



TÜRKİYE VE DÜNYADA UÇAK-HAVACILIK-UZAY MÜHENDİSLİĞİ

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Mehmet YERLİKAYA

yaz
yayınları

Türkiye ve Dünyada Uçak-Havacılık-Uzay Mühendisliği

Editör

Dr.Öğr.Üyesi Mehmet YERLİKAYA

yaz
yayınları

2025

**Türkiye ve Dünyada Uçak-Havacılık-
Uzay Mühendisliği**

Editör: Dr.Öğr.Üyesi Mehmet YERLİKAYA

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-8678-49-9

Aralık 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

İÇİNDEKİLER

Dijital İkiz Teknolojisinin Hava Aracı Bakım Planlamasına Entegrasyonu	1
<i>Sıla KALE, Birsen AÇIKEL, Tarık GÜNEŞ</i>	
Yaşlanan Uçaklarda Yapısal Hasarların Tespiti ve Tahribatsız Muayene Tekniklerinin Değerlendirilmesi	21
<i>Sıla KALE, Birsen AÇIKEL, Tarık GÜNEŞ</i>	
Artificial Intelligence in Aircraft Health Monitoring and Predictive Maintenance: A Review	42
<i>Mehmet YERLİKAYA</i>	

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİSİNİN HAVA ARACI BAKIM PLANLAMASINA ENTEGRASYONU

Sıla KALE¹

Birsen AÇIKEL²

Tarık GÜNEŞ³

1. GİRİŞ

Dijital ikiz, fiziksel varlıkların, süreçlerin veya sistemlerin gerçek zamanlı dijital karşılıkları olup, fiziksel-dijital entegrasyonun temel unsuru olarak Endüstri 4.0'ın ana teknolojilerinden biri kabul edilmektedir (Javaid et al., 2023). Toplanan veriler dijital ikiz ortamına aktarılır; bu sayede sistemlerin mevcut durumu anlık olarak izlenebilir ve çeşitli senaryo simülasyonları gerçekleştirilebilir (Fuller et al., 2020). Gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde sistemler anlık olarak takip ve analiz edilebilir.

Havacılık bakım endüstrisi, veri temelli teknolojiler ve dijitalleşmenin etkisiyle hızlı bir dönüşüm geçirmektedir. Yapay zeka, IoT, büyük veri analitiği ve dijital ikiz gibi yenilikçi yaklaşımlar, bakım süreçlerini daha öngörülebilir, güvenilir ve yüksek verimle yönetmeyi mümkün kılmaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, operasyon maliyetlerini düşürürken uçakların emniyetini ve hizmette kalma süresini önemli ölçüde

¹ İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik, ORCID: 0000-0002-9034-5891.

² Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, İnsansız Hava Aracı Teknolojisi ve Operatörlüğü, ORCID: 0000-0002-6067-5697.

³ Dr. Öğr. Üyesi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Bakım ve Onarım, ORCID: 0000-0003-3098-7654.

artırmaktadır. Böylece arızaların meydana gelmeden tespiti, bakım maliyetlerinin azaltılması, operasyonel verimliliğin artırılması ve sürdürülebilir işletme yaklaşımının desteklenmesi gibi önemli avantajlar ortaya çıkmaktadır (Dagal vd., 2025). Özellikle AI ve makine öğrenimi tabanlı tahmine dayalı bakım sistemleri, arıza olasılıklarını yüksek doğrulukla öngörerek bakım maliyetlerini %35'e, plansız arızaları ise %40'a kadar azaltabilmektedir (Dagal vd., 2025).

Geleneksel bakım yöntemleri çoğunlukla takvim temelli veya kullanım süresine dayalı planlamaya odaklandığı için, gereksiz bakım faaliyetlerine ya da beklenmeyen arızalar nedeniyle operasyonel kesintilere yol açabilmektedir. Gelişen dijital ikiz teknolojisi ise bakım planlamasını statik bir yapıdan çıkararak gerçek zamanlı veriye dayanan, öngörüsül ve dinamik bir modele dönüştürmektedir. Dijital ikiz modellerinin fiziksel sistemle eşleşme yapısı sayesinde, ürün yaşam döngüsü boyunca elde edilen veriler anlık olarak güncellenir ve bakım kararları teknik açıdan daha güvenilir hâle gelir (Yang & Li, 2025). Bir uçağın ya da belirli bir komponentin fiziksel durumunu gerçek zamanlı verilerle besleyen bu sanal kopya; aşınma, performans düşüşü, arıza eğilimi gibi kritik bilgiler sunarak bakım uygulamalarında önemli bir iyileşme sağlar. Bu sistem, gereksiz revizyonların önüne geçerek maliyetleri optimize eder ve kullanıma dayalı bakım yaklaşımı sayesinde parçaların yalnızca gerçekten ihtiyaç duyulduğunda değiştirilmesine imkân tanır (Yang & Li, 2025).

Bu bölümün amacı dijital ikiz teknolojisini kuramsal temelleri, teknik bileşenleri ve havacılık bakım planlamasına entegrasyonu açısından bütüncül bir çerçevede ele almaktır. Bölüm dijital ikiz teknolojisini yalnızca bir simülasyon veya izleme aracı olarak değil, bakım planlamasında karar destek sistemlerinin merkezinde yer alan çok katmanlı bir yapı olarak ele almasıdır. Dijital ikiz türleri, havacılık bakımındaki işlevlerine

göre hiyerarşik bir yaklaşımla bütünleştirilmekte; endüstriyel uygulamalardan elde edilen gerçek zamanlı veri akışlarının arıza tahmini, operasyonel verimlilik ve maliyet yönetimine etkileri teknik düzeyde değerlendirilmektedir. Bu yönüyle dijital ikizin havacılık bakım planlamasında neden stratejik bir dönüşüm aracı olduğunu hem teorik hem de uygulamalı boyutlarıyla ortaya koymaktadır.

2. DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİSİ

Grieves & Vickers (2017) dijital ikizi “fiziksel bir ürün ile onun dijital temsilinin kesintisiz veri alışverişi üzerinden entegre edilmesi” olarak tanımlar (Grieves & Vickers, 2017). NASA ise dijital ikizi, bir sistemin tüm yaşam döngüsü boyunca davranışlarını analiz etmek için kullanılan “yüksek doğruluklu sanal temsil” olarak tanımlarken, güncel çalışmalar bu teknolojinin üretim, havacılık ve altyapı sistemlerinde kestirimci bakım, optimizasyon ve operasyonel güvenilirliği artırmada anahtar rol oynadığını göstermektedir (Glaessgen & Stargel, 2012). Dijital ikiz gerçek zamanlı izleme, arıza öngörme (PHM – Prognostics & Health Management), yaşam döngüsü maliyeti (LCC) azaltma, sanal test – fiziksel prototip ihtiyacını azaltma, operasyonel verimlilik artışı ve karar verme süreçlerini iyileştirme gibi avantajlar sağlamaktadır (Tao et al. 2018; Fuller et al., 2020).

Literatüre göre, bir dijital ikiz üç temel unsurdan oluşur: esasen bir fiziksel ikiz, iki sanal ikiz ve yalnızca bir bağlantı/veri bölünmesi (Grieves ve Vickers, 2017; Tao ve ark., 2018). Dijital ikiz teknolojisi, gerçek dünyadaki bir varlık sistemini veya sürecini ifade eden fiziksel bir ikiz temeline dayanır. Bu fiziksel parça, bir uçak motoru, bir havaalanı pistindeki bir aydınlatma sistemi, bir üretim hattındaki robotik kollar veya bir bina gibi fiziksel olarak var olan herhangi bir şey olabilir ve sürekli olarak

sensörlerin gözetimi altındadır. Gerçek zamanlı olarak toplanan veriler, fiziksel ikizin eylemlerinin, performansının ve durumunun bir yansımasıdır ve bu nedenle dijital ikizin tüm bilgi ihtiyaçlarının tek kaynağı olarak hizmet eder (Tao ve ark., 2018).

Dijital ikiz teknolojisinin temel bileşenleri, dijital ikizlerin basit bir veri toplama yapısından, verileri işleyebilen, tahminler ve optimizasyonlar oluşturabilen ve hatta kendi kararlarını verebilen akıllı ve gelişmiş bir sisteme evrilmesini sağlayan veri yönetim sistemleri, analitik ve hesaplama katmanıdır. Bu katman dijital ikiz mimarisinin "zekâ ve karar motoru" olarak kabul edilir ve operasyonel değer yaratma açısından çok önemlidir (Fuller, Fan, Day ve Barlow, 2020). Hizmet katmanı, temel olarak dijital ikiz teknolojisi çıktılarının operasyonel, stratejik ve taktiksel olarak kullanıldığı uygulama alanlarını içeren üst bileşendir. Fiziksel ve sanal ikizler arasındaki veri alışverişi yoluyla elde edilen bilgilerin nihayetinde değer üreten hizmetlere dönüştürüldüğü aşamadır. Hizmet katmanı, kestirimci bakım (PHM), yaşam döngüsü izleme (LCC ve LCA), operasyonel optimizasyon, risk ve emniyet yönetimi, kapasite ve süreç planlama, sanal prototipleme, performans doğrulama ve "ya şöyle olsaydı" senaryo analizi gibi yüksek katma değerli çeşitli uygulamalara ev sahipliği yapar. Hizmet katmanı, temel olarak dijital ikiz modellemesinin teknik kısıtlamalarını kapsar ve kuruluşların karar alma süreçlerinin üretilen çıktılarla desteklendiği, dolayısıyla maliyetlerin düşürüldüğü, güvenilirliğin artırıldığı ve operasyonel sürdürülebilirliğin teşvik edildiği temel işlevsel çerçeveyi oluşturur. Havacılık sektöründe GE Aviation, servis katmanını dijital ikizlerin operasyonel değer yaratıcıları olarak görmektedir ve bu sayede motor performans tahmini, bakım planlama optimizasyonu, yakıt verimliliği analizi ve filo yönetimi gibi uygulamaların bu katman üzerinden gerçekleştirildiğini belirtmektedir (GE Aviation, 2019).

Bileşen düzeyindeki dijital ikizler, bir sistemin en küçük fiziksel alt bileşenleri üzerinde çalışan mikro düzeydeki dijital modellerdir; örneğin, bir uçak motorunun parçaları, iniş takımı alt grupları ve uçuş kontrol yüzeyi aktüatörleri gibi. Bu dijital ikizler, bileşen ömrünü ve zamanında bakımı tahmin etmede son derece doğru olmakla kalmaz, aynı zamanda bileşen yorgunluğu, aşınması, termal yük, titreşim ve performansın gerçek zamanlı veri izlemesini de sunar. Bileşen düzeyindeki ikizlerin havacılıktaki temel kullanımları arasında motor parçalarının ısınma ve soğumasının, rotor dinamiklerinin, yatak aşınmasının ve yağlama süreçlerinin modellenmesi ve daha fazlası yer alır. NASA ve GE Aviation'ın motor bileşeni düzeyindeki dijital ikizler üzerine yaptığı çalışmalar, mikro düzeydeki modellemenin tüm motorun Kalan Faydalı Ömrü (KÖÖ) tahmininin doğruluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir (Glaessgen ve Stargel, 2012; GE Aviation, 2019).

Sistem düzeyindeki dijital ikizler, bir uçak veya endüstriyel platformun tamamını (tüm uçuş kontrol sistemi, hidrolik devreler, yakıt sistemi, güç üretim ve dağıtım sistemi ve çevre kontrol sistemi (ECS) gibi) belirli fonksiyonel alt sistemlerine kadar temsil eden en kapsamlı dijital klonlardır. Bu modelleri kullanarak, yalnızca alt bileşenlerin etkileşimlerini görmekle kalmaz, aynı zamanda farklı arıza modlarının genel sistem davranışını nasıl etkileyebileceğini de belirleyebilir ve çok karmaşık olan tüm sistemin performansını gerçek zamanlı olarak kontrol edebilirsiniz. Tao vd. (2018), sistem düzeyindeki dijital ikizlerin çok sayıda bileşen tarafından yönetilen ve karmaşık geri bildirim döngülerine sahip havacılık sistemlerinde son derece önemli olduğunu iddia etmektedir. Örneğin, bir uçağın hidrolik sistemindeki basınç değişikliklerinin iniş takımı açılma performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olacağı veya uçuş kontrol yüzeyi arızalarının uçuş dinamiklerinde öngörülemezliğe neden olacağı durumlar, sistem düzeyindeki dijital ikizler

kullanılarak tahmin edilebilecek senaryolardır. Dolayısıyla, bu modeller dikkate alınmasaydı, emniyet, görev sürekliliği ve hata toleransı konularında zaten karmaşık olan karar alma süreçleri çok daha zor olacaktı.

Platform düzeyindeki dijital ikizler, yapısı, aerodinamiği, güç aktarma organları, aviyonikleri ve görev sistemlerinden oluşan tüm uçağın birleşik ve eksiksiz bir sanal temsilini sunar. Bu tür dijital ikizler, uçağın uçuş performansını, yakıt tüketimini, uçuş dinamiklerini, yapısal yük dağılımlarını ve görev profillerine bağlı olarak tüm uçağın konumunu yeniden üretir. NASA'nın "Geleceğin Araç Dijital İkizi" projesi, uçak tasarımı, yapısal bütünlük gözetimi, uçuş profili optimizasyonu ve yaşam döngüsü mühendisliğinde geniş dijital ikizlemenin vazgeçilmez önemini vurgulamıştır (Glaessgen ve Stargel, 2012). Sadece tek bir sistemin değil, tüm uçağın performans ekosisteminin modellenmesi, platform düzeyindeki ikizler aracılığıyla mümkün olmuş ve böylece uçak geliştirme süreci hızlanmış, uçuş testi maliyetleri düşürülmüş ve yapısal sağlık izleme sistemleri daha doğru hale gelmiştir. Bu özellikler sayesinde, platform düzeyindeki dijital ikizler yalnızca üreticiler tarafından değil, aynı zamanda ulusal havacılık otoriteleri tarafından da giderek daha yaygın kullanılmaktadır.

Filo düzeyindeki dijital ikizler, havayolu filosunun tamamının kapsamlı bir görünümünü sağlayan, havayolunun operasyonel davranışını, bakım ihtiyaçlarını, arıza modellerini ve performans metriklerini takip edip optimize eden dijital ikiz yapılandırmalarının zirvesini oluşturur. Böyle bir yöntem, uçaklar arasındaki farklı yönleri, değişen uçuş profillerini, çevresel etkiyi ve bakım geçmişini dikkate alır ve böylece filo düzeyinde karar destek mekanizmaları oluşturur. GE Aviation ve Rolls-Royce gibi şirketler için filo düzeyinde dijital ikizleri kullanma konusundaki eğilim, yakıt tüketimini kontrol etmek, filonun ömrünü uzatmak, bakımı planlamak ve operasyonel

kesintileri en aza indirmek için yüzlerce uçaktan gelen gerçek zamanlı performans verilerinden yararlanmaktadır (GE Aviation, 2019). Fuller ve diğerleri (2020), filo düzeyindeki dijital ikizlerin kullanımının uçuş operasyonları ve MRO süreçlerinin birleştirilmesi yoluyla daha düşük maliyetlere, daha fazla güvenliğe ve uçuş programında daha iyi sürekliliğe yol açtığını göstermektedir. Dolayısıyla, filo düzeyindeki dijital ikizler, havayollarına en büyük stratejik avantajı sağlayan teknolojilerdir.

Veri ekosistemlerini işletmek için OEM uçak üreticileri aracılığıyla veri dijitalleştirmenin başlangıç noktası, havacılık sektöründe büyük önem taşıyan dijital ikiz teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Airbus'ın 2017 yılında Skywise platformunu tanıtması, şirketin veri okuma ve erişim teknikleri açısından bir dönüm noktası olmuştur. Platform, yüzlerce farklı uçak tipinden veri alarak, öngörücü bakım algoritmaları uygulayarak tüm filonun dijital ikizlerini üretmek için Uçak Sağlık İzleme sistemlerini kullanmaktadır. Airbus'a göre bu platform "uçakların dijital DNA'sı" (Airbus, 2018). Benzer şekilde, Boeing'in AnalytX platformu, bakım ihtiyaçlarını tahmin etme, uçuş emniyeti analizi yapma ve filoyu daha verimli bir şekilde işletme gibi çözümler sunmak için büyük veri analitiği, yapay zekâ ve makine öğrenimi kullanarak uçak sistemlerinin operasyonel verilerini yönetmektedir. Boeing, AnalytX'in devreye alınması sonucunda 40'tan fazla havayolunda operasyonel karar kalitesinin arttığını iddia etmekte ve sistemi "uçak operasyon verileri için akıllı bir karar motoru" olarak nitelendirmektedir (Boeing, 2019).

Rolls-Royce'un TotalCare® programında dijital ikiz yaklaşımının uygulanması, motor sağlığının (EHM) izlenmesi, uçuş profilinin analizi ve arıza trendlerinin tahmini ve bakım planlamasıyla birlikte ana bileşenleri oluşturan sıcaklık ve basınç parametrelerinin simülasyonuna odaklanmıştır. Rolls-Royce'un dijital ikizleri, trilyonlarca saatlik kümülatif uçuş süresinden elde edilen devasa veri kümeleriyle desteklenmekte ve makine

öğrenimi modelleri kullanılarak bir motorun kalan ömrü, en etkili bakımın ne kadar süreceği ve performans bozulma eğrileri hakkında tahminler sunabilmektedir (Rolls-Royce, 2019). OEM düzeyinde, Pratt & Whitney EngineWise® tarafından ikiz tabanlı filo analitiği, motor davranışını modelleme, performans düşüşünü izleme ve veri odaklı bakım stratejileri uygulama gibi özelliklerin yanı sıra dijital ikiz teknolojisiyle desteklenen yeni bir hizmet modeli oluşturulmuştur. EngineWise, sensör verileri, uçuş operasyon geçmişi ve motor bileşen modellerinin birleşimiyle motor davranışının gerçek zamanlı simülasyonunu bir araya getiren kapsamlı bir dijital ikiz altyapısına dayanmaktadır (Pratt & Whitney, 2020). Bahsi geçen iki program hem akademik hem de endüstriyel literatürde bakım-onarım-revizyon (MRO) süreçlerinde dijital ikiz başarısının en etkili örnekleri olarak listelenmiştir.

Airbus Skywise ve Boeing AnalytX platformlarındaki filo düzeyindeki dijital ikiz modelleri, yüzlerce uçak tipinin operasyon verilerini izler ve böylece bakım zamanlaması, hangar kapasite kullanımı, malzeme envanter yönetimi ve iş gücü planlaması gibi kritik kararların otomatik olarak optimize edilmesini kolaylaştırır. Airbus'a (2018) göre, Skywise platformu bakım gecikmesini %15'e kadar azaltabilir ve beklenmedik teknik arızaları %30 oranında önleyebilir. Buna karşılık, Boeing AnalytX, uçak sistemleri telemetri verilerinin dijital ikiz modelleriyle birleştirilmesinin hem Plansız Kaldırmalar Arası Ortalama Süre değerlerinde hem de uçuş iptallerinde önemli iyileştirmelere yol açtığını iddia etmektedir (Boeing, 2019)

3. HAVA ARACI BAKIM PLANLAMASININ TEMELLERİ

Hava aracı bakım planlaması, uçakların emniyetli, verimli ve ekonomik şekilde işletilmesini sağlamak için kritik bir süreçtir.

Son yıllarda veri tabanlı tahminleme, yapay zekâ ve optimizasyon tekniklerinin gelişmesiyle bakım planlamasında önemli dönüşümler yaşanmıştır. Deng, Santos ve Curran (2020), uzun yıllar boyunca bakım planlarının çoğunlukla operatör deneyimiyle hazırlandığını, büyük filolarda A ve C bakımlarının manuel olarak planlanmasının haftalar sürdüğünü ve bu yaklaşımın genellikle yalnızca “uygun” bir plan ürettiğini, hiçbir zaman optimal bir çözüm sunmadığını vurgulamaktadır (Deng vd., 2020). Dolayısıyla bakım planlaması hem katı bir yapıya sahipti hem de uçağın gerçek kullanım profilini yansıtmıyordu. Ek olarak, veri analitiği ve yapay zekâ desteğinin bulunmadığı dönemde hangar kapasitesi, iş gücü planlaması, malzeme tedariki ve uçak rotasyonlarının bakım faaliyetleriyle entegrasyonu tamamen manuel hesaplara dayanıyor; çoğu zaman Excel bile kullanılmadan, planlamacıların hafızası ve teknisyenlerin tecrübesiyle yürütülüyordu. Nitekim Samaranayake ve Kiridena (2012), geleneksel bakım planlama sistemlerinin malzeme, iş gücü ve operasyon planlamasının senkronize edilememesi, ERP/MRO sistemlerinin kapasite kısıtlarını dikkate almaması ve planların sıklıkla “faz dışı” kalması gibi yapısal sınırlılıklara sahip olduğunu belirtmektedir (Samaranayake & Kiridena, 2012). Bu nedenle modern dönemde dijital ikiz, PHM sistemleri ve büyük veri analitiği gibi teknolojilerin sunduğu dinamik, öngörüye dayalı ve esnek bakım planlamasının aksine, geleneksel yaklaşım reaktif, tahmine kapalı ve insana yüksek derecede bağımlı bir sistem olarak işlemektedir.

4. DİJİTAL İKİZ TEKNOLOJİSİNİN UÇAK BAKIM PLANLAMASINA ENTEGRASYONU

Dijital ikiz teknolojisi, eski moda zaman tabanlı veya uçuş döngüsü bakımının veri odaklı ve dolayısıyla dinamik ve öngörücü bakım modelleriyle değiştirilmesini sağlayarak,

şüphesiz uçak bakım planlamasının en radikal yöntemleri arasında yer almaktadır. Dijital ikizler bunu esas olarak, gerçek zamanlı sensör verileriyle birleştirildiğinde, bakım planlama sürecinin doğruluğunu ve etkinliğini bir uçağın veya motorlar, iniş takımı, hidrolik ve aviyonik gibi kritik bileşenlerinin fiziksel davranışından daha büyük ölçüde gösteren sanal temsiller oluşturarak yapar. Çığır açan NASA çalışmaları, dijital ikizlerin yapısal sağlık izleme ve kalan faydalı ömür tahmini süreçlerinde hata paylarının büyük ölçüde azaltılmasına katkıda bulunduğunu ve böylece uçak bakım ihtiyaçlarını daha doğru bir şekilde tahmin etmeyi kolaylaştırdığını kanıtlamıştır (Glaessgen ve Stargel, 2012). Bu yöntemi uygulayarak, bakım ekipleri bir arıza meydana gelmeden önce harekete geçme şansına sahip olur ve böylece bakım-onarım-revizyon süreçlerinin hem emniyetini hem de genel verimliliğini maliyet açısından artırır.

Dijital ikiz teknolojisinin değişimi ve uçak bakım planlamasına katkısı bir yönüyle, kestirimci bakım ve durum bazlı bakım kullanımlarının kapsamını genişletme gücüdür. Akademik literatürde sunulan vaka çalışmaları ve tartışmalar, dijital ikiz tabanlı bakım stratejilerinin motor arızalarını %30'a kadar azaltabildiğini, bakım maliyetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü ve motor ömrünü uzattığını göstermiştir (Rolls-Royce, 2019; Pratt & Whitney, 2020). Bu, yalnızca gerçek zamanlı performans göstergelerine dayalı bakım planlaması sağlamamakla kalmaz, aynı zamanda geçmiş verilerin artık bir önemi olmadığından havayolları için daha kapsamlı ve esnek bir bakım stratejisi geliştirilmesine de olanak tanır.

Dijital ikizler, bakım planlamasının yaşam döngüsü maliyeti ve filo yönetimi üzerindeki etkisini değerlendirmeyi mümkün kılar. Fuller ve ark. (2020), uçağın tüm yaşam döngüsü boyunca (YDM) sürekli veri toplayarak, finansal ve operasyonel yönleri de göz önünde bulundurarak uzun vadeli bakım stratejileri için dijital ikizlerin etkilerini tahmin etmektedir. Özellikle, birden

fazla bileşen sistemine sahip ticari uçaklarda dijital ikiz teknolojisine dayalı YDM değerlendirmesi, belirli bir noktada hangi bileşenin değiştirilmesinin en uygun maliyetli olduğuna karar vermek için kullanılabilir ve bu da hem daha doğru bir planlamaya hem de daha iyi bir filo kullanılabilirliğine yol açacaktır. Ardından, filo düzeyindeki dijital ikiz modelleri, uçağın operasyonel profilini, bakım geçmişini ve çevre koşullarını dikkate alarak filo genelinde optimum bakım tahsisi ve kullanılabilirlik tahminleri oluşturabilir (Fuller ve ark., 2020).

Dijital ikiz yaklaşımı, aynı zamanda yüksek hacimli ve çok kaynaklı verinin anlamlandırılmasında güçlü bir çerçeve sunmaktadır. Geleneksel kestirimci bakım yöntemlerinin çoğu zaman sınırlı veriyle karar verdiği bilinirken, dijital ikizler sensörlerden gelen çok boyutlu ve dinamik verileri işleyerek sistemin davranışını gerçek çalışma geçmişi, çevresel koşullar ve yük profilleriyle birlikte analiz edebilmektedir. Bu bütüncül veri işleme kabiliyeti, ekipman sağlığının daha doğru tahmin edilmesini sağlar (Zhong et al., 2023).

Dijital ikiz teknolojisinin bakım süreçlerine getirdiği en kritik yeniliklerden biri de gerçek zamanlı performans izleme ve yüksek doğruluklu arıza öngörüsüdür. Modern uçak dijital ikizlerinin saniyede binlerce veri noktasını işleyerek potansiyel arızaları gerçek zamanlı simülasyonlarla tespit edebildiği; bunun da bakım planlamalarında doğruluğu artırdığı ve beklenmedik arıza riskini azalttığı raporlanmaktadır (Attaran & Celik, 2023). Bir başka stratejik katkı ise bakım süreçlerinin optimize edilmesine olanak tanımasıdır. Dijital ikiz destekli bakım projelerinde planlama sürelerinin önemli ölçüde kısaldığı, bakım maliyetlerinin ise özellikle geniş gövdeli uçaklarda anlamlı düzeyde azaldığı belirtilmektedir. Bu durum dijital ikizleri yalnızca teknik bir araç olmaktan çıkarıp operasyonel verimlilik ve maliyet yönetimi açısından stratejik bir bileşen hâline getirmektedir (Attaran & Celik, 2023).

Sonuç olarak, dijital ikiz teknolojisi uçak bakımını reaktif ve zaman tabanlı bir yapıdan çıkarıp öngörüye dayalı, esnek ve sürekli optimize edilen bir sisteme dönüştürmektedir. Sensör verilerinin entegrasyonu, yüksek doğruluklu simülasyon kabiliyeti ve derin öğrenme destekli arıza tahminleri sayesinde bakım kararları daha güvenilir, daha hızlı ve daha düşük maliyetli bir yapıya kavuşmaktadır. Bu dönüşüm, modern havacılık bakım yönetiminde dijital ikiz teknolojisini vazgeçilmez bir unsura dönüştürmektedir.

5. HAVACILIK ENDÜSTRİSİNDE DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI – VAKA ANALİZLERİ

GE Aviation, motor performansını izlemek, anormallikleri tespit edip düzeltmek ve operatörlerde optimizasyonlar yapmak için dijital ikiz teknolojisinin kullanımında öncü olmuştur. Şirket, LEAP ve GE90 motorlarına dijital ikizlere dayalı analizler entegre ederek, motor performansındaki eksiklikleri erken tespit edebilir, yakıt tüketimini daha verimli hale getirebilir ve arıza eğilimlerini tahmin edebilir. GE teknik raporlarına göre, dijital ikizlerin kullanımı, motor bakım aralıklarının optimizasyonu ve uçuş operasyonlarının kullanılabilirliğinin artması sayesinde bakım maliyetlerini büyük ölçüde azaltmıştır (GE Aviation, 2019). GE motorlarının dijital ikizleri, uçuş verilerini fiziksel modellemeyle birleştiren hibrit bir yaklaşım sundukları için sektördeki en iyiler arasında yer almaktadır.

Dijital ikizler, iniş takımlarındaki amortisörler, frenler ve destekler gibi farklı parçaların yaşlanma sürecini; sıcaklık ve basınçtaki değişimleri, kalkış ve iniş sayılarını ve aşınma ve korozyon eğilimlerini simüle eder. Safran'ın 2020 teknik dokümanına göre, dijital ikizlerin kullanımı iniş takımı arıza oranlarında azalmaya, bakım sürelerinin daha hassas bir şekilde

tahmin edilmesine ve bileşen ömrünün daha iyi tahmin edilmesine yol açmıştır. Bu uygulama, özellikle bileşen düzeyinde, dijital ikizlerin en başarılı örneklerinden biridir.

Uçaklara kabin basınçlandırma ve iklimlendirme sağlayan Çevresel Kontrol Sistemi (ECS), Collins Aerospace'de dijital ikiz tabanlı uygulamalar aracılığıyla simüle edilmekte ve teşhis edilmektedir. ECS, yolcu konforu ve uçuş güvenliği açısından oldukça önemli bir sistemdir ve Collins tarafından oluşturulan dijital ikiz modelleri, sıcaklık, basınç, hava akışı ve kompresör davranışı gibi gerçek zamanlı verileri ilişkilendirerek anormalliklerin tespit edilmesini ve sistem performansının optimize edilmesini sağlar. Şirketin iddiasına göre, bu teknolojinin uygulanması ECS teşhisini çok daha kısa ve bakımını daha etkili hale getirmektedir (Collins Aerospace, 2021).

NASA'nın dijital ikiz araştırması, yalnızca uçan makinelerin genel sistem modellerine değil, aynı zamanda dijital ikizler aracılığıyla yapısal bütünlük modellemesinde yorulma çatlağı yayılımına da odaklanmaktadır. NASA'nın kanat kirişi yapılarındaki kayma çatlakları için geliştirdiği dijital ikiz modeli, fiziksel testlerle kapsamlı bir şekilde doğrulanmış olup, çatlak büyüme oranlarını yüksek hassasiyetle yarı otomatik olarak tahmin etme kapasitesine sahiptir (Abdelal ve Murphy, 2014). Bu çalışma, dijital ikizlerin benimsenmesini sergileyen akademik örneklerden biridir.

Lufthansa Technik, bileşen düzeyinde dijital ikizler oluşturan en önde gelen kuruluşlardan biridir. Şirket, A320 ve B737 konfigürasyonları için dijital ikiz tabanlı bakım modellerinin uygulanmasıyla bileşen arızalarını tahmin etme doğruluğunun %10-15 oranında arttığını ve plansız bakım olaylarında %20'nin üzerinde azalma sağlandığını bildirmektedir. Ayrıca, Lufthansa'nın dijital ikiz tabanlı uygulamaları, hat bakım

operasyonlarında sunduğu gerçek zamanlı arıza tespiti ve hızlı karar alma olanakları açısından dikkat çekicidir (Lufthansa Technik, 2020).

Delta Air Lines, kapsamlı filo operasyonlarında dijital ikiz uygulamalarını sistematik olarak kullanmaya başlayan önde gelen havayollarından biridir. Şirket, uçuş kontrol yüzeylerinin performansını izleyerek, motor trend analizi yaparak, hidrolik sistem davranışlarını gözlemleyerek ve aviyonik bileşen arızalarını tespit ederek dijital ikizler aracılığıyla plansız bakım oranlarını yönetme konusunda ustalaşmıştır. Fuller ve diğerlerine (2020) göre, Delta, dijital ikiz uygulamaları sayesinde filo kullanılabilirliğini giderek artırmış, gecikmeleri azaltmış ve haklı olarak önemli olarak nitelendirilebilecek operasyonel maliyet tasarrufları elde etmiştir.

Embraer, uçuş kontrol yüzeylerinin davranış biçimlerini izlemek için dijital ikiz modellerini kullanan bir sistem geliştirdi. Sistem, uçuş sırasında kontrol yüzeyi hareketlerindeki çok küçük düzensizlikleri tespit ederek, olası arızaları erken bir aşamada tespit etmektedir. Embraer tarafından sağlanan 2021 teknik raporlarına göre, dijital ikiz teknolojisinin kullanımı, uçuş kontrol sistemi arızalarının bazılarını uçuşu etkilemeden önce tahmin etmeyi ve bu da daha hassas bakım kararları alınmasını sağlamıştır (Embraer, 2021).

Dijital ikizler, bakım maliyetlerini düşürme, kestirimci bakımı optimize etme, operasyonel duruşları en aza indirme ve uçuş güvenliğini artırma alanlarında havacılık sektöründe en verimli teknik olarak kabul edilmektedir.

6. SONUÇ

Dijital ikiz teknolojisinin kullanımları, arızaların erken aşamada tespiti, Kalan Faydalı Ömür tahmini ve uçak bakımında

arızalar uçuş operasyonlarını etkilemeden önce müdahale etmeyi sağlayan durum bazlı bakım (CBM) dahil olmak üzere çeşitli seçenekler sunar. Motorlarda, iniş takımlarında ve aviyonik sistemlerde dijital ikiz uygulaması, bakım kararlarını daha bilimsel, veri odaklı ve risk bazlı hale getirmiştir. Airbus Skywise, Boeing AnalytX, Rolls-Royce TotalCare ve Pratt & Whitney EngineWise gibi şirketlerin operasyonel rakamları, dijital ikizlerin bakım maliyetini %15-30 oranında düşürebileceğini, AOG olaylarını önemli ölçüde azaltabileceğini ve bileşen ömrünü artırdığını göstermektedir. Dolayısıyla dijital ikizler, havacılık endüstrisi için emniyet ve ekonomik sürdürülebilirlik gereksinimlerini karşılamada vazgeçilmez bir teknoloji haline gelmektedir. Dahası, dijital ikizler bakım planlamasının kurumsal ve stratejik avantajlarının geliştirilmesine olanak tanır. Filo genelindeki tüm uçakların davranışlarının modellenmesi, bakım yöneticilerine uzun vadeli planlama, yedek parça envanter optimizasyonu, iş gücü tahsisi ve hangar kapasite yönetimiyle ilgili kararlar almada büyük bir avantaj sağlar. Bu, özellikle filolarını genişleten havayolları için operasyonel dayanıklılık açısından hayati önem taşır. Dijital ikiz uygulamalarının mevcut havacılık ekosistemine dahil edilmesi hâlâ birçok engelle karşılaşmaktadır. Teknolojinin ölçeklenebilirliğinin önündeki en büyük engeller; filo çeşitliliği, veri toplama için kullanılan farklı sensör ve altyapı türleri, bunun sonucunda ortaya çıkan büyük miktarda veriyi yönetme ihtiyacı, bakımda insan faktörleri ve AOG'nin (yerdeki uçak) neden olduğu maliyet baskılarının etkisidir. Ayrıca, dijital ikiz uygulamasına ilişkin düzenlemelerin belirsizliği, ortak bir uygulamanın olmamasına yol açmaktadır. Dolayısıyla, dijital ikiz bakımının tam anlamıyla hayata geçirilmesi için teknik, organizasyonel ve düzenleyici alanlardaki dönüşümlerin aynı anda gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Havacılık bakım planlama alanında dijital ikiz teknolojisinin yükselişi, fizik tabanlı modelleri veri odaklı yapay zekâ algoritmalarıyla birleştiren hibrit modelleme teknikleri alanında gelecekteki araştırmaları kaçınılmaz hale getirmiştir. Ayrıca, havayolları, OEM'ler ve MRO'lar arasında güvenilir ve uyumlu veri akışı için ortak veri standartları ve paylaşım protokollerinin geliştirilmesi; tasarımdan operasyona, bakımdan emekliliğe kadar tüm uçak yaşam döngüsünü kapsayan entegre dijital ikiz mimarileri de bu alanda önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca, araştırmanın önemli alanları arasında bakım ekiplerinin dijital ikiz çıktılarını daha etkili ve güvenilir bir şekilde yorumlamalarına yardımcı olacak açıklanabilir yapay zekâ (XAI) tabanlı karar destek sistemlerinin oluşturulması; yoğun veri akışı ve yüksek bağlantılı altyapıyla birlikte gelen artan siber güvenlik tehditleriyle başa çıkmak için gelişmiş koruma önlemlerinin tasarlanması; ve filo düzeyinde birden fazla dijital ikizi birbirine bağlayarak bakım planlamasını, parça lojistiğini ve operasyonel kapasiteyi eş zamanlı olarak optimize edebilecek büyük ölçekli modelleme sistemlerinin kurulması yer almaktadır. Bu eğilimler, dijital ikiz tabanlı bakım planlamasının doğruluğunu, güvenilirliğini ve stratejik değerini büyük ölçüde artıracak bir dönüşüme yol açacaktır. Havacılık bakım sektöründe dijital ikiz teknolojisinin etkin ve sürdürülebilir kullanımını sağlamak için, politika yapımcıların ve sektör oyuncularının birleşik bir stratejik yaklaşım oluşturması gerekmektedir. Dijital ikiz uygulamalarının EASA ve ICAO bakım yönetmelikleriyle uyumlu hale getirilmesi, yetkililer tarafından tanınacağı için teknolojiyi başlangıçta güvenli ve standart bir konuma getirecektir. Bunun yanı sıra, havayolu şirketlerinin sadece yükseltme değil, aynı zamanda bir veri altyapısına, sensör kapasitesinin maksimum seviyeye çıkarılmasına ve uçak sistemlerinden elde edilen verilerin bütünsel bir şekilde işlenmesini destekleyen teknik altyapılara sahip olması, dijital ikizlerin bakım sürecine dahil edilebileceği veri katmanlarına açılması zorunludur. İnsan

kaynaklarının sonunda, dijital ikizler tarafından eğitilmiş bakım personelinin dijital okuryazarlık, veri analitiği ve yapay zeka tabanlı karar alma sistemleri ile donatılması gerekir; bu nedenle kapsamlı eğitim programları oluşturulmalı ve sürekli mesleki gelişim teşvik edilmelidir. Dahası, dijital ikiz teknolojisine dayalı temel bakım stratejileri, MRO kuruluşlarının uzun vadeli yatırım planlarında önceliklendirilmelidir. Bu, yalnızca rekabet güçlerini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda bakım operasyonlarının emniyet ve verimliliğine de katkıda bulunacaktır. Son olarak, OEM'ler, havayolları ve MRO'lar arasındaki iş birliklerinin güçlendirilmesi ve entegre veri paylaşım platformlarının kurulması gerekmektedir; çünkü bu, sektör genelinde dijital ikiz modellerinin doğruluğunu, zamanındalığını ve operasyonel değerini artıracak en önemli gerekliliktir.

KAYNAKÇA

- Abdelal, G., & Murphy, A. (2014). Hybrid simulation framework for structural digital twin modeling. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(1), 04014071.
- Airbus. (2018). *Skywise: Open data platform for aviation*. Airbus Technical Publication.
- Airbus. (2023). *Global services forecast 2023–2042*. Airbus Publications.
- Attaran, M., & Celik, B. (2023). Digital twin technology: Revolutionizing aircraft maintenance through advanced simulation and data analytics. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(4), 1–10.
- Boeing. (2019). *Boeing AnalytX: Advanced analytics for smarter aviation*. Boeing Digital Solutions Report.
- Boeing. (2023). *Commercial market outlook 2023–2042*. Boeing Reports.
- Collins Aerospace. (2021). *Digital twin for environmental control systems*. Collins Technical Documentation.
- Dagal, I., Erol, B., Fendzi Mbasso, W., Harrison, A., Demirci, A., & Cali, U. (2025). A data-driven approach to aircraft engine MRO using enhanced artificial neural networks based on FMECA. *IEEE Access*, 13, 124710–124733. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3587090>
- de Pater, I., & Mitici, M. (2021). Predictive maintenance for multi-component systems of repairables with remaining useful life prognostics and a limited stock of spare components. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107761. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107761>
- Deng, Q., Santos, B. F., & Curran, R. (2020). A practical dynamic programming-based methodology for aircraft

- maintenance check scheduling optimization. *European Journal of Operational Research*, 281(1), 256–273.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.08.019>
- Embraer. (2021). *Digital twin applications in flight control systems*. Embraer Engineering Report.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- GE Aviation. (2019). *Digital twin applications in aviation*. Technical Whitepaper.
- GE Aviation. (2022). *Digital engine analytics report*. General Electric Company.
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles. In *Proceedings of the AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference* (AIAA Paper No. 2012-1818).
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary systems engineering* (pp. 85–113). Springer.
- Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2023). Digital twin applications toward Industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92.
<https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.003>
- Lufthansa Technik. (2020). *Digital MRO: Predictive maintenance with digital twins*. Lufthansa Technical Insights.

- Pratt & Whitney. (2020). *EngineWise: Data-driven engine services*. Pratt & Whitney Service Publication.
- Rolls-Royce. (2019). *TotalCare: Intelligent engine health management*. Rolls-Royce Technical Report.
- Safran Landing Systems. (2020). *Predictive maintenance using digital twin technologies*. Safran Technical Brief.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State of the art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415.
- Yang, W., & Li, Z. (2025). Research on the development and application of digital twin technology in the field of aircraft maintenance and support. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Generative Artificial Intelligence and Information Security (GAIIS 2025)* (pp. 1–5). ACM. <https://doi.org/10.1145/3728725.3728832>
- Zhong, X., Shao, X., & Chen, Y. (2023). A comprehensive review of predictive maintenance: Data, models, and applications across industries. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 738–760.

YAŞLANAN UÇAKLARDA YAPISAL HASARLARIN TESPİTİ VE TAHRİBATSIZ MUAYENE TEKNİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sıla KALE¹

Birsen AÇIKEL²

1. GİRİŞ

Küresel havacılık filolarının giderek yaşlanması, uçak yapılarında zaman içinde biriken yorulma, korozyon ve bağlantı noktası hasarlarını sektörün en önemli emniyet sorunlarından biri hâline getirmiştir. Tekrarlayan yüklemeler, basınç farklılıkları, titreşim ve çevresel etkiler, metalik ve kompozit yapıların mikro seviyede zayıflamasına yol açarak operasyonel bütünlüğü tehdit eden çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bu yapısal bozulmaların büyük bölümü, erken aşamada tespit edilmediği sürece hızla ilerleyerek daha büyük bir risk oluşturmakta ve geçmiş kazalarda görüldüğü gibi ciddi sonuçlara yol açabilmektedir (Mickens et al., 2003). Klasik yöntemler özellikle çok katmanlı yapılar, koruyucu kaplama altındaki kusurlar ve gömülü çatlaklar söz konusu olduğunda sınırlı kalabilmektedir. Bu boşluğu doldurmak üzere geliştirilen gelişmiş elektromanyetik yöntemler, özellikle düşük frekanslı girdap akımı teknikleri, yüzey altındaki yorulma çatlaklarının belirlenmesinde yüksek hassasiyet sunarak yaşlanan uçak

¹ İstanbul Nişantaşı Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Havacılık Elektrik ve Elektronik, ORCID: 0000-0002-9034-5891.

² Dr. Öğr. Üyesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Bilişim Teknolojileri Meslek Yüksekokulu, ORCID: 0000-0002-6067-5697.

yapılarında kritik bir rol üstlenmektedir (Uchanin, 2022). Son yıllarda bakım sistemleri, periyodik kontrol yaklaşımından sürekli izleme odaklı SHM (Structural Health Monitoring) sistemlerine doğru evrilmiştir (Rajeswari et al., 2024). Buna paralel olarak, dijital görüntü işleme teknikleri, yorulma testlerinde küçük çatlakların hızlı ve otomatik olarak tanımlanması sayesinde yaşlanan uçak yapılarının izlenmesinde yeni bir perspektif sunmaktadır. Bu yöntemler, özellikle erken evre çatlakların görünürlüğünün düşük olduğu durumlarda geleneksel yöntemlere kıyasla önemli bir avantaj sağlamaktadır (Zheng, 2023). Ayrıca termografi ve fotogrametri gibi temassız görüntüleme tekniklerinin otonom sistemlerle birleştirilmesi, bakım süreçlerinde insan hatasını azaltarak daha güvenilir ve hızlı değerlendirme imkânı oluşturmaktadır (Bardis et al., 2025). Ultrasonik güdümlü dalga yöntemleri ise özellikle kademeli hasarların –korozyon, yorulma veya tabakalar arası ayrılma gibi– uzun vadeli izlenmesinde büyük potansiyel taşımakta ve geniş yüzeylerde etkin veri üreterek bakım karar süreçlerini güçlendirmektedir (Aranguren et al., 2022). Tüm bu gelişmelere rağmen, yaşlanan uçaklarda hasarların erken tespiti hâlâ çok boyutlu bir zorluk alanı oluşturmaktadır. Bu nedenle hem klasik NDT yöntemlerinin hem de yeni nesil SHM tekniklerinin birlikte değerlendirilmesi ve yapısal hasarların çok yönlü olarak analiz edilmesi gerekmektedir.

2. YAŞLANAN UÇAK KAVRAMI VE YAPISAL HASAR TÜRLERİ

Yaşlanan uçak, uzun süreli operasyonel kullanım, yüksek çevrim sayısı ve çevresel maruziyet sonucunda yapısal yorgunluk, korozyon ve bağlantı hasarlarının birikmesiyle bütünlüğü ve güvenilirliği giderek azalan hava aracını ifade eder. Bu hasarların tespiti ve yönetimi, uçuş emniyeti, ekonomik ömür

ve uçak bakım sektörü açısından hayati öneme sahiptir. Yaşlanan uçaklarda yapısal hasarların gelişimi çoğu zaman mikroskobik ölçekte başlar ve operasyonel yüklemeler altında hızla ilerleyerek kritik duruma ulaşabilir. Özellikle metal alaşımlarda korozyon, gerilmeli korozyon çatlağı (SCC), yaygın yorgunluk hasarı (WFD) ve bağlantı bölgelerinde oluşan çoklu çatlak kümeleri yaşlanma sürecinin en belirgin göstergelerindendir. Uçak yapıları sadece kullanım döngüleriyle değil çevresel etkenlerle de bütünlük kaybı yaşamakta; özellikle korozyon, yorgunluk çatlak ilerlemesini hızlandırarak yapısal bütünlüğü azaltmaktadır (Simpson & Brooks, 1999). Bu durum uçakların kullanım sürelerine etki etmektedir.

Kompozit esaslı modern uçaklarda özellikle sandviç panel yapıları, yapıştırıcı arayüzleri ve bal peteği yapısındaki kompozitlerde nem ve sıcaklık döngülerine bağlı bozulmalar önemli bir zafiyet oluşturur. Kompozit uçak yapılarının dış ortamla sürekli temas hâlinde olduğu için nem absorbsiyonuna karşı metal yapılarından çok daha duyarlı olduğunu; bu durumun özellikle delaminasyon, yapışma yüzeyi ayrılması ve çekirdek-cilt ayrılması gibi hasar türlerini hızlandığını göstermektedir. Concorde istikamet dümeni arızaları, bal peteği sandviç yapılarında nem birikmesi, yapıştırıcı arayüzlerinde zayıflama ve buzlanma sonucu tekrarlayan delaminasyonlarla ilişkilendirilmiş; incelemelerde, ayrışmanın çoğu zaman yapışma hattına su girişinden kaynaklandığı belirlenmiştir (Aceti et al., 2023). Kompozit yapılarda çevresel yaşlanmanın etkileri yalnızca nem absorbsiyonu ile sınırlı değildir. Süpersonik platformlar için kullanılan üç boyutlu örgü kompozitlerde yapılan hızlandırılmış döngüsel higrotermal testler, artan döngü sayısı ile arayüz ayrılması, lif demeti gevrekleşmesi ve çatlak yayılımı mekanizmalarının belirgin biçimde arttığını ve mekanik dayanımda ciddi kayıplara yol açtığını göstermektedir (Deng et al., 2022). Bu bulgular, yaşlanan uçaklarda hasar tespit ve

yönetiminin yalnızca rutin muayenelerle sınırlı kalamayacağını; yapısal sağlık takibi, NDT teknikleri ve çevresel etkilere duyarlı bakım stratejilerinin kritik önem taşıdığını göstermektedir (Aceti et al., 2023; Deng et al., 2022). Sonuç olarak, yaşlanan uçak kavramı günümüzde hem metal hem de kompozit yapılarda çok boyutlu bir hasar evrimi olarak ele alınmakta; yapısal bütünlüğün korunması için çevresel yaşlanma mekanizmalarının anlaşılması ve bu mekanizmalara uygun NDT stratejilerinin geliştirilmesi kaçınılmaz hâle gelmektedir.

Metal yapılar, uzun süreli kullanım, çevresel etkiler ve mekanik yüklemeler sonucu çeşitli hasar mekanizmalarına maruz kalır. Çoğu zaman mikro düzeyde başlayan fakat çevrimsel yükler, çevresel etkiler ve bağlantı detaylarındaki gerilme yoğunlaşmaları nedeniyle hızla ilerleyebilen karmaşık bir süreçtir. Yaşlanan uçaklarda metal alaşımların maruz kaldığı yorgunluk, korozyon, gerilme korozyon çatlaması ve bağlantı elemanı zayıflaması gibi mekanizmalar, yapısal bütünlüğü doğrudan etkiler. Metal yapılarda çatlak başlama sürecinin toplam yorgunluk ömrünün %40–90'ını oluşturduğunu ve özellikle mikro yapısal kısa çatlakların düşük nominal gerilmelerde bile ilerleyebildiğini göstermektedir (Santecchia et al., 2016).

Korozyon kaynaklı hasar, metal yapılar için yaşlanma sürecinin en kritik bileşenlerinden biridir. Endüstriyel ve yüksek nemli ortamlarda maruz kalınan klorür, sülfat ve diğer agresif iyonlar çelik yüzeylerde lokal ve uniform kayıplara neden olur. Özellikle çukurcuk (pitting) korozyonu, malzemenin kesitini ani olarak zayıflattığı için uçak yapısında kritik risk yaratır (Zhang vd., 2022). Bu durum, yaşlanan uçaklarda korozyon hasarının yalnızca yüzey kaybı olarak değil, malzemenin tüm mekanik tepkisini değiştiren kapsamlı bir bozulma olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Bağlantı bölgeleri ve kaynak hatları, uçak yapılarında hasarın yoğunlaştığı kritik noktalardır. Kaynak

bölgesinin ısı etkilenmiş bölgesi, mikro yapısal farklılıklar ve gerilme birikimleri nedeniyle selektif korozyon ve gerilme korozyon çatlaması açısından oldukça hassastır. Özellikle uzunlamasına kaynaklı çelik sistemlerde ısı etkilenmiş bölgesinde derin çukurcuk ve oyuklanmaların oluştuğunu, bu bölgelerde 30%'a varan mukavemet kayıplarının meydana gelebildiğini ortaya konulmuştur (Kowalczyk et al., 2025). Bu bulgu, uçak gövdesi panel birleşimlerinde ve perçinli bağlantılarda benzer hasar mekanizmalarının hayati önem taşıdığını desteklemektedir.

Metal yapılarda yük tekrarlandıkça enerjinin birikimi, mikro çatlakların ilerlemesi için uygun yolu oluşturur. Yorgunluk mekanizmasının doğrusal olmayan birikim davranışına sahip olması nedeniyle, klasik Miner kuralı çoğu durumda yetersiz kalmakta; modern çalışmalar enerji temelli, istatistiksel veya süreklilik mekaniği (CDM) modellerinin daha gerçekçi sonuçlar verdiğini göstermektedir (Santecchia et al., 2016). Bu durum, yaşlanan uçak yapılarında özellikle bakım aralıklarının belirlenmesi ve NDT tarama sıklığının planlanmasında kritiktir. Sonuç olarak metal yapılarda hasar mekanizmaları, yalnızca yorgunluğun veya korozyonun tek başına etkisi ile değil, çoğu zaman karma hasar süreçleri ile şekillenir. Yorgunluk-korozyon etkileşimi, kaynak bölgelerinde gerilme birikimi, perçinli bağlantılarda yük aktarım düzensizlikleri ve kimyasal çevre etkisi yaşlanan uçaklarda metal hasarının hızlanmasına neden olur. Bu nedenle bakım planlaması, hasarın çok ölçekli doğasını dikkate alan bütüncül bir değerlendirme gerektirir.

Kompozitlerin tabakalı ve heterojen iç yapısı, hasarın çoğu zaman yüzeyde görünmeyen, içsel bir karakterde ilerlemesine neden olur. Bu nedenle hasar süreçleri hem tespiti güç hem de çok modlu bir yapıya sahiptir. Bu yapılarda hasar genellikle matris çatlaması, fiber kırılması, delaminasyon, ara yüzey zayıflaması ve çekirdek-cilt ayrılması gibi çok modlu

süreçlerle ilerler. Higrotermal kaynaklı yaşlanma, matrise su difüzyonu ve ısıl genleşme farkları nedeniyle delaminasyon yayılımını hızlandırarak kompozitin servis ömrünü önemli ölçüde etkiler (Aceti et al., 2023). Deng ve arkadaşlarının (2022) hızlandırılmış higrotermal çevrim testleri, 3D ortogonal örgü kompozitlerde arayüz ayrılması, mikro çatlak oluşumu ve fiber demeti kırılmasının ilerleyici bir yapıda geliştiğini göstermektedir. Matris çatlaması, ara yüzey gerilme birikimi ile birleştiğinde delaminasyonun hem kalınlık boyunca hem de tabakalar arası düzlemde ilerlemesine yol açar. Çeşitli deneysel ve nümerik çalışmalar, düşük enerjili darbelere maruz kalan kompozitlerde görünür dış hasar olmasa bile tabakalar arasında geniş bir delaminasyon bölgesi oluşabileceğini göstermektedir (Tuo et al., 2019). Delaminasyonun ilerleyişi, fiber yönelmesi, yük yönü ve ara yüzey dayanımı ile doğrudan ilişkilidir (Li et al., 2019). Kompozit yapılarda hasarın tek modlu ilerlemesi nadiren görülür. Matris çatlamasının ardından ara yüzey zayıflaması ve delaminasyon gelişirken, fiberler boyunca uzanan çekme veya kayma etkisi fiber kırılmasını tetikleyebilir. Özellikle delik veya kesit süreksizliği bulunan bölgelerde, kayma gerilmelerinin artışı fiber kırılması, matris kayma hasarı ve delaminasyonun birlikte ortaya çıktığı karma modlu bir hasar yapısına yol açar (Wu et al., 2023). Çekme ve eğilme yüklemelerinde kompozitlerin sergilediği karma hasar modları, kompozit yapının çok katmanlı ve çok yönlü yük taşımaya dayalı yapısının bir sonucudur. Deneysel bulgular, bu yükleme koşullarında fiber kırılması, matris çatlaması, fiber çekip çıkması ve tabaka ayrılmasının bir arada geliştiğini; özellikle eğilme altında delaminasyonun yerel burkulmayı tetikleyerek rijitliği önemli ölçüde azalttığını göstermektedir (Liu et al., 2025). Tüm bu mekanizmalar birlikte değerlendirildiğinde, kompozit yapılarda hasarın gizli, ilerleyici, birbirini tetikleyen ve çoğu zaman yük yönüne duyarlı bir yapıda geliştiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemelerde hasarın erken aşamada tespiti için faz dizilimli ultrasonik test,

termografi ve şearografi gibi gelişmiş NDT tekniklerinin tercihi büyük öneme sahiptir.

3. GELENEKSEL TAHRİBATSIZ MUAYENE TEKNİKLERİ

Geleneksel tahribatsız muayene (NDT) teknikleri, uçak yapılarında yüzey, yüzeye yakın ve iç kusurların tespitine yönelik olarak uzun yıllardır kullanılan temel yöntemlerdir ve bakım emniyetinin ilk basamağını oluşturur. Bu teknikler, birbirini tamamlayan fiziksel prensiplere dayanarak yapısal bütünlük hakkında önemli bilgiler sunar. Bu yöntemler birlikte değerlendirildiğinde, geleneksel NDT tekniklerinin havacılık bakımında hâlâ vazgeçilmez bir konumda olduğu, farklı kusur türlerine duyarlılıkları sayesinde yapısal emniyetin sağlanmasında birbirlerini tamamlayıcı biçimde kullanıldıkları görülmektedir (Ulus et al., 2024; García-Martín et al., 2011).

Görsel muayene, karmaşık ve çok katmanlı yapılar dahil olmak üzere havacılıkta en hızlı ve en düşük maliyetli ilk değerlendirme yöntemidir ve büyük uçakların %80'inden fazlasında rutin kontrol yöntemi olarak uygulanmaktadır (Fotouhi et al., 2021). Ancak bu yöntem, denetçinin tecrübesine bağlı olduğundan hata olasılığı yüksek ve tekrarlanabilirlik açısından sınırlıdır (Rao, 2017). Bu sebeple bu yöntem tek başına uçaklarda hasar tespitinde yeterli olmamaktadır.

Penetrant testi, yüzeye açık çatlakları ve ince süreksizlikleri tespit etmek için yüksek duyarlılığa sahip bir yöntemdir. Özellikle metallerde yüzeye çıkan yorulma çatlaklarının belirlenmesinde etkilidir ve geniş yüzey alanlarının taranmasına imkân tanır (Wang et al., 2024). Havacılık sektöründe penetrant testi, uçak kanatları, iniş takımı bileşenleri ve motor parçaları gibi yüksek gerilime maruz kalan bölgelerde rutin olarak uygulanmaktadır. Ancak, penetrant testinde

kullanılan bazı kimyasalların insan sağlığı ve çevre açısından riskler taşıdığı da vurgulanmaktadır. Leong ve Clark (2018), özellikle boya bazlı penetrant kimyasallarının uygun havalandırma sistemleri olmadan kullanılması halinde sağlık riskleri oluşturabileceğini ve bu nedenle ultrasonik test ve termografi gibi alternatif yöntemlerin daha emniyetli olduğunu önermiştir (Leong & Clark, 2018).

Manyetik malzemelerde yüzey ve yüzeye yakın çatlakların tespitinde kullanılan yöntem, ferromanyetik yapıdaki hataları manyetik akı sızıntıları üzerinden görünür hale getirir. Özellikle iniş takımı ve yapısal çelik bağlantı parçalarının değerlendirilmesinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Wang et al., 2024). Burke ve Ditchburn (2013), havacılıkta ortalama olarak 2 mm uzunluğundaki kusurları %90 tespit olasılığıyla saptayabildiğini belirtmiş ve yöntemin standartlaştırılmış güvenilirlik sınırlarını ortaya koymuştur (Burke & Ditchburn, 2013). Manyetik parçacık muayenesinin uygulanmasında çalışan sağlığı ve çevre güvenliği de önemli bir faktördür. Leong ve Clark (2018), muayene sırasında maruz kalınan elektromanyetik alanların sınır değerlerde tutulması ve kullanılan manyetik boyaların kimyasal güvenlik önlemleriyle desteklenmesi gerektiğini vurgulamıştır (Leong & Clark, 2018). Sonuç olarak manyetik parçacık muayenesi, yüzey çatlaklarının erken tespitinde yüksek doğruluk, düşük maliyet ve hızlı uygulanabilirlik sunan önemli bir tahribatsız yöntemidir.

Eddy current (EC) yöntemi, metalik uçak yapılarında yorulma çatlakları, korozyon ve özellikle çok katmanlı yapılardaki yüzeye çıkmamış hataların tespitinde yüksek hassasiyet sunar (Uchanin, 2022). Havacılık sektöründe, perçinli çok katmanlı alüminyum yapılarda korozyon ve çatlakların tespiti için Eddy Current Array (ECA) teknolojileri de yaygın olarak kullanılmaktadır. Janovec ve arkadaşları (2020), ECA yöntemiyle uçak gövdesi perçin bölgelerinde simüle edilmiş korozyonun

ikinci ve üçüncü katmanda dahi başarıyla tespit edilebildiğini bildirmiştir (Janovec, Čerňan & Škultéty, 2020). EC yöntemi yalnızca yüzey çatlaklarıyla sınırlı değildir; aynı zamanda uzaktan alan girdap akımı teknikleri sayesinde boru içi veya derin korozyon çatlakları da tespit edilebilmektedir. Sonuç olarak, Eddy Current testi, yüzey ve yüzeye yakın kusurların hızlı, temassız ve yüksek çözünürlüklü biçimde tespiti için en etkili elektromanyetik tahribatsız yöntemlerinden biridir. Çok frekanslı, dizi tabanlı ve otomatik EC sistemleri, bu yöntemin derinlik çözünürlüğünü, tekrarlanabilirliğini ve doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır.

Ultrasonik test (UT), kompozit ve metal yapılarda iç kusurların tespitinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Delaminasyon, iç çatlaklar, boşluklar ve kalınlık değişimleri yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir. Özellikle kompozitlerde delaminasyonun tespitinde standart bir araç olarak kabul edilmektedir (Fotouhi et al., 2021). Havacılıkta, UT özellikle uçak kanatları, gövde panelleri ve kompozit bağlantılarda kritik bir kontrol aracıdır. Faz dizilimli ultrasonik yöntem (Phased Array) ve Tam odaklama yöntemi (Total Focusing Method-TFM) gibi gelişmiş teknikler küçük kusurların çözünürlüğünü artırırken (Kappatos et al., 2017), Yönlendirilmiş Dalga Ultrasonik Testi (Guided Wave Ultrasonics-GWUT) geniş yüzeylerin uzun mesafeli taranmasına olanak tanır (Tanveer et al., 2024). Sonuç olarak ultrasonik muayene, havacılıkta kompozit ve metal yapıların iç kusurlarını yüksek doğruluk, derinlik çözünürlüğü ve güvenilirlikle tespit eden temel bir yöntemdir. Yeni nesil faz dizilimli, lazer ultrasonik ve yapay destekli sistemler, yöntemin algılama gücünü artırmakta; temassız ve gerçek zamanlı muayenelerin önünü açmaktadır.

Radyografik test (RT), metal ve kompozit yapılarda iç kusurların görüntülenmesinde etkili olup özellikle iç boşluklar, kalınlık değişiklikleri ve malzeme yoğunluğu farklılıklarını tespit

eder (Fotouhi et al., 2021). Karmaşık yapılar içinde yer alan bağlantı bölgelerinin incelenmesinde üstün performans sağlar ancak ekipman ve güvenlik gereksinimleri nedeniyle uygulaması diğer yöntemlere kıyasla daha maliyetlidir. Havacılıkta RT perçinli bağlantılar, karmaşık iç geometriler ve kompozit sandviç yapılar gibi doğrudan erişilemeyen bölgelerin incelenmesinde önemli bir rol oynar. X-ışını bilgisayarlı tomografi (XCT) teknolojisi, geleneksel radyografiye kıyasla daha yüksek çözünürlük ve üç boyutlu kusur analizi imkânı sağlamıştır (Dilonardo et al., 2020). Bu yöntemle, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) yapılarında gözeneklerin, tabaka ayrılmasının ve fiber yönlenme hatalarının üç boyutlu olarak modellenmesi mümkündür. Ayrıca bu yöntem ekipman maliyeti, radyasyon güvenliği gereksinimleri ve işlem süresi nedeniyle genellikle kritik bölgelerin analizinde veya diğer yöntemlerle kombine hibrit yaklaşımlarda kullanılmaktadır.

Termografi, yüzeye gelen ısı akışındaki düzensizlikleri kullanarak delaminasyon, su birikimi, korozyon ve yapısal ayrılmaları hızlı şekilde tespit eder. Kompozit yapılarda özellikle üretim hataları ve hizmet sürecinde oluşan hasarların erken belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Fotouhi et al., 2021). Aktif termografi teknikleri, ısıtıcının kontrollü uygulanmasıyla hataları daha belirgin hale getirir. Havacılık endüstrisinde aktif termografi, pasif termografiye göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü dış ısıtma ile derin kusurlar daha belirgin hale getirilebilir (Ciampa et al., 2018). Aktif termografi, özellikle uçak kanatları, kompozit paneller ve bal peteği sandviç yapılarında hızlı alan taraması ve erken hasar tespiti sağlar.

Akustik emisyon (AE) yöntemi bir yapıda çatlak genişlemesi, lif kırılması veya delaminasyon gibi dinamik hasar süreçlerinin olduğu anda yayılan elastik dalgaları tespit eder. Özellikle kompozitlerde lif kırılması ve matriks çatlamasının

erken tespitinde etkinliği gösterilmiştir (Mickens et al., 2003). AE'nin en önemli avantajı, hasarın gerçekleştiği anda gerçek zamanlı izleme imkânı sunmasıdır. Kompozit yapılarda AE, hasar mekanizmalarının sıralı şekilde izlenebilmesi açısından son derece etkilidir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerde lif kırılması, matriks çatlaması, delaminasyon ve ara yüzey ayrılımları gibi mekanizmaların frekans temelli ayırt edilmesi mümkündür (Harizi et al., 2022).

4. GELİŞMİŞ TAHRİBATSIZ MUAYENE TEKNİKLERİ

Gelişmiş tahribatsız muayene teknikleri özellikle havacılık, savunma, enerji, nükleer mühendislik ve altyapı sektörlerinde, güvenilirlik ve ömür tahmini açısından büyük rol oynamaktadır (Faseela, 2024). Son yıllarda yapay zekâ destekli veri analizi, robotik sistemler, çok frekanslı elektromanyetik muayene ve termografik görüntüleme gibi ileri teknolojiler, tahribatsız muayeneyi tamamen yeni bir boyuta taşımıştır (Mineo & Javadi, 2022; Gandhi et al., 2022). Bu gelişmeler, sadece hata tespitini değil, aynı zamanda proaktif bakım, öngörücü analiz ve tasarım için muayene kavramlarının da uygulanabilirliğini artırmaktadır. Endüstride dijital dönüşümün bir parçası olarak, sensör teknolojilerinin, otomasyonun ve yapay zekânın birleşimiyle tahribatsız muayene akıllı üretim süreçlerinin ayrılmaz bir unsuru haline gelmiştir (Gonzalez & Harrap, 2019).

Şearografi, lazer tabanlı tam alanlı deformasyon ölçümü sayesinde yüzey altı kusurları tespit edebilen, temassız ve yüksek hassasiyetli bir tahribatsız muayene yöntemidir (Guo et al., 2022). Özellikle kompozit malzemelerde delaminasyon, mikro çatlak ve bağ ayrılımlarının belirlenmesinde endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tao, Anisimov & Groves, 2021).

Spagnolo ve arkadaşları (2022), düşük maliyetli bir şearografi sisteminin havacılık kompozitlerinde düşük hızlı darbelere bağlı delaminasyonların tespitiinde etkili olduğunu göstermiştir (Spagnolo et al., 2022). Ayrıca, şearografinin diğer tahribatsız muayene teknikleriyle birlikte kullanılması, farklı derinliklerdeki kusurların daha kapsamlı bir şekilde belirlenmesine olanak sağlamaktadır (Ochana et al., 2024; Wei & Xiao, 2024). Şearografi yalnızca laboratuvar ortamlarında değil, saha koşullarında da güvenilir bir tahribatsız muayene aracı olarak konumlanmaktadır. Özellikle kompozit yapıların bütünlüğünün korunmasında, delaminasyon ve mikro çatlakların tespitiinde yüksek doğruluk ve hız sağlamaktadır.

Kızılötesi termografi, yüzey sıcaklık değişimlerini analiz ederek malzeme içindeki kusurları tespit eden, temassız ve hızlı bir tahribatsız muayene yöntemidir (Qu, Jiang & Zhang, 2020). Bu yöntem hem pasif hem de aktif modlarda uygulanabilir; aktif termografi, dış ısıtma kaynakları kullanarak daha derin kusurların tespitini mümkün kılar (Usamentiaga et al., 2014). Aktif kızılötesi termografi, dış enerji kaynağı kullanılarak yüzeyin ısıtılması ve ardından soğuma davranışının izlenmesi prensibine dayanır (Bouteille et al., 2014). Bu yöntem, yüzeyin altındaki boşluklar, delaminasyonlar ve mikro çatlakları yüksek hassasiyetle tespit edebilir. Günümüzde, yapay zekâ tabanlı termografi sistemleri de yaygınlaşmaktadır. Cheng ve arkadaşları (2022) tarafından geliştirilen IRT-GAN modeli, termografik verilerden otomatik kusur segmentasyonu yaparak kompozit malzemelerde hataların hızlı ve operatör bağımsız şekilde tespitini mümkün kılmıştır (Cheng et al., 2022). Kızılötesi termografi özellikle aktif varyantı, hızlı veri toplama, temassız ölçüm ve geniş alan tarama avantajları sayesinde, kompozit ve metalik malzemelerde tahribatsız muayene için etkili, ekonomik ve yenilikçi bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır.

Lazer Doppler Vibrometri (LDV), temassız titreşim ölçümüne olanak tanıyan ve özellikle havacılık ile uzay mühendisliği alanlarında kompozit yapıların bütünlüğünü izlemek için kullanılan gelişmiş bir tahribatsız muayene yöntemidir. 3B taramalı LDV sistemleri, karbon fiber takviyeli polimer malzemelerde yerel rezonans analizleriyle darbe hasarlarını tespit ederek uçak kanat panelleri ve gövde bileşenlerinin bakımında büyük avantaj sağlamaktadır (Derusova et al., 2022). Ayrıca LDV, uçak gövdesi ve motor bileşenlerinin titreşim modlarını analiz ederek potansiyel yorulma bölgelerini belirlemede kullanılmakta ve tam alanlı titreşim ölçümleriyle rezonans modlarının görselleştirilmesine olanak tanımaktadır (Breabăn, Debuchy & Defer, 2015). Güncel araştırmalar, LDV sistemlerinin insansız hava araçlarına entegre edilerek uçuş esnasında titreşim ve yapısal hasar izleme amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir (Schewe et al., 2024). Bunun yanı sıra, LDV ile infrared interferometriyi birleştiren hibrit sistemler, kompozit uçak parçalarında gerçek zamanlı tam alanlı titreşim haritaları çıkararak mikro çatlakların ve ayrılmaların erken tespitini sağlamaktadır (Kilpatrick, Apostol & Markov, 2009).

Terahertz tabanlı tahribatsız test (THz-NDT), malzemelerin ve yapıların iç yapısını veya yüzeyini zarar vermeden incelemek için THz elektromanyetik dalgalarını kullanan modern bir test yöntemidir. THz-NDT, özellikle metal olmayan ve çok katmanlı malzemelerde yüksek çözünürlük, temassız ölçüm ve güvenli kullanım avantajları sunar. THz-NDT, 0.1–10 THz aralığındaki yüksek çözünürlüklü ve iyonlaştırıcı olmayan elektromanyetik dalgaları kullanarak metal içermeyen yapıların iç kusurlarını temassız biçimde görselleştirebilmesi sayesinde son yıllarda özellikle polimer ve kompozit malzemelerin değerlendirilmesinde kritik bir yöntem hâline gelmiştir. THz zaman-alanı spektroskopisi (THz-TDS), yankı

zamanlarındaki gecikmelerden yararlanarak delaminasyon, boşluk ve gömülü kusurların tespiti için yüksek doğruluk sağlamış; nitekim polietilen borularda 2 mm çapındaki gömülü kusurların başarıyla görüntülediği çalışmalar, yöntemin mühendislik altyapısında uygulanabilirliğini doğrulamıştır (Nie et al., 2023).

Öte yandan sürekli dalga temelli terahertz görüntüleme radarları, özellikle kalın ve yüksek kırınım indisli malzemelerde üç boyutlu rekonstrüksiyon algoritmalarıyla desteklenen yüksek çözünürlüklü iç yapı analizi sunarak polimer levhalarda boşluklar ve köpük malzemelerde heterojenlik gibi kusurların etkili biçimde ortaya çıkarılmasını mümkün kılmıştır (Zhang et al., 2020). Terahertz radyasyonunun metal olmayan malzemelere yüksek geçirgenliği, nem ve dielektrik özelliklere duyarlılığı ve güvenli—iyonlaştırıcı olmayan—yapısı, onun havacılıkta kompozit yüzeylerin, yapıştırma bölgelerinin ve polimer esaslı komponentlerin incelenmesinde geleneksel NDT yöntemlerine güçlü bir tamamlayıcı hâle gelmesini sağlamakta; beton, polimer köpük, termal bariyer kaplamalar ve yüksek yoğunluklu polietilen gibi çok çeşitli endüstriyel alanlarda doğrulanan uygulamalar ise teknolojinin geniş ölçekli kullanım potansiyelini açıkça göstermektedir (Tao et al., 2020)

Faz diziliimli ultrasonik test (Phased Array Ultrasonic Testing – PAUT), malzeme ve kaynak muayenelerinde kullanılan gelişmiş bir tahribatsız test yöntemidir. Bu teknikte, tek bir prob yerine birçok küçük elemandan oluşan bir dizilim kullanılarak ultrasonik dalgalar elektronik olarak yönlendirilip odaklanır, böylece malzemenin iç yapısı farklı açılardan ve derinliklerden yüksek hassasiyetle taranabilir. PAUT, geleneksel ultrasonik test yöntemlerine göre daha hızlı, esnek ve doğru sonuçlar sağlar (Lei, Wirdelius & Rosell, 2021). Kompozit ve metal malzemelerde çok küçük (0.8 mm'ye kadar) kusurları tespit edebilmesiyle öne çıkar (Taheri & Hassen, 2019). Ayrıca kaynaklı bağlantıların

incelenmesinde, hataların türünü, derinliğini ve boyutunu belirlemede yüksek doğruluk sunar (Uzun & Gustiani, 2024). Simülasyon tabanlı modelleme ve olasılıksal hata tespit analizlerinde de kullanılarak test maliyetlerini düşürür ve süreçleri optimize eder (Lei, Wirdelius & Rosell, 2022). Yüksek çözünürlüklü 3B görüntüleme yeteneğiyle endüstride kusurların şekil ve derinlik açısından görselleştirilmesini sağlar (Zheng et al., 2022). Kısacası PAUT, modern endüstride malzeme ve kaynak bütünlüğünün hızlı, güvenilir ve detaylı şekilde değerlendirilmesi için kullanılan en etkili tahribatsız test yöntemlerinden biridir.

5. VAKA ANALİZLERİ

1980’li yıllar ve sonrasında yaşanan bazı büyük havacılık kazaları, uçak yapısal bütünlüğünün korunmasında yorulma davranışının, malzeme özelliklerinin ve bakım teknolojilerinin ne kadar kritik olduğunu ortaya koymuştur.

12 Ağustos 1985’te meydana gelen Japan Airlines Flight 123 kazasında, Boeing 747SR-46 uçağının arka basınç bölmesinde on iki yıl önce yapılan hatalı bir onarım, uzun dönemli basınç döngüleri sonucunda metal yorulmasına neden olmuştur. Hatalı yerleştirilmiş çift parçalı splice plate, yük aktarım süreksizliği yaratarak çatlak büyümesine yol açmış; sonunda kabin basıncı aniden boşalmış, dikey stabilize ve hidrolik sistemler tahrip olmuştur. Bu olay, tek bir hatalı tamir uygulamasının, zamanla geniş ölçekli gövde ayrılmasına (widespread fatigue failure) dönüşebileceğini dramatik biçimde göstermiştir (Aircraft Accident Investigation Commission [AAIC], 1987; NTSB, 1986).

28 Nisan 1988’de yaşanan Aloha Airlines Flight 243 kazasında ise çoklu yorulma çatlakları nedeniyle gövde üst panelinin yaklaşık 5,5 metrelik bir kısmı koparak ayrılmıştır.

Boeing 737-200 serisinde kullanılan cold-bonded lap joint tasarımında yapıştırıcının yaşlanmasıyla yükler perçinlere binmiş, bu da perçin deliklerinde mikro yorulma çatlaklarının oluşmasına yol açmıştır. NTSB (1989), bu olayın “Widespread Fatigue Damage (WFD)” kavramının fark edilmesini sağlayarak yaşlanmış uçakların bakım standartlarını kökten değiştirdiğini belirtmiştir (NTSB Aircraft Accident Report AAR-89/03, 1989).

19 Temmuz 1989’da yaşanan United Airlines Flight 232 kazasında, McDonnell Douglas DC-10 uçağının merkez motorunda bulunan titanyum fan diskinin içinde üretimden kaynaklı mikroskobik bir iç kusur, yıllar içinde titreşim kaynaklı yorulma çatlağına dönüşmüştür. Diskin kopmasıyla motor patlamış ve parçalar üç hidrolik sistem hattını aynı anda kesmiştir. Tüm kontrol yüzeylerini kaybeden uçak, yalnızca motor itiş farklarıyla yönlendirilebilmiştir. Olayın nedeni imalat kusurunun mevcut NDT yöntemleriyle tespit edilememesi olarak tanımlanmış; sonrasında FAA, titanyum fan disklerinin ultrasonik yeniden muayenesini zorunlu kılmıştır (NTSB, 1990).

6 Mart 2005’te meydana gelen Air Transat Flight 961 olayı, kompozit malzeme yapılarındaki arızaların tehlikesini ortaya çıkarmıştır. Airbus A310-308 uçağında, bal peteği çekirdekli karbon fiber-epoksi rudder yapısı, nem ve sıcaklık değişimlerinin etkisiyle delaminasyona uğramış ve uçuş sırasında rudder’ın tamamen kopmasına neden olmuştur. İncelemeler mevcut NDT yöntemlerinin kompozit iç hasarlarını tespit etmekte yetersiz olduğunu göstermiştir. Bu olayın ardından Airbus tüm A310/A300 uçaklarında ultrasonik muayeneleri başlatmış, EASA ise kompozit kontrol yüzeylerinin periyodik denetim standartlarını sıkılaştırmıştır (TSB, 2007).

Bu dört olay birlikte değerlendirildiğinde, uçak yapılarında yorulma kaynaklı arızaların çok boyutlu bir mühendislik sorunu olduğu anlaşılmaktadır. Metal yapılarda

mikro yorulma ve tamir hataları, kompozit yapılarda ise delaminasyon ve çevresel bozulma benzer sonuçlara yol açabilmektedir. Bu kazalar, modern havacılıkta NDT teknolojilerinin gelişimini, malzeme kalite standartlarının sıkılaştırılmasını ve “fail-safe/damage-tolerant” tasarım anlayışının yaygınlaşmasını sağlamıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eski uçaklardaki yapısal hasarların tespiti, uçuş emniyeti ve operasyonel süreklilik açısından hayati önem taşır. Artan basınç çevrimleri, çevresel etkiler ve titreşim yükleri, gövde elemanlarında yorulma çatlaklarına, bağlantı yerlerinde gevşemeye ve kompozit panellerin delaminasyonuna neden olur. Bu tür hasarların erken tespit için gelişmiş tahribatsız muayene tekniklerinin uygulanması zorunlu hale gelmiştir. Modern sistemler, mikro düzeydeki hasarları tespit ederek, kritik bileşenlerin arızalanmadan önce bakım programlarına dahil edilmesini mümkün kılar ve AOG (Yerdeki Uçak) maliyetlerinin oluşmasını da önler.

Son araştırmalara göre şearografi, faz dizili ultrasonik test, bozuk termografi ve terahertz tabanlı teknikler gibi tahribatsız muayene yöntemleri, özellikle kompozit yapılarda ve petek bileşenlerde gizli kusurları tespit etmede geleneksel yöntemlerden çok daha etkilidir. Risk bazlı bakım hizmetleri ve gelişmiş tahribatsız muayene teknolojileri, Bakım, Onarım ve Revizyon (MRO) merkezlerinde değişken operasyonlar için aktif formatlarla birlikte bölgesel bakım programlarına zaten dahil edilmiştir. Böylece amaç, yaşanan filoların verimliliğini artırmak, bakım faaliyetlerini iyileştirmek ve emniyet kültürünü teşvik etmektir.

KAYNAKÇA

- Aceti, P., Carminati, L., Bettini, P., & Sala, G. (2023). Hygrothermal ageing of composite structures. Part 1: Technical review. *Composite Structures*, 319, 117076.
- Airbus. (2020). *Aging aircraft and structural maintenance practices: Technical report*. Airbus Customer Services.
- Airbus. (2022). *Aging aircraft structures: Design principles and maintenance considerations*. Airbus Technical Publication.
- Aranguren, G., Bilbao, J., Etxaniz, J., Gil-García, J. M., & Rebollar, C. (2022). Methodology for detecting progressive damage in structures using ultrasound-guided waves. *Sensors*, 22(4), 1692. <https://doi.org/10.3390/s22041692>
- Bardis, K., Avdelidis, N. P., Ibarra-Castanedo, C., Maldague, X. P. V., & Fernandes, H. (2025). Advanced diagnostics of aircraft structures using automated non-invasive imaging techniques: A comprehensive review. *Applied Sciences*, 15(7), 3584. <https://doi.org/10.3390/app15073584>
- Bouteille, P., Legros, G., Walaszek, H., & Bodnar, J. (2014). Non-destructive testing of metallic materials using passive and active infrared thermography. *Mechanics & Industry*, 15, 313–321.
- Breabăn, F., Debuchy, R., & Defer, D. (2015). Laser scanning vibrometry and holographic interferometry applied to vibration study. *Applied Mechanics and Materials*, 801, 303–311.
- Burke, S., & Ditchburn, R. J. (2013). Review of literature on probability of detection for magnetic particle nondestructive testing. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 55(10), 545–551.

- Cheng, L., Tong, Z., Xie, S., & Kersemans, M. (2022). IRT-GAN: A generative adversarial network with a multi-headed fusion strategy for automated defect detection in composites using infrared thermography. *Composite Structures*, 292, 115673.
- Ciampa, F., Mahmoodi, P., Pinto, F., & Meo, M. (2018). Recent advances in active infrared thermography for non-destructive testing of aerospace components. *Sensors*, 18(2), 609. <https://doi.org/10.3390/s18020609>
- Deng, K., Cheng, H., Suo, H., Liang, B., Li, Y., & Zhang, K. (2022). Aging damage mechanism and mechanical properties degradation of 3D orthogonal woven thermoset composites subjected to cyclic hygrothermal environment. *Engineering Failure Analysis*, 140, 106629.
- Derusova, D., Vavilov, V., Druzhinin, N. V., Shpil'noi, V. Y., & Pestryakov, A. (2022). Detecting defects in composite polymers by using 3D scanning laser Doppler vibrometry. *Materials*, 15(20), 7176.
- Dilonardo, E., Nacucchi, M., Pascalis, F. D., Zarrelli, M., & Giannini, C. (2020). High resolution X-ray computed tomography: A versatile non-destructive tool to characterize CFRP-based aircraft composite elements. *Composites Science and Technology*, 192, 108093.
- FAA. (2018). *Aging aircraft safety and inspection program handbook*. Federal Aviation Administration.
- Federal Aviation Administration. (2021). *Aging aircraft safety program: Structural inspection and maintenance requirements*. FAA Office of Aviation Safety.
- Fotouhi, S., Pashmforoush, F., Bodaghi, M., & Fotouhi, M. (2021). Autonomous damage recognition in visual inspection of laminated composite structures using deep

- learning. *Composite Structures*, 268, 113960.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113960>
- Gandhi, N. H., Rose, R., Croxford, A., & Ward, C. (2022). Understanding system complexity in the non-destructive testing of advanced composite products. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(3), 68.
- García-Martín, J., Gómez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, 11(3), 2525–2565.
- Harizi, W., Chaki, S., Bourse, G., & Ourak, M. (2022). Damage mechanisms assessment of glass fiber-reinforced polymer composites using multivariable analysis methods applied to acoustic emission data. *Composite Structures*, 279, 115470.
- Janovec, M., Čerňan, J., & Škultéty, F. (2020). Use of non-destructive eddy current technique to detect simulated corrosion of aircraft structures. *Koroze a Ochrana Materialu*, 64(1), 52–58.
- Kappatos, V., Asfis, G., Salonitis, K., Tzitzilonis, V., Avdelidis, N., Cheilakou, E., & Theodorakeas, P. (2017). Theoretical assessment of different ultrasonic configurations for delamination defects detection in composite components. *Procedia CIRP*, 59, 29–34.
- Kilpatrick, J., Apostol, A., & Markov, V. (2009). Nondestructive testing of aerospace composites with an infrared matrix laser vibrometer. *Proceedings of SPIE*, 7389, 73890E.
- Lei, X., Wirdelius, H., & Rosell, A. (2022). Simulation-based investigation of a probability of detection (POD) model using phased array ultrasonic testing technique. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 41, 12.

- Mickens, T., Schulz, M., Sundaresan, M., Ghoshal, A., Naser, A. S., & Reichmeider, R. (2003). Structural health monitoring of an aircraft joint. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17(2), 285–303. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1425>
- National Transportation Safety Board. (1989). *Aircraft accident report: Aloha Airlines Flight 243* (AAR-89/03). Washington, DC: U.S. Government Printing Office.
- Ochana, I., Ducobu, F., Homrani, M. K., Notebaert, A., & Demarbaix, A. (2024). A comparative study of non-destructive testing techniques: Active thermography versus shearography for 3D-printed thermoplastic composites reinforced with continuous carbon fiber. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(2), 45.
- Qu, Z., Jiang, P., & Zhang, W. (2020). Development and application of infrared thermography non-destructive testing techniques. *Sensors*, 20(14), 3851.
- Rao, B. (2017). Non-destructive testing and damage detection. In *Aerospace materials and material technologies* (pp. 209–228). Springer.
- Tao, N., Anisimov, A., & Groves, R. (2021). Shearography nondestructive testing of thick GFRP laminates: Numerical and experimental study on defect detection with thermal loading. *Composite Structures*, 263, 113713.
- Wei, X., & Xiao, L. (2024). Inspection of defects in composite structures using long pulse thermography and shearography. *Heliyon*, 10, e23456.
- Zhang, H., Liu, Q., & Sun, D. (2022). Hybrid NDT approaches for aging aircraft inspection. *Aerospace Science and Technology*, 125, 107234.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AIRCRAFT HEALTH MONITORING AND PREDICTIVE MAINTENANCE: A REVIEW

Mehmet YERLİKAYA¹

1. INTRODUCTION

Maintenance activities in aviation have been carried out for many years using a reactive maintenance approach, where intervention occurs after a failure has occurred. With the growth of commercial air transport and increased safety requirements, the industry has gradually shifted towards planned and periodic maintenance strategies. While these methods aim to reduce unexpected failures through regular inspections, they have been unable to fully reflect the actual condition of components due to each aircraft operating under different environmental and operational conditions. This limitation has paved the way for condition-based maintenance (CBM), where maintenance is determined based on the condition of the equipment, and for the use of sensor data in maintenance decisions. Today, the most advanced stage of this evolution is the predictive maintenance (PdM) approach, which uses multi-source data such as sensor data and aircraft telemetry to predict failures in advance (Mobley, 2002; Verhagen et al., 2023).

The rapid increase in the number of sensors used in modern passenger aircraft is the most important driving force behind this transformation. New-generation planes have thousands of sensors on a single platform and continuously

¹ Asst. Prof. Dr., Selcuk University, School of Civil Aviation, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, ORCID: 0000-0001-8018-840X.

generate high-volume, variable, and multidimensional data. This data is transmitted to maintenance centers via platforms such as avionics data links, flight recorders, ACARS, Wi-Fi telemetry, IoT infrastructures, and Aircraft Health Monitoring Systems (AHMS). As the amount and variety of produced data increases, traditional statistical analysis methods become insufficient for diagnosis and prediction; therefore, machine learning (ML), deep learning (DL), and data-driven approaches are becoming an indispensable part of aviation maintenance processes (Kabashkin & Shoshin, 2024; Kushan & Diltemiz, 2025).

Operational factors also increase the importance of AI-based maintenance systems. Maintenance accounts for approximately 10–15% of total operating costs for airlines; a significant portion of flight delays and cancellations are caused by technical failures or unplanned maintenance requirements (IATA, 2023). Early detection of faults, shorter line maintenance times, optimized spare parts management, and increased aircraft availability provide major economic and operational advantages. Therefore, AI-supported maintenance systems are now seen not only as a technological innovation but also as a strategic factor affecting the competitiveness of airlines (Dagal et al., 2025; Stanton et al., 2023).

This study aims to comprehensively examine artificial intelligence based (AI-based) PdM applications in aviation. First, the methods found in the literature are classified and discussed within the framework of traditional ML, DL, and hybrid models. Next, the sources of aviation maintenance data and the structural challenges of these datasets (missing data, sensor noise, label deficiencies, variability in flight conditions, etc.) are discussed. Thirdly, AI-based maintenance solutions are evaluated in the context of flight safety, regulatory requirements, and certification processes. Finally, emerging research areas such as digital twin-based maintenance, explainable artificial intelligence (XAI),

autonomous decision systems, federated learning, and edge-AI are explored. With this comprehensive assessment, the study aims to provide a valuable guide for both academics and practitioners involved in the digital transformation of aviation maintenance processes.

2. BACKGROUND AND FUNDAMENTALS

Maintenance activities are fundamental to ensuring safe, reliable, and uninterrupted flight operations in aviation. As aircraft systems have become increasingly complex and global air traffic has expanded, maintenance strategies have evolved from reactive maintenance to periodic maintenance, CBM, and ultimately PdM. This evolution has been accelerated by advances in sensor technologies, digitalization, and AI (Ali Emre, 2024; Kabashkin et al., 2025).

Maintenance constitutes a significant portion of airline operating costs, while unexpected technical failures remain a major source of delays and disruptions. Early aviation relied primarily on reactive maintenance, where corrective action occurred after failure. This was followed by periodic maintenance based on manufacturer-defined intervals. However, fixed schedules often failed to reflect actual component condition due to varying operational and environmental factors. Since the 1990s, CBM has enabled real-time monitoring of aircraft components using sensor measurements such as vibration, temperature, pressure, and lubrication status (Adhikari & Buderath, 2016; Verhagen et al., 2023). Today, PdM represents the most advanced stage, leveraging ML, DL, and statistical models to anticipate failures before they occur (Gholipour, 2025; Meissner et al., 2021).

The main objective of PdM is to improve aircraft availability, reduce unscheduled maintenance, and enhance

operational continuity by detecting potential failures at an early stage (IATA, 2023). To achieve this, a wide range of analytical techniques is employed, including statistical life models, anomaly detection, time-series forecasting, and deep learning architectures (Dangut et al., 2023; Hasib et al., 2023). PdM workflows typically consist of three stages: data collection and preprocessing, model-based failure prediction, and maintenance decision optimization.



Figure 1. Evolution of aircraft maintenance strategies

Modern commercial aircraft are equipped with extensive sensor networks covering engines, flight control systems, hydraulics, pneumatics, fuel systems, and avionics. Sensor data are transmitted via avionics data buses such as ARINC 429, AFDX, and CAN bus, and further relayed to ground systems through ACARS, SATCOM, Wi-Fi, and IoT infrastructures (Airbus, 2022; Emergen Research, 2025). The resulting data volume and heterogeneity exceed the capabilities of traditional analysis methods, making AI-based approaches essential (Kabashkin & Shoshin, 2024).

AI has therefore become a key enabler of modern aviation maintenance. ML and DL techniques have demonstrated strong performance in engine degradation prediction, fault detection, anomaly diagnosis, and pattern discovery in large-scale sensor data. Compared to rule-based or threshold-based methods, AI-based solutions offer greater scalability and adaptability for increasingly complex aircraft systems (Kabashkin & Shoshin, 2024).

CBM represents a shift from time-based maintenance toward condition-driven decision-making. By continuously monitoring component health, CBM reduces unnecessary maintenance actions, extends component life, and improves

safety. However, its effectiveness depends on reliable sensor networks, high-quality data, and robust real-time analytics, as large and heterogeneous datasets must be processed accurately to avoid false alarms or missed detections (Mobley, 2002; Verhagen et al., 2023).

Prognostics and Health Management (PHM) extends CBM by predicting system degradation and estimating the Remaining Useful Life (RUL) of components using physics-based, data-driven, or hybrid approaches. PHM enables proactive maintenance planning and improves aircraft availability and resource management. Nevertheless, PHM deployment faces challenges related to limited labeled data, operational variability across fleets, and strict certification and transparency requirements in safety-critical aviation environments (Fu & Avdelidis, 2023).

Recent research reflects both progress and emerging trends. Federated learning frameworks have been proposed to enable collaborative RUL prediction across multiple airlines without sharing raw data, addressing data scarcity, heterogeneity, and privacy concerns. In parallel, advances in structural health monitoring demonstrate the growing application of multi-sensor data fusion and ML beyond engine systems, extending PHM to airframe structures exposed to complex environmental and operational loads (Landau et al., 2025).

3. AI TECHNIQUES FOR AIRCRAFT PREDICTIVE MAINTENANCE

AI has become a key technology in aircraft health monitoring by enabling the analysis of large, complex, and heterogeneous datasets generated by modern aircraft systems. Data collected from engines, structures, flight control systems, hydraulic and fuel systems, and avionics provide valuable

information for fault detection, anomaly diagnosis, and predictive maintenance applications. Traditional analysis techniques are often insufficient to handle this data complexity, making AI-based methods essential for improving maintenance accuracy and operational reliability (Fu & Avdelidis, 2023; Kabashkin, 2025).

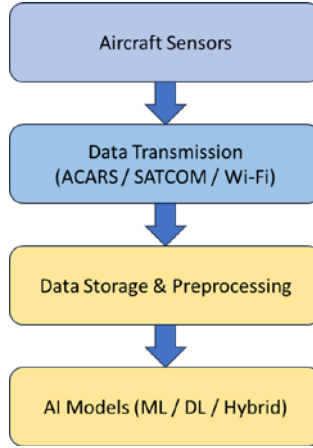


Figure 2. General architecture of an AI-based PdM system

AI-based PdM approaches in aviation can be broadly grouped into three main categories. Traditional ML methods rely on manually engineered features derived from sensor data. Algorithms such as Support Vector Machines (SVMs), Random Forests (RF), k-Nearest Neighbors (kNNs), and Gaussian Mixture Models (GMMs) have been widely applied for fault classification, condition monitoring, and anomaly detection. These methods are effective when expert knowledge is available to guide feature extraction and model design, and they generally offer good interpretability and low computational cost (Kosova et al., 2025).

DL approaches are particularly suited for high-dimensional and time-series data commonly encountered in aviation, such as vibration signals, acoustic measurements, and multivariate sensor streams. Neural network architectures including Convolutional Neural Networks (CNNs), Recurrent

Neural Networks (RNNs), and Long Short-Term Memory (LSTM) networks can automatically learn complex patterns directly from raw data. These models have demonstrated strong performance in fault detection and RUL estimation, especially in large-scale sensor environments (Dangut et al., 2023).

Hybrid and physics-informed models aim to combine the strengths of data-driven learning with physical knowledge of aircraft systems. By integrating physics-based degradation models or structural dynamics with machine learning, these approaches improve robustness, interpretability, and generalization across different operating conditions. Digital twin frameworks, model-based and data-driven fusion techniques, and Physics-Informed Neural Networks (PINNs) are representative examples of this category and are increasingly favored in safety-critical aviation applications (Kabashkin, 2025).

Table 1. Classification of AI techniques in aircraft PdM

Category	Algorithms	Applications	Strengths	Limitations
ML	SVM, RF, k-NN	Fault classification	Interpretable	Feature engineering
DL	CNN, LSTM	RUL estimation	High accuracy	Black-box
Hybrid	PINN, Digital Twin	Safety-critical PHM	Robust & explainable	Complexity

4. DATA SOURCES, FEATURES, AND PREPROCESSING

The performance of AI-based PdM systems in aviation strongly depends on the availability, quality, and diversity of maintenance-related data. Modern aircraft generate large volumes of heterogeneous data from onboard and ground-based sources, including sensor telemetry, flight logs, and maintenance records. While these datasets form the foundation of diagnostic and prognostic models, their inconsistent structure, noise levels, and

limited labeling introduce significant challenges for data integration, preprocessing, and feature extraction (Kabashkin & Susanin, 2024; Scott et al., 2022).



Figure 3. Data preprocessing pipeline for AI-based aircraft maintenance

4.1. Data Sources in Aircraft Health Monitoring

AHM) relies on a broad ecosystem of data sources capturing the operational and structural condition of aircraft systems throughout their lifecycle. Advances in sensing, avionics architectures, and connectivity have enabled continuous data collection from airborne and ground-based systems. However, differences in data formats, sampling rates, and reliability complicate their direct use in AI-based maintenance models (Kabashkin, 2025; Scott et al., 2022; Stanton et al., 2023).

- *Sensor and Telemetry Data:* Real-time and post-flight measurements from engines, structures, control systems, hydraulics, fuel systems, and avionics. Data are transmitted via avionics buses (e.g., ARINC 429, AFDX, CAN bus) and communication systems such as ACARS and SATCOM (Airbus, 2022; Kabashkin & Shoshin, 2024).

- *Maintenance and Operational Records:* Maintenance logs, fault messages, BITE outputs, MEL actions, and component

replacement histories provide contextual and labeling information but are often unstructured or incomplete, limiting their direct usability for machine learning (Stanton et al., 2023).

•*Environmental and Operational Context Data*: Flight profiles, payload, ambient conditions, and mission duration influence component degradation and improve model generalization when integrated into PdM frameworks (Verhagen et al., 2023).

4.2. Feature Extraction and Representation

Feature extraction is a critical step in transforming raw sensor signals into meaningful representations for AI models. Traditional machine learning approaches typically rely on handcrafted features derived from time-domain, frequency-domain, and time-frequency analyses. Examples include statistical moments, spectral energy distributions, vibration envelope features, and health indicators (Kosova et al., 2025).

DL approaches, by contrast, enable automatic feature learning directly from raw or minimally processed data. CNNs can capture spatial and spectral patterns in vibration and acoustic signals, while LSTM and GRU architectures model temporal dependencies and degradation trends in multivariate time series (Dangut et al., 2023). Hybrid approaches often combine engineered physical indicators with learned features to improve interpretability and robustness, particularly in safety-critical aviation applications (Kabashkin, 2025).

4.3. Data Preprocessing Challenges

Aviation maintenance data exhibit a range of preprocessing challenges that stem from both the operational environment of aircraft and the constraints of real-world data acquisition systems. These challenges directly affect the reliability and performance of AI-based PdM models and

therefore require careful consideration during data preparation and model development.

- *Missing and Irregular Data*: Aircraft sensor data may be missing or irregular due to communication limits and different sampling rates. This can reduce the accuracy of predictive maintenance models if not properly managed (Scott et al., 2022; Kabashkin, 2025).

- *Noise*: Harsh operating conditions introduce noise and abnormal measurements into aircraft sensor data, which can mask degradation trends or cause false alarms. Filtering and outlier detection are therefore necessary to ensure reliable model performance (Dangut et al., 2023; Fu & Avdelidis, 2023).

- *Class Imbalance*: Failure events are rare in aviation data, so datasets are dominated by normal operation. This imbalance can cause models to miss critical faults, requiring techniques such as resampling, cost-sensitive learning, or anomaly detection to improve reliability (Stanton et al., 2023; Verhagen et al., 2023).

- *Label Uncertainty*: Maintenance labels are often inferred from repair actions rather than direct failure events, which introduces ambiguity and noise in the data. This uncertainty makes model training, validation, and interpretation more difficult (Fu & Avdelidis, 2023; Hasib et al., 2023).

To handle these issues, preprocessing pipelines usually apply basic steps such as filtering, normalization, data alignment, missing-data handling, and anomaly detection. In addition, semi-supervised and self-supervised learning methods are increasingly used to exploit large amounts of unlabeled data, reducing reliance on precise failure labels and improving model robustness in safety-critical aviation applications (Hasib et al., 2023; Fu & Avdelidis, 2023).

5. CHALLENGES AND LIMITATIONS

Despite the significant progress achieved in AI-based aircraft PdM, a range of technical, operational, and organizational challenges continue to limit large-scale deployment and industrial adoption.

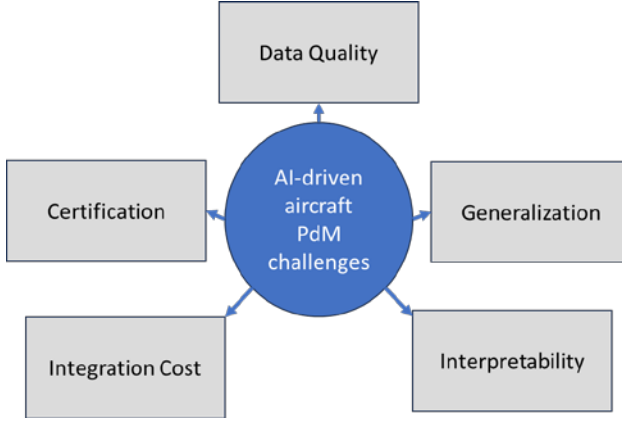


Figure 4. Key challenges affecting AI-driven aircraft PdM

One of the most fundamental challenges in aviation PdM applications is data access, data quality, and labelling constraints. Due to safety requirements, components are often taken out of service for maintenance or replacement before they fail, resulting in very limited run-to-failure data. This situation leads to most datasets containing indirect indicators based on maintenance records rather than direct failure observations. Furthermore, maintenance records may contain missing, inconsistent, or ambiguous information, making it difficult to create reliable labels. These limitations not only reduce the effectiveness of approaches based solely on supervised learning but also increase interest in semi-supervised or hybrid methods (Fu & Avdelidis, 2023; Stanton et al., 2023).

Another significant challenge is the generalizability of models to different operational conditions. Aircraft operate under highly variable conditions, such as flight routes, climate, load

profiles, and operating procedures. Consequently, models trained on data from a specific fleet or airline may experience performance degradation in different environments. Differences in sensor configurations and data collection practices further exacerbate this problem. This situation has increased interest in approaches such as transfer learning, domain adaptation, and federated learning (Kabashkin et al., 2025; Verhagen et al., 2023).

Interpretability and trust also pose a significant obstacle to operational use. Although deep learning models provide high accuracy, they often operate as a ‘black box’ and cannot clearly explain the rationale behind their decisions. However, in aviation, maintenance decisions must be traceable, explainable, and verifiable. Therefore, XAI techniques and physics-based models have become critical for safe and certifiable PdM systems (Fu & Avdelidis, 2023).

Finally, practical constraints such as computational resources, system integration and cyber security also pose significant challenges. PdM systems aiming for real-time or near-real-time predictions must operate with limited onboard processing power. At the same time, they must be integrated in a manner compatible with existing avionics and maintenance information systems. When combined with data security and integrity expectations, these technical requirements further complicate the field integration of AI-based maintenance systems.

6. SAFETY, REGULATIONS, AND CERTIFICATION CONSIDERATIONS

Aviation maintenance operates under very strict regulatory frameworks, and any AI-based predictive maintenance system must comply with the safety and certification requirements defined by authorities such as EASA and the FAA.

These regulations emphasize conservative system behavior, extensive validation, and full traceability to ensure that flight safety is not compromised by new technologies.

From a regulatory perspective, the primary concern is safety assurance. AI systems must be shown to operate reliably under normal and degraded conditions and must not introduce new risks or reduce existing safety margins. This requires comprehensive testing, risk assessment, and predictable system behavior across a wide range of operational scenarios (EASA, 2020; Fu & Avdelidis, 2023).

Another key requirement is traceability and verifiability. Regulatory bodies require clear documentation of data sources, preprocessing steps, model structures, and decision logic to support certification and auditing. However, the limited transparency of many modern AI and deep learning models makes formal verification and validation more challenging (Kabashkin, 2025; SAE, 2021)

Explainability has therefore become essential for regulatory acceptance. Maintenance personnel and certifying authorities need to understand the rationale behind AI-generated recommendations, particularly in safety-critical situations. Without interpretable outputs, trust in AI-supported maintenance decisions remains limited, regardless of predictive performance (Gunning et al., 2019; Hasib et al., 2023).

Current aviation regulations also place limits on adaptive and continuously learning systems. Models that change over time are difficult to certify, as their behavior may diverge from the approved configuration. For this reason, most AI applications in aviation maintenance are presently used as decision-support tools, with final authority remaining with human operators (EASA, 2020; Kabashkin et al., 2025).

In this context, XAI approaches are attracting increasing attention. Techniques that provide transparent and interpretable insights into model behavior help align high-performing AI systems with regulatory expectations, supporting safer and more trustworthy integration of AI-based predictive maintenance in aviation (Fu & Avdelidis, 2023; Gunning et al., 2019; Hasib et al., 2023).

7. FUTURE RESEARCH DIRECTIONS

Several research trends are shaping the future of AI-based aircraft maintenance. These developments indicate a move away from isolated prediction models toward more integrated and intelligent maintenance systems. Digital twin-based maintenance is a key research area. Digital twins create virtual representations of aircraft systems that are continuously updated with sensor data. This allows continuous health monitoring, failure prediction, and evaluation of different maintenance scenarios before actions are taken, supporting more proactive maintenance planning (Kabashkin, 2025; Tao et al., 2018).

Federated and collaborative learning approaches are gaining attention as solutions to data scarcity and privacy constraints. By enabling multiple airlines or fleets to jointly train predictive models without sharing raw data, these methods improve model robustness while preserving data confidentiality. Such frameworks are particularly well suited for aviation, where failure data are rare and sensitive, and regulatory restrictions limit data sharing (Fu & Avdelidis, 2023; Li et al., 2020).

Edge AI and real-time analytics represent another important direction. Deploying lightweight AI models closer to the data source, such as onboard aircraft systems or edge computing platforms, reduces communication latency and dependence on ground infrastructure. This enables faster anomaly

detection and near-real-time health assessment, which is critical for time-sensitive maintenance decisions and operational resilience (Kabashkin & Shoshin, 2024; Shi et al., 2016).

Research is also moving toward autonomous and prescriptive maintenance decision systems. In these systems, AI-based health predictions are combined with optimization, logistics, and scheduling algorithms to automatically recommend maintenance actions, spare parts allocation, and task prioritization. While full autonomy remains limited by certification constraints, such systems offer significant potential to reduce human workload and improve maintenance efficiency (Kabashkin et al., 2025; Meissner et al., 2021).

Finally, human-centered and XAI is increasingly recognized as essential for practical deployment. Future maintenance systems must not only deliver accurate predictions but also provide clear and understandable explanations for their outputs. This is necessary to build trust among maintenance personnel and to meet regulatory requirements for transparency, traceability, and accountability (Gunning et al., 2019; Hasib et al., 2023).

Overall, these research directions indicate a clear transition from isolated PdM models toward integrated, adaptive, and intelligent maintenance ecosystems, where AI supports both technical decision-making and human operators across the entire aircraft lifecycle.

8. CONCLUSION

Artificial intelligence has become a transformative enabler for AHM and PdM, offering significant improvements in safety, reliability, and operational efficiency. By leveraging large-scale sensor data, maintenance records, and operational

context, AI-based systems enable early fault detection, accurate Remaining Useful Life estimation, and optimized maintenance planning.

This review has presented a comprehensive overview of AI techniques applied to aviation maintenance, covering data sources, modeling approaches, challenges, regulatory considerations, and future research directions. While substantial progress has been achieved, critical challenges remain in data quality, model generalization, interpretability, and certification.

Addressing these challenges requires interdisciplinary collaboration among data scientists, maintenance engineers, aircraft manufacturers, and regulatory authorities. With continued advances in explainable AI, digital twins, and collaborative learning frameworks, AI-driven PdM is poised to become a cornerstone of next-generation aviation operations.

REFERENCES

- Adhikari, P. P., & Buderath, M. (2016). A framework for aircraft maintenance strategy including CBM. PHM Society European Conference,
- Airbus. (2022). *In-flight health monitoring*.
https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-07-in-flight-health-monitoring?utm_source=chatgpt.com
- Ali Emre, U. (2024). *Havacilikta kestirimci bakimin onemi*.
<https://www.uted.org/havacilikta-kestirimci-bakimin-onemi>
- Dagal, I., Erol, B., Mbasso, W. F., Harrison, A., Demirci, A., & Cali, U. (2025). A data-driven approach to aircraft engine MRO using enhanced ANNs based on FMECA. *IEEE Access*.
- Dangut, M. D., Jennions, I. K., King, S., & Skaf, Z. (2023). A rare failure detection model for aircraft predictive maintenance using a deep hybrid learning approach. *Neural Computing and Applications*, 35(4), 2991-3009.
- EASA. (2020). *Artificial Intelligence Roadmap 1.0: A human-centric approach to AI in aviation*.
- Emergen Research. (2025). *Commercial Aircraft Health Monitoring Systems Market*.
<https://www.emergenresearch.com/industry-report/commercial-aircraft-health-monitoring-systems-market>
- Fu, S., & Avdelidis, N. P. (2023). Prognostic and health management of critical aircraft systems and components: An overview. *Sensors*, 23(19), 8124.

- Gholipour, Y. (2025). A Comprehensive Review of Maintenance Strategies: From Reactive to Proactive Approaches. Available at SSRN 5349871.
- Gunning, D., Stefik, M., Choi, J., Miller, T., Stumpf, S., & Yang, G.-Z. (2019). XAI—Explainable artificial intelligence. *Science robotics*, 4(37), eaay7120.
- Hasib, A. A., Rahman, A., Khabir, M., & Shawon, M. T. R. (2023). An interpretable systematic review of machine learning models for predictive maintenance of aircraft engine. *arXiv preprint arXiv:2309.13310*.
- IATA. (2023). *Airline Maintenance Cost Executive Commentary: FY2023* Data https://www.iata.org/contentassets/bf8ca67c8bcd4358b3d004b0d6d0916f/fy2023-mcx-report_public.pdf
- Kabashkin, I. (2025). AI and Evolutionary Computation for Intelligent Aviation Health Monitoring. *Electronics*, 14(7), 1369.
- Kabashkin, I., Fedorov, R., & Perekrestov, V. (2025). Decision-making framework for aviation safety in predictive maintenance strategies. *Applied Sciences*, 15(3), 1626.
- Kabashkin, I., & Shoshin, L. (2024). Artificial intelligence of things as new paradigm in aviation health monitoring systems. *Future Internet*, 16(8), 276.
- Kabashkin, I., & Susanin, V. (2024). Unified ecosystem for data sharing and AI-driven predictive maintenance in aviation. *Computers*, 13(12), 318.
- Kosova, F., Altay, Ö., & Ünver, H. Ö. (2025). Structural health monitoring in aviation: a comprehensive review and future directions for machine learning. *Nondestructive testing and evaluation*, 40(1), 1-60.

- Kushan, M. C., & Diltemiz, S. F. (2025). Aircraft Health Monitoring Systems (AHMS) Applications in Aviation.
- Landau, D., de Pater, I., Mitici, M., & Saurabh, N. (2025). Federated learning framework for collaborative remaining useful life prognostics: an aircraft engine case study. *Future Generation Computer Systems*, 107945.
- Li, T., Sahu, A. K., Talwalkar, A., & Smith, V. (2020). Federated learning: Challenges, methods, and future directions. *IEEE signal processing magazine*, 37(3), 50-60.
- Meissner, R., Rahn, A., & Wicke, K. (2021). Developing prescriptive maintenance strategies in the aviation industry based on a discrete-event simulation framework for post-prognostics decision making. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107812.
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. Elsevier.
- SAE. (2021). ARP6983: Process for Addressing Artificial Intelligence in Aerospace Systems. In.
- Scott, M. J., Verhagen, W. J., Bieber, M. T., & Marzocca, P. (2022). A systematic literature review of predictive maintenance for defence fixed-wing aircraft sustainment and operations. *Sensors*, 22(18), 7070.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE internet of things journal*, 3(5), 637-646.
- Stanton, I., Munir, K., Ikram, A., & El-Bakry, M. (2023). Predictive maintenance analytics and implementation for aircraft: Challenges and opportunities. *Systems Engineering*, 26(2), 216-237.

- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Verhagen, W. J., Santos, B. F., Freeman, F., van Kessel, P., Zarouchas, D., Loutas, T., Yeun, R. C., & Heiets, I. (2023). Condition-based maintenance in aviation: challenges and opportunities. *Aerospace*, 10(9), 762.

TÜRKİYE VE DÜNYADA
UÇAK-HAVACILIK-UZAY MÜHENDİSLİĞİ

yaz
yayınları

YAZ Yayınları
M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar / AFYONKARAHİSAR
Tel : (0 531) 880 92 99
yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com