

**F-16 UÇAKLARINDA UÇUŞ GÜVENLİĞİNİN
GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

**Doktora Tezi
Şenol KASAP
Eskişehir 2020**

**F-16 UÇAKLARINDA UÇUŞ GÜVENLİĞİNİN
GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI**

Şenol KASAP

DOKTORA TEZİ

Sosyal Bilimler Enstitüsü

İşletme Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı

Danışman: Prof.Dr. Harun SÖNMEZ

ESKİŞEHİR

Anadolu Üniversitesi

Sosyal Bilimler Enstitüsü

Ağustos 2020

ÖZET

F-16 UÇAKLARINDA UÇUŞ GÜVENLİĞİNİN GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ İLE ARAŞTIRILMASI

Şenol KASAP

İşletme Sayısal Yöntemler Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ağustos 2020

Danışman: Prof. Dr. Harun SÖNMEZ

Olgunlaşan ve gelişen güvenilirlik yöntemleri, karmaşıklaşan sistemler, yeni malzeme ve teknolojilerin kullanılmasıyla kendi standartlarını ve yöntemlerini yaratmıştır. Özellikle uç teknolojiler olarak kabul edilen Havacılık ve Uzay, Nükleer Enerji, Petrol ve Petrokimya dalları birbirlerinden alıntılarla yalnızca bu teknikleri kullanmakla kalmamışlar, gelişimine ve olgunlaşmalarına katkı sağlamışlardır.

Havacılıkta bir sistemin ilk temin fiyatı o sistemin idame işletme bütçesi ile karşılaştırıldığında çok küçük kalmaktadır. Bu nedenle bir sistemin bakım standardının ve politikasının kullanım şartlarına göre belirlenmesi kullanıcılar için önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır.

Üretici ülke ve kuruluşlar sistemlerin bakım politikasını kendi koşullarına göre belirlemektedirler. Ancak değişik şartlarda çalışan sistemlerde bu idame işletme maliyetlerinin artışına sebep olmakta, bununla birlikte sistem güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Yapılan çalışmanın amacı, yurtdışı kaynaklı ve ülkemizde de kullanılan F-16 uçaklarına ait Accessory Drive Gearbox (ADG) ünitesinin Türkiye'deki kullanım koşullarına uygun bakım standart ve politikalarını gerçek verilere dayalı olarak güvenilirlik analizi yardımıyla ortaya koymaktır.

Çalışma sonucunda, F-16 savaş uçaklarının kritik ünitesi ADG'nin güvenilirlik değerlerine ulaşılmış, ünitenin Mean Time To Failure (MTTF) değeri, revizyon sonrasında MTTF değerindeki değişim, bu verilere göre yaptığımız revizyonların başarı oranı ve belirlenen bir zaman dilimi içinde ne kadar ünitenin arıza yaparak onarım/revizyona geleceğine dair bilgiler tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Güvenilirlik mühendisliği, Bakım planlaması, Weibull dağılımı, Uçuş güvenliği.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FLIGHT SAFETY IN F-16 PLANES WITH RELIABILITY ENGINEERING

Şenol KASAP

Department of Business Numerical Methods

Anadolu University, Social Sciences Institute, August 2020

Supervisor: Prof.Dr. Harun SÖNMEZ

Matured and developed reliability methods, complex systems, and the use of new materials and technologies have created their own standards and methods. In particular, the aviation and space, nuclear energy, petroleum and petrochemical branches, which are considered as extreme technologies, have not only used these techniques, but also contributed to their development and maturation.

In aviation, the initial procurement price of a system is very small compared to the maintenance operating budget of that system. Therefore, determining the maintenance standard and policy of a system according to usage conditions is one of the important problems for the users.

Producer countries and organizations determine the maintenance policy of the systems according to their own conditions. However, in systems operating under different conditions, this maintenance leads to an increase in operating costs, but also adversely affects the reliability of the system.

The aim of this study is to determine the maintenance standards and policies of the Accessory Drive Gearbox (ADG) unit of F-16 aircraft sourced from abroad and used in Turkey with the help of reliability analysis based on real data.

As a result of the study, the reliability values of ADG, the critical unit of F-16 warplanes, were reached, Mean Time To Failure (MTTF) value of the unit, change in MTTF value after revision, The success rate of our revisions based on these data and information on how many units will malfunction and come to repair / revision within a specified time period have been determined.

Keywords: Reliability engineering, Maintenance planning, Weibull distribution, Flight security.

ÖNSÖZ

Havacılık gelişmiş ülkelerin ulaşım alanında en temel ihtiyaçlarından biri olması yanında ülke savunmasında da olmazsa olmaz bir öneme sahiptir. En modern sistemlerle donatılmış hava araçlarının yüksek güvenilirlik, yüksek işletme performansı ve kolay bakım yapılabilirlik gibi önemli gereklilikleri karşılaması gerekmektedir.

Bir sistemin, belirlenmiş olan standartları ne derece karşıladığının tespiti için sistemin arıza yapma verilerinin analizinin yapıp bu analizlerden de sistemin güvenilirlik değerinin çıkarılması gerekir. Havacılık alanında bu konudaki çalışmalar Türkiye’de son dönemde önem kazanmıştır. Kurumların yaptığı bu tür çalışmalar idame bütçelerinde kayda değer tasarruf sağlamalarına imkân vermektedir. Bu tezin, bu alanda yapılan çalışmalara katkı sağlaması hedeflenmiştir.

Bu çalışmamda beni yönlendiren, önemli katkısı ve yardımları olan Uçak Mühendisi Muhammet YÜCEL’e, danışman hocam Prof. Dr. Harun SÖNMEZ’e, tez izleme kurulu üyeleri Prof. Dr. Emel ŞIKLAR ve Prof. Dr. Veysel YILMAZ’a, ayrıca beni her konuda destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

Şenol KASAP

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GÖRSELLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMI	3
2.1. Güvenilirlik	4
2.2. Güvenilirliğin Kullanım Alanları	5
2.3. Güvenilirlik Mühendisliği	6
2.4. Güvenilirliğin Faydaları	7
2.5. Güvenilirlik Maliyet İlişkisi	8
2.6. Havacılıkta Güvenilirlik	10
2.7. Güvenilirlikle İlgili Yapılmış Çalışmalar	11
3. GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANILAN İSTATİSTİKSEL DAĞILIMLAR	13
3.1. Güvenilirlik Modelleri ve Veri Tipleri	13
3.2. Olasılık Dağılımları	17
3.3. Normal Dağılım	18
3.4. Log-normal Dağılım	19
3.5. Beta Dağılımı	20

3.6.Weibull Dağılımı	21
3.6.1. Weibull Dağılımının Mühendislikte Kullanılması	22
3.6.2. Weibull Dağılımının Kapsamı	22
3.6.3. Weibull Dağılımının Avantajları	23
3.6.4. Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	23
3.6.5. Arıza Dağılımı	24
3.6.5.1. β 'nın Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Üç Etkisi	25
3.6.5.2. Weibull Dağılımı İçin η 'nin Karakteristik Etkileri ..	25
3.6.5.3. Weibull Dağılımı İçin γ 'nin Karakteristik Etkileri ..	26
4. F-16 UÇAKLARI ADG ÜNİTESİNİN GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ	28
4.1.Problem	28
4.2.Amaç	28
4.3.Araştırma Yöntemi	29
4.4.Ünite Tanıtımı	29
4.5.ADG Arızalarının Ünite Seri Numarasına Göre Dağılımı	31
4.6.ADG Güvenilirlik Analizi	33
4.7.ADG'nin Revizyon Sonrası Güvenilirliği ve Revizyon Etkinliğinin Değerlendirilmesi	37
4.7.1.Onarım/Revizyon Yapılmamış ADG MTTF Değeri ve Güvenilirlik Grafiği	38
4.7.2. Bir Defa Onarım/Revizyon Yapılmış ADG MTTF Değeri ve Güvenilirlik Grafiği	40
4.7.3. İki Defa Onarım/Revizyon Yapılmış ADG MTTF Değeri ve Güvenilirlik Grafiği	42
4.7.4. Uçak Üzerindeki ADG Ünitelerinin 1 Yıl İçinde Oluşacak Arıza Sayısı Tahmini	44
4.8.ADG Güvenilirlik Mühendislik Çalışması Sonucu	49
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	52

KAYNAKÇA	54
EKLER	
ÖZ GEÇMİŞ	

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Tam Veri ve Sansürlü Veri	14
Tablo 4.1. Ünitelerin Bir Yıl İçinde Revizyona Gelme İhtimali	44
Tablo 4.2. Onarım/Revizyon İşlemine Gönderilen Ünitelerin Uçuş Saati Aralığı-1	50
Tablo 4.3. Onarım/Revizyon İşlemine Gönderilen Ünitelerin Uçuş Saati Aralığı-2	50
Tablo 4.4. Onarım/Revizyon Yapılan Ünitelerin MTTF Değişimi	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Güvenilirlik-Maliyet İlişkisi ve Optimum Güvenilirlik	10
Şekil 3.1. Normal Dağılım Grafiği	18
Şekil 3.2. Farklı σ Değerleri İçin Log-normal Dağılım Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	20
Şekil 3.3. Farklı Parametre Değerlerine Göre Beta Dağılımı	21
Şekil 3.4. Weibull β Değerinin Ortak η 'de Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkisi	25
Şekil 3.5. Ortak β için η 'nin Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkileri	26
Şekil 3.6. Pozitif γ 'nin Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkisi	27
Şekil 4.1. Ünitelerin Değişim Saatleri Aralığı	32
Şekil 4.2. Ünitelerin Revizyon Yapılma Sıklığına Yönelik Pareto Analizi Grafiği	32
Şekil 4.3. Birden Çok Revizyon/Onarım Gören ADG Seri Numaraları	33
Şekil 4.4. Ünitelerin Revizyona Gelme Uçuş Saatlerine Göre pdf Grafiği .	34
Şekil 4.5. Ünite Güvenilirlik Grafiği	35
Şekil 4.6. ADG Ünitesi Hata Oranının Zamana Bağlı Grafiği	36
Şekil 4.7. Onarım/Revizyona Gönderilen Ünitelerin Güvenilirlik Grafiği .	37
Şekil 4.8. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği	38
Şekil 4.9. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite Güvenilirlik Grafiği	39
Şekil 4.10. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği	40
Şekil 4.11. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Güvenilirlik Grafiği .	41
Şekil 4.12. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği	42
Şekil 4.13. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Güvenilirlik Grafiği .	43

GÖRSELLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Görsel 3.1. Küvet Karakteristiği Eğrisi	15
Görsel 4.1. ADG Ünitesi ve Uçakta Bulunduğu Bölge	30
Görsel 4.2. ADG Ünitesi Çalışma Şeması	30
Görsel 4.3. ADG Ünitesi ve Beraber Çalışan Üniteler	31
Görsel 4.4. Ünite MTTF Değeri	34
Görsel 4.5. Ünite Güvenilirlik Değerinin %90 Olduğu Uçuş Saati	35
Görsel 4.6. Ünite Güvenilirlik Değerinin %50 Olduğu Uçuş Saati	36
Görsel 4.7. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite MTTF Değeri	39
Görsel 4.8. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite MTTF Değeri	41
Görsel 4.9. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite MTTF Değeri	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ADG	: Accessory Drive Gearbox
LDA	: Life Data Analysis
MLE	: Maksimum Olasılık Tahmini
oyf	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
bdf	: Birikimli Dağılım Fonksiyonu
CAD	: Computer Aided Design
CAM	: Computer Aided Manufacturing
CDF	: Kümülatif Dağılım Fonksiyonudur
JFS	: Jet Fuel Starter
PTO	: Power Takeoff
CSD	: Constant Speed Driver
Pdf	: Probability Density Function
MTTF	: Main Time To Failure
U/S	: Uçuş Saati
MTBF	: Mean Time Between Failure

1. GİRİŞ*

Sistemler kendilerinden beklenen görevleri gerçekleştirmek üzere tasarlanırlar. Bir sistemin görevlerini yerine getirme kapasitesi ise sistem etkinliği ile tanımlanır. Sistem etkinliği, belirlenmiş şartlarda belirli bir zaman diliminde bir görevi başarı ile yapabilme olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Müşteriler için sistem etkinliği bir ürün ya da hizmetin kendilerini memnun etme derecesi, yani kalite kavramına bağlıdır. Sistem etkinliği müşteriler ve kullanıcılar tarafından tanımlanır ve değerlendirilir. Etkinlik; sistemin tasarımı, üretimi, kullanımı ve idamesine bağlıdır. Buna göre, bir sistemin etkinliği birçok farklı niteliği içeren bir fonksiyondur. Bunlar; tasarım uygunluğu, performans ölçümü, üretilebilirlik, emniyet, güvenilirlik, kalite ve idame edilebilirliktir.

Sistem etkinliğini belirleyen en önemli niteliklerden biri güvenilirliktir. Güvenilirlik, bir sistemin kendinden beklenen fonksiyonu, belirlenen ömür süresince ve öngörülen 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].

Sistemlerin artan karmaşıklığıyla beraber, güvenilirlik elde edilmesi güç bir tasarım parametresi olmuştur. Burada aslında güvenilirliği sadece bir tasarım parametresi olarak uygulamak doğru bir yaklaşım değildir. Güvenilirlik, ürünün tasarım aşamasında öngörülen tüm çalışma koşullarında da geçerliliğini korumalıdır. Fakat üretim aşamalarında bunun kontrol edilebilmesi zorlaşmaktadır. Bu zorluklarına rağmen güvenilirlik önemli bir program geliştirme aracıdır. Güvenilirlik tasarım aşamasında

* Bu tezde belirtilen görüş ve yorumlar yazana aittir. Türk Silahlı Kuvvetlerinin ya da diğer kamu kuruluşlarının görüşlerini yansıtmaz.

teknik talepler doğrultusunda geliştirilebilir, yapılacak testlerle önceden bilinebilir ve kullanım sürecinde doğrulanabilir.

Bu çalışmada amaç, F-16 uçaklarının kritik bir ünitesi olan Accessory Drive Gearbox (ADG) ünitelerinin geçmişe ait arıza verilerinin istatistiki olarak incelenmesi ve güvenilirlik programları ile bu verilerin çözümlenerek geleceğe yönelik tahminlerde bulunulmasıdır. Bulunan sonuçların jet uçaklarının en önemli kalemi olan idame işletme bütçesinin daha verimli bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. Çalışma beş bölümden oluşmaktadır.

İkinci bölümde, güvenilirliğin tanımı, kullanım alanları, güvenilirlik mühendisliği, güvenilirliğin faydaları, güvenilirlik-maliyet ilişkisi, güvenilirliğin havacılıktaki önemi ve güvenilirlikle ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, güvenilirlik modelleri ve veri tipleri, arızaların zaman içinde ortaya çıkışlarının istatistiksel yöntemlerle incelemesi yapılarak zamana bağlı hata oranı değişimleri, olasılık dağılımları, güvenilirlik mühendisliğinde kullanılan istatistiksel dağılımlar ve Weibull dağılımının mühendislikte kullanılması konuları ele alınmıştır.

Dördüncü bölüm uygulamanın yer aldığı bölümdür. Bu bölümde, F-16 uçaklarında kullanılan ADG ünitesi ile ilgili tanıtıcı bilgiler verilmiş, ünitenin uçak faaliyet oranları için kritikliğinden bahsedilerek uygulama yapılan verilere nasıl ulaşıldığı ve uygulama öncesi verilerin ne şekilde derlendiği belirtilmiştir. Ardından ADG ünitesinin güvenilirlik analizi yapılmıştır. Bulunan sonuçlara göre arızalı ünitelerin bakımlarının hangi etkinlikle yapıldığı tespit edilmiş ve her ünite için ayrı ayrı gelecek zaman diliminde arıza yapma olasılığı hesaplanmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise yapılan çalışma hakkında genel bir değerlendirme yapılarak bulunan sonuçların sisteme hangi alanlarda fayda sağlayabileceği belirtilmiştir.

2. GÜVENİLİRLİK KAVRAMI

Tarih boyunca insanlar geleceği doğru öngörerek buldukları zamanda kendilerine avantaj sağlamak istemişlerdir. Fakat bunu genellikle batıl düşünceler kullanarak yapmaya çalışmış ve çoğu zamanda başarısız olmuşlardır. Doğa olaylarını izleyerek yaptıkları gözlemlerde ise daha tutarlı tahminler yapabilmişlerdir. Günümüzde mühendisler geleceği tahmin etmek için bilimsel araçları kullanmaktadırlar. Örneğin, güvenilirlik mühendisleri bir ürünün ömür verisi analizleri ile ürünün gelecekte kendinden beklenen fonksiyonları hangi olasılıkta yerine getirebileceğini belirleyebilmektedirler.

Güvenilirlik, II. Dünya Savaşı sonrasında hızla gelişen silah teknolojisinin ortaya çıkardığı bir konudur. 1950'lerden itibaren özellikle sivil uçak ve elektronik sanayii dallarında da konunun önem kazanmaya başladığı görülmüştür. Güvenilirlik teknikleri özellikle 1950 ve 1960'lı yıllarda uzay programlarında oldukça geniş biçimde uygulanmıştır [2].

Otomotiv, savunma, elektronik, beyaz eşya, enerji, havacılık başta olmak üzere birçok endüstriyel sektörde ürün güvenilirliği çok önemli bir kavram haline gelmiştir. Bu sektörlerdeki dünya devi firmaların birçoğu ürün ve süreçlerinde güvenilirlik uygulamalarını bir gereklilik haline getirmiştir. Bugün yüksek teknoloji ile karmaşık mamuller üreten büyük firmalarda Güvenilirlik Mühendisliği (Reliability Engineering) adı altında ayrı departmanlar vardır. Günümüzde kendi alanında söz sahibi birçok firma;

- Marka imajını korumak,
- Artan müşteri beklentilerini karşılayabilmek,
- Garanti maliyetlerini düşürebilmek,
- Dünya piyasasındaki diğer firmalarla rekabet edebilmek

için güvenilirlik analizlerinden yararlanmaktadır.

Güvenilirlik Analizleri (Reliability Analysis) ve Güvenilirlik Mühendisliği teknikleri Amerika ve Avrupa ülkeleri başta olmak üzere dünyada kabul görmüş bir kavramdır. Bu tekniklerin üretim, inşaat, enerji, telekomünikasyon, medikal, savunma sektörleri gibi birçok sektörde çok geniş kullanım alanı vardır. Güvenilirlik analizleri, ürünün tasarım sürecinin başından müşteride kullanım süresinin sonuna kadar olan süre içindeki özelliklerini kontrol edebilmemizi sağlar. Bu analizler yardımıyla ürünlerin belli

bir süre içindeki arızalanma olasılıkları, sistemlerin güvenilirlik endeksleri ve bakım optimizasyon çizelgeleri gibi bilgileri elde edebiliriz.

2.1. Güvenilirlik

Güvenilirlik kelimesi ilk olarak, kişilik özelliklerini betimlemek amacıyla 1800'lü yıllarda kullanılmıştır. 1816 yılındaki bu ilk kullanımın ardından barındırdığı nitel ve nicel çağrışımlar dolayısıyla günümüz teknolojik dünyasını kuşatmıştır [3]. Güvenilirlik denilince öncelikle hataların; nükleer sızıntı, uzay çalışmalarındaki başarısızlıklar, uçağın düşmesi gibi facialara neden olabileceği durumlar akla gelir. Günlük olarak kullandığımız ürünlerde meydana gelen hatalarda ise belki yüzlerce binlerce kişi hayatını kaybetmez fakat firmalar için çok kritik olan müşteri memnuniyetinin kaybedilebileceği durumlar ortaya çıkabilir.

Günümüzde tüketiciler geçmişe göre giderek daha fazla ürün bilincine sahip olmaktadır. Bu nedenle tüketiciler söz verildiği veya reklamı yapıldığı şekilde güvenilir olmayan ürünlere tahammül etmemektedirler. Bir ürünün güvenilirliği ile ilgili müşteri memnuniyetsizliği üretici firma için büyük maliyetlere neden olabilmektedir. “Mutsuz müşteri” ya da “tatmin olmayan müşteri”nin etkisi üzerine yapılan çalışmalara göre, “elde tutulamayan, mutsuz müşteri”, işletme için en önemli tehditlerden biridir. Çünkü, “mutlu müşteri”, bu memnuniyetini ortalama 4-5 kişiye anlatır. Oysa, “memnun olmayanlar” ortalama 8 ila 13 kişiyle (ki farklı yıllarda yapılan bazı araştırmalarda bu rakamı 9-21 olarak tespit edilmiştir) bu konuyu paylaşır [4]. Bu durum güvenilirliğin firmalar için önemini ortaya koymaktadır.

Güvenilirliğin önemini aşağıdaki maddelerle özetleyebiliriz:

- Günümüzün tüketicileri daha akıllı ve bilinçlidir.
- Gelecekte ürünlerinin güvenilirliklerini kontrol edebilen şirketler sektörlerinde ayakta kalabilecektir.
- Güvenilirliği düşük olan ürünlerin firmalara bedeli çok ağır olabilecektir.

Geleceğe dair belirsizliğe ve mevcut sistem ve parçaların çalışmama durumuna olan tahammülsüzlük, karar vericilerin güvenilirlik değerini bilme ihtiyacı ile güvenilirlik

analizi yöntemlerinin her geçen gün daha fazla kullanımı sonucunu doğurmaktadır. Bu da güvenilirliği günümüzde kuruluşlarca en fazla önem verilen performans ölçütlerinden biri haline getirmiştir.

İşletmelerde sahip olunan sistemlere ait bakım standardının ve politikasının kullanım koşullarına göre belirlenmesi de kullanıcı yönünden önemli sorunlardan biridir. Genelde üreticiler sistemin bakım standardı ve politikasını kendi koşullarına göre belirlemektedir. Ancak değişik şartlar altında çalışan sistemlerde bu; işletim, bakım destek gibi maliyetlerin artışına yol açmakta ya da beklenenden daha sık arızalar nedeniyle sahip olunan sistemin verimsiz kullanılmasına sebep olarak sistem güvenilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu bilgilerin ardından güvenilirlik, ürünün veya hizmetin belirli bir zaman diliminde (ürün ömrü) ürünün tasarım aşamasında belirlenen, ürün için uygun olduğu düşünülen çalışma koşulları altında bozulmaksızın çalışma olasılığı olarak tanımlanabilir.

Güvenilirlik, ürünün teknik özelliklerini karşılamaya devam etme olasılığı ve belirli koşullar altında, belirli bir zamana kadar hatasız olarak fonksiyonlarını yerine getirebilmesidir. Dolayısıyla, güvenilirlik zamana ve koşullara bağlı bir fonksiyondur. Kısaca güvenilirlik zamanla ürün ya da sistemdeki performans değişimidir.

Geleneksel “Kalite Kontrol”, ürünün montaj sonrası tasarlandığı şekilde çalışmasını sağlarken, güvenilirlik ürünün tasarlandığı şekilde ne kadar süre çalışacağı ile ilgilenir.

Güvenilirlik; tasarım, kalite, üretim, çalışma şartları, bakım ve zamana bağlıdır.

2.2. Güvenilirliğin Kullanım Alanları

Ürünlerin güvenilirlik özelliklerinin yüksek olabilmesi için ürün geliştirmenin önceki aşamalarında güvenilirlik tahminin yapılması ve sistem tasarımının güvenilirlik değerlendirmesine dayalı olarak yapılması literatürde karşılaşılan bir olgudur [5].

Yöneticiler güvenilirlik analizinden;

- Ürünün beklenen ömür tespitinde,
- İade/arıza miktarlarının tahmin edilmesinde,

- Yedek parça miktarının belirlenmesinde,
- Bakım periyotlarının oluşturulmasında,
- Ürünle ya da sistemle ilgili geliştirme yapılacak alanların belirlenmesinde,
- Risk ve prim hesaplamalarında faydalanırlar.

Bu nedenle güvenilirlik analizlerinin üretim sektörü başta olmak üzere otomotiv, inşaat, enerji, telekomünikasyon, havacılık, medikal, savunma, sigortacılık sektörleri gibi birçok sektörde çok geniş kullanım alanı vardır.

2.3. Güvenilirlik Mühendisliği

Teknoloji, bilim ve özellikle bilgisayarların gücünde meydana gelen gelişmeler mühendislik sistemlerinin hiç olmadığı kadar güçlü olmalarını sağlamıştır. Bu güç sayesinde, karmaşık yapıdaki güvenilirlik problemlerinin çözümleri mümkün olabilmektedir. Uygulanabilir çözümlerin artmasıyla birlikte bireylerin ve toplumların sistem arızalarından etkilenme derecesi de önemli ölçüde yükselmiştir. Örneğin; büyük şehirlerde yaşanacak elektrik ya da su kesintisi, toplu taşıma sisteminde yaşanacak bir problem, bir sosyal medya sitesinin çökmesi, bir bankanın/zincir marketin iç ağının bozulması insanların hayatlarını olumsuz etkilemektedir. Sonuç olarak; modern mühendislik süreçlerinin tasarım, üretim, dağıtım ve işletme aşamalarında güvenilirliğin önemi ortaya çıkmaktadır.

Endüstrinin ihtiyaç duyduğu yüksek güvenilirlik düzeyine sahip ürün, süreç ve sistemlerin tasarlanması sistem güvenilirlik analizi çalışmalarının en önemli amaçlarından biridir. Bu amacı gerçekleştirebilmek öncelikle maliyet ve performans kriterleri arasında uygun bir denge sağlamakla mümkündür. Böylelikle rekabetçi bir fiyatla piyasanın beklediği yüksek güvenilirliğe sahip ürünler/süreçler tasarlanabilir.

Optimal güvenilirlikli ürün tasarımında “ürün ne kadar iyi çalışıyor?” ve “maliyeti nedir?” sorularının cevabı aranmalı ve ideal olarak, performans ile maliyet arasında bir uzlaşma bulan sistem yapısı seçilmelidir [6].

Güvenilirlik mühendisinin sistem güvenilirliğinin hesaplanması, optimal sistem tasarımı ve uygun kalite kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi görevleri bulunmaktadır.

Ana amacı, sistem güvenilirliğini artırmanın en iyi yolunu bulmak olan bir güvenilirlik mühendisi için genel kabul gören prensipler aşağıda sıralanmıştır [7]:

- Performans gereksinimlerine uygun olarak sistemi mümkün olduğunca basit tasarlamak,
- Sistem bileşenlerinin güvenilirliğini artırmak,
- Daha az güvenilir bileşenler için paralel ilave bileşenler kullanmak,
- Bozulma anında aktif bileşene çevrilen beklemede ilave bileşen kullanmak,
- Bozulan bileşenleri, otomatik aktif bileşene çevrilmesi yerine, tamir ederek değiştirmek,
- Bileşenlerin bozulma anında ya da belirlenmiş zaman periyotlarında değiştirildiği koruyucu bakım kullanmak,
- Birbirinin yerine kullanılabilir bileşenler için daha iyi düzenlemeler yapmak,
- Yüksek emniyet faktörleri veya program geliştirme yönetim programı kullanmak,
- Erken bozulma oranı yüksek bileşenlerin, sistem hizmete sunulmadan önce test edildiği burn-in kullanmak şeklinde sıralanmaktadır.

Bu bilgiler ışığında güvenilirlik mühendisliği bir ürünün, işlevin veya servisin beklenen veya olması gereken güvenilirliğinin analiz edilmesi ve hataların en aza düşürülmesi veya bu hataların etkilerinin azaltılması için yapılması gereken işlemlerin belirlenmesi olarak ifade edilir. En genel tanımı ile güvenilirlik mühendisliğinin amacı, bir organizasyondaki ürünlerin güvenilirliğini sayısallaştırmak, test etmek ve raporlamaktır.

İşletmeler organizasyonun finansal gücünü arttırabilmek için ürünlerinin güvenilirliğinin finansal etkisini değerlendirerek kullanırlar.

2.4. Güvenilirliğin Faydaları

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

olunabilir. Bunlar rekabete yansıyan unsurlardır. Serbest piyasa koşullarında firmalar açısından konu özetlenecek olursa;

- Gelecekte sadece ürünlerin güvenilirliğini kontrol edebilen ve güvenilirliğini bilen şirketler ayakta kalabilecektir.
- İşletmeler güvenilirlik analizi uygulamalarının sağladığı üstünlük ve yararlarından faydalanmadıkça başarılı olamazlar.
- 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.
- Müşteriler ve halk her gün daha fazla güvenilirliğin bilincine varmaktadır. Güvenilir olmayan bir ürünün ne kadar pahalıya mal olduğunu günlük yaşamlarında öğrenmişlerdir.
- Tüm şirketler en üst düzey yönetimin desteği ile güvenilirlik ile ilgili yöntembiliminin gereğini yerine getirerek gelişmekte, gerektiğinde ürün üzerinde müşterinin talebi doğrultusunda değişiklik yaparak var olan rekabet koşullarında yaşamını sürdürmektedir.
- 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 kurumun başarısını müşteri ihtiyaçları ve beklentileri doğrultusunda belirlenen güvenilirlik, kalite, bakım yapılabilirlik gibi kavramlar belirlemektedir. Bu nedenle, bu kavramların geliştirilmesi kurumun başarısını arttıracaktır.

2.5. Güvenilirlik Maliyet İlişkisi

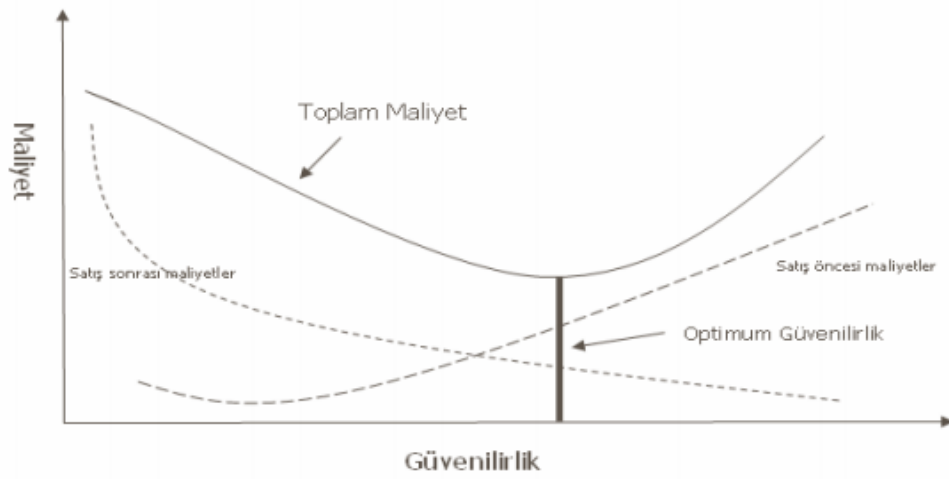
Güvenilirlik metodolojisi bilimsel ve ileri teknik gerektiren bir konu olmasının yanında, düzenli uygulamaları, analizleri ve aktiviteleri organizasyonun finansal performansını doğrudan etkiler.

Güvenilirlik kazanç/maliyet ikilisinin bir parçası olduğuna göre, güvenilirlik verileri, bunların düzenli analizleri, raporlar ve güvenilirlik tahminleri de finansal verileri doğrudan etkiler. Güvenilirlik analizlerinin temelinde arızalar arası zaman aralıkları (MTBF: Mean Time Between Failure) bulunmaktadır. Arızalar arası geçen sürenin uzun olması, sistemin arızalanmadan çalışma süresinin uzun olması anlamına gelmektedir ve bu sayede daha fazla ürün üretilmesini sağlamaktadır. Dolayısıyla sistem verimliliği artmış olmaktadır. Üretim firmalarının performansı ve buna bağlı olarak rekabet gücü, üretim imkanlarının güvenilirliğine ve bununla bağlantılı olarak kullanılabilirliğine bağlıdır [8].

Genel olarak bir üretici ürünün güvenilirliğini arttırmaya çalıştıkça, ürünün tasarım maliyeti veya üretim maliyetleri de artar, çünkü, daha iyi kalitede elemanların kullanımı, üretim süreçlerinin, kontrol ve test süreçlerinin daha yakından takibi gerekir. Diğer yandan ise bakım ve tamir maliyeti düşer [9]. Fakat düşük üretim ve tasarım maliyeti düşük toplam maliyet anlamına gelmez. Ürünün toplam maliyeti, sadece fabrikadan çıktığı andaki maliyeti değil, ürünün tüm ömür çevrimindeki oluşan maliyetler düşünülerek hesaplanmalıdır.

Toplam ürün maliyeti tasarım ve üretim maliyetleri ile sevkiyat sonrası maliyetlerin toplamına eşittir. Ürün güvenilirliğini arttırmak, ürün maliyetini de arttırmış olur ama aynı zamanda ürün destek maliyetleri de azalmış olur. Ürünün arzulan ömrü boyunca bakım ve işletim maliyeti ile fiyatı optimum güvenilirlik seviyesinde minimum olmalıdır [10].

Optimum minimal ürün maliyeti, ürün için optimum güvenilirliğin kullanılması ile belirlenir ve uygulanır. Şekil 2.1'de güvenilirlik-maliyet ilişkisi ve optimum güvenilirlik grafiği verilmiştir. Burada optimum güvenilirlik seviyesini yakalamanın, toplam maliyeti en aza indirmek anlamı taşıdığı ifade edilmektedir.



Şekil 2.1. Güvenilirlik-Maliyet İlişkisi ve Optimum Güvenilirlik [11]

2.6. Havacılıkta Güvenilirlik

Başlangıçta havacılıkta tasarlanan uçağın güvenilirliğinden ziyade uçup/uçamayacağı endişesi bulunmaktaydı. Bu nedenle ilk yıllarda birçok uçak kaybı yaşanmıştır. Daha sonraki yıllarda havacılıkta yaşanan gelişmeler sonucunda uçuş emniyeti ön plana çıkmıştır.

Uçuş emniyetinin ön plana çıkmasının ardından meydana gelen uçak kazalarına hangi arızaların sebep olduğunun bilinmesine gerek duyulmuş, bunun yanı sıra uçakların ömürlerinin ne kadar olması gerektiği araştırılmıştır. Özellikle uçak sistemlerini oluşturan parçaların sürtünme, yorulma ve korozyon etkisi ile oluşan çatlakların takibi yapılmaya başlanarak 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 bakım faaliyetlerinde maksimum ömür, her bir parçanın incelenmesi ve tek tek kullanım ömrünün izlenmesi ile sağlanır. Bu şekilde sistem emniyetli bir şekilde çalışır [12].

Bu bilgiler ışığında uçak kaybı gibi maddi ve manevi çok önemli sonuçlara yol açabilecek sistemlerin hasarının tehlikeli boyuta ulaşmadan tespit edilmesi zorunludur. Bu ise sistemi oluşturan parçaların ömürleri ile ilişkili güvenilirlik bilgilerinin tahmin edilmesi ile mümkün olabilecektir. Böylelikle parçalar hasarlanmadan ve sisteme zarar

vermeden değiştirilme yoluna gidilecek ve lojistik destek gereksinimleri tahmin edilen güvenilirlik bilgilerine göre planlanabilecektir [13].

2.7. Güvenilirlikle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Güvenilirlik kelimesinin kullanımı ve bilinirliği her yıl çok daha fazla oranda artış göstermektedir. Günümüzde anahtar kelime olarak güvenilirlik girildiğinde popüler arama motorlarından Google’da 1,7 milyanın üzerinde sonuç listelenmektedir, ancak 2004 yılında listelenen sonuç sayısı sadece 12,5 milyondur [3].

Güvenilirlik, genel olarak çok farklı alanlarda ve çok farklı disiplinlerde kullanılmaktadır ancak bu tez çalışması kapsamında incelenen bölüm, ürün güvenilirliği ve elde edilen verilerden ürün bakım planlamasına yönelik öngörülerde bulunulması ve lojistik sistemin bu bilimsel öngörüler ışığında daha ekonomik ve etkili bir şekilde işletilmesidir.

Konuyla ilgili daha önce yapılmış Uzun ve Özdoğan [14]’ın bakım zamanlarının belirlenmesine yönelik çalışmasında, bir cam üretim tesisindeki her bir bileşenin güvenilirlik fonksiyonu ve sistem güvenilirliği güvenilirlik blok diyagramı yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ardından, bu fonksiyonlar ve eşitlik yardımıyla herhangi bir zaman dilimi için sistemi oluşturan makinelerin ve sistemin güvenilirlik değerleri elde edilmiştir. Sistemi oluşturan makinelerden sistemin güvenilirlik değeri üzerinde en fazla etkisi bulunanı seçilerek bu makine için en iyi önleyici bakım periyodu hesaplanmıştır. Bu çalışmada, güvenilirlik analizleri kullanılarak önleyici bakım zamanları belirlenmiştir.

Bakım zamanlarıyla ilgili olarak güvenilirlik analizlerinin yapıldığı diğer bir çalışmada [15], uçağın yapısal parçalarının üretildiği üretim hattının arızalanma verileri elde edilmiş olup bu verilere uygun arızalanma dağılımı hesaplanmıştır. Güvenilirlik hesaplamaları doğrultusunda bu verilerin üretim hattı bakım planlarının iyileştirilmesinde kullanılabileceği ve mevcut sistemin analizine yardımcı olacağı belirtilmiştir.

Güvenilirlik analizinin bir diğer amacı da üretim hatlarının ya da sistemlerin mevcut arızalanma durumlarının analiz edilerek, bu analiz ışığında üretim hattı yerleşiminde değişiklikler yapılmasıdır. Zhang et al. [16], çalışmasında hata ağaçları yöntemini kullanarak bir hücreyel imalat biriminde arızalanmaların sistemi etkileme boyutunu incelemiştir. Çalışmada üretim hattında yer alan her bir alt sistemin arızalanma oranları hesaplanmış olup, bu alt sistemlerin mevcut sistemi etkileme boyutu

incelenmiştir. Ardından, sistem üzerinde en büyük etkiye sahip sistem bileşeni belirlenerek sistem güvenilirliğinin artırılması için önerilerde bulunulmuştur.

Gıda sektöründe yapılan güvenilirlik çalışmalarının özetlendiği başka bir çalışmada Tsarouhas [17], güvenilirlik ve başarısızlık oranı modellerini kullanarak arıza riski yüksek olan makinelerin tespit edilmesini ve bunların bakım politikalarının geliştirilmesine yönelik önerilerde bulunmuştur.

Diğer bir çalışmada [18] Li Wenjuan, Ma Cunbao, Song Dong ve He Enning bakım maliyetini azaltmak için bir bakım planlama rehberi ve optimize edilmiş bir şema geliştirmişlerdir. Çalışmaları tamamen bakım zamanının öngörülmesine dayandığı için arıza zamanı tahmini yaparak bakım zamanının hesaplanabileceğini belirtmişlerdir.

Zaretsky, Hendricks ve Soditus [19], konuyla ilgili 2002 yılındaki çalışmalarında motor tasarımı güvenilirliğinin belirlenmesinde, Yabsley ve İbrahim [20], 2008 yılındaki çalışmalarında bakımın ekonomik etkisini hesaplamada, Demirci [21], 1998 yılındaki çalışmasında uçak parçalarının güvenilirliklerini tahmin etmede Weibull parametreleri ve ilgili fonksiyonları kullanmışlardır.

Varol [22], 2013 yılındaki çalışmasında ticari havayolu şirketleri tarafından kiralanacak motorlara yönelik risk ve arıza miktarlarının tahmin edilmesi için bir metot geliştirmiştir.

3. GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİNDE KULLANILAN İSTATİSTİKSEL DAĞILIMLAR

Birçok alanda yaygın olarak kullanılan istatistik bilimi, güvenilirlik analizinde de olasılık dağılımlarıyla birlikte önemli bir yer edinmiştir. Güvenilirlik analizinde, olasılık dağılımlarından kesikli dağılımlar belirli bir zaman aralığında gerçekleşen hata sayısı gibi kesikli olaylarla ilgilenirler. Sürekli dağılımlar ise zamana karşı dayanma süresi gibi herhangi bir değer alan değişkenleri modellemek için kullanılırlar.

Olasılık dağılımları sistemler, alt sistemleri veya bileşenleri için zamana karşı bozulma ya da arızalanma modelleri olarak yaygın biçimde kullanılırlar. Bir sistemin yaşam süresi; üretim miktarı, üretim için kullanılan madde veya çevresel koşullardaki değişim gibi birçok faktöre bağlıdır. Önce sistem ya da sistemin bir alt sistemi veya sistemin bir bileşeni için, süre bir rassal değişken olarak alınarak zamana karşı bozulma ya da arızalanma için uygun bir olasılık modeli oluşturulur. Sonra oluşturulan olasılık modelindeki parametreler tahmin edilir. Ayrıca oluşturulan olasılık modellerinin sağ kalım (survival) fonksiyonu, risk (hazard) fonksiyonu gibi bazı özellikleri incelenir.

3.1. Güvenilirlik Modelleri ve Veri Tipleri

Güvenilirlik modelleri bir ürünün hata oranını zamana bağlı bir fonksiyon olarak tahmin etmenin yanı sıra belirli bir yaş veya zaman aralığı için hata yapma (veya hatasız devam etme) ihtimalini verir. Bu modeller, verinin interpolasyona (ve bazı ekstrapolasyonlara) olanak sağlayan sürekli fonksiyonlara bağlı matematiksel gösterimidir. Bu modellerin temelinde istatistiksel dağılımlar bulunmakta olup, bu dağılımların özel bir alt grubu olan “ömür verisi dağılımları” en yaygın olarak kullanılan dağılımlardır [23].

Modeller hata oranı davranışına göre karakterize edilirler. Hata yapma oranı belirli bir zamana kadar hatasız işlev gösteren bir parçanın bu noktadan sonraki küçük bir zaman aralığında hata yapma olasılığıdır. Hata yapma oranları sabit, azalan, artan, kuvvet şeklinde veya başka bir şekilde olabilir. Artan hata oranları aşınmayı, azalan hata oranları ise erken ölümleri gösterir.

Oluşturulmaya çalışılan modeller verilerden türetilmektedir. Bu veriler ise elde edildikleri kaynağa göre laboratuvar verileri ve saha verileri olarak ikiye ayrılır.

Laboratuvar verileri, tasarım esnasındaki testler, değerlendirme testleri, ömür testleri, nicel hızlandırılmış testler, güvenilirlik gelişim testleri gibi testlerden elde edilir.

Saha verileri ise, müşteri hizmetlerinden, garanti iadelerinden veya muayeneden dönen ürünlerden elde edilir. Saha verileri gerçek kullanım şartlarını ve kullanım hatalarını gösteren verilerdir. Fakat bu veriler zaman zaman yanıltıcı da olabilmektedirler. Ayrıca bu verilerin elde edilebilmesi için veri toplama ve analiz sistemi gereklidir.

Verilerin elde edilmesi, değerlendirilmesi (doğru girilmiş, temsil edici) ve istenen formata getirilmesi güvenilirlik analizinde tüm çalışmanın %90'lık kısmını oluşturmaktadır.

Elde edilen verilerden ürün ömrüne yönelik olasılığa dayalı modeller çıkarmak için istatistiksel metotlar kullanılır. Güvenilirlik mühendisliğinde ve ömür verisi analizlerinde her şey tahminlere bağlıdır. Oluşturulan modeller olabildiğince doğru tahminler yapmak için kullanılmaktadır [23].

Pratik amaçlar için bir ürünün gerçek (%100 kesinlikle) güvenilirlik değerini belirleyebilmek imkansızdır. Bu gerçek değer sadece ürün hata yaptığında belirlenebilir. Ömür verisi analizinin amacı bu gerçek değerleri yüksek doğrulukla tahmin edebilmektir.

Bu amaç için kullanılan veri tipleri tam veri ve sansürlü veri olarak iki gruba ayrılmaktadır. Güvenilirlik verilerinin çoğunda sansürlü veriden kaynaklanan kayıp bilgi bulunmaktadır. Bu nedenle oluşturulan modeller ve analizlerde bu durum da hesaba katılmalıdır. Tam veri ve sansürlü veri örneği Tablo 3.1'de sunulmuştur.

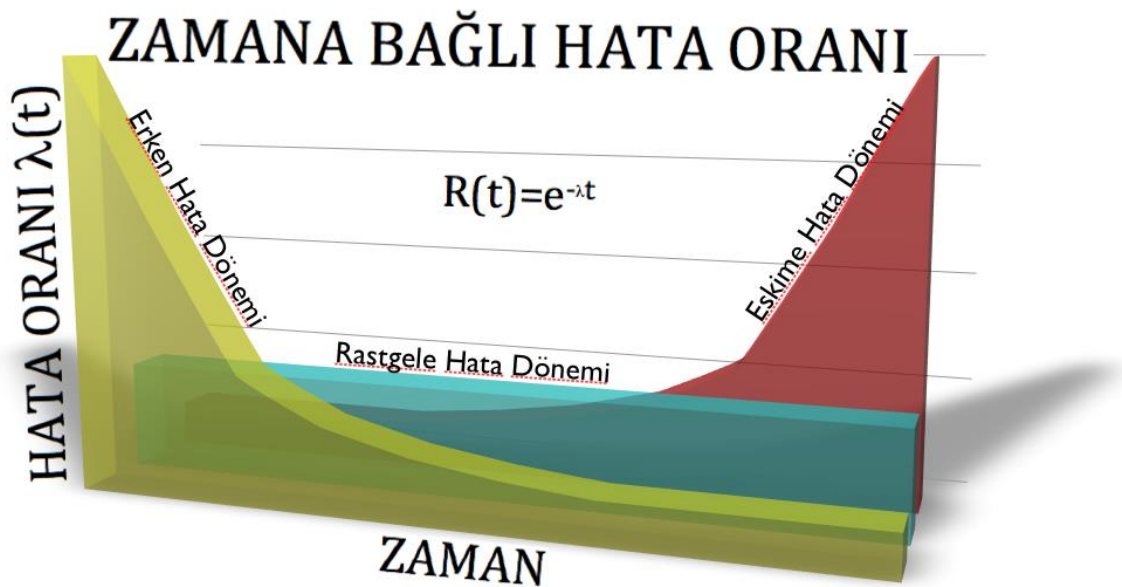
Tablo 3.1. Tam Veri ve Sansürlü Veri [23]

Gözlem Tipi	Açıklama	Örnek
Tam Veri	Arızanın olduğu zamanı tam olarak bilirsiniz.	Tam olarak 500. Günde arıza meydana geldi
Sağdan Sansürlü Veri	Sadece arızanın belirli bir zamandan sonra oluştuğunu bilirsiniz.	500 gün geçti hala arıza meydana gelmedi
Soldan Sansürlü Veri	Sadece arızanın belirli bir zamandan önce oluştuğunu bilirsiniz.	500. günden önce arıza meydana geldi
Aralıklı Sansürlü Veri	Sadece arızanın belirli bir zaman aralığında oluştuğunu bilirsiniz	475 ile 500. Gün arasında bir zamanda arıza meydana geldi.

Güvenilirlik analizinde Normal dağılım, Üstel dağılım, Log-normal dağılım, Weibull dağılımı gibi bazı tek değişkenli istatistiksel dağılım modelleri; iki değişkenli Üstel dağılım ve iki değişkenli Pareto dağılımı gibi bazı iki değişkenli istatistiksel dağılım modelleri; Weibull dağılımlarının karması gibi bazı karma (Mixture/Mixed) dağılım modelleri kullanılmaktadır.

Bir ürünün yaşamı hata niteliklerine göre üç döneme ayrılır. Birinci dönemde büyük çoğunlukla erken hatalar kendini gösterirken rastgele hatalar görece daha azdır. İkinci dönem ürün tasarımının oturduğu rastgele hatalar dönemidir. Son dönem ise ürünün eskimesinden kaynaklı aşınma hataları büyük artış göstermekte rastgele hatalar ise bunun yanında görece çok küçük kalmaktadır [24]. Görsel 3.1’de hataların ortaya çıkış oranının zaman boyutundaki değişimi görülmektedir.

Güvenilirlik çalışmalarında en yaygın kullanım alanına sahip olasılık dağılımı Weibull dağılımıdır. Weibull dağılımı, kuvvet karakteristiği eğrisinin, erken hata dönemi, rastgele hata dönemi (kullanışlı ömür) ve eskime hata dönemi olarak adlandırılan (Görsel 3.1) tüm dönemlerini karakterize edebilme yeteneğine sahiptir. Bir başka ifadeyle, Weibull dağılımı hata hızının artan, azalan ve sabit olduğu durumların hepsinde kullanılabilirdiği için esnek bir güvenilirlik modeli sunar.



Görsel 3.1. Kuvvet Karakteristiği Eğrisi [25,26]

Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde ReliaSoft firması tarafından hazırlanmış olan WEIBULL++ güvenilirlik analizi paket programı kullanılmıştır. ReliaSoft Weibull++, ömür verisi analizi (Weibull analizi) konusunda dünya çapında binlerce firma tarafından standart olarak kullanılmaktadır [27].

Weibull++, standart Yaşam Verisi Analizi (Life Data Analysis - LDA) için analiz, grafikleştirme ve raporlama konularını tüm yönleriyle kapsayan araçların yanı sıra, bozulma verisi analizi (degradation data analysis), garanti verisi analizi (warranty data analysis), parametrik olmayan ömür verisi analizi (non-parametric life data analysis), yinelenen olay verisi analizi (recurrent event data analysis) ve güvenilirlik test tasarımı (reliability test design) gibi çeşitli analizleri de bu araçlarla bütünleştirmektedir [27].

Yazılımda aşağıda listelenen dağılımlar kullanılmaktadır:

- Weibull
- Normal ve Lognormal
- Üstel
- Gama ve Genelleştirilmiş Gama
- Lojistik ve Loglojistik
- Gumbel
- Bayesian-Weibull
- Karışık Weibull
- Rekabetçi Arıza Modları (CFM)

Standart yaşam veri analizi için parametre tahmin seçenekleri şunları içerir:

- X Sıralaması (RRX)
- Y Sıralaması (RRY)
- Maksimum Olabilirlik Tahmini (MLE)
- Doğrusal Olmayan Sıra Regresyonu
- Kesirli Arıza Analizi

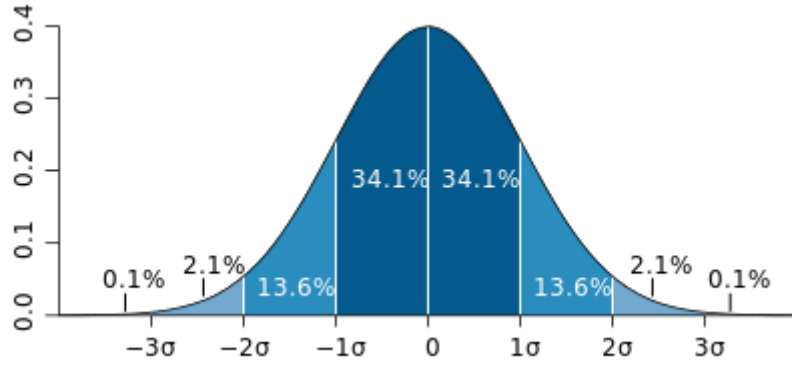
Bu bölümde Güvenilirlik Mühendisliğinde kullanılan istatistiksel dağılımlar ve bu dağılımların risk üzerindeki etkileri kapsamında Normal Dağılım, Log-normal Dağılım, 2 ve 3 parametrelili Weibull Dağılımı ve Beta Dağılımları incelenecektir.

İstatistiksel dağılımlarda ömür kontrollü değişkenlerin açıklanması amacıyla kuyruk yapıları seçilir. Kuyruk yapıları risk değerlendirmesinde çok büyük bir etkiye sahiptirler. Olasılık dağılımlarının şeklinin de arıza tahmini olasılığı üzerinde derin bir etkiye sahip olduğu açıktır. Buna göre daha belirsiz olan, çoğunlukla farklılıklarla karmaşık bir şekilde açıklanan bilgilerin dağılımlarının %5 ve %95 arasında elde edilmesi gerekmektedir. Böyle durumlarda istatistiksel araçlar doğru 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 incelenmiştir.

3.2. 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 ya da bir eğri şeklinde olabilir. Şekil 3.1’de bilinen Normal dağılım grafiği (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 1/1000 oranında limit dikkate alınabilir. Diğer bir deyişle periyodik ömür, zamanından önce ortaya çıkabilecek 1000 arızada 1 olasılıktan fazla olmayacak şekilde saptanmak istenir.

Eğer dağılım kesinlikle biliniyorsa, 1/1000 periyodik ömrünü 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 3.1. Normal Dağılım Grafiği

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. Birikimli dağılım fonksiyonu ilgili eğri noktalarının belirlenmesinde kullanılır.

Gözlem değerlerinin oluşturduğu ana kütle değerlerin gruplandırılması amacıyla ortalama, medyan ve mod olmak üzere üç tip merkezi eğilim ölçütü bulunmaktadır. Ortalama, bunlardan en çok kullanılanıdır ve kütlelerin ilk momentini veya ağırlık merkezini verir. Eğer olasılık yoğunluğu dönüm noktasında ise ana kütle ortalaması dengelenebilir. Mod en çok görülen gözlem değeridir ve bu nedenle ana kütlelerin tepesi olarak gözükmektedir. Medyan ise gözlem değerleri küçükten büyüğe veya büyükten küçüğe sıralandığında ana kütlelerin yarısından büyük, diğer yarısından ise 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 karşılaştırması yapılacaktır.

3.3. Normal Dağılım

Doğada çok sık karşılaşıldığı için en çok bilinen dağılımdır. Karl Gauss tarafından bulunduğu için onun ismi ile anılır. Normal dağılım yoğunluk fonksiyonu eşitlik 3.1’de gösterilmektedir [28].

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} & ; -\infty < x < +\infty \\ 0 & ; \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.1)$$

Model parametresi μ ana kütle ortalamasıdır ve dağılımın merkezinde bulunur. Standart sapma σ , gözlem değerlerinin aritmetik ortalama etrafındaki dağılımının ortalama bir ölçüsüdür [29].

3.4. Log-normal Dağılım

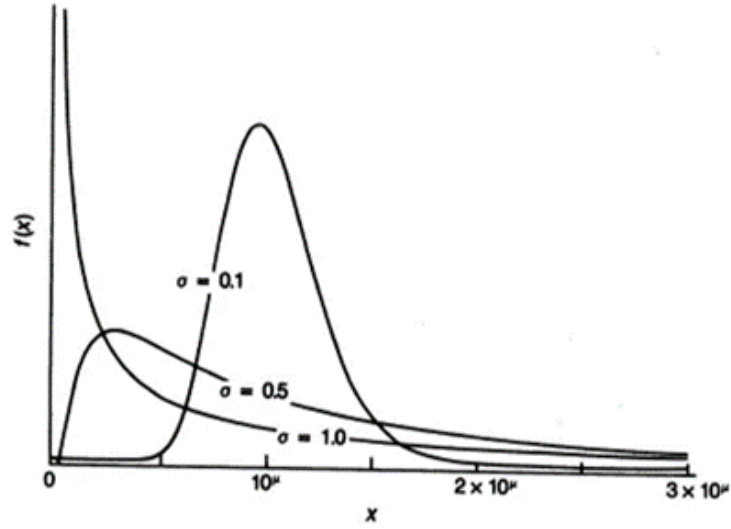
Bir X rassal değişkeninin logaritması normal dağılım gösterirse, bu X rassal değişkeni Log-normal dağılıma sahip rassal değişken olur. Değişik isimler altında da kullanılan Log-normal dağılımı, ilk olarak 1879 yılında Galton ve McAlster tarafından uygulandığı için Galton-McAlster dağılımı olarak da bilinir. Bu dağılım özellikle iktisatta üretim verilerine sıkça uygulanır [30].

Güvenilirlik mühendisliğinde Log-normal dağılım, onarım sürelerini modellemek için en kullanışlı ömür dağılımlarından biridir. Öncelikle genel güvenilirlik analizi, malzeme mukavemeti ve yorulma arızaları için kullanılır. Özellikle kimyasal süreçlerden kaynaklanan elektronik ile ilgili, korozyon, difüzyon, çatlak büyümesi gibi birçok arıza mekanizması log-normal dağılım ile modellenebilir [31].

Log-normal dağılım için olasılık yoğunluk fonksiyonu [32];

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] & ; x > 0 \\ 0 & ; \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (3.2)$$

Farklı σ değerleri için ($\mu = 0$) log-normal dağılım olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 3.2’de sunulmuştur.



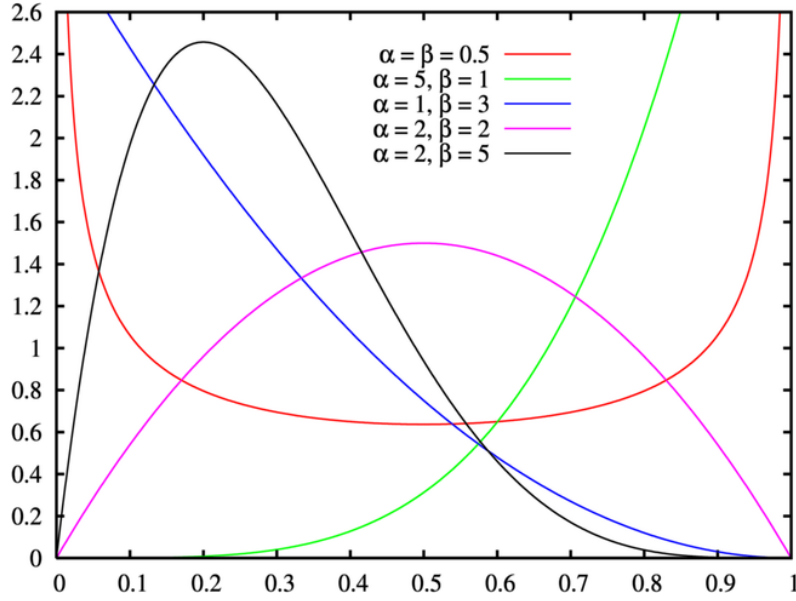
Şekil 3.2. Farklı σ Değerleri İçin Log-normal Dağılım Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

3.5. Beta Dağılımı

Olasılık kuramı ve istatistik bilim dallarında beta dağılımı (0,1) aralığında iki tane pozitif şekil parametresi (tipik olarak α ve β) ile normalize edilmiş bir sürekli olasılık dağılımıdır. Şekil 3.3'de görülebileceği gibi parametre değerlerine bağlı olarak farklı eğriler gösterir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu Eşitlik (3.3)'de verilmiştir [33].

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad \alpha > 0, \beta > 0, 0 < x < 1 \quad (3.3)$$

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



Şekil 3.3. Farklı Parametre Değerlerine Göre Beta Dağılımı [33]

3.6. Weibull Dağılımı

Weibull dağılımı Waloddi Weibull tarafından 1937’de bulunmuştur. Dağılımının geniş aralıktaki problemlere uygulandığını iddia ettiği tezi 1951’de Amerika’da yayımlamıştır. Bu noktayı, tezinde çeliğin gücünden başlayıp İngiliz Adaları’ndaki yetişkin erkeklerin boyuna kadar giden yedi örnekte göstermiştir [34].

1950’lerde Weibull’un tezine gösterilen tepki şüphecilikten tamamen reddetmeye kadar değişiklik gösterecek şekilde olumsuzdu. Weibull’un verilerin dağılımı seçebilecekleri ve parametrelere yerleştirilebilecekleri iddiası gerçek olamayacak kadar iyi göründü. Fakat Dorian Shainin ve Leonard Johnson gibi alanın öncüleri tekniği uyguladılar ve geliştirdiler. ABD Hava Kuvvetleri Weibull’un metodunun değerini fark etti ve 1975’e kadar onun araştırmasını finanse etti. Günümüzde Weibull, ömür verilerini yerleştirmede dünyada önde gelen dağılımdır [35]. Dorian Shainian, Waloddi Weibull’u 1950’lerin ortalarında Hartford Yüksek Lisans Merkezinde (RPI) istatistik mühendisliğine tanıttı ve Pratt&Whitney Aircraft’ı Weibull analizini kullanmaları için teşvik etti. Weibull dağılımı ile ilgili ilk kitapçığını yazdı ve Pratt&Whitney Aircraft için bu konuda bir film çekti [34].

3.6.1. Weibull Dağılımının Mühendislikte Kullanılması

Weibull dağılımı, güvenilirlik mühendisliğinde en yaygın kullanılan ömür dağılımlarından biridir. Biçim parametresi değeri β 'ya dayanan ve diğer dağılım tiplerinin özelliklerini alabilen çok yönlü bir dağılımdır [34].

Weibull dağılımıyla çözülmüş mühendislik problemlerine örnek olarak; bir projede üç aylık bir süre zarfında bir parçanın çalışırken üç arızasının olduğu rapor edilir. Bu durumda sonraki üç ayda, altı ayda ve bir yılda bu parçanın kaç defa arıza yapacağını, bunun maliyetinin ne olacağını, riski ve zararları azaltmak için en iyi düzeltici işlemin ne olacağını belirlemek. Yedek parça sipariş etmek ve bakım işçiliğini planlamak için kaç adet ünitenin sonraki yıl, ay ay her bir arıza moduna göre revizyon yapılmak amacıyla fabrikaya gelmesinin öngörülmesi. Emisyon sistemindeki herhangi bir parçanın arıza oranının garanti süresi içinde %4'ü geçmesi durumunda ilgili devlet kurumu tarafından üretilen araçların geri çağırılması gerekeceğinden, garanti verilerine dayanarak hangi parçaların hangi kullanım süresi sonunda %4 arıza oranına ulaşacağını tespit edilmesi. Bir mühendislik değişikliğinden sonra eski arıza modunun yok edildiğini veya %90 güven seviyesine gelecek şekilde önemli seviyede geliştirildiğini doğrulamak için kaç ünitenin ne kadar süre ile test edilmesi gerekeceği. Bir imalat makinesi taahhüt edilenden daha sık arızalandığında arıza sebebinin neden kaynaklandığının tespit edilmesi. Yıpranma arıza moduna tabi bir parçanın plansız arıza maliyeti planlı değiştirme maliyetinin yirmi katı olduğunda bu parçanın en iyi değiştirme aralığının tespit edilmesi verilebilir.

3.6.2. Weibull Dağılımının Kapsamı

Weibull dağılımı şunları içerir:

- Verileri yerleştirme ve çıkan şekli yorumlama
- Arıza tahmini ve ön görmesi
- Düzeltici işlem planlarını değerlendirme
- Mühendislik değişikliğinin doğrulanması
- Bakım planlaması ve maliyet etkin değiştirme stratejileri
- Yedek parça tahmini

- Garanti analizi ve destek maliyeti tahminleri
- CAD/CAM, sonlu eleman analizi vs. gibi karmaşık tasarım sistemlerinin kalibrasyonu
- Hizmet problemlerine yönelik yönetim önerileri

Arıza tipleri şunları içerir:

- Geliştirme, üretim ve hizmet,
- Mekanik, elektronik, malzeme ve insan arızaları,
- Doğa: yıldırım çarpması, yabancı madde hasarı,
- Kalite kontrol, tasarım aksaklıkları, kusurlu malzeme.

3.6.3. Weibull Dağılımının Avantajları

Weibull dağılımının sağladığı ilk avantaj, makul seviyede doğru arıza analizi ve çok küçük örneklerle arıza tahmini sağlama kabiliyetidir. “Daha fazlasıyla karşılaşmadan” bir problemin çok başlardaki belirtilerinde çözümler mümkün olmaktadır. Ayrıca küçük örnekler maliyet etkin parça testine de olanak tanımaktadır.

Örneğin her bir parça grubunda (dört rulman grubu diyelim) ilk arıza olduğunda “ani ölüm” Weibull testleri yapılır. Tüm rulmanlar arızaya karşı test edildikleri takdirde maliyet ve gerekli zaman çok daha fazla olacaktır.

Weibull dağılımının başka bir avantajı basit ve kullanışlı bir grafik çizimi sağlamasıdır. Verilerin grafiksel çizimi mühendisler için çok önemlidir. Weibull verilerinin grafiksel çizimi, Weibull’un 1951’deki tezinde belirttiği gibi özellikle bilgi vericidir [36].

3.6.4. Weibull Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

Üç parametrelili Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonu Eşitlik 3.4’de verilmiştir:

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (3.4)$$

$$f(T) \geq 0, T \geq 0, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty$$

Bu eşitlikte;

- η = ölçek parametresini
- β = biçim parametresini (veya eğim)
- γ = yer parametresini gösterir.

Parametrelerin değerlerine dayalı olarak Weibull dağılımı çeşitli ömür davranışlarını modellemek için kullanılabilir. Genellikle yer parametresi “0” varsayılır ve bu durumda Weibull pdf iki parametrelili dağılım olur.

3.6.5. Arıza Dağılımı

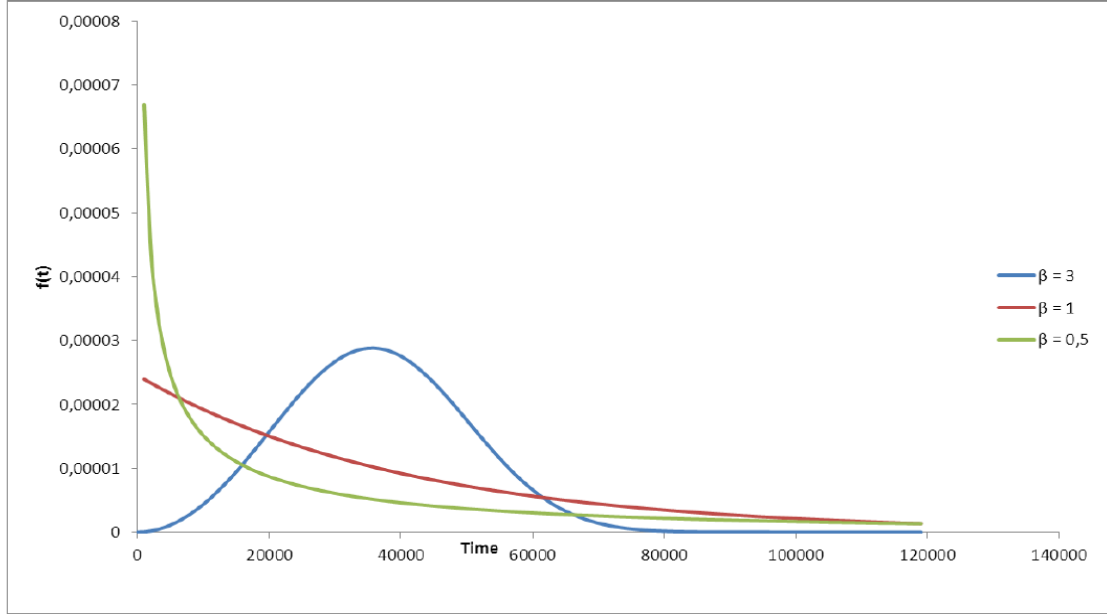
Weibull çiziminin (plot) eğimi olan beta (β), Weibull arıza dağılımları ailesinin hangi üyesinin veriyi en iyi yerleştireceğini veya tanımlayacağını belirler. Ayrıca eğim β , hangi arıza sınıfının bulunduğu da aşağıdaki gibi gösterir:

- $\beta < 1$ yeni parça ölümünü gösterir.
- $\beta = 1$ (yaştan bağımsız) rasgele arızalar anlamına gelir.
- $\beta > 1$ yıpranma arızalarını gösterir.

Yatay ölçek, arızaya kadar yaştır. Dikey ölçek, herhangi bir yaşta arıza yapabileceklerin yüzdesini tanımlayan Kümülatif Dağılım Fonksiyonudur (CDF). CDF ölçeğinin tamamlayıcısı ($100 - \text{CDF}$) güvenilirliktir. Karakteristik ömür (η), ünitelerin %63.2'sinin arıza yapacağı yaş olan B63.2 ömrü olarak tanımlanır (yatay kesik çizgili grafik çiziminde gösterilmiştir). $\beta = 1$ için MTTF ve η eşittirler. $\beta > 1$ için MTTF ve η neredeyse eşittirler.

3.6.5.1. β 'nın Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Üç Etkisi

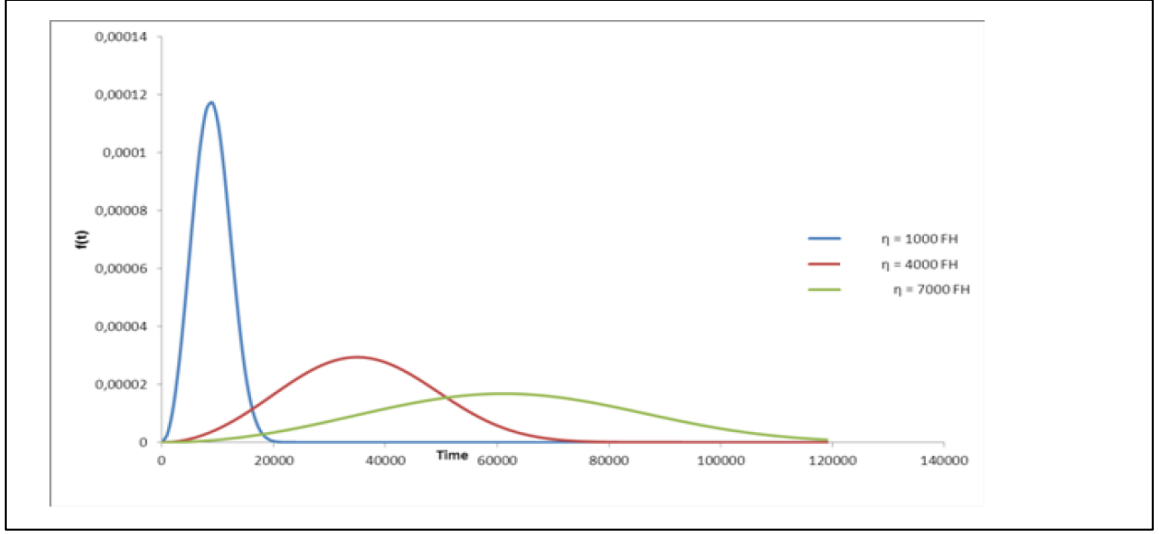
Şekil 3.4'de β 'nın farklı değerlerinin olasılık dağılım fonksiyonu üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu şeklinin β değerine bağlı olarak çeşitli biçimler alabilmektedir [37,31].



Şekil 3.4. Weibull β Değerinin Ortak η 'de Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkisi

3.6.5.2. Weibull Dağılımı İçin η 'nin Karakteristik Etkileri

Weibull dağılımında η 'deki değişikliğin dağılım üzerinde apsis (abscissa) ölçeğindeki değişiklikle aynı etkisi vardır. β 'yı sabit tutarken η 'nin artırılması olasılık dağılım fonksiyonunun dışarı doğru uzamasına neden olur. Olasılık dağılım fonksiyonu eğrisinin altındaki alan sabit ve bire eşit olduğundan eğrisinin tepe noktası Şekil 3.5'de de gösterildiği üzere η 'nin artırılması ile azalacaktır.

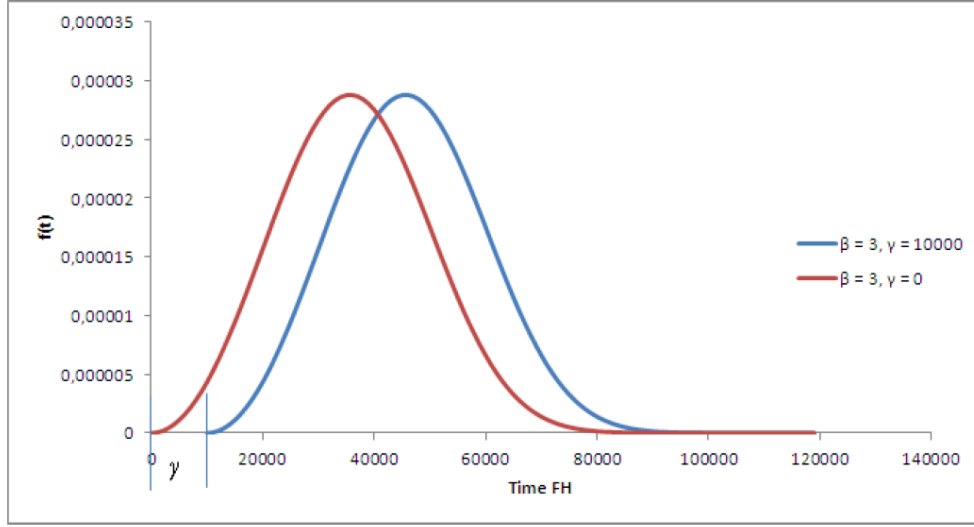


Şekil 3.5. Ortak β için η 'nin Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkileri

- β ve γ aynı tutulurken η arttırıldığında dağılım sağa doğru uzar ve yüksekliği azalır, fakat şeklini ve yerini korur.
- β ve γ aynı tutulurken η azaltıldığında dağılım sola doğru içeri kayar (yani başlangıcına veya 0'a veya γ 'ye doğru) ve yüksekliği artar.
- η 'nin T (zaman) ile aynı ölçü birimleri vardır; saatler, miller, çevrimler, faaliyete geçirmeler vs.

3.6.5.3. Weibull Dağılımı İçin γ 'nin Karakteristik Etkileri

Yer parametresi olan γ , adından da anlaşılacağı üzere apsis boyunca dağılımın yerini gösterir. γ değerinin değiştirilmesinin dağılımın Şekil 3.6'da ve ilgili fonksiyonunda olduğu gibi ($\gamma > 0$ ise) sağa veya ($\gamma < 0$ ise) sola kayma etkisi olur.



Şekil 3.6. Pozitif γ 'nin Weibull Olasılık Dağılım Fonksiyonu Üzerindeki Etkisi

- $\gamma=0$ olduğunda dağılım $T=0$ 'dan veya orijinden başlar.
- $\gamma>0$ olduğunda dağılım γ 'nin orijinin sağındaki yerinden başlar.
- $\gamma<0$ olduğunda dağılım γ 'nin orijinin solundaki yerinden başlar.
- γ , bu tür ünitelerin arızaya kadar en erken zaman tahminini verir.
- 0 'dan $+\gamma$ olan ömür periyodu bu tür ünitelerin arızasız çalışma süresidir.

γ parametresi tüm değerleri varsayabilir ve bir arızanın gözlenebileceği en erken zaman tahminini sağlar. Negatif γ test başlamadan önce arızaların olduğunu gösterir (yani üretim, depolama, aktarma esnasında, görev başlamadan önceki kontrol esnasında veya gerçek kullanımdan önce).

γ 'nin T (zaman) ile aynı ölçü birimleri vardır; saatler, miller, çevrimler vs.

4. F-16 UÇAKLARI ACCESSORY DRIVE GEARBOX (ADG) ÜNİTESİNİN GÜVENİLİRLİK MÜHENDİSLİĞİ BAĞLAMINDA İNCELENMESİ

4.1. Problem

Havacılıkta lojistik yönetim faaliyetleri diğer alanlara göre daha karmaşıktır. Bunun nedeni havacılıkta kullanılan ünitelerin uluslararası geçerlilikte belirli spesifikasyonlara göre üretilme zorunluluğudur. Ayrıca kullanılacak her türlü malzemenin ilgili teknik emirlerde belirtilmiş olması gerekmektedir.

Bu sebeple havacılık malzemelerini üreten firmalar dünya çapında sınırlı sayıdadır. Bu ise, sipariş verdiğiniz malzemelerin üretim sürecini uzatmakta, maliyetini ise arttırmaktadır. Eğer depolarda yeterli miktarda stok yoksa bakım periyodunda malzeme kaynaklı büyük sıkıntılar yaşanabilir.

Jet uçaklarında yurt dışından sipariş edilen malzemelerin teslim süresi 6 ay ile 3 yıl arasında değişebilmektedir. Bu da geleceğe yönelik ihtiyaçların doğruluk payı yüksek şekilde öngörülmesini zaruri hale getirmektedir.

4.2. Amaç

Bu araştırma ile F-16 uçaklarında kullanılan Accessory Drive Gearbox (ADG) ünitesinin güvenilirlik kavramı yardımıyla zaman aşımı süresi, önümüzdeki dönemde ADG ünitelerinden ne kadar arıza geleceği öngörüsü ve bu üniteye yapılan bakımın ne ölçüde etkin olduğuna dair veriler sayısal olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

Bu bağlamda bu çalışma sonucunda ADG ünitesinin önümüzdeki bir yıllık süre içinde;

- Kaç adedinin bakıma geleceği,
- Bakım için gerekli olan malzemelerden ne kadar tedarik edilmesi gerekeceği,
- Bakım için hangi ihtisastan ne miktarda işgücünün rezerve edilmesi gerektiği, bilgilerine ulaşılabilecektir.

Bu bilgiler ışığında, tedarik ve üretim planlama süreçleri ile ilgili doğruluk payı yüksek öngörülerde bulunulabilecektir.

4.3. Araştırma Yöntemi

Araştırma, F-16 uçaklarında kullanılan tüm Accessory Drive Gearbox ünitelerini kapsamaktadır. Sistemde uzun yıllardan beri kullanılmakta olan bilgi sistemleri sayesinde;

- Hangi uçakta hangi ünite kaç uçuş saatinden beri uçuyor?
- Hangi ünite en son ne zaman arıza yaptı?
- Bu ünitenin hangi bakımları hangi tarihlerde kimler tarafından yapıldı?
- Bakımlarında değiştirilen parçalar nelerdi?

gibi soruların tümüne cevap alınabilmektedir.

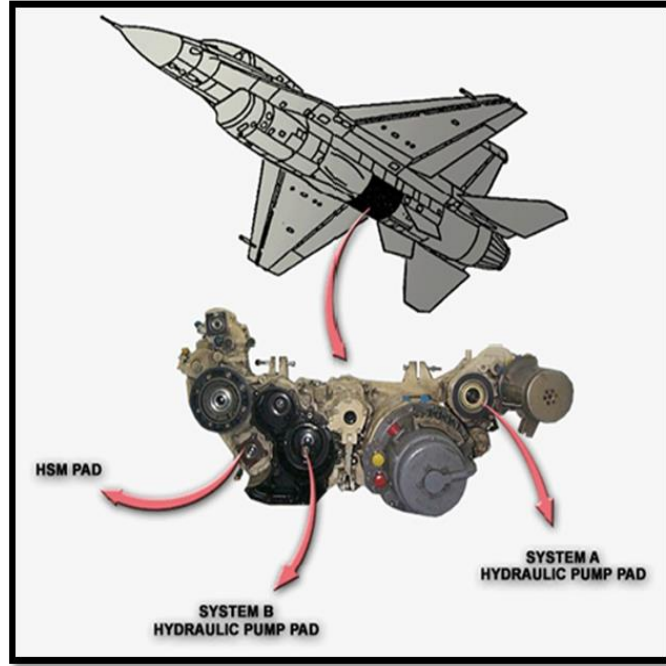
Elde edilen veriler öncelikle tasnif edilip, gerekli kodlamalar yapılarak EXCEL paket programına aktarılmıştır. Daha sonra analize hazır hale gelen veriler ReliaSoft firması tarafından hazırlanmış olan WEIBULL++ güvenilirlik analizi paket programına girilmiştir. Weibull++ programı ile sisteme girdiğimiz verilerin olasılık dağılımı tespit edilmiştir. Ardından belirlediğimiz güven aralığına göre güvenilirlik testleri gerçekteştirilmiştir.

4.4. Ünite Tanıtımı

Accessory Drive Gearbox (ADG), uçak motor Jet Fuel Starter'i (JFS) ile uçak aksesuarları arasındaki mekanik bağı oluşturan bir ünedir. ADG sistemini ADG ve Power Takeoff (PTO) şaft oluşturmaktadır [38].

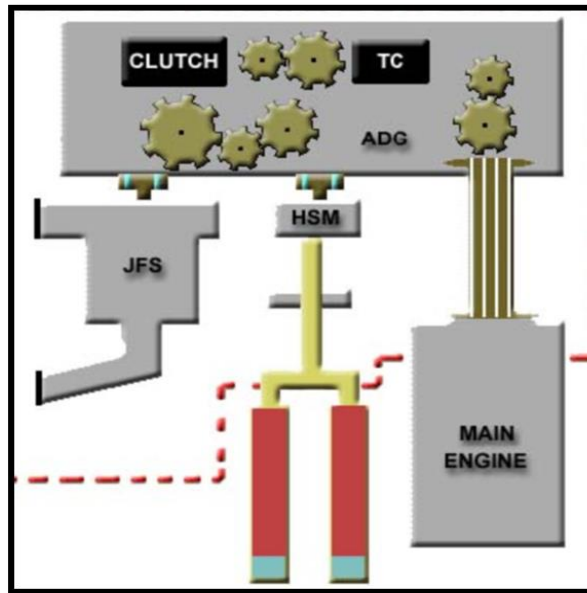
ADG ünitesi 2500 uçuş saatlik bakım aralığına sahip olan seri numara takipli bir ünite olup, revizyon işlemlerinde parça kataloglarına göre 447 kalem malzeme kullanılabilir. Bu 447 kalem malzemenin 67 kalemi ünitenin her revizyon işleminde değiştirilmesi gereken %100 kullanıma sahip malzemedir.

Her uçakta bir adet ADG ünitesi kullanılmaktadır. Ünitenin yurtdışı temin fiyatı 112.000 ABD dolarıdır. F-16 uçaklarının birçok ülkenin ana vurucu gücü olması, ADG ünitesinin uçak sistemleri arasındaki kritik bir ünite olması ve ünitenin yüksek mali değeri nedeniyle, ADG lojistik sistem için yüksek önem düzeyinde takip edilen bir ünedir. ADG F-16 uçağının arka gövdesinde (Görsel 4.1) yer almaktadır [38].



Görsel 4.1. ADG Ünitesi ve Uçakta Bulunduğu Bölge [38]

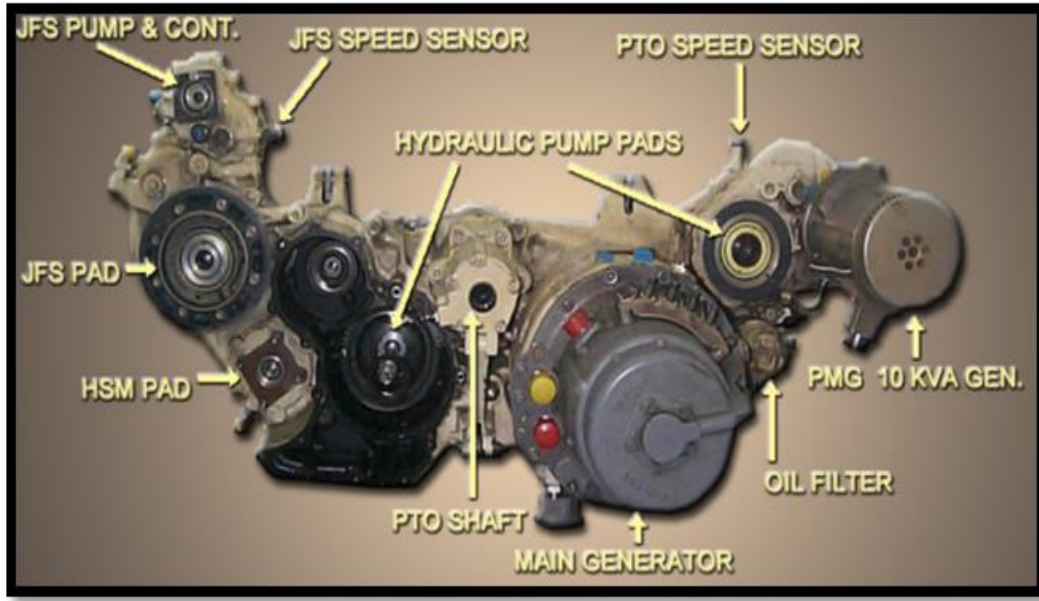
ADG, F-16 uçağının ilk çalışmasını sağlamak için fonksiyonlarından bir tanesi olan Jet Fuel Starter (JFS)'dan aldığı gücü PTO shaft vasıtasıyla motora iletmektedir [38]. (Görsel 4.2)



Görsel 4.2. ADG Ünitesi Çalışma Şeması

F110 motoru kendi gücü ile çalışmaya başladığı andan itibaren motordan aldığı gücü aşağıdaki ünitelere iletir. (Görsel 4.3)

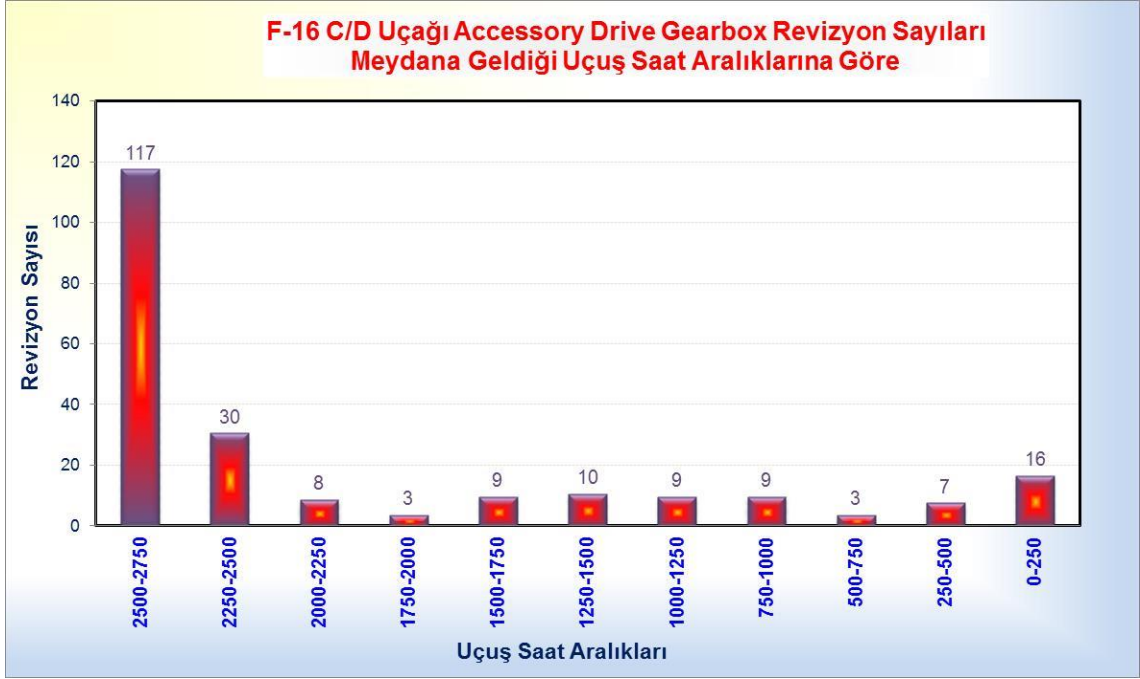
- JFS
- Hydraulic Start Motor
- JFS Fuel Control
- İki Hidrolik Pompa
- Flight Control PMG/ Standby Generator
- Generator / CSD (Constant Speed Driver)



Görsel 4.3. ADG Ünitesi ve Beraber Çalışan Üniteler [38]

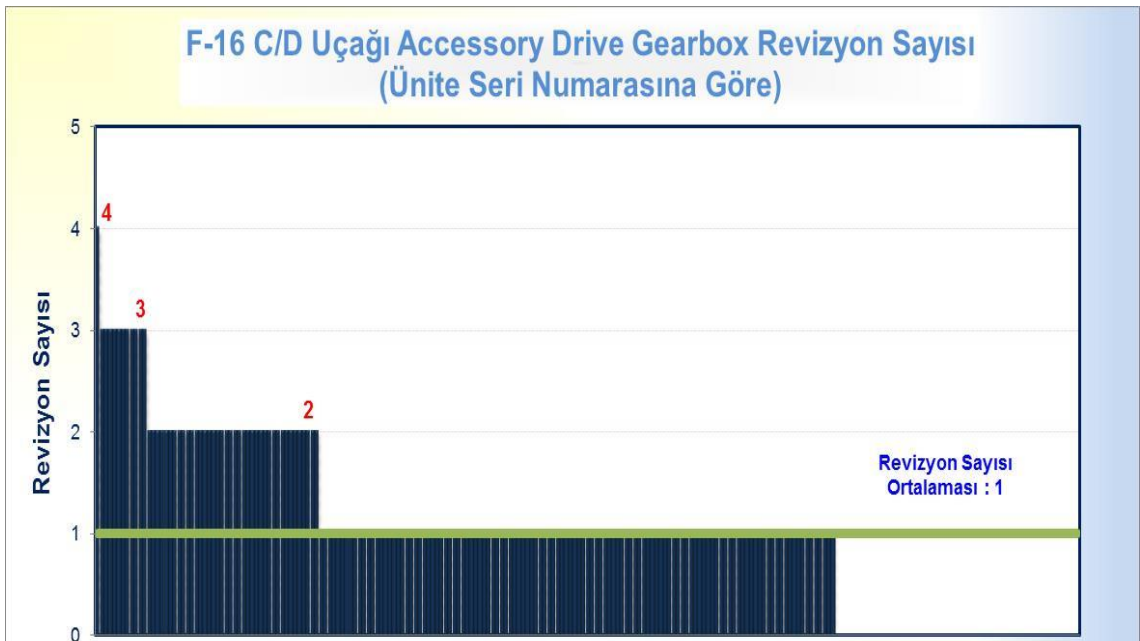
4.5. ADG Arızalarının Ünite Seri Numarasına Göre Dağılımı

F-16 ADG'lerin değişim saatlerine baktığımızda yığılmanın zaman aşım süresi olan 2500 uçuş saatinin üzerinde meydana geldiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



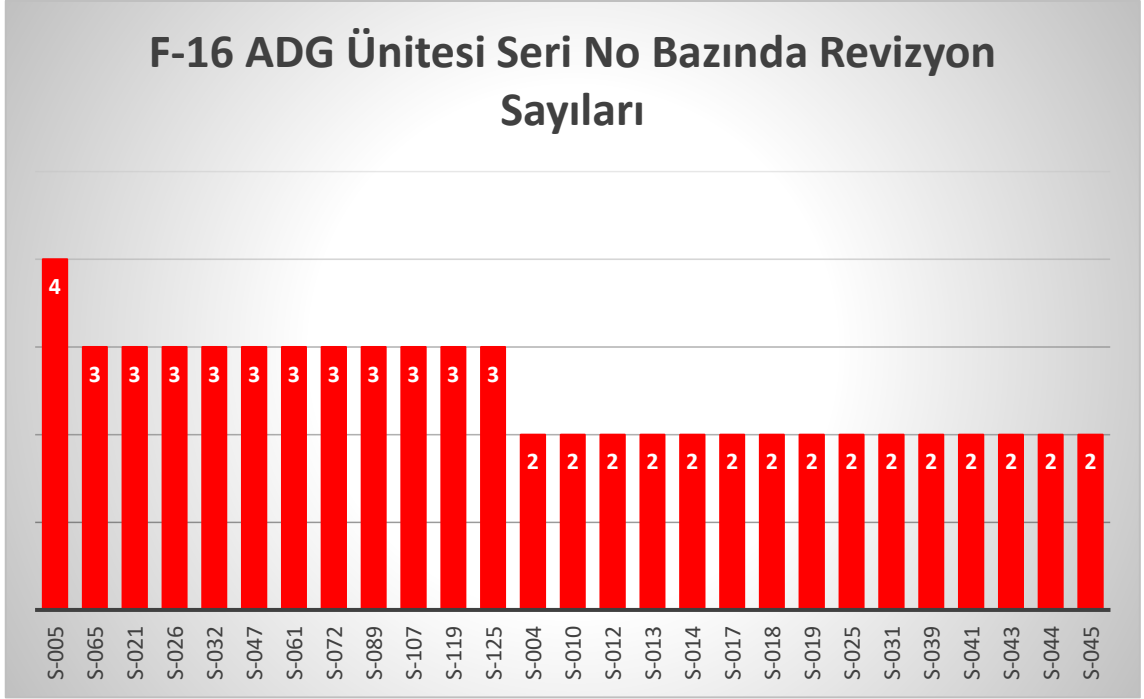
Şekil 4.1. Ünitelerin Değişim Saatleri Aralığı

ADG üniteleri revizyon yapılma sıklığına yönelik yapılan Pareto Analizi grafiği Şekil 4.2’de sunulmuştur [39]. Grafiğe göre revizyon yapılma sıklığı ortalaması 1 olup, 52 adet ADG ünitesine birden fazla revizyon yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Ünitelerin Revizyon Yapılma Sıklığına Yönelik Pareto Analizi Grafiği

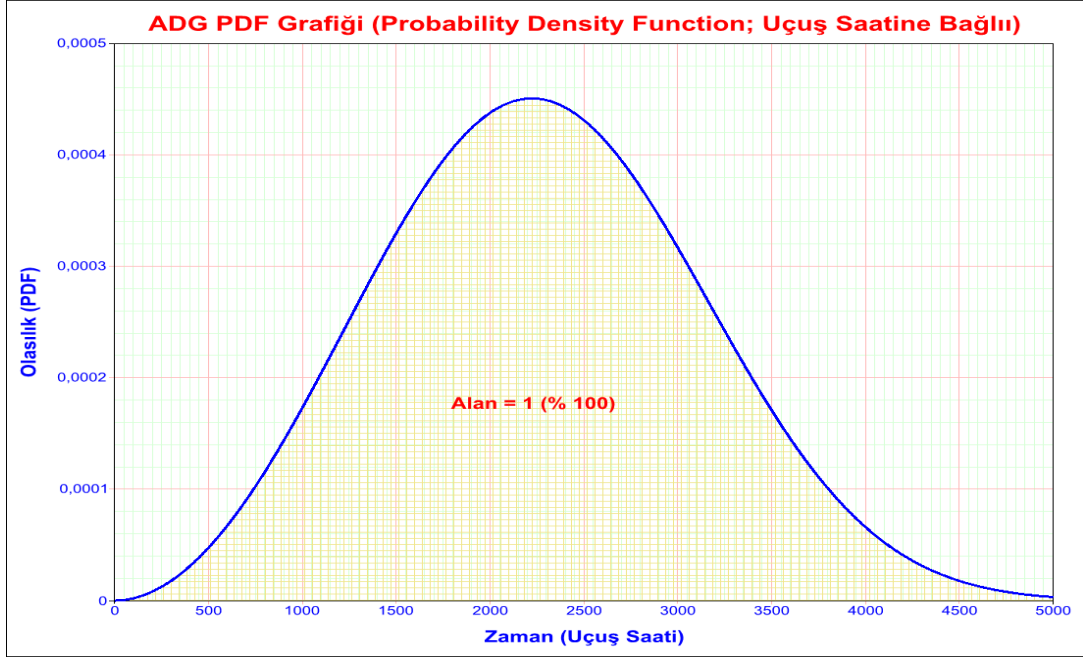
ADG üniteleri ortalama revizyon değerinden (1) daha fazla revizyon yapılan ADG üniteleri seri numaraları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. En çok revizyon yapılan Seri No-005, Seri No-065, Seri No-021, Seri No-026, Seri No-032, Seri No-047, Seri No-061, Seri No-072, Seri No-089, Seri No-107, Seri No-119 ve Seri No-125 ünitelerinin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3. Birden çok Revizyon/Onarım Gören ADG Seri Numaraları

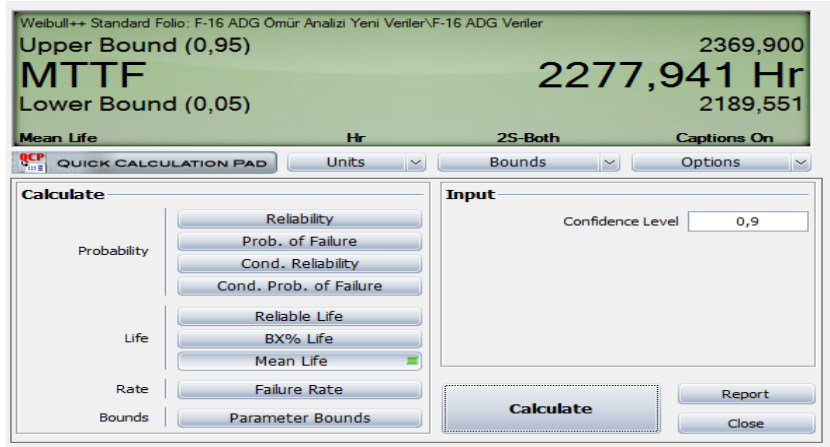
4.6. ADG Güvenilirlik Analizi

ADG'ye ait revizyon saat verilerine göre olasılık yoğunluk fonksiyonunun (Probability Density Function; pdf), Maksimum Likelihood Estimator'a göre iki parametrelili Weibull dağılımına (2-Parameter Weibull Distribution) uygun olduğu belirlenmiş olup, ADG için pdf grafiği Şekil 4.4'de sunulmuştur.

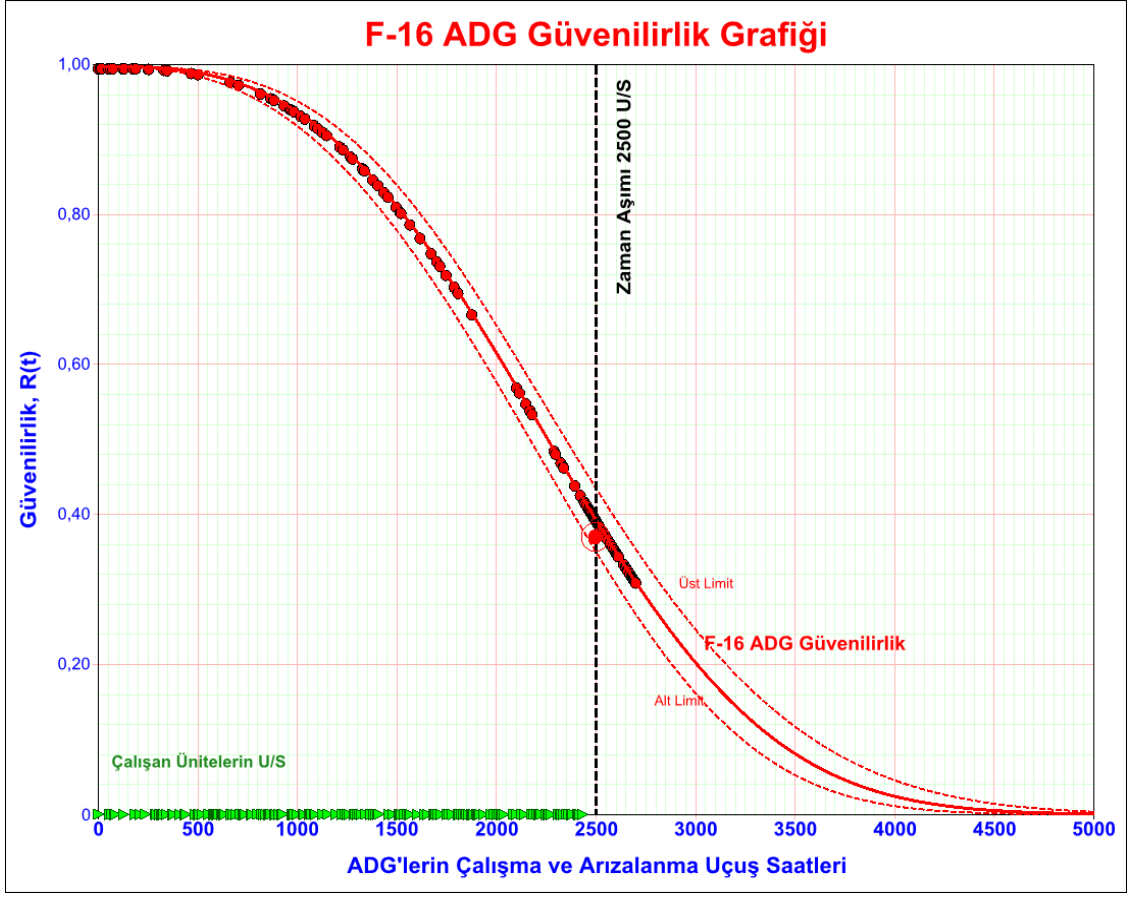


Şekil 4.4. Ünitelerin Revizyona Gelme Uçuş Saatlerine Göre pdf Grafiği

ADG için MTTF (Mean Time To Failure) değeri yaklaşık 2278 U/S olarak (Görsel 4.4) hesaplanmıştır. ADG için zaman aşımı 2500 U/S olarak belirlenmiştir.

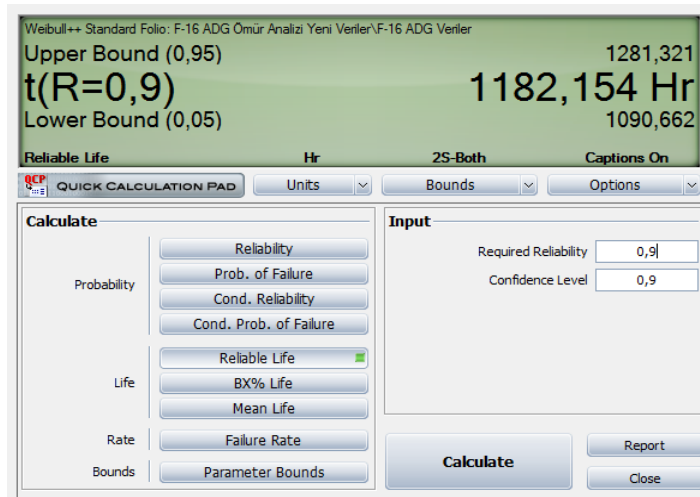


Görsel 4.4. Ünite MTTF Değeri

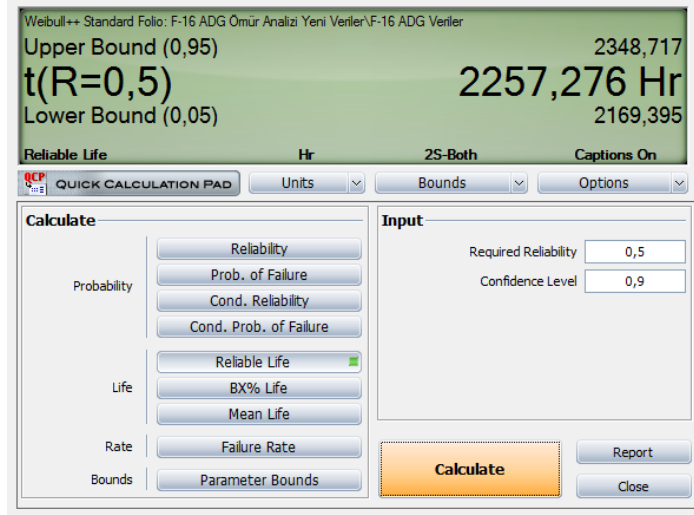


Şekil 4.5. Ünite Güvenilirlik Grafiği

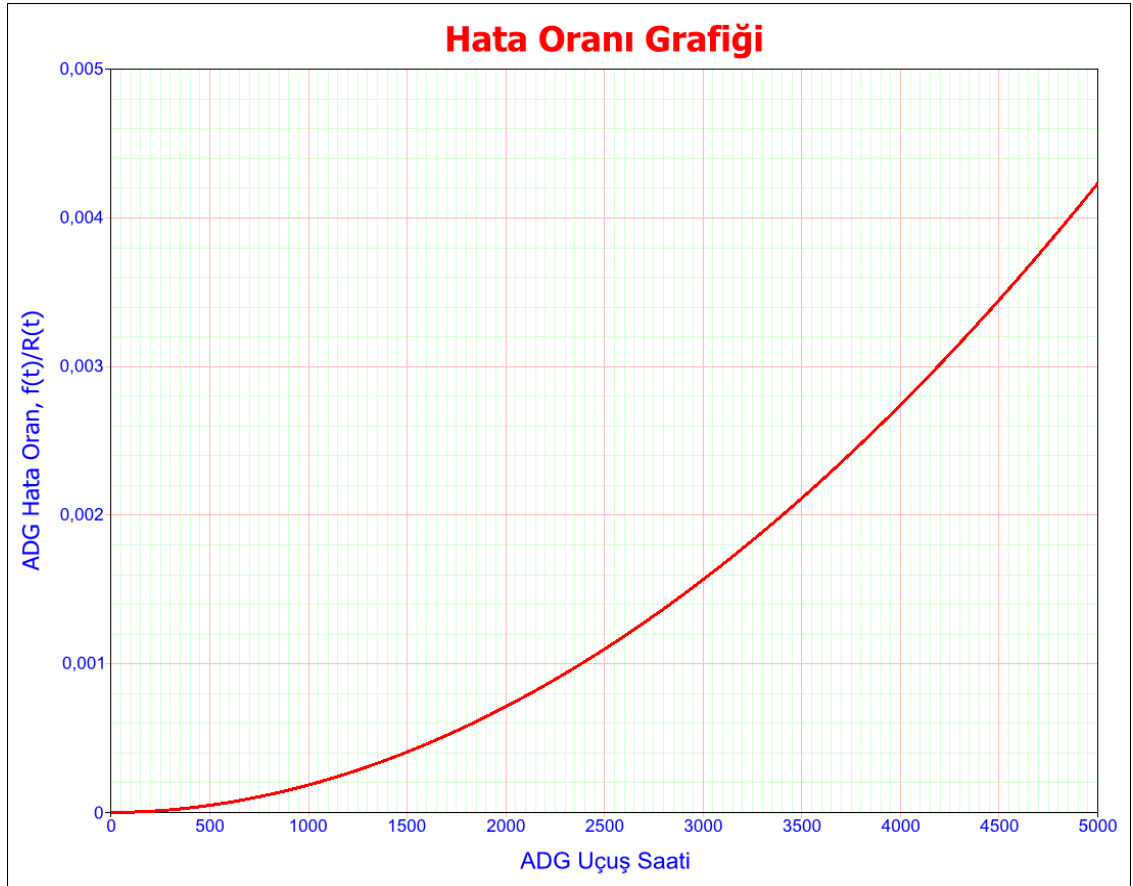
ADG'ye ait güvenilirlik grafiği Şekil 4.5'de sunulmuştur. ADG güvenilirlik değerinin U/S'ne bağlı olarak 1000 U/S'den 3000 U/S'ne sabit ivmeyle düştüğü görülmektedir. ADG güvenilirlik değerinin yaklaşık 1182 U/S'nin sonunda (Görsel 4.5) %90 ve 2257 U/S'nin sonunda %50'nin altına düştüğü (Görsel 4.6) belirlenmiştir.



Görsel 4.5. Ünite Güvenilirlik Değerinin %90 Olduğu Uçuş Saati

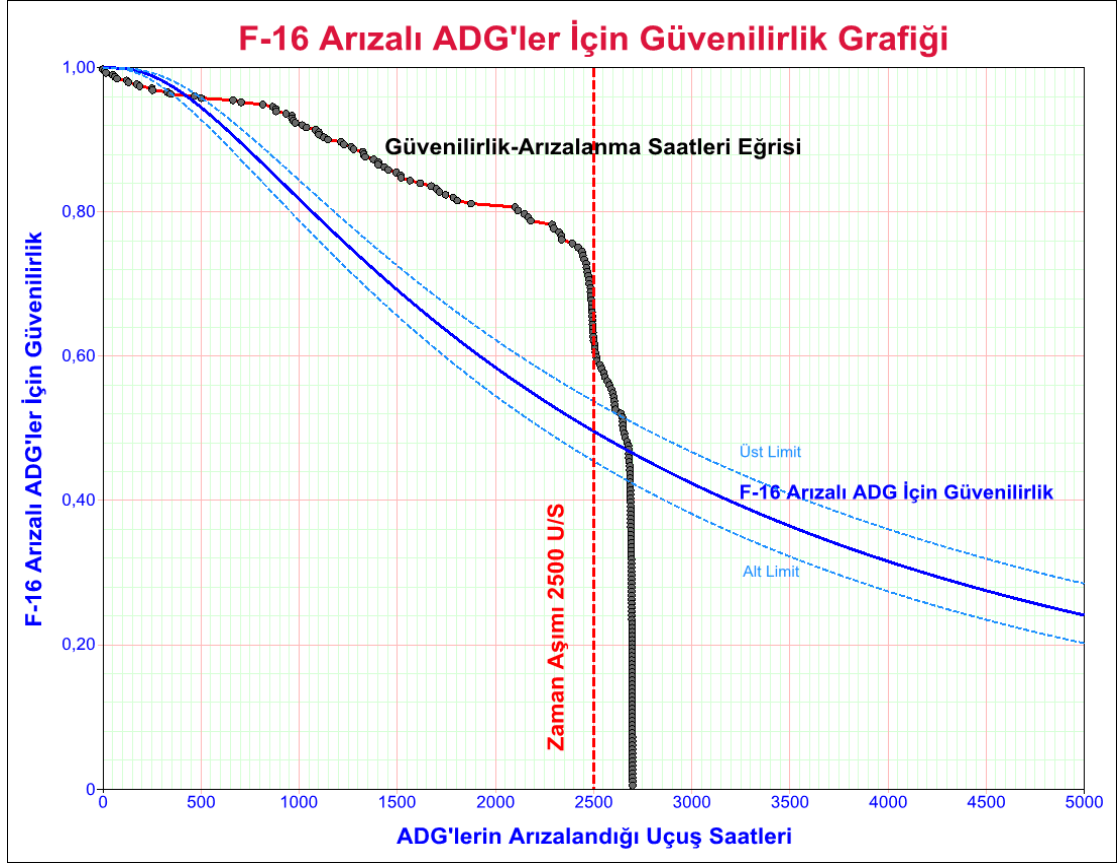


Görsel 4.6. Ünite Güvenilirlik Değerinin %50 Olduğu Uçuş Saati



Şekil 4.6. ADG Ünitesi Hata Oranının Zamana Bağlı Grafiği

ADG'ye ait hata oranının zamana bağlı olarak artmakta olduğu ve 2500 U/S'den sonra hata oranının daha da yükseldiği Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.7. Onarım/Revizyona Gönderilen Ünitelerin Güvenilirlik Grafiği

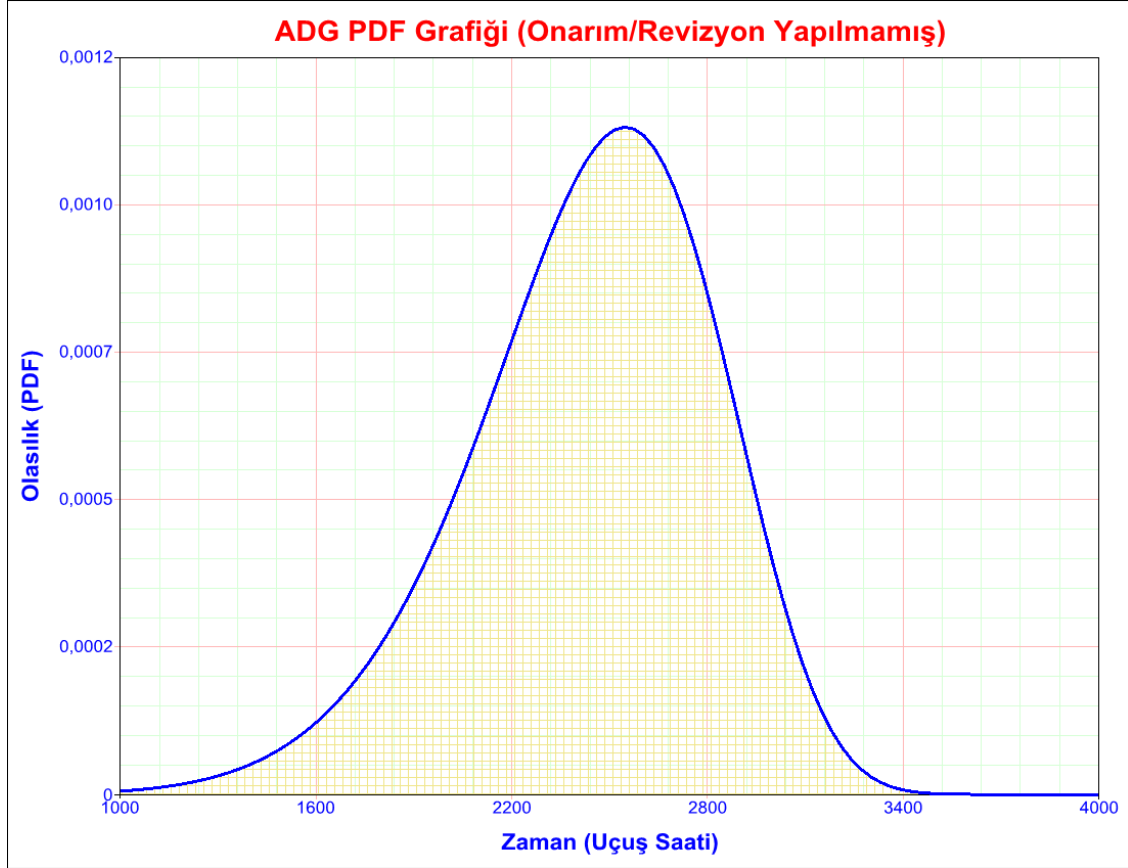
Onarım/Revizyona arıza veya zaman aşımından dolayı gönderilen ADG verileri ile hazırlanan güvenilirlik grafiği Şekil 4.7’de sunulmuştur. Revizyona gönderilen ADG’lerin çoğunun revizyona gönderilme saatinin 2500 U/S’den fazla ve zaman aşım kaynaklı olduğu görülmektedir. 2700 U/S’ne kadar ünitelerin sorunsuz çalışmakta ve revizyona gönderilmekte olduğu verilerden anlaşılmaktadır. 221 adet revizyona gönderilen üniteden 101 adedinin 2600 U/S sonrası ve bu 101 adet üniteden de 72 adedinin de 2690-2700 U/S arasında revizyona gönderildiği tespit edilmiştir.

4.7. ADG’nin Revizyon Sonrası Güvenilirliği ve Revizyon Etkinliğinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde uygulaması yapılan ADG ünitesinin hiç revizyon yapılmamış hali ile bir kez ve iki kez revizyon yapıldığı durumlarda ünitenin arıza yapma sürelerindeki değişimler tespit edilmiştir. Bulunan sonuçlara göre ünitelere yapılan revizyon işleminin etkinliği analiz edilmiş, bunun yanında gelecek zaman diliminde arıza yaparak revizyona gelecek ünite sayısı istatistiksel olarak tahmin edilmiştir.

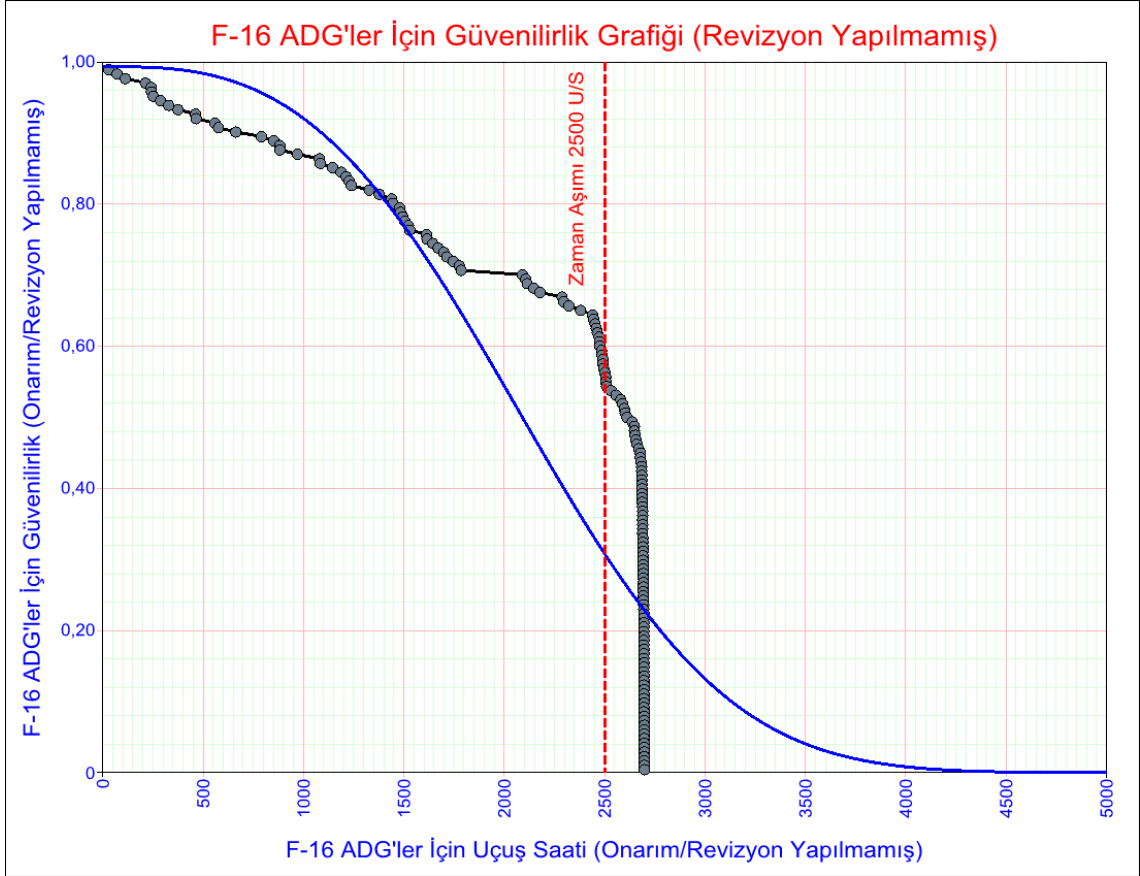
4.7.1. Onarım/revizyon yapılmamış ADG MTTF değeri ve güvenilirlik grafiği

Onarım/revizyon yapılmamış ADG'ye ait revizyona alınma sürelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunun (Probability Density Function; pdf), Weibull dağılımına (2-Parameter Weibull Distribution) uygun olduğu belirlenmiş olup, ADG için pdf grafiği Şekil 4.8'de sunulmuştur.



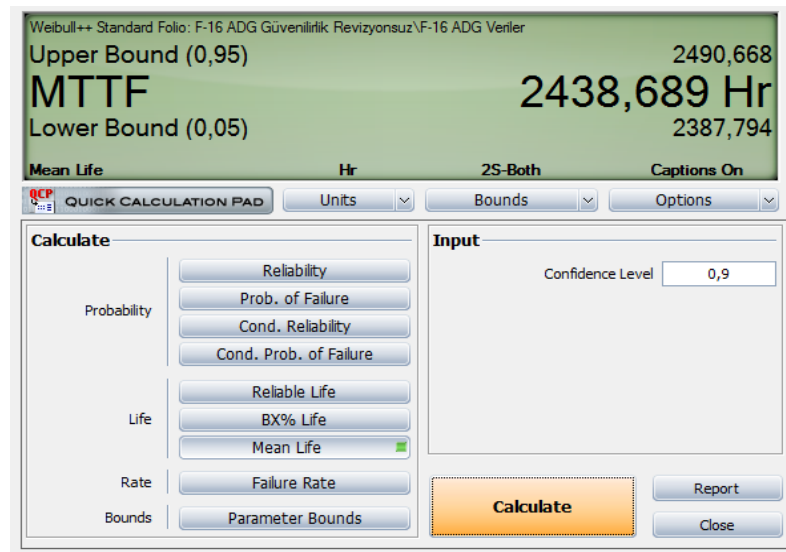
Şekil 4.8. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği

Onarım/revizyon yapılmamış ADG verileri ile hazırlanan güvenilirlik grafiği Şekil 4.9'da sunulmuştur.



Şekil 4.9. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite Güvenilirlik Grafiği

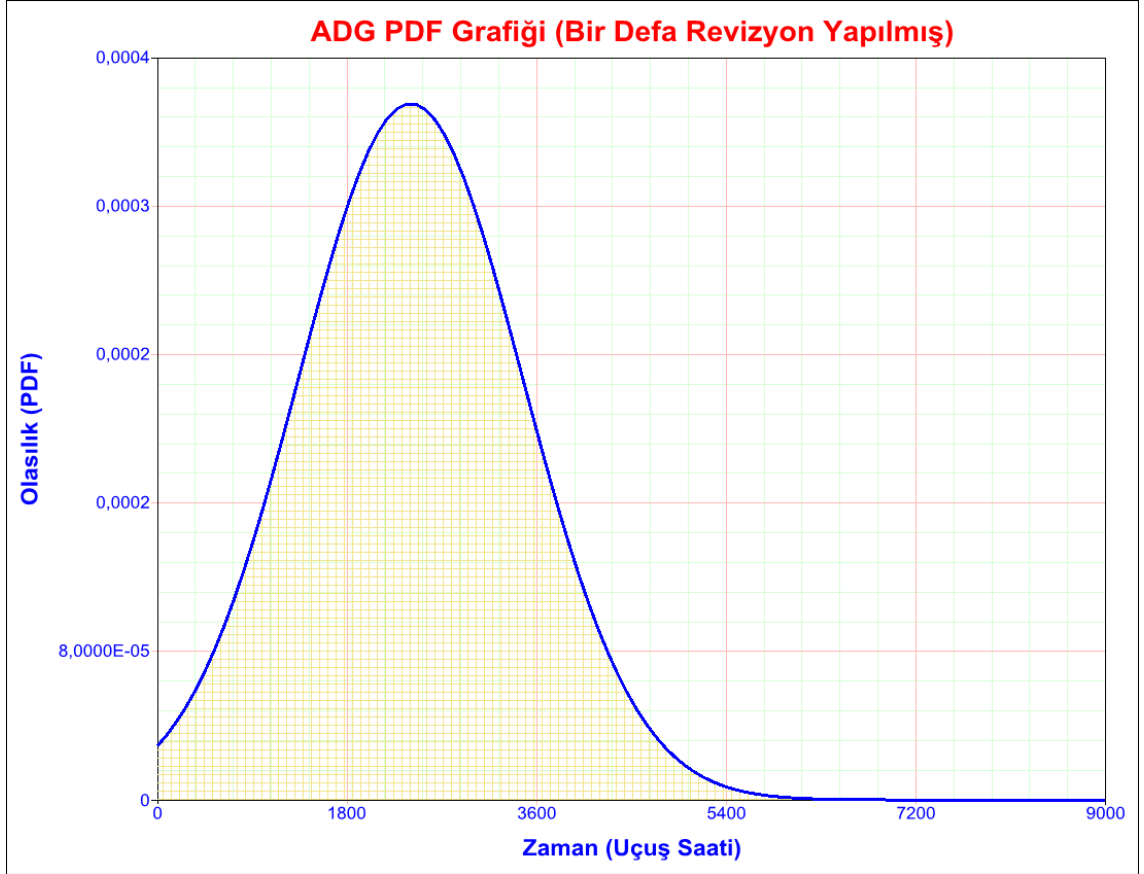
Onarım/revizyon görmemiş ADG'leri için MTTF değeri yaklaşık 2439 U/S olarak (Görsel 4.7) hesaplanmıştır.



Görsel 4.7. Onarım/Revizyon Yapılmamış Ünite MTTF Değeri

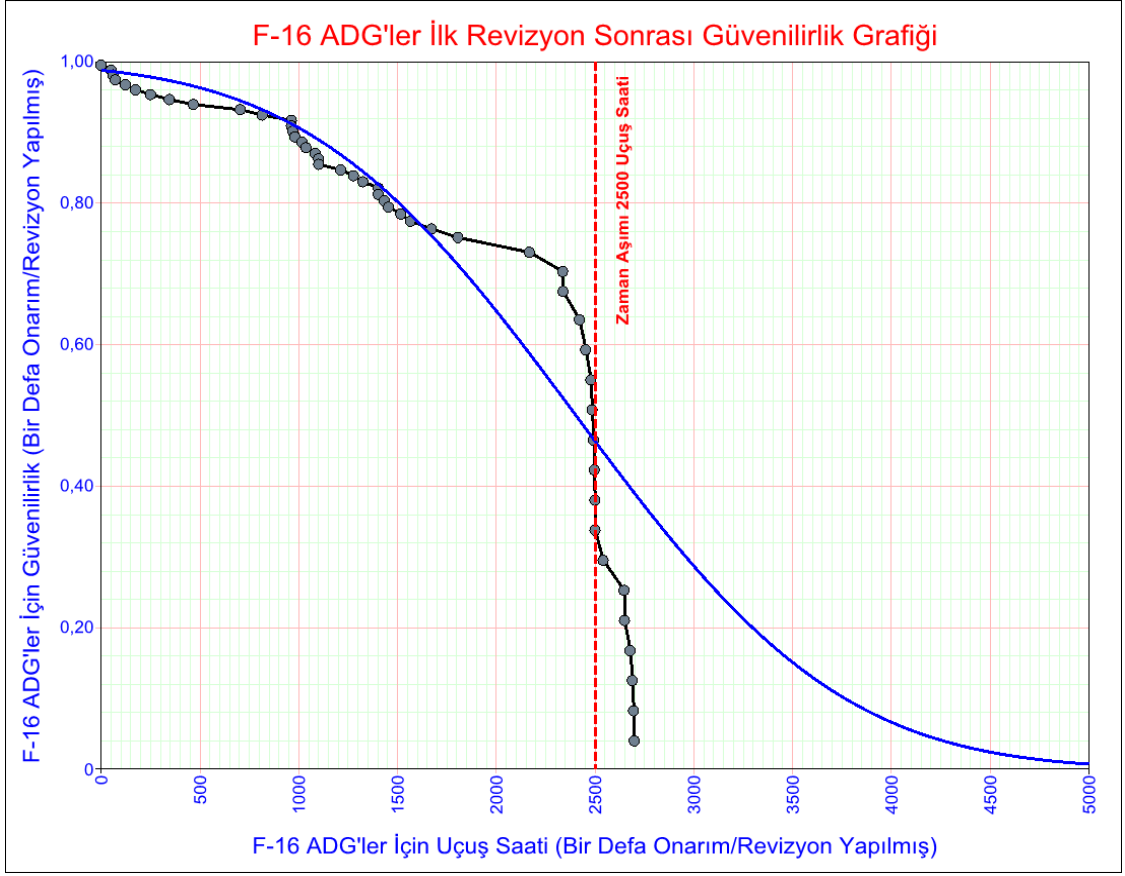
4.7.2. Bir kez onarım/revizyon yapılmış ADG MTTF değeri ve güvenilirlik grafiği

Bir defa onarım/revizyon yapılmış ADG'lere ait revizyona alınma sürelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunun (Probability Density Function; pdf), Normal dağılıma uygun olduğu belirlenmiş olup, ADG için pdf Şekil 4.10'da sunulmuştur.



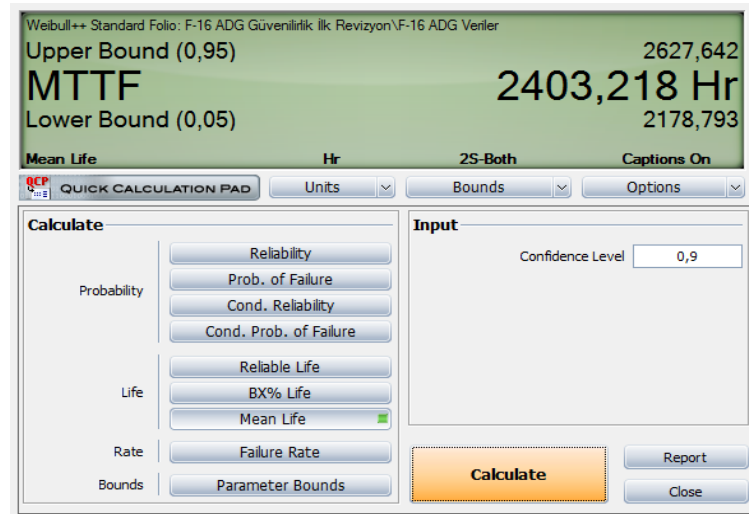
Şekil 4.10. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği

Bir defa onarım/revizyon yapılmış ADG verileri ile hazırlanan güvenilirlik grafiği Şekil 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.11. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Güvenilirlik Grafiği

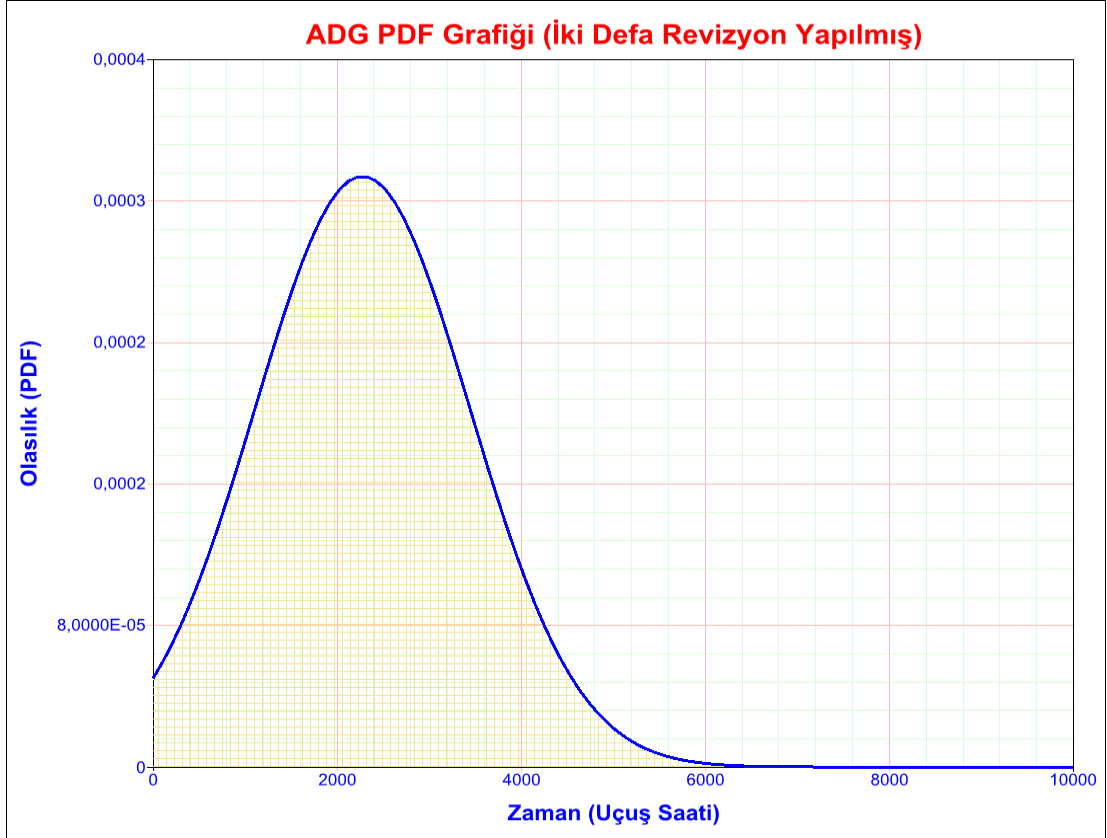
Bir defa onarım/revizyon yapılmış ADG’ler için MTTF değeri yaklaşık 2403 U/S olarak (Görsel 4.8) hesaplanmıştır.



Görsel 4.8. Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite MTTF Değeri

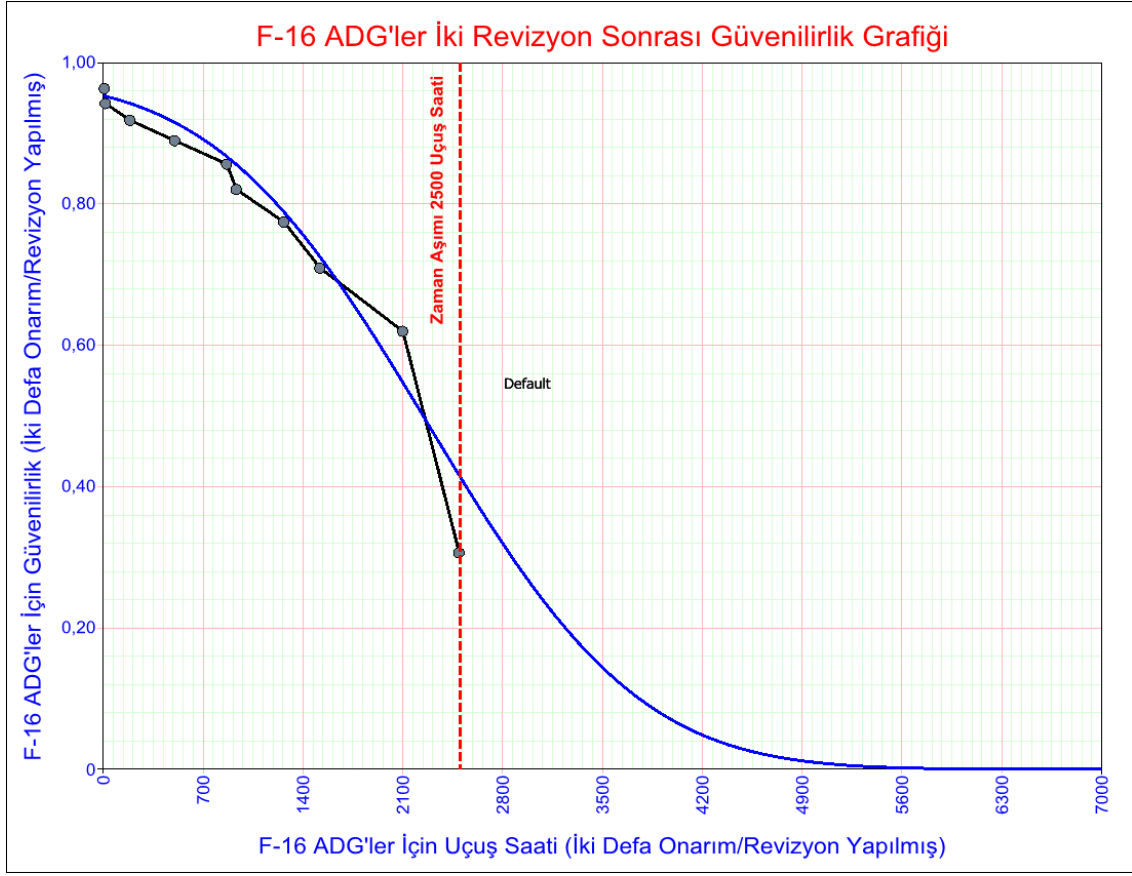
4.7.3. İki kez onarım/revizyon yapılmış ADG MTTF değeri ve güvenilirlik grafiği

İki defa onarım/revizyon yapılmış ADG'lere ait revizyona alınma sürelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunun (Probability Density Function; pdf), Normal dağılıma uygun olduğu belirlenmiş olup, ADG için pdf Şekil 4.12'de sunulmuştur.



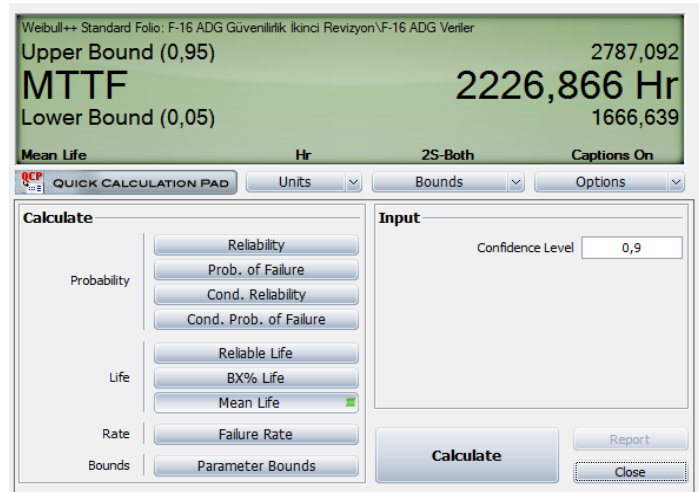
Şekil 4.12. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Grafiği

İki defa onarım/revizyon yapılmış ADG verileri ile hazırlanan güvenilirlik grafiği Şekil 4.13’de sunulmuştur.



Şekil 4.13. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite Güvenilirlik Grafiği

İki defa onarım/revizyon yapılmış ADG’leriçin MTTF değeri yaklaşık 2227 U/S olarak (Görsel 4.9) hesaplanmıştır.



Görsel 4.9. İki Kez Onarım/Revizyon Yapılmış Ünite MTTF Değeri

4.7.4. Uçak üzerindeki ADG ünitelerinin 1 yıl içinde oluşacak arıza sayısı tahmini

Bu bölümde uçaklar üzerinde çalışan ADG ünitelerinin geçmiş verileri (toplam çalışma zamanı, revizyon sayısı ve son revizyondan itibaren çalışma süresi) dikkate alınarak önümüzdeki 1 yıllık süreçte (Bir uçağın bir uçuş eğitim yılı boyunca 300 saat uçuş yaptığı öngörülerek) her bir ünitenin mevcut uçuş saatine göre arıza yapma ihtimali hesaplanmıştır. Bu veriler Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Ünitelerin Bir Yıl İçinde Revizyona Gelme İhtimali

ADG'lerin Toplam U/S, Yapılan Revizyon Sayısı ve Takıldığı Zamandan İtibaren Halihazırdaki U/S'ne Göre Yapılan Arıza Sayısı Tahmini		
	Seri Numarası	300 U/S Sonunda Tahminlenen Ortalama Kümülatif Arıza Sayısı
1	Seri No-001	0,1373
2	Seri No-002	0,1462
3	Seri No-003	0,1549
4	Seri No-004	0,149
5	Seri No-005	0,1416
6	Seri No-006	0,1467
7	Seri No-007	0,1426
8	Seri No-008	0,1371
9	Seri No-009	0,1464
10	Seri No-010	0,144
11	Seri No-011	0,1509
12	Seri No-012	0,1437
13	Seri No-013	0,1421
14	Seri No-014	0,1407
15	Seri No-015	0,1451
16	Seri No-016	0,1408
17	Seri No-017	0,14
18	Seri No-018	0,1456
19	Seri No-019	0,1459
20	Seri No-020	0,1474
21	Seri No-021	0,1422
22	Seri No-022	0,1512
23	Seri No-023	0,1374

24	Seri No-024	0,1465
25	Seri No-025	0,1397
26	Seri No-026	0,1463
27	Seri No-027	0,1425
28	Seri No-028	0,0194
29	Seri No-029	0,1493
30	Seri No-030	0,1462
31	Seri No-031	0,1429
32	Seri No-032	0,1463
33	Seri No-033	0,1402
34	Seri No-034	0,1466
35	Seri No-035	0,1398
36	Seri No-036	0,141
37	Seri No-037	0,1468
38	Seri No-038	0,1483
39	Seri No-039	0,1427
40	Seri No-040	0,1472
41	Seri No-041	0,1409
42	Seri No-042	0,1594
43	Seri No-043	0,1416
44	Seri No-044	0,1353
45	Seri No-045	0,1527
46	Seri No-046	0,1432
47	Seri No-047	0,1433
48	Seri No-048	0,1378
49	Seri No-049	0,15
50	Seri No-050	0,132
51	Seri No-051	0,1384
52	Seri No-052	0,1366
53	Seri No-053	0,1481
54	Seri No-054	0,1433
55	Seri No-055	0,1449
56	Seri No-056	0,1453
57	Seri No-057	0,1594
58	Seri No-058	0,1453
59	Seri No-059	0,1401

60	Seri No-060	0,1462
61	Seri No-061	0,143
62	Seri No-062	0,1403
63	Seri No-063	0,1401
64	Seri No-064	0,1497
65	Seri No-065	0,1529
66	Seri No-066	0,1462
67	Seri No-067	0,132
68	Seri No-068	0,1397
69	Seri No-069	0,1428
70	Seri No-070	0,1554
71	Seri No-071	0,1392
72	Seri No-072	0,1361
73	Seri No-073	0,136
74	Seri No-074	0,1468
75	Seri No-075	0,1438
76	Seri No-076	0,1505
77	Seri No-077	0,1485
78	Seri No-078	0,1397
79	Seri No-079	0,1457
80	Seri No-080	0,145
81	Seri No-081	0,1441
82	Seri No-082	0,1525
83	Seri No-083	0,1406
84	Seri No-084	0,1406
85	Seri No-085	0,145
86	Seri No-086	0,1473
87	Seri No-087	0,1479
88	Seri No-088	0,1422
89	Seri No-089	0,1354
90	Seri No-090	0,1418
91	Seri No-091	0,1449
92	Seri No-092	0,1313
93	Seri No-093	0,1474
94	Seri No-094	0,0709
95	Seri No-095	0,1415

96	Seri No-096	0,1467
97	Seri No-097	0,1514
98	Seri No-098	0,1455
99	Seri No-099	0,1401
100	Seri No-100	0,1456
101	Seri No-101	0,1432
102	Seri No-102	0,1441
103	Seri No-103	0,1429
104	Seri No-104	0,1461
105	Seri No-105	0,1447
106	Seri No-106	0,1446
107	Seri No-107	0,1395
108	Seri No-108	0,1451
109	Seri No-109	0,1424
110	Seri No-110	0,1408
111	Seri No-111	0,1512
112	Seri No-112	0,143
113	Seri No-113	0,1364
114	Seri No-114	0,1411
115	Seri No-115	0,1313
116	Seri No-116	0,1429
117	Seri No-117	0,1393
118	Seri No-118	0,1492
119	Seri No-119	0,1381
120	Seri No-120	0,1413
121	Seri No-121	0,1471
122	Seri No-122	0,1423
123	Seri No-123	0,1397
124	Seri No-124	0,1403
125	Seri No-125	0,1488
126	Seri No-126	0,144
127	Seri No-127	0,1376
128	Seri No-128	0,1501
129	Seri No-129	0,1376
130	Seri No-130	0,1471
131	Seri No-131	0,1372

132	Seri No-132	0,1306
133	Seri No-133	0,1364
134	Seri No-134	0,1438
135	Seri No-135	0,147
136	Seri No-136	0,1462
137	Seri No-137	0,1419
138	Seri No-138	0,1305
139	Seri No-139	0,1401
140	Seri No-140	0,1378
141	Seri No-141	0,1415
142	Seri No-142	0,1372
143	Seri No-143	0,1453
144	Seri No-144	0,1361
145	Seri No-145	0,1358
146	Seri No-146	0,1361
147	Seri No-147	0,1496
148	Seri No-148	0,1369
149	Seri No-149	0,1415
150	Seri No-150	0,1375
151	Seri No-151	0,146
152	Seri No-152	0,1395
153	Seri No-153	0,0261
154	Seri No-154	0,0675
155	Seri No-155	0,0551
156	Seri No-156	0,0151
157	Seri No-157	0,029
158	Seri No-158	0,038
159	Seri No-159	0,0647
160	Seri No-160	0,0446
161	Seri No-161	0,0646
162	Seri No-162	0,0464
163	Seri No-163	0,0329
164	Seri No-164	0,0374
165	Seri No-165	0,0288
166	Seri No-166	0,0237
167	Seri No-167	0,0548

168	Seri No-168	0,0383
169	Seri No-169	0,0269
170	Seri No-170	0,035
171	Seri No-171	0,0486
172	Seri No-172	0,0301
173	Seri No-173	0,0441
174	Seri No-174	0,0551
175	Seri No-175	0,0408
176	Seri No-176	0,0399
177	Seri No-177	0,061
178	Seri No-178	0,0281
179	Seri No-179	0,028
180	Seri No-180	0,049
181	Seri No-181	0,0071
182	Seri No-182	0
183	Seri No-183	0,0152
184	Seri No-184	0,0125
	Beklenen Ortalama Revizyon Sayısı	22,755

ADG ünitelerinin uçuş saatleri incelendiğinde 188 uçuş saatinden başlayarak yaklaşık 6.000 uçuş saatine kadar toplam uçuş saati olan üniteler olduğu görülmektedir. Ayrıca ADG ünitelerinin bir kısmının revizyon görmediği, fakat bir kısmının da dört revizyon gördüğü belirlenmiştir. ADG'lerin toplam U/S'leri, revizyon sayıları ve uçak üzerindeki mevcut U/S'leri dikkate alınarak yapılan analizde 300 U/S sonrasında revizyona gelebilecek ADG sayısının yaklaşık 23 adet olması beklenmektedir. (Tablo 4.1)

4.8. ADG Güvenilirlik Mühendislik Çalışmasının Sonucu

ADG sistemini, ADG ve PowerTakeoff (PTO) şaft oluşturmaktadır. ADG'nin fonksiyonlarından bir tanesi olan F110 motorunun ilk çalıştırmasını sağlamak için; JFS'ten aldığı gücü PTO şaft vasıtasıyla motora iletmektir. F110 motoru kendi gücü ile

çalışmaya başladığı andan itibaren ise motordan aldığı gücü JFS, hidrolik ve elektrik güç üreten sistem ve yardımcı ünitelere iletmektedir.

Onarım/revizyon işlemi için gönderilen ADG'lerin onarım/revizyona gönderildiği U/S aralıkları Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de sunulmuştur.

Tablo 4.2. *Onarım/Revizyon İşlemine Gönderilen Ünitelerin Uçuş Saati Aralığı-1*

U/S Aralığı	2500-2750	2250-2500	2000-2250	1750-2000	1500-1750	1250-1500	1000-1250	750-1000	500-750	250-500	0-250
Onarım / Revizyona Gelen Ünite Sayısı	117	30	8	3	9	10	9	9	3	7	16

Tablo 4.3. *Onarım/Revizyon İşlemine Gönderilen Ünitelerin Uçuş Saati Aralığı-2*

U/S Aralığı	2600-2700	2690-2700
Onarım / Revizyona Gelen Ünite Sayısı	101	72

117 adet ADG'ye 2500 U/S, bunlardan 101 adet ADG'ye 2600 U/S ve 72 adet ADG'ye de 2690 U/S sonrasında revizyon yapıldığı görülmektedir.

İlgili bakım merkezinde onarım/revizyon yapılan ADG'lerin birinci revizyon ve ikinci revizyon sonrası MTTF'i (ortalama revizyona gelme aralığı) onarım/revizyon yapılmayan ADG'lerin MTTF'i ile karşılaştırıldığında birinci onarım/revizyon başarısının %98,5 ve ikinci revizyon başarısının %91,3 olduğu belirlenmiştir. (Tablo 4.4)

Tablo 4.4. *Onarım/Revizyon Yapılan Ünitelerin MTTF Değişimi*

	Onarım/Revizyon Yapılmayan ADG'ler İçin	Bir Kez Onarım/Revizyon Yapılan ADG'ler İçin	İki Kez Onarım/Revizyon Yapılan ADG'ler İçin
MTTF	2439	2403	2227
Revizyon Başarı Oranı (Sıfır Üniteye Göre)	-	$2403 / 2439 = \%98,5$	$2227 / 2439 = \%91,3$

Onarım / revizyon yapılan ADG'lerin %33'ü 2.690-2.700 U/S arası ve %53'ü de zaman aşım süresi olan 2.500-2.700 U/S'leri arasında onarım/revizyona alınmıştır. Bu sonuçlarla birlikte birinci ve ikinci revizyon sonrasında MTTF değerleri hiç revizyon yapılmamış bir ADG ünitesinin MTTF değerine yakın sonuçlar vermiştir.

Sonuç olarak, çalışma saatlerine göre ünitelerdeki yıpranmayı da dikkate aldığımız durumda yapılmakta olan revizyon işlemlerinin oldukça başarılı olduğu sonucuna ulaşmaktayız.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Wright kardeşler tarafından 1903 yılında ilk uçağın uçuşundan günümüze kadar gelişen teknoloji ile beraber havacılıkta büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Havacılık, ulaşım yolları içerisinde diğer ulaşım yöntemlerinden tamamen farklıdır. Bu farkların başındaysa hava ulaşım araçlarının üç boyutlu hareket etmesi gelmektedir. Bu tip hareket insan doğasının alışkın olmadığı bir hareket türüdür. Bu üç boyutlu hareket bir uçak için yaklaşık olarak 30.000 fit yükseklikte meydana gelmektedir. İnsanların kendi doğalarına aykırı olan bu ulaşım yöntemini seçebilmeleri için kendilerini güvende hissetmeleri gerekmektedir. Bu yüzden güvenlik, havacılık için en önemli şarttır.

Günümüz savunma stratejilerinde ise hava gücü ülke savunması için vazgeçilmezdir. Sivil havacılıktan farklı olarak askeri havacılıkta kullanılan uçaklar çok daha hızlı, daha yüksek irtifalara çıkabilen, yüksek manevra kabiliyeti bulunan ve ölümcül silahlar taşıyabilen platformlardır.

Bu bilgiler ışığında askeri havacılık endüstrisi ülke için hem ekonomik hem de stratejik öneme sahiptir. Harekât ortamında bir parça ya da ünitelerden kaynaklı herhangi bir sorun bir uçağın ya da bir tipteki tüm uçakların harekâta katılamamasına, dolayısıyla hava kuvvetinin kullanımında büyük zafiyetlere neden olabilir. Elimizdeki silah sistemlerinin (Uçaklar, motorlar, üniteler, füzeler, radarlar vb.) genellikle yurtdışı kaynaklı olduğu ve bunların farklı ülkelerden temin edildiği düşünülecek olursa, bu sistemlerin kendi harekât şartlarımıza göre bakım konseptlerinin oluşturulması büyük bir zarurettir.

Askeri havacılık, idame işletme bütçesi yüksek olan bir sahadır. Her organizasyon gibi askeri harcamaların da belirli şartlar dâhilinde daha aşağılara çekilebilmesi, bu sistemleri kullanan kurumların temel hedeflerinden birini oluşturmaktadır.

Günümüzde havacılık alanında uçakların kaza kırım olmadan uçurulmasının yanı sıra, uçuş şartlarına göre oluşabilecek arızalar ve bunların hangi zaman aralığında olabileceği istatistiksel olarak tahmin edilebilmektedir. Gerek askeri havacılık gerekse sivil havacılıkta bu durum uçuşların sürekliliğinin sağlanması, bakım ve işletim maliyetlerinin minimuma indirilmesi ve lojistik desteğin sürdürülebilir olması açısından oldukça önemlidir.

Yapılan çalışma ile, yıllardır değişik seviyelerde bakım onarımını yapmak suretiyle bilgi sistemlerine kaydedilen verileri kullanarak birçok ülkenin asli vurucu gücü olan F-16 savaş uçaklarının kritik ünitesi ADG'nin güvenilirliğine yönelik önemli bilgilere ulaşılmıştır. Ünitenin MTTF değerleri, revizyon sonrasında MTTF

değerlerindeki değişimler, MTTF değerlerindeki değişime göre yaptığımız revizyonların başarı oranı ve belirlenen bir zaman dilimi içinde ne kadar ünitenin arıza yaparak onarım/revizyona geleceğine dair bilgiler istatistiki olarak tespit edilmiştir. Bu bilgiler lojistik sistemde idame işletme bütçelerinin daha doğru ve ekonomik bir şekilde kullanılmasına yol gösterici niteliktedir.

Ulaşılan bilgilerin doğru şekilde kullanılmasıyla beraber gelecek bir zaman periyodunda kaç adet ünitenin arızalanacağı öngörülebilecek bu sayede belirlenen zaman periyodundan önce gerekli işgücü ihtisas bazında rezerve edilebilecek ayrıca ünitelerin revizyonu için gerekli malzemeler üniteler arızalanmadan önce tedarik edilerek revizyon sürecinde malzeme beklemekten kaynaklı zaman kayıpları en az indirilebilecektir. Bunun yanında gelecekte ihtiyaç duyulacak malzemelerin belirlenmesi sayesinde gereksiz bir şekilde fazla malzeme sipariş edilmesi önenebilecek, böylece bütçenin daha etkin kullanımı sağlanabilecektir. Ayrıca depo ihtiyacında ve ikmal işlemlerinde de büyük bir azalma meydana gelecektir.

Yapılan çalışmanın havacılık alanında güvenilirliğe dayalı bakım sürelerinin tespitine, ihtiyaçtan fazla malzeme siparişinin önlenmesine, bakım periyoduna göre işgücü planlamalarının yapılarak bakım maliyetlerinin düşürülmesine yönelik örnek olacağı değerlendirilmektedir. Üst yönetim bilgi sistemlerini bilimsel yöntemlerle besleyen bu tür çalışmaların yaygınlaşması ile aşağıdaki başlıklar altında kazanımlar sağlanabileceği öngörülmektedir;

- Bakım sistemindeki plansız söküm ve bakım faaliyetlerini azaltarak süreçleri kısaltma,
- Gereksiz bakımları iptal etme,
- Azalan süre ve faaliyetler sonucu bakım maliyetlerini azaltma,
- Uygulanan bakımların etkinliğini ölçme,
- Düzeltici işlem gerektiren veya istenilen performansın altında kalan üniteleri tespit etme,
- Ana silah sistemleri, motorlar ve ünitelerin performansını izleyerek bakım süreçlerini ayarlamamanın yanı sıra,
- İlerleyen aşamalarda düşen maliyetler ve yükselen uçak ve ünite faaliyet oranlarına ulaşılabilecektir.

KAYNAKÇA

- [1] KOPUR, K.C., (1992) Industrial Engineering Handbook-Reliability and Maintainability, Chapter 89, Mc Graw-Hill Book.
- [2] ÖZDEMİR, Tayfun (2000) İstatistiksel Kalite Kontrol Ankara Üniversitesi Fen Fakültesi Döner Sermaye İşletmesi Yayınları No:62.
- [3] SALEH J.H., MARAIS K., (2006) Highlights from the early (and pre-) history of reliability engineering, Reliability Engineering & System Safety, vol.91, no.2, s. 249-256.
- [4] WREDEN N., (2005) Profit Brand: How to Increase Profitability, Accountability & Sustainability of Brand, Kogan Page.
- [5] CATELANI, M., CIANI, L., LUONGO V., (2014) Improved RBD analysis for reliability assessment in industrial application, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, IEEE International, s. 670 – 674.
- [6] DUGAS, M.R., SAMANIEGO, F.J. (2007) “On optimal system designs in reliability economics frameworks”, Naval Research Logistics 54.
- [7] KUO, W., PRASAD, V.R., TILLMAN, F.A., HWANG, C.L., (2001) Optimal Reliability Design: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press.
- [8] MUCHIRI, P. N., PINTELON, L., MARTIN, H. and DE MEYER, A. M., (2010) Empirical analysis of maintenance performance measurement in Belgian industries, International Journal of Production Research, vol.48, no.20, s. 5905-5924.
- [9] NİL, M., BAYLAKOĞLU, İ., (2006) “RoHS Direktifine Uygun Ürünler için Güvenilirlik Test Süreçleri”, Doğa Uyumlu Elektronik Tasarım Konferansı-İstanbul, 143-149.
- [10] KEÇECİOĞLU, D. (1991), Reliability Engineering Handbook Volume 1-2, PTR Prentice Hall.
- [11] NİL, M. (2009). Eviricilerde Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama Devresinin Tasarımı, Gerçekleştirilmesi ve Analizi. Doktora Tezi.
- [12] MIL-STD-756B (1981), Reliability Modelling and Prediction, USAF Military Specification.

- [13] MIL-HDBK-189 (1981), Reliability Growth Management, USAF Military Handbook.
- [14] UZUN A., ÖZDOĞAN A., (2011) Güvenilirlik analizlerine dayalı önleyici bakım planlanması, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, cilt 20, sayı 1, s. 303-320.
- [15] LI H., YUAN R., HUANG, H., (2013) Reliability analysis of an automated aircraft structural parts production line, Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), s. 1-8.
- [16] ZHANG C., SUN J., LIN S., (2011) Reliability analysis and improvement for Li/MnO₂ cell production line based on fault tree analysis, Proceedings of the 2011 Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM) on IEEE, vol. part 2, s.1132-1135.
- [17] TSAROUHAS P., (2012) Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: a review, International Journal of Food Science&Technology, vol 2012, no. 47, s. 2243-2251.
- [18] WENJUAN, L., CUNBAO, M., DONG, S., & ENNING, H. (2011). Research and Fulfillment on Prediction Algorithm of Aircraft Maintenance Cost Based on MSG_3 Theory. IEEE, 1-4.
- [19] ZARETSKY, E. V., HENDRICKS, R., & SODITUS, S. (2002). Weibull-Based Design Methodology for Rotating Aircraft Engine Structures. Glenn Research Center, Cleveland, Ohio: The NASA STI Program Office.
- [20] YABSLEY, A., & IBRAHIM, Y. (2008). Study on Maintenance Contribution to Life Cycle Costs: Aircraft Auxiliary Power Unit Example. IEEE, 1-6.
- [21] DEMİRCİ, Ş. (1998). Reliability and maintainability analysis with an application to aircraft maintenance. Graduate Thesis.
- [22] VAROL, K. (2013). Engine Maintenance Time Prediction With Weibull Distribution In Commercial Aviation. Graduate Thesis.
- [23] SPAC Danışmanlık, Güvenilirlik Analizleri Eğitimi Notları
- [24] GROSH, D. L., (1989) A Primer of Reliability Theory, John Wiley & Sons Inc.
- [25] <https://docplayer.biz.tr/1108811-Guvenilirlik-muhendisligi-ve-urun-tasarimindaki-yeri-ilknur-baylakoglu-nisan-2012.html>

- [26] ZIO, Enrico (2007), An introduction to the basics of reliability and risk analysis, 1st Edition, Series of Quality, Reliability and Engineering Statistics Vol. 13, World Scientific.
- [27] https://www.spac.com.tr/_tu/_yazilim/reliasoft_weibull.html
- [28] KARAKUŞ C. (2020), İstatistiksel Analiz, Olasılık ve Rastgele Değişkenler.
- [29] IRESON, W.G., COOMBS, C.F. and MOSS, R.Y. (1996), Handbook of Reliability Engineering and Management. McGraw – Hill.
- [30] V. YILMAZ & H.E. ÇELİK, Matematiksel İstatistik Ders Notları
- [31] HAHN, G.J. and SHAPIRO, S.S. (1967). Statistical Models in Engineering. John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto.
- [32] ELSAYED A. (1996), Reliability engineering, 1st Edition, Addison Wesley Longman.
- [33] https://www.wikiwand.com/tr/Beta_dağılımı
- [34] ABERNETHY, D. R. (2002). The New Weibull Handbook. D. R. Abernethy, Florida.
- [35] ANNIS, C. ve VUKELICH, S. (1999), Statistical Characterization of Rare Events, AGARD-R-790.
- [36] WEIBULL, W. (1951). A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. Applied of Mechanics, 293-297.
- [37] EVANS, M., HASTINGS, N. and PEACOCK, B. (1993), Statical Distributions. Second Edition. A Wiley – Interscience Publication: John Wiley & Sons, Inc. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. Printed in the United States of America. 170s.
- [38] Flight Manual HAF Series Aircraft F-16C/D T.O. GR1F-16CJ-1
- [39] SOIN, Sarv Singh. (1992) Total Quality Control Essentials, Key Elements, Medhologies and Managing for Success, Mc Graw-Hill inc, New York.

EKLER

EK-1: Ünitelerin Seri Numarası Bazında Arıza U/S Verileri

Ünite U/S Bilgileri			
Sıra No:	F/S	Uçuş Saati	Seri No:
1	S	3	Seri No-001
2	F	1617	Seri No-001
3	F	2694	Seri No-002
4	S	1780	Seri No-002
5	F	1229	Seri No-003
6	S	1889	Seri No-003
7	F	214	Seri No-034
8	S	748	Seri No-034
9	F	2697	Seri No-004
10	F	1566	Seri No-004
11	S	382	Seri No-004
12	F	1085	Seri No-005
13	F	867	Seri No-005
14	F	883	Seri No-005
15	S	518	Seri No-005
16	F	2489	Seri No-006
17	S	2214	Seri No-006
18	F	2697	Seri No-007
19	S	1660	Seri No-007
20	F	2486	Seri No-008
21	S	1275	Seri No-008
22	F	2691	Seri No-049
23	S	2337	Seri No-049
24	S	1938	Seri No-009
25	F	254	Seri No-010
26	F	2422	Seri No-010
27	S	305	Seri No-010
28	S	2455	Seri No-012
29	F	2116	Seri No-012
30	F	1	Seri No-012
31	F	2691	Seri No-011
32	S	1979	Seri No-011
33	F	884	Seri No-013
34	F	1214	Seri No-013
35	S	1173	Seri No-013
36	F	1189	Seri No-014
37	S	1818	Seri No-014
38	F	2693	Seri No-015

39	S	2159	Seri No-015
40	F	2686	Seri No-016
41	S	2296	Seri No-016
42	F	2149	Seri No-017
43	F	2696	Seri No-017
44	S	2211	Seri No-017
45	F	2653	Seri No-065
46	F	1690	Seri No-065
47	F	10	Seri No-065
48	S	466	Seri No-065
49	F	2697	Seri No-019
50	F	2700	Seri No-019
51	S	398	Seri No-019
52	F	2698	Seri No-020
53	S	2028	Seri No-020
54	F	2686	Seri No-021
55	F	123	Seri No-021
56	F	0	Seri No-021
57	S	2205	Seri No-021
58	F	2492	Seri No-022
59	S	545	Seri No-022
60	F	2697	Seri No-023
61	S	675	Seri No-023
62	F	2698	Seri No-024
63	S	1843	Seri No-024
64	F	1524	Seri No-025
65	F	2542	Seri No-025
66	F	2465	Seri No-026
67	F	2169	Seri No-026
68	F	17	Seri No-026
69	S	211	Seri No-026
70	F	2582	Seri No-027
71	S	1568	Seri No-027
72	F	377	Seri No-028
73	S	377	Seri No-028
74	F	2689	Seri No-029
75	S	1916	Seri No-029
76	F	1646	Seri No-030
77	S	1646	Seri No-030
78	F	2559	Seri No-031
79	F	964	Seri No-031
80	S	1291	Seri No-031
81	F	1716	Seri No-032
82	F	982	Seri No-032

83	F	1267	Seri No-032
84	S	1107	Seri No-032
85	F	359	Seri No-014
86	S	1771	Seri No-025
87	F	2474	Seri No-033
88	S	1818	Seri No-033
89	F	2639	Seri No-035
90	S	2367	Seri No-035
91	S	2162	Seri No-036
92	F	1700	Seri No-037
93	S	1856	Seri No-037
94	F	2700	Seri No-038
95	S	2374	Seri No-038
96	F	2650	Seri No-039
97	S	1704	Seri No-039
98	F	2693	Seri No-040
99	S	2481	Seri No-040
100	F	2662	Seri No-185
101	S	1884	Seri No-185
102	F	31	Seri No-186
103	S	31	Seri No-186
104	F	2694	Seri No-041
105	F	1455	Seri No-041
106	S	1302	Seri No-041
107	F	2691	Seri No-042
108	S	2356	Seri No-042
109	F	244	Seri No-043
110	S	244	Seri No-043
111	F	883	Seri No-044
112	S	538	Seri No-044
113	F	2298	Seri No-045
114	F	2480	Seri No-045
115	S	550	Seri No-045
116	F	2691	Seri No-046
117	F	1673	Seri No-046
118	S	43	Seri No-046
119	F	1329	Seri No-047
120	F	971	Seri No-047
121	F	2496	Seri No-047
122	S	1007	Seri No-047
123	F	792	Seri No-048
124	S	792	Seri No-048
125	S	1766	Seri No-050
126	F	2693	Seri No-051

127	S	1372	Seri No-051
128	F	2476	Seri No-018
129	F	0	Seri No-018
130	S	461	Seri No-018
131	F	2695	Seri No-052
132	S	637	Seri No-052
133	F	242	Seri No-053
134	S	242	Seri No-053
135	F	467	Seri No-187
136	F	2033	Seri No-187
137	S	908	Seri No-187
138	F	2503	Seri No-072
139	S	775	Seri No-072
140	F	560	Seri No-054
141	S	560	Seri No-054
142	F	2454	Seri No-055
143	S	1251	Seri No-055
144	F	2658	Seri No-056
145	S	2047	Seri No-056
146	F	2691	Seri No-057
147	S	2490	Seri No-057
148	F	2460	Seri No-147
149	S	2679	Seri No-147
150	F	2687	Seri No-100
151	S	2273	Seri No-100
152	F	2699	Seri No-058
153	S	1808	Seri No-058
154	F	2698	Seri No-059
155	S	2231	Seri No-059
156	F	2697	Seri No-060
157	S	1871	Seri No-060
158	F	2687	Seri No-061
159	F	175	Seri No-061
160	F	2101	Seri No-061
161	S	23	Seri No-061
162	F	330	Seri No-062
163	F	2339	Seri No-062
164	S	1439	Seri No-062
165	F	2698	Seri No-063
166	S	2233	Seri No-063
167	F	2324	Seri No-064
168	F	1404	Seri No-064
169	S	876	Seri No-064
170	F	2697	Seri No-066

171	S	2387	Seri No-066
172	F	1240	Seri No-067
173	S	1240	Seri No-067
174	F	2698	Seri No-068
175	S	2329	Seri No-068
176	F	2683	Seri No-069
177	F	1807	Seri No-069
178	S	977	Seri No-069
179	F	2290	Seri No-070
180	F	1038	Seri No-070
181	S	2005	Seri No-070
182	S	2	Seri No-188
183	F	2691	Seri No-071
184	S	2331	Seri No-071
185	F	464	Seri No-005
186	F	2109	Seri No-072
187	F	1809	Seri No-072
188	F	1849	Seri No-039
189	F	2695	Seri No-073
190	S	2074	Seri No-073
191	F	2691	Seri No-074
192	S	1471	Seri No-074
193	F	2442	Seri No-075
194	F	251	Seri No-075
195	S	2113	Seri No-075
196	F	2092	Seri No-189
197	S	2160	Seri No-189
198	F	2692	Seri No-076
199	F	964	Seri No-076
200	S	1241	Seri No-076
201	F	2699	Seri No-077
202	F	1435	Seri No-077
203	S	705	Seri No-077
204	F	1147	Seri No-078
205	S	2273	Seri No-078
206	F	2697	Seri No-079
207	S	1798	Seri No-079
208	F	2180	Seri No-080
209	F	2337	Seri No-080
210	S	330	Seri No-080
211	F	2695	Seri No-081
212	S	1784	Seri No-081
213	F	1081	Seri No-082
214	S	1081	Seri No-082

215	F	2688	Seri No-083
216	S	1632	Seri No-083
217	F	2697	Seri No-084
218	S	1529	Seri No-084
219	F	2698	Seri No-085
220	F	1326	Seri No-085
221	S	1345	Seri No-085
222	F	2692	Seri No-086
223	S	1893	Seri No-086
224	F	2650	Seri No-087
225	S	2103	Seri No-087
226	F	2699	Seri No-088
227	S	2289	Seri No-088
228	F	36	Seri No-044
229	F	854	Seri No-089
230	F	1584	Seri No-089
231	F	2697	Seri No-090
232	S	2345	Seri No-090
233	F	2699	Seri No-091
234	S	1795	Seri No-091
235	F	1747	Seri No-092
236	S	2094	Seri No-092
237	F	2697	Seri No-093
238	S	1980	Seri No-093
239	F	1496	Seri No-095
240	F	2679	Seri No-095
241	S	199	Seri No-095
242	F	2693	Seri No-096
243	S	1890	Seri No-096
244	F	2699	Seri No-097
245	S	1964	Seri No-097
246	F	2479	Seri No-098
247	S	1992	Seri No-098
248	F	1446	Seri No-099
249	S	1446	Seri No-099
250	F	1506	Seri No-101
251	S	1506	Seri No-101
252	F	2697	Seri No-102
253	S	1663	Seri No-102
254	F	2699	Seri No-103
255	S	1682	Seri No-103
256	F	2680	Seri No-104
257	F	1102	Seri No-104
258	S	674	Seri No-104

259	F	2698	Seri No-105
260	S	1787	Seri No-105
261	S	33	Seri No-043
262	F	2699	Seri No-106
263	S	1837	Seri No-106
264	F	2599	Seri No-107
265	F	816	Seri No-107
266	F	188	Seri No-107
267	S	466	Seri No-107
268	F	2699	Seri No-108
269	S	508	Seri No-108
270	F	2699	Seri No-109
271	F	467	Seri No-109
272	S	1041	Seri No-109
273	F	1480	Seri No-110
274	S	1480	Seri No-110
275	F	2695	Seri No-111
276	S	933	Seri No-111
277	F	2697	Seri No-112
278	F	1018	Seri No-112
279	S	483	Seri No-112
280	F	2671	Seri No-113
281	S	1511	Seri No-113
282	F	2382	Seri No-114
283	S	2382	Seri No-114
284	F	2680	Seri No-115
285	S	1262	Seri No-115
286	F	2697	Seri No-116
287	S	1670	Seri No-116
288	F	1484	Seri No-117
289	S	1484	Seri No-117
290	F	2447	Seri No-118
291	S	555	Seri No-118
292	F	2508	Seri No-119
293	F	61	Seri No-119
294	F	934	Seri No-119
295	S	292	Seri No-119
296	F	2613	Seri No-120
297	S	1639	Seri No-120
298	F	578	Seri No-121
299	S	578	Seri No-121
300	F	1615	Seri No-122
301	S	1615	Seri No-122
302	F	1778	Seri No-123

303	S	1778	Seri No-123
304	F	1531	Seri No-124
305	S	1531	Seri No-124
306	F	2511	Seri No-125
307	F	51	Seri No-125
308	F	502	Seri No-125
309	S	680	Seri No-125
310	F	2507	Seri No-126
311	S	1974	Seri No-126
312	F	2604	Seri No-127
313	S	1379	Seri No-127
314	F	1380	Seri No-128
315	S	1687	Seri No-128
316	F	2695	Seri No-129
317	S	1368	Seri No-129
318	F	2534	Seri No-130
319	S	2296	Seri No-130
320	S	1802	Seri No-131
321	F	2694	Seri No-132
322	S	1218	Seri No-132
323	F	2591	Seri No-133
324	S	781	Seri No-133
325	F	2493	Seri No-089
326	S	533	Seri No-089
327	F	664	Seri No-134
328	F	2494	Seri No-134
329	S	288	Seri No-134
330	F	290	Seri No-135
331	S	290	Seri No-135
332	F	1787	Seri No-136
333	S	1755	Seri No-136
334	F	2696	Seri No-137
335	S	532	Seri No-137
336	F	1214	Seri No-138
337	S	1214	Seri No-138
338	F	2696	Seri No-139
339	S	1395	Seri No-139
340	F	2699	Seri No-140
341	S	1278	Seri No-140
342	F	2496	Seri No-141
343	S	695	Seri No-141
344	F	2698	Seri No-142
345	S	1293	Seri No-142
346	S	1252	Seri No-190

347	F	2698	Seri No-143
348	S	2053	Seri No-143
349	F	2697	Seri No-144
350	F	1102	Seri No-144
351	S	38	Seri No-144
352	F	1441	Seri No-145
353	S	1441	Seri No-145
354	F	2695	Seri No-146
355	S	1337	Seri No-146
356	F	2689	Seri No-148
357	S	1144	Seri No-148
358	F	2698	Seri No-149
359	S	1440	Seri No-149
360	S	1307	Seri No-150
361	F	2687	Seri No-151
362	S	821	Seri No-151
363	F	2689	Seri No-152
364	S	1581	Seri No-152
365	F	114	Seri No-191
366	S	125	Seri No-191
367	S	515	Seri No-153
368	F	73	Seri No-094
369	S	460	Seri No-094
370	S	992	Seri No-154
371	S	344	Seri No-155
372	S	317	Seri No-156
373	S	582	Seri No-157
374	S	681	Seri No-158
375	S	966	Seri No-159
376	S	771	Seri No-160
377	S	987	Seri No-161
378	S	773	Seri No-162
379	S	625	Seri No-163
380	S	711	Seri No-164
381	S	604	Seri No-165
382	S	447	Seri No-166
383	S	886	Seri No-167
384	S	654	Seri No-168
385	S	508	Seri No-169
386	S	652	Seri No-170
387	S	782	Seri No-171
388	S	576	Seri No-172
389	S	823	Seri No-173
390	S	847	Seri No-174

391	S	771	Seri No-175
392	S	698	Seri No-176
393	S	896	Seri No-177
394	S	553	Seri No-178
395	S	537	Seri No-179
396	S	816	Seri No-180
397	S	147	Seri No-181
398	S	89	Seri No-182
399	S	357	Seri No-183
400	F	0	Seri No-184
401	S	264	Seri No-184