CONTEMPORARY APPROACHES IN AVIATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY, EDUCATION, AND MANAGEMENT

Editor:
Assistant Professor Dr. YASİN ÖZCAN



BİDGE Yayınları

Contemporary Approaches in Aviation and Aerospace Technology, Education, And Management

Editör: YASİN ÖZCAN

ISBN: 978-625-5057-31-0

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

Preface

Aerospace engineering is a continuously developing field that combines many disciplines, such as engineering, technology, management and education. Development in the field is driven by advances in autonomous systems, advanced engineering materials and aviation operations. New engineering education methods, as well as global political and economic changes, directly influence the future of the sector.

The book "Contemporary Approaches in Aviation and Aerospace: Technology, Education, and Management" covers various topics in aviation and aerospace. It includes chapters on cost resilience in airline operations concerning geopolitical risks, human-centered design for future autonomous aviation systems, the impact of composite materials on unmanned aerial vehicles (UAVs), and innovative educational strategies in aerospace engineering to better equip future engineers.

We hope this book proves valuable to academics, researchers, students, and professionals working in the field of aerospace engineering. We extend our gratitude to all the authors for their contributions and for sharing their work in this volume. We also hope that these sections will encourage further research and provide useful information for those interested in the future of the aerospace sector.

Editor
Assistant Professor Yasin ÖZCAN
Kastamonu University

İÇİNDEKİLER

HAVACILIK YÖNETİMİNDE JEOPOLİTİK RİSKLERE KARŞI MALİYET DAYANIKLILIĞI: HAVAYOLU OPERASYONLARINDA ÖNLEYİCİ VE TEPKİSEL YAKLAŞIMLAR 1

FATİH KARAMAN

HUMAN CENTERED DESIGN PRINCIPLES FOR FUTURE AUTONOMOUS AVIATION SYSTEMS 48

TOLUNAY DAĞ, TARIK GÜNEŞ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN KOMPOZİTLER 91

BEKTAŞ AKGÜL, CİHAT AYDIN

INNOVATIVE TEACHING AND LEARNING STRATEGIES IN AEROSPACE ENGINEERING EDUCATION 127

TARIK GÜNEŞ, TOLUNAY DAĞ

BÖLÜM 1

HAVACILIK YÖNETİMİNDE JEOPOLİTİK RİSKLERE KARŞI MALİYET DAYANIKLILIĞI: HAVAYOLU OPERASYONLARINDA ÖNLEYİCİ VE TEPKİSEL YAKLAŞIMLAR

Fatih KARAMAN[1]

Giriş

Havayolu taşımacılığı, ekonomik faaliyetlerin, uluslararası ticaretin ve küresel hareketliliğin önemli unsurlarından biri olmakla birlikte, ulusal sınırların ötesinde faaliyet göstermesi nedeniyle ekonomik, politik ve operasyonel gelişmelere karşı yüksek düzeyde duyarlıdır. Uçuş planlaması, filo kullanımı, güzergâh belirleme, yakıt tedariki, mürettebat ve bakım faaliyetleri ile havalimanı kullanımı gibi operasyonel kararlar, işletme içi koşulların yanı sıra dış çevredeki gelişmelerden de etkilenmektedir. Özellikle savaşlar, bölgesel çatışmalar, hava sahalarının kapatılması, yaptırımlar, diplomatik gerilimler ve siyasi istikrarsızlıklar, mevcut operasyon planlarının değiştirilmesine ve maliyet yapılarında yeni baskıların oluşmasına yol açabilmektedir.

[1] Dr. Öğr. Üye., İstanbul Medipol Üniversitesi, Havacılık Yönetimi Bölümü, Orcid: 0000-0001-5915-8054

Jeopolitik risklerin havacılık sektörü açısından önemi, yalnızca güvenlik ve ulaşım sorunları yaratmalarından değil, operasyonel süreçlerin birçok unsurunu eş zamanlı etkileyebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Hava sahalarının kullanılamaması; uçuş güzergâhlarının değiştirilmesi, uçuş sürelerinin uzaması, alternatif havalimanlarının kullanılması ve operasyonel kaynakların yeniden tahsis edilmesi gibi sonuçlar doğurabilmektedir. Liao et al. (2025), 2018–2024 dönemindeki uluslararası havayolu programlarını inceleyerek Rusya hava sahasının kapanmasının havayollarını daha uzun güzergâhlar kullanmaya yönelttiğini ve işletmelerin ağ yapılarını yeniden düzenlediğini ortaya koymuşlardır. Bu durum, jeopolitik gelişmelerin uçuşların yanı sıra havayolu ağ ve operasyon planlamasını da değiştirebildiğini göstermektedir.

Jeopolitik risklerin maliyetler üzerindeki etkisi özellikle hava sahası kısıtlamaları ve güzergâh değişiklikleri üzerinden görülmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı sonrasında Avrupa-Asya uçuşlarında Rusya hava sahasının kullanılamaması, güzergâhların uzamasına ve operasyonel maliyetlerin artmasına neden olmuştur. Ennen & Wozny (2024), hava sahası kapanmalarının Avrupa-Asya uçuşlarında önemli sapmalara yol açarak seyahat sürelerini ve operasyonel maliyetleri artırdığını ortaya koymuştur. Ayrıca uçuş süresindeki her ilave dakikanın ortalama ücretlerdeki artışla ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Hava sahası kısıtlamaları yakıt tüketimi ve çevresel maliyetleri de artırabilmektedir. Dannet et al. (2025), çatışmalar nedeniyle uygulanan hava sahası kısıtlamalarının küresel havacılık üzerindeki etkisini incelemiş ve Rusya hava sahasının Batılı havayollarına kapanmasının özellikle Avrupa ve Doğu Asya arasındaki uçuşlarda önemli güzergâh sapmalarına neden olduğunu belirlemiştir. Etkilenen güzergâhlarda ortalama yakıt tüketimi %13 artarken, Avrupa ile ilişkili uçuşlarda bu artış %14,8'e ulaşmıştır. Bu

bulgular, jeopolitik risklerin maliyet yapısında özellikle yakıt tüketimi ve uçuş süresi üzerinden doğrudan baskı oluşturabildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte maliyet baskısı sadece yakıt giderleriyle sınırlı görülmemelidir. Güzergâh değişikliklerinin uçuş sürelerini uzatması; uçak kullanım süreleri, bakım planlaması, mürettebat çalışma süreleri, havaalanı ve hava seyrüsefer ücretleri, yedek uçak ihtiyacı ve bağlantılı uçuşların planlanması gibi maliyet unsurlarını da etkileyebilmektedir. Ayrıca tedarik zincirlerindeki bozulmalar, uçak ve motor parçalarına erişimin zorlaşması ve lojistik faaliyetlerdeki aksamalar, operasyonel süreklilik ile maliyet kontrolünü güçleştirmektedir. Dolayısıyla jeopolitik risklerin etkisi yalnızca ortaya çıkan ek maliyetler üzerinden değil, işletmenin bu maliyetleri yönetebilme kapasitesi üzerinden değerlendirilmelidir.

Bu bağlamda havacılık yönetimi açısından "maliyet dayanıklılığı" kavramı önem kazanmaktadır. Bu çalışma kapsamında maliyet dayanıklılığı, havayolu işletmesinin beklenmeyen ve maliyet artırıcı dışsal gelişmeler karşısında operasyonlarını sürdürebilmesi, maliyet baskılarını kontrol edebilmesi ve gerekli durumlarda kaynaklarını yeniden düzenleyebilmesi kapasitesi olarak ele alınmaktadır. Kavram, geleneksel maliyet azaltma yaklaşımından farklı olarak kriz koşullarında maliyetlerin nasıl yönetileceğine ve işletmenin değişen koşullara uyum kapasitesine odaklanmaktadır. Hiney et al. (2025), havalimanlarının belirsizlik ve kriz dönemlerinde operasyonlarını ve ticari faaliyetlerini sürdürebilme kapasitesinin süreçlerin geliştirilmesi, operasyonel verimliliğin artırılması ve paydaş ilişkilerinin güçlendirilmesiyle desteklenebileceğini belirtmektedir.

Havayolu işletmelerinde maliyet dayanıklılığının geliştirilmesinde iki temel yönetim yaklaşımı öne çıkmaktadır. İlki, jeopolitik risk gerçekleşmeden önce hazırlık yapılmasını ifade eden önleyici yaklaşımdır. Alternatif uçuş güzergâhlarının belirlenmesi,

farklı havalimanlarının değerlendirilmesi, tedarik kaynaklarının çeşitlendirilmesi, filo ve kapasite esnekliğinin geliştirilmesi, maliyet baskılarının izlenmesi ve kriz senaryolarının hazırlanması bu kapsamda değerlendirilebilir. Bu yaklaşımın amacı, risk gerçekleştiğinde işletmenin hazırlıksız yakalanmasını ve kararların yalnızca kriz koşullarının baskısıyla alınmasını önlemektir.

İkinci yaklaşım, jeopolitik risk gerçekleştikten sonra ortaya çıkan koşullara uyum sağlamaya yönelik tepkisel yönetimdir. Hava sahasının kapanması veya uçuş kısıtlamaları sonrasında güzergâhların değiştirilmesi, uçuşların yeniden planlanması, sefer sıklığının düzenlenmesi, alternatif havalimanlarının devreye alınması ve kapasitenin yeniden dağıtılması bu kapsamda ele alınabilir. Liao et al. (2025) tarafından ortaya konulan bulgular, Rusya hava sahasının kapanması sonrasında havayollarının daha uzun güzergâhlar kullanarak operasyon ağlarını yeniden düzenlediğini göstermektedir. Dolayısıyla jeopolitik risklerin havayolu işletmeleri açısından değerlendirilmesinde yalnızca maliyet artışına odaklanmak yeterli değildir. İşletmelerin maliyet artırıcı dışsal şokları ne ölçüde öngörebildiği, bunlara karşı nasıl hazırlandığı ve risk gerçekleştiğinde operasyonel ve finansal kaynaklarını nasıl yeniden düzenlediği de önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, maliyet yönetimini statik bir gider azaltma faaliyetinden çıkararak belirsizlik ve kriz koşullarında operasyonel sürekliliği korumaya yönelik stratejik bir yönetim konusu hâline getirmektedir.

Çalışmada havacılık yönetimi perspektifinden jeopolitik riskler ile maliyet dayanıklılığı arasındaki ilişki, kavramsal olarak incelenerek havayolu operasyonlarında uygulanabilecek önleyici ve tepkisel yönetim yaklaşımları değerlendirilecektir. Bu doğrultuda jeopolitik risk kavramı ve bu risklerin sivil havacılığa yansımaları ele alınacak; ardından havayolu operasyonlarının temel maliyet yapısı ve jeopolitik gelişmelerin oluşturduğu maliyet baskıları incelenecektir. Sonraki bölümlerde maliyet dayanıklılığı

açıklanarak, risk öncesinde uygulanabilecek önleyici stratejiler ile risk sonrasında uygulanabilecek tepkisel stratejiler karşılaştırmalı biçimde değerlendirilecektir. Çalışmada belirli bir havayolu işletmesinin maliyet performansını ölçmek yerine, jeopolitik belirsizliklerin havayolu operasyonlarında oluşturduğu maliyet baskılarının ve bu baskılara karşı geliştirilebilecek yönetim yaklaşımlarının ortaya konulması amaçlanmaktadır. Böylece havayolu işletmelerinin krizlere yalnızca tepki veren değil, jeopolitik risklere önceden hazırlanan ve maliyet yapısını değişen koşullara uyarlayabilen bir yönetim anlayışına duyduğu gereksinim ortaya konulacaktır.

Jeopolitik Risk Kavramı ve Sivil Havacılık Sektörüne Yansımaları

Jeopolitik risk, devletler arasındaki siyasal gerilimler, çatışmalar, savaşlar ve uluslararası güvenlik sorunlarının ekonomik faaliyetler üzerindeki belirsizlik ve tehditlerini ifade eden çok boyutlu bir risk türüdür. Caldara & Iacoviello'ya (2022: 4) göre jeopolitik risk, savaşlar, terörizm ve devletler arasındaki her türlü gerginlik gibi olumsuz olayların tehdit oluşturması, meydana gelmesi ve tırmanmasıyla ilgili olarak, uluslararası ilişkilerin huzurlu seyrine etki eden bir kavram olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram yalnızca gerçekleşmiş çatışmaları değil, bunların ortaya çıkma ve tırmanma ihtimalini de kapsamaktadır. Geliştirdikleri Jeopolitik Risk (GPR) Endeksi, jeopolitik gelişmelerin ekonomik faaliyet üzerindeki etkilerini ölçen kapsamlı bir gösterge niteliğindedir. Çalışmada jeopolitik riskteki artışların yatırım ve istihdam üzerinde olumsuz sonuçlarla ilişkili olduğu ortaya konulmuştur (Caldara & Iacoviello, 2022). Jeopolitik tehditler para birimlerine büyük etkiler yaparak mali ve para politikalarına ilişkin öngörüleri değiştirebilir. Glick & Taylor'a (2010: 102) göre savaşlar, terör eylemleri ve çatışmalar genellikle tam ya da kısmi ticaret ambargolarının ardından, uluslararası ticareti azaltma eğilimi

gösterebilir. Dolayısıyla bu tür gelişmeler ticaret akışları üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir.

Sivil havacılık açısından jeopolitik riskin önemi, sektörün uluslararası siyasi, ekonomik ve hukuki sistemlerle doğrudan bağlantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Havayolu işletmeleri; faaliyet gösterdikleri veya üzerinden geçtikleri ülkelerin hava sahası politikaları, güvenlik koşulları, seyahat düzenlemeleri ve ekonomik yaptırımlardan etkilenmektedir. Bu nedenle jeopolitik gelişmeler; uçuş rotalarının, yakıt tüketiminin, yolcu talebinin, uçuş ağının ve finansal performansın üzerinde sonuçlar doğurabilmektedir. Nitekim Cai et al. (2025), Avrupa'daki büyük havayolu işletmelerinde jeopolitik riskler ile havayolu hisse getirileri arasındaki ilişkinin dönemlere göre değişebildiğini ortaya koymuşlardır.

Savaşlar ve bölgesel çatışmalar, jeopolitik risklerin sivil havacılığa en doğrudan yansıyan unsurları arasındadır. Etkileri çatışma bölgesiyle sınırlı kalmayarak hava sahalarının kullanılamaması, uçuş rotalarının değiştirilmesi, seyahat talebindeki değişimler ve yaptırımlar yoluyla farklı ülke ve havayolu işletmelerine yayılabilmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı bu durumun önemli bir örneğidir. Rusya ve Ukrayna hava sahalarının kapanması, uluslararası uçuşların alternatif rotalara yönelmesine ve buna bağlı olarak uçuş mesafeleri ile taşıma maliyetlerinin artmasına neden olmuştur. Chu et al. (2024), 1 milyondan fazla uluslararası uçuş hareketini içeren veriler üzerinden gerçekleştirdikleri analizde, çatışmanın uçuş güzergâhlarında önemli değişiklikler yarattığını; küresel uluslararası uçuşların %6,23'ünde uçuş maliyetinin anlamlı biçimde arttığını ve bu uçuşlarda ortalama maliyet artışının %13,32 olduğunu belirlemişlerdir.

Savaşların etkileri uçuş maliyetlerinin yanı sıra yolcu talebi, kapasite kullanımı ve güzergâh kararlarında da görülmektedir. Cho et al. (2023), siyasi çatışmaların havayolu talebi ve operasyonel performansı üzerinde etkili olduğunu ve farklı havayolu iş

modellerinin kriz koşullarına farklı tepkiler verebildiğini göstermiştir. Ayrıca çatışma bölgelerindeki güvenlik riski, rota kararlarında önemli bir unsur hâline gelmektedir. Bukhman et al. (2024), çatışma bölgelerinde sivil uçakların düşürülme riskinin veri temelli yöntemlerle değerlendirilmesi gerektiğini ve çatışmanın türü ile yoğunluğunun tehdidin düzeyini etkileyebildiğini ortaya koymuşlardır.

Hava sahası kısıtlamaları, jeopolitik gelişmelerin havayolu operasyonlarına doğrudan yansıdığı temel mekanizmalardan biridir. Devletler güvenlik, siyasi gerilim veya askeri çatışma nedeniyle hava sahalarının tamamını ya da belirli bölümlerini sivil uçuşlara kapatabilmekte veya belirli ülkelere ait havayollarının kullanımını sınırlandırabilmektedir. Bu durum, işletmeleri alternatif güzergâhlara ve yeniden düzenlenmiş uçuş planlarına yöneltmektedir. Hava sahasının kapanmasının başlıca sonuçlarından biri uçuş mesafesi ve süresinin artmasıdır. Daha uzun güzergâhlar özellikle yakıt tüketimini ve uçuşla ilişkili maliyetleri artırırken, uçak kullanım süreleri ve operasyonel planlamayı da etkileyebilmektedir. Chu et al. (2024), Rusya ve Ukrayna hava sahalarının kapanmasının küresel uçuş güzergâhlarında önemli sapmalara ve maliyet artışlarına yol açtığını ortaya koymuştur. Hava sahası kısıtlamaları havayolu ağlarının yapısını da değiştirebilmektedir. Liao et al. (2025), 2018–2024 dönemindeki uluslararası uçuş programlarını inceleyerek Rus hava sahasının kapanmasının havayollarını daha uzun güzergâhlara yönelttiğini ve ağ yapısında değişiklikler meydana getirdiğini belirlemiştir. Dolayısıyla hava sahası kısıtlamaları, jeopolitik riskin rota, uçuş süresi, yakıt tüketimi ve ağ bağlantıları üzerinden havayolu işletmelerine aktarılmasında doğrudan bir kanal oluşturmaktadır.

Ekonomik yaptırımlar, belirli ülke, şirket veya ekonomik faaliyetlere yönelik kısıtlamalar aracılığıyla havayolu işletmelerini etkileyen önemli bir jeopolitik risk unsurudur. Havacılık sektöründe

yaptırımlar; uçuş yasakları, hava sahasına erişim kısıtlamaları, ticari işlemlerin sınırlandırılması ve uluslararası ulaşım bağlantılarının azaltılması şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı sonrasında uygulanan yaptırımlar bu ilişkinin önemli bir örneğini oluşturmaktadır. Grimme et al. (2024), Batılı ülkelerin Rus havayollarına yönelik uçuş yasakları ve diğer kısıtlamalarının ardından Rusya'nın da 36 ülkenin havayollarına hava sahası kısıtlamaları uyguladığını belirtmektedir. Bu gelişmeler Rusya'nın uluslararası hava trafiğinin yönünde önemli değişikliklere yol açmış; Batı Avrupa ve Kuzey Amerika ile bağlantılar azalırken yaptırım uygulamayan Orta Asya, Körfez ülkeleri ve Türkiye gibi pazarlara yönelik hava trafiği artmıştır.

Yaptırımlar ayrıca yolcu talebi ve gelirler üzerinde de etkili olabilmektedir. Belirli ülke veya destinasyonlara erişimin sınırlandırılması, doğrudan uçuşların ortadan kalkmasına ve yolcuların alternatif güzergâhlara yönelmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle yaptırımlar, havayolu işletmelerinin operasyonlarının yanı sıra uluslararası pazar bağlantılarını ve gelir kaynaklarını da etkileyebilmektedir.

Diplomatik krizler, silahlı çatışmaya dönüşmeden de sivil havacılık faaliyetlerini etkileyebilmektedir. Devletler arasındaki siyasi gerilimler; uçuş izinleri, hava sahası kullanımı, seyahat düzenlemeleri ve destinasyonlara yönelik yolcu talebinde değişikliklere yol açabilmektedir. Bu nedenle diplomatik krizlerin etkileri güvenlik risklerinin yanı sıra belirsizlik ve talep değişimleri üzerinden de ortaya çıkmaktadır. Cho et al. (2023), Çin ve Güney Kore arasındaki siyasi gerilim bağlamında havayolu işletmelerinin uçuş sayısı ve koltuk kapasitesinde değişiklikler meydana geldiğini ve siyasi çatışmaların havayolu performansını etkileyebildiğini göstermiştir. Bu sonuçlar, diplomatik krizlerin uçuş planlama ve kapasite yönetimini etkileyen bir işletme faktörü olduğunu ortaya koymaktadır.

Diplomatik krizlerin etkileri her zaman doğrudan ve ani olmayabilmektedir. Siyasi gerilimin artması yolcu talebinde belirsizlik yaratırken, krizin devam etmesi havayollarının kapasite ve destinasyon kararlarını değiştirebilmektedir. Böylece diplomatik gelişmeler zaman içerisinde havayolu ağının ve operasyonel faaliyetlerin yeniden şekillenmesine neden olabilmektedir.

Jeopolitik risklerin havayolu işletmelerine etkileri; operasyonel faaliyetler, maliyetler, yolcu talebi, uçuş ağı ve finansal performans gibi birbiriyle ilişkili alanlarda ortaya çıkmaktadır. Hava sahalarının kapanması veya güzergâhların değiştirilmesi, uçuş mesafesi ve sürelerini artırarak operasyonel maliyetleri yükseltebilmektedir. Rusya-Ukrayna savaşı üzerine yapılan araştırmalar, bu etkinin küresel hava taşımacılığında ölçülebilir boyutlara ulaşabildiğini göstermektedir (Chu et al., 2024). Jeopolitik riskler aynı zamanda havayolu ağlarının yapısını değiştirebilmektedir. Hava sahası kısıtlamaları veya diplomatik gelişmeler nedeniyle belirli güzergâhların kullanılamaması, havayollarını alternatif rotalara ve bağlantı noktalarına yöneltebilmektedir. Liao et al. (2025), Rus hava sahasının kapanmasının daha uzun rotaların kullanılmasına ve ağ özelliklerinin değişmesine yol açtığını ortaya koymuşlardır. Bunun yanında siyasi çatışmalar belirli destinasyonlara yönelik seyahat talebini azaltarak uçuş sayısı ve kapasite kullanımını etkileyebilmektedir. Cho et al. (2023), siyasi çatışmaların havayolu talebi ve performansı üzerinde etkili olabildiğini göstermektedir. Son olarak jeopolitik riskler finansal performansa da yansıyabilmektedir. Cai et al. (2025), Avrupa'daki başlıca havayolu işletmelerinde jeopolitik riskler ile hisse getirileri arasındaki ilişkinin zaman içerisinde değişebildiğini ortaya koymuşlardır.

Sonuç olarak savaşlar, bölgesel çatışmalar, hava sahası kısıtlamaları, ekonomik yaptırımlar ve diplomatik krizler, havayolu işletmelerini farklı kanallar üzerinden etkileyen temel jeopolitik risk

unsurlarıdır. Bu risklerin ortak özelliği, işletmelerin doğrudan kontrolü dışında ortaya çıkmaları ve operasyonlardan maliyetlere, uçuş ağlarından yolcu talebine kadar birden fazla alanı eş zamanlı etkileyebilmeleridir. Bu nedenle jeopolitik riskler, sivil havacılık sektöründe yalnızca güvenlik veya dış politika konusu değil, aynı zamanda havayolu işletmelerinin operasyonel ve ekonomik faaliyetlerini etkileyen önemli bir işletme riski olarak değerlendirilmelidir.

Havayolu Operasyonlarında Maliyet Yapısı ve Maliyet Baskıları

Havayolu taşımacılığı; yüksek sermaye gereksinimi, kapasitenin kısa dönemde sınırlı ölçüde değiştirilebilmesi, çok sayıda operasyonel faaliyetin eş zamanlı yürütülmesi ve dışsal şoklara duyarlılığı nedeniyle maliyet yönetiminin kritik olduğu bir sektördür. Havayolu işletmelerinin maliyet yapısı yakıt, işgücü, uçak sahipliği ve kiralama, bakım, havalimanı ve hava seyrüsefer hizmetleri, sigorta, yer hizmetleri ve diğer operasyonel giderlerden oluşmaktadır (Belobaba et al., 2015; Doganis, 2010; Flouris et al., 2009). Bu maliyetlerin bir bölümü kapasite ve uçuş hacmine bağlı olarak değişirken, bazıları kısa dönemde daha katı bir yapı göstermekte ve uçuşların azaltılması veya iptali durumunda tamamen ortadan kalkmamaktadır.

Öncü et al.'a (2010: 50) göre sabit maliyetler, hava aracının kullanımına bağlı olarak değişmeyen, hava aracına ait katı giderler, ekiplerin sabit harcamaları, bakım sözleşmelerinin sabit masrafları ve sigorta harcamalarının sabit giderleri şeklinde alt başlıklara ayrılmaktadır. Bu masraflara genel yönetim masrafları, genel sigorta masrafları, genel kira masrafları ve amortismanlar da eklenmesi, yaygın olarak karşılaşılan uygulamalar arasında bulunmaktadır. Değişken maliyetler, çalışanların seyahat, eğitim, fazla mesai ve harcırah gibi masraflarının yanı sıra, hava araçlarının uçuş süreleri

ile döngülerine göre hesaplanan giderleri ve parça değişim masraflarını kapsamaktadır. Ayrıca, hava araçlarının uçuşları esnasında eklenen yakıt, yer hizmetleri, yemek servisi, üst geçiş ücretleri, havalimanı yolcu vergileri ve havalimanında konma ya da konaklama masrafları gibi tüm ödemeleri de içermektedir. Vasigh et al.'a (2019: 37) göre, işletme ve operasyon masrafları; uçak giderleri, havayolu işletme giderleri, yakıt masrafları, çalışan masrafları, bakım masrafları, iniş ücretleri ve diğer organizasyonel giderler; yolcu ve yük taşıma işlemleri sırasında ortaya çıkan masraflar olarak tanımlanmaktadır. Aslında işletme faaliyetleri sabit ve değişken olarak sınıflandırılmaktadır, ancak tüm havayolu firmaları bunları esas faaliyetlerinin hesaplama yöntemi olarak görmekte ve değerlendirmektedirler. Maliyetlerin büyüklüğü ve bileşimi dönemsel ve bölgesel koşullara göre değişebilmektedir. IATA verilerine göre 2022 yılında uçak yakıtı ve yağ giderleri küresel havayolu maliyetlerinin %28,7'sini oluştururken; amortisman ve itfa giderleri %9,1, uçuş personeli maaş ve giderleri ise %8,6 düzeyinde gerçekleşmiştir (IATA, 2024a). Bununla birlikte yakıt fiyatları, ücretler, bakım kapasitesi, uçak teslimatları ve döviz hareketleri maliyet kalemlerinin göreli ağırlığını değiştirebilmektedir. IATA'nın güncel tahminlerinde işgücü maliyetlerinin toplam maliyetler içinde en büyük kalem hâline geldiği, bakım ve uçak sahipliği maliyetlerinin de yükseldiği belirtilmektedir (IATA, 2025).

Bu değişken yapı, jeopolitik riskler açısından önem taşımaktadır. Savaşlar, çatışmalar, hava sahası kısıtlamaları, yaptırımlar ve diplomatik gerilimler yalnızca tek bir maliyet kalemini değil; havayolunun ağ yapısını, filo kullanımını, uçuş planlarını, mürettebat planlamasını ve tedarik süreçlerini eş zamanlı etkileyebilmektedir. Dolayısıyla jeopolitik risklerin maliyet etkisi, doğrudan gider artışlarının yanı sıra bir maliyet kalemindeki değişimin diğer operasyonel maliyetleri tetiklemesi şeklinde de

ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle maliyet dayanıklılığının değerlendirilmesinde maliyetler arasındaki karşılıklı etkileşimler dikkate alınmalıdır.

Yakıt maliyetleri, havayolu işletmelerinin en önemli ve piyasa koşullarına en duyarlı gider kalemlerinden biridir. Jet yakıtı fiyatları ham petrol fiyatları, rafineri kapasitesi, küresel arz-talep dengesi, enerji piyasaları ve jeopolitik risklerden etkilenmektedir (IATA, 2024b). IATA'nın 2025 yılı tahminlerinde jet yakıtının toplam havayolu işletme giderleri içindeki payının %25,8 olması beklenmiştir (IATA, 2025). Hava taşımacılığı yapan şirketler oldukça hareketli bir sektörde yer almaktadırlar. Bu şirketler, uluslararası düzeyde çalışarak küreselleşmenin yan etkilerini derinlemesine deneyimlemektedirler. Sürekli değişim gösteren havacılık endüstrisinde yer almak isteyen havayolu firmaları, diğer firmalarla birleşmeler ya da satın almalar gerçekleştirip, küresel iş birlikleri (One World, Star Alliance ve Sky Team) için girişimlerde bulunmaktadırlar. Kristjanpoller & Concha'ya (2016: 497) göre dünya genelindeki ekonomik dalgalanmaların etkileri havayolu firmalarına da ulaşmakta ve özellikle yakıt maliyetlerindeki dalgalanmalar, bu şirketlerin harcama bütçelerinde büyük artışlara sebep olmaktadır.

Jeopolitik riskler yakıt maliyetlerini iki temel kanaldan etkilemektedir. İlki, enerji arzı ve petrol fiyatları üzerinden ortaya çıkan doğrudan fiyat etkisidir. Enerji üretim bölgelerindeki çatışmalar ve taşımacılığı etkileyen güvenlik sorunları, arz ve fiyat belirsizliğini artırabilmektedir. İkinci kanal ise hava sahası kısıtlamaları nedeniyle rotaların uzamasıdır. Alternatif güzergâhların kullanılması uçuş mesafesi ve süresini artırarak yakıt tüketimini yükseltebilmektedir. EUROCONTROL verileri, hava sahası kapasite sorunlarının dahi daha uzun rotalara, daha yüksek yakıt tüketimine ve operasyonel maliyetlere yol açabildiğini göstermektedir (EUROCONTROL, 2024). Çatışma bölgelerine

ilişkin ICAO (2023) yaklaşımı da güvenlik değerlendirmeleri doğrultusunda rota planlarının yeniden düzenlenmesi gerektiğinden bahsetmektedir. Dolayısıyla jeopolitik kaynaklı yakıt maliyeti baskısı yalnızca yakıt fiyatındaki artıştan ibaret değildir. Rota ve uçuş süresindeki uzama, uçuş başına yakıt tüketimini artırırken uçak kullanımı, mürettebat planlaması ve bağlantılı uçuşların zamanlaması üzerinde de ikincil maliyetler yaratabilmektedir.

İşgücü maliyeti, Ay'a (2012: 326) göre iki ana unsurdan meydana gelmektedir. Bunlar istihdam vergileri ve ücretlerdir. Bununla beraber işsizlik ile işgücü maliyeti arasında genel anlamda olumlu bir ilişki bulunmaktadır. İşgücü maliyetleri yükseldikçe, işgücü talebi düşüş göstermektedir. İşgücü maliyetlerini azaltmak, Karabulut'a (2007: 25) göre istihdam üzerinde oldukça faydalı etkiler yaratmaktadır. Onaran & Aydıner-Avsar'a (2006: 1) göre yüksek işgücü maliyetleri, özellikle iş gücü yoğun sektörlerde işgücü talebini azaltarak, işsizlik oranını artırabilmektedir. İşgücü maliyetleri; pilotlar, kabin ekipleri, bakım personeli, yer hizmetleri ve idari personel gibi insan kaynağına ilişkin giderleri kapsamaktadır. Ücret baskıları ve nitelikli personel arzındaki kısıtlar nedeniyle bu maliyetlerin ağırlığı son yıllarda artmıştır. IATA'nın değerlendirmesine göre işgücü maliyetlerinin 2026 yılında toplam havayolu maliyetlerinin yaklaşık %28'ini oluşturması beklenmektedir (IATA, 2025). Jeopolitik riskler işgücü maliyetlerini çoğunlukla operasyonel kanallar üzerinden etkilemektedir. Hava sahalarının kapanması veya rotaların uzaması, uçuş sürelerini ve mürettebat görev planlarını değiştirebilmekte; yedek mürettebat ihtiyacını, konaklama giderlerini ve görev değişikliklerini artırabilmektedir. Özellikle uçuş ve görev süresi sınırlamaları nedeniyle operasyonel planlamanın yasal çalışma ve dinlenme süreleriyle birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle jeopolitik kaynaklı maliyet baskısı yalnızca ücret artışlarından değil, mevcut mürettebat kapasitesinin daha düşük verimlilikle kullanılmasından,

yedek personel ihtiyacından ve planlanmamış konaklama ve ulaşım giderlerinden de kaynaklanabilmektedir. Bu durum insan kaynağı planlamasını maliyet dayanıklılığının stratejik unsurlarından biri hâline getirmektedir.

Uçak bakım, onarım ve revizyon faaliyetleri (Maintenance, Repair and Overhaul—MRO), uçuş emniyetinin ve operasyonel kullanılabilirliğin korunması açısından temel bir maliyet alanıdır. Bakım maliyetleri; planlı bakım, motor ve komponent bakımları, yedek parça tedariki, teknik personel giderleri ve uçakların bakım nedeniyle hizmet dışında kaldığı dönemlerin fırsat maliyetlerini kapsamaktadır (Belobaba et al., 2015; Flouris et al., 2009). Jeopolitik risklerin bakım maliyetleri üzerindeki etkisi özellikle küresel havacılık tedarik zinciri üzerinden ortaya çıkmaktadır. Üretim ve teslimat gecikmeleri, yedek parça sorunları ve bakım kapasitesindeki kısıtlar, havayollarını daha yaşlı uçakları daha uzun süre kullanmaya zorlayabilmektedir. IATA, 2025 yılında havacılık tedarik zinciri sorunlarının sektöre 11 milyar ABD dolarından fazla ek maliyet oluşturduğunu ve bunun yaklaşık 3,1 milyar dolarının daha yüksek bakım maliyetlerinden kaynaklandığını belirtmektedir (IATA, 2025b).

Parça tedarikindeki jeopolitik sorunlar alternatif tedarikçilere yönelmeyi, daha uzun lojistik rotaları ve yüksek stok seviyelerini gerekli kılabilmektedir. Parça bulunabilirliğinin azalması ise uçakların yerde kalma süresini artırarak kapasite kaybına ve ek uçak veya motor kiralama ihtiyacına yol açabilmektedir. Böylece bakım maliyetleri doğrudan giderlerin yanı sıra gelir ve kapasite kayıpları üzerinden de genişlemektedir.

Havayolu işletmeleri uçuş faaliyetleri kapsamında havalimanı işletmecilerine ve hava seyrüsefer hizmet sağlayıcılarına çeşitli kullanım ücretleri ödemektedir. Havalimanı ücretleri konma, park, yolcu hizmetleri ve güvenlik gibi hizmetleri kapsarken, hava seyrüsefer ücretleri çoğunlukla uçuş mesafesi ve hava aracının

ağırlığı dikkate alınarak belirlenmektedir (ICAO, 2025). Bu nedenle hava sahası kapanmaları ve rota değişiklikleri yakıt tüketiminin yanı sıra seyrüsefer ücretlerini de etkileyebilmektedir. Alternatif rotaların uzaması, mesafe temelli ücretlendirme uygulanan hava sahalarında ek maliyet yaratabilmektedir. Ayrıca hava sahası kapasitesindeki düşüş, yoğunluk ve gecikmeleri artırabilmektedir. EUROCONTROL (2024), kapasite sorunlarının daha uzun rotalara ve buna bağlı olarak daha yüksek yakıt ve operasyonel maliyetlere neden olabildiğini belirtmektedir.

Jeopolitik krizlerde alternatif havalimanlarının kullanılması da iniş, park, yer hizmetleri, yolcu transferi ve yeniden konumlandırma gibi planlanmamış giderler doğurabilmektedir. Böylece hava sahasına ilişkin bir güvenlik kararı birden fazla maliyet kalemini aynı anda etkileyebilmektedir.

Sigorta giderleri toplam maliyet içinde yakıt veya işgücü kadar yüksek bir paya sahip olmasa da jeopolitik riskler açısından stratejik önem taşımaktadır. Savaş, terör ve diğer olağan dışı riskleri kapsayan havacılık sigortaları, risk algısındaki değişimlere duyarlıdır. Büyük güvenlik olayları sonrasında teminat koşullarının daralması ve primlerin yükselmesi tarihsel olarak gözlemlenmiştir (Flouris et al., 2009; Freitas, 2013). Jeopolitik risklerin yükseldiği dönemlerde sigorta şirketleri ve reasürörler risk değerlendirmelerini yeniden yapabilmekte; belirli bölgeler için daha yüksek prim, daha düşük teminat veya özel koşullar talep edebilmektedir. ICAO'nun savaş riski sigortasına ilişkin çalışmaları da güvenlik olaylarının savaş riski teminatının maliyet ve erişilebilirliğini değiştirebildiğini göstermektedir. Bu nedenle sigorta maliyetleri kriz dönemlerinde yalnızca gider artışı değil, belirli bölgelere uçuş yapılabilirliğini etkileyen operasyonel bir kısıt hâline gelebilmektedir.

Uçak sahipliği ve kullanım maliyetleri amortisman, finansman giderleri ve finansal veya operasyonel kiralama ödemelerinden oluşmaktadır. Uçakların yüksek sermaye değerine

sahip olması ve uluslararası işlemlerin büyük ölçüde ABD doları üzerinden gerçekleştirilmesi, kur hareketlerini önemli bir maliyet unsuru hâline getirmektedir (Belobaba et al., 2015; Flouris et al., 2009). Yerel para birimiyle gelir elde eden ancak yakıt, kiralama ve bakım gibi giderleri ABD doları üzerinden gerçekleşen havayollarında kur hareketleri maliyet baskısını artırabilmektedir. IATA, küresel havayolu maliyetlerinin yaklaşık %55–60'ının ABD doları cinsinden olduğunu tahmin etmektedir (IATA, 2025). Dolayısıyla jeopolitik gelişmelerin döviz piyasalarında yarattığı dalgalanmalar operasyonel maliyetlerin yanı sıra finansal riski de artırabilmektedir.

Talep düşüşü veya rota iptalleri nedeniyle uçak kullanım oranlarının azalması ise sahiplik ve kiralama giderlerinin aynı ölçüde düşmesini sağlamamaktadır. Böylece toplam maliyetler daha düşük üretim kapasitesine dağıtılarak birim maliyetlerin yükselmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda CASK (Cost per Available Seat Kilometre), kapasite üretme maliyetinin değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir.

Havayolu operasyonları; yakıt ve teknik parçaların yanı sıra catering, yer hizmetleri, temizlik, güvenlik, bagaj ve diğer girdilerden oluşan geniş bir tedarik ağına bağlıdır. Jeopolitik risklerin ticaret yollarını, sınır geçişlerini ve uluslararası tedarik ilişkilerini etkilemesi, bu nedenle maliyet yapısına doğrudan yansıyabilmektedir. Ambargolar, ihracat kontrolleri, sınır kısıtlamaları ve tedarikçi ülkelerdeki üretim sorunları, kritik malzeme ve hizmetlerin alternatif kaynaklardan temin edilmesini gerektirebilmektedir. Daha pahalı tedarik kanalları, uzayan taşıma mesafeleri ve yüksek stok gereksinimi maliyet artışlarına yol açabilmektedir. IATA'ya göre uçak teslimatlarındaki gecikmeler ve parça arzındaki sorunlar, havayollarını daha yaşlı uçakları uzun süre işletmeye zorlamakta; bunun sonucunda bakım, motor kiralama ve yedek parça stok maliyetleri yükselmektedir (IATA, 2025b).

Jeopolitik risklerin maliyet yapısındaki önemli özelliklerinden biri, doğrudan giderlerin yanında zincirleme ve dolaylı maliyetler yaratmasıdır. Hava sahasının kapanması veya uçuşun iptali; yakıt ve personel giderlerinin yanı sıra uçağın sonraki uçuşlarını, mürettebat planlarını, bağlantılı yolcuları ve ağ genelindeki programı etkileyebilmektedir. Bu nedenle operasyonel aksama yönetimi maliyet dayanıklılığının temel unsurlarındandır (Belobaba et al., 2015). İlk maliyet grubu yolcu hizmetleri ve yasal yükümlülüklerdir. İptal ve uzun süreli gecikmeler yeniden rezervasyon, konaklama, yiyecek-içecek ve alternatif ulaşım hizmetlerini gerektirebilmektedir. Avrupa Birliği'nde yürürlükte bulunan 261/2004 sayılı Tüzük, belirli koşullarda iptal ve gecikmelerde yolculara yardım ve tazminat sağlanmasına ilişkin yükümlülükler getirmektedir (European Parliament & Council of the European Union, 2004). Olağanüstü koşullar bazı tazminat yükümlülüklerini etkileyebilse de yolcuya sağlanan yardım ve yeniden yönlendirme maliyetleri kriz dönemlerinde önemli giderler yaratabilmektedir.

İkinci maliyet grubu uçak ve mürettebatın yeniden konumlandırılmasıdır. Tek bir uçuşun gecikmesi, sonraki uçuşlarda uçak ve mürettebatın planlanan konumda bulunamamasına neden olarak ekip değişiklikleri, uçak değişimleri, ek konaklama, slot düzenlemeleri ve yeniden planlama maliyetleri yaratabilmektedir. Böylece tek bir noktadaki operasyonel aksama ağın diğer bölümlerine yayılarak toplam maliyeti artırabilmektedir.

Son olarak operasyonel aksaklıklar gelir ve kapasiteyi de etkileyebilmektedir. Uçakların yerde kalması veya uçuşların iptali, kapasitenin kullanılamamasına ve sabit veya yarı sabit maliyetlerin daha az üretim birimine dağıtılmasına yol açmaktadır. Bu durum birim maliyetlerin yükselmesine ve finansal esnekliğin azalmasına neden olabilmektedir. Dolayısıyla jeopolitik kaynaklı aksamalar

yalnızca ek gider yaratmamakta, mevcut kapasitenin verimliliğini de düşürmektedir.

Sonuç olarak havayolu maliyet yapısı, bağımsız gider kalemlerinin toplamından ziyade birbirini etkileyen dinamik bir sistem olarak değerlendirilmelidir. Jeopolitik bir risk, hava sahası kısıtlaması olarak ortaya çıkarken rota uzamasıyla yakıt tüketimini, uçuş süresinin artmasıyla mürettebat planlamasını, alternatif meydan kullanımıyla havalimanı ve yer hizmetleri giderlerini, tedarik sorunlarıyla bakım maliyetlerini ve operasyonel aksamalarla yolcu hizmetleri ile kapasite maliyetlerini eş zamanlı etkileyebilmektedir. Bu nedenle maliyet dayanıklılığı, yalnızca maliyetleri düşürme kapasitesi değil; dışsal şokların maliyet yapısındaki zincirleme etkilerini öngörme, absorbe etme ve operasyonları yeniden yapılandırabilme kapasitesi olarak ele alınmalıdır. Bu yaklaşım, önleyici ve tepkisel maliyet yönetimi uygulamalarının teorik ve operasyonel temelini oluşturmaktadır.

Havayolu Operasyonlarında Maliyet Dayanıklılığı

Havayolu taşımacılığında maliyet yönetimi, yalnızca operasyonel verimliliğin artırılması ve giderlerin azaltılmasına yönelik statik bir faaliyet değildir. Sektörün yüksek sermaye yoğunluğu, küresel tedarik ağlarına bağımlılığı, talep dalgalanmalarına açıklığı ve jeopolitik, ekonomik ve operasyonel şoklara duyarlılığı, işletmelerin beklenmeyen koşullarda faaliyetlerini sürdürebilme kapasitesini stratejik bir gereklilik hâline getirmektedir. Bu bağlamda dayanıklılık, havayolu işletmelerinin krizleri atlatmanın yanı sıra şokları absorbe etme, faaliyetlerini yeniden yapılandırma ve kriz sonrasında öğrenerek uyum sağlama kapasitesini ifade etmektedir (Duchek et al., 2020).

Dayanıklılık kavramı başlangıçta ekolojik sistemlerin dışsal değişimlere karşı kendini koruyabilme kapasitesini açıklamak üzere kullanılmış, daha sonra mühendislik, örgüt yönetimi, tedarik zinciri

ve operasyon yönetimi gibi alanlara aktarılmıştır. Örgütsel dayanıklılık, kuruluşların belirsizlik ve kriz koşullarında temel işlevlerini sürdürebilmesi ve değişen çevre koşullarına uyum sağlayabilmesi olarak ele alınmaktadır. Duchek et al. (2020), örgütsel dayanıklılığı öngörme, başa çıkma ve uyum sağlama süreçleri üzerinden açıklamaktadır. Buna göre dayanıklılık yalnızca kriz sonrasında toparlanma kapasitesi değil, kriz öncesi hazırlığı ve kriz sırasında kaynakların yeniden düzenlenmesini de içeren dinamik bir yetenektir.

Havayolu işletmeleri açısından dayanıklılık çok boyutlu bir yapı göstermektedir. İlk boyut operasyonel dayanıklılıktır. Operasyonel dayanıklılık, beklenmeyen kesintiler karşısında hizmet sürekliliğinin korunması ve operasyonların kabul edilebilir performans düzeyinde yeniden tesis edilmesiyle ilişkilidir. Hava sahası kapanmaları, teknik arızalar, mürettebat yetersizlikleri, grevler ve jeopolitik çatışmalar zincirleme operasyonel aksamalara yol açabilmektedir. Özellikle ağ yapısına dayalı havayollarında bir uçuşta meydana gelen aksamanın sonraki uçuşlara aktarılması, bozulmanın ağ genelinde büyümesine neden olabilmektedir. Havayolu ağlarının dayanıklılığı üzerine yapılan çalışmalar, gecikme anomalileri ve büyük ölçekli olayların ağın farklı bölümlerinde farklı etkiler yaratabildiğini göstermektedir (Wong et al., 2020). Güncel çalışmalar da operasyonel dayanıklılığı öngörme, şoku absorbe etme, uyum sağlama ve toparlanma süreçlerinin birlikte değerlendirildiği bütünleşik bir yapı olarak ele almaktadır (Tsiakalos & Poulaki, 2026).

İkinci boyut finansal dayanıklılıktır. Havayollarının yüksek sabit maliyetleri, sermaye gereksinimleri, yakıt fiyatlarındaki oynaklık, döviz kuru riski ve talep dalgalanmaları dışsal şoklara karşı finansal hassasiyet yaratmaktadır. Finansal dayanıklılık, gelir veya maliyetlerdeki ani değişimler karşısında işletmenin likiditesini, borç ödeme kapasitesini ve operasyonlarını sürdürebilme yeteneğini

koruyabilmesi anlamına gelmektedir. COVID-19 krizi, kapasite azaltma, maliyet kısma, filo küçültme ve finansal destek mekanizmalarına başvurma gibi stratejiler aracılığıyla bu boyutun önemini ortaya koymuştur (Budd et al., 2020; Sun et al., 2021). Bu nedenle finansal dayanıklılık, operasyonel faaliyetlerin sürdürülebilirliğini destekleyen temel koşullardan biridir.

Üçüncü boyut tedarik zinciri dayanıklılığıdır. Havayolları; uçak, motor ve komponent üreticileri, MRO kuruluşları, yakıt tedarikçileri, yer hizmetleri işletmeleri ve lojistik hizmet sağlayıcılarından oluşan küresel bir tedarik ekosistemine bağlıdır. Bu nedenle tek bir tedarik zincirindeki kırılma operasyonel kapasiteyi doğrudan etkileyebilmektedir. Tedarik zinciri dayanıklılığı, kesinti sonrasında sistemin kabul edilebilir performans düzeyine dönebilmesi ve gerektiğinde mevcut yapıyı değiştirerek yeni koşullara uyum sağlayabilmesi kapasitesidir. Uçak teslimatları, motor ve yedek parça tedariki ile bakım kapasitesindeki sorunlar bu boyutun önemini artırmaktadır. Tedarik zinciri aksaklıklarının uçakların yerde kalma sürelerini ve bakım giderlerini artırması, kapasite kullanımını düşürmesi, tedarik zinciri dayanıklılığını doğrudan maliyet dayanıklılığıyla ilişkilendirmektedir.

Bu üç boyutun kesişiminde maliyet dayanıklılığı ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada maliyet dayanıklılığı, havayolu işletmesinin dışsal bir şok sonucunda oluşan maliyet artışlarını öngörebilme, absorbe edebilme, maliyet yapısını yeniden düzenleyebilme ve operasyonlarını kabul edilebilir bir maliyet düzeyinde sürdürebilme kapasitesi olarak kavramsallaştırılmaktadır. Bu tanım, maliyet dayanıklılığını geleneksel maliyet minimizasyonundan ayırmaktadır. Maliyet minimizasyonu normal koşullarda giderlerin azaltılmasına odaklanırken, maliyet dayanıklılığı belirsizlik ve kriz koşullarında maliyetlerin nasıl yönetileceğine odaklanmaktadır. Bu nedenle dayanıklı maliyet yapısı her zaman en düşük maliyetli yapı değildir. Yedek kapasite,

alternatif tedarikçi, ilave yakıt planlaması, likidite rezervi veya esnek filo kapasitesi kısa vadede maliyetleri artırsa da kriz dönemlerinde daha büyük kayıpların önlenmesini sağlayabilmektedir.

Maliyet dayanıklılığının temel unsurları öngörülebilirlik, esneklik, absorbe edebilme kapasitesi ve yeniden yapılandırma yeteneğidir. Öngörülebilirlik, jeopolitik risklerin maliyet yapısı üzerindeki etkilerinin önceden izlenmesini; esneklik, kaynakların değişen koşullara göre yeniden düzenlenmesini; absorbe edebilme kapasitesi, maliyet şoklarının işletmenin finansal ve operasyonel yapısını bozmasını önleyecek tamponların bulunmasını; yeniden yapılandırma ise kriz koşulları kalıcı hâle geldiğinde ağ, filo, tedarik ve maliyet yapısının yeni koşullara uyarlanmasını ifade etmektedir. Bu yaklaşım, dayanıklılığı yalnızca eski duruma dönme kapasitesiyle sınırlamamaktadır. Nitekim örgütsel dayanıklılık literatürü, kriz sonrasında yeni koşullara uyum sağlayarak farklı bir denge oluşturmanın da dayanıklılığın önemli bir unsuru olduğunu vurgulamaktadır (Duchek et al., 2020).

Havayolu yönetiminde maliyet dayanıklılığının önemi, maliyetlerin birbirinden bağımsız hareket etmemesinden kaynaklanmaktadır. Jeopolitik bir çatışma nedeniyle hava sahasının kapanması, alternatif rota kullanımını gerektirebilir; rota değişikliği yakıt tüketimini ve uçuş süresini artırırken mürettebat planlamasını etkileyebilir. Aynı olay bağlantılı uçuşlarda gecikmelere, alternatif havalimanlarının kullanımına ve yolcu yeniden yönlendirmelerine yol açarak farklı maliyet kalemlerinde baskı oluşturabilir. Böylece tek bir jeopolitik şok; yakıt, mürettebat, havalimanı, bakım, yer hizmetleri ve yolcu hizmetleri maliyetlerini eş zamanlı etkileyebilir. ICAO da hava taşımacılığındaki kesintilerin jeopolitik gerilimlerden silahlı çatışmalara ve siber saldırılara kadar genişleyebildiğini ve dayanıklılığın hazırlık, müdahale ve toparlanma süreçleriyle birlikte ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır (ICAO, 2024).

Bu çerçevede maliyet dayanıklılığı, yalnızca kriz sonrasında maliyetleri azaltmaya yönelik tepkisel bir yaklaşım olarak görülmemelidir. Önleyici ve tepkisel kapasitenin birlikte geliştirilmesi gerekmektedir. Önleyici kapasite; jeopolitik risklerin izlenmesi, senaryo analizleri, yakıt ve döviz risklerinin yönetimi, alternatif tedarik kaynaklarının geliştirilmesi, filo ve ağ esnekliğinin artırılması ve finansal tamponların oluşturulmasını kapsamaktadır. Tepkisel kapasite ise kriz sonrasında rota ve filo planlarının yeniden düzenlenmesi, kapasitenin farklı pazarlara kaydırılması, tedarik zincirinin alternatif kaynaklara yönlendirilmesi ve operasyonel maliyetlerin kontrolünü içermektedir. Böylece dayanıklılık, pasif bir krize dayanma özelliğinden ziyade sürekli geliştirilen bir yönetim kapasitesi olarak değerlendirilmektedir.

Sonuç olarak havayolu operasyonlarında maliyet dayanıklılığı; operasyonel, finansal ve tedarik zinciri dayanıklılığının kesişiminde ortaya çıkan bütünleşik bir yönetim kapasitesidir. Bu kapasite, maliyet artışlarına katlanmanın ötesinde, maliyet şoklarının kaynaklarını önceden değerlendirmeyi, etkileri sınırlandırmayı ve gerektiğinde operasyonel yapıyı yeniden düzenlemeyi mümkün kılmaktadır. Jeopolitik risklerin hava sahası, enerji piyasaları, döviz kurları, tedarik zincirleri ve talep koşulları üzerinden eş zamanlı etkide bulunabilmesi, maliyet dayanıklılığını havayolu yönetiminde stratejik bir yetenek hâline getirmektedir. Bu nedenle önleyici ve tepkisel yaklaşımların temel amacı yalnızca maliyetleri azaltmak değil, jeopolitik şoklar altında maliyet yapısının sürdürülebilirliğini ve operasyonel devamlılığı güvence altına almak olmalıdır.

Jeopolitik Risklere Karşı Önleyici Yönetim Yaklaşımları

Jeopolitik risklerin havayolu operasyonları üzerindeki etkilerinin sınırlandırılmasında temel yaklaşım, risk gerçekleşmeden önce operasyonel ve finansal hazırlık kapasitesinin geliştirilmesidir.

Önleyici yönetim, olası tehditlerin önceden belirlenmesini ve işletmenin bu tehditlere karşı alternatif hareket alanları oluşturmasını amaçlamaktadır. Bu yaklaşım; hava sahası kapanmaları, bölgesel çatışmalar, enerji arzındaki kesintiler, yaptırımlar ve tedarik sorunları gibi birden fazla operasyonel unsuru etkileyebilen riskler açısından önem taşımaktadır. ICAO, çatışma bölgelerinde güncel risk bilgilerinin paylaşılmasını ve hava yolu işletmelerinin kendi risk değerlendirmelerini gerçekleştirerek bunları rota ve operasyon planlamasına dâhil etmesini öngörmektedir (ICAO, 2023).

Jeopolitik risklere karşı temel önleyici araçlardan biri, havayolu ağının alternatif rotalar ve havalimanları üzerinden yeniden yapılandırılabilmesini sağlayacak operasyonel esnekliğin oluşturulmasıdır. Hava sahasının kapanması durumunda alternatif rotaların önceden belirlenmesi, kriz sırasında karar alma süresini kısaltarak operasyonların sürekliliğini destekleyebilir. Ancak rota planlamasında yalnızca güvenlik değil; uçuş süresi, yakıt tüketimi, seyrüsefer ücretleri, mürettebat görev süreleri ve bağlantılı uçuşlar üzerindeki etkiler de dikkate alınmalıdır. Alternatif havalimanlarının da pist ve terminal kapasitesi, yakıt ikmali, yer hizmetleri, slot erişimi ve yolcu transfer olanakları açısından önceden değerlendirilmesi gerekmektedir. Böylece kriz anındaki yönlendirmelerin teknik olduğu kadar maliyet ve hizmet sürekliliği açısından da uygulanabilir olması sağlanabilir. Bu doğrultuda operasyonel planlama, farklı risk seviyelerine yönelik alternatif senaryolar üzerinden yürütülmelidir. Nitekim havayolu operasyonel dayanıklılığına ilişkin çalışmalar, jeopolitik şokların rota değişiklikleri ve operasyonel ağın yeniden yapılandırılması yoluyla yönetilebildiğini göstermektedir (Kaya et al., 2026).

Önleyici maliyet dayanıklılığının bir diğer unsuru, filonun ve kapasitenin değişen operasyonel koşullara uyarlanabilmesidir. Farklı menzil, kapasite ve yakıt tüketimi özelliklerine sahip uçaklardan

oluşan filo, kriz koşullarında rota ve kapasite değişikliklerinin yönetilmesini kolaylaştırabilir. Özellikle uzun alternatif rotalarda menzili yüksek ve yakıt verimliliği daha iyi uçakların kullanılması, operasyonel ve maliyet baskısını sınırlandırabilir. Filo esnekliği yalnızca uçak tipi çeşitliliğini değil, kiralama sözleşmelerinin esnekliğini, uçakların farklı pazarlara tahsis edilebilmesini ve kapasitenin gerektiğinde artırılıp azaltılabilmesini de kapsamaktadır. Bu nedenle kısa ve orta vadeli kiralama seçenekleri, kapasite paylaşımı ve esnek sözleşme koşulları, krizlere hazırlık açısından önemli araçlar olarak değerlendirilebilir.

Jeopolitik risklerin maliyet yapısına aktarılmasında tedarik zinciri önemli bir kanaldır. Tek bir ülke, bölge veya tedarikçiye aşırı bağımlılık, kriz dönemlerinde alternatif kaynaklara erişimi sınırlandırabilir. Bu nedenle kritik uçak parçaları, teknik hizmetler, yer hizmetleri ve diğer operasyonel girdiler bakımından tedarikçi çeşitlendirmesi, önleyici maliyet dayanıklılığının temel araçlarından biridir. IATA'nın değerlendirmeleri, havacılık tedarik zincirindeki sorunların operasyonel ve finansal baskı oluşturduğunu ve tedarik zinciri görünürlüğünün geliştirilmesinin önemini göstermektedir (IATA, 2026a). Yakıt risk yönetimi ise hem fiziksel arz güvenliğini hem de fiyat riskini kapsamaktadır. Alternatif yakıt tedarikçileri ve ikmal noktalarının belirlenmesi bölgesel arz kesintilerinin etkisini azaltabilirken, finansal riskten korunma araçları yakıt fiyatlarındaki oynaklığın mali etkisini sınırlayabilir. IATA, hedging uygulamalarını fiyat dalgalanmalarının finansal etkisini azaltmaya yönelik araçlardan biri olarak değerlendirmektedir (IATA, 2026c). Bununla birlikte hedging fiziksel arz sorunlarını ortadan kaldırmadığından, finansal risk yönetimi ile fiziksel tedarik güvenliği birlikte ele alınmalıdır.

Önleyici yönetimin bütünleştirici boyutu, jeopolitik risklerin sürekli izlenmesi ve erken uyarı mekanizmalarının karar süreçlerine dâhil edilmesidir. Siyasi gelişmeler, çatışma yoğunluğu, hava sahası

kısıtlamaları, enerji piyasaları, döviz hareketleri, yaptırımlar ve tedarik zinciri göstergelerinin izlenmesi, risk gerçekleşmeden önce operasyonel tedbirlerin alınmasına imkân sağlayabilir. ICAO da güncel risk bilgilerinin devletler, hava yolu işletmeleri ve hava seyrüsefer hizmet sağlayıcıları arasında paylaşılmasını ve operasyonel risk değerlendirmelerine yansıtılmasını öngörmektedir (ICAO, 2023). Erken uyarı sistemlerinin etkinliği, üretilen bilgilerin belirli karar eşikleriyle ilişkilendirilmesine bağlıdır. Örneğin hava sahası riskinin yükselmesi alternatif rota hazırlığını, yakıt arz göstergelerinin kritik seviyeye ulaşması alternatif tedarik noktalarının kullanımını, kritik komponent bulunabilirliğinin azalması ise öncelikli stok veya alternatif tedarikçi kullanımını tetikleyebilir. Böylece risk izleme, pasif bir raporlama faaliyetinden aktif bir karar destek sistemine dönüşmektedir.

Bu yaklaşımın tamamlayıcı unsuru senaryo planlamasıdır. Havayolu işletmeleri jeopolitik riskleri farklı şiddet ve sürelerde ortaya çıkabilecek gelişmeler üzerinden değerlendirmeli; rota uzunluğu, yakıt maliyeti, uçak ve mürettebat kullanılabilirliği, alternatif havalimanları, tedarik süreleri ve nakit akışı gibi değişkenleri birlikte ele almalıdır. Böylece kriz sırasında yalnızca tepki verilmesi yerine önceden belirlenmiş seçenekler arasından hızlı karar alınması mümkün olur. Sonuç olarak jeopolitik risklere karşı önleyici yönetim; esnek rota ve havalimanı seçenekleri, uyarlanabilir filo ve kapasite yapısı, çeşitlendirilmiş tedarik kaynakları, yakıt risk yönetimi, erken uyarı mekanizmaları ve senaryo planlamasının bütünleşik biçimde uygulanmasını gerektirmektedir. Amaç jeopolitik şoku tamamen ortadan kaldırmak değil, şok gerçekleştiğinde havayolunun operasyonel seçeneklerini ve maliyet yönetme kapasitesini koruyabilmesidir. Bu nedenle önleyici yönetim, maliyet dayanıklılığının kriz öncesindeki temel bileşeni olarak değerlendirilebilir.

Jeopolitik Riskler Gerçekleştiğinde Tepkisel Yönetim Yaklaşımları

Jeopolitik riskin gerçekleşmesiyle birlikte havayolu işletmeleri, önceden oluşturulan risk azaltma planlarından gerçek zamanlı operasyonel karar alma sürecine geçmektedir. Hava sahasının kapanması, çatışma ortamının oluşması veya belirli bölgelere ilişkin güvenlik risklerinin artması, uçuş ağının kısa sürede yeniden düzenlenmesini gerektirebilmektedir. Bu aşamada temel amaç, operasyonları tamamen eski hâline getirmekten ziyade mevcut kaynakları yeniden tahsis ederek güvenli ve ekonomik açıdan kabul edilebilir bir operasyon düzeyi oluşturmaktır. Havayolu literatüründe bu süreç; uçuş, uçak, mürettebat ve yolcuların yeniden planlanmasını içeren bütünleşik bir toparlanma problemi olarak ele alınmaktadır (Clausen et al., 2010; Hassan et al., 2021).

Jeopolitik şokun ilk operasyonel sonuçlarından biri uçuş rotalarının değiştirilmesidir. Hava sahasının kullanılamaması durumunda alternatif koridorların veya havalimanlarının kullanılması gerekebilir. Ancak rota değişikliği yalnızca güvenli bir güzergâhın belirlenmesini değil; uçuş süresi, yakıt tüketimi, mürettebat görev süresi, bağlantılı uçuşlar ve uçağın sonraki görevleri üzerindeki etkilerin birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir. Rosenberger et al. (2003), operasyonel kesintiler sonrasında uçakların ve uçuş bacaklarının yeniden düzenlenmesinin iptal ve yeniden konumlandırma maliyetleriyle birlikte ele alınması gerektiğini göstermektedir.

Hava sahası kısıtlamalarının uzaması hâlinde alternatif havalimanlarının kullanılması da önemli bir tepkisel araçtır. Ancak bu karar; slot, yer hizmetleri, yakıt, yolcu transferi ve uçağın sonraki uçuş planı gibi unsurlar dikkate alınarak verilmelidir. Lee et al. (2020), havaalanı operasyonlarındaki belirsizliklerin gecikme, iptal ve bağlantı kayıplarına yol açabildiğini ve toparlanma kararlarının bu etkileri birlikte değerlendirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Uçuş iptali veya frekans azaltma da kriz dönemlerinde önemli bir kapasite yönetimi aracıdır. Her uçuşun gerçekleştirilmesi, özellikle rota uzaması ve kaynak kısıtlarının bulunduğu koşullarda toplam maliyeti artırabilir. Su et al.'a (2021) göre iptal, kaynakların uçuşu gerçekleştirmeye elverişli olmadığı veya gecikme maliyetinin kabul edilebilir sınırları aştığı durumlarda kullanılan temel toparlanma araçlarından biridir.

Jeopolitik kriz sonrasında temel sorunlardan biri, mevcut uçak ve kapasitenin yeni koşullara göre yeniden dağıtılmasıdır. Hava sahası veya destinasyon kısıtlamaları bazı hatlarda kapasite fazlası, bazı hatlarda ise uçak ihtiyacı yaratabilir. Bu nedenle filo yönetimi, statik planlamadan dinamik bir kaynak tahsisi problemine dönüşmektedir. Uçak tipi değişikliği bu süreçte önemli bir araçtır. Uzun rotalarda menzil ve yakıt kapasitesi uygun uçakların, talebin azaldığı hatlarda ise daha düşük kapasiteli uçakların kullanılması kapasitenin yeniden dengelenmesini sağlayabilir. Havayolu toparlanma modelleri, uçak ataması, uçak değişimi ve rota düzenlemelerinin toplam maliyetin sınırlandırılmasında temel kararlar olduğunu göstermektedir (Clausen et al., 2010; Su et al., 2021).

Mürettebat planlaması ise uçak toparlanmasıyla birlikte ele alınmalıdır. Rota ve uçuş süresindeki değişiklikler planlanan görevlerin uygulanabilirliğini ortadan kaldırabileceğinden, ekiplerin yeniden atanması, konumlandırılması veya yedek ekiplerin kullanılması gerekebilir. Lettovský et al. (2000), kriz sonrası mürettebat toparlanmasının güvenlik ve çalışma kurallarına uyarken operasyonel bozulma ve yeniden atama maliyetlerini sınırlandırmayı amaçladığını göstermektedir. Rezerv mürettebat kullanımındaki esnekliğin de uçuş iptallerini ve son dakika değişikliklerini azaltabildiği belirtilmektedir (Schrotenboer et al., 2023). Bu nedenle uçak ve mürettebat yönetimi birbirine bağlı bir kaynak tahsisi problemi olarak ele alınmalıdır (Wang et al., 2025).

Jeopolitik risk gerçekleştiğinde yalnızca uçuş ağı değil, tedarik yapısı da yeniden düzenlenebilir. Sınır kısıtlamaları, yaptırımlar, lojistik yolların kesilmesi veya tedarikçilerin faaliyetlerini sürdürememesi durumunda alternatif tedarikçilere ve bölgesel kaynaklara yönelmek gerekebilir. Bu süreçte amaç, tedarik zincirinin normal yapısını korumaktan ziyade kritik girdilerin mümkün olan en düşük toplam operasyonel maliyetle temin edilmesini sağlamaktır. Wang et al. (2025), ABD havayolu sektörüne ilişkin çalışmalarında tedarik stratejilerinin dışsal kesinti riskleriyle ilişkisini incelemiş ve havayollarının uzun dönemli tedarik ilişkileri veya birden fazla tedarik kaynağı gibi farklı stratejiler kullanabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte tedarikçi çeşitlendirmenin her durumda aynı ölçüde fayda sağlamadığı ve mevcut ilişkilerin yapısının toparlanma kapasitesini etkilediği ortaya konulmuştur. Bu nedenle kriz sırasında alternatif tedarikçi seçimi; fiyat, kalite, güvenilirlik, teslim süresi, lojistik maliyeti ve mevcut sözleşmelerle uyumluluk gibi unsurlar birlikte değerlendirilerek yapılmalıdır.

Jeopolitik kriz dönemlerinde maliyet kontrolü, olağan dönemlerdeki gider azaltma politikalarından farklıdır. Bazı maliyetlerin azaltılması operasyonel riski artırabilirken, ilave maliyetler operasyonun devamlılığını sağlayabilir. Örneğin daha fazla yakıt tüketen alternatif bir rota, uçuşun iptal edilmesinden kaynaklanabilecek yolcu, bağlantı ve kapasite kayıplarından daha düşük bir toplam maliyet yaratabilir. Bu nedenle tepkisel maliyet yönetiminde temel ölçüt, tek bir gider kalemini azaltmak değil, toplam toparlanma maliyetini kontrol etmektir. Havayolu yönetim araştırmaları, toparlanma sürecinde uçak, mürettebat ve yolcu kaynaklarının birlikte değerlendirilmesinin maliyet minimizasyonu açısından önemli olduğunu göstermektedir (Clausen et al., 2010; Hassan et al., 2021). Uçak değişimi, uçuş iptali, gecikme, mürettebatın yeniden konumlandırılması ve yolcuların alternatif

uçuşlara aktarılması birbirinden bağımsız kararlar değildir. Bir kararın sağladığı maliyet avantajı, ağın başka bir bölümünde daha yüksek maliyet yaratabilir. Bu nedenle kriz yönetiminin ağ genelindeki toplam maliyet ve operasyonel sonuçlar üzerinden yürütülmesi gerekmektedir.

Bu yaklaşım, jeopolitik risk gerçekleştiğinde maliyet dayanıklılığının temel niteliğini ortaya koymaktadır. Tepkisel yönetim, kriz kaynaklı maliyetleri tamamen ortadan kaldırmayı değil; sınırlı kaynakların yeniden tahsisi yoluyla maliyet artışını kontrol altında tutmayı ve operasyonların sürdürülebilirliğini sağlamayı amaçlamaktadır. Son dönem araştırmalarında da havayolu düzensiz operasyonlarının birbirine bağlı bir kapasite-talep problemi olarak ele alınması ve yerel toparlanma kararlarının ağın diğer bölümlerinde sonuçlar doğurabileceği vurgulanmaktadır (2026).

Sonuç olarak jeopolitik risk gerçekleştiğinde tepkisel yönetim kapasitesi; rota ve havalimanlarının yeniden düzenlenmesi, kapasitenin ayarlanması, uçak ve mürettebatın yeniden tahsisi, tedarik kaynaklarının değiştirilmesi ve toplam toparlanma maliyetinin kontrolü üzerinden şekillenmektedir. Amaç, normal operasyon planını korumaya çalışmak yerine değişen koşullar altında güvenli ve ekonomik açıdan sürdürülebilir yeni bir operasyonel denge oluşturmaktır. Böylece önleyici ve tepkisel yaklaşımlar, havayolu işletmesinin jeopolitik şoklara karşı bütünleşik maliyet dayanıklılığının iki tamamlayıcı boyutunu oluşturmaktadır.

Havayolu Operasyonlarında Önleyici ve Tepkisel Yaklaşımların Değerlendirilmesi

Jeopolitik risklerin havayolu operasyonları üzerindeki etkilerinin yönetilmesinde önleyici ve tepkisel yaklaşımlar, birbirinden bağımsız iki yönetim biçimi olarak değil, aynı risk yönetimi sürecinin birbirini tamamlayan aşamaları olarak

değerlendirilmelidir. Önleyici yaklaşım, henüz gerçekleşmemiş bir riskin operasyonel ve finansal etkilerini sınırlandırmak amacıyla alternatiflerin, kaynak tamponlarının ve karar mekanizmalarının önceden oluşturulmasına dayanırken; tepkisel yaklaşım, gerçekleşen şokun mevcut operasyon yapısında meydana getirdiği bozulmanın giderilmesine ve kaynakların yeni koşullara göre yeniden tahsis edilmesine odaklanmaktadır. Havayolu yönetim literatüründe de operasyonel kesintilerin yönetimi; uçak, mürettebat, uçuş programı ve yolcu kaynaklarının birlikte yeniden düzenlenmesini gerektiren bütünleşik bir problem olarak ele alınmaktadır (Clausen et al., 2010).

Bu iki yaklaşım arasındaki temel farklılık, zamanlama ve belirsizliğin yönetilme biçiminde ortaya çıkmaktadır. Önleyici yönetim, risk gerçekleşmeden önce belirsizliğin olası etkilerini sınırlandırmaya ve işletmenin karar seçeneklerini genişletmeye çalışırken; tepkisel yönetim, belirsizliğin gerçekleşmesinden sonra mevcut koşullara uyum sağlamaya ve operasyonu yeniden dengelemeye yönelmektedir. Örneğin alternatif bir uçuş rotasının önceden belirlenmesi ve operasyonel açıdan doğrulanması önleyici bir uygulama niteliğindedir. Hava sahasının gerçekten kapanması sonrasında söz konusu rotanın devreye alınması ise tepkisel bir karara dönüşmektedir. Benzer biçimde, alternatif tedarikçilerin önceden belirlenmesi tedarik zinciri dayanıklılığını artırırken, mevcut tedarikçinin kriz nedeniyle kullanılamaması üzerine alternatif tedarikçiye geçilmesi tepkisel yönetim kapsamında değerlendirilmektedir. Dolayısıyla önleyici kapasite, kriz sırasında kullanılabilecek tepkisel seçeneklerin kapsamını genişleten bir altyapı oluşturmaktadır.

Önleyici ve tepkisel araçların ağırlığı, jeopolitik riskin ortaya çıkış biçimine ve işletmeye müdahale için bıraktığı zamana göre değişmektedir. Gelişimi belirli ölçüde izlenebilen ve olası etkileri konusunda önceden bilgi edinilebilen risklerde önleyici planlama daha fazla önem kazanmaktadır. Hava sahasında gerilimin kademeli

biçimde yükselmesi, belirli bir bölgeye yönelik yaptırım ihtimalinin artması veya enerji arzında bozulma sinyallerinin ortaya çıkması gibi durumlarda alternatif rotaların, tedarik kaynaklarının ve kapasite planlarının önceden hazırlanması işletmeye operasyonel hareket alanı sağlayabilmektedir. Buna karşılık ani gelişen çatışmalar, beklenmedik hava sahası kapanmaları veya kısa sürede ortaya çıkan güvenlik tehditleri, önceden hazırlanan planların kapsamını aşabilmektedir. Bu durumda rota değişikliği, uçuş iptali, uçak ve mürettebatın yeniden konumlandırılması veya alternatif havalimanlarının kullanılması gibi tepkisel araçlar ön plana çıkmaktadır. Dolayısıyla yönetim yaklaşımının belirlenmesinde yalnızca riskin potansiyel büyüklüğü değil, riskin gelişim hızı, etkisinin süresi ve işletmeye müdahale için bıraktığı zaman da dikkate alınmalıdır. Bu açıdan önleyici ve tepkisel yönetim arasında kesin bir ayrım bulunmamaktadır. Aynı uygulama risk yönetimi sürecinin farklı aşamalarında farklı nitelik kazanabilmektedir. Örneğin alternatif havalimanlarının önceden belirlenmesi önleyici bir dayanıklılık uygulaması iken, kriz sırasında bu havalimanlarından birinin fiilen kullanılması tepkisel operasyon yönetiminin parçasıdır. Bu durum, iki yaklaşımın ayrı süreçlerden ziyade birbirine bağlı bir yönetim döngüsü içerisinde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Önleyici yaklaşımın temel avantajı, kriz anında kullanılabilecek alternatiflerin önceden belirlenmesi sayesinde karar alma sürecinin hızlandırılması ve operasyonel belirsizliğin azaltılmasıdır. Alternatif tedarikçilerin belirlenmesi, esnek filo kapasitesinin oluşturulması, alternatif rotaların planlanması ve farklı kriz senaryolarının hazırlanması, işletmenin tek bir kaynağa veya operasyonel seçeneğe bağımlılığını azaltabilmektedir. Bu durum özellikle maliyet dayanıklılığı açısından önemlidir; çünkü kriz sırasında alternatiflerin sınırlı olması, işletmeyi daha yüksek

maliyetli ve daha düşük verimli çözümleri kabul etmeye zorlayabilmektedir.

Bununla birlikte önleyici dayanıklılığın oluşturulması maliyetsiz değildir. Yedek kapasite bulundurulması, alternatif tedarikçilerle ilişkilerin sürdürülmesi, esnek sözleşmeler yapılması, ilave stok tutulması veya farklı kriz senaryoları için kaynak ayrılması normal faaliyet dönemlerinde ek maliyet yaratabilmektedir. Dolayısıyla dayanıklılığın artırılması ile operasyonel verimlilik arasında bir denge kurulması gerekmektedir. Her olası riske karşı sınırsız kapasite ve kaynak ayrılması, kısa vadede risk tamponunu güçlendirse de işletmenin olağan dönemlerdeki maliyet yapısını ağırlaştırabilir. Dayanıklılık literatüründe de kaynak tamponlarının ve esnekliğin oluşturulmasının belirli bir verimlilik maliyeti yaratabileceği ve bu nedenle dayanıklılık yatırımlarının maruz kalınan riskin niteliğiyle uyumlu olması gerektiği vurgulanmaktadır (Ataburo et al., 2024). Bu nedenle önleyici yönetimin başarısı, mümkün olan en fazla kaynağın önceden tutulmasına değil, kritik riskler karşısında işletmeye yeterli hareket alanı sağlayacak kaynak ve kapasite düzeyinin belirlenmesine bağlıdır. Başka bir ifadeyle amaç, tüm riskleri ortadan kaldırmak değil, belirli risk senaryolarında işletmenin kritik operasyonlarını sürdürebilmesini sağlayacak bir tampon yapısı oluşturmaktır.

Tepkisel yaklaşımın temel özelliği, kaynakların gerçekleşmiş bir riskin somut etkilerine göre yeniden tahsis edilmesidir. Bu durum, gerçekleşmesi belirsiz riskler için önceden yüksek miktarda kaynak ayrılması gereksinimini azaltması bakımından avantaj sağlayabilir. İşletme, kriz gerçekleştiğinde riskin gerçek kapsamını ve etkilerini gözlemleyerek rota, filo, kapasite, mürettebat ve tedarik kararlarını buna göre şekillendirebilir. Bununla birlikte kriz gerçekleştiğinde zaman baskısı altında alınan kararların maliyeti artabilmektedir. Örneğin bir hava sahasının aniden kapanması

sonucunda gerçekleştirilen rota değişikliği yalnızca yakıt tüketimini değil, mürettebat görev sürelerini, uçak kullanım planlarını, bağlantılı uçuşları ve yolcu hizmetlerini de etkileyebilmektedir. Bu nedenle tek bir operasyonel kararın mali etkisi ağın diğer bölümlerine aktarılabilmektedir. Havayolu yönetim çalışmalarında kriz sonrası toparlanmanın yalnızca tek bir uçuşun yeniden planlanması olarak değil, uçak, mürettebat ve uçuş programının birlikte ele alındığı bütünleşik bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilmesi de bu durumla ilişkilidir (Clausen et al., 2010; Hassan et al., 2021).

Tepkisel yönetimin diğer önemli sınırlılığı ise bazı seçeneklerin kriz başladıktan sonra artık kullanılamaz hale gelebilmesidir. Örneğin alternatif tedarikçinin önceden belirlenmemiş olması, kriz sırasında uygun tedarikçinin bulunmasını ve gerekli sözleşmelerin hızla kurulmasını zorlaştırabilir. Benzer şekilde alternatif rota veya havalimanı seçeneklerinin önceden değerlendirilmemiş olması, güvenlik açısından mümkün görünen bir seçeneğin operasyonel veya ekonomik açıdan uygulanabilir olmamasına neden olabilir. Bu nedenle tepkisel kapasitenin etkinliği, büyük ölçüde kriz öncesinde oluşturulmuş bilgi, sözleşme, kapasite ve alternatifler altyapısına bağlıdır.

Önleyici ve tepkisel yaklaşımların birlikte değerlendirilmesi, maliyet dayanıklılığı kavramının temelini oluşturmaktadır. Önleyici yönetim işletmeye alternatifler, tamponlar ve hazırlık kapasitesi sağlarken; tepkisel yönetim bu alternatiflerin krizin gerçek koşullarına göre kullanılmasını ve gerektiğinde yeniden düzenlenmesini mümkün kılmaktadır. Bu nedenle maliyet dayanıklılığı, yalnızca kriz öncesinde maliyetleri düşük tutmak veya kriz sonrasında giderleri azaltmak şeklinde tanımlanmamalıdır. Temel mesele, bir şok meydana geldiğinde işletmenin maliyet yapısını kontrol edebilmesini ve operasyonlarını kabul edilebilir bir maliyet düzeyinde sürdürebilmesini sağlayacak yeterli hareket

alanına sahip olmasıdır. Bu açıdan önleyici ve tepkisel yaklaşımlar arasında bir tercih yapılmasından ziyade, iki kapasitenin hangi koşullarda ve nasıl birbirini tamamladığı önem kazanmaktadır. Önleyici kapasite ne kadar gelişmiş olursa olsun, gerçekleşen kriz önceden oluşturulan senaryodan farklı gelişebilir. Benzer biçimde güçlü bir tepkisel kapasiteye sahip olmak da işletmenin her krizi düşük maliyetle yönetebileceği anlamına gelmemektedir. Dolayısıyla dayanıklı bir havayolu işletmesi için gerekli olan, önceden belirlenmiş seçeneklerle kriz sırasında bu seçenekleri değiştirebilme ve yeni seçenekler oluşturabilme kapasitesinin birlikte bulunmasıdır.

Bu bütünleşik yaklaşım aynı zamanda maliyet yönetiminin statik ve dinamik boyutlarını birbirine bağlamaktadır. Normal faaliyet döneminde alternatif tedarikçi bulundurmak, yedek kapasite oluşturmak veya esnek sözleşmeler yapmak maliyet yaratabilir; ancak bu kaynaklar kriz sırasında daha yüksek maliyetlerin ve operasyonel kayıpların sınırlandırılmasına katkı sağlayabilir. Buna karşılık kriz sırasında gerçekleştirilen maliyet azaltıcı bir karar, operasyonun devamlılığını zayıflatıyorsa toplam maliyet üzerinde beklenenin tersine bir etki yaratabilir. Bu nedenle maliyet dayanıklılığının değerlendirilmesinde tek tek gider kalemlerinden ziyade toplam maliyet, operasyonel süreklilik ve kaynakların yeniden tahsis edilebilirliği birlikte dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak jeopolitik risklere karşı maliyet dayanıklılığı, önceden hazırlık ile kriz sırasında uyum sağlama kapasitesinin birleşiminden oluşmaktadır. Önleyici yaklaşım işletmenin maruz kalabileceği maliyet şoklarının etkisini sınırlamaya ve kriz sırasında kullanılabilecek seçenekleri genişletmeye hizmet ederken, tepkisel yaklaşım gerçekleşen şokun oluşturduğu maliyet ve operasyonel bozulmanın yönetilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle havayolu işletmelerinde maliyet dayanıklılığının geliştirilmesi, yalnızca daha düşük maliyetli bir operasyon yapısının oluşturulmasını değil; farklı

koşullarda yeniden yapılandırılabilen, kaynaklarını yeniden tahsis edebilen ve kriz sonrasında yeni koşullara uyum sağlayabilen esnek bir maliyet yapısının oluşturulmasını gerektirmektedir. Bu çerçevede önleyici ve tepkisel yönetim, birbirinin alternatifi değil, jeopolitik şoklar karşısında havayolunun maliyet dayanıklılığını oluşturan birbirini tamamlayan iki kapasite olarak değerlendirilmelidir.

Sonuç ve Değerlendirme

Havayolu taşımacılığı; operasyonların küresel ölçekte yürütülmesi, yüksek sermaye ve sabit maliyet yapısı, yakıt ve döviz fiyatlarına duyarlılığı, uluslararası tedarik zincirlerine bağımlılığı ve hava sahası kullanımına ilişkin kısıtlamalardan doğrudan etkilenmesi nedeniyle jeopolitik risklere karşı yüksek düzeyde hassasiyet gösteren sektörlerden biridir. Çalışmada jeopolitik riskler yalnızca uçuş güvenliği ve operasyonel süreklilik açısından değil, havayolu işletmelerinin maliyet yapısı ve maliyet dayanıklılığı üzerindeki etkileri bakımından ele alınmıştır. Dolayısıyla temel yaklaşım; jeopolitik bir şokun tek bir maliyet kalemini etkilemekle sınırlı kalmadığı, bunun yanında yakıt, işgücü ve mürettebat, bakım, havalimanı ve hava seyrüsefer hizmetleri, sigorta, uçak sahipliği ve kiralama, tedarik ve operasyonel aksama maliyetleri gibi birbirleriyle bağlantılı alanlarda eş zamanlı baskı yaratabildiği yönündedir.

İncelemeler neticesinde anlaşılan temel sonuçlardan biri, jeopolitik riskler ile havayolu maliyetleri arasındaki ilişkinin doğrudan, dolaylı ve zincirleme etkiler içeren çok boyutlu bir yapı sergilediğidir. Hava sahasının kapanması veya uçuş rotalarının değiştirilmesi doğrudan uçuş mesafesinin ve yakıt tüketiminin artmasına neden olabilirken, aynı gelişme uçuş sürelerini, mürettebat görev planlarını, uçak kullanımını, bağlantılı uçuşları ve alternatif havalimanlarının kullanımını da etkileyebilmektedir. Benzer şekilde enerji arzındaki veya uluslararası tedarik zincirlerindeki bozulmalar yalnızca girdi fiyatlarının yükselmesine yol açmamakta; tedarik

sürelerinin uzaması, stokların artırılması, alternatif kaynaklara yönelme ve operasyonel kaynakların yeniden düzenlenmesi nedeniyle ilave maliyetler de yaratabilmektedir. Dolayısıyla jeopolitik risk ile maliyet arasındaki ilişki doğrusal ve tek boyutlu değildir. Bir riskin farklı maliyet kalemleri üzerinde oluşturduğu etkiler birbirini tetikleyebilmekte ve başlangıçta sınırlı görünen bir operasyonel aksama, ağ genelinde daha geniş bir maliyet baskısına dönüşebilmektedir.

Netice olarak havayolu işletmelerinde maliyet yönetiminin yalnızca maliyet minimizasyonu perspektifiyle ele alınmasının yetersiz kalabileceği anlaşılmaktadır. Normal operasyon koşullarında düşük maliyet sağlayan bir yapı, kriz koşullarında alternatiflerinin sınırlı olması nedeniyle daha yüksek toplam maliyetlerle karşılaşabilir. Bu nedenle çalışmada maliyet dayanıklılığı; dışsal bir şok karşısında maliyet artışlarını öngörebilme, ortaya çıkan maliyet baskılarını absorbe edebilme, kaynakları yeniden tahsis edebilme, maliyet yapısını gerektiğinde değiştirebilme ve operasyonları kabul edilebilir bir maliyet düzeyinde sürdürebilme kapasitesi olarak kavramsallaştırılmıştır. Bu yaklaşım, maliyet yönetimini statik bir gider azaltma faaliyetinden çıkararak belirsizlik ve şoklar altında sürdürülebilirlik perspektifine taşımaktadır.

Bu çerçevede maliyet dayanıklılığının operasyonel, finansal ve tedarik zinciri dayanıklılığının kesişiminde oluştuğu sonucuna da ulaşılmaktadır. Operasyonel dayanıklılık, uçuş ağının ve kaynakların değişen koşullara uyarlanabilmesini; finansal dayanıklılık, maliyet ve gelir şokları karşısında likidite ve faaliyet sürekliliğinin korunabilmesini; tedarik zinciri dayanıklılığı ise kritik girdilerin alternatif kaynaklar üzerinden sürdürülebilmesini ifade etmektedir. Jeopolitik şoklar bu üç boyutu aynı anda etkileyebildiğinden, maliyet dayanıklılığının yalnızca finansal bir gösterge veya operasyonel bir performans ölçütü olarak değerlendirilmesi yeterli

değildir. Kavramın esas niteliği, farklı kaynak ve karar alanları arasındaki karşılıklı bağımlılıkların yönetilebilmesinde ortaya çıkmaktadır.

Yönetsel açıdan önemli bir sonuç ise jeopolitik risk yönetiminin yalnızca kriz veya güvenlik birimlerinin sorumluluğunda değerlendirilmemesi gerektiğidir. Risklerin maliyet yapısı üzerindeki etkileri finans, filo planlama, ağ yönetimi, satın alma, tedarik zinciri, insan kaynakları ve operasyon birimleri arasındaki karar süreçleriyle birlikte ele alınmalıdır. Özellikle alternatif rota ve havalimanlarının önceden belirlenmesi, filo ve kapasite esnekliğinin geliştirilmesi, kritik tedarikçilere bağımlılığın azaltılması, yakıt ve döviz risklerinin izlenmesi, finansal tamponların oluşturulması ve erken uyarı mekanizmalarının geliştirilmesi, maliyet dayanıklılığını destekleyen temel yönetim araçlarıdır. Buradaki amaç bütün olası krizleri önceden tahmin etmek değil, farklı kriz senaryoları karşısında işletmenin hareket alanını genişletmektir.

Bununla birlikte, önleyici yaklaşımların tek başına yeterli olmadığı da görülmektedir. Jeopolitik krizlerin gerçekleşme biçimi, süresi ve kapsamı çoğu zaman önceden hazırlanan senaryolardan farklılaşabilmektedir. Bu nedenle önleyici planlamanın tepkisel karar alma kapasitesiyle desteklenmesi gerekmektedir. Önceden belirlenmiş alternatif rotalar, tedarikçiler, havalimanları veya kapasite seçenekleri kriz sırasında kullanılabilecek bir hareket alanı sağlarken; tepkisel yönetim, bu seçeneklerin gerçekleşen koşullara göre yeniden düzenlenmesini mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla maliyet dayanıklılığı açısından önleyici ve tepkisel yaklaşımlar birbirinin alternatifi değil, birbirini tamamlayan iki yönetim kapasitesidir.

Çalışmanın bir diğer önemli sonucu, dayanıklılık ile maliyet verimliliği arasında uygun bir dengenin kurulması gerektiğidir. Her türlü riske karşı yüksek miktarda yedek kapasite, alternatif tedarikçi,

stok veya finansal tampon oluşturmak normal faaliyet dönemlerinde işletmenin maliyetlerini artırabilir. Buna karşılık aşırı maliyet optimizasyonu, kriz sırasında işletmenin hareket seçeneklerini azaltarak daha yüksek toplam maliyetlere yol açabilir. Bu nedenle dayanıklılık yatırımlarının riskin gerçekleşme olasılığı, potansiyel mali etkisi, operasyonel kritikliği ve müdahale süresi ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşımda hedef, mümkün olan en yüksek dayanıklılık düzeyini oluşturmak değil; işletmenin stratejik risk profiliyle uyumlu, mali açıdan sürdürülebilir ve kritik operasyonların devamlılığını destekleyecek yeterli dayanıklılık kapasitesini oluşturmaktır.

Jeopolitik risklerin etkilerinin yalnızca kısa vadeli operasyonel maliyetler üzerinden değerlendirilmemesi de çalışmanın önemli sonuçlarından biridir. Uzun süreli rota değişiklikleri, kapasite kayıpları, tedarik sorunları ve operasyonel aksamalar; müşteri hizmetleri, ağ yapısı, filo kullanım oranları, pazar erişimi ve finansal performans üzerinde daha uzun vadeli sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle maliyet dayanıklılığı, kısa vadeli giderlerin kontrol edilmesinin ötesinde, işletmenin kriz sonrasında operasyonel ve finansal yapısını sürdürebilme ve değişen koşullara uyum sağlayabilme kapasitesini de kapsamaktadır. Başka bir ifadeyle dayanıklılık, yalnızca şokun absorbe edilmesi ve önceki duruma dönülmesi değil, gerektiğinde yeni koşullara uygun bir operasyonel ve maliyet yapısının oluşturulabilmesidir.

Bu çalışma esas olarak kavramsal ve literatür temelli bir çerçeve sunduğundan, ortaya koyduğu ilişkilerin farklı havayolu işletmeleri ve farklı jeopolitik şoklar üzerinden ampirik olarak sınanması gelecekteki araştırmalar açısından önem taşımaktadır. Öncelikle hava sahası kapanmalarının yakıt ve mürettebat maliyetleri üzerindeki etkileri, bölgesel çatışmaların sigorta ve tedarik maliyetlerine yansıması ve alternatif rota kullanımının birim maliyet göstergeleri üzerindeki etkileri nicel modeller aracılığıyla

incelenebilir. Ayrıca farklı filo yapılarının, iş modellerinin ve ağ tasarımlarının jeopolitik şoklara karşı maliyet dayanıklılığı üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması, işletmeler arasındaki farklılıkların daha ayrıntılı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayabilir.

Gelecekteki araştırmalar açısından ikinci önemli alan, maliyet dayanıklılığının ölçülmesine yönelik göstergelerin geliştirilmesidir. Mevcut dayanıklılık çalışmalarının önemli bir bölümü operasyonel toparlanma, ağ performansı veya finansal sonuçlara odaklanırken, jeopolitik bir şok karşısında maliyet yapısının ne ölçüde korunabildiğini doğrudan ölçen göstergelerin geliştirilmesi literatüre katkı sağlayabilir. Bu kapsamda maliyet şokunun büyüklüğü, birim maliyetlerdeki değişim, toparlanma süresi, alternatif kaynaklara geçiş maliyeti, kapasite kaybı ve kriz sonrasında maliyet yapısının önceki veya yeni denge düzeyine ulaşma süresi birlikte değerlendirilebilir. Böylece maliyet dayanıklılığı soyut bir yönetim kapasitesi olmaktan çıkarılarak karşılaştırılabilir ve izlenebilir bir performans boyutuna dönüştürülebilir.

Buna ek olarak gelecekteki araştırmalarda maliyet dayanıklılığının tek bir toplam gösterge üzerinden değerlendirilmesi yerine çok boyutlu bir ölçüm çerçevesinin geliştirilmesi yararlı olabilir. Operasyonel esneklik, finansal tamponlar, tedarikçi çeşitliliği, rota alternatifleri, filo esnekliği, maliyet şokunun absorbe edilme kapasitesi ve toparlanma süresi gibi göstergelerin birlikte değerlendirilmesi, işletmelerin farklı dayanıklılık profillerinin ortaya konulmasını sağlayabilir. Özellikle aynı maliyet artışının farklı havayollarında farklı sonuçlar doğurabilmesi nedeniyle, maliyet dayanıklılığının yalnızca maliyet düzeyi üzerinden değil, işletmenin bu maliyet değişimine uyum sağlama kapasitesi üzerinden değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Sonuç olarak havayolu işletmelerinde jeopolitik risklere karşı maliyet dayanıklılığı, yalnızca maliyetleri düşürme veya kriz sırasında giderleri kontrol etme problemi değildir. Esas mesele, jeopolitik belirsizliklerin operasyonel ve finansal sonuçlarını önceden değerlendirebilen, kriz gerçekleştiğinde kaynaklarını yeniden tahsis edebilen, maliyet şoklarını absorbe edebilen ve kriz sonrasında faaliyetlerini sürdürülebilir bir maliyet yapısıyla devam ettirebilen bütünleşik bir yönetim kapasitesinin oluşturulmasıdır. Bu açıdan önleyici planlama işletmeye hazırlık ve seçenek yaratma kapasitesi kazandırırken, tepkisel yönetim değişen koşullara uyum sağlama ve toparlanma kapasitesi kazandırmaktadır. Her iki yaklaşımın bütünleştirilmesi, havayolu işletmelerinin jeopolitik şokların oluşturduğu maliyet baskılarını daha sistematik biçimde yönetmesine ve uzun vadeli operasyonel ve finansal sürdürülebilirliğini güçlendirmesine katkı sağlayabilecek temel bir yönetim çerçevesi sunmaktadır.

Kaynakça

Ataburo, H., Ampong, G. E., & Essuman, D. (2024). Developing operational resilience to navigate transportation disruptions: the role and boundaries of efficiency priority. *Annals of Operations Research*, *340*(2), 723-755. https://doi.org/10.1007/s10479-024-06092-4

Ay, S. (2012). Türkiye'de İşsizliğin Nedenleri: İstihdam Politikaları Üzerine Bir Değerlendirme. *Yönetim Ve Ekonomi Dergisi*, *19*(2), 321-341. https://izlik.org/JA55WA57YN

Belobaba, P., Odoni, A., & Barnhart, C. (Eds.). (2015). *The global airline industry*. John Wiley & Sons.

Budd, L., Ison, S., & Adrienne, N. (2020). European airline response to the COVID-19 pandemic–Contraction, consolidation and future considerations for airline business and management. *Research in Transportation Business & Management*, *37*, 100578. https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100578

Bukhman, S., Brito, M. P., & Sung, M. C. (2024). Quantifying civilian aircraft vulnerability: A data-driven approach in geo-political conflict zones for improved risk assessment of aircraft shot-down. *Journal of Air Transport Management*, *121*, 102674. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102674

Cai, Y., Fu, X., & Zhang, Y. (2025). Geopolitical risks and airlines stock return—Implications to the financial stability of European airlines. *Transport Policy*, *170*, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.05.001

Caldara, D., & Iacoviello, M. (2022). Measuring geopolitical risk. *American economic review*, *112*(4), 1194-1225. DOI: 10.1257/aer.20191823

Cho, J., O'Connell, J. F., Kim, B., & Shin, H. (2023). The impact of political conflicts on airline performance. *Annals of*

Tourism Research, *103*, 103648. https://doi.org/10.1016/j.annals.2023.103648

Chu, C., Zhang, H., Zhang, J., Cong, L., & Lu, F. (2024). Assessing impacts of the Russia-Ukraine conflict on global air transportation: From the view of mass flight trajectories. *Journal of Air Transport Management*, *115*, 102522. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102522

Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J., & Rezanova, N. J. (2010). Disruption management in the airline industry—Concepts, models and methods. *Computers & Operations Research*, *37*(5), 809-821. https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.03.027

Cook, A. J., & Tanner, G. (2015). *European airline delay cost reference values*. EUROCONTROL Performance Review Unit.

Dannet, G., Bellouin, N., & Boucher, O. (2025). Airspace restrictions due to conflicts increased global aviation's carbon dioxide emissions in 2023. *Communications Earth & Environment*, *6*(1), 52. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01956-w

Doganis, R. (2010). Flying off course: Airline Economics and Marketing.

Duchek, S., Raetze, S., & Scheuch, I. (2020). The role of diversity in organizational resilience: a theoretical framework. *Business research*, *13*(2), 387-423. https://doi.org/10.1007/s40685-019-0084-8

Ennen, D., & Wozny, F. (2024). Airspace closures following the war of aggression in Ukraine: The impact on Europe-Asia airfares. *Transportation research procedia*, *78*, 103-110. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.014

EUROCONTROL. (2024). *Performance review report: Air traffic management performance in Europe*. EUROCONTROL.

https://www.eurocontrol.int/performance/prb-monitoring/rp4/test/rp3/2024/ses-rp3/?utm_

European Parliament & Council of the European Union. (2004). *Regulation (EC) No 261/2004 of the European Parliament and of the Council of 11 February 2004*. *Official Journal of the European Union, L 46*, 1–8. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1586037233485&uri=CELEX%3A32004R0261&utm_

Flouris, T., Hayes, P., Pukthuanthong-Le, K., Thiengtham, D., & Walker, T. (2009). Recent developments in the aviation insurance industry. *Risk Management and Insurance Review*, *12*(2), 227-249. https://doi.org/10.1111/j.1540-6296.2009.01165.x

Freitas, P. J. (2013). Aviation war risk insurance and its impacts on US passenger aviation. *Journal of Transport Literature*, *7*(2), 268-283.

Glick, R., & Taylor, A. M. (2010). Collateral damage: Trade disruption and the economic impact of war. *The Review of Economics and Statistics*, *92*(1), 102-127. https://doi.org/10.1162/rest.2009.12023

Grimme, W., Maertens, S., & Bingemer, S. (2024). An analysis of Russian international air traffic in times of war: What structural changes have emerged and who benefits from Western sanctions?. *Transportation Research Procedia*, *81*, 128-137. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.11.014

Hassan, L. K., Santos, B. F., & Vink, J. (2021). Airline disruption management: A literature review and practical challenges. *Computers & Operations Research*, *127*, 105137. https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105137

Hiney, N., Efthymiou, M., & Morgenroth, E. (2025). Adapting to uncertainty: Black swans, VUCA challenges and airport

resilience strategies. *Journal of the Air Transport Research Society*, *4*, 100068. https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2025.100068

IATA. (2023). *Annual review 2023*. International Air Transport Association. https://www.iata.org/contentassets/c8122240d2124d03b4ef08f0293eb311/annual-review-2023.pdf

International Air Transport Association. (2024a). *Unveiling the biggest airline costs*. IATA. https://www.iata.org/en/publications/newsletters/iata-knowledge-hub/unveiling-the-biggest-airline-costs/?utm_

International Air Transport Association. (2024b). *Fuel*. IATA. https://www.iata.org/en/programs/ops-infra/fuel/?utm

International Air Transport Association. (2025a). *Airline profitability to strengthen slightly in 2025 despite headwinds*. IATA. https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-06-02-01?utm

International Air Transport Association. (2025b). *Supply chain challenges could cost airlines more than $11 billion in 2025*. IATA. https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-10-13-01/?utm

International Air Transport Association. (2025c). *Airline profitability stabilizes with 3.9% net margin expected in 2026*. IATA. https://www.iata.org/en/pressroom/2025-releases/2025-12-09-01/?trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block&utm

International Air Transport Association. (2026a, June 24). *IATA outlines four priorities to strengthen the aviation supply chain*. IATA. https://www.iata.org/en/pressroom/2026-releases/06-24-iata-outlines-four-priorities-to-strengthen-aviation-supply-chain/?utm

International Air Transport Association. (2026b, June 25). *IATA and IATP collaborate to support airline supply chain*

resilience. IATA. https://www.iata.org/en/pressroom/2026-releases/06-25-iata-iatp-collaborate-support-airline-supply-chain-resilience/?utm

International Air Transport Association. (2026c). *Aviation fuel hedging: Strategies for cost management and risk mitigation*. IATA. https://www.iata.org/en/training/courses/aviation-fuel-hedging/enc023veen02/en/?utm

International Civil Aviation Organization. (2019). *Manual on air navigation services economics* (Doc 9161, 5th ed.). ICAO. https://www.icao.int/safety/conflictzones?source=post_page----------&utm

International Civil Aviation Organization. (2023). *Risk assessment manual for civil aircraft operations over or near conflict zones* (3rd ed., Doc 10084). ICAO.

International Civil Aviation Organization. (2024). *Resilience of the air navigation system* (AN-Conf/14-WP/751 Rev. 1). ICAO.

Karabulut, A. (2007). Türkiye'deki işsizliği önlemede aktif istihdam politikalarının rolü ve etkinliği. *İş-Kur Uzmanlık Tezi, Ankara., http://statik. iskur. gov. tr/tr/rapor_bulten/uzmanlik_tezleri/ALPASLAN% 20KARABULUT*, *20*.

Kaya, L., Çopur, T., & Altintaş, M. (2026). Geopolitical Risks and Airline Operations: A Qualitative Thematic Synthesis of the Impact of Regional Conflicts on Airline Strategies. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, *34*(3), e70206. https://doi.org/10.1111/1468-5973.70206

Kristjanpoller, W. D., & Concha, D. (2016). Impact of fuel price fluctuations on airline stock returns. *Applied Energy*, *178*, 496-504. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.089

Lettovský, L., Johnson, E. L., & Nemhauser, G. L. (2000). Airline crew recovery. *Transportation science*, *34*(4), 337-348. https://doi.org/10.1287/trsc.34.4.337.12316

Liao, M., Zhang, Y., & Cheung, T. (2025). Airline network response to government policies: COVID-19 and Russian airspace closure. *Transport Policy*, *169*, 74-89. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.04.026

Lee, J., Marla, L., & Jacquillat, A. (2020). Dynamic disruption management in airline networks under airport operating uncertainty. *Transportation Science*, *54*(4), 973-997. https://doi.org/10.1287/trsc.2020.0983

Onaran, Ö., & Aydiner-Avsar, N. (2006). The controversy over employment policy: Low labor costs and openness, or demand policy? A sectoral analysis for Turkey. DOI: 10.57938/87a7fb61-acf8-42ee-a643-39a05eaf0f7f

Öncü, M. A., Çömlekçi, İ., & Coşkun, E. (2010). Havayolu şirketlerinin uyguladıkları finansal stratejiler üzerine bir araştırma. *AİBÜ-İİBF Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*.

Rosenberger, J. M., Johnson, E. L., & Nemhauser, G. L. (2003). Rerouting aircraft for airline recovery. *Transportation Science*, *37*(4), 408-421. https://doi.org/10.1287/trsc.37.4.408.23271

Schrotenboer, A. H., Wenneker, R., Ursavas, E., & Zhu, S. X. (2023). Reliable reserve-crew scheduling for airlines. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *178*, 103283. https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103283

Su, Y., Xie, K., Wang, H., Liang, Z., Chaovalitwongse, W. A., & Pardalos, P. M. (2021). Airline disruption management: A review of models and solution methods. *Engineering*, *7*(4), 435-447. https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.021

Sun, X., Wandelt, S., Zheng, C., & Zhang, A. (2021). COVID-19 pandemic and air transportation: Successfully navigating the paper hurricane. *Journal of Air Transport Management*, *94*, 102062. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2021.102062

Tsiakalos, S., & Poulaki, I. (2026). Digital twin–enabled operational resilience in airlines: A conceptual model. *Transport Economics and Management*. https://doi.org/10.1016/j.team.2026.06.001

Vasigh, B., & Rowe, Z. C. (2019). *Foundations of airline finance: Methodology and practice*. Routledge.

Wang, K., Wan, Y., Jiang, C., & Gu, H. (2025). Sourcing strategies for disruption recovery: Empirical evidence from the US airline industry. *Transport Policy*, *167*, 145-156. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2025.03.021

Wensveen, J. G. (2015). Air transportation: a management perspective 8th ed.

Wong, A., Tan, S., Chandramouleeswaran, K. R., & Tran, H. T. (2020). Data-driven analysis of resilience in airline networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *143*, 102068. https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102068

BÖLÜM 2

HUMAN CENTERED DESIGN PRINCIPLES FOR FUTURE AUTONOMOUS AVIATION SYSTEMS

TOLUNAY DAĞ[1]
TARIK GÜNEŞ[2]

Introduction

The aviation industry is undergoing a fundamental transformation driven by advances in automation, artificial intelligence (AI), intelligent avionics, and increasingly autonomous systems. Modern aircraft have evolved from platforms predominantly controlled through direct human intervention into highly integrated cyber physical systems in which automated functions perform an expanding range of monitoring, control, navigation, and decision-support tasks. This technological transformation offers considerable opportunities to improve operational efficiency and support safer flight operations. At the same time, however, increasing system complexity introduces new human factors challenges related to cognitive workload, situational awareness, decision-making, human–machine coordination, and the

[1] Res. Asst., İskenderun Technical University, Department of Aerospace Engineering, Orcid: 0000-0003-1514-5336
[2] Assistant Professor, İskenderun Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Orcid: 0000-0003-3098-7654

allocation of authority between human operators and intelligent systems (Valiyaparambil & Ghosh, 2025; Ziakkas & Plioutsias, 2024).

Historically, aviation automation was largely developed according to a technology centered philosophy in which functions were allocated between humans and machines according to their assumed respective strengths. Traditional approaches, including the well-known Human-Are-Better-At/Machines-Are-Better-At (HABA-MABA) perspective, sought to determine whether a particular function should primarily be assigned to the human operator or the automated system. However, the growing complexity and adaptive capabilities of contemporary AI-based systems challenge such static function-allocation approaches. The assumption that automation can simply substitute for human functions the so called "substitution myth" does not adequately reflect the dynamic interactions that occur between humans and increasingly intelligent systems. Instead, the introduction of advanced automation may transform human tasks, create new monitoring responsibilities, and generate unforeseen forms of human–machine interaction (Valiyaparambil & Ghosh, 2025).

The transition from automation to autonomy further intensifies this transformation. Whereas conventional automated systems typically execute predefined functions under predetermined conditions, increasingly autonomous systems can exhibit greater levels of adaptive behavior and operational initiative. Consequently, the human role is gradually shifting from direct control toward supervision, coordination, collaboration, and strategic decision-making. In this emerging environment, autonomous technologies should no longer be viewed exclusively as tools controlled by humans but increasingly as collaborative agents operating as part of a joint human–autonomy system (Zhang et al., 2021; Bjurling et al., 2024). This transition has given increasing prominence to the

concept of Human Autonomy Teaming (HAT), which emphasizes effective collaboration between human operators and autonomous agents rather than simple task substitution.

The emergence of such collaborative relationships creates important questions regarding authority, accountability, trust, and human control. As autonomous systems acquire greater decision-making capabilities, it becomes increasingly important to determine when humans should intervene, how system intentions should be communicated, and how operators can maintain an appropriate understanding of autonomous actions. The concept of Meaningful Human Control (MHC) provides an important perspective for addressing these questions by emphasizing the need to preserve meaningful human involvement and responsibility in autonomous system behavior (Calvert, 2025; Kirwan, 2025). From a human factors perspective, preserving human control does not necessarily require continuous manual intervention. Instead, system design should enable operators to understand, supervise, influence, and, when necessary, appropriately intervene in autonomous processes.

Trust represents another fundamental element of this relationship. Increasing autonomy may reduce the direct visibility of underlying system processes, particularly when AI-based decision-making mechanisms operate in ways that are difficult for operators to interpret. In such situations, inappropriate levels of trust may emerge: insufficient trust may result in the rejection or underuse of useful automation, whereas excessive reliance may reduce active monitoring and preparedness to intervene. Therefore, transparency, explainability, and mechanisms for repairing trust following unexpected system behavior become essential components of human centered autonomous system design (de Visser et al., 2018). The objective should not simply be to maximize trust in automation, but to support an appropriately calibrated relationship in which operator reliance reflects the actual capabilities and limitations of the system.

These challenges become particularly important in emerging aviation concepts such as Single-Pilot Operations (SPO) and increasingly intelligent flight decks. Reducing the number of human crew members while simultaneously increasing automation fundamentally changes the distribution of workload, responsibility, and decision-making authority within the cockpit. Human centered approaches to SPO therefore emphasize that advanced automation should support pilot performance rather than merely replace functions previously performed by another crew member (Wang et al., 2023). Similarly, intelligent assistant systems may provide context-sensitive decision support, assist pilots during complex operational situations, and reduce workload, but their effectiveness depends on how well their behavior is integrated with human cognitive capabilities and operational expectations (Saunders et al., 2026). Human centered intelligent systems have also been discussed in relation to areas such as safety investigation, fatigue risk management, and emerging eVTOL training environments, further demonstrating the expanding relevance of Human-AI integration across aviation domains (Ziakkas et al., 2025).

Within this context, Human-Centered Design (HCD) provides a critical foundation for the development of future autonomous aviation systems. Rather than treating human operators as residual components responsible for tasks that cannot yet be automated, HCD places human capabilities, limitations, responsibilities, and operational needs at the center of system development. The objective is therefore not to maximize autonomy as an end, but to determine how autonomous capabilities can be designed to enhance human performance, preserve situational awareness, maintain meaningful control, support effective decision-making, and contribute to overall system safety. This perspective requires human factors considerations to be incorporated throughout system design rather than addressed only after technological

functions have already been established (Wang et al., 2023; Kirwan, 2025).

Despite growing interest in human-centered autonomy, the relevant concepts are distributed across research on human–autonomy teaming, meaningful human control, trust, explainability, intelligent assistance, human performance, and emerging flight-deck concepts. Bringing these perspectives together is necessary to establish a coherent understanding of what human-centered autonomy should mean in future aviation systems. Accordingly, this chapter examines the transition from automation to autonomy from a human-centered perspective and synthesizes the principal human factors requirements associated with increasingly autonomous aviation systems. Particular attention is given to Human–Autonomy Teaming, Meaningful Human Control, trust and explainability, situational awareness, cognitive workload, human-machine coordination, and intelligent decision support. Building on these perspectives, the chapter ultimately proposes a set of human-centered design principles for future autonomous aviation systems, providing a conceptual foundation for systems in which technological autonomy complements human expertise while preserving human authority, operational transparency, and aviation safety

FROM AUTOMATION TO AUTONOMY IN AVIATION

The evolution from automation to autonomy represents more than a technological advancement in aviation; it reflects a fundamental transformation in the relationship between human operators and increasingly intelligent systems. Conventional automation has traditionally been designed to execute predefined functions, reduce repetitive workload, and support pilots in managing complex flight operations. Autonomous systems, however, introduce greater adaptive and decision making

capabilities, allowing technology to respond dynamically to changing operational conditions and, in some cases, initiate actions with reduced direct human intervention. This transformation requires aviation system design to reconsider not only what functions technology can perform but also how humans and intelligent systems should coordinate their capabilities, responsibilities, and authority (Zhang et al., 2021; Bjurling et al., 2024).

As autonomy increases, traditional distinctions between human and machine functions become progressively less adequate. The central design question therefore shifts from "Which tasks should be automated?" toward "How should humans and autonomous systems work together?" This transition is particularly important in safety critical aviation environments, where technological capability alone cannot determine operational effectiveness. Human understanding, oversight, intervention capability, and responsibility remain essential considerations even when autonomous systems perform increasingly sophisticated functions (Valiyaparambil & Ghosh, 2025; Kirwan, 2025).

Evolution of Automation in Aviation

Automation has played a central role in the development of modern aviation by supporting pilots in flight control, navigation, system monitoring, and operational decision making. As technological capabilities have advanced, automated systems have progressively assumed functions that previously required continuous human intervention. This development has contributed to increasingly sophisticated flight decks in which pilots interact with multiple interconnected automated and intelligent systems rather than directly controlling every aspect of aircraft operation (Ziakkas & Plioutsias, 2024).

The traditional rationale for automation has often been based on allocating functions according to the perceived strengths and limitations of humans and machines. Approaches derived from the HABA-MABA perspective distinguish tasks considered more appropriate for humans from those considered better suited to machines. Humans are generally associated with flexible reasoning, contextual interpretation, and adaptation to unexpected circumstances, whereas machines provide advantages in repetitive processing, computational speed, and consistent execution. Although such distinctions have historically supported function allocation, increasingly intelligent and adaptive technologies make rigid divisions between human and machine capabilities progressively more difficult to sustain (Valiyaparambil & Ghosh, 2025).

This limitation becomes particularly evident as AI-enabled systems move beyond deterministic automation. Rather than merely executing predefined instructions, intelligent systems can process complex information, generate recommendations, and adapt their behavior according to changing operational conditions. As a result, automation is no longer simply a collection of functions transferred from humans to machines. Instead, the introduction of advanced technology changes the nature of the remaining human tasks and creates new requirements for monitoring, coordination, interpretation, and intervention.

The evolution of automation should therefore not be understood solely in terms of increasing technological capability. From a human factors perspective, each increase in system capability also changes the role and responsibilities of the human operator. This relationship becomes particularly important when technological systems progress toward greater autonomy, where the boundaries between automated execution, decision support, and independent system action become increasingly complex.

Limitations of Automation-Centered Design

A major limitation of traditional automation centered design is the assumption that human functions can be decomposed into individual tasks and transferred to technology without substantially changing the surrounding human–system relationship. This assumption has been described through the substitution myth, according to which automation is expected to replace human activity while leaving the remainder of the operational system essentially unchanged. In practice, however, introducing automation frequently transforms rather than eliminates human work (Valiyaparambil & Ghosh, 2025).

When a system assumes routine operational functions, the human operator may become increasingly responsible for supervising automation, detecting abnormal behavior, interpreting system states, and intervening during situations that the automation cannot manage effectively. Consequently, reductions in direct manual workload do not necessarily correspond to reductions in cognitive demands. Instead, workload may shift from physical control toward monitoring, information integration, and supervisory decision making. This transformation can become particularly problematic when operators are required to intervene after extended periods of limited direct involvement.

Automation centered approaches may also insufficiently account for trust dynamics. Operators must continuously determine whether automated recommendations or actions are appropriate for the current operational context. When system behavior is difficult to understand or differs from operator expectations, trust may deteriorate. Conversely, repeated successful performance can encourage excessive reliance. de Visser et al. (2018) emphasize that effective human–machine interaction therefore requires consideration not only of initial trust formation but also of

mechanisms through which trust can be recalibrated or repaired following automation failures.

These limitations suggest that simply increasing automation does not automatically produce better human performance or safer operations. Future system design must instead consider the quality of interaction between humans and intelligent technologies. This requires moving beyond static function allocation toward approaches that explicitly address coordination, communication, transparency, authority, and adaptability within the combined human autonomy system.

Changing Roles of Human Operators

Increasing autonomy fundamentally changes the operational role of the human. In conventional manual operations, the pilot acts primarily as a direct controller of the aircraft. With increasing automation, this role progressively incorporates supervision and management of automated functions. As systems acquire greater adaptive and decision-making capabilities, however, the human role may evolve further toward that of a collaborative partner working alongside intelligent agents rather than simply commanding passive technological tools (Zhang et al., 2021; Bjurling et al., 2024).

This transition has important implications for system design. A human supervising a highly autonomous system requires different information and interaction capabilities from a pilot directly manipulating aircraft controls. Operators must understand what the autonomous system is doing, why particular actions are being taken, what the system is likely to do next, and under which circumstances human intervention may become necessary. Consequently, transparency and explainability become central requirements for maintaining effective human involvement in increasingly autonomous operations (de Visser et al., 2018).

The changing role of the pilot is particularly evident in emerging concepts such as Single-Pilot Operations. In these environments, advanced automation and intelligent assistance may assume or support functions traditionally distributed across multiple flight crew members. However, a human centered approach requires these systems to be designed around the operational needs and cognitive capabilities of the remaining pilot rather than simply automating tasks previously performed by another crew member (Wang et al., 2023). Intelligent assistants may consequently need to support workload management, information prioritization, decision-making, and responses to unexpected operational conditions (Saunders et al., 2026).

The progression toward autonomy therefore represents a transition in the nature of human involvement rather than the disappearance of human involvement. Human operators increasingly move from direct control toward supervisory and collaborative roles in which effective performance depends on maintaining appropriate awareness, authority, competence, and interaction with autonomous systems. This evolving relationship provides the foundation for Human-Autonomy Teaming and reinforces the need for a human-centered approach to future aviation system design.

The overall transformation described above is summarized in Figure 1. Rather than representing autonomy merely as the final stage of increasing automation, the framework emphasizes the parallel transformation of both technological capabilities and the human role. As system capabilities progress from automated assistance toward autonomous behavior, human involvement evolves from direct control and supervision toward coordination and collaboration.

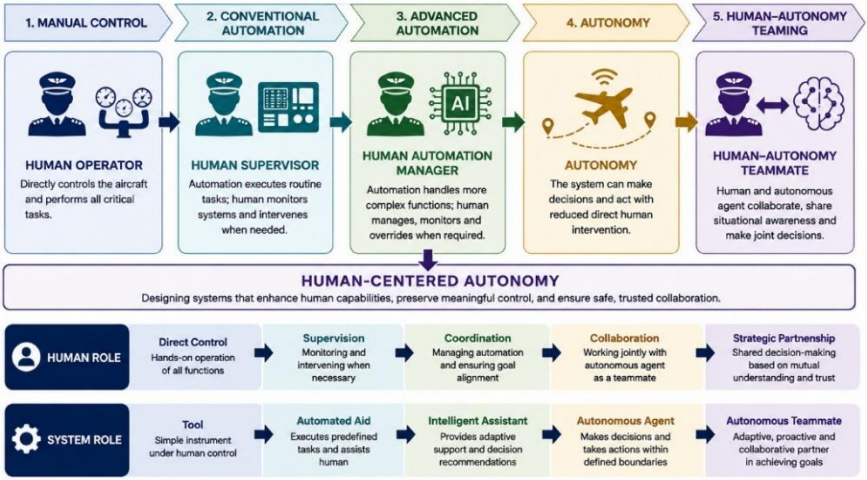


Figure 1 Evolution from Automation-Centered to Human-Centered Autonomous Aviation

As illustrated in Figure 1, the progression toward autonomous aviation should not be interpreted as a linear process in which technological capability gradually eliminates human involvement. Instead, increasing autonomy changes the nature of the human system relationship. The system evolves from a passive tool and automated aid toward an intelligent assistant and potentially an autonomous teammate, while the human role shifts from direct control toward supervision, coordination, and collaboration. From a human-centered perspective, the critical design challenge is therefore not the maximization of autonomy, but the development of an appropriate relationship between human authority and autonomous capability. This perspective provides the conceptual basis for the Human-Centered Design principles discussed in the following section.

HUMAN-CENTERED DESIGN IN AUTONOMOUS AVIATION SYSTEMS

Human-Centered Design (HCD) in autonomous aviation is based on the principle that increasing technological capability should not marginalize the human operator. Instead, autonomous functions should be designed around human capabilities, limitations, responsibilities, and operational needs. In this context, autonomy is not treated as an end point in which the human is gradually removed from the system, but as a design space in which human and machine capabilities are intentionally coordinated. This perspective becomes increasingly important as aviation systems incorporate artificial intelligence, adaptive behavior, and autonomous decision-making functions that may influence safety-critical operations (Wang et al., 2023; Kirwan, 2025).

A human-centered approach therefore requires designers to consider how autonomous systems communicate their intentions, how humans maintain awareness of system behavior, how authority is distributed, and how operators can intervene when necessary. The quality of the human–autonomy relationship becomes as important as the technical performance of the autonomous system itself. Accordingly, future aviation systems should be evaluated not only according to whether they can perform a function autonomously, but also according to whether they can support effective human understanding, coordination, and control.

Human-Centered Design Philosophy

Traditional automation-centered design has often emphasized technological capability and functional allocation. Human-centered design, by contrast, begins with the operational role of the human and asks how technology can support that role without undermining essential cognitive and decision making functions. This distinction is particularly important in aviation because even highly capable

autonomous systems operate within environments characterized by uncertainty, time pressure, changing operational conditions, and safety critical consequences.

Wang et al. (2023), in their review of human-centered design for Single-Pilot Operations, emphasize that reducing crew numbers or increasing automation should not be treated as a simple replacement problem. The remaining pilot continues to require support in areas such as workload management, monitoring, decision making, and situational awareness. Consequently, HCD should focus on preserving the pilot's ability to understand the operational context and to remain effectively engaged with the system.

Similarly, Kirwan (2025) argues that future Human-AI Teaming in aviation requires explicit human factors requirements rather than assumptions that intelligent systems will naturally integrate into existing operational structures. From this perspective, autonomy should be designed around the combined performance of the Human-AI system. The objective is not to optimize the human and the autonomous agent independently, but to ensure that their interaction produces a safe and effective joint system.

Human-centered design therefore involves a shift from maximizing automation toward optimizing collaboration. This requires designers to consider authority, information sharing, timing of assistance, workload distribution, transparency, and the ability of the human to recover from unexpected system behavior. These dimensions provide the foundation for Human-Autonomy Teaming.

Human-Autonomy Teaming

Human-Autonomy Teaming (HAT) represents a significant departure from conventional human automation interaction. In traditional automated systems, the machine generally performs predefined functions under human supervision. In HAT, however,

autonomous systems may take initiative, adapt to changing conditions, provide recommendations, and participate more actively in operational decision-making. This changes the relationship from one of tool use toward one of collaboration between human and autonomous agents (Bjurling et al., 2024).

Bjurling et al. (2024) emphasize that effective human-autonomy teaming requires careful consideration of human factors during the design of digital assistants. The autonomous system should not merely provide additional information; it should support coordination in a way that is compatible with human cognitive processes and operational expectations. This includes determining when assistance should be provided, how information should be communicated, and how the system should respond to changing levels of workload or task complexity.

The collaborative nature of HAT also requires a clearer understanding of roles and responsibilities. As autonomous systems acquire greater capabilities, the distinction between human decision maker and automated support system becomes less rigid. Future autonomous agents may contribute to goal formation, option generation, monitoring, and operational coordination. In such environments, effective teamwork depends on shared awareness of responsibilities, predictable system behavior, and mechanisms that enable the human operator to understand the current status and future intentions of the autonomous agent.

Saunders et al. (2026) extend this perspective through the concept of intelligent assistant systems for future flight decks. Such systems are intended to reduce pilot workload by supporting autonomous action integration while remaining compatible with human operational needs. Their contribution is therefore not limited to task execution; they may also help prioritize information, support decision-making, and assist pilots during complex or unexpected

situations. This illustrates how future HAT concepts may move beyond simple automation toward more adaptive and context-sensitive collaboration.

Meaningful Human Control

As autonomous aviation systems gain greater decision making capabilities, the question of how meaningful human authority can be preserved becomes increasingly important. Meaningful Human Control (MHC) provides a conceptual basis for addressing this issue by ensuring that human involvement remains relevant even when systems can perform complex functions independently.

Calvert (2025) describes MHC through principles that emphasize both human responsibility and system responsiveness to human intentions. In this context, the tracing condition requires that autonomous actions remain connected to identifiable and competent human agents who can be held responsible for system behavior. The tracking condition, meanwhile, requires the system to respond appropriately to human intentions, values, and relevant reasons. Together, these conditions prevent autonomy from becoming completely detached from human judgment and responsibility.

In aviation, meaningful human control does not imply that pilots must manually control every action performed by an autonomous system. Instead, it requires that operators retain sufficient understanding, authority, and intervention capability to influence system behavior when necessary. The system should therefore communicate its operational status, decision logic, and limitations in a way that enables the human to maintain effective oversight (Kirwan, 2025).

MHC is especially relevant in high-autonomy environments where system decisions may occur rapidly or involve complex AI-based reasoning. If operators cannot understand why a system has

selected a particular course of action, their ability to exercise meaningful oversight becomes limited. Consequently, meaningful human control is closely connected with transparency and explainability.

Trust, Transparency, and Explainability

Trust is one of the central determinants of effective interaction between humans and increasingly autonomous systems. Operators must determine whether an autonomous system can be relied upon in a given operational context, while remaining sufficiently engaged to identify situations in which system behavior may be inappropriate or unreliable. The objective of HCD should therefore not be to maximize trust, but to support calibrated trust that corresponds to the actual capabilities and limitations of the system.

de Visser et al. (2018) emphasize that trust in automation is dynamic and may be damaged when system behavior violates user expectations. Importantly, successful human-machine interaction requires mechanisms not only for establishing trust but also for repairing it following failures or unexpected actions. This is particularly relevant in aviation, where a single unexplained or inappropriate automated action may significantly influence subsequent pilot reliance.

Transparency is essential for supporting such trust calibration. An autonomous system should provide sufficient information for the operator to understand what it is doing, why it is doing it, and what it is likely to do next. Transparency becomes especially important when system actions deviate from pilot expectations or when the operational environment changes rapidly.

Explainability complements transparency by helping operators understand the reasoning or relevant factors behind system outputs. In AI-enabled aviation, explainability can support situational

awareness and improve the operator's ability to evaluate recommendations rather than accepting them uncritically. This becomes increasingly important as AI-based systems operate as decision-support tools or intelligent assistants in safety critical environments (de Visser et al., 2018; Kirwan, 2025).

At the same time, transparency and explainability must be designed carefully to avoid introducing additional cognitive burden. Excessive information may overwhelm the operator rather than improve understanding. Human-centered system design should therefore provide the appropriate level of explanation at the appropriate time, taking into account operational urgency, task complexity, and human cognitive limitations.

Taken together, Human-Autonomy Teaming, Meaningful Human Control, calibrated trust, transparency, and explainability form the conceptual foundation of human centered autonomous aviation. These elements ensure that future autonomous systems do not merely perform tasks effectively, but also remain understandable, controllable, and operationally compatible with the humans who depend on them.

HUMAN FACTORS REQUIREMENTS FOR AUTONOMOUS AVIATION

The successful integration of autonomous technologies into aviation depends not only on the technical capabilities of intelligent systems but also on their compatibility with human cognitive and operational characteristics. As discussed in the previous section, Human Centered Design requires autonomous systems to preserve meaningful human involvement while supporting effective Human-Autonomy Teaming. Translating these principles into operational systems requires explicit consideration of human factors requirements, particularly situational awareness, cognitive workload, decision making, communication, and human

performance under safety-critical conditions (Kirwan, 2025; Wang et al., 2023).

Increasing autonomy may fundamentally alter how pilots acquire information, understand system states, and make operational decisions. Therefore, human factors requirements should not be considered secondary constraints applied after autonomous functions have been developed. Instead, they should form part of the system design process itself. The objective is to ensure that autonomous capabilities remain cognitively compatible with human operators and contribute to the performance of the overall human-autonomy system.

Situational Awareness and Cognitive Workload

Situational awareness remains a fundamental requirement in highly automated and autonomous aviation environments. As direct human involvement in aircraft control decreases, pilots may receive fewer natural cues about system behavior and increasingly depend on interfaces to understand aircraft status, environmental conditions, and autonomous actions. Consequently, the design of autonomous systems must ensure that reduced direct control does not result in reduced understanding of the operational situation.

This requirement becomes particularly important when pilots transition from active control toward supervisory roles. Although automation can reduce the workload associated with routine tasks, it may simultaneously introduce new cognitive demands related to monitoring, interpreting system behavior, and determining when intervention is required. Therefore, reductions in physical or procedural workload should not automatically be interpreted as reductions in total pilot workload (Wang et al., 2023).

Intelligent systems may provide opportunities to manage these demands more dynamically. Rather than continuously presenting all

available information, future systems may support pilots by prioritizing operationally relevant information and providing assistance according to task demands. Intelligent assistants designed for future flight decks, for example, may reduce workload by supporting the integration of autonomous actions and assisting pilots during complex operational situations (Saunders et al., 2026).

However, assistance should not result in cognitive disengagement. A human centered system should maintain sufficient operator involvement to preserve awareness and preparedness for intervention. The design challenge is therefore to achieve an appropriate balance between reducing unnecessary workload and maintaining meaningful cognitive engagement.

Human–Machine Coordination and Decision-Making

Decision-making in autonomous aviation increasingly becomes a joint activity involving both human judgment and machine generated information. AI enabled systems can process large volumes of data and provide recommendations more rapidly than a human operator could independently analyze them. Nevertheless, the operational value of these capabilities depends on whether the recommendations can be effectively incorporated into human decision-making.

Human-centered decision support should therefore enhance rather than displace human judgment. The autonomous system should provide information in a manner that enables operators to evaluate recommendations within the broader operational context. This is particularly important in uncertain or abnormal situations, where rigid automated responses may not adequately reflect contextual factors understood by experienced operators (Kirwan, 2025).

Effective coordination also requires clear expectations regarding the distribution of authority. When both humans and autonomous systems can initiate actions, ambiguity regarding responsibility may create operational difficulties. HAT therefore requires mechanisms that communicate who or what currently has authority, what actions are being performed, and when control or decision responsibility is transferred between human and autonomous agents (Bjurling et al., 2024).

Intelligent assistants illustrate the potential of this collaborative approach. Rather than functioning as passive information displays, they may identify relevant information, support alternative evaluation, and assist with complex operational decisions. Their effectiveness, however, depends on whether pilots understand and appropriately evaluate their recommendations. Human centered decision support therefore requires coordination between computational capability and human operational expertise rather than simple technological substitution (Saunders et al., 2026).

Multimodal Interaction and Interface Design

The interface represents the primary communication channel through which pilots understand and interact with increasingly autonomous systems. As system complexity grows, traditional visual displays alone may become insufficient for communicating large amounts of operational information without increasing cognitive demand. Human centered interface design should therefore consider how information can be distributed across appropriate sensory channels while maintaining clarity and prioritization.

Multimodal interaction provides one possible approach by combining visual, auditory, and haptic information according to operational requirements. Such an approach may help distribute information demands across multiple sensory channels rather than overloading a single modality. However, multimodal design should

not simply increase the number of alerts or information sources. Its purpose should be to provide the right information through the most appropriate modality according to urgency, task context, and operator needs.

The increasing use of AI also changes the information that interfaces need to communicate. Future interfaces may need to represent not only aircraft parameters but also autonomous system intentions, recommendations, confidence, and potential changes in planned actions. This creates a requirement for interfaces capable of supporting transparency and explainability without unnecessarily increasing cognitive workload.

Human centered intelligent systems therefore require interfaces that support two-way coordination. The pilot must be able to understand the autonomous agent, while the system should also respond appropriately to human inputs and operational requirements. This interaction is particularly important when the autonomous system functions as an intelligent assistant or teammate rather than as a conventional automated tool (Bjurling et al., 2024; Ziakkas et al., 2025).

Human Performance and Operational Safety

Human centered autonomy ultimately needs to be evaluated according to its contribution to the safety and performance of the combined human–machine system. Technological sophistication alone cannot demonstrate that an autonomous function improves aviation safety. A technically capable system may still create operational risk if it increases confusion, encourages inappropriate reliance, reduces situational awareness, or creates new coordination problems.

Human performance should therefore be considered throughout the development and evaluation of autonomous systems.

Relevant considerations include workload, attention, situational awareness, decision quality, response to unexpected events, trust, and the ability to intervene effectively. These factors are interconnected: for example, poor transparency may affect trust, inappropriate trust may influence monitoring behavior, and reduced monitoring may subsequently affect situational awareness and intervention performance (de Visser et al., 2018).

This systems perspective is particularly important in emerging operational environments. Human centered intelligent systems have potential applications extending beyond conventional flight-deck automation to areas such as fatigue risk management, safety investigation, and immersive eVTOL training. These applications illustrate that Human-AI integration should be considered across the wider aviation system rather than solely within aircraft control functions (Ziakkas et al., 2025).

Ultimately, operational safety requires autonomous systems to support rather than undermine human resilience. The human operator remains particularly important when operations deviate from expected conditions or when system behavior becomes uncertain. Human-centered autonomy should therefore preserve the capacity for human understanding, adaptation, and intervention while using intelligent technologies to enhance information processing and decision support. The effectiveness of future autonomous aviation systems will consequently depend on the performance of the integrated human-autonomy system, rather than on autonomous capability considered in isolation.

EMERGING APPLICATIONS OF HUMAN-CENTERED AUTONOMOUS SYSTEMS

The principles of human centered autonomy become particularly significant when translated into emerging aviation applications. Increasing levels of artificial intelligence and

autonomy are creating operational concepts in which technology is expected not only to execute predefined functions but also to provide adaptive assistance, support complex decisions, and collaborate with human operators. Intelligent flight-deck assistants, Single-Pilot Operations (SPO), AI supported safety applications, and emerging eVTOL training environments illustrate how this transformation may reshape both operational roles and human–machine interaction (Wang et al., 2023; Ziakkas et al., 2025; Saunders et al., 2026).

These applications also demonstrate why technological capability alone is insufficient for successful autonomy. Systems designed to provide intelligent assistance must operate in ways that are understandable, predictable, and compatible with human cognitive characteristics. Their effectiveness therefore depends on the extent to which the principles discussed previously meaningful human control, appropriate trust, transparency, situational awareness, workload compatibility, and effective coordination—are incorporated into practical system design.

Intelligent Assistants in the Flight Deck

The development of intelligent assistant systems represents an important step in the transition from conventional cockpit automation toward collaborative human–autonomy interaction. Unlike traditional automated functions that primarily execute predefined tasks, intelligent assistants may provide context-sensitive support, analyze operational information, generate recommendations, and potentially initiate or coordinate actions according to changing flight conditions. Such capabilities create opportunities to reduce pilot workload while improving access to relevant information during complex operations (Saunders et al., 2026).

From a human centered perspective, however, the objective of an intelligent assistant should not simply be to automate additional

cockpit functions. Instead, the assistant should support the pilot in managing cognitive demands while preserving situational awareness and decision authority. This requires the system to determine not only what assistance can be provided, but also when assistance is appropriate and how it should be communicated. Assistance provided at an inappropriate time or in an unclear manner may increase rather than reduce cognitive workload.

The concept of intelligent assistance also changes the traditional interaction between pilots and cockpit systems. When an intelligent system can interpret information, generate recommendations, or take autonomous actions, the relationship begins to resemble collaboration rather than conventional tool use. This reinforces the need for predictable system behavior, transparent communication, and clear allocation of responsibilities between the pilot and the intelligent assistant (Bjurling et al., 2024; Saunders et al., 2026).

Accordingly, intelligent flight deck assistants should be evaluated according to their contribution to the performance of the combined human–autonomy system. Reductions in workload are important, but they should not be achieved at the expense of human understanding, preparedness, or meaningful control.

Single-Pilot Operations

Single-Pilot Operations represent one of the clearest examples of why future aviation automation requires a human centered design philosophy. Reducing a conventional multi-crew flight deck to a single pilot changes the distribution of workload, monitoring, communication, decision-making, and operational responsibility. Consequently, the technological support required for SPO cannot be designed simply by transferring the tasks of the removed crew member to automation (Wang et al., 2023).

A human centered approach instead requires consideration of the entire operational system surrounding the remaining pilot. Automation and intelligent assistance should support the pilot according to changing workload and operational conditions while preserving sufficient engagement and situational awareness. This includes supporting information management, monitoring, decision-making, and responses to abnormal or unexpected situations.

The SPO context also illustrates the importance of adaptive human-autonomy coordination. During routine phases of flight, intelligent systems may perform or support a relatively broad range of functions. During complex or abnormal conditions, however, the pilot may require different forms of assistance, including prioritized information, decision support, or management of secondary tasks. The effectiveness of automation therefore depends not only on its functional capability but also on its ability to respond appropriately to changing human and operational requirements (Wang et al., 2023; Saunders et al., 2026).

Human centered SPO design should consequently focus on supporting the remaining pilot rather than replacing the absent pilot. This distinction is fundamental because it shifts the design objective from task substitution toward system level performance and effective human–autonomy collaboration.

AI Supported Safety and Decision Making

Artificial intelligence provides significant opportunities to support aviation decision making by processing large amounts of operational information and identifying patterns that may be difficult for human operators to evaluate rapidly. In human centered autonomous systems, however, AI generated outputs should function as decision support rather than automatically displacing human judgment.

This distinction is particularly important in safety critical and unexpected situations. Human operators may need to integrate information about operational context, system condition, environmental factors, and mission objectives while working under time pressure. Intelligent systems can potentially support this process by organizing information, identifying relevant factors, and presenting possible courses of action. Such assistance may reduce cognitive demands and allow the operator to focus attention on higher-level operational decisions (Ziakkas et al., 2025; Saunders et al., 2026).

At the same time, AI-supported decision-making introduces requirements concerning transparency and trust. Pilots must be able to determine whether a recommendation is appropriate for the current situation and understand sufficient information about its basis to decide whether it should be followed. Blind acceptance of AI generated recommendations would be inconsistent with meaningful human control, while systematic rejection would eliminate much of the potential benefit of intelligent decision support.

Human centered AI should therefore seek an appropriate balance between computational assistance and human judgment. The purpose is not to create a system that makes every decision independently, but to improve the quality, timeliness, and resilience of decision-making across the combined Human-AI system.

eVTOL and Future Aviation Training

The emergence of new aircraft concepts and intelligent systems also creates important implications for aviation training. Future operators will need to interact with systems that differ substantially from conventional aircraft in terms of automation, information presentation, and human–machine coordination. Consequently, training must prepare operators not only to use

autonomous technologies during normal operations but also to understand their capabilities, limitations, and potential failure modes.

Ziakkas et al. (2025) discuss human-centric intelligent systems in relation to immersive eVTOL simulation training, illustrating how emerging technologies may support the preparation of personnel for increasingly complex operational environments. Simulation environments provide opportunities to expose operators to Human-AI interaction scenarios, including unexpected system behavior and changing levels of automation, without introducing operational risk.

Training for autonomous aviation should therefore extend beyond procedural knowledge. Operators may require competencies related to interpreting AI generated information, managing trust, understanding system limitations, maintaining situational awareness during high levels of automation, and determining when intervention is required. These competencies become increasingly important as pilots transition from direct controllers toward supervisors and collaborative partners of intelligent systems.

From a human centered perspective, training should also support appropriate expectations regarding autonomy. Operators need to understand both what intelligent systems can accomplish and where human expertise remains necessary. Such preparation can contribute to calibrated trust and more effective human–autonomy coordination while helping operators remain capable of responding when autonomous system behavior differs from expectations.

Taken together, these emerging applications demonstrate that human centered autonomy is not limited to a single technological solution or operational concept. Intelligent assistants, SPO, AI supported decision making, and future training environments all require careful integration of human capabilities with increasingly sophisticated technologies. Their successful implementation

therefore depends on translating human factors requirements into explicit design principles that can guide the development and evaluation of future autonomous aviation systems.

HUMAN-CENTERED DESIGN PRINCIPLES FOR FUTURE AUTONOMOUS AVIATION SYSTEMS

The preceding discussion demonstrates that the development of autonomous aviation systems cannot be guided solely by technological capability or increasing levels of automation. As autonomous systems become more adaptive, intelligent, and capable of independent action, their effectiveness increasingly depends on the quality of interaction established with human operators. Human Centered Design should therefore address autonomy as a joint human system capability in which technological performance, human cognitive characteristics, operational responsibilities, and safety requirements are considered together (Wang et al., 2023; Bjurling et al., 2024; Kirwan, 2025).

Based on the synthesis of the reviewed literature, eight interrelated principles are proposed for the human centered design of future autonomous aviation systems: meaningful human control, transparency and explainability, calibrated trust, preservation of situational awareness, cognitive compatibility and workload management, adaptive human–autonomy coordination, clear authority and responsibility, and safety centered intelligent assistance. These principles should not be interpreted as independent requirements. Instead, they form an interconnected framework for maintaining effective human involvement while exploiting the capabilities of increasingly autonomous technologies.

Preserve Meaningful Human Control

The first principle is that increasing autonomy should not eliminate meaningful human authority over safety critical

operations. Meaningful Human Control requires autonomous behavior to remain connected to competent human agents and responsive to relevant human intentions and reasons (Calvert, 2025). Accordingly, the human operator should retain sufficient authority, understanding, and intervention capability even when the autonomous system performs substantial portions of an operational task.

Preserving meaningful control does not imply continuous manual control. In highly autonomous environments, requiring constant intervention would undermine many of the benefits of autonomy. Instead, system design should ensure that operators can understand the operational state, influence autonomous behavior, intervene when necessary, and appropriately assume or transfer control. Meaningful control should therefore be embedded in the architecture of human–autonomy interaction rather than treated solely as an emergency override mechanism (Kirwan, 2025).

Ensure Transparency and Explainability

Autonomous systems should communicate their status, intentions, actions, and relevant reasoning in ways that are understandable to human operators. As AI based systems become increasingly complex, their internal processes may become less directly observable. This creates the risk that pilots may receive recommendations or observe autonomous actions without sufficient understanding of why those actions occurred.

Transparency should therefore enable operators to develop an accurate understanding of what the system is doing and what it is likely to do next. Explainability should complement this by providing sufficient insight into the basis of important recommendations or decisions. However, explanations should be context sensitive. Providing excessive technical information during time critical situations may increase cognitive workload rather than

improve understanding. Human centered explainability should consequently provide the appropriate information, at the appropriate level of detail, at the appropriate time (de Visser et al., 2018; Kirwan, 2025).

Support Calibrated Trust

Trust should be treated as a dynamic design requirement rather than an assumption that operators will naturally accept intelligent technologies. Effective human–autonomy interaction requires neither maximum trust nor permanent skepticism. Instead, operator trust should correspond to the actual reliability, capabilities, and limitations of the autonomous system.

Design should therefore support calibrated trust, enabling operators to appropriately rely on autonomy when it performs reliably while remaining prepared to question or override it when circumstances require. Because unexpected system behavior or failure may damage trust, future autonomous systems should also incorporate mechanisms that support trust recovery and recalibration (de Visser et al., 2018).

Transparency, explainability, and predictable behavior are closely related to this principle. Operators are more capable of calibrating their reliance when they understand system capabilities and limitations and can interpret deviations from expected behavior.

Preserve Situational Awareness

Autonomy should reduce unnecessary workload without disconnecting operators from the operational environment. As pilots move from direct control toward supervisory and collaborative roles, they may receive fewer natural indications of system behavior and depend increasingly on information presented through technological interfaces.

Human centered systems should therefore provide sufficient information for operators to understand the current operational situation, the state of the autonomous system, ongoing actions, and potential future developments. Information should be prioritized according to operational relevance rather than simply maximizing the quantity of data presented.

This requirement is particularly important when intervention may suddenly become necessary. A pilot cannot meaningfully intervene in autonomous behavior without first understanding the state of the aircraft, environment, and autonomous agent. Situational awareness is therefore closely linked to meaningful human control and effective human–autonomy coordination (Wang et al., 2023; Saunders et al., 2026).

Design for Cognitive Compatibility and Workload Management

Autonomous technologies should be designed according to human cognitive capabilities and limitations. Although automation can reduce routine task demands, it may simultaneously introduce monitoring, interpretation, coordination, and decision making requirements. Consequently, transferring additional functions to autonomy does not necessarily reduce overall cognitive workload.

Human centered systems should seek to maintain workload within manageable levels while avoiding both excessive demand and prolonged cognitive disengagement. Intelligent assistance may contribute by prioritizing information, supporting complex decisions, and managing secondary tasks during demanding operational situations (Saunders et al., 2026).

Interface design is central to this requirement. Visual, auditory, and other interaction modalities should be selected according to operational context and cognitive demands rather than technological

availability. The objective should be to make autonomous capabilities cognitively compatible with human performance rather than requiring humans to continuously adapt to technological complexity.

Enable Adaptive Human-Autonomy Coordination

Future autonomous systems should support dynamic collaboration rather than fixed divisions of labor. The relative contributions of the human and autonomous agent may need to change according to operational conditions, workload, system capability, and unexpected events.

Human-Autonomy Teaming therefore requires systems capable of coordinating actions and information with human operators in ways that remain predictable and operationally meaningful. Autonomous agents may provide assistance, recommendations, monitoring, or direct action, but these functions should be integrated into a shared operational process rather than performed independently of human activity (Bjurling et al., 2024).

Adaptive coordination becomes particularly relevant in concepts such as SPO, where intelligent systems may need to provide different forms of assistance depending on the demands placed on the remaining pilot. Human centered autonomy should consequently support flexible collaboration while maintaining clarity regarding system behavior and human responsibilities (Wang et al., 2023; Saunders et al., 2026).

Maintain Clear Authority and Responsibility

Increasing autonomy creates important questions concerning who has authority to make decisions and who remains responsible for operational outcomes. Ambiguity in these areas may undermine coordination and meaningful human control.

Human centered design should therefore make the distribution of authority explicit. Operators should be able to determine when an autonomous system is providing information, recommending an action, executing an authorized action, or acting within predefined autonomous boundaries. Similarly, transitions in authority should be clearly communicated and operationally manageable.

This principle is closely associated with Meaningful Human Control. Maintaining identifiable human responsibility does not require humans to directly perform every action, but it does require autonomous behavior to remain within a framework in which human authority, system authority, and accountability are clearly established (Calvert, 2025; Kirwan, 2025).

Prioritize Safety Centered Intelligent Assistance

The final principle is that autonomous capability should be evaluated according to its contribution to overall human system safety rather than according to technological sophistication alone. An intelligent system that performs complex functions but introduces confusion, inappropriate reliance, excessive workload, or reduced situational awareness cannot be considered successfully human centered.

Intelligent assistance should therefore enhance the resilience of the combined human-autonomy system. AI may support information processing, decision making, workload management, and responses to complex operational conditions, but these capabilities should complement human expertise rather than create new dependencies that weaken human preparedness (Ziakkas et al., 2025; Saunders et al., 2026).

Safety centered design also requires consideration of unexpected and degraded conditions. Autonomous systems should not only support optimal performance during routine operations but

also help human operators understand and manage situations in which system capability becomes limited or behavior differs from expectations.

Tablo 1 Proposed Human-Centered Design Principles for Future Autonomous Aviation Systems

Design Principle	Primary Design Objective	Human Factors Rationale	Expected Contribution
Meaningful Human Control	Preserve effective human oversight and intervention	Prevent loss of human authority	Accountability and operational control
Transparency and Explainability	Make system behavior and relevant reasoning understandable	Reduce uncertainty about autonomous actions	Better understanding and decision support
Calibrated Trust	Align reliance with actual system capability	Avoid overreliance and underuse	Appropriate use of autonomy
Situational Awareness	Maintain understanding of system and operational states	Prevent cognitive disengagement	Effective monitoring and intervention
Cognitive Compatibility and Workload Management	Match assistance to human cognitive capabilities	Prevent overload and underload	Sustainable human performance
Adaptive Human-Autonomy Coordination	Enable context sensitive collaboration	Support changing operational demands	Effective Human-Autonomy Teaming
Clear Authority and Responsibility	Define decision and control boundaries	Prevent ambiguity in human system roles	Accountability and coordinated action
Safety Centered Intelligent Assistance	Use autonomy to strengthen overall system safety	Prevent technology driven design from creating new human-factor risks	Safer and more resilient operations

As summarized in Table 1, the proposed principles address different but closely interconnected dimensions of human centered

autonomy. Meaningful human control and clear authority establish the governance of human-autonomy interaction, while transparency, explainability, and calibrated trust support the operator's understanding of and appropriate reliance on autonomous behavior. Situational awareness and cognitive compatibility address human performance requirements, whereas adaptive coordination and safety centered assistance focus on the effectiveness of the combined human–autonomy system. Consequently, these principles should be implemented as an integrated design framework rather than as independent technical requirements.

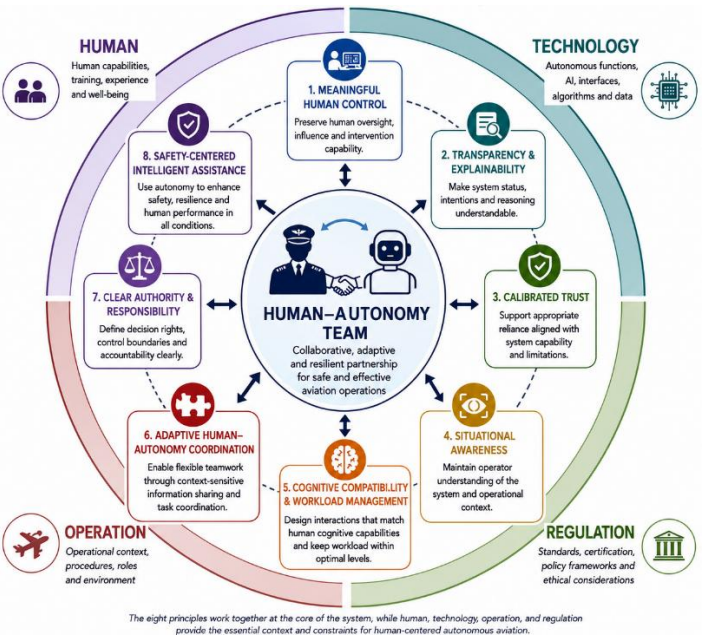


Figure 2 Proposed Human Centered Design Framework for Future Autonomous Aviation Systems

CHALLENGES AND FUTURE PERSPECTIVES

The transition toward human centered autonomous aviation presents significant opportunities for improving operational performance and safety, but it also introduces challenges that extend

beyond the technical development of autonomous functions. As autonomy becomes increasingly integrated into safety critical aviation operations, future systems will need to demonstrate not only technical reliability but also compatibility with human cognitive characteristics, operational responsibilities, and regulatory expectations. The successful implementation of human centered autonomy will therefore require coordinated progress across technological, human factors, operational, and regulatory dimensions (Kirwan, 2025; Ziakkas et al., 2025).

One of the primary challenges concerns the increasing complexity of artificial intelligence and autonomous decision making. Advanced AI systems may process large volumes of data and generate recommendations or actions that are difficult for operators to fully interpret. This creates a potential conflict between increasing technological capability and maintaining meaningful human understanding. Future research should therefore investigate how transparency and explainability can be incorporated into autonomous aviation systems without creating additional cognitive workload. The objective should not be to expose every aspect of algorithmic processing, but to provide operators with information that is operationally relevant and sufficient for effective oversight and decision-making (de Visser et al., 2018; Kirwan, 2025).

A closely related challenge involves maintaining appropriately calibrated trust. As autonomous systems become more reliable and capable, pilots may increasingly depend on their recommendations and actions. However, excessive reliance can reduce active monitoring, whereas insufficient trust may result in rejection or underuse of beneficial autonomous capabilities. Future autonomous aviation systems should therefore incorporate interaction mechanisms that help operators understand system capabilities, limitations, and changes in performance. Attention should also be given to trust repair following unexpected or incorrect autonomous

behavior, since effective long-term human-autonomy collaboration depends on the ability to restore appropriate reliance after system failures (de Visser et al., 2018).

Another important issue is the dynamic allocation of tasks and authority between humans and autonomous agents. Traditional function-allocation approaches may be insufficient for environments in which autonomous systems can adapt their behavior and take greater initiative. Future Human-Autonomy Teaming concepts will require more flexible approaches that determine how responsibilities should change according to operational conditions, workload, system capability, and unexpected events (Bjurling et al., 2024). At the same time, increased flexibility should not create ambiguity regarding decision authority or accountability. Meaningful Human Control therefore remains essential for ensuring that increasing autonomy does not separate operational actions from identifiable human responsibility (Calvert, 2025).

The changing role of aviation personnel represents an additional challenge. As pilots increasingly transition from direct controllers toward supervisors and collaborative partners of intelligent systems, traditional competencies may no longer be sufficient. Future operators will need to understand the capabilities and limitations of AI supported systems, interpret autonomous recommendations, manage trust, maintain situational awareness under high levels of automation, and intervene effectively when system behavior deviates from expectations. Emerging training approaches, including immersive simulation environments, may provide opportunities to develop and evaluate these competencies under realistic but controlled conditions (Ziakkas et al., 2025).

These issues are particularly relevant to emerging operational concepts such as Single-Pilot Operations. Reducing flight crew while increasing technological support creates new questions

regarding workload, resilience, decision-making, and the ability to manage abnormal situations. Future studies should therefore evaluate human centered autonomous technologies under realistic operational scenarios rather than focusing exclusively on isolated technical performance. The effectiveness of intelligent assistance should be assessed according to its contribution to the combined performance of the pilot and autonomous system, particularly during high-workload and unexpected situations (Wang et al., 2023; Saunders et al., 2026).

Regulatory and certification considerations will also play a critical role in determining how autonomous aviation technologies are implemented. As autonomous agents acquire greater decision-making capability, existing assumptions concerning human responsibility, system authority, and operational oversight may need to evolve. The principles of Meaningful Human Control can provide an important conceptual foundation for this process by maintaining a clear relationship between autonomous actions and responsible human agents (Calvert, 2025). Nevertheless, translating such principles into practical requirements for system design, certification, training, and operations remains an important area for future development.

More broadly, future research should move beyond evaluating human and autonomous performance as separate elements. The relevant unit of analysis should increasingly become the integrated human–autonomy system. This perspective requires evaluation methods capable of examining how trust, workload, situational awareness, system transparency, authority, and adaptive coordination interact over time. Human centered autonomous systems should ultimately be assessed according to whether the combined system performs safely and resiliently across routine, complex, and unexpected operational conditions (Bjurling et al., 2024; Kirwan, 2025).

The framework proposed in this chapter provides a conceptual foundation for addressing these challenges, but its principles will require further validation in specific aviation contexts. Future studies could examine how the proposed principles apply to intelligent flight deck assistants, Single-Pilot Operations, highly autonomous aircraft, and emerging eVTOL environments. Experimental and simulation-based research may also help determine how individual principles interact and whether their relative importance changes according to autonomy level, operational phase, or task complexity. Such validation would support the transition from broad human centered design principles toward measurable design and evaluation requirements for future autonomous aviation systems.

Overall, the future of autonomous aviation should not be defined solely by how much authority can technically be transferred to machines. A more meaningful measure of progress will be the extent to which increasingly capable autonomous systems can operate as understandable, trustworthy, and effective partners while preserving appropriate human authority and responsibility. Human centered autonomy therefore represents not a limitation on technological development, but a design philosophy for ensuring that technological capability contributes to safer and more resilient aviation operations.

CONCLUSION

The transition from automation toward increasingly autonomous and AI enabled aviation systems represents a fundamental transformation in the relationship between humans and technology. As autonomous systems acquire greater capabilities for information processing, decision support, adaptation, and independent action, the traditional role of the human operator is progressively shifting from direct control toward supervision, coordination, and collaboration. This transformation requires

aviation system design to move beyond conventional automation centered approaches and adopt a Human Centered Design philosophy in which technological capability is developed in accordance with human cognitive characteristics, operational responsibilities, and safety requirements.

This chapter has examined this transition through the interconnected concepts of Human–Autonomy Teaming, Meaningful Human Control, trust, transparency, explainability, situational awareness, cognitive workload, and intelligent decision support. The discussion demonstrates that increasing autonomy should not be interpreted as a progressive removal of humans from aviation systems. Rather, autonomy changes the nature of human involvement and creates new requirements for effective coordination between human operators and intelligent agents. The performance of future autonomous aviation should therefore be evaluated at the level of the integrated human-autonomy system, rather than by considering human and technological performance independently.

Based on the synthesis of the reviewed literature, this chapter proposed eight Human Centered Design principles for future autonomous aviation systems: meaningful human control, transparency and explainability, calibrated trust, preservation of situational awareness, cognitive compatibility and workload management, adaptive human–autonomy coordination, clear authority and responsibility, and safety centered intelligent assistance. Together, these principles emphasize that autonomous systems should remain understandable, appropriately controllable, cognitively compatible, and operationally aligned with human capabilities and responsibilities. The proposed framework further situates these principles within four interconnected dimensions “human, technology, operation, and regulation” highlighting that human centered autonomy cannot be achieved through interface or technological design alone.

Emerging applications such as intelligent flight deck assistants, Single-Pilot Operations, AI supported decision making, and future eVTOL environments illustrate the practical relevance of this perspective. These concepts may provide substantial benefits in terms of workload management, information processing, and operational support; however, their success will depend on maintaining appropriate human engagement, authority, and preparedness for unexpected conditions. Future research should therefore focus not only on improving autonomous capability but also on validating how human centered principles influence the safety, resilience, and effectiveness of human-autonomy interaction across different operational contexts.

Ultimately, the future of autonomous aviation should not be defined by the extent to which humans can be removed from operational processes, but by the effectiveness with which human expertise and autonomous capability can be integrated. Human centered autonomy therefore represents a shift from designing systems that replace human functions toward designing systems that strengthen human-autonomy collaboration. Maintaining this perspective will be essential for ensuring that future autonomous aviation systems remain not only technologically advanced, but also understandable, trustworthy, controllable, and safe.

Reference

Bjurling, O., Muller, H., Burgen, J., Bouvet, C. J., & Berberian, B. (2024). Enabling human-autonomy teaming in aviation: A framework to address human factors in digital assistants design. Journal of Physics: Conference Series, 2716(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2716/1/012076

Calvert, S. C. (2025). Principles and framework for the operationalisation of meaningful human control over autonomous systems. Science and Engineering Ethics, 31(5). https://doi.org/10.1007/s11948-025-00554-z

de Visser, E. J., Pak, R., & Shaw, T. H. (2018). From 'automation' to 'autonomy': The importance of trust repair in human–machine interaction. Ergonomics, 61(10), 1409–1427. https://doi.org/10.1080/00140139.2018.1457725

Kirwan, B. (2025). Human factors requirements for human-AI teaming in aviation. Future Transportation, 5(2). https://doi.org/10.3390/futuretransp5020042

Saunders, D., Blundell, J., Li, W. C., Beecroft, P., Lu, L., Korek, W. T., & Shi, W. (2026). Principles for 'intelligent assistant' systems in future flight deck design: Autonomous action integration to reduce pilot workload. The Aeronautical Journal. https://doi.org/10.1017/aer.2026.10161

Valiyaparambil, P., & Ghosh, K. K. (2025). Assessing the impact of human factors on aircraft design and safety in the aerospace industry: A machine learning approach. Proceedings of 2025 International Conference on Emerging Technologies in Computing and Communication (ETCC 2025). https://doi.org/10.1109/ETCC65847.2025.11108519

Wang, G., Li, M., Wang, M., & Ding, D. (2023). A systematic literature review of human-centered design approach in single pilot

operations. Chinese Journal of Aeronautics, 36(11), 1–23. https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.07.026

Zhang, Z. T., Liu, Y., & Husmann, H. (2021). Pilot attitudes toward AI in the cockpit: Implications for design. Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS 2021). https://doi.org/10.1109/ICHMS53169.2021.9582448

Ziakkas, D., Henneberry, D., & Plioutsias, A. (2025). Designing human-centric intelligent systems in aviation: Applications of artificial cognitive systems, AI-enhanced investigations, and immersive eVTOL simulation training. Human-Intelligent Systems Integration, 7(1), 249–262. https://doi.org/10.1007/s42454-025-00083-x

Ziakkas, D., & Plioutsias, A. (2024). Artificial intelligence and human performance in transportation. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003480891

BÖLÜM 3

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN KOMPOZİTLER

BEKTAŞ AKGÜL[1]
CİHAT AYDIN2

Giriş

İnsansız hava araçları (İHA), üzerinde insan pilot bulunmaksızın uzaktan kumanda, yarı otonom ya da tam otonom kontrol sistemleri aracılığıyla görev icra edebilen hava platformları olarak tanımlanmaktadır. Son yıllarda İHA sistemleri savunma, keşif-gözetleme, haritalama, tarım, afet yönetimi, lojistik ve çevresel izleme gibi farklı alanlarda giderek daha yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu platformların görev başarısı yalnızca elektronik donanım, yazılım altyapısı, haberleşme sistemleri ve kontrol birimlerinin etkinliğiyle sınırlı kalmamaktadır. Gövde, kanat, pervane, iniş takımı ve taşıyıcı yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin mekanik ve yapısal performansı da uçuş süresi, faydalı yük kapasitesi, manevra kabiliyeti, enerji verimliliği ve yapısal

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Bilimi ve Teknolojileri Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0002-2199-8175
[2] Profesör Doktor, Fırat Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Bakım ve Onarım Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0001-9997-6326

güvenilirlik üzerinde doğrudan belirleyici olmaktadır. Bu nedenle İHA tasarımında malzeme seçimi, aerodinamik ve mekanik tasarım süreçleriyle birlikte ele alınması gereken kritik bir mühendislik problemi olarak değerlendirilmektedir.

Havacılık uygulamalarında kullanılan malzemelerden düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, yüksek rijitlik, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve çevresel koşullar altında kararlı davranış göstermesi beklenmektedir. Geleneksel olarak alüminyum ve titanyum alaşımları havacılık yapılarında yaygın biçimde kullanılmıştır. Hafiflik gereksiniminin artmasıyla birlikte kompozit malzemeler, İHA tasarımlarında daha fazla tercih edilen mühendislik malzemeleri hâline gelmiştir. Kompozit malzemeler, matris ve takviye elemanı olmak üzere en az iki farklı bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşturulmakta ve bu bileşenlerin tek başına sağlayamadığı üstün özellik kombinasyonlarını ortaya koymaktadır. Özellikle polimer matrisli karbon fiber takviyeli kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve tasarım esnekliği nedeniyle havacılık ve İHA uygulamalarında öne çıkmaktadır (Parveez et al., 2022).

İHA'larda kompozit malzeme kullanımını belirleyen temel etkenlerden biri yapısal ağırlığın azaltılmasıdır. Toplam kütlede sağlanan azalma, aynı enerji kaynağıyla daha uzun uçuş süresi, daha yüksek faydalı yük kapasitesi ve daha verimli görev performansı elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Xu et al, 2022). İHA'larda hafiflik gereksiniminin gövde malzemelerindeki gelişimi hızlandırdığını ve karbon fiber kompozitlerin alüminyum ile titanyum gibi hafif metal malzemelerden sonra İHA yapılarında önemli bir konuma ulaştığını belirtmektedir. Bu doğrultuda karbon fiber kompozitler yalnızca taşıyıcı gövde malzemesi olarak değerlendirilmemekte, radar soğurucu/iz azaltıcı yapılar ve yapısal

enerji depolama gibi çok işlevli uygulamalar kapsamında da araştırılmaktadır (Xu et al., 2022).

Kompozit malzemelerin İHA tasarımına sağladığı başlıca katkılardan biri, yapıların görev gereksinimlerine göre özelleştirilebilmesidir. Fiber yönlenmesi, tabaka dizilimi, matris türü ve üretim yöntemi değiştirilerek malzemenin mekanik davranışı belirli yükleme koşullarına uygun biçimde düzenlenebilmektedir. Bu özellik, özellikle kanat, gövde ve kuyruk gibi aerodinamik etkiler ile yapısal yüklerin birlikte karşılandığı bileşenlerde belirgin avantaj oluşturmaktadır(Rekatsinas et al, 2024). Kompozit İHA yapılarının tasarımında geleneksel izotropik malzemelerden farklı bir yaklaşım gerektiğini, tabakalı yapıların, sandviç panellerin ve çok disiplinli optimizasyon yöntemlerinin ağırlık ve dayanım hedeflerini birlikte karşılamada önemli olduğunu vurgulamaktadır. Bu durum, kompozitlerin İHA tasarımında yalnızca alternatif bir malzeme grubu olarak değil, tasarım yaklaşımını dönüştüren stratejik bir unsur olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

İHA yapılarında kullanılan kompozit sistemler içinde sandviç kompozitler de dikkat çekici bir yer tutmaktadır. Sandviç yapılar genel olarak iki ince ve dayanıklı yüzey tabakası ile bu tabakalar arasında konumlanan hafif çekirdek malzemeden meydana gelmektedir. Bal peteği, köpük ya da benzeri çekirdek yapılar sayesinde düşük ağırlıkla yüksek eğilme rijitliği elde edilebilmektedir. Bu özellik, kanat panelleri, gövde kaplamaları ve kontrol yüzeyleri gibi geniş yüzeyli havacılık bileşenlerinde önemli tasarım avantajları sağlamaktadır(Castanié et al, 2020). Sandviç yapıların havacılık uygulamalarında uzun süredir kullanıldığını ve özellikle hafiflik ile yüksek yapısal performansın birlikte hedeflendiği tasarımlarda tercih edildiğini ifade etmektedir.

Bununla birlikte kompozit malzemelerin İHA uygulamalarında kullanımı bazı teknik sorunları da beraberinde

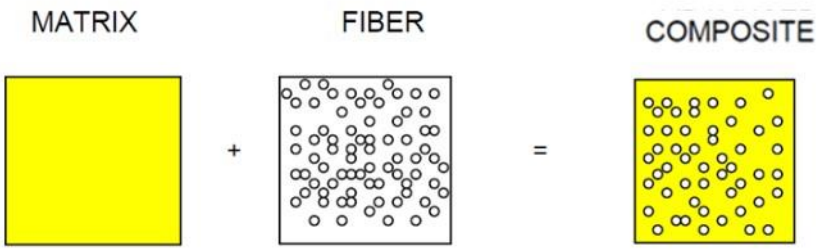
getirmektedir. Darbe hasarı, delaminasyon, üretim kaynaklı kusurlar, nem ve sıcaklık etkileri, bakım-onarım güçlükleri ve hasar tespitinin karmaşık yapısı bu sorunlar arasında yer almaktadır. Karbon fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek düzlem içi mukavemet ve rijitlik göstermesine karşın, düzlem dışı darbe yüklemelerine karşı daha hassas davranabilmekte ve bu durum delaminasyon gibi iç hasar mekanizmalarına neden olabilmektedir (Sarvestani vd., 2017). Kompozit yapılarda bazı hasarların dış yüzeyden kolaylıkla fark edilememesi, tahribatsız muayene yöntemlerini yapısal güvenliğin sağlanmasında zorunlu hâle getirmektedir. (Wang et al., 2020). ultrasonik test, termografi, akustik emisyon, shearografi ve X-ışını görüntüleme gibi yöntemlerin kompozit yapılardaki hasar ve kusurların belirlenmesinde yaygın olarak değerlendirildiğini belirtmektedir.

Bu seminer çalışmasının amacı, İHA'larda kullanılan kompozit malzemelerin temel özelliklerini, sağladığı avantajları, uygulama alanlarını ve karşılaşılan teknik sorunları akademik kaynaklar doğrultusunda incelemektir. Çalışma kapsamında öncelikle kompozit malzemelerin genel yapısı ve sınıflandırılması ele alınmakta, ardından karbon fiber, cam fiber, aramid fiber ve sandviç kompozitlerin İHA bileşenlerindeki kullanım alanları değerlendirilmektedir. Devamında kompozitlerin İHA performansına etkileri, üretim yöntemleri, hasar mekanizmaları, bakım-onarım gereksinimleri ve gelecek eğilimleri incelenmektedir. Böylece kompozit malzemelerin İHA teknolojilerindeki stratejik rolü, malzeme bilimi ve havacılık mühendisliği ekseninde bütüncül biçimde ortaya konulmaktadır.

Kompozit Malzemelere Genel Bakış

a. Kompozit Malzeme Tanımı

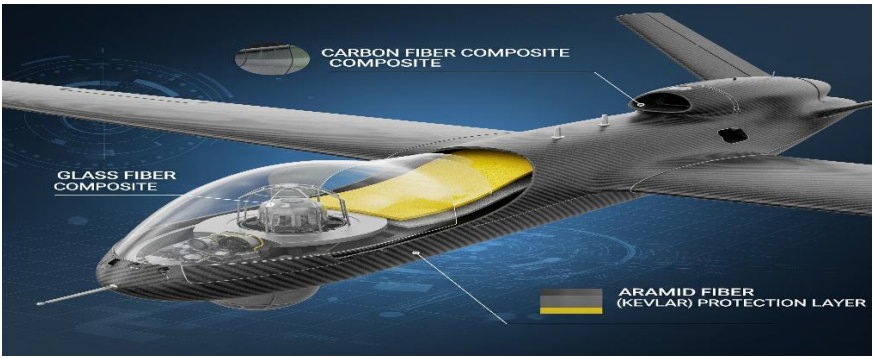
Şekil 1. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanımı



Kaynak: Erdil (2020)

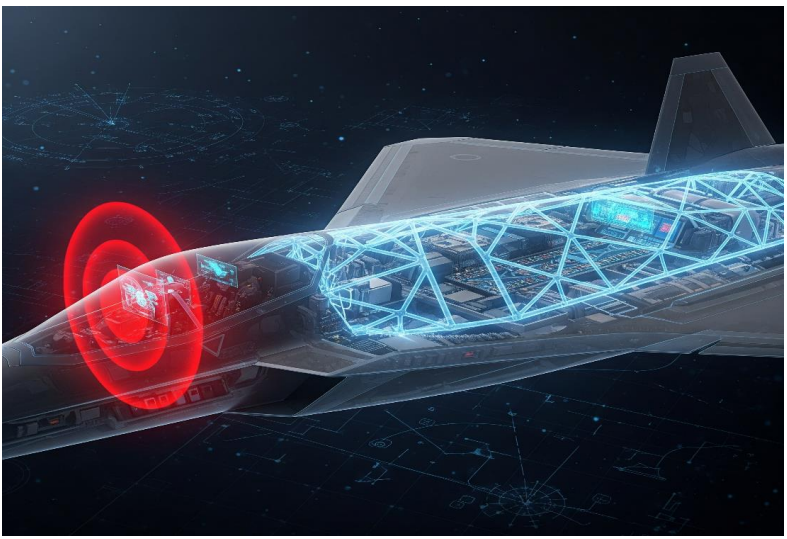
Fiziksel, mekanik ve kimyasal nitelikleri bakımından birbirinden ayrılan iki ya da daha fazla malzemenin belirli bir düzen içinde birleştirilmesiyle meydana getirilen ve bileşenlerinden farklı karakteristikler taşıyan malzemeler kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler, yapılarında yer alan bileşenlerle karşılaştırıldığında akma dayanımı, kopma dayanımı, rijitlik, kırılma tokluğu, kütle-hacim ilişkisi ve yüksek sıcaklık koşullarına direnç gibi özellikler açısından özgül nitelik kombinasyonları ortaya koymaktadır (Rajak et al., 2019). Söz konusu malzeme birliktelikleri, kompozitlerin uzay ve havacılık, otomotiv, savunma, spor, ulaştırma ve inşaat alanlarında geniş bir kullanım zemini kazanmasına yol açmakta ve bu kullanım alanları zaman içinde giderek yaygınlaşmaktadır. Kullanım yoğunluğu son yüzyılda belirgin biçimde artmış olmakla birlikte kompozit malzemelere ilişkin uygulamaların kökeni antik dönemlere kadar uzanmaktadır. Kırılgan yapıdaki malzemelere dayanımı yüksek hayvansal ve bitkisel katkıların dâhil edilmesi yoluyla ana yapının mekanik niteliklerinin geliştirilmesi, yapı inşasında kullanılan kerpiçler ile savunma amacı taşıyan yaylarda karşılık bulmaktadır.

Resim 1. Hafif ve Güçlü Kompozit Malzeme



Kaynak: Nanotoz (t.y.)

Resim 2. Savunma Sanayinde İletken Kompozitlerin Stratejik Önemi



Kaynak: Profesör administrator (t.y.)

Kompozit malzemeler, bileşimsel yapı bakımından matris fazı ve takviye fazı olmak üzere iki temel unsurdan meydana gelmektedir. Endüstriyel kullanıma elverişli mekanik davranışların kompozit malzemelere kazandırılması, bu iki fazın birlikte

oluşturduğu yapısal düzen sayesinde gerçekleşmektedir. Matris fazı, takviye elemanlarını bütüncül bir yapı içinde tutarak malzeme sürekliliğini korumaktadır. Bununla birlikte kompozit malzemeye etki eden kuvvetlerin takviye elemanlarına aktarılmasını sağlayarak malzemenin hasara uğrama eğilimini sınırlandırmaktadır. Takviye fazı ise matris malzemesine kıyasla daha sert ve daha yüksek dayanımlı bir yapı sergilediğinden, kompozit malzemeye akma dayanımı, kopma dayanımı ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikler kazandırmaktadır (Cantor vd., 2011).

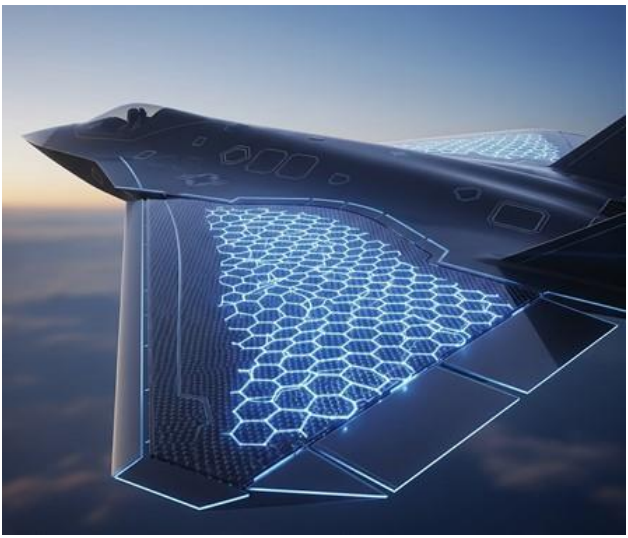
b. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin mekanik nitelikleri, daha önce ifade edildiği üzere, yapıyı meydana getiren matris fazı ile takviye fazının ortak etkisiyle kazandırılmaktadır (Rajak et al., 2019). Bu çerçevede kompozit malzemeler, yapısal bileşimlerinde yer alan matris türü ve takviye elemanlarının özellikleri esas alınarak sınıflandırılmaktadır.

1. Matrise Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerde matris fazı, yapıya dış görünümünü kazandıran ve bileşenlerin bir arada bulunmasına zemin hazırlayan temel unsur olarak değerlendirilmektedir. Matris malzemesi, kompozit yapı içerisinde sürekliliğin korunmasına katkı vermekte ve dış etkilerden kaynaklanan darbe yüklerine karşı direnç oluşturmaktadır. Kompozitlerin sınıflandırılmasında kullanılan malzeme türleri temel belirleyici ölçütlerden biri olarak kabul edilmektedir. Bu kapsamda matris esasına göre kompozit malzemeler, Metal Matris Kompozitler (MMK), Polimer Matris Kompozitler (PMK) ve Seramik Matrisli Kompozitler (SMK) olmak üzere üç ana grup altında ele alınmaktadır (Sharma et al., 2020).

Resim 3. Grafen Takviyeli Karbon Elyaf Kompozitlerin Dayanıklılık ve Uygulamaları



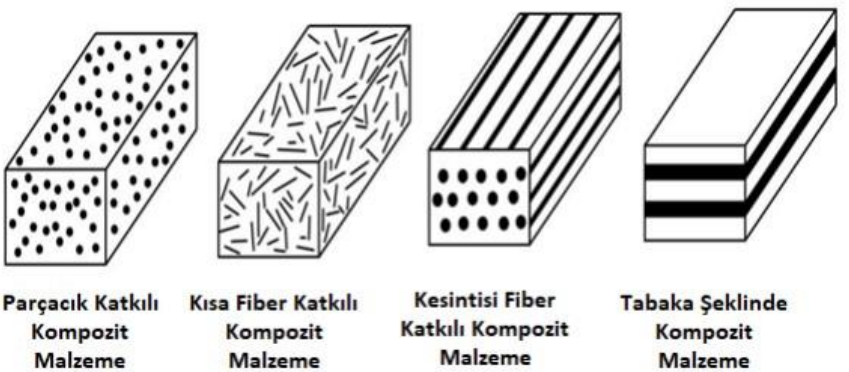
Kaynak: Nanokar (2025)

Metal Matris Kompozit Malzemelerde matris fazını Alüminyum (Al), Bakır (Cu), Magnezyum (Mg), Nikel (Ni), Titanyum (Ti) ve bu metallere ait alaşımlar meydana getirmektedir. Bu malzemelerin MMK yapılarında tercih edilmesi, yüksek aşınma dirençleri ile gelişmiş mekanik ve termal niteliklerinden kaynaklanmaktadır. Alüminyum ve alaşımları düşük yoğunlukları, işlenebilirlik düzeyleri, korozyon dirençleri ve yüksek özgül mukavemetleri nedeniyle MMK'lerde matris bileşeni olarak kullanılmaktadır. Alüminyum esaslı MMK üretiminde, matris ile takviye fazı arasındaki bağlanma güçlükleri dikkate alındığında ıslanabilirliği yüksek takviye malzemelerinin seçimi öne çıkmaktadır. Alüminyumun sünek karakter taşıması, yüksek sertlik değerine sahip takviye malzemelerine yönelik ilgiyi artırmaktadır. Bu kapsamda Alüminyum MMK'lerde Al_2O_3, TiB_2, TiO_2, SiC, TiC ve B_4C gibi karbür, oksit ve borit esaslı takviyeler endüstriyel

uygulamalarda yaygın biçimde yer almaktadır. Alüminyum MMK'ler yüksek mukavemet, düşük maliyet ve hafiflik özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık başta olmak üzere savunma, otomotiv, demiryolu ve deniz taşımacılığı, elektrik-elektronik, hobi ve spor endüstrilerinde kullanılmaktadır (Cantor vd., 2011).

Bakır ve alaşımlarının matris malzemesi olarak kullanıldığı MMK'ler son yıllarda daha fazla dikkat çekmektedir. Bu durum, bakır esaslı malzemelerin elektrik iletkenliği, yüksek korozyon direnci, yorulma dayanımı ve yüksek özgül ağırlık gibi niteliklerinden kaynaklanmaktadır. Bakır esaslı MMK üretiminde SiC gibi aşınma direnci yüksek seramik takviyelerin kullanılmasıyla fiziksel ve mekanik özellikleri geliştirilmiş kompozit yapılar elde edilmektedir. Bakırın yüksek elektrik iletkenliği, bu kompozitlerin elektrik ve elektronik sektöründe kullanımını artırmaktadır. Termal davranışları, mekanik dayanımları ve yoğunlukları nedeniyle demiryolu rayları, diş implantları, medikal cihazlar, ısı eşanjörleri, deniz taşımacılığı ve havacılık yapılarında da kullanım alanı bulmaktadır (Bahador et al., 2020).

Şekil 2. Kompozit Malzemelerin Katkı Şekline Göre İsimlendirilmesi



Kaynak: Gazi Akademik Yayıncılık (2023)

Magnezyum ve alaşımları, endüstride kullanılan farklı metallere kıyasla düşük yoğunluk, üstün mekanik davranış, yüksek korozyon ve aşınma direnci ile düşük ısıl genleşme katsayısı gibi özellikler taşıdığından MMK'lerde matris bileşeni olarak daha fazla kullanılmaktadır. Magnezyum esaslı MMK üretiminde Al_2O_3, SiC, B_4C ve metalik camlar takviye malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Bu takviyeler, Magnezyum esaslı MMK'lerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesine katkı vermektedir. Titanyum ve alaşımları ise biyouyumlu yapıları, özgül mekanik özellikleri, aşınma ve korozyon dirençleri nedeniyle endüstride geniş kullanım alanına sahiptir. Titanyum esaslı MMK üretiminde bağlanma özelliklerinde oluşabilecek kayıpların sınırlandırılması amacıyla Titanyum Borür (TiB) ve Titanyum Karbür (TiC) takviye elemanları kullanılmaktadır. Bu takviyelerle üretilen Titanyum esaslı MMK'ler, yüksek sıcaklık koşullarında çalışma kabiliyetini artırmakta ve yüksek düzeyde özgül mekanik özellikler kazanmaktadır. Titanyum MMK'ler biyomedikal endüstri, otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır (Rajak et al., 2019).

Matris fazının termoset ya da termoplastik malzemelerden, takviye fazının ise cam, karbon ve aramid elyaflardan oluştuğu kompozitler Polimer Matrisli Kompozit (PMK) olarak adlandırılmaktadır. Teknolojik gelişmelerle ilerleyen elyaf üretimi, geleneksel metal malzemelerde görülen sınırlılıklar, üretim kolaylığı ve düşük maliyet PMK'lerin mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmasına zemin hazırlamıştır. Elyaf takviyeleriyle birlikte PMK'ler yüksek çekme mukavemeti, yüksek sertlik, kırılma tokluğu, korozyon direnci, aşınma direnci ve delinme direnci göstermektedir (Cantor vd., 2011). Bunun yanında düşük termal direnç ve yüksek termal genleşme katsayısı da bu malzeme grubunun özellikleri arasında yer almaktadır. Lifli takviye yapısı

nedeniyle yük altında liflerde kırılmalar meydana gelmekte, polimer matris ise yükleri donatılara aktararak kırılmaların yüzeye taşınmasını sınırlandırmaktadır. Bu davranış, matris malzemesine sönümleyici nitelik kazandırmakta ve rezonans benzeri istenmeyen etkilerin azaltılmasına katkı vermektedir. PMK'ler bu özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık alanında iskelet ve kabuk yapılarda sıkça kullanılmaktadır. Yüksek özgül mekanik özellikleri, hafif yapıları ve korozyon dirençleri nedeniyle endüstriyel alanlarda ve gündelik yaşam uygulamalarında yer almaktadır. Uzay ve havacılık, medikal cihazlar, otomobil sektörü, karayolu yapıları, demiryolu ve deniz taşımacılığı, ahşap ve mobilya sektörü, kapı panelleri, kaplama yapıları, spor ve hobi ekipmanları bu kullanım alanları arasında gösterilmektedir (Sharma et al., 2020).

Resim 4. Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanımı



Kaynak: Erdil (2020)

Seramik malzemeler yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek sertlik, hafiflik, kimyasal kararlılık, aşınma direnci ve üstün basma mukavemeti ile tanımlanmaktadır. Buna karşın düşük tokluk

değerleri nedeniyle yapısal uygulamalardaki kullanım alanları sınırlı kalmaktadır. Yüksek sıcaklık koşullarında çalışabilen ve daha yüksek tokluk gösteren malzemelere duyulan gereksinim, Seramik Matrisli Kompozitlerin endüstriyel açıdan değer kazanmasına neden olmaktadır. SMK üretiminde matris fazını oluşturan seramik yapı, sürekli ve süreksiz liflerle takviye edilmektedir. Lif takviyeleri, kompozit bünyesinde çevresel direnç oluşturarak özellikle yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen yüklemeler karşısında yapının kararlılığını korumasına katkı vermektedir. Kesici takımlar, ısı motorları, tank güç aktarma organları, denizaltı salmastraları, rulmanlar ve türbinler SMK'lerin uygulama alanlarına örnek oluşturmaktadır (Bahador et al., 2020).

2. Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin termal ve mekanik nitelikleri, takviye fazının mikro yapısı, takviye türü, aşındırıcı karakteri, arayüzey bağlanma durumu, hacimsel oranı ve parçacık boyutu gibi etkenlere bağlı olarak değişmektedir. Takviye elemanlarının kompozit yapı içerisindeki temel işlevi, malzemeye etki eden kuvvetlerin taşınmasına katkı vermek, matris fazının rijitlik ve mukavemet düzeyini geliştirmektir (Lütjering vd., 2007). Bu kapsamda kompozit malzemeler, kullanılan takviye elemanının yapısal niteliği dikkate alınarak da sınıflandırılmaktadır. Takviye türü esas alındığında kompozit malzemeler parçacık takviyeli, elyaf takviyeli ve tabakalı kompozitler olmak üzere üç temel grup altında incelenmektedir.

Şekil 3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması



Kaynak: Aydemir (2021)

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, sünek özellik gösteren matris fazı içerisinde yer alan ve matrisle bağ kurarak tokluk ile dayanım değerlerini artırmayı amaçlayan küçük, sert ve gevrek parçacıkların takviye unsuru olarak kullanıldığı malzeme sistemleri olarak tanımlanmaktadır. Bu tür kompozitlerde takviye fazı boyutsal açıdan makro ölçekte değerlendirilmektedir. Düzenli ya da düzensiz boyutlara sahip seramik parçacıklar, bu kompozit grubunda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Parçacık takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde toz metalürjisi, difüzyonla bağlama, mekanik alaşımlama ve döküm yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Üretim sürecinde parçacıkların matris fazı içerisinde homojen biçimde dağılması, kompozit bütünlüğün korunması açısından temel bir gereklilik taşımaktadır. Parçacıkların matris içinde düzensiz yerleşmesi, yükleme koşulları altında bölgesel çatlak oluşumuna neden olmakta ve çatlama, çarpılma, kırılma ya da kopma gibi istenmeyen hasar biçimlerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamaktadır (Cantor vd., 2011).

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, kompozit türleri arasında üretimi ve kullanımı en yaygın olan gruplardan biri olarak değerlendirilmektedir. Bu malzemelerde yüksek mukavemet,

üretilebilirlik ve esneklik gibi üstün nitelikler taşıyan lifli yapıya sahip elyaflar takviye fazı olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf, karbon elyaf ve aramid, bu grupta yer alan başlıca takviye elemanları arasında gösterilmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik davranışı, elyaf ile matris arasındaki arayüzey bağlanma niteliğine, liflerin yönlenme düzenine ve lif boyutlarına bağlı olarak şekillenmektedir. Bu nedenle elyafların yapı içindeki konumu ve boyutsal özellikleri, malzemenin yük taşıma davranışının belirlenmesinde belirleyici rol üstlenmektedir. Elyaf takviyeleri, lif yapısının süreklilik durumuna göre süreksiz lif takviyeli ve sürekli lif takviyeli sistemler kapsamında ele alınmaktadır (Xu et al., 2022).

Tabakalı kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin benzer veya farklı doğrultularda üst üste yerleştirilmesiyle katmanlı yapı biçiminde meydana getirilen kompozit sistemler olarak ifade edilmektedir. Bu katmanlar cam, ahşap, metal ya da plastik esaslı malzemelerden oluşabilmektedir. Üretim aşamasında katmanlar tek bir malzeme türünden seçilebildiği gibi farklı malzeme kombinasyonlarıyla da oluşturulmaktadır. Korozyon ve ısıya karşı direnç göstermeleri, yüksek mukavemet özellikleri ve hafif yapıları nedeniyle uzay ve havacılık araç bileşenlerinde, otomobil parçalarında, rüzgâr türbini kanatlarında, tekne gövdelerinde ve hobi araçlarında kullanım alanı bulmaktadır. Mekanik özellikleri yönünden değerlendirildiğinde tabakalı kompozitler düşük yoğunluk, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, üstün korozyon direnci, yüksek çentik dayanımı, darbe ve yorulma direnci, üretim ve onarım kolaylığı ile yüksek özgül statik özellikler göstermektedir (Lütjering vd.,2022). Bu nitelikler, büyük ölçüde takviye elemanlarının yönelim açılarına bağlı olarak değişmektedir. Tabakalı kompozitler düz, dalgalı ve dairesel formlarda üretilebilmektedir.

c. Kompozit Malzemelerin Teknolojik Özellikleri

Yalıtım, çağdaş mimari uygulamalarda yaşam konforuna, ekonomik verimliliğe ve ekolojik dengeye katkısı nedeniyle yapı sektörünün temel unsurlarından biri hâline gelmektedir. Bina ile yapı içinde bulunan canlı ve cansız varlıkların gürültü, yangın, soğuk ve sıcak etkilerine karşı korunması amacıyla alınan teknik önlemler yalıtım kapsamında tanımlanmaktadır. Uygun yalıtım uygulamaları, yapının fiziksel bütünlüğünü korumakta ve kullanım alanlarında sağlık koşullarıyla uyumlu konfor düzeyinin oluşturulmasına katkı vermektedir (Kaya, 1995).

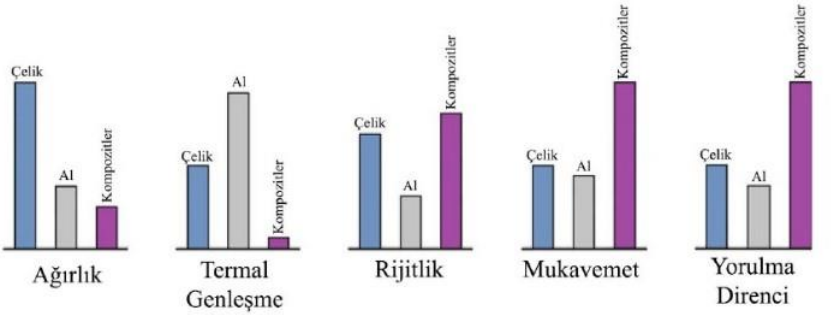
Isı yalıtımı, yapı bileşenlerini dış çevre etkilerine karşı korumayı, değişen mevsim koşullarında kullanım amacına uygun sağlıklı ve ekonomik konfor koşulları oluşturmayı, yapı elemanları üzerinden gerçekleşen ısıl enerji geçişini azaltmayı amaçlamaktadır. İnşaat teknolojilerindeki gelişmeler ve betonarmenin taşıyıcı sistem olarak kullanılması, duvar kalınlıklarının azalmasına neden olmakta ve ısı, nem, ses ile yanma davranışına ilişkin yapı fiziği sorunlarını gündeme getirmektedir. Çok katlı yapılarda ısı kayıplarının %40'ı, tek katlı yapılarda ise %25'i duvarlar yoluyla gerçekleşebilmektedir. Isı, farklı sıcaklık değerlerine sahip ortamlar arasında sıcaktan soğuğa doğru hareket ederek dengeye yönelmektedir. Yalıtım malzemeleri, ısı iletkenlik katsayıları ve kalınlıklarına bağlı olarak bu geçişe direnç göstermektedir. Isı yalıtım malzemelerinin boşluk oranının yüksek, yoğunluğunun düşük ve nem içeriğinin az olması gerekmektedir. Enerji tasarrufu açısından ısı iletim katsayısının düşük, buhar difüzyon direncinin yüksek, yanıcılık eğiliminin sınırlı, çevre ve sağlık koşullarına uygun, çürüme ile fermantasyona dayanıklı ve nem tutmayan yapıda olması beklenmektedir (Vasiliev vd., 2001).

Ses, hava, su ya da benzeri elastik ortamlarda basınç değişimleriyle yayılan ve insan kulağı tarafından algılanan bir uyaran olarak açıklanmaktadır. İnsan kulağı 20 Hz ile 20.000 Hz

aralığındaki sesleri işitebilmektedir. Düzensiz spektrumlu sesler gürültü olarak adlandırılmaktadır. Ses absorbsiyonunda, hava parçacıkları yalıtım malzemesi içinde sürtünerek ses enerjisinin bir bölümünü ısı enerjisine dönüştürmektedir. Ses yalıtımında lifli ya da açık gözenekli malzemeler tercih edilmektedir. Yoğun, gözeneksiz ve homojen yapı elemanlarında ses yalıtımı birim alan ağırlığıyla ilişkilendirilmektedir. Doğal elyaflar, selüloz atıkları, kenaf, keten, kenevir, koyun yünü, bambu ve Hindistan cevizi lifleri oda akustiği ile gürültü bariyerlerinde ses emici olarak kullanılmaktadır (Vasiliev vd., 2001).

Yangın yalıtımı, yanıcı madde, oksijen ve tutuşma sıcaklığı koşullarının kontrol altına alınmasına dayanmaktadır. Yanma, oksijenle gerçekleşen fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar sonucunda ışık, ısı, su, karbon dioksit ve karbon monoksit oluşumuyla gerçekleşmektedir. Malzeme sıcaklığındaki artış öz ısı, yoğunluk, termal iletkenlik, gizli ısı ve buharlaşma ısısına bağlıdır. Yangın geciktiriciler yanma kimyasını değiştirerek alev yayılımını sınırlandırmakta, kömürleşmeyi artırmakta ve yanıcı gazların ayrışmasını azaltmaktadır. Yanma dayanımı katkı oranı, kalınlık, yoğunluk ve alevlenebilirlik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Malzemelerin yangın davranışlarının belirlenmesinde DIN 4102 ve BS 476 standartları esas alınmaktadır (Kaya, 1995).

Grafik 1. Geleneksel Monolitik Malzemeler ile Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması



Kaynak: Admin (2020)

İnsansız Hava Araçları

İHA'nın Tanımı

İnsansız hava araçları (İHA), bünyesinde pilot yer almadan uzaktan kumanda ile yönlendirilen ya da otonom sistemler aracılığıyla işletilen hava araçlarını ifade etmektedir. Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'ne göre "Unmanned Aircraft System (UAS)" kavramı yalnızca hava aracını kapsamamakta, kontrol istasyonu, veri bağlantısı ve destek unsurlarını içeren bütünleşik bir sistem yapısını tanımlamaktadır. Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı, İHA sistemlerini radyo kontrollü modellerden sabit kanatlı hava araçlarına, döner kanatlı platformlardan hibrit sistemlere uzanan geniş bir kategori içinde değerlendirmektedir. Amerika Birleşik

Devletleri Federal Havacılık İdaresi (FAA) ise Part 107 düzenlemesiyle bu araçların ulusal hava sahasında güvenli işletilmesine yönelik esasları belirlemektedir (Federal Aviation Administration [FAA], 2020).

İHA'lar, son yıllarda doğal afetlerle mücadele süreçlerinde stratejik bir unsur niteliği kazanmaktadır. Türkiye'de meydana gelen orman yangınları, depremler ve sel olaylarında bu sistemler arama-kurtarma, hasar tespiti, yangın izleme ve afet bölgesinin haritalanması gibi görevlerde etkin biçimde kullanılmaktadır. Afet sahalarında altyapı hasarlarının belirlenmesi, haberleşme ağlarının yeniden kurulmasına destek verilmesi ve geniş alanların kısa sürede taranması bakımından İHA'lar yüksek işlevsel kapasite göstermektedir (Erdelj et al., 2017). Termal kameralarla kayıp kişilerin belirlenmesi ve gerçek zamanlı veri aktarımı, karar vericilerin afet koşullarına daha hızlı yanıt vermesine zemin hazırlamaktadır.

Türkiye'de orman yangınlarıyla mücadelede İHA kullanımı 2020 yılında başlamıştır. Orman Genel Müdürlüğü, yerli üretim Bayraktar TB2 tipi İHA'ları yangınların erken tespiti amacıyla devreye almıştır. Bakanlık açıklamalarında 2020 yangın sezonunda 33 helikopter, 2 uçak ve 1 İHA'nın havadan destek verdiği bildirilmektedir. Bu gelişme, Türkiye'nin Avrupa'da orman yangınlarında İHA teknolojisini kullanan ilk ülke, dünyada ise ikinci ülke konumuna gelmesine yol açmıştır (Kale, 2026).

Resim 5. İHA'lara Yeni Görev: Yangınlar İçin Kullanılabilir

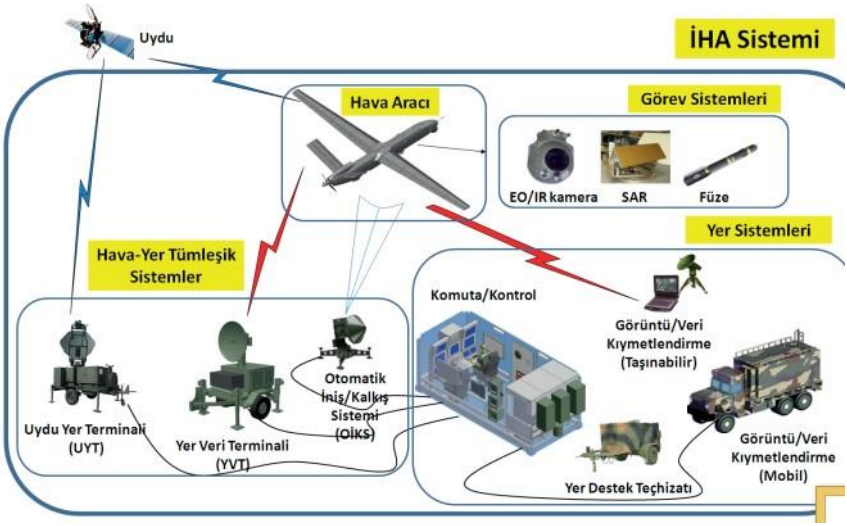


Kaynak: Aksan (2019)

2020 yılından sonra İHA destekli gözlem faaliyetleri giderek kurumsallaşmaktadır. Orman Genel Müdürlüğü verilerine göre 3.000'den fazla orman yangını erken aşamada tespit edilmiş, yangınlara ilk müdahale süresi 40–45 dakikadan 10 dakikaya kadar düşmüştür. Elazığ Sivrice depremi, 2021 yangınları, Bartın, Kastamonu ve Sinop taşkınları ile 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri, İHA kullanımının farklı afet türlerinde yaygınlaştığını göstermektedir. 2024 ve 2025 yıllarında Orman Genel Müdürlüğü ile AFAD tarafından yürütülen çalışmalar, İHA teknolojisinin afet yönetimi süreçlerinde kurumsal bir bileşen hâline geldiğini ortaya koymaktadır (Kale, 2026).

İHA'nın Bileşenleri

Şekil 4. İHA Sistemi Unsurları



Kaynak: Thinktech STM Teknolojik Düşünce Merkezi (2018)

İnsansız hava araçları (İHA), yalnızca uçan platformdan oluşan araçlar kapsamında değerlendirilmemekte, uçuş kontrol sistemi, güç sistemi, haberleşme ve veri bağlantısı, faydalı yük ile yer kontrol istasyonu gibi alt bileşenlerin birlikte işlediği bütünleşik bir sistem yapısını ifade etmektedir. Bu yapıyı meydana getiren her unsur, İHA'nın uçuş performansı, görev güvenilirliği ve enerji verimliliği üzerinde doğrudan belirleyici etki oluşturmaktadır (Erdelj et al., 2017).

Uçuş kontrol sistemi, İHA'nın merkezi yönetim birimi niteliğinde çalışmaktadır. Bu sistem, ataletsel ölçüm birimi, jiroskop, ivmeölçer, manyetometre ve barometre gibi sensörlerden elde edilen verileri işleyerek aracın konumunu, yönelimini ve hızını sürekli biçimde hesaplamaktadır. Uçuş kontrolörleri, otopilot yazılımlarıyla birlikte çalışarak rota izleme, otonom geri dönüş ve sabit irtifa koruma gibi görevleri yerine getirmektedir. Gelişmiş yapılarda sensör füzyonu ve model öngörülü kontrol algoritmaları kullanılarak

manevra hassasiyeti artırılmaktadır. Bu birim, kamera ve haberleşme modülü gibi görev yüklerini yönetmekte, veri bağlantısının denetimini de gerçekleştirmektedir. Enerji verimliliği bakımından uçuş kontrol birimlerinde düşük güç tüketimli mikroişlemcilerin kullanımı kritik değer taşımaktadır (Uragun, 2011).

Güç sistemi, İHA'nın enerji gereksinimini karşılayan temel yapı olarak bataryalar, motorlar, elektronik hız kontrol birimi ve güç dağıtım kartından meydana gelmektedir. Küçük ve orta ölçekli İHA sistemlerinde çoğunlukla lityum-polimer bataryalar kullanılmakta, daha büyük platformlarda hibrit-elektrik ya da içten yanmalı motor çözümleri tercih edilmektedir. Uragun (2011), güç bileşenini enerji verimliliğini belirleyen altı temel alt sistemden biri olarak tanımlamaktadır. Güç sistemlerinde gerçekleştirilen enerji optimizasyonu, uçuş süresi ve görev başarısı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Acil durum görevlerinde enerji yoğunluğu yüksek batarya teknolojileri operasyonel açıdan üstünlük kazandırmaktadır.

Haberleşme ve veri bağlantısı sistemi, İHA ile yer kontrol istasyonu arasındaki karşılıklı bilgi akışını yürütmektedir. Bu bağlantı çoğunlukla 2.4 GHz veya 5.8 GHz bandında radyo frekansı üzerinden kurulmakta, uzun menzilli görevlerde uydu bağlantısı ya da 4G/5G tabanlı iletişim sistemleri kullanılmaktadır. Veri bağlantısı, uçuş komutlarının yanında kamera ve sensörlerden gelen görev verilerini de taşımaktadır. İletişim mesafesinin artması ile iletim gücü gereksinimi de yükselmektedir (Kale, 2026).

Resim 6. ASELSAN'ın Uydu Haberleşmesi Alanındaki Sistem Çözümleri ve Projeleri



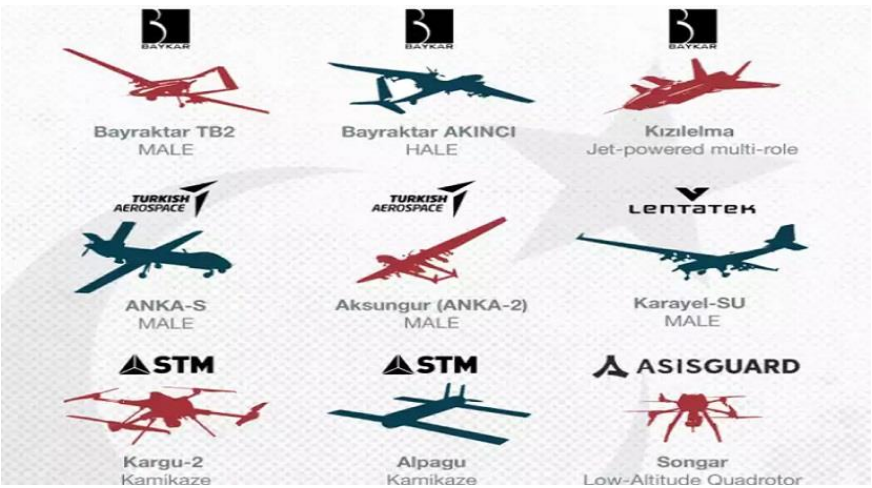
Kaynak: Kaplan (2021)

Faydalı yük, İHA'nın görev amacına bağlı olarak taşıdığı kamera, LIDAR, termal sensör, radar modülü, iletişim rölesi ve kimyasal sensör gibi donanımları kapsamaktadır. Bu bileşenler aracın ağırlık merkezini ve enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Her sensör ya da görev modülü toplam enerji gereksinimini artırmaktadır. Yer kontrol istasyonu ise operatörün İHA'yı yönettiği, görev rotasını oluşturduğu ve telemetri verilerini izlediği merkez olarak görev yapmaktadır. Modern sistemlerde uçuş planlama yazılımı, anten modülleri, veri bağlantı üniteleri ve ekran arayüzleri birlikte kullanılmaktadır. GCS, konum, hız, batarya durumu ve yük verilerini gerçek zamanlı olarak analiz etmektedir. Acil durumlarda rota değişikliği, geri çağırma ve yük aktarımı bu merkez üzerinden yürütülmektedir. İleri düzey sistemlerde yapay zekâ destekli görev planlama modülleri GCS yapısına entegre edilmektedir (Erdelj et al. 2017).

İHA'nın Sınıflandırılması

Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü (ICAO), hava araçlarını balon, planör, uçak ve rotorlu hava aracı gibi çeşitli gruplar altında tanımlamaktadır. Uçaklar kara, deniz ya da amfibi özellik taşıyabilmektedir. Bir hava aracının insanlı ya da insansız işletilmesi, onun hava aracı statüsünü değiştirmemektedir. Bu yaklaşım, insansız hava araçlarına yönelik düzenlemelerin temelini oluşturmakta ve uçuşa elverişlilik, personel lisanslandırma ile ayırma standartları gibi konuların değerlendirilmesinde belirleyici rol üstlenmektedir. ICAO'nun Unmanned Aircraft Systems (UAS) dokümanında (Circular 328-AN/190) İHA'lar, üzerinde pilot bulunmayan, uzaktan kontrol edilen ya da otonom biçimde uçabilen hava araçları olarak tanımlanmaktadır (International Civil Aviation Organization [ICAO], 2011). Bu tanım, İHA sınıflandırmalarında kullanılan ölçütler için temel dayanak oluşturmaktadır.

Resim 7. Türkiye'de Geliştirilen Başlıca İHA Platformları



Kaynak: Bağımsız Havacılar (2023)

İHA'lar tasarım özellikleri, operasyonel kullanım biçimleri, menzil, uçuş süresi, irtifa, ağırlık, görev türü, tahrik sistemi ve otomasyon düzeyi gibi ölçütlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma süreçleri ulusal sivil havacılık otoriteleri tarafından yürütülmektedir. Küresel ölçekte ICAO standart ve tavsiye kararları belirlemekte, Avrupa Birliği'nde Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) bağlayıcı düzenlemeler yayımlamakta, Türkiye'de ise Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) bu esasları ulusal mevzuata uyarlamaktadır. SHGM, İHA'ları kalkış ağırlığı ve operasyon yapısı temelinde sınıflandırmaktadır (Kale, 2026).

Menzil ve havada kalış süresi bakımından İHA'lar Yüksek İrtifa Uzun Dayanıklılık (HALE), Orta İrtifa Uzun Dayanıklılık (MALE), Düşük İrtifa Düşük Dayanıklılık (LALE), Mini ve Mikro Hava Araçları (MAV'ler) olarak gruplandırılmaktadır. HALE sistemleri üst atmosfer katmanlarında uzun süre görev yapan büyük ölçekli platformlar olarak stratejik gözetleme, keşif ve hedef tespitinde kullanılmaktadır. MALE sistemleri orta irtifa seviyelerinde sınır güvenliği, afet sahası izleme ve taktik keşif görevlerinde değerlendirilmektedir. LALE sınıfı düşük irtifalarda görev yürüttüğü için kontrol ve iletişim bakımından daha kolay yönetilmekte, gerçek zamanlı görüntüleme ve gözetleme faaliyetlerinde kullanılmaktadır. Mini ve mikro İHA'lar ise taşınabilir yapıları nedeniyle sivil, ticari, iç mekân ve yakın mesafe taktik görevlerde yer almaktadır (Uragun, 2011).

Ağırlık ve boyut esasına göre İHA'lar nano, mikro, mini ve daha yüksek kalkış kapasitesine sahip operasyonel sınıflara ayrılmaktadır. Türkiye'de SHGM sınıflandırmasına göre İHA0 sınıfı 250 gram ile 4 kilogram arasındaki, İHA1 sınıfı 4 kilogram ile 25 kilogram arasındaki, İHA2 sınıfı 25 kilogram ile 150 kilogram arasındaki, İHA3 sınıfı ise 150 kilogram ve üzerindeki sistemleri kapsamaktadır (SHY-İHA, Md. 5). EASA ise C0 ile C6 arasında

teknik sınıflar oluşturmakta, ICAO ise ağırlığı sabit limitlerden çok operasyonel risk değerlendirmesinin bir unsuru olarak ele almaktadır (European Commission, 2019).

Görev türü açısından İHA'lar askerî havacılık, sivil havacılık ve terörle mücadele havacılığı kapsamında değerlendirilmektedir. Sivil kullanımda trafik izleme, kablosuz iletişim kapsaması, uzaktan algılama, çevresel gözlem, arama-kurtarma, kargo teslimatı, güvenlik, hassas tarım ve altyapı denetimi gibi uygulamalar yürütülmektedir. Uçuş yarıçapına göre yakın, kısa, orta ve uzun menzilli İHA grupları oluşturulmaktadır. Uçuş irtifasına göre düşük, orta ve yüksek irtifa kategorileri tanımlanmaktadır. Uçuş kurallarına göre VFR, IFR ve VIFR ayrımı yapılmakta, hava aracı tipine göre uçak, helikopter, dönüştürülebilir uçak, zeplin ve hibrit İHA türleri değerlendirilmektedir. Operasyon yapısında SHGM kısıtlı ve kısıtsız uçuş ayrımını benimsemekte, EASA Açık, Özel ve Onaylı kategorilerini kullanmakta, ICAO ise Part 101 ve Part 102 kapsamında risk temelli bir düzenleme modeli ortaya koymaktadır (European Commission, 2019).

Tablo 1. Günümüz İHA Sınıflandırması

Sınıfı	Kategorisi	Görev Yüksekliği (ft)	Görev Yarıçapı (km)	Sivil Kategori	Örnek Platform
Sınıf I (150 kg.dan hafif)	Mikro (<2 kg)	<200 (AGL)	5 (LOS)	Ağırlık Sınıfı Grup 1 Küçük İHA (<20 kg)	Black Widow 
	Mini (2-20 kg)	<3.000 (AGL)	25 (LOS)		Bayraktar, Malazgirt, Scan Eagle 
	Küçük (>20 kg)	<5.000 (AGL)	50 (LOS)	Ağırlık Sınıfı Grup 2 Hafif İHA (20-150 kg)	Hermes 90 
Sınıf II (150-600 kg)	Taktik	<10.000 (AGL)	200 (LOS)	Ağırlık Sınıfı Grup 3 İHA (>150 kg)	Bayraktar Taktik, Karayel, Aerostar 
Sınıf III (600 kg.dan ağır)	Orta İrtifa Uzun Havada Kalış (MALE)	<45.000 (MSL)	Limitsiz (BLOS)		ANKA, Heron, Predator, Reaper 
	Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalış (HALE)	<65.000	Limitsiz (BLOS)		Global Hawk 
	Saldırı / Muharebe	<65.000	Limitsiz (BLOS)		X-47B, Phantom Ray 

Kaynak: Tyrannosurusrex (2016)

İHA'larda Kullanılan Başlıca Kompozit Malzemeler

İnsansız hava araçlarında kullanılan kompozit malzemeler, hafiflik gereksinimi ile yüksek mekanik dayanım beklentisinin birlikte karşılanması amacıyla tercih edilmektedir. İHA platformlarında gövde, kanat, iniş takımı, rotor kolu, bağlantı elemanları ve elektronik bileşenleri koruyan kaplama yapıları gibi bölümlerde malzeme seçimi, uçuş süresi, taşıma kapasitesi, enerji tüketimi, titreşim davranışı ve görev güvenilirliği üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Modern İHA sistemlerinde sensörler, haberleşme birimleri, konumlandırma donanımları ve faydalı yük bileşenleri toplam ağırlığı artırmaktadır. Bu nedenle yapısal parçaların daha düşük ağırlıkla tasarlanması, aracın manevra kabiliyeti ve operasyonel verimliliği açısından kritik bir mühendislik gerekliliği oluşturmaktadır. Kompozit malzemeler, metal malzemelere kıyasla daha yüksek özgül dayanım, daha düşük yoğunluk, korozyon direnci, yorulma dayanımı ve darbe direnci gibi nitelikler

göstermektedir (Sönmez et al., 2022). Alüminyum yerine kompozit malzeme kullanımı, yapısal ağırlığın belirgin ölçüde azaltılmasına katkı vermekte, gürültü ve titreşim davranışının iyileştirilmesine de zemin hazırlamaktadır.

İHA yapılarında en yaygın kullanılan kompozit türlerinden biri karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerdir. Karbon elyaf takviyeli polimerler, yüksek çekme dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek eğilme dayanımı ve yorulma direnci nedeniyle özellikle gövde, kanat, kanat-gövde bağlantıları ve yüksek yük taşıyan yapısal bölgelerde değerlendirilmektedir. Bu malzemeler, uzun menzil, yüksek manevra kabiliyeti ve yapısal kararlılık gerektiren İHA sistemlerinde yüksek performans ortaya koymaktadır. Karbon elyafın rijit yapısı, titreşimlerin sınırlandırılmasına ve aerodinamik formun korunmasına katkı vermektedir (Sönmez et al., 2022). Bununla birlikte karbon elyaf esaslı kompozitlerin üretimi özel ekipman, kontrollü işlem koşulları ve yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle kullanım alanı, görev gereksinimleri ve üretim ölçeği dikkate alınarak belirlenmektedir.

Cam elyaf takviyeli polimer kompozitler, İHA yapılarında kullanılan başlıca malzeme gruplarından bir diğerini oluşturmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitler, karbon elyaflı sistemlere göre daha düşük maliyetli ve daha kolay üretilebilir yapılarıyla öne çıkmaktadır. Bu malzemeler, küçük ölçekli, ticari, eğitim amaçlı ve düşük maliyetli İHA platformlarında tercih edilmektedir. Cam elyaf takviyeli yapılar, karbon elyaf kadar hafif olmamakla birlikte darbe direnci ve elektriksel yalıtım özellikleri bakımından elverişli bir malzeme davranışı göstermektedir (Erdelj et al., 2017). Bu özellikler, özellikle gövde kabukları, kaplama elemanları ve orta düzey mekanik yük taşıyan bileşenlerde kullanımını artırmaktadır.

Aramid elyaflar ve Kevlar esaslı kompozitler, darbe dayanımı ve enerji sönümleme kabiliyeti nedeniyle İHA yapılarında farklı bir kullanım değeri taşımaktadır. Aramid takviyeli kompozitler, özellikle düşük irtifa görevlerinde, çarpma riski bulunan platformlarda, rotor çevresi yapılarında ve hasar toleransının yüksek tutulması gereken bölümlerde değerlendirilmektedir (Parveez et al., 2022). Bu malzemeler, hafiflik ile darbe direncini birlikte karşılayan yapıları sayesinde güvenlik odaklı tasarımlarda tercih edilmektedir. Bor elyaf takviyeli kompozitler de İHA yapılarında kullanılan ileri takviye seçenekleri arasında yer almakta, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda yapısal performansa katkı vermektedir.

Hibrit kompozit sistemler, farklı elyaf türlerinin tek bir matris yapısı içinde birlikte kullanılmasıyla oluşturulmaktadır. Karbon elyaf ile cam elyafın veya aramid elyafın birlikte kullanıldığı hibrit yapılar, dayanım, darbe emilimi, maliyet ve ağırlık arasında dengeli bir malzeme davranışı meydana getirmektedir. Bu tür sistemlerde karbon elyaf yüksek rijitlik ve dayanım kazandırırken, cam elyaf ya da aramid elyaf darbe direnci ve hasar toleransı bakımından katkı oluşturmaktadır (Xu et al., 2022). Bu nedenle hibrit kompozitler hem sivil hem de savunma amaçlı İHA tasarımlarında görev türüne bağlı olarak tercih edilmektedir.

İHA kompozitlerinde matris malzemesi olarak çoğunlukla epoksi esaslı termoset reçineler kullanılmaktadır. Epoksi matrisler, elyafları bir arada tutmakta, yük aktarımını gerçekleştirmekte ve yapısal bütünlüğün korunmasına katkı vermektedir. Termoplastik matrisler ise son yıllarda üç boyutlu yazdırma ve hızlı prototipleme süreçleriyle birlikte daha fazla değerlendirilmektedir. Polilaktik asit gibi biyobazlı matrislerin doğal elyaflarla takviye edilmesiyle oluşturulan biyokompozitler, düşük hızlı, kısa menzilli ve küçük ölçekli İHA uygulamalarında çevresel etkileri azaltmaya yönelik

alternatifler arasında yer almaktadır. Bambu, keten ve jüt gibi doğal liflerle desteklenen yapılar, hafiflik ve işlenebilirlik bakımından belirli avantajlar göstermektedir (Erdelj et al., 2017). Buna karşın nem alma, ultraviyole dayanımı ve uzun süreli yorulma davranışı gibi konular, bu malzemelerin kullanım alanlarını belirleyen temel sınırlar arasında bulunmaktadır.

Kompozit İHA parçalarının üretiminde vakum infüzyon, reçine transfer kalıplama, otoklav kürleme, filament sarma ve üç boyutlu yazdırma yöntemleri kullanılmaktadır. Vakum infüzyon ve el yatırma yöntemleri düşük hacimli üretim ve prototipleme için uygun görülmektedir. Reçine transfer kalıplama, yüzey kalitesi ve ölçüsel tekrarlanabilirlik gerektiren parçalarda tercih edilmektedir. Otoklav kürleme, yüksek mekanik performans ve düşük boşluk oranı gerektiren havacılık sınıfı karbon elyaf kompozitlerde kullanılmaktadır. Filament sarma yöntemi gövde boruları ve rotor kolları gibi silindirik parçaların üretiminde değerlendirilmektedir. Üç boyutlu yazdırma ise karmaşık geometrilerin hızlı üretilmesine, hafif yapısal tasarımların geliştirilmesine ve malzeme kullanımının azaltılmasına katkı vermektedir (Sönmez et al., 2022).

Sonuçlar

İnsansız hava araçları için kompozit malzemeler, hafiflik, yüksek özgül mukavemet, rijitlik, yorulma dayanımı, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi gereksinimlerin birlikte karşılanmasında stratejik bir malzeme grubu olarak dikkat çekmektedir. İHA sistemlerinde uçuş süresi, faydalı yük kapasitesi, enerji tüketimi, manevra kabiliyeti ve görev güvenilirliği doğrudan yapısal ağırlıkla ilişkili olduğundan, gövde, kanat, iniş takımı, rotor kolu ve bağlantı elemanlarında kullanılan malzemelerin seçimi kritik bir mühendislik aşaması hâline gelmektedir. Bu bağlamda kompozit malzemeler, geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha düşük yoğunlukta yüksek dayanım elde edilmesine olanak tanımakta ve

İHA platformlarının operasyonel verimliliğini artıran temel unsurlardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Araştırma bağlamında ele alınan karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf, hibrit kompozit sistemler ve sandviç yapılar, İHA bileşenlerinde farklı görev beklentilerine göre kullanılmaktadır. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler yüksek dayanım, rijitlik ve yorulma direnci gerektiren gövde ve kanat gibi ana taşıyıcı yapılarda öne çıkmaktadır. Cam elyaf takviyeli kompozitler daha düşük maliyetli ve üretilebilir yapılarıyla küçük ölçekli ve ticari İHA uygulamalarında değerlendirilmektedir. Aramid elyaf esaslı yapılar darbe dayanımı ve enerji sönümleme kabiliyeti gerektiren bölümlerde kullanılmaktadır. Hibrit kompozitler ise farklı elyaf türlerinin üstün yönlerini bir araya getirerek dayanım, ağırlık, maliyet ve hasar toleransı arasında dengeli bir yapı oluşturmaktadır.

Kompozit malzemelerin İHA uygulamalarındaki başarısı yalnızca malzeme türüne bağlı kalmamakta, matris seçimi, elyaf yönlenmesi, tabaka dizilimi, arayüzey bağlanması ve üretim yöntemiyle beraber şekillenmektedir. Vakum infüzyon, reçine transfer kalıplama, otoklav kürleme, filament sarma ve üç boyutlu yazdırma gibi yöntemler, farklı üretim ölçekleri ve performans beklentileri doğrultusunda tercih edilmektedir. Bununla birlikte delaminasyon, darbe hasarı, nem ve sıcaklık etkileri, bakım-onarım güçlükleri ile tahribatsız muayene gereksinimi, kompozit İHA yapılarında dikkatle ele alınması gereken konular arasında yer almaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, kompozit malzemeler İHA teknolojilerinde yalnızca hafif bir yapı malzemesi olarak görülmemekte, performans, güvenilirlik, enerji verimliliği ve görev sürekliliğini doğrudan etkileyen temel bir tasarım bileşeni olarak kabul edilmektedir. Gelecekte biyokompozitler, geri dönüştürülebilir matris sistemleri, akıllı sensörlerle bütünleşik yapılar ve eklemeli

imalat teknikleri, İHA tasarımında daha sürdürülebilir, daha işlevsel ve daha verimli çözümlerin geliştirilmesine yön vereceği düşünülmektedir.

Öneriler

İnsansız hava araçlarında kompozit malzeme kullanımının daha verimli hâle getirilebilmesi için malzeme seçimi, görev profili ve üretim yöntemi beraber değerlendirilmelidir. Özellikle karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf ve hibrit kompozit sistemlerin İHA bileşenlerindeki performansı, farklı yükleme koşulları, çevresel etkiler ve uzun süreli kullanım davranışları açısından ayrıntılı biçimde incelenmelidir. Kompozit yapılarda darbe hasarı, delaminasyon, nem etkisi ve yorulma gibi sorunların erken aşamada belirlenebilmesi amacıyla tahribatsız muayene yöntemlerinin daha yaygın kullanılması önerilmektedir. Ayrıca biyokompozitler, geri dönüştürülebilir matris sistemleri ve üç boyutlu yazdırma teknolojileri üzerine yapılacak çalışmaların artırılması, İHA tasarımlarında hem sürdürülebilirlik hem de üretim verimliliği açısından katkı sağlayacaktır.

Kaynakça/References

Admin, (2020). Kompozit nedir? Kompozit malzemeler ve özellikleri. İnsapedia. https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri

Aksan, S. (2019). *İHA'lara yeni görev: Yangınlar için kullanılabilir.* Yeni Şafak: https://www.yenisafak.com/gundem/ihalara-yeni-gorev-yanginlar-icin-kullanilabilir-3502800

Aydemir, F. (2021). *Kompozit malzeme nedir?* Sanal Santiye: https://www.sanalsantiye.com/kompozit-malzeme-nedir-insaat-muhendisliginde-onemi

Bahador, A., Umeda, J., Yamanoglu, R., Ghandvar, H., Issariyapat, A., Bakar, T., & Kondoh, K. (2020). Deformation mechanism and enhanced properties of Cu-TiB2 composites evaluated by the in-situ tensile test and microstructure characterization. *Journal of Alloys and Compounds, 847*, 156555. https://doi:10.1016/j.jallcom.2020.156555

Cantor, K., & Watts, P. (2011). Plastics processing. M. Kutz (Dü.) içinde, *Applied plastics engineering handbook* (s. 195-203). William Andrew Publishing.

Castanié, B., Bouvet, C., & Ginot, M. (2020). Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access, 1*, 100004. https://doi:10.1016/j.jcomc.2020.100004

Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 of 12 March 2019 on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems. (2019). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0945

Drone kelimesi odağında Türkçe terminoloji tartışması. (2018). Thinktech STM: https://thinktech.stm.com.tr/uploads/docs/1608906598_stm-drone-kelimesi-terminoloji.pdf

Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K., & Akyildiz, I. (2017). Help from the sky: Leveraging UAVs for disaster management. *IEEE Pervasive Computing, 16*(1), 24-32. https://doi:10.1109/MPRV.2017.11

Erdil, A. (2020). *Kompozit malzemelerin genel özellikleri ve kullanımı.*Tekyaz:https://blog.tekyaz.com/kompozit malzemelerin-genel-ozellikleri-ve-kullanimi/

Grafen takviyeli karbon elyaf kompozitlerin dayanıklılık ve uygulamaları. (2025). Nanokar: https://www.nanokar.com.tr/blog/grafen-takviyeli-karbon-elyaf-kompozitlerin-dayaniklilik-ve-uygulamalari

Günümüz İHA sınıflandırması. (2016). Tyrannosurusrex: https://tyrannosurusrex.wordpress.com/2016/04/21/yeni-operatif-iha-ve-gorevi

İnsansız hava araçlarında kullanılan hafif ve güçlü kompozitler. (ty). Nanotoz: https://nanotoz.com.tr/askeri-ihalarda-insansiz-hava-araclari-kullanilan-hafif-ve-guclu-kompozitler/

Kale, S. (2026). *İnsansız hava aracı (İHA) desteği ile havalimanlarında hava trafiği kaynaklı acil durumların simülasyon tabanlı analizi.* Eskişehir Teknik Üniversitesi.

Kaplan, S. (2021). *ASELSAN'ın uydu haberleşmesi alanındaki sistem çözümleri ve projeleri.* Defence Turk: https://www.defenceturk.net/aselsanin-uydu-haberlesme-sistemi-cozumleri-ve-projeleri

Kaya, A. (1995). *Atık kâğıtlardan geri kazanılmış liflerden kompozit malzeme üretim olanaklarının araştırılması.* Süleyman Demirel Üniversitesi.

Kompozit nedir? Kompozit malzemeler ve özellikleri. (2020). İnsapedia: https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri

Lütjering, G., & Williams, J. (2007). Titanium matrix composites. *Titanium* (s. 367-382). içinde Springer.

Parveez, B., Kittur, M., Badruddin, I., Kamangar, S., Hussien, M., & Umarfarooq, M. (2022). Scientific advancements in composite materials for aircraft applications: A review. *Polymers, 14*(22), 5007. https://doi:10.3390/polym14225007

Rajak, D., Pagar, D., Kumar, R., & Pruncu, C. (2019). Recent progress of reinforcement materials: A comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology, 8*(6), 6354-6374.

Rekatsinas, C., Dimitriou, D., & Chrysochoidis, N. (2024). A road map to the structural optimization of a type-C composite UAV. *Aerospace, 11*(3), 211. https://doi:10.3390/aerospace11030211

Sarvestani, A., & Tehrani, M. (2017). Investigation of impact energy absorption and damage in woven carbon fiber reinforced polymer composite materials. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.07144

Savunma sanayinde iletken kompozitlerin stratejik önemi. (ty). Nanoteknoloji: https://nanoteknoloji.org/savunma-sanayinde-iletken-kompozitlerin-stratejik-onemi/

Sharma, A., Bhandari, R., Aherwar, A., & Rimašauskienė, R. (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings, 21*, 1559-1562.

Sönmez, M., Pelin, C.-E., Georgescu, M., Pelin, G., Stelescu, M., Nituica (Vilsan), M., . . . Gurau, D. (2022). Unmanned aerial vehicles-classification, types of composite materials used in their structure and applications. *ICAMS 2022: 9th International Conference on Advanced Materials and Systems*, (s. 77-82) https://doi:10.24264/icams-2022.I.11

Summary of small unmanned aircraft rule (Part 107). (2020). FAA: https://www.faa.gov/uas

(2011). *Unmanned aircraft systems (UAS).*

Uragun, B. (2011). Energy efficiency for unmanned aerial vehicles. *2011 10th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA).* IEEE. https://doi:10.1109/ICMLA.2011.159

Vasiliev, V., & Morozov, E. (2001). *Mechanics and analysis of composite materials.* Elsevier.

Wang, B., Zhong, S., Lee, T.-L., Fancey, K., & Mi, J. (2020). Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in Mechanical Engineering, 12*(4). https://doi:10.1177/1687814020913761

Xu, C., Ji, Y., Wang, Y., Guo, H., Kong, D., Li, Z., . . . Li, W. (2022). Application of carbon composites in unmanned aerial Vehicles: A review. *Proceedings of 2021 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021)* (s. 3479-3485). Springer.

https://doi:10.1007/978-981-16-9492-9_343

BÖLÜM 4

INNOVATIVE TEACHING AND LEARNING STRATEGIES IN AEROSPACE ENGINEERING EDUCATION

TARIK GÜNEŞ[1]
TOLUNAY DAĞ[2]

Introduction

Aerospace engineering education is undergoing a significant transformation in response to rapid technological development, increasing system complexity, and changing professional expectations. Contemporary aerospace systems increasingly incorporate advanced computational methods, intelligent control, digital engineering tools, autonomous technologies, and multidisciplinary design processes. These developments are changing not only the technical knowledge expected from aerospace engineers but also the competencies required to apply this knowledge effectively in professional practice. Accordingly,

[1] Assistant Professor, İskenderun Technical University, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, Orcid: 0000-0003-3098-7654
[2] Res. Asst., İskenderun Technical University, Department of Aerospace Engineering, Orcid: 0000-0003-1514-5336

engineering education has progressively moved from predominantly teacher centered models toward student centered approaches that promote active participation, practical experience, and greater student responsibility for the learning process (López-Fernández et al., 2020).

This transformation is especially relevant to aerospace engineering because of the experimental, analytical, and application oriented nature of the discipline. Fundamental knowledge in areas such as aerodynamics, propulsion, structures, flight mechanics, control, and aerospace systems must ultimately be connected with experimentation, analysis, design, and engineering decision-making. Laboratory education therefore continues to play an important role in connecting theoretical concepts with observable engineering phenomena and practical activities (Chen, 2026). At the same time, contemporary aerospace problems increasingly require students to integrate knowledge from multiple engineering domains rather than approaching technical subjects as isolated areas.

Traditional lectures and structured engineering exercises remain essential for establishing fundamental theoretical knowledge. However, these approaches alone may provide limited opportunities for students to experience the open-ended, multidisciplinary, and collaborative nature of professional engineering practice. Modern aerospace engineers are expected not only to understand technical principles but also to analyze complex problems, evaluate alternative solutions, work effectively within multidisciplinary teams, communicate engineering decisions, and adapt to rapidly evolving technologies. Innovative pedagogical approaches can contribute to the development of critical thinking and improved learning outcomes by creating more active and participatory learning environments (Bhuttah et al., 2024).

Active and experiential learning approaches provide an important response to these educational requirements. Project-Based

Learning (PBL), Challenge-Based Learning (CBL), Flipped Classroom models, and adaptive learning strategies represent different but potentially complementary ways of increasing student engagement with engineering knowledge. Project activities can connect disciplinary knowledge with authentic engineering tasks and support technical as well as collaborative competencies (Rodríguez et al., 2015). Aerospace-specific active learning experiences have also demonstrated positive effects on student motivation and engagement (López-Fernández et al., 2019). Challenge-based approaches further extend this perspective by exposing students to complex engineering problems that require collaborative investigation and the integration of knowledge across different areas (López-Fernández et al., 2020). More broadly, evidence from engineering education indicates the potential of active learning approaches to support competency development through authentic and student-centered learning experiences (Sukackė et al., 2022).

The transformation of aerospace engineering education is also being accelerated by technological developments in engineering practice. Conventional laboratories are increasingly complemented by computational, simulation-based, and digitally supported learning environments. The evolution of undergraduate aerospace laboratories demonstrates the continuing importance of practical experimentation while also reflecting changes in the technological tools available for engineering education (Chen, 2026). Similarly, emerging areas such as artificial intelligence and intelligent control are creating new curriculum requirements. The development of educational frameworks for intelligent control in aerospace engineering illustrates the need to prepare students for systems that increasingly combine conventional engineering principles with intelligent and data-driven technologies (Narimani et al., 2024).

Educational innovation, however, should not be understood simply as the introduction of new technologies or the replacement of

conventional teaching with a single alternative methodology. Different pedagogical approaches address different aspects of the learning process. Project and challenge-based activities can provide authentic engineering experiences; flipped and hybrid approaches can reorganize classroom interaction; adaptive learning can support more individualized learning pathways; and digital engineering technologies can expand the range of systems and problems that students are able to explore (Chua & Islam, 2021; Rincon-Flores et al., 2024). Their educational value therefore depends on how effectively they are aligned with learning objectives, engineering practice, and expected graduate competencies.

This alignment is increasingly important as aerospace engineering moves toward more digital, intelligent, autonomous, and interdisciplinary systems. Preparing students for this environment requires educational models capable of connecting strong theoretical foundations with practical engineering experience and future-oriented competencies. The central challenge is therefore not simply to identify which innovative teaching strategy is most effective, but to determine how pedagogical approaches, technological learning environments, experiential engineering activities, and competency development can be systematically integrated within aerospace engineering education.

Accordingly, this chapter examines innovative teaching and learning strategies in aerospace engineering education from an integrated and future-oriented perspective. It discusses the transition toward student-centered and active learning, evaluates major educational strategies and technology enhanced learning environments, and considers their contribution to the competencies required of future aerospace engineers. Based on the synthesis of the reviewed literature, the chapter subsequently proposes an integrated framework for future oriented aerospace engineering education, organized around four interconnected dimensions: active learning

strategies, technology enhanced learning environments, experiential engineering practice, and future competency development. Through this framework, educational innovation is conceptualized not as the isolated adoption of individual methods or technologies, but as the coordinated development of an educational ecosystem designed to prepare future ready aerospace engineers.

TRANSFORMATION OF AEROSPACE ENGINEERING EDUCATION

Aerospace engineering education has traditionally been built upon strong foundations in mathematics, physics, engineering sciences, and discipline-specific technical knowledge. This foundation remains essential; however, the increasing complexity of aerospace systems and the changing nature of engineering practice have expanded the educational requirements of the discipline. Contemporary aerospace engineering involves not only the analysis of individual technical problems but also the integration of multiple subsystems, technologies, and engineering disciplines. Consequently, educational environments are increasingly expected to connect theoretical knowledge with experimentation, design, collaborative problem-solving, and practical engineering activities.

This transformation is reflected in the broader movement within engineering education toward active and student-centered learning. Rather than replacing fundamental engineering instruction, these approaches seek to complement theoretical education by providing students with opportunities to apply, evaluate, and integrate their knowledge. Within aerospace engineering, this transition is especially relevant because many professional activities involve complex systems in which technical decisions must be made across disciplinary boundaries. Educational innovation should therefore maintain rigorous theoretical foundations while creating

stronger connections between knowledge acquisition and engineering practice (López-Fernández et al., 2020; Chen, 2026).

From Teacher-Centered to Student-Centered Education

Traditional teacher-centered education places the instructor at the center of knowledge transmission, with students primarily receiving and subsequently applying the information presented through lectures and structured exercises. This model provides an efficient mechanism for introducing fundamental theories and analytical methods, which remain indispensable in aerospace engineering. However, the development of engineering competence requires students to move beyond receiving and reproducing technical knowledge toward actively applying that knowledge in different contexts.

Student-centered education changes the role of both the learner and the instructor. Students assume greater responsibility for engaging with engineering problems, exploring possible solutions, discussing alternatives, and reflecting on their learning processes. The instructor, while remaining an important source of disciplinary expertise, increasingly acts as a facilitator who structures learning experiences and guides students through complex engineering activities. This transition is consistent with the broader shift toward active learning approaches observed in engineering education (López-Fernández et al., 2020; Sukackė et al., 2022).

For aerospace engineering students, this shift can provide an important bridge between academic knowledge and engineering practice. Real aerospace problems rarely present themselves as clearly defined textbook exercises with a single predetermined solution. Instead, engineers must frequently work with competing requirements, technical constraints, incomplete information, and alternative design possibilities. Student-centered learning environments can expose students to these characteristics by

requiring them to investigate problems, make engineering decisions, justify their choices, and collaborate with others.

Active participation can also influence students' relationship with the learning process. López-Fernández et al. (2019) reported positive motivational effects associated with active learning methods among aerospace engineering students. This is significant because student engagement becomes especially important in technically demanding curricula, where abstract theoretical concepts may be difficult to connect with their eventual engineering applications. Providing opportunities to apply these concepts within meaningful activities can help students recognize the relationship between what they learn and how that knowledge functions in aerospace engineering practice.

The movement toward student-centered education should therefore not be interpreted as a rejection of conventional instruction. Rather, it represents a rebalancing of the educational process. Lectures and structured instruction can establish essential theoretical foundations, while active learning experiences provide opportunities to apply and integrate those foundations. The challenge for aerospace engineering education is to create an appropriate relationship between these complementary forms of learning.

Changing Competency Requirements in Aerospace Engineering

The transformation of aerospace engineering education is also associated with changes in the competencies expected from engineering graduates. Strong disciplinary knowledge remains fundamental, but contemporary engineering practice increasingly requires the ability to use technical knowledge across complex and multidisciplinary contexts. Students must therefore develop competencies that extend beyond understanding individual theories, equations, or engineering procedures.

Problem-solving and critical thinking represent central components of this broader competency profile. Aerospace engineering problems often involve multiple interacting variables and require the evaluation of alternative technical solutions. Educational environments that encourage students to investigate, analyze, compare, and justify engineering decisions can contribute to the development of these abilities. Innovative pedagogical approaches have been associated with improved critical thinking and learning outcomes in higher education, reinforcing the importance of moving beyond passive knowledge acquisition (Bhuttah et al., 2024).

Collaboration is another relevant dimension. Aerospace systems consist of interconnected technical domains, and their development frequently requires engineers from different areas to work toward common objectives. Project-based experiences in space engineering education demonstrate how students can be exposed to this multidisciplinary character by working on activities involving different engineering functions and subsystems (Rodríguez et al., 2015). Such learning environments provide opportunities for students to develop technical knowledge alongside communication, coordination, and teamwork.

Technological change is simultaneously expanding the technical competency requirements of aerospace graduates. Intelligent control represents one example of an area in which conventional engineering foundations are increasingly interacting with emerging computational approaches. Narimani et al. (2024) emphasize the educational relevance of intelligent control for aerospace engineers, demonstrating the need for curricula that respond to developments in contemporary aerospace technologies. This does not imply abandoning conventional control theory or fundamental engineering knowledge; rather, emerging topics should build upon and extend these foundations.

The competency profile of future aerospace engineers can therefore be understood as a combination of disciplinary foundations, advanced technical capabilities, problem solving abilities, collaborative competencies, and adaptability to technological change. Developing these dimensions requires educational experiences that allow students not only to acquire knowledge but also to use it under conditions that increasingly resemble authentic engineering practice.

The Role of Experiential and Active Learning

Experiential learning provides a critical connection between theoretical engineering knowledge and its practical application. Aerospace engineering has a strong tradition of laboratory education because experimentation allows students to observe physical phenomena, compare theoretical predictions with measured behavior, analyze uncertainty, and develop an understanding of how engineering principles operate in practice. The systematic review conducted by Chen (2026) demonstrates the continuing role of undergraduate laboratory courses in aerospace engineering and the evolution of these learning environments over time.

Experiential education, however, is not limited to conventional laboratory exercises. Project activities, engineering design problems, simulations, and challenge-based experiences can also create environments in which students learn through application. Rodríguez et al. (2015), for example, describe project-based experiences in space engineering education that allow students to engage with engineering activities extending across different elements of space systems. Similarly, the ESA Concurrent Engineering Challenge examined by López-Fernández et al. (2020) illustrates how students can participate in collaborative engineering activities related to space mission development.

These approaches are valuable because they can bring students closer to the characteristics of professional engineering practice. Rather than applying a formula to an already defined problem, students may need to identify relevant information, distribute responsibilities, integrate different technical perspectives, evaluate alternatives, and communicate their decisions. The learning process consequently encompasses both technical knowledge and the broader competencies required to use that knowledge effectively.

Evidence across engineering education also supports the broader relevance of active learning approaches, including problem, project, and challenge-based models (Sukackė et al., 2022). Within aerospace engineering, their value lies especially in their ability to connect theory, application, collaboration, and engineering decision making. These four elements provide an important foundation for the innovative teaching strategies discussed in the following section.

INNOVATIVE TEACHING AND LEARNING STRATEGIES

The transformation of aerospace engineering education requires teaching strategies that enable students to move beyond the passive acquisition of technical knowledge and engage more actively with engineering problems. Active learning approaches can provide opportunities for students to apply theoretical concepts, evaluate alternatives, collaborate with peers, and participate in learning activities that more closely resemble engineering practice. Within this context, Project-Based Learning, Challenge-Based Learning, Flipped Classroom models, and adaptive learning represent complementary strategies that address different dimensions of the educational process (Sukackė et al., 2022).

These approaches should not necessarily be considered replacements for conventional engineering instruction. Fundamental theories and analytical methods remain essential in aerospace engineering education. Instead, innovative strategies can provide

environments in which theoretical knowledge is applied, integrated, and reinforced through active participation. Their educational value therefore depends on how effectively they are aligned with course objectives, disciplinary content, and expected engineering competencies.

Project-Based Learning

Project-Based Learning (PBL) is one of the most established active learning approaches in engineering education. It organizes learning around projects that require students to apply knowledge, investigate engineering problems, develop solutions, and produce identifiable outcomes. In contrast to conventional exercises that often focus on a single concept or predefined analytical procedure, project-based activities can require the integration of knowledge from multiple areas and therefore provide a closer representation of professional engineering practice (Rodríguez et al., 2015; Sukackė et al., 2022).

This characteristic makes PBL especially relevant to aerospace engineering. Aerospace vehicles and systems consist of highly interconnected subsystems, and decisions made within one engineering domain may affect several others. A space system, for example, may involve structures, propulsion, thermal management, power, communication, control, and mission requirements. Educational projects can expose students to these relationships and encourage them to understand engineering problems from a system level perspective rather than as isolated disciplinary tasks.

Rodríguez et al. (2015) reported Project-Based Learning experiences in space engineering education at the Technical University of Madrid. These experiences illustrate how students can participate in activities associated with the development and integration of space systems, thereby connecting theoretical knowledge with practical engineering processes. Such project

environments also create opportunities for students to coordinate tasks, communicate technical information, and integrate contributions from different areas.

An additional benefit concerns student engagement. Active learning methods implemented with aerospace engineering students have demonstrated positive motivational effects (López-Fernández et al., 2019). This is relevant because technically demanding engineering subjects can sometimes make it difficult for students to recognize the practical significance of individual theoretical concepts. Projects can provide a broader context in which students understand why particular theories, calculations, and engineering methods are necessary.

PBL can consequently support two interconnected dimensions of aerospace engineering education. The first is technical integration, in which students apply knowledge from different engineering subjects to a common problem. The second is professional competency development, in which students experience teamwork, communication, planning, coordination, and engineering decision making. These dimensions make project-based environments valuable for connecting academic preparation with the multidisciplinary nature of aerospace engineering practice.

However, the effectiveness of PBL depends on appropriate educational design. Projects should be sufficiently complex to require meaningful engineering reasoning while remaining compatible with students' existing knowledge and course objectives. The instructor therefore continues to play an important role by defining the educational context, providing guidance, and ensuring that project activities contribute to intended learning outcomes. PBL should thus be understood as structured active learning rather than simply assigning students a project.

Challenge-Based Learning

Challenge-Based Learning (CBL) shares several characteristics with project-based approaches but places greater emphasis on addressing broader, authentic, and often open-ended challenges. Students are encouraged to investigate a problem, consider its wider context, develop possible responses, and evaluate solutions rather than follow a predetermined path toward a known answer. This structure makes CBL suitable for engineering problems characterized by uncertainty, multiple constraints, and competing design alternatives (Sukackė et al., 2022).

Aerospace engineering provides a suitable environment for this type of learning because aerospace problems frequently require multidisciplinary decision-making. Mission design, propulsion, aircraft configuration, sustainability, control, and systems integration may involve technical trade-offs rather than a single optimal answer. Challenge-based environments can expose students to these trade-offs and require them to justify engineering choices using evidence and technical reasoning.

An important aerospace specific example is the ESA Concurrent Engineering Challenge implemented at the Technical University of Madrid. López-Fernández et al. (2020) describe how this initiative introduced aerospace engineering students to concurrent engineering practices associated with space mission development. The learning environment required participants to work collaboratively across different technical areas while contributing to a shared engineering objective.

The concurrent engineering context is educationally significant because it reflects the interconnected nature of aerospace system development. Decisions cannot always be made sequentially within isolated disciplines; instead, engineers must exchange information, understand dependencies, and modify solutions in response to developments in other areas. CBL can therefore help

students experience engineering as a collaborative and iterative process rather than a sequence of independent technical calculations.

The approach can also broaden the scope of engineering education by placing technical problems within wider contexts. The review by Sukackė et al. (2022) indicates that challenge-based approaches can engage students with authentic problems and support competencies associated with active engineering learning. This provides an opportunity to connect technical decision-making with wider considerations such as sustainability and societal relevance when these dimensions are inherent to the challenge being addressed.

CBL should therefore not be viewed simply as a more difficult version of conventional problem solving. Its educational value lies in the authenticity, openness, interdisciplinarity, and collaborative character of the challenge. Students are required not only to obtain technically valid results but also to define problems, manage uncertainty, evaluate alternatives, and justify decisions.

Flipped Classroom and Hybrid Learning

The Flipped Classroom changes the organization of teaching by relocating part of the initial acquisition of theoretical content outside scheduled classroom time. Materials such as recorded lectures or other learning resources can be studied before class, while face-to-face sessions can be used for activities requiring greater interaction, including problem-solving, discussion, demonstrations, and engineering applications. In this sense, the model does not necessarily reduce the importance of theoretical instruction; instead, it reorganizes when and how different learning activities occur (Zappe, 2009).

This structure has clear potential in engineering education because classroom time can be redirected toward activities in which students require interaction with instructors and peers. Instead of

spending most contact hours receiving information, students can use these periods to apply theoretical concepts and receive feedback while working through engineering problems.

The approach becomes especially relevant when combined with Project-Based Learning. Chua and Islam (2021) examined a hybrid Project-Based Learning Flipped Classroom model within an engineering design project module. Combining these strategies allows theoretical preparation and active project work to operate as interconnected parts of the same learning process. Students can acquire or review relevant conceptual material before class and then use classroom time to apply that knowledge within design-oriented activities.

For aerospace engineering education, such a structure may be useful in subjects that require both substantial theoretical preparation and extensive application. Students could, for example, prepare fundamental concepts before class and subsequently use contact time for analysis, design activities, demonstrations, simulation, or collaborative engineering work. The central educational principle is therefore not simply the use of recorded lectures, but the reallocation of learning time toward higher levels of student participation.

Nevertheless, flipped learning depends on students engaging with preparatory material before active sessions. Course design must therefore establish a clear relationship between pre-class preparation and classroom activities. When these components are disconnected, the intended benefits of the model may be reduced. Hybrid approaches should consequently be designed as coherent learning sequences rather than as separate online and classroom components.

Adaptive and Personalized Learning

While active learning approaches increase student participation, they do not automatically address differences among individual learners. Engineering students may enter a course with

different levels of prior knowledge, progress at different rates, and experience difficulty with different concepts. Adaptive learning seeks to respond to this variability by adjusting learning experiences according to student progress and educational needs.

Rincon-Flores et al. (2024) examined adaptive learning as a strategy for improving the teaching learning process. The approach provides a basis for moving beyond a uniform educational pathway in which all students receive the same learning activities at the same pace. Instead, adaptive environments can support differentiated progression and more individualized learning experiences.

This potential is relevant to aerospace engineering because many subjects are cumulative. Difficulties in fundamental mathematical, physical, or engineering concepts can affect students' ability to understand more advanced material. An adaptive approach may help identify differences in learning progress and provide more appropriate learning pathways before students move toward increasingly complex applications.

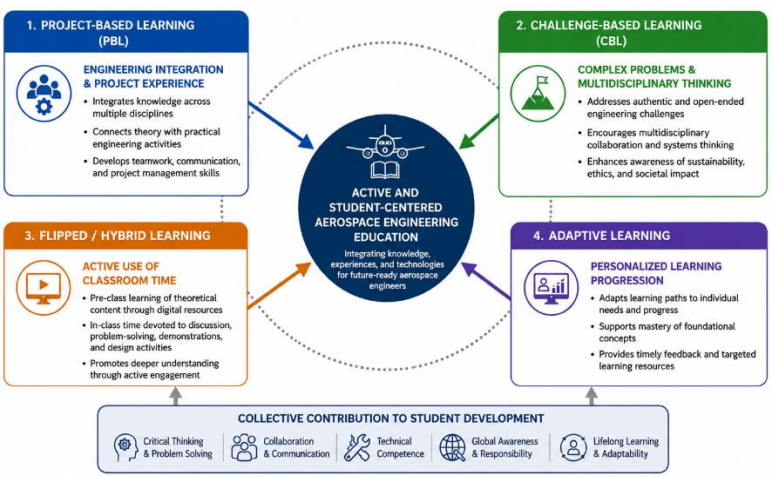
Adaptive learning can also complement the other strategies discussed in this section. Project and challenge environments emphasize collaborative and authentic engineering activities, while adaptive learning focuses more directly on individual learning progression. Similarly, a flipped environment may provide digital learning resources before class, while adaptive mechanisms can potentially support differentiated engagement with those resources. These approaches therefore address different dimensions of the learning process rather than competing for the same educational function.

The broader implication is that innovative aerospace engineering education does not require the selection of a single dominant pedagogical model. Different strategies can be combined according to the nature of the subject, expected learning outcomes,

student characteristics, and available technological resources. PBL can emphasize engineering integration and project experience; CBL can introduce open-ended and multidisciplinary challenges; flipped learning can reorganize instructional time around active participation; and adaptive learning can support differences in individual learning progression.

Taken together, these approaches address different but interconnected dimensions of aerospace engineering education. While Project-Based Learning emphasizes engineering integration and project experience, Challenge-Based Learning introduces authentic and multidisciplinary problems. Flipped and hybrid learning models reorganize instructional time to support active participation, whereas adaptive learning provides greater flexibility in responding to individual learning progress. Rather than functioning as isolated strategies, these approaches can therefore be considered complementary components of a student-centered aerospace engineering learning environment. Their complementary roles are summarized in Figure 1.

Figure 1. *Complementary Roles of Innovative Learning Strategies in Aerospace Engineering Education*



As illustrated in Figure 1, the four strategies contribute to student development through different educational mechanisms while sharing a common orientation toward active and student-centered learning. Their combined use can support the connection between theoretical knowledge and engineering application while contributing to critical thinking, problem solving, collaboration, communication, technical competence, and adaptability. The appropriate combination of these strategies should nevertheless depend on course objectives, disciplinary characteristics, student needs, and available educational resources. This integrated pedagogical perspective also provides a foundation for considering how emerging technologies can further enhance aerospace engineering learning environments.

TECHNOLOGY-ENHANCED AEROSPACE ENGINEERING EDUCATION

The pedagogical transformation of aerospace engineering education is occurring alongside rapid developments in the technologies used for engineering analysis, design, experimentation, and control. As aerospace systems become increasingly digital, computational, and intelligent, educational environments must provide students with opportunities to engage with technologies that reflect contemporary engineering practice. Technology enhanced education, in this sense, involves more than the introduction of digital tools into conventional courses. Its broader purpose is to create learning environments in which students can connect theoretical principles with experimentation, analysis, system behavior, and engineering decision-making.

Aerospace engineering is especially suited to technology enhanced learning because many of its fundamental concepts involve complex physical phenomena and interacting systems. Laboratory experimentation, computational tools, simulation

environments, and intelligent engineering applications can provide different ways of exploring these phenomena. When appropriately integrated with pedagogical objectives, these technologies can extend the range of learning experiences available to students and strengthen the relationship between academic preparation and professional engineering practice.

Modern Aerospace Laboratories and Simulation

Laboratory education has long represented an essential component of aerospace engineering curricula. Experimental activities allow students to observe physical phenomena, collect and interpret data, evaluate theoretical predictions, and recognize the differences between idealized models and actual system behavior. In this respect, laboratories provide an important bridge between mathematical and theoretical instruction and the physical characteristics of aerospace systems.

Chen (2026), in a systematic review of aerospace engineering undergraduate laboratory courses covering the period from 1990 to 2025, highlights the continuing importance and evolution of laboratory education within the discipline. This long term development suggests that laboratory learning should not be regarded as a fixed educational format. Instead, it evolves in parallel with changes in aerospace technologies, educational objectives, and the tools available for engineering experimentation.

Modern aerospace laboratories can consequently be understood as environments in which physical experimentation and computational investigation increasingly complement one another. Conventional experimental activities remain valuable because they expose students to measurement, uncertainty, physical system behavior, and practical engineering constraints. At the same time, digitally supported learning environments can expand students'

opportunities to explore engineering phenomena beyond the limitations of physical laboratory infrastructure.

Simulation is especially valuable in this context. Aerospace systems frequently involve conditions that may be difficult to reproduce repeatedly within undergraduate laboratories because of technical complexity, cost, physical limitations, or operational constraints. Simulation-based activities can provide students with opportunities to investigate system responses, examine alternative conditions, and evaluate the consequences of engineering decisions within controlled learning environments.

However, simulation should not necessarily be viewed as a replacement for physical experimentation. The two approaches can serve different educational purposes. Physical laboratories expose students to actual measurement processes and practical limitations, whereas simulation environments allow systematic exploration of models and system behavior across a wider range of conditions. Their combined use can therefore create a richer experiential learning environment.

From an educational perspective, the central issue is not the technological sophistication of the laboratory itself but the learning activity that the technology enables. A highly advanced simulation or laboratory system has limited educational value if students simply follow predefined instructions without interpreting results or making engineering decisions. Technology enhanced laboratory activities should therefore encourage students to formulate expectations, observe behavior, analyze data, compare results with theoretical models, and explain discrepancies.

Digital Engineering and Emerging Technologies

The increasing digitalization of aerospace engineering is broadening the range of tools and environments that students may encounter during their education. Engineering analysis and system

development increasingly involve computational and digitally supported processes, making familiarity with such environments an important element of contemporary aerospace education.

The evolution of aerospace laboratory education documented by Chen (2026) provides evidence of the broader transformation of experimental learning environments. From an educational standpoint, digital tools can complement physical experimentation by allowing students to explore engineering systems from multiple perspectives. This can strengthen the relationship between analytical models, experimental observations, and engineering interpretation.

The educational significance of digital technologies should nevertheless be distinguished from their mere availability. Introducing advanced software or computational tools into a course does not automatically create active learning. Students should understand the engineering assumptions behind the tools, interpret their outputs, evaluate limitations, and relate computational results to fundamental engineering principles. Otherwise, there is a risk that technological tools become substitutes for engineering reasoning rather than instruments that support it.

This distinction is particularly relevant in aerospace engineering, where computational outputs may represent highly complex physical systems. Students should therefore develop not only the ability to operate digital tools but also the capacity to evaluate whether the resulting information is physically reasonable and technically meaningful. Digital competence in aerospace engineering education should consequently develop alongside theoretical understanding and engineering judgment.

Technology enhanced learning environments can also support the active learning strategies discussed in Section 3. Digital tools may become components of projects, engineering challenges, laboratory investigations, or hybrid learning activities. In this way,

pedagogical strategy and educational technology can reinforce one another rather than functioning as independent dimensions of the curriculum.

Artificial Intelligence and Intelligent Control Education

Artificial intelligence and intelligent systems represent another emerging dimension of aerospace engineering education. As aerospace systems incorporate increasingly sophisticated automation and control capabilities, engineering graduates require educational foundations that allow them to understand and work with these technologies.

Intelligent control provides a clear example of this transition. Narimani et al. (2024) proposed a novel educational framework for intelligent control specifically designed for aerospace engineers. Their work reflects the growing relevance of integrating intelligent control concepts into aerospace engineering education and connecting them with the technical foundations already established within conventional engineering curricula.

The educational challenge is not simply to add artificial intelligence or intelligent control as isolated topics. These technologies should be positioned in relation to existing engineering knowledge. Students require an understanding of fundamental system behavior and conventional control principles before they can meaningfully evaluate more advanced intelligent approaches. Emerging technologies should therefore extend established engineering foundations rather than bypass them.

This relationship is also important for engineering judgment. Students should learn not only how an intelligent method can be implemented but also why it may be appropriate for a particular engineering problem, what assumptions influence its performance, and how its outputs should be interpreted. Such an approach shifts education from tool-oriented training toward a deeper understanding

of the interaction between engineering principles and intelligent technologies.

The integration of intelligent control into aerospace education also illustrates a broader curriculum challenge. Technological development often progresses faster than conventional curriculum revision. Aerospace engineering programs therefore need sufficient flexibility to introduce emerging technologies while preserving the fundamental scientific and engineering knowledge upon which those technologies depend. This balance between fundamental knowledge and technological adaptability will become increasingly important as aerospace systems continue to evolve.

Taken together, laboratory experimentation, simulation, digital engineering environments, and intelligent technologies can significantly broaden the learning opportunities available to aerospace engineering students. Their educational contribution, however, depends on their integration with clear learning objectives and meaningful engineering activities. Technology should therefore function as an enabler of engineering learning, rather than becoming the objective of learning.

This perspective establishes an important connection with the next stage of the discussion. If innovative pedagogical strategies define how students learn, and technology enhanced environments expand where and through which tools they learn, the next question concerns what competencies these learning experiences should ultimately develop. This issue forms the focus of the following section.

DEVELOPING FUTURE AEROSPACE ENGINEERING COMPETENCIES

The transformation of aerospace engineering education ultimately needs to be reflected in the competencies developed by

students. Innovative teaching strategies and emerging educational technologies have limited value if they are not connected with clearly defined learning outcomes and professional capabilities. As aerospace systems become more complex and multidisciplinary, graduates are expected to combine strong engineering foundations with the ability to solve complex problems, use evolving technologies, collaborate across disciplinary boundaries, and continue adapting their knowledge throughout their professional careers.

From this perspective, competency development should not be treated as a separate outcome that occurs after technical education. Instead, competencies can be developed through the learning process itself. Project activities, engineering challenges, laboratory experiences, collaborative tasks, and technology-supported learning environments provide opportunities for students to apply knowledge while simultaneously developing broader capabilities. The literature on active learning in engineering education supports this connection between student-centered learning experiences and the development of knowledge and skills relevant to engineering practice (Rodríguez et al., 2015; Sukackė et al., 2022).

Technical and Digital Competencies

Strong technical competence remains the foundation of aerospace engineering education. Regardless of changes in educational methodology or technology, future engineers require a rigorous understanding of the scientific and engineering principles underlying aerospace systems. Innovative education should therefore strengthen rather than replace fundamental disciplinary knowledge.

The changing technological environment, however, is expanding the meaning of technical competence. Aerospace

engineers increasingly encounter computational, digitally supported, and intelligent engineering environments. Consequently, students need opportunities to connect fundamental engineering principles with contemporary technological applications. The evolution of undergraduate aerospace laboratory education reflects this changing relationship between theoretical foundations, experimentation, and the tools used to investigate aerospace systems (Chen, 2026).

Intelligent control represents a relevant example. Narimani et al. (2024) demonstrate the educational importance of preparing aerospace engineers to engage with intelligent control approaches. Such preparation requires more than familiarity with individual methods or software tools. Students should be able to relate emerging approaches to fundamental system and control principles, understand their engineering relevance, and evaluate their application within aerospace contexts.

Digital competence should therefore be understood as an extension of engineering competence rather than as an independent ability to operate software. A student may be capable of producing computational results without necessarily understanding their physical significance or limitations. Future oriented education should seek to develop engineers who can use technological tools while maintaining the ability to interpret outputs, question assumptions, and exercise engineering judgment.

Problem Solving and Critical Thinking

Aerospace engineering involves problems that are frequently complex, multidisciplinary, and constrained by competing technical requirements. Preparing students for such environments requires educational activities that extend beyond the application of predetermined procedures. Students need opportunities to analyze problems, identify relevant information, compare alternatives,

justify decisions, and evaluate the consequences of proposed solutions.

Critical thinking is therefore closely connected with engineering problem solving. Bhuttah et al. (2024) identify a positive relationship between innovative pedagogical approaches, critical thinking, and learning outcomes in higher education. From an engineering education perspective, this suggests that learning environments should encourage students to question, analyze, interpret, and evaluate rather than simply reproduce information.

Project and challenge-based approaches can provide suitable environments for developing these abilities. Project activities require students to integrate knowledge while progressing toward an engineering outcome, whereas challenge-based activities can expose them to more open-ended situations in which the problem itself may require investigation and interpretation (Rodríguez et al., 2015; López-Fernández et al., 2020).

The aerospace context makes these competencies especially relevant. Engineering decisions are rarely based on a single variable, and improvements in one aspect of a system may introduce limitations elsewhere. Students should therefore become familiar with reasoning under constraints and evaluating alternative solutions rather than assuming that every engineering problem has one predetermined answer. Such experiences can help bridge the difference between solving academic exercises and addressing authentic engineering problems.

Teamwork, Communication, and Interdisciplinary Collaboration

Modern aerospace systems are inherently multidisciplinary. Their development requires interaction among different engineering domains, making collaboration an important component of professional aerospace practice. Engineering education should

therefore provide students with opportunities to experience technical collaboration before entering professional environments.

Project-Based Learning is particularly suitable for this purpose because students can assume different responsibilities while contributing to a common engineering objective. Experiences reported by Rodríguez et al. (2015) demonstrate how project-based activities in space engineering education can involve the integration of different technical areas. Such environments require students to coordinate their work and understand how individual contributions affect the wider engineering system.

The ESA Concurrent Engineering Challenge provides another relevant example. The educational experience examined by López-Fernández et al. (2020) exposes students to collaborative engineering activities associated with space mission development. Concurrent engineering requires interaction among different technical areas, illustrating that multidisciplinary collaboration involves more than simply dividing a project into independent tasks. Participants must communicate information, recognize dependencies, respond to changes, and contribute to collective decisions.

Communication consequently becomes inseparable from technical collaboration. Engineering knowledge has limited practical value if decisions, assumptions, constraints, and results cannot be effectively communicated to other members of a multidisciplinary team. Learning activities that require students to discuss alternatives, explain technical reasoning, and coordinate engineering tasks can therefore contribute to both communication and teamwork development.

The objective is not to reduce the importance of individual technical expertise. Rather, future aerospace engineers need to combine disciplinary depth with the ability to operate across

disciplinary interfaces. Educational environments that expose students to collaborative engineering activities can help develop this balance.

Adaptability and Professional Awareness

Rapid technological development creates another important educational requirement: graduates must be capable of adapting their knowledge as aerospace technologies evolve. The technical tools and methods encountered during university education may change throughout an engineer's professional career. Consequently, aerospace education cannot prepare students solely by teaching the technologies currently in use; it must also strengthen their capacity to learn and engage with emerging approaches.

Adaptive learning introduces this concept from the perspective of the educational process itself. By recognizing differences in student progress and supporting more individualized learning pathways, adaptive approaches can encourage students to take a more active role in their learning development (Rincon-Flores et al., 2024). Although adaptability in professional engineering extends beyond adaptive learning as a pedagogical method, both reflect the broader importance of responding effectively to changing knowledge requirements.

Challenge-based experiences can further broaden students' understanding of engineering problems by placing technical decisions within more complex contexts. The literature on active evidence-based learning in engineering indicates that project, problem, and challenge-oriented approaches can support learning through authentic and contextualized activities (Sukackė et al., 2022). Such experiences can encourage students to recognize that engineering decisions are influenced by requirements and constraints extending beyond isolated technical calculations.

For aerospace engineering education, professional awareness therefore involves understanding engineering work as part of a wider system of technical requirements, collaborative processes, and evolving technologies. Future engineers should be prepared not only to apply existing knowledge but also to recognize when new knowledge is required and to continue developing their capabilities accordingly.

Taken together, these competencies suggest that the future aerospace engineer cannot be characterized exclusively by technical knowledge. Technical and digital competence, critical thinking and problem-solving, interdisciplinary collaboration, communication, and adaptability form an interconnected competency profile. The educational challenge is to develop these capabilities without weakening the rigorous scientific and engineering foundations that define the discipline.

The preceding sections have examined the components required to address this challenge from different perspectives. Active learning strategies provide pedagogical mechanisms for student engagement; technology enhanced environments expand the tools and contexts available for learning; experiential activities connect theoretical knowledge with engineering practice; and competency development defines the capabilities that these experiences should ultimately support. The next section integrates these dimensions into a unified conceptual structure for future aerospace engineering education.

AN INTEGRATED FRAMEWORK FOR FUTURE ORIENTED AEROSPACE ENGINEERING EDUCATION

The preceding discussion indicates that the transformation of aerospace engineering education cannot be achieved through a single pedagogical method or technological intervention. Project-Based Learning, Challenge-Based Learning, flipped and hybrid models,

adaptive learning, laboratory activities, and emerging engineering technologies address different aspects of the educational process. Their broader value emerges when these elements are aligned around a common objective: enabling students to transform theoretical engineering knowledge into competencies that can be applied within complex aerospace environments.

Based on the reviewed literature, this chapter proposes an Integrated Framework for Future Oriented Aerospace Engineering Education. The framework organizes aerospace engineering education around four interconnected dimensions: pedagogical strategies, technology enhanced learning environments, experiential engineering practice, and future competency development. These dimensions are not intended to represent consecutive or independent stages. Instead, they form an interconnected educational system in which pedagogical choices determine how students engage with knowledge, technological environments expand how engineering concepts can be explored, experiential activities provide opportunities for application, and competency development represents the broader educational outcome.

Pedagogical Strategies

The first dimension concerns the organization of the learning process. Project-Based Learning, Challenge-Based Learning, Flipped Classroom models, and adaptive learning offer different mechanisms for increasing student participation and connecting knowledge acquisition with application (Chua & Islam, 2021; López-Fernández et al., 2020; Rincon-Flores et al., 2024; Rodríguez et al., 2015).

Within the proposed framework, these strategies are regarded as complementary rather than competing approaches. Project-Based Learning can provide an environment for integrating disciplinary knowledge around an engineering outcome, while Challenge-Based

Learning can expose students to open-ended and multidisciplinary problems. Flipped and hybrid models can create additional classroom opportunities for interaction and application, whereas adaptive learning can respond more effectively to differences in individual learning progression.

The selection and combination of these strategies should therefore depend on learning objectives and the characteristics of the engineering subject. The framework does not prescribe a universal pedagogical model; instead, it emphasizes purposeful alignment between teaching strategy and the engineering capabilities that students are expected to develop.

Technology Enhanced Learning Environments

The second dimension represents the technological environments through which engineering learning can be supported. The continuing evolution of aerospace engineering laboratories demonstrates that experimental education remains an important component of the discipline while adapting to changes in engineering technologies and educational practices (Chen, 2026).

Technology enhanced learning environments can expand the possibilities available for experimentation, analysis, and exploration of aerospace systems. Their educational role, however, should remain connected with engineering understanding. Students should not simply learn how to operate technological tools; they should be able to interpret their outputs, recognize assumptions and limitations, and connect computational or experimental results with fundamental engineering principles.

The growing relevance of intelligent control provides an example of this relationship between technological development and curriculum evolution. Educational approaches designed for intelligent control in aerospace engineering illustrate how emerging technologies can be incorporated into engineering preparation while

remaining connected with established technical foundations (Narimani et al., 2024).

Within the framework, technology therefore functions as an enabler of learning and engineering inquiry, rather than as an educational objective in isolation.

Experiential Engineering Practice

The third dimension provides the connection between knowledge and application. Experiential engineering practice includes activities in which students are required to use theoretical knowledge within laboratory experiments, projects, design tasks, engineering challenges, and collaborative problem solving environments.

Project-based experiences in space engineering demonstrate the potential of authentic engineering activities to connect multiple areas of technical knowledge (Rodríguez et al., 2015). Similarly, the ESA Concurrent Engineering Challenge illustrates how students can experience multidisciplinary collaboration and engineering decision making within a space mission context (López-Fernández et al., 2020).

Experiential activities occupy a central position in the proposed framework because they provide the environment in which pedagogy and technology become connected with actual engineering reasoning. Students move from knowing an engineering principle to determining how and when it should be applied, interpreting the resulting information, evaluating alternatives, and communicating engineering decisions.

Experiential engineering practice can therefore be understood as the integration layer between theoretical knowledge and competency development. It provides the context in which

students transform disciplinary knowledge into usable engineering capability.

Future Competency Development

The fourth dimension concerns the capabilities that aerospace engineering education ultimately seeks to develop. The previous sections indicate that future oriented education should maintain rigorous technical foundations while also supporting critical thinking, problem solving, collaboration, communication, and adaptability.

Innovative pedagogical approaches can contribute to critical thinking and learning outcomes (Bhuttah et al., 2024), while project and challenge-oriented environments can provide opportunities for multidisciplinary collaboration and engineering decision making (Rodríguez et al., 2015; López-Fernández et al., 2020). The increasing presence of intelligent technologies simultaneously expands the technical capabilities that future aerospace engineers may require (Narimani et al., 2024).

Within the framework, competency development is therefore conceptualized as multidimensional. Technical and digital competence enables students to understand and work with contemporary aerospace technologies. Critical thinking and complex problem solving support the evaluation of engineering alternatives. Communication and interdisciplinary collaboration enable effective participation in complex engineering activities, while adaptability supports continued learning as technologies and professional requirements evolve.

These competencies should not be developed independently. Authentic engineering activities frequently require several capabilities simultaneously. A multidisciplinary aerospace project, for example, may require technical analysis, digital tools, problem

solving, teamwork, communication, and adaptation to changing design requirements within the same learning experience.

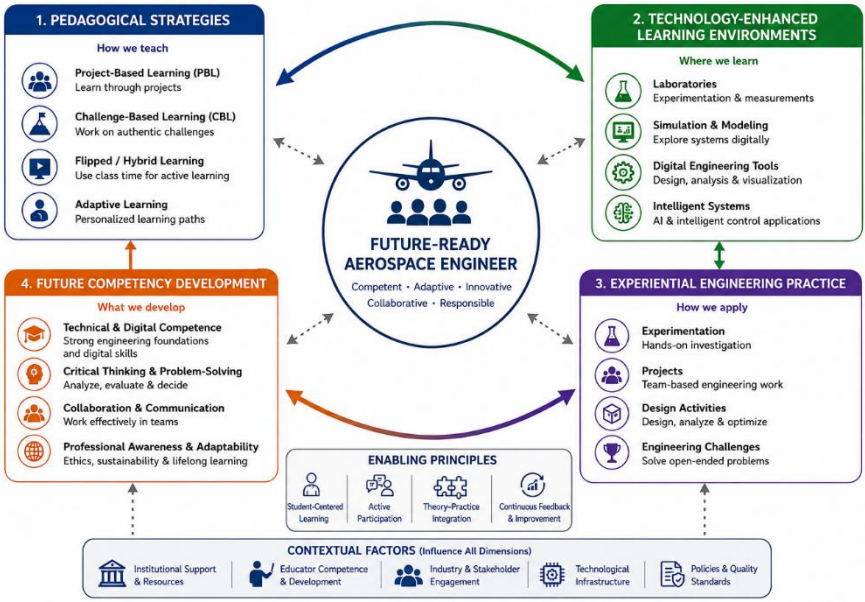
From Educational Integration to the Future-Ready Aerospace Engineer

The central outcome of the proposed framework is the future-ready aerospace engineer. This concept does not refer simply to an engineer familiar with the newest technologies. Rather, it describes a graduate who combines strong scientific and engineering foundations with the ability to apply knowledge, use contemporary engineering tools, collaborate across disciplines, evaluate complex problems, and continue adapting to technological change.

The framework therefore emphasizes integration across the educational process. Pedagogical strategies determine how students engage with learning; technological environments provide tools for exploration and analysis; experiential engineering practice creates opportunities to apply knowledge; and competency development translates these experiences into capabilities relevant to engineering practice.

Importantly, the relationships among these dimensions should be understood as iterative rather than linear. Competency development can influence the selection of future learning activities, experiential tasks may reveal limitations in students' theoretical understanding, and emerging technologies may require changes in both pedagogy and curriculum content. Feedback among the dimensions therefore allows the educational system to evolve in response to student needs and technological developments.

Figure 2. *Integrated Framework for Future Oriented Aerospace Engineering Education*



As illustrated in Figure 2, future oriented aerospace engineering education emerges from the interaction of pedagogical, technological, experiential, and competency-oriented dimensions rather than from any single instructional strategy. The framework places the future-ready aerospace engineer at the center of this interaction while emphasizing continuous feedback among its components. Such a structure allows educational methods and technologies to be selected according to their contribution to engineering learning and competency development rather than their novelty alone. The framework therefore provides a conceptual basis for designing aerospace engineering learning environments that preserve fundamental disciplinary knowledge while responding to technological and professional change.

CHALLENGES AND IMPLEMENTATION CONSIDERATIONS

The adoption of innovative teaching and learning strategies offers significant opportunities for aerospace engineering education,

but their effective implementation also presents several challenges. Educational transformation requires more than introducing active learning methods or advanced technological tools. It involves coordinated changes in course design, instructor roles, learning environments, assessment practices, and the relationship between theoretical instruction and engineering application. The effectiveness of educational innovation therefore depends largely on how these elements are integrated within existing aerospace engineering curricula.

One important consideration concerns the design and implementation of active learning environments. Project-Based Learning and Challenge-Based Learning can provide students with authentic and multidisciplinary engineering experiences, but these approaches require careful planning and coordination. Projects and challenges should be sufficiently complex to encourage engineering reasoning while remaining achievable within students' existing knowledge, available time, and intended course outcomes. Experiences reported in aerospace and space engineering education demonstrate the educational potential of these approaches while also emphasizing the importance of structured learning environments (Rodríguez et al., 2015; López-Fernández et al., 2020).

A related consideration is the changing role of educators. Student-centered education does not reduce the importance of the instructor; instead, it changes the nature of instructional responsibility. In addition to providing disciplinary knowledge, educators may be required to design authentic engineering activities, facilitate teamwork, guide problem solving processes, integrate technological resources, and provide feedback throughout learning activities. Successful implementation therefore depends not only on the availability of innovative methods but also on the capacity to align these methods with appropriate instructional practices.

Technology integration presents another implementation challenge. Simulation, computational environments, intelligent control methods, and other digital technologies can expand the range of engineering problems accessible within educational settings. Their educational value, however, depends on whether students are encouraged to understand underlying engineering principles, interpret outputs critically, and recognize assumptions and limitations. The evolution of aerospace laboratory education and the development of educational approaches for intelligent control illustrate the importance of connecting technological innovation with meaningful engineering learning (Chen, 2026; Narimani et al., 2024).

Curriculum design must also balance technological responsiveness with the preservation of fundamental engineering knowledge. Aerospace engineering programs are expected to maintain rigorous preparation in mathematics, physics, engineering sciences, and discipline specific subjects while responding to developments in increasingly digital and intelligent aerospace systems. Continuously adding new technological content without reconsidering curriculum structure may increase content density without necessarily improving educational outcomes. Emerging technologies should therefore be incorporated where they meaningfully extend established engineering foundations and support intended competencies.

Another consideration involves differences among learners. Students may enter engineering courses with different levels of prior knowledge and may progress at different rates. Adaptive learning provides one approach for responding to such variability through more individualized learning pathways (Rincon-Flores et al., 2024). This suggests that collaborative active learning and individualized learning support should not be treated as opposing approaches. They

can instead address different educational needs within the same broader learning environment.

Assessment practices must similarly reflect changes in educational objectives. If aerospace engineering education seeks to develop not only technical knowledge but also problem solving, critical thinking, collaboration, communication, and adaptability, assessment should be capable of capturing these different dimensions. Conventional examinations remain valuable for evaluating theoretical understanding and analytical competence, but project work, engineering challenges, laboratory activities, and collaborative tasks may reveal additional dimensions of student performance. Alignment among learning objectives, instructional activities, and assessment is therefore essential when implementing active and experiential approaches (Sukackė et al., 2022).

The combination of multiple educational strategies also requires careful consideration. Project-Based Learning, Challenge-Based Learning, flipped learning, and adaptive learning address different aspects of the educational process, and their simultaneous use should not result in unnecessary instructional complexity. Instead, combinations should be selected according to the characteristics of the subject and intended learning outcomes. The hybrid Project-Based Learning-Flipped Classroom approach examined by Chua and Islam (2021) demonstrates how different strategies can be combined within a coherent engineering learning environment.

Institutional conditions may further influence implementation. The framework proposed in this chapter requires alignment among pedagogical strategies, technological learning environments, experiential activities, and competency objectives. The extent to which these dimensions can be integrated may differ according to available laboratory infrastructure, technological resources, curriculum structure, instructional capacity, and the

characteristics of individual courses. Consequently, the proposed framework should be interpreted as a flexible conceptual structure rather than a standardized model that must be implemented identically across institutions.

The practical value of educational innovation ultimately depends on whether it improves the relationship between engineering knowledge, learning experience, and professional competency. New technologies and pedagogical approaches should therefore be selected according to the educational functions they perform rather than their novelty. An advanced digital tool has limited educational value if students cannot connect its outputs with engineering principles, just as an active learning method has limited value if its activities are not aligned with clearly defined learning outcomes.

Accordingly, implementing the proposed framework requires a balanced approach. Aerospace engineering education should preserve rigorous disciplinary foundations while providing students with opportunities to apply knowledge through active, experiential, collaborative, and technology-supported learning. Such an approach allows educational innovation to remain connected to the central objective of engineering education: developing graduates capable of understanding complex systems, making informed engineering decisions, collaborating effectively, and adapting their knowledge as aerospace technologies continue to evolve.

CONCLUSION

Aerospace engineering education is evolving in response to increasing technological complexity, digitalization, intelligent systems, and the multidisciplinary nature of contemporary aerospace practice. While strong foundations in mathematics, physics, and engineering sciences remain essential, these foundations must increasingly be complemented by learning experiences that enable

students to apply knowledge, evaluate complex problems, collaborate across disciplines, and engage effectively with emerging technologies.

This chapter examined Project-Based Learning, Challenge-Based Learning, flipped and hybrid learning, and adaptive learning as complementary strategies for supporting a more active and student-centered educational environment. Evidence from aerospace and broader engineering education indicates that these approaches can strengthen the connection between theoretical knowledge and practical application while supporting student engagement, critical thinking, problem solving, and collaborative learning (Rodríguez et al., 2015; López-Fernández et al., 2019, 2020; Chua & Islam, 2021; Sukackė et al., 2022; Bhuttah et al., 2024; Rincon-Flores et al., 2024).

The discussion also highlighted the changing role of laboratories, simulation, digital environments, and intelligent technologies in aerospace engineering education. As engineering practice becomes increasingly technology intensive, educational environments should provide students with opportunities to engage with contemporary tools without weakening their understanding of fundamental engineering principles. The evolution of aerospace laboratory education and the growing relevance of intelligent control demonstrate the importance of maintaining this relationship between technological capability and engineering understanding (Narimani et al., 2024; Chen, 2026).

Based on these considerations, the chapter proposed an Integrated Framework for Future Oriented Aerospace Engineering Education structured around four interconnected dimensions: pedagogical strategies, technology enhanced learning environments, experiential engineering practice, and future competency development. The framework emphasizes that meaningful educational innovation emerges from the interaction among these

dimensions rather than from the isolated adoption of individual teaching methods or technologies. At its center is the future ready aerospace engineer, characterized by strong technical foundations, digital competence, critical thinking, problem-solving ability, interdisciplinary collaboration, communication, and adaptability.

Ultimately, preparing aerospace engineers for an evolving professional environment requires a balance between continuity and transformation. Fundamental engineering knowledge must remain at the core of aerospace education, while pedagogical practices and learning environments should evolve in response to technological and professional change. The central objective is therefore not simply to make aerospace engineering education more technologically advanced, but to make it more integrated, experiential, adaptive, and competency oriented. Such an approach can strengthen the connection between education and engineering practice and provide students with the capabilities required to contribute effectively to the continuing transformation of aerospace systems.

References

Bhuttah, T. M., Xusheng, Q., Abid, M. N., & Sharma, S. (2024). Enhancing student critical thinking and learning outcomes through innovative pedagogical approaches in higher education: The mediating role of inclusive leadership. *Scientific Reports, 14(*1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-75379-0

Chen, M. (2026). Aerospace engineering undergraduate laboratory courses: A systematic review (1990–2025). *Computer Applications in Engineering Education, 34*(2). https://doi.org/10.1002/cae.70179

Chua, K. J., & Islam, M. R. (2021). The hybrid Project-Based Learning–Flipped Classroom: A design project module redesigned to foster learning and engagement. *International Journal of Mechanical Engineering Education, 49*(4), 289–315. https://doi.org/10.1177/0306419019838335

López-Fernández, D., Ezquerro, J. M., Rodríguez, J., Porter, J., & Lapuerta, V. (2019). Motivational impact of active learning methods in aerospace engineering students. *Acta Astronautica, 165*, 344–354. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.026

López-Fernández, D., Salgado Sánchez, P., Fernández, J., Tinao, I., & Lapuerta, V. (2020). Challenge-Based Learning in aerospace engineering education: The ESA Concurrent Engineering Challenge at the Technical University of Madrid. *Acta Astronautica, 171*, 369–377. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.027

Narimani, M., Emami, S. A., & Castaldi, P. (2024). Intelligent control for aerospace engineers: A novel educational framework. *IFAC-PapersOnLine,58*(16),41–46. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.08.459

Rincon-Flores, E. G., Castano, L., Guerrero Solis, S. L., Olmos Lopez, O., Rodríguez Hernández, C. F., Castillo Lara, L. A., &

Aldape Valdés, L. P. (2024). Improving the learning-teaching process through adaptive learning strategy. *Smart Learning Environments, 11*(1). https://doi.org/10.1186/s40561-024-00314-9

Rodríguez, J., Laverón-Simavilla, A., Del Cura, J. M., Ezquerro, J. M., Lapuerta, V., & Cordero-Gracia, M. (2015). Project Based Learning experiences in the space engineering education at Technical University of Madrid. *Advances in Space Research, 56*(7), 1319–1330. https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.003

Sukackė, V., Guerra, A. O. P. de C., Ellinger, D., Carlos, V., Petronienė, S., Gaižiūnienė, L., Blanch, S., Marbà-Tallada, A., & Brose, A. (2022). Towards active evidence-based learning in engineering education: A systematic literature review of PBL, PjBL, and CBL. *Sustainability, 14*(21), 13955. https://doi.org/10.3390/su142113955

Zappe, S. (2009). "Flipping" the classroom to explore active learning in a large undergraduate course. *Proceedings of the 2009 ASEE Annual Conference & Exposition*.


BİDGE