

Turbofan Uçak Motorlarının Uçuşa Elverişli Tutulması İçin Yeni Bir Motor Bakım Sisteminin Tasarımı ve Optimizasyonu

M. Bucan ÇOLAK¹

Ömer IŞIK¹

Haluk DEMİRTAŞ²

Satılmış ÜRGÜN²

Seçil ULUFER³

Özet

Uçak motorlarının çok hassas cihazlar olduğu herkes tarafından bilinir. Özellikle yabancı maddelerin motora girmesi sonucunda büyük maddi hasarlar meydana gelmektedir.

Uçak motorlarının bakımları da oldukça maliyetli ve uzun süren işlemlerdir. İdeal bir hava taşımacılığı için bakımların asgari sürede tamamlanması ve uçağın yeniden operasyona döndürülmesi önem arz eder. Günümüzde havayolu şirketleri ve taşımacılık yapan firmalar, bakım kuruluşlarından planlanan bakımı en kısa sürede tamamlamasını istemektedirler. Bu talebe binaen oluşturulan gelişmiş bakım programı sistemlerine, hem üreticiler hem de bakım firmaları çok çaba harcamaktadır. Motor bakımları, uzun süren işlemler olduğu için genellikle operasyona verilen uzun molalarda; özellikle gece yapılması uygun görülen işlemlerdendir.

Motor bakımlarını diğer sistemlerden farklı kılan bir diğer durum ise, özel uçuş operasyonları olan ETOPS vb. özelliklerdir. Motorlara yüklenen daha özel kabiliyetler, tabii olarak motorlara uygulanan bakım işlemlerine ek iş yükü olarak yansımaktadır. Motor bakımlarını icra eden teknisyenlerin yetkilendirilmesi de bazı ayrıcalıklı şartları ortaya çıkarmıştır. Motor

¹ THY Teknik A.Ş. / Eğitim Başkanlığı

² Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi

³ İstanbul Aydın Üniversitesi, ABMYO, Sivil Havacılık Bölümü

performansı hem taşınan yolcu ve kargonun miktarını belirler, hem de uçağın harcayacağı yakıt miktarını derinden etkiler. Bu iki önemli faktör doğrudan maliyeti değiştirdiği için, motor performansı havacılıkta dikkate çok şayan bir uygulamadır. Motorun performansının süreklilik arz etmesi ve yüksek verim için motorların her uçuşta gösterdikleri davranışların (Motor Parametreleri) takip edilmesi ve ortaya çıkan aksaklıkların üretici firma talimatları doğrultusunda giderilmesi gerekmektedir. Günümüzde havaaracı ve motor bakımı konusunda yürürlükte olan yasalar optimum bakım performansı ve güvenliği açısından belli noktalarda zaaf lar barındırmaktadır. Bu zaaf ların temelinde operatör şirketlerin bakımı yönetmesi yatmaktadır. Mevcut bakım yönetimi sorumluluğu kanunları değiştirilerek problemlerin aşılması mümkündür. Temel olarak bakım yönetimi ve uygulamasının üretici firma ve bakım yapmaya yetkili kuruluşlar arasında idare edilmesi temeline dayanan bu yeni sistem hem maliyet hem de güvenlik açısından muazzam avantajlar sunmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada uçuş güvenliğini artıran ve operatörler için daha düşük maliyetli olan yeni bir motor bakım sistemi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Turbofan, Uçak motor bakımı, optimizasyon

A New Engine Maintenance System Design and Optimisation for Keeping Turbofan Aeroplane Engines Airworthy

Abstract

It is commonly known that aircraft engines are delicate machines. Especially Foreign objects got sucked into the engine cause vast amount of damage. Maintenance of engine is a quite long and expensive process. For an optimum commercial aviation transport operation, it is essential to complete maintenance and return the aircraft to service as quick as possible. Therefore nowadays airlines and commercial transporters demand from maintenance firms to carry out the asked maintenance actions in the soonest option. The advanced maintenance program systems prepared by virtue of this demand are the result of hard efforts by both MROs and manufacturers. Engine repairs are mostly planned in long stays of aircraft on ground; especially in night stops since they require long time.

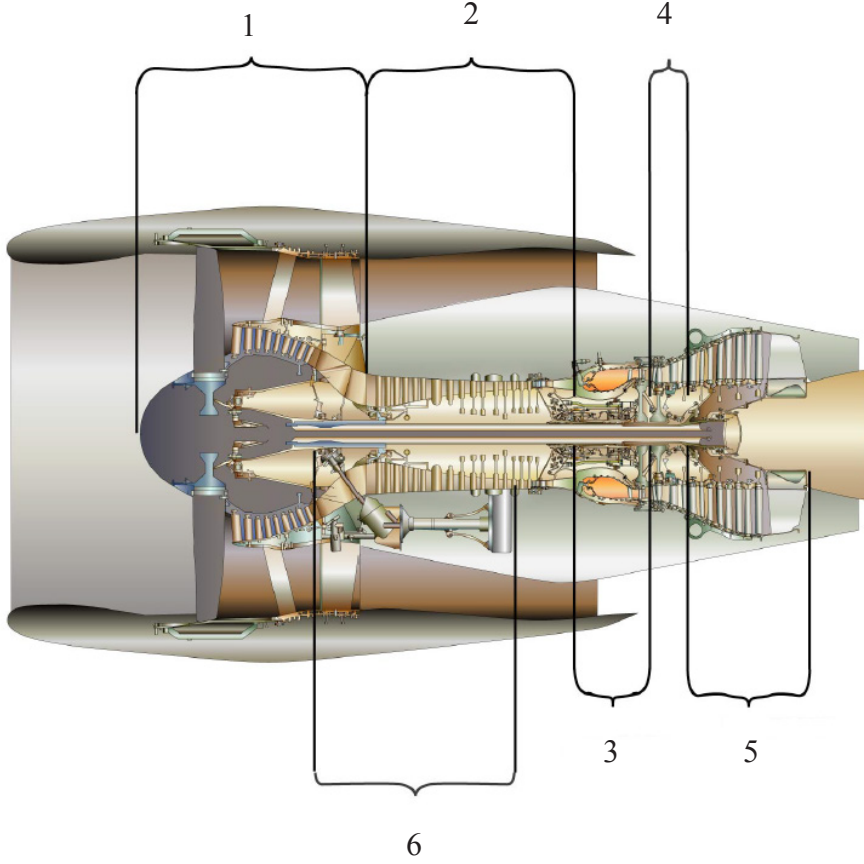
The additional features that make the engine maintenance more special compare to others are special operations such as ETOPS etc. Those added privilege capabilities naturally resulted as extra maintenance tasks on engines. For this reason the authorisation of maintenance engineers working on engines have to get some additional trainings and meet extra qualification provisions.

Performance of engines deeply effects the amount of passenger and cargo load as well as the fuel consumption. Those two parameters directly in relation with economic figures therefore the engine performance is a very important criterion. All the attitudes of engines for each flight (Engine Parameters) must be monitored and all revealed faults must be fixed according to manufacturers maintenance in order to achieve the continuous highest performance of engines. instruction.

In the present days the regulation structure which is in force involves some weaknesses in terms of optimum maintenance performance and safety. Those safety gaps in the law derives from management of maintenance by operators. It is possible to overcome the challenge by rewriting the current maintenance management regulations. The new system proposed in this work, basically depends on setting up the maintenance management activity between manufactureres and approved maintenance organisations, provides tremendous advantages for cost cutting and increasing flight safety. Here, a new engine maintenance management system which improves flight safety and with less cost is being offered.

1. Turbofan Motorların Yapısının Genel İncelenmesi

Bir turbo-fan tipi motorda itme kuvveti birbirine dolaylı olarak bağlı iki (bazılarında üç) şaft sistemi sayesinde oluşturulur. N1 ve N2 olarak adlandırılan sistemlerden N1 itme için motora girecek gerekli havayı emerek asıl itmeyi sağlar. N2 ise yanma miktarını ayarlamak suretiyle N1 sisteminin dönüş hızını ve dolaylı olarak itme kuvvetini idare eder. Bu motor hızı ve itme yönetimi sırasında birçok karmaşık sistemin bir arada olması nedeniyle motor arızaları doğrudan uçuş güvenliğini en üst seviyede tehdit eden arızalar grubundadır.



Şekil 1. Bir Turbofan Motorun Ana Modülleri

Bir Turbofan motoru esas olarak 6 kısımdan oluşmaktadır;

- 1- Fan ve Alçak Basınç Kompresörü
- 2- Yüksek Basınç Kompresörü
- 3- Yanma Odası
- 4- Yüksek Basınç Türbini
- 5- Alçak Basınç Türbini
- 6- Dişli Kutusu

1- Fan ve Alçak Basınç Kompresörü: Motorun en ön kısmını oluşturan bu yapı atmosfer havasının emilmesini sağlayan kısımdır. Fan kesitinden görüleceği üzere havanın küçük bir kısmı motor içine çekilirken büyük

miktarda hava motorun dışından akmaktadır. Fanın arkasında yer alan alçak basınç kompresörü de havanın motor içine girerken yönünü ve basıncını ayarlamak için kullanılır.

- 2- Yüksek Basınç Kompresörü: Alçak basınç kompresöründen gelen hava bu bölümde sıkıştırılır. Bu sayede havanın hızı düşürülür, sıcaklığı ve basıncı artırılır. Yüksek basınç kompresöründen çıkan hava artık yanma işlemi için şartlandırılmış havadır.
- 3- Yanma Odası: Kompresörden gelen hava, yakıt ile bu kısımda karıştırılır ve gerektiğinde bujiler vasıtasıyla patlatılır. Turbo fan motorlarda genellikle annular tip yanma odası olan motor, odacıklardan mütevellit bir bölüme sahiptir.
- 4- Yüksek Basınç Türbini: Bu kısım yüksek basınç kompresörüyle beraber N2 sistemini oluşturur. Yüksek basınç türbini yanma odasından gelen serseri yönlü havanın yönünü düzenler ve havayı alçak basınç türbinine yönlendirir.
- 5- Alçak Basınç Türbini: Artık motoru terk etmek üzere olan havanın motordan çıkarken belli doğrultuda çıkması ve herhangi bir akış bozukluğuna sebep olmaması için kullanılır. Fan, alçak basınç kompresörü ile birlikte N1 sistemini oluşturan kısımdır.
- 6- Dişli kutusu: Transfer ve aksesuar olarak iki kısımdır. Bu bölüm, motorun farklı sistemlerine takat vermesini sağlayan pompalar ve muhtelif güç aktarım elemanlarını üzerinde taşıyan kısımdır. Motordan alınan hareket ve güç **uçacağı yönetmek için de kullanılır. Üzerinde Hydro Mechanical Unit (HMU), yakıt pompası, hidrolik yağ pompası, Integrated Drive Generator (IDG) ve Full Authority Digital Engine Control (FADEC) ve Permanent Magnet Alternator (PMA) gibi komponentler takılıdır.**

Dileyen okurlar turbofan motorlardan bazılarının performanslarıyla ilgili limitleri ve özellikleri hakkında, Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı'nın (EASA) web sitesinden detaylı bilgi alabilirler.¹

2. Birincil (Primary) ve İkincil (Secondary) Motor Parametreleri

Turbofan motorlarında kullanılan motor parametreleri önem seviyesine ve doğrudan uçuş güvenliğine olan etkisine göre iki ana gruba bölünmüştür; Birincil (Primary) ve İkincil (Secondary) Motor Parametreleri. Bunlardan primary parametreler olan;

- 1- N1: Motorun alçak basınç döner sistemlerinin dönme hızıdır.
 - 2- N2: Motorun yüksek basınç döner sistemlerinin dönme hızıdır.
 - 3- EGT: (Exhaust Gas Temperature) Egzoz gaz harareti motoru terk eden havanın sıcaklığını gösterir.
 - 4- Fuel Flow: Bir saatte her bir motorun harcayacağı yakıt miktarını gösteren parametredir.
 - 5- EPR: (Engine Pressure Ratio) Motoru terk eden gazın basıncı ile motora giren havanın basıncının oranı anlamına gelir.
- Primary parametreler her uçuşa kontrol edilmelidir. Uçağın arıza yönetim sisteminden primary parametreler konusunda bir uyarı gelirse, kontrol ve tamir işlemlerinin ilk inişte uygulattırmak gerekir.

Secondary parametreler ise;

- 6- FUSED: Motorun çalışmaya başladığı andan itibaren o uçuşa ne kadar yakıt tükettiğini gösteren parametredir.
- 7- OIL: Her motorun hidrolik sisteminde dolaşmakta olan yağ miktarını gösteren parametredir.
- 8- PSI: Aynı sistemlerde bulunan hidrolik yağının basıncını gösteren parametredir.
- 9- °C: Motorların hidrolik sisteminde kullanılan yağın sıcaklığını gösteren parametredir.
- 10- VIB (N1 & N2) : Alçak ve yüksek basınç sistemlerinin oluşturmakta olduğu titreşim miktarını gösterir.
- 11- NAC: Motorun kaportasıyla sıcak kısımları arasındaki havanın motoru terk ederken sahip olduğu sıcaklığı gösteren parametredir.

Secondary parametreler de **uçuş** boyunca kontrol edilmelidir. Arıza bildirimleri mutlaka üretici firmanın bakım el kitaplarına göre müdahale edilmelidir.

3. Türkiye’de Turbofan Motor Bakım Potansiyeli

Günümüzde yolcu uçaklarında kullanılan iki tip motor vardır, bu motor tipleri ve kullanılan uçaklar şöyle özetlenebilir;

- Turbofan (Tüm Boeing Uçakları – Tüm Airbus Uçakları – Embraer – Bombardier)
- Turboprop (ATR 42/72 – Bombardier Dash 8)

Türkiye’de faaliyet gösteren tüm ticari havacılık işletmelerinde turbofan motorları kullanılmaktadır. Boeing firmasının öngörülerine göre, Türkiye’de ticari uçak sayısı 2023 yılında 700 civarına ulaşacağını belirtmiştir.² Bu uçakların büyük çoğunluğu çift motorlu olacağı için türkiyenin 2023’de sahip olacağı motor potansiyeli 1400 motorlu bir turbofan filosudur.

Aktif motor ve operasyonu destekleyecek yedek motor hesabı yapılacak olursa;

Δt anında bir operatörün sahip olması gereken yedek motor sayısı;
 $N \geq \%10 A$ veya $\%10A \leq 1$ ise $N = 2$ şeklindedir.

Bu formülde

N: Yedek Motor Sayısı

A: Filoda Kullanılan Aktif Motor Sayısı anlamına gelmektedir.³

Dolayısıyla 1400 aktif motorlu filoların 140 civarında yedek stoğunun olması gerektiği göz önüne alınırsa toplamda ülkemizin turbofan motor kapasitesinin 1540 civarında olacağı öngörülebilir.

Ortalama bir motorun atölyede overhaul’e girmesi periyodunu takribi 5 yıl kabul edersek, bakım pazarının 5 yıllık dönemdeki maddi (1 atölye bakımı) büyüklüğü şöyle hesaplanabilir;

Tablo1. Türkiye’de 10 yıl sonra var olacağı planlanan motor sayıları ve motor başına düşen bakım maliyeti

Motor Tipi	Türkiyede’ki Sayısı	Overhaul Ücreti
CFM 56 Ailesi	500	3,5 – 4 Milyon \$
V2500 Ailesi	500	3,5 – 4 Milyon \$
CF6 / Trent 700 / PW4000	250	6 – 7,5 Milyon \$
GE 90	150	7 – 8 Milyon \$
TOPLAM	1400	6.500.000.000 \$

Beş yıllık bir saykıl içinde, 6 milyar dolarlık bir pazara sahip olması hesaplanan motor bakım faaliyetinin hukuki altyapı kurgusu ve uygulanması konusunda bazı eksiklikler bulunmaktadır.

4. Uçuşa Elverişlilik Yasası ve Eksiklikleri

Turbofan motorlarının uçuşa elverişli tutulması sorumluluğu konusunda, geçerli olan kurallar, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından yayımlanan Sivil Havacılık Yönetmeliği (SHY-M) ve Talimatı (SHT-M) kurallarıyla düzenlenir.

Kuralların kökeni Avrupa Birliği'nin otoritesi olan EASA tarafından hazırlanmış olan EASA Part-M yasasıdır.

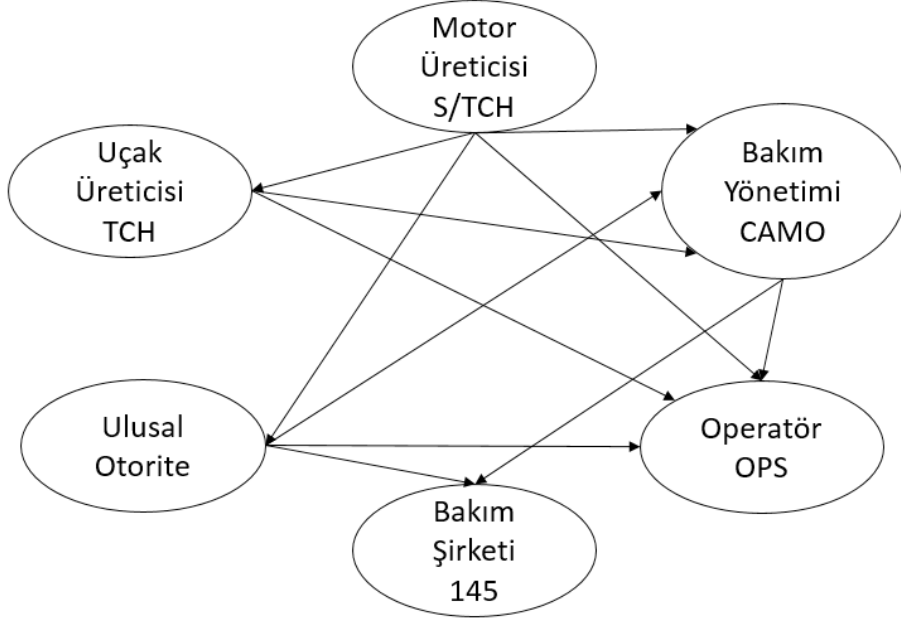
İlgili yasalarda motor sağlık takibi olarak geçen şartlar şu şekilde belirtilmiştir;

Motor sağlığı takibi İşleticinin kanat üzerinde motor sağlığı takibini anlaşma yoluyla devretmesi halinde, alt yüklenici kuruluşun bu görevi gerçekleştirmek için, işletmeci tarafından tedarik edilmesi gereken her bir parametre değeri dahil olmak üzere ilgili tüm bilgileri alması gerekmektedir. Söz konusu anlaşma ayrıca, kuruluşun işletmeciye ne türde geri bildirim bilgileri (motor limitleri, uygun teknik tavsiye, vb.) temin etmesi gerektiğini de belirtmelidir.⁴

Yasanın açıkça belirttiği gibi motorların sağlıklı tutulup tutulmaması, operatörlerin yani havayolu şirketinin veya uçak sahibi şirketin mesuliyeti sayılmıştır. Aslında motor üretici şirketleri zaten ürünlerinin sağlık durumunu bazen operatörlerden daha derin bir biçimde zaten takip etmektedir. Bu cümle çok ciddi gibi dursa da aslında gerçeğin ta kendisidir **“Üretici firmaya gelmeyen hiçbir bilgi katıyetle operatöre de gelmez ama operatöre gelmeyen pek çok bilgi üretici firmalara gelir”** bu cümle aslında bilgi bakımından operatörler ile üreticiler arasındaki uçurumu özetlemektedir.

Üstte belirtilen sebeplerden dolayı, yasal açıdan motor bakımında aksayan kısım ortaya çıkmaktadır. Madem ki üretici motorları çok daha yakından takip ediyor ve etmek zorunda⁵ ki motora ait sürekli uçuşa elverişlilik ve bakım dökümanlarını yayımlayabilsin. Bakım yönetimi sorumluluğunu da üstlenebilir. Ayrıca operatörlerin bakım yönetiminde aracı bir rol üstlenmesi çok karmaşık bir iletişim gerekliliği ortaya çıkarmaktadır. İletişim ve mesajlaşma sayısının artışı yanlış anlama, hatalı anlama veya

verilen talimatı anlamamak gibi iletişim temelli hataların ortaya çıkması ihtimalini hayli yükseltmektedir.



Şekil 5. Günümüzde Motor Bakım Yönetimi Dâhilinde Muhtemel Aşırı İletişim

5. Yeni Bir Motor Bakım Sistemi

Yasal olarak havaaracı ve motor bakımlarının yönetim sürecinden operatörlerin çıkarılması yeni ve daha dinamik bir sisteme geçiş olarak kabul edilebilir. Yeni sistemde, motorların bakım yönetimi üreticiler tarafından yapılacaktır. Motorun bakımları da mevcut durumda olduğu gibi, yetkili bakım kuruluşları tarafından yapılacaktır.

Üreticilerin bakım sorumluluğunun üstlenmesinin avantajları şu biçimde sıralanabilir;

- 1- Motorların performans ve bilgilerinin derinlemesine kontrolünü sağlayan üretici, olabilecek sorunları operatöre göre daha erken teşhis edebilir.
- 2- Operatör firmalar, motor bakımı için ekstra efor sarfetmeden bu hizmeti edinebilirler.

- 3- Ticari kaygılar nedeniyle uçuşa elverişli olmayan bir motoru uçurmak gibi yolcu ve havacılık emniyetini riske atacak tehlikeli girişimler engellenir.
- 4- Merkezi bakım sistemi, dünya üzerinde motorlarda oluşan kronik arızaların tesbiti ve giderilmesi konusunda büyük avantaj sağlar ve küresel havacılığa faydası oldukça büyük olur.
- 5- Operatörlerin bakım sorumluluğunu üstlendikleri yasal modelde meydana gelen aşırı iletişim sebebiyle doğacak hatalar engellenecek ve uçuş güvenliği seviyesi yükselecektir.

Yeni önerilen modelde mali açıdan operatörler de tasarruf edebilecektir. Tasarrufun miktarını hesaplamak istersek;

- Bir operatör mühendisinin saat ücretinin (Mh) 50 ABD doları olduğu varsayılırsa.
- Bir AD veya SB kontrolü için 2,5 saat emek (Lr) harcadığını varsayarsak
- Bir motor overhaul paketine (nAD) 15 AD atandığı varsayılırsa
- Aynı pakete (nSB) 25 SB atandığı varsayılırsa

Sadece bakım paketinin kontrol işlemi için harcanacak ücret (C);

$$C = (nAD + nSB) \times Lr \times Mh$$

$$C = (15 + 25) \times 2,5 \times 50$$

$$C = 5000 \$$$

Şeklinde hesaplanabilir. Bu da ülkemizdeki motor sayısı üzerinden genele yönlendirilirse; 1540 motor için 77.000.000 ABD doları bir meblağ ortaya çıkmaktadır. Bu rakam örnek modellemenin ne denli büyük bir tasarruf sağladığını kanıtlamaktadır.

Sonuçlar ve Öneriler

Çalışmada motor bakım süreçlerindeki verimsizliğin ve güvensizliğinin temelinde yatan kök nedenin; ana faaliyeti bakım olmayan bir şirket olan operatörlere bakım sorumluluğunun bırakılması olarak tesbit ettik. **Çözüm** nettir ; **Operatör bakım sorumluluğu üstlenmemelidir.**

Bakım yönetimi konusunda operatörlerin aradan çekilmesi birçok açıdan motor bakım yönetim süreçlerini rahatlatacak bir uygulamadır. Zira bakım yönetimi için gereken altyapının büyük bir kısmı motor üreticisi tarafından sağlanırken, bakım işlemi de yetkili bakım kuruluşlarına bırakılmıştır. Bakımın fiili uygulanması bu iki kuruluş arasında paylaşılmışken operatörün araya giren varlığı fazlalıktır.

Günümüzde tamamen operatörlere bırakılmış gibi görünen sürecin suiistimallere de açık olduğu görülmektedir.

Bu konuda yapılması gereken yasal değişikliklerin birinci sorumlusu, ülkelerin sivil havacılıktan sorumlu devlet kurumlarıdır. Yasal açıdan alınması gereken değişiklikler şöyle sıralanabilir;

- EASA Part-M ve ilgili bakım yasalarında operatörün sorumlulukları yeniden tanımlanmalı ve bakım yönetiminin sınırları operatörler için daraltılmalıdır
- Motor üretici firmaların bakım işlemleri planlaması konusunda bir referans program hazırlamaları sağlanmalıdır
- Yetkili motor bakım şirketleri ve üreticiler arasında ortak kullanılan bir motor bakım yönetim havuzu oluşturulmalıdır.
- Operatör ve otoriteler bakım işlemleri konusunda kontrol ve yönetim faaliyetlerini sadece denetlemekten sorumlu tutulmalıdır.

Otoriteler, hukuki boşlukları doldurduktan sonra sektörel değişiklikler birlikte gelecektir. Hukuki olarak desteklenmesi gereken bir diğer konu ise üretici firmalar ve bakım şirketlerinin bakım planlaması konusunda uzmanlaşması için gerekli personel ve altyapı şartlarını kurmaları olacaktır. Gerekli uzmanlığa sahip üreticiler, operatörler ve bakım firmalarının varlığı motor bakımı konusunda günümüzde meydana gelen ve gelebilecek aksaklıkları önleyebilecektir.

Bir uçağın ticari hayatı boyunca operatör, yanlış bakım politikaları nedeniyle sadece motor için atanmış AD kontrolü için 25.000 ABD doları harcamaktadır. Önerilen modelde, bu maliyeti ortadan kaldıracak ve operatörlerin bakım planlamasından azledilmesi suretiyle gereksiz bakım yönetimi delegasyonu masrafından tasarruf etmesi sağlanmış olur.

Önerilen modelin bir diğer avantajı da iletişimi azaltmak suretiyle oluşabilecek iletişim kaynaklı hataların önlenmesidir. Havacılık kazalarında bakım kaynaklı kazaları inceleyen kaynaklar ve kurumlar, iletişim eksikliğini ciddi bir faktör olduğunu belirtmektedirler.

Motor bakımı esnasında da iletişim adımlarının azaltılması hatalı anlama, yanlış anlama, anlamama, anlatılanı unutma vb. gibi iletişim kökenli hataların oluşması ihtimalini düşürecektir. Az ama yetkin iletişim motor bakım güvenliğini geliştirecek bir modeldir. Gelecekte motor bakımlarının maliyetinin azaltılması ve güvenilirliğinin artırılması için sistematik olarak modelin uygulanmasında fayda vardır. Bu modelin sadece ülkemizde değil tüm dünya havacılığında etkin olabilmesi için, uluslararası bir kural sistematiğine bağlanması gerekir. Bahsedilen etkinliğe ve güce sahip otorite, Birleşmiş Milletler'e bağlı Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu'dur(ICA0). Sistemin kalıcı ve uzun vadeli olmasının yasal çözümü bu şekilde küreselleşebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Linke-Diesinger, Andreas – System of Commercial Turbofan Engines / An Introduction to System Functions – 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg – ISBN 978-3-540-73618-9
- [2] https://easa.europa.eu/document-library/type-certificates?search=&date_filter%5Bvalue%5D%5Byear%5D=&product%5B%5D=23 (11.1.2016 Erişim zamanı)
- [3] <http://www.hurriyet.com.tr/boeing-2023-te-turkiye-nin-yolcu-ucagi-sayisi-700-u-asar-15059292> (11.1.2016 Erişim zamanı)
- [4] Çolak, Mustafa Bucan - CF6-80E1 Motorlarının Uçuşa Elverişli Tutulması Sisteminin Merkezileştirilmesi ve Optimizasyonu / Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi – 2015
- [5] <http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/yonetmelikler/SHY-M.PDF> (11.1.2016 Erişim zamanı)

- [6] http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/SHT-M-Rev.02_03.04.2015.pdf
(11.1.2016 Erişim zamanı)
- [7] http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/pdf/hava_araci_islemleri/sht-m.pdf (11.1.2016 Erişim zamanı)
- [8] EASA Part-21.A.449 / SHT-21.A.449