

**KÜÇÜK BİR İHA TURBOJET MOTORUNA AİT
ÇEŞİTLİ PARAMETRELERİN
PERFORMANS TAKİBİ VE ANALİZİ**

Nilgün Fazilet ÖZER

Yüksek Lisans Tezi

Havacılık Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

Kasım-2015

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Rektörlüğü ve TEI-Tusaş Motor Sanayii A.Ş. arasında sürdürülen üniversite sanayi işbirliği çerçeve protokolü tarafından desteklenmektedir. Proje No: AGR1300041

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Nilgün Fazilet ÖZER'in "**Küçük Bir İha Turbojet Motoruna Ait Çeşitli Parametrelerin Performans Takibi ve Analizi**" başlıklı **Havacılık Elektrik Elektronik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 04.11.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Danışman)	: Yard. Doç. Dr. Emre KIYAK
Üye	: Yard. Doç. Dr. Tolga BAKLACIOĞLU
Üye	: Yard. Doç. Dr. H. Serhan YAVUZ

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

Enstitü Müdürü

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi
KÜÇÜK BİR İHA TURBOJET MOTORUNA AİT ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERİN PERFORMANS TAKİBİ VE ANALİZİ

Nilgün Fazilet ÖZER
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Havacılık Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Yard. Doç. Dr. Emre KIYAK
2015, 101 sayfa

Anadolu Üniversitesi ve TEI (*Tusaş Engine Industry*) arasındaki üniversite- sanayi iş birliği çerçeve programı kapsamında gerçekleştirilen bu tezde, insansız hava araçlarına yönelik motor sağlığı izleme konusu ele alınmıştır. Motor performans parametrelerinin mevcut durumundan yola çıkarak, gelecek durumları hakkında tutarlı tahminler yapabilme amaçlanmıştır. Bu amaçla, risklerin probleme dönüşmeden önce belirlenip, minimize edilmesi hedeflenmiştir. Hedefler doğrultusunda motor ömrünün uzatılması, erken söküm/takım işlemlerinin ve mekanik aşınmaların önlenmesi, bakım maliyetlerinin düşürülmesi, vb gibi süreçlere katkı sağlayarak zamansal ve mali tasarruflar elde edilmesi planlanmıştır. Bu bakış açısından yola çıkarak, söz konusu süreç için MATLAB programında veri tabanlı bir yazılım geliştirilmiştir. İlgili yazılım, TEI'ye ait küçük bir insansız hava aracında kullanılan turbojet motoru performans parametreleri için işletilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gerçek motor verileri ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama sonucunda, motorda meydana gelebilecek bir arızanın henüz oluşmadan önce saptanabildiği tespit edilmiştir. Bu sayede, motorun istenmeyen koşullarda çalışmasının önlenebildiği açıkça ortaya konulmuştur. Bu durum, geliştirilen yazılımın başarılı bir şekilde çalıştığı anlamına gelmektedir. Yapılan çalışmalar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bu tez çalışmasının hedeflerine ulaştığı sonucu çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız hava araçları, uçak motor performansı, veri tabanlı uçak motor sağlığı izleme, diagnostik ve prognostik süreçler, gaz türbinli motorlar, trend analizi.

ABSTRACT
Master of Sciences Thesis
PERFORMANCE MONITORING AND ANALYSIS OF
VARIOUS PARAMETERS FOR A SMALL UAV TURBOJET ENGINE

Nilgün Fazilet ÖZER

Anadolu University
Graduate School of Sciences
Department of Avionics

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Emre KIYAK
2015, 101 pages

In this thesis carried out under the university-industry cooperation program between Anadolu University and TUSAŞ Engine Industries INC., subject of engine health monitoring for unmanned aerial vehicles is discussed. It is intended to make consistent predictions about the future status of the engine performance parameters by using their current states. For this purpose, it is aimed to be minimized the risks, before they turn into the problems. In accordance with these objectives, it is planned to achieve temporal and financial savings by contributing the processes like extending of the engine life, preventing of early disassembly-reassembly and mechanical wears, reducing of the maintenance costs, etc. Based on the this point of view, it is developed a data based software in MATLAB for the so called process. The software is operated for the performance parameters of the turbojet engine that is used in a small UAV of TEI cooperation. The obtained results are compared with the real data of the engine. As a result of this comparison, it is identified that a fault may occur in the motor can be detected before it has been determined yet. In this way, it is clearly demonstrated that the engine operation in adverse condition can be prevented. This situation means that the software to be developed is operates successfully. When the above mentioned studies evaluated as a whole, it follows that the the thesis has been achieved its targets.

Keywords: Unmanned aerial vehicles, aeroengine performance, data driven aeroengine health monitoring, diagnostics and prognostics, gas turbine engines, trend analyses.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez sürecim boyunca çeşitli bilimsel projelerde yer almama imkan sağlayan, gerçekleştirdiğimiz çalışmalarla ulusal ve uluslar arası platformlarda çalışmalarımızı ve üniversitemizi temsil etmemize vesile olan, akademik çalışmalar konusunda tecrübe kazanmama katkı sağlayan, bilimsel çalışma disiplinini bana aşıl原因 ve her türlü konuda benden yardımlarını esirgemeyen Akademik Danışmanım Yard. Doç. Dr. Emre KIYAK'a;

Yüksek lisans tez çalışmamın, üniversite - sanayi işbirliği çerçevesinde bir projeye dönüşmesine katkı sağlayan Prof. Dr. Hikmet KARAKOÇ'a;

Yüksek lisans tez çalışmamın iş paketi sunumlarında çalışmalarına görüşleriyle katkı sağlayan, yeni bir bakış açısı kazandıran Ali DİNÇ'e; sürecin ilk aşamasından itibaren gerek teknik gerekse sosyal konularda yardımlarını esirgemeyen Süha TOPRAK'a; teknik bilgileri yanında mesleki deneyim ve tecrübelerini de paylaştan Sanayi Danışmanlarım Sercan ARSLAN ve Kerim KAHRAMAN'a ve emeği geçen tüm TEI çalışanlarına;

Öğrenimim süresince desteklerini esirgemeyen Annem Meral BAYRAKTAR ve Babam Ş. Ertuğrul BAYRAKTAR'a;

Hayat yolunda olduğu gibi, tez sürecimde de maddi ve manevi desteğini daima hissettiğim Eşim Mehmet ÖZER'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSRTACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR	4
2.1. Gaz Türbinli Motorların Bileşenleri	4
2.1.1. Hava alığı (Inlet, Giriş)	4
2.1.2. Fan	5
2.1.3. Kompresör	7
2.1.4. Yanma odası	9
2.1.5. Türbin	10
2.1.6. Egzoz	12
2.2. Brayton Çevrimi	14
2.3. GTM Çeşitleri ve Karakteristikleri	16
2.4. Motor Performansına Etki Eden Parametreler	21
3. İSTATİSTİKSEL VERİ ANALİZİ	23
3.1. Korelasyon Analizi	23
3.2. Regresyon Analizi	24
3.2.1. Hareketli ortalamalar	25
3.2.2. En küçük kareler yöntemi (EKK)	26
3.2.3. Hipotezler	29
3.2.4. t-Testi	30
4. UÇAK MOTOR SAĞLIĞI İZLEME	31
4.1. Sağlık İzleme (HM, Health Monitoring)	31
4.2. Motor Sağlığı İzleme (EHM, Engine Health Monitoring)	33
4.3. Uçak Motoru Performans Parametreleri ve İzlenen Sinyaller	37

4.4. EHM Kapsamında Yapılan Çeşitli İzlemeler	39
4.5. EHM Sistem Kabiliyetleri	41
4.6. EHM Sistemlerinin Sağladığı Faydalar	43
4.7. Uçak Motorlarında Meydana Gelebilecek Olumsuz Durumlar	46
4.8. EHM Uygulama Adımları	48
4.8.1. İzleme (Monitoring)	51
4.8.2. Algılama (Sensing)	51
4.8.3. Saptama (Detection)	53
4.8.4. Teşhis (Diagnostics)	54
4.8.5. Tahmin (Prognostics)	56
4.8.6. Planlama (Planning)	57
4.9. EHM Standartları	58
4.10. EHM Standartları	60
5. İHA MOTORU İÇİN VERİ TABANLI GELECEK DURUM TAHMİNİ	67
5.1. Anakod	67
5.1.1. Verilerin düzenlenmesi	68
5.1.2. Maksimum aşma kontrolü (mnbmxe)	69
5.1.3. Gelecek verinin tahmini	72
6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME	74
6.1. Elde Edilen ANAKOD Çıktıları	75
6.1.1. Sarı bölgeye ait program çıktıları	75
6.1.2. Yeşil bölgeye ait program çıktıları	76
6.1.3. Kırmızı bölgeye ait program çıktıları	78
6.1.4. Risk bölgesine ait program çıktıları	80
KAYNAKLAR	82
Ek-1 Özel Fonksiyonlar, Normal Denklemleri ve Standart Hata Hesaplamaları	96
Ek-2 t_ Tablosu	98
Ek-3 Çeşitli EHM Standartları	99
Ek-4 ATA Kodları	101

ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1. GTM temel bölümleri ve bileşenleri	4
2.2. Hava hızlarına göre akış çizgileri ve inlet tasarımları	5
2.3. Fan ve içerisindeki hava akışları	6
2.4. BPR' ye göre özgül yakıt tüketimi	6
2.5. Düşük/yüksek basınç kompresörü	7
2.6. Kompresör kademelerine göre basınç değerleri	8
2.7. Kompresör basınç oranı ve birim akış kütlesi başına iş hesabı	8
2.8. Yanma odası çeşitleri	10
2.9. Düşük/yüksek basınç türbini	11
2.10. Türbin basınç oranı ve birim akış kütlesi başına iş hesabı	11
2.11. Motor sıcaklık oranı	13
2.12. Motor basınç oranı	13
2.13. Brayton çevrimi	14
2.14. NASA turbojet motor terminal numaraları	15
2.15. NASA brayton çevrimi diyagramları	15
2.16. Turbojet motor	16
2.17. Turbojet motor basınç ve sıcaklık diyagramları	16
2.18. Turbojet motor itki ifadesi	17
2.19. Turbofan motor	18
2.20. Turbofan motor basınç ve sıcaklık diyagramları	18
2.21. Turbofan motor itki ifadesi	18
2.22. Turboprop motor	19
2.23. Turboprop motor itki ifadesi	19
2.24. Turprop motor basınç ve sıcaklık diyagramları	20
2.25. Turboşaft motor	20
3.1. Hareketli ortalamalar yöntemi	25
3.2. EKK yöntemi	26
3.3. XY tablolarının doldurulması	28
3.4. Kabul/red bölgesi	30
4.1. EHM gelişim evreleri örneği	33
4.2. EHM Genel ve iç yapısı	35

4.3. SHM sistem gereksinimleri	36
4.4. EHM algılayıcı konumları	38
4.5. Veri toplama	41
4.6. Veri toplama ve özütleme	42
4.7. Karar destek	42
4.8. Veri işleme ve analiz	43
4.9. RB199 motoru iç aksamı	44
4.10. EHM genel izleme süreci	48
4.11. Model tabanlı yaklaşım	49
4.12. EHM adımları	51
4.13. Uçak motoru ana bileşenlerinde yapılan bazı ölçümler	52
4.14. Uçak motorları için çeşitli algılayıcılar	52
4.15. Öğrenme süreci	55
4.16. MTU uçak ve motor izleme diyagramları	61
4.17. Pratt&Whitney entegre sağlık yönetimi işleyişi	62
4.18. Honeywell motor sağlığı izleme diyagramı	63
4.19. Rolls Royce motor sağlık yönetimi diyagramı	63
4.20. Trent 900 motoru	64
4.21. RB199 ve EJ200 motorları	65
5.1. Verilerin elde edilmiş adımları	69
5.2. Maksimum aşma kontrolü işleyiş adımları	71
5.3. EGT yaklaşma bölgeleri	72
5.4. Geleceğe dair veri üretimi işleyiş adımları	73
6.1. Sarı bölge sonuçları	76
6.2. Yeşil bölge sonuçları	78
6.3. Kırmızı bölge sonuçları	79
6.4. Risk bölgesi sonuçları	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1. Çeşitli motor by-pass oranları	6
2.2. Su-buhar enjeksiyonunun güç ve verim üzerindeki etkisi	22
3.1. r ve ilişki derecesi	24
4.1. 1950-1990 arası motor teknolojiler	34
4.2. EHM sürecinde kullanılan sinyaller	38
4.3. Çeşitli hatalar ve oluşum yerleri	47
4.4. Çeşitli EHM programları	60

1. GİRİŞ

Günümüz dünya düzeninde, ülkelerin ekonomik ve sosyal olarak tam bağımsızlığı ancak askeri gücün istikrarı ile mümkün olabilmektedir. Bu bağlamda özellikle savunma sanayi alanındaki çalışmalar, kritik derecede önem arz etmektedir. Bu sürece katkı sağlayacak en önemli noktalardan biri ise ‘yerli üretim’ kavramıdır. Konuya Türkiye açısından bakıldığında, hali hazırda tamamlanmış veya çalışmaları devam etmekte olan pek çok yerli üretim savunma sanayi projesi (*SOM-J: Seyir Füzesi, UMTAS: Tanksavar Füze Sistemi, BORA-12 (JNG-90): Keskin Nişancı Tüfeği, Fırtına Obüsü (T-155): Topçu sistemi, ALTAY: Muharebe Tankı, AKYA: Standart Çaplı Yeni Tip Ağır Torpido, MİLGEM: Modern Muharip Gemi, ATMACA: Gemisavar Füze Sistemi, ARMA: Zırhlı Muharabe Aracı, KİRPİ: Mayına Karşı Korunmalı ve Taktik Tekerlekli Araç, COBRA: 4x4 Zırhlı Araç, GÖKTÜRK: Milli Keşif ve Gözetleme Uydusu, İDA: İnsansız Deniz Aracı, KASIRGA (TR-300): Füze, MPT: Modern Piyade Tüfeği, Kuzgun (150 ve T44-H): Paraşüt, PARS: Zırhlı Muharebe Aracı*) olduğu görülmektedir.

Bu tez kapsamı ile yakından ilişkisi olan askeri hava savunma sanayisi ele alındığında, özellikle son yıllarda yüksek bütçeli yatırımlar yapıldığı ve bu yatırımlar ile yerli üretimin büyük oranda desteklendiği görülmektedir. Ülkemizde, bu kapsamda pek çok projeye imza atılmış ve yürütülmekte olanlar ile de sürecin devamlılığı sağlanmaktadır. Söz konusu askeri hava savunma sanayi yerli üretim projelerinden bazılarını aşağıda kısaca değinilmiştir :

ANKA:

- İnsansız hava aracı (*İHA*)
- Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş (*TAI, Turkish Aerospace Industries*) tarafından üretildi
- Sınıfının en üst kapasiteli uçakları arasında yer almaktadır

HÜRKUŞ:

- Eğitim uçağı
- TAI tarafından üretildi
- Hava kuvvetleri için tasarlandı

GÖZCÜ:

- Mini İHA
- Baykar Makine Sanayii ve KaleKalıp tarafından üretildi
- Hava keşif ve haber alma görevleri için kullanılmaktadır

BAYRAKTAR:

- Mini taktik İHA
- Kale-Baykar iş ortaklığı ile geliştirildi
- Milli ve özgün tam otomatik uçuş kontrol özelliklerine sahiptir

TEBER:

- Yeni nesil lazer güdüm kiti
- Roketsan tarafından geliştirildi
- Bomba (*MK-81 ve MK-82*) vuruş kabiliyetini arttırıp sistemi akıllı hale getirecektir

Yerli üretim projeleri, dışa bağımlılığı azalttığı gibi, ortaya konulan ürünlerin ihracatı ile milli gelire de büyük oranda katkı sağlamaktadır. Bu durum yerli üretim pazar payını arttırmakla birlikte, bu alanlarda gerçekleştirilen AR-GE çalışmalarının da önem kazanmasını sağlamıştır. Söz konusu çalışmalarda üretim maliyetini düşürmek, daha yüksek verim elde etmek, ergonomiyi arttırmak, hedef kitlesini genişletmek, ürün ömrünü uzatmak, bakım periyodunu/maliyetini en aza indirmek gibi temel noktalar dikkate alınmaktadır. Bununla birlikte, sisteme etkiyen bozucu etkinin giderilmesinden ziyade, bu etkinin henüz oluşmadan önce algılanıp, sistemin çalışması üzerinde olumsuz etki yapmasına izin vermemek gerekir. Kısaca riskin probleme dönüşmeden önce önlenmesi olarak özetlenebilecek bu durum, literatürde genel olarak “Sağlık İzleme (*HM, Health Monitoring*)” başlığı altında ele alınmaktadır. Sağlık izleme konusu pek çok alana uygulanabildiği gibi araç motorlarına da uygulanabilmektedir. Bu konu literatürde ise “Motor Sağlığı İzleme (*EHM, Engine Health Monitoring*)” ya da “Motor Sağlığı Yönetimi (*EHM, Engine Health Management*)” şeklinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez kapsamında ele alınan uçak motorları genel bir sistem olarak değerlendirildiğinde, ilk çalıştırma, yakıt, yağlama, ateşleme, hava, gösterge gibi birçok alt sistemden oluştuğu görülmektedir. Söz konusu her sistemin kendisine

özgü çeşitli performans kriterleri bulunmaktadır. Bu performans kriterlerinin belirli sınırlar dahilinde işlemesi ise güvenilir çalışma koşullarının sağlanması anlamına gelmektedir. Bu yüzden, EHM kapsamında gerçekleştirilen alt ve üst sınırların aşılmasını önleyici yaklaşımlar son derece önem teşkil etmektedir. Literatüre bakıldığında ise bu alana dair kapsamlı çalışmaların yer aldığı görülmektedir.

Duffy, 2004 yılında motor sağlığı yönetimine dair gerçekleştirdiği çalışmasında jet motoru hareketli aksamaları için yerleşik (*onboard*) gerçek zamanlı izleme konusunu ele almıştır. Söz konusu aksamlara dair kalan faydalı ömür hesaplamalarında son derece başarılı olduğunu vurgulamaktadır [1].

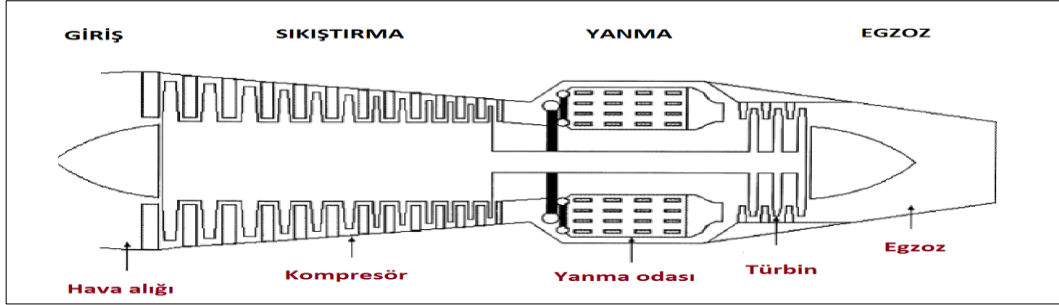
Byer, 2002 yılında Prognostikler ve Sağlık Yönetimine (*PHM, Prognostics and Health Management*) dair gerçekleştirdiği çalışmasında PHM teknolojilerinin uçak motoruna dair maliyet/fayda (*cost-benefit*) analizlerindeki etkinliği konusunu ele almıştır [2].

Galbreath ve arkadaşları, 2009 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında donanma uçaklarında kullanılan entegre yapısal sağlık izleme ve raporlama sistemlerinin geliştirilmesini ele almışlardır. Çeşitli algılayıcılarda alınan verileri senkronize etme ve kaydetme kabiliyetlerine sahip, tam programlanabilir, çok amaçlı bir sistemin geliştirilmesi ve test edilmesi üzerine odaklanmışlardır [3].

Yaşar ve arkadaşlarının 2005 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında, gaz türbinli uçak motorlarının sağlık yönetimi ile ilgili olarak yavaş zamanlı anomalileri tespit eden çeşitli algoritmaların karşılaştırılması konusunu ele almışlardır [4].

EHM kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışmasında ise, küçük bir İHA turbojet motorunda meydana gelebilecek problemleri (*limit aşımı/düşümü*), henüz oluşmadan önce tespit etme konusu incelenmiştir. Bu amaçla motora ait çeşitli performans parametreleri (*EGT, ön ve arka yatak sıcaklığı*) izlenmiştir. Veri tabanlı (*data-driven*) yaklaşım çerçevesinde gerçekleştirilen analizlerde, EGT parametresi temel alınarak, geleceğe dair veri tahminleri (*prediction*) yapılmış ve orijinal test verileri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tahminlerin tutarlı yani olası limit aşımı durumlarını önceden tespit edilebildiğini göstermektedir. Bu sayede motorun istenmeyen koşullar altında çalışması önlenmiştir.

2. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR



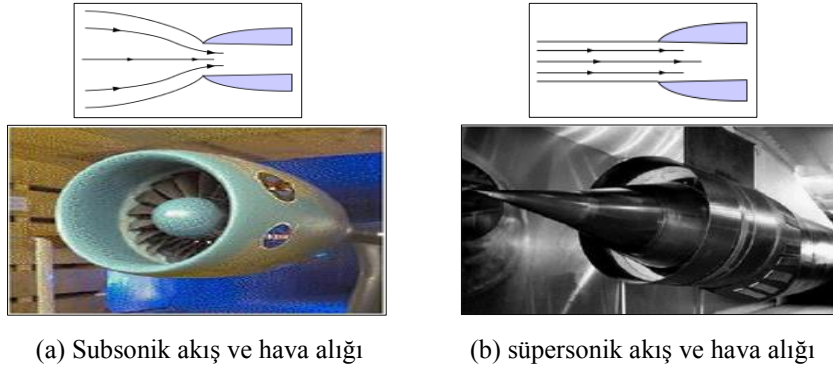
Şekil 2.1. GTM temel bölümleri ve bileşenleri [5]

Temelleri 1900'lü yıllarda atılan gaz türbinli motorlar (*GTM*), genel olarak hava solunmalı sistemler olarak nitelendirilmektedirler. Çalışma mantığı göz önüne alındığında ise, ısı enerjisinin mekanik enerjiye çevrildiği sistemler olarak tanımlanabilmektedirler. Hareketi sağlayacak itki kuvvetinin üretilmesini sağlayan motor; giriş, sıkıştırma, yanma ve egzoz olmak üzere 4 ana bölümde incelenebilmektedir (Bkz. Şekil 2.1.). Her bölümde görev alan temel elemanlar ise, *GTM*'nin temel bileşenlerini oluşturmaktadır.

2.1. Gaz Türbinli Motorların Bileşenleri

2.1.1. Hava alığı (Inlet, Giriş)

Atmosferden alınan havanın, momentumunun düşürülüp basıncının arttırıldığı temel bileşendir. Bu kısımda dinamik hava basıncı, statik hava basıncına çevrilir. Akış üzerinde termodinamiksel olarak herhangi bir iş yapılmaz. Bu nedenle, toplam sıcaklık değerinde bir değişim gözlenmez. Öte yandan basınç, zaman içerisinde değişken bir durum sergiler. Bundan dolayı, hava alığı performans hesaplarında, hava alığı çıkış basıncının giriş basıncına oranı olan ve "total pressure recovery" olarak isimlendirilen değer referans alınır. Hava alığı şekli, alığa giren hava akışı debisi, uçak uçuş hızı, uçak manevraları gibi faktörler söz konusu referans değer üzerinde son derece etkili parametrelerdir [6].



Şekil 2.2. Hava hızlarına göre akış çizgileri ve inlet tasarımları [6, 7]

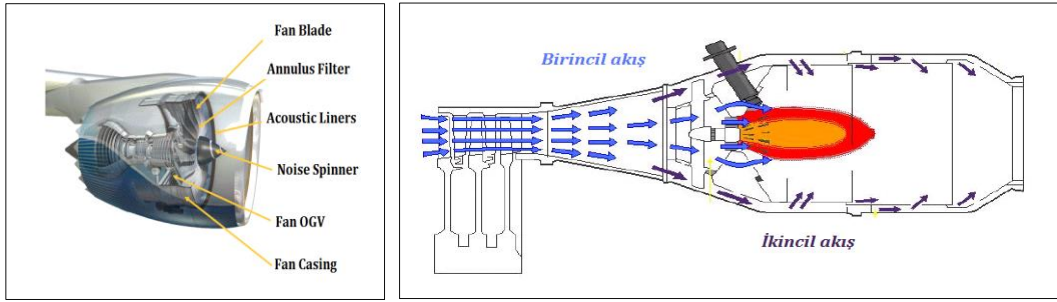
Hava alığı bir çeşit difüzör olarak görev yapar. Bu sayede, fan ve kompresörde yüksek verim eldesi için havanın uygun koşullara getirilmesini sağlamış olur [5]. Çok çeşitli tasarımları bulunmakla birlikte, uçuş hızlarına göre tasarlanmış olan türleri de bulunmaktadır (Bkz. Şekil 2.2.).

2.1.2. Fan

GTM'lerin sıkıştırma bölümünün iki temel bileşeninden birisi olan fan, genellikle kompresörün bir parçası olarak kabul edilir (Bkz. Şekil 2.3.a.). Kompresör çıkışında yüksek sıcaklıktaki havaya maruz kalmaması için genellikle kompresörün ön kısmında kullanılır ve üzerinden geçen havanın ivmelendirilmesini sağlar.

Fan içerisindeki hava akışı, birincil (% 20-30) ve ikincil (% 70-80) olmak üzere ikiye ayrılır (Bkz. Şekil 2.3.b.). Birincil hava akışı, motor içine girerek yanma olayına katılır ve sıcak olarak dışarı atılır. Fanın dönmesi için gerekli enerjinin üretilmesini sağlar. İkincil hava akışı ise yanma olayına katılmayıp soğuk bir şekilde dışarı atılan ve ana itki üretimini sağlayan hava akışıdır.

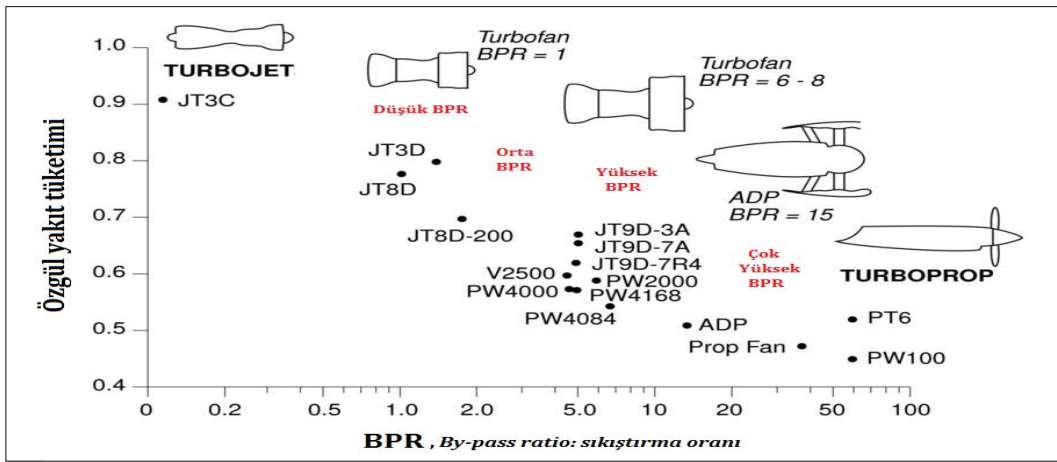
Birincil hava akışının ikincil hava akışına oranı “*by-pass*” oranı olarak tanımlanır ve bu oran arttıkça, motor özgül yakıt sarfiyatı da azalır (Bkz. Şekil 2.4.). Oranın artması, ikincil hava akışının, yanmamış hava miktarının, dışarı atılan soğuk hava miktarının ve üretilen itkinin artması anlamına gelirken; aynı zamanda gürültü ve yakıt tüketiminin azaldığı anlamına da gelmektedir. İhtiyaca göre çeşitli *by-pass* oranlarında motorlar tasarlanabilmektedir (Bkz. Çizelge 2.1.).



(a) Fan bölümleri [8]

(b) Fan içerisindeki hava akışları [9]

Şekil 2.3. Fan ve içerisindeki hava akışları



Şekil 2.4. BPR'ye göre özgül yakıt tüketimi [10]

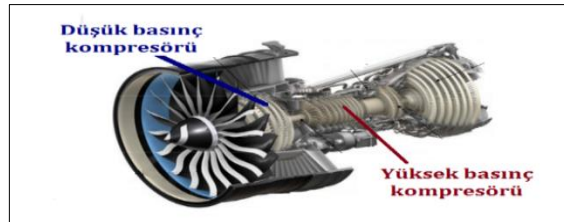
Çizelge 2.1. Çeşitli motor by-pass oranları [11]

Motor	Kullanım yeri	Bypass oranı
Pratt & Whitney F100	F-16, F-15	0.36:1
Eurojet EJ200	Typhoon	0.4:1
Rolls-Royce Tay	Gulfstream IV, F70, F100	3.1:1
PowerJet SaM146	SJ 100	4.43:1
Pratt & Whitney PW2000	757, C-17	5.9:1
General Electric GENx	747-8, 787	8.5:1
Rolls-Royce Trent 1000	787	10:1
PT6 / PW100 (turboprop) ^[2]	Beechcraft Super King Air / ATR 72	50-60:1

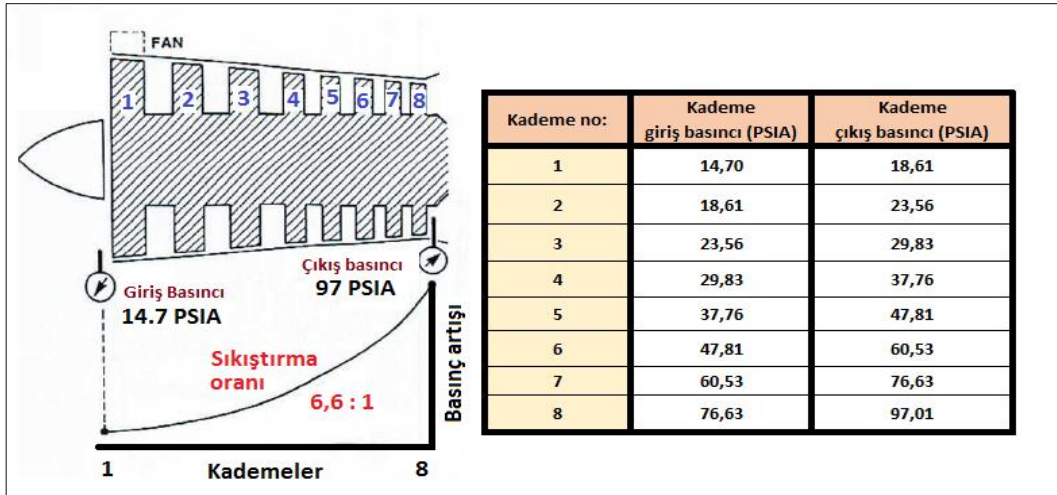
2.1.3. Kompresör

Kompresör, GTM sıkıştırma bölümünün ikinci temel bileşenidir. Fandan gelen havayı sıkıştırır. Bunun sonucunda basıncı, yanma olayının yüksek verimle gerçekleşmesi için gerekli olan değere ulaştırır. Kompresörde, sıkıştırılan gazın hacminin küçülmesiyle birlikte sıcaklığında artış gözlenir. Bu noktada, ulaşılabilecek en yüksek basıncın, en düşük sıcaklık artışına sebebiyet vermesi, kompresör veriminin yüksek olması şeklinde tanımlanabilmektedir. Öte yandan kompresör çıkış basıncının giriş basıncına oranı olarak ifade edilen sıkıştırma oranı da, özellikle yüksek irtifa (*düşük ortam sıcaklığı*) uygulamalarında dikkate alınan bir başka verim ifadesidir. Ön ve arka olmak üzere iki bölümde incelenebilen kompresörde, önden arkaya doğru basınç artışı söz konusudur. Bu bağlamda ön kompresör düşük basınçlı (*low pressure*), arka kompresör ise yüksek basınçlı (*high pressure*) kompresör olarak adlandırılmaktadır [12] (Bkz. Şekil 2.5.).

Temel olarak aksel akışlı (*axial flow*) ve santrifüj akışlı (*centrifugal flow*) olmak üzere iki çeşit kompresör türü bulunmaktadır. Akış; aksel akışlı kompresörlerde dönme eksenine paralel doğrultuda, santrifüj akışlılarda ise dik olarak ilerler. İki kompresör türü arasındaki en önemli farklardan biri kademe sayıdır. Bununla birlikte, söz konusu sayılar kompresör sıkıştırma oranı ile de doğru orantılıdır. Aksel akışlı kompresörler, birden fazla kademedan oluşabildiği için, yüksek sıkıştırma oranları elde edilebilmektedir [13] (Bkz. Şekil 2.6.). Bu özellikleri sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedirler. Santrifüj akışlı kompresörler ise bir iki kademedan oluşabilmektedir. Bundan dolayı yüksek sıkıştırma oranları elde edilememektedir. Her iki kompresör türü de genellikle türbin şaftına doğrudan bağlı olduklarından, hareket enerjilerini türbinden sağlamaktadırlar [9, 14].



Şekil 2.5. Düşük/yüksek basınç kompresörü [12]



Şekil 2.6. Kompresör kademelerine göre basınç değerleri [13]

Kompresörün akış basıncını artırma miktarı, “kompresör basınç oranı (CPR: compressor pressure ratio)” parametresi ile belirlenir. Bu parametre, kompresör toplam çıkış basıncının, giriş basıncına oranlanması ile elde edilir (NASA terminal numaralarına göre, (2.1)). Söz konusu basınç artışı için kompresör, akış üzerinde iş yapar. Birim akış kütlesi başına yapılan iş, kompresör giriş-çıkışı arasındaki özgül entalpi değişimi olarak tanımlanmaktadır ve “CW” ile simgelenmektedir. İlgili hesaplamalar Şekil 2.7.’de gösterilmektedir [15].

$$CPR = p_{t3} / p_{t2} \quad (2.1)$$

Motor temel bileşenlerinden olan yanma odası, kompresörden sonra gelen kısımda yer almaktadır. Bu nedenle, kompresörde sıkıştırılarak hacmi azaltılmış, basıncı ve sıcaklığı artırılmış olan hava, buradan yanma odasına iletilir.

Kompresör basınç oranı (CPR)

$$CPR = \frac{p_{t3}}{p_{t2}} = \left(\frac{T_{t3}}{T_{t2}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

İş / birim akış kütlesi (CW)

$$CW = (h_{t3} - h_{t2})$$

$$CW = c_p (T_{t3} - T_{t2})$$

$$CW = \frac{c_p T_{t2}}{\eta_c} (CPR)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Terminal 2 : Kompresör girişi
Terminal 3 : Kompresör çıkışı

pt : Toplam basınç
Tt : Toplam sıcaklık

ht : Özgül entalpi
cv : Özgül ısı

γ : Özgül ısı oranı
ηc : Adyabatik verim

Şekil 2.7. Kompresör basınç oranı ve birim akış kütlesi başına iş hesabı [15]

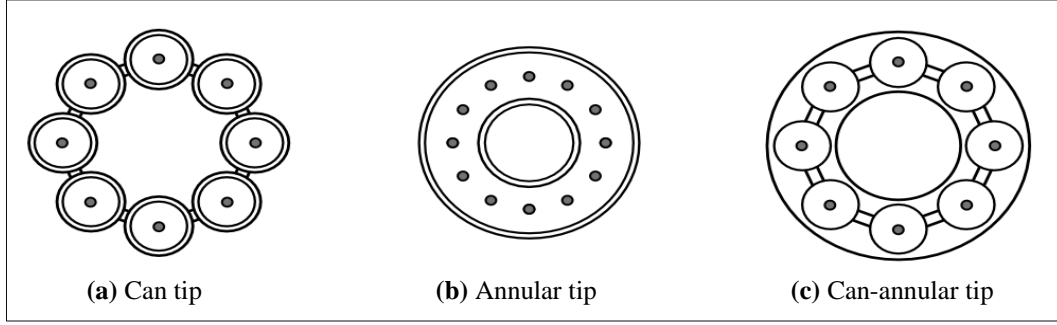
2.1.4. Yanma odası

Motor yakıtının, kompresörden gelen yüksek basınçlı hava (*birincil akış*) ile çeşitli oranlarda karıştırılarak yanma işlemine tabi tutulduğu motor bileşenidir. Karışım, hava-yakıt temas oranının artırılması için, yakıtın çok küçük ebatlarda havaya püskürtülmesiyle sağlanmaktadır. Yanma işlemi sonucunda açığa çıkan yüksek sıcaklıktaki egzoz gazları, güç türbininin döndürülmesinde ve itkinin üretilmesinde kullanılmaktadırlar.

Mevcut yakıtın tamamını yakabilecek miktarda hava kullanılması durumu, “*tam yanma olayı*” olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca bu durum, egzoz gazları çıkış sıcaklıklarının maksimum değere ulaştığı anlamına gelmektedir. Söz konusu yüksek sıcaklıklara dayanabilecek malzemelerin seçimi, egzoz tasarımları açısından pek çok dezavantaj barındırmaktadır. Bu nedenle, tam yanma olayı her ne kadar olumlu bir durum gibi gözükse de, istenmeyen bir süreçtir ve gerçekleşmemesi için çeşitli önlemler alınmaktadır. Söz konusu önlemler arasında, tam yanma için gerekli hava miktarından daha fazla havanın kullanılması ve yanma odası çıkışında soğutma işlemleri yer almaktadır. Yanma odası ile ilgili bir başka önemli nokta ise, bileşene giren hava akışının hızı ile ilgilidir. Hava akış hızı, alevin sönmesine (*flame-out*) neden olacak kadar düşük veya bu alevi yanma odası dışına taşıracak (*blow-out*) kadar yüksek hızda olmamalıdır. Yanma olayında kullanılan kimyasalların ısı enerjisine dönüşme miktarı, “*yanma verimi*” olarak tanımlanabilmektedir. Bununla birlikte, bu verim performans hesapları açısından büyük önem taşımaktadır. Ayrıca yanma olayının ideal şartlarda ve sabit basınçta gerçekleştiği kabul edilir. Fakat uygulamalarda basınç azalması meydana geldiği tespit edilmektedir. Bu basınç düşüşünün azlığı, bir başka yanma verimi göstergesidir [16, 17].

Can, annular ve can-annular olmak üzere üç temel yanma odası çeşidi mevcuttur. Bununla birlikte, günümüzde kullanım kriterlerine göre çok çeşitli tasarımlar gerçekleştirilmektedir [18] (Bkz. Şekil 2.8.).

Birbirinden bağımsız yanma odalarından oluşan can (*odacık*) tipi, yapısal olarak kararlı ve bakımı son derece kolaydır. Öte yandan bu tipte, her oda çıkışındaki egzoz gazı çıkış hızları farklı olabilmektedir. Bu durum türbin

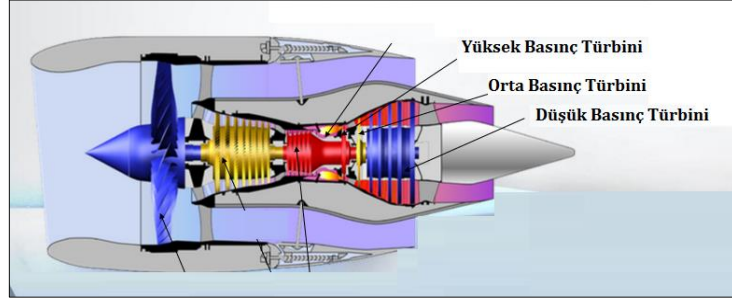


Şekil 2.8. Yanma odası çeşitleri [18]

kararlılığı açısından olumsuz durumlar oluşturabilmektedir. Ayrıca diğer tiplere göre geniş alan kaplaması ise bir başka olumsuz özelliğidir. Annular tip yanma odaları, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Motor şaftını saracak şekilde yerleştirilmektedir. Can tip ile kıyaslandığında daha küçük çaplı, hafif, daha düşük basınç kaybı, daha düşük soğutma havası ihtiyacı, daha büyük yanma hacmi, daha yüksek yanma verimi ve daha dumansız yanma gibi olumlu özellikleri öne çıkmaktadır. Öte yandan üretim/bakım maliyetinin yüksek olması, söküm/montaj işlemlerinin zor ve zaman alıcı olması olumsuz özellikleri arasında yer almaktadır. Can-annular tip ise, her iki tipe ait olumlu özelliklerin bir arada bulunduğu fakat aerodinamik kayıpların yüksek olduğu bir çeşittir. Her ne çeşit kullanılırsa kullanılsın, minimum basınç kaybı, düşük alev sönme riski ve yüksek yanma verimi, yanma odaları için istenen önemli özellikler arasındadır. Bu özelliklerin sağlanması, bileşenin bağlı bulunduğu türbinin verimi açısından son derece önemlidir [9, 16].

2.1.5. Türbin

Türbin, yanma odasından gelen yüksek sıcaklıktaki gazların ısı enerjisini, mekanik enerjiye çeviren bileşendir. Kompresörlerde olduğu gibi, çeşitli kademelerden, düşük ve yüksek basınç bölümlerinden oluşabilmektedir [19] (Bkz. Şekil 2.9.). Bu bileşende öncelikle, yanma odasından gelen gaz akışının hızı artırılır. Böylece statik basıncı düşürülmüş olur. Daha sonra yüksek hızlı akış, türbin hareketli bileşenlerine çarptırılarak, dönüş için gerekli tork üretilir.



Şekil 2.9. Düşük/yüksek basınç türbini [19]

Türbinde üretilen iş, türbin giriş ve çıkış sıcaklığı arasındaki fark ile doğru orantılıdır. Bu nedenle bu sıcaklık değerleri, performans hesaplamaları açısından son derece önemlidir. Öte yandan üretilen enerji; kompresör, pervane, pompa ve jeneratör gibi ünitelerin çalıştırılmasında ve çeşitli kısımların soğutulmasında kullanılmaktadır [9, 16].

Akış türbin içerisinde ilerlerken, toplam basıncında ve sıcaklığında azalma meydana gelir. Basınç değerindeki azalma, türbin çıkış basıncının giriş basıncına oranı olan “türbin basınç oranı (TPR, Turbine Pressure Ratio)” ile hesaplanmaktadır. NASA terminal numaralarına göre TPR değeri, (2.2) ile ifade edilmektedir. Kompresördeki tanımlamaya benzer şekilde, birim kütle başına iş değeri, türbin için “ TW ” ile simgelenmektedir [20] (Bkz. Şekil 2.10.).

$$TPR = p_{t5} / p_{t4} \quad (2.2)$$

<p>Türbin basınç oranı (TPR)</p> $TPR = \frac{p_{t5}}{p_{t4}} = \left(\frac{T_{t5}}{T_{t4}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$	<p>İş / birim akış kütlesi (TW)</p> $TW = (h_{t4} - h_{t5})$ $TW = c_p (T_{t4} - T_{t5})$		
<div style="border: 1px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> $TW = \eta_t c_p T_{t4} (1 - TPR^{(\gamma-1)/\gamma})$ </div>			
Terminal 4 : Türbin girişi Terminal 5 : Türbin çıkışı	<p>pt : Toplam basınç Tt : Toplam sıcaklık</p>	<p>ht : Özgül entalpi c_p : Özgül ısı</p>	<p>γ : Özgül ısı oranı η_t : Adyabatik verim</p>

Şekil 2.10. Türbin basınç oranı ve birim akış kütlesi başına iş hesabı [20]

2.1.6. Egzoz

Kimyasal enerjinin itkiye çevrildiği bileşen olan egzoz, sürtünme kayıplarına neden olabilecek düzeydeki gaz hızlarını difüze ederek verimin artmasına katkı sağlar. Bununla birlikte, türbinden gelen gazların yüksek hızlarda dışarı atılmasını sağlar. Söz konusu yüksek gaz çıkış hızı, motorun giriş ve çıkış momentumu arasında büyük fark oluşmasına sebebiyet verir. Bu fark, Newton'un 2. Yasası gereği itkinin üretilmesini sağlar [21].

Egzoz bileşeninde akış üzerinde termodinamik olarak iş yapılmamaktadır. Bu nedenle bileşen boyunca toplam sıcaklık değeri sabit kalmaktadır. Bu durum NASA terminal numaralarına göre, egzoz giriş sıcaklığı T_{t5} , çıkış sıcaklığı T_{t8} olmak üzere, (2.3) ile ifade edilmektedir [22].

$$T_{t8} / T_{t5} = 1 \quad (2.3)$$

Egzoz boyunca sabit olan toplam sıcaklık değeri; diğer tüm motor bileşenleri ile ilişkili olan “motor sıcaklık oranı (*ETR, Engine Temperature Ratio*)” ile hesaplanabilmektedir. ETR değeri; kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz sıcaklık oranlarının çarpımı ile elde edilmektedir [23] (Bkz. Şekil 2.11.).

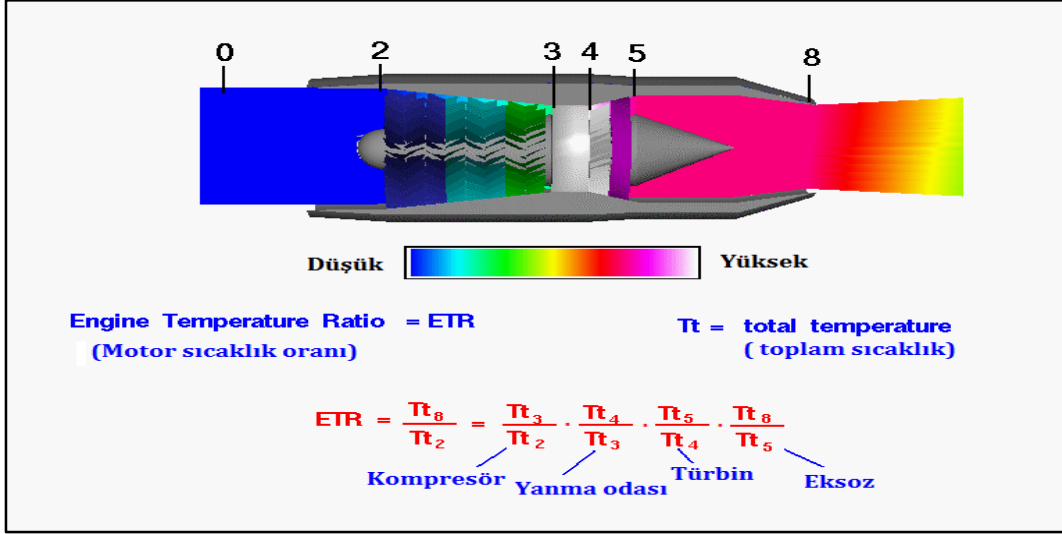
Egzoz bileşeni boyunca, toplam sıcaklıkta olduğu gibi toplam basınç değeri de sabit kalmaktadır. Bu durum NASA terminal numaralarına göre, egzoz giriş basıncı p_{t5} , çıkış basıncı p_{t8} olmak üzere, (2.4) ile ifade edilmektedir.

$$p_{t8} / p_{t5} = 1 \quad (2.4)$$

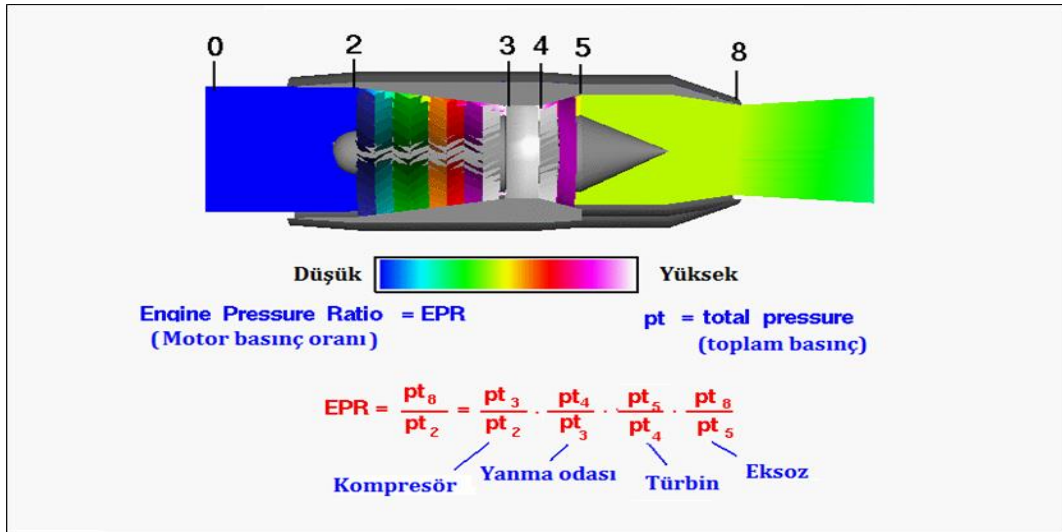
Egzoz toplam basıncının, statik basınca ($p_8=p_0$) oranı olarak ifade edilen “egzoz basınç oranı (*NPR, Nozzle Pressure Ratio*)”, verim ifadeleri açısından önemli bir diğer parametredir. Bu oran, NASA terminal numaralarına göre, (2.5) ile ifade edilmektedir [22].

$$NPR = p_{t8} / p_8 = p_{t8} / p_0 \quad (2.5)$$

Egzoz basınç oranı içerisindeki statik basınç, serbest akış statik basıncıdır. Egzoz toplam basıncı ise, serbest akış koşulları ile diğer tüm motor bileşenlerinin basınç oranlarına bağlı olan “motor basınç oranı (*EPR, Engine Pressure Ratio*)” ile hesaplanabilmektedir [24] (Bkz. Şekil 2.12.).



Şekil 2.11. Motor sıcaklık oranı [23]



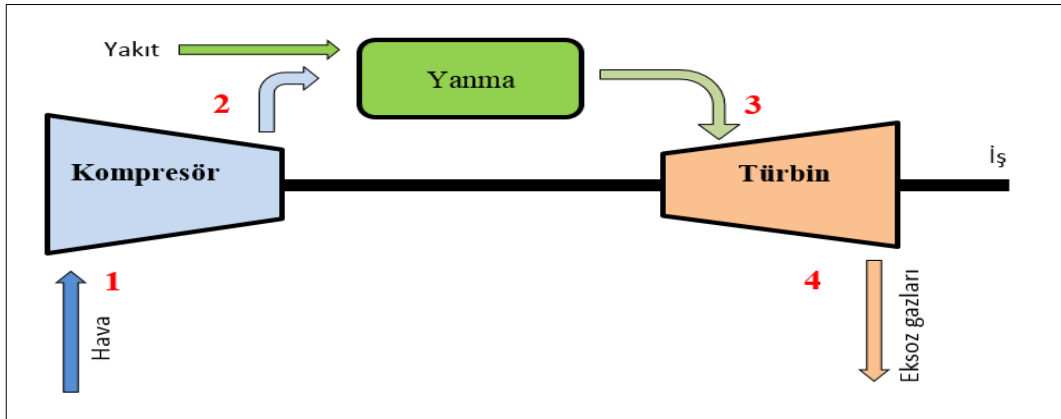
Şekil 2.12. Motor basınç oranı [24]

Motor bir bütün olarak düşünüldüğünde hareketi sağlayacak itici gücün üretilmesi için GTM içerisinde sırasıyla; atmosferden havanın alınması, alınan havanın sıkıştırılması, sıkıştırılmış havanın yakıt ile karıştırılıp yakılması ve oluşan egzoz gazlarının dışarı atılması işlemleri belirli bir çevrim içerisinde gerçekleşir. Söz konusu bu süreç, literatüre 19. yy'da kazandırılan *Bryton Çevrimi* ile açıklanmaktadır.

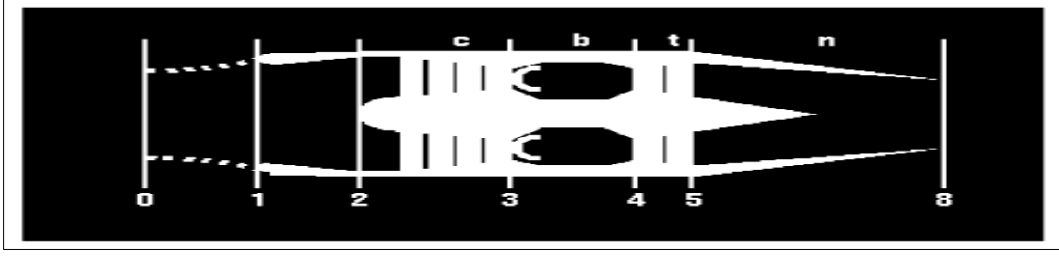
2.2. Brayton Çevrimi

1872 yılında literatüre kazandırılan Brayton çevrimi, gaz türbinli makinelerin çalışma prensibinin temelini oluşturur. Termodinamikte ideal GTM güç çevrimleri için kullanılan bir model çeşididir [25]. Bu çevrimde, kompresöre giren havanın basınçlandırılması (*izentropik olay*), basınçlı havanın yanma odasında yakıt ile karıştırılması (*sabit basınçta*), hava yakıt karışımının alev alması, açığa çıkan enerji ile türbinde iş üretilmesi ve üretilen işin bir kısmının mil aracılığı ile kompresöre iletilmesi aşamaları, sırası ile gerçekleşmektedir [16] (Bkz. Şekil 2.13.). Brayton çevrimindeki terminaller arasındaki olaylar incelendiğinde 1-2 terminalleri arasında izentropik sıkıştırma; 2-3 terminalleri arasında sabit basınçta sisteme ısı girişi; 3-4 terminalleri arasında izentropik genişleme ve 4-1 terminalleri arasında ise sabit basınçta ısı çıkışı aşamalarının gerçekleştiği görülmektedir. Söz konusu aşamalar p-V ve T-s diyagramları ile ifade edilmektedir [16, 26].

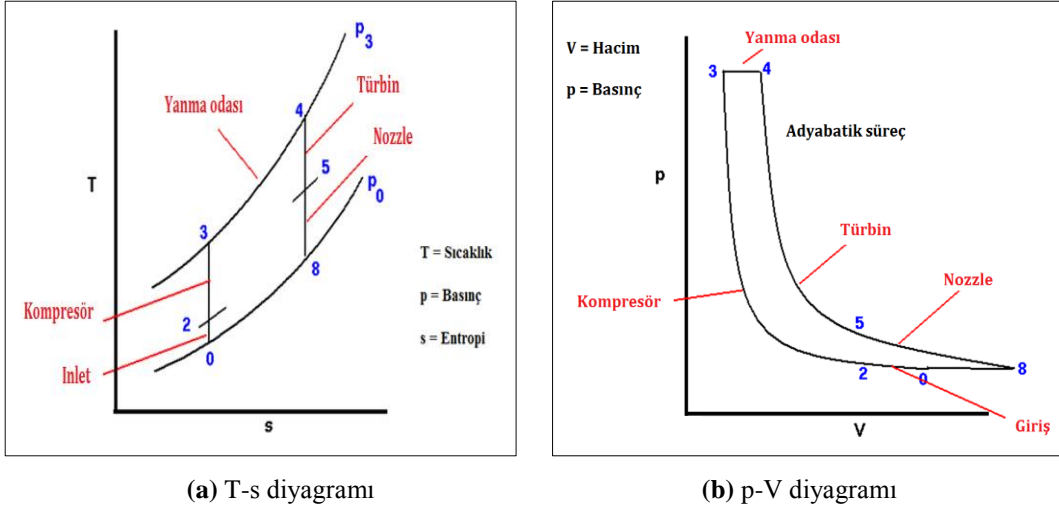
Brayton çevrimi kapsamındaki analizler GTM'in termodinamik performanslarının tayini için kullanılmaktadır. GTM bileşenleri numaralandırılarak ilgili terminallere özgü analizler gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.14.'te NASA'ya ait numaralandırma [27], Şekil 2.15.'te ise bu numaralandırmaya özgü Brayton çevrimi için T-s ve p-V diyagramları gösterilmektedir [28].



Şekil 2.13. Brayton çevrimi [16]



Şekil 2.14. NASA turbojet motor terminal numaraları [27]



(a) T-s diyagramı

(b) p-V diyagramı

Şekil 2.15. NASA Brayton çevrimi diyagramları [28]

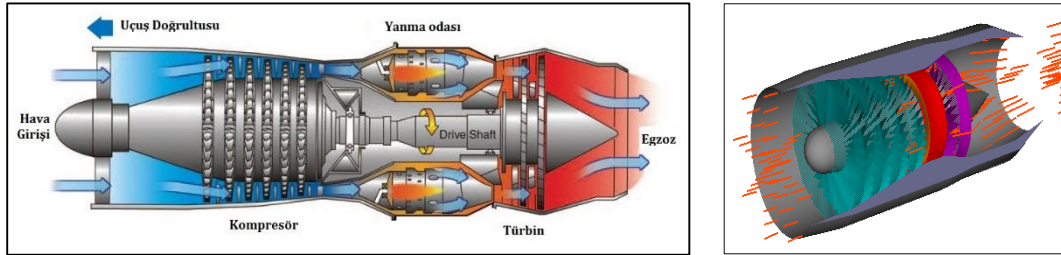
İlk terminal numarası (TN) olan 0, serbest hava akışı koşullarını ifade etmektedir. TN 1-2 arasında, serbest hava akış hızının, kompresöre uygun hale gelmesi için yavaşlatıldığı kısımdır. Seyahat halinde TN 1-2, yavaşça hava ile dolmaya başlar. Uçak hızının artışı ile yükselen enerjinin bir kısmı, biriken bu havanın statik basıncını artırır ve böylece hava sıkışır. TN 3'te iş yapılarak, hava akışının basınç ve sıcaklığı izantropik şekilde artırılır. TN 3-4 arasında ise sabit basınçta yanma işlemi gerçekleşir. Yanma sonucu açığa çıkan sıcak egzoz gazları, TN 4'ten TN 5'e doğru ilerler ve türbine ulaşır. Burada iş üretilerek, mevcut egzoz gazları TN 8'den dış ortama salınır. Sonuç olarak gaz akış koşulları, dış ortam koşullarına dönüşmüş olur [28].

2.3. GTM Çeşitleri ve Karakteristikleri

Gaz türbinli motorlar; turbojet, turbofan, turboprop ve turboşaft olmak üzere 4 temel çeşide sahiptir. İtki üretim türüne göre turbojet ve turbofan; tork üretim süreçlerine göre ise turboprop ve turboşaft olarak gruplandırmak mümkündür. Motor tiplerine, karakteristiklerine ve itki denklemleri ile akış/basınç/sıcaklık diyagramlarını içeren şekillere aşağıda yer verilmiştir [13, 29] (Bkz. Şekil 2.16.-25.).

Turbojet motorlar (Bkz. Şekil 2.16.a.):

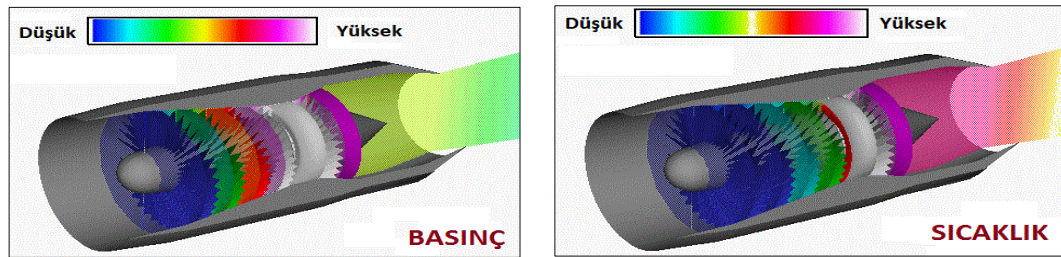
- Gaz türbinli motor mantığının kullanıldığı ilk motor tipidir.
- Hava akışının tamamı motor içerisine girer.
- Tüm itki, egzoz gazlarından üretilir.
- Uçuş hızı azaldıkça, üretilen itki miktarı da azalır.
- Kalkış mesafesi diğer motor tiplerine göre daha fazladır.
- Düşük uçuş hızlarında yüksek özgül yakıt tüketimine sahiptir.
- Diğer GTM tiplerine göre daha gürültülüdür.
- Ekonomik değildir.



(a) Motor şekli [29]

(b) Hava/gaz akışı [30]

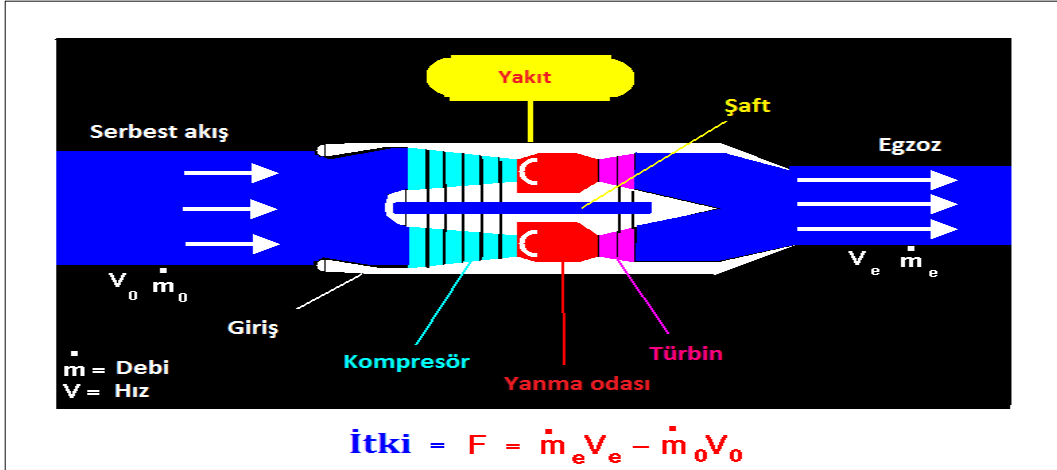
Şekil 2.16. Turbojet motor



(a) Basınç diyagramı [31]

(b) Sıcaklık diyagramı [32]

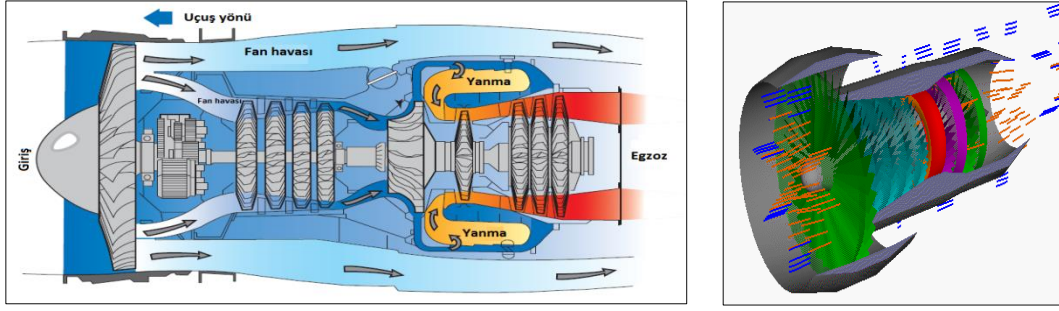
Şekil 2.17. Turbojet motor basınç ve sıcaklık diyagramları



Şekil 2.18. Turbojet motor itki ifadesi [33]

Turbofan motorlar (Bkz. Şekil 2.19.a.):

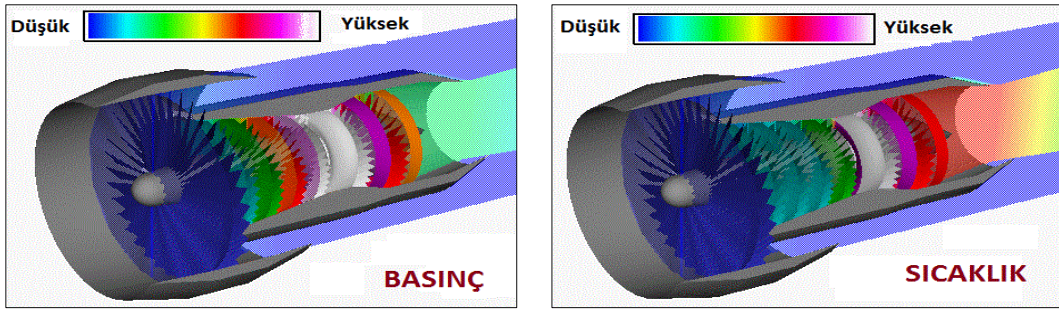
- Turbojet motorun, fan eklenmiş halidir.
- Motora giren hava akışı birincil ve ikincil olmak üzere ikiye ayrılır.
- Birincil hava akışı, motorun içine girerek yanma olayına katılır ve itki üretimi sağlar.
- İkincil hava akışı, yanma olayına katılmadan itki üretimi sağlar ve soğutucu olarak da kullanılır.
- Uçuş hızı arttıkça itki de artar.
- Özgül yakıt tüketimi turbojet motorlardan daha düşüktür.
- Gürültü seviyesi turbojet motora göre daha düşüktür.
- Turbojet motora göre hem daha büyük uçaklarda kullanılabilir hem de daha ekonomiktir.
- Sivil uçaklarda kullanılan turbofan motorlar by-pass oranlarına göre düşük, orta ve yüksek olarak sınıflandırılabilirler [16, 29].
- Fan motora çeşitli şekillerde monte edilebilir. İlk olarak kompresörün ön kısmında, ikinci olarak kompresöre devir düşürücü dişliler vasıtasıyla bağlanmış şekilde, üçüncü olarak bağımsız türbin çarkı aracılığıyla kompresörü döndürecek şekilde ve son olarak türbin içerisinde olmak üzere, motorda çeşitli konumlarda bulunabilir. İlk üç konum ön fan, son konum ise arka fan olarak isimlendirilmektedir.



(a) Motor şekli [29]

(b) Hava/gaz akışı [34]

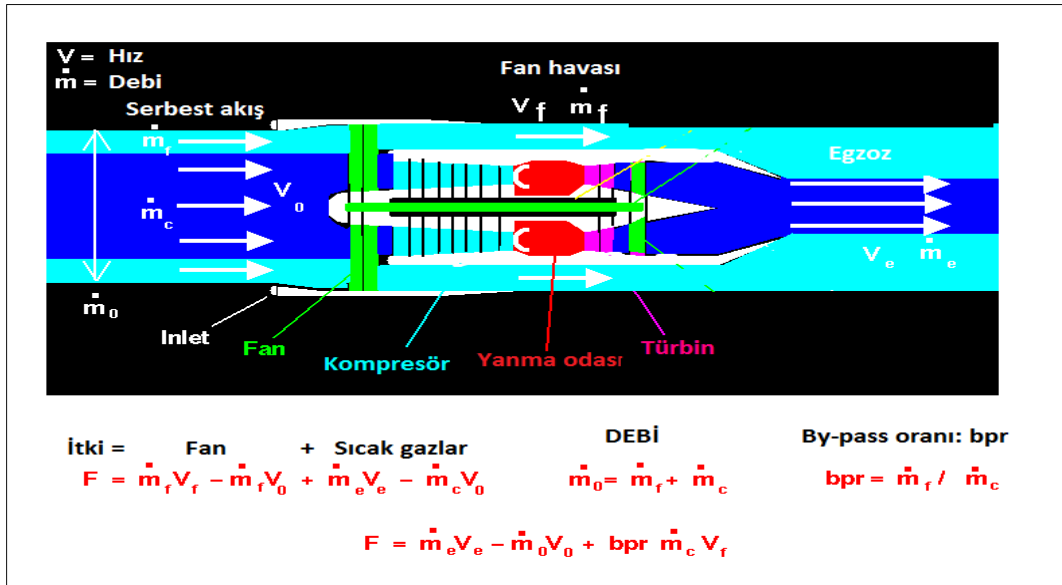
Şekil 2.19. Turbofan motor



(a) Basınç diyagramı [35]

(b) Sıcaklık diyagramı [36]

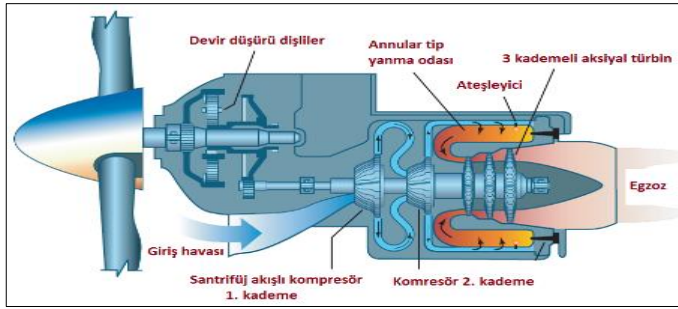
Şekil 2.20. Turbofan motor basınç ve sıcaklık diyagramları



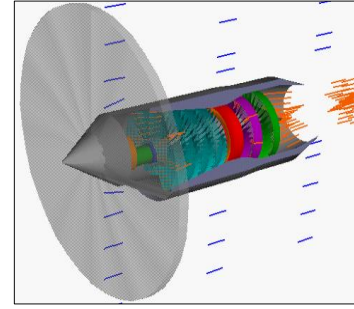
Şekil 2.21. Turbofan motor itki ifadesi [37]

Turboprop motorlar (Bkz. Şekil 2.22.a.):

- Üretilen güç, pervanenin döndürülmesinde kullanılır.
- Türbin ile kompresör arasında mekanik bağlantı bulunmamaktadır.
- Hem pervane hem de egzoz gazları ile çekiş gücü üretir.
- Uçuş hızının artışı, itki verimi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.
- Düşük uçuş hızlarında yüksek itkiye sahip olmasından dolayı kısa kalkış mesafelidir.
- Yüksek hızlarda, diğer GTM tiplerine göre sürtünme fazla olacağından üretilen güç azalır.
- Özgül yakıt tüketimi en düşük olan GTM çeşididir.

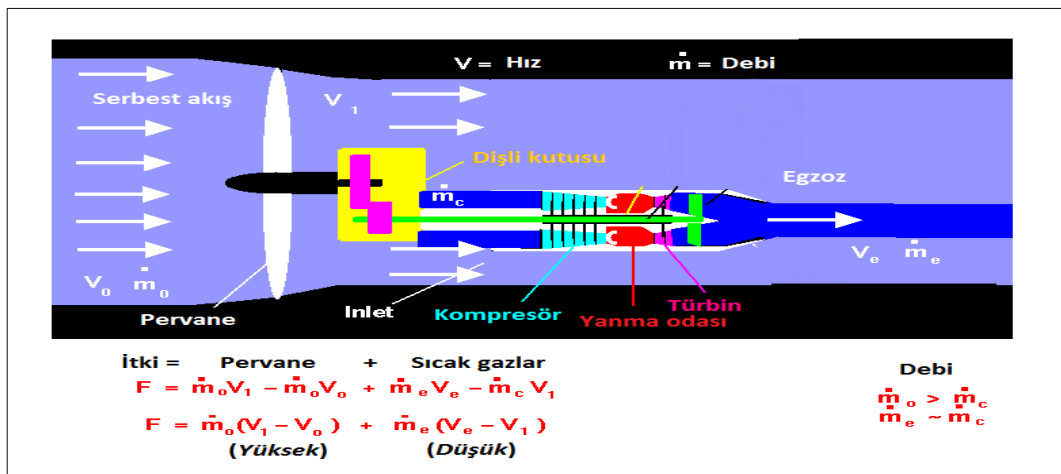


(a) Motor şekli [29]

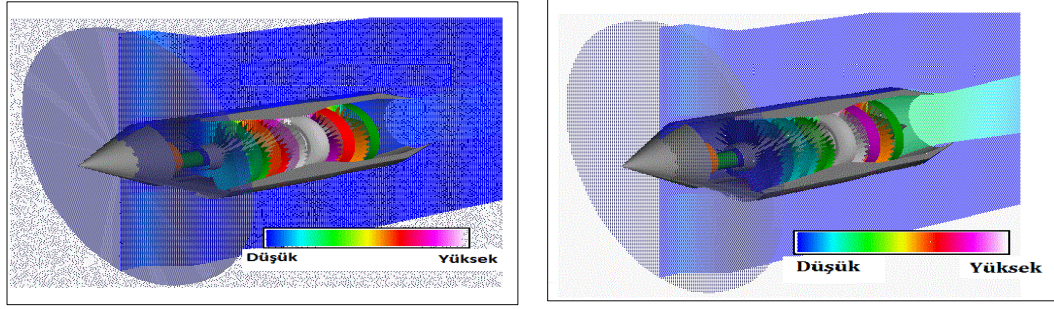


(b) Hava/gaz akışı [38]

Şekil 2.22. Turboprop motor



Şekil 2.23. Turboprop motor itki ifadesi [39]



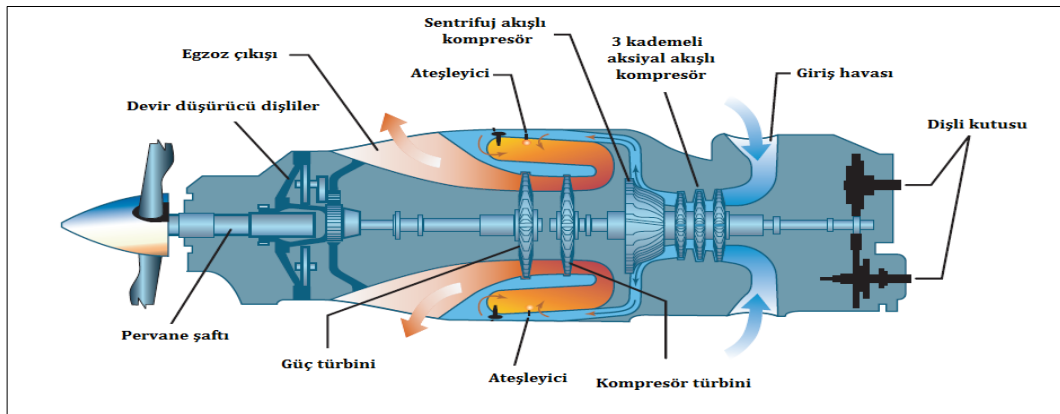
(a) Basınç diyagramı [40]

(b) Sıcaklık diyagramı [41]

Şekil 2.24. Turprop motor basınç ve sıcaklık diyagramları

Turboşaft motorlar (Bkz. Şekil 2.25.):

- GTM'a sahip helikopterlerde kullanılan motor tipi olarak tanımlanır.
- Yolcu uçaklarının APU (*yardımcı güç kaynağı*) kısmında da kullanılırlar.
- Gaz üretici ve güç türbini olmak üzere iki ana bölümden oluşur.
- Gaz üretici kısmı, güç türbini için gerekli enerjiyi üretir.
- Üretilen enerjinin çok büyük kısmı helikopter rotoru ve hareketli aksamların döndürülmesi için kullanılır. Bu nedenle itki üretimi yok denecek kadar azdır.
- Yapısında tek şaft barındıran Gear coupled (*direct drive*) ve yapısında birbirinden fiziksel olarak bağımsız iki şaft barındıran Gas coupled (*free turbine*) olmak üzere iki temel çeşidi bulunur [13, 29, 42].



Şekil 2.25. Turboşaft motor [29]

2.4. Motor Performansına Etki Eden Parametreler

Motor performansına etki eden parametreler genellikle itki ile ilişkilidir. Bu parametrelere kısaca değinilecek olursa [30].

İrtifa:

- İrtifa arttıkça basınç azalır ve dolayısıyla yoğunlukta azalır.
- İrtifa arttıkça sıcaklık azalır ve dolayısıyla yoğunluk artar.
- 36000ft altındaki irtifalarda, yoğunluk üzerinde, basınç sıcaklığa göre daha etkin olduğundan, irtifa arttıkça yoğunluk azalır. Söz konusu yoğunluk azalışı üretilen itkinin de azalmasına sebep olur.
- 36000ft üzerindeki irtifalarda, sıcaklık sabit ($\approx -56^{\circ}\text{C}$) olduğu için yoğunluk artışı durur. Bu nedenle üretilen itki hızla azalır.

RAM etkisi:

- Hava alığında, hava birikmesiyle meydana gelir.
- Uçuş hızının artmasıyla doğru orantılıdır.
- Biriken havanın hızı azalır, dolayısıyla basıncı artar.
- Hava alığında yüksek basınçlı hava akışı olması ise üretilen itkiyi artırır.

RPM etkisi:

- Kompresörün sıkıştırma oranı ile doğrudan ilişkilidir.
- RPM ile kütle akışının kontrolü sağlanır.
- Kütle akışının artması, üretilen itkinin de artmasını sağlar.
- Kütle akışı arttığında yakıt akışı da buna uygun şekilde artırılır.

Sıcaklık etkisi:

- Yüksek ortam sıcaklığında alığa giren havanın yoğunluğu düşük olur.
- Düşük yoğunluklu hava, itki üretiminin düşmesine sebep olur.
- Kalkış anında yüksek ortam sıcaklığından dolayı düşük itkinin üretilmesi; daha uzun kalkış mesafesi, daha düşük kalkış ağırlığı ve dolayısıyla daha düşük mali kazanç anlamına gelir.

Nem etkisi:

- Nem arttıkça, havanın yoğunluğu düşer.
- Düşük hava yoğunluğu, hava yakıt oranının azalmasına ve dolayısıyla da üretilen itki kuvvetinin azalmasına neden olur.

Su-buhar enjeksiyonu etkisi (Bkz. Çizelge 2.2.):

- Ortam sıcaklığının yüksek olması, hava yoğunluğunun azalmasına neden olur.
- Düşük hava yoğunluğu, üretilecek itkiyi azaltır. Bu etkinin giderilmesi için motorun çeşitli kısımlarında hava sıcaklığının düşürülmesi için püskürtme tabanlı soğutucular konumlandırılır.
- Kompresörde su-buhar enjeksiyonu yapıldığında kompresörün çıkış sıcaklığı düşer. Dolayısıyla harcayacağı enerji düşer. Böylece itki üretimi artar.
- Kompresörde uygulanacaksa düşük basınç kompresöründe yapıp, buranın çıkış basıncını yükseltmek daha uygun olur. Bu sayede yüksek basınç kompresörünün giriş basıncı arttırılmış olur. Bunun sonucunda kompresör çıkışındaki basıncın artması sağlanır. Artan çıkış basıncı, üretilen itki üzerinde olumlu etki yapar.
- Yanma odasında yapılan su-buhar enjeksiyonu, bu bölümden sonra gelen ekipmanların yüksek sıcaklıklara maruz kalmasını önleme amacı ile gerçekleştirilir.

Çizelge 2.2. Su-buhar enjeksiyonunun güç ve verim üzerindeki etkisi [43]

Türbin	Üretici	Güç (MWe)			Verim (%)		
		En.suz	En.lu	% artış	En.suz	En.lu	% artış
M1A-13CC	KAWASAKI Heavy Industries	1.30	2.40	84.6	22.30	33.70	51.1
501-KH	Allison Engine Company	4.90	6.80	38.8	31.50	39.90	26.7
LM1600 STIG	General Electric	13.00	17.00	30.8	35.50	39.50	11.3
LM2500 STIG	General Electric	22.80	28.10	23.2	36.80	41.00	11.4
LM5000 STIG	General Electric	34.50	51.60	49.6	37.20	43.80	17.7

3. İSTATİSTİKSEL VERİ ANALİZİ

İstatistiksel veri analizi genel olarak; verilerin amaca uygun bir şekilde toplanması, toplanan verilerin işlenmesi, işlenmiş verilerin uygun istatistiksel yöntemlerle analiz edilmesi ve analiz sonuçlarının yorumlanması olmak üzere dört temel aşamayı içeren yöntemler bütünü olarak tarif edilebilir [44]. Elde edilen verilerin çeşitli görsellerle özetlenmesi, sonuçların güvenilirliklerinin ortaya konulması, çeşitli genel geçer çıkarımların oluşturulabilmesi, değişkenler arasındaki ilişkilerin anlamlandırılması gibi süreçler ise analizlerin ara basamaklarına örnek teşkil etmektedir. Söz konusu aşamalar, uygulanacak sisteme, bu sistemden toplanacak olan verilerin içeriğine ve varılmak istenen hedeflere göre çok geniş bir yelpazede çeşitlilik göstermektedir.

Literatüre bakıldığında, EHM kapsamında pekçok farklı uygulama için istatistiksel analiz yöntemlerinin etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Veri kümesindeki ardışık örnekler arasındaki farkların hesaplanmasında “*Gradient Based Approach*” [45]; zaman serilerinin üretilmesinde “*Double Exponential Smoothing*” [45]; hata tespit ve tahmininde “*Self Organizing Maps*” [46]; regresyon parametrelerinin seçiminde “*Lasso Kriteri*” [47]; algılayıcı konumlarının belirlenmesinde “*Frobenius Metodu*” tercih edilen yöntemlerdendir. Bu tez kapsamında ise korelasyon ve regresyon analizleri, hareketli ortalamalar, en küçük kareler yöntemi ile t-testi istatistiksel analiz yöntemleri ele alınmıştır.

3.1. Korelasyon Analizi

Değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin derecesini ve yönünü ölçmek için kullanılan bir analiz yöntemidir. İlişkinin derecesi $[-1,+1]$ kapalı aralığında bulunan parametre ile ifade edilir [48]. \bar{x} ve \bar{y} , x ile y değerlerinin ortalamaları olmak üzere; korelasyon katsayısı (r), (3.1) ile hesaplanmaktadır [49].

$$r = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x-\bar{x})^2 \Sigma(y-\bar{y})^2}} \quad (3.1)$$

Çizelge 3.1. r ve ilişki derecesi

R	İlişki derecesi
$ r = 1$	Mükemmel
$1.00 < r \leq 0.90$	Kuvvetli
$0.90 < r \leq 0.50$	Orta
$0.50 < r \leq 0.00$	Zayıf

Hesaplanan r değerinin 0.75 olduğu varsayılırsa; r^2 , 0,56 olur. Bu durumda, “ x ’teki değişimin % 56’sı, y deki değişim ile ilgilidir” yorumu yapılmaktadır. r sıfır ise, değişkenler arasında doğrusal ilişki olmadığı yorumu yapılır. Ayrıca katsayının mutlak değerinin artması, ilişkinin kuvvetlendiği anlamına gelmektedir [50] (Bkz. Çizelge 3.1.).

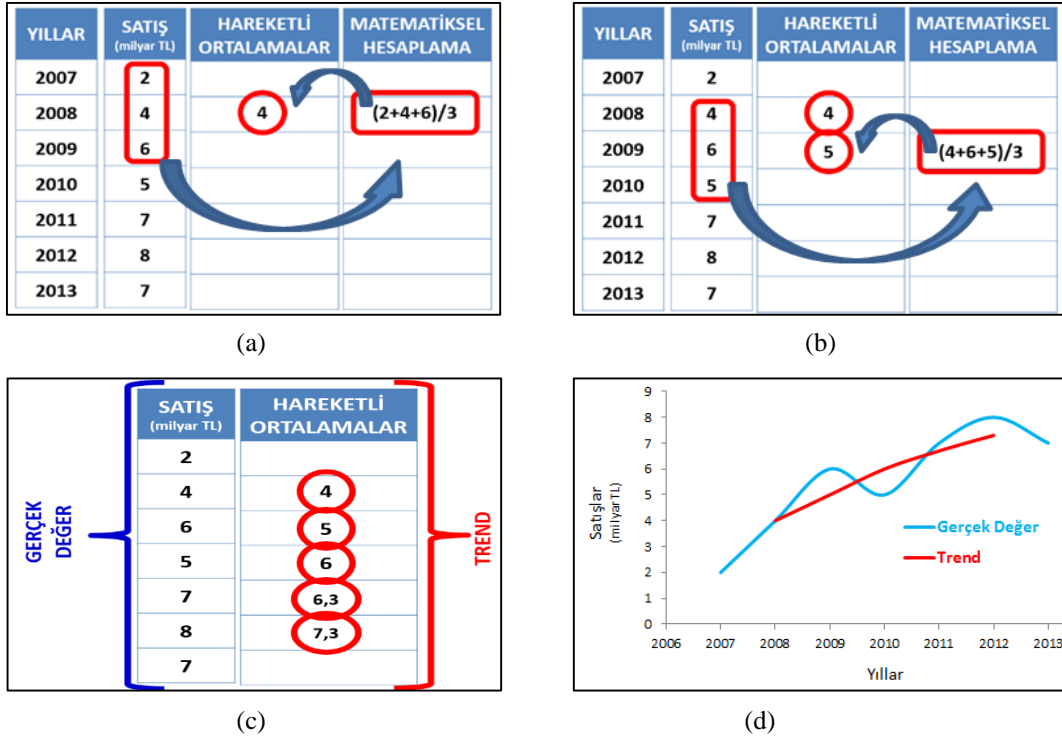
Pozitif veya negatif değerler alabilen korelasyon katsayısı, bu özelliği ile ilişkinin yönünü tayin eder. r ’nin negatif olması, değişkenlerin zıt yönde; pozitif olması ise aynı yönde değişim gösterdikleri anlamına gelmektedir. Korelasyon analizi ile değişkenler arasındaki doğrusal ilişkinin derece ve yönünün tespit edilmesinden sonraki adım ise regresyon analizidir.

3.2. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişken(ler) arasındaki ilişkinin, matematiksel fonksiyonlar ile ortaya konulması sürecidir [51]. Bu süreçteki temel amaç, veri kümesini en az hata ile temsil edecek regresyon doğrusunun çizdirilmesidir. Bu amaçta öncelikli olarak “*Hareketli Ortalamalar Yöntemi*” veya “*En Küçük Kareler Yöntemi*” gibi yöntemler ile, verilerin genel eğilimi yani trendi belirlenir [52]. Bir sonraki adımda trend, analitik fonksiyonlar cinsinden modellenir. Olası en uygun modelin elde edilmesi için, standart hatalar üzerinden karar mekanizmaları gerçekleştirilir. Ayrıca hesaplanan katsayı değerleri için, çeşitli “*anlamlılık testleri*” gerçekleştirilerek, hatanın en aza indirilmesi sağlanır. Temelinde “*standart puanların*” yer aldığı bu testler, modelin işlevselliği açısından son derece önemlidir.

3.2.1. Hareketli ortalamalar

Bu yöntemde mevcut verilerden yola çıkarak, sistemin genel eğilimi tahmin edilir. Bu tahmin sürecinde Şekil 3.1’de gösterilen tablolar oluşturulur. Veri kümesindeki artış ve azalış yönündeki dalgalanmalar belirlenerek, dalga uzunluğu adı verilen değer tespit edilir. Literatürde dalga uzunluğu hesabı için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bununla birlikte Şekil 3.1.a’daki veri seti incelendiğinde, verilerin yukarıdan aşağıya doğru artış, artış, azalış şeklinde değiştiği görülmektedir. Dolayısı ile veri setinin dalga uzunluğu 3 olarak belirlenir. Bundan sonraki işlem ise dalga uzunluğu adedince, veri kümesindeki elemanları toplayıp ortalamalarını almaktır (Bkz. Şekil 3.1.a.). Bu ortalama işlemi veri setinin tüm elemanlarını kapsayacak şekilde gerçekleştirilir (Bkz. Şekil 3.1.b.). Sonuç olarak, veri setindeki değerler “gerçek değer” olarak adlandırılırken; hareketli ortalamalar ile hesaplanan veriler “trend verileri” ismini almaktadır (Bkz. Şekil 3.1.c.). Son olarak gerçek ve trend değerleri üst üste çizdirilerek genel eğilim gözlemlenir (Bkz. Şekil 3.1.d.).



Şekil 3.1. Hareketli ortalamalar yöntemi

Hareketli ortalamalar yöntemi; uygulama açısından basit ve elverişli olmasının yanında, kullanılabilmesi için bazı şartları sağlaması gerekmektedir. Trendin doğrusal olması ve veri kümesindeki dalga uzunluklarının eşit olması şeklinde sıralanabilecek bu şartlar, yöntemin uygulama alanını oldukça daraltmaktadır [48]. Dolayısı ile doğrusal olmayan sistemler için farklı teknikler kullanılarak, genel trend belirlenebilmektedir. “En Küçük Kareler Yöntemi” bu amaçla yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir.

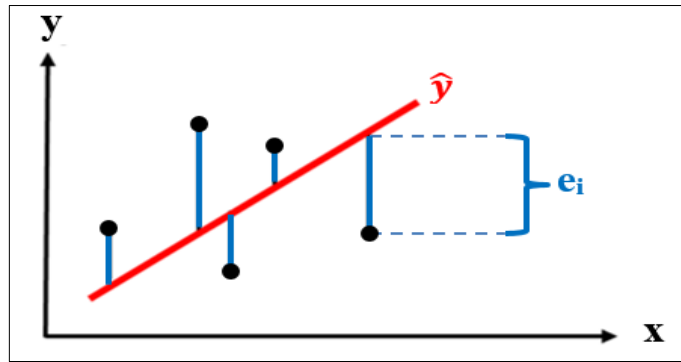
3.2.2. En küçük kareler yöntemi (EKK)

Bu yöntemde, veri setindeki noktaların (y_i), trend değerlerine (\hat{y}) olan uzaklıkları hata payı (e_i) olarak nitelendirilmektedir (Bkz. Şekil 3.2.). Dolayısı ile veri seti için belirlenecek olası en uygun trend modeli, hatalar toplamının ($\sum e_i$) en düşük olduğu durumdaki denklemdir. Uzaklık değerleri negatif ya da pozitif olabileceği için, hata toplama işlemi, bu değerlerin kareleri ($\sum e_i^2$) alınarak yapılmaktadır.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad (3.2)$$

$$\sum e_i = \sum (y_i - \hat{y}_i) \quad (3.3)$$

$$\sum e_i^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.4)$$



Şekil 3.2. EKK yöntemi [53]

Uydurulan eğrinin doğrusal olduğu varsayılırsa, \hat{y}_i değeri,

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifade (3.4)'te yerine yazıldığında (3.6) elde edilir.

$$\sum e_i^2 = \sum (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2 \quad (3.6)$$

Bu yöntemde temel amaç, hatanın en aza indirilmesi olduğundan, (3.6)'yı minimum yapan β_0 ve β_1 değerleri, olası en uygun eğrinin katsayılarını oluşturur. Bu değerlerin bulunması için ise, (3.6)'nın, β_0 ve β_1 'e göre türevleri alınıp sıfıra eşitlenir. Bu işlemler sonucunda, n veri adedi olmak üzere (3.7) ile (3.8) elde edilir. Bu denklemler ise “normal denklemleri” olarak isimlendirilir [44, 54].

$$\sum y_i = n\beta_0 + \beta_1 \sum x_i \quad (3.7)$$

$$\sum x_i y_i = \beta_0 \sum x_i + \beta_1 \sum x_i^2 \quad (3.8)$$

Bu tez kapsamında da kullanılan bazı özel fonksiyonlara ait denklemlere ve bu fonksiyonlara ait normal denklemlerine Ek-1'de yer verilmiştir.

Normal denklemlerindeki katsayıların, elde edilmiş veriler ile hesaplanabilmesi için, Şekil 3.3.'te yer alan x ve y ile ilgili tablolar oluşturulmaktadır. Veri adedi tek sayıda ise, ortadaki terimin karşısına X sütununda 0 değeri yazılır (Bkz. Şekil 3.3.a.). Daha sonra bu sütun, yukarı doğru -1, -2, -3, vb.; aşağı doğru ise 1, 2, 3, vb. şeklinde doldurulur (Bkz. Şekil 3.3.b.). Eğer veri adedi çift sayıda ise, ortadaki iki elemandan büyük olanına 1, küçük olanına -1 yazılır. İkişer ikişer arttırma/azaltma işlemi ile X sütunu doldurulur. X sütunundan sonra X^2 sütunu tamamlanır (Bkz. Şekil 3.3.c.). Daha sonra gerçek veriler sütunu olan Y sütunu da doldurulur (Bkz. Şekil 3.3.d.).

YILLAR	SATIŞ (milyar TL)	X	X^2	XY
2008	4			
2009	6			
2010	5	0		
2011	7			
2012	8			
TOPLAM				

(a) X değişkeni başlangıç değeri

YILLAR	SATIŞ (milyar TL)	X	X ²	XY
2008	4	-2		
2009	6	-1		
2010	5	0		
2011	7	1		
2012	8	2		
TOPLAM				

(b) X değişkeni değerleri

YILLAR	SATIŞ (milyar TL)	X	X ²	XY
2008	4	-2	4	
2009	6	-1	1	
2010	5	0	0	
2011	7	1	1	
2012	8	2	4	
TOPLAM				

(c) X² değerleri

YILLAR	Y	X	X ²	XY
2008	4	-2	4	-8
2009	6	-1	1	-6
2010	5	0	0	0
2011	7	1	1	7
2012	8	2	4	16
TOPLAM	30	0	10	9

(d) Y ve XY değerleri

Şekil 3.3. XY tablolarının doldurulması

Sonuç olarak tüm sütunların doldurulmasıyla birlikte, denklemlerde yer alan toplamı terimlerin hepsi elde edilmiş olur. İlgili değerlerin yerine yazılmasıyla $\beta_{0,1,2,3}$ değerleri ve bunun sonucunda trend modeli denklemleri elde edilmiş olur. Elde edilen bu denklemler arasında, olası en uygun trend modeline karar verirken, standart hatası (S) en düşük olan model türü seçilir [55]. Doğrusal ve parabolik trend standart hata hesapları, (3.9) ve (3.10) ile gösterilmiştir.

$$S_{Doğrusal\ trend\ için} : \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}}, (n < 30) \quad \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, (n \geq 30) \quad (3.9)$$

$$S_{Parabolik\ trend\ için} : \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-3}}, (n < 30) \quad \sqrt{\frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, (n \geq 30) \quad (3.10)$$

Gerçekleştirilen modellemelerin tutarlı olup olmadıklarını sınımaya yarayan çok çeşitli istatistiksel testler bulunmaktadır. Bu testlerin işleyişinde öncelikle *hipotezler* belirlenir. Bunun ardından test istatistiği değerleri hesaplanır. Daha sonra belirli koşullar çerçevesinde, verilerin anlamlı olup olmadığına karar verilir.

3.2.3. Hipotezler

İstatistiksel olarak hipotez kavramı; bir parametre ile ilgili doğru veya yanlış olabilen ve geçerliliği olasılık kuralları ile sınanabilen, iddialar olarak tanımlanabilmektedir. Hipotez testleri uygulanırken temel olarak, mevcut durumu (H_0) ve bu durumun tersini (H_1) ifade eden iddialar ortaya atılır. Test kapsamında H_0 iddiası test edilir ve kabul görmemesi durumunda ise H_1 iddiası kabul edilmiş olur. Göz ardı edilmemesi gereken bir diğer nokta ise test sonucunda varılan kararın yanlış olma riski taşımasıdır [56].

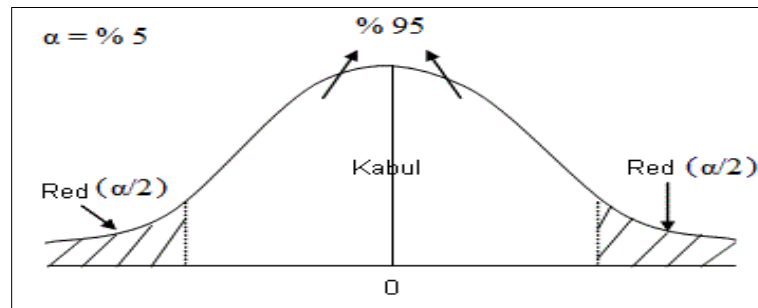
Öne sürülen hipotezler, çeşitli test istatistikleri yardımıyla sınanmaktadır. Söz konusu test istatistikleri, gözlenen ve beklenen değer arasındaki farkın, standart sapmaya bölümü ile elde edilir. Karar aşamasında ise yaygın olarak kullanılan yöntem, test istatistiği değerinin kritik değer ile karşılaştırılmasıdır. Hesaplanan değer kritik değerden büyük olması durumunda ise, H_0 hipotezinin reddedilmesi anlamına gelmektedir. Literatürde çok çeşitli testler bulunmakla birlikte bu tez kapsamında t-Testi ele alınmış ve uygulanmıştır.

3.2.4. t-Testi

1908 yılında William Sealy Gosset tarafından literatüre kazandırılan t-testi, yaygın olarak kullanılan hipotez testlerindedir. Örneklem sayısının 30'dan küçük olduğu durumlar için uygun olan bu test, standart hatanın hesaplanması, t-testinin istatistik hesaplanması, kritik t değerinin belirlenmesi ve t-test istatistiği ile kritik t değerinin karşılaştırılması adımlarını içerir [57]. \bar{X} , örnek aritmetik ortalaması; μ , kitle aritmetik ortalaması; s, standart sapma ve n, örnek sayısı olmak üzere t test istatistiği (3.11)'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n-1}} \quad (3.11)$$

t test istatistiğinin karşılaştırılacağı kritik t değeri ise t-dağılım tablosu aracılığı ile belirlenir (Ek-2). Serbestlik derecesi (SD) ve anlamlılık seviyesi (α), bu belirleme sürecindeki iki önemli parametredir [58] (Bkz. Şekil 3.4.). Serbestlik derecesi, örnek ortalamasını değiştirmeyecek şekilde alınabilecek değişken sayısıdır. Kitle ortalaması için SD, (n-1) olarak alınır. Hipotezin doğru olduğu halde reddedilme durumuna razı olabileceğimiz maksimum olasılık ise anlamlılık seviyesini ifade eder. Bu değer azaltılması, “gerçekte yanlış olan H_0 'ın reddedilmesi” olasılığı şeklinde ifade edilen “test gücü” değerini düşüreceğinden, 6 sigma süreçlerinde genel olarak %5 olarak kullanılır [59]. SD ve α değerleri belirlendikten sonra, t-dağılım tablosundan ilgili satır ve sütunlar kesiştirilerek, kritik t değeri belirlenir. Sonuç olarak; hesaplanan test istatistiği değeri, kritik değerden büyük ise ilişkinin anlamlı olduğu yorumu yapılır.



Şekil 3.4. Kabul/red bölgesi [58]

4. UÇAK MOTOR SAĞLIĞI İZLEME

4.1. Sağlık İzleme (*HM, Health Monitoring*)

Gelişen teknolojiye paralel olarak, kullanılan sistemler birim zamanda daha fazla iş yapabilme kabiliyetine sahip olmaktadır. Yüksek verimlerin elde edilmesini de sağlayan bu durum, kullanıcı açısından son derece olumlu olsa da üretici açısından dezavantajlar barındırmaktadır. Verim artışını sağlayıcı etkenler; sistem ve bileşenlerinin yönetimi, kontrolü, bakımı ve güvenli çalışma limitlerinin sağlanması gibi süreçlerin daha da karmaşık hale gelmesine sebebiyet vermektedir. Bu nedenle sistemde meydana gelebilecek bir sorun, büyük bir iş yükü ile mali ve zamansal kayıpları da beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda ortaya çıkan bir problemin giderilmesinden ziyade, henüz oluşmadan önce tespit edilebilmesi son derece önem arz etmektedir. Dolayısıyla günümüzde birçok sektörde, hataların önceden tahmin edilebilmesine yönelik, artan bir eğilim söz konusudur [60]. Bu eğilim literatürde “sağlık izleme (*HM, Health Monitoring*)” olarak adlandırılan sürecin gelişimine büyük katkı sağlamıştır.

İzleme tekniklerinin ortaya çıkışı 1960’lı yıllara dayanmaktadır. Bu yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda hedef noktası, hataların belirlenmesi ve ayrıştırılmasına yöneliktir. Hatalar, önceden tanımlanmış çeşitli hata modları ve bu modların sistem üzerindeki bilinen etkilerine göre belirlenmeye çalışılıyordu [61]. Bir sonraki evrede ise hatanın oluşum yerinin saptanması odak noktası olmuştur. Bu evrede, motor detaylı bakıma girene kadar, sistemin çalışmaya devam edebilmesini, yani motor çalışma süresinin uzatılmasını sağlama hedeflenmişti. Sistem donanımı azaltılmış ve dolayısıyla ağırlık ile bakım maliyetleri açısından yüksek tasarruflar elde edilmiştir. İlerleyen zamanlarda, yazılımsal ve istatistiksel süreçler de sisteme dahil edilmeye başlanmış ve izleme tekniklerinde yeni bir evre ortaya çıkmıştır [62, 63]. 1990’lı yıllara gelindiğinde ise, motor sağlığı konusunda kilometre taşı sayılabilecek olan “*prognostik yaklaşımlar (gelecek duruma dair veri tahmini)*” odak noktası haline gelmiştir. Bununla birlikte izleme fonksiyonları ile bakım ve plan/yönetim konularına entegre hale getirilmiştir. Bu haliyle söz konusu izleme teknikleri, “Prognostik ve Sağlık Yönetimi (*PHM, Prognostics and Health Management*)” adı ile literatüre kazandırılmıştır [64, 65]. Söz konusu

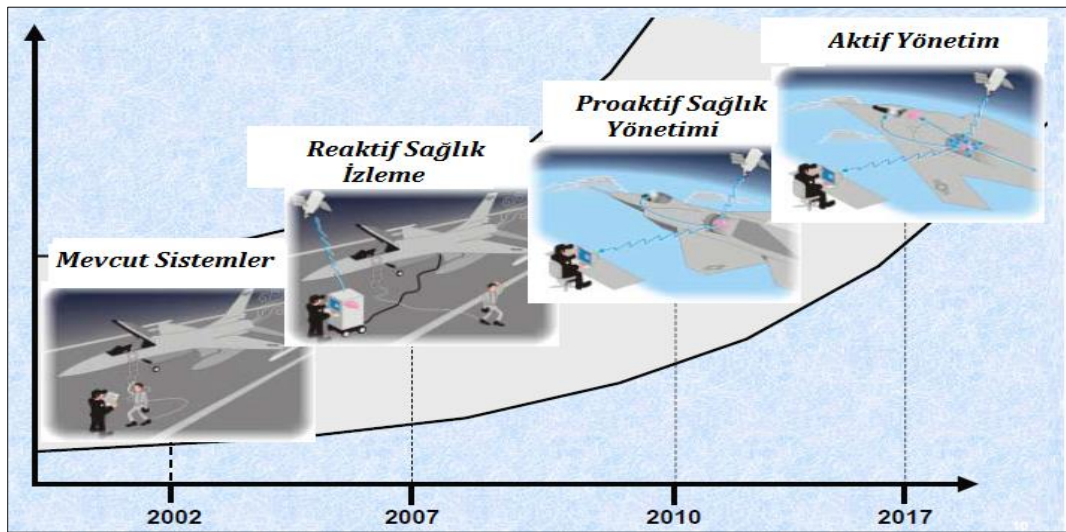
izleme teknikleri, oluşabilecek hataların ve risklerin nedenlerini saptamak amacı ile ürün güvenilirliğini sağlamaya yönelik belirli teknolojileri ve yöntemleri içeren bir disiplin olarak tanımlanabilmektedir [66].

PHM izleme tekniklerinin sağlık yönetimi kısmı; diagnostik (*mevcut durumun saptanması*) ve prognostik yöntemlerle elde edilmiş bilgiler, mevcut kaynaklar ve işletim taleplerinden yola çıkılarak bakım işlemleri ile ilgili uygun kararlar verebilme yeteneği olarak tanımlanabilmektedir [67, 68]. Tekniğin prognostik kısmı ise, sistem ya da bileşenin geçmiş ve mevcut verileri referans alınarak gelecek davranışları/performansı/işlevselliği hakkında öngöründe bulunma kabiliyetlerini içermektedir [69]. Tahminler ve öngörüye dayalı olan bu süreç; kullanılabilirlik (*availability*), güvenlik (*security*), uygunluk (*compliance*), kaynak tahsisi (*resource allocation*), maliyet kontrolü (*cost control*), iş sürekliliği (*business continuity*) gibi öne çıkan faktörleri bünyesinde barındırmaktadır. Sistem ya da bileşenden elde edilecek tasarrufların ve kazançların artırılmasına yönelik olarak kullanılabilirlik faktörü; kullanılabilirliği en üst düzeye çıkarmayı, kullanımda tam performans koşullarına ulaşmayı, işleyiş süresindeki kesintileri en aza indirmeyi hedefler. Güvenliğe dair sorunların minimize edilmesini ifade eden güvenlik faktörü kapsamında; beklenmedik olayların yaşanma sıklığını azaltma, kritik öneme sahip ilişkileri anlama, ölçüm ve öngörü risklerini azaltma gibi hedefler tayin edilmiştir. Marka değerini korumaya yönelik olan uygunluk faktörü, mevzuata uygunluk ve kurumsal imaj geliştirme ile emisyon azaltımı ve doğal çevrenin korunması konularını temel almaktadır. Sistem ya da bileşenden elde edilecek verime odaklanan kaynak tahsisi faktöründe ise temel olarak; doğru kaynakların kullanılması, envanterlerin azaltılması, bakım programlarının planlanması konuları göz önüne alınmaktadır. Üretici açısından son derece önemli olan maliyet kontrolü faktörü ile boşa harcanan zamanın azaltılması, garanti kapsamına giren maliyetlerin düşürülmesi, kullanım kapasitesini en etkin şekilde değerlendirebilme, çeşitli derecedeki hasarlanmalardan kaynaklı maliyetlerin azaltılması hedeflenmiştir. Üretici açısından bir diğer kritik öneme sahip olan iş sürekliliği faktöründe ise şirket itibarını koruma, insan faktöründen kaynaklı sorunları en aza indirme, sürdürülebilirliği sağlama gibi noktalar göz önüne alınmaktadır [70].

4.2. Motor Sağlığı İzleme (EHM, Engine Health Monitoring)

Elektronik dünyasında yaşanan büyük gelişmeler inşaattan motor sanayisine kadar çeşitli sektörlerde, pek çok sistem/donanım için HM sistemlerinin uygulanmasını mümkün kılmıştır [71, 72]. Söz konusu sektörlerden biri de bu tez çalışması kapsamı ile yakından ilişkili olan uçak motor sanayisidir. Bu sanayi için HM sistemleri, yoğun ilgi gösterilen konular arasında yer almaktadır. Bu nedenle söz konusu sistemler, sanayinin gelişim evrelerine göre gelişme göstermiş ve üretim süreçlerine dahil edilmiştir [73] (Bkz. Şekil 4.1.).

Uçak motor sanayi gelişim evreleri genel olarak ele alındığında 1., 2., 3. ve 4. jenerasyon olmak üzere dört sınıfta incelenmesi mümkündür. İlk jenerasyonlarda son derece basit tasarım kuralları bulunmakla birlikte, motor ömür tespiti, çalışma veya uçuş saati üzerinden yapılmaktaydı. 2. nesilde birçok uçak ve motor parametresi kayıt altına alınmaya ve üretici firmalar tarafından, yer tabanlı analizler yapılmaya başlandı. Uçak ya da motorlara çeşitli izleme ekipmanlarının monte edilmesi ve verilerin uçuş esnasında analiz edilmesi ile 3. jenerasyon başlamış oldu. İzleme ve analiz süreçlerinin motor tasarım evresinde motora dahil edilmesi ile de 4. nesil üretime geçildi. Jenerasyonların çeşitli motor teknolojileri açısından kıyaslanması Çizelge 4.1.'de verilmiştir [74].

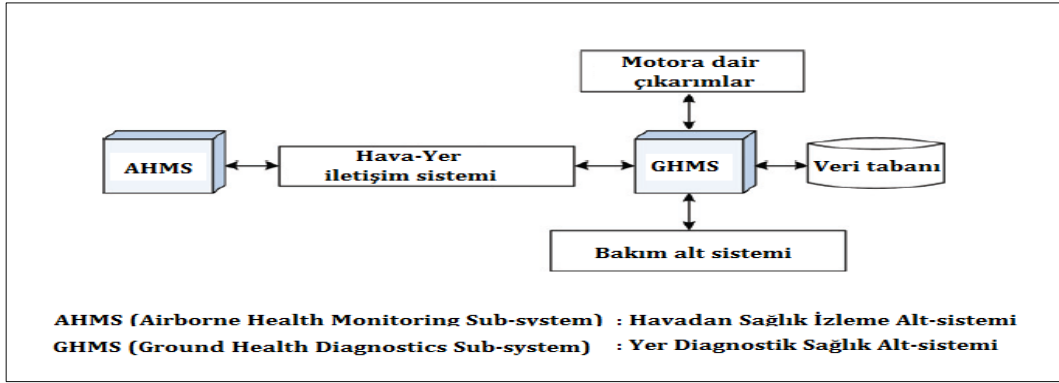


Şekil 4.1. EHM gelişim evreleri örneği [73]

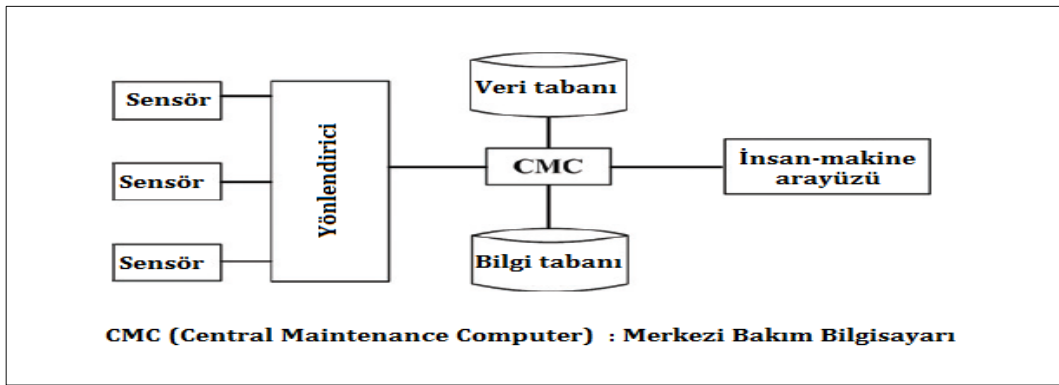
Çizelge 4.1. 1950-1990 arası motor teknolojiler [74]

	1950'ler	1960'lar	1970'ler	1980'ler	1990'lar
Motor	J57 Conway	Allison250 ATAR	F100 CFM56	F110 F118	EJ200 F414
Kontrol	Mekanik	Hidro/ Mekanik	Elektro/ mekanik	Elektro/mek./ FADEC	FADEC
İzleme	Manuel	Manuel	EHM	EHM	EHM
Kullanıcı	Güvenli	Güvenli	Güvenli ve ekonomik	Güvenli ve ekonomik	Güvenli ve ekonomik
Jenerasyon	1	1	2	3	4

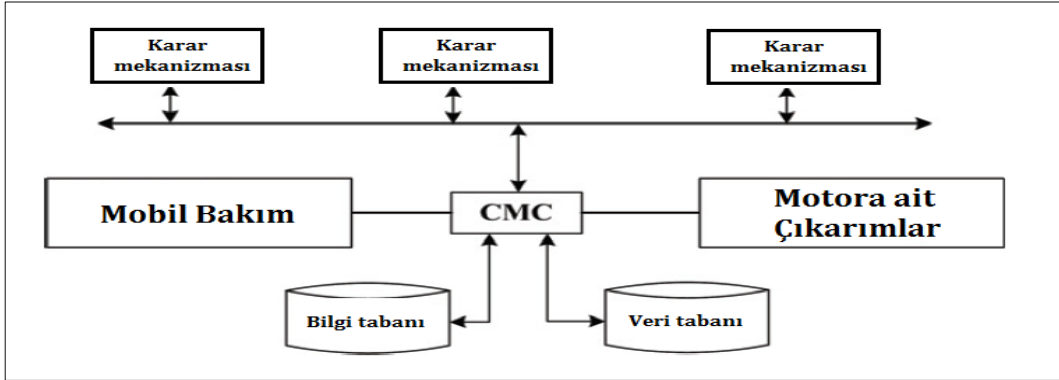
“Motor izleme (*EM, Engine Monitoring*)”, sistem ya da bileşen üzerine dahili veya harici şekilde monte edilen algılayıcılardan elde edilen verilerin, gözlemlenmesine dair bir disiplin ya da teknik olarak tanımlanabilmektedir [75]. İzleme kapsamındaki parametrelerde anormal davranışların diagnostik ve prognostik yaklaşımlar ile tespit edilip, gelecek davranışlarını tahmin etme süreci ise “motor sağlığı izleme (*EHM, Engine Health Monitoring*)” olarak ifade edilmektedir [76]. Söz konusu iki kavramın işleyişi ise literatürde, “motor sağlığı yönetimi (*EHM, Engine Health Management*)” olarak yer almaktadır. Genel olarak tanımlanacak olursa, ekipmanlarda ya da sistemde meydana gelen bozulmaların tespiti, teşhisi ve tanısı ile ilgili genel bir disiplin ya da tekniktir [75]. Genel şeması ve iç yapıları Şekil 4.2.’de gösterilen EHM sistemi, havadan ve yerden sağlık izleme olmak üzere iki kısımda incelenebilmektedir [77]. Bu süreçte, “sağlık veri tabanı (*HD, Health Database*)” ve “bilgi tabanı (*KD, Knowledge Database*)” olmak üzere iki temel bilgi havuzu oluşturulur. Geçmiş bakım ve tamir bilgileri, HD’nin bilgi kaynaklarıdır. Uçağın sağlık durumunun doğru tanımlanabilmesine destek sağlayan KD ise; tolerans değerler, performans parametreleri, uyarı sınır değerleri, tehlike durumları, hata/arıza nedenleri ve çözüm planları gibi mühendislik/tasarım bilgilerinin kayıtlı olduğu bilgi havuzudur. Her iki havuzun beslenmesi ise kural-durum tabanlı yaklaşımlar, korelasyon tabanlı analizler, hata ağacı ve yapay sinir ağlarına dayanan çeşitli metotlar ile sağlanmaktadır [78].



(a) EHM genel şeması



(b) AHMS iç yapısı



(c) GHMS iç yapısı

Şekil 4.2. EHM Genel ve iç yapısı [77]

Uçak motorları gibi mekanik bir sistem için sağlık izleme süreci söz konusu olduğunda, sistemin mekanik aksamının sağlığı ve performansı olmak üzere iki temel izleme çeşidinden söz etmek mümkündür. Mekanik sağlığın izlenmesi, mekanik aksamda meydana gelen istenmeyen durumlara dair gerçekleştirilen izleme olarak ifade edilebilmektedir. Söz konusu istenmeyen

durumlar, yapısal ve hareketli bileşenlerin dinamik karakteristikleri üzerinde değişime neden olmaktadır. Süreç kapsamında bu değişimler saptanarak, ilgili hatanın arızaya dönüşme riski ortadan kaldırılmakta ya da en aza indirilmektedir. Titreşim, akustik, gerilme, yağ numunesi inceleme, metal sıcaklığı ölçümleri, termografi ve yük analizi gibi yöntemler, mekanik izleme sürecinde kullanılan analizlere örnek teşkil etmektedir. Sistem bileşenlerinde, işletim anında meydana gelen hasarlanmaların ya da akış hattının izlenmesi ise genellikle performans izleme olarak nitelendirilmektedir [79].

Son zamanlarda havacılık sektöründe oldukça ilgi gösterilen bir başka motor sağlığı izleme kavramı ise, uçak ve bileşenleri için geliştirilen “Yapısal Sağlık İzleme (SHM, *Structural Health Monitoring*)” kavramıdır [80]. Esas itibarı ile mevcut yapısal sağlık durumunun saptandığı istatistiksel bir süreçtir [81, 82]. 4 temel bölümden oluşan sistem gereksinimleri, Şekil 4.3.’de verilen SHM sistemleri, uygulama alanı ile tümleşik (*onboard*) yapıdadır [83]. Bu yapı içerisinde olası hata senaryolarının tanımı; periyodik aralıklarla yapının gözlemlenmesi ve çeşitli parametrelere dair verilerin analizleri ile yapının mevcut sağlık durumunun belirlenmesi sonucunda gerçekleştirilir. Geleneksel “çalışma sonrası (*off-line*)” analizlerin yanında, “çalışma anında (*on-line*)” analizlerin de gerçekleştirilmesine imkan sağlamaktadır [84]. Bu çerçevede, mevcut yapısal bütünlüğe ilişkin güvenilir bilgi verme amaçlanır. Kısaca hasar tespiti ve karakterizasyonu stratejileri olarak da tanımlanabilir [85, 86].



Şekil 4.3. SHM sistem gereksinimleri [83]

4.3. Uçak Motoru Performans Parametreleri ve İzlenen Sinyaller

Çeşitli sistem ve alt sistemden oluşan uçak ve motorları, karmaşık yapılarından ötürü birçok performans hesabı tanımına sahiptir. Her tanımlama kendine özgü temel parametrelere sahiptir. Bu parametreler,

1- Motora ait:

- a) Spool speed, şaft hızı (spool speed, shaft speed)
- b) Motor giriş sıcaklığı (engine intake temperature)
- c) Kompresör çıkış sıcaklığı (compressor exit temperature)
- d) Stator çıkış sıcaklığı (stator outlet temperature)
- e) Türbin blade sıcaklığı (türbine blade temperature)
- f) Egzoz gaz sıcaklığı (exhaust gas temperature)
- g) Motor giriş basıncı (engine intake pressure)
- h) Kompresör çıkış basıncı (compressor exit pressure)
- i) Enjeksiyon borusu basıncı (jet pipe pressure)
- i) Yağ basıncı (oil pressure)
- j) Yakıt akışı (fuel flow)
- k) Afterburner seçim göstergesi (afterburner-select indicator)

2- Uçağa ait:

- a) Hava sıcaklığı (air temperature)
- b) Gösterge hava hızı (indicated air speed)
- c) Basınç irtifası (pressure altitude)
- d) Hücum açısı (angle of attack)
- e) Sapma açısı hızı (yaw angle velocity)
- f) Tekerlere binen ağırlık (weight-on-wheels indicator)

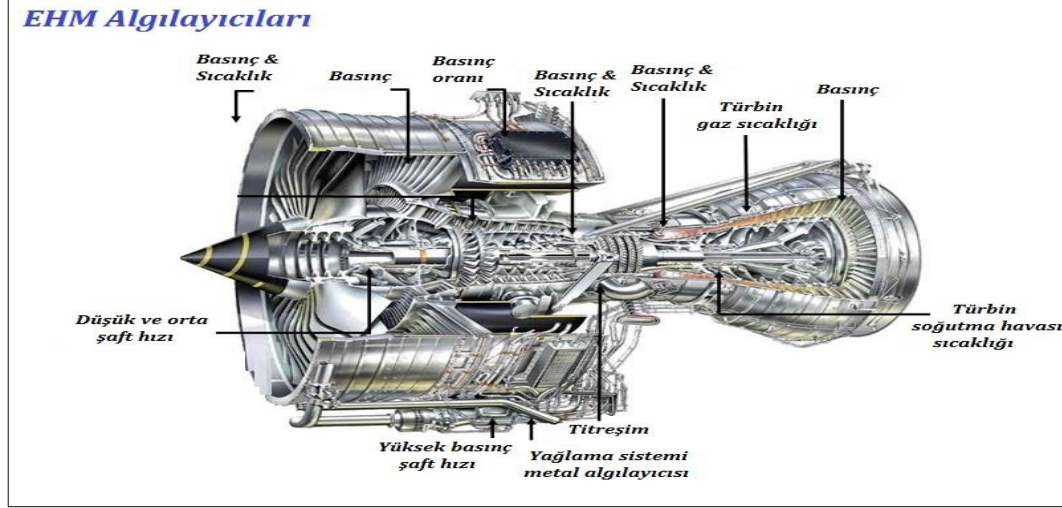
3- Konfigürasyon verileri:

- a) Uçak ve motor tipi
- b) Uçak ve motor seri numaraları
- c) İzleme sistemi donanım ve yazılım versiyonları

4- Genel veriler:

- a) Tarih ve zaman

olmak üzere 4 bölümde gruplandırılabilir [86]. Motorun net itki üretiminde doğrudan ya da dolaylı olarak etkiye sahiptirler. Bu nedenle EHM sistemlerinde, pek çok parametrenin de izlenmesi zorunlu hale gelmektedir. Bu izleme süreci, motora dahili veya harici şekilde yerleştirilmiş bir dizi algılayıcıdan (Bkz. Şekil 4.4.) sağlanan veri akışı (Bkz. Çizelge 4.2.) ile gerçekleştirilmektedir [88, 89].



Şekil 4.4. EHM algılayıcı konumları [88]

Çizelge 4.2. EHM sürecinde kullanılan sinyaller [89]

	Kullanılan sinyal	Literatürdeki karşılığı
1	Statik/toplam hava sıcaklığı	<i>Static/total air temperature</i>
2	Yükseklik	<i>Altitude</i>
3	Hava hızı	<i>(Mach number, identified/calibrates airspeed)</i>
4	Brüt ağırlık	<i>Gross weight</i>
6	Uçuş modu/fazı	<i>Flight mode/phase</i>
8	Uçak kimlik/kayıt numarası	<i>Aircraft identification/registration number</i>
9	Koordineli Evrensel Zaman	<i>Time (UTC: Coordinated Universal Time)</i>
10	Ağırlık merkezi	<i>Centre of gravity</i>
11	Hücum açısı	<i>Angle of attack</i>
12	Eksenel ivmeler	<i>Normal flight path acceleration</i>
14	Gaz keleşmesi seviyesi açısı	<i>Throttle level angle</i>
15	Buz önleme valfi konumu	<i>Anti ice on/off</i>
17	Çevre kontrol sistemi durumu	<i>Environmental control system pack status on/off</i>
19	APU sızdırma durumu	<i>APU bleed status</i>
21	Silah sesleri (askeri)	<i>Gunfire (military)</i>

Bahsi geçen izleme süreci kapsamında genel olarak izlenen parametreler, şu şekilde sıralanabilir [76, 90, 91-95]:

- Egzoz gaz sıcaklığı (*EGT, Exhaust Gas Temperature*),
- Egzoz statik basıncı (*ESP, Exhaust Static Pressure, mmHg*),
- Hız (*RPM, Speed*),
- Motor fan dönüş hızları (*EFS, Engine Fan Speeds, N1 ve N2*),
- Yakıt akışı (*FF, Fuel Flow*),
- Motor basınç oranı (*EPR, Engine Pressure Ratio*),
- Yağ basıncı (*OIP, Oil Pressure*),
- Yağ sıcaklığı (*OIT, Oil Temperature*),
- Sıcaklık (*Ortam havası, yakıt, kompresör-türbin giriş/çıkışı*),
- Basınç (*Hava alığı, kompresör- türbin giriş/çıkışı, tahliye havası*),
- Vibrasyon genliği,
- Yağ tüketimi ile ilgili oranlar,
- Yağlama sistemi filtre basınçları,
- Gaz kelebeği konumu,
- Zaman (*çalışmaya başlama saati, toplam çalışma süresi*)

4.4. EHM Kapsamında Yapılan Çeşitli İzlemeler

EHM sistemi temel olarak hatayı erken evrede tespit etme, arıza kaynağını ortaya koyma, gerekli işletim/bakım işlemini belirleme ve hatanın arızaya dönüşmeden önce giderilmesini sağlama işlevlerini yerine getirir [75]. Bu amaçla EHM temel fonksiyonları, motorun durumunu değerlendirmek için verileri anlamlandırır. Bunun sonucunda ise tanıda bulunur, performans analizleri yapar ve ekipmanların kalan ömrünü hesaplar. Sistemin odak noktası ise bakım maliyetlerini düşürmek ve işletim hizmetindeki aksaklıkları önlemektir [88, 89]. Bu doğrultuda EHM kapsamında,

- Hava aracının uçuşa elverişli ve güvenli olmasının yanı sıra, arıza ve risklerin önceden belirlenen sınırlar dahilinde olmasını ifade eden “uçuşa elverişlilik/güvenlik (*airworthiness or safety*)”,

- Hava aracı sistem ya da bileşenlerinin görevlerini, önceden tanımlanmış olan koşullar çerçevesinde gerçekleştirmelerini ifade eden “görevin tamamlanması (*mission success*)”,
- Beklenmeyen bir arıza meydana geldiğinde, bu sorun için harcanan bakım süresinin, havaaracı kalkış/varış süresini etkilememesini ifade eden (*avalibility/mission readiness*),
- Hava aracının bakım ve yönetim maliyetlerini minimum seviyeye indirmeyi ifade eden “düşük maliyetli destek (*low support cost*)”

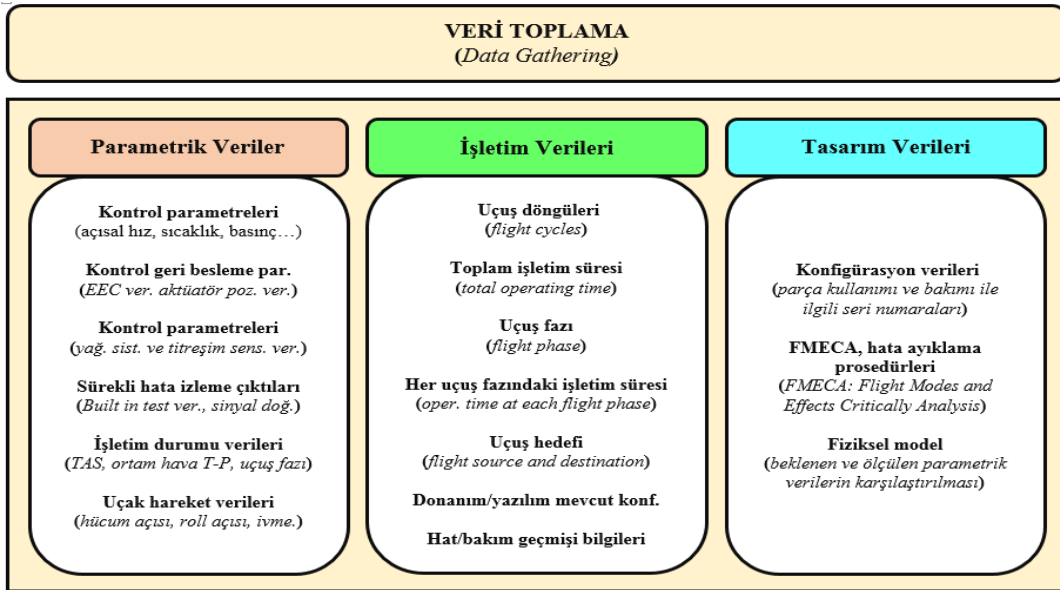
hedefleri gözetilerek [75], pek çok izleme süreci çeşitli amaçlar için gerçekleştirilmektedir. Bunlar şu şekilde sıralanabilir [88]:

- *Sınır izleme (Limit/Exceedance Monitoring)*: Uygun bakım eyleminin belirlenmesinde kullanılır.
- *Kullanım ömrü izleme (Life Usage Monitoring)*: Ömürlü parçaların uygun zamanda değiştirilmesine imkan sağlayarak arıza olma olasılığını azaltır.
- *Mekanik eğilim (Mechanical Trending)*: Mekanik bütünlüğün; titreşim, yağ ve yağ sistemi detektörlerinden alınan veriler ile izlenmesi sonucunda, hatanın önceden tespit edilip önlem alınmasına imkan sağlar.
- *Mekanik teşhis (Mechanical Diagnosis)*: Tanı süreci, motorun hatadan sorumlu kısmının belirlenmesi olarak tanımlanırken; mekanik tanı, hatanın öncülü olarak ifade edilir.
- *Filo ortalaması (Fleet Averaging)*: Belirli koşullarda çalıştırılan bir grup motorun davranışlarını ifade eder. Sürece ait parametreler genellikle kararlı durum koşullarında hesaplanır.
- *Motor kontrol sistemi eğilim ve teşhisi (Engine Control System Trend and Diagnosis)*: Kontrol sistemi tarafından kullanılan algılayıcı sinyalleri ve eyleyicideki bozunmaları belirler.
- *Olay saptama, analiz ve iz sürme (Event Detection, Analysis, and Tracking)*: Normal işletim parametreleri ya da limitler dışında meydana gelen olaylar için uygun bakım işleminin belirlenmesine imkan tanır.

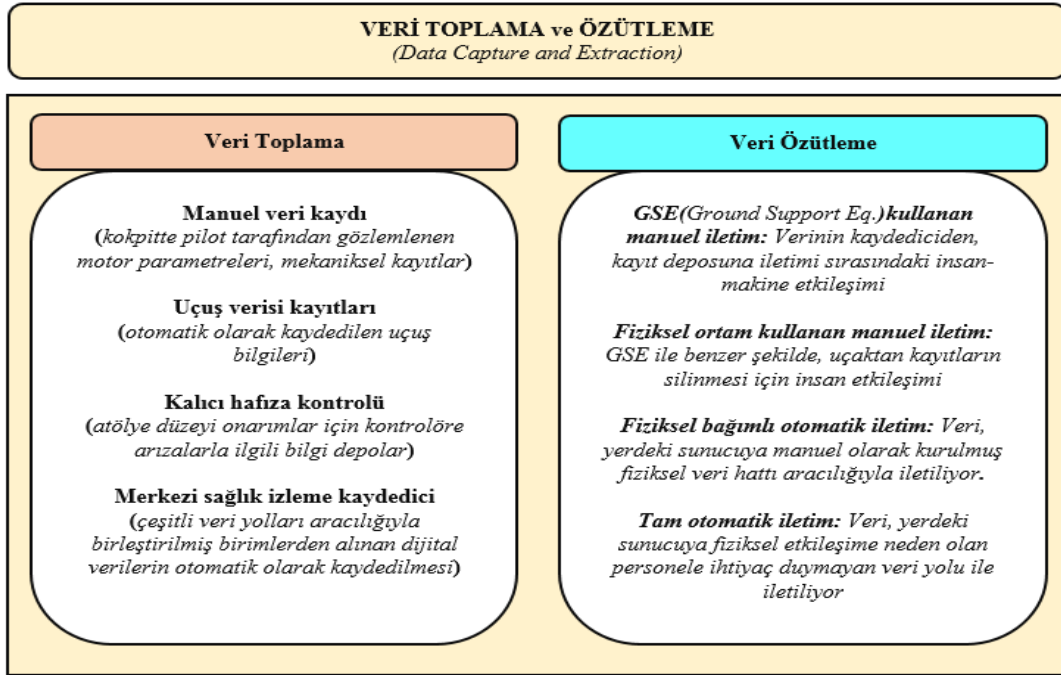
- *Motor başlangıcı izleme (Engine Start-up Monitoring)*: Parametrelerin İlk çalıştırma durumundaki değerlerinin elde edilmesinde kullanılır. Olası bir soruna karşı ön uyarı sağlar.
- *Motor sonlandırma izleme (Engine Shutdown Monitoring)*: Spool down süresince veri toplama, rulmanlar gibi mekanik parçalardaki bozunmanın tanımlanmasında kullanılabilir.
- *EBU Systems*: Motor donanımlarındaki bozunmaları ve bu bozunmaların motor performansını nasıl etkileyeceğini tanımlar.
- *Engine to Engine Comparison*: Uçuş sırasında bir uçağın tüm motorlarından alınan verilerin karşılaştırılmasıdır.
- *Prognostik*: Arıza belirtisi algılandığında, bileşenin kalan ömrü ile ilgili bilgi üreten süreçtir.

4.5. EHM Sistem Kabiliyetleri

EHM sistemleri kapsamında çok çeşitli algılama sistemleri, ölçüm verileri ve metodolojileri bulunmaktadır. Bu süreçler, veri toplama (*data gathering*) (Bkz. Şekil 4.5.), veri toplama ve özütleme (*data capture and extraction*) (Bkz. Şekil 4.6.),

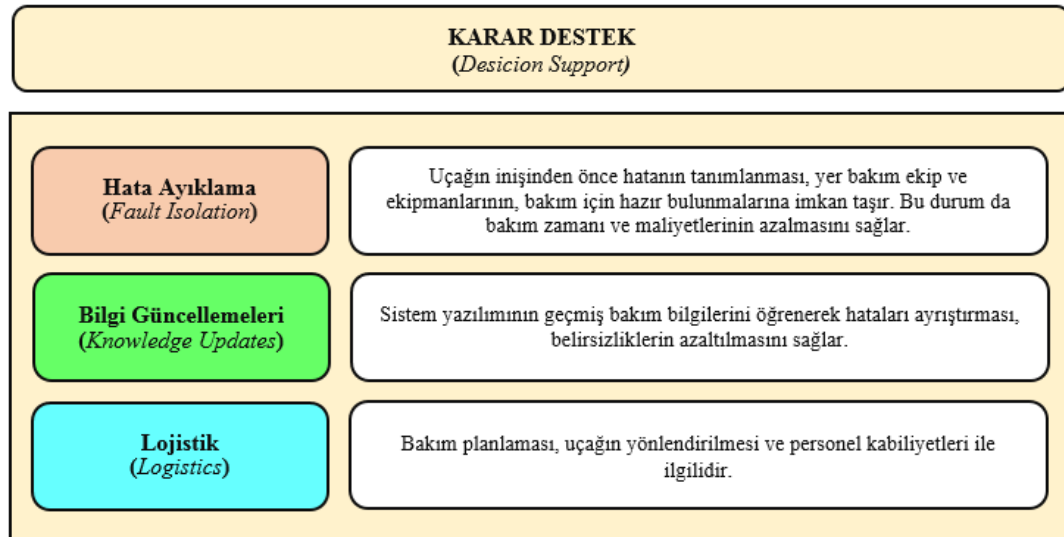


Şekil 4.5. Veri toplama [75]

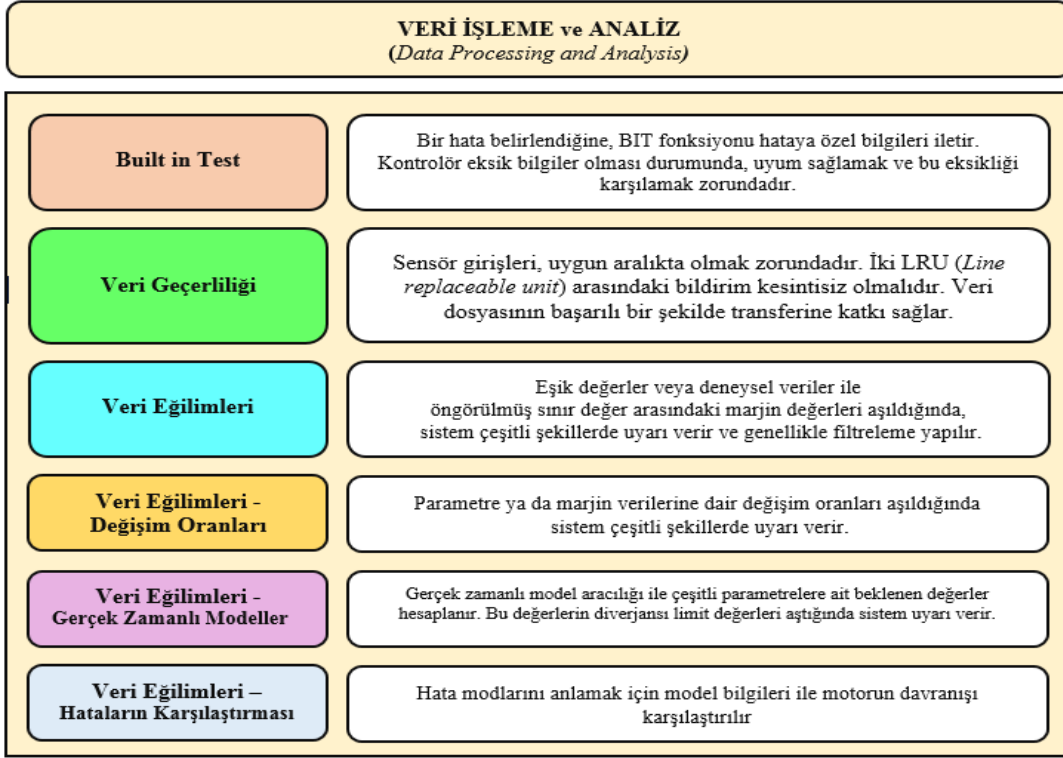


Şekil 4.6. Veri toplama ve özütleme [75]

ve karar destek (*decision support*) (Bkz. Şekil 4.7.) ile veri işleme ve analizi (*data processing and analysis*) olmak üzere dört genel kategori altında toplanabilmektedir [75] (Bkz. Şekil 4.8.).



Şekil 4.7. Karar destek [75]



Şekil 4.8. Veri işleme ve analiz [75]

4.6. EHM Sistemlerinin Sağladığı Faydalar

Olası tehdidi, probleme dönüşmeden önce saptamaya yarayan EHM teknikleri, motorun uçuş esnasında ya da uçuş sonrasındaki sağlık durumu ile ilgili çeşitli bilgilerin elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca dâhil edildikleri sistemi daha verimli hale getirdikleri gibi, çok çeşitli avantajlar ve kazanımların da elde edilmesini mümkün kılmaktadırlar. Bakım maliyetleri ve süresini azaltma, öne çıkan faydaları arasındadır [71, 96].

EHM sistemleri yaygın olarak kullanıma girmeden önce motorlar, bakım ve tamiratlarının gerçekleştirilmesi için belirli periyotlarda uçak gövdesinden sökülmekteydi. Son derece uzun zaman alan bu süreç mali açıdan da büyük kayıplara sebebiyet vermekteydi. Bunlara ek olarak belirli periyotlarda bakım işleminin gerçekleştirilmesi “vaktinden önce” veya “vaktinden sonra söküm” olarak nitelendirilebilecek iki istenmeyen durumu da beraberinde getirmektedir. Vaktinden önce söküm işlemi, parçaların ömürlerinin azalmasına neden olurken;

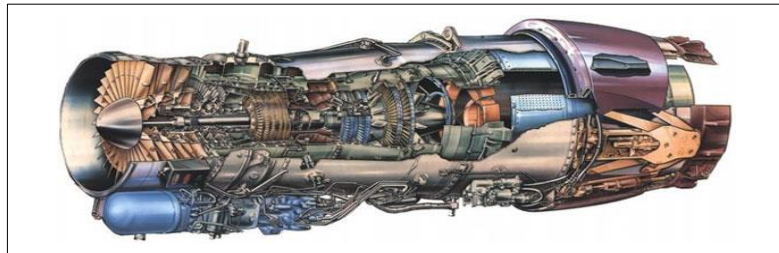
vaktinden sonra söküm, hem tamir edilecek bileşen sayısını arttırmakta hem de sistemin belli bir süre istenmeyen koşullar altında çalışmasına sebebiyet vermektedir [97]. Bu olumsuz durumların giderilmesine yönelik olarak sistem mühendisliği alanında, “elde edilen (Aa , *Achieved Availability*) (4.1)” ve “operasyonel kullanılabilirlik (Ao , *Operational Availability*) (4.2)” gibi çeşitli parametreler tanımlanmış ve tasarım süreçlerine dahil edilmiştir [98].

$$Aa = \frac{\text{Çalışma süresi (Up time)}}{\text{Arıza giderme süresi (Down time)}} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \quad (4.1)$$

$$Ao = \frac{\text{Up time}}{\text{Down time}} = \frac{MTBUMA}{MTBUMA+ALDT+MTTR} \quad (4.2)$$

MTBF: Hatalar arasındaki ortalama zaman (Mean Time Between Failure); MTTR: Ortalama tamir süresi (Mean Time To Repair); MTBUMA: Planlanmamış bakım süreçleri arasındaki ortalama zaman (Mean Time Between Unscheduled Maintenance Actions); ALDT: İdari lojistik arıza giderme süresi (Administrative Logistical Down Time)

Bu sayede çok çeşitli hareketli ve hareketsiz bileşenlerden oluşan uçak motorlarında [99] (Bkz. Şekil 4.9.), EHM sistemlerinin kullanılması ile ömür konusunda da son derece etkin kazanımlar elde edilebilmektedir. Motor üzerindeki ömürlü parçaların kullanım süreleri saptanmakta ve dolayısıyla da bakım/söküm işlemleri en uygun zamanda gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede ömür sınırlarını zorlayan parçaların, fonksiyonel olarak bağlı buldukları bileşenlere zarar vermesi önlenmektedir, dolayısıyla da sistem güvenliği sürdürülebilir hale getirilmektedir [100, 101]. Ayrıca sisteme zamanında müdahale edebilme yeteneği sayesinde, destek ekipmanlarının % 50'ye varan oranlarda azaltılabildiği ve bakım döngüsünün % 20 oranlarında uzatılabildiği tespit edilmiştir [77].



Şekil 4.9. RB199 motoru iç aksamı [99]

Uçak motorları, uçuş güvenliği ve zamanında bakım sağlanması için çeşitli izleme sistemlerinin (*MS, Monitoring System*) kullanıldığı karmaşık yapılardır [102]. Söz konusu karmaşık yapı, yüksek üretim ve bakım maliyetine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, operasyonel kullanım sürecinde limit aşımına neden olmaksızın motor bütünlüğünü sağlama olarak tanımlanan “güvenli motor işletimi (*Safe Engine Operation*)” ve motoru maksimum ömür süresince kullanabilme olarak tanımlanabilecek “ekonomik motor işletimi (*Economic Engine Operation*)” kavramları sağlık izleme süreçleri açısından son derece önem arz etmektedir [86]. Yüksek verimlerin elde edilmesine imkan sağlayan bu konular, pek çok araştırmacı tarafından da ele alınmaktadır. General Electric (*GE*) firması çalışanlarından Greg ve Jaspal [103], 1982 yılında CF6 turbofan motorlarının bakım maliyetleri; US Air firmasından Halsmer ve Matson [104], 1992 yılında CFM56-3 serisi motorların sökümünden kaynaklanan performans kayıpları; Lee ve Agogino [105], 2000 yılında garanti süresi içindeki GE motorlarının bakım maliyetlerinin azaltılması; Mitsubishi Heavy Industries firmasından Tanaka ve çalışma ekibi [106], 2003 yılında motorların uçuş ömürlerinin hesaplanması konularını ele almışlar ve ilgili alanlarda literatürün zenginleşmesine katkı sağlamışlardır.

Sistem ya da bileşenin güvenilirliğini arttıran ve hataları oluşum evresinde saptayarak nedenleri ile birlikte raporlayan, söz konusu hatalara olası çözümler üretebilen EHM sistemleri, kullanıcı veya üretici için:

- *Sistemin ömür boyu maliyetini (life cycle cost) azaltma*
- *Motor kapatmadan ve planlanmamış bakımdan kaynaklı maliyeti azaltma*
- *Bakım işlemlerini en aza indirme*
- *Bakım süresini azaltma*
- *Bakım periyodunu arttırma*
- *Bakım elemanı sayısını azaltma*
- *Gereksiz bakım faaliyetlerini azaltma*
- *Parça tedarik süresini kısaltma*
- *Sistem hata uyarılarını azaltma*
- *Hataya müdahale etme süresini kısaltma*

- *Hataları saptama, tanımlama ve sınıflandırma*
- *Hataları ve çözümleri öğrenebilme*
- *Hatalar arasında ilişki kurabilme*
- *Benzer hatalar için çözüm üretebilme*
- *Sistem çalışma kapasitesi ve süresini arttırma*
- *Görev planlama yeteneğini geliştirme*
- *Motor performansını iyileştirme*
- *Motor sağlığına dair sürekli ve yüksek doğrulukta veri akışı sağlama*
- *Motor denetim işlemlerini azaltma*
- *Yapısal ve fonksiyonel güvenliği arttırma*
- *Gelecek durum için öngörülebilirlik*
- *Tasarımda kaliteyi arttırma*
- *Yeni nesil motor tasarımları için veri tabanı sağlama*

gibi çeşitli faydalar sağlamaktadır [66, 74, 90, 107-110]. Söz konusu faydalar dikkate alındığında mali ve zamansal kazancın ön plana çıktığı görülmektedir.

4.7. Uçak Motorlarında Meydana Gelebilecek Olumsuz Durumlar

Uçak motorlarında normal dışı işleyişler genel olarak ele alındığında; hata, anomali ve arıza olmak üzere üç temel kavram karşımıza çıkmaktadır. Hata kavramı, bilinen ve tekrarlanabilen; anomali ise daha önceden bilinmeyen ya da tamamen anlaşılammış normal dışı davranışlar olarak tanımlanabilmektedir. Önlenmemiş olan söz konusu hata veya anomali durumlarının yol açtığı; sistem, süreç ya da bileşenin işleyiş performansını bozan ve amaçlanan hedeflere ulaşılmasını engelleyen durumlar ise arıza adını almaktadır. Genellikle çalışma koşullarının yüksek sıcaklık ve hızlarda gerçekleşmesinden dolayı meydana gelmektedir [69, 94].

Uçak motorları genellikle; ateşleme, yağlama, yakıt vb. gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Ayrıca her sistemin kendine özgü çeşitli performans parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler, sistemin maksimum verimle çalışmasına imkan sağlayan optimum çalışma aralıklarına sahiptirler. Çalışma

koşullarının sınır değerlere yaklaşması veya kritik değerleri aşması durumlarında, sistem veriminde düşüş yaşanacağı gibi uçuş güvenliğini, yolcu-personel hayatını tehlikeye atma gibi geri dönüşü olmayan durumlar da ortaya çıkabilmektedir. Bu olumsuz durumlara sebebiyet vermemek için EHM sistemleri uçak motorlarına entegre edilmektedir. Stall, motor durdurma (*engine shut-down*), motor dalgalanması (*engine surge*), alev sönmesi (*flame out*), aşırı hız (*over-speed*), aşırı sıcaklık (*over-temperature*), yabancı madde hasarı (*FOD, Foreign Object Damage*), düşük basınç-yüksek sıcaklık farkları, yüksek titreşim, düşük akış oranı, rulmanlarda yağ sızıntısı, şaft aksel kaçıklıkları, şaftta çatlaklar oluşması, ani yük değişimi yaygın olarak izlenen olumsuz durumlardır. Bunlara ek olarak EHM sistemleri ile; Çizelge 4.3.'de oluşum yerleriyle birlikte verilen erozyon (*ER, Erosion*), korozyon (*COR, Corosion*), termo-mekanik hatalar (*TMF, Thermo-Mechanical Fatigue*), düşük çevrimli yorulma (*LCF, Low Ccycle Fatigue*), yüksek çevrimli yorulma (*HCF, High Cycle Fatigue*), deformasyon (*C, Creep*), sıcaklıkla aşınma (*HC, Hot Corrosion*), aşınma (*WR, Wear*) gibi motorda meydana gelebilecek çeşitli olumsuz durumların henüz oluşmadan önce tespit edilmesi sağlanmaktadır [108, 109, 111-113].

Çizelge 4.3. Çeşitli hatalar ve oluşum yerleri [111]

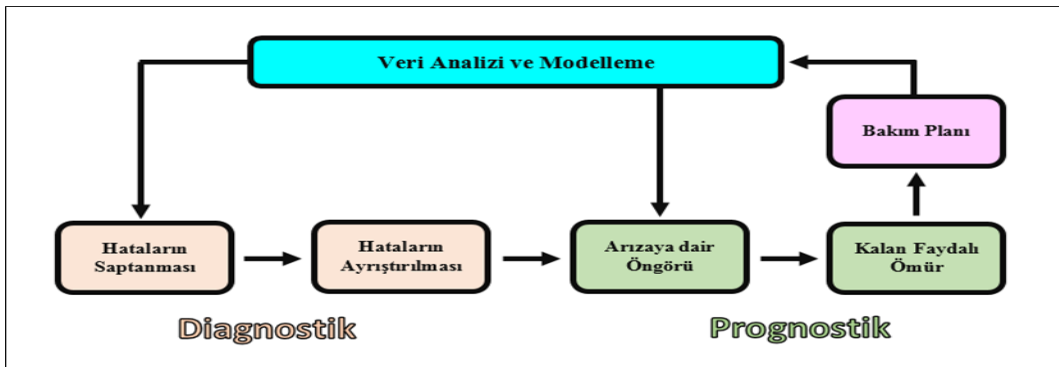
Motor Bölümü	Bileşen	Hata Türü
Kompresör	Blade	ER-COR, HCF
	Vane	ER-COR, HCF
	Disc	LCF, C, HCF
	Spacer	LCF, C, HCF
Türbin	Blade	TF, C, HC, LCF, HCF
	Vane	TF, C, HC, HCF
	Disc	LCF, C, HCF
	Torque ring	LCF
3Yanma odası		LCF, C, HC
Şaft		LCF, WR
Kompresör (discharge case: diffuser)		ER, LCF, COR
Hareketli contalar, sızdırmazlık elemanları		LCF, C, HCF

Tespit sürecinde gerçekleştirilen hataların sınıflandırılması işlemi, çözüm sürecini son derece hızlandırmaktadır. Hatanın ne zaman meydana geldiği (*ilk çalıştırmada, düzenli çalışma sürecinde vb.*), ne kadar sürdüğü (*kalıcı, geçici, belirli süre vb.*), nasıl ortaya çıktığı (*kesikli ya da sürekli sızıntı, ani ya da kademeli vb.*), diğer hatalarla ilişkisi (*bağımsız, ilişkili, eşzamanlı vb.*), hataya neyin sebebiyet verdiği (*yapısal/fonksiyonel tasarım, çevre koşulları vb.*), hatanın neleri etkilediği (*bileşen, alt sistem, sistem vb.*) ve hatanın önem seviyesinin (*kritik, kritik olmayan, geri alınabilir*) ne olduğu gibi çeşitli sorulara verilen cevaplar neticesinde hataları sınıflandırabilmek mümkündür [114].

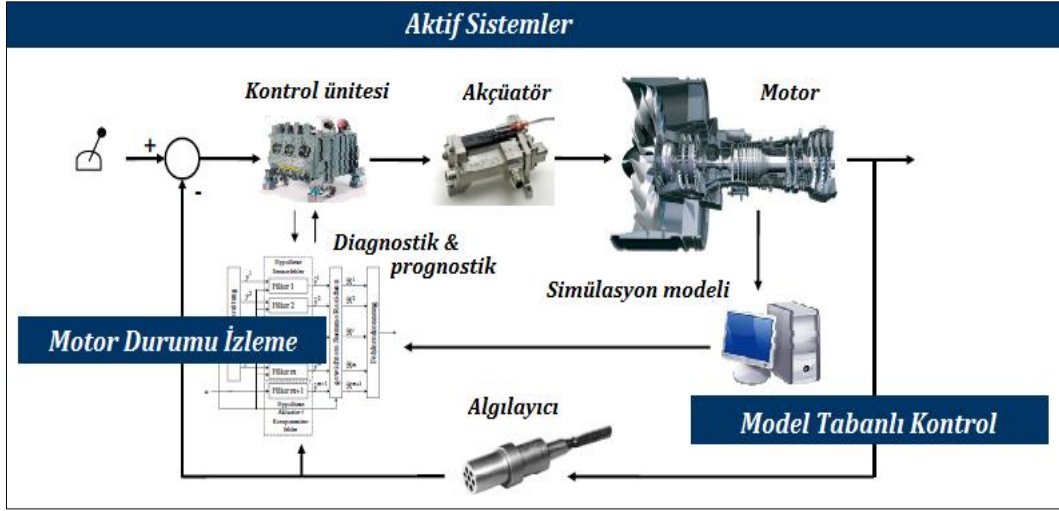
4.8. EHM Uygulama Adımları

Uçak motorlarının performansı; motora ait çeşitli parametrelerin normal dışı davranışlarının, diagnostik (*teşhis*) ve prognostik (*tahmin*) yaklaşımlar ile saptanması sonucu değerlendirilebilmektedir [69, 76] (Bkz. Şekil 4.10.). Dolayısıyla gerek teknik gerekse akademik çalışmalar, bu yaklaşımlar üzerine odaklanmakta ve mevcut durumdan yola çıkarak gelecek durumun tahmin edilebilmesine katkı sağlamaktadır [115].

EHM kapsamındaki diagnostik ve prognostik yaklaşımlar genel olarak model ve veri tabanlı (*model based and data driven*) olmak üzere iki temel yöntem içermektedir [116]. Sistem ya da bileşene dair net matematiksel modeller mevcut ise model tabanlı yaklaşım tercih edilir [117] (Bkz. Şekil 4.11.).



Şekil 4.10. EHM genel izleme süreci [69]



Şekil 4.11. Model tabanlı yaklaşım [117]

Şekil 4.11.'de gösterilen model tabanlı yaklaşım, donanım bilgileri ile teorik bilgilerin ilişkilendirilmesinin sonucunda, sistem modellerinin oluşturulması ve bu modeller aracılığıyla tanı ve teşhis işlevlerinin gerçekleştirilmesi süreçlerini kapsar [118-120].

Sistem işletim verilerinin mevcut ya da sistemin izlenebilir olduğu durumlarda ise genellikle veri tabanlı yaklaşım tercih edilmektedir. Bu yaklaşımda herhangi bir modellemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. İşleyişe ait verilere sahip olmak yeterlidir. Bu verilere uygulanan çeşitli matematiksel ve istatistiksel yaklaşımlar ile tanı işlemi gerçekleştirilmektedir. Veriler; uçuş anında elde edilen işletim verileri ve uçuş sonrasında ait bakım bilgilerinden oluşmaktadır. İstatistiksel yöntemler (*Bayesian networks*), yapay sinir ağları, otomatik öğrenme ve kalite kontrol yaklaşımları veri temelli yöntemde kullanılan metotlar arasındadır [60, 84, 121].

Günümüzde modern hava taşımacılığı sistemleri ve yer destek ekipmanları oldukça karmaşık hale gelmektedir. Bu durum, söz konusu sistem ve bileşenlerinin mekanik ve yapısal sağlıklarının izlenmesi için, fiziksel ve matematiksel modellerinin oluşturulması açısından büyük bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu bağlamda model tabanlı yaklaşım yerine, EHM sistemlerinde veri temelli yaklaşım daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu yaklaşımda, işletim verileri ile izlenen parametrelerin normal karakteristikleri karşılaştırılır.

Bunun sonucunda, olası tehditler belirlenip ortadan kaldırılabilmekte ve sistem ya da bileşenin gelecek durum davranışı ön görülebilmektedir [122].

Bir sistemin ya da sürecin, izlenmesi, anomalinin tanımlanması ve hatanın arızaya dönüşmeden önce tespit edilmesi kabiliyetlerini kapsayan EHM sistemleri için, aşağıdaki kavramlar büyük önem teşkil etmektedir [123]:

Kritik değerler: Her sistemin kendine özgü çeşitli performans kriterleri ve bu kriterlerin de sistemin maksimum verimle çalışmasını sağlayan çeşitli sınır değerleri vardır. Bu değerlere yaklaşma, hatanın başlangıç evresini oluşturur. Uzun süreli limit aşmaları ise arızaya neden olabilmektedir.

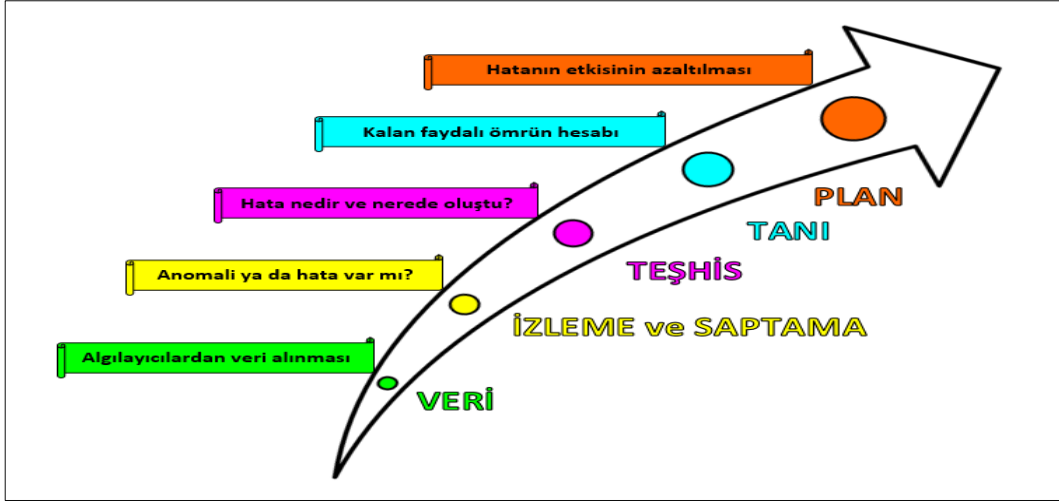
Erken uyarı: Sistem çalışması üzerinde olumsuz etki yapacak durumların, henüz oluşmadan önce tespit edilmesidir. Olası arızaları önleyebilme açısından son derece önemlidir.

Sorun giderme: Erken uyarı sistemiyle elde edilen zamansal tasarruf, istenmeyen işleyişe neden olabilecek durumun çeşitli algoritmalar aracılığı ile ortadan kaldırılması için kullanılabilir. Bu sayede olası riskler ortadan kaldırıldığı gibi yüksek oranlarda zamansal tasarruf sağlanmış olur.

Öğrenme: Sistemin, karşılaştığı durumları hafızaya alıp, benzer durumların tekrar oluşması durumunda, karar verme sürecini kısaltması anlamına gelir. Bu durum; hataya, olası en kısa sürede müdahale etme anlamına gelmektedir.

Öngörü: Öğrenme ile ya da sistemde önceden belirlenmiş koşullarla elde edilmiş veri tabanı üzerinden, gelecek duruma dair yorum yapabilme kabiliyetidir. Söz konusu kavramlar, EHM tekniklerinin temel mantığını oluşturmaktadır.

EHM teknikleri temel mantığı, verilerin elde edilmesi (*data*), izleme-saptama (*monitor-detect*), teşhis (*diagnose*), tanı (*prognose*) ve planlama (*planning*) süreçleri çerçevesinde şekillenmektedir (Bkz. Şekil 4.12.). Verilerin elde edilmesi kısmı, algılayıcılar aracılığıyla performans parametrelerine dair verilerin elde edilmesini; izleme-saptama kısmı, hata belirtilerinin saptanmasını; teşhis kısmı, hatanın ne olduğu ve yerinin belirlenmesini; tanı kısmı, kalan faydalı ömre dair bilgi edinilmesini; planlama kısmı ise, söz konusu hatanın etkilerinin ortadan kaldırılması ya da en aza indirilmesini sağlar [123].



Şekil 4.12. EHM adımları [123]

4.8.1. İzleme (*Monitoring*)

Bileşen, sistem ya da sürecin işletim durumu ile ilgili olan sinyallerin ya da özelliklerin izlenmesi ve normal ya da normal dışı olup olmadıklarının belirlenmesi olarak tanımlanabilmektedir [123]. Aktif sistemde, belirli periyotlar ile süresiz; pasif bir sistemde ise belirli periyotlar ile sınırlı süreli olarak algılayıcılar aracılığı ile sistem hakkındaki bilgilerin kayıt altına alınması sürecidir. İzlemenin temel amacı, dahili algılayıcılardan ve detektörlerden, performans parametrelerine dair alınan veriler ile, geçmiş değerleri arasındaki ilişki kıyaslanarak, sistem arızalarını, arıza oluşumundan önce teşhis edebilme sürecine katkı sağlamaktır [124]. Dolayısıyla HM, geri dönülmez problemlerin oluşumunu engellemek üzere, arızaların ilk sinyallerinin tespiti için sistem davranışlarının gözlem altına alınması süreci olarak ifade edilebilmektedir [77].

4.8.2. Algılama (*Sensing*)

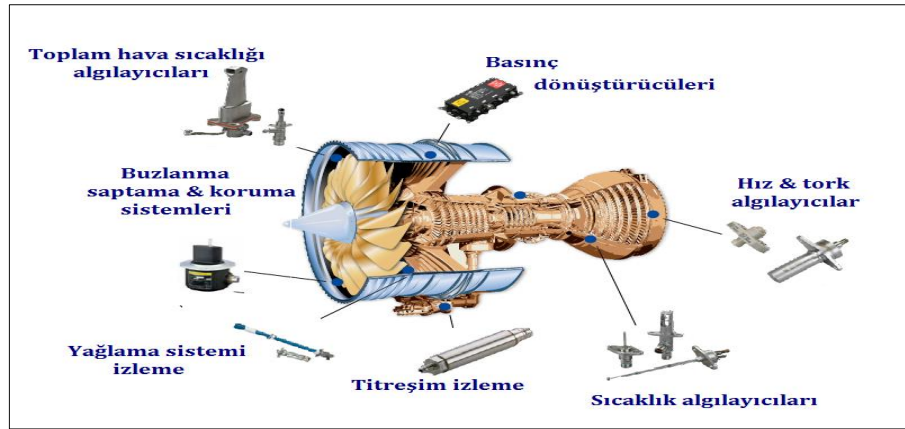
EHM sistemlerinin en önemli adımlarından biri olan “algılama (*sensing*)”, algılayıcılar aracılığı ile durum farkındalığı yaratma olarak tanımlanabilmektedir [111]. Bu adımda izlenecek sistem ya da bileşen, fiziksel ortamı elektronik ortama aktaran “algılayıcılar (*sensors*)” ile donatılmaktadır. Dahili ya da harici şekilde

kurulan algılayıcı ağları ile izlenen sistem ya da bileşenin mevcut durumuna dair kullanıcıya bilgi akışı sağlanmaktadır [111, 125-129]. Uçak motorları da aynı şekilde; sıcaklık, basınç, hız, akış, titreşim seviyeleri gibi çok çeşitli performans parametrelerinin takip edilebilmesi için çeşitli algılayıcılar ile donatılmıştır [88, 96, 130]. GTM temel bölümlerinde yapılan bazı ölçümler, Şekil 4.13.'de gösterilmektedir [131].

Her ne kadar EHM süreci yeni bir kavram olmasa da, özellikle algılayıcılar ve algılama teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, EHM uygulamalarına yeni bir soluk kazandırmıştır [132]. Sistem ya da bileşenden sağlıklı verilerin elde edilmesi için, uygun algılayıcı ve tekniklerinin seçilmesi son derece önemlidir [133] (Bkz. Şekil 4.14.).

	Hava Alığı	Fan	Komp.	Yanma Odası	Türbin	Nozzle
FOD Buzlanma		Stall kontrolü Akış kontrol Ömür Açıklık kontrolü Yorulma		Yanma kararsızlık kontrolü Emisyon azaltımı kontrolü	Açıklık kont. Ömür Soğutma kont.	Blade aşınma Afterburner
Basınç Sıcaklık		Stall belirtileri Akım ayrılması Gerilme, burulma Vibrasyon Basın. Sıcaklık		Yanma parametreleri Emisyon miktarı Basınç Sıcaklık	Türbin giriş sıcaklığı Blade/vane sıcaklığı Vibrasyon Gerilme, burulma	Basınç Sıcaklık

Şekil 4.13. Uçak motoru ana bileşenlerinde yapılan bazı ölçümler [131]



Şekil 4.14. Uçak motorları için çeşitli algılayıcılar [133]

Bu bağlamda; hidrolik/pnömatik sızıntılar için ultrasonik, pompalar için kızılötesi, yağ analizleri ve metalik aşınmalar için ferrografi, parçacık algılama için lazer, conta sızıntılarının ya da deformasyonlarının tespiti için akustik ve egzoz gazı analizleri için gaz kromatografisi yaygın olarak tercih edilen algılayıcı teknolojileri arasında yer almaktadır [134]. Öte yandan EGT ve türbin giriş sıcaklığı (*TIT, Turbine inlet temperature*) gibi çok yüksek sıcaklıkların ölçülmesinde termokapıl proplar, dış hava sıcaklığı gibi orta dereceli sıcaklıklar için termistör proplar, RPM için manyetik algılayıcılar, yağ basıncı ya da barometrik irtifa için basınç dönüştürücüleri ise söz konusu ölçümler için kullanılan elverişli algılayıcı çeşitleri arasında yer almaktadır [135].

Algılama adımında bir diğer önemli nokta ise, kurulacak algılayıcı ağının işleyişine dair özelliklerin, ölçüm sistemi ve ortamına göre kalibrasyonudur. Ölçüm aralığı, doğruluk, duyarlılık, tekrarlanabilirlik, çözünürlük, frekans tepkisi, histeresiz, doğrusallık, tepki süresi, örnekleme oranı ve kararlı hale geri dönüş süresi, bu kalibrasyon çerçevesinde ele alınan özelliklerdendir [66]. Söz konusu özellikler; algılayıcının kullanılacağı sisteme, sisteme entegre edileceği konuma ve ortam şartlarına göre değişiklik göstermektedir.

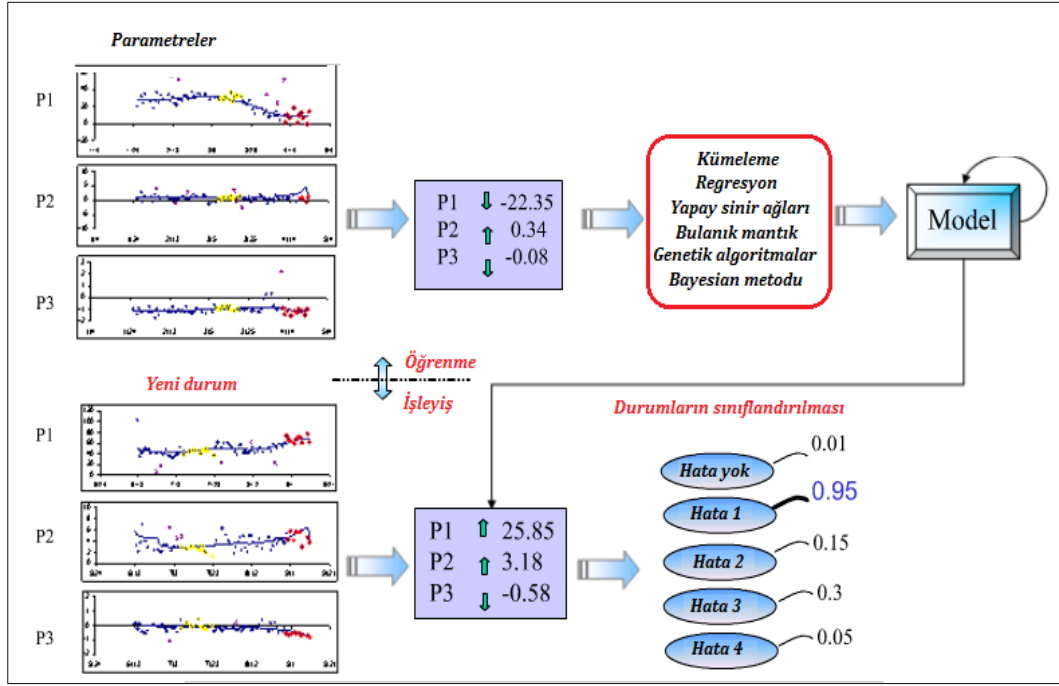
4.8.3. Saptama (*Detection*)

EHM uygulamalarının üçüncü adımı olan “saptama (*detection*)” kısmı, izlenen sistem ya da bileşenin normal davranışlarından uzaklaşmasının tespit edilmesi sürecidir [123]. Aynı zamanda, mevcut durumun farkındalığı ve olumsuz işleyişlerin tanımlanması olarak ifade edilebilmektedir. Genel olarak “yaşam ve durum tabanlı (*life and condition based*)” olmak üzere iki temel yaklaşım içerir. Yaşam tabanlı (*Life-based*) kısmında, başlangıç durumu neydi, buraya varırken hangi yol takip edildi gibi sorulara cevap aranır. Durum tabanlı (*Condition-based*) yaklaşımında ise bileşen davranışları algılanarak mevcut durum; istatistiksel ve fiziksel veriler, yapay zeka, Kalman filtresi, bulanık mantık, Bayesian teorisi gibi araçlar ile olası en az hata ile belirlenmeye çalışılır [75].

4.8.4. Teşhis (*Diagnostics*)

Mevcut ve geçmiş normal dışı durumların bulunması süreci anlamına gelen “teşhis (*diagnostics*)” , EHM sisteminin dördüncü adımını oluşturmaktadır [69]. Algılayıcı ağı aracılığı ile elde edilen verilerden yola çıkarak, hataların öncü belirtilerini saptayan ve bu belirtilerin nedenlerinin anlaşılmasını sağlayan aktif bir süreçtir [75]. Geri dönüşü olmayan arızalardan kaçınmak, yüksek maliyete sebep olacak hasarları önlemek, hataların yüksek hassasiyetle saptanmasını sağlamak, bakım maliyetlerini azaltmak temel amaçları arasında yer almaktadır [114]. Bu özellik ve amaçlar doğrultusunda son derece yüksek değerlerde mali tasarruf ile sistem ya da bileşene dair önemli kazançlar elde edilmesine imkan sağlar [136].

Aerodinamik ve termodinamik kararlılıkların temel alındığı diagnostik yaklaşımlar [111], sistem ya da bileşenin mevcut ve geçmiş yapısının değerlendirilmesi için gerçekleştirilen çeşitli analizleri içerirler [96, 137, 138]. Söz konusu analizler çok çeşitli istatistiksel metotlar ile gerçekleştirilebilmektedir. Aynı zamanda, model tabanlı olmayan (*non-model-based*) ya da yapay sinir ağı tabanlı (*Neural networks-based*) diagnostik yaklaşımlar da bu metotlara örnek teşkil etmektedir. Klasik yöntemlerden olan model tabanlı olmayan metotta tahmini hata senaryoları kurularak sistem veri tabanına dahil edilmektedir. Saptanan belirtiler, bu veri tabanı ile karşılaştırılarak olası hatalar belirlenmeye çalışılır. Yapay sinir ağı tabanlı metotlarda ise klasik yöntemlerden farklı olarak; oluşan yeni belirti, hata ve çözüm yolları sistem tarafından öğrenilir. Bu öğrenme süreci, benzer belirtilerin ortaya çıkması durumunda, sistemin, çözüm için gerçekleştireceği karar mekanizmasının daha hızlı çalışmasına imkan sağlar [139] (Bkz. Şekil 4.15.). Zaman açısından yüksek tasarruflar elde edilmesinin yanı sıra, sistemin beklenmeyen durumlar karşısında daha kararlı bir yapıda çalışması sağlanır. Öğrenme faktörü gereği sistem veri tabanı, zaman içerisinde genişleyen ve kendi kendisini geliştiren bir yapıya sahiptir [140].



Şekil 4.15. Öğrenme süreci [139]

Gözlemlenen parametrelere dayalı olarak bileşenin mevcut durumunun saptanması [68] ve fonksiyonlarını yerine getirebilme kabiliyetinin belirlenmesi süreci [66, 80], teşhise yönelik (*diagnostik*) yaklaşımlar olarak ifade edilmektedirler. Bu yaklaşımlar model tabanlı olsun ya da olmasın temel olarak; hata belirtilerinin saptanması, hata oluşum yerinin belirlenmesi, hatanın önem derecesinin belirlenmesi, hataların ayrıştırılması, hataların sınıflandırılması işlevlerini yerine getirirler [67, 81, 109, 115]. Bahsi geçen işlevler çeşitli hata senaryolarının oluşturulması, çözüm adımlarının belirlenmesi ve senaryo ile ilgili çözüm adımı arasındaki bağlantıları kuran algoritmaların tasarlanması süreçlerini içerir. Uçak motorlarının karmaşık yapısı göz önüne alındığında, diagnostik yaklaşımlar, çok çeşitli hata kodları ve bu kodların ilişkili olduğu çözüm adımlarını içeren karmaşık algoritmalara sahiptirler. Örneğin yağlama sistemine ait “*Rise Temperature*” değeri normal koşullarda 200°C civarındadır. Sistem izlenirken eğer bu değer 200°C den büyükse, “IDG çok ısı üretiyor”; düşükse, “soğutma yeterli değil” yorumu yapılır. Bir başka örnek vermek gerekirse; sabit hızlı seyir (*CSD, Constant Speed Drive*) yapısındaki “*hız algılayıcıdan*” alınan

döngü bilgisi Idle'ın %5 inden küçükse, “çıkışta istenen döngü hızının üretilmeyeceği” anlamına gelir. Yapılan bu yorumlar senaryo üretimini ve tanı koyma sürecini oluşturur. Söz konusu işlevleri yerine getirebilen diagnostik yaklaşımların günümüzde motor tasarım evrelerine dahil edilmesiyle, motor işletimi, tasarımı ve bakım süreçlerinin daha verimli hale dönüştürülmesi [141] ve hata uyarılarının en aza indirilmesi sağlanmaktadır [110].

4.8.5. Tahmin (*Prognostics*)

EHM sistemlerinin beşinci adımı, öngörüye dayalı diagnostik yaklaşımlar süreci olarak tanımlanabilen ve sistem ya da bileşenin düzenli işleyişini devam ettirebileceği şekilde, ne kadar süre daha çalışabileceğinin tahmin edilmesine imkan sağlayan “tahmin (*prognostics*)” adımıdır [68]. Bir başka deyişle, belirli tolerans değerler çerçevesinde sistem ya da bileşenin, etkin çalışma koşullarını koruyabileceği şekilde kalan ömrün hesaplanması sürecidir [66, 110, 123]. Performans parametrelerinden elde edilen veriler değerlendirilerek sistem ya da bileşenin gelecek durum davranışları tahmin edilir [45, 142]. Bu süreçte hata senaryoları modellenir [67, 143]. Bu modeller aracılığı ile arızanın ne zaman oluşabileceği, nasıl erteleneceği, nasıl bertaraf edileceği sorularına cevaplar türetilir. Olası en uygun çözüm senaryosu belirlenerek ivedilikle işleme konulur [96]. Dolayısıyla sistemin arızalı şekilde işletimi engellenmiş olur. Bu durum da sistem bileşenlerinin bakıma girme süresinin uzamasını sağlar. Bu noktada prognostik yaklaşımlar gelecek duruma dair tahminler ürettiği gibi, sistem ya da bileşenin bakım süreci ile ilgili de değerlendirmelerde bulunmuş olur [137]. Bunlara ek olarak planlanmamış bakım zamanı ve maliyetlerinin yüksek oranlarda azaltılmasına katkı sağlar [144] ve motorun söküme gireceği ortalama zamanın hesaplanmasına imkan tanır [109, 110]. Bu sayede hatırı sayılır oranlarda mali ve zamansal tasarruflar elde edilmesine zemin hazırlar.

Prognostik süreçler genel olarak; hata modu, etkileri ve kritik analizleri (*FMECA, Fault Mode, Effects and Critically Analyses*), bileşen ömrü izleme, kalan ömür hesabı, trend analizi ve hata tahmini olmak üzere 5 temel bölümden oluşmaktadır [68]. Bu süreçlerde, sisteme önceden girilmiş veriler veya sistem ya

da bileşenin işletimi sırasında edinilen deneyim ışığında, mevcut durumun değerlendirilip olası sonuçları belirlenir. Bu sayede olumsuz durum ya da durumlar gerçekleşmeden önce çeşitli önlemlerin alınmasına olanak sağlar. Söz konusu işlevlerin yerine getirilmesi ve oluşabilecek risklerin en aza indirilmesi için geliştirilen belirli teknolojiler ve metotlar bütünü ise prognostik sağlık yönetimi (*PHM, Prognostics and Health Management*) olarak isimlendirilmektedir [66].

4.8.6. Planlama (*Planning*)

EHM sistemlerinin son adımı, mevcut hatanın ve oluşabilecek arızanın işleyiş üzerindeki etkilerini azaltabilmek için gerçekleştirilecek işlemler bütünü olarak tanımlanabilen “planlama (*planning*)” adımıdır [123]. Bu adımda, tanı veya teşhis ile belirlenen durumlara karşı üretilen çözümlerden, en etkin ve uygulama zamanı en düşük olanının belirlenip, uygulamaya hazır hale getirilmesi hedeflenmektedir [75]. Bu süreçte; performans iyileştirme, işletim ömrü uzatma ve bakım maliyetlerini azaltmaya yönelik kurulan ve geribeslemeli kontrol algoritmalarından oluşan “aktif kontrol (*active control*)” kavramı hakimdir [96]. Günümüzde plan adımı içerisinde, “Durum Tabanlı Bakım (*CBM, Condition Based Maintenance*)” konusuna dair artan bir eğilim söz konusudur. CBM tekniğinde genel olarak, bilinen bakım prosedürleri ile sistem ya da bileşenin çalışma anına ait veriler ilişkilendirilerek sağlık değerlendirmesi gerçekleştirilir [145, 146]. Model ve veri tabanlı yaklaşımları bünyesinde barındıran CBM tekniği [45], arıza başlangıçlarının tespit edilmesini sağlayan önleyici bakım şeklidir. Hata uyarılarının, işleyişteki istenmeyen kesintilerin ve beklenmeyen bakım maliyetlerinin azalmasına katkı sağladığı gibi, sistem ya da bileşenin işleme hazır hale gelmesi ve güvenilirliği üzerinde de olumlu etkilere sahiptir [109, 134].

4.9. EHM Standartları

EHM teknikleri; uçak ve alt sistemleri, motorları, yapı ve donanımları için çok çeşitli konfigürasyonlarda gerçekleştirilebilmektedir. Uygulama alanlarının karmaşık yapıya sahip olması, süreç gereksinimlerinin artmasına ve yönetim planlarının daha karmaşık yapılara sahip olması zorunluluğunu beraberinde getirmektedir. Dolayısıyla izleme adımlarından en etkin sonuçların alınabilmesi için, “*hangi özellikler ya da parametreler izlenmeli, kaç adet uçak üzerinde kaç adet motor izlenmeli, sonuçlar nasıl değerlendirilmeli, işletim anında mı ölçüm yapılmalı, yoksa işletim anına ait veriler işletim sonrasında mı analiz edilmeli*” gibi çeşitli sorulara cevaplar verilmelidir [147]. Öte yandan seçilecek olan izleme tekniği, seçilen tekniğin sisteme monte edilmesi, izleme yönteminin işleyişine dair akış diyagramları, teknikte kullanılması gereken donanım ve yazılım gereksinimleri, ölçüm noktaları, ölçüm yöntemleri, algılayıcı teknikleri, çeşitleri ve özellikleri, veri elde etme yöntemleri, veri kayıt şekilleri, veri analizlerinde kullanılacak teknikler, tanı/teşhis algoritmaları vb. gibi uygulama sürecine dair pek çok önemli bilgiye de ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu soruların cevapları ve bahsi geçen gereksinimler, Uluslararası Otomasyon Birliği (*ISA, The International Society of Automation*), Amerikan Materyal Deneme Birliği (*ASTM, American Society for Testing and Materials*) ve Otomotiv Mühendisleri Birliği (*SAE International, Society of Automotive Engineers*) gibi çeşitli kurumlar tarafından standart hale getirilmiş ve uluslararası platformlarda kabul gören dokümanlar şeklinde yayımlanarak literatüre kazandırılmıştır. Ek-3’te ilgili standartlardan EHM sistemleri ile ilgili olanların bir kısmına yer verilmiştir.

ISA : 1945 yılında kurulan ISA , dünya çapında yaklaşık 36000 üyesi ve 350000 müşterisi için, eğitim ve eğitim sağlayan kitaplar, teknik makaleler yayımlayan, konferans ve sergilere ev sahipliği yapan, ağ ve kariyer geliştirme programları sağlayan ve teknoloji ve mühendislik uygulamaları için standartlar geliştiren bir organizasyondur [148-150].

ASTM: 1898’de “American Society for Testing of Materials” ismi ile kurulan organizasyon, 2001 yılından bu yana “ASTM International” ismi ile anılmaktadır. Organizasyon, dünya çapında yaklaşık 12000 adet standart

yayımlamıştır ve söz konusu standartlar; malzeme, ürün, sisteme dair geniş bir yelpazede hizmet vermektedir [151, 152].

SAE International: Başlangıçta “Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automotive Engineers)” olarak kurulan SAE International; motorlu taşıt bileşenlerinin tasarımı, yapımı ve özelliklerine dair teknik, kara araçları için motor gücü ölçümü, motor yağı sınıflandırması, frenler, iletişim ağları, elektrikli araç şarj sistemleri, araç ergonomisi, araç tasarımı ve performansına dair, hava-uzay araçları için; havacılık standartları (*AS, Aerospace Standards*), performans ve kalite standartları, malzeme, ürün, süreç, prosedürler veya test yöntemlerini vb., havacılıkta önerilmiş uygulamalar (*ARP, Aerospace Recommended Practices*), uygulama, prosedürler ve teknoloji dokümantasyonları, standart mühendislik uygulamaları kılavuzları vb., havacılık bilgilendirme raporları (*AIR, Aerospace Information Reports*), referans verileri, geçmişe dair bilgi, eğitim materyali vb., havacılık materyal belirleme (*AMS, Aerospace Material Specification*), malzeme ve sürece dair özellikler vb., havacılık kaynak dokümanları (*ARD, Aerospace Resource Document*), alan verileri, saha testleri, sonuçların derlenmesi gibi çeşitli standartlar yayımlamaktadır [153-155].

EHM sistemleri ile ilgili yayımlanan çeşitli standartların yanında, sistem adımlarından tanı ve teşhis süreçlerindeki çözüm algoritmaları için de bazı standartlaşmış dokümanlar söz konusudur. Bu dokümanlar; sistemde herhangi bir hata belirtisi, anomali ya da arıza algılandığında, kurulan mantık algoritmaları çerçevesinde olası en uygun çözüme ya da bakım planına ulaşılmasına katkı sağlar. Dolayısıyla tanımlanmış ya da sistem tarafından öğrenilmiş hata modlarının, ilgili dokümanlarda yer alan kodlamalar ile ilişkilendirilmesi, özellikle bakım sorumluları açısından büyük kolaylık sağlar. Tüm sistem analizleri yerine, doğrudan sorunlu kısma müdahale sağlanmış olur. Bu durum da, zamansal ve mali konularda yüksek tasarruf ve kazanımların elde edilmesine imkan sağlamaktadır.


EHM sistemleri çözüm algoritmalarına büyük destek sağlayan dokümanlardan yaygın olarak bilineni, 1956 yılında Hava Taşımacılık Birliği (*ATA, Air Transport Association*) tarafından literatüre kazandırılan ve “ATA Kodları (*ATA Codes*)” olarak isimlendirilen dokümandır. Süreç içerisinde çeşitli

güncellemeler geçiren ve “JASC Kod Tablosu (*JASC Code Table, The Joint Aircraft System/Component*)” olarak anılan bu doküman, pilot, mühendis ve bakım teknisyeninin süreç üzerindeki hakimiyetini arttırmakta ve tüm ticari uçaklar için referans olarak kabul edilmektedir (Ek-4) [156].

4.10. Uygulama Örnekleri

EHM teknikleri günümüzde pek çok kurum ya da kuruluş tarafından çok çeşitli projelerde uygulanmaktadır [157, 158] (Bkz. Çizelge 4.4.). Temel mantık aynı olmakla birlikte projeler; uygulama noktaları, sistemin uygulanış şekilleri, kullanılan sistem elemanları gibi geniş bir yelpazede çeşitlilik göstermektedir. Bu çeşitlilik, izleme ve yönetim sistemlerinin farklı isimler altında literatüre kazandırılmasını sağlamıştır.

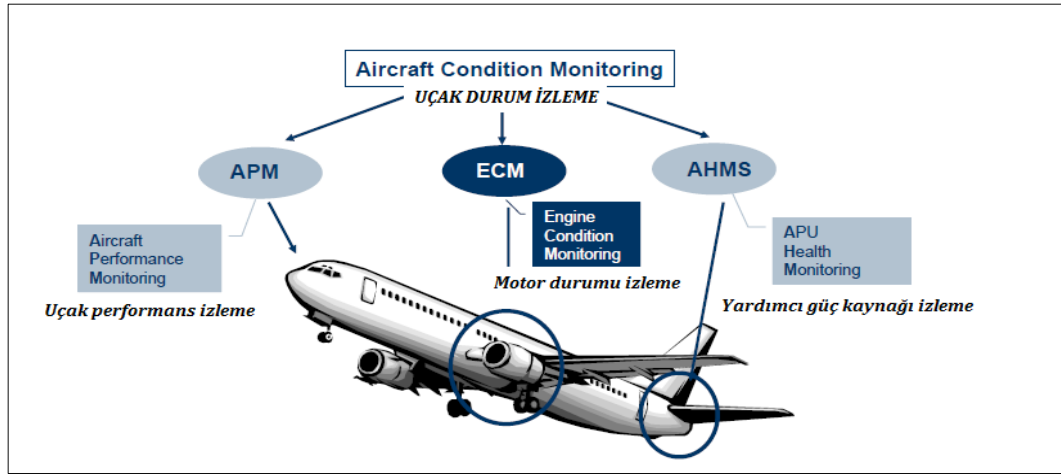
Çizelge 4.4. Çeşitli EHM programları [157, 158]

Uygulayıcı	Program	
NASA AMES	Integrated Propulsion Engine & Vehicle Control • <i>F-16</i>	
NAVAIR	Integrated Airplane Health Management (IAHM) • <i>F/A-18 E/F Uçuş kontrolleri</i>	
USAF	C-17 Integrated Vehicle Health Management	
AFRL	UCAV X45A Propulsion Prognostics Health Monitoring • <i>X45A platformundaki F124 motoru için PHM Algoritmaları</i>	
USAF/AF RL	Aircraft Electrical Power System Prognostics and Health Management (AEPHM) • <i>Elektro-mekanik akçüatörler, yakıt pompa/vanaları, kablolama ve jeneratörler için sağlık yönetimi</i>	
LPTI	Prognosis and Emission Mitigation for DPHM Infrastructure • <i>Gerçek zamanlı işletim verileri ile prognostik süreçlerin geliştirilmesi</i>	
NASA	Intelligent Propulsion System (Intelligent Vehicle System) • <i>Entegre Sağlık Yönetimi, Kontroller ve Operasyonlar</i>	

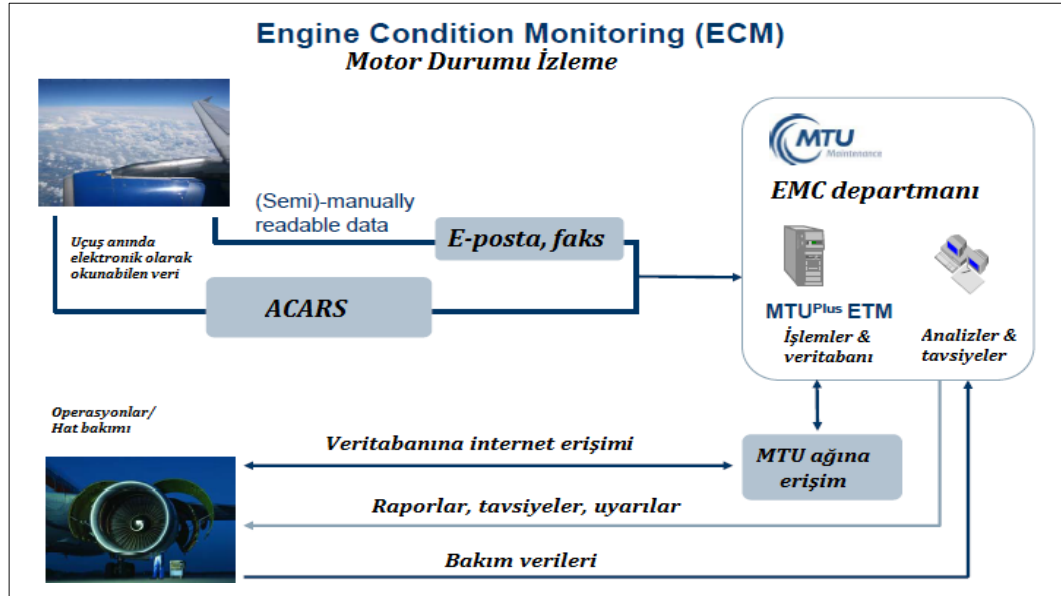
Literatürde yer alan söz konusu projelerden ve çeşitli firmaların gerçekleştirmiş oldukları çalışmalardan bir kısmına aşağıda kısaca değinilmiştir:

MTU

MTU firması ise ilgili konuda “uçak durumunu izleme (*Aircraft Condition Monitoring*)” sistemleri ile hizmet vermektedir. Söz konusu sistem, uçak performansı, motor ve yardımcı güç kaynağı izleme olmak üzere 3 ana kısımdan oluşmaktadır [159] (Bkz. Şekil 4.16.).



(a) Uçak durumu izleme



(b) Motor durumu izleme

Şekil 4.16. MTU uçak ve motor izleme diyagramları [159]

Boeing

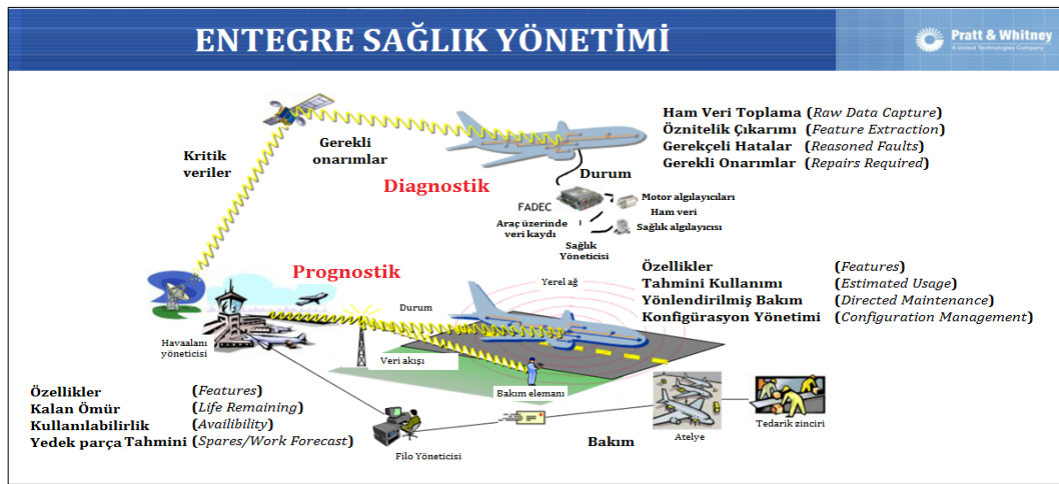
Firma, uçak sistem ve bileşenlerini uçuş anında izleme kabiliyetine sahip olan ve 58 havaalanında 2000’den fazla uçakta kullanılmakta olan “havaaracı sağlık yönetim sistemi (AHM, *Airplane Health Management System*)” adını verdikleri tasarımları ile hizmet vermektedir. Yer istasyonuna gerçek zamanlı olarak veri aktarımı yapma kabiliyetine sahip olan AHM sistemi, herhangi bir acil durumda havayolu personeline internet, e-posta, faks ya da çağrı cihazı aracılığıyla duruma dair gerekli bilgileri iletebilmektedir [160].

Pratt&Whitney

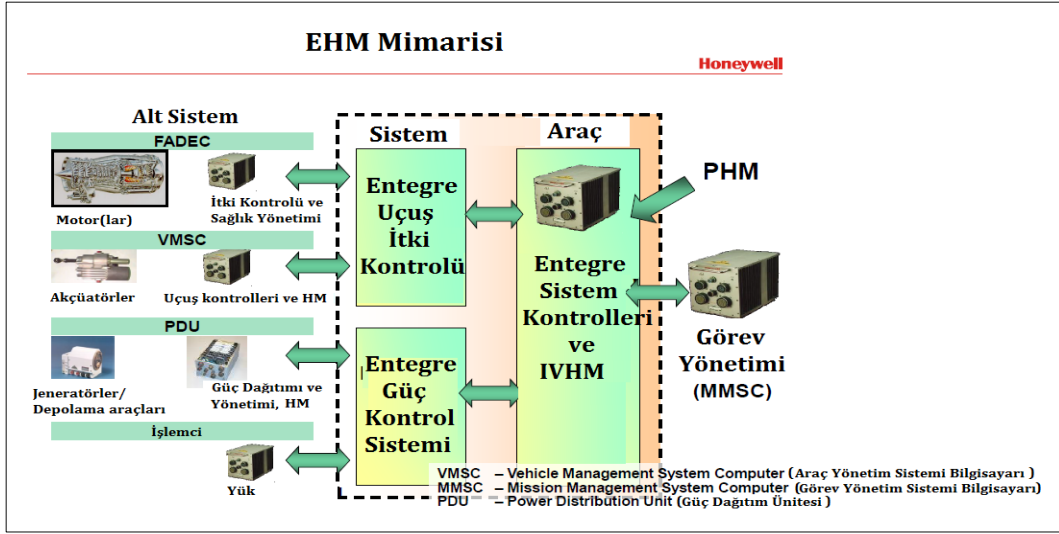
EHM kapsamında ele alınan izleme adımları, uçak yerde iken gerçekleştirilebildiği gibi seyir halinde iken de gerçekleştirilebilmektedir. Sektörün önde gelen firmalarından Pratt&Whitney, diagnostik ve prognostik süreçleri barındıran ve havadan/yerden izleme kısımlarından oluşan “*Tümleşik Sağlık Yönetimi (Integrated Health Management)*” sistemi ile birçok uygulama gerçekleştirmektedir [161] (Bkz. Şekil 4.17.).

Honeywell

Firma; alt sistem, sistem ve araç odaklı EHM tekniği geliştirmiştir. Bu teknik, PHM uygulamasını içerdiği gibi entegre sistem kontrolleri ile IVHM yapısını da barındırmakta ve bu sayede kullanıcılarına geniş kapsamlı bir hizmet sunmaktadır [162] (Bkz. Şekil 4.18.).



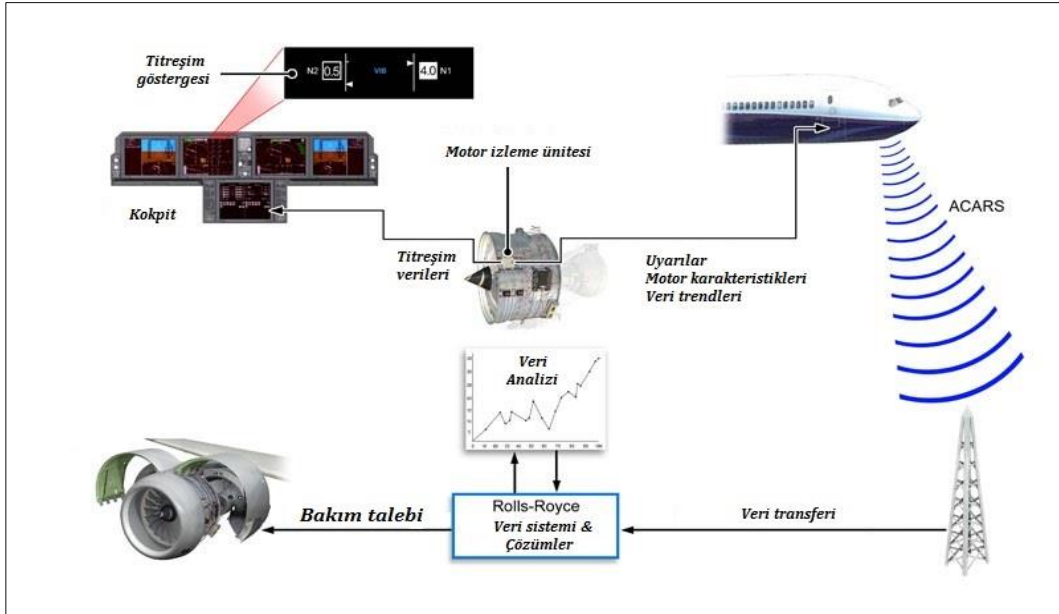
Şekil 4.17. Pratt&Whitney entegre sağlık yönetimi işleyişi [161]



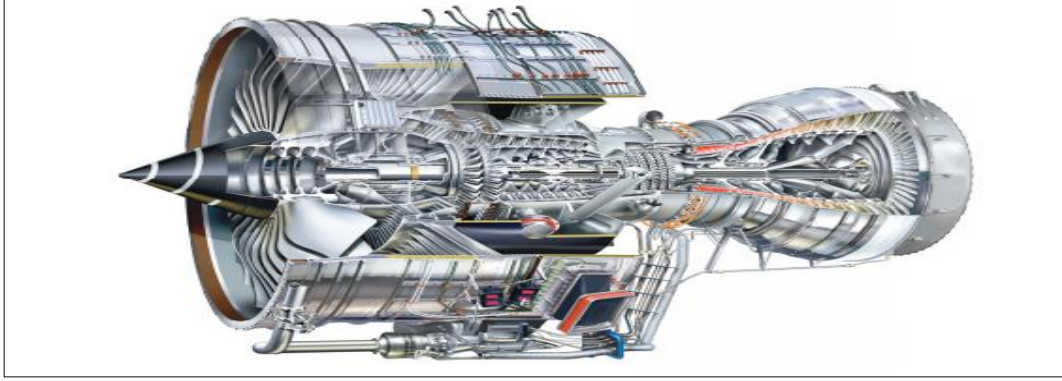
Şekil 4.18. Honeywell motor sağlığı izleme diyagramı [162]

Rolls Royce

Firma, gerçekleştirdikleri “motor sağlığı yönetimi (*Engine Health Management*)” sistemi ile dünyanın dört bir yanında faaliyette olan binlerce motorun sağlık süreçlerinin izlenmesini mümkün kılmaktadır [163] (Bkz. Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. Rolls Royce motor sağlığı yönetimi diyagramı [163]



Şekil 4.20. Trent 900 motoru [164]

Şekil 4.19.'da gösterilen sistemde genel olarak şaft hızları ve türbin gaz sıcaklığı değerleri, ana performans parametreleri olarak belirlenmiştir. Öte yandan motorlar; gaz hattında çok sayıda basınç/sıcaklık tespit cihazları, hareketli bileşenlerde ise titreşim algılayıcıları ve yağlama sisteminde elektrik/manyetik çip dedektörler ile donatılmıştır. A-380 uçağında kullanılan Trent 900 motorları sistemin ilk uygulamaları arasındadır [165] (Bkz. Şekil 4.20.).

AvioAero

Firma, veri toplama/işleme/kaydetme ve yer istasyonuna ilgili verileri uçuş anında iletme kabiliyetlerine sahip olan “motor/sağlık izleme sistemi (*EMS/HMS, Engine/Health Monitoring System*)” ile uçak motorlarının performans durumlarının izlenmesine olanak sağlamaktadır. Bunlara ek olarak katıldıkları iki büyük proje ile izleme teknikleri alanındaki deneyimlerini kuvvetlendirmişlerdir.

Bu projelerden ilkinin uygulama noktası RB199 motorudur [166] (Bkz. Şekil 4.21.a.). Bu motor için tasarladıkları “bakım kaydedici (*Maintenance Recorder*)” sistemi, uçuş anında motor verilerini analiz etme, motor bileşenlerinin kalan faydalı ömürlerini hesaplama ve performans durumlarını belirleme işlevlerini yerine getirme kabiliyetlerine sahiptir. Projenin bir diğer uygulama noktası ise EJ200 motorudur [167] (Bkz. Şekil 4.21.b.). Bu motor için, bileşen faydalı ömrü hesaplama ve yağlama sisteminde yabancı maddelerin tespiti işlevlerini yerine getirebilen “faydalı ömür ve safsızlaştırılmamış yağ (*Lifing and Oil Debris*)” sistem tasarımını gerçekleştirmiştir [168].



(a) RB199 motoru



(b) EJ200 motoru

Şekil 4.21. RB199 ve EJ200 motorları [167, 168]

F110:

F-16 ve F-15 uçaklarında kullanılan F110-GE-100 motorunda kullanılan EMS sistemi, uçak ve motor parametrelerine ait verilerin elde edilmesi, bakım aksiyomlarının tanımlanması, kaydedilen verilerin yer istasyonuna aktarılması işlevlerini yerine getirebilmekte ve on/off line analizleri mümkün kılmaktadır [169].

Joint Strike Fighter F-35:

F-35 uçağında kullanılan PHM konsepti, on-board ve off-board CBM sistem özelliklerine sahiptir. Sistem uçuş anında hataları değerlendirebildiği için, uçağın görev kabiliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Öte yandan bakım planlaması geliştirme, güvenilirliği artırma ve demontaj işlemi ile hasarlanmayı azaltma gibi avantajlar sağlamaktadır [132].

C-17

T-1 olarak da bilinen C-17 Globemaster III askeri nakliye uçağında, Pratt&Whitney FI-PW-100 turbofan motoru kullanılmaktadır. Motor, alt sistemleri ve bileşenlerinin işletim anında ya da sonrasında verimli bir şekilde kontrol ve test edilmesine, izlenmesine ve geri dönüşü olmayan hataların önlenmesine imkan sağlayan “tümleşik araç sağlık yönetimi (*IVHM, Integrated Vehicle Health Management*)” programı ile donatılmıştır [170]. Program kapsamında PHM teknikleri uygulanmakta ve bu sayede motor ve sistemlerine dair problemlerin teşhisi erkenden yapılarak uçuş güvenliğinin sürdürülebilirliğine katkı sağlanmaktadır [171].

Bazı NASA projeleri: F-15, F-18, X29A

F-15 uçaklarında “tümleşik itiş ve uçuş kontrolü (*Integrated Propulsion and flight control*)” sistemi kullanılmaktadır. F-18 uçak motorları ise benzer şekilde “araç sağlığı yönetimi (*Vehicle Health Management*)” sistemi ile donatılmıştır. Normal koşullarda sistem saniyede 40 ölçüm alırken, diagnostik süreç işlerken saniyedeki ölçüm sayısı 800’e ulaşmaktadır. Söz konusu durum sistemin mevcut ve gelecek durum tahminindeki hassasiyeti arttırmaktadır. F404-GE-400 turbofan motoru kullanan X-29A uçağı için ise “bilgisayar yardımcı motor izleme (*Intelligent Computer Assistant for Engine Monitoring*)” sistemi geliştirilmiştir [172]. Sistem veya bileşenlerde meydana gelebilecek beklenmeyen güvenlik risklerinin önlenmesi için AirSTAR (*Airborne Subscale Transport Aircraft Research*) isimli uçuş test düzeneğı geliştirilmiştir [173].

SAGE (System Analysis of Gas Turbine Engine)

General Electric firması tarafından geliştirilen performans izleme programıdır. Programda temel performans parametresi olarak, “*EGS, Egzoz Gaz Sıcaklığı marjini*” değeri kullanılmıştır. Bu değer, motorun kalkıştaki maksimum kalkış EGS değeri ile, o motor tipi için sertifikaya edilmiş olan limit EGS değeri arasındaki farktır. Program 20 adet Boeing737-400 uçağına takılı olan toplam 40 adet CFM56-31 motoruna uygulanmıştır. Bu motorlara ait EGS marjin değerleri 4 yıl boyunca izlenerek kayıt altına alınmış ve motordaki aşınmalar ile performans kayıplarına dair analizler gerçekleştirilmiştir [98].

ADEPT (Aviation Diagnostic and Engine Prognostic Technology)

CH47 model helikopterlerde kullanılan T-55 tip motorlarının geleceğe dair tanı ve sağlık yönetimi için Honeywell firması tarafından gerçekleştirilen bir yazılımdır. Söz konusu yazılımda yapay sinir ağları tabanlı ve gerçek zamanlı hata tespit algoritmaları ile motor surge, düşük hız, alev sönmesi, yüksek sıcaklık, güç türbini yüksek giriş sıcaklığı gibi istenmeyen durumlar, oluşum evrelerinde tespit edilebilmektedir [174].

5. İHA MOTORU İÇİN VERİ TABANLI GELECEK DURUM TAHMİNİ

EHM tekniklerinin uygulanmasıyla elde edilen yüksek mali/zamansal tasarruflar ve insan faktörünün en aza indirilmesi gibi kazanımlar, süreç içinde bu tekniklere duyulan ilginin artmasını sağlamıştır. Bu duruma paralel olarak gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, EHM tekniklerinin geleceğe yönelik veri tahmini kısmı ele alınmıştır.

Tez kapsamında uygulama noktası olarak, TEI firmasına ait bir insansız hava aracı motoru seçilmiştir MATLAB programı ile gerçekleştirilen veri tabanlı yazılım (**ANAKOD**) ile arıza oluşumuna sebebiyet verebilecek durumların önceden tespiti sağlanarak; motorun istenmeyen koşullarda çalışması engellenmiştir. Tasarlanan sistemde EGT verileri ana motor performans parametresini oluştururken; hesaplamalarda RPM, OYS (*ön yatak sıcaklığı*) ve AYS (*arka yatak sıcaklığı*) verileri kullanılmıştır.

5.1. ANAKOD

Motor performans parametrelerine dair gerçekleştirilen yazılımda temel olarak, ilgili RPM aralıklarındaki EGT değerlerinde meydana gelebilecek sapmalar önceden tespit edilmiş ve bu sapmalarda, OYS ve AYS parametrelerinin sürece katkısı ortaya konulmuştur.

ANAKOD temel olarak “Verilerin düzenlenmesi”, “maksimum aşma kontrolü (*mnbmxe*)” ve “gelecek verinin üretilmesi” olmak üzere 3 ana bölüm içermektedir.

5.1.1. Verilerin düzenlenmesi

Bu tez kapsamında kullanılan motor verileri (zaman, RPM, OYS ve AYS), TEI tarafından tedarik edilmiştir. Motorunun, çeşitli zaman dilimlerinde, belirli çevresel şartlar altında ve RPM aralıklarında çalıştırılmasıyla elde edilen bu veriler, **ANAKOD** tarafından düzenlenerek “*rv, referans veri matrisi*” oluşturulmuştur. Bu kısmın elde edilme adımları aşağıda sıralanmıştır (Bkz. Şekil 5.1.):

ADIM-1

Ölçümlerde kullanılan en yüksek RPM değerini de içine alacak şekilde RPM aralıkları (ra) belirlendi.

ra matrisi

	RPM min	RPM max
ra (1)	0	x
ra (2)	x	2x
ra (.)	.	.
ra (.)	.	.
ra (.)	.	.

(a)

ADIM-2

Aynı RPM değerinde alınmış olan EGT, OYS ve AYS değerlerinin ortalaması alındı.

oaRPM matrisi

	RPM	EGT	OYS	AYS
	3r	e	2o	3a
	3r	2e	2o	3a
	3r	2e	3o	4a
	3r	2e	4o	5a
	3r	3e	4o	5a
	↓	↓	↓	↓
Ort. →	3r	2e	3n	4a

(b)

ADIM-3

Ortalaması alınmış veriler, ra'na göre gruplandı. Değer olan ve olmayan ra belirlendi.

Değer olan RPM aralıkları	Değer olmayan RPM aralıkları
x – 2x	3x – 4x
5x – 6x	7x – 8x
8x – 9x	9x – 10x
20x – 21x	24x – 25x
22x – 23x	25x – 26x
31x – 32x	33x – 34x
40x – 41x	41x – 42x

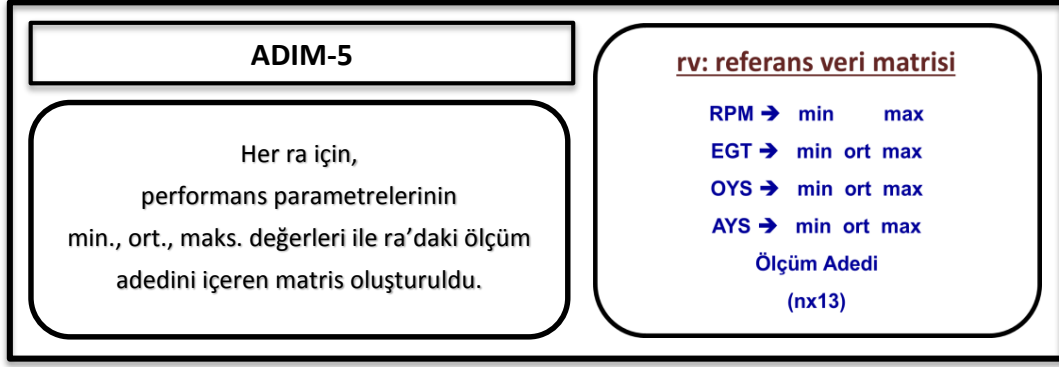
(c)

ADIM-4

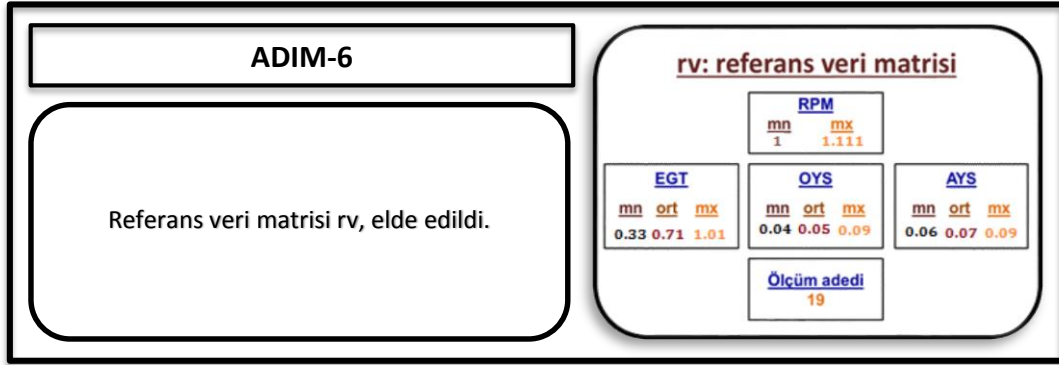
Değer olmayan ra için; bir önceki ve sonraki ra'ndaki değerler baz alınarak, yeni EGT, OYS ve AYS değerleri üretildi.

	RPM	
	1.005	
	1.016	
Değer uydurulacak RPM aralığı	1.027	
	1.038	
1 -- 1.111	1.050	EGT, OYS ve AYS
	1.061	
	1.072	
	1.083	
	1.105	

(d)



(e)

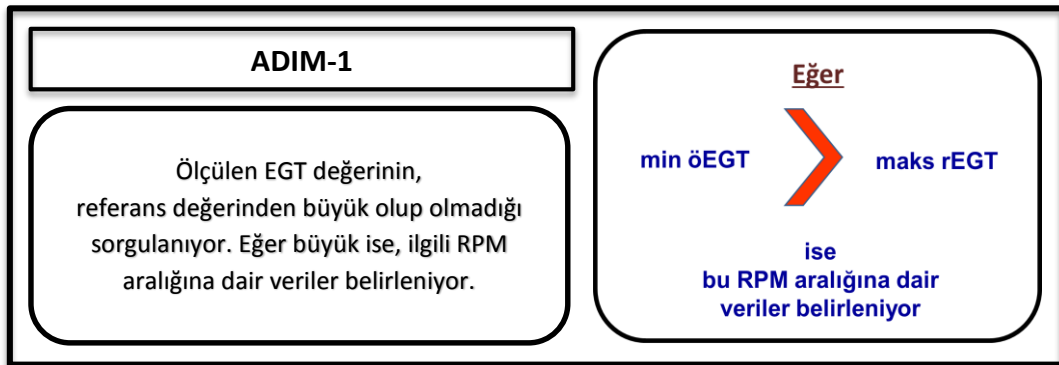


(f)

Şekil 5.1. Verilerin elde edilmiş adımları

5.1.2. Maksimum aşma kontrolü (mnbmxe)

mnbmxe, **ANAKOD** 'un ikinci kısmını oluşturmaktadır. Bu kısımda, ölçülen EGT değeri (öEGT), ilgili RPM aralığındaki maksimum referans EGT değeri (rEGT) ile karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmadaki temel amaç, öEGT'nin minimum değerinin, rEGT'nin maksimum değerinden büyük olması durumunun tespitidir. Bu kısmın işleyiş adımları aşağıda sıralanmıştır (Bkz. Şekil 5.2.):



(a)

ADIM-2

Belirlenen aralıktaki min. EGT değerinin; referans EGT değerini ve motorun ulaşabildiği maksimum EGT değerini aşma miktarları yüzde cinsinden hesaplandı.

AŞMA SONUÇLARI			
RPM min	RPM maks	mn-mx % aşma	mxEGT yi % aşma
4.55	4.66	1.83	18.81

(b)

ADIM-3

Korelasyon analizi için , korelasyon katsayısı aralıkları ve ilişki düzeyleri belirlendi.

Korelasyon analizi...

r	İlişki düzeyi
$0.00 \leq r < 0.25$	Çok zayıf
$0.25 \leq r < 0.49$	Zayıf
$0.49 \leq r < 0.69$	Orta
$0.69 \leq r < 0.89$	Yüksek
$0.89 \leq r < 1.00$	Çok yüksek
$r = 1.00$	Mükemmel

(c)

ADIM-4

Korelasyon analizi sonucunda, ilişki yüzde değerleri, derecesi ve orantı durum değerleri belirlendi.

KORELASYON SONUÇLARI					
EGT - OYS İlişkisi (%)	EGT - AYS İlişkisi (%)	Baskın parametre	Sorumluluk Payı	İlişki Derecesi	Orantı
0.17	0.36	AYS	0.36	Orta	Ters Orantı

(d)

ADIM-5

Korelasyon sonuçlarının anlamlı olup olmadığının belirlenmesi için, t_testi uygulandı.

İlgili aralık için t, test istatistiği değeri hesaplanıyor

Hesaplanan t değeri, t_tablo değeri ile karşılaştırılıyor

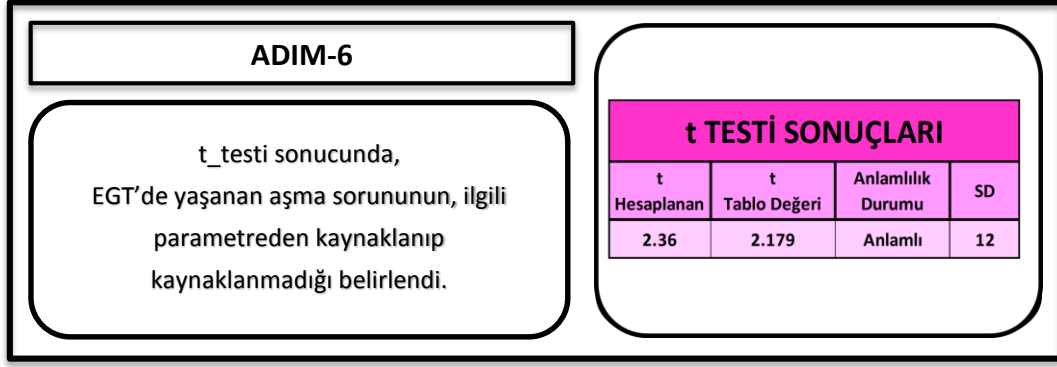
t

>

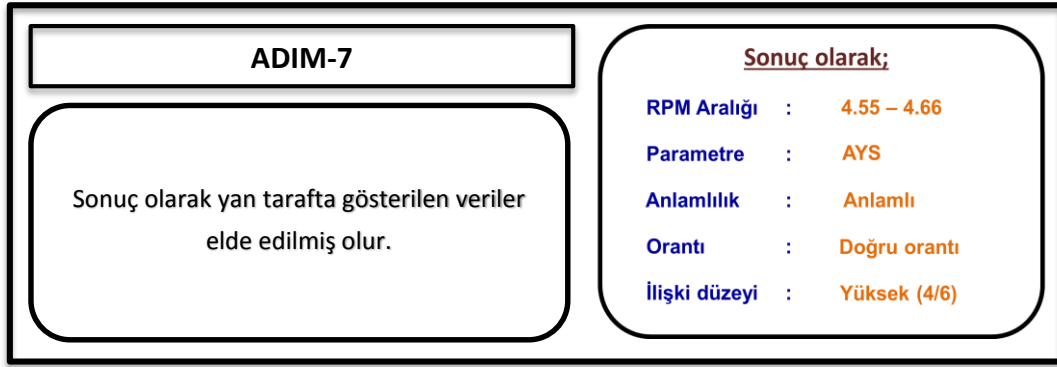
t_{tablo}

İLİŞKİ ANLAMLI DIR

(e)



(f)



(g)

Şekil 5.2. Maksimum aşma kontrolü işleyiş adımları

5.1.3. Gelecek verinin tahmini

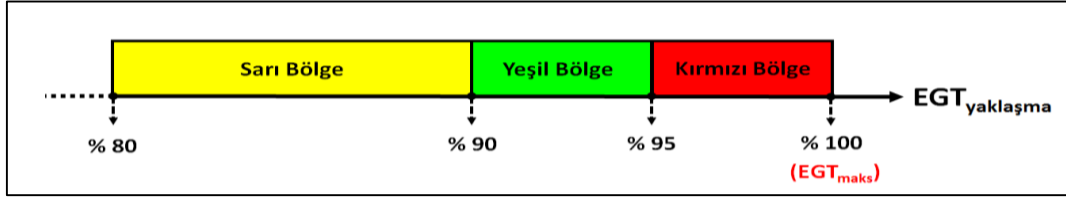
ANAKOD'un son bölümü olan, gelecek verinin tahmini kısmındaki işlemler, temel olarak “*EGT*marjin değeri (*EMD*)” üzerinden yapılmaktadır (5.1). Tanım olarak; ilgili RPM aralığında, EGT_{maks} ile $EGT_{ölçülen}$ arasındaki farkın, yüzde cinsinden karşılığıdır. Bu değer 1’den çıkarılmış hali ise EGT_{maks} ’a yaklaşma miktarının, yüzde cinsinden değerini ($EGT_{yaklaşma}$) ifade etmektedir (5.2).

$$EMD = \frac{EGT_{maks} - EGT_{ölçülen}}{EGT_{maks}} \quad (5.1)$$

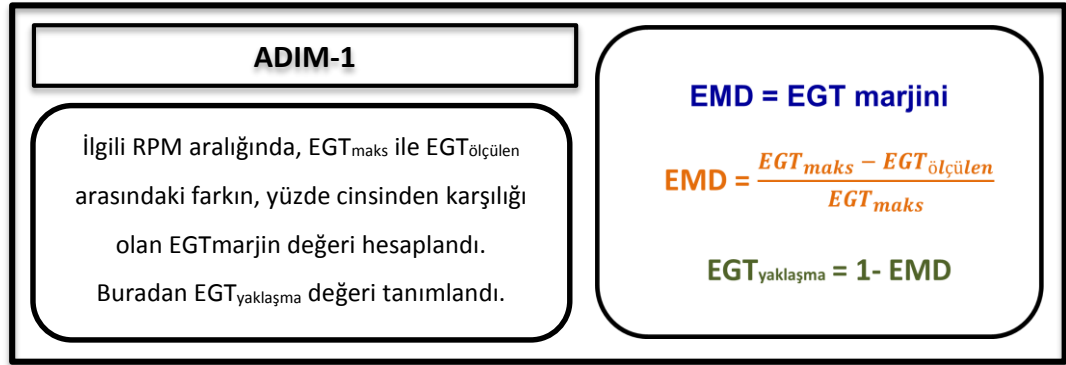
$$EGT_{yaklaşma} = 1 - EMD \quad (5.2)$$

$EGT_{yaklaşma}$ değerine bağlı olarak 3 adet yaklaşma bölgesi tanımlanmıştır. Sırasıyla sarı, yeşil ve kırmızı olarak isimlendirilen bu bölgeler ve sınır değerleri Şekil 5.3.’te gösterilmektedir. Ölçülen EGT değerinin, herhangi bir bölgeye girmesi durumunda **ANAKOD**, EGT’nin gelecek değerini hesaplamaktadır. Sırasıyla sarı bölgeden kırmızı bölgeye doğru, $EGT_{yaklaşma}$ yani, EGT_{maks} değerine olan yakınlık

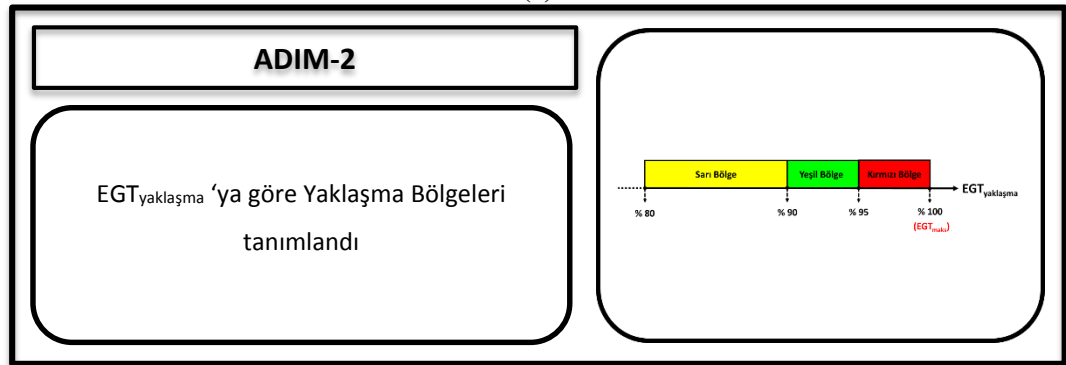
artmaktadır. Dolayısıyla, hesaplanacak olan gelecek değerin, EGT_{maks} 'ı aşma olasılığı da o kadar yüksek olmaktadır. **ANAKOD** 'un temel işlevi ise bu aşma durumunu önceden tahmin edip önleyebilmektir. Söz konusu işlevi başarı ile yerine getirebilme kabiliyetine sahip olan **ANAKOD**, işleyişinde veri tabanlı yaklaşım kullanmaktadır. Bu yaklaşımlar kapsamında; korelasyon analizi, regresyon analizi, trend modeli belirleme, en küçük kareler, hareketli ortalamalar, t testi gibi analiz ve yöntemler yer almaktadır. **ANAKOD**'un hesapladığı gelecek değerin; önceden belirlenmiş olan limit değerleri aşması durumunda ise, kullanıcı sesli ve yazılı olarak uyarılmaktadır. Sürecin işleyiş adımları Şekil 5.4.'te gösterilmektedir.



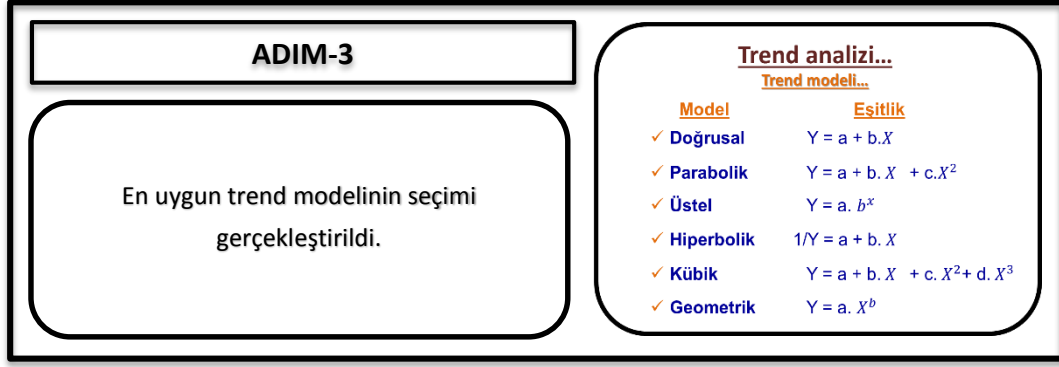
Şekil 5.3. $EGT_{yaklaşma}$ bölgeleri



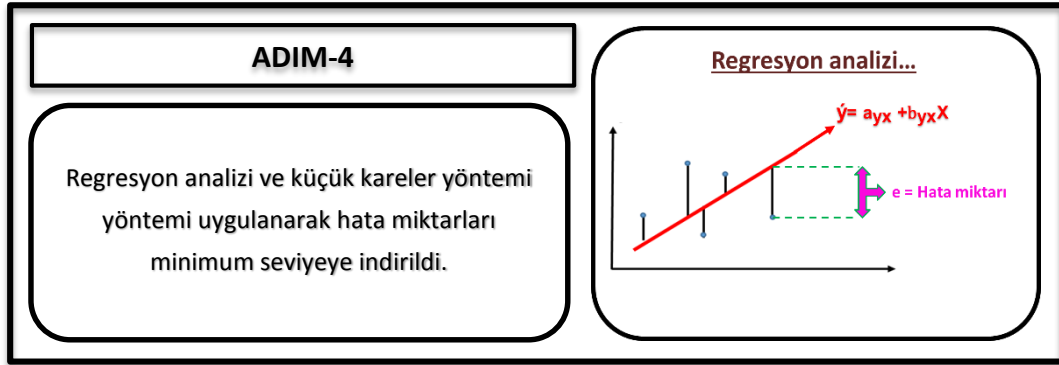
(a)



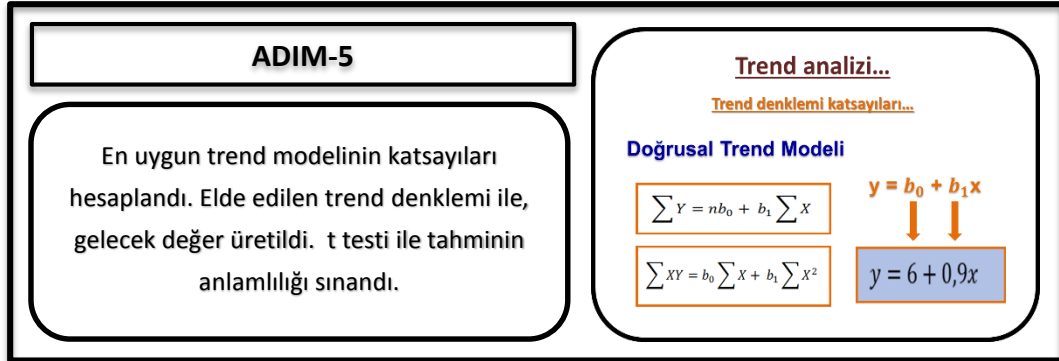
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.4. Geleceğe dair veri üretimi işleyiş adımları

Geleceğe dair veri üretimiyle birlikte, üç temel bölümden oluşan **ANAKOD** tamamlanmış olmaktadır. Sonuç olarak, mevcut verilerden yola çıkarak geleceğe dair veri tahmini süreci, olası en az hata payı ile gerçekleştirilmiştir.

6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu tez kapsamında, TEI firmasına ait küçük bir insansız hava aracı motoru için EHM sistemi çerçevesinde, ana motor performans parametresi EGT'nin, gelecek durumunun tahmin edilmesi süreci gerçekleştirilmiştir. Veri tabanlı yaklaşımın kullanıldığı bu süreçte; “sarı”, “yeşil” ve “kırmızı” olmak üzere 3 adet yaklaşma bölgeleri ile bir adet “risk bölgesi (*ölçülen EGT değerinin, ilgili RPM aralığındaki referans EGT değerinden büyük olduğu durum*)” tanımlanmıştır. Mevcut EGT değerinin, tanımlanan yaklaşma bölgelerinden herhangi birine girmesi durumunda, ANAKOD gelecek değer tahmini sürecini başlatmaktadır. Bu süreçteki tahmin, parametrenin genel trendi üzerinden hesaplanmaktadır. Hesaplanan tahmini değer, önceden tanımlanmış sınır değerleri aşması durumunda ise kullanıcı ANAKOD tarafından sesli olarak uyarılmaktadır. Ayrıca sonuçlar ekranda yazılı olarak raporlanmaktadır. Bu rapor; ölçüm verileri, trend analizi, korelasyon analizi, t-testi, ilgili parametre ve yapılan tahminlerin gerçek test verileri ile kıyaslanmasına dair bilgileri içermektedir.

Tanımlanan yaklaşma bölgelerine göre ANAKOD tarafından elde edilen çıktılar; gerçek test verileri ile karşılaştırıldığında; yapılan tahminlerin ve yönlendirmelerin doğru olduğunu ortaya koymaktadır. ANAKOD'un başarılı bir şekilde çalıştığını gösteren bu durum; motorun uygunsuz koşullar altında çalışmasının engellendiği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla;

- motor faydalı ömrünün etkin bir şekilde kullanılması,
- bileşenlerin hasarlanma/aşınma durumlarının azaltılması,
- bakım masraflarının azaltılması,
- erken/geç - söküm/takım işlemlerinin önlenmesi,
- motor işletim süresinin arttırılması,
- sistem güvenilirliğinin sağlanması

gibi kazanımların elde edilmesine imkan sağlanmıştır. Söz konusu kazanımlar, yüksek oranlarda gerek mali gerekse zamansal tasarrufların elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

6.1. Elde Edilen ANAKOD Çıktıları

Bu başlık altında, tanımlanan risk bölgelerine dair elde edilen çıktılar yer almaktadır. Elde edilen sonuçlardaki sayısal değerler, gerçek verilerin ölçeklendirilmiş şeklidir.

6.1.1. Sarı bölgeye ait program çıktıları

!!! ALARM !!!
!!! ÖLÇÜMÜ DURDUR!!!
Ölçüme devam edilirse mxEGT, % 6.39 oranında aşılacak

(a) Uyarı

Ölçüm verileri:

3.88 -- 4 RPM aralığında;

Satır No: 66

mxEGT	= 0.588 derece
Ölçülen EGT	= 0.523 derece
EGTmx a yaklaşma	= % 89

SARI BÖLGE

(b) Ölçüme dair veriler

Trend verileri:

Veri seti için en uygun model:

DOGRUSAL TREND MODELİDİR

Doğrusal Trend Modeline göre

Gelecek Değerin Tahmini Değeri (GDTD): 0.626 derecedir

GDTD,

3.88 – 4 RPM aralığındaki EGTmx değerinden % 6.39 oranında fazladır

(c) Trend analizi sonuçları

Korelasyon verileri:

r = Korelasyon katsayısı
r =0.5731

AYS değeri üzerindeki dalgalanmanın %32.85'i,
EGT' deki aşma durumundan kaynaklıdır

(d) Korelasyon analizi sonuçları

t Testi verileri:

t = t Testi, test istatistiği olmak üzere
t =2.6169

t Testi ne göre EGT ile AYS arasındaki ilişki anlamlıdır

(e) t-testi sonuçları

<p>SONUÇ OLARAK: *****</p> <p>EGT ile AYS arasında;</p> <p>Orta dereceli</p> <p>Pozitif yönde</p> <p>Anlamlı</p> <p>bir ilişki bulunmaktadır</p>	<p style="text-align: center;">Sonraki 12 adet EGT ölçümünün ortalaması = 0.604 Bu ortalama değer, ilgili aralıktaki mxEGT değerinden % 2.84 oranında fazladır</p> <p style="text-align: center;">Dolayısı ile motor performansı açısından, ölçümün durdurulmuş olması, son derece olumlu bir müdahaledir.</p>
---	--

(f) Genel sonuç ve kıyaslama

Şekil 6.1. Sarı bölge sonuçları

6.1.2. Yeşil bölgeye ait program çıktıları

!!! ALARM !!!

!!! ÖLÇÜMÜ DURDUR!!!

Ölçüme devam edilirse mxEGT, % 3.08 oranında aşılacak

(a) Uyarı

Ölçüm verileri:

4.44 – 4.55 RPM aralığında;

Satır No: 56

mxEGT = 0.621 derece
Ölçülen EGT = 0.576 derece
EGTmx a yaklaşma = % 93

YEŞİL BÖLGE

(b) Ölçüme dair veriler

Trend verileri:

Veri seti için en uygun model:

DOGRUSAL TREND MODELİDİR

Doğrusal Trend Modeline göre

Gelecek Değerin Tahmini Değeri (GDTD): 0.640 derecedir

GDTD,

3.88 -- 4 RPM aralığındaki EGTmx değerinden % 3.08 oranında fazladır

(c) Trend analizi sonuçları

Korelasyon verileri:

r = Korelasyon katsayısı

r = 0.5385

AYS değeri üzerindeki dalgalanmanın %29'u,

EGT' deki aşma durumundan kaynaklıdır

(d) Korelasyon analizi sonuçları

t Testi verileri:

t = t Testi, test istatistiği olmak üzere

t = 2.4749

t Testi ne göre EGT ile YYS arasındaki ilişki anlamlıdır

(e) t-testi sonuçları

<p>SONUÇ OLARAK: *****</p> <p>EGT ile AYS arasında;</p> <p>Orta dereceli</p> <p>Pozitif yönde</p> <p>Anamlı</p> <p>bir ilişki bulunmaktadır</p>	<p>Sonraki 12 adet EGT ölçümünün ortalaması = 0.638 Bu ortalama değer, ilgili aralıktaki mxEGT değerinden % 2.70 oranında fazladır</p> <p>Dolayısı ile motor performansı açısından, ölçümün durdurulmuş olması, son derece olumlu bir müdahaledir.</p>
--	--

(f) Genel sonuç ve kıyaslama

Şekil 6.2. Yeşil bölge sonuçları

6.1.3. Kırmızı bölgeye ait program çıktıları

<p>!!! ALARM !!!</p> <p>!!! ÖLÇÜMÜ DURDUR!!!</p> <p>Ölçüme devam edilirse mxEGT, % 9.23 oranında aşılacak</p>

(a) Uyarı

<p>Ölçüm verileri: *****</p> <p>3.44 – 3.55 RPM aralığında;</p> <p>Satır No: 5</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>mxEGT</td> <td>= 0.571 derece</td> </tr> <tr> <td>Ölçülen EGT</td> <td>= 0.555 derece</td> </tr> <tr> <td>EGTmx a yaklaşma</td> <td>= % 97</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">KIRMIZI BÖLGE</p>	mxEGT	= 0.571 derece	Ölçülen EGT	= 0.555 derece	EGTmx a yaklaşma	= % 97
mxEGT	= 0.571 derece					
Ölçülen EGT	= 0.555 derece					
EGTmx a yaklaşma	= % 97					

(b) Ölçüme dair veriler

Trend verileri:

Veri seti için en uygun model:

ÜSTEL TREND MODELİDİR

Üstel Trend Modeline göre

Gelecek Değerin Tahmini Değeri (GDTD): 0.623 derecedir

GDTD,

3.88 – 4 RPM aralığındaki EGTmx değerinden % 6.39 oranında fazladır

(c) Trend analizi sonuçları

Korelasyon verileri:

r = Korelasyon katsayısı

r = 0.5196

AYS değeri üzerindeki dalgalanmanın %27'si,

EGT' deki aşma durumundan kaynaklıdır

(d) Korelasyon analizi sonuçları

t Testi verileri:

t = t Testi, test istatistiği olmak üzere

t = 2.4327

t Testi ne göre EGT ile AYS arasındaki ilişki anlamlıdır

(e) t-testi sonuçları

SONUÇ OLARAK:

EGT ile AYS arasında;

Orta dereceli

Pozitif yönde

Anlamlı

bir ilişki bulunmaktadır

Sonraki 12 adet EGT ölçümünün ortalaması = 0.605

Bu ortalama değer, ilgili aralıktaki mxEGT değerinden

% 5.78 oranında fazladır

Dolayısı ile motor performansı açısından,

ölçümün durdurulmuş olması,

son derece olumlu bir müdahaledir.

(f) Genel sonuç ve kıyaslama

Şekil 6.3. Kırmızı bölge sonuçları

6.1.4. Risk bölgesine ait program çıktıları

!!! ALARM !!!
!!! ÖLÇÜMÜ DURDUR!!!
Ölçüme devam edilirse mxEGT, % 9.23 oranında aşılacak

(a) Uyarı

Ölçüm verileri:

3.44 – 3.55 RPM aralığında;

Satır No: 7

mxEGT	= 0.572 derece
Ölçülen EGT	= 0.576 derece
EGTmx'ı aşma	= % 1

RISK BÖLGESİ

(b) Ölçüme dair veriler

Trend verileri:

Veri seti için en uygun model:
ÜSTEL TREND MODELİDİR
Üstel Trend Modeline göre
Gelecek Değerin Tahmini Değeri (GDTD): 0.624 derecedir
GDTD,
3.88 – 4 RPM aralığındaki EGTmx değerinden % 9.23 oranında fazladır

(c) Trend analizi sonuçları

Korelasyon verileri:

r = Korelasyon katsayısı
r = 0.5196
AYS değeri üzerindeki dalgalanmanın %27'si,
EGT' deki aşma durumundan kaynaklıdır

(d) Korelasyon analizi sonuçları

t Testi verileri:

t = t Testi, test istatistiği olmak üzere
t =2.4327
t Testi ne göre EGT ile AYS arasındaki ilişki anlamlıdır

(e) t-testi sonuçları

<p>SONUÇ OLARAK: ***** EGT ile AYS arasında; Orta dereceli Pozitif yönde Anlamlı bir ilişki bulunmaktadır</p>	<p>Sonraki 12 adet EGT ölçümünün ortalaması = 0.599 Bu ortalama değer, ilgili aralıktaki mxEGT değerinden % 6.78 oranında fazladır Dolayısı ile motor performansı açısından, ölçümün durdurulmuş olması, son derece olumlu bir müdahaledir.</p>
---	---

(f) Genel sonuç ve kıyaslama

Şekil 6.4. Risk bölgesi sonuçları

Üniversite-sanayi işbirliği çerçeve programı kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışması sonucunda elde edilen çıktılar, proje başlangıcında belirlenen hedeflere ulaşıldığını açıkça göstermektedir. Sonuçlar TEI firması açısından değerlendirildiğinde; oluşabilecek hataların probleme dönüşmeden önce tespit edilebilmesi; yüksek oranda mali ve zamansal tasarrufların elde edilebilmesi anlamına gelmektedir. Anadolu Üniversitesi açısından değerlendirildiğinde ise; projenin güncel bir konuda özgün bir şekilde gerçekleştirilmiş olması, üniversite prestijini arttıran ulusal ve uluslararası akademik yayınlar açısından son derece önem teşkil etmektedir.

Günümüzde EHM sistemleri, havacılık alanında artan bir ilgiye sahiptir. Bu nedenle gerek teknik gerekse akademik olarak pek çok çalışma gerçekleştirilmektedir. Literatüre bakıldığında; uygulama noktası, kullanılan veri analiz teknikleri, tanımlanan risk bölgeleri bu çalışmayı özgün kılan özelliklerden bazılarıdır. Bu özellikler, benzer konuda gerçekleştirilecek çalışmalara örnek oluşturması açısından literatüre büyük katkı sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Duffy, M.J., Gamache, R.N., Morris, R., Hess, A.J., "Jet engine life prediction systems integrated with prognostics health management," Pratt & Whitney (Ed: Suarez, E.L.), East Hartford, A.B.D., 3596-3602, 6. Cilt, 2004.
- [2] Byer, R.J., "An approach for conducting a cost benefit analysis of aircraft engine prognostics and health management functions," GE Aircraft Engines (Ed: Ashby, M.J.), Evendale, A.B.D, 2847-2856, 6. Cilt, 2002.
- [3] Galbreath, J.H., Townsend, C.P., Churchill, D.L., Corneau, B., Ketcham, R.P., Phan, N., "Energy harvesting wireless sensors and networked timing synchronization for aircraft structural health monitoring," Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Ed: Arms, S.W.), MicroStrain Inc., Williston, VT, USA, 16-20, 2009.
- [4] Yasar, M., Shin, C., Ray, A., "Anomaly detection for health management of aircraft gas turbine engines," (Tolani, D.), Pennsylvania State Universitesi, University Park, A.B.D., 459-464, 1. Cilt, 2005.
- [5] Anonim, 2014.
<http://hezarfendergi.com/turbojet-motorlarin-ozellikleri-nelerdir/>
- [6] Anonim, 2015.
http://www.cs.mcgill.ca/~rwest/wikispeedia/wpcd/wp/j/Jet_engine.htm
- [7] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/inlet.html>
- [8] Portsmore, A., *Composite Fan Systems*. GKN Aerospace, 2015.
- [9] Anonim, *Uçak bakım - motor kısımları*, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, No:525MT0034, Ankara, 2012.
- [10] Anonim, 2015.
<http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node84.html>
- [11] Anonim, 2009.
https://en.wikipedia.org/wiki/Bypass_ratio#cite_note-Spak-2

- [12] Jeniski, R., ATI Aerospace, ATI Jet Engine Applications, 2008.
- [13] Otis, E.C., Vosbury, A.P., *Aircraft gas turbine powerplants* (ed: Otis, E.C., Vosbury, A.P), Jeppesen Co, Almanya, 2002.
- [14] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/compress.html>
- [15] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/compth.html>
- [16] Karakoç, H., Turgut, E., “Gaz Türbinli Motor Sistemleri,” Anadolu Üniversitesi Yayınları, Eskişehir, 2008
- [17] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/burner.html>
- [18] Anonim, 2009.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3_types_of_combustion_chamber.PNG
- [19] Roberts, P.J., *Measurement technology requirements for gas turbine propulsion systems*. Sensors and Instrumentation KTN: ISP Meeting, Rolls Royce, 2009.
- [20] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/powtrbth.html>
- [21] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/newton2.html>
- [22] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nozzleh.html>
- [23] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/etr.html>
- [24] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/epr.html>
- [25] Mattingly, D.J., *Elements of gas turbine propulsion* (ed: Corrigan, J.J., Bradley, W.J.), McGraw-Hill Book Co, Singapur, 1996.
- [26] Çengel, A.Y., Boles, A.M., “Termodinamik : Mühendislik Yaklaşımıyla,” Güven Kitabevi, İzmir, 2008.

- [27] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/EngineTheory.pdf>
- [28] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html>
- [29] Anonim, "FAA-H-8083 Airplane Flying Handbook," U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Flight Standards Service.
- [30] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etf.html>
- [31] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etp.html>
- [32] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etth.html>
- [33] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbth.html>
- [34] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etff.html>
- [35] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etfp.html>
- [36] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etfh.html>
- [37] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbfan.html>
- [38] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etpf.html>
- [39] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/turbprp.html>
- [40] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etpp.html>
- [41] Anonim, 2015.
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/Animation/turbtyp/etph.html>
- [42] Turgut, T.E., *Uçak Temel Güç Sistemleri Ders notları*, 2012.

- [43] Poulikkas, A., *An overview of current and future sustainable gas turbine technologies*, 2004.
- [44] Güler, F., *İstatistik Metotları ve Uygulamaları*, Beta Basım A.Ş, İstanbul, 2012.
- [45] Babbar, A., Ortiz, M.E., Syrmos, L.V., Arita, M.M., *Advanced diagnostics and prognostics for engine health monitoring*. Hawaii Üniversitesi, Hawaii, 2008.
- [46] Cotae, P., Chen, P., “Optimization of sensor locations and sensitivity analysis for engine health monitoring using minimum interference algorithms,” IEEE, 2007.
- [47] Come, E., Cottrell, M., Verleysen, M., Lacaille, J., “Aircraft engine health monitoring using self-organizing maps,” *10th Industrial Conference ICDM*, Berlin, 2010.
- [48] Serper, Ö., *Uygulamalı İstatistik 2*, Ezgi Kitapevi, Bursa, 2004.
- [49] Hoel, G.P., *Introduction to Mathematical Statistics*, Jhon Wiley & Sons, New York, Londra, Sidney, 1965.
- [50] Yılmaz, İ., *Verilerin çözümlenmesi-ilişki-korelasyon*, Yüksek Lisans Programı-Araştırma Yöntemleri, Ankara Üniversitesi, Eğitim Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [51] Özdamar, K., “Çok Değişkenli Analizler,” *Paket Programlar ile İstatistiksel Veri Analizi 2*, Kaan Kitapevi, Eskişehir, 2004.
- [52] Babacan, B., Gebze Yüksek Teknoloji Üniversitesi İşletme Fakültesi
- [53] Anonim, 2015.
http://www.baskent.edu.tr/~afet/dersler/genel_matematik_2/dersnotlari_listesi/DERS_%207.pdf
- [54] Yükselen, M.A., HM504 Uygulamalı Sayısal Yöntemler Ders Notları.
- [55] Babacan, B., *Zaman Serileri Analizi ve Regresyon*.
<http://www.dersnotlari.net/arastirmayazilari/zaman.htm>
- [56] Işığışok, E., *Hipotez Testleri Yol Haritası*, Marmara Kitabevi, Bursa.
- [57] Siegel, F.A., Morgan, J.C., *Statistics and Data Analysis an Introduction*, John Wiley & Sons.

- [58] Ankara Üniversitesi Açık Ders Notları, 2015.
<http://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=457>
- [59] Kartal, M., *Bilimsel Araştırmalarda Hipotez Testleri Parametrik ve Nonparametrik Teknikler*, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 2014.
- [60] Sankavaram, C., Pattipati, B., Kodali, A., Pattipati, K., Azam, M., Kumar, S., Pecht, M., “Model-based and Data-driven Prognosis of Automotive and Electronic Systems,” Bangalore, Hindistan, 2009.
- [61] Willksy, A.S., “A Survey of esign Methods for Failure Detection Dynamic Systems,” *Automatica*, **12**, 601-611, 1976.
- [62] Merrill, W.C., DeLaat, J.C. ve Bruton, W.M., “Advanced Detection, Isolation, and Accomodation of Sensor Failures Real time Evaluation,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, **11**, 517-526, 1988.
- [63] Frank, P.M., “Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy A Survey and New Results,” *Automatica*, **16**, 459-474, 1990.
- [64] Smith, G., Schroeder, J.B., Navarro, S. ve Haldeman, D., “Development of a Prognostics and Health Management Capability fort he Joint Strike Fighter,” *Proceedings of IEEE AUTOTESTCON*, **September**, 676-682, 1997.
- [65] Scheuren, W., *Joint Strike Fighter Prognostics & Health Management*, AIAA-98-3710, 1998.
- [66] Dekate, A.D., “Prognostics and Engine Health Management of Vehicle using Automotive Sensor Systems,” *International Journal of Science and Research*, **2**, 244-251, 2013.
- [67] Anonim, 2015.
Joint Strike Fighter Phm Vision.
- [68] Anonim, *Aircraft Systems Diagnostics, Prognostics and Health Management Technology Insight Document*, Industry Canada, Kanada, 2004.
- [69] Jaw, C.L., Mattingly, D.J., *Aircraft Engine Controls* (Ed: Schetz, A.J.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virgin, A.B.D., 2009.
- [70] Anonim, *Predictive equipment health management*, OSyS, 2015.

- [71] Lau, C.K., Mak, W.P.N., Wong, K.Y., Chan, W.Y.K., Man, K.L.D., "Structural health monitoring," *Structural health monitoring of three cable-supported bridges in Hong Kong*, Technomic, Lancaster, 450-460, 1999.
- [72] Ou, J.P., "Structural health monitoring and intelligent infrastructure," *Some recent advances of intelligent health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China*, 130.
- [73] Gsatineau, D.Z., *Propulsion Technology Planning for Engine Health Management*, Air Force Research Laboratory.
- [74] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 1*, RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [75] Anonim, *SAE ARP 1587. Aircraft gas turbine engine monitoring system guide*. Aerospace Recommended Practice, 1981.
- [76] Zhang, C., Wang, N., "Aero-Engine Condition Monitoring Based on Support Vector Machine," *Physics Procedia*, Tianjin, China, 1546-1552, 2012.
- [77] Zhong ji, T., Zhiqiang, Z., Yan bin, S., "The Overview of the Health Monitoring Management System," *Physics Procedia*, **33**, 1323-1329, 2012.
- [78] Wenjin, Z., "Agile UAV built by PHM protection system," *aviation maintenance & engineering*, 53-56, 2010.
- [79] Barad, G.B., Ramaiah, P.V., Giridhar, R.K., Krishnaiah, G., "Neural Network Approach For A Combined Performance And Mechanical Health Monitoring Of A Gas Turbine Engine," *Mechanical Systems and Signal Processing*, **27**, 729-742, 2012.
- [80] Anonim, *Aircraft Systems Diagnostics, Prognostics and Health Management Technology Insight Document*, Industry Canada, 2004.
- [81] Dawson, B., "The Shock and Vibration Digest," *Vibration condition monitoring techniques for rotating machinery*, SpringerLink, Londra, 1976.

- [82] Ooijsvaar, T.H., Grooteman, F.P., Warnet, L.L., Loendersloot, R., Akkerman, R., de Boer, A., “Dynamic characterisation of a damaged composite structure with stiffeners employing fibre Bragg gratings,” Lausanne, İsviçre, 2011.
- [83] Albert, P.A., Antoniou, E., Leggiero, D.E., Tooman, A.K., Veglio, R.L., *A systems engineering approach to integrated structural health monitoring for aging aircraft*, Air Force Institute Of Technology, Department Of The Air Force.
- [84] Ooijsvaar, T., *Vibration Based Structural Health Monitoring Of Composite Skin-Stiffener Structures*, Doktora Tezi, Twente Üniversitesi, Enschede, Hollanda, 2014.
- [85] Dawson, B., “Vibration condition monitoring techniques for rotating machinery,” *SpingerLink*, **8**, 3, 1976.
- [86] Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F., Czarnecki, J., *A Review of Structural Health Monitoring Literature*, 1996-2001.
- [87] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 8*, RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [88] Waters N., “Engine health management,” *Ingenia Issue*, **39**, 2009.
- [89] Anonim, “Guidelines for integrating typical ehm functions within aircraft systems,” Sae International Aerospace Information Report, 2008.
- [90] Ortiz, E., Babbar, A., Syrmos, L.V., “Extreme Value Theory for Engine Health Monitoring and Diagnosis,” Saint Petersburg, Rusya, 2009.
- [91] Babbar, A., Ortiz, M.E., *Advanced Diagnostics and Prognostics for Engine Health Monitoring*, Hawaii, A.B.D..
- [92] Tumer, Y.I., Bajwa, A., *A Survey Of Aircraft Engine Health Monitoring Systems*, NASA Ames Research Center, No: AIAA-99-2528, A.B.D..
- [93] Anonim, *Allison Gas Turbines Turboshaft Models 250C-18*, General Motors Corp., 1982.
- [94] Chuanchao, Z., “Monitoring method of aero-engine based on immunology principles,” *Çin*, 102-106, 2008.

- [95] Özmen, T., *Gas monitoring system*, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [96] Anonim,2015.
<http://www.rolls-royce.com/about/our-technology/enabling-technologies/engine-health-management.aspx#act>
- [97] Demirel, L., Tolun, S., “Ticari Turbofan Uçak Motorlarının Uçuş Ömürlerinin Optimizasyonu,” *İtüdergisi/d*, **7**, 80-81, 2008.
- [98] Thompson, C., Missiles, M.L., *Systems Prognostic Health Management EMIS 7305*, Systems Engineering Program, SMU, 2006.
- [99] Anonim , RB199 turbofan engine The innovative power, 2014.
http://www.mtu.de/fileadmin/EN/2_Engines/2_Military_Aircraft_Engines/1_Fighter_Aircraft/RB199/RB199_Product_Leaflet.pdf
- [100] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 3*, RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [101] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 7*, RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [102] Huenecke, K., *Jet engines: Fundamentals of theory, design, and operation*. Airlife Publishing Ltd, İngiltere, 1997.
- [103] Gregg G., Jaspal, R., *Cost Effective Performance Restoration of High Bypass Engines*, General Electric Company, Cincinnati, Ohio, A.B.D., 1982
- [104] Halsmer, R.A., Matson, R.E., “Smoothing CFM56 engine removal rate at US Air,” Nashville, A.B.D., 1992.
- [105] Lee, Z.H., Agogino, A.M., “Warranty and Maintenance decision making for Gas Turbines,” Stanford, California, A.B.D., 2000.
- [106] Tanaka, Y., Nagai, S., Ushida, M., Usui, T., “Large engine maintenance technique to support flight operations for commercial airlines” *Technical Review*, **40**, 2, Japan, 2003.
- [107] Keller, K., *Health Management Technology Integration*, The Boing Company.

- [108] Stramiello, D.A, Ling, R., Kacprzyński, J.G, Roemer, J.M., “*Aviation Diagnostic And Engine Prognostic Technology (Adept) For The Chinook’s T-55 Engine,*” A.B.D..
- [109] Kadiramanathan, V., Fleming, P., “*Monitoring of Aircraft Engines,*” Sheffield, İngiltere.
- [110] Mooney, T., *Health Management for In-Service Gas Turbine Engines,* PHM Society Meeting, San Diego, 2009.
- [111] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 5,* RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [112] Anonim, *Reduce shutdowns and fulfill production goals.* Emerson Process Management, Teksas.
- [113] Anonim, *Essential asset monitoring,* Emerson Process Management, 2012.
- [114] Litt, S.J., Simon, L.D., Gary, S., Guo, T., Mercer, C., Millar, R., Behbahani, A., Bawja, A., Jensen, T.D., *A Survey of Intelligent Control and Health Management Technologies for Aircraft Propulsion Systems,* NASA, A.B.D, 2005.
- [115] Roemer, J.M., Byington, S.C., Kacprzyński, J.G., Vachtsevanos, G., “An Overview Of Selected Prognostic Technologies With Application To Engine Health Management,” Barselona, İspanya, 2006.
- [116] Sarkar, S., Jin, X., Ray, A., “Data-Driven Fault Detection in Aircraft Engines With Noisy Sensor Measurements,” 2011.
- [117] Horn, W., Kando A., Mathes J., *Engine monitoring and performance control development.* NASA, Cleveland, 2012.
- [118] Polycarpou, M.M., “An on-line approximation approach to fault monitoring, diagnosis, and accommodation,” *SAE Transactions–Journal of Aerospace,* **103**, 371-380, 1994.
- [119] Pomfret, C., “Engine life measurement and diagnostics,” *Aerospace Engineering,* 1994.

- [120] Powers, W.T., Cooper, A.E., Wallace, T.L., Buntine, W.L., Whitaker, K., “Space shuttle main engine plume diagnostics: OPAD approach to vehicle health monitoring,” *SAE Transactions–Journal of Aerospace*, **102**, 2021-2033, 1993.
- [121] Luo, J., Tu, H., Pattipati, K., Qiao, L., Chigusa, S., “Graphical models for diagnostic knowledge representation and inference,” *IEEE Instrument and Measurement Magazine*, No: 9, 45-52, 2006.
- [122] Iverson, D., Spirkovska, L., Schwabacher, M., *Data-Driven Online System Health Monitoring for Space Operations*, NASA Ames Research Center, 2010.
- [123] Coble, J., *Prognostics and Health Monitoring in Complex Engineering Systems: Methods and Applications*, Proact Lab, 2011.
- [124] Przytula, K.W., Allen, D., Vian, J., Mansouri, G., “Health monitoring for commercial aircraft systems,” 2008.
- [125] Abdulaziz, A., Abumeri, G., Woike, M., Baakilini, G.Y., *NDE Using Sensor Based Approach to Propulsion Health Monitoring Of A Turbine Engine Disk*, SPIE Smart Structure/NDE, San Diego, California, 2009.
- [126] Abdulaziz, A., Woike, M., Lekki, J., Baaklini, G.Y., *Health Monitoring of a Rotating Disk Using a Combined Analytical-Experimental Approach*, NASA Technical Memorandum, NASA/TM-2009-215675, 2009.
- [127] Abdulaziz, A., Bhatt, R. T., Baaklini, G.Y., “Criteria for Crack Deflection/Penetration in Coated Ceramics; a Parametric Study,” San Diego, California, A.B.D., 2007.
- [128] Abdulaziz, A., Krause, J.D., “Combined Experimental and Analytical Study Using Cruciform Specimen for Testing Advanced Aeropropulsion Materials Under In-Plane Biaxial Loading,” California, A.B.D., 2006.
- [129] Abdulaziz, A., Saury, C., Xuan, B., Young, P.G., “On The Material Characterization of a Composite using Micro CT Image Based Finite Element Modeling,” California, A.B.D., 2006.
- [130] Hayton, P., Utete, S., King, D., King, S., Anzizis, P., Tarassenko, L., “Static and dynamic novelty detection methods for jet engine health monitoring,” *Philosophical Transactions*, 2007.

- [131] Kenneth J. Semega, J.K., Simon, L.D., Gang, S., Hunter, W.G., *Sensor Needs for Control and Health Management of Intelligent Aircraft Engines*, U.S. Army Research Laboratory, NASA, A.B.D., 2004.
- [132] Lane, A.R., *Sensor and Sensing Technologies for Integrated Vehicle Health Monitoring Systems*, Savunma Bakanlığı, A.B.D..
- [133] Anonim, Engine System Integration, UTC Aerospace Systems, A.B.D..
- [134] Butcher, W.S., *Assessment of Condition-Based Maintenance in the Department of Defense*, 2000.
- [135] Anonim, *Choosing and upgrading your engine monitor*. Savvy Analysis, Las Vegas.
- [136] Sampath, S., Ogaji, S., Singh, R., Probert, D., “Engine-fault diagnostics: an optimisation procedure,” *Applied Energy*, **73**, 47-70, 2002.
- [137] Loendersloot, R., Ooijevaar, T.H., Warnet, L.L., de Boer, A., Akkerman, R., “Vibration based structural health monitoring of a composite plate with stiffeners,” Leuven, Belgium, 2010.
- [138] Farrar, C.R., Sohn, H., Hemez, F.M., Anderson, M.C., Bement, M.T., Cornwell, P.J., Doebling, S.W., Schultze, J.F., Lieven, N., Robertson, A.N., *Damage prognosis: current status and future needs technical report*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2001.
- [139] Cleary, D., Yu, L., *Engine health management system diagnostics and prognostics*. General Electric Global Research Center, New York, 2005.
- [140] Tumer, Y.I., Bajwa, A., *A survey of aircraft engine health monitoring systems*. NASA ames research center Raporu, No: AIAA-99-2528, Kaliforniya, 1999.
- [141] Horn, W., Kando, A., Mathes, J., “Engine Monitoring and Performance Control Development at MTU Aero Engines,” Cleveland, A.B.D., 2012
- [142] Greitzer, L.F., Pawlowski, A.R., “Paper Presented at International Instrumentation Symposium Embedded Health Monitoring Workshop,” Pensilvanya, No: 35920, 2002.
- [143] Goebel, K., Krok, M., *Prognostics for advanced compressor health monitoring*. GE global research, New York.

- [144] Anonim, *Improved operational decision making*. Boeing Commercial Airplane Raporu, No: 178933, A.B.D., 2010.
- [145] Ortiz, E., Babbar, A., Syrmos, V., Clark, G., Vian, J., Arita, M., “Multi-source data integration for aircraft health management,” *2007 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2007.
- [146] Byington, S.C., Kalgen, W.P., Dunkin, K.B., Donovan, P.B., “Advanced diagnostic/prognostic reasoning and evidence transformation techniques for improved avionics maintenance,” *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004.
- [147] Anonim, *Recommended practices for monitoring gas turbine engine life consumption chapter 9*, RTO technical report 28, No: RTO-TR-28 AC/323(AVT)TP/22, Kanada, 2000.
- [148] Anonim, 2015.
<https://www.isa.org/>
- [149] Anonim, 2015.
https://en.wikipedia.org/wiki/International_Organization_for_Standardization
- [150] Stange, B., *ISA standarts for türbine engine test cell instrumentation*. US Air Force.
- [151] Anonim, 2015.
<http://www.astm.org/>
- [152] Anonim, 2015.
https://en.wikipedia.org/wiki/ASTM_International
- [153] Anonim, 2015.
<http://www.sae.org/>
- [154] Anonim, 2015.
https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_International
- [155] Alexander, D., “SAE aerospace standarts europe,” 2012.
- [156] Monroney, M., *Federal aviation administration joint aircraft system/component code table and definitions*. U.S Department of transportation, 2008.

- [157] Shao, G., Nwadiogbu, E., *The direction engine control integration with HM Technologies should lead*. Honeywell, 2012.
- [158] Anonim, *Diagnostics, prognostics and health management technology insight document*. Industry Canada, Kanada, 2004.
- [159] Binner, M., Frienrichs, J., *Engine contion monitoring*. MTU Aero Engine Company, 2009.
- [160] Anonim, 2013.
<http://www.boeing.com/features/2013/07/bca-airplane-health-mgmt-07-30-13.page>
- [161] Al, V., Wood, B., “Engine Health Management for Aircraft Propulsion Systems”, *Pratt Whitney*, 2015.
- [162] Shao, G., Nwadiogbu, E., *Intelligent distributed control / prognostic health management (idc/phm the direction engine control integration with hm technologies should lead 3rd grc pcd workshop*. Honeywell firması, 2012.
- [163] Morton, A., “Strategic research and horizon scanning in rolls-rouce,” *Venturefest Konferansi*, Bristol 2013.
- [164] Anonim, *Trent900 engine*, Rolly-Royce, Rapor No: VCOM13797, 2009.
- [165] Anonim, 2015.
<http://www.rolls-royce.com/about/our-technology/enabling-technologies/engine-health-management.aspx#act>
- [166] Anonim, *RB199 turbofan engine*. MTU Aero engines, Almanyaa.
- [167] Anonim, *EJ200 turbofan engine*, MTU Aero Engine AG, Munich, Almanyaa.
- [168] Anonim, 2015.
http://aviogroup.hosting.dgtmedia.com/en/catalog/military/sistemi_di_monitoraggio_aereo
- [169] Ashby, J.M., Dyson, E.J.R., *F110 engine monitoring system*, General Electric Co. Raporu, No: 84-2754, Ohio.
- [170] Anonim, *Research and technology goals and objectives for integrated vehicle health management*, No: NASA-CR-192656, A.B.D., 1992.

- [171] Simon, L.D, Gary, S., Venti, M., *Propulsion control and health management (PCHM) technology for flight test on the C-17 T-1 aircraft*. NASA Raporu, No: NASA /TM-2004-213303, 2004.
- [172] Ray, J.R., Hicks, W.J., Wichman, D.K., *Real-time in flight engine performance and health monitoring techniques for flight research application*. NASA Raporu, No: 104239, Kaliforniya, 1991.
- [173] Murch, M.A., *A flight control system architecture for the NASA AirSTAR flight test infrastructure*, NASA Langley Research Center, Hampton.
- [174] Stramello, D.A., Kacprzyński, J.G., “Aviation diagnostic and engine prognostic technology for the chinook’s T-55 engine,” Arizona, 2003.

EK-1 Özel Fonksiyonlar, Normal Denklemleri ve Standart Hata Hesaplamaları ⁽¹⁾

a) **Doğrusal Fonksiyon** : $Y = a + b \cdot X$

Normal Denklemleri :
$$\begin{aligned} \sum Y &= na + b \sum X \\ \sum XY &= a \sum X + b \sum X^2 \end{aligned}$$

Standart Hata Hesabı :

$$S_{yx} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY}{n-2}} & (n < 30) \\ \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY}{n}} & (n > 30) \end{cases}$$

b) **Parabolik Fonksiyon** : $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2$

Normal Denklemleri :
$$\begin{aligned} \sum Y &= na + b \sum X + c \sum X^2 \\ \sum XY &= a \sum X + b \sum X^2 + c \sum X^3 \\ \sum X^2 Y &= a \sum X^2 + b \sum X^3 + c \sum X^4 \end{aligned}$$

Standart Hata Hesabı :

$$S_{yx} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY - c \sum X^2 Y}{n-3}} & (n < 30) \\ \sqrt{\frac{\sum Y^2 - a \sum Y - b \sum XY - c \sum X^2 Y}{n}} & (n > 30) \end{cases}$$

c) **Üstel Fonksiyon** : $Y = a \cdot b^X$

Normal Denklemleri :
$$\begin{aligned} \sum \log Y &= n \log a + \sum X \log b \\ \sum X \log Y &= \sum X \log a + \sum X^2 \log b \end{aligned}$$

⁽¹⁾ Gürler, İ., *Zaman Serileri Analizi, İşletme İstatistiği ve Kantitatif Yöntemler Dersi Yıl İçi Ödevi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Üretim Yönetimi ve Endüstri İşletmeciliği Programı, İzmir, 2002.

d) **Hiperbolik Fonksiyon :** $1/Y = a + b \cdot X$

Normal Denklemleri :

$$\sum 1/Y = na + b \sum X$$

$$\sum X/Y = n \sum X + b \sum X^2$$

e) **Kübik Fonksiyon :** $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2 + d \cdot X^3$

Normal Denklemleri :

$$\sum Y = na + b \sum X + c \sum X^2 + d \sum X^3$$

$$\sum XY = a \sum X + b \sum X^2 + c \sum X^3 + d \sum X^4$$

$$\sum X^2Y = a \sum X^2 + b \sum X^3 + c \sum X^4 + d \sum X^5$$

$$\sum X^3Y = a \sum X^3 + b \sum X^4 + c \sum X^5 + d \sum X^6$$

f) **Geometrik Fonksiyon :** $Y = a \cdot X^b$

Normal Denklemleri :

$$\sum \log Y = n \log a + b \sum \log X$$

$$\sum \log X \cdot \log Y = \log a \sum \log X + b \sum (\log X)^2$$

EK-2 t_Tablosu

df	α											
	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,02	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,710	15,890	31,820	63,660	127,300	318,300	636,60
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	4,849	6,965	9,925	14,090	22,330	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	3,482	4,541	5,841	7,453	10,210	12,920
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	2,999	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	2,757	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	2,612	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,517	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,449	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,398	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,359	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,328	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,303	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,282	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,264	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,249	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,235	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,224	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,214	2,552	2,878	3,197	3,611	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,205	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,197	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	,663,	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,189	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,183	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,177	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,172	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,167	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,162	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,150	2,473	2,771	3,057	3,421	3,690
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,154	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,150	2,462	2,756	3,038	3,396	3,659
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,147	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,123	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
50	0,679	0,849	1,047	1,295	1,676	2,009	2,109	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,099	2,390	2,660	2,915	3,232	3,460
80	0,678	0,846	1,043	1,292	1,664	1,990	2,088	2,374	2,639	2,887	3,195	3,416
100	0,677	0,845	1,042	1,290	1,660	1,984	2,081	2,364	2,626	2,871	3,174	3,390
1000	0,675	0,842	1,037	1,282	1,646	1,962	2,056	2,330	2,581	2,813	3,098	3,300
∞	0,674	0,841	1,036	1,282	1,640	1,960	2,054	2,326	2,576	2,807	3,091	3,291

Ek-3 Çeşitli EHM standartları

Kurum	Standart kodu	Standart adı
ISA	107.1	Nonintrusive Stress Measurement (NSMS) /Blade Tip Timing (BTT)
ISA	107.2	Temperature Measurement using Thermographic Phosphors
ISA	107.3	Blade Tip Clearance Measurement
ISA	107.4	Wireless Data Transmission in the Test Cell Environment
ISA	107.5	Dynamic Pressure Measurement -(still under development)
SAE	AIR1828B	Guide to Engine Lubrication System Monitoring
SAE	AIR1871C	Lessons Learned From Developing, Implementing, and Operating a Health Management System for Propulsion and Drive Train Systems
SAE	AIR1872B	Guide to Life Usage Monitoring and Parts Management for Aircraft Gas Turbine Engines
SAE	AIR1873	Guide to Limited Engine Monitoring Systems for Aircraft Gas Turbine Engines
SAE	AIR4061B	Guidelines for Integrating Typical Engine Health Management Functions Within Aircraft Systems
SAE	AIR4174	A Guide to Aircraft Power Train Monitoring
SAE	AIR4175A	A Guide to the Development of a Ground Station for Engine Condition Monitoring
SAE	AIR46B	The Preparation and Use of Chromel-Alumel Thermocouples for Aircraft Gas Turbine Engines
SAE	AIR4986A	Engine Electrostatic Gas Path Monitoring
SAE	AIR5317	A Guide to Apu Health Management
SAE	AIR5871	Prognostics for Gas Turbine Engines
SAE	AIR65	Thermoelectric Circuits and the Performance of Several Aircraft Engine Thermocouples
SAE	ARP1587B	Aircraft Gas Turbine Engine Health Management System Guide
SAE	ARP4176	Determination of Costs and Benefits from Implementing an Engine Health Management System
SAE	ARP464	Mount – Thermocouple
SAE	ARP465B	Flange – Thermocouple
SAE	ARP485A	Temperature Measuring Devices Nomenclature
SAE	ARP5783	Health and Usage Monitoring Metrics, Monitoring the Monitor
SAE	ARP690	Standard Exposed Junction Thermocouple for Controlled Conduction Errors in Measurement of Air or Exhaust Gas Temperature
SAE	ARP691	Recommended Ice Bath for Reference Junctions
SAE	AS8054A	Airborne Engine Vibration Monitoring (EVM) System, Guidelines for Performance Standard For

Ek-3 (Devam) Çeşitli EHM standartları

SAE	ARP6137	Tire Pressure Monitoring Systems (TPMS) for Aircraft
SAE	AIR6168	Landing Gear Structural Health Monitoring
SAE	AIR5273	Actuation System Failure Detection Methods
SAE	AIR6034	Airborne Hydraulic Monitoring Systems
SAE	AIR6552	Measure, Store, and Access Fibre Optic Transceiver Test Data
SAE	ARP6461	Guidance on structural health monitoring for aerospace applications
SAE	AIR5080	Integration of Probabilistic Methods Into the Design Process
SAE	AS4831A	Software Interface for Ground-Based Monitoring
SAE	AS5393	Health and Usage Monitoring System, Blade Tracker Interface Specification
SAE	AIR1871C	Lessons Learned From Developing, Implementing, and Operating a Health Management System for Propulsion and Drive Train Systems
SAE	AIR5871	Prognostics for Gas Turbine Engines
SAE	ARP5783	Health and Usage Monitoring Metrics, Monitoring the Monitor
SAE	AIR5909	Validation and Verification of Fault Detection, Isolation and Prediction Algorithms for Engine Health Management
SAE	AIR4548	Real-Time Modeling Methods for Gas Turbine Engine Performance
SAE	ARP6068	Gas Turbine Engine Test Facility Vibration Measurement
SAE	ARP5757	Guidelines for Engine Component Tests
SAE	AIR5509	Using Engine Test Data to Model Engine Performance
SAE	AS5780B	Specification for Aero and Aero-Derived Gas Turbine Engine Lubricants
SAE	AIR5120	Engine Monitoring Systems Reliability and Validity
SAE	AIR4176	Cost Versus Benefits of Engine Monitoring Systems
SAE	AIR4985	A Methodology for Quantifying the Performance of an Engine Monitoring System
SAE	AS5392	Health and Usage Monitoring System, Rotational System Indexing Sensor Specification
SAE	AIR1828A	Guide to Oil System Monitoring
SAE	ARP1587A	Aircraft Gas Turbine Engine Monitoring System Guide
SAE	AIR1900	Guide to Temperature Monitoring in Aircraft Gas Turbine Engines
SAE	AIR1839	A Guide to Aircraft Turbine Engine Vibration Monitoring Systems

Ek-4 ATA kodları [156]

ATA Kodu	Açıklama	ATA Kodu	Açıklama
4930	Engine Fuel & Control	7330	Indicating
4960	Engine Controls	7397	Wiring Discrepancies
6310	Engine / Gearbox Couplings	74	Ignition
72	Engine Turbine/Turboprop, Ducted Fan/Unducted Fan	7400	General
73	Engine Fuel & Control	7410	Electrical Power Supply
7510	Engine Anti-Icing	7420	Distribution
72	Engine Turbine/Turboprop, Ducted Fan/Unducted Fan	7430	Switching
7200	General	7497	Wiring Discrepancies
7210	(Turboprop &/Or Front Mounted Driven Propulsor)	76	Engine Controls
7220	Air Inlet Section	7600	General
7230	Compressor Section	7610	Power Control
7240	Combustion Section	7620	Emergency Shutdown
7250	Turbine Section	7697	Wiring Discrepancies
7260	Accessory Drives	77	Engine Indicating
7270	By-Pass Section	7700	General
7280	Propulsor Section (Rear Mounted)	7710	Power
73	Engine Fuel & Control	7720	Temperature
7300	General	7730	Analyzers
7310	Distribution	7740	Integrated Engine Instrument Systems
7320	Controlling	7797	Wiring Discrepancies