

**UÇAK BAKIM PLANLAMASINDA
GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İÇİN
BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Meriç ALPER
Doktora Tezi

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Aralık 2000

* T 000 2781 *

tdr TL 2001. A46

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Meriç Alper'in "Uçak Bakım Planlamasında Güvenilirlik Analizi İçin Bir Yöntem Geliştirilmesi" başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 21/12/2000 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Musa ŞENEL	
Üye	: Doç. Dr. Mustafa CAVCAR	
Üye	: Doç. Dr. A. Sermet ANAGÜN	
Üye	:	
Üye	:	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun ..3..1..2001. tarih ve ...1/2..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET
Doktora Tezi

**UÇAK BAKIM PLANLAMASINDA GÜVENİLİRLİK ANALİZİ İÇİN
BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

Meriç ALPER

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Sivil Havacılık Anabilim Dalı**

**Danışman : Prof. Dr. Musa ŞENEL
2000**

Bir sistemin bakım standardının ve politikasının kullanım koşullarına göre belirlenmesi kullanıcı yönünden en önemli sorunlardan birisidir. Genelde sistemi üreten ülke veya kuruluşlar sistemin bakım ve politikasını kendi koşullarına göre belirler. Ancak değişik koşullarda çalışan sistemlerde bu; işletim, bakım destek gibi maliyetlerin artışına yol açmakla birlikte, sistemin güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan çalışmanın amacı, yurtdışı kaynaklı ve ülkemizde kullanılan bir silah sistemi olan F-16 uçaklarına ait F110-GE-100 motorlarının en çok hasarlanan iki parçasını ele alıp ülkemiz kullanım koşullarına göre F110-GE-100 motorlarının bakım standart ve politikasını gerçek verilere dayalı olarak güvenilirlik analizi yardımıyla bulmaktır. Bu çalışma, üretici firma tarafından belirlenmiş olan F110-GE-100 motor bakım planının ülkemizdeki uçakların görevlerinin farklı olması nedeniyle gerçek durumla uyum sağlamadığını ve ülkemiz koşullarına uyan bir bakım planlamasının yapılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler : Güvenilirlik Analizi, Weibull Dağılımı, Motor Ömür Yönetimi, Jet Motor Güvenilirliği, Motor Bakım Kavram ve Politikaları

ABSTRACT
Ph.D. Thesis

**DEVELOPING A METHOD FOR AIRCRAFT MAINTENANCE
PLANNING RELIABILITY ANALYSIS**

Meriç ALPER

Anadolu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Aviation Program

Supervisor : Professor Musa ŞENEL, Ph.D.
2000

The determination of a maintenance standard and policy for a system in accordance to usage conditions is one of the most important problems for system users. In general, countries or corporations which manufacture systems determine system maintenance and policy according to their conditions. However, in systems working under different conditions this may cause an increase in costs for communication, maintenance and support, which in turn effects the reliability of the system adversely. The goal of this study is to determine a maintenance standard and policy for F110-GE-100 engines according to usage conditions of our country. The two most damaged parts of F110-GE-100 engines of the F-16 aircraft were taken into consideration and a reliability analysis was performed based on real data. The study put forth showed that the maintenance plan developed by the system manufacturing country does not agree with the actual conditions of our country, due to the fact that our aircraft have a different mission profile and therefore needs to be tailored to our countries requirements.

Keywords : Reliability Analysis, Weibull Distrubition, Engine Life Management, Jet Engine Reliability, Engine Maintenance Concepts & Policies

ÖNSÖZ

Askeri öğrenci olarak okuduğum İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği bölümünü bitirdikten sonra, 1980 yılında teğmen rütbesiyle atandığım Türk Hava Kuvvetlerinde bugüne kadar uçak sistemlerinin bakımları konusunda çalıştım. Ancak yapılan çalışma sadece yurt dışından özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nden alınan silah sistemlerinin kendi üretici firmaları veya kullanıcıları tarafından önerilen bakım plan ve standartlarını uygulamaktı. “Nasıl kendimize özgü bakım ve standartlarımızı geliştirebiliriz?” sorusunu hep kendime sormuşumdur. Bu sorunun yanıtını ancak 1990 yılında Endüstri Mühendisliği Yöneylem araştırması bilim dalında yapmış olduğum yüksek lisans eğitimi sırasında buldum. Bu, istatistik teknikleri kullanarak olabilecekti.

Ancak burada en büyük zorluk bakım bilgilerinin özellikle arıza kayıtlarının yeterince tutulmamasıydı. Bu yüzden sadece üretici firma ve ABD hava kuvvetlerinin sınırlı bilgilerinden yararlanıyor, kendi uçuş şartlarımızdaki verilerin olmamasından dolayı bu konuda çalışmalar sınırlı düzeyde kalıyordu.

Türk Hava Kuvvetleri envanterine 1987 yılında giren F16 uçaklarının alt sistemlerinin (motor, aviyonik vb.) tüm bilgilerinin bilgisayar ortamında izlenmesi sayesinde Türk Hava Kuvvetlerinde kendi uçuş şartlarına özgü büyük bir bakım veri tabanı oluştu. Bu zenginlik içerisinde elbette bir şeyler yapmak gerekiyordu. İşte benim bu çalışmamda, istatistiksel teknikler kullanılarak bu zengin veri tabanına dayalı bilgiler ışığında güvenilirlik analizi yapılmıştır. Böylece, Türk Hava Kuvvetlerinin kendi uçuş şartlarına uyan bakım planlaması ve bakım standardı geliştirilmiştir. Türk Hava Kuvvetlerinin uçuş şartlarına dayalı yapılan bu çalışma bir ilk olup, benzer ve daha ileri seviyede çalışmaların yapılmasında ışık tutmasını dilerim.

Bana bu çalışmayı yapmamda destek sağlayan ve danışmanlığımı yapan Anadolu Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölüm başkanı Prof.Dr. Musa ŞENEL'e

teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışma sırasında kullandığım istatistiksel teknikler konusunda bana yardımlarını esirgemeyen Anadolu Üniversitesi İstatistik bölüm başkanı Prof.Dr. Ali Fuat YÜZER'e teşekkür ederim.

Meriç ALPER

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMINA GENEL BAKIŞ.....	4
2.1. Temel Kavramlar.....	4
2.2. Güvenilirlik Analizinin Yararları.....	4
2.3. Güvenilirliğin Optimizasyonu.....	5
2.4. Güvenilirliğin Havacılıkta Önemi.....	6
3. İSTATİSTİKSEL GÜVENİLİRLİK.....	9
3.1. Olasılık Kavramları.....	9
3.1.1. Olasılıklarda çarpma ve toplama kuralları.....	11
3.1.1.1. Bağımlı olaylarda çarpma kuralı.....	11
3.1.1.2. Bağımsız olaylarda çarpma kuralı.....	11
3.1.1.3. Bağıdaşır olaylarda toplama kuralı.....	12
3.1.1.4. Bağıdaşmaz olaylarda toplama kuralı.....	12
3.2. Güvenilirlik ve Sistem Etkinliğinde Koşullu Olasılık.....	12
3.3. Önemli Güvenilirlik Birimleri.....	16
3.4. Hata Nedenleri ve Türleri.....	17
3.5. Hata Dönemleri.....	17
3.5.1. Erken hatalar dönemi.....	18

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.5.2. Şans hataları.....	19
3.5.3. Aşınma hataları.....	19
4. GÜVENİLİRLİKDE YAPI MODELLERİ.....	21
4.1. Seri Sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları.....	21
4.2. Paralel sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları.....	24
4.3. Karma sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları.....	25
4.3.1. Yedeklemesiz karma sistemler.....	26
4.3.2. Yedeklemeli karma sistemler.....	26
5. HATALARIN ZAMAN BOYUTUNDA ORTAYA ÇIKIŞLARININ İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ.....	28
5.1. Giriş.....	28
5.2. Olasılık Dağılımları.....	29
5.3. Normal Dağılım.....	30
5.4. Lognormal Dağılım.....	31
5.5. Weibull Dağılımı.....	31
5.6. Beta Dağılımı.....	37
5.7. Ömür Modellerinin Karşılaştırılması.....	38
5.8. Güven Aralıkları.....	42
5.9. Tehlikeli Oranda Yüksek Risk Tahminleri.....	42
5.10. Risk Belirlemede Monte Carlo Benzetimi.....	43
5.11. Sonuç.....	43
6. UÇAK MOTORLARININ BAKIM KAVRAMLARI VE UYGULAMASI.....	45
6.1. Bakım Politikaları.....	45
6.2. Uçak Motorlarının Sınıflandırılması.....	46
6.2.1. Kullanım durumuna göre uçak motorlarının sınıflandırılması.....	47
6.2.1.1. Savaş uçaklarının motorları.....	47

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
6.2.1.2. Nakliye uçaklarının motorları.....	47
6.2.1.3. Helikopter motorları.....	48
6.2.1.4. Ticari ve askeri farklar.....	49
6.2.2. Teknoloji ve bakım şartlarına göre uçak motorlarının sınıflandırılması.....	50
6.2.2.1. Birinci nesil motorlar.....	50
6.2.2.2. İkinci nesil motorlar.....	50
6.2.2.3. Üçüncü nesil motorlar.....	51
6.2.2.4. Dördüncü nesil motorlar.....	51
6.2.3. Tasarım yapıldığı yıla göre sınıflandırma.....	51
6.3. Bakım Politikasını Etkileyen Destek Maliyetleri.....	53
6.4. Güvenilirliği Esas Alan Bakım (GEB).....	54
6.5. Ömür Yönetimi Planı.....	56
6.5.1. Emniyetli ömür.....	57
6.5.2. Hasar toleransı (Kırılma Mekanikliği).....	60
6.5.2.1. Tahribatsız kontrol.....	61
6.5.2.2. Hasar toleransı için kontrol gereksinimleri.....	63
6.6. Parçaların Ömür Takibi.....	64
7. SON NESİL BİR UÇAK MOTORUNUN BELİRLENEN ÇALIŞMA KOŞULLARINDA GÜVENİLİRLİĞİNİN BULUNMASI.....	66
7.1. Genel.....	66
7.2. Sorunun Tanımı.....	67
7.3. Güvenilirlik Çözümlemesi.....	67
7.3.1. Hata türlerinin irdelenmesi.....	69
7.3.2. Hataların istatistiksel analizi.....	70
7.3.2.1. Yanma odası arızalarının istatistiksel analizi.....	72
7.3.2.2. Türbin çerçevesi arızalarının istatistiksel analizi.....	73

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7.4. Ortalama Arıza Yapma Süresinin Tahmini.....	74
7.5. Güvenilirlik Tahmini.....	75
7.6. Bakım Planlaması Önerisi.....	77
7.7. Değerlendirme.....	78
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	80
9. KAYNAKLAR.....	82
10. EKLER	
EK-1. Weibull Grafik Tablosu.....	86
EK-2. MTTF ile η, β Parametreleri Arasındaki Bağntı	87
EK-3A. Yanma Odası Hasar Verileri	88
EK-3B. Türbin Çerçevesi Hasar Verileri.....	90
EK-4. Yanma Odasının Ki-kare Uyum İyiliği Test İşlemleri	92
EK-5. Türbin Çerçevesinin Ki-kare Uyum İyiliği Test İşlemleri	97

ŞEKİLLER DİZİNİ

No	Şekil Adı	Sayfa
3.1.	Zamana bağlı olarak parçaların hata oranının değişim grafiği.....	18
4.1.	n parçadan oluşan seri sistem.....	21
4.2.	n parçadan oluşan paralel sistem.....	24
5.1.	Gauss (Normal) dağılım.....	29
5.2.	Değişik parametrelere göre Weibull dağılımı.....	36
5.3.	Beta dağılımı.....	37
5.4.	Yorulma türü için Lognormal dağılımı.....	38
5.5.	Yorulma türü bilgisi gösterimi için Lognormal ve Normal ve 2 parametrelili Weibull dağılımı.....	39
5.6.	Yorulma türü bilgisi için 2 parametrelili Weibull dağılımı.....	40
5.7.	Yorulma türü bilgisi için 3 parametrelili Weibull dağılımı.....	41
5.8.	Yorulma türü bilgi gösterimi için Lognormal, 3 parametrelili Weibull ve Beta dağılımı.....	41
6.1.	Modül ve motor ömrünün eş zamanlaması.....	54
6.2.	İlk komponent kal edildiğinde kalan uçuş ömrü.....	59
6.3.	Emniyetli ömür yaklaşımı.....	59
6.4.	Hasar tolerans yaklaşımı.....	61
6.5.	Hata büyümesinin izlenmesi.....	63
7.1.	F100-GE-100 Motoru.....	67
7.2.	Yanma odası bileşenleri.....	68
7.3.	Türbin çerçeve bileşenleri.....	69
7.4.	Yanma odası gerçek ve kuramsal frekansları.....	73
7.5.	Türbin çerçevesi gerçek ve kuramsal frekansları.....	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

No	Çizelge Adı	Sayfa
3.1.	Önemli güvenilirlik birimleri.....	16
6.1.	Tasarım yıllarına göre motor nesilleri.....	52
6.2.	Aynı anda gelişen teknoloji ve bakım felsefeleri.....	52
E4.1.	Yanma odasının hasarlarına ilişkin sınıflandırma ve buna ait uygulamalar.....	93
E4.2.	Moment işlemleri.....	94
E4.3.	Yanma odası uygunluk işlemleri.....	96
E5.1.	Türbin çerçevesinin hasarlarına ilişkin sınıflandırma ve buna ait gözlemler.....	98
E5.2.	Türbin çerçevesi hata dağılım fonksiyon moment bulma işlemleri.....	99
E5.3.	Türbin çerçevesi uygunluk işlemleri.....	100

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

$P(O_1)$: O_1 olayının ortaya çıkma olasılığı
$s(O_1)$: O_1 olayına ilişkin birim sayısı
$s(S)$: Karşılaşılabilir birim sayısı
$N_s(t)$: t zamanında başarıyla tamamlanmış görev sayısı
$N_T(t)$: t zamanında istenilen görevlerin toplam sayısı
$R(t)$: Güvenilirlik olasılığı
$Q(t)$: Güvenilmezlik olasılığı
$N_F(t)$: Başarısızlıkla sonuçlanan t zaman aralığındaki görev sayısı
SE	: Sistem etkinliği
O_H	: Operasyonel hazırlık
R_G	: Görev güvenilirliği
T_U	: Tasarım uygunluğu
Par_n	: n parçadan oluşan sistem
η	: Weibull konum parametresi
β	: Weibull şekil parametresi
μ	: Momentler
oyf	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu ($f(x)$)
bdf	: Birikimli dağılım fonksiyonu ($F(x)$)

Kısaltmalar

TAC	: Total Accumulated Cycle, Toplam Birikmiş Çevrim
LCF	: Düşük Çevrimli Yorulma
RFC	: Retirement for Cause, Sebebe Bağlı Kal
FM	: Fracture Mechanics, Kırılma Mekaniği
FADEC	: Full Authority Digital Engine Control, Tam Otomatik Sayısal Elektronik Kontrol
RCM	: Reliability Centered Maintenance, Güvenilirliği Esas Alan Bakım
ENSIP	: Engine Structural Integrity Program, Motor Yapısal Bütünlük Programı
NDI	: Non Destructive Inspection, Tahribatsız Kontrol
EOT	: Engine Operation Time, Motor Çalışma Süresi (Motor Uçuş Saati)
MTTF	: Mean Time to Failure, Arızalar arası ortalama süre (Onarılamayan parçalar)
MTBF	: Mean Time Between Failure, İki arıza arası ortalama süre (Onarılabilen parçalar)
HP	: High Pressure, Yüksek Basınç
LP	: Low Pressure, Alçak Basınç

1. GİRİŞ

Bir sistem kendisinden beklenen fonksiyonu yerine getirecek şekilde tasarlanır. Bu fonksiyon da genellikle “GÖREV” olarak adlandırılır. Görevi yerine getirmek için bir sistemin tüm kapasitesini tanımlamada sıklıkla kullanılan terim ise, “SİSTEM ETKİNLİĞİ” dir. Sistem etkinliği, belirlenmiş şartlar altında çalışıldığında verilen bir zaman dahilinde bir görevi başarı ile karşılayabilme olasılığı olarak tanımlanır. Müşteri yönünden ürünlerin sistem etkinliği müşterinin memnuniyetine yani kalite kavramına bağlıdır. Sistem etkinliği müşteriler ve kullanıcılar tarafından tanımlanır ve değerlendirilir. Etkinlik; sistemin tasarımı, üretimi, kullanımı ve idamesine bağlıdır. Böylece, bir sistemin etkinliği bir çok niteliğin fonksiyonudur. Bunlar tasarım uygunluğu, performans ölçümü, emniyet, güvenilirlik, kalite, üretilebilirlik ve idame edilebilirliktir.

Güvenilirlik, sistem etkinliğini belirleyen en önemli niteliklerden birisidir. Genellikle, bir sistemin kendinden beklenen fonksiyonu yeterince, istenilen ömür boyunca ve belirlenen çalışma şartlarında yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanır.

Güvenilirlik, bir sistemin doğal niteliğidir. Bu nitelik sistemin kapasitesi, performansı veya gücü ile bağlantılıdır. Güvenilirlik seviyesi, tasarım aşamasında kurulur ve ardından gelen test işlemi ve üretim sürecindeki basit tasarım değişiklikleri ile güvenilirlik artırılabilir. Güvenilirliğin soyut bir kavram oluşu ve ölçmenin zorluğu nedeniyle birçok organizasyon, başlangıçta gelişmiş bir güvenilirlik programı uygulayamaz. Bunun nedeni hem yönetim hem de teknik sistem tasarım personelinin güvenilirliğin parça üzerindeki önemini anlayamamış olmalarıdır. Bu, bir organizasyon içinde, sistem tasarımcıları ve yöneticilerinin güvenilir bir ürünle ilgilenmediği anlamına gelmez. Fakat, tasarım mühendisleri üzerindeki baskılar ve sıklıkla da organizasyon yapısı, etkin güvenilirlik programının gelişimine engel teşkil eder [1].

Artan sistem karmaşıklığı ile birlikte, güvenilirlik elde edilmesi güç bir tasarım parametresi olmaya başlamıştır. Güvenilirliği, sadece bir tasarım parametresi olarak tanımlamak ve uygulamak doğru değildir. Güvenilirlik, tasarlanan ürünün kullanımını belirleyen tüm çalışma koşullarında da geçerliliğini korumalıdır. Ancak üretim sürecinde bunu kontrol etmek gittikçe zorlaşmaktadır. Bununla birlikte, geçmişte yaşananlar göstermiştir ki, güvenilirlik gerekli bir program geliştirme aracıdır. Güvenilirlik, tasarım ihtiyaçlarının şartnameleri ile geliştirilebilir, testlerle önceden bilinebilir, üretim sırasında kontrol edilebilir ve kullanım alanında doğrulanabilir.

Bu çalışmada amaç, bir sistemin ömür çevrimi boyunca uygulanan bazı güvenilirlik ve bakım kavramları ile felsefelerinden yararlanarak Türk Hava Kuvvetleri'nde kullanılan F-16 uçaklarına ait F110-GE-100 motorlarının ana alt parçaları seri bir sistem olarak ele alınmış, söz konusu motorlara ait güvenilirlik ile ilgili veriler elde edilmiş ve bu veriler değerlendirilerek bununla ilgili sorunların çözümlenmesi yapılmıştır. Böylelikle motorun idamesi daha kolay ve güvenilir şekilde yapılabilecektir. Çalışma belirtilen amaçlara uygun olarak sekiz bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, güvenilirlik ile ilgili temel tanım ve kavramlarla birlikte güvenilirlik analizinin yararları, güvenilirliğin optimizasyonu ile güvenilirliğin havacılıktaki önemi özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde, istatistiksel güvenilirlik ile ilgili kavramları, önemli güvenilirlik birimleri, hata nedenleri ve türleri açıklanarak arıza dönemleri hakkında bir irdeleme yapılmıştır. Bu kısımda çalışmaya ışık tutacak "güvenilirlik banyo küveti" (reliability bathtub) olarak adlandırılan ve güvenilirlik analizinde sıkça kullanılan grafik de açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, güvenilirlik yapı modelleri tanıtılarak (seri, paralel ve karma yapı modelleri), söz konusu yapı modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde, Hataların zaman boyutunda ortaya çıkışlarının istatistiksel yöntemlerle incelemesi yapılarak, önemli hata olasılık dağılımları açıklanmış, risk tahminleri hakkında açıklama yapılmıştır.

Altıncı bölümde ise uçak motorlarının sınıflandırılması, kullanım ve teknolojik gelişmeler yönünden yapılarak, teknolojik gelişmeye paralel şekilde bakım kavramlarındaki değişimler irdelenerek, son nesil motorlarında kabul edilen bakım kavramları konusunda inceleme yapılmıştır. Bunun yanı sıra motor izleme yöntemleri ve motor izleme ile kazanılan faydalar incelenmiştir.

Yedinci bölümde, önceki bölümde verilen bilgiler ışığında Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan ve F-16 uçaklarında kullanılan F110-GE-100 serisi turbofan motorunun güvenilirlik analizi yapılmıştır. Türk Hava Kuvvetleri görev şartlarına göre ilk kez yapılan bir çalışma olma özelliği taşıyan bu çalışma sonucunda her biri alt sistem olarak kabul edilen duran parçaların güvenilirlikleri bulunarak söz konusu motorun güvenilirlik analizi çıkartılmıştır.

Sekizinci ve son bölümde, yapılan çalışmalar hakkında genel bir değerlendirme ile birlikte ileride konu ile ilgili yapılabilecek çalışma ve konulara yer verilmiştir.

2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMINA GENEL BAKIŞ

Kullanılan bir sistemin arızalanmadan ne kadar kullanılabilceği, sistemin arızalanma sıklığı ve buna karşı alınacak önlemler kullanıcı açısından çok önemlidir. Kullanıcı kullandığı sistemin güvenilirliğinin ne kadar olduğunu bilmek ister. Dünya üzerinde gelişmiş ülkelerin tümünde güvenilirlik analizi etkin bir şekilde kullanılmakta ve ürünlerin güvenilirliği bu yöntemle garanti altında olmaktadır. Güvenilirlik analizi, tasarımı yapılmış parça, ürün ve sistemleri en iyi doğrulama yöntemidir. Böylelikle söz konusu parça, ürün ve sistemlerin görevlerini hatasız olarak yerine getirdiği gösterilmiş olur.

2.1. Temel Kavramlar

Sistemin belirlenen ömürde, belirli görev zamanında ve çalışma koşullarında arzu edilen amaç ve doğrultuda tasarlanmış performans limitlerini karşılayan güvenilirlik, verilen bir güven seviyesinde koşullu bir olasılıktır. Güvenilirlik kısaca, bir ürünün belirli bir sürede, belirli koşullarda, belirli bir fonksiyonu arızasız (hatasız) gerçekleştirme olasılığıdır [1].

Güvenilirlik fonksiyonu, ön belirleme, geliştirme, üretim ve kullanım süresince sistemin belirli karakteristiklerinin ve kapasitesinin, arıza oranlarının ölçülmesi ve kontrolü ile yönlendirilen bir mühendislik disiplindir [2].

2.2. Güvenilirlik Analizinin Yararları

Rekabet koşullarında tasarlanan bir parça, ürün veya sistemden istenen çevre koşullarında ve güvenilirlikte hatasız olarak kendisinden beklenen fonksiyonlarını yerine getirmesi beklenir. Söz konusu ürünler önceden temin edilerek bunların onarılabirlikleri, güvenilir oluşları ve kullanılabilirlikleri konusunda bilgi sahibi olunabilir. Bunlar rekabete yansıyan unsurlardır. Kısaca,

a) Gelecekte sadece ürünlerin güvenilirliğini kontrol edebilen ve güvenilirliğini bilen şirketler ayakta kalabilecektir.

b) İşletmeler güvenilirlik analizi uygulamalarının sağladığı üstünlük ve yararlarından faydalanmadıkça başarılı olamazlar.

c) Birçok ürünün karmaşıklığı sürekli artmaktadır. Ürünlerin güvenilirlik tasarımlarının korunması ve daha güvenilir ürünler için en üst güvenilirliği sağlayacak tasarımlar yapılmalı ve aynı ürünlerin yeni modellerinde kullanılmalıdır.

d) Müşteriler ve halk her gün daha fazla güvenilirliğin bilincine varmaktadır. Güvenilir olmayan bir ürünün ne kadar pahalıya mal olduğunu günlük yaşamlarında öğrenmişlerdir.

e) Tüm şirketler en üst düzey yönetimin desteği ile güvenilirlik ile ilgili yöntemlerinin gereğini yerine getirerek gelişmekte, gerektiğinde ürün üzerinde müşterinin talebi doğrultusunda değişiklik yaparak var olan rekabet koşullarında yaşamını sürdürmektedir.

f) Kuruluşlar kendi ürünlerinin tanıtımını güvenilirlik oranı, hata yapma oranı, hatalar arası zamanı gibi kavramlarla yapmaktadırlar. Bu rekabet ortamı firmaların, kendi ürünlerini tanımaları için, ürünler hakkında bilgi toplamalarını, ve bu bilgileri güvenilirlik oranlarına nasıl ve ne şekilde dönüştürüleceğini öğrenmelerini ve bu bilgileri yorumlayarak, hata oranlarını, güvenilirliklerini nasıl geliştirebileceklerini öğrenmeleri için zorlamaktadır.

Sonuç olarak güvenilirlik, bakım yapılabilirlik, kalite gibi kavramlar müşteri ihtiyaçları ve beklentileri doğrultusunda belirlenen kavramlar olup, bu beklentilerin gerçekleştirilmesi kurumun başarısını belirlemektedir.

2.3. Güvenilirliğin Optimizasyonu

“Bir ürünün tasarımında, üretiminde ve bakımında olması gereken güvenilirlik düzeyi ne olmalıdır?” sorusu her zaman sorulur. Bunun yanıtı ise, “Ürünün arzulan

ömrü boyunca bakım ve işletim maliyeti ile fiyatının optimum güvenilirlik seviyesinde minimum olmasıdır.” Maliyete hem müşteri, hem de üretici açısından bakmak gerekir [3].

Bir ürünün ömür boyu maliyetinin en düşük düzeyde olması ancak, güvenilirlik testleri, HTEA (Hata Türü ve Etkileri Analizi – Failure Mode and Effect Analysis), tasarımın gözden geçirilmesi ve arıza veri toplama ve analizi çalışmalarının yapılması ile mümkündür. Bunun için ürünün ömrü boyunca her aşamada güvenilirlik programı uygulanmalıdır.

Ürünün ömür boyu maliyetinin daha az olması için;

1. İhtiyaç duyulan bileşen sayısının azaltılması,
2. Sistemde bileşenlerin daha iyi düzenlenmesi,
3. Bileşenlerin tasarımında stres çalışma koşullarını etkileyen unsurların doğru tahmin edilmesi,
4. Malzemenin daha iyi seçilmesi,
5. İstatistik ve olasılık yöntemlerinin kullanılması,
6. Güvenilirlik, onarılabirlik kontrollerinin yerine getirilmesi,

gerekir.

Belirlenen güvenilirlik seviyesi yönetim tarafından önemli karar alma aracı olarak kullanılır [1].

2.4. Güvenilirliğin Havacılıkta Önemi

Havacılığın ilk yılları, tasarlanan hava taşıtının güvenilirliğinden daha çok uçup/uçmayacağı endişesinin hakim olduğu yıllardır. Bu nedenle bu yıllarda bir çok uçak kaybı olmuş, ancak daha sonraki yıllardaki gelişmeler uçuş emniyetinin ön plana çıkmasına yol açmıştır.

Bu gelişme içerisinde uçaklarda meydana gelen arızaların nedenlerinin bilinmesine gerek duyulmuş bunun yanı sıra sistemin ne kadar ömüre sahip olduğu araştırılmıştır. Özellikle uçak parçalarında meydana gelen sürünme, yorulma ve korozyon etkisiyle oluşan çatlakların takibi yapılmaya başlanılarak olası bir hasarın önceden önlenmesi amaçlanmıştır. Ekonomik değerlendirmeler, sistemin elden çıkartılmasında yapısındaki en kısa ömürlü malzemenin ömrüne göre değil, sürekli izlenerek sistemin tam ömrüne göre değerlendirme yapmayı öngörmektedir. Maliyet – etkin (ekonomik) bakımın mantığı parça kullanım ömrü, temini ve kullanım kolaylığı arasında denge sağlamaktır. Maksimum ömür, her bir parçanın incelenmesi ve tek tek kullanım ömrünün izlenimi ile sağlanır. Bu parçaların oluşturduğu sistem emniyetli bir şekilde çalışır [4].

Parça ömrünün belirli bir aşaması sonucunda kullanım koşulları parçanın değiştirilme ihtiyacını doğurur. Modern gaz türbinleri olan uçak motorlarında kullanılan diskler ve disk tutucuları normal halde düşük çevrimli yorulma, sürünme ve aşırı hızdan dolayı parçalanmaya dayanıklı, türbin paleleri ise yüksek devrimli yorulma, termomekanik yorulma ve sürünmeye karşı dayanıklı olmak zorundadır.

Tüm bu tasarım özelliklerine rağmen uçak motoru için hayati öneme sahip bu parçalar çalışma şartlarına bağlı olarak hasarlanmakta ve önlem alınmadığı takdirde çok daha büyük sorunlar yaratabilmektedir.

Tasarım aşamasında ve gerilim analizi ile tahmin edilemeyen sonuçlar ile üretim hatalarının oluşma olasılığı, malzemenin servis ömründen daha önce arızalanmasına neden olabilir. Ağır parçalar, kaynak bölgesi gibi bazı yapılarda hasar oluşma olasılığının yüksekliği nedeniyle malzeme servise verildikten hemen sonra hasar oluşabilmektedir [5].

Verilen bu bilgilerden uçak gibi kaybı çok önemli sonuçlara yol açabilecek sistemlerin hasarının tehlikeli boyuta ulaşmadan tespit edilmesi zorunludur. Bu ise

parçaların ömürleri ile ilişkili güvenilirlik bilgilerinin tahmin edilmesi ile mümkün olabilecektir. Böylelikle parçalar hasarlanmadan ve sisteme zarar vermeden değiştirilme yoluna gidilecek, lojistik destek gereksinimleri tahmin edilen güvenilirlik bilgilerine göre planlanabilecektir.

3. İSTATİSTİKSEL GÜVENİLİRLİK

Bir ürün geliştirilirken veya yeni bir ürün tasarımı yapılırken benzer ürünlerin güvenilirlik bilgilerinden yararlanılarak söz konusu ürünün güvenilirliği belirlenir.

Önceki bölümde güvenilirlik tanımı, “verilen bir güven düzeyinde koşullu olasılık” olarak yapılmıştır. Bu durum ürünün yaşamı boyunca bazı bilgileri gözlememizi gerektirmektedir.

Bu bölümde koşullu olasılık kavramı, önemli güvenilirlik birimleri ve bunların belirlenmesine verilen önem ve bu veriler ile yapılan çalışmalar gibi kavramlar açıklanacaktır.

3.1. Olasılık Kavramları

Bir rassal deney sonucu karşılaşılabilen her olayın ortaya çıkma şansı aynı olsun. Eş olası olaylardan oluşan böyle bir örnek uzayında, karşılaşılabilen birim sayısı $s(S)$ ve ilgilenilen O_i olayına ilişkin birim sayısı $s(O_i)$ ise, O_i olayının ortaya çıkma olasılığı $P(O_i)$ şeklinde gösterilir ve

$$P(O_i) = \frac{s(O_i)}{s(S)} = \frac{\text{ilgilenilen sonuç sayısı}}{\text{karşılaşılabilen sonuç sayısı}} \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır.

$O_i \subseteq S$ olduğundan, $s(O_i) \leq s(S)$ eşitliğine bağlı olarak;

$$P(O_i) = \frac{s(O_i)}{s(S)} \leq 1 \quad (3.2)$$

ve

$$s(O_i) \geq 0 \quad , \quad s(S) > 1$$

$$P(O_i) \geq 0 \quad \text{ve} \quad P(S) = 1$$

elde edilir.

Görüldüğü gibi, bu tanımla bir olayın ortaya çıkma olasılığı 0 ile 1 arasında değer almaktadır. $0 \leq p \leq 1$ olmak üzere elverişli sonucun ortaya çıkma olasılığı "p", elverişsiz sonucun ortaya çıkması olasılığı ise "1-p" şeklinde gösterilir [6].

Basit ve Bileşik Olaylar: Tek bir deneyde tek bir sonuç olarak gerçekleşen olaylara "basit olay", iki veya daha çok olayın birlikte veya birbiri ardınca meydana gelmesine "bileşik olay" denir.

Bağdaşmaz ve Bağdaşır Olaylar: Bir olayın ortaya çıkması diğer bir olayın/ olayların ortaya çıkmasını engelliyorsa yani iki veya daha fazla olay birlikte meydana gelemiyorsa, bu olaylara "bağdaşmaz olaylar" denir. Buna karşılık, bir olayın ortaya çıkması diğer bir olayın/ olayların ortaya çıkmasını engellemiyorsa yani iki veya daha fazla olay birlikte meydana gelebiliyorsa, bu olaylara "bağdaşır olaylar" denir.

Bağımsız ve Bağımlı Olaylar: Bir olayın ortaya çıkması diğer bir olayın / olayların ortaya çıkması ile ilişkisiz ise, bu olaylara "bağımsız olaylar", buna karşılık bir olayın ortaya çıkması diğer bir olayın / olayların ortaya çıkmasını etkiliyorsa, böyle iki olaya / olaylara "bağımlı olaylar" adı verilir.

Koşullu (Şartlı) Olasılık: Bağımlı olaylardan birinin (O_1) gerçekleştiği bilindiğinde, diğerinin (O_2) ona bağlı olarak meydana gelme olasılığı bulunabilir. Bu olasılığı $P(O_2)$ olasılığından ayırt edebilmek için $P(O_2 / O_1)$ sembolü kullanılır ve $P(O_2 / O_1)$ olasılığına " O_1 "in gerçekleştiği bilindiğinde O_2 'nin gerçekleşme olasılığı veya O_2 'nin O_1 'e bağlı koşullu olasılığı denir.

$P(O_1) \neq 0$ olmak üzere $P(O_2 / O_1)$ şu şekilde bulunur.

$$P(O_2 / O_1) = P(O_1 \text{ ve } O_2) / P(O_1) \quad (3.3)$$

3.1.1. Olasılıklarda çarpma ve toplama kuralları

Yukarıda tanımları yapılan olaylara ait olasılık hesaplarında uygulanması gereken kurallar bulunmaktadır.

3.1.1.1. Bağımlı olaylarda çarpma kuralı

Bağımlı iki olaydan E_2 olayı E_1 olayından sonra ortaya çıktığında, olayların birlikte gerçekleşme olasılığı şu şekilde hesaplanır.

$$P(O_1 \text{ ve } O_2) = P(O_1) \cdot P(O_2 / O_1) \quad (3.4)$$

“Genel çarpma kuralı” adı verilen bu bağıntıda $P(O_2/O_1)$ çarpanı O_2 'nin şartlı olasılığını ifade etmektedir.

3.1.1.2. Bağımsız olaylarda çarpma kuralı

Birbirinden bağımsız O_1 ve O_2 olaylarının birlikte gerçekleşme olasılığı bu olayların basit aksaklıklarının çarpımına eşittir.

$$P(O_1 \text{ ve } O_2) = P(O_1) \cdot P(O_2) \quad (3.5)$$

Olaylar birbirinden bağımsız olduğuna göre, $P(O_2 / O_1)=P(O_2)$ yazılabilir. Böylelikle (3.6) ifadesinde $P(O_2/O_1)$ yerine $P(O_2)$ konularak (3.5) elde edilir. Bu bağıntıya “özel çarpma kuralı” adı verilir.

3.1.1.3. Bağdaşır olaylarda toplama kuralı

İki olay bağdaşır olduğunda O_1 olayının veya O_2 olayının ortaya çıkması ya O_1 olayının ya O_2 olayının yada O_1 ve O_2 olaylarının her ikisinin birlikte gerçekleşmesi anlamını taşır. Dolayısıyla bu olasılık O_1 ve O_2 olaylarının basit olasılıklarının toplamından her ikisinin birlikte gerçekleşmesi olasılığının çıkartılmasıyla bulunur.

$$P(O_1 \text{ veya } O_2) = P(O_1) + P(O_2) - P(O_1 \text{ ve } O_2) \quad (3.6)$$

“Genel toplama kuralı” adı verilen bu bağıntıda $P(O_1 \text{ ve } O_2) = P(O_1) \cdot P(O_2)$ olduğu hatırlanmalıdır.

3.1.1.4. Bağdaşmaz olaylarda toplama kuralı

O_1 ve O_2 bağdaşmaz olaylar olduklarında, O_1 olayının veya O_2 olayının ortaya çıkması olasılığı, bu olayların basit olasılıklarının toplamına eşittir.

$$P(O_1 \text{ veya } O_2) = P(O_1) + P(O_2) \quad (3.7)$$

Daha önceden de belirtildiği üzere bağdaşmaz olaylarda $P(O_1 \text{ ve } O_2) = 0$ dır. Dolayısıyla (3.6)daki formülün son terimi ortadan kalkmakta ve (3.7) elde edilmektedir.

3.2. Güvenilirlik ve Sistem Etkinliğinde Koşullu Olasılık

Güvenilirlik belirlenen performans sınırları içinde verilen güven seviyesinde hata yapmadan gerçekleştirilen görevlerin toplam görev sayısına bölümüyle elde edilen bir koşullu olasılıktır.

Payda yer alan sayı, t zamanında başarıyla tamamlanmış görev sayısıdır ($N_s(t)$). Paydadaki sayı, t zaman aralığında istenilen görevlerin toplam sayısıdır ($N_T(t)$).

$$\text{Güvenilirlik} = \bar{R}(t) = \frac{N_S(t)}{N_T(t)} \quad (3.8)$$

Pay yeniden düzenlenirse,

$$\bar{R}(t) = \frac{N_T(t) - N_F(t)}{N_T(t)} = 1 - \frac{N_F(t)}{N_T(t)} = 1 - \bar{Q}(t) \quad (3.9)$$

veya

$$\bar{R}(t) = 1 - \text{Güvenilmezlik} \quad (3.10)$$

Burada;

$N_F(t)$: Başarısızlıkla sonuçlanan t zaman aralığındaki görev sayısıdır.

$\bar{Q}(t)$: Güvenilmezlik veya başarısızlık olasılığıdır.

Bu, bir ünitenin $N_T(t)$ görevini üstlenip $N_S(t)$ görevinin başarıyla halinde uygulanır. Eğer ünite başarısız olursa, ilk görevin başladığı aynı şarta geri dönlür. Ayrıca, her bir $N_S(t)$ ünitesi $N_T(t)$ 'den farklı, fakat benzer üniteleri olduğunda "t" zaman aralığında görevini başarıyla tamamlaması halinde de bu uygulanır.

Eğer tüm görevler başarısızlıkla sonuçlanırsa, o zaman $N_S(t) = 0$ olup buradan (3.8) eşitliğinde $\bar{R}(t) = 0$ olur. Aksi olarak tüm görevler başarıyla sonuçlanırsa o zaman $N_S(t) = N_T(t)$ olur ve (3.8) eşitliğinde $\bar{R}(t) = 1$ olur. Sonuç olarak, güvenilirlik 0-1 arasında veya %0 ile %100 arasında bir değer alır.

$\bar{R}(t)$ sadece bir tahmindir. Bunun nedeni üstlenilen toplam görevin sonlu sayıda veya sınırlı oluşudur. Bir ünite veya birçok benzer ünite tarafından yerine getirilen görevlerin toplam sayısı sonsuza yaklaşıırken bu tahmin gerçek güvenilirliğe yaklaşır.

Yani;

$$\lim_{N_T \rightarrow \infty} \bar{R}(t) = R(t) = \text{Gerçek güvenilirlik} \quad (3.11)$$

Eğer M sayıda örnek ve her biri N büyüklüğünde güvenilirliği test edilirse $N_T \rightarrow \infty$ veya N_T büyük olur. Bu takdirde,

$$\bar{R}(t) = \frac{\sum_{i=1}^M N_{S_i}(t)}{M \times N} = \frac{N_S(\text{toplama})}{N_T(\text{toplama})} \quad (3.12)$$

$M \times N$ hızlı olarak sonsuza doğru gitme eğilimi olduğundan, $\bar{R}(t)$ de $R(t)$ 'ye yaklaşır.

Görevin en başında sistem elemanlarının tümünün istenilen koşullarda uygun çalıştığına emin olunduğu için güvenilirlik 1'e eşittir. O zaman,

$$M_{S(t=0)} = N_T(t)$$

ve
$$\bar{R}_{(t=0)} = \frac{N_T(t)}{N_T(t)} = 1 \text{ olur.}$$

Görevin başlangıcında sistemin elemanları mevcut ve görevi başarı ile başlatmaya hazır olduğunun kabul edilmesi nedeniyle buna şartlı güvenilirlik denir ve sistem elemanlarının operasyona hazırlığı %100'dür.

Eğer $N_s(t)$ görevleri başarı ile tamamlanırsa, güvenilirlik tanımı ($N_s(t)/N_T(t)$) yine şartlı olur. Bütün görev hedefleri ve performans hedefleri için gerekli tasarımlar elde edilmiş ve tasarım uygunluğu %100'dür.

Bir bütün olarak tabloyu görmek için daha iyi bir yol sistem etkinliği (SE) kavramına bakılmasıdır. Bu ise şu şekilde tanımlanır (Keçecioglu, [15]).

$$SE = O_H \times R_G \times T_U = \frac{N_{AC}}{N_T} \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'deki "Operasyona Hazırlık (O_H)" sistemin ya görevin başında mevcut olduğu veya belirlenen bir zaman periyodunda görev başlayıncaya kadar göreve hazır hale getirilebildiği kavramdır. Arızasız bir şekilde görevini tamamlayan sistemin görevi başarı ile başlıyor olması olasılığı "Görev Güvenilirliği (R_G)" olarak adlandırılır. Görev hedeflerine uygun olarak tasarımı yapılan bir sistemin görevini başarı ile tamamlayıcı olma olasılığı "Tasarım Uygunluğu (T_U)" olarak adlandırılır.

Eşitlik (3.13)'de N_{AC} , bir zaman aralığında planlanan görev hedeflerinin tümünü karşılayan sistemlerin sayısıdır. N_T , eldeki sistemlerin toplam sayısıdır.

Operasyonel hazırlık, sistemin idamesi ve güvenilirliğin bir fonksiyonudur. Bunun nedeni, sistem ya önceki görevinde güvenilir olarak fonksiyonunu yerine getirmesi nedeniyle hemen diğer görevine başlamaya uygun olacağı için daha üst düzeyde olacaktır yada bir sonraki görevin başlaması planlanana kadar çalışır duruma getirmek için onarım ve/veya bakımdan geçeceği için daha alt bir seviyede olacaktır. Tasarım uygunluğu, nitelendirilmesi güç bir kavram olduğu için örnekler yardımıyla açıklanmaktadır.

Güvenilirliği sistem etkinliği olarak alırsak; operasyonel hazırlık ve tasarım uygunluğunun her birinin %100 olduğu kabul edilir. Böylece, eğer güvenilirlik sadece sistem etkinliği indeksi olarak kullanılırsa, o zaman güvenilirlik operasyonel hazırlık ve tasarım uygunluğunun her birinin %100 olduğu gerçeğine bağlı bir olasılık olacaktır [3].

3.3. Önemli Güvenilirlik Birimleri

Güvenilirliğin sayısal olarak ifade edilebilmesi önem taşır. Bunun gerçekleşmesi amacıyla çeşitli birimler kullanılır. Çizelge 3.1’de bu birimler açıklanmıştır [7].

Çizelge 3.1 – Önemli Güvenilirlik Birimleri

<u>Birim</u>	<u>Anlam</u>
MTBF (mean time between failure)	Onarılabilen bir ürünün ardışık arızaları arasındaki ortalama süre.
Arıza oranı	Birim ünite için arıza sayısı.
MTTF (mean time to failure)	Onarılamayan bir ürün için arıza yapıncaya kadar geçen tahmini süre. Onarılabilen bir ürünün ilk arızasına kadar geçen ortalama süre.
Ortalama ömür	Ürünün ortalama ömrü (Ömür ilk revizyon tarihi veya aşınma ile ilgili olabilir).
MTFF (mean time to first failure)	Onarılabilen bir ürünün, ilk arızasına kadar geçen ortalama ömür.
MTBM (mean time between maintenance)	Belirli tipteki bakım işlemleri arasındaki ortalama süre.
Uzun ömürlülük	Bir ürünün aşınmaya başlama zamanı
Faal durumda bulunma (availability)	Çalışma ve onarım sürelerinin oranıdır.
Sistemin etkinliği	Ürünün, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılama ölçüsü.
b_{10} ömrü	Miktarın %10’u başarısız oluncaya kadar geçen süre.
b_{50} ömrü	Yarı ömür veya miktarın %50’si başarısız oluncaya kadar geçen süre.
Tamir sayısı / 100	Her 100 çalışma saatindeki onarım sayısı.

3.4. Hata Nedenleri ve Türleri

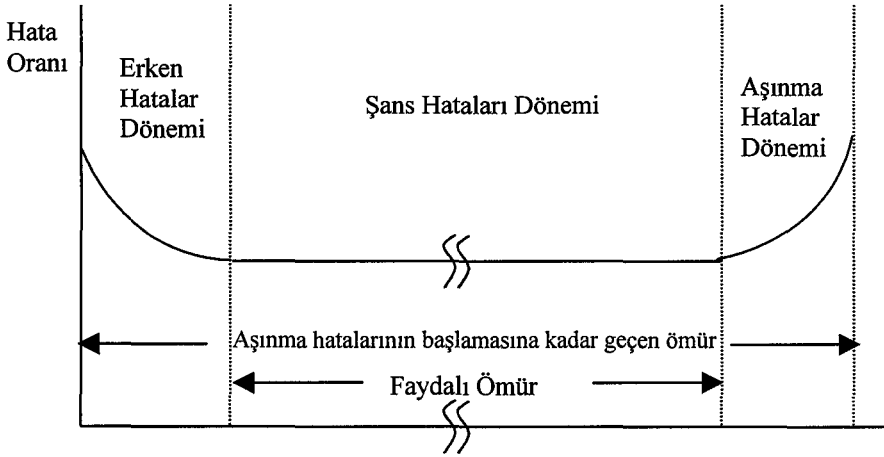
İyi bir şekilde tasarlanmış, mühendislik işlemleri tam anlamıyla yerine getirilmiş, bütünüyle test edilmiş ve uygun bir şekilde kurulmuş sistemlerin kuramsal olarak işletim sırasında asla arıza yapmamaları beklenir. Bununla birlikte deneyimler tüm bu işlemlerin yapılmasına karşın, arızaların meydana gelmesini bütünüyle önlemediğini göstermektedir. Bu arızalar, güvenilirliği etkileyen olaylar olarak tanımlanır.

Sistemin güvenilirliklerinin somut olarak belirlenmesi belirli dönemlerde ortaya çıkan arıza sıklıklarının bilinmesiyle mümkündür. Bu nedenle zaman içinde arıza sayısını veya sıklığını gösteren bir fonksiyona gerek vardır. Değişkenine bağlı olarak sistemin arıza yapmaksızın çalışabilme olasılığını bulmaya yarayan fonksiyon ise güvenilirlik fonksiyonudur.

Uygulamada genel olarak iki tür arıza ile karşılaşmaktadır. Bunlardan birinci grubun kökeninde kullanım ve depolama koşullarına uymama nedenleri yatmaktadır. Güvenilirlik fonksiyonunun bulunması için göz önüne alınacak olan ve ikinci grubu oluşturan arızalar ise uygun kullanım koşulları altında ortaya çıkan arızalardır.

3.5. Hata Dönemleri

Hatalar niteliklerine göre farklı dönemlerde ortaya çıkarlar. Bu nedenle parçanın yaşamı üç döneme ayrılır. Birinci dönemde şans hatalarının çok az olmasına karşılık, büyük çoğunlukla erken hatalar kendini gösterir. İkinci dönemde yalnızca şans hatalarıyla karşılaşılır. Son dönemde ise, az sayıda şans hatalarının yanında aşınma hataları büyük çoğunlukla kendini göstermektedir. Şekil 3.1'de hatalarının ortaya çıkış oranının zaman boyutundaki değişimi görülmektedir [8].



Şekil 3.1. Zamana bağlı olarak parçaların hata oranının değişim grafiği

3.5.1. Erken hatalar dönemi

Erken hatalar sistem ömrünün başlangıcında ortaya çıkar. Ortaya çıkış oranı başlangıçta yüksektir. Bu oran daha sonra giderek azalmaktadır.

Erken hatalar tasarım hataları, kontrol altında olmayan üretim süreci ve yetersiz kalite kontrolü sonucunda ortaya çıkmaktadır. Üretimi yapılan ürünün büyük çoğunluğu belirlenen ölçülere uygun olduğu halde, bunların yanı sıra birkaç ölçü dışı parça gözden kaçabilir. Aynı zamanda çeşitli parçaların sistemi oluşturmak üzere bağlanması sırasında da bazı bağlantılar yetersiz yapılmış olabilir. Ayrıca zayıf süreç, taşıma ve üretim tekniklerinin kullanımı, işçilik, ayarsızlık gibi faktörlerden de sistem erken arızalanabilir. Bu tür hatalardan kaynaklanan arızalar daha çok ürünün kullanım ömrünün başlarında ortaya çıkarlar.

Başlangıçta ortaya çıkan erken hataların giderilmesi için sistemler genellikle deneme işletimine alınır. Böylece gerçek işletimde ortaya çıkabilecek hatalar önceden belirlenir ve giderilmesi amacıyla önlemler alınır. Çoğu zaman erken hataların öncelikle ortaya çıkarılması için, sistem olağan işletim koşullarından daha ağır koşullarda işleme

konur. Sistemin işlevini aksatan parçalar arızanın niteliğine göre ya onarılır ya da değiştirilir. Böylece olağan koşullardan daha zor koşullarda çalışan parçalar, olağan koşullarda işlevini fazla sayıda erken arıza yapmaksızın yerine getirebilir, ancak erken hatalar bütünüyle ortadan kaldırılamaz [3].

3.5.2. Şans hataları

Sistem ve onu oluşturan parçaların tasarım ve yapımları ne kadar iyi olursa olsun, arıza yapmayacağı kesin değildir. Erken hatalar dönemini izleyen dönemde farklı bir biçimde ortaya çıkan ve en iyi bakım teknikleriyle dahi önlenemeyen bazı arızalar vardır. Bu arızalar düzensiz ve beklenmedik şekilde ortaya çıkarlar. Bu dönemin her anında arızaların ortaya çıkma olasılıkları eşittir. Ortaya çıkışları zamana bağlı olmayan ve sabit bir olasılıkta rastlanılan bu tür arızalar şans hataları olarak isimlendirilir. Bu tür arızaların dönemin hangi anında ortaya çıkacağı kestirilemez, fakat yeterince uzun dönemde oluş sıklıkları yaklaşık olarak sabittir.

Parçaların güvenilirlik çözümlemesini en çok ilgilendiren iki dönemden biri şans arızalarının ortaya çıktığı dönemdir.

3.5.3. Aşınma hataları

Parçaların ömürlerinin sonlarında arızaların yoğunluğu artmaya başlar. Bunun nedeni mekanik bozulma ve metalurjik yorgunluk süreci sonunda aşınma hatalarının ortaya çıkmasıdır. Eğer parçanın yapım gereği olan bakım uygun bir şekilde gerçekleştirilirse, aşınma hatalarının ortaya çıkmasını mümkün olduğu kadar geciktirebilir. Sistemin güvenilirliğinin bozulmaması için aşınan parçaların gerektiği zaman değiştirilmesi zorunludur. Eğer aşınmaya uğrayacak parçaların değiştirilme olanağı yoksa, bu parçalar sistemin değiştirilebilir parçalarından daha fazla dayanıklı olmalıdır. Parçanın işlevini yapamaz bir duruma gelmesiyle sistemin de işlevini yapamaz duruma düşmesi doğaldır.

Erken hatalar dışında kullanım sırasında karşılaşılan iki arıza türünden şans arızalarının ortaya çıkış oranı zamana bağlı olmamasına karşın, aşınma hatalarında bunun tam tersi bir durum söz konusu olmaktadır. Bu durum parçanın niteliğine göre, önceleri yüksek oranda aşınma, daha sonra düşük oranda aşınma, veya önceleri düşük, sonraları yüksek aşınma şeklinde kendini göstermektedir. Bu nedenle şans hatalarının ortaya çıkış oranı sabit bir olasılıkla gösterilebilirken, aşınma hatalarının ortaya çıkış oranı zamana bağlı bir olasılık fonksiyonudur. Erken hatalarda zamana bağlı bir olasılık fonksiyonu olduğu Şekil 3.1’de görülmektedir.

Aşınma hataları ile şans hataları her zaman ayrı dönemlerde ortaya çıkmazlar. Öncelikle aşınma olayına sık rastlanılan mekanik sistemlerde iki tür arızanın aynı dönemde ortaya çıkması mümkündür. Sürekli olarak sürtünmeye uğrayan parçalarda aşınma olayı parçanın kullanıma girdiği andan itibaren ortaya çıkar. Bunun yanı sıra bazı şans hataları da görülmekle birlikte, egemen olan arıza türü aşınma hatasıdır ve incelemelerde bu arıza türü göz önüne alınmaktadır.

Aşınma hatalarına; parçanın yaşlanması, aşınması, dayanımında azalma, yorulma, sürünme, korozyon, bozunma, zayıf bakım, servis ve kısa tasarımılanmış çalışma zamanı yol açmaktadır [3].

Bu tür hataların ortaya çıkış oranı zamana bağlı olarak değiştiğinden, arızaların giderilmesi için alınacak önlemler de planlama dönemindeki zaman boyutunda değişik nitelikler göstermektedir. Bu nedenle bu tür hataların zaman boyutunda ortaya çıkışları istatistik yöntemlerle incelenmeli ve gelecekteki davranışları en iyi biçimde kestirilmelidir. Beşinci bölümde bu konu işlenmiştir.

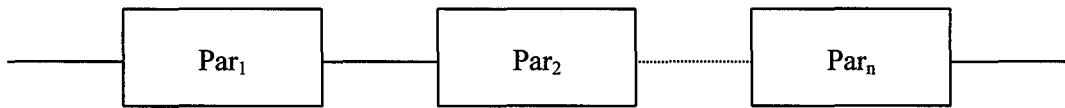
4. GÜVENİLİRLİKDE YAPI MODELLERİ

Bu bölümde güvenilirlik de yapı modelleri ve bunların sistem performansı ile olan bağıntısı açıklanmıştır. Bu bağıntı iki konudan oluşur: (1) Parçanın kendi başına olan performansı, (2) Sistemin yapısını oluşturan bütün parçaların çalışma ilişkisi. Bir sistemin güvenilirliği, sistemi oluşturan parçaların güvenilirliklerine ve bu parçaların birbirleriyle olan seri ve/veya paralel bağlantılarına göre belirlenir. Bu belirlemede olasılığın çarpım ve toplam kurallarından yararlanılmaktadır.

4.1. Seri Sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları

Her bir parçanın çalışma koşulu sistemin çalışmasını etkiler. Parçanın çalışması belirlenen durumda ve sırada olur. Sistem tasarımı sırasında gereksinim duyulan bir çalışma için bütün parçaların uygun çalışma düzeninde olması gerekir. Bu tipteki sisteme seri sistem denir.

n parçanın amaçlanan işlevleri gerçekleştirmek üzere birbirleri ardısıra dizilmesiyle oluşan bir seri sistem Şekil-4.1'de olduğu gibi gösterilebilir.



Şekil-4.1. n parçadan oluşan seri sistem

Seri olarak birbirine bağlanmış olan parçalardan oluşan bir sistemin işlevini sürdürebilmesi, parçaların hepsinin arıza yapmadan çalışmasına bağlıdır. Sistemi oluşturan parçalardan yalnızca bir tanesinin arıza yapması bile sistemin işlevinin aksamasına ve daha sonra da bütünüyle bozulmasına neden olur. Bu yapı modellerinde yedekleme yoktur.

Güvenilirlik çözümlemesi yapılan seri sistemin arıza yapmaması olayı O, sistemi oluşturan parçaların arıza yapmama olayları ise (O_i ($i=1,2,\dots,n$)) ile gösterildiğinde, aşağıdaki bağıntı kurulabilir [9].

$$O = O_1 \cap O_2 \cap \dots \cap O_n \quad (4.1)$$

Buna göre O olayının meydana gelme olasılığı,

$$P(O) = P(O_1 \cap O_2 \cap \dots \cap O_n) \quad (4.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Koşullu olasılıktan yararlanıldığında, yukarıdaki ilişki şöyle yazılabilir:

$$\begin{aligned} P(O) &= P(O_1 / O_2 \cap O_3 \dots \cap O_n) P(O_2 \cap O_3 \dots \cap O_n) \\ &= P(O_1 / O_2 \cap \dots \cap O_n) P(O_2 \cap O_3 \cap \dots \cap O_n) P(O_3 \cap \dots \cap O_n) \end{aligned} \quad (4.3)$$

O olayının meydana gelme olasılığı genel olarak aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$P(O) = \prod_{i=1}^{n-1} P(O_i / O_{i+1} \cap \dots \cap O_n) P(O_n) \quad (4.4)$$

Seri sistemlerin güvenilirlikleri çözümlenirken, sistemi oluşturan parçaların arızalanma olaylarının bağımsız olay olduğu varsayımı yapıldığında, sistemin herhangi bir parçasının arıza yapmama olasılığı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$P(O_i / O_{i+1} \cap \dots \cap O_n) = P(O_i) \quad i=1,2,\dots,n-1 \quad (4.5)$$

Olasılığın çarpım kuralı gereğince sistemin arıza yapmama olasılığı

$$P(O) = \prod_{i=1}^n P(O_i) \quad (4.6)$$

olarak ifade edilebilir. Sistemin arıza yapmama olasılığı güvenilirliği göstereceğinden,

$$P(O) = \prod_{i=1}^n P(O_i) \quad (4.7)$$

olarak yazılabilir. Eğer sistemi oluşturan parçaların güvenilirlikleri birbirine eşitse, sistemin güvenilirliği herhangi bir parçanın güvenilirliğinin n'inci kuvvetine eşit olacak ve,

$$R(O) = R_i^n \quad (O) \quad (4.8)$$

şeklinde bulunacaktır.

$$\begin{array}{lll} P(O)=R & P(O_i) = R_i & \text{olarak gösterilirse} \\ R = \prod_{i=1}^n R_i & \text{elde edilir.} & (4.9) \end{array}$$

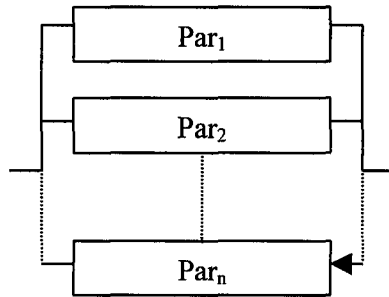
"R" güvenilirliği gösterir. Sonuçta sistemin tamamının güvenilirliği alt sistemlerin güvenilirliğinin çarpımına eşittir.

1950'lerden sonra havacılıkta kullanılmaya başlanan Jet Motorlarının karmaşık yapısı seri sistemler için belki de en güzel örnektir. Jet Motorlarda alt sistemler ve parçalar grubu vardır. Bazıları aynı anda çalışılırken bazıları verilen komuta göre çalışır ve hepsi görevini tam yaparak sistemin başarıyla çalışmasını sağlamak zorundadır. Yani biri başarısız olursa sistem de doğal olarak görevini yerine getiremez ve başarısız olur. Her bir alt sistem başarılı olmak zorundadır. Ancak son dönemlerde geliştirilen jet motorlarında başarısızlık için yedekleme sistemleri konulması amacıyla çalışmalar sürdürülmektedir.

Genel olarak eğer bir jet motoru sınırlı sayıda ana alt sistemlere ayrıştırılırsa ve bu alt sistemler bağımsız olarak değerlendirilirse, jet motorunun güvenilirliği bu ana alt sistemlerin güvenilirliklerinin çarpımına eşit olacaktır [10].

4.2. Paralel Sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları

Sistemi oluşturan parçaların aynı işlev süreci kanalında değil, farklı kanallarda olması halinde paralel sistemler söz konusu olur. Sistemde yedekleme mevcut olup, sistemi oluşturan parçalardan bir veya birden fazla arıza yapsa da, sistemin işlevliğini sürdürme olasılığı vardır. Bu durumda sistem amaçlanan işlevlerini tam anlamıyla olmasa bile, belli bir düzeye kadar gerçekleştirebilecektir. n parçadan oluşan bir paralel sistem Şekil-4.2'de görülmektedir [11].



Şekil-4.2. n parçadan oluşan paralel sistem

Paralel sistemlerin güvenilirliği seri sistemlere göre daha yüksektir; seri sistemlerde her bir parçanın arızalanma olasılığı nedeniyle parça sayısı arttıkça güvenilirliğin azalmasına karşılık, paralel sistemlerde parça sayısı arttıkça güvenilirlik de yükselmektedir.

İki parçadan oluşan paralel sistemin güvenilirliği

$$\begin{aligned} R &= R_{\text{sistem}} = P(P_{ar_1} \text{ veya } P_{ar_2} \text{ nin herhangi birinin çalışması}) \\ &= R_1 + R_2 - R_1 R_2 \quad \text{dir.} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Üç parçadan oluşan paralel sistemin güvenilirliği

$$\begin{aligned} R &= P(P_{ar_1}, P_{ar_2} \text{ veya } P_{ar_3} \text{ den en az birinin çalışması}) \\ &= R_1 + R_2 + R_3 - R_1 R_2 - R_1 R_3 - R_2 R_3 + R_1 R_2 R_3 \quad \text{olur.} \end{aligned} \quad (4.11)$$

n parça sayısının artması durumunda ifade edilme ve hesaplama zorluğu nedeniyle paralel sistemlerin güvenilirliği araştırılırken önce güvenilirlik belirlenir. Paralel sistemlerde bütün parçaların arıza yapması halinde sistem işlemez hale geleceğinden, olasılıktaki çarpım kurallarından yararlanır; O_i , i'inci parçanın güvenilirliğini gösterdiğinde, paralel sistemin güvenilirliği,

$$Q_s = P[\bar{O}_1 \cap \bar{O}_2 \cap \dots \cap \bar{O}_n] \quad (4.12)$$

\bar{O} arzu edilen olasılığın tamamlayıcısıdır. Bağımsız olaylar olarak kabul edilirse,

$$Q_s = P(\bar{O}_1)P(\bar{O}_2)\dots P(\bar{O}_n)$$

veya

$$Q_s = \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

Sistemin güvenilirliği ise tamamlayıcısı olarak

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

olarak ifade edilir [12,13].

4.3. Karma Sistemlerin Güvenilirlik Fonksiyonları

Uygulamada bütünüyle seri yada paralel olan sistemlerle karşılaşmak genelde mümkün değildir. Karşılaşılan sistemlerin çoğunluğu seri ve paralel olarak bağlanmış

parçalardan oluşmaktadır. Bu şekilde oluşan sistemler iki türdür. Bunlar yedeklemesiz ve yedeklemeli karma sistemlerdir.

4.3.1. Yedeklemesiz karma sistemler

Sistemdeki bazı parçaların bağlantıları sistemin yapısı gereği paralel ise, yedeklemesiz karma sistemler söz konusu olmaktadır. Bunların güvenilirlik fonksiyonlarının belirlenebilmesi için öncelikle sistemin yapısının, başka bir deyişle işlevsel ilişkilerinin açık bir şekilde ortaya konması gerekmektedir.

Sistemdeki işlevsel ilişkiler belirlendikten sonra parçalar gruplandırılarak alt sistemler oluşturulur. Alt sistemlerin oluşturulması sonucunda, her alt sistemde bulunan parçalar birbirleriyle seri veya paralel bağlanmış olmalıdır. Daha sonra alt-sistemlerin güvenilirlik fonksiyonları elde edilir. Aynı gruplandırmaya sistemin güvenilirlik fonksiyonu bulununcaya kadar devam edilir.

4.3.2. Yedeklemeli karma sistemler

Karma sistemlerdeki ikinci paralel bağlantılar yedekleme şeklindedir. Sistemleri daha güvenilir yapmak için arıza olasılığı yüksek olan parçalara paralel olarak yedekleme parçaları bağlanır. Bu tür sistemlere yedeklemeli karma sistemler denir. Özellikle seri sistemlerdeki parça sayısındaki artış sistemin güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu sakıncayı gidermek için seri parçaların yanlarına paralel bağlantılar yapılmaktadır.

Yedeklemeli karma sistemler, karma sistemlerin özel bir türü olduğundan, karma sistemlerin güvenilirlik fonksiyonlarının bulunması için izlenen yol bunlar için de geçerlidir. Aralarında farklı olan tek nokta şudur: Bu tür sistemlerde işletme sürecine kendiliğinden giren yedekleme parçasının bu sürece girmesini sağlayan parçanın güvenilirliğinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Bu parçanın da arıza

yapabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle söz konusu parçanın güvenilirliği de hesaplamaya katılmalıdır.

Bu bölümde yapılan tanımlamalar ve çözümlenmeler doğrutusunda sistemin tümünün veya parçalarının belli dönemlerde arıza yapma olasılıkları belirlenebilecektir. Böylece bakım planlaması için yapılacak çalışmalara temel olacak veriler elde edilebilecektir [11].

5. HATALARIN ZAMAN BOYUTUNDA ORTAYA ÇIKIŞLARININ İSTATİSTİKSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Gelişmiş bilgisayarların yoğun olarak kullanıldığı metotlar sayesinde elde edilen ucuz hesaplama gücü, Monte Carlo benzetimi örneğindeki gibi risk analizlerini içeren mühendislik problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü iyi tasarlanmış yapıların servis ömürleri düşük arıza olasılığına sahip olmakta ve hata risklerinin sayılabilir (tespit edilebilir) olmasıyla beklenmeyen olayların davranışları bu yöntemler kullanılarak analiz edilmekte ve risk azaltılabilmektedir.

Bu bölümde, ömür kontrol değişkenlerinin davranışlarının tanımlanmasında seçilen istatistiksel dağılımlar ve onların risk üzerindeki tahmini etkileri irdelenecektir. Burada normal dağılım, log-normal, 2 ve 3 parametrelili Weibull ve Beta dağılımları incelenecek ve karşılaştırmaları yapılacaktır.

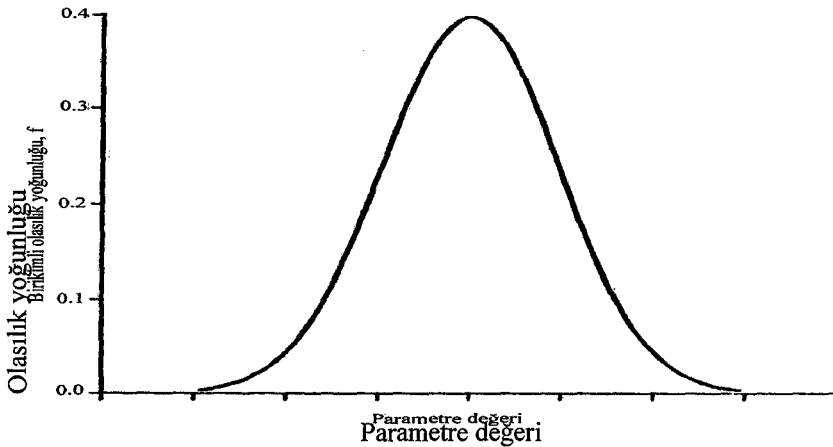
5.1. Giriş

İstatistiksel dağılımlarda kuyruk yapıları, ömür kontrollü değişkenlerin açıklanması amacıyla seçilir ve risk değerlendirmesinde çok büyük etkiye sahiptir. Olasılık dağılımlarının şeklinin, arızaların tahmini olasılığı üzerinde derin bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Buna göre daha belirsiz olan, çoğunlukla farklılıklarla karmaşık bir şekilde açıklanan bilgilerin dağılımlarının %5 ve %95 arasında elde edilmesi gereksinimidir. Böyle durumlarda bazen istatistiksel araçlar doğru olarak seçilmiş ve uygulanmış olsa bile hatalı risk değerlendirmesiyle sonuçlanabilmektedir. Çünkü (doğru) varsayımı ortaya çıkaracak temel gözlemler elde edilmemiş olabilir. Mühendislikte risk tespitinde yaygın olarak kullanılan birkaç dağılım, bu noktayı göstermek amacıyla incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

5.2. Olasılık Dağılımları

Bir olasılık dağılımı iki veya daha fazla deneysel sonucu bulunan nisbi olasılıklarla ilgilidir. X rassal değişkeni kesikli olduğunda şekil bir histogramla gösterilmektedir. X değerleri sürekli olduğu zaman bunlara karşı gelen $P(x)$ olasılık değerlerinin şekli bir doğru yada eğri biçiminde olabilir. Şekil 5.1’de bilinen çan eğrisi görülmektedir. Bu olasılık dağılımı, önceden belirlenen sınırlardan küçük veya bunlara eşit değer alan parametreler için olasılık değerini bulmak amacıyla kullanılmaktadır. Örnek olarak, yapısal ömür değerlendirmesinde parametrelerde periyodik hata olabilir ve dikkate alınan limit 1/1000 oranında alınabilir. Diğer bir deyişle periyodik ömür, zamanından önce ortaya çıkabilecek bin arızada bir olasılıktan fazla olmayacak şekilde saptanmak istenir.

Eğer dağılım kesinlikle biliniyorsa, 1/1000 periyodik ömürünü kestirmek mümkün olabilir. Bununla beraber gerçek koşullarda teorik dağılım bilinmemektedir ve mevcut sınırlı sayıda veriyi tanımlayan birbirine eşit seviyede birçok alternatif model bulunmaktadır. Bu dağılımlar tek tepelidir (unimodel) ve gözlem aralığında veriler modellenirken, eğrinin uç noktalarında oldukça büyük farklılıklar görülür ve bu noktalar dağılım merkezinden oldukça uzaktadırlar.



Şekil 5.1. Gauss (Normal) dağılım

Olasılık yoğunlukları, ya olasılık fonksiyonuna ya da birikimli dağılım fonksiyonuna bağlı olarak ifade edilir. Klasik olarak olasılık yoğunluk fonksiyonu (oyf) $f(x)$ ve birikimli dağılım fonksiyonu da (bdf) $F(x)$ ile gösterilir. Bdf, ilgili eğri noktalarının belirlenmesinde kullanılır.

Ana kütle merkezinin yakınındaki değerlerin gruplandırılması amacıyla ortalama, medyan ve mod olmak üzere üç tip merkezi eğilimin ölçütü bulunmaktadır. Ortalama, bunlardan en çok kullanılanıdır ve kütlelerin ilk momentini veya ağırlık merkezini verir. Eğer olasılık yoğunluğu dönüm (fulcrum) noktasında ise ana kütle ortalaması (yükseltisi) dengelenebilir. Mod en çok görülen gözlem değeridir ve bu nedenle ana kütlelerin tepe noktası olarak gözüktür. Medyan anakütlelerin yarısından büyük, diğer yarısından da küçük olan değerdir. Simetrik dağılımlarda bu üç değer birbirine eşittir.

Bunu takip eden işlem genellikle parça ömür zaman davranışlarının modellenmesinde kullanılan muhtemel dağılımın gözden geçirilmesidir. Her biri kısaca incelendikten sonra, kuyruk noktalarının özelliklerinin karşılaştırılması yapılacaktır.

5.3. Normal Dağılım

En çok bilinen dağılımdır. Çünkü doğada çok sık karşılaşılmaktadır. 200 yıl önce Karl Gauss üzerinde çalıştığı için onun ismiyle anılır. Normal yoğunluk fonksiyonu eşitlik 5.1'de gösterilmektedir.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-1/2\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.1)$$

Model parametresi μ , ana kütle ortalamasıdır ve dağılımın merkezinde bulunur. Standart sapma σ , gözlem değerlerinin aritmetik ortalama etrafındaki dağılımının ortalama bir ölçüsüdür.

5.4. Lognormal Dağılım

Yorulma ömür zamanları lognormal dağılmışlardır. Doğal olarak değişkenin (çevrim kabiliyeti gibi) logaritması, kendisine göre daha normal bir dağılım gösterir. Yorulma davranışı analizlerinde 20 senelik deneyim göstermektedir ki lognormal dağılım gözlemlenmiş davranışın iyi bir modelini sunmaktadır. İstatistikte çoğu zaman görüldüğü gibi, bazı olayların doğruluğunu ispatlamak imkansızdır, sadece uygun veriler sonucu destekler. İstatistiksel uygunluk testi, veri toplama tanımlamasının kısmi dağılımın uygunluğunu ölçmek için kullanılır.

Lognormal dağılımın formülü 5.1 nolu eşitlikteki gibidir. Fakat x , gerçek çevrim sayısından ziyade, çevrim ömrünün logaritmasını temsil eder. Ortalama, mod ve medyanın rassal olduğu normal dağılımdan farklı olarak, lognormal dağılımın şekli düzensizdir ve sonuçta bu noktalar ana kütlede farklı yerlerde bulunmaktadır. μ 'ü konum parametresi olarak kabul edersek, $x = \log_e$ (çevrimler) iken logaritmanın ortalamasıdır, σ^2 ise logaritmanın varyansıdır. Çevrimlerin ortalaması $\text{ortalama}_{\text{çevrim}} = \exp(\mu + \sigma^2/2)$ formülüyle hesaplanır. Mod, $\text{mod}_{\text{çevrim}} = \exp(\mu - \sigma^2)$ ve medyan, $\text{medyan}_{\text{çevrim}} = \exp(\mu)$ olarak saptanır. Sonuç olarak mod, ortalamadan küçük olan medyandan daha küçüktür (herhangi bir dağılımda medyan, ortalama ve mod arasında yer alır). Görülebileceği gibi, düzensizliğin boyutu, μ ve σ^2 'nin nisbi miktarına bağlıdır. Bütün bunlardan görülebileceği gibi lognormal dağılımın ortalaması logaritmik ortalamanın üssü değildir.

5.5. Weibull Dağılımı

Kullanım kolaylığından ve esnekliğinden dolayı son yıllarda Weibull dağılımının mühendislik uygulamalarında kullanımı artmıştır. Özellikle ömür problemlerinde başarılı uygulamaları vardır [14].

Weibull, birikimli dağılım fonksiyonu;

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-t_0}{2}\right)^\beta} \quad (5.2)$$

ve

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu,

$$\begin{aligned} f(t) &= \eta\beta t^{\eta-1} \exp(-\beta t^\eta); \quad t > 0 \\ \eta &> 0 \\ \beta &> 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

şeklinde gösterilmektedir. Bu ifadede η ve β parametreler, t ise değişkendir.

Weibull dağılımının parametrelerinin kestirimi için, en büyük benzerlik yönteminden yararlanılır. Bu nedenle önce en büyük benzerlik fonksiyonu elde edilmelidir. Söz konusu en büyük benzerlik fonksiyonu,

$$L(t_i; \eta, \beta) = \prod_{i=1}^n \eta\beta t_i^{\eta-1} \exp(-\beta t_i^\eta) \quad (5.4)$$

şeklinindedir. En büyük benzerlik yönteminin gereği olarak fonksiyonun e tabanına göre logaritması alınır;

$$\ell = \ln L = n \ln \eta + n \ln \beta + (\eta - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - \beta \sum_{i=1}^n t_i^\eta \quad (5.5)$$

Fonksiyonunun η ve β 'ya göre kısmi türevleri alındığında,

$$\frac{\partial \ell}{\partial \eta} = \frac{n}{\hat{\eta}} + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n t_i \ln t_i$$

$$\frac{\partial \ell}{\partial \beta} = \frac{n}{\hat{\beta}} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\eta}} \quad (5.6)$$

elde edilir. Bunlar sıfıra eşitlenip, $\hat{\eta}$ ve $\hat{\beta}$ için çözüldüğünde, aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\hat{\eta} = \frac{n}{\hat{\beta} \sum_{i=1}^n t_i^{\hat{\eta}} - \sum_{i=1}^n 1} \quad (5.7)$$

Kestirimi düşünülen parametreler EK-1 bire bir ölçekli Weibull olasılık grafiğinden yararlanılarak da bulunur. Yöntem olarak başlangıç noktası seçilir ve yatay yönde bir inch ölçülür, eğriyi kestiği noktada dikey nokta ölçülür. Dikey/yatay oranı β 'yı verir. η ise dağılımın yüzde 63,2'dir. Bir noktadan yatay eksenin doğruyu kestiği noktadan dikey inildiğinde bulunan nokta η değerini gösterir. η ve β değerlerinin bulunmasında sonra ise EK-2 grafiği yardımıyla Hatalar arası ortalama süre (MTBF) tahmin edilir [12].

r'inci Momentler

Genel olarak, orjine göre r'inci moment

$$\mu_r = \int_0^{\infty} t^r f(t) dt \quad (5.8)$$

olarak tanımlanır. Burada $f(t)$ Weibull dağılımı için olasılık yoğunluk fonksiyonudur ve $\beta > 0$, $t = 0$ ve $\eta > 0$ dır.

Böylece Weibull için

$$\mu_r = \frac{\beta}{\eta^\beta} \int_0^\infty t^{r+(\beta-1)} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} dt \quad (5.9)$$

olur.

$y=(t/\eta)^\beta$ ifadesinin her iki tarafının türevi alınırsa;

$$\frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} dt = dy \quad (5.10)$$

elde edilir ve $t=\eta y^{1/\beta}$ olduğu kabul edilir.

Böylelikle ifade yeniden düzenlenirse

$$\mu_r = \eta^r \int_0^\infty y^{\frac{1}{\beta}r} e^{-y} dy \quad (5.11)$$

bulunur.

Weibull Dağılımının Aritmetik Ortalaması

Orjine göre ilk moment aritmetik ortalamadır. Buradan Weibull dağılımının aritmetik ortalaması bulunabilir. $r=1$ için (5.11) eşitliği şu şekilde yazılabilir.

$$\mu_1 = \eta \int_0^\infty y^{1/\beta} e^{-y} dy \quad (5.12)$$

Bu integral iyi bilinen gamma fonksiyonunu ifade eder.

$$\mu_1 = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = MTTF \quad (5.13)$$

Şayet $t_0 \neq 0$ ise ifade şu şekilde yazılabilir.

$$MTTF = t_0 + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (5.14)$$

Weibull Dağılımının Varyansı

Weibull dağılımının varyansını bulmak için, birinci momentin karesinden daha az orjine yaklaşan ikinci moment bulunur.

Orjine göre ikinci moment;

$$\mu_2 = \eta^2 \int_0^{\infty} y^{1/\beta^2} e^{-y} dy \quad (5.15)$$

biçiminde bulunur. Gamma fonksiyonundan yararlanarak;

$$\mu_2 = \eta^2 \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta^2}\right) \quad (5.16)$$

olur. Buradan

$$\sigma^2 = \mu_2 - (\mu_1)^2 \quad (5.17)$$

bulunur.

Weibull dağılımı için ise

$$\sigma^2 = \eta^2 \left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right]^2 \right) \quad (5.18)$$

Weibull Dağılımının Modu

Şayet $\beta \leq 1$ ise, mod yoktur ancak $\beta > 1$ ise,

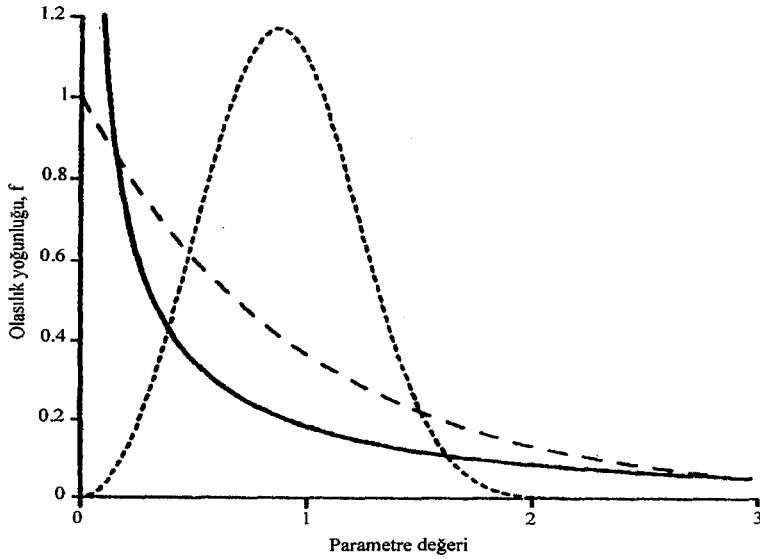
$$\text{Mod} = t_0 + \Gamma \left(1 - \frac{1}{\beta} \right)^{1/\beta} \quad (5.19)$$

olarak bulunur.

Weibull Dağılımının Medyanı

$$\text{Medyan} = t_0 + \Gamma \left[(1/n2)^{1/\beta} \right] \quad \text{dir.} \quad (5.20)$$

η karakteristik ömürdür ve toplam yüzde oranı 63.2'dir. Konum parametresi rolü oynar ve karşılaştırma parametresidir. β dağılımın şeklini belirler ve dağılımı etkiler (Şekil 5.2). Üçüncü model parametresi t_0 , hata olasılığının 0 olduğu yere karşılık gelen değeri gösterir. Pek çok uygulamada sıfır olarak varsayılır ve eşitlikte görülmez. Çevrimsel ömür yüzde yüz olasılık başarısıyla tanımlandıktan sonra çok dikkatli kullanılmalıdır.



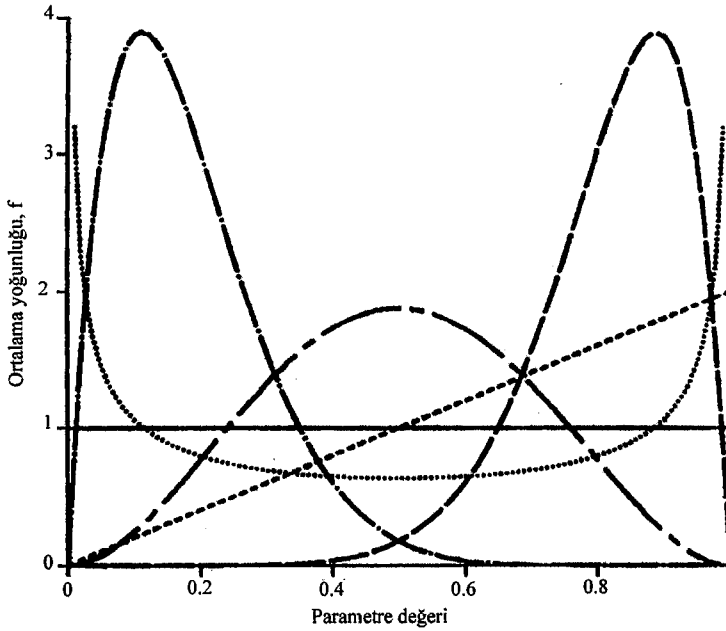
Şekil 5.2. Değişik parametrelere göre Weibull dağılımı

5.6. Beta Dağılımı

Mühendislik uygulamalarının bazı durumlarda kullanılan beta dağılımı şekil 5.3'de verilmiştir. Bir önceki uygulamada olduğu gibi Beta dağılımı süreklidir, fakat diğerlerinin tersine sınırlı aralıkta tanımlanmıştır. Parametre değerlerine bağlı olarak farklı eğriler gösterir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu formülü (5.21) nolu eşitlikte verilmiştir.

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad \alpha > 0, \beta > 0, 0 < x < 1 \quad (5.21)$$

(0, 1) aralığında tanımlandığı için, Beta dağılımı; örneğin çevrim sayısına oranla, belirlenmiş sınırlar içerisinde ortaya çıkarılan X değişkeninin hatayı temsil ettiği durumlarda daha kullanışlı olmaktadır.

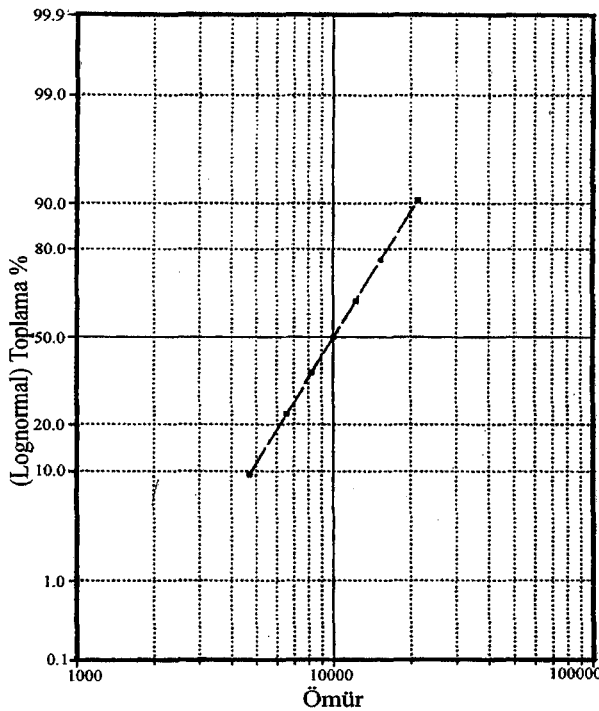


Şekil 5.3. Beta dağılımı

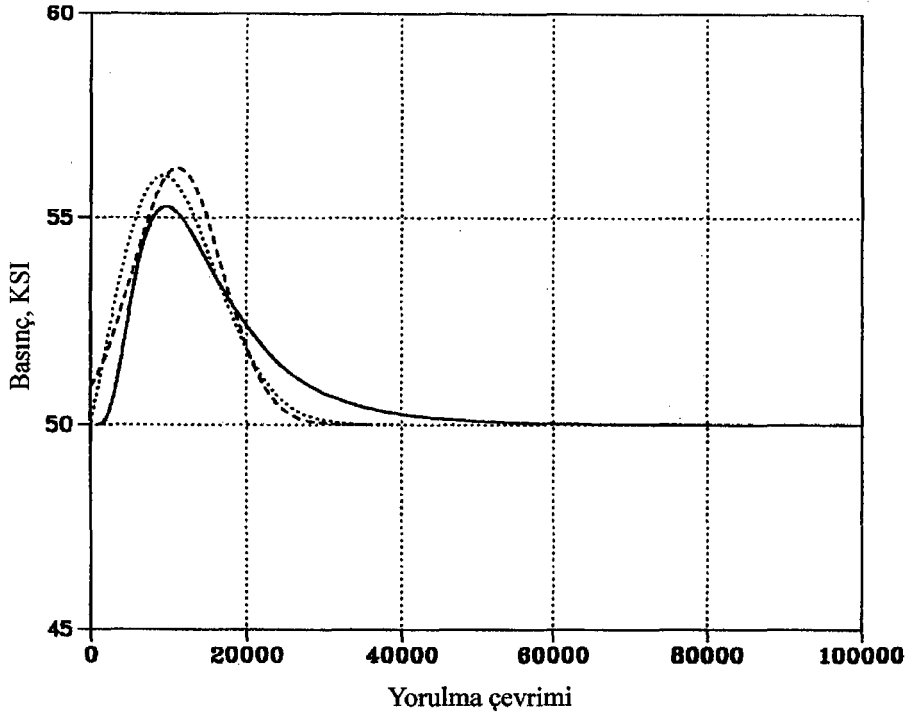
5.7. Ömür Modellerinin Karşılaştırılması

Tahmini parametre dağılımı yöntemleri genellikle kısmi dağılım içeren bir aralık üzerinde gözlemlenmiş birikimli dağılım fonksiyonunun (bdf) taslağını içermektedir. Veri, çevrim ömrüne göre küçükten büyüğe doğru sınıflandırılmıştır. $F(i)=(i-0.3)/(N+0.4)$ ile tahmin edilmekte, her biri bir büyüklük (değişken) olarak tayin edilmektedir. Burada $i;1,2,3,\dots,N$ dir. N ise örnek içerisindeki toplam gözlem sayısıdır. Şekil 5.4, lognormal dağılım için bdf'yi göstermektedir. Yedi gözlem tam olarak çizgi üzerinde olmalıdır. Çünkü bu dağılımdan gelecek şekilde tanımlanmışlardır. Aynı dağılımdan rassal olarak seçilmiş gerçek bir örnek, doğrusal ilişkiye göre dikkat çekecek bir şekilde saçılım gösterebilir ve bu ideal doğrusallık değildir.

Bu gözlemlerin diğer dağılımlara sahip oldukları varsayıldığı zaman onların davranışlarını göstermek için seçilmiştir. Buradaki önemli nokta Şekil 5.5'te görüldüğü gibi normal 2 parametrelili Weibull ve lognormal dağılımları için çeşitli dağılımların gözlemlerde artış (yükselme) yaratabileceğidir.

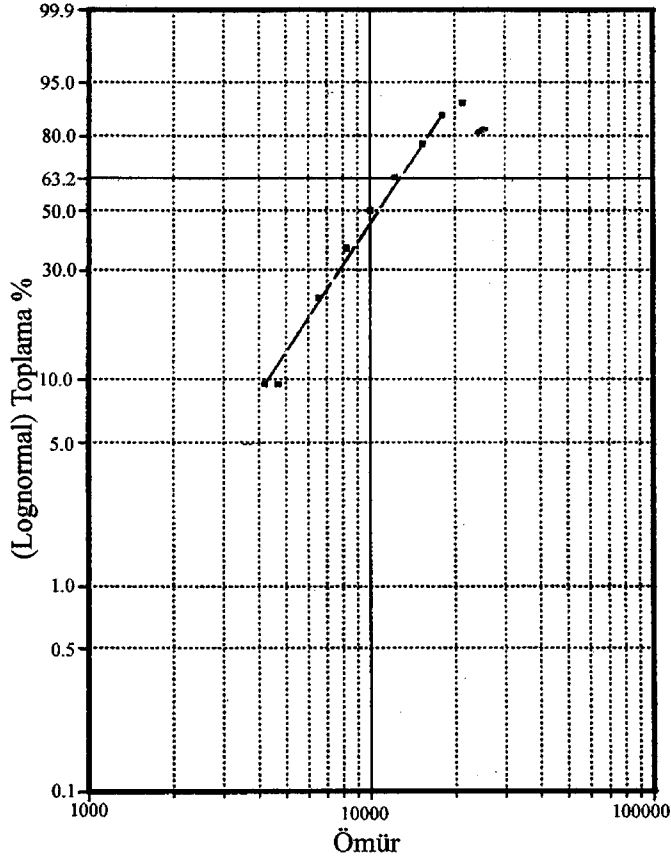


Şekil 5.4. Yorulma türü için Lognormal grafiği



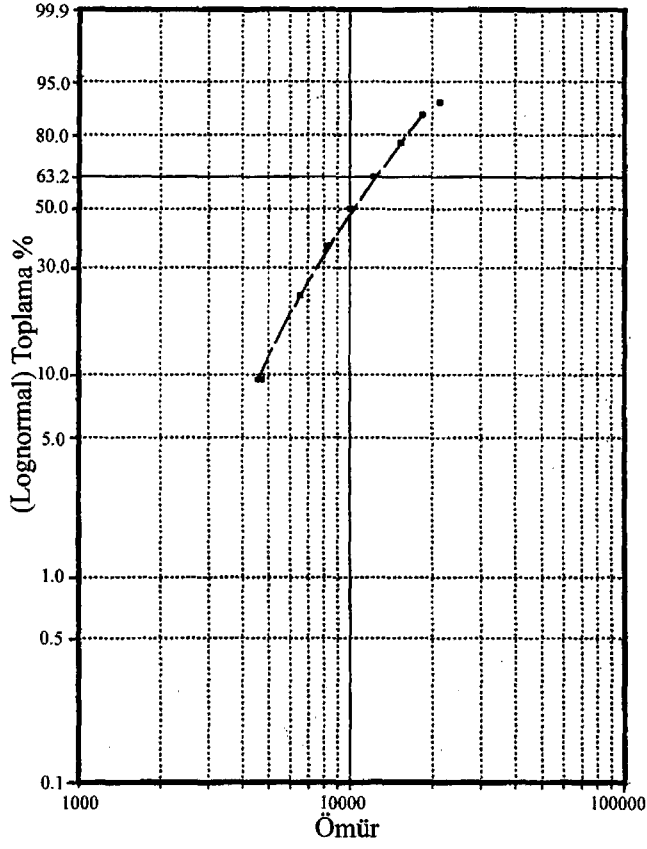
Şekil 5.5. Yorulma türü bilgisi gösterimi için Lognormal, Normal ve 2 parametrelili Weibull dağılımı

Karşılaştırma yapılmak istendiğinde, o_yf 'nin (olasılık yoğunluk fonksiyonu) aksine (Şekil 5.6 ve 5.7) 2 ve 3 parametrelili Weibull dağılımında görülen bdf noktalarının bu yedi temsili ömür süresi (pseudo-lifetimes) için güvenilir modeller sağladığına dikkat edilmelidir. 3 parametrelili Weibull dağılımı ele alındığında, lognormal ve Weibull dağılımları benzer şekle sahiptirler ve böylece uygun aralıkta model iyi işler. Şekil 5.8'de görüldüğü gibi kuyruk noktalarının davranışları tamamen farklıdır. Zor olan, gerçek durumda eğrinin bilinmemesidir ve karşılaştırma yapmak sadece bu merkez bölge içerisinde mümkün olabilmektedir ve her iki model de burada kullanılabilir.

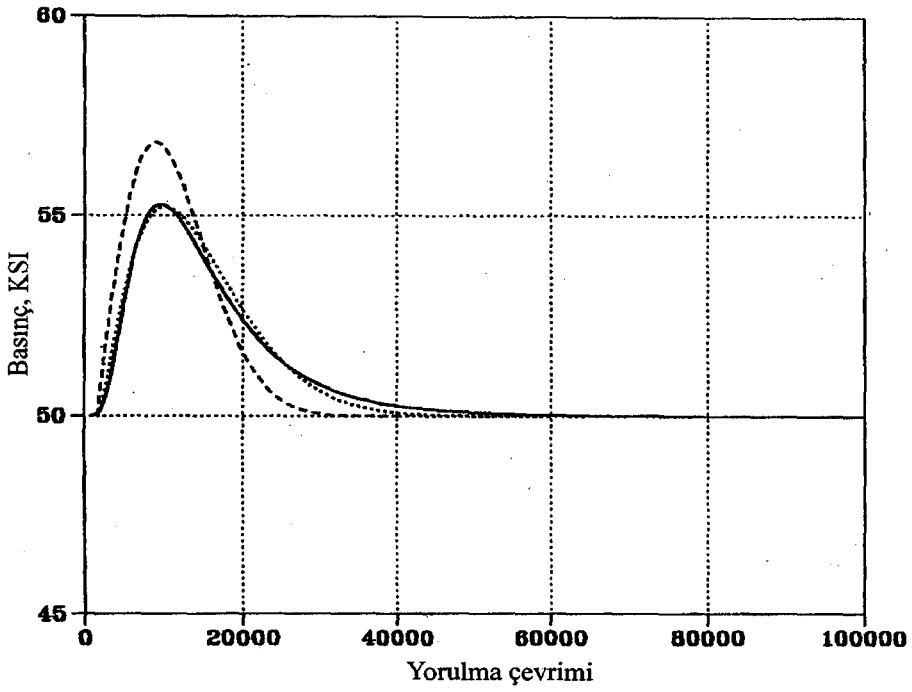


Şekil 5.6. Yorulma türü bilgisi için 2 parametrelı Weibull dağılımı

Beta modeli çok geniş aralıklardaki çevrim ömürlerini lognormal'e yaklaştırmak için seçilmiştir. Kuyruktaki noktaların davranışları bilinmediği için gerçekte uygulamasının yapılamayacağı görülmelidir ve burada temsili amaçlarla görünmektedir. Şekil 5.8'de gösterildiği gibi Beta geniş bir aralıkla uygun bir model olabilmektedir. Fakat bu şartlarda dahi model farkları ilk 1688 çevrimde tahmini "sıfır" hata olasılığıyla sonuçlanabilir. Oysa "gerçek" (tanımlandığı şekilde) erken hata olasılığı %0.1'dir.



Şekil 5.7. Yorulma türü bilgisi için 3 parametrelı Weibull dağılımı



Şekil 5.8. Yorulma türü bilgi gösterimi için Lognormal, 3 parametrelı Weibull ve Beta dağılımı

5.8. Güven Aralıkları

Küçük örnekler esas alınarak bulunan sonuçlarla nicel değişkenler (quantiles) için güven aralığı hesaplanırken ortaya bazı güçlükler çıkabilmektedir. Örnek olarak, elimizde yedi gözlemlik bir örnek olduğunu varsayalım. Diğer bir örnekte farklı gözlem sonuçları bulunabilir fakat benzer olmasının yanında nicelik bakımından farklı tahminler de elde edilebilir. Devam edilirse, yedi gözlemlik pek çok örnek toplanabilir ve her biri için daha düşük değerlerde nicelik tahmin edilebilir. Güven aralığı (%90 kabul edildiğinde), bu şekilde tahmin edilen niceliklerin %90'ının, o nicelik için bilinmeyen gerçek değeri içereceği şeklinde yorumlanır. Pek çok durumda bu tür bir güven tahmini, özellikle bilinen bir yoğunluk fonksiyonundan alınan küçük bir örnekle ilgilenilirken çok önemli olabilir. Fakat herhangi bir güven aralığı hesabındaki kesinlik, temeli oluşturan yoğunluk dağılımının bilinmesindedir. Bu varsayım, çoğu kez ihmal edilmektedir. Böylelikle bir güven aralığı, örneğin; normal dağılımına sahip bir niceliğin 0.001 gibi yüksek bir güven derecesinde değerlendirildiği varsayımı üzerine tahmin edilir. Ancak esas eğilim, temel dağılımın normal dağılımdan farklı bir dağılım olmasından ötürü gerçekte çok farklı olabilir. Bundan dolayı "güvenilirlik" bir aralıkta gerçek bir değer varolmasından çok, aslında temeli oluşturan dağılımın ne olduğunun bilinmesidir.

5.9. Tehlikeli Oranda Yüksek Risk Tahminleri

Şimdiye kadar, örnekler yapısal gerçekçiliğin tahmininin nasıl ortaya çıktığını gösterecek şekilde seçilmiş ve istatistiksel araçların doğru seçilip uygulanmasına rağmen, belirli bir dağılımın temelini oluşturan varsayım hatalı çıkmıştır. Aynı zamanda kabul edilen dağılımın doğru olmamasından dolayı, uygun olmayan sonuçlar elde etme olasılığı bulunmaktadır. Örneğin; normal dağılımı göz önüne alalım. Yedi adet standartlaştırılmış ve uygun hale getirilen gözlem yaşam süresi için, negatif değerlere sahip bir normal dağılım üretir. Bu sonuç açık bir şekilde uygulanamaz bir sonuçtur.

Sürecin yapısı yaşam süresinin 0'a eşit yada daha büyük olmasını gerektirmektedir ve bundan dolayı sonucun geçersiz olduğu açıktır. Eğer benzer bir örnek madde dayanıklılığı yada madde ömrü uzatılması için alınsaydı ve örnekte, gerçekte lognormal dağılıma sahip olmalarına rağmen normal dağılmış olduğu kabul edilseydi benzer bir durum ortaya çıkacaktır. Belirlenen dağılım (normal) gerçekte oluşabilecek olandan daha düşük maddesel yeteneklere olanak sağlar ve bunların üzerine kurulu risk tahminleri sakıncalı olacaktır.

5.10. Risk Belirlemede Monte Carlo Benzetimi

Şimdiye kadarki tartışmalar, ilgilenilen bir parametrenin hata periyotlarına ait basit dağılımları ile ilgiliydi. Pek çok uygulamada bu dağılım bilinmez, ancak Monte Carlo yöntemleri kullanılarak modellenilebilir. Kısaca, ömür kontrol değişkenlerinin belirli bir istatistiksel dağılıma sahip oldukları ve buna bağlı olarak bazı değerlerin (gerilim, sıcaklık yada bunun gibi başka parametre değerlerinin) ortaya çıkmasının diğerlerinden daha muhtemel olduğu kabul edilir. Bu dağılımlara örnekleme uygulanır ve sonuçta, oluşan yapısal yetenek sistemin fiziksel yeteneğinden türetilir. Süreç, belki de onbinlerce kez tekrar edilir ve sonuçta oluşan yeteneklerin dağılımı (örneğin; yaşam süreleri) oluşturulur. İlgilenilen nicelik doğrudan belirlenebilir. Bu durumda problem çıkarma eğilimi olan, çevrim uzunluğu modeli değil, ömür kontrol değişkenlerinin kendileridir. Daha önce olduğu gibi uygun olmayan istatistiksel model seçimi hatalı ömür süreleri ve dolayısıyla hatalı risk tahminleriyle sonuçlanan yanlışların ortaya çıkmasıyla sonuçlanabilir.

5.11. Sonuç

Potansiyel yapısal riskleri belirlemek için istatistiksel araçların mühendislikte kullanılması, deneysel teknikleri esas alan önceki yöntemler üzerinde büyük bir ilerleme sağlamıştır. Fakat birçok uygulamada bu istatistiksel araçları oluşturan teorik dayanak noktaları göz ardı edilmiştir. Bu gibi durumlarda elde edilen sonuç şekil ve fonksiyon

açısından doğru ancak içerik olarak yanlış (amaca hizmet etmeyen) şekilde sonuçlanabilmektedir.

Bu temel dayanak noktalarının göz ardı edilmemesi, iyi anlaşılacak uygun şekilde kullanılması gereklidir.

Bu bölümde, bazı genel olasılık dağılımları ve bunların uygulamalarında karşılaşılabilecek güçlükler irdelenmiştir. Çoğu mühendislik probleminde olduğu gibi çözüme ulaşmak için ilk adım temel prensiplerin doğru anlaşılması ve uygulanması olmalıdır.

6. UÇAK MOTORLARININ BAKIM KAVRAMLARI VE UYGULAMASI

1940'ların ilk yıllarında bir motor servise verilirken 25 saatlik çalıştırma testi ile motorun faal olup olmadığı belirlenmekte idi. Bugün, bunun yerine gaz türbinli motorlar için tasarım uygulamaları, ömür kestirme yöntemleri, ömür izleme kullanımı ve kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bir çok mühendislik uygulamaları ile dayanıklılık sorunlarının çözümüne ilişkin gelişmeler sağlanmış ve gaz türbinli motorların bakımı ve üretimi daha iyi seviyelere gelmiştir.

6.1. Bakım Politikaları

Havacılıkta kullanılan gaz türbinli motorlarda hasar tespitinde kullanılacak çok sayıda bakım politikası ve izlenecek yol vardır [15].

Bakım politikasını etkileyen hususlar şunlardır;

- Motorun geliştirildiği devre,
- Motorun takıldığı uçağın gelişmişliği,
- Kullanıcıların bilgi teknoloji tabanı,
- Motor üreticisi tarafından yapılan tasarım, analiz ve gelişmeler,
- Uçak ve motor üreticilerinin kullanıcı üzerindeki etkisi,
- Motor parçalarının kalan ömürleri.

Yukarıda belirtilen birçok değişken içinden basit bir çözüm bulmak gerekmektedir. Bu karar ise önemli ölçüde maliyeti, güvenliği ve silah sisteminin özelliklerini etkilemektedir.

Hasar yönünden kritik olan döner motor parçalarının bakım politikalarında başarı elde edebilmek için üç temel kriter vardır:

- Tehlikeli arızaları önlemek için hasarlanan motor parçaları sisteme zarar vermeden servisten çıkartılmalıdır.
- Maliyeti karşılanabilir olmalıdır.
- Ulusal güvenlik stratejilerini karşılamak için motorların servise hazır olmaları sağlanmalıdır.

Birinci kriter, bu sınıf parçalar tehlikeli arızalara neden olmadığı sürece kolaylıkla başarılabılır. İkinci kriterin durumu ise oldukça karanlıktır. En düşük bakım maliyetinin ne zaman olacağını kestirmek oldukça güçtür. Maliyetin karşılanabilir olması demek, satın almada kaynakların uygunluğu, stok ve parçaların değişme sırasındır. Politikalar maliyeti karşılayamaz hale geldiğinde, savaşa hazırlık ve uçuş durumu zafiyet gösterecektir.

Eski sisteme sahip motorların bakımı genellikle aşağıdaki politikalardan birine göre belirlenir;

- Sabit saatler veya periyodik aralıklar,
- Hesaplanmış ve ölçülmüş türbin sıcaklık tolerans şartları,
- Daha karmaşık bilgi kayıt ve analiz sistemi.

Yeni bakım politikaları yukarıdakilerden herhangi birini veya ek olarak ömür arttırmak ve ömür belirlemek için hasar tolerans tekniklerini de içerir.

6.2. Uçak Motorlarının Sınıflandırılması

Uçak motorları kullanım durumuna ve kullanıldığı teknoloji ile bakım şartlarındaki tarihsel gelişimine göre iki şekilde sınıflandırılır [16].

6.2.1. Kullanım durumuna göre uçak motorlarının sınıflandırılması

Uçak motorları, kullanım amaçları doğrultusunda savaş uçaklarının motorları, nakliye uçaklarının motorları ve helikopter motorları olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bu motorlar farklı çalışma rejimlerine sahiptir.

6.2.1.1. Savaş uçaklarının motorları

Günümüz savaş uçaklarının motorlarında kumanda sistemleri açısından önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Uçakların çoğu şimdi standart bir özellik olarak uçuş zarfının her noktasında motor durmadan sınırsız gaz kolu hareketi yapabilir. Günümüz motorları, ilk gaz türbinlerinde olan 30 ila 60 sn ivmelenme zamanının aksine birkaç saniyede ani olarak ivmelenebilmektedir. Gaz kolu hareketlerinin değişimi ile çok sayıda farklı çevrimler oluşur. Çoğu günümüz motorlarında kullanım, eşdeğer veya referans çevrim esasına dayalı parametrik olarak ölçülür. ABD motorları için ortak bir parametre TACs (Toplam birikmiş çevrim - Total accumulated cycles) kullanılmaktadır. TAC birikimi, gaz kolu hareketleri veya rotor hızları ile ilgilidir. Bazı modern motorlar, değişken kanatçıklar, egzoz lülesi pozisyonu ve rotor hızını sabit tutmak için yakıt akışını ayarlayarak rotor geçiş fazlarının etkisini sınırlamaktadır. Kullanımı bir çok NATO ülkesinde de hala devam eden eski motorlarda ise gaz kolu hareketini sınırlayan çalışma limitleri mevcuttur. Bu limitler sebebiyle eski motorlarda yenileri gibi çok fazla sayıda takip edilecek uçuş parametresi olmadığından bakım politikalarını belirlemede de sınırlı kalınmaktadır.

6.2.1.2. Nakliye uçaklarının motorları

Nakliye uçaklarının motorları turboprop veya turbofan / turbojet olabilir. Genelde sistemin yaşı motorların bakım politikasını belirler. Nakliye uçakları, savaş uçaklarından farklı olarak daha az gaz kolu hareketi ile daha uzaklara uçarlar. Ancak bu durum;

- Otomatik iniş sistemi devredeyse, çok sayıda gaz kolu hareketi olduğunda,
- Doldurma (havada yakıt ikmali) manevraları olduğunda,
- Düşük seviyeli yük atışları yapıldığında,

geçerliliğini yitirir.

Turboprop motorlar ya şartlı bakım yada sabit saat aralıklarında bakım için tasarlanmışlardır. Ömür ölçme cihazları nakliye uçaklarına monte edilmez.

6.2.1.3. Helikopter motorları

Helikopterlerde uzun yıllardan bu yana turboşaft (Gaz türbinli) motorlar kullanılmaktadır. 1960'larda helikopterlere ilk gaz türbinlerinin girişi ile askeri etkinlikleri artmıştır. Burada da sistemin yaşı ve tasarım gereksinimleri motor bakım politikalarını belirlemektedir. Turboşaft motorlar tipik olarak periyodik ömürlü parçalarla ve kesin zamanlı bakım limitlerine göre tasarlanmışlardır. Çok sayıdaki dönen parça, rotor hızı ile ilgili gerilimlerden dolayı zaman ömürlüdür. Turboşaft motorlardaki güç türbinleri de termal çevrimden dolayı zaman ömürlüdür. Çünkü rölanti üzerinde belli bir seviyede güç üretmek için sabit rotor hızında çalışılır. Bununla birlikte güç türbininin disk ve şaftı her uçuşta bir LCF (Düşük Çevrimli Yorulma-Low Cycle Fatigue) gerilim çevrimine maruzdur ve tork seviyeleri sık sık değişir.

Helikopter motorları için özel durumlar şunlardır;

- Dişli kutusunun korunması amacı ile motor gücü-tork eşlenmesi yapılıır.
- Diğerleri ile karşılaştırıldığında bir motorun ömrünü aşmaması için çoklu kontrol sistemi uygulanır.
- Güç türbini regülatör sisteminin çalışması sonucu otomatik gaz kolu hareketi olur.
- Pilottan gelen kollektif ve periyodik hatve değerlerine rağmen helikopter rotor hızı sabittir.

6.2.1.4. Ticari ve askeri farklar

Ticari motorların görev şartları askeri motorlardan çok daha basittir. Bu fark F117-PW-100 askeri motoru ile bunun ticari eşleniği olan PW 2037 motorunun çalışma şartları karşılaştırıldığında ortaya çıkar. F117 bir uçuşunda dalış ve iniş gibi hareketler nedeniyle bir veya daha fazla çevrim yapar. F117'nin çevrim olarak birikimi PW 2037'nin çevrim / uçuş saatinin 2-3 katı kadardır. Bir sivil motoru askeri uygulamalara uyarlamak için tasarım değişikliklerine, daha fazla kontrol gereksinimine ve alternatif bakım yaklaşımlarına ihtiyaç duyulabilir. Bundan istisna olarak, bölgesel yük taşımacılığının yapıldığı motorlarda çevrim sayısı keşif veya deniz devriye uygulamalarında kullanılanlardan daha fazladır.

Ticari havacılık kuruluşları motorlarına, üreticiden satın alındığından itibaren özen gösterilmesini ister. Bu yüzden ticari uygulamalarda revizyon, tamir ve etkinlik kabiliyetleri ve bakım için kalite yaklaşımları büyük ölçüde farklılık gösterir. Ayrıca uçak ve motorun kullanıldığı coğrafi bölge ve şartlar da farklılık gösterir.

Farklı ülkeler tarafından kullanılan askeri motorların kullanımında ve bakımında ticari motorlarla benzerlikler olabileceği gibi bakım uygulamalarında farklılıklar görülebilir. Bu farklılıklar üreticilere ve motorun satıldığı ülkelerde motorun bakım koşullarına bağlıdır. Bakım kavramının oluşturulmasında motorun tasarlanıp üretildiği ana ülke ile motoru satın alan ülke arasında bilgi alışverişi kuraldır.

Alan olarak küçük ülkelerde daha zor görevler ortaya çıkar (ağır silahlarla daha düşük seviyeli uçuşlar). Motor tasarlandığı şartlardan daha zor şartlara maruz kaldığında parçaların dayanımı azalır ve bakım aralıkları kısalmır.

6.2.2. Teknoloji ve bakım şartlarına göre uçak motorlarının sınıflandırılması

Burada sadece motorların sahip oldukları özellikler özet olarak alınmıştır. Aşağıda verilen sınıflandırmada görüleceği üzere bakım şartları ile teknolojik ilerleme birbirine paralel bir şekilde gelişmiştir [17].

6.2.2.1. Birinci nesil motorlar

- Basit malzeme bilgileri kullanılır.
- Basit dizayn kuralları uygulanır (sadece diskler ve paleler).
- Parçalar ilkel çatlak kontrol yöntemleri (kızgın yağ ve tebeşir tozu) ile ilk çatlak tespitine kadar ömürlendirilir.
- Tasarım amaçlı olarak basit görev profilleri kullanılır.
- Uçuş süresince gaz kolu hareketi için tahmin yapılır.
- Uçuş ömrü saatle ölçülür.
- Uçuş ömrü, daha önce uçurulan motorların kontrollerine bağlı olarak arttırılır.

6.2.2.2. İkinci nesil motorlar

- Tasarım bilgileri ve kuralları birinci nesil ile aynıdır.
- Döndürme testi geliştirilmiştir.
- Magnetik kaydedici sistemler kullanılmıştır.
- Mümkün olan birçok uçak ve motor bilgileri kaydedilir.
- Uçuşun çok az bir kısmı takip edilir.
- Üretim sırasında yer analizleri yapılır.
- Az sayıda örnekleme bilgileri saatteki kullanım oranını belirlemede kullanılır.

6.2.2.3. Üçüncü nesil motorlar

- Bütün uçak ve motorlara izleme donanımı bağlanır.
- Ömür birimi ile yapılan ömürlendirme havacılık dokümanlarına uyması için saate çevrilir.
- Bilgiler çizelge üzerinde analiz edilir.
- Sonuçlar her uçuşun sonunda incelenir.
- Uçuş kullanım yönetimi motora göre değil parçaya göre yapılır.
- Her parçanın tek tek takibi normal olarak kabul edilir.
- Yeni motor özelliklerini belirlemede mevcut bilgiler kullanılır.
- Bazı "Kırılma Mekanîği" metotları kullanılır.

6.2.2.4. Dördüncü nesil motorlar

- Tasarımın tamamı malzeme bilgileri üzerine dayandırılır.
- Kırılma mekanîğine dayanan tasarımıdır. Bazı tasarım teknikleri geniş çapta kullanılır.
- Zamana bağlı gerilme modelleri geliştirilmiştir.
- Ömür, kabul edilebilir çatlak boyutu/derinliği oranının 2/3'ü kadardır.
- Kritik her parça takip edilir.
- Ömür saate göre değil belirlenmiş parametrelere (kalkış, iniş, tamgaz, A/B sayısına) göredir.
- Takip sistemi, motor tasarımı ve geliştirme süreçleri ile bütünleştirilmiştir.

6.2.3. Tasarım yapıldığı yıla göre sınıflandırma

1950'den beri servise alınan motorlar Çizelge 6.1'de verilmiştir. Gösterilen tarihler "servise girme tarihinden" daha önemli olan "tasarım başlama" tarihinden alınmıştır. 1990'lı yılların motorları ticari kaygılar ve işletmelere ait özel bilgiler dikkate

alınarak sınıflandırma yapılmamış ve bütün motorların şu an serviste oldukları dikkate alınmıştır. Bu da bazı motorların tasarlanandan daha uzun süre serviste kaldığını göstermektedir. Modern tasarım araçları kullanarak bazı parçaların ömürleri uzatılmıştır.

Çizelge 6.1. Tasarım yıllarına göre motor nesilleri [17]

1950'ler	1960'lar	1970'ler	1980'ler	1990'lar
J57	TF41	F100	F110	EJ200
J75	J85	F101	F100	F414
TF33	TF30	F108	F200	
Dart	TF34	CFM56	F220	
Conway	TF39	T700	F118	
T56	Spey	Makila	AE2100	
J69	Adour	TFE125	M88	
Tyne	Pegasus	RB199	RTM322	
J79	Gem	F404	F117	
T58	Turmo	M53	F119	
	Astazou	RD33	F120	
	ALF502	PT6	MTR390	
	Allison250			
	T64			
	ATAR			
	Larzac			
	Gnome			

Kullanılan kontrol teknolojisinin önemi ile bakım ve ekonomik sebeplerdeki farklılıklar Çizelge 6.2'nin doğmasına yol açmıştır.

Çizelge 6.2. Aynı anda gelişen teknoloji ve bakım felsefeleri [17]

	1950'ler	1960'lar	1970'ler	1980'ler	1990'lar
Kontrol	Mech	Hydro/Mech	Electro/Mech	Electro/Mech/Fadec	Fadec
İzleme	Manuel	Manuel, Bilgisayar ortamı	Bilgisayar ortamı	Bilgisayar ortamı	Bilgisayar ortamı
Bakım Politikası	Zor Ömür	Zor Ömür	Zor Ömür RFC	FM RFC Zor Ömür	FM RFC
İşletim politikası	Emniyet	Emniyet	Emniyet/Ekonomik	Emniyet/Ekonomik	Emniyet/Ekonomik
Nesil	1	1	2	3	4
Durum	Eski Motor		Yeni & Orta Yaşlı		Gelecek
RFC (Retirement For Cause) – Sebebe bağlı kal (Kullanım dışı)					
FM (Fracture Mechanics) – Kırılma Mekaniği					
FADEC (Full Authority Digital Engine Control) – Tam Otomatik Sayısal Motor Kontrol Sistemi					
DT (Damage Tolerance) – Hasar Toleransı					

1950-1989 yılları arasında tasarım yapılan motorlar kapsam içine alınmıştır. Bu bütün eski, orta yaşlı ve yeni motorların (kendi kullanım çevreleri dışında) tamamını kapsar.

6.3. Bakım Politikasını Etkileyen Destek Maliyetleri

Bakım stratejisi işletme ile destek ve işletme maliyetleri arasındaki genel ilişki oldukça basittir.

- Sistemin kazanç maliyeti yaklaşık olarak ömür çevrim fiyatlarının yarısına karşılık gelir.
- Geri kalan da bakım ve onarım maliyetlerini oluşturur.

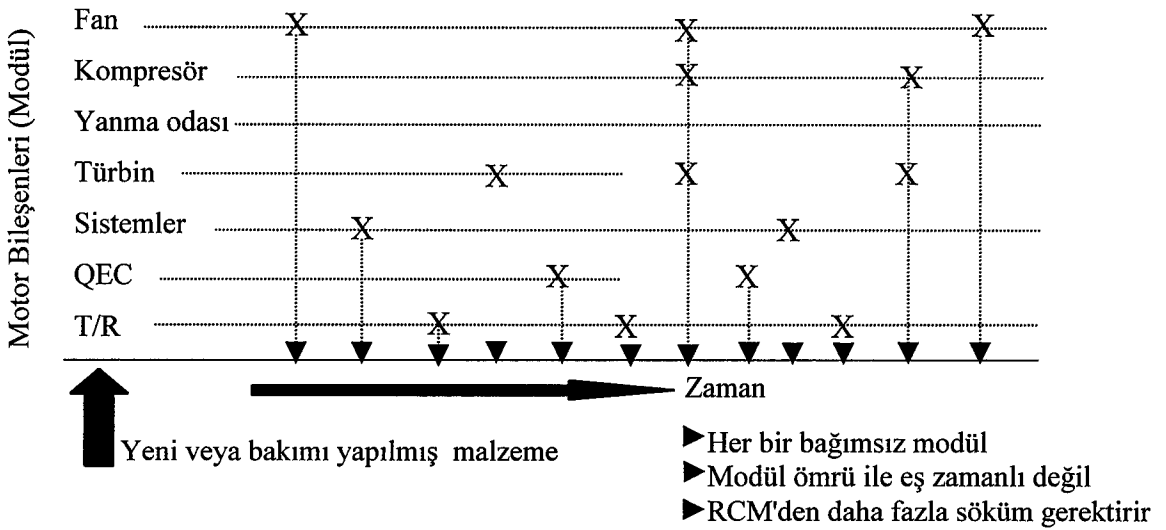
Fiyatları direkt ve indirekt olarak etkileyen birçok faktör vardır. Tasarım şartları kazanç maliyetlerini doğrudan etkiler ve özellikle uçuş saati bazında bakım ve onarım maliyetlerinde önemli bir faktördür. Doğal olarak bir makinanın güvenilirliği tasarımda başlar. Bakım uygulamaları ve politikaları bu güvenilirliği ilk bakım faaliyetleri başladığında etkiler. Şayet bakım sırasında performans dikkate alınmazsa, daha düşük güvenilirlik ve daha yüksek işletme maliyetleri kaçınılmaz bir sonuç olur. Bir bakım faaliyetini takiben performans geliştirilmesi, orijinal tasarımdaki bir hatanın düzeltilmesi anlamına gelir.

Bu durum atelyeye gelip değiştirilen parça ile işletme ve destek maliyetleri arasındaki optimal ilişki olarak görülür. A310 uçağına takılan CF6-80A ticari motorundaki tecrübeler göstermiştir ki, atelyeye geliş ve malzeme değişim maliyetlerinden daha çok uçuş saati başına maliyetleri azaltarak işletme ve bakım maliyetleri optimize edilir. Uygulamada bu bakımla eş zamanlı olarak, motoru aksesuarlarla birlikte bir ünite gibi servise almakla olur. Bu uygulama ile motor kanat üzerinde iken modül değişiklikleri yapmaya nazaran işletme ve bakım harcamalarında önemli ölçüde azalma sağlanmıştır.

Bu bakım felsefesi, tüm kullanıcılar açısından önemli olmuş ve motor üzerinde modüler bakım kavramı geliştirilmiştir. Eski motorlarda kullanıcılar motorun tamamını bakıma sokar ve değişmesi gereken üniteleri değiştirirken, yeni nesil motorlarda sadece

hasarlanabilecek parçaların bileşimini oluşturan modül bakıma girmektedir. Eşzamanlı bakıma giren modüllerden oluşan sistem en az maliyetle faaliyete geçirilmektedir. Dolayısıyla bakım ve işletim maliyeti düşmektedir.

İş durumu maliyet ilişkisi



Şekil 6.1. Modül ve motor ömrünün eş zamanlaması

Bu kazançlar, tipik olarak bir motorun çekirdek kısmındaki kompresör ve türbin bölgesinde yeralan eşzamanlı ömürlü parçalar ile performans limiti olan parçaların bakım programından türetilmiştir. Şekil 6.1, bakımın eş zamanlı olmadığı haldeki potansiyel motor sökümünü gösterir. Şekil 6.1'den kolaylıkla görülebileceği gibi modül bakım gereksinimleri (ömür limitleri veya performans) ile paralel bakım programı, işletme ve destek maliyetlerinin azaltılmasına yönelik büyük bir potansiyel sağlar [15].

6.4. Güvenilirlik Esaslı Bakım (GEB)

Güvenilirlik Esaslı Bakım (Reliability Centered Maintenance-RCM) fikri ilk olarak 1980'lerin başında ortaya çıkmıştır. Düşünce olarak her bir parçanın çalışma sonrası hatalarının incelenmesi esasına dayanır. Eğer hatalar kabul edilemez seviyede ise, parçaya bakım yapılır. Sonuç, bakım adam saatleri ve malzeme kullanımını

azaltırken emniyet ve çalışma hedeflerini karşılayan bir program olarak ortaya çıkar. GEB her hasar modunu değerlendiren mühendislik kararıdır ve matematiksel olarak bir sistemin veya motorun ömrü üzerindeki riski belirler.

Genelde GEB analiz prosesi, parçanın yapısal veya fonksiyonel olarak önemli olup olmadığının belirlenmesi ile başlar. Her bir parçanın sınıflandırılması için ayrı GEB karar ağacı vardır. Bu analiz, normal olarak hata türü ve etkileri analizinin bir parçası olarak yapılır. İkinci adım, hasarın öneminin belirlenmesidir. Hasar önemleri şu şekilde sınıflandırılır:

- Güvenlik,
- Ekonomik / bakımsal,
- Güvenlik dışı gizli hasarlar,
- Gizli emniyet,

Hasarın önemi belirlendikten sonra, müteakip hasarlardan kaçınmak için ve uygulanabilirliğin değerlendirilmesi amacı ile çalışmalar yapılır. Bunların arasında en uygun olanı seçilir. Maliyet – kazanç analizi, eski ve yeni tasarımlara ait yeni parçaların veya tamir edilmiş / yeniden işlenmiş parçaların optimum karışımını belirlenmesine yarar. Bakım seçenekleri şunlardır:

- Hiçbir şey yapma,
- Yeniden tasarla,
- Koruyucu bakım çalışmaları yap.

Koruyucu bakım çalışmaları, servis / yağlama, şartlı keşif, belirli zamanda işleme veya kal ve söz edilen seçeneklerin birleşimini kapsar. GEB uygulandıktan sonra, Amerikan Deniz Kuvvetleri motor türbini zaman ömürlü parçaları yapısal olarak önemli parçalar adı altında sınıflandırılmıştır. GEB ile ilgili daha detaylı bilgi ATA 143

ve MIL-STD-2173'te bulunabilir. Herhangi bir motor programına GEB işlemi uygulanmadan önce bu dokümanların gözden geçirilmesi gerekir [15].

6.5. Ömür Yönetimi Planı

Her bir motor tipi, modeli, serisi bu motorlara uygun proses için temel oluşturan bir ömür yönetimi planından fayda sağlayabilir. Tipik ömür yönetim planları, ömrü boyunca bir motorun tasarım, geliştirme, üretim, kullanım ve onarım veya modifikasyon işlemlerini bütünleştiren mantıksal gelişim hareketi ve bir yapı sağlar. Böyle bir plan, geliştirmenin hemen başlangıcından sonra başlar ve aşağıdakileri içerir:

- Tasarım bakım kavramı,
- Birlik bakım kavramı,
- Fabrika bakım yeteneği,
- Güvenilirlik Esaslı Bakım (GEB) analiz sonuçları,
- İlk ömür tahminleri,
- Ömür araştırma planları,
- Yedek gereksinim süreci (Spares Requirement Process).

Ömür yönetimi için birbiri ile yarışan iki yaklaşım vardır. Bunlar emniyetli ömür yaklaşımı ve hasar tolerans yaklaşımıdır [15].

a) Emniyetli ömür yaklaşımı kullanarak saat ile tanımlanan ömür sıklıkla "katı zaman" (hard time) veya "katı ömür" (hard life) olarak isimlendirilir. Bu, nominal bir parça için verilen tahmini ömür ve malzeme özelliklerine göre hesaplanan veya kanıtlanmış bir ömre dayanır. En az malzeme özellikli parça ile en fazla çalışma sağlayacak ve emniyetli bir toleransa izin veren test ömrü ve malzeme özelliklerine sıkı faktörler (conservative factors) uygulanır.

b) Hasar tolerans yaklaşımı dahilinde de iki yöntem vardır. Standart ENSIP-Motor Yapısal Bütünlük Programı (ENgine Structural Integrity Program) ve Sebebe Bağlı Kal (Retirement For Cause).

1. Hasar tolerans yaklaşımı, belirlenebilir hata ve kopma arasında olabildiğince uzun çatlak büyüme (kalan ömür) periyoduna sahip olarak tasarlanan parçayı esas alır. Bu periyodik kontrolün yapılması gereken aralıktır. Bu aralıkta komponent hala faaldir (servise verilebilir) ve hasar limitini aşan hatalara sahip komponentler kal edilir. Standart ENSIP metodu kontrol aralıklarını belirler fakat yukarıda açıklandığı gibi en son kal ömrü hala "kesin zaman" (hard time) ömürdür.

2. "Sebebe Bağlı Kal" (Retirement For Cause) yöntemi, kontrol aralıkları oluşturmak için hasar tolerans analizini içerir. Bununla birlikte, kal ömrü bir hata bulana kadar devam eden kontroller esasına dayanır veya parça ekonomik nedenlerle kal olur. Bir parçanın ömründe bazı noktalarda, "katı zaman" (hard time) esasına göre bir parçanın değişiminde ekonomik sebepler ön plana çıkar.

İki tip hata türü mevcuttur ve ayrı ayrı düşünülür. Bunlar yüzey çatlakları ve iç (yüzey altı) hatalardır. Yüzey çatlakları NDI (Tahribatsız Kontrol - Non Destructive Inspection) yöntemleri ile rahatlıkla tespit edilirken yüzey altı hataları hem NDI hem de farklı kontrol yöntemleri ile belirlenebilir. Üretim süreçleri ve hata azaltma teknikleri, (örneğin sıcak eşdeğer statik basınç gibi) pale ve disklerdeki dahili boşlukları (çatlaklara yol açan) tespit etmek için temel kontrol yöntemleridir.

6.5.1. Emniyetli ömür

Motor tasarımcıları, çalışma emniyetini tehdit edebilen parçalar için emniyetli ömrü tespit etmek amacıyla çok fazla zaman harcarlar. Ömür limitlerini tespit etmede başvurulan ömür tespit etme yöntemi parçanın tipi ve hasarın şekline göre değişir. Modern gaz türbinlerinde diskler, spacerler normalde LCF (Low Cycle Fatigue),

sürünme ve aşırı hız nedeniyle oluşan patlamaya (burst) dayanacak şekilde tasarlanır. Bu tasarım motorun hem sıcak hem de soğuk kısımlarına uygulanır ve böylece daha yüksek motor basınç oranları ve kompresör çıkış / yanma odası çıkış sıcaklık yükselmeleri sağlanmış olur. Türbin paleleri ve kanatçıklar termomekanik yorulma ve yüksek çevrimli yorulmanın yanı sıra sürünmeye de dayanacak şekilde tasarlanırlar.

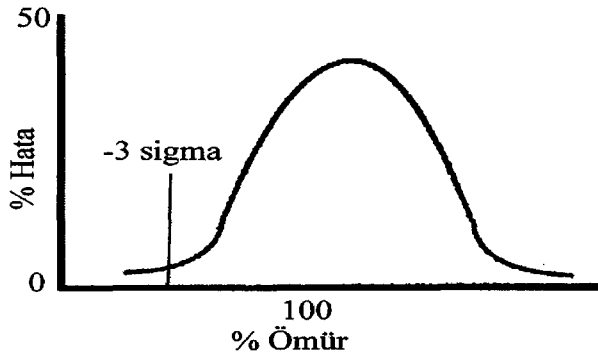
Bu parçalar için ömür limitleri, başlangıçta çalışma sırasında oluşan hasar birikme oranları tahminine dayanır. Limitler daha sonra kullanıcıların tecrübelerine göre güncelleştirilir. Diskler için emniyetli ömür limitlerini belirlemede en yaygın ömür tespit etme işlemi "zaman veya çevrimlere bağlı olarak çatlak oluşumu" kriteridir. Özel olarak, türbin paleleri ve kanatçıkları nadiren ömürlüdürler. Çünkü, kullanıcıların muhtelif kullanma şartları olması ve metalurjik yönden karmaşık malzeme sistemlerinin çalışma sırasındaki davranışlarının tahmini zordur. Bundan daha başka parçaların kaplamalı olması halinde durum daha da karmaşık hale gelir. Kaplama nedeniyle ana malzeme ile kaplama arasında hasarın tespiti zordur. Bazen "şartlı ömür" (life on-condition) yaklaşımı kullanılır. Örneğin, pale hava akış yüzeyinin sürünme uzaması veya bükülmesi (untwist) ölçülür ve çarpılma (distorsion) limitleri elden çıkarma-kal limitleri olarak kullanılır.

Türbin ve kompresör diskleri gibi döner parçalar genellikle LCF hasar birikimi nedeniyle ömür limitlidirler. Bu parçalar için en yaygın ömür tespit yöntemi "çevrim-çatlak başlama – cycles to crack-initiation" kriteridir [18].

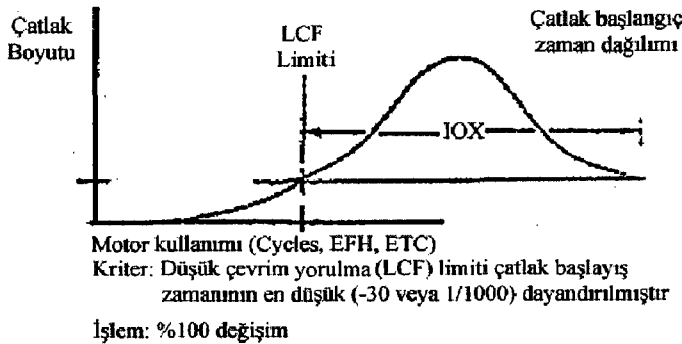
Minimum ömür kapasitesi, yapılan testlere benzetilen çalışma şartları için istatistiksel yöntemle belirlenir. Bu normal olarak standart kupon testi ve döndürme testleri ile parça doğrulamasını içerir. Genellikle istatistiksel olarak 1000 parçada 1'den daha fazla hataya izin verilmemektedir. Tipik olarak seçilen tespit edilebilir çatlak ise 0.8mm uzunluğundadır. Yani %95 güvenilirlik için 1000'de 1'den daha az oranda 0.8mm'den daha büyük yüzey çatlağına izin verilmektedir. Yaklaşım, disklerin üzerinde hala önemli miktarda ömür varken kal edilmesini gerektirmesi nedeniyle eleştirilir.

Çevrime bağlı çatlak oluşumu ret kriteri olarak döner parçaların ömrünü belirlemede kullanıldığı zaman iki ana konu vardır. Bunlardan birincisi parçaların %99.9'u herhangi bir tespit edilebilir hasar oluşmadan kal edilirler. Muhtemelen bu parçalar 0.8mm'den daha büyük çatlağı tolere edebilecek kapasiteye sahip olabilirler.

Şekil 6.2 ve 6.3'de görülebileceği üzere, ilk parça kal ömrüne ulaştığı zaman çok sayıda parçada potansiyel olarak hala faydalı ömür kalacaktır. Ekonomik yönden düşünüldüğünde en düşük ömürlü değiştirilen parçalar yerine her bir parçanın ömrünün kullanılması önerilmektedir. Aynı şekilde, sadece parça reddine dayanan ve üretimi ve karşılanması uzun süren parçaların kontrol edilmesine tamamen bağlı olmak bir uçuşu sağlayabilmek için hazır olmayı gerektirir. Maliyet yönünden etkin bakım için parçaların ömür kullanımı ve mevcudiyeti arasında bir denge sağlanması gerekir. Halbuki burada, parça henüz kullanım ömrünü doldurmadan servisten alınmaktadır.



Şekil 6.2. İlk komponent kal edildiğinde kalan uçuş ömrü



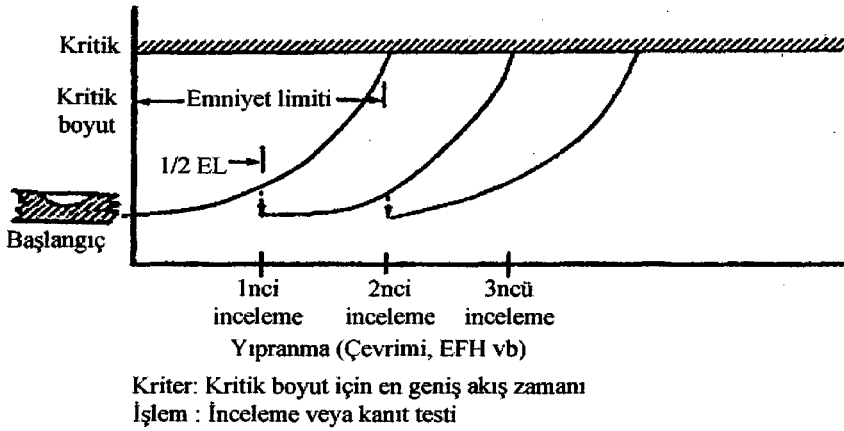
Şekil 6.3. Emniyetli ömür yaklaşımı

Her bir parçanın hesaba katılması ve her birinin tek tek kullanım ömrünün izlenmesi sağlanmadıkça parçaların birlikte uçuşunda emniyet söz konusu olamaz ve maksimum ömür sağlanamaz.

6.5.2. Hasar toleransı (Kırılma Mekaniği)

Döner parçaların ömür potansiyelinin tümünü kullanmayı sağlamak için alternatif ömür yönetimine ait izlenecek yöntem önerilir. Bu yöntem Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Bunlar hasar toleransı ve kırılma mekanikleri prensiplerinin uygulanmasına dayanır. Bu alternatif ömür yönetimi işlemlerinin temelindeki felsefe parçanın çatlak büyümesi sırasında düzenli olarak yapılan kontrollerle güvenilirliğinin izlenmesine dayanır. En temelde, bu alternatif hasar toleransı Şartlı Ömür (Life On Condition), Sebebe Bağlı Kal (Retirement For Cause) veya sadece Kırılma Mekaniği (Fracture Mechanics) olarak bilinir ve:

- Bir parçanın kritik kırılma bölgelerinde, parçayı incelemek için kullanılan Tahribatsız Kontrol (NDI) tekniğinin tespit limitlerinin altındaki bir büyüklükte çatlak olduğu varsayılır,
- Parça ömründe bazı noktalarda bir çatlağın başlayabileceği kabul edilir ve düzenli kontroller başlatılır,
- Daha sonra çatlak başlar ve servis boyunca çatlak büyür ve doğrusal elastik kırılma mekaniği ile veya diğer kabul edilebilir yöntemlerle tahmin edilebilir.
- Kritik bir ölçünün üzerindeki tüm çatlaklar tespit edilip izlenebilecektir.
- Çatlaklar önceden tespit edilen ölçüye ulaştığında parçalar kal edilecektir.



Şekil 6.4. Hasar tolerans yaklaşımı

Bir takım işlemlere dayanan hasar toleransının başarılı uygulaması bunu destekleyen teknolojilere bağlıdır. Bu teknolojiler tahribatsız muayeneler, test kuponları ile parçaların mekanik testleri, yapısal analizler ve görev profil analizleri ile parçaların durumunun izlenmesini içerir.

ABD Hava Kuvvetleri için Motor Yapısal Bütünlük Programı (ENSIP) [19] bu faktörleri dikkate alır. Çünkü;

- Malzemenin mühendislik yapısını kontrol eder,
- Asıl hata dağılımını kabul eder,
- Tasarım sürecine dahil eder,
- Bu hatalara neden olan süreçlerin kontrolünü temin etmek için üretimde kontrol seviyesi sağlar,
- Her bir parçanın kalan ömrünü belirler.

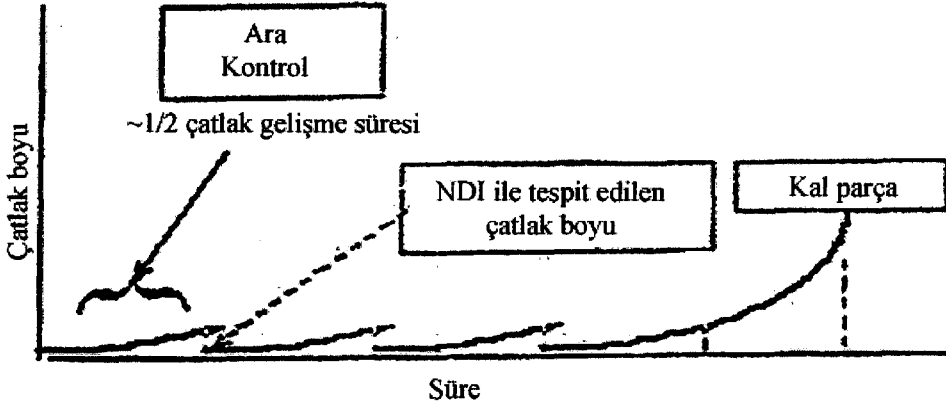
6.5.2.1. Tahribatsız kontrol

Servise verilebilir parçaların kontrolü ve yeniden kullanımı esasına dayanan ömür yönetiminin temel bileşeni günümüzde mevcut olan tahribatsız kontrol

süreçlerinde uygun olanını kullanmaktır. Eddy akım ve floresant penetrant yöntemler, sıkça kullanılan yöntemlerdir. Ultrasonografi, X-ray, magnetik demir tozu ve nötron radyoloji vb yöntemlerin sınırlı uygulamaları vardır. Şekil 6.5'de görüleceği üzere ilk hasar büyüklüğü üretildiği şartlar için belirlenmiştir. Hatasız işlem aralığı ya gerçek başlangıç malzeme hata dağılımı (probabilistic) veya kabul edilen hata dağılımı (deterministic) olarak belirlenir. Birçok malzeme ve süreçler için hata dağılımları kesilen test numunelerinden belirlenir ve mikroskop ile analiz edilir. Kabul edilen ilk hata tipik olarak geçmiş gözlemlere dayalı bir birinci kademe taşlama ölçüsünde yapılır [20].

Malzemenin çatlak büyüme karakteristikleri ve yüklemeye dayalı olarak bir çatlak büyüme tahmini daha sonra hesaplanır. Daha sonra da bir hatayı belirleyen ve bunun emniyetli bir şekilde büyüme aralığını (çatlak büyüme ömrünün yarısı) izleyen NDI yöntemine izin veren aralık belirlenir. Daha sonraki kontroller böyle bir hatanın sürekliliğini belirler. Eğer yoksa, parça bir sonraki aralığa kadar kullanılmak üzere faal verilir. Eğer kontrolde hata yakalanırsa parça kal edilir.

Herhangi bir kontrol sürecinin bir sonlu çatlak bulma olasılığı vardır ve böylece bir çatlağı kaçırmada da sonlu şans vardır. Civata delikleri, broşlanmış yerler, kirişler, vb. kritik sahalar için etkin kontrol süreçleri sağlamada hata bulma olasılığını (POD-Probability of Detection) saptamak esastır. Bu yaklaşımın ana prensibi en küçük hatayı bulmaktan çok kaçırabilecek en büyük çatlak üzerine kurulmuştur. Kontrol yöntemi bu prensip göz önünde bulundurularak belirlenir. Eddy akım yöntemi küçük hataları tespit etmek için kullanılan bir yöntem olup bu alanlar yüksek kalıcı basma gerilmelerinin olduğu yerlerdir. Uygulamada kullanılan diğer metotlar ise ultrasonik ve fluorescent penetrant kontroldür. Güvenilirlik Esaslı Bakım (Reliability Centered Maintenance-RCM) süreci, hata olasılığı, bunların ilerleme oranı, sonuçlarının şiddeti, hata tespit ihtimali ve gerekli kontrol aralıkları arasındaki bağlantıları belirler.



Şekil 6.5. Hata büyümesinin izlenmesi

Eğer "kal için sebep" (retirement for cause) kullanılacaksa o zaman emniyeti sağlamak için ilave ve daha fazla karmaşık ultrasonik ve eddy akım kontroller gerekli olacaktır. Son olarak, emniyeti en üst seviyeye çıkarmak için "kesin zaman" (hard time) ve "kal için sebep" kavramlarını birleştirmek önemlidir. Bunun anlamı, bütün parçalar çatlığa bağlı ömürden bağımsız olarak kal edilecekleri "kesin zaman" (hard time)ları vardır. Çoğu zaman gerçek ömür tüketilmeden mevcudun belli bir yüzdesi kal edilir. Burada parçaların değiştirilmesi için üretim zamanı sağlama ve servisteki herhangi bir kritik parça hataları hariç tutulur. Weibull analizi bu noktada uçuşun %10'unun kal edildiğini kabaca gösterir [19].

6.5.2.2. Hasar toleransı için kontrol gereksinimleri

MIL-STD-1783 [19] veya ENSIP kritik parçaların tahribatsız kontrol değerlendirmeleri;

- Üretim,
- Bakım,
- Hat kontrolleri sırasında yapılması gerektiğini gösterir.

Kontrolü dikkate alarak tasarım yapma ve emniyet yönünden kritik bütün parçaların kontrol edilemeyen servis periyodunu sınırlama ENSIP sürecinin parçalarıdır. MIL-STD-5007E altındaki tüm dönen parçalar ve FAR 33 altındaki dönen diskler, shaft'lar ve spacer'ler ile kıyaslandığında emniyet ve görev yönünden kritik bütün parçalar özel kontrollere tabi tutulur.

Ultrasonik fluorescent penetrant ve eddy akım ile kontrol metotları üç farklı bakım seviyesinde uygulanır. Bilinen standartlara göre yapılan testler sonucu emniyet limitlerini tanımlamada kullanılan tahribatsız kontrol değerlendirmesi (NDE), ENSIP altında yapılır. Her bir kontrol sahasında kontrol metotlarının doğrulanması bir hata tespiti olasılığı (probability of detection-POD) eğrisi yaratır.

FPI yöntemi, normal olarak 0.035 inç derinliğinde 0.070 inç uzunluğunda hatayı bulabilir ve 0.020 inç derinliğinde 0.040 inç uzunluğunda çatlak ise odaklanmış kontrol prosedürü ile bulma kapasitesine sahiptir.

6.6. Parçaların Ömür Takibi

Kritik parçaların izlenmesi için NATO ülkeleri dahilinde kullanılan birçok yöntem vardır. En basit yöntem takılan parçaların çalışma saatlerinin kağıt üzerinde kaydının yapılmasıdır. Parçaların kalan ömrü bir bütün olarak kaydedilir ve motor çalıştıkça periyodik aralıklarla değiştirilir. Belirtilen ömüre ulaşıldığında motor sökülür ve parça değiştirilerek kal edilir.

Daha karmaşık fakat hala kullanılan yöntem çalışma zamanının görev ve çevrime dönüştürülerek toplam sabit bir sayı elde edilmektedir. Dönüştürme faktörleri bazen beta (β) olarak bilinir. Sonuçta bulunan çalışma zamanıdır.

Bununla birlikte daha karmaşık yöntem gövde üzerine takılı bir ölçüm cihazı ile belli bir sıcaklık bandında çevrim ve zamanı kaydetmektedir. Bu bilgi daha sonra yerdeki bir bilgisayar sistemine yüklenir. İzlenen parçaların kalan ömürleri kaydedilir. Yer bilgisayarında bilginin açılması çevrimlerin kaybolmasına neden olabilir.

Daha ileri aşamada, bilginin bir hacimde (bulk) kaydedilip analiz için yer bilgisayarında açılmasıdır (download). Bu gerektiğinde tüm üreticilerin tasarım modelinin analizini yapmaya olanak sağlar. Bu teknik olarak daha hassas bir yaklaşım sağlar.

Son aşama konfigürasyon kayıtlarını sağlayarak ve uçak üzerindeki bilgisayar sistemi sayesinde yaklaşık gerçek zamanda kayıtların güncelleştirilmesi sağlanır. Bu periyodik olarak yer bilgisayarlarına yüklenir ve kullanım planlaması ile birlikte bilgi kaybı da önlenmiş olur.

Bu sistemlerin hedefi uçuş sırasında hasar görmeden önce ömür limitine sahip parçaların kal edilmesini sağlamaktır. Ancak bu çalışmanın maliyetleri önemli derecede düşürdüğü sonucu açık değildir. Bununla birlikte çalışma risklerinde önemli derecede avantaj sağlar.

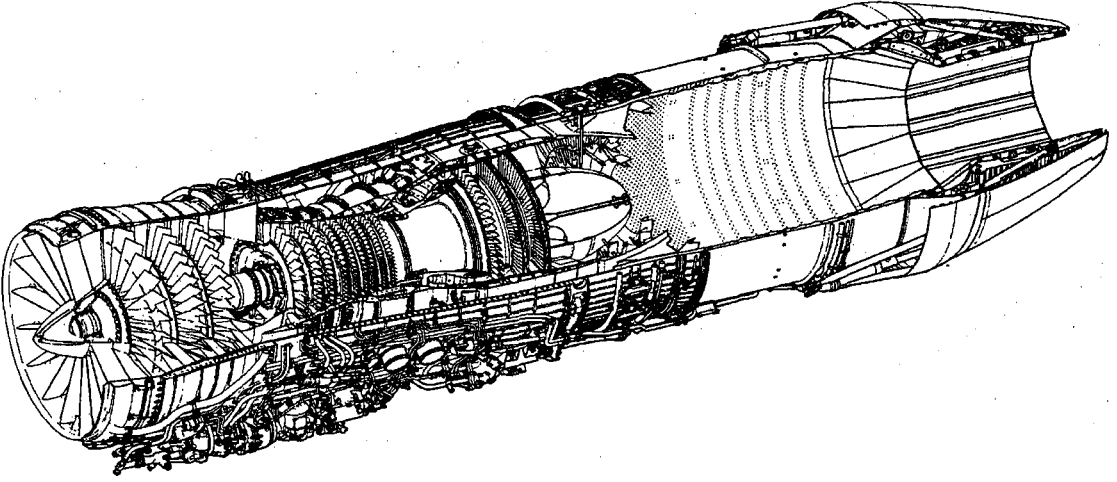
7. SON NESİL BİR UÇAK MOTORUNUN BELİRLENEN ÇALIŞMA KOŞULLARINDA GÜVENİLİRLİĞİNİN BULUNMASI

7.1. Genel

Önceki bölümlerde uçak motorlarındaki gelişmeler ve bu gelişmelere bağlı olarak bunların bakım kavramlarındaki değişimler ele alınmıştır. Görüldüğü üzere son nesil uçak motorlarında hatanın başlamasından ziyade hatanın gelişmesi izlenmekte ve hatanın neden olabileceği bir hasardan önce parçanın veya parçaların oluşturduğu sistemin elden çıkartılması sağlanmaktadır. Bu ise olabildiği ölçüde parçadan en fazla yararlanmayı sağlamaktadır. Dolayısıyla bakım maliyetlerinin en aza düşürülmesi hedeflenmektedir.

Yapılan bu çalışmalarda, uçak motorlarının döner parçalarının en fazla hasarlanabilecek ve elden çıkartılabilecek parçalar olduğu kabul edilmektedir. Özellikle askeri uçak motorlarında uçuş sırasında sürekli motor devrinin değişmesi bu sonucu yaratmakta ve hataların döner parçalardan oluşacağı varsayılmaktadır.

Ancak Türk Hava Kuvvetleri envanterindeki F-16 uçaklarının güç kaynağı olan F110-GE-100 serisi motorlarda hasarlanmalar, üstlenmiş olduğu görev şekli nedeniyle döner parçalarda değil, duran parçalarda ve özellikle sıcak kısım duran parçalarında oluşmaktadır. Bakım standartlarının Amerikan Hava Kuvvetlerinden aynen alınması nedeniyle motorların bakım saatlerinden daha erken olarak görevden alınmasını gerektirmekte, böylelikle bakım ve işletim maliyetleri artarken, parça değişim tahmininde yanılgılara yol açmaktadır. Bu çalışmada, Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F110-GE-100 motorlarının görev koşullarına göre güvenilirlikleri bulunarak söz konusu motorların en ekonomik bakım aralığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.1 – F110-GE-100 Motoru [21]

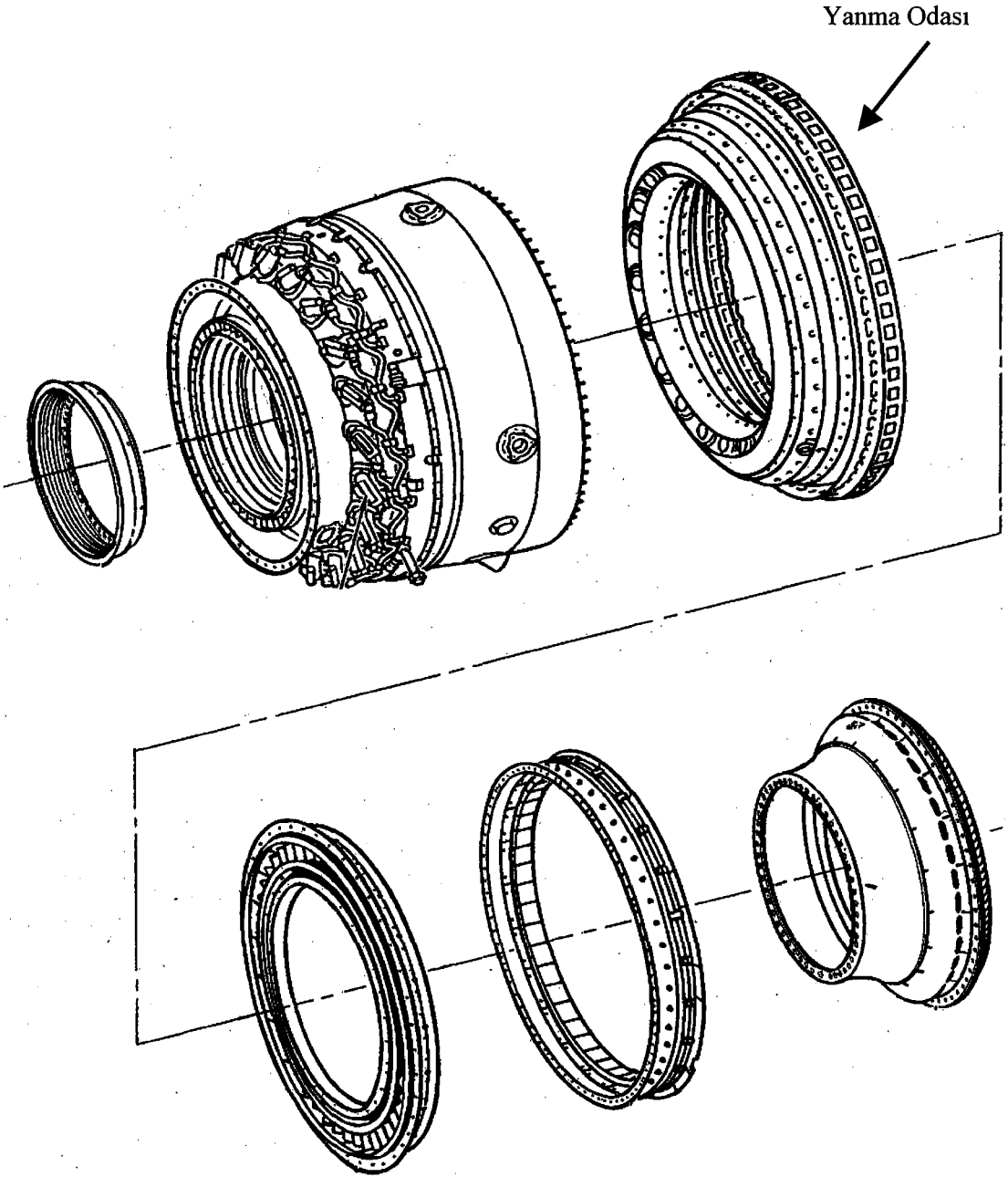
7.2. Sorunun Tanımı

F-16 uçaklarının motorlarında kullanılan ve üzerinde çalışılan F110-GE-100 motoru Amerikan Hava Kuvvetleri standartlarına göre TAC (Total Accumulated Cycle-Toplam Biriken Çevrim) olarak adlandırılan ve tamamen gaz kolunun hareketine bağlı bir uçuş birimiyle değerlendirilmektedir. Yapılan istatistiklere göre 1 uçuş saatinin, 1,8 TAC'a karşılık geldiği kabul edilmektedir. Amerikan Hava Kuvvetlerinde olduğu gibi, Türk Hava Kuvvetlerinde de F110-GE-100 motoru 3000 TAC ve katlarında (6000, 9000,) döner parçaların kontrolü yapılmakta, bu arada duran parçalar da kontrole tabi tutulmaktadır. Ancak sıcak kısım duran parçalarının bu sürenin öncesinde hasarlanması nedeniyle motorlar normal bakım periyotlarından önce sökülerek bu parçaların değiştirilmesi yoluna gidilmekte, bu ise motorun plansız görevden alınmasına yol açmaktadır.

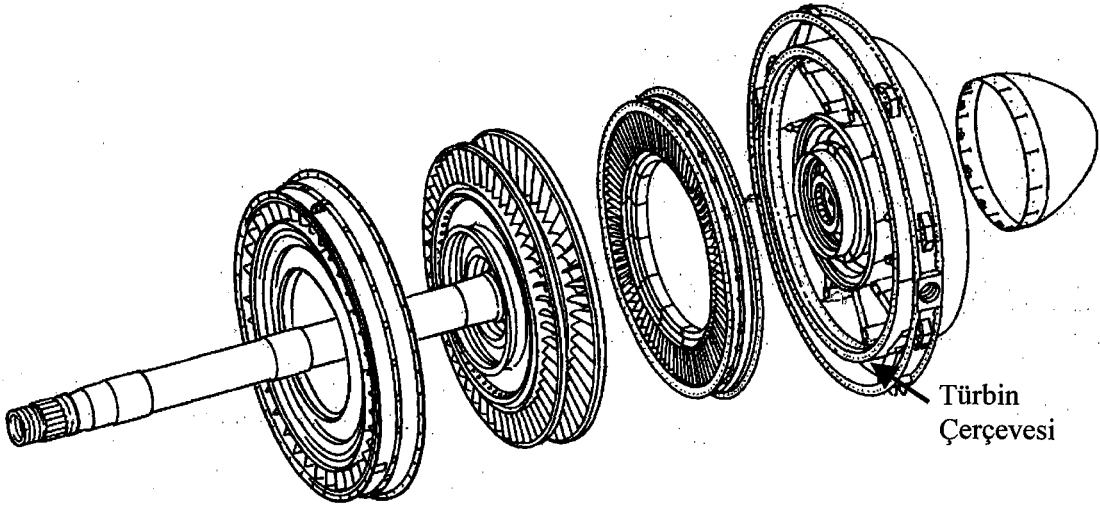
7.3. Güvenilirlik Çözümlemesi

F110-GE-100 motorlarının Türk Hava Kuvvetlerindeki görev koşullarına göre güvenilirliğin bulunması ve uygun bakım periyotlarının tespiti amacıyla bu motorların

en sık hasarlanan parçaları olan ve sıcak bölgede yer alan Yanma Odası (Şekil 7.2) ve Türbin Çerçevesi (Frame) (Şekil 7.3) üniteleri ele alınmıştır.



Şekil 7.2 – Yanma odası bileşenleri



Şekil 7.3 – Türbin çerçeve bileşenleri

Söz konusu bu parçaların hasarlanma süreleri tespit edilmiş olup Yanma odası için 54 veri (EK-3A), aynı şekilde Türbin Çerçevesi için 54 veri (EK-3B) veri elde edilmiştir. Söz konusu veriler F-16 kullanıcı birliklerinden iki yıllık süre içinde alınmıştır.

Her iki parça, seri bir şekilde çalışmaları nedeniyle seri bir sistem oluşturmaktadır.

7.3.1. Hata türlerinin irdelenmesi

Bu tür motorlar servise verilmeden önce birçok deneme ve testlerden geçtiği için erken arıza dönemine bu motorlarda rastlanmamaktadır. Şans dönemi arızası ise genellikle kullanma veya malzeme hatası nedeniyle oluşacağı için bu tür arızaları da havacılık sanayiinde kalite standartlarının çok sıkı olması ve bu yöntemleri kullanan personel eğitimlerinin yeterli olması nedeniyle bu tip motorlarda rastlanmayacağı veya rastlanırsa dahi bunun ihmal edilecek seviyede olduğu kabul edilecektir. Bu durumda

havacılık sanayiinde kullanılan tüm aygıt ve cihazlardaki hataların kullanım sırasında aşınma arızaları döneminde meydana geleceği değerlendirilmektedir.

Bu döneme ait hataların istatistiksel dağılımı genelde Normal veya Weibull dağılımına uymaktadır. Weibull dağılımı, esnek olması ve hata analizlerinde sıkça kullanılması nedeniyle hataların analizinde üstünlük sağlamaktadır [3].

7.3.2. Hataların istatistiksel analizi

Örnek birimlerin parametreleri belirli olan bir yığından geldiği kabul edilir. Böyle durumlarda örnek birimleri önce seçilir ve sonra bu örnek birimlerinin sözü edilen yığından gelip gelmediği konusunda bir test yapılır. Bu testlerin temel özelliği örnekteki bilginin varsayımına uyup uymadığına karar vermektir. Bu testlere kısaca uyum iyiliği testleri denilmektedir. Uyum iyiliği problemleri için birçok teknik önerilmiştir. Bunlar içerisinde en yaygın olarak kullanılan Ki-kare uyum iyiliği testi ve Kolmogorov Smirnov testidir [22]. Bu çalışmada daha sağlıklı sonuç vermesi ve bilgisayar programlarından yararlanılması açısından Ki-kare uyum iyiliği testi kullanılmıştır.

Ki-kare uyum iyiliği testinin temel özelliği, gözlenen frekanslar ile örnek birimlerinin belirli bir yığından geldiğini belirten yokluk hipotezi doğru iken beklenen frekanslar arasındaki farkların büyüklerine göre test istatistiğinin değerinin belirlenmesidir.

Ki-kare uyum iyiliği testinde yokluk ve karşıt hipotezleri genel olarak şöyledir:

H_0 : Örnek belirli bir dağılıma sahip olan yığından seçilmiştir.

H_1 : Örnek yokluk hipotezinde belirtilen dağılımdan seçilmemiştir.

Yokluk hipotezi doğru ise, yığından seçilen örneklerin yığının karakteristiklerinin yansıtması beklenir. Örnek birimleri sözü edilen dağılımdan seçilmiş iseler, sınıfların herbirinden beklenen frekanslar ile gözlenen frekansların birbirine eşit yada yakın olması beklenir. Beklenen frekanslar ile gözlenen frekanslar arası uyum ölçüsü test istatistiğini belirler. Test istatistiğinin değeri her sınıf için gözlenen frekans ile beklenen frekansın farkının karesini alıp sonra beklenen frekansa böler ve tüm sınıflar için elde edilen değerleri toplayarak elde edilir. Ki-kare istatistiği;

G_i : i-inci sınıfa ait gerçekleşen frekans

B_i : i-inci sınıfa ait beklenen frekans

olmak üzere,

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^c \left[\frac{(G_i - B_i)^2}{B_i} \right] \quad (7.1)$$

eşitliği elde edilir.

Yokluk hipotezi doğru iken yukarıdaki gibi tanımlanan istatistik, yaklaşık olarak c-1 serbestlik dereceli ki-kare dağılımına sahiptir. Test işleminde karar şu şekilde verilir; Ki-karenin hesaplanan değeri α anlamlılık düzeyinde ve c-1 serbestlik derecesinde ki-karenin tablo değerinden büyükse, yokluk hipotezi red olunur.

$$\chi_{c-1}^2 > \chi_{1-\alpha, c-1}^2 \quad \text{ise } H_0 \text{ red edilir.}$$

$$\chi_{c-1}^2 \leq \chi_{1-\alpha, c-1}^2 \quad \text{ise } H_0 \text{ red edilmez.}$$

$$\sum_{i=1}^c \left[\frac{(G_i - B_i)^2}{B_i} \right] \quad \text{olarak tanımlanan istatistiğin yaklaşık olarak c-1 serbestlik}$$

dereceli ki-kare dağılımına sahip olması için en az 30 olması yeterli kabul edilir. Ancak hiçbir sınıfta beklenen frekansın 1'den küçük olmasına izin verilmemelidir. Bu durum

ortaya çıkarsa bazı sınıflar birleştirilebilir. Bu işlemden sonra serbestlik derecesinin değişeceği açıktır [23].

Bu bilgiler altında F110-GE-100 motorlarının en çok arızalanan ve bu nedenle değiştirilen parçaları olan Yanma Odası ve Türbin Çerçevesi (Frame) örnek birimleri için ayrı ayrı uyum iyiliği testi yapılacak olup bu iki parça bir seri sistem olarak düşünülmüştür. İstatistiksel analiz çalışmalarında Anadolu Üniversitesi İstatistik Bölümü'nde hazırlanan bilgisayar programından yararlanılmıştır.

7.3.2.1. Yanma odası arızalarının istatistiksel analizi

Hasarlı Yanma Odalarına ilişkin sıralı 54 gözlem değeri EK-4'te verilmiştir.

Eldeki veriler ve bu verilerin özelliği göz önüne alındığında Weibull dağılımının bu verileri temsil edebileceği görülmüştür. EK-4'deki işlemler sonucunda dağılıma ilişkin parametreler,

η (ölçek parametresi) = 1337,031

β (şekil parametresi) = 2,07955 elde edilmiştir.

Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu,

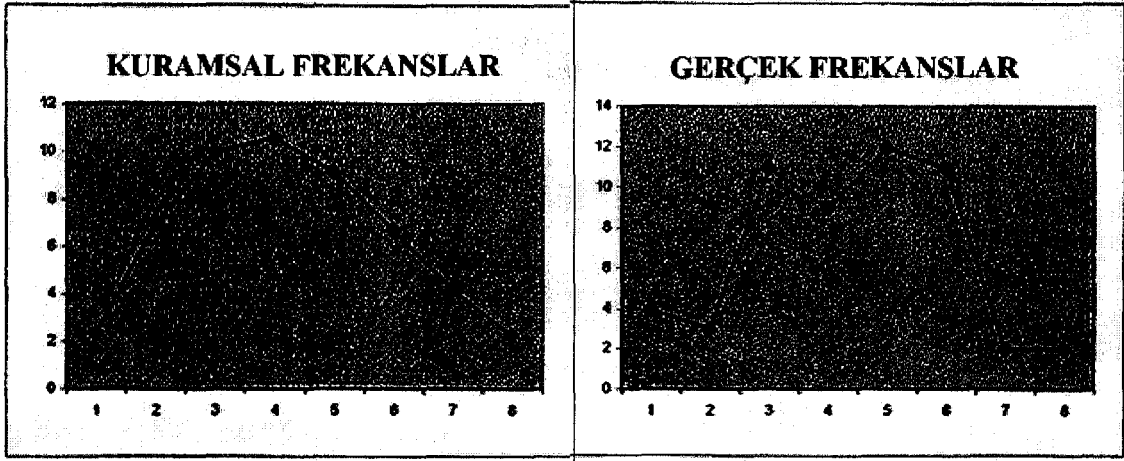
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; t > 0, \eta > 0, \beta > 0$$

$$f(t) = 0 \quad ; \text{diğer durumlarda}$$

olduğuna göre, Yanma Odasının hata yoğunluk fonksiyonu

$$f(t) = \frac{2,07955}{(1337,031)^{2,07955}} t^{1,07955} e^{-\left(\frac{t}{1337,031}\right)^{2,07955}} \quad \text{olarak elde edilmiştir.}$$

Şekil 7.4'de Gerçek frekanslar ile Kuramsal frekansların dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 7.4 – Yanma Odası Gerçek ve Kuramsal Frekansları

7.3.2.2. Türbin çerçevesi arızalarının istatistiksel analizi

Yanma Odası için yapılan çalışmalar Türbin Çerçevesi için de yapılmıştır. Buna göre Türbin Çerçevesi için elde edilen sıralı veri kümesi EK-5'te verilmiştir.

Eldeki veriler ve bu verilerin özelliği göz önüne alındığında Weibull dağılımının bu verileri de temsil edebileceği görülmüştür. EK-5'deki işlemler sonucunda, ilgili parametreler;

$$\eta \text{ (ölçek parametresi)} = 1460,4$$

$$\beta \text{ (şekil parametresi)} = 3,2637 \text{ olarak bulunmuştur.}$$

Bağlı olarak weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu ise;

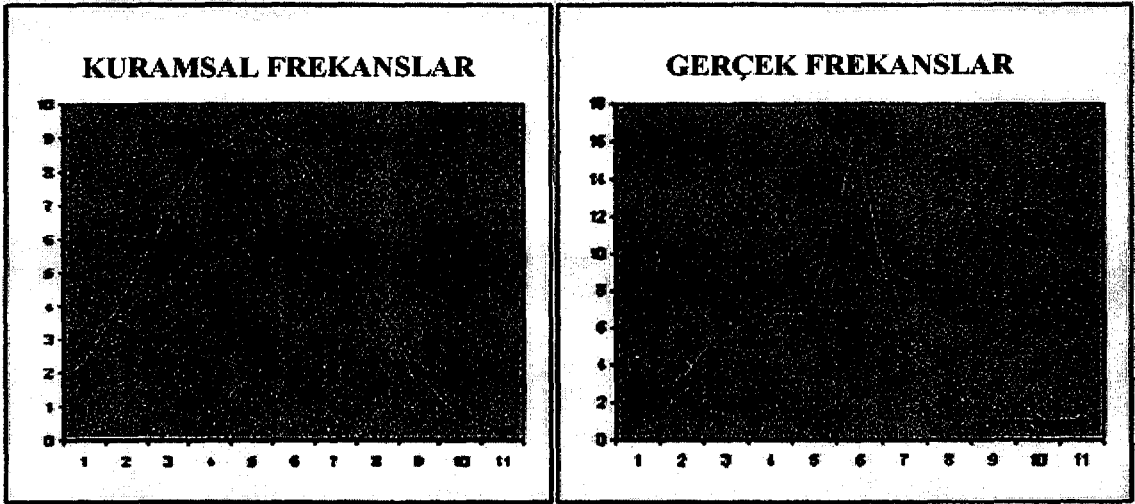
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} t^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}; t > 0, \eta > 0, \beta > 0$$

$$f(t) = 0 \quad ; \text{ diğ}er \text{ durumlarda}$$

olduğuna göre,

$$f(t) = \frac{3,2637}{(1460,4)^{3,2637}} t^{2,2637} \cdot e^{-\left(\frac{t}{1460,4}\right)^{3,2637}} \quad \text{olarak elde edilir.}$$

Şekil 7.5'de Gerçek frekanslar ile Kuramsal frekansların dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 7.5 – Türbin Çerçevesi Gerçek ve Kuramsal Frekansları

7.4. Ortalama Arıza Yapma Süresinin Tahmini

F110-GE-100 motorlarının en sık arıza yapan iki üniteden;

Yanma Odası için,

$$\eta : 1337,031 \quad \beta : 2,07955$$

Türbin Çerçevesi için,

$$\eta : 1460,4 \quad \beta : 3,2637$$

olarak bulunmuştur.

Söz konusu bulunan parametre değerlerine göre Arızadan Arızaya olan Ortalama Süre (AAOS-MTTF)* tahmini EK-2'de verilen grafik yardımıyla yapılır [12]. Grafiğin yatay ekseninde bulan β değeri işaretlenir ve dik çıkılarak eğriye kesim noktasından yatay doğrultuda grafiğin dikey ekseninde olan MTTF/ η değeri bulunur. η değeri bilindiğine göre MTTF değeri bulunur. Buna göre arızalar arası ortalama süre (AAOS-MTTF),

Yanma odası : 1189 saat ~ (1200 saat)
 Türbin çerçevesi : 1304 saat ~ (1300 saat) olarak bulunur.

Başka bir ifadeyle Türk Hava Kuvvetlerinin uçuş profiline göre, Yanma Odasının ortalama uçuş süresi 1200, Türbin Çerçevesinin (Frame) ortalama uçuş süresi ise 1300 saattir.

Bu sonuçlardan Yanma Odasının arızalanma sıklığının, Türbin Çerçevesinin arızalanma sıklığından daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda F110-GE-100 motorları ortalama 1200 saatte bir Yanma Odası değişimi için, 1300 saatte bir Türbin Çerçevesi değiştirmek amacıyla plansız olarak görevden alınmaktadır. Bu durum gerek bakım maliyeti ve gerekse lojistik destek açısından sıkıntı yaratmaktadır.

7.5. Güvenilirlik Tahmini

F110-GE-100 motorlarının bakım kavramı gereğince 3000 TAC ve katlarında normal bakım işlemleri için planlı olarak görevden alınır. 3000 TAC'ın yaklaşık 1667 uçuş saatine denk geldiği kabul edilirse, bu sürenin altında olan her plansız görevden alınmış güvenilirlik olarak kabul edilip, bu sürenin üzerinde olan değerler ise güvenilirliği, parçanın güvenilirliğini belirler. Parçanın seri olarak görev yapması nedeniyle her iki parça bir seri sistem oluşturur.

* MTTF ile MTBF burada aynı anlamda kullanılmıştır. MTTF (Mean-Time-To-Failure), MTBF (Mean-Time-Between-Failure) her ikisi de oluşan iki hata arasındaki ortalama süreyi belirtir.

Weibull dağılımının arıza fonksiyonu

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (7.2)$$

$F(t)$, belirlenen bir t zamanındaki hasarlı toplam parça miktarını vermektedir. Doğal olarak t anında hasarlı olmayan parça miktarı da $1-F(t)$ dır. Bu ise güvenilirliği temsil etmekte ve $R(t)$ ile gösterilmektedir.

Buna göre;

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (7.3)$$

$$R(t) = 1 - 1 + e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (7.4)$$

$$R(t) = e^{-(t/\eta)^\beta} \quad (7.5)$$

(7.5) ifadesinden $t=1667$ olarak alındığında her iki parça için $R(1667)$ bulunabilir.

$$R_{\text{Yanma Odası}} = 0,206$$

$$R_{\text{Türbin Çerçevesi}} = 0,214$$

Her iki parça seri bir sistem oluşturduğundan,

$$R(Z) = \prod_{i=1}^n R_i(Z) \quad (7.6)$$

ifadesinden sistemin güvenilirliğini;

$$R = (0,206) \times (0,214)$$

$$R = 0,044$$

olarak bulunur.

F110-GE-100 motorlarının kontrol ve bakımının yapıldığı süre olan 3000 TAC veya 1667 uçuş saati (motor çalışma saati)ne göre yapılan güvenilirlik analizi sonucunda en fazla hasarlanan iki üniteden meydana geldiği kabul edilen sistemin güvenilirliği 0.044 olarak bulunur. Bu sonuç doğal olarak bakım periyodunun öne çekilmesi sonucunu vermektedir.

7.6. Bakım Planlaması Önerisi

Bulunan sonuçlar Türk Hava Kuvvetleri envanterindeki F110-GE-100 motorlarının hasarlanma olasılığı daha fazla olan yanma odasının arızalar arası ortalama süre (AAOS-MTTF) olan 1200 saat veya 2160 TAC'da planlı olarak bakıma alınması gereğini ortaya koymaktadır. Bu arada türbin çerçevesinin hasarları limit içinde olsa dahi bu hasarların giderilmesi, ayrıca motorun başka ünitelerinde olabilecek hasarlarında bu bakım aralığında giderilmesi gerekir. Bu durumda, yani 1200 saat için motor güvenilirliği (7.4) eşitliğinden,

$$R_{Y.O.}(1200) = 0,450$$

$$R_{T.Ç.}(1200) = 0,590$$

olarak bulunur. Sistemin güvenilirliği ise, $(0,450) \times (0,590) = 0,266$ dır.

Ancak bulunan bu güvenilirlik değeri, motorların uçuş öncesi ve uçuş sonrası sürekli kontrol altında bulunması sonucunu vermektedir. Bu nedenle Türk Hava Kuvvetlerinde bir motorun 1 ayda yaklaşık 25 saat uçtuğu istatistiksel olarak kabul edilirse her ay, yani 25 saatte bir bu ünitelerin uçuş hattında ve uçak üzerinde baroskop kontrolünün yapılması sağlanmalıdır.

Bu durumda sistemin güvenilirliği;

$$R_{Y.O.}(25) = 0,9997$$

$$R_{T.Ç.}(25) = 0,9999$$

$(0,9997) \times (0,0999) = 0,9996$ olarak bulunur. Bu sonuç ise motorların 25 saatte kontrol edilmesi durumunda güvenilir ve emniyetli uçurulabileceğini vermektedir.

Özetlemek gerekirse F110-GE-100 serisi motorun planlı bakım aralığının 3000 TAC (1667 saat)'den 2160 TAC veya izleme kolaylığı açısından 2000 TAC (1100 saat)'e indirilmesi, ancak uçuş emniyeti ve güvenilirliği açısından her 25 saatte baroskop kontrolünün yapılması uygun olacaktır.

7.7. Değerlendirme

F110-GE-100 motorlarının Amerikan Hava Kuvvetlerinin bakım kavramı gereğince ilk önce hasarlanması beklenen döner parçalar için belirlenen uçuş ömrü 3000 TAC veya 1667 uçuş saati olması gerekirken, Türk Hava Kuvvetlerinin görev şartları nedeniyle parça hasarlanması ve plansız görev iptali daha çok duran parçalar nedeniyle olmakta, bu ise motor güvenilirliğinin 0.044 olduğunu göstermektedir.

Türk Hava Kuvvetleri için bu motorlara özgün yeni bir bakım planlaması yapılmasını gerektirmektedir. Türk Hava Kuvvetlerinin uçuş profiline göre bu bakım aralığı 2000 TAC olması ve sistemin uçuş emniyeti ve güvenilirliği açısından her 25 saatte baroskop kontrolünün yapılması yapılan çalışma kapsamında bulunmuştur. Bulunan sonuçlardan duran parçaların ortalama arıza süresine göre bakım programlarının değiştirilmesi gerek bakım maliyeti gerek işletim maliyeti gerekse lojistik destek açısından uygun görülmektedir.

Bununla birlikte, motor parçalarında oluşan hasarlar üzerine takılı olduğu uçağın görev profili ile çok yakından ilgilidir. Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F16 uçaklarının görev profili Amerikan Hava Kuvvetlerinin envanterindeki F16 uçaklarından çok farklı olmakla birlikte bakım standardı Amerikan Hava Kuvvetlerinin aynısıdır. Ancak, Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F16 uçaklarının güç

kaynağı olan F110-GE-100 motorlarında görülen hasarlanmalar Amerikan Hava Kuvvetlerinden farklı olarak döner parçalardan olmayıp sıcak kısım sabit parçalarındandır. Bu durum daha az yıpranmış olan döner parçaların daha erken zamanda görevden alınmasını gerektirmekte ve işletim maliyetleri artarken, parça değişim tahmininde yanılmalara yol açmaktadır.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

1903 yılında Wilbur ve Orville Wright kardeşlerin ilk uçağı uçurmasından bu yana gelişen teknolojiye bağılı olarak özellikle son zamanlarda havacılık alanında büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak teknoloji ne kadar ilerlerse ilerlesin temel hedef güvenle uçmaktır. Bu nedenle, metallurji, elektronik, aerodinamik, mekanik, ısı vs. alanlarındaki yeniliklerin ilk uygulamaları havacılık ortamında yapılmaktadır.

Günümüzde artık uçakların arıza yapmadan uçurulmalarının yanı sıra uçuş şartlarına göre meydana gelebilecek arızalar ve bunların ne zaman olabileceğı ile de ilgilenilmekte ve istatistiksel olarak tahmin edilmektedir. Gerek sivil havacılık gerekse askeri havacılıkta bu durum uçuşların sürekliliğinin sağlanması, işletim, bakım maliyetlerinin en aza indirgenmesi ve lojistik desteğın sürdürülebilir olması açısından önemlidir.

Uçak, motor ve bunlara ait alt sistemlerin bakım planlamasının yapılmasının yukarıda sözü edilen hedeflere ulaşmak açısından önemi büyüktür. Görevi bu hedeflere ulaşmak olan Bakım Mühendisliğı maalesef ülkemizde henüz yerleşmemiştir. O nedenle, şu anda havacılık alanındaki bakım planlamaları uçak ve motorların alındığı ülkelerin kendi uçuş profillerine göre hesaplanmış ve uygulamakta olduğu kavram ve politikalara göre yapılmaktadır. Gerçekte, her ülkenin uçuş şartları ve uçuş görevleri birbirinden farklı olduğundan bakım planlamaları da farklı olmalıdır. Ülkemizde de Türk Hava Kuvvetleri henüz kendine özgü bir bakım planlamasına sahip olamamıştır.

Burada yapılan çalışmanın amacı, 1980'li yılların ikinci yarısında Türk Hava Kuvvetleri envanterine giren F-16 uçaklarının güç sistemi olan F110-GE-100 motorlarının en çok hasarlanan iki ünitesine ait gerçek veriler esas alınarak bu parçaların istatistiksel olarak ülkemizdeki hasarlanma zaman aralığını tespit etmektir. Böylelikle anılan motorlara ait güvenilirlik analizi yapılmıştır. Çalışma sonuçları, burada istatistiksel olarak hesap edilen parça hasarlanma aralığının gerçek uçuşlarda

karşılana n hasarlanma aralığı ile uyum gösterirken motor tasarımcısı olan General Electric (GE) firmasının bu motorların bakım aralığını belirlemede esas aldığı Amerikan Hava Kuvvetleri ile farklılıklar olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma Türk Hava Kuvvetlerinin kendine özgü uçuşlarına uyan bakım aralığını tespit etmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Yapılan çalışmada F110-GE-100 motorlarının bakım aralığının 3000 TAC'dan 2000 TAC'a düşürülmesi ayrıca her 25 saatte motorun kritik parçaları olan Yanma Odası ve Türbin Çerçevesi ünitelerine baroskop kontrolünün yapılmasının gerekli olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmanın bir devamı olarak bundan sonra yapılması gereken çalışma, envanterimizdeki F110-GE-100 motoru veya diğer tip motorlar için, motorların hız, basınç, sıcaklık gibi parametrelerinin izlenerek bunların hasarlanabilecek parçalar üzerindeki etkileri değerlendirilmelidir. Böylelikle analitik ve istatistiksel analiz yöntemleriyle alınan sonuçların birbiriyle örtüşmesi durumunda bu motorlara ait bakım planları geliştirilebilecektir.

Benzer çalışma havacılık sanayiinde tüm sistemler için yapılabileceği gibi, günlük yaşantımızda kullandığımız her türlü cihaz ve araç için de yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. KOPUR, K.C., *Industrial Engineering Handbook-Reliability and Maintainability*, Chapter 89, Mc Graw-Hill Book Co, 1992.
2. LOCKHEED MARTIN., *Reliability Introduction Course*, Lockheed Martin Corporation, 1998.
3. KEÇECİOĞLU, D., *Reliability Engineering Handbook Volume 1-2*, PTR Prentice Hall, 1991.
4. MIL-STD-756B, *Reliability Modelling and Prediction*, USAF Military Specification, 1981.
5. MIL-HDBK-189, *Reliability Growth Management*, USAF Military Handbook, 1981.
6. KARA, İ., *Olasılık*, Bilim ve Teknik Yayınevi, İstanbul, 1983.
7. JURAN, J. M. ve GRYNA, F. M. Jr., *Quality Planning and Analysis*, Mc Graw-Hill Publishing Company, 1980.
8. GROSH, D. L., *A Primer of Reliability Theory*, John Wiley & Sons Inc, 1989.
9. LLOYD, D. K. ve LIPOW M., *Reliability Management, Methods and Mathematics*, Prentice-Hall Inc, 1964.
10. PRETZER, F. L., *Reliability Centered Maintenance Analysis*, Lockheed Martin Tactical Systems, 1998.

KAYNAKLAR (devam)

11. YÜZÜGÜLLÜ, N., *Bakım Planlamasının Boyutları ve Planlama için Modeller*, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınları No:50, Eskişehir, 1984.
12. ABERNETHY, R. B., *The New Weibull Handbook*, Gulf Publishing Company, 1994.
13. KOPUR, K.C. ve LAMBERSON, L. R., *Reliability in Engineering Desing*, John Wiley & Sons, s.8-67, s.291-340, 1997.
14. ANNIS, C. ve VUKELICH, S., *Statistical Characterization of Rare Events*, AGARD-R-790, 1999.
15. DAVENPORT, O., *Maintenance Policies and Procedures*, RTO-TR-28, Bölüm 3 2000.
16. HOLMES, R., *Civil and Military Protices*, RTO-TR-28, Bölüm 2, 2000.
17. SAPSARD, M., *Intruccion to Engine Usage Monitoring*, AGARD, s.1-6, 1999.
18. MIL-HDBK-472, *Maintainability Prediction*, USAF Military Handbook, 1996.
19. MIL-STD-1783, *Engine Structural Integrity Program*, USAF Military Specification, 1986.
20. MIL-STD-410, *Non-Destructive Testing*, USAF Military Specification.
21. GE AIRCRAFT ENGINES, *F110-GE-100 Operation & Service Manual*, GEK 85080, 1987.

KAYNAKLAR (devam)

22. GAMGAM, H., *Parametrik Olmayan İstatistiksel Teknikler*, Gazi Üniversitesi Yayınları, Ankara, Yayın no:140, 1989.
23. DANIEL, W.W., *Applied Nonparametric Statistics*, Houghton Mifflin Company Boston, 1978.
24. ELSAYED, E. A., *Reliability Engineering*, Mc Graw-Hill Co, 1996.
25. FOWLER, T. W., *Jet Engines and Propulsion Systems for Engineers*, GE Aircraft Engines Human Resource Development, 1999.
26. GE AIRCRAFT ENGINES, *F110-GE-100 3000 TAC Maintenance Planning*, 1992.
27. HILLIER, F. S. ve LIEBERMAN G. J., *Introduction to Operation Research*, Mc Graw-Hill Publishing Company, 1970.
28. HILLIER, F. S. ve LIEBERMAN G. J., *Introduction to Stochastic Models in Operation Research*, Mc Graw-Hill Publishing Company, 1990.
29. HOLMES, R., *Civil and Military Practices*, AGARD, s.1-14, 1999.
30. HARRISON, G., *Translation of Service Usage Into Component Life Consumption*, AGARD, s.1-14, 1999.
31. IRESON, W. G., *Reliability Handbook*, Mc Graw-Hill Co, 1996.
32. MIL-HDBK-217F, *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, USAF Military Handbook, 1991.

KAYNAKLAR (devam)

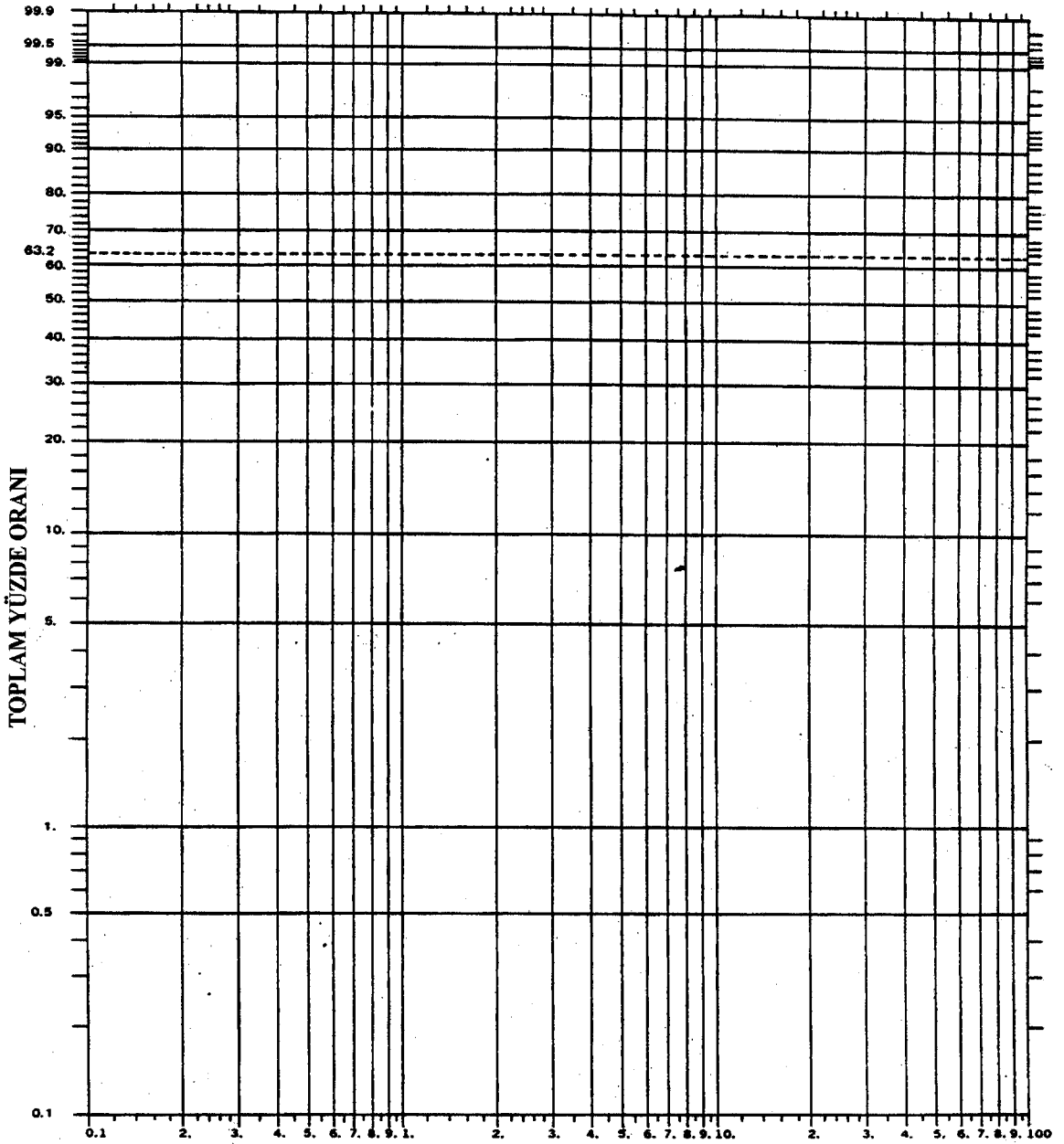
33. MIL-STD-471A, *Maintainabilty Verification / Demonstrotion / Evaluation*, USAF Military Specification, 1991.
34. MIL-STD-785B, *Reliability Program for System and Equipment Developed and Production*, USAF Military Specification, 1980.
35. MIL-STD-1629A, *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, USAF Military Specification, 1997.
36. YÜZER, A.F., *Olasılık ve İstatistik*, Anadolu Üniversitesi Yayınları: No.911, 1996.
37. BANKS, J. ve CARSON, J.S., *Discrete-Event System Simulation*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1984.
38. ROSS, S.M., *Introduction to Probability Models*, Academic Press, NewYork, 1972.

WEİBULL GRAFİK TABLOSU

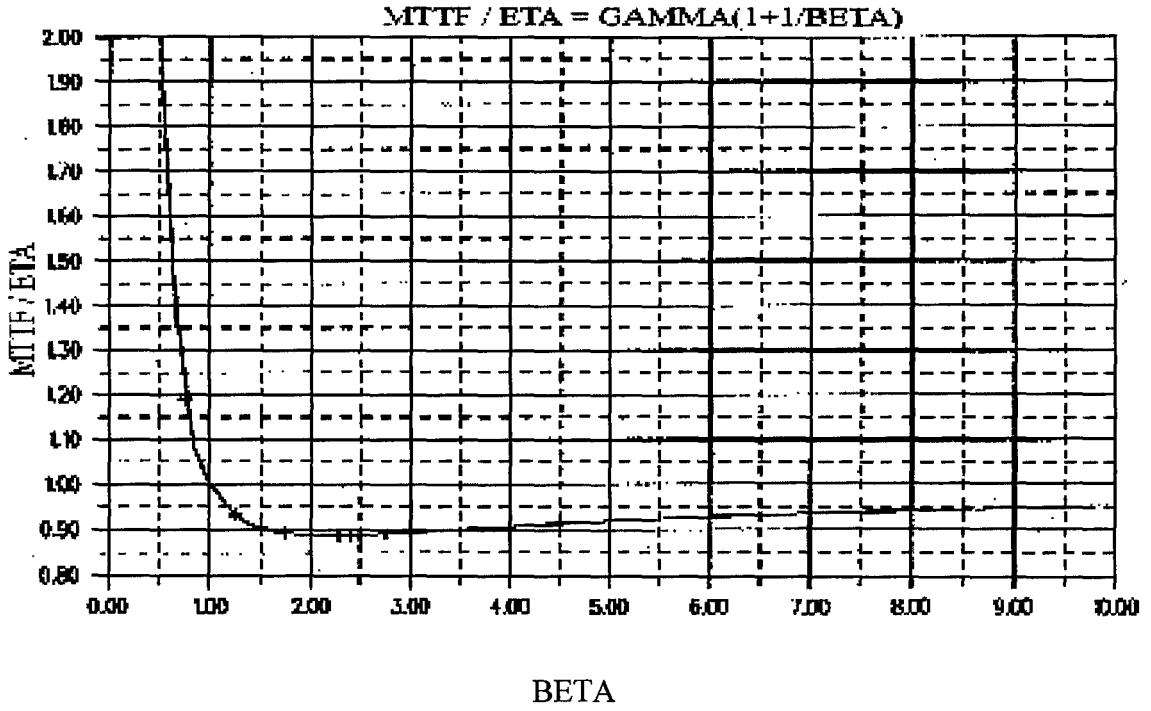
WEIBULL GRAFİK TABLOSU

WEIBULL GRAFİĞİ

WEIBULL DAĞILIMI	
BETA	:
ETA	:
ÖRNEK BOYUTU	:
HATA	:



MTTF ile η, β PARAMETRELERİ ARASINDAKİ BAĞINTI



Minimum $MTTF / \eta = 0,8856 @ \text{BETA} = 216$

A- Yanma Odası Hasar Verileri

LİMİT DIŞI HASAR NEDENİYLE SÖKÜLEN ÜNİTELER					
SN	PARÇA NO	SERİ NO	MOTOR UÇUŞ SAATİ (EOT)	SÖKÜLDÜĞÜ MOTOR SERİ NO	BİRLİĞİ
1	1493M83G05	GGMLC997	704,90	509150	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
2	1493M83G03	GGMAP095	1355,20	509154	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
3	1493M83G01	GGMFE673	3134,00	509192	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
4	1493M83Q01	GGMBH600	876,00	509263	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
5	1493M83G01	GGMFH566	1096,60	509264	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
6	1493M83G01	GGMEF226	590,50	509357	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
7	1493M83G01	GGMDH640	1300,10	510104	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
8	1493M83G01	GGMFE672	762,20	510105	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
9	1493M83G01	GGMHG217	302,00	510105	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
10	1493M83G06	GGMBH617	1783,20	610110	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
11	1493M83G01	GGMV9168	32,90	510121	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
12	1493M83G01	GGMER473	925,90	510122	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
13	1493M83G01	GGMPF917	1202,10	510131	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
14	1493M83G05	GGMBA500	1291,30	510133	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
15	1493M83G01	GGMDW700	1188,30	510139	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
16	1493M83G01	GGMLC991	827,60	510144	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
17	1493M83G01	GGMLK611	955,50	510145	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
18	1493M83G01	GGMLK609	1458,60	510146	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
19	1493M83G03	GGMDW703	1175,90	610160	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
20	1493M83G01	GGMER471	707,10	510157	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
21	1493M83G03	GGMFH572	1487,50	510168	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
22	1493M83G05	GGMPS330	115,30	510171	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
23	1493M83G01	GGMFA816	2072,10	510184	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
24	1493M83G01	GGMCB723	1785,60	509209	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
25	1493M83G03	GGMCJ241	758,00	510107	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
26	1493M83G03	GGMGN176	1073,00	510112	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
27	1493M83G05	GGMHP218	1643,20	510114	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
28	1493M83G01	GGMDV366	1527,00	510119	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
29	1493M83G01	GGMHJ369	982,70	510124	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
30	1493M83G03	GGMCH054	1426,60	510125	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
31	1493M83G05	GGMER447	1196,00	510127	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
32	1493M83G05	GGMDW710	1678,50	510128	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
33	1493M83G02	GGMHY432	673,80	510132	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
34	1493M83G05	GGMGI386	1186,20	510148	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
35	1493M83G03	GGMGM557	1271,40	510157	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
36	1493M83G03	GGMGW876	1370,40	510186	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
37	1493M83G03	GGMPJ732	233,70	510191	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
38	1493M83G03	GGMHC774	1822,40	510204	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
39	1493M83G03	GGMNB582	647,80	510207	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ

LİMİT DIŞI HASAR NEDENİYLE SÖKÜLEN ÜNİTELER (devam)					
SN	PARÇA NO	SERİ NO	MOTOR UÇUŞ SAATİ (EOT)	SÖKÜLDÜĞÜ MOTOR SERİ NO	BİRLİĞİ
40	1493M83G01	GGMLC994	1680,50	510217	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
41	1493M83G03	GGMHE160	1344,80	510255	6 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
42	1493M83G01	GGMTF825	1677,10	510173	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
43	1493M83G03	GGMNB582	647,80	510255	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
44	1493M83G03	GGMNB584	1578,00	510227	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
45	1493M83G03	GGMNV459	1322,00	510231	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
46	1493M83G03	GGMPJ732	233,70	519248	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
47	1493M83G01	GGMDV754	737,10	510120	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
48	1493M83G01	GGMGB459	414,20	510147	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
49	1493M83G01	GGMEV919	651,20	510131	9 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
50	1493M83G03	GGMHF200	1777,00	510166	8 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
51	1493M83G03	GGMER448	1796,00	510143	8 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
52	1493M83G03	GGMFH507	1215,00	510145	8 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
53	1493M83G03	GGMDL821	2287,00	510164	8 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
54	1493M83G03	GGMTF825	1677,00	510173	8 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ

B- Türbin Çerçevesi Hasar Verileri

LİMİT DIŞI HASAR NEDENİYLE SÖKÜLEN ÜNİTELER					
SN	PARÇA NO	SERİ NO	MOTOR UÇUŞ SAATİ (EOT)	SÖKÜLDÜĞÜ MOTOR SERİ NO	BİRLİĞİ
1	9530M82G33	CHE12701	1453,60	509150	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
2	9521M22G12	SUMA0502	1665,00	509154	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
3	9521M22G11	CHE17222	1442,70	509263	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
4	9521M22G11	SUMA0433	1711,70	509264	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
5	9521M22G13	FABRU104	1510,40	509255	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
6	9521M22G22	FABM0211	944,70	509367	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
7	9521M22G10	FABRU023	837,20	509465	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
8	9521M22G20	CHE16884	1601,70	510105	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
9	9521M22G07	SUMA0096	529,70	510109	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
10	9530M82G29	FABRU049	490,00	510111	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
11	9521M22G17	SUMA0074	2464,40	510122	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
12	9521M22G12	CHE21447	1547,30	510131	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
13	9521M22G11	CHE18324	2116,80	510133	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
14	9521M22G11	CHE17499	862,40	510139	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
15	9521M22G20	CHE17601	538,70	510144	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
16	9521M22G20	SUMA0330	1516,00	510145	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
17	9521M22G12	CHE20654	1921,60	510146	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
18	9521M22G12	CHE21450	1031,40	510160	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
19	9521M22G13	CHE24727	876,60	510161	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
20	9521M22G13	FABNO190	1524,40	510166	4 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
21	9521M22G13	SUMA0653	1387,20	509209	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
22	9521M22G13	CHE23784	1171,00	510107	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
23	9521M22G21	FABNO137	1157,10	510112	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
24	9521M22G16	FABRU455	411,10	510114	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
25	9521M22G13	CHE24742	1420,80	510119	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
26	9521M22G20	CHE16065	1181,70	510124	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
27	9521M22G22	FABRU048	1057,50	510125	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
28	9521M22G22	FABRU459	820,02	510127	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
29	9521M22G20	SUMA0040	1426,60	510128	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
30	9521M22G21	FABNO092	1079,40	510132	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
31	9521M22G20	SUMA0146	1363,70	510140	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
32	9521M22G12	SUMA0390	1714,20	510148	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
33	9521M22G13	FABRU252	1375,00	510157	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
34	9521M22G13	FABRU098	1257,50	510159	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
35	9521M22G13	FABRU212	1387,20	510176	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
36	9521M22G20	SUMA0322	1363,30	510181	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
37	9521M22G13	CHE23308	1568,70	510198	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
38	9521M22G21	FABNO113	827,50	510204	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
39	9521M22G11	SUMA0365	411,10	510207	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ

LİMİT DIŞI HASAR NEDENİYLE SÖKÜLEN ÜNİTELER (devam)					
SN	PARÇA NO	SERİ NO	MOTOR UÇUŞ SAATİ (EOT)	SÖKÜLDÜĞÜ MOTOR SERİ NO	BİRLİĞİ
40	9521M22G21	CHE00418	1230,00	510210	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
41	9521M22G12	FABNO143	1451,70	510211	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
42	9521M22G20	SUMA0069	766,80	510214	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
43	9521M22G20	SUMA0093	1510,30	510216	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
44	9521M22G12	CHE20230	1565,00	510217	6 NCÜ ANA JET ÜS K.LİĞİ
45	9521M22G12	GGMBW551	1433,10	509322	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
46	9521M22G13	CHE24130	704,40	510199	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
47	9521M22G11	CHE18041	1062,90	510118	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
48	9521M22G08	NCE3160C	1518,00	510236	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
49	9521M22G08	PURO1292	1487,00	509357	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
50	9521M22G08	MPOAS422	1900,20	510178	9 NCI ANA JET ÜS K.LİĞİ
51	9521M22G13	CHE25138	1807,00	510135	8 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
52	9521M22G20	SUMA0401	2210,00	510138	8 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
53	9521M22G12	CHE2024G	1475,00	510182	8 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ
54	9521M22G21	CHE20370	1635,00	510229	8 NCU ANA JET ÜS K.LİĞİ

Yanma Odasının Ki-Kare Uyum İyiliği Test İşlemleri

Yanma odasının sıralanmış hasar verileri

Sıra	Veriler	Sıralı Veriler
1	704,9	32,9
2	1355,2	115,3
3	3134	233,7
4	876	233,7
5	1096,6	302
6	590,5	414,2
7	1300,1	590,5
8	762,2	647,8
9	302	647,8
10	1783,2	651,2
11	32,9	673,8
12	925,9	704,9
13	1202,1	707,1
14	1291,3	737,1
15	1188,3	758
16	827,6	762,2
17	955,5	827,6
18	1458,6	876
19	1175,9	925,9
20	707,1	955,5
21	1487,5	982,7
22	115,3	1073
23	2072,1	1096,6
24	1785,6	1175,9
25	758	1186,2
26	1073	1188,3
27	1643,2	1196
28	1527	1202,1
29	982,7	1215
30	1426,6	1271,4
31	1196	1291,3
32	1678,5	1300,1
33	673,8	1322
34	1648,8	1344,8
35	1186,2	1355,2
36	1271,4	1370,4
37	1556,7	1426,6
38	1370,4	1458,6
39	1557	1487,5
40	233,7	1527
41	1793,1	1578
42	647,8	1643,2
43	647,8	1677

Yanma odasının sıralanmış hasar verileri (devam)

Sıra	Veriler	Sıralı Veriler
44	1578	1677,1
45	1322	1678,5
46	233,7	1680,5
47	414,2	1777
48	651,2	1783,2
49	1644,6	1785,6
50	1796	1796
51	1215	1822,4
52	2287	2072,1
53	1677	2287
54	1765	3134

54 adet veri gruplandırılmış, elde edilen sınıf aralıkları ve bu aralıktaki gözlem sayıları Çizelge E4.1'de verilmiştir. Elde edilen veriler 8 sınıfla ifade edilmiştir.

Çizelge E4.1 – Yanma odasının hasarlarına ilişkin sınıflandırma ve buna ait uygulamalar

Sınıflar	t	Frekans
0-300	150	4
300-600	450	3
600-900	750	11
900-1200	1050	9
1200-1500	1350	12
1500-1800	1650	11
1800-2100	1950	2
2100-	2250	2
		54

Weibull dağılımının η (ölçek parametresi) ve β (şekil parametresi) parametreleri EK-1 grafiğinden yararlanarak bulunabileceği gibi Newton yaklaşımı [37] ile de bulunabilir. Verilerden, Newton yaklaşımı kullanılarak,

$$\eta = 1337,031$$

$$\beta = 2,07955$$

olarak elde edilmiştir.

Bir dağılım momentler ile karakterize edilmektedir. Bağlı olarak aritmetik ortalama (μ_1), Varyans (μ_2), Asimetri (α_3) ve Basıklık (α_4) değerleri bir dağılımın kimliğini belirlemede kullanılması gereken önemli göstergelerdir[36]. Çizelge E4.2 Moment bulma işlemlerini tablo halinde vermektedir.

Çizelge E4.2 – Moment işlemleri

t	f	t*f	t ² *f	t ³ *f	t ⁴ *f
150	4	600	90000	13500000	2025000000
450	3	1350	607500	273375000	1,23019E+11
750	11	8250	6187500	4640625000	3,48047E+12
1050	9	9450	9922500	10418625000	1,09396E+13
1350	12	16200	21870000	29524500000	3,98581E+13
1650	11	18150	29947500	49413375000	8,15321E+13
1950	2	3900	7605000	14829750000	2,8918E+13
2250	2	4500	10125000	22781250000	5,12578E+13
	54	62400	86355000	1,31895E+14	2,16111E+14

SIFIR ETRAFINDAKİ MOMENTLER

$$M_0 = 1, M_1 = \frac{\sum(t \times f)}{\sum f}, M_2 = \frac{\sum(t^2 \times f)}{\sum f}, M_3 = \frac{\sum(t^3 \times f)}{\sum f}, M_4 = \frac{\sum(t^4 \times f)}{\sum f}, \sum f = N$$

$$M_1 = E(x) = \mu$$

$$M_1 = 1155,555556 \quad M_2 = 1599166,667 \quad M_3 = 2442500000 \quad M_4 = 4,00206E+12$$

ORTALAMA ETRAFINDAKİ MOMENTLER

$$\mu_0 = M_0 = 1$$

$$\mu_1 = E(x - \mu) = 0$$

$$\mu_2 = M_2 - M_1^2 = \text{Var}(x)$$

$$\mu_3 = M_3 - 3M_1M_2 + 2M_1^3$$

$$\mu_4 = M_4 - 4M_1M_3 + 6M_2M_1^2 - 3M_1^4$$

$$\mu_2 = 263858,0247$$

$$\mu_3 = -15231138,55$$

$$\mu_4 = 5,52456E+12$$

STANDART MOMENTLER

Asimetri

Basıklık

$$\alpha_3 = \frac{\mu_3}{\mu_3^{3/2}}$$

$$\alpha_4 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3$$

α_3 negatif ise eğri sola pozitif ise sağa eğiktir. Eğer α_3 0'a eşit ise eğri simetriktir.

α_4 'ün değeri 3'ten büyük yada küçük olması, eğrinin mod komşuluğunda normal eğriden daha yüksek (dik) yada basık olduğunu gösterir[36]. Eldeki veriden,

$$\alpha_3 = -0,11237686$$

$$\alpha_4 = 79,35186722$$

olarak bulunmuştur.

Verilerin Weibull dağılımına uygunluğu, Ki-kare uyum iyiliği testi ile test edilir. Buna göre hipotez; (H_0) hipotezi,

$$\chi_{hesaplanan}^2 \leq \chi_{iablo}^2$$

olduğunda kabul edilir.

H_0 : Gözlem değerleri $\eta = 1337,031$ $\beta = 2,07955$ olan Weibull dağılımına uyar.

$$X \sim W (1337,031 ; 2,07955)$$

H_1 : Gözlem değerleri $\eta = 1337,031$ $\beta = 2,07955$ olan Weibull dağılımına uymaz.

$$X \not\sim W (1337,031 ; 2,07955)$$

Söz konusu verilerin Weibull dağılımına uygunluğu Ki-kare uyum iyiliği testi ile doğrulamak amacıyla yapılan işlemler Çizelge E4.3'de verilmiştir.

$$f_{k_{\text{umsal}}} = B_{\text{eklenen}}$$

$$f = G_{\text{özlenen}} \quad \text{olarak gösterilmiştir.}$$

Çizelge E4.3 – Yanma Odası Uygunluk İşlemleri

t	β/η^β	$t^{\beta-1}$	$(t/\eta)^\beta$	$\exp(-(t/\eta)^\beta)$	Ordinatlar	f(t)	Fk(B _i)	f	$\frac{(G-B)^2}{B}$
150	6,56148E-07	223,4597552	0,01057604	0,98947969	0,00014508	0,043524052	2,350298787	4	1,557944
450	6,56148E-07	731,6031543	0,103877281	0,901335901	0,000432677	0,129803186	7,00937205	3	2,293367
750	6,56148E-07	1269,908374	0,300514992	0,740436804	0,000616967	0,185090231	9,994872483	11	0,10108
1050	6,56148E-07	1826,101477	0,604987914	0,546081026	0,00065431	0,196293134	10,59982923	9	0,241462
1350	6,56148E-07	2395,255355	1,020276962	0,360495083	0,000566569	0,169970784	9,178422361	12	0,867393
1650	6,56148E-07	2974,642592	1,548642694	0,212536255	0,00041483	0,124448862	6,7202385536	11	2,725552
1950	6,56148E-07	3562,516338	2,191916309	0,111702487	0,000261109	0,07833265	4,229963115	2	1,175598
2250	6,56148E-07	2,951641769	2,951641769	0,003234094	0,000142551	0,042765152	2,309318198	2	0,041431
					0,003234094	0,970228051	52,39231476	54	8,603827

$$N = 54$$

$$\chi_h^2 = 8,603727$$

bulunur.

Serbestlik derecesi = Sınıf sayısı – Parametre sayısı – 1

Serbestlik derecesi = 8 – 2 – 1

Serbestlik derecesi = 5

$\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyi ve 5 serbestlik derecesinde

$$\chi_{\text{tablo}}^2 = 11,07048257$$

olarak tablo değeri bulunur.

$\chi_h^2 \leq \chi_t^2$ olması nedeniyle gözlem değerlerimiz Weibull dağılımına uyum sağlamaktadır.

Türbin Çerçevesinin Ki-Kare Uyum İyiliği Test İşlemleri

Türbin Çerçevesinin sıralanmış hasar verileri

Sıra	Veriler	Sırah Veriler
1	1453,6	411,1
2	1665	490
3	1442,7	529,7
4	1711,7	538,7
5	1510,4	704,4
6	944,7	711,1
7	837,2	755,8
8	1601,7	820,02
9	529,7	827,5
10	490	837,2
11	2464,4	862,4
12	1547,3	878,8
13	2116,8	944,7
14	862,4	1031,4
15	538,7	1057,5
16	1516	1062,9
17	1921,6	1079,4
18	1031,4	1157,1
19	876,6	1171
20	1524,4	1181,7
21	1387,2	1230
22	1171	1257,5
23	1157,1	1363,3
24	411,1	1363,7
25	1420,8	1375
26	1181,7	1387,2
27	1057,5	1387,2
28	820,02	1420,8
29	1426,6	1426,6
30	1079,4	1433,1
31	1363,7	1442,7
32	1714,2	1451,7
33	1375	1453,6
34	1257,5	1475
35	1387,2	1487
36	1363,3	1510,3
37	1568,7	1510,4
38	827,5	1516
39	711,1	1518
40	1230	1524,4
41	1451,7	1547,3
42	766,8	1585
43	1510,3	1568,7

Türbin çerçevesinin sıralanmış hasar verileri (devam)

Sıra	Veriler	Sıralı Veriler
44	1565	1601,7
45	1433,1	1635
46	704,4	1665
47	1062,9	1711,7
48	1518	1714,2
49	1487	1807
50	1900,2	1900,2
51	1807	1921,6
52	2210	2116,8
53	1475	2210
54	1635	2464,4

Elde edilen 54 veri 11 sınıfla ifade edilmiştir. Elde edilen sınıf aralıkları ve bu aralıklardaki gözlem sayıları Çizelge E5.1'de verilmiştir.

Çizelge E5.1 - Türbin Çerçevesinin hasarlarına ilişkin sınıflandırma ve buna ait gözlemler

Sınıflar	t	Frekans
400-600	500	4
600-800	700	3
800-1000	900	6
1000-1200	1100	7
1200-1400	1300	7
1400-1600	1500	16
1600-1800	1700	5
1800-2000	1900	3
2000-2200	2100	1
2200-2400	2300	1
2400-	2500	1
		54

Türbin çerçevesi hasarlarının Weibull dağılımına uygunluğu Ki-kare uyum iyiliği testi ile yapılmıştır. Ancak öncelikle η (ölçek parametresi) ve β (şekil parametresi) parametre değerleri Newton yaklaşımı [37] ile bulunmuştur. Buna göre,

$$\eta = 1460,4$$

$$\beta = 3,2637 \quad \text{olarak belirlenmiştir.}$$

Türbin çerçevesine ilişkin momentler Çizelge E5.2'de verilmiştir.

Çizelge E5.2 – Türbin Çerçevesi Hata Dağılım Fonksiyon Moment Bulma İşlemleri

t	f	t*f	t ² *f	t ³ *f	t ⁴ *f
500	4	2000	1000000	500000000	2,5E+11
700	3	2100	1470000	1029000000	7,203E+11
900	6	5400	4860000	4374000000	3,9366E+12
1100	7	7700	8470000	9317000000	1,02487E+13
1300	7	9100	11830000	15379000000	1,99927E+13
1500	16	24000	36000000	54000000000	8,1E+13
1700	5	8500	14450000	24565000000	4,17605E+13
1900	3	5700	10830000	20577000000	3,90963E+13
2100	1	2100	4410000	9261000000	1,94481E+13
2300	1	2300	5290000	12167000000	2,79841E+13
2500	1	2500	6250000	15625000000	3,90625E+13
	54	71400	104860000	1,6679E+11	2,835E+14

SIFIR ETRAFINDAKİ MOMENTLER

$$M1= 1322,22222 \quad M2= 1941851,85 \quad M3= 3088777778 \quad M4= 5,25E+12$$

ORTALAMA ETRAFINDAKİ MOMENTLER

$$\mu_2= 193580,25 \quad \mu_3= 9305898,491 \quad \mu_4= 1,1374E+11$$

STANDART MOMENTLER

$$\alpha_3= -0,1092614 \quad \alpha_4= 3,0352197$$

Ki-kare uyum iyiliği testinde hipotezimiz (H_0)

$$\chi^2_{hesaplanan} \leq \chi^2_{tablo}$$

ise kabul edilir.

İlgili hipotezler;

H_0 : Gözlem değerleri $\eta=1460,4$ $\beta=3,2637$ olan Weibull dağılımına uyar.

$$X \sim W (1460,4 ; 3,2637)$$

H_1 : Gözlem değerleri $\eta=1460,4$ $\beta=3,2637$ olan Weibull dağılımına uymaz.

$$X \not\sim W (1460,4 ; 3,2637)$$

Elde edilen verilen verilerin Weibull dağılımına uyan yığından (ana kütlede) geldiğini göstermek amacıyla yapılan uygunluk işlemleri Çizelge E5.3'de verilmiştir.

Çizelge E5.3 – Türbin Çerçevesi Uygunluk İşlemleri

t	β/η^β	$t^{\beta-1}$	$(t/\eta)^\beta$	$\exp(-(t/\eta)^\beta)$	Ordinatlar	f(t)	Fk (B _i)	f	$\frac{(G-B)^2}{B}$
500	1,534E-10	1287236,66	0,030251138	0,970201849	0,000191577	0,03831546	2,0690348	4	1,802109
700	1,534E-10	2757074,07	0,090710964	0,913281644	0,000386257	0,07725146	4,1715788	3	0,329035
900	1,534E-10	4869885,71	0,206003493	0,813830233	0,000607962	0,12159231	6,5659849	6	0,048788
1100	1,534E-10	7670092,85	0,396557907	0,672631326	0,000791409	0,1582819	8,5472224	7	0,280079
1300	1,534E-10	11195244,1	0,684053747	0,504567452	0,000866516	0,1733031	9,3583674	7	0,594323
1500	1,534E-10	15478104,8	1,091245207	0,335798095	0,000797296	0,15945919	8,6107961	16	6,340916
1700	1,534E-10	20547889,6	1,641834782	0,193624458	0,000610311	0,12206214	6,5913554	5	0,384202
1900	1,534E-10	26431056,7	2,360377328	0,094384602	0,000382683	0,07653661	4,1329768	3	0,310584
2100	1,534E-10	33151853,7	3,272204363	0,037922739	0,000192855	0,03857101	2,0828347	1	0,56295
2300	1,534E-10	40732709,7	4,40336256	0,012236126	7,64559E-05	0,01529117	0,8257233	1	0,036783
2500	1,534E-10	49194528	5,780562663	0,003086978	2,32956E-05	0,00465912	0,2515925	1	2,226274
					0,004926617	0,98532347	53,207467	54	12,91604

$$N = 54$$

$$\chi_h^2 = 12,91604$$

bulunur.

Serbestlik derecesi = Sınıf sayısı – Parametre sayısı – 1

Serbestlik derecesi = 11 – 2 – 1

Serbestlik derecesi = 8

$\alpha = 0,05$ anlamlılık düzeyi ve 8 serbestlik derecesinde

$$\chi_i^2 = 15,51$$

olarak tablodan bulunur.

$$\chi_h^2 \leq \chi_i^2 \Rightarrow 12,9164 < 15,51$$

olması nedeniyle gözlem değerleri Weibull dağılımına uygundur.