

Sivil Havacılıkta Bakım, Onarım ve Yenileme (BOY) Faaliyetleri, Havacılık 4.0 ve Yeni Trendler

Abdullah Cahit Karaoğlanlı^{1,*} 

¹Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 12.04.2021
Kabul: 20.04.2021

Anahtar Kelimeler:
Sivil havacılık
Bakım-onarım ve yenileme
(BOY) faaliyetleri
Endüstri 4.0
Artırılmış gerçeklik (AR)
Eklemeli imalat (AM)

ÖZET

Küreselleşen, nüfus oranı hızla artan, sosyal olarak gelişen ve ekonomik olarak büyüyen dünyamızda ulaştırma sektöründeki hız, emniyet, kalite ve konfor gibi faktörler havayolu taşımacılığını diğer ulaşım sistemlerine (karayolu, demiryolu, denizyolu vb.) göre ön plana çıkarmaktadır. Havayolu taşımacılığının diğer ulaşım sistemleri içerisindeki artarak büyüyen payı havacılık faaliyetlerindeki güvenli, etkin ve emniyetli uçuş koşullarının sağlanmasını da zorunlu kılmaktadır. Sivil havacılıkta yürütülen bakım, onarım ve yenileme (BOY) faaliyetleri, uçuş güvenliği açısından birincil düzeyde öneme sahiptir. BOY faaliyetleri aynı zamanda kamu/özel havayolu şirketleri için maliyet ve planlama yönüyle de hata toleransının minimum seviyede tutulması gereken bir süreçtir. BOY faaliyetlerinin şirketlerin toplam giderleri içerisindeki payı %10 ila %20 arasında değişen oranları bulurken, tüm dünyadaki havayolu şirketlerinin 2019 yılı içindeki BOY faaliyet giderleri %4'e yakın bir yıllık büyüme oranı ile 70 milyar USD'a yaklaşmıştır. Artan nüfus hızıyla birlikte küresel pazarın son derece dinamik bir yapıya kavuşması sonucunda üretim-tedarik sürelerinin hızlanması ve maliyetlerin düşürülmesi yönündeki baskı artmış, bunun sonucu olarak da imalat, tedarik ve lojistik gibi konularda son yıllarda gelişen elektronik ve dijital teknolojilerden daha fazla faydalanma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada, tüm dünyadaki sivil havacılık otoritelerinin yön verdiği BOY faaliyetlerine ait temel bilgiler verilerek, BOY faaliyetlerinin optimizasyon ve Endüstri 4.0 adaptasyonuna ilişkin güncel ilerlemeler değerlendirilerek, sunulmuştur.

Maintenance, Repair and Overhaul (MRO) Activities in Civil Aviation, Industry 4.0 and New Trends

ARTICLE INFO

Received: 12.04.2021
Accepted: 20.04.2021

Keywords:
Civil aviation,
Maintenance-repair and
overhaul (MRO) activities
Industry 4.0
Augmented reality(AR)
Additive manufacturing

ABSTRACT

In our rapidly globalizing, socializing, economically growing world with increasing population growth, factors such as time, quality and comfort have rendered airline transportation the most prominent mode of transportation when compared to the others (highway, railway, maritime etc.). The increasing share of airline transportation with every passing year brings about additional need for ensuring safe, efficient and secure flight conditions. Maintenance, repair and overhaul (MRO) activities carried out in the field of civil aviation is of primary concern in terms of airworthiness. This subject also holds critical importance for public and private airline companies as it requires minimization of error margins from the perspective of expenses and planning. The share of MRO activities within the overall expenditure of airline companies varies between 10% and 20%, whereas the overall MRO expenses of airline companies throughout the world has reached 70 billion USD by year 2019 with an annual increase of 4%. The highly dynamic nature of the global market induced by the high population growth has increased the pressure on the need for faster production-supply chains with lower logistic costs, which has led to an increased requirement for the utilization of electronics and digital technologies. In this work, fundamental information related to the MRO activities directed and audited by civil aviation authorities, as well as the recent developments regarding the optimization of MRO activities and their adaptation into Industry 4.0 have been reviewed and introduced.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ticari havacılığın dünya genelinde en güvenli ulaşım yolu olduğunu gösteren istatistiksel verilerin artış eğilimi son yıllarda da benzer şekilde devam etmektedir [1]. Bu başarıdaki en büyük etken sürekli olarak yenilenen ve temel prensipleri küçük değişikliklerle de olsa dünya genelindeki tüm devletler tarafından kabul edilen bakım, onarım ve yenileme (BOY) sistemidir [2]. Hizmete alınmadan önce tüm ticari uçakların ilgili devlete bağlı Sivil Havacılık Otoritesi (CAA) tarafından onaylanmış bir üretici bakım programı uçak bakım dökümanına sahip olması zorunludur. Havayolları, Sivil Havacılık Otoritesinin onayıyla kendi gereksinimleri doğrultusunda bu programa ilaveler veya üzerinde ek düzenlemeler yapabilmektedir. Belirli bir tip uçağın herhangi bir havayolu şirketindeki bakım programı yalnızca bu şirket tarafından uygulanabilir ve uçak başka bir şirkete satıldığında devredilemez niteliktedir [1-3].

Havacılık terminolojisinde BOY (İngilizce MRO) terimi (Bakım, Onarım ve Yenileme); muayene, hasar görmüş veya bozulmuş parçaların değiştirilmesi, iç ve dış yapının kontrolü, yapısal elemanların, hareketli parçaların ve malzeme yapısının kontrolü, korozyon ve aşınma hasarları, sızdırmazlık parçalarının değiştirilmesi, termal bariyer kaplamaların (TBCs) onarılması, lubrikantların veya gazların dolumu gibi işlemlerin tümünü kapsamaktadır [4,5]. BOY faaliyetlerinin amacı ticari bir uçağın her havalanışında Uçuşa Elverişlilik Direktiflerine uygun koşullarda olduğundan emin olunmasıdır [6]. BOY faaliyetleri güvenlik açısından kritik önem taşır ve bu yüzden ABD’de FAA (Federal Havacılık İdaresi), Kanada’da TCCA (Sivil Havacılık Otoritesi) ve Avrupa ülkelerinde EASA (Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı) tarafından sıkı biçimde denetime tabi tutulmaktadır [3]. Bakım faaliyeti yürüten tüm firmalara işletme sertifikaları FAA ve EASA tarafından verilmektedir [7]. Ülkemizde sivil havacılık sisteminde emniyet ve güvenliğe ilişkin standartlar çerçevesinde ilgili kuralların yazılması ve uygulanması ile ilgili otorite Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığına bağlı, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM)’dir.

Marx ve Graeber’in sunduğu SHELL modeline göre havacılık sistemi dünya genelinde en fazla şu dört unsurdan etkilenmektedir: Yazılım (düzenlemeler, talimatlar, bilgi, organizasyon), Donanım (uçaklar ve tesisler), Ortam (hava, sıcaklık, fiziksel-sosyal-siyasi değişkenler) ve İnsan Unsuru (pilotlar, bakım personelleri, yer ekibi, vs.) [8]. Havacılıkta meydana gelen kazalar genellikle yazılım ve donanım ile insan unsuru arasındaki ilişkinin zayıf olmasından kaynaklanmaktadır [9]. Endüstri tarihine bakıldığında bakım faaliyetleri endüstri ve havacılıkta gerçekleşen her devrimle doğrudan ilişkili olmuştur. İlk bakım personeli lisanslama standardı 1947’de ICAO (Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) tarafından çıkarıldığında uçaklar içten yanmalı bir motordan, mekanik sistemlerden ve gövdeden oluşan basit bir mekanik sistem olarak görülmekteydi [10]. Elektronik alanındaki ilerlemeler, malzeme teknolojileri ve jet motorlarındaki devrimsel gelişmeler bakım mühendislerinin daha derin bir uzmanlığa sahip olması gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Günümüzde uçak bakım mühendisliğinin gerektirdiği uzmanlık oldukça ileri düzeyde olmakla birlikte, genel amaçlı bir mühendis kompleks bakım operasyonlarını yürütecek bilgi ve tecrübeye sahip değildir [11]. Bakım mühendisliğinin artan önemine bağlı olarak Lisanslı Hava Bakım Mühendisliği (LAME) gereklilikleri EASA/FAA Uçak Bakım Personel Lisanslama işleyişinde ayrıntılı olarak verilmektedir [12]. Havacılık otoriteleri lisanslama koşulu olarak havayolu şirketlerinden Sürekli Uçuşa Elverişlilik Bakım Programı (CAMP) hazırlamalarını zorunlu kıldığından dolayı sivil havacılıkta BOY faaliyetleri kritik bir öneme sahiptir. Havayolu şirketlerinin uygulaması gereken tüm rutin denetimler detaylı bir şekilde CAMP listelerinde verilmektedir [13]. Uçakların havalanabilmesi için gerekli olan uçuş izni ancak uçağın düzenli bakımlarının yapıldığını onaylayan Uçuşa Elverişlilik Denetim Sertifikası ile alınabilmektedir. Bu yüzden tüm ticari uçaklar üreticiler tarafından uçaktaki yapısal tasarım ve sistemlere göre geliştirilen prosedürlere göre periyodik olarak bakıma alınmak zorundadır. Denetim ve muayene periyotları uçuş saatlerine göre, kalkış-iniş çevrim sayısına veya zamana göre (yaşlanma problemi; yıpranma, bozunma, yorulma, aşınma ve korozyon vb. etkilere bağlı) programlanabilmektedir [3].

2. UÇAKLARDAKİ KONTROL VE BAKIM TÜRLERİ İLE DİĞER BOY FAALİYETLERİ (AIRCRAFT MAINTENANCE CHECK TYPES AND OTHER MRO ACTIVITIES)

Havacılıkta gerçekleştirilen bakımlar genel olarak uçuş öncesi ve sonrasında gerçekleştirilen bakımlar, günlük, süreli bakımlar ve takip/kontrol işlemleri ile daha detaylı bir biçimde gerçekleştirilen süreç ve proseslerden oluşmaktadır. Ticari/sivil havacılıkta hizmet veren tüm uçaklar A, B, C, D şeklinde dört farklı seviyede bakım kontrollerine tabidir [3].

A tipi kontrol: 200-300 uçuş çevriminden sonra gerçekleştirilen hafif bir kontroldür. Yolcu kabininin, iç ve dış yapının, motor bağlantı direklerinin, kontrol yüzeylerinin ve motorların kontrol ve muayenesini kapsar.

B tipi kontrol: 2000 uçuş saati sonrası (genellikle 6-8 aylık bir süreçten sonra) gerçekleştirilen hafif bir kontroldür. Yaklaşık 1 ila 4 gün sürer. Tüm A kontrollerine ek olarak motorların, yapısal elemanların, tüm hareketli parçaların, kanatların, kompozit malzemelerin (çatlak veya delaminasyona karşı) derinlemesine kontrolünü kapsar.

C tipi kontrol: 3500 uçuş saatinden (18 ila 24 ay) sonra gerçekleştirilen ağır bakım prosesidir. Bu bakım prosesi 8 ila 15 gün sürerken bu bakımda uçağın bakım için operatör şirket hangarına veya uzman bakım firmasının hangarına çekilmesi gerekir. A ve B tipi kontrollere ek olarak pek çok grup ve bileşen demonte edilerek, dikkatlice muayene edilmeleri sağlanır (özellikle motor ve motor direkleri).

D tipi kontrol: Uçak üzerinde gerçekleştirilen en ağır bakımdır ve yenileme (overhaul) olarak da adlandırılmaktadır. D tipi ağır bakım uçak 18000-26000 uçuş saatine ulaştığında başlar ve bu da yaklaşık 6-10 yıllık bir servis ömrüne tekabül eder. Uçak tüm iç ve dış yapıyı kapsayacak şekilde tamamen demonte edilir ve bakım genellikle 60 gün sürer. Her D tipi bakımdan sonra uçak 3 saatlik bir test uçuşuna tabi tutulur.

Bunların yanında sivil havacılık bakım hizmetleri her biri birbirinden farklı faaliyetlerden oluşan üç sınıfa ayrılabilir [14].

a) Hat Bakımı: Bu bakım uçak aprondayken, uçak indiği zaman ve tekrar uçuşa havalanmadan önce işletme durumundayken gerçekleştirilir. EASA Onaylı Bakım Kuruluşları Yönetmeliği Bölüm 145'te hat bakımı hangar dışında ve açık havada gerçekleştirilebilecek her türlü bakım şeklinde tarif edilmektedir. Hat bakımı ile ilgili görevlerin tanımı oldukça açıktır ve genellikle rutin servis içi denetimleri, günlük kontrolleri, sorun gidermeyi ve tashihleri kapsar. Hatta değiştirilebilen üniteler (LRU) şeklinde tasarlanan cihazlar bu bakım sırasında değiştirilebilmektedir. Hat bakımı genellikle yer destek ekipmanının sayısı ve kapsamı ile sınırlıdır [15].

b) Üs Bakımı: Hat bakımından farklı olarak üs bakımında uçak genellikle bir günden fazla bir süreyle hizmetten ayrılır ve bu süre 30 güne kadar uzayabilmektedir [3]. Bakım, uçağın servis alanından ayrıldığı bir ortamda hangar ve atölye ortamlarında gerçekleştirilir. Bakım sırasında özel alet ve ekipmanlar gerekir. Programlı kontroller bu bakım sırasında gerçekleştirirken tashih-düzeltilme faaliyetleri ve kusur tespit çalışmaları da bu bakımda yürütülen faaliyetler arasındadır. Hat bakımından daha ağır olan C ve D tipi kontroller bu bakım sırasında gerçekleşir. Üs bakımı yapısal çalışmalar, korozyon önleme, iç mekan yenileme ve önemli bileşenlerin değiştirilmesi gibi zaman alıcı bakım görevlerini içerir [3, 14].

c) Komponent Bakımı: Hat ve üs bakımlarında değiştirilen veya çıkarılan tüm parçalar komponent bakıma tabi tutulur. Aviyonik (havacılık elektroniği) üniteleri, çeşitli mekanik ve elektriksel uçak ve motor bileşenleri ve bazı durumlarda komple motor tertibatı demonte edildikten sonra özel bir alana alınarak bu bakıma tabi tutulurlar. Bu bakım genellikle uçak üzerinde değil, parçaların demonte edilerek götürüldüğü ayrı bir alanda gerçekleştirilir. Bir komponent bakım kılavuzu (CMM) belirli bir komponent üzerinde yürütülecek görevlerin tanımlanmasında kullanılır. Bu kılavuz bileşenin servis koşullarında çalışabilecek kondisyona getirilmesi için gerekli bilgileri içerir [16].

BOY faaliyetleri, montaj-demontaj prosedürlerinin açıklayıcı resimlerle detaylandırıldığı kontrol listeleri üzerinden gerçekleştirilmektedir [17]. Yedek parçalarla değiştirilecek olan ana bileşenlerin doğru biçimde tespit edilerek, bakım lojistik zinciri tarafından zaman kaybı olmadan tam zamanında teslim edilmesi büyük önem arz etmektedir. Gereksiz parçaların raflarda birikmesinin önüne geçilerek, ihtiyaç duyulan yedek parça stoklarının oluşturulması verimlilik açısından önemlidir [18].

Havacılık sektöründe bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri işleyiş, malzeme, parça ve ekipman yönüyle değerlendirildiğinde karmaşık yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple, bakım prosedürleri basılı prosedürler gibi geleneksel yöntemlerle yürütüldüğünde pek çok sorun ortaya çıkabilmektedir [18]. Açıklayıcı resimlerin gerçeğinden farklı olması, demontaj prosedürlerinin iki boyutlu resimlerden anlaşılamayacak kadar karmaşık olması, sürekli olarak uçak üreticisi tarafından teyit edilmesi gereken hususlar, bakım faaliyetlerinin yürütülmesi sırasında zayıf ergonomiden kaynaklanan aşırı iş yükü, benzer bileşenlerle dolu alanlarda belirli bir bileşenin yerinin tespit edilmesinin zor olması, uzun ve yorucu montaj/demontaj işlemleri ortaya çıkabilecek muhtemel sorunlardan yalnızca bir kısmıdır. Bundan dolayı, özellikle insan unsuru olarak nitelikli ve tecrübeli personelin etkin kullanımı sektörün verimli işleyişinin anahtar faktörlerinden birisidir [19].

Ticari uçak bakımı, uçağın teknik, operasyonel ve ekonomik açıdan optimum şartlar altında tutulması için gerekli tüm görevlerin yerine getirilmesi şeklinde de tanımlanabilmektedir. Bakım programları, ticari uçaklar gibi pahalı ve karmaşık ekipmanlar için güvenlik ve operasyonel güvenilirliğin son derece önemli olduğu, yönetmelik ve düzenlemeler ile sıkı biçimde kontrol edilen ticari havacılık sektöründe operasyonel başarı için büyük önem taşımaktadır [20].

Herhangi bir bakım programının temel amaçları önem sırasına göre şu şekilde sıralanabilir [21].

- Uçuş operasyonları ile ilgili tüm güvenlik seviyelerinin doğru bir biçimde uygulandığından emin olmak ve herhangi kaza veya vaka olasılığının minimize edilmesi,

- Sivil Havacılık Otoritesi'nin (CAA) gerekliliklerinin eksiksiz bir şekilde yerine getirildiğinin gösterilmesi, ilgili muayenelerden başarılı bir şekilde geçilmesinin sağlanması ve Uçuşa Elverişlilik Sertifikasının alınması,

- Uçağın ticari hizmet için uygun olduğu sürenin maksimum düzeyde tutulması ve bu yolla filonun potansiyel kullanım oranına katkıda bulunulması,

- Yalnızca bakımla ilgili hususların değil ilgili tüm faktörlerin dikkate alınması suretiyle havayolu işletim ekonomisinin optimize edilmesidir [22].

Yukarıda bahsedilen ilk iki amacın gerçekleştirilmesi ticari uçak işletmeciliği için zorunlu olup her bir ticari uçağın havalanabilmek için Sivil Havacılık Otoritesi'nden uçağın ulusal ve uluslararası koşulları karşıladığını tescil eden Uçuşa Elverişlilik Sertifikasını (Airworthiness Certificate-AC) almış olması gerekmektedir [23]. Bunun için de havayolu şirketinin talep edilen tüm bakım standartları ile ilgili uygulama ve prosedürlerin sürekliliğini garanti eden bir Teknik Organizasyon ile çalışması gerekir. Teknik Organizasyon (BOY Şirketi) ve prosedürleri Sivil Havacılık Otoritesi tarafından denetlenir ve onaylandıktan sonra havayolu şirketine işletme ruhsatı (Air Operator Certificate-AOC) verilir. Teknik Organizasyonun da ilgili bakım hizmetini satabilmek için Sivil Havacılık Otoritesinden ilgili uçak tipine göre Tip Sertifikası alması gerekir [23].

Havayolu işletmeciliği ekonomisinin optimizasyonu pek çok etkene bağlıdır [24]. Yatırım maliyeti açısından bakıldığında uçağın kullanım oranının en üst seviyeye çıkarılması işletme ekonomisinin geliştirilmesindeki temel etkenlerden biridir. Havayolu firmaları bu doğrultuda uçaklarını mümkün olan en fazla uçuş saati ile kullanmayı, bakım hizmetlerini mümkün olan en düşük sürelerde tutmayı ve kapasite fazlasını dışarı pazarlamayı hedefler [25]. Bunun için kilit faktörler uçuş rotalarının optimize edilmesi, uçuş sürekliliğinin artırılması ve uçakların kalkışa en kısa sürede hazırlanmasını sağlayacak yer hizmetlerinin sağlanmasıdır. Aynı zamanda uçağın optimum teknik kondisyona sahip olması yakıt sarfiyatını düşürecek ve bu da şirketin bütçesine olumlu yansıtacaktır [26].

İşletme sırasında uçak performansının düşmesi zorunlu ek bakım faaliyetleri ile telafi edilebilir veya engellenebilir. Çoğu zaman bu faaliyetler uçağın yerdeki süresini arttırırken toplam uçuş süresini de azaltacaktır. Maliyet ve bakım gibi birbirine zıt prosedürler arasındaki dengenin sağlanması havayolu bakım sisteminin öncelikli hedefleri arasında gelir [27]. Bu durumda departmanlar arası bir yönetim grubunun, şirketin küresel politikasını münferit havayolu birimlerinin bütçe politikalarının üzerinde tutmasını gerektirir. Örneğin aşırı yoğun onarım faaliyetleri uçağın bakım süresini arttırıp uçuş süresini azaltırken, uçuş programı üzerindeki baskıyı arttırabilir. Diğer yandan bakım faaliyetlerinin belirli bir seviyenin altına düşmesi uçuş iptal ve gecikme sayısını arttırıp firma güvenilirliğini zedelerken, motor ve sistemlerin performansının düşmesi yoluyla yakıt sarfiyatının artmasına da sebep olabilir [21].

2.1. Uçak Bakım ve Performans Takibi (Aircraft Maintenance and Performance Monitoring)

İşletme ömrü boyunca herhangi bir ticari uçağın enerji verimliliği, mühendislik ve bakım departmanlarının diğer ilgili parametrelerle birlikte spesifik sarfiyatı sürekli olarak gözlem altında bulundurması yoluyla takip edilebilir [28]. Spesifik sarfiyat değerlerinin analizi, bakım faaliyetleri yoluyla giderilebilecek olası teknik noksanlıkların tespit edilmesinde önemli rol oynamaktadır. Havayolu işletmecileri satın alınan uçak tertibatının kontrol ayarlarını, yalıtım ve boya durumunu potansiyel bir onarım veya modifikasyon ihtiyacına karşı teslimat öncesi muayene ederek uçağın ağırlığındaki değişiklikleri tespit etmek zorundadır. Teslimat öncesi testler uçak performansına ilişkin veri tabanının oluşturulmasında yardımcı olur. Uçak tam teçhizatlı MEW (İmalatçı Boş Ağırlığı) kontrolünü ve uçağın spesifik menzilin sözleşmede garanti edilen limitler içinde olduğunu gösteren bir uçuş testine tabi tutulur [29]. Performans ile ilgili olmayan diğer testler farklı sistemlerin işlevselliği, kabin gereklilikleri, kabin içi ses gibi hususlarla ilgilidir.

Uçak hizmete alındıktan sonra performans takibi:

- Aynı tip uçakların verimlilik trendinin aynı anda takip edildiği filo düzeyinde,
- Performans takibinin uçağın kuyruk numarası üzerinden gerçekleştiği münferit uçak düzeyinde,
- Her bir motorun performans düşüşünün ayrı ayrı takip edildiği motor seri numarası düzeyinde gerçekleştirilir.

Yüksek yakıt sarfiyatından dolayı daha yüksek yük kısıtlamalarına tabi olan uzun menzilli filolarda genellikle kuyruk numarası ve motor seri numarası üzerinden takip gerçekleştirilirken, ağır yük limitlerine tabi olmayan kısa-orta menzilli filoların performans takibi filo düzeyinde veya aynı yaş ve spesifikasyona sahip uçak grupları düzeyinde gerçekleştirilebilmektedir [28,29].

2.2. Uçak Yakıt ve Verimliliğinin Arttırılması İçin Uygulanan BOY Faaliyetleri (MRO Activities to Reduce Fuel Consumption and Improve Efficiency)

Uçak performans takibi (APM) prosedürleri; uçuş sırasındaki mevcut spesifik yakıt sarfiyatının uçağın veya motorun teslimat anındaki durumunu gösteren referans bir performans değeri ile karşılaştırılması prensibine dayanır. Analiz edilen parametreler aşağıdaki gibidir [21].

- Yanan yakıt hacmi,
- Uçuş saati başına yakıt gibi seçilen bir parametre değerine göre hesaplanan enerji verimliliği,
- Spesifik yakıt sarfiyatındaki artış,
- Mevcut performansın tahmin edilen trende göre ayarlanmasını içermektedir.

Uçakların yakıt sarfiyatı performansları, havayolu şirketlerine teslimat öncesinde üretici firma tarafından teslimat öncesi testlerde kontrol edilmektedir. Uçakların sarfiyat performans değerleri belli aralıklarla birbirlerinden farklı olabilmekte birlikte Uçak Performans Kılavuzu'nda (APMA) üretici tarafından garanti edilen belli limit değerlerinin dışına çıkamaz [30].

İşletmeci firma performans trendine ilişkin benzer garantileri uçağın hizmet süresi için de isteyebilme hakkına sahiptir. Bu durumda, üretici uçağın hizmet-içi performansının belirtilen

performans aralığında gerçekleştirdiğini gösteren APM uygulamalarını gerçekleştirmekle yükümlü olacaktır. Garanti koşulları Uçak Satın Alma Sözleşmesinde açık bir şekilde belirtilir ve hukuki değere sahiptir. APM prosedürlerinin herhangi bir hukuki ihtilaf durumunda kullanılabilir şekilde şeffaf ve net olması gerekmektedir. Performans takip prosedürlerinin son derece karmaşık teknik yapısı hizmet-içi performans garantilerinin takibini de zorlaştırmaktadır [21,23].

APM prosesi için gerekli olan veriler uçaktaki ekipmanlar tarafından kaydedilerek Dijital Uçuş Veri Kayıt Cihazına (DFDR) gönderilir ve oradan teknik departmana iletilir. Veri transfer şekli uçak konfigürasyonuna göre fiziki çıktı veya dijital medya ortamında ya da Uçak İletişim Yönlendirme ve Raporlama (ACARS) Sistemi üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Elde edilen analiz sonuçları operasyon departmanı tarafından yönlendirilerek APMA’da belirtilen yakıt sarfiyat parametrelerinin bakım departmanı tarafından düzeltilmesi sağlanır. Uzun menzilli uçaklarda her uçağa özel doğrulama katsayıları uygulanırken kısa ve orta menzilli uçaklarda aynı spesifikasyona sahip tüm uçaklar için tek bir doğrulama katsayı değeri uygulanmaktadır [21,30].

Uçak motorları, uçak gövde ve sistemlerinden ayrı olarak performans düşüş analizlerine tabi tutulmakta ve gerekli görüldüklerinde değiştirilebilmektedirler. Çoğu havayolu Motor Kondisyon Trend Takibi (ECTM) programları uygulayarak uçuş saat ve çevrimleri üzerinden farklı motor parametrelerindeki değişimleri takip ederler [31]. APM ve ECTM analiz sonuçlarının karşılaştırılması yoluyla performans düşüşünün ne kadarının uçak gövde ve sistemlerinin performansına bağlı olduğu tespit edilebilmektedir. Münferit uçak performans seviyesine ilişkin bilginin doğruluğu, seyahat süresince kullanılacak yakıt miktarının tam olarak hesaplanmasını kolaylaştıracalığından güvenlik toleranslarını etkilemeden uçak yakıt rezervinin minimize edilmesine ve dolayısıyla uçuş planlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Yakıt verimliliğinin artırılması ile ilgili tipik bakım türleri genel olarak dört kategoriye ayrılabilir [21].

- Spesifik sarfiyatın iyileştirilmesi için motor yenileme alışmaları,
- Aerodinamik temizliğin sağlanması ve sürdürülmesi,
- Uçak ağırlılığının azaltılması,
- Doğruluk optimizasyonu için sistem kalibrasyonu.

2.3. Uçak Motor Yenileme alışmaları (Aircraft Engine Renewal Studies)

APM tüm uçağın performansı ile ilgili olsa da yakıt verimliliği bakımından en önemli bileşen sonuçların %70-75’inden sorumlu olan uçak motorudur [32]. Onarım ihtiyaçları, güncellemeler, aşırı performans kaybı veya lojistik sebeplerden dolayı uçakların hizmet süreleri boyunca motorları pek çok kez değiştirilebilmektedir. Ticari uçaklar ilk 30-60 uçuş çevriminde telafi edilemeyen büyük performans kayıplarına uğrarlar. Bunun nedeni motorun hareketli ve sabit parçaları üzerinde yapılan ayarlamalar, motorun yüksek sıcaklıklarda ilk kez çalışıyor olması ve bununla ilgili meydana gelen mekanik aksaklıklardır. Bu aşama geçildikten sonra yakıt sarfiyatındaki artış daha takip edilebilir bir trend izler. Kullanım sırasındaki performans kaybının yaklaşık %80’i büyük yenileme çalışmaları ile giderilebilmektedir. Bakım faaliyet periyotlarını belirleyen ana etken belirli bir ömür sonrası değiştirilmesi gereken parçalar (life-limited-parts-LLP) olduğundan onarım faaliyetlerinin optimum sayısını onarım masrafları ve sağlanacak yakıt tasarrufu arasında kurulacak denge belirler [33]. Motor performansının tipik göstergeleri egzoz gaz sıcaklık (EGT) marjı ve spesifik yakıt sarfiyatıdır (SFC). EGT sıcak gazların motor türbininden çıkış anındaki sıcaklığı temsil etmekte ve işletme için limit sıcaklığı belirlemektedir. Motor verimliliği zamanla azalığından istenen itiş gücüne ulaşmak için daha fazla yakıt gerekir ve dolayısıyla egzoz gaz sıcaklığı zamanla artar [34].

Kokpit göstergelerinde EGT marjı aşıldığında uyarı veren bir kırmızı çizgi bulunur. EGT marjı ise mevcut sıcaklık ile bu kırmızı çizgi arasındaki farkı ifade eder. Marj ortadan kalktığında motor itişinin düşürülmesi veya motorun bakım ve restorasyona alınması gerekir [34]. SFC birim itiş gücü başına motor yakıt sarfiyatını ifade eder ve motor verimliliği düşüktüe artar. Bu iki parametre (EGT ve SFC)

bakım faaliyet planlamaları için analiz edilen ana parametrelerdir ve motorun değiştirilmesi veya yenilenmesi için en uygun zamanın belirlenmesinde kilit rol oynarlar. Yenileme ve bakım maliyetlerinin elde edilecek EGT ve SFC iyileştirmeleri ile mali açıdan dengede tutulması gerekir. Uçak motorlarının rutin hizmet süresince motor performans kaybının en önemli sebepleri aşağıdaki gibidir [21].

- Kir birikintileri,
- Sızdırmazlık malzemelerinin aşınmasından kaynaklanan sızıntı ve kaçaklar,
- Kompresör ve türbin bıçak ucu boşluklarının artmasından kaynaklı basınç kayıpları,
- Türbin bıçaklarının aerodinamik profillerinde partikül çarpmalarından ve erozyondan kaynaklanan bozukluklardır.

2.4. Aerodinamik Temizlik (Aerodynamic Cleaning)

Ticari uçaklar birçok rijit ve hareketli parçadan oluşan kompleks mekanizmalardır. Optimum verimlilik her bir bileşen üzerinde minimum hava direnci oluşumunun sağlanması ve gövdenin düzensizliklerden arındırılması yoluyla elde edilir [35]. Tüm yüzeylerin mümkün olduğunca düzgün olması, kapı ve panellerin diğer yapılarla süreklilik içinde olması gerekir. Uçuş sırasında uçak yüzeyleri partikül darbelerine maruz kalarak erozyona uğrarlar. Bu düzensizliklerin artması hava direncini artırır ve bu durum yakıt sarfiyatının artmasına sebep olur [36]. En ağır etkiyi uçağın burun, kokpit gibi ön kısmındaki, kanatlardaki ve kuyruk kısmındaki düzensizlikler verir. Hava direncinde bu düzensizliklerden kaynaklanan artışlar %0.4'leri bulabilmektedir. Hava direncini arttıran sorunlar arasında kapı ve panellerin hizasının bozulması, düşük kaliteli onarım işlemleri, sızdırmazlık malzemelerinin aşınması, boya katmanının bozulması sayılabilir. Yıkama ve parlatma işlemleri, uçak yüzeyindeki hava direncini %0.1-0.2 gibi ciddi oranlarda azaltabilmektedir [21].

2.5. Uçak Ağırlığının Azaltılması (Aircraft Weight Reduction)

Ticari uçakların operasyonel boş ağırlıkları (OEW) 5 ila 10 yıl gibi bir zaman aralığında %1 oranında artabilmektedir ve bu sistematik olarak kontrol edilmesi gereken bir durumdur. Havayolu şirketleri uçakları sık aralıklarla tartmazken, bu çoğu durumda yenileme faaliyetleri sonrası ile sınırlı kalmaktadır. Ağırlık artışına sebep olan bazı etkenler aşağıdaki gibidir [21].

- Erişilemeyen alanlarda kirlilik ve rutubet birikmesi,
- Onarımlardan kaynaklı ilave ağırlıklar,
- Servis bültenleri ve diğer modifikasyonlar,
- Boş birim yükleme cihazları (ULD),
- Gereksiz acil durum veya bakım ekipmanları olabilmektedir.

2.6. Sistem Kalibrasyonu (System Calibration)

Uçuş sistemleri önceden belirlenmiş bir hata marjı dahilinde uçuş ile ilgili bilgi sağlarlar. Hata marjını aşan bir hata uçuş ekibinin hız, irtifa ve hatta yerçekimi bakımından optimum koşulların altına düşmelerine sebep olabilir. Bunun neticesinde havayolu şirketi uçuş planına uyulmaması sonucu ağır yaptırımlara maruz kalmaktan, yakıt sarfiyatından dolayı maddi kayba uğramaya kadar pek çok istenmeyen durumla karşı karşıya kalabilmektedir [37]. Bir Boeing 747-400 öngörülenden 0.01 Mach daha hızlı uçtuğunda yakıt tüketimi %1'den daha fazla bir oranda artmaktadır. Bunun önüne geçebilmek için hava verilerini sağlayan algılayıcı sistemlerin belirli aralıklarla kalibre edilmesi gerekir [21].

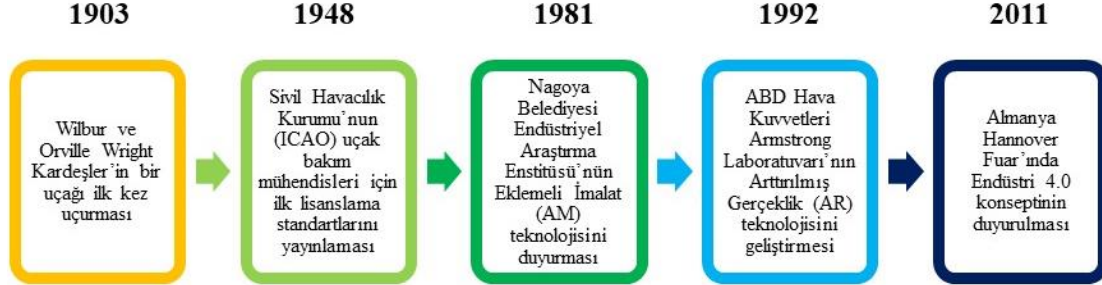
3. FAALİYETLERİNİN ENDÜSTRİ 4.0'A ENTEGRASYONU: ARTTIRILMIŞ GERÇEKLİK (AR) VE EKLEMELİ İMALAT (AM) UYGULAMALARI (INTEGRATION OF MRO ACTIVITIES WITH INDUSTRY 4.0: AUGMENTED REALITY (AR) AND ADDITIVE MANUFACTURING (AM) APPLICATIONS)

Endüstri 4.0 kavramı ilk kez 2011 yılında Alman Hükümet yetkilileri ve akademisyenler tarafından imalatın dijitalleşmesine dayalı stratejik bir yaklaşım olarak Hannover Fuar'ında sunulmuştur [38]. Son yıllarda Endüstri 4.0 kavramı imalat robotları, insanlar ve makineler arasında gerçek bir etkileşime dayalı yeni bir devrim olarak pek çok alanda kendini göstermeye başlamıştır. Cozmiuc ve Petrisor'a göre dördüncü endüstriyel devrim dört temel unsur üzerinde yükselmektedir [39]. Bu temel unsurlar; birlikte çalışabilirlik, bilgi şeffaflığı, teknik destek ve merkezi olmayan karar alma unsurlarıdır. Birlikte çalışabilirlik (interoperability) kavramı; insanları, cihazları, makineleri ve robotları kapsayan bir ağın mümkün olan en yüksek düzeyde otomasyon sağlamak amacıyla Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT) vasıtasıyla oluşturulması ve bu yolla "Tam Otomatik Fabrika" konseptinin hayata geçirilebilmesi ile ilgilidir. Bilgi şeffaflığı terimi Dijital İkizler (Digital Twins) konsepti üzerine kuruludur [40]. Dijital ikizler gerçek nesnelerin sanal kopyaları ve sanal verilerin gerçek sensörler vasıtasıyla zenginleştirilmesini içermektedir. Teknik destek kavramı iki temel teknoloji üzerine kuruludur: işletmecilere problemlerin kısa sürede çözülmesini sağlamak için gerektiğinde görselleştirilebilecek bilgiyi sağlamak; D3 operasyonlarını (sıkıcı, kirli, tehlikeli) yürüten insanların siber-fiziksel makineler ile değiştirilmesi [41]. Merkezi olmayan (decentralized) karar konsepti ise otomatik olarak karar veren, insan müdahalesi olmadan çelişkileri ve kompleks planlama problemlerini çözebilen akıllı makinelerin kullanılmasını ve dolayısıyla problem çözme yükünün insan üzerinden alınarak denetleme görevinin daha iyi yürütülmesinin sağlanmasını içerir [42].

Endüstri 4.0 şirketlerde Artırılmış Gerçeklik (AR) ve Sanal Gerçeklik (VR) gibi yeni teknolojilerin kullanılmasını; imalat sürelerinin kısaltılması ve akıllı yapıların kullanılabilmesi için Eklemeli İmalat (AM) teknolojisinden faydalanılmasını; şirketlere büyük miktarlarda veriyi yönetebilecek yazılım araçlarının sağlanmasını (Büyük Veri-Big Data); verilerin anlaşılır ve sezgisel biçimde toplanması için yazılım algoritmalarının geliştirilmesini ve böylelikle denetleyici insanlara yalnızca en önemli verilerin ulaşmasını; fabrikalarda insanlar, makineler ve robotlar arasında etkileşim sağlayan geniş bantlı internet altyapılarının kurulmasını kapsamaktadır [43]. Endüstri 4.0 kavramı ve yukarıda bahsedilen bileşenleri diğer pek çok alan gibi havacılık alanında da kendini göstermeye başlamıştır. Havacılık, tasarım ve bakım perspektifinden bakıldığında oldukça kompleks bir alandır [44]. Sivil havacılık, uzak alanlara kısa sürelerde yedek parçaların sağlanabilmesi için lojistik çözümler ararken yerel havayolu şirketleri için kompleks bakım faaliyetleri en önemli ihtiyaçlardan birini teşkil eder. Bakım faaliyetlerinin havayolu şirketleri için önemini destekler nitelikte Avrupa Araştırma Programı; Clean Sky 2 ADVANCE European Union H2020 projesi çatısı altında büyük yolcu uçakları için bakım stratejileri geliştirmektedir [45]. Endüstri 4.0'ın havacılık endüstrisine entegrasyonu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, French vd. Eklemeli İmalat teknolojisinin havacılık endüstrisinde kullanımının önemine vurgu yapmaktadır [46]. Literatürde yapılan araştırmalar Endüstri 4.0'ın BOY faaliyetlerinde bakım sürelerinin azaltılmasında etkin bir şekilde kullanılabilir olduğunu göstermiştir. Eklemeli İmalat ve Artırılmış Gerçeklik teknolojilerinin sunduğu kolaylıklar havacılık endüstrisine etkin bir şekilde adapte edilebilir niteliktedir [47].

Uçak bakım sektörü için kilit öneme sahip olabilecek teknolojiler Endüstri 4.0 tarafından sunulmaktadır. Ağ oluşturma, büyük verilerin kullanılabilmesi, kişiselleştirilmiş ve lokal olmayan üretim kabiliyetleri, birbirine bağlı mikro-sensör ağları, uzak operasyonlarda verilerin ve bilgilerin akıllı ve sezgisel biçimde görselleştirilmesi (drone kullanımı), otomasyon gibi teknolojiler yalnızca fabrikalarda değil havacılık sektöründe de verimi ve hızı arttırarak maliyetleri düşürebilecek kilit teknolojiler arasındadır. Bu duruma bir örnek çalışma, Büyük Veri işleme kabiliyetine sahip verimli algoritmalar, Airbus ve Boeing gibi üreticilerin kompozit yapıların gerçek zamanlı ve güvenli yapı kontrolünün sağlanmasının takibinde kullanmaya başladıkları önemli bir teknolojidir [48]. Bu yaklaşım, kompozit yapıların takibi ve çatlak ilerlemesinin etkin bir şekilde tespit edilmesi için milyonlarca verinin toplanması ve analizinin gerçekleştirilmesine ve gerçek bir "hasar tolerans"

stratejisi oluşturulmasına dayalıdır [49]. Diğer tüm Endüstri 4.0 teknolojileri arasında Arttırılmış Gerçeklik ve Eklemeli İmalat teknolojilerinin havacılık sektöründe kilit oyuncular olacağı ön görülmektedir [3]. Arttırılmış gerçeklik ve eklemeli imalatı da içeren havacılık teknolojilerindeki tarihsel gelişime ait zaman çizelgesi Şekil 1’de gösterilmektedir. Teknolojideki gelişmeler ve Endüstri 4.0 kavramının yaygın hale gelmesi sivil havacılığın yanında askeri havacılıkta dahil olmak üzere tüm havacılık endüstrisinde büyük ilerlemeleri beraberinde getirecektir [3].



Şekil 1. Havacılık teknolojilerinin tarihsel gelişimi (Historical development of aviation technologies) [3].

3.1. Arttırılmış Gerçeklik (Augmented Reality (AR))

Arttırılmış Gerçeklik (AR) teknolojisi, Arttırılmış Bakım Kılavuzlarının ve Tasvirlendirilmiş Parça Kataloglarının oluşturulmasında büyük önem taşımaktadır [3,50]. Bu şekilde bakım personeli gerçek bir uçak üzerinde bakımı yapılacak bileşen ile ilgili her türlü bilgiye basılı kılavuzların bahsedilen kısıtlamalarına maruz kalmadan sezgisel ve hızlı bir şekilde ulaşabilir. Özellikle montaj/demontaj görevlerinin bakım personeline bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleri veya manuel operasyonları temsil eden semboller vasıtasıyla sunulduğu veya hareket izleme teknolojilerinin kullanıldığı sanal panellerin kullanıldığı bakım prosesleri, arttırılmış gerçeklik teknolojisinin uçak bakımında kullanımına ilişkin örneklerden bazılarıdır [3,51]. Arttırılmış gerçeklik uygulamaları uzak bakım operasyonlarında kompleks prosedürlerin bakım merkezleri tarafından sanal animasyonlarla desteklenmesinde de kullanılabilir. Her bir bakım prosedürü için sanal animasyonların hazırlanması zaman alıcı bir süreç olup, bu durum arttırılmış gerçeklik teknolojisinin kullanımını kısıtlayıcı bir etken oluşturmaktadır. Ancak Ceruti vd.'nin de önerdiği gibi, milyonlarca parçadan oluşan bir ticari uçağın her bir parçası için gerekli bakım prosedürlerine ait animasyonlar üretici firmanın kendi çatısı altında oluşturduğu bir departmanda oluşturularak havayolu şirketlerinin kullanımına sunulduğunda arttırılmış gerçeklik teknolojisinin uçak bakım faaliyetlerinde kullanım oranı artmıştır [52]. Uçak bakım eğitimleri, arttırılmış gerçekliğin kullanılacağı diğer bir alan olup gerçekçi ve etkin eğitimler için kilit rol oynayacaktır. Sanal ve gerçek bileşenlerin arttırılmış gerçeklik teknolojisi ile bir araya getirilmesi karmaşık senaryoların eğitimlerde kullanılmasını sağlayabilmektedir [53]. Özetle, arttırılmış gerçeklik teknolojisi özellikle geleneksel basılı kılavuzlar ile açıklanamayacak kadar karmaşık olan bakım görevlerinin gerçekleştirilmesinde son derece kilit bir rol oynayacak ve verimlilik düzeyini arttıracaktır.

3.2. Eklemeli İmalat (Additive Manufacturing (AM))

Endüstri 4.0'ın Eklemeli İmalat (AM) tarafında bakım prosedürlerini kolaylaştırabilecek pek çok uygulama söz konusudur [3,54]. İmalata geçilebilmesi için sadece hedef parçanın sayısal modelinin mevcut olmasının yeterli olması eklemeli imalatın avantajlı yönünü oluşturmaktadır. En iyi sonuçlar parça üzerinde bir topolojik optimizasyon sonrası sağlanan kafes yapıları modeller ile elde edilebilmektedir [55]. Bu şekilde talaş kaldırma ve diğer geleneksel imalat yöntemleri ile elde edilemeyen kompleks geometrilerin imalatı son derece kolay hale gelmektedir. Sivil havacılık sektöründe yapılacak düzenlemelerle, eklemeli imalatla üretilmiş olan metal parçalara kullanım izni verildiğinde yedek parçaların üretilebilmesi için, bir eklemeli imalat üretim hattı olacaktır. “Dijital İkiz” kavramının havacılık sektöründe kendine yer bulduğunda farklı geometriye sahip yedek parçaların orijinali ile değiştirilmesi de mümkün olabilecektir [56]. Böyle bir durumda, orijinal

parçaların toplu üretimi geleneksel yöntemlerle daha uygun maliyetlerle gerçekleştirilirken, çatlak/hasar görmüş parçaların da optimize edilmiş ve daha verimli çalışan yedek parçalar ile değiştirilebilmesi mümkün olabilecektir. Bu durumun neticesinde, orjinal ve optimize edilmiş parçaların üretim maliyetleri de birbirine yakın olacaktır. Boyutlardaki değişiklikler uçak fonksiyonelliğini etkilemediği sürece, bileşenler üzerine gelecek aynı yapısal gerilmelerle yapısal ağırlıkta düşüşler sağlanabilecektir [54,55].

Standart ve eklemeli imalatla yedek parçaların bir arada kullanılmasından dolayı her uçağın orjinal ve yedek parça envanteri farklı olacak ve bunun yönetilmesinde bir dijital ikiz oluşturulması kolaylık sağlayacaktır [57]. Eklemeli imalat parçaları yapısal olmayan parçalar için depolama giderlerini de düşürmüştür olacaktır. Eklemeli imalat teknolojisinin avantajlarından faydalanılabilmesi için uçak üreticilerinin parçaların dijital modellerini paylaşması ve FAA/EASA düzenlemelerinin metalik parçaların eklemeli imalatına izin vermesi öncelikli olarak gerekecektir. Bu yolla bakım hangarlarına kurulacak eklemeli imalat tertibatının kurulması yoluyla yedek parça tedarik zincirinin önemli ölçüde kısaltılması sağlanacaktır. Endüstri 4.0 teknolojilerinin BOY uygulamalarında yer bulması için uçak üreticileri, havayolları ve bakım şirketleri arasında sıkı bir bilgi ağının oluşturulması son derece önem arz etmektedir [3,54,55].

3.3. Havacılık 4.0’da BOY Faaliyetleri Üzerine Yapılan Çalışmalar ve Yeni Trendler (Recent Studies on MRO Activities in Aviation 4.0 and New Trends)

Tüm ulaşım yolları içerisinde güvenilirliği ve kullanım oranı her geçen gün artan sivil havacılık sektörü dünya üzerindeki kamu ve özel ulaştırma firmaları tarafından en çok yatırım yapılan alanlardan birisidir [58]. Nüfus artış trendi ve globalleşme göz önüne alındığında sivil havacılık faaliyetlerine olan talebin yakın gelecekte daha da fazla olacağı öngörülmektedir. Diğer tüm teknik alanlarda olduğu gibi sivil havacılık BOY faaliyetlerinin de Endüstri 4.0 çatısı altındaki uygulamalardan maksimum düzeyde faydalanması, tedarik zincirlerinin kısaltılmasında ve daha dinamik bir yapıya kavuşmasında, depolama, insan kaynağı ve BOY maliyetlerinin düşürülmesinde kritik öneme sahip olacaktır [59]. Bu kapsamda, BOY faaliyetlerinin Endüstri 4.0’a entegrasyonu ve diğer optimizasyon uygulamaları ile ilgili yapılan bazı çalışmalar bu kısımda özetlenmektedir.

Ahmadi vd. yaptıkları çalışmada, her bir yenileme döngüsündeki optimum yenileme ve muayene sayısını ve muayene-test aralıklarının optimum süresini bulmak için toplam maliyeti göz önünde bulundurarak bir matematiksel model geliştirmişlerdir [60]. Sundukları modelin bakım yöneticileri tarafından farklı yenileme verimliliği, maliyet ve yenileme döngü uzunluğu gibi parametrelerin karşılaştırılmasında kullanışlı bir araç olabileceğini belirtmektedirler. Bierer ve arkadaşlarına göre BOY verimliliğinin ve ilgili üretim sistemlerinin geliştirilmesinde, akıllı BOY sistemleri önemli bir potansiyel sunmaktadır [61]. Ancak bu sistemlerin beraberinde getirdiği ek karmaşıklık ve maliyet gibi unsurlar, bu sistemlerin finansal ve diğer açılardan ne kadar avantajlı olduğunu sorgulanmasını da gerektirmektedir. Bu durum akıllı BOY sistemlerinin uygulanmasında ve adaptasyonunda, sistematik bir kontrolün ve değerlendirmenin yapılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında akıllı BOY sistemlerinin uygulanması aynı zamanda sistematik bir bilgi yönetim sistemine olan ihtiyacı da açığa çıkarmaktadır. Araştırmacılar, bu kapsamda BOY yönetimi ile ilgili mevcut metodolojiye katkıda bulunmak için entegre bir kontrol, değerlendirme ve bilgi yönetim konsepti sunmuştur [3]. BOY yedek parça envanter yönetimindeki güçlüklerle dikkat çekerek Endüstri 4.0 teknolojilerinin envanter yönetim verimliliğinin geliştirilmesinde sağlayabileceği avantajlara değinmişlerdir. Bakım aralıklarının belirlenmesinde Büyük Veri, Makine Öğrenmesi (Machine Learning) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramlarının kullanılmasıyla birlikte bakım döngülerinin ve yedek parça taleplerinin daha iyi bir şekilde tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir. Eklemeli imalatın kullanım oranı düşük olan parçaların tedarik sürelerini stabilize edebileceğine ve düşüreceğine dikkat çekmişlerdir. Lojistik 4.0 ve Yeni Akıllı Mobilite (New Smart Mobility) modellerinin BOY parçalarının merkezileştirilmesinde verimli bir ulaşım ağı oluşturma potansiyeli olduğunu öne sürmüşlerdir. Araştırmacılar, otomotiv endüstrisinden elde ettikleri gerçek verileri ve Endüstri 4.0’a ilişkin bu kavram ve teknolojileri kullanarak BOY parça kullanım oranları, tedarik süreleri ve maliyet

gibi parametrelerin envanter yönetim sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır [3, 60-62].

Denkena vd. BOY faaliyetlerinin otonomlaşması üzerine yaptıkları çalışmada, yüksek basınçlı türbin kanatçıklarına ilişkin malzeme envanterinin rejenerasyonu için temel bir proses zinciri kavramı geliştirmiştir [63]. Sunulan yaklaşım bıçakların koşullara dayalı yenilenmesi için bir temel teşkil etmektedir. Bunun için ise onarıma girecek her bir bileşenin kondisyonu; aerodinamik performans ve yapısal simülasyonlar vasıtasıyla onarım öncesi kayıt altına alınmaktadır. Günümüzde kullanılan geleneksel BOY uygulamalarından farklı olarak, bu yolla bıçaklardan elde edilebilecek performans ve servis ömürleri daha kesin bir şekilde tahmin edilebilmektedir. Dinis ve arkadaşları Büyük Veri analizi yoluyla BOY verilerinin değerlendirilmesi üzerine yürüttükleri çalışmada Bayes Networklerini (BN) bir Büyük Veri Tahmin Analizi (BDPA) aracı olarak kullanımını araştırmışlar ve büyük ölçekli verilerin BOY faaliyetleri için değerli bilgilere dönüştürülme potansiyelini incelemişlerdir [64]. Elde edilen çalışma çıktılarına göre BN ağları olasılıksal yapıları itibariyle bakım iş yükü tahminlerinde yaşanan belirsizliklerin giderilmesinde ve karar-alma proseslerinde uygun bir teknik olarak kullanılabilir. Dinis ve arkadaşları bakım kapasite planlamalarında karşılaşılan sorunları inceledikleri çalışmalarında, bu amaç için Portekiz'deki bir BOY firmasının yürüttüğü 372 uçak bakım projesine ait verileri kullanmışlardır [65].

Uçak Bakım Tahmin Çerçevesi (FRAME) adını verdikleri veri analizi yaklaşımı ile 3D-MDA (Üç Boyutlu Bakım Veri Analizi) uzay-zaman-yetenek temelli bir koordinat sistemi geliştirmişler ve bunu bakım planlama ve programlarının optimizasyonunda kullanmışlardır. Novák vd. insansız hava araçlarının (UAV) uçak bakım proseslerinde görsel muayene için kullanılması üzerine yeni bir çalışma yapmıştır [66]. Yapılan bu çalışmada, uçak bakımında insan müdahalesinin getirdiği risklerin minimize edilmesinde kullanılabilir araç ve prosesler arasında insansız hava araçlarının kullanımı gösterilmiştir. Araştırmacılar çalışmalarında, bu uygulamaya örnek olarak sertifikalı bir ticari uçak BOY firması ile bir Sürekli Uçuşa Elverişlilik Yönetim Organizasyonunda (CAMO) "Akıllı Hangar" adı verilen konseptin uygulanmasını göstermişlerdir. Yapılan çalışmada, insansız hava araçlarının bakım proseslerinde kullanılmasının avantajları yanında dezavantajlarına da değinilmiştir. Oyesola ve arkadaşları yaptıkları çalışmada hibrid-eklemeli imalat (HEM) teknolojisinin BOY faaliyetlerinin üretkenlik ve karlılığının artırılmasında kullanılmasına değinmişlerdir [67]. Çalışmada, hibrid eklemeli imalat teknolojisinde takım tezgahlarının kullanılmadığı eklemeli imalat teknolojisi ile maliyetler düşürülürken konvansiyonel talaş kaldırma yöntemi ise nihai ürünlerin elde edilmesinde ve son proses işlemlerinde kullanılmaktadır. Araştırmacılar bahsedilen bu hibrid imalat sisteminin BOY faaliyetlerine entegrasyonu için bir maliyetleme yaklaşım modeli geliştirmişlerdir [67].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Küreselleşen dünyamızda diğer ulaşım sistemlerine göre hızlı, güvenli ve etkin bir sektör olarak havacılığın ön plana çıktığı görülmektedir. Ekonomik büyüme, sosyal gelişmeler ve artan nüfus hızı birlikte sektör yolcu ve yük taşımacılığında dünya ekonomisinde itici güç unsurlarından biri olmaya devam edecektir. Havacılık sektörünün sürdürülebilirliğinin sağlanması için, uçuş emniyeti ve havacılık güvenliğinin uluslararası kurallara uygunluğunun temin edilmesi olmazsa olmaz unsurlardır. Bu kapsamda uçuş güvenliğinin sağlanması amacıyla, kamu ve özel sektör havacılık işletmelerinin gerçekleştirdikleri bakım, onarım ve yenileme faaliyetleri (BOY) sivil havayolu taşımacılığında önemini her geçen gün arttırmaktadır. Ayrıca ulaşımın, iletişimin, üretim, tedarik ve lojistik zincirlerinin son derece dinamik ve değişken bir hal aldığı günümüzde tüm endüstriyel alanlarda hız ve verimliliğin artırılmasında faydalanılan Endüstri 4.0 ile ilişkili teknolojiler ve kavramlar havacılık sektöründe de kendisini göstermeye başlamıştır. Bu kapsamda, 2011 yılında Almanya'da soyut bir kavram olarak karşımıza çıkan Endüstri 4.0, her alanda olduğu gibi havacılık sektöründe de kendisine yer bulmuş ve Havacılık 4.0 kavramının doğmasına neden olmuştur. Bu durumun bir sonucu olarak BOY faaliyetlerinde artık günümüz ihtiyaçları için yetersiz kalmaya başlayan geleneksel optimizasyon metodları da yerini Endüstri 4.0 teknolojileri ile doğrudan veya dolaylı olarak ilişkilendirilmiş BOY yaklaşımlarına bırakmaya başlamıştır. Bu çalışmada, küresel

ölçekteki BOY faaliyetleri ile ilgili temel bilgiler verilerek Endüstri 4.0 ile ilgili yeni trendler açıklanmaya çalışılmıştır. Dünya genelinde faaliyet gösteren BOY işletmeleri ancak teknolojinin hızına ayak uydurabildikleri ve Endüstri 4.0'a adaptasyon süreçlerini tamamlayabildikleri ölçüde hıza, verimliliğe ve teknoloji kullanımına dayalı günümüz rekabet ortamında ayakta kalmayı başarabileceklerdir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. İnternet: European union: air safety statistics in the EU https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Air_safety_statistics_in_the_EU Erişim: 01.05.2020.
2. A. De Graaff, 2001. Aviation safety, an introduction. *Air & Space Europe*, 3(3-4), 203-205. doi:10.1016/s1290-0958(01)90095-4.
3. A. Ceruti, P. Marzocca, A. Liverani, C. Bil, Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing, *Journal of Computational Design and Engineering*, 6: 516-526, 2019.
4. A. Regattieri, M. Gamberi, R. Gamberini, R. Manzini, Managing lumpy demand for aircraft spare parts. *Journal of Air Transport Management*, 11(6): 426-431, 2005.
5. A.C. Karaoğlanlı, T. Grund, A. Turk, T. Lampke, A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs). *Surface & Coatings Technology*, 371: 47-67, 2019.
6. İnternet: Maintaining airworthiness with a strong aircraft maintenance program <https://www.intelligent-aerospace.com/commercial/article/16544919/maintaining-airworthiness-with-a-strong-aircraft-maintenance-program> Erişim: 01.05.2020.
7. İnternet: FAA, Continuous airworthiness maintenance program (CAMP) guidance and policy https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Notice/N_8900.516.pdf Erişim: 01.05.2020.
8. D.A. Marx, R.C. Graeber, Human error in aircraft maintenance. Seattle, Washington: Boeing Commercial Airplane Group, 131-144, 1993.
9. G. Lei, Z. Shuguang, T. Peng, Yi Lu, An integrated graphic–taxonomic–associative approach to analyze human factors in aviation accidents, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27 (2): 226-240, 2014.
10. İnternet: Background to the development of annex 1-personnel licensing. Training Manual (ICAO) PartD-1 Aircraft maintenance. http://www.aviationchief.com/uploads/9/2/0/9/92098238/icao_doc_7192_-_training_manual_-_part_d1_-_acft_maintenance_-_2nd_edition_-_2004.pdf. Erişim: 01.05.2020.
11. E. Uhlmann, M. Bilz, J. Baumgarten, MRO-challenge and chance for sustainable enterprises, *Procedia CIRP*, 11: 239-244, 2013.
12. İnternet: CASA, Becoming a licensed aircraft maintenance engineer (LAME) <https://www.casa.gov.au/standard-page/becoming-licensed-aircraft-maintenance-engineer-lame> Erişim: 01.05.2020.
13. İnternet: FAA, Technical implementation procedures for airworthiness and environmental certification, https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/international/bilateral_agreements/baa_basa_listing/media/EUT_IP_Rev6_w_amdt1_amdt2.pdf Erişim: 01.05.2020.
14. İnternet: The difference between line, base and component maintenance, <https://blog.dviation.com/2018/11/14/the-difference-between-line-base-and-component-maintenance/> Erişim: 01.05.2020.
15. S. Shaukat, M. Katscher, C.L. Wu, F. Delgado, H. Larrain, Aircraft line maintenance scheduling and optimization, *Journal of Air Transport Management*, 89, 101914, 2020.
16. D. Kritzinger, Aircraft system safety assessments for initial airworthiness certification, Chapter 11: Continuing Safety, Woodhead Publishing, 371-385, 2017.
17. İnternet: Sustainment of commercial aircraft gas turbine engines: an organizational and cognitive engineering approach, <https://core.ac.uk/download/pdf/18321856.pdf> Erişim: 01.05.2020.
18. J. Geng, X. Tian, M. Bai, X. Jia, X. Liu, A design method for three-dimensional maintenance, repair, and overhaul job card of complex products, *Computers in Industry*, 65(1): 200-209, 2014.
19. İnternet: The Importance of MRO, <https://www.mane.co.uk/news/the-importance-of-mro-145171/> Erişim: 01.05.2020.
20. C. Ucler, O. Gok, Innovating general aviation MRO's through IT: The sky aircraft management system-SAMS, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195: 1503-1513, 2015.

21. A. Benito, G. Alonso, Energy efficiency in air transportation. Chapter 7: Maintenance. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2018.
22. F.D. Florio, Chapter 5-Type certification, airworthiness (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 85-122, 2016.
23. F.D. Florio, An introduction to aircraft certification and operations. Third Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2016.
24. E. Kasturi, S.P. Devi, S.V. Kiran, S. Manivannan, Airline route profitability analysis and optimization using BIG DATA analytics on aviation data sets under heuristic techniques. *Procedia Computer Science*, 87: 86-92, 2016.
25. D. West, J. Bradley, Airline flight networks, cycle times, and profitability: *Operations Management Research*. 1, 129-140, 2008.
26. Y. Wang, Y. Shi, M. Cai, W. Xu, Q. Yu, Efficiency optimized fuel supply strategy of aircraft engine based on air-fuel ratio control, *Chinese Journal of Aeronautics*, 32 (2): 489-498, 2019.
27. J.C. Taylor, The evolution and effectiveness of Maintenance Resource Management (MRM), *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26 (2): 201-215, 2000.
28. K. Seymour, M. Held, G. Georges, K. Boulouchos, Fuel estimation in air transportation: Modeling global fuel consumption for commercial aviation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88: 102528, 2020.
29. M. Lee, L.K.B. Li, W. Song, Analysis of direct operating cost of wide-body passenger aircraft: A parametric study based on Hong Kong. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32 (5): 1222-1243, 2019.
30. İnternet: ICAO global reporting format. Introducing reporting of runway condition relevant for aircraft-performance. [https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/GRF%20Workshop%20\(Helsinki\)/GRF%20wkshp%20Hels%20PPT02.pdf](https://www.icao.int/EURNAT/Other%20Meetings%20Seminars%20and%20Workshops/GRF%20Workshop%20(Helsinki)/GRF%20wkshp%20Hels%20PPT02.pdf) Erişim: 01.05.2020.
31. M.A. Fernández-Montesinos, P. Janssens, R.A. Vingerhoeds, Enhancing aircraft engine condition monitoring, *IFAC Proceedings*, 27 (16): 161-166, 1994.
32. S. Gudmundsson, Chapter 7- Selecting the power plant, Editor(s): Snorri Gudmundsson, *General Aviation Aircraft Design*, Butterworth-Heinemann, 181-234, 2014.
33. M. Caetano, C. Jorge, Innovation system in air transport management. *Journal of Information Systems and Technology Management*, 16, 2019.
34. V.F.F. Filho, R.F.G. Ribeiro, P.T. Lacava, Turbofan engine performance optimization based on aircraft cruise thrust level. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 41: 64, 2019.
35. D.M. Bushnell, Aircraft drag reduction-a review, *Journal of Aerospace Engineering: 25th Anniversary Collection*, 217(1): 1-18, 2003.
36. C. Baker, T. Johnson, D. Flynn, H. Hemida, A. Quinn, D. Soper, M. Sterling, *Train Aerodynamics*, Chapter 7- Aerodynamic drag, Editor(s): Chris Baker, Terry Johnson, Dominic Flynn, Hassan Hemida, Andrew Quinn, David Soper, Mark Sterling, Butterworth-Heinemann, 129-149, 2019.
37. P. Adam, Ā. Jirı, K. Vojtĕch, Calibration and its use in measuring fuel consumption with the can-bus network. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 64: 503-507, 2016.
38. C.C. Kuo, J.Z. Shyu, K. Ding, Industrial revitalization via industry 4.0-A comparative policy analysis among China, Germany and the USA, *Global Transitions*, 1: 3-14. 2019.
39. D. Cozmiuc, I. Petrisor, Industrie 4.0 by Siemens: Steps made today. *Journal of Cases on Information Technology*, 20 (2): 30-48, 2018.
40. A.M. Miller, R. Alvarez, N. Hartman, Towards an extended model-based definition for the digital twin. *Computer-Aided Design and Applications*, 15(6): 880-891, 2018.
41. P. Hold, S. Erol, G. Reisinger, W. Sihn, Planning and evaluation of digital assistance systems. *Procedia Manufacturing*, 9: 143-150, 2017.
42. P. Marcon, F. Zedulka, I. Vesely, Z. Szabo, Z. Roubal, O. Sajdl, P. Dohnal, Communication technology for industry 4.0, *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 1694-1697, 2017.
43. S. Vaidya, P. Ambad, S. Bhosle, Industry 4.0-A Glimpse, *Procedia Manufacturing*, 20: 233-238, 2018.
44. İnternet: Federal Aviation Administration, FAA-H-8083-30A, Aviation maintenance technician handbook-General.https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/ Erişim: 01.05.2020.
45. İnternet: EU, Interim evaluation of the clean sky 2 joint undertaking operating under horizon 2020 experts group report. <https://ec.europa.eu/research/evaluations/pdf/cs2.pdf> Erişim: 01.05.2020.
46. R. French, H. Marin-Reyes, M. Benakis, Transfer analysis of human engineering skills for adaptive robotic additive manufacturing in the aerospace repair and overhaul industry, *Advances in*

- Manufacturing, Production Management and Process Control, International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Springer, 793: 3-12, 2018.
47. R.A. Valdes, V.F.G. Comendador, A.R. Sanz, J.P. Castan, Aviation 4.0: More safety through automation and digitization, DOI: 10.5772/intechopen.73688, 2017.
 48. N. Testoni, L.D. Marchi, A. Marzani, Detection and characterization of delaminations in composite plates via air-coupled probes and warped-domain filtering. *Composite Structures*, 153, 773-781, 2016.
 49. F. Borello, E. Cestino, G. Frulla, Structural uncertainty effect on classical wing flutter characteristics, *Journal of Aerospace Engineering*, 23 (4): 327-338, 2010.
 50. H. Eschen, T. Kötter, R. Rodeck, M. Harnisch, T. Schüpptuhl, Augmented and virtual reality for inspection and maintenance processes in the aviation industry, *Procedia Manufacturing*, 19: 156-163, 2018.
 51. A. D'Anniballe, J. Silva, P. Marzocca, A. Ceruti, The role of augmented reality in air accident investigation and practitioner training, *Reliability Engineering & System Safety*, 204, 107149, 2020.
 52. A. Ceruti, A. Liverani, P. Marzocca, A 3D user and maintenance manual for UAVs and commercial aircraft based on augmented reality, *SAE Technical Paper*, 2015-01-2473, 2015.
 53. F. De Crescenzo, M. Fantini, F. Persiani, S. Luigi Di, A. Pietro, S. Salti, Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support, *Computer Graphics and Applications*, IEEE. 31: 96-101, 2011.
 54. A. Gisario, M. Kazarian, F. Martina, M. Mehrpouya, Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review, *Journal of Manufacturing Systems*, 53: 124-149, 2019.
 55. Y. Saadlaoui, J.L. Milan, J.M. Rossi, P. Chabrand, Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes, *Manufacturing Systems*, 43 (1): 178-186, 2017.
 56. İnternet: How the digital twin makes the aftermarket more profitable. <https://blogs.3ds.com/northamerica/digital-twin-overhauls-aftermarket-for-enhanced-servitization/> Erişim: 01.05.2020.
 57. İnternet: It's a twin-win with digital! <https://www.aero-mag.com/ifs-mro-digital-twin-aerospace-15052020/> Erişim: 01.05.2020.
 58. İnternet: Rapid expansion of global aviation industry propels investment <https://oxfordbusinessgroup.com/overview/skybound-rapid-expansion-global-aviation-industry-propels-investment-6> Erişim: 01.05.2020.
 59. D.A. Ghadge, M. Er, H. Moradlou, M. Goswami, The impact of industry 4.0 implementation on supply chains, *Journal of Manufacturing Technology Management*. Doi: 10.1108/JMTM-10-2019-0368, 2020.
 60. A. Ahmadi, I. Soleimanmeigouni, J. Block, C. Letot, Optimum failure management strategy for periodically inspected units with imperfect maintenance. *IFAC-Papers online*, 49-12, 799-804, 2016.
 61. A. Bierer, U. Götze, S. Köhler, R. Lindner, Control and evaluation concept for smart MRO approaches. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing-Decoupling Growth from Resource Use, *Procedia CIRP*, 40: 699-704, 2016.
 62. J. Chen, O. Gusikhin, W. Finkenstaedt, Y.N. Liu, Maintenance, repair, and operations parts inventory management in the era of industry 4.0, *IFAC Papers Online*, 52-13, 171-176, 2019.
 63. B. Denkena, P. Nyhuis, B. Bergmann, N. Nübel, T. Lucht, Towards an autonomous maintenance, repair and overhaul process: Exemplary holistic data management approach for the regeneration of aero-engine blades. 19th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry 2019 (MIC 2019), Hannover, Germany, *Procedia Manufacturing*, 40, 77-82, November 27-28, 2019.
 64. D. Dinis, A. Barbosa-Povoa, A.P. Teixeira, Valuing data in aircraft maintenance through big data analytics: A probabilistic approach for capacity planning using Bayesian networks, *Computers & Industrial Engineering*, 128: 920-936, 2019.
 65. D. Dinis, Barbosa-Povoa, A.P. Teixeira, A supporting framework for maintenance capacity planning and scheduling: Development and application in the aircraft MRO industry, *International Journal of Production Economics*, 218: 1-15, 2019.
 66. A. Novák, A.N. Sedlácková, M. Bugaj, B. Kandra, T. Lusiak, Use of unmanned aerial vehicles in aircraft maintenance, 9th International Conference on Air Transport-INAIR 2020, Challenges of Aviation Development. *Transportation Research Procedia*, 51: 160-170, 2020.
 67. M.O. Oyesola, K. Mpofu, R.N. Mathe, A. Daniyan, Hybrid-additive manufacturing cost model: A sustainable through-life engineering support for maintenance repair overhaul in the aerospace, *Procedia Manufacturing*, 49: 199-205, 2020.