

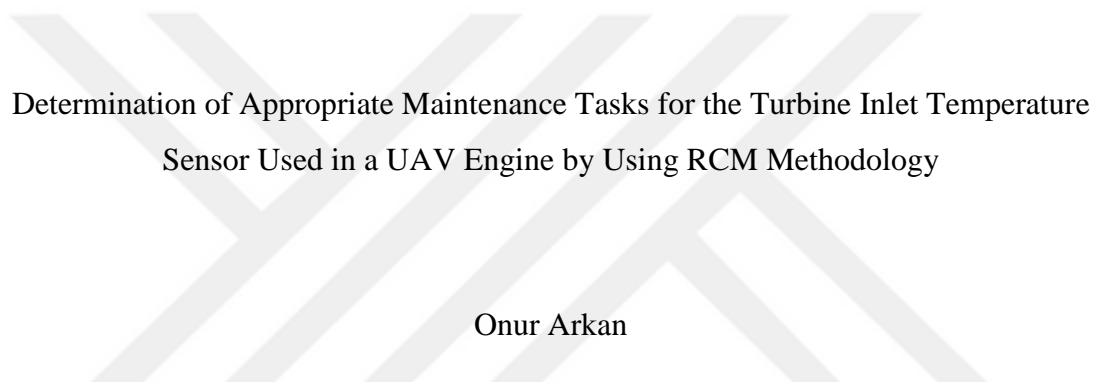
GMB Metodolojisi Kullanılarak Bir İHA Motorunda Kullanılan Türbin Giriş Sıcaklığı
Sensörü için Uygun Bakım Görevlerinin Belirlenmesi

Onur Arkan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı

Kasım 2018



Determination of Appropriate Maintenance Tasks for the Turbine Inlet Temperature
Sensor Used in a UAV Engine by Using RCM Methodology

Onur Arkan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Aviation Science and Technology

November 2018

GMB Metodolojisi Kullanılarak Bir İHA Motorunda Kullanılan Türbin Giriş Sıcaklığı
Sensörü için Uygun Bakım Görevlerinin Belirlenmesi

Onur Arkan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Havacılık Bilimi Ve Teknolojileri Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan

Kasım 2018

ONAY

Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Onur Arkan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “GMB Metodolojisi Kullanılarak Bir İHA Motorunda Kullanılan Türbin Giriş Sıcaklığı Sensörü için Uygun Bakım Görevlerinin Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan

İkinci Danışman : —

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan

Üye : Doç. Dr. Mustafa Ertunç TAT

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yasin ŞÖHRET

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan danışmanlığında hazırlamış olduğum “GMB Metodolojisi Kullanılarak Bir İHA Motorunda Kullanılan Türbin Giriş Sıcaklığı Sensörü için Uygun Bakım Görevlerinin Belirlenmesi” başlıklı tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 12/11/2018

Onur ARKAN

ÖZET

Güvenilirlik Merkezli Bakım (GMB/RCM), emniyetli operasyonlar ve maliyet etkin hazır olunmayı sağlamayı garanti edebilen, içerisinde önleyici bakım gereklilikleri ve diğer eylemleride barındıran uygun hata yönetimi stratejilerinin belirlenmesine karar veren bir analitik süreçtir (Naval Air Systems Command, 2016).

Bu yüksek lisans tezinde, GMB/RCM analiz süreçlerinin neler olduğu anlatılmıştır. Bir İHA motoru üzerinde kullanılan Türbin Giriş Sıcaklığı (TGS/TIT) sensörleri üzerinden örnek bir çalışma yapılmıştır. Sahadaki bir ürün üzerindeki değişim aralıklarının değiştirilebilmesi için takip edilmesi gereken analizler gösterilmiştir.

Örnek çalışma kapsamında ilk aşamada, sensöre ait hata türleri tespit edilmiştir. Daha sonra GMB/RCM analizleri ile sensör için uygulanması gereken doğru önleyici bakım görevi belirlenmiştir.

İkinci aşamada, sensör arıza kayıtları kullanılarak Weibull analizi yapılmıştır. Sensör planlı ve plansız maliyetleri hesaplanmıştır. Burdan yola çıkarakta sensör için ideal değişim aralığının ne olması gerektiği belirlenmiştir.

Son aşamada sensöre ait mevcut bakım görevi ile yeni değişim zamanı arasındaki maliyet kıyaslaması yapılmıştır. Buna göre yeni değişim zaman ile iki yıl içerisinde 72,450\$ kazanç sağlanacağı görülmüştür. Buna ek olarak sensördeki rezistör arızası kaynaklı arızaların önlenmiş olacağı belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güvenilirlik Merkezli Bakım, Planlı Bakım, Önleyici Bakım, Güvenilirlik.

SUMMARY

Reliability Centered Maintenance (GMB/RCM) is an analytical process to determine the appropriate failure management strategies, including PM requirements and Other Actions, warranted to ensure safe operations and cost-wise readiness (Naval Air Systems Command, 2016).

In this master thesis, GMB/RCM analysis processes has been explained. A case study was performed on the TGS/TIT sensors used on a UAV engine. It has been described that the which analyzes are needed to be followed to change the replacement intervals on a fielded product.

In the first phase of the case study, the failure modes of the sensor have been determined. Then, the correct preventive maintenance task for the sensor has been defined by GMB/RCM analysis.

In the second stage, Weibull analysis has been performed using sensor fault records. Sensor planned and unplanned maintenance costs has been calculated. The optimum replacement interval for the sensor has been determined by using these two analysis results.

In the last stage, the cost comparison between the current maintenance task of the sensor and the new replacement time has been made. Accordingly, it is seen that the new replacement time will yield 72.450\$ in two years time. In addition, it is stated that failures due to the fault of the resistor in the sensor will be prevented.

Keywords: Reliability Centered Maintenance, Scheduled Maintenance, Preventive Maintenance, Reliability.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve destek olan değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Melih Cemal Kuşhan'a teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Bu tez çalışmasını yapabilmem için gerekli her türlü desteği bana sağlayan şirket arkadaşlarıma ve yöneticilerime, parçası olmaktan gurur duyduğum TEI şirketine teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu tez sürecinde benden desteğini bir an için bile esirgemeyen değerli eşim, Lorna Sarah ARKAN'a, tüm eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen her zaman yanımda olan sevgili aileme ve çocuklarım Taylan ARKAN ile Leyla ARKAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Bakım	4
2.1.1. Düzeltici bakım	5
2.1.2. Önleyici bakım	5
2.2. Güvenilirliğin Tanımı ve Gelişimi	8
2.3. Arıza Oranı ve Arızalar Arası Ortalama Geçen Zaman	10
2.4. Banyo Eğrisi	11
2.5. Weibull Analizi Gelişimi ve Kullanım Amacı	14
2.6. Güvenilirlik Merkezli Bakım Tanımı	15
2.7. Güvenilirlik Merkezli Bakım Gelişimi	17
2.8. Güvenilirlik Merkezli Bakım Temelleri	18
2.8.1. İşlev	19
2.8.2. İşlevsel hatalar	20
2.8.3. Hata türü	20
2.8.4. Hatanın sonuçları	20
2.8.5. Hatayı önlemek veya tahmin etmek	23
2.9. Literatürde Güvenilirlik Merkezli Bakım ile İlgili Yapılan Çalışmalar	29
3. MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Materyal	32

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.2. Yöntem.....	35
3.2.1. Hata türü, etkileri ve kritikliği analizi	37
3.2.2. Tehlike risk değerlendirmesi.....	42
3.2.3. Güvenilirlik merkezli bakım karar mantık diyagramının uygulanması	43
3.2.4. Bakım görev analizi	45
3.2.5. Weibull analizinin yapılması.....	46
3.2.6. İdeal değişim aralığının belirlenmesi	51
3.2.7. Maliyet etkin analizi.....	54
3.2.8. Maliyet kaçınma analizi	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
4.1. İlk Tehlike Risk Değerlendirmesi Sonuç Raporu	59
4.2. Güvenilirlik Merkezli Bakım Karar Mantık Diyagramı Sonuç Raporu	60
4.3. Weibull Analizi Sonuç Raporu	61
4.4. Bakım Grörev Analizi Sonuç Raporu	63
4.5. İdeal Değişim Aralığı Sonuç Raporu	64
4.6. Maliyet Kaçınma Analizi Sonuç Raporu	65
4.7. Nihai Tehlike Risk Değerlendirmesi Sonuç Raporu.....	66
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ana bakım kategorileri	5
2.2. Banyo eğrisi	11
2.3. Uçaklarda yapısal olmayan parçalar için ömür-güvenilirlik dağılım eğrileri	13
2.4. GMB/RCM karar mantığı diyagramı	21
2.5. P-F eğrisi	24
2.6. Hatanın şartlı olasılığı: a) Faydalı ömür b) Erken arızaların etkisi c) Emniyetli Ömür Limiti	26
2.7. Ekonomik ömür limitleri	27
3.1. Analiz akış şeması	36
3.2. Operasyonel sonuçlar için GMB/RCM karar verme diyagramı	44
3.3. Tipik bir Weibull Grafiği.....	48
3.4. Köpek ayağı büküm örnek grafiği	50
3.5. Maliyet ve zaman	51
3.6. Hayatta kalmayı başaran parça yüzdesi.....	56
4.1. TGS/TIT sensör Weibull grafiği	61
4.2. TGS/TIT sensör rezistör arızası hata türü Weibull grafiği	62
4.3. TGS/TIT sensör değişim aralığı (planlı ve plansız bakım maliyet değişimi).....	64

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Banyo eğrisi fazları arıza nedenleri ve alınabilecek önlemler.....	12
3.1. TGS/TIT sensör arıza ve şüpheli listesi.....	33
3.2. TGS/TIT sensör HTEKA/FMECA formu.....	40
3.3. Tehlike şiddet değerlendirmesi	41
3.4. Tehlike risk matrisi	43
3.5 Weibull grafiği çıktıları ve değerlendirme (örnek grafik için)	47
3.6. Hayatta kalan parça yüzdesi analiz verileri	52
3.7. Weibull parametrelerine göre ideal değişim aralığı	53
3.8. Maliyet etkinlik analiz verileri	56
4.1. ÖAO ₆₀₀ için tehlike risk değerlendirmesi (operasyonel sonuçlar için).....	59
4.2. Güvenlilik merkezli bakım karar mantığı soru ve cevapları	60
4.3. Güvenlilik merkezli bakım karar mantığı soru ve cevapları (operasyonel sınıfı için) 60	60
4.4. Weibull analiz sonuçları	63
4.5. TGS/TIT sensör planlı ve plansız bakım görev analiz özeti	63
4.6. Maliyet kazanç analizi sonuçları	65
4.7. ÖAO ₂₀₀ için tehlike risk değerlendirmesi (operasyonel sonuçlar için).....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

β	Şekil Parametresi
η	Karakteristik Ömür
p	Kritik İlgileşim Katsayısı
p^2	Kritik Belirleme Katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

AAOGZ/MTBF	Arızalar Arası Ortalama Geçen Zaman (Mean Time Between Failure)
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ABSK/EMSG	Avrupa Bakım Sistemi Kılavuzu (Europe Maintenance System Guide)
AFHM/FAA	Amerika Federal Havacılık Merkezi (Federal Aviation Administration)
BGA/MTA	Bakım Görev Analizi (Maintenance Task Analysis)
BYG/MSG	Bakım Yönlendirme Grubu (Maintenance Steering Group)
DHTEKA/SFMECA	Desteklenebilirlik Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (Supportability Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)
EEGDG/AGREE	Elektronik Ekipman Güvenilirliği Danışma Grubunu (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)
EGS/EGT	Egzoz Gaz Sıcaklığı (Exhaust Gas Temperature)
GATA/AAAV	Gelişmiş Amfibik Taarruz Aracı (Advanced Amphibious Assault Vehicle)
GMB/RCM	Güvenilirlik Merkezli Bakım (Reliability-Centered Maintenance)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
HRA/ARINC	Havacılık Radyo Anonim (Aeronautical Radio Incorporated)
HTEKA/FMECA	Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)
IHA	İnsansız Hava Aracı
MEO/CBR	Maliyet Etkin Oranı (Cost Benefit Ratio)
MOT/MLE	Maksimum Olabilirlik Tahmin (Maximum Likelihood Estimation)
ÖAO	Önlenmemiş Arıza Oranı
SD/DoD	Savunma Departmanı (Department of Defence)
TGS/TIT	Türbin Giriş Sıcaklığı (Turbine Inlet Temperature)
THTEKA/DFMECA	Tasarım Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (Design Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)

1.GİRİŞ VE AMAÇ

Uçak bakımında, uçuşta tek bir bileşenin arızalanmasının büyük miktarlarda mali kayba mal olabileceği ve bazı durumlarda mümkün olabilecek en kötü senaryonun yaşanabileceği gerçeği vardır. Sonuçları emniyet odaklı olan arızaların önlenmesi bir zorunluluktur. Buna ek olarak askeri havacılıkta operasyonel kayıplar, üzerinde ciddi derecede durulması gereken konulardan bir tanesidir. Platformun mevcut görevini yerine getirmesine engel olan arızaların önüne geçebilmek için önleyici bakımlar doğru bir uygulamadır.

Havacılık motorlarında genellikle ilk hazırlanan planlı bakım planlarının hazırlanmasında, uçuş emniyetini koruyacak şekilde benzer ürünlerdeki planlı bakımlardan veya varsa testlerde elde edilen arıza kayıtlarından faydalanılır. Genellikle test süreleri ideal değişim aralıklarının belirlenmesi için yeterli olmamaktadır. Bu sebeple zaman içerisinde saha tecrübesi ile bazı parçalar için belirlenen bakım görevi aralıklarının iyileştirmesi gerekliliği ortaya çıkar. Genellikle bu iyileştirmeler, operasyonel veya maliyet açısından sisteme negatif etki yapan parçalar için geçerlidir. Tüm bu değerlendirmelerin güvenilirlik kavramı ile birleştirip yapılabildiği yer Güvenilirlik Merkezli Bakım (GMB/RCM) analizleridir.

Ürün için belirlenen doğru belirlenmiş önleyici bakımlar sistem güvenilirliği üzerinde olumlu etkisi olmaktadır. Ancak sistemin arıza oranını azaltmak için olması gerekenden önce yapılan parça değişimlerini yıllık planlı bakım maliyetleri gibi kalemler üzerinde kötü yönde etki yapacaktır. Bu sebeple en ideal olan değişim aralığı belirlenirken, arıza oranı, düzeltici ve önleyici bakım maliyetleri gibi kalemlerde dikkate alınarak analizler yapılmalıdır. Hiçbir önleyici bakım yapmanın daha iyi bir seçim olacağı durumlarda olabilir. Parça maliyeti çok düşük ama önleyici bakım maliyeti parça maliyetine nazaran çok yüksek olan durumlarda değişim kararı verilmeyebilir.

Bu çalışmada sonuçları emniyet riski yaratmayan ancak arıza yaptığında operasyonel ve ekonomik sonuçlar doğuran bir hava aracı motor gösterge sistemi elemanı olan Türbin Giriş Sıcaklığı (TGS/TIT) sensörlerde ideal önleyici bakımın ne olduğunu belirlemeye yönelik analizler yapılmıştır. Tez bölümleri aşağıdaki başlıklardan oluşmaktadır:

1. Literatür Araştırması
2. Materyal ve Yöntem
3. Bulgular ve Tartışma
4. Sonuç ve Öneriler

Tezin ikinci bölümü olan literatür araştırmasında, öncelikle bakımın ne olduğu, bakım çeşitleri ve önleyici bakımın hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. GMB/RCM analizinin temelini oluşturulan güvenilirlik yaklaşımın, banyo eğrisi ve sensöre ait ömür hesaplamalarında kullanılan Weibull analizi anlatılmıştır. Devam eden sayfalarda GMB/RCM analizinin tarihçesi, GMB/RCM kapsamında değerlendirmesi gereken ana başlıkların neler olduğu, Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik analizi (HTEKA/FMECA) analizi ile olan ilişkisi anlatılmıştır. Son olarak literatürde diğer yapılan akademik çalışmalara değinilmiştir.

Tezin üçüncü bölümü olan materyal ve yöntem kısmında, sensör bakım aralığında yapılması gereken işlemler bir akış şeması ile sunulmuştur. Bir IHA motorunda kullanılan TGS/TIT sensörlere ait arıza kayıtları incelenmiş ve bu amaçla kullanılabileceği değerlendirilmiştir. İlerleyen kısımlarda akış şeması içerisinde belirtilen her bir başlığın, analizlerde ne amaçla kullanıldığı anlatılmıştır.

Tezin dördüncü bölümü olan bulgular ve tartışma kısmında, üçüncü bölümde anlatılan iş akışına uygun bir şekilde ilgili analizler sırası ile yapılmıştır. Yapılan Weibull analizine göre yıpranmaya sebep olan hata türünün karakteristik ömür değeri 937,41 ve şekil parametresi 2,62 çıkmıştır. Maliyet etkinlik analizlerinin kapsamında arızanın planlı veya plansız bakımlar ile giderilmesi durumundaki maliyetlerinin neler olduğu hesaplanmıştır. Bu kapsamda sensörün arıza yapması durumunda planlı değişim maliyetinin 212,5\$, plansız değişim maliyetinin ise 6300\$ olduğu görülmüştür. Mevcut

durumda her 600 saatte durumuna bakılmaksızın yenisi ile değiştirilen sensörlerin, her 200 saatte bir değiştirildiği takdirde, operasyonel kayıplarda meydana gelen iyileştirmenin yanında, iki yıllık uçuş zarfında 72,450\$'lık kazanç sağlanacağı görülmüştür. Son olarak kritiklik matrisinde mevcut planlı değişim zamanı olan her 600 saatte bir değişim ile risk tablosunun yüksek risk grubunda bulunan sensöre ait hata türünün, 200 saatlik değişimle, kabul risk seviyesine çekildiği gösterilmiştir.

Tezin son bölümü olan sonuçlar ve öneriler bölümünde, uygun parçalarda yapılacak değişim aralığı iyileştirme çalışmalarının elde edilmesinin katkılarının neler olduğu vurgulanmış ve bu analizleri yapmak için gerekli verileri toplamanın zorluklarından bahsedilmiştir. Yapılan analizi sonucunda sensör için elde edilen mali ve operasyonel yönden olan kazanımların neler olduklarından anlatılmıştır. GMB/RCM kapsamında ilgilenilmesi gereken bakım görev türlerini hangileri olması gerektiği vurgulanmıştır.

Ürün yaşam dönüğündeki maliyetlerde planlı ve plansız bakım maliyetleri çok önemli bir kalemdir. Plansız meydana gelen arızalar yarattıkları mali kayıpların yanısıra savunma alanında kritik durumlarda operasyonel kabiliyetin kaybolmasına sebep olabilir. Bu tezin hazırlanmasındaki amaçta; ilgili kişi ve kurumlarda; parçaya ait hata türlerinin sonuçlarının bir emniyet riski yaratmadığı durumlarda, test veya tasarım verilerine göre oluşturulmuş planlı değişim aralıklarının, sahadan gelen veriler ile tekrar gözden geçirilmesinin operasyonel kabiliyetler ve ürün yaşam dönüğü maliyetleri üzerindeki etkisinin neler olduğunu ortaya koymak olmuştur.

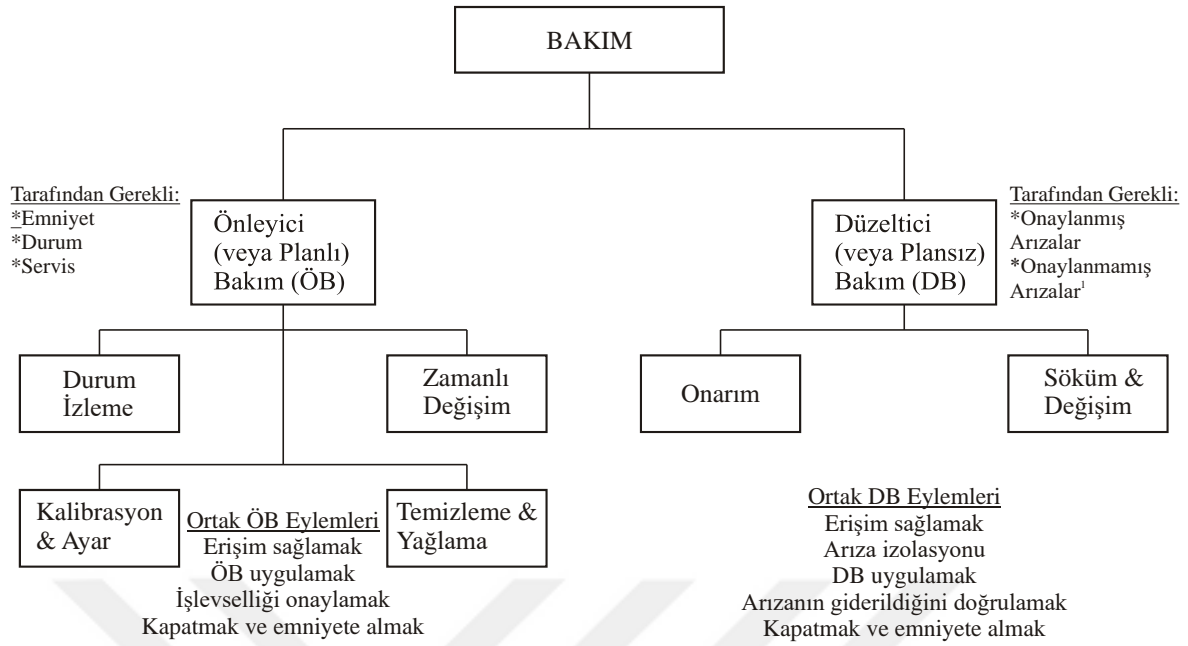
2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Bakım

Bakım fiziksel varlıkların, kullanıcılarının kendilerinden yapmasını istediklerini yapmaya devam ettiğinden emin olmaktır. Mühendislik bakış açısından, herhangi bir fiziksel varlığın yönetiminde iki unsur bulunur. Sürdürülebilirlik ve zaman zaman değiştirilmesi de gerekebilir. Büyük sözlükler sürdürmeyi, devam etmenin veya var olan bir durumda kalmanın bir sebebi olarak tanımlar. Bu, bakımın bir şeyleri korumak anlamına geldiğini gösterir. Öte yandan, bir şeyi değiştirmenin onu bir şekilde değiştirmek olduğu anlamında gelir (Moubray, 1997).

Department of the Army (2006)'te Moubray'in tanımına benzer bir şekilde bakımı, bir öğenin doğru çalışmasını doğrudan koruyan veya başarısızlık veya başka bir anomali ile kesildiğinde bu işlemi geri yükleyen faaliyetler ve eylemler olarak tanımlamaktadır. Uygulandığı duruma göre bakım kategorileri göre iki ana gruba ayrılır (Department of the Army, 2006). Şekil 2.1'de bu kategorilerin aşağıya doğru kırılımları gösterilmektedir.

Bakım aynı zamanda yapıldığı yere görede kategori edilebilir. Bu kategoriler bakım seviyelerini göstermektedir ve üç başlıkta incelenirler. Hat veya organizasyonel bakım, sistemin veya donanımın, ürünün normalde kullanımda olduğu veya depolandığı durumlarda uygulanan bakımdır. Saha bakımı, bakım uygulamasının sistemin bölümlerine (alt sistem, alt gruplar veya parçalar gibi) çalışma veya depolama bölgesinin yakınlarında yapılan bakımdır. Bazı durumlarda sistem üzerinde yapılan ağır bakımlarda (yapısal onarım, motor değişimi vb.) bu kapsama dahil edilebilir. Depo seviyesi bakım ise, sistemin veya sistemin bölümlerinin uzakta merkezi bir tesiste bakımının yapıldığı durumdur (Department of the Army, 2006).



Şekil 2.1 Ana bakım kategorileri (Department of the Army, 2006)

2.1.1. Düzeltici bakım

Reaktif bakım terimi düzeltici bakım ile aynı anlama gelir ve her ikisinde bozulma, onarım, arıza olduğunda onarım veya arıza olana kadar çalışma bakım yönetimi olarak ifade edilmektedir. Arıza olana kadar çalışmak, makina veya ekipmanın hiçbir bakım işlemi yapılmadan arıza olana kadar beklediği reaktif bir yönetim tekniğidir; aslında hiç bakım gerektirmeyen yönetim anlayışıdır. Bu yaklaşım ayrıca en pahalı bakım yönetim stratejisidir. Bu tip bakım yönetimiyle ilgili büyük masraflar, yüksek yedek parça stok maliyeti, fazla mesai iş gücü maliyeti, yüksek makina kapalı kalma süresi ve düşük üretim kullanılabilirliğidir (Mobley, 2002; Department of the Army, 2006).

2.1.2. Önleyici bakım

Önleyici bakımın farklı birçok tanımı mevcuttur. Mann (1976)'ya göre bakım tartışma amacıyla genellikle zaman temelinde sınıflandırılır. Acil bakım, işin yakın gelecekte yapılması gerektiği anlamına gelir. Rutin bakım normalde işin sınırlı, öngörülebilir bir gelecekte yapılması gerektiği anlamına gelir ve koruyucu bakım, planlanan bir çizelgeye göre gerçekleştirilen bakım anlamına gelir (Martin, 2006) .

Bu tanım ile belirtilen önleyici bakım kavramı, önleyici bakım ile ilişkili oldukları için planlama ve zamanlama fikirlerini getirir. Mann önceden planlanan bir çizelgeye göre önleyici bakım gerçekleştirildiğinde, gerçekleştirildikleri zamana bağlı olarak farklı bakım türlerini tanımlar. Koruyucu bakımın önceden planlandığı gerçeğinden yola çıkılarak, koruyucu bakımın reaktif olmayan proaktif olduğu izlenir. Başka bir deyişle, bir koşul veya bir olay meydana geldiği için (yani, bir olay veya duruma tepki olarak değil), ancak önceden belirlenmiş belirli bir zaman veya kullanım kriterleri sağlandığında gerçekleştirilir (Martin, 2006). Mobley (2002) bu zaman odaklı bileşeni desteklemekte ve bunu şu ifadelerle anlatmaktadır:

"... tüm önleyici bakım yönetim programları zaman odaklıdır. Başka bir deyişle, bakım görevleri, geçen toplam çalışma zamanı veya saatlerine dayanır"

Ebeling (2000), önleyici bakımı içerisinde onarım, değişim, temizleme, yağlama, ayarlama ve hizalama görev setlerini barındıran, genellikle periyodik olan planlı durdurmalar olarak tanımlamaktadır. Yine, önleyici bakım kavramının içerisine bir zamanlama kavramı dâhil edilmiştir, ancak Ebeling, koruyucu bakım şemsiyesi altında gerçekleştirilen eylem türleri hakkında daha ayrıntılı bir detaya girmektedir. İyi tanımlanmış bir dizi görev düşüncesi, birinin önleyici bakım işlemlerinin önceden düşünülüp detaylı olarak belirtildiği fikrine yol açar. Bu kavram önemlidir, çünkü bu konseptten sonra gelen koruyucu bir bakım programının geliştirilmesindeki en önemli görevlerden biri, koruyucu bakım programının bir parçası olarak hangi eylemlerin gerçekleştirileceğini ve gerçekleştirilmeyeceğini belirlemektir (Martin, 2006).

Department of the Air Force (2000), önleyici bakımı, ekipmanlardaki arızaları önlemek, bakım yapılabilirliklerini doğrulamak veya çevresel elemanlardan kaynaklanan bozulma, aşınma ve yıpranmaya maruz kalmış olan ekipmanların tam servis verilebilirliklerini sağlamak için sistematik muayene, tutarsızlıkların saptanması ve düzeltilmesi süreçleri boyunca yapılan normal bakım ve koruma olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlama, arızaların önlenmesi kavramını getirir ve tanım olarak bir bileşenin veya sistemin güvenilirliğini arttırmayı ifade eder (Martin, 2006).

Önceden tanımlanmış koruyucu bakım yapmak için neden önleyici bakım yaptığımızı anlamak da önemlidir. Smith (1993)'e göre koruyucu bakım yapmak için üç neden vardır:

- Arızayı önlemek
- Arızanın başlangıcını tespit etmek
- Gizli bir arızayı tespit etmek

Arızayı olmadan önce önleyerek, bir sistemin yerine getirmesi gereken işlevleri daha düzgün yapabilmesi sağlanacaktır. Arızanın başlangıcını tespit ederek, bakım teknisyenleri ve yöneticileri, bakım süresini en aza indirecek bakım ve onarım işlemlerinin etkin ve verimli bir şekilde nasıl planlanacağı ve böylece sistemin amaçlanan işlevlerini daha iyi yerine getirebileceği konusunda daha fazla bilgiye sahip olurlar. Gizli arıza, normal çalışma sürecinde hiç kimsenin tahmin edemeyeceği arızaların meydana gelebileceği donanım öğeleri, bütün bir alt sistem veya sistemi kapsar. Bu sebeple, gizli arızaların keşfedilmesi, bakım yöneticisinin gizli arızaları sistemin işlevselliğini etkilemeden önce onararak sistem güvenilirliğini arttırmasına olanak tanır (Martin, 2006).

Şüphesiz, koruyucu bakımın ortak uygulamaları, önleyici bakım gerektiren ürün, makine ve sistemlerin çoğuyla birlikte gelişmiştir. 1930'lardan beri, bakım evrimi üç kuşak boyunca izlenebilir (Moubrey, 1997)

I. nesil, II. Dünya Savaşı'na kadar olan zamanı içerir. O günlerde, endüstri çok fazla mekanize değildi bu sebeple duruş süreleri pek önemli değildi. Bu, ekipmanlardaki arızaların engellenmesinin yöneticilerin zihninde yüksek önceliğe sahip olmaması demektir. Aynı zamanda, çoğu donanım basitti ve çoğunun tasarımı gerektiğinden çok daha iyi bir tasarıma sahipti. Bu durum ekipmanları, güvenilir ve onarımı daha kolay yapılabilir yapmıştır. Sonuç olarak; basit temizlik, çeşitli hizmetler ve yağlama rutinlerinin dışında sistematik bir bakıma gereksinim duyulmamıştır. Ayrıca bakım için gerekli olan beceri gereksinimi bugünkünden çok daha azdı (Moubrey, 1997; Ünal, 2009)

İkinci nesil, daha karmaşık makinelere daha fazla bağımlılık hissedilen dönemdir. Bu artan bağımlılık, makine kırıldığında etkileri daha derindi. Bu, donanım arızalarının engellenmesi ve önlenmesi gerektiği fikrine yol açtı ve bu da koruyucu bakım kavramına dönüştü. Tam zamanında, zayıf ve envanter indirimi gibi lojistik konularında ortaya çıkan üretim çizelgelerindeki değişimler için karşılıklı bağımlılık ve azaltılmış toleransa ekipman arızalarının artık tüm tesisin işletilmesine müdahale etme ihtimali artmaktadır ve mekanizasyon ve otomasyon büyümesi, güvenilirlik ve kullanılabilirliğin artık önemli konular olduğu anlamına geliyor (Moubray, 1997).

Son olarak, günümüzün otomatik donanımlarının bakımını yapmak için gereken uzmanlık derecesi, büyük oranda bakım gerçekleştirme masraflarında büyük bir artışa neden olmuştur. Bazı sektörlerde şimdi işletme maliyetlerinin en yüksek veya en yüksek unsuru olmaktadır (Moubray, 1997).

Koruyucu bakım konusundaki bu tartışmayı güvenilirlik odaklı bakım kavramıyla ilişkilendirmenin aşamasını belirlemek için güvenilirlik kavramı ve nasıl geliştiği hakkında daha fazla bilgi edinmek önemlidir (Martin, 2006).

2.2. Güvenilirliğin Tanımı ve Gelişimi

Güvenilirlik, bir bileşen veya sistemin, belirtilen çalışma koşullarında kullanıldığında belirli bir süre için gerekli bir işlevi yerine getirebilme olasılığıdır (Mobley, 2002).

Güvenilirliğin erken temeli, sigorta endüstrisinde kullanılan aktüeryal kavramlarda, özellikle insan hayatta kalma olasılıklarının incelenmesinde bulunabilir. 1930'ların sonlarında ve 1940'larda Weibull, materyaldeki yorulma ömrünü analiz etmiştir ve bu da kendi ismini taşıyacak olan olasılık dağılımını ortaya çıkmasını sağlamıştır. Yapısal güvenilirlik ve yorulma kaynaklı arızalar ile ilgili çalışmalar 1930'lu yıllarda başlamış ve o zamandan beri devam etmiştir. Erken zamanlarda (1930 ve 1940'lar), özellikle üssel dağılımla birlikte kullanılacak şekilde kuyruk ve yenileme teorisindeki meydan gelen gelişmeler güvenilirlik için matematiksel bazı temelleri sağlamış olsa da, İkinci Dünya Savaşı'na kadar güvenilirlik çalışma konusu haline gelmemiştir. Bu, savaş sırasında

kullanılan nispeten karmaşık elektronik ekipman ve gözlenen oldukça yüksek başarısızlık oranlarına bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle, vakum tüpleri bilinen bir şekilde güvenilmezdi. Savaşı takiben, Ticari havayolları tarafından, havacılık elektronik donanımlarının geliştirilmesi amacıyla Havacılık Radyo Anonim (HRA/ARINC) kurulmuştur. 1950'de Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Hava Kuvvetleri, genel cihazların güvenilirliğini artırmak için bir grup oluşturmuş ve 1952'de Savunma Bakanlığı, Elektronik Ekipman Güvenilirliği Danışma Grubunu (EEGDG/AGREE) kurmuştur. Bu danışma grubu tarafından yeni sistemlerin güvenilirlik test ve gösteri gerekliliği ortaya konulmuştur (Ebeling, 2000).

1950'lerde arıza zamanlarını göstermede üssel dağılımın kullanılması odaklı çalışmalar yayınlansada, 1950'lerin sonuna doğru Weibull dağılımına olan ilgi ve önem artmıştır. 1970'li yıllar boyunca, güvenilirlik merkezli çalışmalar büyük ölçüde nükleer reaktör emniyeti konusundaki endişelerden dolayı hata ağacı analizine doğru kaymıştır. 1980'li yıllara doğru, güvenilirlik ağı literatürde kayda değer ölçüde ilgi görmüştür. Güvenilirlik ve idame edilebilirlik, ABD Hava Kuvvetleri'nin Güvenilirlik ve Temel Tespiti 2000 programının tanıtımıyla 1980'lerin ortalarında büyük bir önem kazanmıştır. Güvenilirlik ve idame edilebilirlik programının amacı; 2000 yılına kadar, güvenilirlik ve idame edilebilirlik değerlerini iyileştirerek, sistemin hazır olma değerini arttırmak, bakım personelinin gereksinimlerini ve yaşam döngüsü maliyetlerini azaltmayı hedeflemiştir (Ebeling, 2000).

Kişinin görüşüne bağlı olarak güvenilirlik farklı yollar ile hesaplanabilir: doğal güvenilirlik, operasyonel güvenilirlik, görev (veya fonksiyonel) güvenilirlik ve temel (ya da lojistik) güvenilirliktir. GMB/RCM operasyonel güvenilirlik ile ilişkilidir Tasarımcının bakış açısına göre, güvenilirlik yalnızca tasarımla ilgili olan arızaları sayarak ölçülür. Bu şekilde ölçüldüğünde, güvenilirlik, doğal güvenilirlik olarak adlandırılır. Bir kullanıcının veya operatörün bakış açısına göre, sistemin amaçlanan işlevini yerine getirmesini durdurmasına neden olan tüm olaylar bir arıza olayıdır. Bu olaylar kesinlikle sistemin işlevini etkileyen tüm tasarımla ilgili hataları içerir. Ayrıca, bakım nedeniyle tetiklenen arızalar, arızalı olmayan olaylar ve tasarımcının sözleşmeden doğan sorumluluğunun veya teknik kontrolünün dışında olabilecek diğer anormallikler vardır. Bu güvenilirliğe operasyonel güvenilirlik denir. (Department of the Army, 2006).

2.3. Arıza Oranı ve Arızalar Arası Ortalama Geçen Zaman

Bir sistemin veya bir sistemin içindeki bir ögenin arıza oranı, beklenen sıklıkta arızanın meydana geleceğini gösterir. Arıza oranı, belirtilen bir işlem sırasında oluşacak bir sistem, öge, grup veya parçanın arıza sayısını tahmin eden sayısal bir değerdir. Belirlenen süre boyunca meydana gelen arıza sayısının, belirlenmiş süreye bölünmesi sonucu arıza oranı değeri elde edilir. Arızalar Arası Ortalama Geçen Zaman (AAOGZ/MTBF) değerinin hesaplanması, arıza oranı hesabında kullanılan verileri kullanılarak yapılır. AAOGZ/MTBF ve arıza oranı birbirlerinin tersidir. Arıza oranı bir ögenin, grubun veya parçanın ortalama arızalanır kadar çalışabileceği ortalama süreyi, AAOGZ/MTBF ise arızalar arası ortalama geçen süreyi tahmin eder (Jones, 2010). GMB/RCM bağlamında, arıza oranı, hata türünü önlemek için herhangi bir işlem yapılmadığı varsayılarak, bir ünite çalışma periyodu boyunca bir arızanın meydana gelme sayısı olarak tanımlanır. Diğer bir deyişle, arıza oranı, tüm varlık nüfusunun ortalama yaşını dikkate alarak, arızalı olanların, normal çalışma koşullarında, önleyici bakım (veya başka bir arıza yönetimi stratejisi) uygulanmaksızın başarısızlığa uğradıklarını varsayar. Bu, hafifletilmemiş arıza oranı olarak adlandırılır. GMB/RCM analizi kapsamında arıza oranı dört amaç için kullanılır (Naval Air Systems Command, 2016):

- Analiz gerektirebilecek hata türlerine öncelik vermek
- Emniyet dışı olan koşullu görevler için ihtiyaç ve sıklığı belirlemek
- Arıza Bulma görevlerinin gerekliliğini ve sıklığını belirlemek
- Alternatif başarısızlık yönetimi stratejilerinin görece etkinliğini değerlendirmek

2.4. Banyo Eğrisi

Banyo eğrisi (Şekil 2.2) üç periyottan oluşur: Azalan arıza oranına sahip olan yeni doğan ölüm periyodu, ardından arıza oranının nispeten sabit olduğu ile normal ömür süresi (faydalı ömür olarak da bilinir) periyodu ve bu periyodun devamında ortaya çıkan, arıza oranının hızlı bir şekilde arttığı yıpranma bölgesidir (Wilkins, 2018). Çoğunlukla bu kavram elektronik cihazlarla alakalı olarak bilinmektedir. Elektronik bir ürün satın alırken, çoğu arıza, ürünün erken kullanımı safhasında ortaya çıkar. Elektronik ürünler bu tehlikeli periyodu (yeni doğan ölüm bölgesi) geçtiğinde, genellikle uzun bir süre normal bir şekilde çalışabilmektedir. Bu fikir, elektronik ürünlerin tüketiciye gönderilmeden önce üreticisi tarafından belli bir süre teste (yanma) tutulmasının gerekliliğini ortaya koyar. Uzun bir süre devam eden sabit arıza oranı sahip dönemden sonra, bazı bileşenler ve sistemler sonunda arıza oranının keskin bir şekilde arttığı bir noktaya ulaşacaktır. (Martin, 2006).



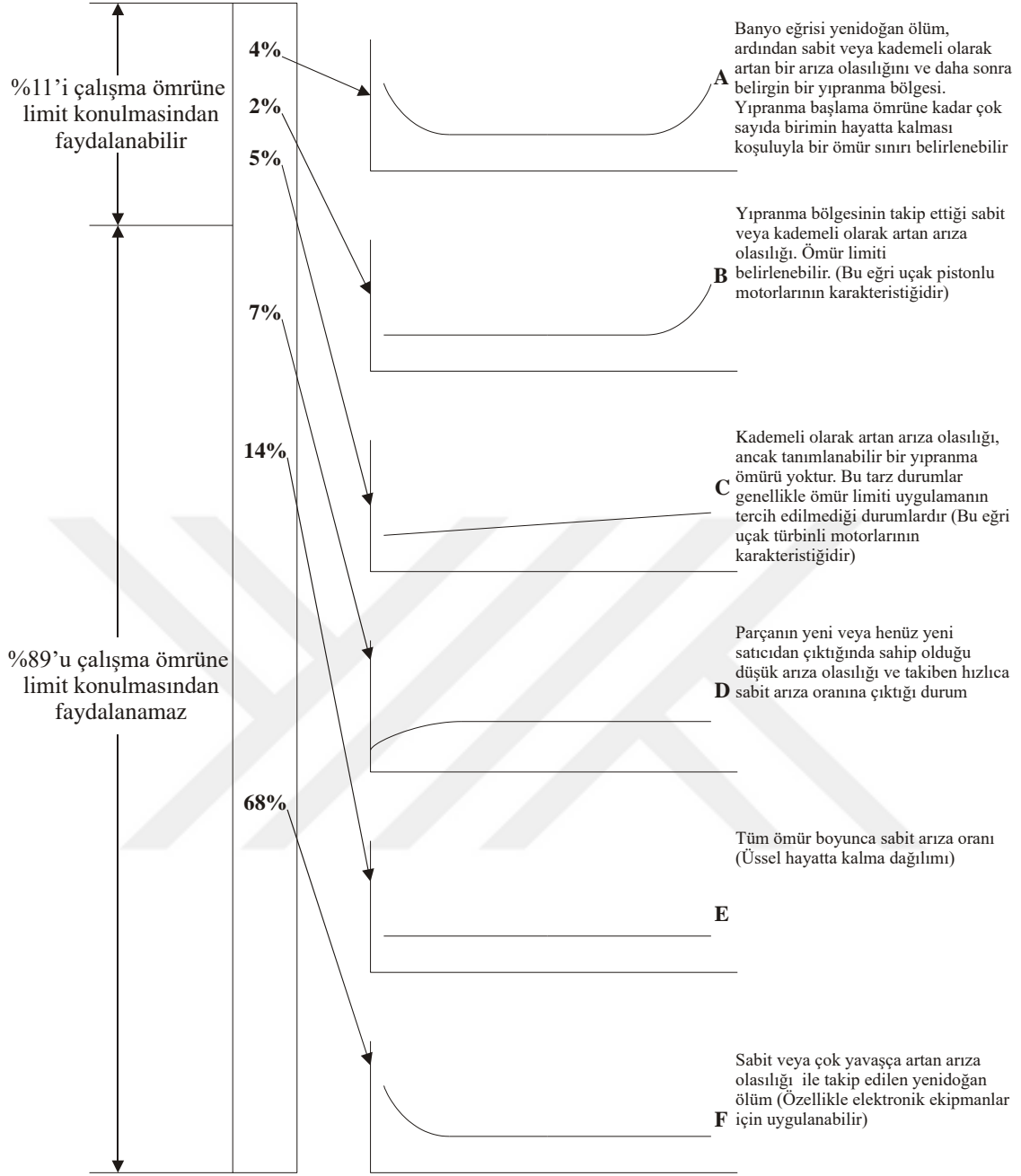
Şekil 2.2. Banyo eğrisi (Wilkins, 2018)

Ekipmanların banyo eğrisindeki yaşam periyotlarına göre arıza nedenleri ve alınabilecek önlemler Çizelge 2.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Banyo eğrisi fazları arıza nedenleri ve alınabilecek önlemler (Ebeling, 2000)

Bölge	Karakterize	Neden	Önlemler
Yenidoğan Ölüm (Yanma)	AAO (Azalan Arıza Oranı)	Üretim hataları: kaynak kusurları, çatlaklar, kusurlu parçalar, kötü kalite kontrolü, kirlilik, kötü işçilik	Yanma testi Tarama Kalite kontrol Kabul testleri
Faydalı Ömür	SAO (Sabit Arıza Oranı)	Çevre Değişken yükler İnsan hatası Şansa bağlı olarak	Yedeklilik İlave güçlendirme
Yıpranma	YAO (Yükselen Arıza Oranı)	Yorulma Korozyon Yaşlanma Sürtünme Devirsel yükleme	Değer kaybı analizi Önleyici bakım Parçaların değişimi Teknoloji

Bir zamanlar tüm ekipmanların yıpranma karakteristiklerine sahip olduğuna inanılırdı ve ekipman bakım sürelerinin hızlı bir şekilde uzamaya başladığı bu yıllar süresince, United Airlines, yüksek bakım sürelerinin genel güvenilirliği azaltmadığından emin olmak amacıyla uçak parçaları için çok sayıda şartlı olasılık eğrileri geliştirdi. Bu çalışma sonucunda koşullu-olasılık eğrilerinin Şekil 2.3’de gösterilen altı temel dağılımda yayıldığı görülmüştür (Nowlan ve Heap, 1978).



Şekil 2.3. Uçaklarda yapısal olmayan parçalar için ömür-güvenilirlik dağılım eğrileri (Nowlan ve Heap, 1978)

Şekil 2.3'e göre uçak teçhizatının yalnızca yaklaşık% 4'ünde, banyo eğrisi (Bkz. Şekil 2.2) ile doğru bir şekilde karakterize edilebilecek arıza fonksiyonları vardır (Martin, 2006). Daha da önemlisi Nowlan, F. Stanley, and Howard F. Heap. (1978)'e göre, başarısızlık fonksiyonundan ötürü uçak teçhizatının % 89'u çalışma ömrü sınırından yararlanamamaktadır. Bu bulgular, güvenilirlik ile çalışma ömrü arasında her zaman bir bağlantı olduğuna olan inanç ile çelişmektedir. Çalışma ömrü ile güvenilirlik arasında her

zaman bir ilişki olur inancı, bir parçada ne kadar sıklıkla bakım yapılırsa, o oranda arıza olasılığı azalmış olur düşüncesini ortaya çıkarır. Günümüzde bu nadiren doğrudur. Hâkim ömür ile ilişkili baskın bir hata türü yoksa, ömür limitleri karmaşık sistemlerin güvenilirlikleri üzerinde çok az veya hiçbir etki yapmaz. Bunun yanında planlı bakımlar, kararlı olan sistemlerin içerisine yenidoğan ölümlerini getirdiği için genel arıza oranını artırabilirler (Moubray, 1997).

Bu gerçeklerin farkındalığı, bazı organizasyonların tamamen proaktif bakım fikrinden vazgeçmelerine yol açmıştır. Aslında sonuçlarının küçük olacağı düşünülen arızalar için bu yapılabilir. Ancak arıza sonuçları önemli olduğunda, arızaları önlemek veya tahmin etmek veya en azından sonuçlarını azaltmak için bir şeyler yapılmalıdır (Moubray, 1997).

2.5. Weibull Analizi Gelişimi ve Kullanım Amacı

Waloddi Weibull 1937 yılında Weibull dağılımını icat etmiş ve 1951 yılında konu ile ilgili bildirisini teslim etmiştir. Dağılımının geniş bir aralıktaki problemlere uygulanabilir olduğunu öne sürmüştür. Bu tezini, çeliklerin gücünden Britanya Adaları'ndaki yetişkin erkeklere kadar değişen yedi örnekle göstermiştir. Belirtiği fonksiyonun bazen iyi hizmet verebileceğini iddia etmiştir. Her zaman işe yaradığını iddia etmemiştir. Zaman, Waloddi Weibull'un her ikisinde de doğru olduğunu göstermiştir (Abernethy, 2000).

Waloddi'nin yayınladığı bildiriye 1950'lerde tepkiler olumsuzdu ve şüphecilikten tamamen red etmeye doğru değişiklik göstermekteydi. Yine de sahadaki Dorian Smith ve Leonard Johson gibi öncüler, tekniği uygulamış ve geliştirmişlerdir. Amerikan Hava Kuvvetleri, Weibull methodunun değerini kabul etmiş ve 1975 yılına kadar araştırmalarını finaslamaştır (Abernethy, 2000).

Weibull analizi, doğru hata tahminleri sağlamak için hata verilerini kullanan istatistiksel bir tekniktir. Zamanın bir fonksiyonu olarak arıza olasılığını belirlemek için bir yöntem sağlar. Bu da hata türünün meydana gelme sayısının kabul edilemez bir düzeye ulaştığı süreyi tespit ederek zamanlı görev aralıklarını belirlemek için kullanışlıdır (Naval

Air Systems Command, 2016). Weibull yöntemi son derece küçük numunelerle, hatta iki veya üç arıza ile uygulanabilir. Bu özellik havacılık ve uzay emniyet sorunları ile ve küçük numunelerle yapılan geliştirme testlerinde önemlidir. Ancak istatistiksel anlamlılık için daha büyük numunelere ihtiyaç vardır (Abernethy, 2000)

2.6. Güvenilirlik Merkezli Bakım Tanımı

GMB/RCM terimi, ekipmanın doğal güvenilirlik yeteneklerini gerçekleştirmek üzere tasarlanmış planlı bir bakım programını ifade eder (Nowlan ve Heap, 1978). Moubrey (1997)'e göre ise GMB/RCM, herhangi bir fiziksel varlığın, kendisine tanımlı operasyon profilinde, kullanıcıların kendisinden yapmasını istediği herşeyi yapmaya devam etmesinden emin olan için yapılması gerekenleri belirlemede kullanılan bir süreçtir. Smith (1993) GMB/RCM için dört temel unsur tanımlamaktadır:

GMB/RCM'in ana amacı sistemin işlevselliğini korumaktır (Smith, 1993). GMB/RCM, amacı arızanın kendisini önlemek olan daha önceki önleyici bakım felsefelerinin aksine, arızanın her zaman önlenemez olmadığını ve bazı durumlarda arızayı önlemeye çalışmanın aslında sistemin daha erken arızalanmasına sebep olduğunu belirtir. Örnek olarak Şekil 2.3'deki A ve F eğrilerinin düz olduğu bölgede olan bir ekipmanda yapılacak olan ağır bakım ekipmanı yenidoğan ölüm bölgesine götürebilir. Ayrıca, her sistem veya bileşen aynı derecede önemli değildir, bu nedenle önleyici bakım programı, arıza yaptığında sistemin işlevi üzerinde çok az etkisi olan ekipmanlardaki işlev kaybını veya arızanın oluşumunu önlemek için kaynak ayrılmamalıdır (Martin, 2006).

GMB/RCM'in ana amacı sistem işlevini korumak olduğundan, işlev kaybı veya işlevsel hata var ise bir sonraki düşünülmesi gereken kısımlardır (Smith, 1993). İşlevsel arızanın düşünülmesi, sistem içerisindeki gerçek ekipmana bakılması ve bu ekipmanın gerekli işlevini yerine getirememesinin olası tüm sebepleri için analiz edilmesi anlamına gelir (Martin, 2006). Sadece işlevler (maddenin yapması gereken) tam olarak tanımlandığında, işlevsel hatalar ve bunlara neden olan çok özel hata türlerini tanımlanabilir ve sadece hata türleri ve etkileri anlaşıldığında, her bir hata türünün sonuçlarından kaçınabilmek için etkili bir yönetim politikası oluşturulabilir (Garza, 2002).

Öncelikli amacın sistem işlevini korumak olduğu GMB/RCM sürecinde, sistematik bir şekilde, bütçeleri ve kaynakları tahsis etmede hangi sıralamayı veya önceliği atamak istediğimize karar verme şansına sahibiz. Böylece, arıza türlerinin önemliliklerini önceliklendirebilmek isteriz (Smith, 1993). Bu özellik, GMB/RCM analizinde verimlilik faktörünü ortaya çıkarmaktadır. Her bir bileşenin veya sistemin hata yapma yollarını önceliklendirerek veya önem durumuna göre sıralamaya sokarak sistem işlevselliği üzerinde en çok etki yaratanları ele alabilir ve sistem üzerinde çok az etkisi olan veya hiç etkisi olmayan arıza veya bozulmalar için harcanan zamanı ve enerjiyi azaltabiliriz (Martin, 2006). Herhangi bir ekipman veya sistemdeki olası arıza türlerinden her birinin emniyet, operasyonlar, çevre veya maliyetler üzerinde potansiyel olarak farklı bir etkisi vardır. Olayları ele almak için dikkat edilmesi gereken hususları belirleyen bu etki veya sonuçtur. Buda, bir arıza sonucu emniyet, operasyonlar, çevre veya maliyetleri olumsuz yönde etkilemediğinde, herhangi bir planlı önleyici bakımın yapılmasına gerek olmadığı durum olan nihai bakım yönetimi sonucuna götürür (Garza, 2002).

Her bir potansiyel önleyici bakım görevi uygulanabilir ve etkin olarak değerlendirilmelidir (Smith, 1993). Uygulanabilirlik, bakım görevi gerçekleştirilirse, önleyici bakımın yapılmasındaki üç nedenden (arızayı önlemek veya azaltmak, bir hata başlangıcını algılamak veya gizli bir hatayı bulmak) birisinin başarılması anlamına gelir. Etkinlik ise kaynakları bu bakım görevini yapmak için harcamayı arzu ettiğimiz anlamına gelir (Martin, 2006). Önleyici bakım, sadece olmak üzere olan bir işlevsel hatanın veya gizli bir hatanın belirtisinin niceliksel bir göstergesi olduğunda etkili olabilir. Yani, hataya karşı düşük direnç tespit edilebilirse (potansiyel hata) ve potansiyel hata ile işlevsel hata arasında tutarlı veya öngörülebilir bir aralık varsa, önleyici bakım uygulanabilir. Önleyici bakım genellikle yıpranma bölgesini takip eden ürünlerde etkindir (Department of the Army, 2006). Elektronikler banyo eğrisinin faydalı ömür bölgesinde, yani rastgele meydana gelen hata dağılımına sahip olduklarından önleyici bakım uygulamak etkin bir çözüm sağlamaz ancak elektroniklerin aksine mekanik bileşenler kısıtlı faydalı ömür zamanına sahiptirler ve bu ömür sonunda yıpranmaya başlarlar.

2.7. Güvenilirlik Merkezli Bakım Gelişimi

GMB/RCM kökeni havayolu endüstrisine dayanmaktadır. 1950 yılının sonlarına doğru, bu endüstrideki bakım masrafları dayanılmaz hale gelen bir noktaya yükselmiştir. Bu arada, Federal Havacılık Ajansı (AFHM/FAA), belirli motor tiplerinin arıza oranının, planlanan sabit aralık yenilemelerinin sıklığını veya içeriğini değiştirerek kontrol edilemeyeceğini tecrübe ederek öğrenmiştir. Bu iki faktörün bir sonucu olarak havayolu endüstrisinde uygulanmakta olan önleyici bakımın etkinliğini incelemek amacıyla 1960 yılında havayolları ve hava aracı üreticilerinin temsilcilerinden oluşan bir görev gücü kurulmuştur. Bu görev gücü önleyici bakım programını geliştirmek için temel bir teknik geliştirmiştir. Daha sonra, önleyici bakımın gelişimini yönetmek için bir Bakım Yönlendirme Grubu (BYG/MSG) oluşturulmuştur (Department of the Army, 2006).

Bu grup incelemelerinin sonucunda havayolu ve uçak şirketlerine kendi bakım görevlerinde kullanılmak üzere kılavuz kaynaklar hazırlamıştır. Bu kılavuzdaki bilgiler Boeing 747 uçağının bakım programının geliştirmesinde kullanılan BYG/MSG-1'in oluşmasını sağlamıştır. BYG/MSG-1, GMB/RCM konseptinde uygulanan ilk bakım programıdır. BYG/MSG-1'in bir sonraki revizyonu 1970'te ortaya çıkan BYG/MSG-2 olmuştur. BYG/MSG-2 Lockheed L-1011 ve Douglas DC-10 uçaklarının bakım programlarının geliştirilmesinde kullanılmıştır (Nowlan ve Heap, 1978). 1972'de Avrupa havacılık endüstrileri BYG/MSG-2'de yapısal ve zon analizi bakımından iyileştirilmiş Avrupa Bakım Sistemi Kılavuzu (ABSK/EMSG) yayınlamıştır. ABSK/EMSG, Concorde ve A300 Airbus'ta kullanıldı (Department of the Army, 2006).

Havayollarının ve AFHM/FAA'nın geleneksel bakım yaklaşımıyla yaşadığı sorunlar askeri alandada problem olmaktaydı. Her ne kadar kazanç hem havayollarında hem de askeri alanda ortak bir amaç değilse de, maliyetleri kontrol altına almak ve uçakları hazır olmasını maksimize etmek ortaktı (Department of the Army, 2006). 1974'te, Amerikan Savunma Bakanlığı United Airlines'tan sivil havacılık endüstrisinde kullandıkları bakım süreci hakkında detay bir rapor hazırlamalarını istemiştir. Sonuçta Nowlan ve Heap, (1978) tarafında hazırlana bu rapora Reliability-Centered Maintenance adı verilmiştir. Nowlan ve Heap raporu, 1980 yılında yayınlanan ve 1988 ile 1993 yıllarında revize edilen MSG-3'ün temelini oluşturmuştur (Moubray, 1997).

2.8. Güvenilirlik Merkezli Bakım Temelleri

Nowlan ve Heap (1978) raporlarında GMB/RCM'in temeli olarak aşağıdaki üç kesin soruyu belirlemiştir:

- Arıza nasıl oluşur?
- Oluşan arızanın sonuçları nedir?
- Önleyici bakım bu arıza ile ilgili iyileştirici ne yapabilir?

Yukarıda belirtilen üç temel soru tekrar değerlendirilmiş ve günümüzde GMB/RCM yapısında kullanılan 7 temel soruya dönüştürülmüştür. Moubray (1997) bu soruları aşağıdaki gibi tanımlamıştır:

1. Varlığın mevcut operasyonel bağlamındaki işlevleri ve ilişkili performans standartları nelerdir (İşlevler)?
2. Hangi yollarla işlevlerini yerine getirmekte başarısız olur (İşlevsel arızalar)?
3. İşlevsel arızaların oluşmasının nedenleri nedir (Hata türleri)?
4. Her bir işlevsel hata meydana geldiğinde ne olur (Hatanın sonuçları/etkisi)?
5. Her bir işlevsel hata ne kadar kritiktir (Hatanın kritikliği)?
6. Her bir işlevsel hatayı tahmin etmek veya önlemek için ne yapılabilir (Kestirimci bakım görevleri veya bakım aralıkları)?
7. Uygun bir proaktif görev bulunamazsa ne yapılmalıdır (Varsayılan eylemler) ?

Bir sistemin veya bileşenin işlevlerini yerine getiremediğini belirlemek, Hata Türleri, Etkileri ve Kritik Analizi (HTEKA/FMECA) adı verilen süreçteki ilk adımdır. Aslında, birden beşe kadar olan sorular (İşlevi nedir? İşlevsel hatalar nedir? Her bir işlevsel hataya neden olan nedir? Her bir işlevsel hatanın etkisi nedir? Her bir işlevsel hata ne kadar kritiktir?) HTEKA/FMECA analizi yapılarak cevaplanır (Martin, 2006).

HTEKA/FMECA süreci, bir bileşenin işlevlerini, işlevsel hatalarını, hata türlerini, hata etkilerini ve bileşenin arızası durumundaki kritikliğini tanımlar ve belgeler. İşlevsel hataların emniyet, çevre, operasyon ve ekonomi açısından önemini belirlemek için de kullanılır. Ayrıca, her bir hatanın etkisinin ciddiyetini, belirlenen şiddet sınıflandırma kıstaslarına göre sınıflandırır ve hata oranı bilgisini sağlar (Naval Air Systems Command, 2016).

2.8.1. İşlev

İşlev, istenen bir performans standardı tarafından tarif edildiği gibi bir ürünün amaçlanan amacıdır (Naval Air Systems Command, 2016). Herhangi bir fiziki varlığın, kullanıcının mevcut çalışma profilinde yapmasını istediği her şeyi yapmaya devam etmesini sağlamak için ne yapılması gerektiğini belirlemeden önce iki şeyi yapmak gerekir (Moubray, 1997):

1. Kullanıcılarının varlıktan ne yapmasını istediğini belirlemek
2. Varlığın kullanıcılarının kendisinden yapmasını istediklerini yapabilecek kapasiteye sahip olduğundan emin olmak

GMB/RCM sürecinin ilk adımının uygun içerikte, beklentileri karşılayan işlevlerin tanımlanması olmasının tam olarak sebebi budur. Kullanıcı tarafındaki beklenti birincil ve ikincil işlevler olmak üzere iki kategoride incelenebilir. Birincil işlevler hız, çıktı, kapasite, kalite veya müşteri hizmetleri gibi faktörleri içerecektir. İkincil işlevler ise emniyet, kontrol, konfor, verimlilik, çevresel uyum ve görünüm içerebilir. Kullanıcılar bu fonksiyonları herkesten daha iyi bilirler, bu sebeple GMB/RCM sürecinin başından itibaren bir parçası olması çok önemlidir. Doğru yapıldığında bu süreç sadece tek başına tüm GMB/RCM analiz sürecinin üçte birlik zamanını doldurur (Moubray, 1997).

2.8.2. İşlevsel hatalar

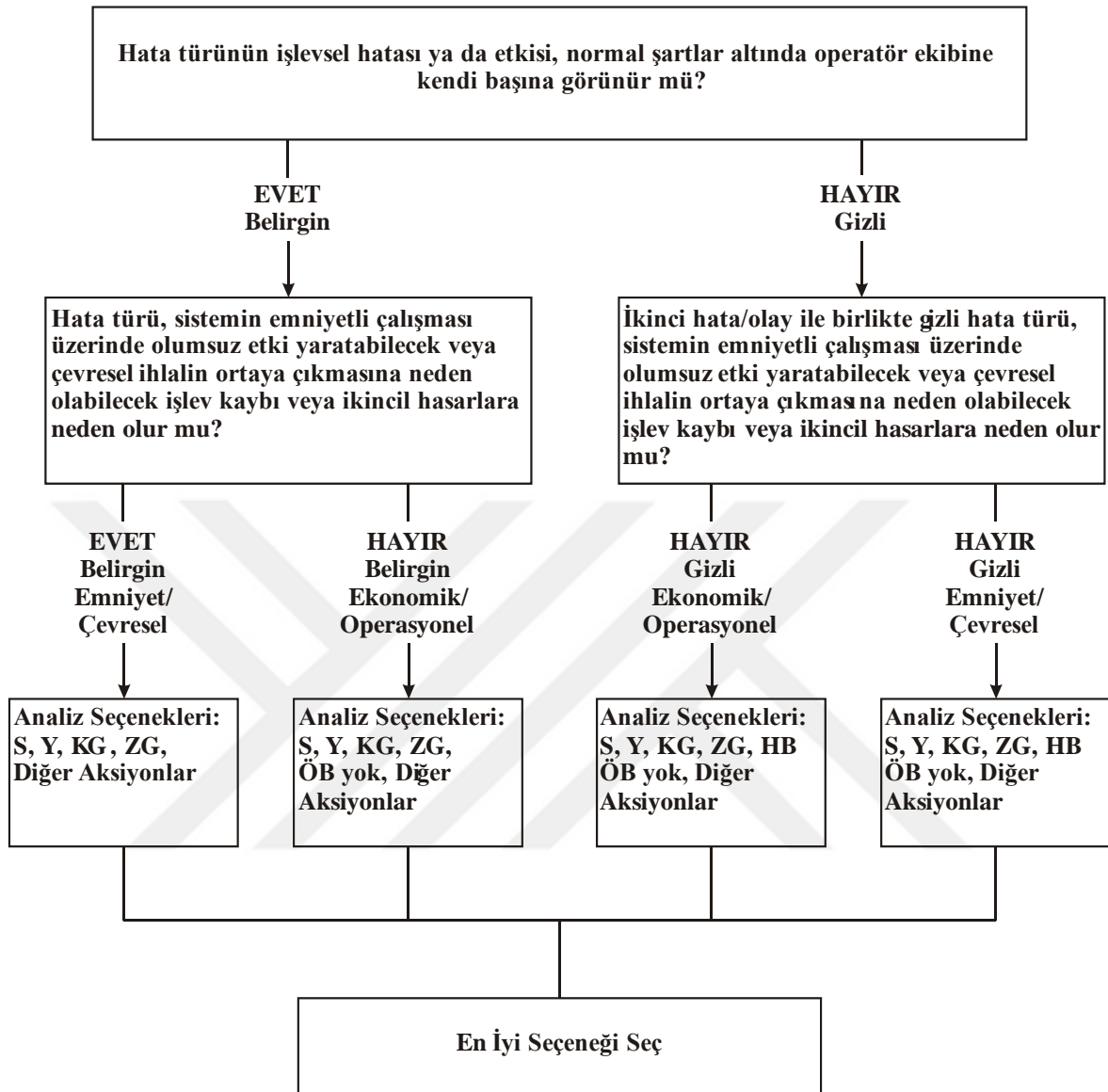
İkinci soruda, işlevsel hataların belirlenmesi gerekmektedir. İşlevsel bir hata, bir bileşenin belirlenen limitler dahilinde spesifik bir işlevi yerine getirememesidir. İşlevsel bir hata, mutlaka işlevin tamamen kaybı olmayabilir. İşlevsel hatalar, ya performans kayıpları ya da sistemin tamamen kaybedilmesiyle sonuçlanırlar (Naval Air Systems Command, 2016).

2.8.3. Hata türü

Her bir işlevsel hata tespit edildikten sonra, bir sonraki adım, başarısız olan her duruma neden olması muhtemel olan tüm olayları tanımlamaya çalışmaktır. Bu olaylar hata türleri olarak bilinir (Moubrey, 1997). Daha sonrasında her bir hata türünün etkisi incelenir. Hatanın etkilerinin belirlenmesi dördüncü sorunun cevabı olur. Hatanın etkileri, GMB/RCM analiz sürecinde uygun önleyici bakım görevleri geliştirilebilmesi için, hatanın sonuçlarını belirlemede kullanılır. Arızanın sonuçları, personel emniyetini, çevreyi, görevin başarısını ve maliyetleri olumsuz etkilemektedir. Arızanın sonuçlarını belirlemek için, analist, bir başarısızlık türünün ortaya çıkmasının son öge üzerinde yarattığı etkiyi tanımlamalıdır (Naval Air Systems Command, 2016).

2.8.4. Hatanın sonuçları

Hataların sonuç değerlendirilmesi iki aşamalı bir süreçtir. Birincisi, işlevsel hatalar gizli ve belirgin hatalar olmak üzere iki kategoriye ayrılır. İkinci aşama olarak, hatanın etkileri emniyet veya çevresel uygunluğu etkileyenleri belirlemek için değerlendirilir (Society of Automotive Engineers, 1999). Bu amaçla Naval Air Systems Command (2016) tarafından hazırlanan GMB/RCM karar mantığı diyagramı (Şekil 2.4) kullanılabilir.



Şekil 2.4. GMB/RCM karar mantığı diyagramı (Naval Air Systems Command, 2016)

GMB/RCM karar mantığı diyagramı, işlevsel hatalarının sonuçlarını kabul etmek, ortadan kaldırmak veya azaltmak için uygun başarısızlık yönetimi stratejisini belirlemek için kullanılır. Her işlevsel hata, bir veya daha fazla hata türüne sahiptir ve bunlardan herhangi birinin meydana gelmesi durumu işlevin kaybına yol açacaktır. Bu hata türlerinin her biri, bir önleyici bakım görevinin geliştirilip geliştirilmeyeceğini veya başka bir eylemin gerekli olup olmadığını belirlemek için GMB/RCM karar mantığı aracılığıyla analiz edilmelidir. GMB/RCM karar mantığındaki aşağıda belirtilen üç soru, bir önleyici bakım görevinin gerekli veya istenen olup olmadığını belirlemek için belirli bir hata

türünün değerlendirilmesinde hangi dalın kullanılacağını belirler (Naval Air Systems Command, 2016):

1. İşlevsel hata veya hata türünün etkisi, tek başına normal görevleri yerine getirirken operatör için belirgin midir?
2. Hata türünün ortaya çıkması, çalışma güvenliği üzerinde olumsuz etki yaratabilecek veya çevresel bir ihlale yol açabilecek bir işlevsel kayba veya ikincil hasara neden olur mu?
3. İkinci bir hata veya olay ile birlikte gizli hata türünün ortaya çıkması, sistemin emniyeti üzerinde olumsuz etki yaratabilecek veya çevresel bir ihlale yol açabilecek bir işlev kaybına veya ikincil hasara neden olur mu?

İşlevsel bir hatanın belirgin olarak sınıflandırılması için, normal şartlar altında, kendi başına operatörün kendisi için belirgin olması gerekir. Bu, işlevsel hatayı belirgin kılmak için başka bir hata veya olayın gerçekleşmesi gerekmediği ve normal faaliyetlerin parçası olanlar dışında özel eylemler veya özel koşulların gerçekleşmesi gerekmediği anlamına gelir. Eğer operatör bir hatayı tespit etmek için normal prosedürlerin kapsamında olmayan bir şey yapması gerekiyorsa (örneğin, ekipman çalışması sırasında panellerin sökülmesi), hata gizli olarak sınıflandırılır (Naval Air Systems Command, 2016).

İşlevsel hatalar gizli ve belirgin kategorilerine ayrıldıktan sonra, emniyet veya çevresel uygunluğu etkileyen hata türleri belirlenir. Hatalar, birisini öldürmek ya da ağır yaralamak için kabul edilemez bir olasılığa sahip olmaları durumunda, emniyet kapsamında değerlendirilirler. Hatalar, bir çevre standardı ya da yönetmeliğinin ihlal edilmesine neden olacak kabul edilemez bir olasılığa sahip olmaları halinde ise çevresel uygunluğu etkilediği düşünülmektedir. Emniyet ve çevre uyumunu etkilemeyen belirgin ve gizli hatalar, çeşitli seçeneklerin maliyetlerini ve operasyonel etkilerini karşılaştırarak en iyi hata yönetimi stratejisini belirleyebilmek için analiz yapılmasını gerektirirler (Naval Air Systems Command, 2016).

2.8.5. Hatayı önlemek veya tahmin etmek

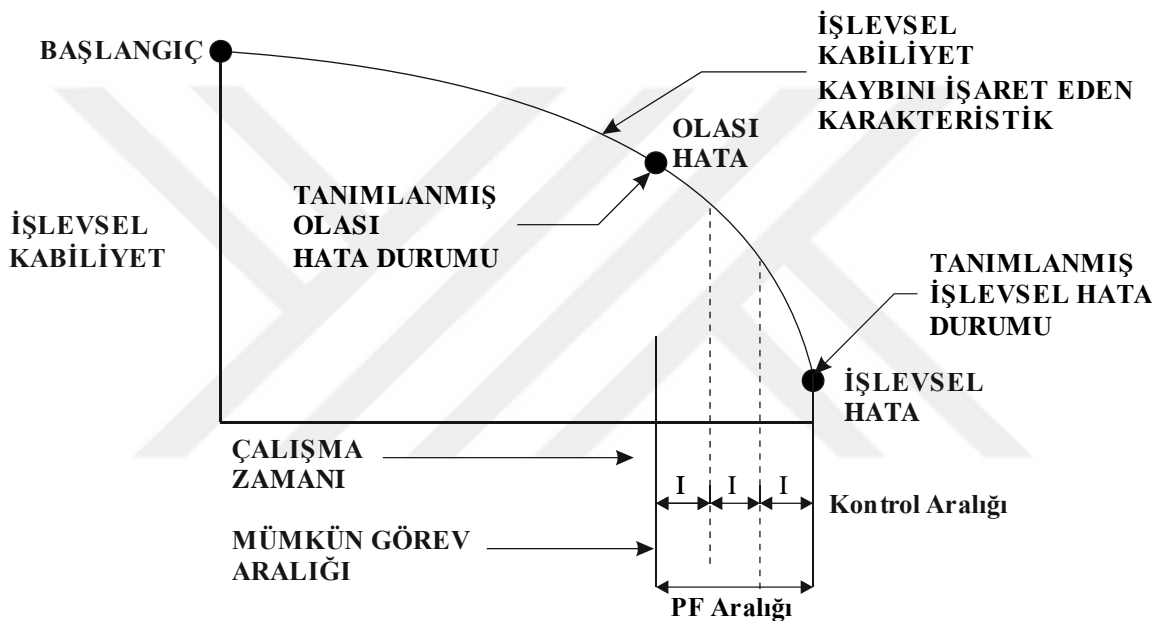
Bu aşamadan sonra GMB/RCM analizi altıncı soru olan, “Her bir işlevsel hatayı tahmin etmek veya önlemek için ne yapılabilir?” sorusu ile devam eder. Bu proses görev değerlendirme olarak adlandırılır.

Görev değerlendirme, bir hata türünün ortaya çıkmasını engellemek için çeşitli seçeneklerden hangisinin daha uygun olduğunu belirlemek için veya bu hata türünün ortaya çıkmasının önlenemediği durumlarda, hatanın sonuçlarının, program tarafından kabul edilebilecek bir seviyeye indirilmesi yapılan bir süreçtir (Naval Air Systems Command, 2016). Bu kapsamda değerlendirilebilecek bakım görevlerini Naval Air Systems Command (2016) şu şekilde belirlemiştir:

- Servis görevleri
- Yağlama görevleri
- Koşullu görev
- Zamanlı görev
- Hata bulma görevi
- Önleyici bakım görevi ihtiyaç olmadığı durumlar (Arıza olana kadar çalışma)

Karmaşık donanımlar, başarılı bir şekilde çalışmayı sürdürmek için çok sayıda programlanmış servis ve yağlama görevine ihtiyaç duyarlar (Nowlan ve Heap, 1978). Servis görevleri, normalde ne sıklıkla yapılması gerektiğini belirlemek için kapsamlı bir analiz gerektirmez. Bunlar genellikle kullanım, çevre ve rahatlık göz önünde bulundurularak üreticinin tavsiyelerine veya operasyonel ihtiyaçlarına göre gerçekleştirilirler. Yağlama görevi ise çalışması sırasında yağlamaya ihtiyaç duyan tasarıma sahip bileşenler için uygulanan bir bakım görevidir. Bir yağlama görevi, yalnızca kullanılacak olan yağlayıcı kalıcı olmayan bir tipse ve periyodik olarak tekrar uygulanması gerektiğinde uygundur. Yağlama görevleri, yağlayıcının ömrüne göre programlanır. Servis bakım görevlerine benzer şekilde, yağlama görevleri genellikle gerçekleştirilmesi ucuzdur ve bu nedenle ne sıklıkla yapılması gerektiğini belirlemek için kapsamlı analizler genellikle garanti edilmez (Naval Air Systems Command, 2016)

Koşullu görev, olası bir hata durumunu algılamak ve işlevsel hata meydana gelmeden önce düzeltilmesini imkân verebilmesi için tasarlanmış periyodik veya süreklilik arz eden kontroller olarak tanımlanır. Olası bir hata, işlevsel bir hatanın meydana geleceğini belirten tanımlanabilir ve saptanabilir bir durumdur (Naval Air Systems Command, 2016). Eğer bir bileşenin arıza yapmak üzere olduğuna dair bulgular elde edilebilirse, bu parçanın tamamen arızalanması ve/veya bunun getireceği sonuçlardan kaçınılabilecek önleyici aksiyonlar alınabilir (Moubray, 1997). Bu durum Şekil 2.5'teki P-F eğrisi ile açıklanmaktadır.



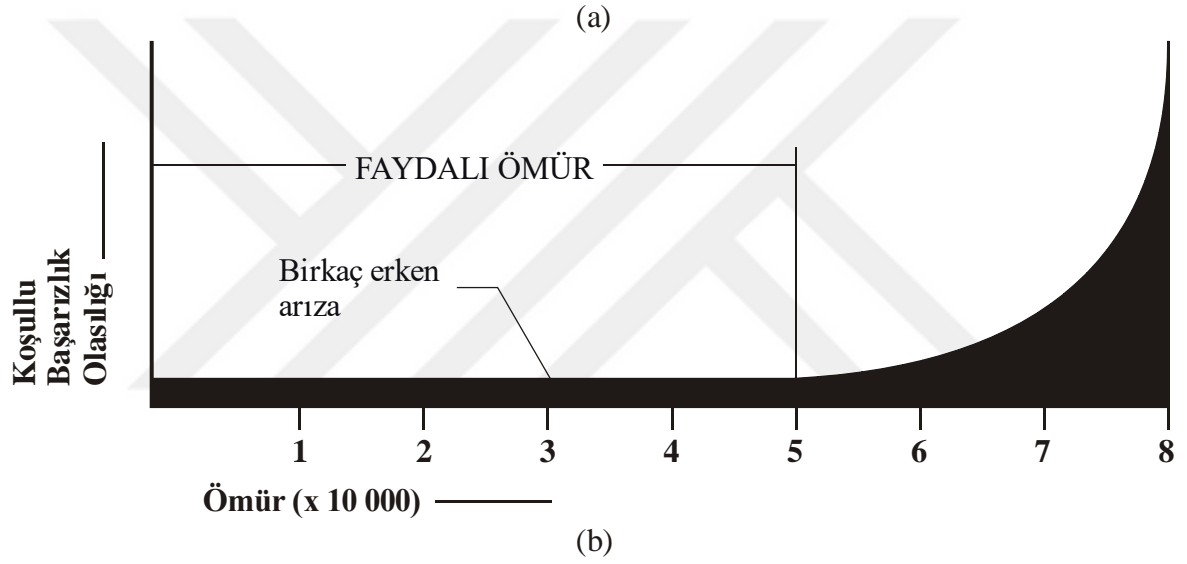
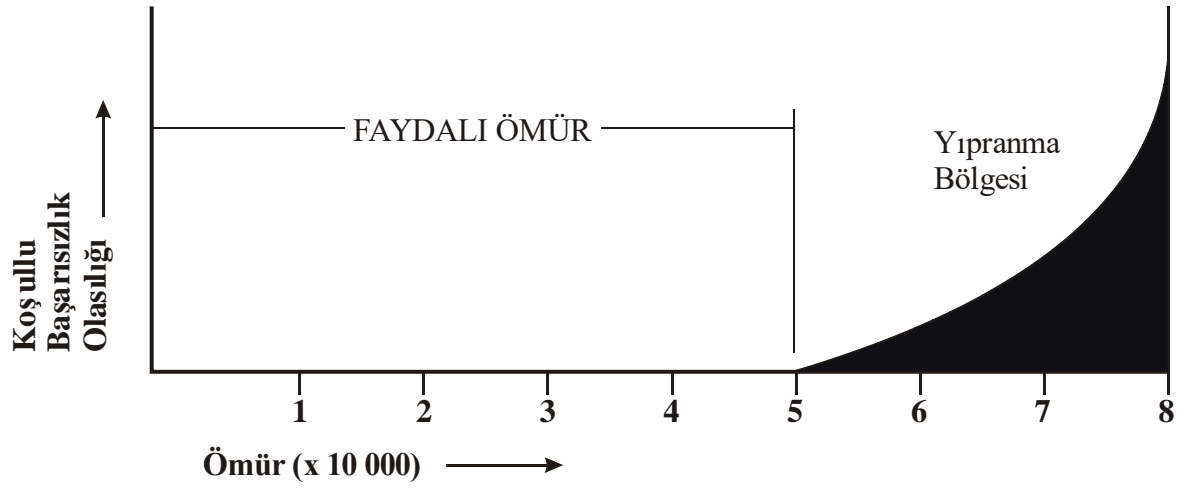
Şekil 2.5. P-F eğrisi (Naval Air Systems Command, 2016)

P-F eğrisi bir hatanın nasıl başladığını, tespit edilebileceği noktaya (P noktası) kadar nasıl bozulduğunu ve daha sonra tespit edilip düzeltilmediğinde, bozulmaya devam ettiğini, genellikle de işlevsel başarısızlık noktasına (F noktası) ulaşana kadar hızlanan bir hızda devam ettiğini gösterir. Olası bir hatanın kendisine ek olarak, potansiyel bir hatanın meydana geldiği nokta arasında bir başka deyişle, tespit edilebilir hale geldiği noktadan işlevsel bir hataya dönüştüğü nokta arasında geçen zaman miktarının (veya stres döngü sayısını) dikkate alınması gerekir. Bu aralık P-F aralığı olarak adlandırılır. P-F aralıkları, koşullu görevlerin ne sıklıkla yapılması gerektiğini belirtir. İşlevsel bir hata meydana gelmeden önce olası hata tespit edilmek isteniliyorsa, kontroller arasındaki aralık P-F aralığından daha az olmalıdır (Moubray, 1997).

Zamanlı görev, bir bileşendeki işlevsel hatayı önlemek için bileşenin belirli bir maksimum ömür sınırında planlı olarak sökülmesi veya onarıcı aksiyonların alınmasıdır . Bir zamanlı görev, bir hata türü, hata direncinde algılanabilir bir azalma gösteren özellikler göstermediğinde veya bir koşullu göreve izin verecek kadar uzun bir P-F aralığına sahip olmadığında uygulanması daha doğru olabilir. Bir hata türünün oluşmasını engelleyebilecek bir zaman görevini geliştirmek için üç soruya değinilmelidir (Naval Air Systems Command, 2016):

- Tanımlanabilir yıpranma ömrü nedir?
- Yıpranma süresine kadar arıza yapmadan kalan parçaların yüzdesi nedir?
- Hata olasılığını kabul edilebilir bir seviyeye indiren azaltan bir görev aralığı geliştirilebilir mi?

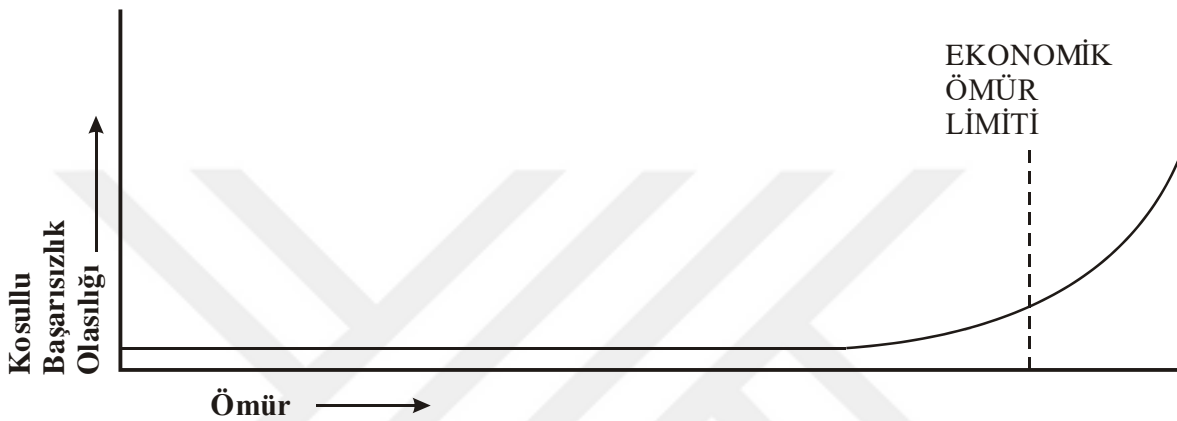
Yıpranma, ömür ile birlikte hatanın koşullu olasılığındaki artış olarak tanımlanmaktadır. Erken arızaların olmadığı durum için bu eğri Şekil 2.6a'daki gibidir. Yararlı ömür, koşullu hata olasılığında hızlı bir artış olduğu ömrü tanımlar. Erken arızaların sonucu olarak koşullu olasılık eğrisi Şekil 2.6b'deki hali alır. Bu eğri Şekil 2.3'teki B eğrisi ile aynıdır. İdeal olarak, bir ürün kullanıma sunulmadan önce emniyet ömür sınırları belirlenmelidir. Ömür değerinin gerçekte ne olacağını belirlemek için simüle edilmiş bir çalışma ortamında test edilmeli ve bu testlerde belirlenen ömrün ölçülü bir şekilde bölünmesi ile ortaya çıkan değer emniyetli ömür sınırı olarak kullanılmalıdır. Bu durum Şekil 2.6c'de gösterilmektedir. Test ortamı ile çalışma ortamı arasında asla mükemmel bir ilişki yoktur. Uzun ömre sahip parçaları arıza olana kadar test ortamında çalıştırmak maliyetlidir ve açık bir şekilde uzun zaman almaktadır, bu yüzden sağ kalım eğrilerinin güvenle çizilebilmesi için yeterli test verisi yoktur. Bu durumda emniyetli ömür sınırları, ortalamanın üç ya da dört gibi büyük bir rastgele faktör tarafından bölünmesi ile elde edilir (Moubray, 1997).



(c)

Şekil 2.6. Hatanın şartlı olasılığı: a) Faydalı ömür b) Erken arızaların etkisi c) Emniyetli Ömür Limiti (Moubrey, 1997)

Ekonomik ömür limiti, hata türleri sadece ekonomik/operasyonel sonuçları olan ürünler için kullanılır (Naval Air Systems Command, 2016). Emniyet ömür limiti hedefi, herhangi bir hatadan kaçınmak olsa da, ekonomik ömür limitinin tek gerekçesi maliyet etkinliğidir. Bu sebeple, çeşitli ömür sınırlarında planlı olarak yapılacak değişimlerin toplam sayısının maliyet-fayda oranını nasıl etkileyeceğini tahmin etmek için arıza oranı bilinmelidir (Nowlan ve Heap, 1978). Bu durum Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Ekonomik ömür limitleri (Naval Air Systems Command, 2016)

Zamanlı görev aralıklarını belirlemek için Naval Air Systems Command (2016) tarafından aşağıdaki methotların kullanılabileceği belirtilmektedir:

- Weibull analizi
- Yorulma analizi veya testler
- Üreticinin önerdiği çalışma ömrü
- Mevcutta var olan bakım görevleri
- Benzer çalışma görünüşüne sahip sistemlerden alınabilecek veriler
- Elde bulunan veriye göre yapılan mühendislik yaklaşımları
- Operatör ve bakım personellerinden gelebilecek girdiler.

Bir öge, çalışma ekibine belirgin olmayacak bir işlevsel hataya maruz kaldığında, bu işlevin kullanılabilirliğini korumak için zamanlanmış bir görev gereklidir. Her ne kadar gizli işlevin tanımlanmasındaki hatalar anında bir karşılık vermese de, tespit edilmeyen arızalar olası birçoklu hata durumunun ortaya çıkmasına neden olur. Bu nedenle, başka

türde bir bakım görevi uygulanabilir ve etkili değilse, gizli işlev öğeleri için planlı kontrol olan hata bulma görevleri atanır. Hata bulma görevinin amacı, gizli işlevin yeterli hazır olma değerini sahip olduğundan emin olabilmektir (Nowlan ve Heap, 1978). Moubray (1997)'in bu bakım görevi ile ilgili verdiği örnekler aşağıdaki gibidir:

- Yağlama yağı basıncı belirli bir seviyenin altına düştüğünde bir makineyi kapatmak için bir basınç şalteri tasarlanabilir. Mümkün olan yerlerde bunun gibi anahtarlar, yağ basıncını gereken seviyeye düşürerek, makinenin kapanıp kapanmadığı kontrol edilmelidir.
- Bir yangın algılama devresinde, duman detektörüne duman üfleyerek yangın alarm sesinin çaldığı kontrol edilmelidir.

Emniyet/çevre uyumu söz konusu değilse, önleyici bakımı gerçekleştirmemek, işlevsel hata ile baş etmenin en uygun seçeneği olabilir. Bu durumda, öğenin arızalanıncaya kadar çalışmaya devam etmesine izin verilir (Naval Air Systems Command, 2016). Moubray (1997) önleyici bakım uygulamasının olmamasının aşağıda belirtilen durumlardan birisi olduğundan geçerli olabileceğini söylemektedir:

- Gizli bir hata için uygun bir zamanlı görev bulunamadığı ve ilişkili çoklu hataların emniyet veya çevresel sonuçlarının olmadığı durumlarda
- Operasyonel veya operasyonel olmayan sonuçlara sahip olan hatalar için uygun maliyetli bir önleyici görev bulunamadığında

Görevler seçildikten sonra, gerçekleştirilecekleri bir sıklık veya aralık atanmalıdır. Yeni sistemler için bu sıklık değeri, tasarım mühendisliği verilerine veya Weibull eğrisinin oluşturulması ve uygulanması gibi kabul edilebilir bir arıza oranlarının istatistiksel analizi ile harmanlanmış olan üreticinin kalite kontrol ve pilot test verilerine dayanarak atanır. Hizmet içi sistemler için, belirli bir hata türüne ilişkin veriler için bakım yönetimi bilgi sistemi sorgulanır. Arızalar arasındaki ortalama süre, daha sonra sorguda listelenen bileşenlerin hizmet sürelerine göre hesaplanabilir (Martin, 2006).

Bir inceleme veya bakım aralığını hesaplamak için yeterli verinin bulunmadığı durumu ele almak için bir başka seçenek de ömür araması tavsiye edilmektedir (Martin, 2006). Ömür araması, GMB/RCM analiz kararlarını ve sonuç önerilerini optimize etmek veya doğrulamak için gerçek operasyonel veya test ortamlarından belirli verileri toplamak için kullanılır. Bu süreçleri, prosedürleri ve aralıkları varsayımlara veya muhafazakâr tahminlere dayanarak geliştirilmiş bir önleyici bakım görevini içerebilir. Bir ömür araması görevi geliştirmek, her biri analistlerin bilgilendirilmiş GMB/RCM kararları vermesine izin veren verileri toplamak için gerekli olan birçok yönü içerir. Ömür araması görevi geliştirme, diğer şeylerin yanı sıra şunları içerir (Naval Air Systems Command, 2016):

- Görev tanımı, ilk denetim aralığı, görev aralığı, görev süresi ve örnek miktarını içerecek şekilde tasarlanması
- Verileri toplamak için gereken bakım ve beceri düzeyini belirlemek
- Önerilen ömür bakım görevinin değerli bir çaba olup olmadığını belirlemek için bir maliyet-fayda analizi yapılması. Maliyet fayda analizi, nihai etki temelinde güvenlikle ilgili başarısızlık türleri için geçerli olmayabilir.
- Görevleri belirli organizasyonel etkinliklerde uygulamak için izin alınması
- Analist ve veri toplayıcı arasında iletişim hatları oluşturmak.

2.9. Literatürde Güvenilirlik Merkezli Bakım ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Garza (2002) çalışmasında deniz piyadeleri için geliştirilen Gelişmiş Amfibi Taarruz Aracı (AAAV)'lar, GMB/RCM'in uygulamalarını ve etkilerini incelemiştir. Bu çalışma sonucunda GMB/RCM uygulamasının sadece efektif bir bakım programdan daha fazlası olduğu ve sistemdeki risk, emniyet ve çevresel konular hakkında GMB/RCM uygulamalarına ne kadar erken başlanırsa o kadar daha faydalı olacağı ancak süreçlere başlanmada geç kalırsa bile GMB/RCM' in hala süreçlere katkısının olabileceği değerlendirilmiştir. GMB/RCM'in sadece bakım kavramında ibaret olmadığını, insan faktörü, emniyet ve yazılım tasarımı gibi konulara kadar uzanan bir analiz olduğunu söylemiştir. Son olarak yukarıda yazılan çıktıların gerçekleşebilmesi için ön şartın program liderliklerinden olan yüksek katılım, konusunda uzman çalışanlar, düzenli verilen GMB/RCM eğitimleri ve doğru organizasyonel kurgu ile sağlanabileceğini ortaya koyan bilgiler vermiştir.

Yumbe vd. (2017) çalışmalarında GMB/RCM'in endüstrinin birçok dalında önemli bir metrik olduğunun bilindiği, ancak güç mühendisliğinde hala etkili bir analitik metod olmadığını düşünmüşlerdir. Bu kapsamda GMB/RCM'in güç dağıtım sistemine dâhil edebilecek pratik bir çerçeve çizmişlerdir. Oluşturdukları algoritma üç ana kademedен oluşmaktadır. İlk aşamada analiz için gerekli önkoşullar anlatılmıştır. İkinci aşamada sistem içerisindeki güvenilirlik kritik parçaların tespitinin nasıl yapılabileceği ortaya konmuştur. Daha sonrasında seçilen kritik parçalar için uygun bakım stratejilerine karar verilmiştir. En son aşama olan üçüncü aşamada algoritma durdurularak, seçilen bakım aktivelerinin ortaya çıkardığı teknik ve ekonomik sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Önerilen metodolojinin, dağıtım ağını iyileştirmenin yanında, diğer güç sistem alanlarına eklenebilecek kadar jenerik olduğu söylenmiştir. İsveç, Stockholm'deki birkaç dağıtım sistemi çalışma kapsamında önerilen bu yöntem kullanılarak incelenmiştir.

Aldhubaib ve Salama (2014) çalışmalarında bakım ve parça değişim kararları arasında bağlantının kurulması üzerine bir yaklaşımda bulunmuşlar. Bu yaklaşımda uygun parça değişim zamanlarının belirlenmesinde metotlara dayalı seçim yapılmasını önermektedir. Parça değişiminin maliyet etkinliği hem parça ömrü dolmadan önceki durum hem de parçanın ömrünün bakım görevleri ile arttırıldığı durumlar için incelemişlerdir. Bakım yapmanın etkilerini doğru bir şekilde analiz edebilmek için bakım aktiviteleri verimli olacak şekilde planlanmalıdır. Bu yüzden çalışma içerisinde iyimser planlı bakım aktivitelerini belirleyebilecek, GMB/RCM ve genetik algoritmasına dayalı bir yaklaşımı ortaya koymuştur. Parça değişiminin bakım ve bakım yapılmadan olması durumundaki sonuçları değerlendirilmiştir. Çalışma için güç sisteminin en kritik ekipleri olan güç transformatörleri seçilmiştir.

Luis (2013), çalışmasında, yeni nesil bakım yönetimlerinin, zaman aralıklarına göre bakımdan, risk yaklaşım temelli bakım uygulamalarına doğru değiştiğini belirtmiştir. Risk tabanlı bakım yaklaşımını, bakım yönetiminde uygulamakla tehlikelerin kolaylıkla tespit edilebileceği, risklerin doğru bir şekilde önceliklendirebileceği ve mevcut kaynakların en kritik bölgelere düzgün bir şekilde aktarılmasının sağlanabileceğini söylemiştir. Çin Petrol Servis Şirketinde risk temelli bakım yönetimini anlatan örnek bir süreç geliştirilmiş ve bu yaklaşımdaki bakım yönetiminin, tesisin ürün ömür devir süresince sahip olacağı risklerini azaltması, güvenilirliğini artırması ve de maliyet kayıplarını önlemesi üzerine çalışmıştır.

Ünal (2009), çalışmasında bakım ve GMB/RCM konularında incelemelerde bulunmuş, ilgili kavramlar hakkında bilgiler vermiştir. GMB/RCM analizlerinin nasıl yapılacağı, tarihsel gelişimi gibi konulara değinmiştir. Bu tez kapsamında değinilmeyen, bilgisayar destekli bakım yönetim sistemleri hakkında detaylı bir araştırma yapılmıştır. Uygulama olarak Akçansa Çimento fabrikasındaki bakım uygulamalarından bahsedilmiş ve iyileştirici yönde önerilerde bulunulmuştur.

Fischer vd. (2012), çalışmalarında Vestas V44-600 kW ve V90-2MW olmak üzere iki farklı model rüzgâr türbini üzerinde GMB/RCM konseptini uygulanmıştır. Analizlerinde, arıza sıklıkları ve sonuçları rüzgâr türbinlerinde çok kritik sistemler olan dişli kutusu, jeneratör, elektrik sistemi ve hidrolik sistemleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışmaları bakım stratejisini seçimi ve optimizasyonu için sayısal model sunmakla birlikte, rüzgâr türbini tasarımlarının geliştirilebilmesi için fayda sağlayabilecek saha tecrübelerini sağlamaktadır.

Al Haiany (2016), çalışmasında madencilik sektöründe kullanılacak maden ekipmanlarının sofistیک ve karmaşık olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda maden şirketlerinin otomasyon ve mekanizasyonlaşarak çalışma kabiliyetlerini arttırdığını, bununla iyi geliştirilmiş ve planlanmış bakım stratejilerini oluşturmayı zorunlu kıldığını söylemiştir. Buradan yola çıkarak maden endüstrisinde GMB/RCM uygulamalarının nasıl olabileceği ve hangi alt sistemler için uygulandığında daha çok fayda sağlayabileceğine dair fikirler türetmiştir. Ek olarak başarılı bir GMB/RCM süreci için tecrübeli çalışanların sürece katkıda bulunmaları gerektiğini belirtmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Analizler kapsamında kullanılan TGS/TIT sensör, dirençli termometredir (DT/RTD). DT/RTD tip sensörler içerisinde direnç değeri sıcaklık ile değişen bir rezistör barındırırlar. Bir DT/RTD 'ye sabit bir akım uygulayarak ve direnç boyunca ortaya çıkan voltaj düşüşünü ölçerek DT/RTD direnci hesaplanabilir ve buradan sıcaklık değeri okunabilir. TGS/TIT sensörün sıcaklık ölçüm aralığı -200 ile 850°C arasındadır. Bu tip sensörlerin kullanım alanları özetle aşağıdaki gibidir:

- Endüstriyel üretim tesislerinde malzeme ve ekipman sıcaklıklarının ölçülmesi
- Laboratuarlarda, temiz odalarda ve diğer yerlerde hava sıcaklığının ölçülmesi
- Hava kanalları içindeki sıcaklık ölçümü
- Kaplama banyoları dahil olmak üzere sert veya yüksek basınçlı ortamlarda sıcaklıkların ölçülmesi
- Fırınlr, sobalar ve gıda işleme ekipmanı içindeki sıcaklıkların ölçülmesi

TGS/TIT sensöre ait ideal önleyici bakım aralığının belirlenebilmesi için yapılacak analizler için gerekli veri seti bir İHA motoru üzerinden toplanmıştır. Toplanan veriler Weibull analizinde kullanabilmek amacıyla arıza ve şüpheli olmak üzere iki ayrı grupta sınıflandırılmıştır.

Söz konusu hata türünden arıza yapmayan bir parça şüpheli veya sansürlü birimdir. Bu parça farklı bir hata türüyle arızalanmış veya hiç arıza yapmamış olabilir. Erken şüpheliler ilk arıza zamanında önce çalışması sonlandırılmış parçalardır. Erken şüpheliler, ilk arıza süresinden önce, geç şüpheliler son arızadan sonra çalışması sonlandırılan parçalardır. Son arıza ile ilk arıza arasındaki şüpheliler rastgele veya ilerleyen şüpheliler olarak adlandırılır. Kural olarak şüpheliler karakteristik ömrü arttırır, ancak eğim üzerinde

çok az etkiye sahiptir. Erken şüphelilerin Weibull grafiği üzerinde ihmal edilebilir etkisi vardır. Geç şüphelilerin daha önemli etkileri vardır ve eğimi azaltabilir (Abernethy, 2000).

Abernethy (2000)'nin belirttiği bilgiler referans alınarak, TGS/TIT sensöre ait arızalar ve arıza yapmadığı halde bakım veya başka bir sebeple değişimi yapılan parçalar, bir başka deyişle şüphelilere ait çalışma zamanları tespit edilerek kayıt altına alınmıştır. Bu toplanan veri seti Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. TGS/TIT sensör arıza ve şüpheli listesi

Çalışma Zamanı	Arızalı Parça Sayısı	Şüpheli Parça Sayısı	Çalışma Zamanı	Arızalı Parça Sayısı	Şüpheli Parça Sayısı
9.0	1	1	300.2	-	2
24.8	1	1	314.9	-	2
26.1	1	1	327.4	1	1
26.4	-	2	328.7	-	2
29.8	-	2	332.0	1	1
32.7	-	2	358.8	-	2
35.0	1	1	365.4	1	1
40.7	1	1	398.2	1	1
55.1	-	2	417.0	-	2
67.2	-	2	430.7	1	1
67.3	-	2	435.7	1	1
75.7	-	2	441.2	-	2
97.5	-	2	447.9	-	2
114.7	-	2	458.3	-	2
118.4	-	2	464.4	-	2
131.4	-	2	467.6	1	1
142.1	1	1	481.2	1	1
147.2	1	1	497.5	1	1
164.2	-	2	532.1	1	1
173.2	-	2	533.0	1	1

Çizelge 3.1. TGS/TIT sensör arıza ve şüpheli listesi (devam)

Çalışma Zamanı	Arızalı Parça Sayısı	Şüpheli Parça Sayısı	Çalışma Zamanı	Arızalı Parça Sayısı	Şüpheli Parça Sayısı
195.3	-	2	547.6	1	1
201.8	1	1	555.3	-	2
211.0	-	2	563.5	-	2
245.1	-	2	564.5	1	1
259.2	1	1	567.7	1	1
268.5	1	1	568.1	-	2
271.4	1	1	570.2	-	2
294.3	-	2	578.4	-	2
587.1	-	2	604.2	-	2
587.2	-	2	607.3	-	2
589.2	-	2			
593.0	-	2			
593.4	-	2			
593.5	-	2			
594.6	-	2			
595.1	-	2			
597.0	-	2			
597.9	-	2			
599.4	-	2			
599.7	-	2			
600.4	-	2			
601.8	-	2			
603.7	-	2			
603.8	-	2			

3.2. Yöntem

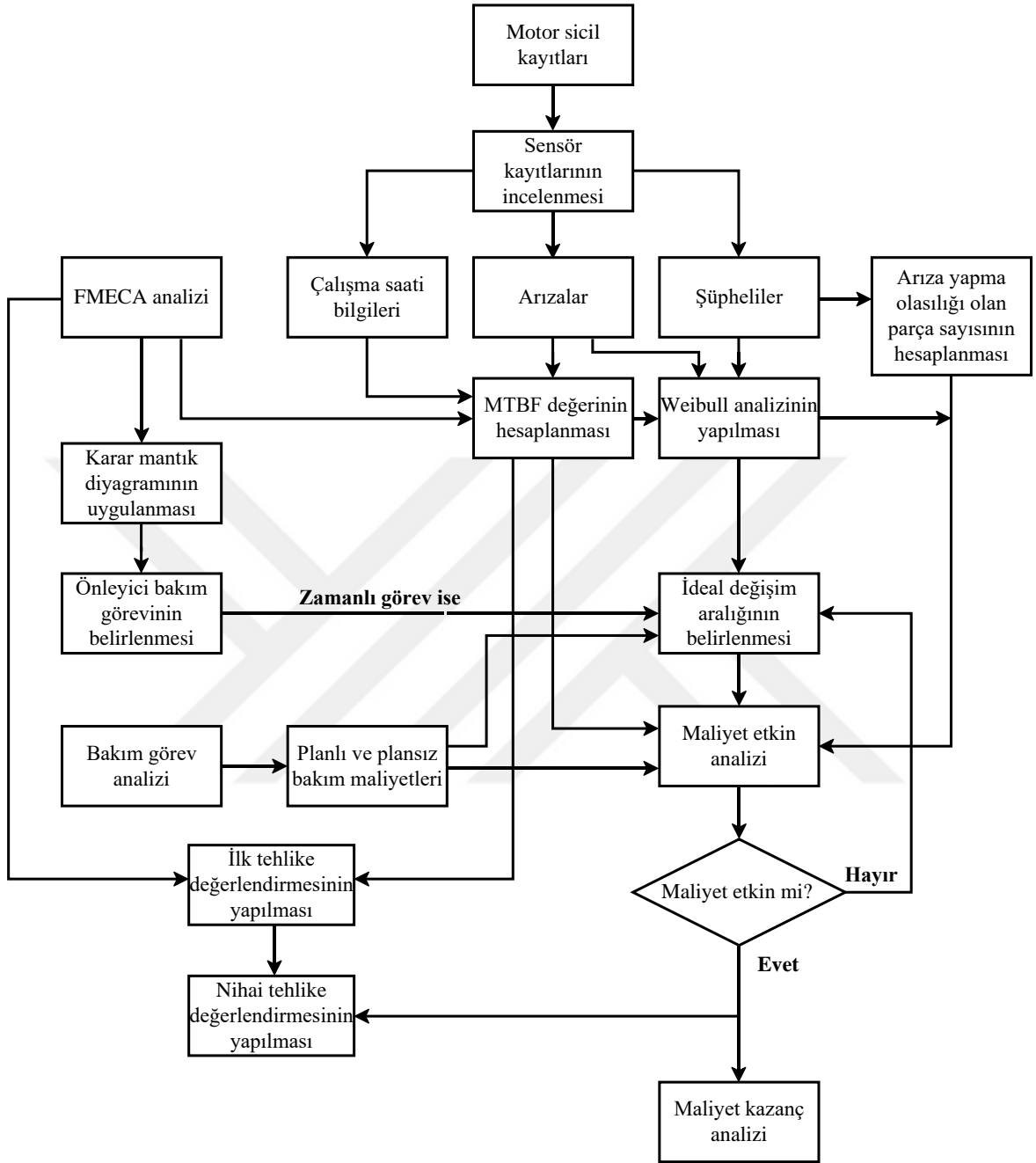
Yapılmış olan analizlerde izlenmiş süreçlere ait akış şeması Şekil 3.1’te verilmiştir.

TGS/TIT sensör, motor sistemi içerisinde motor sıcaklık gösterge sistemi altında bulunmaktadır. Sensörün sistem içerisindeki işlevi, süper şarjöre gelen egzoz gaz sıcaklıklarını ölçerek motor kontrol ünitesini gönderilmesidir. Motor kontrol ünitesi tarafından bu bilgi yardımı ile süper şarjör koruma işlevi yerine getirilmektedir.

Mevcut motor üzerinde birbirinin yedeği olarak çalışan iki adet TGS/TIT sensör bulunmaktadır ve bunların montajı egzoz manifoldu üzerine yapılmıştır. Sensörlerin her ikisinde arıza yapması durumunda, ilgili işlevin devamlılığı her bir silindire bağlı egzoz boruları üzerinden Egzoz Gaz Sıcaklığını (EGS/EGT) ölçen sensörlerden okunan değerlerin ortalaması alınarak yapılabilmektedir.

Zamanlı görevlerde emniyet sonuçları olmayan hata türleri için belirlenen değişim aralıklarının aynı zamanda maliyet etkin olması beklenmektedir. Bu etkinliği hesaplayabilmek için mevcut durumdaki bakım maliyetleri ile yeni değişim aralığı ile ortaya çıkacak maliyetler arasındaki farkın ne olduğunun, ayrıca ilgili analizlerde kullanılmak üzere hesaplanan AAOGZ/MTBF değerinin hangi bakım uygulamaları ile ortaya çıktığının bilinebilmesi amacıyla hâlihazırda üründe uygulanmakta olan bakım stratejisinin ne olduğunun bilinmesi gereklidir. Analizler kapsamında TGS/TIT sensörler için bakım stratejisi olarak aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Her 600 motor çalışma saatinde sonra sensörlerin durumuna bakılmaksızın yenisi ile değiştirilmektedir.
- Sensörler hat seviyesi değiştirilebilir parçalardır.
- Hat seviyesinde bir sensörün arıza yapması durumunda her iki sensörde yenisi ile değiştirilmektedir.



Şekil 3.1. Analiz akış şeması

3.2.1. Hata türü, etkileri ve kritikliği analizi

Birkaç tür HTEKA/FMECA vardır. Savunma departmanı (SD/DoD) süreçlerinde yaygın olarak kullanılan iki tür, Tasarım Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (THTEKA/DFMECA) ve Desteklenebilirlik Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi (DHTEKA/SFMECA)'dır. THTEKA/DFMECA, kritik hata türlerini ortadan kaldırmak veya azaltmak için kullanılır. Tipik olarak, THTEKA/DFMECA, gerekli emniyet, güvenilirlik veya hazır olma seviyelerini karşılamak için tasarım değişikliklerinin nerede gerekli olduğunu belirlemeye yaramaktadır. Öte yandan DHTEKA/SFMECA, operasyonel durumda ortaya çıkması muhtemel olan bakım veya diğer düzeltici eylemlerin uygulanması yoluyla iyileştirme gerektiren hataları tespit etmekte faydalanılır (Naval Air Systems Command, 2016).

THTEKA/DFMECA ve DHTEKA/SFMECA arasında birkaç farklılık vardır. THTEKA/DFMECA geleneksel olarak hata türlerini parça seviyesine (örn. Dirençler, yataklar, vb.) kadar analiz ederken, DHTEKA/SFMECA daha yüksek bir parça seviyesinde gerçekleştirilir. Bir desteklenebilirlik analizi için başlangıç noktası olarak bir THTEKA/DFMECA kullanılması birkaç sorun sunar (Naval Air Systems Command, 2016):

- Çalışma İçeriği: THTEKA/DFMECA, tasarım koşullarının mevcut olduğunu varsayarken, bir DHTEKA/SFMECA, analiz edilen sistemi çalıştıracak, koruyacak veya benzer sistemleri işleten operasyon ve bakım personelinin deneyimlerine dayanan bilinen veya olası çalışma koşullarını ve senaryolarını dikkate almalıdır.
- Analiz seviyesi: THTEKA/DFMECA, arıza mekanizmalarını anlamak ve tasarım geliştirmeleri yoluyla potansiyel hataları azaltmak için tasarımcılara yeterli geribildirimde bulunmak amacıyla, çok düşük parça seviyelerine kadar ayrıntılı bir şekilde detaylandırılmasını gerektirmektedir. DHTEKA/SFMECA sadece sahadaki arızaları azaltmak için gerekli seviyede bilgiye ihtiyaç duyar.

- Odaklanma: THTEKA/DFMECA, risk (tipik olarak emniyet) ve güvenilirliğe odaklanırken, SFMEA ayrıca destek sisteminin maliyet, görev etkinliği, hazır olma kavramlarına odaklanmalıdır.

HTEKA/FMECA analizi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada TGS/TIT sensör için yukarıda anlatılan bilgiler kapsamında HTEKA/FMECA analizi yapılabilmesi için sensörün ait olduğu motor alt sistemi belirlenmiş ve sonra sırası ile devam eden paragraflardaki değerlendirmeler yapılarak Çizelge 3.2'deki HTEKA/FMECA formuna girilmiştir:

İlk aşama olarak TGS/TIT sensörün sistem üzerindeki işlevi ve buna bağlı olarak meydana gelebilecek işlevsel hata türü belirlenmiştir. Sensörün planlı değişim aralığını belirleyebilmek için, işlevsel hata türüne sebep olan ve zamana bağlı meydana gelen hata durumun belirlenmesi gerekmektedir. Sensör bulunduğu konum itibari ile yüksek sıcaklıklar altında çalışmakta ve bu durum zamanla sensörün bir parçası olan rezistör üzerindeki koruyucu kaplamanın özelliğini yitirmesine sonuç olarakta sensörün arızalanmasına yapmasına sebep olmaktadır. İşte bu sebeple GMB/RCM analizleri için hata türü olarak rezistörün arızalı olduğu durum seçilmiştir. HTEKA/FMECA formu üzerinde sensörün işlevsel olarak hata yapmasına sebep olabilecek diğer olası sebepleri, GMB/RCM analizleri kapsamı dışında bırakılmıştır.

İkinci aşamada, belirlenen hata türünün motor sistemi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda lokaldeki, bir üst seviyedeki etkisi ve motor sistemi üzerindeki etkilerinin neler olacağı tanımlanmıştır.

Üçüncü aşamada, sensörün kaybedilmesi durumu için sistem içinde tasarlanmış dengeleyici unsurların neler olduğu belirlenmiştir. TGS/TIT sensörler için hem yazılımsal hem de donanımsal yedekleme yoluna gidilmiştir. Donanımsal yedeklilik olarak sistem içerisine aynı tip sensörden bir adet daha eklenmiştir. Sensörlerden herhangi birinin arıza yapması durumunda, diğer faal olan sensör işlevi yerine getirmeye devam edebilmektedir. Yazılımsal yedeklilik olarak ise her iki sensörün arıza yapması durumunda EGS/EGT sensörler üzerinden okunan değerler vasıtası ile sistemin operasyonel kalması sağlanmaktadır.

Dördüncü aşamada, hatanın tespit edilebilirliği irdelenmiştir. TGS/TIT sensör arızasının sistem tarafından tespit edilebildiği ancak operatör ekranına bunun daha genel bir ifade ile yansıtıldığı görülmüştür. Bu durumun sonucu olarak hangi sensör kaynaklı bir arıza olduğu operatör tarafından tam olarak bilinmemekte, alınan yedekleme önlemlerine rağmen, risk almamak için uçuş yarıda kesilerek emniyetli bir şekilde iniş gerçekleştirilmektedir.

Beşinci aşamada, şiddet belirlenmesi yapılmıştır. Şiddet belirlenmesi yapılırken tehlike şiddet sınıflandırması (Bkz. Çizelge 3.3) ve dengeleyici unsurlarda belirtilen açıklamalar dikkate alınmıştır. Buna göre işlevsel hatanın etkilerinin emniyet açısından ihmal edilebilir olduğu ancak operasyonel olarak görev kaybına sebep olabileceği değerlendirilmiştir. Bu sebeple operasyonel etki sınıfı kritik olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.2. TGS/TIT sensör HTEKA/FMECA formu

Parça Tanımı	Sayı	İşlevi	Harf	İşlevsel hata	Sayı	Hata türü	Lokal Etkisi	Bir Üst Seviyedeki Etkisi	Nihai Etkisi	Şiddeti	Hata Tespit Methodu	Dengeleyici Unsurlar
TGS/TIT Sensör	1	Turboşarja gelen egzoz gaz sıcaklığı bilgisini ölçmek	A	Sıcaklığın ölçülememesi	1	Rezistör Arızası	Turboşarj koruma fonksiyonu çalışmaz	Turboşarj çalışmasında major bozulma	Motorda tam veya kısmi güç kaybı	II	Operatör ekranında sensör arızalı hata kodu	Yedekli Sistem (Donanımsal ve Yazılımsal)
										Operasyonel		

Çizelge 3.3. Tehlike şiddet değerlendirmesi (Ministry of Defence, 2016)

KATEGORİ	Emniyet		Çevresel	Operasyonel	Maliyet
	Üçüncül Kişiler (Not 1)	Birincil ve İkincil Kişiler (Not 2)	-	Operasyonel Kabilyet	Onarım veya Yenileme Maliyetleri
(I) KATASTROFİK	Tekil ölüm veya birden fazla ciddi yaralanma veya şiddetli mesleki hastalıkları	Çoklu ölümler	Büyük çapta yaygın hasar veya ciddi mevzuat ihlali. Etkin olmayan kontrol önlemleri.	Platform veya ekipmanın kaybı	£500k'dan daha fazla
(II) KRİTİK	Tekil şiddetli yaralanma veya mesleki hastalık veya birden fazla hafif mesleki hastalık	Ölüm veya çoklu ciddi yaralanmalar veya şiddetli mesleki hastalıklar	Çevre üzerinde göze çarpan yaygın etki. Kontrol önlemleri minimal düzeyde etkilidir.	Görev kabilyetinin kaybolması	£200k ile £500k arasında
(III) MARJİNAL	En fazla tekil hafif yaralanma veya tekil mesleki hafif hastalık	Tekil ciddi yaralanmalar veya mesleki hastalık veya çoklu hafif yaralanma veya hafif mesleki hastalık	Çevre üzerinde küçük etki. Kontrol önlemleri büyük ölçüde etkilidir.	Sınırlı görev kabilyeti	£10k ile £200k arasında
(IV) İHMAL EDİLEBİLİR	-	En fazla tekil hafif yaralanma veya tekil mesleki hastalık	Küçük etkisi. Kontrol tedbirleri kapsamlı.	En az ölçüde görev kabilyetinde bozulma	£10k daha küçük

Notlar:

- 1 Üçüncü taraflar, kamunun üyeleri, ya da birincil veya ikincil kişi olmayıp, son ürününün veya ekipmandan veya bunların faaliyetlerinden tehlikeye maruz kalan herhangi diğer kişilerdir.
- 2 İlk taraflar, doğrudan son ürün veya ekipmanın çalışması ve bunlar ile ilgili acil desteği sağlamakla ilgilene kişilerdir. İkinci taraflar, son ürün veya ekipmanın çalışması ve bunlar ile ilgili acil desteği sağlamakla dolaylı olarak ilgilene, son ürün üzerinde bulunan ve operasyonuna ya da desteğine dahil olmayan yolculardır.

3.2.2. Tehlike risk değerlendirmesi

Tehlike risk değerlendirmesi mevcut planlı değişim saati ve yeni belirlenen planlı değişim saati üzerinden ilk ve nihai tehlike değerlendirmesi olmak üzere iki kez yapılmıştır. Hatanın etkisinin risk durumu Naval Air Systems Command (2016) belirlenen tehlike risk matrisi çizelgesine (Çizelge 3.4) göre değerlendirilmiştir. Çizelge 3.4'teki şiddet bölümü hata türünün etkisinin sistem üzerinde yarattığı üzerinden belirlenmiştir. Planlı bakımda yapılan iyileştirme ile hata türünün etkisinin şiddeti üzerinden bir değişiklik olmayacağı için, iki analizdede aynı şiddet değeri kullanılmıştır.

Sıklık kategorisi ise; Naval Air Systems Command (2016)'in GMB/RCM bağlamında, meydana gelme sıklığı genellikle AAOGZ/MTBF veya arıza oranı ile belirtilmektedir ifadesine uygun olarak belirlenmiştir.. Bu kapsamda sıklık bilgisinin tespit edilebilmesi için sensöre ait mevcut bakım strateji ile ortaya çıkmış olan arıza oranı değeri Denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

$$\text{ÖAO}_{600} = \frac{\text{Rezistör arızası kaynaklı arıza sayısı}}{\text{Toplam çalışma saati x Sensör adedi}}$$

(3.1)

Çizelge 3.4. Tehlike risk matrisi (Naval Air Systems Command, 2016)

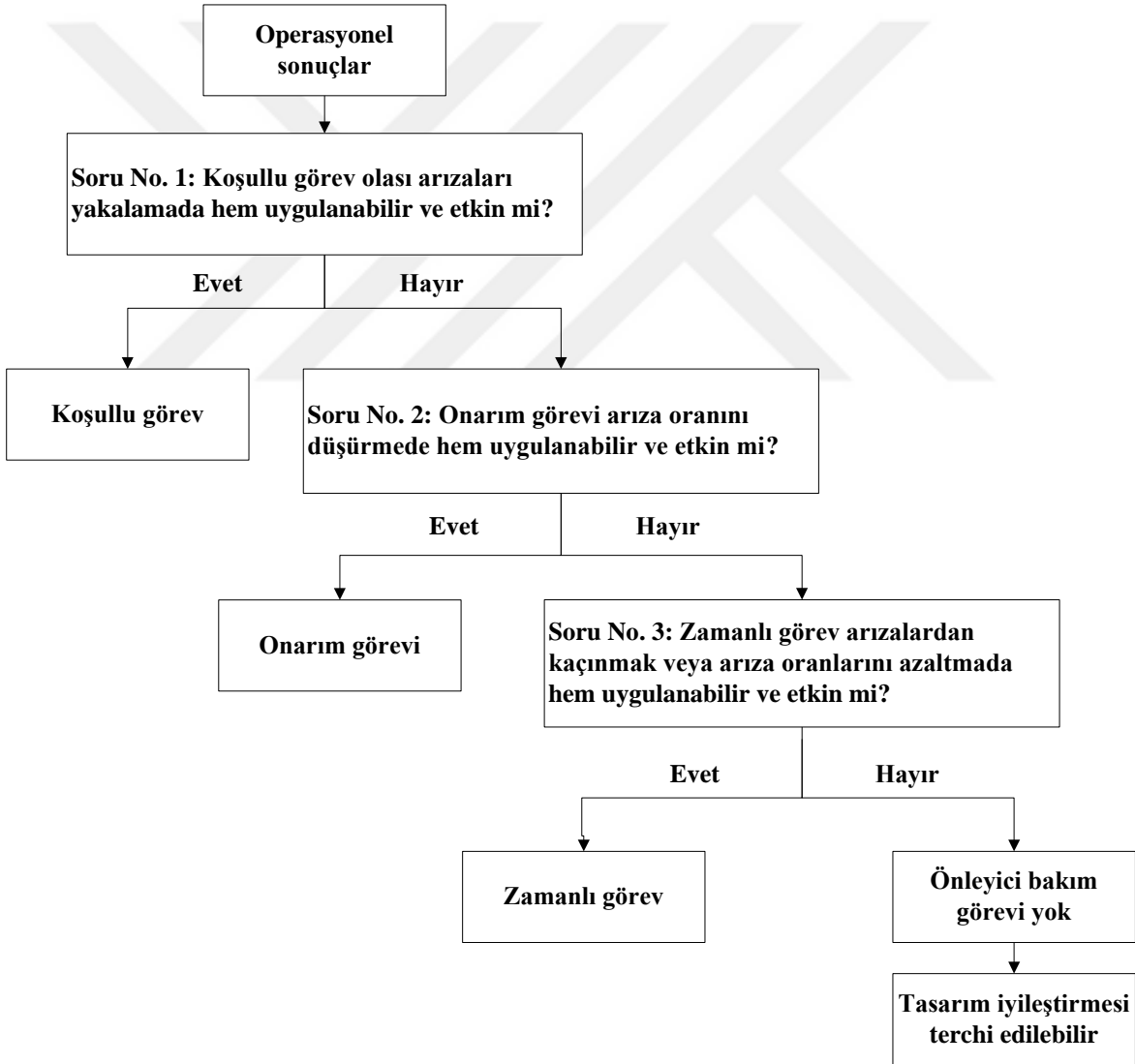
SIKLIK →	SIKLIK $\geq 1 \times 10^{-3}$	MUHTEMEL $\geq 1 \times 10^{-4}$	NADİREN $\geq 1 \times 10^{-5}$	UZAK $\geq 1 \times 10^{-6}$	OLANAKDIŞI $< 1 \times 10^{-6}$
↓ŞİDDET					
KATASTROFİK (I)	1 YÜKSEK	2 YÜKSEK	4 YÜKSEK	8 ORTA	12 KABUL
KRİTİK (II)	3 YÜKSEK	5 YÜKSEK	6 ORTA	10 DÜŞÜK	15 KABUL
MARJİNAL (III)	7 ORTA	9 ORTA	11 DÜŞÜK	14 KABUL	17 KABUL
İHMAL EDİLEBİLİR (IV)	13 KABUL	16 KABUL	18 KABUL	19 KABUL	20 KABUL
RİSK SEVİYELERİ	YÜKSEK	Program yönetimi onayı veya risk kabulünü gerektiren zorunlu düzeltme veya tehlikenin ortadan kaldırılması veya kontrolü	DÜŞÜK	Program yönetimi ve sistem emniyeti çalışma grubunu risk hakkında bilgilendir	
	ORTA	Risk kabul programı yönetimi ve sistem emniyeti çalışma grubu uyumu için yönetim gözden geçirmesi gerektirir	KABUL	Tasarım olgunlaştıkça kabul edilebilir risk değerlendirmesi	

3.2.3. Güvenilirlik merkezli bakım karar mantık diyagramının uygulanması

HTEKA/FMECA analizinde TGS/TIT sensör için belirlenen işlevsel hata durumu için GMB/RCM karar mantığı diyagramındaki (Bkz. Şekil 2.4) sırası ile sorulmuştur. Birinci soruda hatanın tespit edilebilir mi yoksa gizli bir hata olduğunun cevabı aranmaktadır. HTEKA/FMECA analizinde belirtildiği gibi hata operatör ekibi tarafından tespit edilebilmektedir. İkinci soruda hata türünün uçuş emniyeti üzerinde direk bir etkisi olup olmadığı sorgulanmaktadır. Sistemin yedekli olması sebebi ile hata durumunun uçuş

emniyeti açısından bir risk yaratmadığı değerlendirilmiştir. Üçüncü soruda, hata türünün operasyonel kayba sebep olup olmadığı sorulmaktadır. HTEKA/FMECA analiz değerlendirmesinde belirtilen hata tespit metodundaki noksanlıklar sebebi ile hatanın olması durumunda uçuş kesilerek emniyetli bir şekilde iniş yapılmaktadır. Bu sebeplede önleyici görevin amacı, operasyonel grup içerisinde çıkmıştır.

Operasyonel sonuçları olan hata türleri için sırası ile Şekil 3.2’teki sorular sorulmuştur. Bu sorulara verilen cevaplar neticesinde TGS/TIT sensörler için en uygun bakım görevi belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Operasyonel sonuçlar için GMB/RCM karar verme diyagramı (Jones, 2010)

3.2.4. Bakım görev analizi

Bakım görevi analizi (BGA/MTA), bir bakım eyleminin ayrıntılı, adım adım nasıl gerçekleştirilmesi gerektiğini, kimin gerçekleştirmesi gerektiğini ve görevi tamamlamak için gerekli tüm fiziksel kaynaklar belirlemek için yapılan bir analizdir. BGA/MTA, görevi yerine getirmek için ihtiyaç duyulan yedek parça malzeme, alet veya diğer destek ekipmanları veya altyapı ile ilgili göz önünde bulundurulması gereken konuların neler olduğunun belirlenmesini sağlar. BGA/MTA'nın gerçekleştirilmesi, bakım görevinin her adımının sırayla tanımlanmasıyla başlar. Sonra görevin her bir adımı fiziksel olarak nasıl gerçekleştirileceğini belirlemek için analiz edilir. Görevin nasıl gerçekleştirileceğinin fiziksel olarak açıklanmasından sonra, görevi desteklemek için gerekli olan her kaynak belirlenir. Bu kaynak şunları içerir (Jones, 2010):

1. Her adımda yer alan kişi veya kişiler, yaptıkları şeyin anlatımsal bir tanımını
2. Her bir kişinin katılımının süresi
3. Gerekli araçlar veya diğer destek ekipmanları
4. Adım için gerekli parça ve malzemeler.

Yukarıda listelenen dört aktivitenin tamamlanmasından sonra, sonuçlar toplam bakım görevi ile ilgili aşağıdaki konuları belirlemek için değerlendirilir (Jones, 2010):

- a. Tüm görev için başlangıçtan tamamlamaya kadar geçen toplam süre. Her bir kişinin katılımının süresi
- b. Görevi yerine getirmek için gereken asgari teknik kabiliyet, bilgi ve deneyime dayanan kişi (veya kişiler) türü
- c. Uygun iş performansını sağlamak için kişiye verilmesi gereken herhangi bir ek eğitim ihtiyacı
- d. Alan kısıtlamaları, çevresel kontroller, sağlık tehlikeleri veya asgari kapasite gereksinimleri gibi herhangi bir altyapı problemi içerme.

GMB/RCM analizlerinde, sonuçları emniyet dışı olarak değerlendirilen durumlarda, ideal bakım aralığının hesaplanabilmesi, belirlenen bakım görevinin, maliyet etkinlik açısından değerlendirilebilmesi için düzeltici veya önleyici bakım maliyetlerinin

hesaplanması gereklidir. Sensördeki rezistör kaynaklı arıza yaşanması durumunda icra edilen arıza giderme görevi, arızanın tespiti, arızanın bulunduğu parçaya ulaşım, malzeme değişimi, ilgili motor kapamalarının tekrar takılması ve faaliyet testi için harcanan zamanların toplamından oluşmaktadır. Ayrıca her iki bakım görevinde de lojistik veya idari olarak (evrak işlemleri, depodan yedek parça temini, taşıma işlemleri vb.) meydana gelen kayıp zamanlarda, toplam geçen zaman süresi içerisinde dahil edilmiştir.

3.2.5. Weibull analizinin yapılması

İki parametrelili Weibull dağılımı, ömür verileri analizi için en yaygın kullanılan dağılımdır. İki parametreler karakteristik ömür η ve Weibull çizgisi eğimi olan β 'dir. β , hata türünün yeni doğan ölüm bölgesi, rastgele veya yıpranma bölgelerinden hangisinde olduğunu gösterir. β ayrıca, Weibull dağılım ailesinin hangi üyesinin en uygun olduğunu belirlediğinden şekil parametresi olarak da adlandırılır (Abernethy, 2000).

Weibull grafiğinde yatay ölçek ömür veya zaman ölçeğini göstermektedir. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi zaman ölçeği logaritmiktir. Bu kısım servis veya çevrim sayısında olabilir. Dikey ölçek ise Kümülatif Dağılım Fonksiyonu (CDF), t zamanına kadar arıza yapan ünitelerin oranının yüzde cinsinden ifadesidir. CDF için istatistiksel sembol $F(t)$ (Denklem 3.2)'dir ve t zamanına kadar arıza yapma olasılığını anlamına gelmektedir. $R(t)$ 'nin karşılığı güvenilirliktir ve t zamanına kadar arıza yapmama olasılığı Denklem 3.3 ile gösterilir (Abernethy, 2000).

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.2)$$

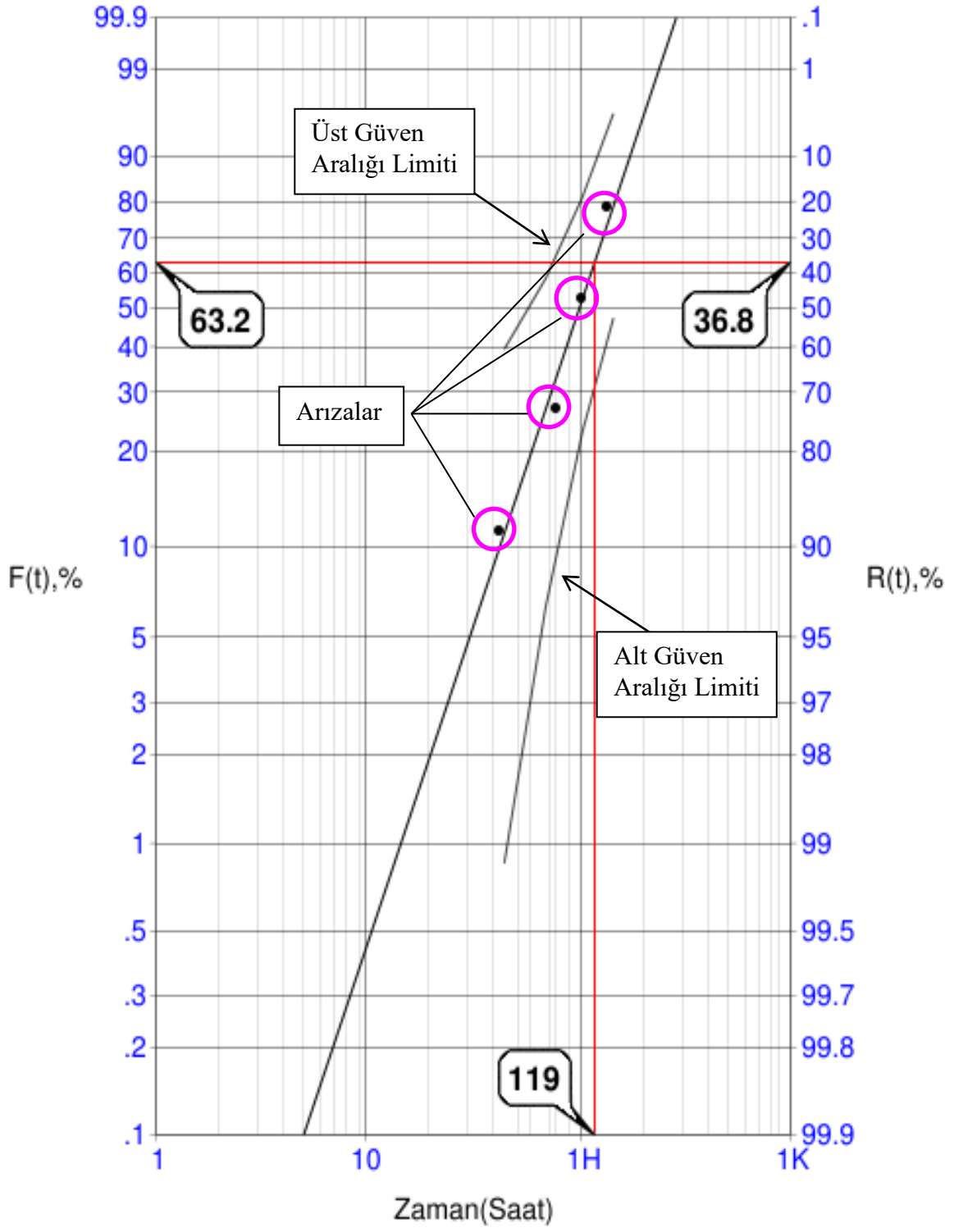
$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.3)$$

$\beta < 1$ olan Weibull dağılımları, zamanla azalan ve aynı zamanda yeni doğan ölüm bölgesi veya erken yaşamda başarısızlık olarak bilinen bir başarısızlık oranına sahiptir. β , 1'e yakın veya eşit olan Weibull dağılımları, yararlı ömür veya rastgele başarısızlıklara işaret eder, oldukça sabit bir başarısızlık oranına sahiptir. $\beta > 1$ ile Weibull dağılımları, zamanla artarak, aşınma hataları olarak da bilinen bir arıza oranına sahiptir. Bunlar klasik banyo eğrisinin (Bkz. Şekil 2.2) üç bölümünü içerir (Anonim, 2018).

Weibull analizinde veri kümesinin istatistiksel olarak düz bir eğri üzerine ne kadar düzgün bir şekilde dağıldığının incelenmesi gerekmektedir. Bunu belirleyebilmek amacı ile kritik ilgileşim katsayısı (p) ve kritik belirleme katsayısı (p^2) değerleri göz önüne alınır. p iki değişken arasındaki doğrusal bir ilişkinin kuvvetini ölçmeyi amaçlamaktadır. p , eğime bağlı olarak -1 ile +1 arasında bir sayıdır. Weibull her zaman pozitif eğimleri olduğu için, her zaman pozitif ilgileşim katsayıları olacaktır. p 'nin bire doğru yaklaşması daha iyi bir dağılıma doğru gittiği anlamına gelmektedir. % 90 kritik ilgileşim katsayısı uygunluğun bir ölçüsünü sağlar. p , kritik ilgileşim katsayısından daha büyükse, iyi bir uyum var demektir. Eğer p , kritik ilgileşim katsayısından küçükse, verileriniz Weibull'dan önemli ölçüde farklıdır, kötü bir uyumunuz var demektir. p^2 dağılımdaki uyum tarafından açıklanan verideki varyasyon yüzdesine eşittir (Abernethy, 2000). Şekil 3.3'deki örnek Weibull grafiği ve grafiğe ait çıktılara ait değerlendirmeler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Weibull grafiği çıktıları ve değerlendirme (örnek grafik için)

Parametre	Değer	Değerlendirme
Şekil Parametresi (β)	3,28	Banyo eğrisindeki konumu belirlenmektedir. Bu değere göre hata modu yıpranma bölgesindedir.
Ömür Parametresi (η)	118,95	119 çalışma saatinde parçaların 63,2'si arızalanmaktadır. Bir başka deyişle popülasyonun %36,8'i, 119'uncu çalışma saatine gelindiğinde faal durumdadır.
p^2	0,98	Eğrinin bir düzgü üzerinde ne kadar düzgün dağılım gösterdiğini ifade eder. 1'e yaklaştıkça istatistiksel olarak eğrinin dağılımını daha düzgün olduğu kabulü yapılır.



Şekil 3.3. Tipik bir Weibull Grafiği

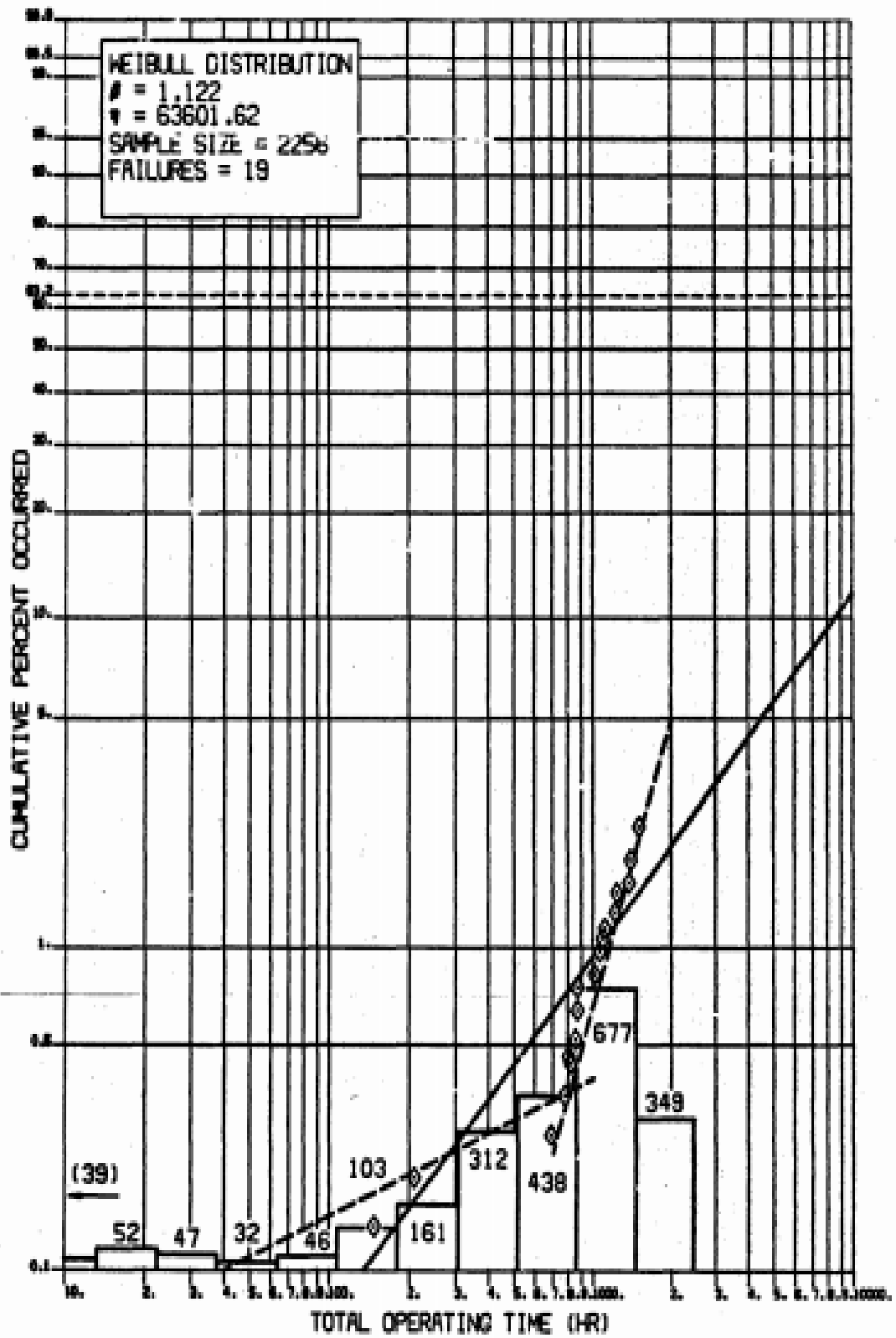
Weibull metodu, bir seferde sadece bir hata türünün incelenmesine izin verir (Abernethy, 2000). Bu açıklamadan yola çıkarak TGS/TIT sensör için yapılan HTEKA/FMECA analizinde, zamana bağlı olarak ortaya çıkan hata türüne karşılık geldiği düşünülen veri kümesi üzerinden Weibull analizi yapılmıştır.

Numune sayısı 15'ten büyük veya ona eşit olduğu için (arızalar ve şüpheliler), Maksimum Olabilirlik Tahmini (MOT/MLE) yöntemine dayalı parametre tahminleri daha doğru kabul edilir. Veri kümesinin sayısının 15'ten büyük olması sebebi ile parametrelerin hesaplanmasında MOT/MLE yöntemi kullanılmıştır.

GMB/RCM analizlerinde zamanlı görevler ve koşullu görevlerin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için en önemli noktalardan biri parçaya ait arıza kayıtlarının düzenli bir şekilde tutulmasıdır. Buna ek olarak düzgün yürütülen hata bulma, raporlama ve düzeltici aksiyonlar süreçleri ile birlikte arızalara ait kök sebebin ne olduğunun belirlenmeye çalışılmasında önemlidir. Şayet sadece arızalara ait kayıtların bulunduğu ama arızaların kök nedeninin bilinemediği durumlarda Weibull analizi yapılmak isteniyorsa, Weibull okuma tekniklerinden faydalanmak gereklidir. Sensöre ait ilk çizilen Weibull grafiğinde Şekil 3.4'dekine benzer bir durum ortaya çıkmıştır. Bu görüntü köpek ayağı bükümü olarak isimlendirilmektedir. Bir köpek ayağı bükümü içeren Weibull grafiği, çoklu arıza türlerinin potansiyeline dair bir ipucudur (Abernethy vd, 1983). Bu sebeple veri kümesi tekrar incelenmiş ve kalite, imalat, üretici veya insan kaynaklı hatalardan dolayı meydana geldiği değerlendirilen arızalar kapsam dışı bırakılarak analiz tekrarlanmıştır.

İkinci analizdeki dağılıma ait p ve p^2 değerlerine bakıldığı zaman Abernethy (2000)'nin konu ile ilgili açıklamaları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bu sebeple veri kümesinin analizinin, Weibull yöntemi ile yapılmasının istatistiksel olarak uygun olduğu değerlendirilmiştir.

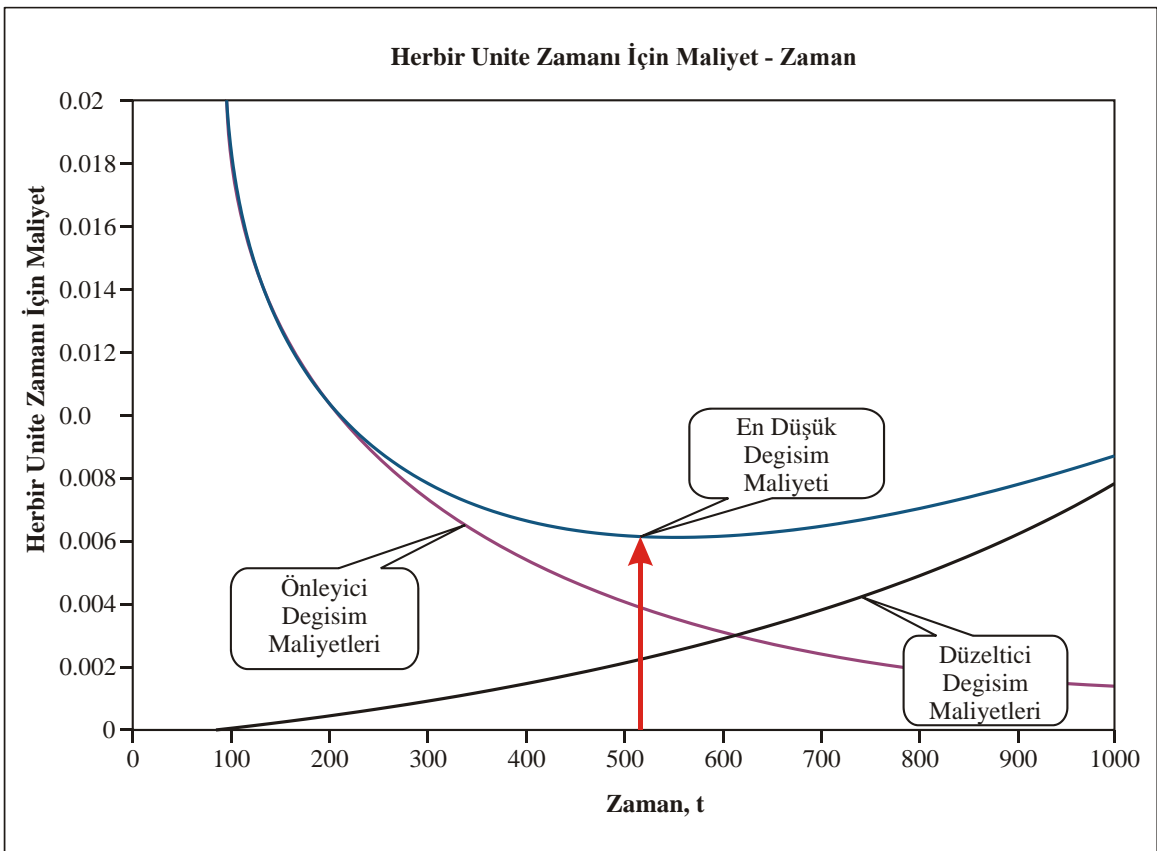
Weibull analizleri, web tabanlı bir program olan Reliability Analytic Toolkit programı kullanılarak yapılmıştır



Şekil 3.4. Köpek ayağı büküm örnek grafiği (Abertnethy vd'den., 1983)

3.2.6. İdeal değişim aralığının belirlenmesi

Eğer bir parça Weibull yıpranma dağılımına sahipse ve plansız arızaların maliyeti, plansız değiştirmelerin maliyetinden çok daha büyükse, en uygun bir değiştirme aralığı vardır (Abernethy, 2000). Önleyici bakımın faydalı olabilmesi için, sistemin arıza oranının zamanla artması ve planlanan koruyucu bakım maliyetinin, planlanmamış düzeltici bakım maliyetinden daha az olması gerekmektedir. Bu koşulların her ikisi de karşılanırsa, önleyici bakım yapılmalıdır (Anonim, 2018). Bu durum Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Maliyet ve zaman (Anonim, 2018)

TGS/TIT sensör için ideal değişim aralığı Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır (Anonim, 2018). $R(t)$ değeri, Weibull analizi sonucu elde edilen η ve β parametreleri kullanılarak Denklem 3.5 ile hesaplanmıştır.

Department of Defence (1998)'e göre bir parçaya zamanlı görev atanabilmesi için belirlenen değişim aralığının sağlanması gereken şartlardan biri, parçaların büyük bir yüzdesinin aşınma ömür limitini geçmiş olmasıdır. Buradan yola çıkarak veri kümesindeki (Bkz. Çizelge 3.1) bilgilerden süzülerek Çizelge 3.6 oluşturulmuştur. Ek olarak 200 saate kadar arıza dışı sebepler ile değiştirilen (şüpheli) parçalardan, 200 saate kadar çalışmış olsaydı kaçınının daha arıza yapacağı hesaplanmıştır. Bu hesabı yapabilmek için Weibull diyagramından 200 saat için arıza olasılığı değeri alınmış ve şüpheli sayısı ile çarpılmıştır.

Çizelge 3.6. Hayatta kalan parça yüzdesi analiz verileri

Veri	Değer
200 M/S'den önce arıza yapan parça sayısı	8
200 M/S'den önce şüpheli olan parça sayısı	38
200 M/S'deki arıza olasılığı	0,020723
200 M/S'den önce şüpheli olan parça sayısı içinden 200 M/S kadar çalışmış arıza olsaydı arıza yapacak parçaların sayısı	1 (38x0,020723=0,78)
200 M/S'den üzerinde çalışmayı başaran parça sayısı	83

$$C(t) = \frac{P \times R(t) + U \times (1 - (R(t)))}{\int_0^t e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\beta} dx} \quad (3.4)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.5)$$

Formülde;

$C(t)$ = Birim zaman başına maliyet

U = Planlanmamış çevrimiçi değişimin maliyeti

P = Hatadan önce plansız çevrimdışı değiştirme maliyeti

$R(t)$ = t zamanındaki güvenilirlik değeri

η = Karakteristik ömür

β = Şekil parametresi

Denklemler 3.4'e göre yeni planlı değişim aralığı hesaplamaları yapılmış ve sonuçları Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7. Weibull parametrelerine göre ideal değişim aralığı

Değişim Zamanı	Maliyet	Değişim Zamanı	Maliyet	Değişim Zamanı	Maliyet
5	40,0014	90	2,3697	220	1,5336
10	20,0042	100	2,1749	230	1,5434
20	10,0129	200	1,5358	300	1,6925
30	6,6916	205	1,5331	400	2,1143
40	5,0397	210	1,53191	500	2,6738
50	4,0569	211	1,53184	900	5,2708
60	3,4098	212	1,53183		
70	2,9553	213	1,53187		
80	2,6219	214	1,53196		
90	2,3697	215	1,53211		

Bu analiz sonucunda elde edilen en uygun değişim aralığı değeri, mevcut bakım konseptine uyumlu hale getirilmiş ve bölüm 3.2.7 belirtilmiş olan Denklem 3.6 maliyet etkin analizi hesaplamasındaki “ t ” değeri için kullanılmıştır.

3.2.7. Maliyet etkin analizi

Emniyet ile ilgili olmayan sabit zamanlı görevler, önlemek için tasarlandıkları hatanın sonuçlarının oluşturacağı maliyetlerden az olduğu durumlarda gereklidirler. Bu durum Denklem 3.6 ile hesaplanabilir (Naval Air Systems Command, 2016):

$$CBR = \frac{\frac{(C_{BF} \times N_S) + (C_{AF} \times (1 - N_S))}{N_S t + [(1 - N_S) \times (Kt)]}}{\frac{C_{AF}}{MTBF}}$$

(3.6)

Formülde;

MEO/CBR = Maliyet etkin oranı

C_{BF} = Arıza olmadan önce değişim veya yenileme yapmanın maliyeti

N_S = Önerilen bakım görevine kadar hayatta kalmaya başarmış parçaların yüzdesi

t = Önerilen bakım görev aralığı

C_{AF} = Onarım/değişim ve yan hasarların maliyeti (Operasyonel etkileri maliyete dönüştürüldüyse, hesaplama içine dahil edildiğinden emin olunmalı)

AAOGZ/MTBF = Arızalar orası ortalama geçen zaman (hiçbir önleyici bakımın uygulanmadığı durum için)

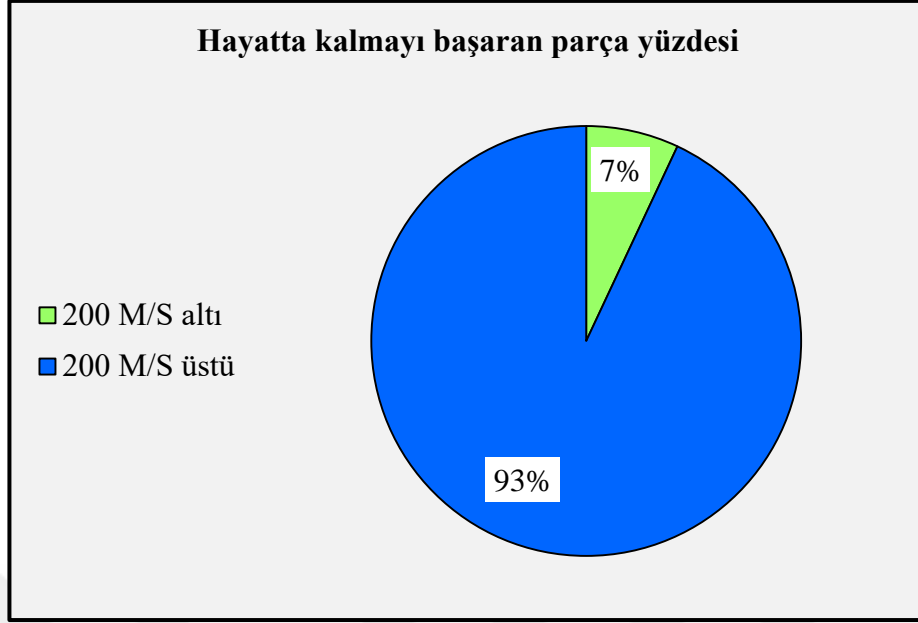
K = Prematüre faktörü

Hesaplamalarda yapılmış olan kabuller ve referans bilgiler aşağıda sıralanmıştır:

1. MEO/CBR değeri 1'den küçük olan görevler maliyet etkin olarak düşünülür (Naval Air Systems Command, 2016).

2. Parçaların büyük bir kısmı belirlenen ömür değerini geçmiş olmalıdır (Nowlan ve Heap, 1978). N_s değeri bu kapsamda düşünülerek hesaplanmıştır. Çalışma saati belirlenen bakım saatinden az olan ve arıza yapmadan çalışan sensörlerin kaçının daha tahmini olarak arıza yapacağı hata olasılık eğrisi yardımı ile belirlenmiştir.
3. AAOGZ/MTBF değeri, Denklem 3.1’de tanımlandığı şekilde iki adet sensörün toplam çalışma saati değerinin, toplam sensör arıza sayısına bölerek hesaplanmıştır.
4. K faktörü erken arızaların ortalama değerinin, görev aralığına olan yüzdesidir. (Naval Air Systems Command, 2016). K değeri eldeki veri setinin yetersiz kalması sebebi ile hesaplanamamıştır. Naval Air Systems Command (2016)’da K değerinin bilinemediği durumlarda, 1 değerinin kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu sebeple K değeri analizlerde 1 olarak alınmıştır.
5. Maliyet etkinlik analizlerinde kullanılmak üzere sensöre ait AAOGZ/MTBF değeri hesaplanmıştır. Kullanım sırasında oluşan veriler, mevcut veya geçmiş önleyici eylemlerin etkilerini içerebilir. Eğer mevcut hata türü için hali hazırda uygulanmakta olan bir önleyici bakım görevi varsa, bu görevin etkilerini hesaba katmak için hesaplanan arıza oranının ayarlanması gerekir (Naval Air Systems Command, 2016). Mevcut durumdaki sensörlerin her 600 saatte bir değiştiği göz önüne alınarak hesaplanan AAOGZ/MTBF değeri, %95 güvenilirlik seviyesindeki alt limit değeri ile hesaplamalarda kullanılmıştır.

200 saatlik değişim aralığı seçilmesi durumunda hayatta kalan parçaların yüzdesinin %93 olduğu görülmüştür (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Hayatta kalmayı başaran parça yüzdesi

Denklem 3.6'ya göre yapılan hesaplama sonucu ideal değişim aralığı 212 saat olarak hesaplanmıştır. Mevcut bakım konsepti ile uyumlu olması açısından sensör değişiminin her 200 saatlik bakımda yapılmasının uygun olacağı değerlendirilmiştir. Maliyet etkinlik analizleri hesaplamasında kullanılan tüm veriler Çizelge 3.8'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.8. Maliyet etkinlik analiz verileri

Tanım	Değer
Arıza olmadan önce değişim veya yenileme yapmanın maliyeti (C_{BF})	212,5\$
Önerilen bakım görevine kadar hayatta kalmaya başarmış parçaların yüzdesi (N_s)	%93
Önerilen bakım görev aralığı (t)	200 saat
Onarım/değişim ve yan hasarların maliyeti (C_{AF})	6.300\$
Arızalar arası ortalama geçen zaman (AAOGZ/MTBF) (%95 güvenlilik seviyesinde)	1.789 saat
Prematüre faktörü (K)	1

3.2.8. Maliyet kaçınma analizi

Maliyetten kaçınma analizi, bir parçanın orijinal bakım veya güvenilirliği ile ilgili işletim maliyetini, bir GMB/RCM analizinin uygulanmasından sonraki ortaya çıkan işletim maliyeti ile karşılaştırır (Naval Air Systems Command, 2016). Bu kapsamda GMB/RCM analizi yapılmadan önceki ve GMB/RCM analizi yapıldıktan sonra ortaya çıkan bakım maliyetleri arasındaki fark hesaplanmıştır. GMB/RCM analizi yapılmadan önceki durum için Denklem 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10 kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} \text{İki yıllık önleyici bakım maliyeti} = & \text{Planlı bakım için bakım görev analizinde belirtilen} \\ & \text{ortalama süre} \times \text{Adam-saat ücreti} + (\text{Bir adet sensör maliyeti} \times 2 \times (\text{Yıllık ortalama uçuş} \\ & \text{saati/Sensör planlı bakım aralığı}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Ortalama bir uçuş iptali toplam maliyeti} = & \text{Plansız bakım için bakım görev analizinde} \\ & \text{belirtilen süre} \times \text{Adam-saat ücreti} + \text{Bir ortalama uçuş iptali maliyeti} + \text{İki adet sensör} \\ & \text{maliyeti} \end{aligned} \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned} \text{İki yıllık düzeltici bakım maliyeti} = & 2 \times \text{Ortalama bir uçuş iptali toplam maliyeti} \times \\ & \text{yıllık ortalama sensör kaynaklı uçuş iptali sayısı} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} \text{GMB/RCM analizi öncesi toplam maliyet} = & \text{İki yıllık önleyici bakım maliyeti} + \text{İki} \\ & \text{yıllık düzeltici bakım maliyeti} \end{aligned} \quad (3.10)$$

GMB/RCM analiz yapıldığı durumun maliyetlerinde (Denklem 3.11) ise yeni değişim aralığında rezistör arızası kaynaklı bir işlevsel hatanın meydana gelmeyeceği öngörüldüğünde, düzeltici bir bakım maliyeti hesaplanmamıştır. Sensörün her 200 saatte bir değişimi durumunda GMB/RCM analizi öncesi maliyetlerdeki 40 adetlik sensör değişim maliyetine ek 80 adet daha fazla sensör değişimi yapılması gerekecektir.

$$\text{GMB/RCM analizi sonrası toplam maliyet} = (\text{GMB/RCM analizi için harcanan süre} \times \text{GMB/RCM analiz personel adam-saat ücreti}) + \text{Bir adet sensör maliyeti} \times 2 \times (\text{Yıllık ortalama uçuş saati/Sensör planlı bakım aralığı})$$

(3.11)

Son olarak Denklem 3.12 te belirtilen GMB/RCM analizi öncesi maliyetlerden GMB/RCM analizi sonrası maliyet değeri çıkartılarak, iki yıllık uçuş süresince elde edilebilecek mali kazanç gösterilmiştir.

$$\text{Toplam Kazanç} = \text{GMB/RCM analizi öncesi toplam maliyet} - \text{GMB/RCM analizi sonrası toplam maliyet}$$

(3.12)

4.BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İlk Tehlike Risk Değerlendirmesi Sonuç Raporu

Sensöre ait ilgili hata türü olan rezistör arızası için, mevcut altı yüz saatlik değişim konseptindeki önlenmemiş arıza oranı ($\ddot{O}AO_{600}$) %95 güvenilirlik seviyesinde 0,00044 arıza sayısı/motor uçuş saati olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan $\ddot{O}AO_{600}$ değerinin Çizelge 4.1'teki sıklık kategorisinden muhtemel sınıfına denk geldiği görülmüştür.

İlgili hata türü için belirlenen şiddet ve sıklık değerine göre tehlike risk değerlendirme çizelgesindeki (Çizelge 4.1) konumu belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. $\ddot{O}AO_{600}$ için tehlike risk değerlendirme (Operasyonel sonuçlar için)

SIKLIK →	SIKLIK $\geq 1 \times 10^{-3}$	MUHTEMEL $\geq 1 \times 10^{-4}$	NADİREN $\geq 1 \times 10^{-5}$	UZAK $\geq 1 \times 10^{-6}$	OLANAKDIŞI $< 1 \times 10^{-6}$
↓ŞİDDET					
KATASTROFİK (I)					
KRİTİK (II)		$\ddot{O}AO_{600}$			
MARJİNAL (III)					
İHMAL EDİLEBİLİR (IV)					

4.2. Güvenilirlik Merkezli Bakım Karar Mantık Diyagramı Sonuç Raporu

GMB/RCM karar mantığı diyagramındaki (Bkz. Şekil 2.4) sorular ve verilen cevaplar Çizelge 4.2’te gösterilmiştir. Verilen cevaplara göre hata türünün sonuçları operasyonel/ekonomik kategorisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.2. Güvenilirlik merkezli bakım karar mantığı soru ve cevapları

Soru No	Soru	Cevap
1	Hata türünün işlevsel hatası ya da etkisi, normal şartlar altında operatör ekibine kendi başına görünür mü?	Evet
2	Hata türü, sistemin emniyetli çalışması üzerinde olumsuz etki yaratabilecek veya çevresel ihlalin ortaya çıkmasına neden olabilecek işlevin kaybına veya ikincil hasarlara neden olur mu?	Hayır
3	Hata, operasyonel kabiliyet üzerinde direk bir etki yapar mı?	Evet

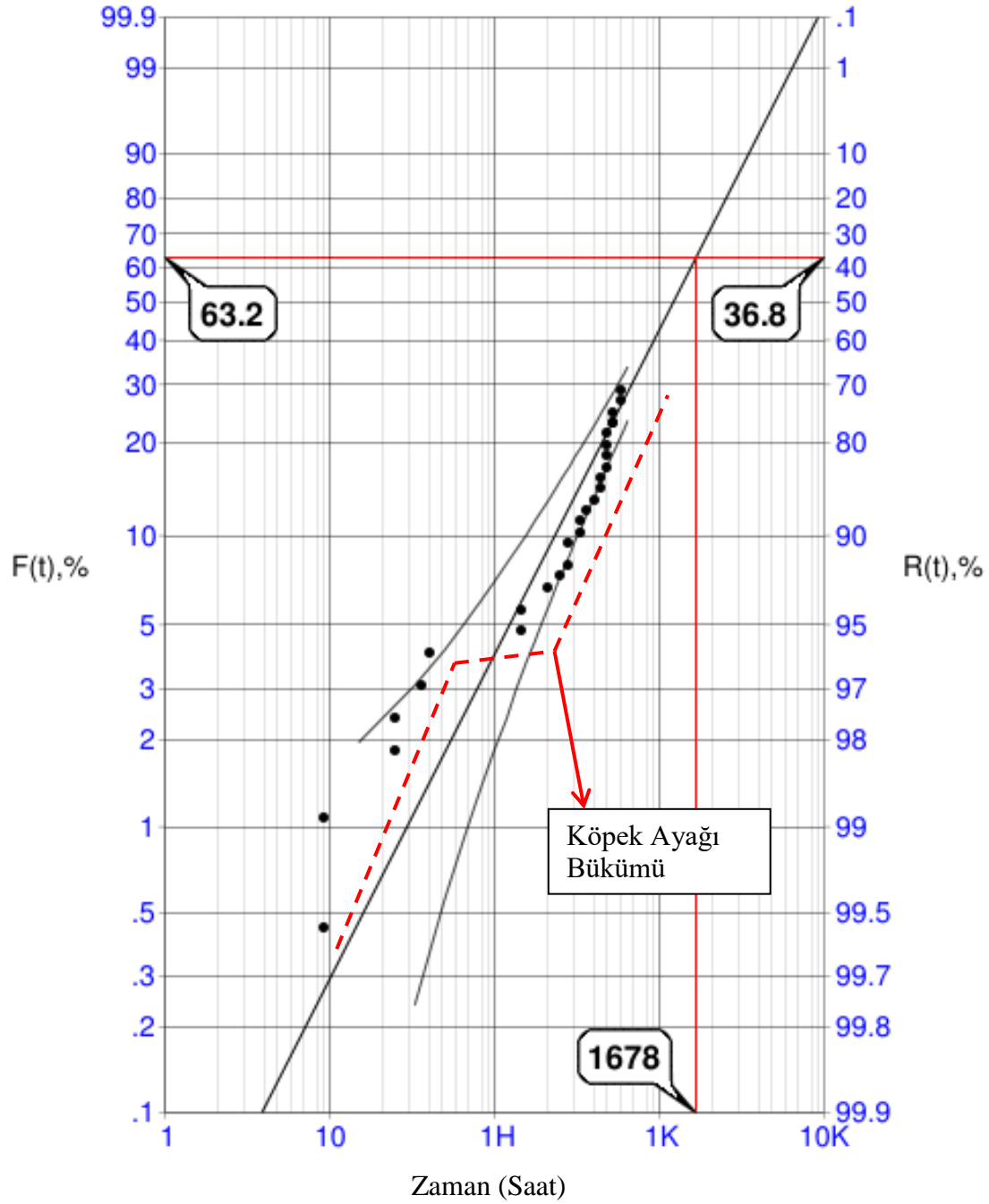
Operasyonel sonuçlar için GMB/RCM karar verme diyagramındaki (Bkz. Şekil 3.2) sorular ve verilen cevaplar Çizelge 4.3’te gösterilmiştir. Sonuç olarak sensöre ait rezistör arızası için en uygun önleyici bakım görevinin zamanlı değişim olduğuna karar verilmiştir.

Çizelge 4.3. Güvenilirlik merkezli bakım karar mantığı soru ve cevapları (operasyonel sınırı için)

Soru No	Soru	Cevap
1	Koşullu görev olası arızaları yakalamada hem uygulanabilir ve etkin mi?	Hayır
2	Onarım görevi arıza oranını düşürmede hem uygulanabilir ve etkin mi?	Hayır
3	Zamanlı görev arızalardan kaçınmak veya arıza oranlarını azaltmada hem uygulanabilir ve etkin mi?	Evet

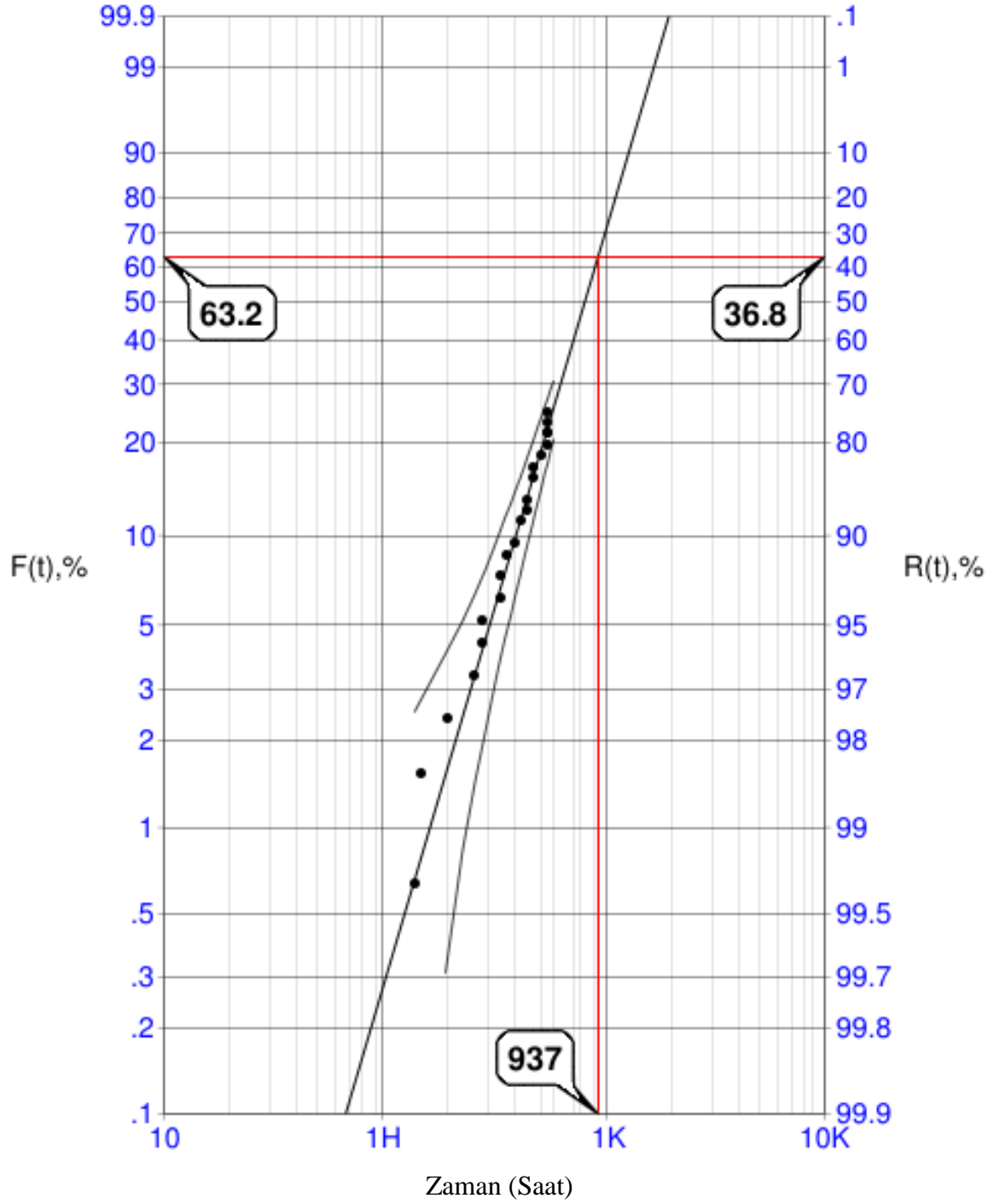
4.3. Weibull Analizi Sonuç Raporu

İlk olarak TGS/TIT sensör tüm veri kümesine için Weibull grafiği (Şekil 4.1) çizdirilmiş ve buna göre β değeri 1,14 ve η değeri 1678,28 çıkmıştır. Bu durum ilk etapta hata türünün yıpranma bölgesi problemi olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.1. TGS/TIT sensör Weibull grafiği (birden fazla hata türü)

İkinci yapılan analiz (Şekil 4.2) sonucunda β değeri 2,62 ve η değeri 937 olarak hesaplanmıştır. Bu hata türünün yıpranma bölgesindeki, sensörde sıcaklığa bağlı olarak zamanla meydana gelen hata türünü temsil ettiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2. TGS/TIT sensör rezistör arızası hata türü Weibull grafiği

Analiz kapsamında hesaplanan şekil, ömür ve p^2 değerleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Weibull analiz sonuçları

Analiz No.	Şekil Parametresi	Ömür Parametresi	p^2	Banyo Eğrisindeki Konumu
1	1,14	1.678,28	0,93	Yıpranma Bölgesi
2	2,62	937,41	0,98	Yıpranma Bölgesi

4.4. Bakım Grörev Analizi Sonuç Raporu

Çizelge 4.5'te TGS/TIT sensör için planlı ve plansız bakımlar için yapılmış olan BGA/MTA özetleri sunulmuştur.

Çizelge 4.5. TGS/TIT sensör planlı ve plansız bakım görev analiz özeti

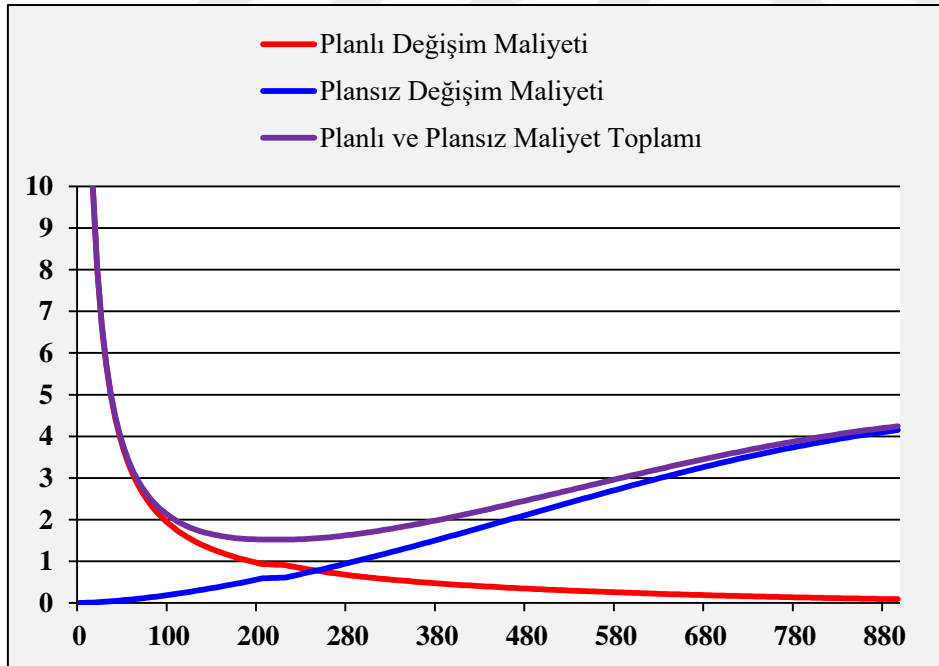
Bakım Konsepti Tanımlaması: Her 600 saatte bir değişim (Planlı bakım)						
Bakım Görevi	Bakım Seviyesi	Toplam Geçen Zaman (dk)	Personel Yetenek Seviyesi	Adam-dakika	Değişen Parçalar	Test veya destek ekipmanı
Sök ve yenisi ile değiştir	Organizasyonel	30	Temel	30	2 adet TGS/TIT sensör	Yok

Çizelge 4.5. TGS/TIT sensör planlı ve plansız bakım görev analiz özeti (devam)

Bakım Konsepti Tanımlaması: Plansız bakım durumu (Rezistör arızası için)						
Bakım Görevi	Bakım Seviyesi	Toplam Geçen Zaman (dk)	Personel Yetenek Seviyesi	Adam-dakika	Değişen Parçalar	Test veya destek ekipmanı
Arıza Giderme	Organizasyonel	240	Temel	240	2 adet TGS/TIT sensör	Servis Ekipmanı

4.5. İdeal Değişim Aralığı Sonuç Raporu

Planlı, plansız ve toplam maliyetlerini ile değişim aralıklarına göre değişimini gösteren grafik Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. TGS/TIT sensör değişim aralığı (planlı ve plansız bakım maliyet değişimi)

MEO/CBR değeri 0,91 olarak hesaplanmıştır. Değerin birden küçük olması sebebi ile bakım aralığı maliyet etkin olarak değerlendirilmiştir.

4.6. Maliyet Kaçınma Analizi Sonuç Raporu

Mevcut belirlenen bakım aralığı ile iki senelik uçuş süresi zarfında ne kadar mali kazanç sağlanacağı Çizelge 4.6’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Maliyet kazanç analizi sonuçları

Tanım	Veri
Organizasyonel seviye bakım adam-saat ücreti	25\$
Bir düzeltici bakım için harcanan süre	4 saat
Bir önleyici bakım için harcanan süre	0,5 saat
Ortalama bir uçuş iptali toplam maliyeti	6.300\$
Ortalama yıllık TGS/TIT sensör kaynaklı abort sayısı	7
Ortalama yıllık uçuş saati	6.000 saat
Bir adet TGS/TIT sensör maliyeti	100\$
GMB/RCM Analizi Öncesi Toplam Maliyet	
İki yıl içerisinde toplam TGS/TIT sensör kaynaklı plansız arıza maliyeti	88.200\$
GMB/RCM Analizi Sonrası Toplam Maliyet	
GMB/RCM analizi için harcanan süre	135 saat
GMB/RCM analizini yapan kişinin adam-saat ücreti	50\$
İki yıl içerisinde toplam planlı TGS/TIT sensör değişim sayısı	80 adet
İki yıl içerisinde toplam planlı TGS/TIT sensör değişim maliyeti	15.750\$
Sonuç	
Toplam kazanç	72.450\$

4.7. Nihai Tehlike Risk Değerlendirmesi Sonuç Raporu

Son olarak yeni belirlenen değişim aralığı ile tehlike risk değerlendirmesi tekrardan değerlendirilmiştir. Belirlenen hata türü için olma sıklığı muhtemelden olanak dışına çekilmiştir. Bu durum Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. ÖAO₂₀₀ için tehlike risk değerlendirmesi (Operasyonel sonuçlar için)

SIKLIK →	SIKLIK ≥ 1x10 ⁻³	MUHTEMEL ≥ 1x10 ⁻⁴	NADİREN ≥ 1x10 ⁻⁵	UZAK ≥ 1x10 ⁻⁶	OLANAKDIŞI < 1x10 ⁻⁶
↓ŞİDDET					
KATASTROFİK (I)					
KRİTİK (II)		ÖAO ₆₀₀			ÖAO ₂₀₀
MARJİNAL (III)					
İHMAL EDİLEBİLİR (IV)					

5.SONUÇ VE ÖNERİLER

Sensörlerin değişim zamanı ideal olması gereken yerin çok uzağında kalmaktadır. 600 saatlik planlı değişim yerine 200 saatlik değişim saati uygulaması ile iki senelik uçuşlarda 72450\$'lık bir kazanç sağlandığı ve sensörde ömür kaynaklı ortaya çıkan arızaların önüne geçilebildiği görülmüştür. Ayrıca veri kümesine göre, sensörlerin %93'ü belirlenen yeni değişim aralığının üzerindeki saatlere kadar çalışabildikleri hesaplanmıştır. Havacılık anlayışı gereği olarak, sistem içerisinde tasarimsal olarak yeterli önlemler alınmış dahi olan arızalar için, herhangi bir risk almamak adına uçuş iptali kararının verildiği gözlemlenmiştir. Sensör için yapılacak bir düzeltici bakım faaliyetine oranının bir planlı bakım maliyetine oranının yaklaşık 29 kat olduğu görülmüştür.

GMB/RCM analizlerinin alacağı iş gücü ve veri ihtiyacının fazlalığı gibi zorlukların yanında, sadece bir sensör üzerindeki iyileştirmenin sistem için getirdiği faydanın ne kadar büyük olabileceği görülmüştür. Belirli bir iş gücünü bu noktaya aktarabilme konusunda yöneticilerin ikna olabilmesi için, ilgili çalışanların mevcut iş yüklerine ek olarak farkındalık çalışmaları yapmalarının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Özellikle havacılık endüstrisinde yapılan GMB/RCM analizlerinde, sonuçları emniyet açısından risk yaratan hata türleri için belirlenen bakım görevleri, sistem emniyetini riske atacak olaylara sebep olmadığı sürece değiştirilmemelidir. Sahadan toplanan veriler belirli bir bakım planına göre yapıldığı için, işlevsel hatası emniyet sonuçlarına sebep olan durumlar için yeterli verinin toplanamayacağı değerlendirilmektedir. Bunun yerine emniyet temelli bakım görevleri için istenilen uzunlukta testler yapılmalıdır. Planlı değişim zamanlarındaki iyileştirmeler için öncelikli olarak operasyonel/ekonomik bakım görevi grubundaki hata türlerine yönelinilmelidir.

Sahadaki motordaki güvenilirlik ve hazır olma değerleri sürekli iyileştirmeye açık motor karakteristikleridir. Tasarımı donmuş ve olgun duruma gelmiş bir üründe, tasarım değişiklikleri yaparak bu karakteristikleri iyileştirmenin birçok zorluk barındırdığı görülmüştür. Bu sebeple önleyici bakım görevleri ile oynayarak motor sistemi üzerinde sürekli iyileştirme yapılmasının diğer seçeneklere göre daha kolay ve yapılabilir olduğu değerlendirilmektedir. Ancak burada yedek parça yönetim sürecinin iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Çoğu zaman motor test süreleri ömür analizlerini yapabilmek için yeterli arıza sayısını çıkaracak uzunlukta olmamaktadır. Bu sebeple ürün üreticisi tarafından ön tasarım ve detay tasarım aşamasında GMB/RCM analizlerinden veya benzer sistemler düzenli bakım planlarından faydalanılarak belirlenen değişim veya kontrol aralıklarının, sahadaki kullanım sonucu oluşan bilgiler ile gene ürün üreticisi tarafından güncellenmesi gerekliliği görülmüştür. Yapılan güncellemenin kullanıcıya bildirimde kullanılan formun içeriğinde, üretici tarafından bu tez kapsamında yapılan analizleri içeren bir teknik raporun olmasının, kullanıcının yeni belirlenen değişim aralığını kolayca benimsemesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Kullanıcı ile sözleşmede karşılıklı olarak saha verilerinin paylaşımı konusunda anlaşma sağlanmalıdır. Sözleşmesel ile bir bağlılık olmadığı sürece bu tez çalışmasındaki analizleri yapmak için yeterli detayda bir bilgi alınmasının çok zor olduğu görülmüştür. Alınan veriler ile ne yapılmasının amaçlandığı, kullanmakta olduğu sistemdeki iyileştirmelerin kendisine ne kazandıracacağı, kullanıcıya net bir şekilde anlatılmalıdır.

Doğru önleyici bakım ile parça AOGZ/MTBF'inde dolayısıyla motor AOGZ/MTBF saatlerinde artış olacaktır. Buna ek olarak planlı bakımlara harcanan adam saat değerlerinde artış olurken, plansız bakımlara harcanan adam saatlerde ise bir düşüş olacaktır. Ayrıca sensör kaynaklı iptal olan uçuş sayısında azalma olacağı için motor kaynaklı iptal oranında (Abort Rate) azalma, diğer bir değişle motor görev AOGZ/MTBF değerinde yükselme olacaktır. Buda operasyonel hazır olma değerinde iyileşmeye neden olacaktır. Zincirleme olarak birbirine tetikleyen parametrelerinde, değişim aralıklarının optimizasyon çalışması sırasında önemle değerlendirilmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abernethy, B., R., 2000, The New Weibull Handbook, Robert B. Abernethy, p.1-2, 14, 34-35, 45-46, 76.
- Abertnethy, B., R., Breeneman, E., J., Medlin, H., C., Reinman, L., G., 1983, Weibull Analysis Handbook, Pratt & Whitney Aircraft, p.27, 29.
- Aldhubaib, H., A., Salama, M., M., 2014. A Novel Approach to Investigate the Effect of Maintenance on the Replacement Time for Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, 1603-1612.
- Al Haiany, H., 2016, Reliability centered maintenance different implementation approaches, M.Sc thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering.
- Anonim, 2018, Characteristics of the Weibull Distribution, <https://www.weibull.com/hotwire/issue14/relbasics14.htm>, erişim tarihi: 24.05.2018.
- Anonim, 2018, Optimum Maintenance Intervals in RCM++, <https://www.weibull.com/hotwire/issue113/hottopics113.htm>, erişim tarihi: 18.06.2018.
- Department of Defence, 1998, Reliability-Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft, Weapon Systems and Support Equipment, MIL-HDBK-2173, Department of Defence, p.60.
- Department of the Air Force, 2000, Aerospace Equipment Maintenance General Policies and Procedures, AFTO 00-20-1, Department of the Air Force, p.A-4.
- Department of the Army, 2006, Reliability-Centered Maintenance (RCM) for Command, Control, Communications, Computer, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (C4ISR) Facilities, TM 5-698-2, Department of Army, p.1.4-1.5, 3.1-3.2.
- Ebeling, C. E., 2000, An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering, McGraw-Hill, p.10, 32.
- Garza, L., 2002, A Case Study of the Application of Reliability Centered Maintenance (RCM) in the Acquisition of the Advanced Amphibious Assault Vehicle (AAAV), M.Sc thesis, Naval Postgraduate School, p.5-7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jones, J. V., 2010, Integrated Logistics Support Handbook, McGraw-Hill Inc., p.4.4, 8.8., 13.4, 13.5
- Luis, D., 2013, Application of risk based inspection (RBI), reliability centered maintenance (RCM) and risk based maintenance (RBM), M.Sc thesis, Stavanger: University of Stavange.
- Mann, L. J., 1976, Maintenance Management, D.C. Heath and Company, p.1.
- Martin, M. H., 2006, Implementing Reliability Centered Maintenance Analysis in a Revised Preventive Maintenance Program for F-15, M.Sc thesis, Department of the Air Force Air University, p.9-13, 16, 19-20, 24, 31-32.
- Ministry of Defence, 2016, Using Reliability Centred Maintenance to Manage Engineering Failures - Guidance on the Application of Reliability Centered Maintenance, Defence Standard 00-045 Part 3, Ministry of Defence, p.27.
- Mobley, R. K., 2002, An Introduction to Predictive Maintenance, New York: Elsevier Science.
- Moubray, J., 1997, Reliability-Centered Maintenance, Industrial Press Inc., p.2-6, 127-138, 187.
- Naval Air Systems Command, 2016, The Naval Aviation Reliability-Centered Maintenance Process, Naval Air System Command, NAV-AIR 00-25-403, Naval Air Systems Command, p.3.1-3.39, A.6, A.7.
- Nowlan, F., S., Heap, F.,H., 1978, Reliability-Centered Maintenance . Vol. A066-579. National Technical Information Service, p.5-6, p.45-46, p50-75.
- Smith, A. M., 1993, Reliability-Centered Maintenance, New York, McGraw-Hill Inc., p.11, 14, 49-51.
- Society of Automotive Engineers, 1999, Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes, Vol. JA1011, Warrendale, Society of Automotive Engineers, p.7.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ünal, G., 2009, Güvenilirlik merkezli bakım ve bir endüstriyel uygulama, Yüksek lisans tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü., s. 14.

Yumbe, Y., Miyakoshi, M., Kondo, M., Arao, T., Furukawa, N., 2017, Evaluation of Optimization Method for Inspection Scheduling of Power Distribution Facilities Using Maintenance Data Accumulated by Power Utility, IEEE Transactions on Power Delivery, 696 – 702.

Wilkins, D. J., 2018, The Bathtub Curve and Product Failure Behavior, <http://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>, erişim tarihi: 10.04.2018.