



I. HAVACILIK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ SEMPOZYUMU

18-19 Ocak 2024

**Özet Gönderim Son Günü
4 Aralık 2023**

**Taslak Programın Duyurulması
15 Aralık 2024**

**Tam Metin Gönderim Son Günü
4 Ocak 2024**

**Programın Kesinleştirilmesi
10 Ocak 2024**

**Sempozyum Açılışı
18 Ocak 2024**

1. HAVACILIK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ SEMPOZYUMU

18-19 Ocak 2024

ERCIYES ÜNİVERSİTESİ, HAVACILIK VE UZAY BİLİMLERİ FAKÜLTESİ
B-BLOK KONFERANS SALONU

DÜZENLEME KURULU

Prof. Dr. NAFİZ KAHRAMAN (Başkan)
Prof. Dr. Alper ASLAN
Doç. Dr. Mustafa SOYLAK
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Ali SOYTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ (Başkan Yardımcısı)

BİLİM KURULU

Prof. Dr. NAFİZ KAHRAMAN
Prof. Dr. BİLGE ALBAYRAK ÇEPER
Prof. Dr. Tuğrul OKTAY
Prof. Dr. Alper ASLAN
Prof. Dr. İlke TÜRKMEN
Prof. Dr. Pınar ÇİVİCİOĞLU BEŞDOK
Doç. Dr. Murat AYDIN
Doç. Dr. Selçuk ASLAN
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM
Doç. Dr. Veysel ERTURUN
Doç. Dr. Tunahan AVCI
Doç. Dr. Fatma YILDIRIM DALKIRAN
Doç. Dr. Mehmet KONAR
Dr. Öğr. Üyesi İSMAİL ATA
Dr. Öğr. Üyesi HARUN ÇELİK
Dr. Öğr. Üyesi Buğrahan ALABAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ
Dr. Öğr. Üyesi Sami PEKDEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN
Dr. Öğr. Üyesi Selim TANGÖZ
Dr. Öğr. Üyesi Eda ÇINAROĞLU

1. Gün - 18 Ocak 2024, Perşembe

Saat	Sunumu Yapan	Sunum Başlığı
09:30	Prof Dr Nafiz KAHRAMAN	Açılış Konuşması
09:45	Kübra ÖZDEMİR, T3 Vakfı	Deneyap Atölyeleri Eğitimlik Tanıtımı
10:00	Araştırma Dekanlığı, Prj. Destek Of.İ Orbay ŞİMŞEK	Yüksek Lisans ve Doktora Öğrencileri için Burs ve Proje Destekleri
10:30	Çay Arası	
	I. Oturum Başkanı	Doç Dr Çağrı Vakkas YILDIRIM
10:45	Cemal ŞİMŞEK	Eklemeli İmalat ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımında İkincil İşlemlerin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi
11:00	Ayhan AKBULUT	Havaçılıkta kullanılan kompozit malzemeler
11:15	Muhammed Can Aytekin	3D Printer Teknolojisi ile Havaçılık Sektörüne Yönelik Chaff - Flare Magazine Geliştirilmesi
11:30	Utku Öğüt	Havaçılık sektöründe termoplastik kompozit malzeme kullanımı, son yıllarda gerçekleşen yenilikler, havaçılık sektörünün geleceği için önemi, üretim aşamaları
11:45	SAADET DOGRUEL	Yeşil Havaçılık: Çevre Dostu Uçak Tasarımı için Sürdürülebilir Kompozit Malzemeler
12:00	Yemek Arası	
	II. Oturum Başkanı	Doç Dr Mehmet KONAR
13:30	Fatma Bulut	Hisse Senedi Fiyat Hareketliliğini Anlamak: Havayolu İşletmeler ile Panel Veri Analizi
13:45	Ozan KUYUCU	MÜHENDİSLİKTE KARŞILAŞILAN ETİK SORUNLAR VE YAPTIRIMLAR
14:00	MUSTAFA ÖZCANLAR	TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİNDEN MEKANİK ALAŞIMLAMA
14:15	Metin Çoşkun	termoplastik kompozitler üzerine araştırma
14:30	Muhammed Osman Yüceli	Termoplastik Kompozitler üzerine çalışma
14:45	Aybüke NACAĞ	havaçılık alanında dijital ikiz uygulamaları
15:00	Çay Arası	
	III. Oturum Başkanı	Doç Dr Selçuk ASLAN
15:15	Özcan Kahramangil	Uçaklarda Yıldırım Çarpması Hasarının Tespitinde MoCap Kullanımı
15:30	Erkan Kuzey	Hava Aracı Gaz Türbinli Motor Malzemeleri
15:45	Mücahit Yazanel	Aktif ve Pasif Akışların Kanat Profili Üzerine Etkisi
16:00	Özkan Semih Karakiş	Geçmişten Geleceğe Kanat-Kuyruk Konfigürasyonlarında Yeniliklerin İncelenmesi
16:15	İdil Sena Durukan	Adaptif kontrol yaklaşımıyla MRAC yönteminin uygulanmasındaki önemini ve diğer kontrol yöntemleriyle kıyaslanması
16:30	Mehmet Sincar	İHALarın sınıflandırılması

2. Gün - 19 Ocak 2024, Cuma

Saat	Sunumu Yapan	Sunum Başlığı
	IV. Oturum Başkanı	Doç Dr. Murat AYDIN
09:30	Kadir DURGUT	Uçaklarda Buzlanma ve Buzlanmayı Önleyecek Yöntemler
09:45	ENGIN DURMUŞ	Metasezgisel Algoritmalar İle İnsansız Hava Araçlarının Görev Planlaması
10:00	Oğuzhan Boztoprak	Yanma Kararsızlıkları
10:15	BARLAS ÖZGÜR	TURBOPROP MOTORLU ASKERİ UÇAKLARDA (ASPECT RATIO) KANATAÇIKLIK ORANININ PERFORMANSA ETKİSİ VE İNCELENMESİ
10:30		Çay Arası
	V. Oturum Başkanı	Doç Dr Çağrı Vakkas YILDIRIM
10:45	Oğuzhan Akyüz	MÜHENDİSLİKTE İDEAL PERVANE TASARIMI
11:00	Burak AKGÜL	ELEKTRİKLİ UÇAKLAR İÇİN BATARYA TÜRLERİNİN İNCELENMESİ
11:15	Seda Erkmen	Havaadlıkta Optimal Kontrol: Verimliliği ve Performansı Artırma
11:30	Mehmet Burak ÖZCEYHAN	HAVA ARACI BAKIM ORGANİZASYONLARINDA İNSAN FAKTÖRLERİ İLE EMNİYET YÖNETİM SİSTEMİ ENTEGRASYONU (EMNİYET EĞİTİMİ)
11:45	Veysel Kılıç	Sıcaklık Bağlı Olarak Jet Yakıtında Oluşan Su Kirliliği
12:00		Yemek Arası
	VI. Oturum Başkanı	Dr Öğr Üyesi İsmail ATA
13:30	KÜBRA KUŞCU	ÇİFT VE DÖRT MOTORLU UÇAKLARDA CRITIC DESTEKLİ TOPSIS YÖNTEMİYLE SEÇİM ANALİZİ
13:45	Hasan KAYA	Hücum kenarı ayrılma kabarcığının olumsuz etkileri tasarımsal olarak giderilebilir mi?
14:00	Furkan Musaoğlu	İklim Nötr havaacılığın uçuşu nasıl sağlanır ?
14:15	Kadir YILMAZ	EWIS (Electrical Wiring Interconnection System) ve Uçak Kablo Sisteminde Ortaya Çıkabilecek Hasarlar ve Hasar İncelemelerinin Değerlendirilmesi
14:30	Muhammed Ali Kara	Uçak sistemleri zaman ilerledikçe neden daha elektronik hale geliyor.
14:45	Ayşe Nur DİŞLİTAŞ	WIG Uçaklarının Operasyonel Analizi
15:00		Çay Arası
	VII. Oturum Başkanı	Dr Öğr Üyesi Eda ÇINAROĞLU
15:15	Cemil RAKİPOĞLU	ABD MERKEZLİ SİVİL TİCARİ UÇAK KAZALARININ İNCELENMESİ; ARDL MODEL ANALİZİ
15:30	Muhammed Fatih CİHAN	HAVA HUKUKU' NUN KONUMU İLE TÜRK HAVA HUKUNA DAİR BİR İNCELEME
15:45	Sümeyye Yavuz	Havaadlık Sektöründe Kadın Çalışanlarının Firma Karlılığına Etkisi: THY Örneği
16:00	Tuğba AKBIYIK	Türkiye'de Terör Olaylarının ve Turizm Faaliyetlerinin Havaacılık Sektörüne Etkisi
16:15	Kubilay Yusuf ÖZDEMİR	CRITIC Temelli TOPSIS Yöntemi ile Dünyanın En İşlek Havalimanlarının Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi
16:30	Z.L. SOYHAN	DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE EĞİTİM SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE EĞİTİM SİSTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

SOYHAN, Z.L. VE AYANOĞLU, M.

Sakarya Üniversitesi, İşletme Enstitüsü, Esentepe Kampüsü, Serdivan, Sakarya, TURKEY

ÖZET

Üniversiteler, bilginin üretildiği ve öğretildiği yerlerdir. Üniversiteleri temel amacı bilgiye ulaşmak, araştırma yaparak yeni verileri elde ederek sosyal ve ekonomik yaşama katkı sağlamaktır. Toplumlarda yeni nesillerin yetişmelerinde, bilimsel yeterliliklerini ve eleştirel düşünce kapasitelerini geliştirmelerinde eğitici kurumlar olarak görev yapmaktadırlar. Üniversiteler bulunduğu bölgelerde etkin bir eğitim yapılanmasına giderek öğrenci talebinin karşılanmasına yönelik hizmetleri sunmak, oluşan arzı yönetmek istemektedirler. Bunun yanında eğitim programlarının yenilenmesi, eğitim verecek akademik personelin yetiştirilmesi, mezuniyet sonrası öğrencilerin istihdamına yönelik modellemeler üzerinde durulmaktadır. Günümüzde artan genç nüfus ile birlikte yükseköğrenim görmek isteyen öğrenci sayısı da hızla artmaktadır. Bu durum üniversite kurulumunda ücretli üniversitelerin oluşumunu da tetiklemiştir. Üniversiteler, bir yandan giderek artan yükseköğretim görme ihtiyaç ve isteğini karşılamaya, bir taratan da bilimsel araştırma programlarını ve projelerini uygulamaya çalışmaktadırlar. Bu süreçte eldeki kaynaklar yeterli olmamaktadır. Ülkelerin özgün toplumsal yapısı ile özdeşleşen bir yapılanma ile yükseköğretim sistemi inşa edilmelidir. Bu çalışmada, Türkiye'deki yükseköğretim sistemi ile çeşitli ülkelerin yükseköğretim sistemleri ele alınarak karşılaştırmalı analiz yapılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilimsel Yeterlilik, Karşılaştırmalı Analiz, Bilimsel Araştırma

ABSTRACT

Universities are places where knowledge is produced and taught. The main purpose of universities is to reach information, to contribute to social and economic life by obtaining new data by doing research. They serve as educational institutions in raising new generations in societies, improving their scientific competencies and critical thinking capacities. Universities want to provide services to meet student demand by establishing an effective education structure in their regions and to manage the resulting supply. In addition, it focuses on the renewal of education programs, the training of academic personnel who will provide training, and models for employment of students after graduation. Today, with the increasing young population, the number of students who want to study higher education is also increasing rapidly. This situation also triggered the formation of paid universities in the university establishment. Universities are trying to meet the increasing need and desire for higher education on the one hand, and to implement scientific research programs and projects on the other. In this process, the available resources are not enough. A higher education system should be built with a structure that identifies with the unique social structure of the countries. In this research, a comparative analysis is made by considering the higher education system in Turkey and the higher education systems of various countries.

Keywords: Scientific Competence, Comparative Analysis, Scientific Research

YÜKSEKÖĞRETİMDE KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Yükseköğrenim sistemine yönelik yapılan araştırmalarda üniversitelerin tanımlanmasında en önemli öge Charle ve Verger'e göre; "belli disiplinlerin yüksek düzeyde öğretimini sağlamak üzere bir araya gelmiş hocalardan ve öğrencilerden oluşan yapılardır" (Charle; Verger, 2005) ifadesi yer alır.

11 ve 12nci yüzyılda kurulan ilk üniversiteler arasında yer alan Bologna, Paris, Oxford üniversiteleri batının medeniyetinin ilk yükseköğretim yerleşkeleridir. Bu üniversiteler kuruldukları dönemin koşullarına göre yapılandırılmış, bilim adamları, araştırmacılar ve öğrencilerden oluşan buldukları toplumunun en köklü kurumlarından biri olarak görev yapmışlardır. El-Ezher ve Nizamiye medreseleri 10 ve 11nci yüzyıllarda kurulmuş olup Batı'da görülen üniversitenin biçimlenme ve kurumsallaşma dönemlerini önemli derecede etkilemiştir. Batıda bilimin gelişmesinde İslam ülkelerindeki modern bilimin temellerini oluşturan orijinal araştırmaların katkıları görülmüştür (Raşid, 2005).

Modern üniversitenin temelleri Wilhelm Von Humbolt'un Berlin Üniversitesinde kurumsallaştırdığı 'Humbolt-Alman' modeline dayanmaktadır. Kant'a göre; "üniversite denen kurumun bütün etkinlikleri, tek bir düzenleyici fikir etrafında örgütlenmiştir ve bu fikir akıldır". Humbolt modeline göre, "üniversite fikrini kültür etrafında örmüşlerdir. Modele göre kültür, incelenen bütün bilgidir ve bu bilgiler neticesinde elde edilen çıktı ise bireyin karakterinin şekillenmesidir". "Üniversiteler, devrinin siyasal ve toplumsal dönüşümlerinden etkilenerek ortaya çıkmıştır (Wittrock, 1993).

Üniversite insan bilgisinin tümüyle ilgilenmektedir. Gerçeğin bağımsız bir şekilde araştırıldığı yerler olan üniversiteler otonom bir kurumsal yapıya sahip olacak şekilde kurgulanmıştır.

ÜLKELER ARASI KARŞILAŞTIRMA VE DEĞERLENDİRME

Almanya: Almanya'daki 12 yıllık zorunlu eğitim süresi içerisinde öğrenciler beceri ve yeteneklerine göre meslek veya akademik kariyer planlaması yaparlar. Her bir öğrenci zekâsı, yeteneği ve isteğine göre yönlendirilir. Liseler diploma notları ve sertifikalara göre yapılırlar. Üniversite ise kendi sınavıyla öğrenci kabulü yaparlar. **İngiltere:** İngiltere'de 12 yıllık 4 kademeli zorunlu eğitim süresinde öğrencilerin yaşlarına göre değişen ve gelişen karakterleri ve düşünceleri beceri ve kabiliyetlerine göre geleceklerini belirlemektedir. Öğrenciler başarı notları ve bireysel sınavlar sonucu belgelerle okul tercihleri yaparlar.

Türkiye: Türkiye'de zorunlu eğitim 12 yıllıktır. Ortaöğretimden sonra ulusal sınavlarla öğrenciler okul hayatlarına devam etmektedirler. Lise ve yükseköğretim okumak isteyen tüm öğrenciler ülke geneli ortak sınavlarla okullara yerleşirler.

Finlandiya: Finlandiya'da 9 yıllık zorunlu eğitim süreci bulunmaktadır. Daha yetenekli çocukları daha çok teşvik etmektense, daha zayıf ve geride kalmış öğrencilere daha çok çaba göstermek, daha iyi sonuçlar sağlıyor. Burada, daha zeki çocukların, kendi eğilimlerine göre kendi gelişimlerini engellemeden, kendilerinden daha geri konumdaki arkadaşlarına yardımcı olacağı düşüncesi üzerine şekillenmiştir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Süre gelen yıllar içerisinde Türkiye eğitim müfredatı diğer ülkelere göre pek çok kez değişiklikler yaşamıştır. Diğer ülkelerde eğitim kurumları buldukları eyalet veya yerel yönetimlere bağlıken,

Türkiye’de tek bir kuruma bağlıdır. Avrupa ülkelerinde okullar müfredatlarını eğitim verecekleri öğrencilerin; ihtiyaçlarına, eğilimlerine, yeteneklerine ve kişiliklerine göre şekillendiriyor. Ülkemizde ise ulusal olarak aynı müfredatla aynı eğitimler verilmektedir. Avrupa’da öğrenciler zorunlu eğitim sonrası yetenek ve kabiliyetlerine göre, diploma notlarıyla lise tercihlerinde bulunurlarken ülkemizde ulusal ortak sınavlarla okullara geçiş yapılabilir. Ülkemizin mesleki eğitim kurumlarında verilen eğitimler teorik ağırlıklıdır ama diğer ülkelerde bunun aksine uygulamalı eğitime daha fazla ağırlık verilmektedir.

Eğitim temeli küçük yaşlarda atılmaya başlanır. ‘Türkiye’nin okul öncesi eğitimi (kreş) %35 civarındayken diğer ülkelerde bu oran %95’i bulmaktadır’. Sonrasında ise öğrenciler ilköğretim eğitimi esnasında öğrencilerin eğitim hayatları sınavlara endekslenmektedir. Fakat bu durum Avrupa ülkelerinde böyle değildir. Öğrenciler yetenek ve becerilerine göre okul süreçlerini geçirirler ve bu süreç içerisinde edindikleri kazanımlar sonucu girecekleri sınav akademik kariyerlerini belirler. Bireylerin kişisel gelişimleri, temel toplumsal kazanımları, etik yapıları ve karakterlerinin en verimli gelişeceği yaş aralığı 4-16 arasındadır. İngiltere’nin zorunlu eğitim süresinin uzunluğu çocukların kişisel gelişimi açısından en verimlisidir.

KAYNAKÇA

Altbach, P. G. (1999). “Patterns in Higher Education Development. American Higher Education in The 21. Century (15-37)”. Baltimore: Johns Hopkins University.

Charle, C. & Verger, J. (2005). “Üniversitelerin Tarihi” Ankara Dost Collegium, Çeviri İsmail Yerguz, Collegium News. 4 Mayıs 2009’da erişilmiştir: <http://collegium.accunet.org/fall04.pdf>

Doğramacı, İ. (2007). “Türkiye’de ve Dünyada Yükseköğretim Yönetimi”, Ankara: Meteksan.

Duderstadt, J. J. (2000). “A University For The 21st Century”. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Duderstadt, J. J. (2008). “Higher Education in The 21st Century: Global Imperatives,

Regional Challenges, National Responsibilities and Emerging Opportunities”. L. E. Weber & J. J. Duderstadt (Ed.), He Globalization of Higher Education (195-206). Paris: Economica.

Eurydice. (2008). “Higher Education Governance in Europe”, Policies, Structures, Fun Ding and Academic Staf. Brussels.

Keohane, N. O. (2006). “Higher Ground: Ethics and Leadership in the Modern University”. Durham: Duke University Press.

Makdisi, G. (1989). Scholasticism and humanism in classical Islam and the Christi an West, Journal of the American Oriental Society, 109 (2), 175-182.

Raşid, R. (2005). “Klasik Avrupalı Modernitenin İcadı ve İslam’da Bilim”. (Ed. B. S. Gür) Ankara: Kadim.

Wittrock, B. (1993). “He Modern University: He Three Transformations”. S. Rothblatt & B.

Wittrock (Ed.), The European and American University Since 1800 (s. 303-362). Cambridge.

OSYM İstatistikleri Erişim: 05.01.2023.

OECD (2003). “Education Policy Analysis”, Paris: OECD, 29 Şubat 2008 tarihinde erişilmiştir: <http://www.oecd.org/dataoecd/0/20/35747684.pdf>

TÜİK 2002. “Hanehalkı Eğitim Bütçe Anketi Sonuçları”.

Yılmaz, H. ve Emil, F. (2008), “Social Expenditures At Different Levels Of Government:

Turkey, A Background Study Prepared for World Bank Social Policy Work”.

Yielder, J., & A. Codling. (2004). “Management and Leadership in the Contemporary University”. *Journal of Higher Education Policy and Management*, 26 (3), 315-328.

YÖK (2007). “Türkiye’nin Yükseköğretim Stratejisi”. Ankara: T. C. YÖK.

Zaharia, S. (2002). “A Comparative Overview of Some Fundamental Aspects of Univer Sity Management as Practiced in Several European Countries, *Higher Education in Europe*”, 27 (3). 301–311.

<https://www.cam.ac.uk/> Erişim Tarihi: 05.12.2022

<http://budget.asu.edu/state-investment-0>.

http://www.calstate.edu/business_community/ Erişim: 05.01.2023.

<http://introduction.ku.dk> Erişim: 05.01.2023.

<https://www.ox.ac.uk/about/organisation> Erişim Tarihi: 07.12.2022.

<https://www.istanbul.edu.tr/tr/content/universitemiz/tanitim> Erişim Tarihi: 11.12.2022.

<https://www.itu.edu.tr/hakkimizda> Erişim Tarihi: 13.12.2022.

<https://www.itugvo.k12.tr/tarihce> Erişim Tarihi: 15.01.2023.

<https://www.gsu.edu.tr/tr/kesfet> Erişim Tarihi: 25.12.2022.

<http://www.gsl.gsu.edu.tr/tr/tarihce/tarihsel-arka-plan> Erişim Tarihi: 19.01.2023.

<https://website.robcol.k12.tr/tr/rc-hakkinda> Erişim Tarihi: 25.12.2022.

<https://www.sj.k12.tr/index.php/tr/saint-joseph-lisesi/lise-tarihcesi> Erişim Tarihi: 25.12.2022.

<https://www.rwth-aachen.de/cms/root/Die-RWTH/~emp/Profil/> Erişim Tarihi: 29.11.2022.

<https://www.kit.edu/kit/profil.php> Erişim Tarihi: 19.01.2023.

<https://www.uni-heidelberg.de/de/universitaet> Erişim Tarihi: 27.11.2022.

<https://www.hs-koblenz.de/hochschule/organisation/ueber-uns/kurzportrait-der-hochschulekoblenz> Erişim Tarihi: 29.11.2022.

<https://www.les-neuwied.de/> Erişim Tarihi: 01.12.2022

<https://www.helsinki.fi/en/about-us/university-helsinki> Erişim Tarihi: 27.12.2022.

<https://www.utu.fi/en/university> Erişim Tarihi: 28.01.2023.

UÇAK SİSTEMLERİ ZAMAN İLERLEDİKÇE NEDEN ELEKTRONİK HALE GELİYOR

Muhammet Ali KARA^{1*}

Fatma YILDIRIM DALKIRAN²

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Melikgazi/Kayseri

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Melikgazi/Kayseri

ÖZET

1903 yılında ilk uçuşun gerçekleştirildiğinden, günümüze kadar olan süre zarfında sayısız uçuş denemesi ve uçak tasarım girişimleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde uçuşların ve uçak tasarımlarının daha konforlu ve daha güvenli hale gelmesi üzerine çalışılmaktadır. Günümüzde kullanılan çoğu teknolojinin temel taşı olan elektronik sistemler, şimdi ve gelecekte üretilecek olan uçak tasarımlarında ciddi rol oynayacaktır. Bu çalışmada elektronik teknolojisinin temellerinden, günümüz uçaklarındaki kullanımından, “Fly by Wire” kavramının yeni nesil uçaklarda kullanılmasından ve elektronik sistemler sayesinde uçakların nasıl daha konforlu ve daha güvenli bir hale geldiğinden bahsedilecektir.

Giriş

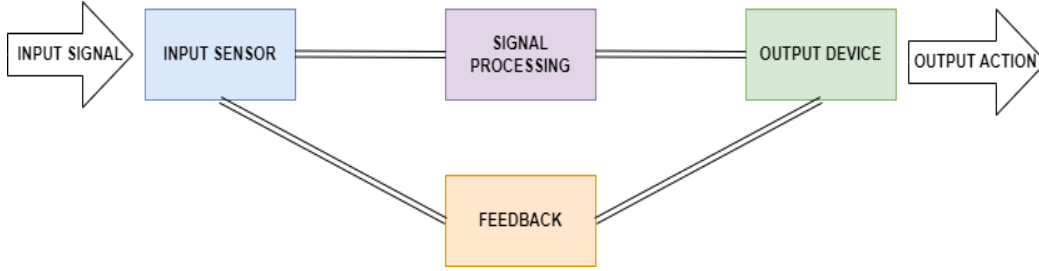
1947 yılında ilk transistörün icat edilmesinden sonra sırasıyla 1958, 1969 yıllarında entegre devreler (IC) ve mikroişlemciler intel tarafından icat edildi. 1969 yılından kısa bir süre sonra analog sinyalleri işleyen operasyonel yükselteçler (OPAMP) bu analog devreler içlerinde analog çoğaltıcıları, analog-dijital (ADC) ve dijital-analog (DAC) dönüştürücüler, analog filtreleri içeriyordu [1]. Elektronik teknolojisinde yaşanan bu gelişmeler o dönem havacılık paydaşları tarafından aktif bir şekilde takip ediliyordu. Yaşanan bu gelişmelerden sonra, elektronik devreler 1958-1969 yılları arasında uçuşa yardımcı teçhizatlar aktif bir şekilde kullanılmaya başlandı. Nitekim bu teçhizatlar pistten yayılan sinyallere göre kötü hava şartlarında iniş ve kalkış yapabilmeye olanak sağlıyordu. Daha sonraki yıllarda çok daha fazla veriyi işleyen ve yöneten bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle uçaklarda artık elektronik tabanlı sistemler kontrolcü olarak görev almaya başlamıştır.

1. Elektronik Sistem Temelleri

Elektronik sistem, elektriksel sinyalleri işleyerek, bu sinyallere göre çıkış sinyali üretir. Elektriksel olmayan giriş sinyalleri ise sensörler aracılığıyla algılanır ve bu sinyaller, elektriksel sinyallere dönüştürülür. Dönüştürülen sinyaller işlenerek, çıkışta kontrol edilmek istenen cihaza gönderilir. Bu cihaz, elektriksel olarak aldığı sinyallerinden bir çıkış sinyali üretir. Üretilen bu sinyal yapılacak işleme göre çıkış bilgisi sunar. Elektronik sistem, Şekil 1’ de de görüldüğü gibi 4 temel yapıdan oluşur. Bunlar giriş sensörleri, elektriksel sinyallerin işlenmesi, çıkış cihazları ve geri beslemedir [2]. Giriş sensörleri, elektriksel olmayan sinyalleri elektriksel sinyale dönüştürür. Örnek olarak bir noktaya uygulanan basınç bilgileri piezoelektrik sensörler aracılığıyla elektriksel sinyallere dönüştürülür. 2. yapı olan elektriksel sinyallerin işlenmesi, elektriksel sinyallerin entegre devreler aracılığıyla istenilen şekle getirilmesidir. Çıkış cihazları ise, üretilen elektriksel sinyallerin istenilen işlemleri yapması için ilgili cihazlara gönderilmesini sağlar. Örneğin çıkışta aktüatörün hareket etmesi isteniyorsa bir servo-motor kullanılabilir. 4. yapı, geri beslemedir. Çıkışta üretilen çıkış sinyali tekrar giriş hattına gönderilerek, sistemin kararlı olması sağlanır.

2. Uçaklarda Kullanılan Elektronik Tabanlı, Uçuşa Yardımcı Teçhizatlar

Elektronik tabanlı sistemlerin hayatımıza girdiği dönem, şüphesiz İkinci Dünya Savaşı dönemidir. Bu sistemler, İkinci Dünya Savaşı sırasında balistik ve menzil hesaplamaları gibi alanlarda kullanıldığı gibi sonraki dönemlerde hava tahminleri, yüksek hızlı menzil hesaplamaları ve pek çok bilimsel alanda yapılan çalışmalarda ve hesaplamalarda kullanılmıştır [2]. 1940 ile 1980 yılları arasında elektronik tabanlı sistemlerin gelişmesi havacılık sektöründe de bir etki yaratmıştır. O yıllarda pilotlar hava şartlarının olumsuz olduğu zamanlarda uçmayı tercih etmiyorlardı.



Bu sorunun aşılması için yetkililer, elektronik sistem kontrolünde olan bir aletli iniş sisteminin gerçekleştirilmesi gerekliliğini öne sürmüşler ve Aletli İniş Sistemi (Instrument Landing System) sistemini geliştirerek, havacılık sektöründe kullanılmasını sağlamışlardır []. Bu gelişmelerle birlikte uçuşa yardımcı teçhizatlar Yere yakınlık ikaz sistemi (Ground Proximity Warning System), Trafik çarpışmaları önleyici sistem (Traffic Collision Avoidance System) ve Küresel konum belirleme sistemi (Global Position System) sistemleri ortaya konmuş ve hatta kullanımı havacılık sektöründe zorunlu hale getirilmiştir. Bu teknolojilerin gelişmesinde alınan sinyalleri işleyebilecek elektronik sistem önemli bir yapı taşı olmuştur [6-8].

2.1. ILS

1940'lı yıllarda, uçakların uçuşlarının kötü hava şartlarında aksamasını önlemek için CAA (Civil Aviation Authority) tarafından ABD Başkanı Roosevelt'e ILS sisteminin bir versiyonu sunulmuştur [3]. O zaman alınan kararlar gereği bu sistemin uçaklara konulması ertelenmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra ILS sistemi sivil havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır. 1947'li yıllarda CAA yöneticisi T. P. Wright, ILS sistemini kullanan havayolları için iniş koşullarını değiştirdi. İniş için gerekli olan azami irtifa 100 feet değerinde, görüş mesafesi normal şartların dörtte-biri kadar azaltıldı. Bu yıllarda ILS sisteminin çok gelişmiş olmadığını düşünen bazı devlet yetkilileri tam otomatik bir ILS sistemi geliştirilmesi konusunda tavsiyelerde bulunmuştur. 1960'lı yıllara kadar da ILS çok fazla kullanılmamıştır. 1964 yılında ilk kez Mesafe ölçüm ekipmanı (Distance measurement Equipment) sistemi ILS sistemiyle birleştirildi. ILS sisteminin günümüzdeki versiyonunun kullanılması bu yılda olmuştur. ILS sistemi, 3 tane önemli antenden aldığı verileri elektronik devreler aracılığıyla kendi diline çevirerek, göstergelere pist orta hiza, pist süzülüş hattı ve pist mesafesi hakkında bilgiler sağlar. Sistemin çalışmasındaki en büyük avantaj, antenlerden alınan verilerin elektronik dile çevrilerek göstergelere aktarılmasıdır.

ILS bileşenlerinden localizer, havalimanı pistinde bulunan verici localizer anteni tarafından yayılan 90 ve 120 Hz. sinyalleri uçaktaki alıcı localizer anteni tarafından algılar. Algılanan 90 ve 120 Hz'lik sinyaller elektronik devre aracılığıyla sinyallerin kesiştiği noktada pist-orta hizasını gösterecek şekilde, kokpitte bulunan göstergelere gönderilir. Gösterge, uçağın almış olduğu sinyallere göre uçağın pistin sağında mı, yoksa solunda mı olduğu bilgisini verir.

a. *Glide Slope*: Havalimanı pistinde bulunan Glide Slope anteni tarafından yayılan 90 ve 150 Hz sinyaller, Uçakta genellikle radomda veya bazen uçak gövdesinin ön kısmında bulunan Glide Slope anteni tarafından algılanır. Algılanan 90 ve 150 Hz'lik sinyaller elektronik devre aracılığıyla sinyallerin kesiştiği

noktada pist süzülüş hattını gösterecek şekilde, kokpitte bulunan göstergeye gönderilir. Gösterge, uçağın almış olduğu sinyallere göre uçağın pist süzülüş hattının üstünde mi? Yoksa altında mı? Olduğu bilgisini bize sağlar.

b. *Marker*: Marker sistemi Uçağa, Havalimanı pistine olan mesafe hakkında bilgi verir. Piste yakın noktalara yerleştirilmiş olan, genellikle Outer ve Middle marker olarak isimlendirilen 2 tane marker anteni piste yaklaşan uçaklara sinyaller gönderir. Uçaklarda gövdenin altında bulunan marker anteni tarafından sinyaller algılanır. Algılanan sinyalleri alan uçaklarda, o anda almış olduğu marker antenini belli eden sinyal frekansı elektronik devre tarafından algılanır. Algılanan bu sinyaller kokpitte ilgili marker göstergesi ışığını yakar. Pilot bu durum sonucunda bulunmuş olduğu pistin dokümanına bakarak yanan marker göstergesinin pistte ne kadar uzakta olduğunu öğrenir.

1971 yılında NASA tarafından MLS'nin (Microwave Landing System) sivil havacılıkta kullanılması ile ilgili bir ulusal plan yayınlandı. Bu yıllarda ILS sisteminin yetersizliği sivil havacılık otoriteleri tarafından düşünülüyordu ama ILS sisteminin birçok havalimanı pistinde aktif olarak kullanılması, ILS sistemi yerine MLS sisteminin kullanılmasını daha zor bir hale getirdi. Nitekim ILS sistemi günümüzde halen aktif olarak kullanılmaktadır ancak FAA'nin 1989 da kesin yaklaşma politikası ile ilgili yayınladığı karar, ilerleyen zamanlarda ILS sistemi yerine daha kesin yaklaşımlar veren bir sistemi zorunlu hale getirmeyi planladığını göstermektedir. Elektronik teknolojisinin gelişmesiyle alınan sinyalleri daha kesin ve daha noktasal hesaplayan elektronik devreler bu teknolojilerin gelişmesinde önemli rol oynayacaktır.

2.2 GROUND PROXIMITY WARNING SYSTEM (GPWS)

1960'lı yılların başında uçak yapımcıları ve yan kuruluşlar, sivil havacılık tarihinde meydana gelmiş olan bazı kazaları göz önünde bulundurarak pilotları yere gereğinden fazla ve tehlikeli bir şekilde alçaldıklarında uyarabilecek bir sistem geliştirmeye başladılar. Böylece aynı yılın ortalarında Radyo altimetre adlı yeni bir cihaz denemeleri başlamış oldu. Bu cihaz yaklaşık 2500 irtifa altında pilotlara anlık yükseklik bilgisini verebilecek kapasiteydi. Sistem gönderdiği sinyalleri alan ve aldığı bu sinyalin gidiş-dönüş arasındaki süre farkından yüksekliğini hesaplayabilmekteydi. Sistem geliştiricileri radyo altimetreyi GPWS sistemine, irtifa bilgisi sağlaması için kullandılar. Anlık alınan irtifa bilgileri yere gereğinden fazla yaklaştığında sesli olarak ikaz veren bir GPWS sistemini geliştirmelerine yardımcı oldu. Sistemin ilk prototipi 1968 yılında 3 tane farklı ikaz üretebilecek düzeydeydi. Nitekim daha sonraki yıllarda geliştirilen EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System) günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır. GPWS sistemi 7 tane farklı ikaz üreterek pilotları bilgilendirmek için kullanılmaktadır. [4,5]

- a. Mod 1: Aşırı alçalma oranı
- b. Mod 2: Araziye aşırı yaklaşma
- c. Mod 3: Kalkıştan sonra alçalma
- d. Mod 4: Emniyetsiz arazi mesafesi
- e. Mod 5: Glide Slope hattından alçalma
- f. Mod 6: Durum farkındalığı; Aşırı Yatış açısı ve Emniyetsiz irtifa hakkında uyarı
- g. Mod 7: Emniyetsiz rüzgar değişim oranı

Yukarıda verilen modlar aracılığıyla pilot sesli bir şekilde uyarılır. Her modun kendine ait ikaz sesi vardır pilot duyduğu bu ikaza göre gerekli işlemleri uygular. 1974 yılında FAA, büyük turbo-jet ve turbo-prop uçaklarda GPWS sisteminin taşınmasını zorunlu kıldı. GPWS sisteminin zorunlu kılınmasında sonra arazi çarpmalarında %85 oranında azalma görüldü. Son zamanlarda yaşanmış Isparta uçak kazası raporunda, MD-83 uçağında GPWS sisteminin bozuk olmasına rağmen uçağın sefere verildiği görülmüştür. Bunun sonucunda pisti tam olarak bulamayan pilotlar pist etrafında dolanmaya başlamışlardı pist etrafında bulunan Türbetepe'ye aşırı yaklaşan pilotları uyaran herhangi bir GPWS sistemi olmadığı için uçak 30 Kasım 2007 tarihinde Türbetepe'ye çarparak kazaya uğramıştır.

2.3 GLOBAL POSITION SYSTEM (GPS)

1951 yılında, Dr. Ivan Getting tarafından radyo sinyallerin varışlarındaki süre farkına bakarak 3 boyutlu, konum hesaplayabilen bir sistem tasarlandı. Yaşanan bu gelişmelerin ardından Sputnik bilim adamları, eğer uyduların yeri kesin olarak bilirse, doppler bozukluğuyla efemeris bilgisinin hesaplanabileceğini onayladı. Dünyaya yapay uydu yerleştirilerek küresel konum belirleme girişimleri bu tarihlerden itibaren konuşmaya başladı. Nitekim GPS sistemi yaşanan gelişmelerin ardından, havacılık tarihinde ilk olarak 1983 yılında, bir uçak tamamen GPS sistemini kullanarak Atlantik'i geçerek Paris'e indi. 1989-1994 yıllarında 24 tane uydunun yerleştirilmesiyle GPS sisteminin tamamen operasyonel olabileceği 1994 yılında bildirildi. Havacılıkta seyrüsefer yardımcısı olarak kullanılan sistem uçuşun her fazında; Departure, En route, Arrival; kullanılabilir kapasiteye sahiptir. ABD savunma bakanlığı tarafından yönetilen GPS sistemi, Bakanlık tarafından FAA ile yapılan görüşmelerde sivil havacılıkta da kullanılması teklif edildi. GPS sistemi L1, L2 ve L5 olmak üzere 3 farklı frekansta yayın yapar. Uçaklarda GPS sisteminin *çalışma prensibi*; Uçaklarda bulunan antenler aracılığıyla en az 4 tane uydudan alınan sinyaller, elektronik devreler aracılığıyla uydulardan alınan sinyallerin süre farklarına göre konum hesapları ardından hesaplanan konum bilgisi kokpitte bulunan göstergelere gönderilir. GPS sisteminin gelişmesinin ardından uçaklarda seyrüsefer ile ilgili sorunlar; Özellikle okyanus aşırı uçuşlarda, minimuma indirildi. [6]

2.4 TCAS

Haziran 1956 yılında havacılık tarihinde o zamana kadar yaşanan en ölümcül kaza kaydedildi. Yaşanan kazada bir Lockheed L-1049 Super Constellation ile Douglas DC-7 21000 feet'te Amerika'da bulunan Grand Canyon üzerinde birbirleriyle çarpıştılar. Bu kazada hayatta kalan insan olmadı ve 128 kişi hayatını kaybetti [7]. Havacılığın yavaş geliştiği bu dönemlerde maalesef uçaklarda, etrafındaki uçaklarının durumunu, irtifalarını ve konumlarını gösteren sistemler daha uçaklarda bulunmuyordu. Tüm sorumluluk pilotların üzerindedir, hatta o zaman havacılıkta "See and Be seen" sözü pilotlar arasında meşhurdur. 1981 yılında FAA, TCAS sisteminin oluşturulması yönelik kararlarını bildirdi. İlk yıllarda TCAS sistemi ATRBS (Air Traffic Control Radar Beacon System) transponder ile kullanıyordu. Daha sonraki yıllarda yeni nesil transponder olarak bilinen DABS (Discrete Address Beacon System); sonraki yıllarda Mode S olarak anılan, sistemle uyumlu olarak çalışmaya başladı. [8]

Zamanla 3 tane TCAS sistemi geliştirildi;

- TCAS 1: Küçük uçaklar için sadece Trafik Tavsiyeleri (TA) sağlar, manevra tavsiyeleri sağlamaz.
- TCAS 2: Büyük uçaklar için TA ve dikey-manevra tavsiyeleri (RA) sağlar.
- TCAS 3: TCAS 2 ye ek olarak yatay-manevra tavsiyeleri de sağlar.

FAA, TCAS 2 sistemi için 1989 yılında 30'dan fazla yolcu taşıyan tüm uçaklarda, 10 ile 30 yolcu taşıyan Commuter uçaklar içinse TCAS 1 sisteminin kullanılması için bir kural yayınladı ve böylelikle bu yıllarda TCAS sisteminin kullanılması havayollarında yaygınlaştı.

TCAS sisteminin *çalışma prensibi*: TCAS sisteminin çalışmasında en önemli unsur uçakta bulunan Transponder sisteminin aktif edilmesidir. Uçakta aktif edilen Transponder, çevresindeki uçaklara sorgulayıcı sinyaller gönderir eğer karşıdaki uçağın da transponder sistemi aktif edilmişse bu sorgulayıcı sinyale ek olarak uçakta bulunan transponder özelliğine göre bilgiler yansıma yoluyla tekrar gönderen uçağa gelir eğer gelişmiş "Mode S" Transponder ise Uçağın Kuyruk kodunu, İrtifa bilgisini ve Uçağın alçaldığı veya yükseldiği bilgisini, "Mode C" ise İrtifa ve kuyruk kodu bilgisini, eğer az gelişmiş "Mode A" ise sadece uçağın kuyruk kodu bilgisini verir. Geri gelen bu sinyaller TCAS anteni tarafından alınır ve elektronik devre aracılığıyla bilgiler işlenir daha sonra kokpitte EFIS gösterge panellerinde bu bilgiler gösterilir. TCAS sistemi, pilotlara hem görüntü olarak hemde sesli olarak ikaz üretebilecek düzeydedir. TCAS sistemi yerde bulunan ATC antenleri tarafından da sorgulanabilir bunun sonucunda ATC yetkilileri uçaklar hakkında ilgili bilgilere sahip olur ve uçakları koordineli bir şekilde iniş için hazırlar. FAA, terminal etrafında bulunan ve transponder taşıyan tüm uçaklarının seferleri, ATC'in (Air Traffic Controller) kontrolü altında gerçekleşmesine gerek duyuyor. Çünkü pist

alanının geniş olması ve uçaklar arasında gerçekleşen TCAS haberleşmesinde bazı aksaklıkların yaşanmasını engellemek ve yerden yayılan radarın çoğu uçağı daha ayrıntılı göstereceğı için bu bildiri FAA tarafından yayınlanmıştır. TCAS sisteminin gelişmesinin ardından Uçak çarpışmalarında kayda değer bir azalış görülmüştür.

UÇUŞA YARDIMCI TEÇHİZATLAR	
ILS	1964
GPWS	1974
TCAS	1989
GPS	1995

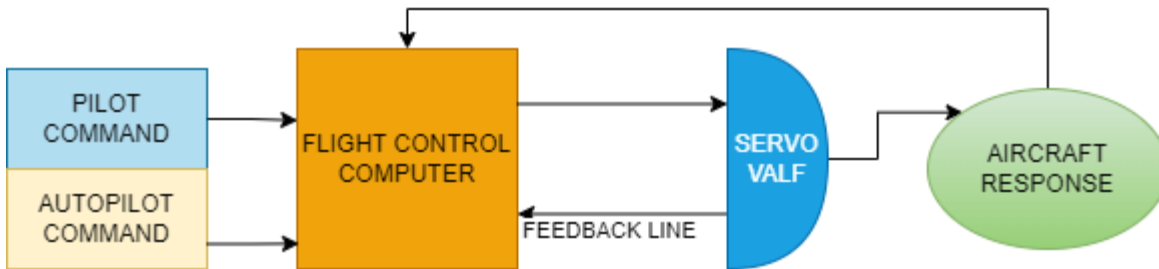
Yandaki tabloda, uçuşa yardımcı teçhizatların havacılıkta hangi yıllarda kullanıldığı gösterilmektedir.

3.0 Yeni Nesil Uçaklarda “FLY BY WIRE” teknolojisinin kullanılması

1984 yılında AIRBUS uçak üreticisi tarafından, A320 uçağı programı tanıtıldı. AIRBUS şirketi A320 uçağını tanıtırken birçok teknik gelişmelerden ve en göze çarpan özelliğı olan “FLY BY WIRE” teknolojisinden bahsetti. A320 uçağının eski nesil Mekanik göstergeler ve sistemlerden ziyade yeni nesil Elektronik sistemlerle dizayn edileceğine dikkat çekti. O zamanlarda havacılık sektöründe 2 tane farklı düşünce yapısı vardı, bazı sektör çalışanları mekanik sistemlerin pilota daha fazla yardımcı olduğunu ve mekanik sistemlerin ve göstergelerin daha güvenli olduğunu savunurken diğer grup ise elektronik sistemlerin ve göstergelerin daha güvenli olduğunu ve hata payının düşük olduğunu düşünüyordu. Nitekim yaşanan gelişmelerin ardından AIRBUS şirketi tarafından tanıtılan “FLY BY WIRE” teknolojisi yeni nesil uçakların günümüzde de aktif olarak üretilen uçaklarda da kullanılmaktadır.

2.5 “FLY BY WIRE” TEKNOLOJİSİ

“FLY BY WIRE” sistemi mekanik bağlantının yerini, elektriksel bağlantının almasını temsil eder. Sistem pilotlardan, otopilottan veya uçuşa etki edecek bilgileri ileten sensörler tarafından iletilen elektriksel sinyalleri FCC’ye (Flight Control Computer) iletir, alınan bu verilerin bir bilgisayar tabanlı sistemle işlenerek, uçuş kontrol yüzeylerine veya uçuş için önemli olan sistemlere iletilmesi esasına dayanır. FLY BY WIRE sistemi mekanik bağlantının yerini almasıyla sağladığı ağırlık kazancının yanı sıra uçuş güvenliğini, karalılığını ve uçağın manevra kabiliyetini artırması gibi birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak askeri havacılıkta ve Concorde uçağında sistemin temelleri atılsa da 1988 yılında AIRBUS şirketinin “FLY BY WIRE” sistemiyle ürettiğı A320 uçağıyla sistem aktif olarak sivil havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonraki yıllarda BOENING ve AIRBUS şirketinin ürettiğı uçaklarının tümünde bu teknolojinin yer alması üretilen yeni nesil uçakların, elektronik sistem altyapısıyla üretildiğini bizlere göstermektedir. [9]



Yukarıdaki şemada “FLY BY WIRE” teknolojinin çalışma prensibi gösterilmektedir. Pilotan, Otopilotan veya sensörlerden alınan veriler Flight Control Computer’a gönderilir. Daha sonra ilgili servo valf veya sensor hattı enerjilendirilir. Enerjilenen bu hatlar hareket ederek verilen komutu gerçekleştirir, feedback hattı aracılığıyla valf’in durumu sürekli olarak FCC’ye gönderilir. Daha sonra servo valfin

hareketi sonucu uçakta oluşan durum tekrardan FCC'e gönderilerek uçağın kararlı bir halde tutulması sağlanır. Bu veriler aynı zamanda kaydedilerek Flight Data Recorder'a gönderilir[9]. AIRBUS şirketi 1988 yılında A320 uçağını "FLY BY WIRE" teknolojisiyle ürettiğini duyurduktan sonra, uçak üretiminde yeni bir dönem başladı. AIRBUS daha sonraki uçakları olan A220, A330, A350, A380 uçaklarında da bu teknolojinin daha gelişmiş olarak kullandığı diyebiliriz. Kısa sürede ciddi satışlar yakalayan şirket diğer uçak üreticileriyle rekabet edecek düzeye geldi. Rekabetin gölgesinde havacılık sektöründe, elektronik tabanlı teknolojiler daha sık kullanılmaya başlandı. Bunun sonucunda havacılıkta yeni bir dönem başladı. AIRBUS şirketinin Glass Kokpit denilen kavramı da uçaklarda tercih etmesi, kokpitte pilotun yükünü hafifleten bir sonuç doğurdu. Glass kokpit denilen kavram kısaca, birçok gösterge ve knob'ların yerine daha az gösterge ve knob'ların almasıyla pilotun veya uçuş mühendisinin yükünü azaltan ve aynı zamanda yaşanacak olan teknik sıkıntıları minimuma indirmeyi hedefler. Nitekim yeni üretilen uçakların bu kavramla üretilmesi kokpitte yaşanan sorunları minimuma indirmiştir.

SONUÇ

İkinci dünya savaşının ardından teknolojinin gelişimi farklı bir noktaya geldi. 1947 yılında elektronik tabanlı sistemlerin temel taşı olan transistör icat edildi. Transistörün icat edilmesinden sonra entegre devreler ve daha karmaşık mikroişlemciler karşımıza çıktı. 1940-1980 yılları arasında havacılık sektöründe elektronik sistemlerin genel olarak, uçuşa yardımcı teçhizatların antenlerinden aldığı verileri işleyerek ilgili sistemin göstergesine dijital veri olarak göndermesi temeline dayanıyordu. Bunun sonucunda pilot bu teçhizatlar sayesinde daha kötü hava şartlarında daha güvenli uçuşlar gerçekleştiriyordu [10]. Nitekim havacılık otoritelerinin bu teçhizatları zamanla, havayolları operatörlerine zorunlu kılmasıyla elektronik tabanlı sistemler havacılıkta yavaş yavaş yer edinmeye başlamıştır. 1984 yılında, AIRBUS şirketinin "FLY BY WIRE" teknolojisini tanıtmaya başladığı uçuşlarda artık elektronik sistemler, uçak sistemlerinde elektronik kontrolcü olarak karşımıza çıkmıştır. Bu yeni tasarım artan sivil operasyonlarını, daha güvenli ve daha konforlu bir uçuş sunduğu için uçak üreticileri tarafından benimsenmiştir. Nitekim 1980'den günümüze kadar olan süre zarfında uçak kazalarında azalma, uçuş güvenliğinde artış sağlandığı için "FLY BY WIRE" teknolojisi etkinliğini artırarak uçak sistemlerinde yer edinmiştir. Gelecek uçak tasarımlarında elektronik tabanlı sistemlerin daha fazla havacılıkta yer edeceğine kesin gözüyle bakılmaktadır. Havacılık sektörünün yeni gelişen teknolojilerle "Uçuşu daha güvenli hale getirme" mottosu havacılık sektörünü her zaman üst seviyelere taşıyacak ve uçakların en güvenli ulaştırma aracı olarak kalmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. <https://www.elprocus.com/know-about-brief-history-of-electronics-and-their-generations/>
2. https://resource.download.wjec.co.uk/vtc/2016-17/16-17_1-8/discovering-electronics-chapter-1-digital.pdf
3. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/history/chronolog_history/b-chron.pdf
4. https://www.faa.gov/lessons_learned/transport_airplane/accidents/N6902C
5. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf;jsessionid=oZ1YarAWjXn1ep6ZcxfmskGN?dergiKodu=4&cilt=14&sayi=163&sayfa=14&yaziid=2583>
6. https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/about-aiaa/press-room/videos/iaf-60th-anniv-gps-nomination.pdf?sfvrsn=9bc64bfa_0
7. <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/tcas-system-preventing-midair-collisions-harman-ja-6399.pdf>
8. <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/tcas-system-preventing-midair-collisions-harman-ja-6399.pdf>
9. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-06-safety-innovation-1-fly-by-wire-fbw>
10. <https://airandspace.si.edu/explore/stories/evolution-commercial-airliner>

GEÇMİŞTEN GELECEĞE KANAT-KUYRUK KONFIGÜRASYONLARININ İNCELENMESİ

Özkan Semih KARAKIŞ

Erciyes Üniversitesi, Uçak Mühendisliği

ÖZET

"Geçmişten Geleceğe Kanat-Kuyruk Konfigürasyonlarında Yeniliklerin İncelenmesi" adlı bu çalışma, uçaklarda kullanılan kanat-kuyruk konfigürasyonlarının günümüz tasarımlarını ve gelecekte beklenen gelişmelerini incelemeyi amaçlamaktadır. Araştırmanın kapsamı, ilk uçak kanat-kuyruk tasarımlarıyla başlayarak, ilerlemelerin gözlemlendiği tasarımları ve geçmişte kullanılan konfigürasyonları da içermektedir. Günümüzde kullanılan standart tasarımlar, yüksek verimlilik sağlayan konfigürasyonlar ve özel amaçlara uygun tasarımlar da ele alınacak. Ayrıca, gelecekteki teknolojik gelişmelerle birlikte ortaya çıkması beklenen yeni tasarım yaklaşımları, hibrit kanat-kuyruk konfigürasyonları ve ileri malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulan tasarımlar da incelenecektir. Çalışmanın sonunda, kanat-kuyruk konfigürasyonlarının performans analizi yapılacak ve bu analizin aerodinamik performans, yükseltilmiş performans ve yakıt verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilecektir. Çalışmanın bulguları, önerilen kanat-kuyruk konfigürasyonları ve gelecekte yapılması gereken araştırmalara da yer verilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kanat, kuyruk, konfigürasyon, gelenek, yenilik.

GİRİŞ

Geçmişten geleceğe kanat-kuyruk konfigürasyonlarında yeniliklerin incelenmesi çalışması, havacılık endüstrisindeki gelişmeleri ve ilerlemeleri gözlemlenmek amacıyla yapılan bir araştırmadır. Bu çalışmanın odak noktası, havacılıkta kullanılan kanat-kuyruk konfigürasyonlarında yeni fikirler ve tasarımların nasıl uygulandığıdır. Bu çalışma, havacılık mühendisliği alanında önemli bir konudur ve havayolu endüstrisindeki yenilikleri ve gelişmeleri incelemeyi amaçlamaktadır.

1.1. Araştırmanın Amacı

Araştırmanın amacı, geçmişten günümüze havacılıkta kullanılan kanat-kuyruk konfigürasyonlarındaki yenilikleri ve gelişmeleri incelemektir. Bu çalışma, havacılık endüstrisindeki teknolojik ilerlemeleri takip etmeyi ve yenilikçi tasarımların nasıl uygulandığını anlamayı hedefler. Bunun yanı sıra, havacılık mühendisleri tarafından kullanılan yeni malzemelerin ve tasarım tekniklerinin kanat-kuyruk konfigürasyonlarındaki performans üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlar.

1.2. Araştırmanın Kapsamı

Araştırmanın kapsamı, geçmişte kullanılan kanat-kuyruk konfigürasyonlarından günümüzde kullanılan yenilikçi tasarımlara kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Bu çalışma, farklı havacılık şirketlerinin ve araştırma kurumlarının gerçekleştirdiği çalışmalardan elde edilen bilgileri içerir. Ayrıca, farklı uçak ve helikopter modellerinin kanat-kuyruk konfigürasyonlarına odaklanırken, sivil ve askeri havacılık alanlarını da kapsamaktadır.

1.3. Araştırmanın Yöntemi

Araştırmanın yöntemi, literatür taraması ve analizlerin ağırlıklı olarak kullanıldığı bir yaklaşımdır. İlk olarak, geçmişteki ve mevcut literatürde bulunan kanat-kuyruk konfigürasyonlarıyla ilgili bilgiler derlenmiştir. Ardından, bu bilgilerin analizi yapılarak, yenilikçi tasarım kavramları ve uygulamaları incelenmiştir. Araştırma, havacılık mühendislerine ve tasarımcılara rehberlik etmek amacıyla, havayolu endüstrisindeki gelişmeleri ve yenilikleri anlamayı ve değerlendirmeyi hedeflemektedir.

Çalışma Organizasyonu

Bu çalışmanın organizasyonu aşağıda verildiği gibidir.

1. Bölümde, Uçuş Aerodinamiği ve Kanat-Kuyruk Yapıları
2. Bölümde, Geçmişteki Kanat-Kuyruk Konfigürasyonları
3. Bölümde, Günümüzdeki Kanat-Kuyruk Konfigürasyonları
4. Bölümde, Gelecekteki Kanat-Kuyruk Konfigürasyonları ve Sonuç

Değerlendirme ve Sonuç

Bu çalışma, havacılık tarihindeki kanat-kuyruk konfigürasyonlarının evrimini inceleyerek, uçak tasarımındaki temel değişimleri ve ilerlemeleri ortaya çıkarmayı amaçlamıştır. Elde edilen bulgular, havacılık endüstrisindeki mühendislik ve teknolojik gelişmelerin, uçak performansı, güvenlik ve verimlilik üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir. Bu inceleme, ilk uçulardan başlayarak biplanelerden monoplanlara, sabit kanatlılardan günümüz tasarımlarına kadar geniş bir yelpazedeki kanat-kuyruk konfigürasyonlarının tarihsel gelişimini izlemiştir. Bu araştırma, gelecekteki uçak tasarımlarını etkileyebilecek potansiyel trendlere de ışık tutmaktadır. Yapmış olduğumuz çalışma bize gösteriyor ki kanat-kuyruk konfigürasyonundaki değişimlerin temel taşı malzeme bilimi oluşturuyor. Çok kanatlı ilk uçaklarda kullanılan kumaş malzemelerden tek kanatlı karbonfiber kanatlara geçiş bunun en belirgin örneğidir. Sonuç olarak, bu makale, havacılık mühendisliği ve tasarımındaki evrimin önemli bir panoramasını sunarak, gelecekteki uçak tasarımlarının şekillenmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Serdar Genç, Gülşah Özışık, N.K., 2008. Düz flaplı NACA0012 kanat profilinin aerodinamik performansının incelenmesi, J. of Thermal Science and Technology, 28:3–4.
2. Jr., J.D.A., 2005. Introduction to Flight, McGraw-Hill, New York.
3. Raymer, D., 2018. Aircraft Design: A Conceptual Approach, AIAA, Reston, VA.
4. Smithsonian National Air and Space Museum. "1903 Wright Flyer". Erişim: 25 Kasım 2023. https://airandspace.si.edu/collection-objects/1903-wrightflyer/nasm_A19610048000.
5. Johnson, William M. "Wings over Iowa: From the Pilot's Seat." Iowa Heritage Illustrated 77.1 (1996).
6. Loening, Grover Cleveland. "New Development in Aeroplane Construction." Scientific American 105.20 (1911): 428-429.
7. FAA. (2019, Kasım/Aralık). November/December 2019 FAA Safety Briefing. FAA Safety Briefing, 19(6), 20-23.

8. K Özpınar - 2022 - search.proquest.com. Motorlu Çok Hafif Hava Aracının Prototipinin Tasarımı ve Geliştirilmesi. erbakan.edu.tr
9. E Özbek - 2020 - search.proquest.com. Elektromekanik Doğa Benzetimli Gözlem Mini İHA Tasarımı: Yapısal ve Aerodinamik Analizleri.
10. MC Wilkins - 2019 - books.google.com. German Fighter Aircraft in World War I: Design, Construction and Innovation.
11. Hamilton, J. (2004). Aircraft of World War I. ABDO Publishing Company.
12. Hallion, R. P. (1978). Wooden Aircraft and the Great War. Journal of Forest History, 36 22(4), 200-202.
13. Calise, A. J., Lee, S., & Sharma, M. (2001). Development of a reconfigurable flight control law for tailless aircraft. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 24(5), 896-902.
14. Chen, S., Lyu, Z., Kenway, G. K., & Martins, J. R. (2016). Aerodynamic shape optimization of common research model wing-body-tail configuration. Journal of Aircraft, 53(1), 276-293.
15. Karakoç, T. H., & Özbek, E. (2018). Elektromekanik doğa benzetimli gözlem mini İHA tasarımı: yapısal ve aerodinamik analizleri (Master's thesis, Tez (yüksek lisans) Anadolu Üniversitesi).
16. Hashimoto, A., Jeong, S., & Obayashi, S. (2015). Aerodynamic optimization of nearfuture high-wing aircraft. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 58(2), 73-82.
17. Nash, S. M., & Rogers, S. E. (1999). Numerical study of a trapezoidal wing high-lift configuration. SAE transactions, 993-1001.
18. A Rusca - "The Science and Development of Transport"(ZIRP ... - researchgate.net.SHUNTING YARD CAPACITY ASSESSMENT USING A DISCRETE SIMULATION MODEL. researchgate.net
19. MC Wilkins - 2021 - books.google.com. British Fighter Aircraft in World War I: Design, Construction, and Innovation. HTML
20. İ Harbi - 2023 - acikkaynak.bilecik.edu.tr. İnsansız hava araçlarında kullanılan pistonların malzeme ve kaplama özelliklerinin aşınma performansına etkisinin incelenmesi. bilecik.edu.tr
21. Y Şen, T Erdağ - Troy Academy, 2021 - academia.edu. Havayolu Taşımacılığı Sektörü Gelişim Evrelerinin PEST Analizi ile Değerlendirilmesi: 5 Dönem+ Covid19 Pandemi Süreci Dönemi Kapsamında Bir İnceleme. academia.edu Cited by 7.



Alınma
04 Ocak 2024
Düzeltilme

Kabul

* Furkan MUSAOĞLU.
e-mail:
401433015@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- Nötr Uçuş 1
- Küresel Isınma 2
- Sürdürülebilir Dünya 3
- Hidrojen 4
- Fosil yakıt 5

Nötr Havacılığın Uçması Nasıl Sağlanır?

Furkan MUSAOĞLU¹

¹ Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Mühendisliği, İstanbul, Türkiye
² Havacılık ve Uçak Mühendisliği, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye³

ÖZET

Bu çalışmada Nötr uçuş nedir, bu nasıl sağlanabilir ve yöntemleri nedir gibi konular ele alınmaktadır. İklim krizi her geçen zamanla daha ciddi hale dönüşüyor ve ekolojik yaşamda daha fazla etkiliyor. Ancak bu kadar belirli bir tehdide ve ciddi olumsuz etkilere rağmen, ulusal ve uluslararası düzeydeki çabalar iklim kriziyle mücadele etmekten uzak duruyor. Özellikle süratle büyümesi ve devamlı artan emisyon oranlarıyla havacılık sektörü iklim kriziyle mücadele etmekte yetersiz kalıyor. Fakat literatüre bakıldığı zaman farklı konular üzerinde birçok çalışma yapılmış ancak aynı konular üzerinde birleşilen görüşlerin çalışmalarının yavaş ilerlediği görülmektedir. Sürdürülebilir dünya için hayati önem taşıyan bir konu olduğu küresel ısınma probleminin tüm insanlığı etkileyeceğinin, bu durumda zamanla ortaya çıktığı görülmektedir. Sonuç olarak ise uluslararası ve ulusal havacılığın iklim kriziyle mücadelesinde çalışmaların olduğu ancak ileriki süreçlerde sürdürülebilir dünya olabilmesi için çalışmaların daha hızlı ve kesin olması gerekmektedir.

How to Make Neutral Aviation Fly?

Furkan MUSAOĞLU¹

¹ Air Force Academy Aerospace Engineering İstanbul, Türkiye
² Aviation and Aircraft Engineering, Erciyes University, 38030, Kayseri, Türkiye

ABSTRACT

In this study, topics such as what is neutral flight, how can this be achieved and what are the methods are discussed. The climate crisis is becoming more serious with each passing day and is affecting ecological life more. But despite such a specific threat and serious negative impacts, efforts at national and international levels are still far from tackling the climate crisis. The aviation industry, especially with its rapid growth and ever-increasing emission rates, is insufficient to combat the climate crisis. However, when we look at the literature, it is seen that there are many studies on different topics, but the studies of unified views on the same topics are progressing slowly. It is seen

Received
04 Ocak 2024
Revised
01 Şubat 2020
Accepted
01 Mart 2020

* Furkan MUSAOĞLU
e-mail:
401433015@erciyes.edu.tr

Keywords:

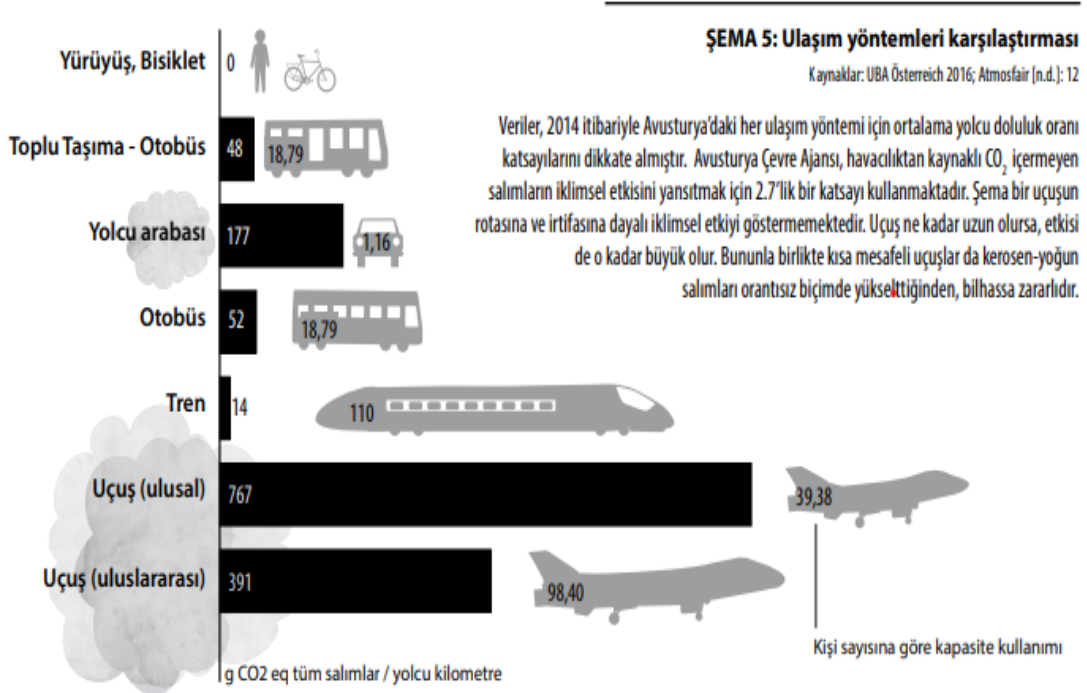
- Neutral Flight 1
- Global Warning 2
- Sustainable World 3

- Hydrogen 4
- Fossil Fuel 5

that the global warming problem, which is a vital issue for a sustainable world, will affect all humanity, and this situation will appear over time. As a result, there are efforts to combat the climate crisis in international and national aviation, but the work needs to be faster and more precise to create a sustainable world in the future.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde her yıl en az yarım milyon insan havacılık sektörünü kullanarak yolculuk yapmaktadır. Geçtiğimiz 25 yıl, hava ulaşımı artık her kesimden insanın ulaşabildiği bir ulaşım şekli haline gelmiştir. Her ne kadar olumlu etkileri olsa da bu kadar yaygın kullanımla oluşan olumsuz etkileri de olmaktadır. İklim ve sürdürülebilir bir çevreye olan olumsuz etkileri bunların başında yer almaktadır. İklim üzerine etkisi en olumsuz olan ulaşım şeklidir. Havacılık sektöründeki bir uçuş, seyahat edilen her 1000 yolcu-kilometre başına, tren yolculuğuna göre 18 kat daha fazla CO₂ 'ye (karbondioksit) sebep olur.(Guardian 2017)



(UBA Österreich 2016)

Dünyadaki CO₂ emisyonlarının %2,5'i küresel havacılık sektörü sebebiyle oluşmaktadır. (Friedlingstein 2019) Son yirmi yıllık periyoda bakıldığında zaman uçakların yakıt tüketiminde yıllık %2'lik bir iyileşme olmasına rağmen, yıllık talepteki %4'lük artış nedeniyle CO₂ emisyonlarının artmaya devam etmesi ve havacılığın CO₂ emisyonlarının dünyaya etkisi iki katına çıktı. (NLR & SEO Amsterdam 2021) CO₂ emisyon etkilerinin yanı sıra havacılık sektörü, kısa ömürlü iklim zorlayıcıları tarafından (Short-Lived Climate Forcers) (SLCF) serbest bırakarak atmosferdeki "CO₂ olmayan etkiler" etkisiyle iklim değişikliğine olumsuz etkiye sebep oluyor. Önemli belirsizliklerle ilişkili olmasına rağmen, CO₂ dışı etkilerin anlaşılması yıllar içinde iyileşti ve atmosferik SLCF emisyonları ile ısınım salımlarındaki

(Radiative Forces) (RF) artış arasındaki ilişkinin kabul edilebilir seviyede olduğu görüldü. (M.CAİN 2019)

Avrupa Komisyonu, havacılığın iklim üzerindeki tüm etkilerini araştıran ve çözüm üretmesi amacıyla politikalara olan ihtiyacı olduğunu kabul etmektedir. (European Commission, 2020) Yakın zamanda yaptırdığı bir analiz sayesinde CO₂ dışı etkilerin düzenlemesine yönelik yollar bulmayı önerdi. (EASA 2020) Ancak bu önerilere bakıldığı zaman politika ve çözüm yollarının döküman ve çalışmalarında yeterince ele alınmıyor ve havacılığın iklim değişikliğine katkısını azaltmak için gereken çaba gösterilmemektedir. Azaltma yollarına bakıldığı zaman, hava trafik sisteminin iyileştirilmesine, daha büyük ve yakıt açısından daha verimli uçakların üretilmesine, sürdürülebilir havacılık yakıtlarının kullanılmasına ve kalan etkilerinde daha azaltılmasıyla hedefe ulaşılacağı öngörülmektedir. Tüm bunların sonucunda AB merkezli uçak üretici ülkeler, havalimanları ve havayolları için “Hedef 2050” sloganıyla 2050 yılına kadar CO₂ emisyonlarını %92 oranında azaltmayı hedefliyor.

1.1. İklim Etkisini Hafifletme Yolları (Climate impact mitigation pathways)

Havacılık sektörünün sadece fosil jet yakıtına dayandığı senaryonun yanı sıra, havacılığın iklim etkisini azaltmak için iki teknoloji seçeneğini (yani hafifletme yaklaşımlarını) değerlendirilmektedir. İlk olarak, fosil bazlı bir havacılık filosu için havacılığın iklim etkisini azaltmak sebebiyle CO₂'nin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan Doğrudan Hava Yakalama (Direct Air Capture) (DAC) ve CO₂'nin kalıcı jeolojik depolanması yoluyla gerçekleştirilir. (Şekil 1a) Daha sonra sentetik jet yakıtının, havadan yakalanan CO₂'i su elektrolizi yoluyla sayesinde hidrojenle üretilir ve geri kalan etkiler DACCS tarafından dengelenir (Şekil 1b). Sürdürülebilir havacılık yakıtı için Avrupa Birliği tarafından tahmini hedeflerin, sentetik jet yakıtının 2030 yılı için %5, 2050'de %63 ve son olarak 2050'de %100 hacim yüzdesiyle geleneksel jet yakıtıyla harmanlandığını varsayılmaktadır. (European Commission, 2020)

Bu iddialı bir hedeftir fakat teknoloji olarak mümkün kılınmakta olup geliştirme sonucu verilen hedeflere ulaşmanın zor olmayacağı düşünülmektedir. Ancak maliyet açısından rekabetçi ortam oluşturmanın etkisinin ciddi olabileceği de düşünülmelidir. (Nature Energy 854–865 (2022)).

1.2. Corsia Nedir? Nasıl Çalışır? (What is Corsia? How does it work?)

Ekim 2016'da, kurulan Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü'nün üye ülkeleri tarafından havacılık emisyonları önlemek amacıyla küresel dünyada kurulmasına yönelik tarihi bir karar alınarak kurulan birimdir. (ATAG) Uluslararası Havacılık için Karbon Dengeleme ve Azaltma Planı (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) (CORSIA) ICAO teşkilatının sayesinde kurulan birime denir. CORSIA'nın çalışmalarına bakıldığı zaman, havayollarının CO₂ emisyonlarında 2020 seviyelerinin üzerindeki artışı dengelemek amacıyla kurulan küresel plandır. Bu sistem sürdürülebilir havacılık yakıtı , altyapı tesisleri gibi diğer emisyon azaltma tedbirlerinin uygulanmasıyla birlikte havacılığın net CO₂ emisyonlarının stabil hale geleceği anlamına gelmektedir. CORSIA'nın 2021 ile 2035 yılları arasında hedefinin yaklaşık olarak 2,5 milyar ton CO₂'yi azaltacağı, bununla birlikte yıllık ortalama 164 milyon ton CO₂ emisyon sağlanacağı hedeflenmektedir. (ATAG)

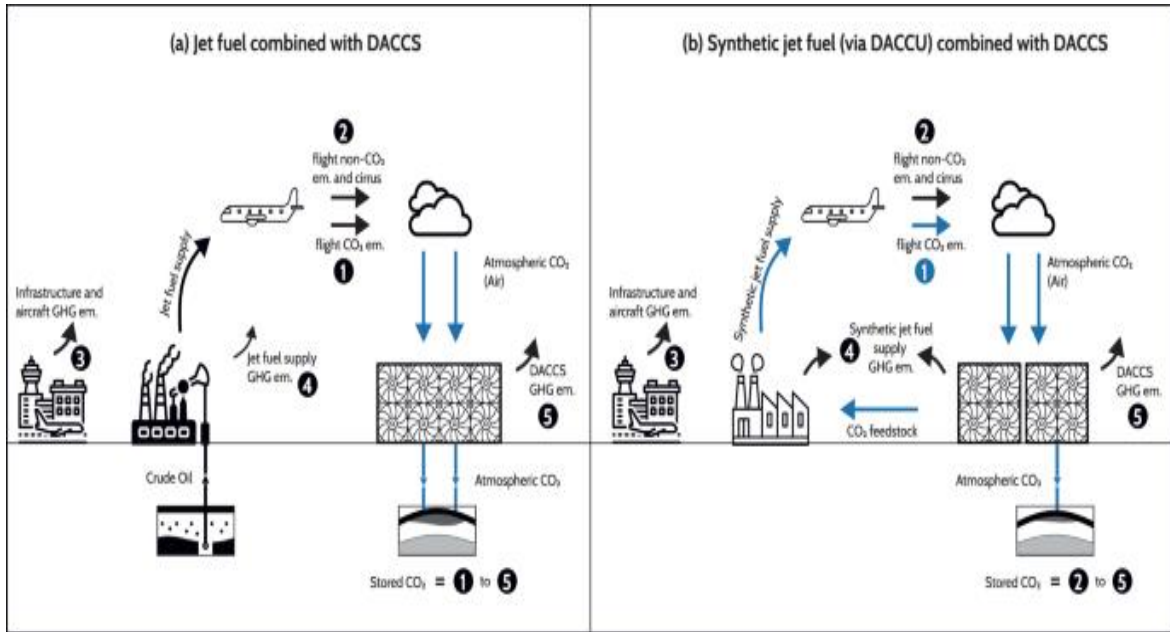
Dekarbonizasyon için Temel Unsurlar

- Teknolojik Yenilikler
- Sürdürülebilir Havacılık Yakıtlar
- Operasyonel ve Altyapı İyileştirmeleri
- Döngüsel Ekonomi

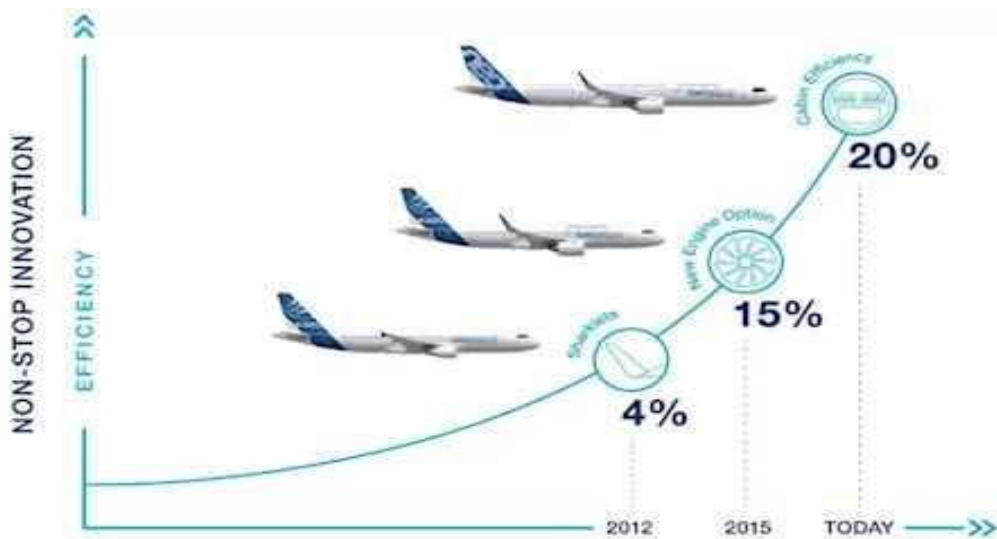
Örneğin; Uluslararası Hava taşıyıcılığı yapan Pegasus şirketinin net sıfır karbon hedefinin haritasına bakıldığı zaman sürdürülebilir havacılık yakıtının pastada en büyük yer kapladığı, sonrasında sırasıyla karbon yakalama ve karbon nötrleme, yeni teknolojiler (Hidrojen ve Elektirik) ve altyapı ve operasyonel verimlilik şeklinde bir planlarının bulunduğu görülmektedir. (IATA)

Şirketin kullandığı uçaklara bakıldığı zaman CFM-Leap Motor serisinin kullanıldığı özellikle Airbus tarafından Airbus320 ceo uçaklarıyla yakıt tüketimi ve karbon emisyonu açısından %15-20 oranında verimlilik sağladığını bildirmektedir. (Şekil-2) (AIRBUS)

Şekiller (Figures)



Şekil 1. DAC Sistemi (DAC System)



Şekil 2. Airbus A320 Neo Filo verimliliği (A320 Neo Squadron Efficiency)

SONUÇ (CONCLUSION)

Karbon emisyonunu dengelemek için havacılık sektöründe yapılanlar yetersiz kalmakla birlikte yapılan çalışmaların faydalı ve etkili olacağı görülmektedir. Çalışmaların uluslar ve uluslararası olduğu gözükmele beraber farklı konuların beraber entegrasyonu daha iyi sonuçların ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Sürdürülebilir dünya için fosil yakıt tüketiminin mümkün olduğunca azaltılması, sentetik jet yakıtının kullanılmasına yönelik teknolojilerin kullanılmasının en büyük katkı sağlayacağı, bununla birlikte hidrojen ve elektrikli motorların kullanımının artırılması fayda sağlayacağı kaçınılmaz olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Friedlingstein, P. et al. Global carbon budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1783–1838 (2019)
2. Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T. & Penanhoat, O. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environ. Res. Lett.* 14, 084019 (2019).
3. ACA – Airport Carbon Accreditation (2017): <http://www.airportcarbonaccreditation.org>
4. ATAG - Air Transport Action Group (2013): Reducing Emissions from Aviation through Carbon-Neutral Growth from 2020. <http://www.atag.org/our-activities/38th-icao-assembly.html>
5. Atmosfair (o. A.): Emissionsrechner. <https://www.atmosfair.de/de/emissionsrechner>
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_Offsetting_and_Reduction_Scheme_for_International_Aviation
7. <https://www.flypgs.com/surdurulebilirlik/2050-net-sifir-karbon-emisyonu-yolculugumuz>
8. EASA. Updated analysis of the non-CO2 effects of aviation. European Union Aviation Safety Agency <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2020:277:FIN> (EASA, 2020).
9. ICAO. Introduction to the ICAO Basket of Measures to Mitigate Climate Change. ICAO Environ. Rep. 2019 111–115 (ICAO, 2019).
10. Cain, M. et al. Improved calculation of warming-equivalent emissions for short-lived climate pollutants. *npj Clim. Atmos. Sci.* 2, 1–7 (2019).
11. Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., Gasser, T. & Penanhoat, O. The contribution of carbon dioxide emissions from the aviation sector to future climate change. *Environ. Res. Lett.* 14, 084019 (2019).
12. Schneider, L., Michaelowa, A., Broekhoff, D., Espelage, A. & Siemons, A. Lessons Learned from the First round of Applications by Carbon-offsetting Programs for Eligibility Under CORSIA (Öko-Institut, 2019).

Journal of Aerospace Science and Management

Vol: XXX, No: XXX, 2021 (xx-xx)

E-ISSN: 1234-1234

(Araştırma Makalesi / Derleme)

**Havacılıkta Kullanılan Kompozit Malzemeler ve
Tahribatsız Muayene Sistemleri**

Ayhan AKBULUT

Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Geleneksel olarak kullanılan malzemeler bazı sınırlı veya bulunmayan özelliklerini geliştirmek amacıyla kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kullanım amacına göre oluşturulan bu yeni malzeme birçok alanda kullanılmakta ve kullanımı hızla artmaktadır. Havacılık sektörü için gerekli şartları ve özellikleri karşılayabilmek amacıyla kompozit malzemelerin havacılıkta kullanımı ve önemi her geçen gün artmaktadır. Kullanılan bu yüksek özellikli malzemeler istenen özellikleri karşılamanın yanı sıra servis ömrü boyunca üretim amacını barındıran özellikleri kaybolmamalıdır. Ancak, havacılık malzemeleri farklı yükler ve atmosferik şartlar gibi çeşitli nedenlerden dolayı hasara uğramakta ve özellikleri kaybolmaktadır. Havacılık sektöründe artan rekabet ile uçaklarda kullanılan malzemelerin güvenilirliği ve hava araçlarının bakım süreleri çok önemli hale gelmiştir. Bu malzemelerin güvenilirliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla malzemelerin servis ömürleri boyunca tahribatsız olarak muayene edilmesi gerekmektedir. Uçaklarda en yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdeki hasarın tespiti, hasar bölgesinin belirlenmesi ve hasarın karakterize edilmesi için güvenli bir tahribatsız muayene yöntemi bulmak çok önemlidir. Havacılıkta en sık kullanılan görsel inceleme yöntemleri, penetrant muayenesi, Eddy-current akımları ile inceleme, ultrasonik inceleme, radyografi ve termografi gibi test teknikleridir. Bu araştırmada ilk olarak havacılık sektöründe en çok kullanılan malzemeler olan kompozit malzemelere değinilmiştir. Daha sonra havacılıkta geleneksel olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden bahsedilmiştir.

ABSTRACT

Composite materials have been developed to improve some limited or non-existent properties of traditionally used materials. This new material, which is created according to the intended use, is used in many areas and its use is increasing rapidly. The use and importance of composite materials in aviation is increasing day by day in order to meet the conditions and properties required for the aviation sector. In addition to meeting the desired properties, these high specification materials should not lose their properties that fulfil the purpose of production during the service life. However, aerospace materials are damaged and their properties are lost due to various reasons such as different loads and atmospheric conditions. With the increasing competition in the aviation industry, the reliability of the materials used in aircraft and the maintenance periods of aircraft have become very important. In order to increase the

reliability of these materials and reduce maintenance costs, non-destructive testing of materials is required throughout their service life. It is very important to find a safe non-destructive testing method for detecting damage, identifying the damage site and characterising the damage in composite materials, which are most commonly used in aircraft. The most commonly used visual inspection methods in aviation are test techniques such as penetrant inspection, examination with Eddy-current currents, ultrasonic examination, radiography and thermography. In this research, firstly, composite materials, which are the most commonly used materials in the aviation industry, are mentioned. Then, non-destructive testing methods traditionally used in aerospace are mentioned.

1. Genel Bilgiler (General Information)

1.1. Giriş (Introduction)

Havacılık ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanım oranları, hafifliği, dayanıklılığı gibi unsurlardan ötürü giderek artmaktadır. Özellikle artan boyutlar, uçuş süreleri ve ekonomik olmaları açısından hava aracının mümkün olan en hafif şekilde yapılması hedeflenmektedir.

Bahsi geçen kompozit malzemeler, kullanıldığı alana göre belirli avantajlar sağlayabilen yüksek verimli ürünlerdir. Bu bağlamda yeni nesil hava araçlarının üretiminde kompozit malzeme kullanımı, kritik bir öneme sahiptir.

Uçak parçalarında kompozit malzeme kullanımının daha çok yaygın hale gelebilmesi için bu malzemelerin güvenilirliğinin artırılması gerekmektedir. Uçaklarda kullanılan kompozit malzemelerinin büyük yapısal hasara yol açabilecek kritik malzeme çatlaklarına ve hasarlarına karşı sürekli muayene edilmesi ve bakım onarım süreçlerini geçmesi gerekmektedir.

Havacılık sektöründe kompozit malzeme muayenesi çok kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden, günümüzde havacılık şirketleri kompozit malzemelerinin muayene yöntemlerini için yapmış olduğu maliyet, kompozit malzemeyi üretme ve serviste tutma maliyetinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır (Şahin,2006:30-150) (Kaya, 2016: 40).

Uçaklarda en sık karşılaşılan hasar türü darbeye bağlı ortaya çıkan hasarlardır. Kompozit yapıların, kalınlık doğrultusunda sahip oldukları düşük dayanımlarına bağlı olarak, darbe yüklemeleri sonrası mekanik mukavemetlerdeki önemli düşüş, gözle görülür hasar bölgelerinin oluşması ile sonuçlanır(Yılmaz, 2015: 81). Düşük hızlı darbe yüklemeleri; bitişik tabakalar arası ayrılma olan delaminasyon, matris çatlaması ve fiber kırılmalarına bağlı olarak kompozit yapılarının dayanımında ve yorulma ömürlerinde önemli derecede düşüşlere sebep olabilmektedir(Kaya, 2016: 40).

Havacılıkta kullanılan malzemelerde bulunan hasarların tespiti, hasarlı bölgelerin belirlenmesi ve hasarların sınıflandırılması için güvenilir ve uygun bir tahribatsız muayene yöntemi belirlemek son derece önem arz etmektedir. Uçaklarda kullanılan kompozit içerisinde oluşan çatlaklar planlanmış bakım onarım süreçlerinden önce büyük yapısal hasarlara yol açabilir. Bu durumu önlemek için uçak malzemelerinin iç yapılarını sürekli kontrol etmek çok önemlidir.

Bu çalışmada uçaklarda kullanılan kompozit malzemeler ve havacılıkta kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri hakkında bilgiler verilecektir.

2. Kompozit Malzemeler (Composite Materials)

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı (Composite Material Definition)

İki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle oluşan, homojen bir yapı olmamasına rağmen bileşenlerine göre yeni ve farklı özellik gösteren malzeme tipine kompozit malzeme denir(Şahin,2006:30-150). Örnek gösterim Şekil 1'de verilmiştir.

Tarihsel süreç içerisinde, kompozit malzemelerden daha binlerce yıl önce, evlerin yapımında saman takviyeli kerpiç bloklar şeklinde faydalanılmıştır. Günümüzde ise geleneksel malzemelerin yetersiz olduğu veya özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği durumlar için özel malzeme olarak faydalanılmaktadır.

2.2. Kompozit Malzeme Özellikleri (Composite Material Properties)

Kompozit malzemeler birçok açıdan, klasik malzemelere göre üstünlük göstermektedirler. Çok zor hizmet koşullarında klasik malzemenin yapamayacağı görevleri başarmaktadırlar. Kompozit malzemelerin en önemli üstünlükleri, ağırlıklarının çok azaltılabilmesine imkân tanınmasıdır (Şahin,2006:30-150). Bu nedenle havacılık sanayisinde kompozitler sıklıkla kullanılır. Örnek gösterim Şekil 2’de verilmiştir.

Kompozit yapı iç bileşenleri birbirlerine genelde kovalent bağla bağlı oldukları için çok yüksek dayanımlara erişebilmektedirler. Ağırlıktan kasıt, mukavemet/ağırlık oranıdır. Kompozit malzemelerde bu oran klasik malzemelere oranla çok yüksektir. İç yapının bu özelliklerinden dolayı kompozit malzeme yüksek mukavemet, yüksek elastisite modüllerine, iyi derecede yorulma ve sürünme özelliklerine vb. yapısal özelliklere sahiptirler(Kaya, 2016: 40).

Kompozit malzemelerin çeşitli malzemeler ile yoğunluk (kg/m^3), elastikiyet modülü (GPa) ve çekme mukavemeti (MPa) özellikleri Şekil 3,4 ve 5’de verilmiştir.

2.2.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları (Advantages and Disadvantages of Composite Materials)

Aşağıda havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin olumlu ve olumsuz özellikleri sıralanmıştır(Şahin,2006:30-150)

Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Yüksek mukavemet
- Yüksek aşınma direnci ve rijitlik
- Hacmine oranla hafif olması
- Yüksek yorulma ve çekme dayanımı
- Korozyon direnci yüksek
- Daha az bağlantı elemanı gerektirmesi
- Düşük ısı ve ses geçirgenliği

Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

- Ham maddesinin pahalı olması
- Karbon-metal temasında galvanik korozyon oluşumu
- Test yöntemlerinin pahalı olması
- Katlar arasındaki gazların malzeme ömrünü düşürmesi
- Delaminasyon (bitişik tabakalar arası ayrılma)
- Karmaşık üretim

2.3. Bağlayıcılar ve Güçlendiriciler (Binders and Reinforcements)

Kompozit malzemenin yapısını güçlendirici malzeme (takviye edici) ile bağlayıcı (matris) malzeme oluşturur. Burada bağlayıcı malzemenin görevi, güçlendirici malzemelerin birbiri ile yapıştırılmasına yardımcı olmasının yanında malzemeye binecek yüklerin eşit dağılmasını sağlamaktır. Ayrıca bağlayıcı malzemeyi dış etkenlerden koruma, malzemede çatlak oluşumuna karşı mukavemet gösterme ve malzemeyi sıcaklığa karşı koruma gibi görevleri de mevcuttur. Bağlayıcı ve Güçlendirici Örnekleri Tablo 1’de verilmiştir.

Kompozit malzemeleri oluşturmada en çok kullanılan bağlayıcı, polimerlerdir. Polimer matrisler, termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılır: Termosetler sıvı hâlde olup ısıyla ya da kimyevi madde ile katı hâlde getirilerek bağlayıcı özelliği kullanılır. Termoplastikler ise katı hâlde olup ısı ile eritildikten sonra uygulanır ve termoplastiklerin soğutulularak tekrar katı hâlde geçmesi sağlanır(Şahin,2006:30-150). Örnek termoset bağlayıcı, epoksi reçine ve epoksi sertleştirici gösterimi Şekil 6’da verilmiştir.

2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Classification of Composite Materials)

Kompozitler genellikle kullanılan matris malzemelere göre sınıflandırılırlar. Bunlar, metal matrisli kompozit (MMC), seramik matrisli kompozit (CMC), polimer matrisli kompozitlerdir (PMC). Alternatif olarak kompozit malzemeler kullanılan takviye elemana göre de sınıflandırılırlar. Bunlar, partikül takviyeli, yapısal (tabakalı, sandviç), karma kompozitler ve fiber takviyeli (sürekli, süreksiz, hizalı, rastgele) kompozit malzemelerdir(Kaya, 2016: 40). Örnek kompozit malzemelerin sınıflandırılması gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.

2.4.1. Elyafli Kompozitler (Fibre Composites)

Bu kompozit türü, elyafların matris yapıyla birleşmesiyle oluşmuştur. Elyafların dizilim şekline göre mukavemet seviyesi değişir. Sürekli fiberler tek yönlü (UD) ya da dokuma kumaş şeklinde yapılırlar. Tek yönlü dizilimde malzemeyi oluşturan fiberler birbirini kesmeyecek şekilde tek yönde dizilirler, dokuma kumaşa ise birbirini doksan derece kesecek şekilde dizilirler. Dokuma kumaşlar düz örgüler, ikili örgüler ve beş koşumlu saten örgüler olarak yapılabilirler. Örnek gösterim Şekil 8’de gösterilmiştir (Çobanoğlu, 2017: 197).

Sektörde en çok tercih edilen kompozit türüdür. Bazı elyafli kompozitler, cam elyafı (fiberglas), karbon elyafı (karbon fiber), aramid elyaf (kevlar) ve bor elyafıdır.

a) Cam Elyafı (Fiberglass)

Uçak tasarımında ilk kez kullanılan kompozit türüdür. Ayrıca imalatı en kolay, en ucuz ve en çok kullanılan kompozittir. Özgül dayanımı yüksek ve kullanım alanı geniştir. Dezavantajı nemden etkilenmesidir. En çok kullanılan cam elyaf türleri: E-glass, S-glass, Quartz ve C-glass’tır. C-glass, uçak tasarımında kullanılmaz. Örnek cam elyafı gösterimi Şekil 9’da gösterilmiştir. E-glass türü elyaf, özellikle yüksek elektrik iletkenliği istenilen alanlarda kullanılır. Diğer cam elyaflarına göre en ucuzudur. Elyafta sıcaklık arttıkça mukavemette azalma olur. S-glass türü elyaf, diğer cam elyaflarına oranla yüksek mukavemet özelliği ile öne çıkar. Yüksek sıcaklıklarda E-glass’a nazaran kendini muhafaza edebilme kabiliyeti çok daha iyidir. Özellikle uzay sanayisi için üretilen hibrit kompozitlerde birçok üstün özelliği ile tercih edilme sebebidir. Quartz türü elyaf malzeme, ısı direnci ve düşük elektrik iletkenliği özellikleri ile anten ve radar yapımında kullanılır.

b) Karbon Elyafı (Carbon Fiber)

Karbon elyafı; yüksek mukavemet ve tokluk, hafiflik, düşük sürtünme ve termal genleşme katsayısı, korozyon direnci, çekme dayanımı gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Bütün avantajları göz önünde

bulundurulduğunda karbon fiber; uçak, uydu, roket, yarış arabası üretiminde kullanılır. Karbon fiberin dezavantajı ise karbon yapısından dolayı kırılğan ve diğer elyaflara nazaran pahalı olmasıdır. Örnek karbon elyafı Şekil 10'da gösterilmiştir. Karbon elyaf malzemenin havacılık sektöründe kullanım yerleri aşağıda sıralanmıştır.

- Askeri uçak yapılarında
- İniş takım kapaklarında
- Hız frenlerinde
- Kumanda yüzeylerinde
- Radar konisinde
- Tüm kuyruk grubunda
- Motor kaplamalarında
- Kaplama plakalarında
- Motor tutucularında

c) Aramid Elyaf (Kevlar)

Cam elyafli kompozitlere göre %35 daha hafiftir. Kevlar elyafın darbe mukavemeti yüksek, basma mukavemeti düşüktür. Kevlar elyafının en önemli özelliği ise yüksek seviyede darbe, aşınma, yorulma ve kimyasal dayanımının olmasıdır. Bu elyaf, aynı ağırlıktaki çelik malzemeden beş kat daha dayanıklıdır. Aramid elyafı; kurşungeçirmez yelek, kask, miğfer, tank ve uçak kanat yapısı gibi sağlamlık istenen parçalarda kullanılır. Bunlara motosiklet için koruyucu ekipmanlar örnek olarak gösterilebilir.

d) Bor Elyaf

Üretilmesi en zor ve en pahalı elyaf malzeme türüdür. Karbon elyafına yakın çekme dayanımına sahip olmasına rağmen basma dayanımında, karbon elyafından üstündür. Yorulmaya ve darbeye karşı dayanıklıdır. Kullanım alanlarına havacılık ve uzay sanayi örnek gösterilebilir.

2.4.2. Parçacıklı Kompozitler (Particulate Composites)

Takviye edici, güçlendirici malzemenin partiküller hâlinde bağlayıcı (matris) malzemeyle birleştirilmesiyle oluşur. Bu tip kompozitte üretim aşaması önem arz etmektedir. Partiküllerin üretim aşamasında büyüklüğü, eşit boyda olması, homojen olarak dağılması mukavemetini etkilemektedir. En çok tercih edilen tipi, metal güçlendirici partiküller ile plastik bağlayıcı malzemeden oluşan kompozit türüdür. Burada metallerin elektrik ve ısı iletiminden faydalanılır. Seramik bağlayıcı ve metal matris karışımında sıcaklık dayanımı ve sertliği yüksek olur. Bunların kullanım alanına örnek olarak uçak metal parçaları, nükleer reaktörler gösterilebilir(Şahin,2006:30-150).

2.4.3. Tabakalı Kompozitler (Layered Composites)

1. Elyaf malzemelerin üst üste matris malzeme ile bağlanmasıyla oluşur. En eski ve en çok kullanılan kompozit türüdür. Özellikle her bir elyaf malzemenin dizilim yönlerine dikkat edilerek farklı dizilim şekliyle üst üste konulmasıyla yüksek mukavemet değerlerine ulaşılır. Tabakalı kompozit yapılar neme ve ısıya karşı da oldukça dayanıklıdır. Kompozitin hafifliğiyle beraber diğer özellikleri düşünüldüğünde tabakalı kompozitin uçak sanayisi için çok kullanışlı bir kompozit türü olduğu söylenebilir. Uçak gövde kaplaması, kanat ve kuyruk yapısı uçakta kullanım alanlarına örnek verilebilir(Taşkıran, 2010: 19-80).

Tabakalı kompozit yapının bir başka üretim şekli sandviç panellerdir. Sandviç panel, bal peteği (honey comb) malzemesinin alt ve üst katlarına levhaların uygun bir matrisle bağlanmasıyla oluşturulur. Buradaki levhalar istenilen göreve göre elyaf kompozit ya da alüminyum olabilir. Örnek sandviç panel

ve bal peteği yapı gösterimi Şekil 11 ve 12’de gösterilmiştir. En yaygın kullanılan hexagonalcore, flexcore, overexpanded core bal peteği tipleri gösterimi Şekil 13’de gösterilmektedir.

2.4.4. Karma Kompozitler (Hybrid Composites)

Farklı özellikteki takviye edici malzemelerin çeşitli matris kombinasyonlarıyla birleştirilmesine karma kompozit denir. Özellikle yine havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan bir kompozit türüdür. Bir kompozitten yüksek tokluk ve basma kuvveti isteniliyorsa hem de kompozitin düşük maliyetle üretilmesi amaçlanıyorsa yüksek tokluk ve düşük maliyetli kevlar elyafı ile yüksek basma kuvvetine sahip grafit ile birleştirilir(Şahin,2006:30-150).

3. Havacılıkta Hasar Tespiti ve Muayene Yöntemleri(Aviation Damage Detection and Inspection Methods)

3.1. Tahribatlı Muayene(Destructive Inspection)

Tahribatlı muayene yöntemi, malzemelerin kalıcı şekil değiştirmelerine karşı direncini ifade eder. Bu yöntemde çekme, basma, eğme, yorulma vb. muayenesi yapılacak malzemeleri plastik ve elastik deformasyon yükleri etkiler. Bu malzemeler tahribatlı muayene edildikten sonra tekrar kullanılamaz(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

3.2. Tahribatsız Muayene(Non-Destructive Testing)

Malzemenin özelliklerini bozmadan ve hasar vermeden tüm malzemenin veya parçalarının muayenesine imkân veren deneylere tahribatsız muayene yöntemleri [NDT (non-destructive testing)] denir. Tahribatsız muayene alanı, yapısal bileşenlerin ve sistemlerin işlevlerini güvenilir ve uygun maliyetli bir şekilde yerine getirmelerini sağlamada kritik bir rol oynayan çok geniş, disiplinler arası bir alandır. Söz konusu yöntemler genel itibari ile ürünleri tekrar kullanılabilir kılar(Onursal, 2010).

NDT teknisyenleri ve mühendisleri, uçakların kaza yapmasını, konstrüksiyonların yıkılmasını, yakıt tanklarının deforme olmasını, boru hatlarının hasara uğramasını engelleyecek hata tespitleri yapar. Bu uzmanlar gözle daha az görünür fakat çok ciddi rahatsız edici sonuçlar doğurabilecek kusurları tespit eder. Örnek tahribatsız muayene işlemi Şekil 14’de gösterilmiştir. NDT kontrolörleri bu kusurları tespit eden testleri tanımlar ve uygular. Bu testler, nesnenin veya malzemenin gelecekteki kullanımını etkilemeyecek bir şekilde gerçekleştirilir(Onursal, 2010). Başka bir deyişle NDT, parçaların ve malzemelerin zarar görmeden kontrol edilmesini ve ölçülmesini sağlayan tahribatsız muayene yöntemlerine denir. Bir ürünün son kullanımına müdahale etmeden incelemeye izin verdiği için NDT, kalite kontrol ve maliyet değişkenleri arasında dengeli bir yöntemdir. Tahribatsız muayene yöntemlerinin amaçları aynı olsa da NDT (Non-destructive testing), NDE (Non-destructive evaluation) ve NDI (Non-destructive inspection) gibi isimler almaktadır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

3.2.1. Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Avantajları(Advantages of Non-Destructive Testing Methods)

NDT’nin tahribatlı muayene yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar şunlardır:

- Daha hızlı sonuç verir.
- Birçok alanda kullanıma uygundur.
- Mamullere üretim anında veya üretim sonrasında test imkânı sağlar.
- Parça tahrip edilmediği için ürün sarfiyatı yoktur.

- Taşınması mümkün olmayan parçaların muayeneleri yerinde yapılabilir.
- Parçaların bir kısmı değil bütünü muayene edilebilir.
- Daha güvenilir kontrol sonuçları ve bulgular elde edilir.
- Kalite kontrol denetimi sağlar

3.2.2. Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Uygulandığı Alanlar(Areas where non-destructive testing methods are applied)

Tahribatsız muayene yöntemlerinin nüfuziyet ve algılayıcı eleman olmak üzere iki bileşeni bulunur. Nüfuziyet, test edilecek parçaya giriciliği ve malzeme içerisindeki hatayı tespit edebilme kabiliyetidir. Algılayıcı ise nüfuz edici elemanın tespit ettiği bilgileri işleyerek bizlere sunan bileşendir. Parça üzerinde tespit edilen tüm hatalara ise süreksizlik denir. Süreksizlik, parçada ciddi hasarlara sebep olabilir. Parçalardaki süreksizlik tiplerine göre uygulanacak muayene yöntemi seçilir(Onursal, 2010). Örnek cüruf kalıntısı ve çatlak süreksizliği gösterimleri Şekil 15 ve 16'da gösterilmiştir. Malzemelerde bulunan süreksizlikler üç ana başlıkta incelenir:

- 1) İmalat süreksizlikleri: Çöküntü (pipe), ayrışma (segregation), çekme boşluğu (shrinkage cavity), gaz boşlukları (blow holes), gözenekler (porosity) vb.
- 2) İşleme ve kaynak süreksizlikleri: Cüruf kalıntıları (slag inclusions), çatlak (crack), patlama (bursts), burkulma (twist), pullanma (flakes), tabakalaşma (lamination) vb.
- 3) Servis süreksizlikleri: Yorulma çatlağı (fatigue crack), korozyon (corrosion), gerilim korozyon çatlağı (stress corrosion crack), oyuk (gouge), kırışma (crease) vb. Örnek korozyon gösterimi Şekil 17'de gösterilmiştir

3.3. Havacılıkta Hasar Kontrol Yöntemleri(Damage Control Methods in Aviation)

Havacılıkta kullanılan parçaların hasar kontrolü, basitten karmaşığa hiyerarşik bir sistemde ilerlemektedir. Bunlar basitten karmaşığa doğru: Gözle kontrol, tap test ve sıvı penetrant, girdap akımları, ultrasonik muayene gibi tahribatsız muayene yöntemleri olarak sıralanabilir.

3.3.1. Görsel ve Optik Kontrol(Visual and Optical Control)

Görsel ve optik kontrol, diğer tahribatsız muayenelerden önce uygulanır. Görsel inceleme, kusurları bulmak için kontrolörün izlenimlerini içerir. Kontrolör, parçayı daha yakından incelemek için boroskop, teleskopik ayna, büyüteç, fener ve kumpas gibi özel araçlar kullanabilir. Bu yöntemle malzeme yüzeyindeki çatlak, çizik, gözenek vb. hatalar tespit edilebilir. Örnek boroskop, teleskopik ayna ve fener gösterimleri Şekil 18,19 ve 20'de gösterilmiştir

3.3.1.1. Görsel ve Optik Kontrol Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Visual and Optical Control Method)

Yöntemin avantajları:

- Test ve ekipman maliyet ucuzdur.
- Uygulaması kolaydır.
- Minimum eğitim gerektirir.
- Minimum ekipman gerektirir.

- Hızlı sonuç verir.

Yöntemin dezavantajları:

- Yalnızca yüzeydeki hassas olmayan hatalar tespit edilebilir.
- Parça içi süreksizlikler tespit edilemez.
- Test sonucu yoruma açıktır

3.3.2. Tap Test Yöntemi(Tap Test Method)

Tap test yönteminin temel amacı kompozit parçanın farklı bölgelerine eşit kuvvetle uygulanacak darbeler sayesinde parçadan gelecek sesin tokluğuna göre hasar tespiti yapmaktır. Yapıştırma hatası veya ayrışma olan bölgelerde sönük bir ses çıkmaktadır. Bu test 3 farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; bozuk para ile tap test (coin tap test), tap test ölçü aleti ile (instrumented tap test) ve tap test çekici ile (tap test with tap hammer) yapılan testlerdir. Örnek tap test yöntemleri Şekil 21’de gösterilmiştir. Bu metot, hatalı bölgenin genel olarak işaretlenmesi için iyi bir yöntemdir. Bu usul kalın tabakalı yapılarda iyi sonuç vermez. 4 kattan fazla olan tabakalarda tap testi yapılması tavsiye edilmez. Ayrıca uygulayıcının duyma kapasitesi, tecrübesi, bölgenin sessizliği testin hassas olmasına etki eden unsurlardır.

3.3.3. Penetrant Muayene Yöntemi(Penetrant Inspection Method)

Penetrant test, yüzeylerde oluşan hataların penetrant sıvısının uygulanması ile tespit edildiği yöntemdir. Bu yöntem, insan gözü ile doğrudan görülemeyen küçük çatlakların tespit için kullanılır. Penetrant testindeki her bir adım kapiler hareket prensibine dayanır. Örnek çeşitli çaplarda kapiler hareket gösterimi Şekil 22’de gösterilmiştir.

3.3.3.1. Penetrant Tipleri ve Uygulanabileceği Malzemeler(Penetrant Types and Applicable Materials)

Testler, görülebilir penetrant veya floresan penetrant malzemeleri kullanılarak iki türlü yapılabilir. Görülebilir penetrant, beyaz ışık altında görülebilir. Daha yüksek hassasiyete sahip olan Floresan penetrant ise karanlık ortamda ultraviyole ışık altında görülebilir. Tüm malzeme türlerindeki yüzey süreksizliklerinin tespitinde penetrant yöntemi kullanılabilir. Uçak parçalarındaki süreksizliklerinin tespit edilmesinde görülebilir penetrant kullanılmaz.

Testlerde kullanılan diğer elemanlar da temizleyici (cleaner) ve geliştiricidir (developer). Temizleyicinin görevi, yüzeyi temizleyerek teste hazır hâle getirmektir. Developerin görevi ise süreksizliğin içinde kalan penetrant sıvısının emilimini sağlamaktır. Bu şekilde hata görünür hâle gelmektedir. Örnek penetrant sıvısı, geliştirici ve temizleyici gösterimleri Şekil 23 ve 24’de gösterilmiştir

3.3.3.2. Penetrant Muayene Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Penetrant Inspection Method)

Avantajları:

- Ucuzdur.
- Elektrik vb. enerjilere ihtiyacı yoktur.
- Bütün malzeme çeşitlerine uygulanabilir.
- Uygulanması basittir.

-
- Karmaşık yapılı malzemelerin testine uygundur.
 - Portatiftir.

Dezavantajları:

- Malzeme içi süreksizler test edilemez.
- Pürüzlü ve gözenekli yüzeyler test edilemez.
- Yüzeydeki boya, kir, toz çok iyi temizlenmelidir.
- Temizliğin iyi yapılmaması süreksizlik olarak görülebilir.

3.3.4. Penetrant Muayene Yöntemi(Penetrant Inspection Method)

Eddy akımları, Faraday'ın endüksiyon kanununa dayanır. Bir bobin içerisinden değişken elektrik akımları geçirilerek manyetik alan oluşturulur. Burada oluşan manyetik alan, iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında, malzeme üzerinde endüksiyon akımları oluşturacaktır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60). Oluşan endüksiyon akımlarına girdap akımları denir. Örnek Eddy akımlarının oluşumu Şekil 25'de gösterilmiştir. Malzeme üzerinde oluşan girdap akımları manyetik alan meydana getirir ve bu manyetik alanın ölçümleri yapılarak süreksizlikler tespit edilir.

3.3.4.1. Eddy Current Kontrolünün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Eddy Current Control can be Applied)

Eddy Current test, temel olarak iletken malzemelerdeki süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Dairesel malzemelerin testinde kullanımı yaygındır. Bunların yanında malzemelerin iletkenlik ölçümlerinde, iletken olmayan boya kalınlıklarının ölçümünde veya malzemelerin kalınlık ölçümünde kullanılmaktadır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

3.3.4.2. Eddy Current Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Eddy Current Method)

Avantajları:

- Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler tespit edilir.
- Çok küçük süreksizlikler tespit edilebilir.
- Malzeme kalınlıkları ve iletkenliklerinin ölçümünde de kullanılır.
- Karmaşık şekilli parçalar test edilebilir.
- Hızlı sonuç verir.
- Uygulaması basittir.

Dezavantajları:

- Yalnızca iletken malzemelerde süreksizliklerin tespit yapılabilir.
- Referans standartlara ihtiyaç vardır.
- Çok derinlerde oluşmuş süreksizlikleri tespit edemez.
- Tabakalaşma gibi sargı yönüne paralel süreksizlikleri tespit edemez.
- Malzeme kenarları ve köşelerinde doğru ölçümler vermez.

3.3.5. Ultrasonik (Ses Dalgalarıyla) Kontrol(Ultrasonic (Sound Waves) Control)

Ultrasonik ses, frekans değeri 20.000 Hz/s üzerindeki titreşimleri ifade eder. Malzeme üzerine ultrasonik seviyede ses dalgaları gönderilerek içerisindeki süreksizlikleri tespit etme yöntemine ultrasonik muayene yöntemi denir(Arı, 2023: 3). Örnek Ultrasonik test cihazı ile kontrolü Şekil 26'de gösterilmiştir. Malzemelerin titreşimi ile ses, dalgalar hâlinde yayılır. Malzeme üzerine gönderilen bu ses dalgaları kırılma ve yansıyan yapıdadır. Malzeme içerisindeki süreksizlere çarpmalarıyla ses dalgalarında bozulmalar oluşur. Bozulmanın değeri, süreksizliğin büyüklüğünü ve konumunu belirlememizi sağlar(Onursal, 2010) (Arı, 2023: 3).

3.3.5.1. Ultrasonik Kontrolün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Ultrasonic Control can be Applied)

- Metal veya metal olmayan malzemelerdeki çatlak, gözenek gibi süreksizliklerin tespitinde,
- Malzeme içerisinde veya yüzeyde bulunan süreksizliklerin tespitinde,
- Malzeme kalınlıklarının ölçülmesinde,
- Korozyon tespitinde,
- Kompozit malzemelerde görülen tabakalaşma süreksizliklerinde,
- Metallerin sertleşen bölgelerinin tespitinde kullanılır.

3.3.5.2. Ultrasonik Muayene Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Ultrasonic Examination Method)

Avantajları:

- Metal ve metal olmayan malzemelerin süreksizliklerini tespit eder.
- Malzeme yüzeyi ve malzeme içindeki süreksizlikleri tespit eder.
- Süreksizlik tespit, konumu, büyüklüğü konularında hassasiyet yüksektir.
- Kalınlık ölçümlerinde kullanılır.
- Hızlı sonuç verir.

Dezavantajları:

- Ekipmanların kullanımı diğer yöntemlere göre daha ciddi uzmanlık gerektirir.
- Muayene jeli veya sıvılarına ihtiyaç vardır.
- Muayene edilecek parçanın formu düzgün değilse testin hata payı yüksek olur.
- Ses iletimi düşük olan malzemelerin test zordur.
- Probdan gönderilen ses dalgaları, süreksizlik yönü ile paralel doğrultudaysa süreksizlik tespit edilemeyebilir.

3.3.6. Radyografik Kontrol(Radiographic Control)

Yüksek enerjili elektromekanik dalgalara veya ışın foton demetlerine radyoaktif ışınlar denir. Radyografik muayene yönteminde en çok X- veya gama ışınları kullanılmaktadır. Bunun haricinde Alfa, Beta, Y-Ray ve özel tekniklerde (Nötron) kullanılmaktadır. Muayenede kullanılan yüksek enerjili ışınlar, test malzemesinin içerisinden geçer ve geçerken de bir miktar kayba uğrar. Malzeme içerisindeki

süreksizliklerin içinden geçen ışın demet farklı oranlarda kayıplara neden olacaktır. Bu enerji kaybındaki farklılıklar, test parçasının diğer tarafına konulan ışınına duyarlı filmleri veya elektronik film görüntüleyicilerini etkileyerek malzeme içerisindeki süreksizlikleri tespit eder(Onursal, 2010). Örnek radyasyon türleri ve nüfuziyet kabiliyetleri Şekil 27’de gösterilmiştir.

3.3.6.1. Radyografik Kontrolün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Radiographic Control can be Applied)

Radyografik kontrol, metal veya metal olmayan her türlü malzemenin muayenesinde kullanılabilen bir yöntemdir. Günlük hayata hastanelerde kullanılan röntgen filmleri bu prensibe göre çalışır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60). Radyografide kullanılan X- ve gama ışınları malzemelere zarar vermez ancak insan sağlığına son derece zararlıdır.

3.3.6.2. Radyografik Kontrolün Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Radiographic Control)

Avantajları:

- Metal ve metal olmayan tüm malzemeler için kullanılabilir.
- Malzeme yüzeyi ve yüzey içerisindeki süreksizlikleri tespit edebilir.
- Her türlü süreksizlik tipini tespit edebilir.
- Çeşitli geometrilerdeki test parçasını muayene edebilir.
- Hassas bir test malzemesi temizliği gerektirmez.
- Malzeme hareket hâlindeyken dahi test edilebilir.

Dezavantajları:

- İnsan sağlığı açısından oldukça tehlikeli olduğu için çok dikkatli kullanım gerektirir.
- Kontrolörün ciddi bir eğitim sürecinden geçmesi gerekir.
- Kullanılan ekipmanlar pahalıdır.
- Süreksizliğin derinlik mesafesi hesaplanamaz. (Hesaplanabilmesi için farklı açılardan test yapılmalıdır.)

3.3.7. Termografik Muayene(Thermographic Examination)

Termografik muayene metodu nispeten yeni bir tahribatsız muayene yöntemi olup, kızılötesi kamerayla yüzeyde gözlenen sıcaklık değişikliklerinin izlenmesi yoluyla, yüzey altı süreksizliklerin bulunmasını sağlar(Fidan, 2011). Termografi yöntemi ile parçanın hasarlı yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları yardımıyla çatlakların yeri tespit edilir. Isı parçaya uygulanır, sonra film veya enfraruj kamera kullanılarak sıcaklık farkları adım adım ölçülür. Termografi yönteminin uygulanabilmesi için, test numunesinin termik öz iletkenlik bilgilerinin bilinmesi gerekir. Örnek sivil havacılıkta termografi kullanımı Şekil 28’de gösterilmiştir. Termal kontrolün temel prensibi; test parçasından veya test parçasına doğru ısı akışı sağlandığında oluşan yüzey sıcaklığının haritasını veya ölçümünü içerir. Bir yüzeydeki ısı farklılıkları veya zamanla yüzey ısısındaki değişimler ısı akımının yönüyle ilişkilidir ve kusurların tespitinde veya test parçasının ısı karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır (Fidan, 2011).

3.3.7.1. Termografik Muayene Uygulanabileceği Malzemeler (Materials to which Thermographic Examination can be Applied)

Termografi yöntemi de sağladığı hızlı ve güvenilir sonuçlarıyla vazgeçilemez bir hasarsız kontrol yöntemidir. Havacılıkta kullanılan sandviç yapıları, bal peteği yapıları gibi kompozit malzemeler, metaller ve diğer termal özelliklerin değiştiği malzemeler üzerinde kullanılabilir (Fidan, 2011).

3.3.7.2. Termografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları (Advantages and Disadvantages of Thermography Method)

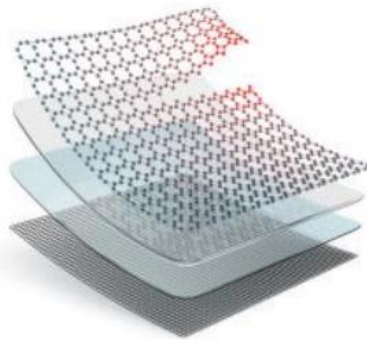
Avantajları:

- Hızlı gözlem (test) oranı.
- Temas olmaması.
- Güvenlik (yüksek güçle harici uyarıcılar kullanılmasına rağmen zararlı radyasyon içermez.).
- Sonuçlar kolayca yorumlanabilir.
- Geniş uygulama alanı.

Dezavantajları:

- Geniş bir yüzeye, kısa sürede, büyük miktardaki enerjiyi eşit olarak yayma zorluğu.
- Termal görüntünün bozulmasına termal kayıpların etkisi.
- Malzemelerin (ekipmanın) maliyeti.
- Sadece termal özelliklerin değiştiği parçaların incelenebilmesi.
- Yüzey altındaki sınırlı kalınlıkların incelenebilmesi.

4. Şekiller (Figures)



Şekil 1. Kompozit malzeme (Composite material)



Şekil 2. Bazı malzeme ve kompozitlerin yoğunluk (kg/m³) özellikleri (Density (kg/m³) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



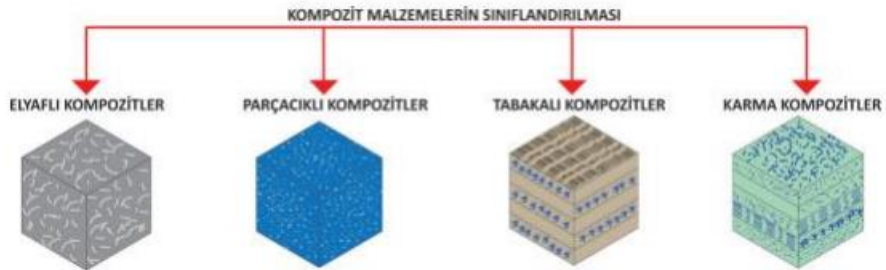
Şekil 3. Bazı malzeme ve kompozitlerin elastikiyet modülü (GPa) özellikleri (Modulus of elasticity (GPa) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



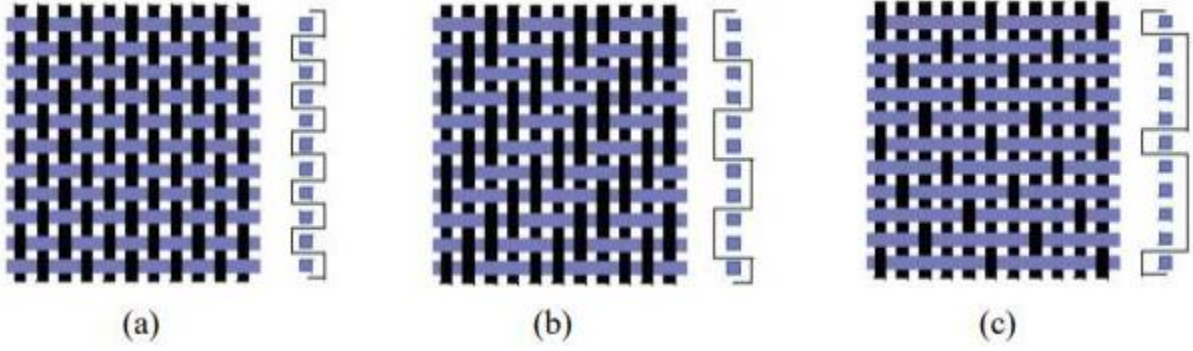
Şekil 4. Bazı malzeme ve kompozitlerin çekme mukavemeti (MPa) özellikleri (Tensile strength (MPa) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



Şekil 5. Termoset bağlayıcı, epoksi reçine ve epoksi sertleştirici (Thermosetting binder, epoxy resin and epoxy hardener)



Şekil 6. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Classification of composite materials)



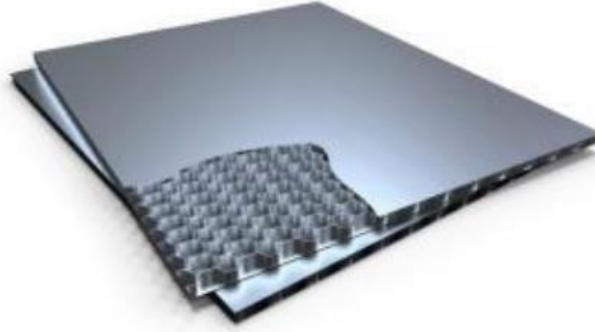
Şekil 7. En çok kullanılan örgü tipleri; (a) Düz örgü, (b) İkili örgü, (c) Beş koşumlu saten örgü(The most commonly used weave types are; (a) plain weave, (b) double weave, (c) satin weave with five harnesses)



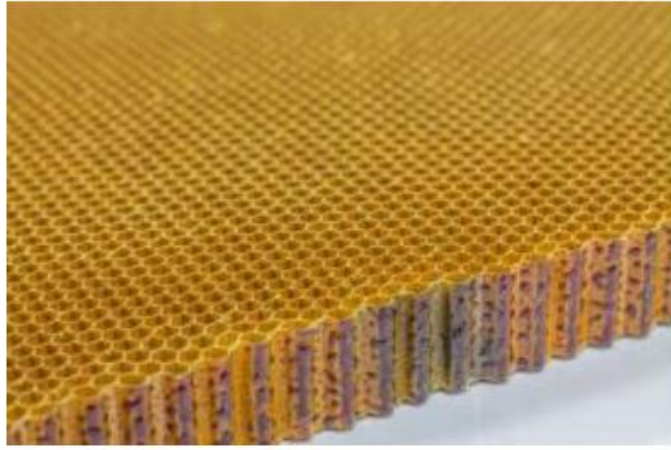
Şekil 9. Cam elyafı(Fibreglass)



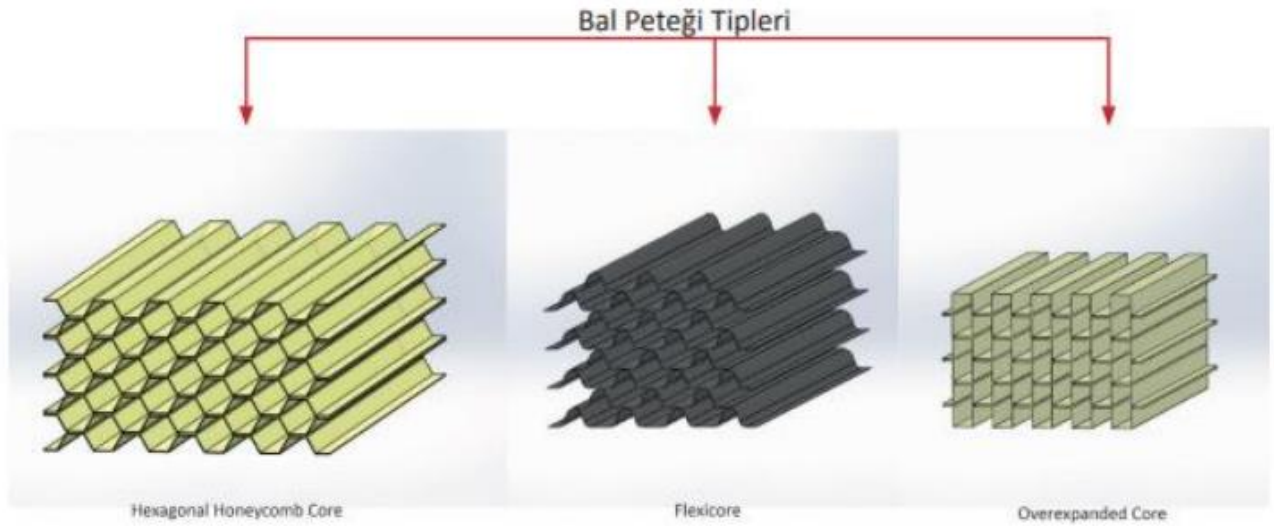
Şekil 10. Karbon elyafı(Carbon fibre)



Şekil 11. Sandviç panel örneği(Sandwich panel sample)



Şekil 12. Bal peteği yapı örneği(Honey comb structure example)



Şekil 13. Bal peteği yapısı çeşitleri(Types of honeycomb structure) (Taşkiran, 2010: 19-80)



Şekil 14. Tahribatsız muayene işlemi(Non-destructive testing)



Şekil 15. Cüruf kalıntısı(Slag residue)



Şekil 16. Çatlak süreksizliği(Crack discontinuity)



Şekil 17. Korozyon(Corrosion)



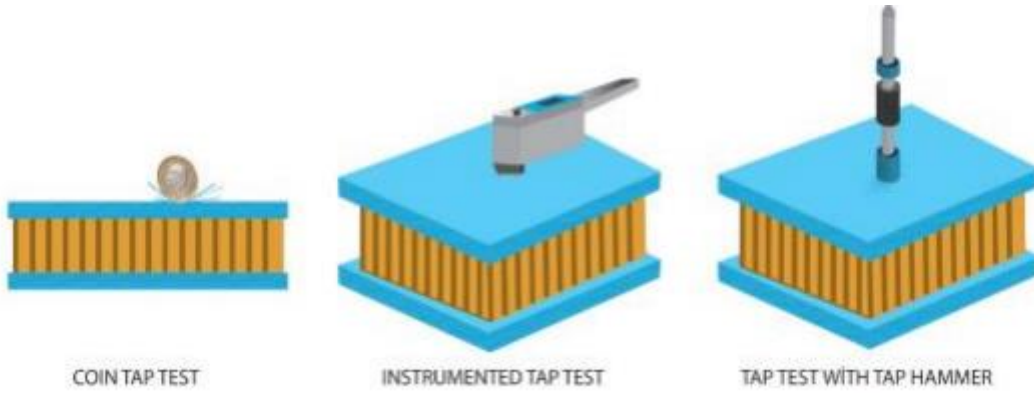
Şekil 18. Boroskop (Boroscope)



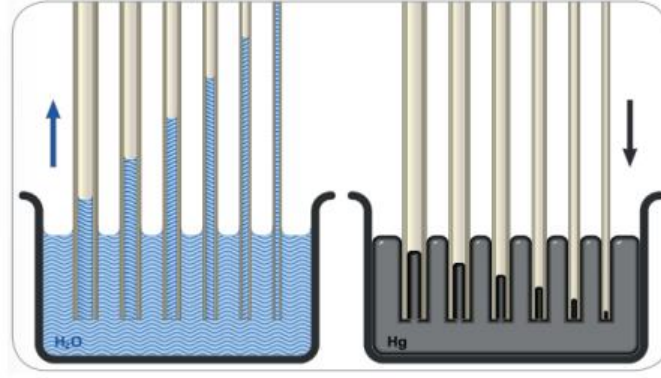
Şekil 19. Teleskopik ayna (Telescopic mirror)



Şekil 20. Fener (Flashlight)



Şekil 21. Tap test yöntemleri (Tap test methods)



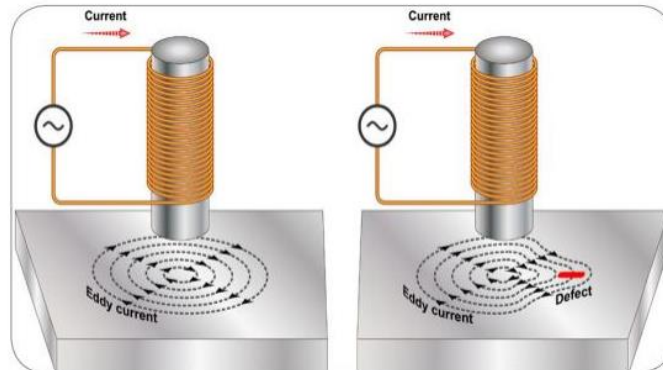
Şekil 22. Çeşitli çaplarda kapiler hareket(Capillary movement in various diameters)



Şekil 23. Penetrant sıvısı(Penetrant liquid)



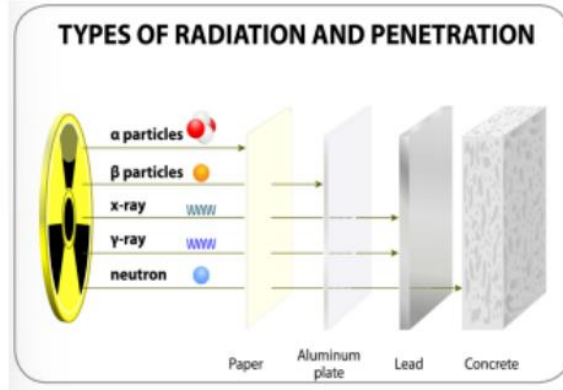
Şekil 24. Geliştirici ve temizleyici (Developer and cleaner)



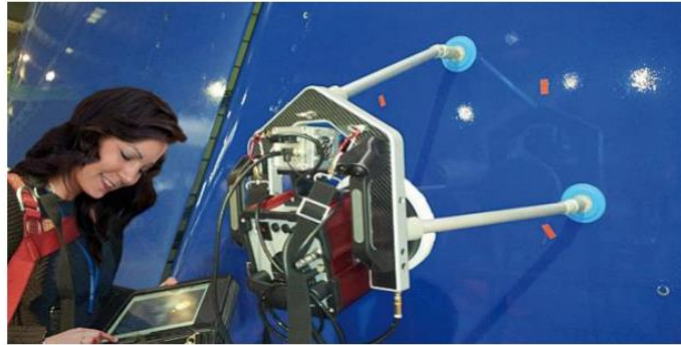
Şekil 25. Eddy akımlarının oluşumu(Eddy current formation)



Şekil 26. Ultrasonik test cihazı ile kontrolü(Control with ultrasonic tester)



Şekil 27. Radyasyon türleri ve nüfuziyet kabiliyetleri(Radiation types and penetration capabilities)



Şekil 28. Sivil havacılıkta termografi kullanımı(Use of thermography in civil aviation) (“Automation Technology GmbH”, 2023)

5. Tablolar (Tables)

Tablo 1. Bağlayıcı ve Güçlendirici Örnekleri(Connector and Reinforcer Examples)

Matris (Bağlayıcılar)	Güçlendiriciler
Polimerler	Elyafılar (Fiberler)
Seramikler	Partiküller
Metaller	Pullar (Whishers)

6. Sonuç (Conclusion)

Havacılık sektöründe ileri teknoloji ürünler olan çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Havacılık sektörünü gelişmesi bu sektörde kullanılan malzemelerin de gelişmesine bağlıdır. Kompozit malzemelerinin gelişmesi ile havacılıkta kullanılan kompozit malzemeler buna verilebilecek en güzel örnektir. Kompozit malzemeler günümüz yeni nesil uçaklarının %50'sini ve her geçen gün daha fazlasını oluşturmaktadır. Bu malzemelerin gelişmesi, güvenilirliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin azaltılması gerekmektedir.

Havacılıkta kullanılan en yaygın malzeme kompozitlerdir. Uçaklarda kullanılan bu kompozit yapıların yaşlarının ilerlemesi, bakım ve onarım maliyeti endişelerini de beraberinde getirmektedir. Bu yapılarda tekrarlı yüklerin ve korozyon atmosfer şartları gibi çeşitli sebeplerden aşınma, yırtılma ve değişik sıra dışı hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar sonucunda çok ciddi ve maddi kayıplar meydana gelmektedir. Bu yüzden malzeme hasara uğramadan muayene etmek son derece önemlidir. Büyük ve yüzeyde oluşan hasarları çıplak gözle görmek mümkündür. Fakat iç ve dış küçük hasarların tespiti için farklı muayene tekniklerine ihtiyaç vardır. Bu teknikler önceki bölümlerde açıklanmış olan Endüksiyon akım, penetrant sıvısı, ultrasonik, röntgen vb. gibi tekniklerdir. Bu muayene tekniklerini kullanmak son derece önem ve nitelikli personel gerektirir. Bu teknikler kullanarak arıza tespiti yapılabilir fakat belirli malzemelerde, yapılarda kullanılabilir ve bu teknikler ile hasarın miktarını belirlemek çok zordur. Bu eksiklikleri kapatmak amacıyla özellikle son yıllarda akıllı sistemlerin hasar tespit için geliştirilmeye başlanmıştır. Akıllı hasar tespit sistemleri ilerleyen yıllarda havacılık için çok daha elzem olacağı açıkça tespit edilmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Yağcı, T. , Çidem, A., & Durmuş, H. (2018). Geçmişten günümüze tahribatsız muayene yöntemleri. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi, 3(27), 49-61.
2. Kaya, A.İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi,29, 38-45. 24
3. Arı, A. C. (2023). Kompozit Malzemelerin Tahribatsız Muayene Yöntemlerinden Olan Ultrasonik Test ile Ölçülmesi Üzerine Yapılan Çalışmaların İncelenmesi. Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi, 4(1-2), 1-10.
4. Yılmaz, U., & Evci, C. (2015). Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği. Savunma Bilimleri Dergisi, 14(2), 77-109.
5. Şahin, Y. (2006). Kompozit malzemelere giriş. Seçkin Yayınevi, Ankara.
6. Onursal, M. (2010). Uçaklarda kullanılan metal malzemelere uygulanan tahribatsız muayeneler. (Yüksek lisans tezi).
7. Fidan, S. (2011). Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi.
8. Yenilmez, F. (2018). Metal ve polimer esaslı malzemelerin enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu. (Yüksek lisans tezi).
9. Taşkıran, C. (2010). Tabakalı kompozit levhaların sıcaklığa bağlı düşük enerjili darbe davranışlarının incelenmesi. (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
10. Çobanoğlu, T. (2021). Havacılık sektöründe kompozit metal malzeme kombinasyonlarında delik delme prosesinin iyileştirilmesi. (Doktora tezi). (Tez no: 91438).
11. Automation Technology GmbH. (2023, 12 26). Active Thermography for Nondestructive Composites Testing. Quality Magazine: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>



Journal of Aerospace Science and
Management

Vol: XXX, No: XXX, 2021 (xx-xx)

E-ISSN: 1234-1234

(Araştırma Makalesi / Derleme)



<https://jasam.erciyes.edu.tr/>

<https://havacilik.erciyes.edu.tr/>

Alınma
01 Ocak 2020
Düzeltilme
01 Şubat 2020
Kabul
01 Mart 2020

Ayhan AKBULUT
e-mail:
ayhanakbulut446@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

- Havacılık 1
- Kompozit Malzemeler 2
- Tahribatsız Muayene 3
- Hasar Tespit 4

Havacılıkta Kullanılan Kompozit Malzemeler ve Tahribatsız Muayene Sistemleri

Ayhan Akbulut

Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Geleneksel olarak kullanılan malzemeler bazı sınırlı veya bulunmayan özelliklerini geliştirmek amacıyla kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Kullanım amacına göre oluşturulan bu yeni malzeme birçok alanda kullanılmakta ve kullanımı hızla artmaktadır.

Havacılık sektörü için gerekli şartları ve özellikleri karşılayabilmek amacıyla kompozit malzemelerin havacılıkta kullanımı ve önemi her geçen gün artmaktadır. Kullanılan bu yüksek özellikli malzemeler istenen özellikleri karşılamanın yanı sıra servis ömrü boyunca üretim amacını barındıran özellikleri kaybolmamalıdır. Ancak, havacılık malzemeleri farklı yükler ve atmosferik şartlar gibi çeşitli nedenlerden dolayı hasara uğramakta ve özellikleri kaybolmaktadır. Havacılık sektöründe artan rekabet ile uçaklarda kullanılan malzemelerin güvenilirliği ve hava araçlarının bakım süreleri çok önemli hale gelmiştir. Bu malzemelerin güvenilirliğini artırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak amacıyla malzemelerin servis ömürleri boyunca tahribatsız olarak muayene edilmesi gerekmektedir.

Uçaklarda en yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdeki hasarın tespiti, hasar bölgesinin belirlenmesi ve hasarın karakterize edilmesi için güvenli bir tahribatsız muayene yöntemi bulmak çok önemlidir. Havacılıkta en sık kullanılan görsel inceleme yöntemleri, penetrant muayenesi, Eddy-current akımları ile inceleme, ultrasonik inceleme, radyografi ve termografi gibi test teknikleridir. Bu çalışmada ilk olarak havacılık sektöründe en çok kullanılan malzemeler olan kompozit malzemelere değinilmiştir. Daha sonra havacılıkta geleneksel olarak kullanılan tahribatsız muayene yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Composite Materials and Non-Destructive Testing Systems Used in Aviation

Ayhan Akbulut

Department of Aircraft Engineering, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Received
01 Ocak 2020
Revised
01 Şubat 2020
Accepted
01 Mart 2020

Ayhan Akbulut

e-mail:
ayhanakbulut446@gmail.com

Keywords:

- Aviation 1
- Composite Materials 2
- Nondestructive Inspection 3
- Damage Assessment 4

Composite materials have been developed to improve some limited or non-existent properties of traditionally used materials. This new material, which is created according to the intended use, is used in many areas and its use is increasing rapidly. The use and importance of composite materials in aviation is increasing day by day in order to meet the conditions and properties required for the aviation sector. In addition to meeting the desired properties, these high specification materials should not lose their properties that fulfil the purpose of production during the service life. However, aerospace materials are damaged and their properties are lost due to various reasons such as different loads and atmospheric conditions. With the increasing competition in the aviation industry, the reliability of the materials used in aircraft and the maintenance periods of aircraft have become very important. In order to increase the reliability of these materials and reduce maintenance costs, non-destructive testing of materials is required throughout their service life. It is very important to find a safe non-destructive testing method for detecting damage, identifying the damage site and characterising the damage in composite materials, which are most commonly used in aircraft. The most commonly used visual inspection methods in aviation are test techniques such as penetrant inspection, examination with Eddy-current currents, ultrasonic examination, radiography and thermography. In this research, firstly, composite materials, which are the most commonly used materials in the aviation industry, are mentioned. Then, non-destructive testing methods traditionally used in aerospace are mentioned.

1.Genel Bilgiler (General Information)

1.1. Giriş (Introduction)

Havacılık ve otomotiv endüstrileri başta olmak üzere birçok sektörde kompozit malzemelerin kullanım oranları, hafifliği, dayanıklılığı gibi unsurlardan ötürü giderek artmaktadır. Özellikle artan boyutlar, uçuş süreleri ve ekonomik olmaları açısından hava aracının mümkün olan en hafif şekilde yapılması hedeflenmektedir.

Bahsi geçen kompozit malzemeler, kullanıldığı alana göre belirli avantajlar sağlayabilen yüksek verimli ürünlerdir. Bu bağlamda yeni nesil hava araçlarının üretiminde kompozit malzeme kullanımı, kritik bir öneme sahiptir.

Uçak parçalarında kompozit malzeme kullanımının daha çok yaygın hale gelebilmesi için bu malzemelerin güvenilirliğinin artırılması gerekmektedir. Uçaklarda kullanılan kompozit malzemelerinin büyük yapısal hasara yol açabilecek kritik malzeme çatlaklarına ve hasarlarına karşı sürekli muayene edilmesi ve bakım onarım süreçlerini geçmesi gerekmektedir.

Havacılık sektöründe kompozit malzeme muayenesi çok kritik bir öneme sahiptir. Bu yüzden, günümüzde havacılık şirketleri kompozit malzemelerinin muayene yöntemlerini için yapmış olduğu maliyet, kompozit malzemeyi üretme ve serviste tutma maliyetinin yaklaşık üçte birini oluşturmaktadır (Şahin,2006:30-150) (Kaya, 2016: 40).

Uçaklarda en sık karşılaşılan hasar türü darbeye bağlı ortaya çıkan hasarlardır. Kompozit yapıların, kalınlık doğrultusunda sahip oldukları düşük dayanımlarına bağlı olarak, darbe yüklemeleri sonrası mekanik mukavemetlerdeki önemli düşüş, gözle görülür hasar bölgelerinin oluşması ile sonuçlanır(Yılmaz, 2015: 81). Düşük hızlı darbe yüklemeleri; bitişik tabakalar arası ayrılma olan delaminasyon, matris çatlaması ve fiber kırılmalarına bağlı olarak kompozit yapılarının dayanımında ve yorulma ömürlerinde önemli derecede düşüslere sebep olabilmektedir(Kaya, 2016: 40).

Havacılıkta kullanılan malzemelerde bulunan hasarların tespiti, hasarlı bölgelerin belirlenmesi ve hasarların sınıflandırılması için güvenilir ve uygun bir tahribatsız muayene yöntemi belirlemek son derece önem arz etmektedir. Uçaklarda kullanılan kompozit içerisinde oluşan çatlaklar planlanmış bakım onarım süreçlerinden önce büyük yapısal hasarlara yol açabilir. Bu durumu önlemek için uçak malzemelerinin iç yapılarını sürekli kontrol etmek çok önemlidir.

Bu çalışmada uçaklarda kullanılan kompozit malzemeler ve havacılıkta kullanılan tahribatsız muayene yöntemleri hakkında bilgiler verilecektir.

2. Kompozit Malzemeler (Composite Materials)

2.1. Kompozit Malzeme Tanımı (Composite Material Definition)

İki veya daha fazla malzemenin birleştirilmesiyle oluşan, homojen bir yapı olmamasına rağmen bileşenlerine göre yeni ve farklı özellik gösteren malzeme tipine kompozit malzeme denir(Şahin,2006:30-150). Örnek gösterim Şekil 1'de verilmiştir. Tarihsel süreç içerisinde, kompozit malzemelerden daha binlerce yıl önce, evlerin yapımında saman takviyeli kerpiç bloklar şeklinde faydalanılmıştır. Günümüzde ise geleneksel malzemelerin yetersiz olduğu veya özelliklerinin geliştirilmesi gerektiği durumlar için özel malzeme olarak faydalanılmaktadır.

2.2.1. Kompozit Malzeme Özellikleri (Composite Material Properties)

Kompozit malzemeler birçok açıdan, klasik malzemelere göre üstünlük göstermektedirler. Çok zor hizmet koşullarında klasik malzemenin yapamayacağı görevleri başarmaktadırlar. Kompozit malzemelerin en önemli üstünlükleri, ağırlıklarının çok azaltılabilesine imkân tanınmasıdır (Şahin,2006:30-150). Bu nedenle havacılık sanayisinde kompozitler sıklıkla kullanılır. Örnek gösterim Şekil 2'de verilmiştir. Kompozit yapı iç bileşenleri birbirlerine genelde kovalent bağla bağlı oldukları için çok yüksek dayanımlara erişebilmektedirler. Ağırlıktan kasıt, mukavemet/ağırlık oranıdır. Kompozit malzemelerde bu oran klasik malzemelere oranla çok yüksektir. İç yapının bu özelliklerinden dolayı kompozit malzeme yüksek mukavemet, yüksek elastisite modüllerine, iyi derecede yorulma ve sürünme özelliklerine vb. yapısal özelliklere sahiptirler(Kaya, 2016: 40). Kompozit malzemelerin çeşitli malzemeler ile yoğunluk (kg/m³), elastikiyet modülü (GPa) ve çekme mukavemeti (MPa) özellikleri Şekil 3,4 ve 5'de verilmiştir.

2.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları (Advantages and Disadvantages of Composite Materials)

Aşağıda havacılık sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin olumlu ve olumsuz özellikleri sıralanmıştır(Şahin,2006:30-150)

Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Yüksek mukavemet
- Yüksek aşınma direnci ve rijitlik
- Hacmine oranla hafif olması
- Yüksek yorulma ve çekme dayanımı
- Korozyon direnci yüksek
- Daha az bağlantı elemanı gerektirmesi
- Düşük ısı ve ses geçirgenliği

Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

- Ham maddesinin pahalı olması
- Karbon-metal temasında galvanik korozyon oluşumu
- Test yöntemlerinin pahalı olması
- Katlar arasındaki gazların malzeme ömrünü düşürmesi

- Delaminasyon (bitişik tabakalar arası ayrılma)
- Karmaşık üretim

2.4. Bağlayıcılar ve Güçlendiriciler (Binders and Reinforcements)

Kompozit malzemenin yapısını güçlendirici malzeme (takviye edici) ile bağlayıcı (matris) malzeme oluşturur. Burada bağlayıcı malzemenin görevi, güçlendirici malzemelerin birbiri ile yapıştırılmasına yardımcı olmasının yanında malzemeye binecek yüklerin eşit dağılmasını sağlamaktır. Ayrıca bağlayıcı malzemeyi dış etkenlerden koruma, malzemede çatlak oluşumuna karşı mukavemet gösterme ve malzemeyi sıcaklığa karşı koruma gibi görevleri de mevcuttur. Bağlayıcı ve Güçlendirici Örnekleri Tablo 1’de verilmiştir. Kompozit malzemeleri oluşturmada en çok kullanılan bağlayıcı, polimerlerdir. Polimer matrisler, termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılır: Termosetler sıvı hâlde olup ısıyla ya da kimyevi madde ile katı hâle getirilerek bağlayıcı özelliği kullanılır. Termoplastikler ise katı hâlde olup ısı ile eritildikten sonra uygulanır ve termoplastiklerin soğutulmasıyla tekrar katı hâle geçmesi sağlanır(Şahin,2006:30-150). Örnek termoset bağlayıcı, epoksi reçine ve epoksi sertleştirici gösterimi Şekil 6’da verilmiştir.

3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Classification of Composite Materials)

Kompozitler genellikle kullanılan matris malzemelere göre sınıflandırılırlar. Bunlar, metal matrisli kompozit (MMC), seramik matrisli kompozit (CMC), polimer matrisli kompozitlerdir (PMC). Alternatif olarak kompozit malzemeler kullanılan takviye elemana göre de sınıflandırılırlar. Bunlar, partikül takviyeli, yapısal (tabakalı, sandviç), karma kompozitler ve fiber takviyeli (sürekli, süreksiz, hizalı, rastgele) kompozit malzemelerdir(Kaya, 2016: 40). Örnek kompozit malzemelerin sınıflandırılması gösterimi Şekil 7’de verilmiştir.

3.1. Elyaflı Kompozitler (Fibre Composites)

Bu kompozit türü, elyafların matris yapıyla birleşmesiyle oluşmuştur. Elyafların dizilim şekline göre mukavemet seviyesi değişir. Sürekli fiberler tek yönlü (UD) ya da dokuma kumaş şeklinde yapılırlar. Tek yönlü dizilimde malzemeyi oluşturan fiberler birbirini kesmeyecek şekilde tek yönde dizilirler, dokuma kumaşta ise birbirini doksan derece kesecek şekilde dizilirler. Dokuma kumaşlar düz örgüler, ikili örgüler ve beş koşumlu saten örgüler olarak yapılabilirler. Örnek gösterim Şekil 8’de gösterilmiştir (Çobanoğlu, 2017: 197). Sektörde en çok tercih edilen kompozit türüdür. Bazı elyaflı kompozitler, cam elyafı (fiberglass), karbon elyafı (karbon fiber), aramid elyaf (kevlar) ve bor elyafıdır.

a. Cam Elyafı (Fiberglass)

Uçak tasarımında ilk kez kullanılan kompozit türüdür. Ayrıca imalatı en kolay, en ucuz ve en çok kullanılan kompozittir. Özgül dayanımı yüksek ve kullanım alanı geniştir. Dezavantajı nemden etkilenmesidir. En çok kullanılan cam elyaf türleri: E-glass, S-glass, Quartz ve C-glass’tır. C-glass, uçak tasarımında kullanılmaz. Örnek cam elyafı gösterimi Şekil 9’da gösterilmiştir.

E-glass türü elyaf, özellikle yüksek elektrik iletkenliği istenilen alanlarda kullanılır. Diğer cam elyaflarına göre en ucuzudur. Elyafta sıcaklık arttıkça mukavemette azalma olur.

S-glass türü elyaf, diğer cam elyaflarına oranla yüksek mukavemet özelliği ile öne çıkar. Yüksek sıcaklıklarda E-glass’a nazaran kendini muhafaza edebilme kabiliyeti çok daha iyidir. Özellikle uzay sanayisi için üretilen hibrit kompozitlerde birçok üstün özelliği ile tercih edilme sebebidir. Quartz türü elyaf malzeme, ısı direnci ve düşük elektrik iletkenliği özellikleri ile anten ve radar yapımında kullanılır.

b. Karbon Elyafı (Carbon Fiber)

Karbon elyafı; yüksek mukavemet ve tokluk, hafiflik, düşük sürtünme ve termal genleşme katsayısı, korozyon direnci, çekme dayanımı gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Bütün avantajları göz önünde bulundurulduğunda karbon fiber; uçak, uydu, roket, yarış arabası üretiminde kullanılır. Karbon fiberin

dezavantajı ise karbon yapısından dolayı kırılğan ve diğer elyafllara nazaran pahalı olmasındır. Örnek karbon elyafı Şekil 10'da gösterilmiştir.

Karbon elyaf malzemenin havacılık sektöründe kullanım yerleri aşağıda sıralanmıştır.

- Askeri uçak yapılarında
- İniş takım kapaklarında
- Hız frenlerinde
- Kumanda yüzeylerinde
- Radar konisinde
- Tüm kuyruk grubunda
- Motor kaplamalarında
- Kaplama plakalarında
- Motor tutucularında

c. Aramid Elyaf (Kevlar)

Cam elyafllı kompozitlere göre %35 daha hafiftir. Kevlar elyafın darbe mukavemeti yüksek, basma mukavemeti düşüktür. Kevlar elyafının en önemli özelliği ise yüksek seviyede darbe, aşınma, yorulma ve kimyasal dayanımının olmasıdır. Bu elyaf, aynı ağırlıktaki çelik malzemededen beş kat daha dayanıklıdır.

Aramid elyafı; kurşungeçirmez yelek, kask, miğfer, tank ve uçak kanat yapısı gibi sağlamlık istenen parçalarda kullanılır. Bunlara motosiklet için koruyucu ekipmanlar örnek olarak gösterilebilir.

d. Bor Elyaf

Üretilmesi en zor ve en pahalı elyaf malzeme türüdür. Karbon elyafına yakın çekme dayanımına sahip olmasına rağmen basma dayanımında, karbon elyafından üstündür. Yorulmaya ve darbeye karşı dayanıklıdır. Kullanım alanlarına havacılık ve uzay sanayi örnek gösterilebilir.

3.2. Parçacıklı Kompozitler (Particulate Composites)

Takviye edici, güçlendirici malzemenin partiküller hâlinde bağlayıcı (matris) malzemeyle birleştirilmesiyle oluşur. Bu tip kompozitte üretim aşaması önem arz etmektedir. Partiküllerin üretim aşamasında büyüklüğü, eşit boyda olması, homojen olarak dağılması mukavemetini etkilemektedir. En çok tercih edilen tipi, metal güçlendirici partiküller ile plastik bağlayıcı malzemededen oluşan kompozit türüdür. Burada metallerin elektrik ve ısı iletiminden faydalanılır. Seramik bağlayıcı ve metal matris karışımında sıcaklık dayanımı ve sertliği yüksek olur. Bunların kullanım alanına örnek olarak uçak metal parçaları, nükleer reaktörler gösterilebilir(Şahin,2006:30-150).

3.3. Tabakalı Kompozitler (Layered Composites)

Elyaf malzemelerin üst üste matris malzeme ile bağlanmasıyla oluşur. En eski ve en çok kullanılan kompozit türüdür. Özellikle her bir elyaf malzemenin dizilim yönlerine dikkat edilerek farklı dizilim şekliyle üst üste konulmasıyla yüksek mukavemet değerlerine ulaşılır. Tabakalı kompozit yapılar neme ve ısıya karşı da oldukça dayanıklıdır. Kompozitin hafifliğiyle beraber diğer özellikleri düşünülüğünde tabakalı kompozitin uçak sanayisi için çok kullanışlı bir kompozit türü olduğu söylenebilir. Uçak gövde kaplaması, kanat ve kuyruk yapısı uçakta kullanım alanlarına örnek verilebilir(Taşkıran, 2010: 19-80).

Tabakalı kompozit yapının bir başka üretim şekli sandviç panellerdir. Sandviç panel, bal peteği (honey comb) malzemesinin alt ve üst katlarına levhaların uygun bir matrisle bağlanmasıyla oluşturulur. Buradaki levhalar istenilen göreve göre elyaf kompozit ya da alüminyum olabilir. Örnek sandviç panel

ve bal peteği yapı gösterimi Şekil 11 ve 12’de gösterilmiştir. En yaygın kullanılan hexagonalcore, flexcore, overexpanded core bal peteği tipleri gösterimi Şekil 13’de gösterilmektedir.

3.4. Karma Kompozitler (Hybrid Composites)

Farklı özellikteki takviye edici malzemelerin çeşitli matris kombinasyonlarıyla birleştirilmesine karma kompozit denir. Özellikle yine havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan bir kompozit türüdür. Bir kompozitten yüksek tokluk ve basma kuvveti isteniliyorsa hem de kompozitin düşük maliyetle üretilmesi amaçlanıyorsa yüksek tokluk ve düşük maliyetli kevlar elyafı ile yüksek basma kuvvetine sahip grafit ile birleştirilir(Şahin,2006:30-150).

3.4.1. Havacılıkta Hasar Tespiti ve Muayene Yöntemleri(Aviation Damage Detection and Inspection Methods)

3.5. Tahribatlı Muayene(Destructive Inspection)

Tahribatlı muayene yöntemi, malzemelerin kalıcı şekil değiştirmelerine karşı direncini ifade eder. Bu yöntemde çekme, basma, eğme, yorulma vb. muayenesi yapılacak malzemeleri plastik ve elastik deformasyon yükleri etkiler. Bu malzemeler tahribatlı muayene edildikten sonra tekrar kullanılamaz(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

3.5.1. Tahribatsız Muayene(Non-Destructive Testing)

Malzemenin özelliklerini bozmadan ve hasar vermeden tüm malzemenin veya parçalarının muayenesine imkân veren deneylere **tahribatsız muayene yöntemleri** [NDT (non-destructive testing)] denir. Tahribatsız muayene alanı, yapısal bileşenlerin ve sistemlerin işlevlerini güvenilir ve uygun maliyetli bir şekilde yerine getirmelerini sağlamada kritik bir rol oynayan çok geniş, disiplinler arası bir alandır. Söz konusu yöntemler genel itibari ile ürünleri tekrar kullanılabilir kılar(Onursal, 2010).

NDT teknisyenleri ve mühendisleri, uçakların kaza yapmasını, konstrüksiyonların yıkılmasını, yakıt tanklarının deforme olmasını, boru hatlarının hasara uğramasını engelleyecek hata tespitleri yapar. Bu uzmanlar gözle daha az görünür fakat çok ciddi rahatsız edici sonuçlar doğurabilecek kusurları tespit eder. Örnek tahribatsız muayene işlemi Şekil 14’de gösterilmiştir. NDT kontrolörleri bu kusurları tespit eden testleri tanımlar ve uygular. Bu testler, nesnenin veya malzemenin gelecekteki kullanımını etkilemeyecek bir şekilde gerçekleştirilir(Onursal, 2010). Başka bir deyişle NDT, parçaların ve malzemelerin zarar görmeden kontrol edilmesini ve ölçülmesini sağlayan tahribatsız muayene yöntemlerine denir. Bir ürünün son kullanımına müdahale etmeden incelemeye izin verdiği için NDT, kalite kontrol ve maliyet değişkenleri arasında dengeli bir yöntemdir. Tahribatsız muayene yöntemlerinin amaçları aynı olsa da NDT (Non-destructive testing), NDE (Non-destructive evaluation) ve NDI (Non-destructive inspection) gibi isimler almaktadır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

3.5.2. Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Avantajları(Advantages of Non-Destructive Testing Methods)

NDT’nin tahribatlı muayene yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Bu avantajlar şunlardır:

- Daha hızlı sonuç verir.
- Birçok alanda kullanıma uygundur.
- Mamullere üretim anında veya üretim sonrasında test imkânı sağlar.
- Parça tahrip edilmediği için ürün sarfiyatı yoktur.
- Taşınması mümkün olmayan parçaların muayeneleri yerinde yapılabilir.
- Parçaların bir kısmı değil bütünü muayene edilebilir.
- Daha güvenilir kontrol sonuçları ve bulgular elde edilir.

- Kalite kontrol denetimi sağlar

3.5.3. Tahribatsız Muayene Yöntemlerinin Uygulandığı Alanlar (Areas where non-destructive testing methods are applied)

Tahribatsız muayene yöntemlerinin nüfuziyet ve algılayıcı eleman olmak üzere iki bileşeni bulunur. **Nüfuziyet**, test edilecek parçaya girciliği ve malzeme içerisindeki hatayı tespit edebilme kabiliyetidir. **Algılayıcı** ise nüfuz edici elemanın tespit ettiği bilgileri işleyerek bizlere sunan bileşendir. Parça üzerinde tespit edilen tüm hatalara ise **süreksizlik** denir. Süreksizlik, parçada ciddi hasarlara sebep olabilir. Parçalardaki süreksizlik tiplerine göre uygulanacak muayene yöntemi seçilir (Onursal, 2010). Örnek cüruf kalıntısı ve çatlak süreksizliği gösterimleri Şekil 15 ve 16'da gösterilmiştir.

Malzemelerde bulunan süreksizlikler üç ana başlıkta incelenir:

1. **İmalat süreksizlikleri:** Çöküntü (pipe), ayrışma (segregation), çekme boşluğu (shrinkage cavity), gaz boşlukları (blow holes), gözenekler (porosity) vb.
2. **İşleme ve kaynak süreksizlikleri:** Cüruf kalıntıları (slag inclusions), çatlak (crack), patlama (bursts), burkulma (twist), pullanma (flakes), tabakalaşma (lamination) vb.
3. **Servis süreksizlikleri:** Yorulma çatlağı (fatigue crack), korozyon (corrosion), gerilim korozyon çatlağı (stress corrosion crack), oyuk (gouge), kırışma (crease) vb. Örnek korozyon gösterimi Şekil 17'de gösterilmiştir

3.6. Havacılıkta Hasar Kontrol Yöntemleri (Damage Control Methods in Aviation)

Havacılıkta kullanılan parçaların hasar kontrolü, basitten karmaşığa hiyerarşik bir sistemde ilerlemektedir. Bunlar basitten karmaşığa doğru: Gözle kontrol, tap test ve sıvı penetrant, girdap akımları, ultrasonik muayene gibi tahribatsız muayene yöntemleri olarak sıralanabilir.

3.6.1. Görsel ve Optik Kontrol (Visual and Optical Control)

Görsel ve optik kontrol, diğer tahribatsız muayenelerden önce uygulanır. Görsel inceleme, kusurları bulmak için kontrolörün izlenimlerini içerir. Kontrolör, parçayı daha yakından incelemek için boroskop, teleskopik ayna, büyüteç, fener ve kumpas gibi özel araçlar kullanabilir. Bu yöntemle malzeme yüzeyindeki çatlak, çizik, gözenek vb. hatalar tespit edilebilir. Örnek boroskop, teleskopik ayna ve fener gösterimleri Şekil 18, 19 ve 20'de gösterilmiştir

3.6.2. Görsel ve Optik Kontrol Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları (Advantages and Disadvantages of Visual and Optical Control Method)

Yöntemin avantajları:

- Test ve ekipman maliyet ucuzdur.
- Uygulaması kolaydır.
- Minimum eğitim gerektirir.
- Minimum ekipman gerektirir.
- Hızlı sonuç verir.

Yöntemin dezavantajları:

- Yalnızca yüzeydeki hassas olmayan hatalar tespit edilebilir.
- Parça içi süreksizlikler tespit edilemez.

- Test sonucu yoruma açıktır

3.7. Tap Test Yöntemi(Tap Test Method)

Tap test yönteminin temel amacı kompozit parçanın farklı bölgelerine eşit kuvvetle uygulanacak darbeler sayesinde parçadan gelecek sesin tokluğuna göre hasar tespiti yapmaktır. Yapıştırma hatası veya ayrışma olan bölgelerde sönük bir ses çıkmaktadır. Bu test 3 farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlar; bozuk para ile tap test (coin tap test), tap test ölçü aleti ile (instrumented tap test) ve tap test çekici ile (tap test with tap hammer) yapılan testlerdir. Örnek tap test yöntemleri Şekil 21’de gösterilmiştir. Bu metot, hatalı bölgenin genel olarak işaretlenmesi için iyi bir yöntemdir. Bu usul kalın tabakalı yapılarda iyi sonuç vermez. 4 kattan fazla olan tabakalarda tap testi yapılması tavsiye edilmez. Ayrıca uygulayıcının duyma kapasitesi, tecrübesi, bölgenin sessizliği testin hassas olmasına etki eden unsurlardır.

3.8. Penetrant Muayene Yöntemi(Penetrant Inspection Method)

Penetrant test, yüzeylerde oluşan hataların penetrant sıvısının uygulanması ile tespit edildiği yöntemdir. Bu yöntem, insan gözü ile doğrudan görülemeyen küçük çatlakların tespit için kullanılır. Penetrant testindeki her bir adım kapiler hareket prensibine dayanır. Örnek çeşitli çaplarda kapiler hareket gösterimi Şekil 22’de gösterilmiştir.

1. Penetrant Tipleri ve Uygulanabileceği Malzemeler(Penetrant Types and Applicable Materials)

Testler, görülebilir penetrant veya floresan penetrant malzemeleri kullanılarak iki türlü yapılabilir. Görülebilir penetrant, beyaz ışık altında görülebilir. Daha yüksek hassasiyete sahip olan Floresan penetrant ise karanlık ortamda ultraviyole ışık altında görülebilir. Tüm malzeme türlerindeki yüzey süreksizliklerinin tespitinde penetrant yöntemi kullanılabilir. Uçak parçalarındaki süreksizliklerinin tespit edilmesinde görülebilir penetrant kullanılmaz.

Testlerde kullanılan diğer elemanlar da temizleyici (cleaner) ve geliştiricidir (developer). Temizleyicinin görevi, yüzeyi temizleyerek teste hazır hâle getirmektir. Developerin görevi ise süreksizliğin içinde kalan penetrant sıvısının emilimini sağlamaktır. Bu şekilde hata görünür hâle gelmektedir. Örnek penetrant sıvısı, geliştirici ve temizleyici gösterimleri Şekil 23 ve 24’de gösterilmiştir

2. Penetrant Muayene Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Penetrant Inspection Method)

Avantajları:

- Ucuzdur.
- Elektrik vb. enerjilere ihtiyacı yoktur.
- Bütün malzeme çeşitlerine uygulanabilir.
- Uygulanması basittir.
- Karmaşık yapı malzemelerin testine uygundur.
- Portatiftir.

Dezavantajları:

- Malzeme içi süreksizler test edilemez.
- Pürüzlü ve gözenekli yüzeyler test edilemez.

- Yüzeydeki boya, kir, toz çok iyi temizlenmelidir.
- Temizliğin iyi yapılmaması süreksizlik olarak görülebilir.

3.9. Penetrant Muayene Yöntemi(Penetrant Inspection Method)

Eddy akımları, Faraday'ın endüksiyon kanununa dayanır. Bir bobin içerisinde değişken elektrik akımları geçirilerek manyetik alan oluşturulur. Burada oluşan manyetik alan, iletken bir malzemeye yaklaştırıldığında, malzeme üzerinde endüksiyon akımları oluşturacaktır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60). Oluşan endüksiyon akımlarına girdap akımları denir. Örnek Eddy akımlarının oluşumu Şekil 25'de gösterilmiştir. Malzeme üzerinde oluşan girdap akımları manyetik alan meydana getirir ve bu manyetik alanın ölçümleri yapılarak süreksizlikler tespit edilir.

1. Eddy Current Kontrolünün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Eddy Current Control can be Applied)

Eddy Current test, temel olarak iletken malzemelerdeki süreksizliklerin tespitinde kullanılır. Dairesel malzemelerin testinde kullanımı yaygındır. Bunların yanında malzemelerin iletkenlik ölçümlerinde, iletken olmayan boya kalınlıklarının ölçümünde veya malzemelerin kalınlık ölçümünde kullanılmaktadır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60).

2. Eddy Current Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Eddy Current Method)

Avantajları:

- Yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikler tespit edilir.
- Çok küçük süreksizlikler tespit edilebilir.
- Malzeme kalınlıkları ve iletkenliklerinin ölçümünde de kullanılır.
- Karmaşık şekilli parçalar test edilebilir.
- Hızlı sonuç verir.
- Uygulaması basittir.

Dezavantajları:

- Yalnızca iletken malzemelerde süreksizliklerin tespit yapılabilir.
- Referans standartlara ihtiyaç vardır.
- Çok derinlerde oluşmuş süreksizlikleri tespit edemez.
- Tabakalaşma gibi sargı yönüne paralel süreksizlikleri tespit edemez.
- Malzeme kenarları ve köşelerinde doğru ölçümler vermez.

4.Ultrasonik (Ses Dalgalarıyla) Kontrol(Ultrasonic (Sound Waves) Control)

Ultrasonik ses, frekans değeri 20.000 Hz/s üzerindeki titreşimleri ifade eder. Malzeme üzerine ultrasonik seviyede ses dalgaları gönderilerek içerisindeki süreksizlikleri tespit etme yöntemine ultrasonik muayene yöntemi denir(Arı, 2023: 3). Örnek Ultrasonik test cihazı ile kontrolü Şekil 26'de gösterilmiştir.

Malzemelerin titreşimi ile ses, dalgalar hâlinde yayılır. Malzeme üzerine gönderilen bu ses dalgaları kırılabilir ve yansıyan yapıdadır. Malzeme içerisindeki süreksizliklere çarpmalarıyla ses dalgalarında

bozulmalar oluşur. Bozulmanın değeri, süreksizliğin büyüklüğünü ve konumunu belirlememizi sağlar (Onursal, 2010) (Arı, 2023: 3).

4.1.Ultrasonik Kontrolün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Ultrasonic Control can be Applied)

- Metal veya metal olmayan malzemelerdeki çatlak, gözenek gibi süreksizliklerin tespitinde,
- Malzeme içerisinde veya yüzeyde bulunan süreksizliklerin tespitinde,
- Malzeme kalınlıklarının ölçülmesinde,
- Korozyon tespitinde,
- Kompozit malzemelerde görülen tabakalaşma süreksizliklerinde,
- Metallerin sertleşen bölgelerinin tespitinde kullanılır.

4.2.Ultrasonik Muayene Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Ultrasonic Examination Method)

Avantajları:

- Metal ve metal olmayan malzemelerin süreksizliklerini tespit eder.
- Malzeme yüzeyi ve malzeme içindeki süreksizlikleri tespit eder.
- Süreksizlik tespit, konumu, büyüklüğü konularında hassasiyet yüksektir.
- Kalınlık ölçümlerinde kullanılır.
- Hızlı sonuç verir.

Dezavantajları:

- Ekipmanların kullanımı diğer yöntemlere göre daha ciddi uzmanlık gerektirir.
- Muayene jeli veya sıvılarına ihtiyaç vardır.
- Muayene edilecek parçanın formu düzgün değilse testin hata payı yüksek olur.
- Ses iletimi düşük olan malzemelerin test zordur.
- Probdan gönderilen ses dalgaları, süreksizlik yönü ile paralel doğrultudaysa süreksizlik tespit edilemeyebilir.

4.3.Radyografik Kontrol(Radiographic Control)

Yüksek enerjili elektromekanik dalgalara veya ışın foton demetlerine radyoaktif ışınlar denir. Radyografik muayene yönteminde en çok X- veya gama ışınları kullanılmaktadır. Bunun haricinde Alfa, Beta, Y-Ray ve özel tekniklerde (Nötron) kullanılmaktadır. Muayenede kullanılan yüksek enerjili ışınlar, test malzemesinin içerisinden geçer ve geçerken de bir miktar kayba uğrar. Malzeme içerisindeki süreksizliklerin içinden geçen ışın demet farklı oranlarda kayıplara neden olacaktır. Bu enerji kaybındaki farklılıklar, test parçasının diğer tarafına konulan ışınına duyarlı filmleri veya elektronik film görüntüleyicilerini etkileyerek malzeme içerisindeki süreksizlikleri tespit eder(Onursal, 2010). Örnek radyasyon türleri ve nüfuziyet kabiliyetleri Şekil 27’de gösterilmiştir.

A. Radyografik Kontrolün Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Radiographic Control can be Applied)

Radyografik kontrol, metal veya metal olmayan her türlü malzemenin muayenesinde kullanılabilen bir yöntemdir. Günlük hayata hastanelerde kullanılan röntgen filmleri bu prensibe göre çalışır(Yağcı ve Çiğdem, 2018: 50-60). Radyografide kullanılan X- ve gama ışınları malzemelere zarar vermez ancak insan sağlığına son derece zararlıdır.

B. Radyografik Kontrolün Avantajları ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Radiographic Control)

Avantajları:

- Metal ve metal olmayan tüm malzemeler için kullanılabilir.
- Malzeme yüzeyi ve yüzey içerisindeki süreksizlikleri tespit edebilir.
- Her türlü süreksizlik tipini tespit edebilir.
- Çeşitli geometrilerdeki test parçasını muayene edebilir.
- Hassas bir test malzemesi temizliği gerektirmez.
- Malzeme hareket hâlindeyken dahi test edilebilir.

Dezavantajları:

- İnsan sağlığı açısından oldukça tehlikeli olduğu için çok dikkatli kullanım gerektirir.
- Kontrolörün ciddi bir eğitim sürecinden geçmesi gerekir.
- Kullanılan ekipmanlar pahalıdır.
- Süreksizliğin derinlik mesafesi hesaplanamaz. (Hesaplanabilmesi için farklı açılardan test yapılmalıdır.)

4.4.Termografik Muayene(Thermographic Examination)

Termografik muayene metodu nispeten yeni bir tahribatsız muayene yöntemi olup, kızılötesi kamerayla yüzeyde gözlenen sıcaklık değişikliklerinin izlenmesi yoluyla, yüzey altı süreksizliklerin bulunmasını sağlar(Fidan, 2011). Termografi yöntemi ile parçanın hasarlı yüzeyinde oluşan sıcaklık farkları yardımıyla çatlakların yeri tespit edilir. Isı parçaya uygulanır, sonra film veya enfraruj kamera kullanılarak sıcaklık farkları adım adım ölçülür. Termografi yönteminin uygulanabilmesi için, test numunesinin termik öz iletkenlik bilgilerinin bilinmesi gerekir. Örnek sivil havacılıkta termografi kullanımını Şekil 28’de gösterilmiştir. Termal kontrolün temel prensibi; test parçasından veya test parçasına doğru ısı akışı sağlandığında oluşan yüzey sıcaklığının haritasını veya ölçümünü içerir. Bir yüzeydeki ısı farklılıkları veya zamanla yüzey ısısındaki değişimler ısı akımının yönüyle ilişkilidir ve kusurların tespitinde veya test parçasının ısı karakteristiklerinin belirlenmesinde kullanılır (Fidan, 2011).

A. Termografik Muayene Uygulanabileceği Malzemeler(Materials to which Thermographic Examination can be Applied))

Termografi yöntemi de sağladığı hızlı ve güvenilir sonuçlarıyla vazgeçilemez bir hasarsız kontrol yöntemidir. Havacılıkta kullanılan sandviç yapıları, bal peteği yapıları gibi kompozit malzemeler, metaller ve diğer termal özelliklerin değiştiği malzemeler üzerinde kullanılabilir(Fidan, 2011).

B. Termografi Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları(Advantages and Disadvantages of Thermography Method)

Avantajları:

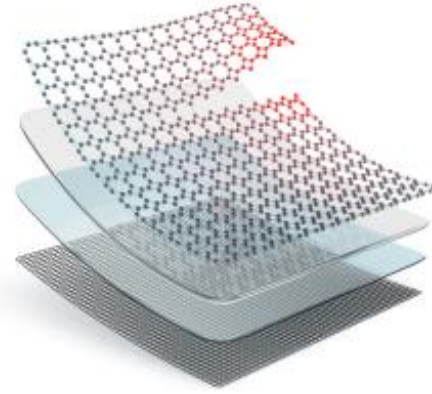
- Hızlı gözlem (test) oranı.

- Temas olmaması.
- Güvenlik (yüksek güçle harici uyarıcılar kullanılmasına rağmen zararlı radyasyon içermez.).
- Sonuçlar kolayca yorumlanabilir.
- Geniş uygulama alanı.

Dezavantajları:

- Geniş bir yüzeye, kısa sürede, büyük miktardaki enerjiyi eşit olarak yayma zorluğu.
- Termal görüntünün bozulmasına termal kayıpların etkisi.
- Malzemelerin (ekipmanın) maliyeti.
- Sadece termal özelliklerin değiştiği parçaların incelenebilmesi.
- Yüzey altındaki sınırlı kalınlıkların incelenebilmesi.

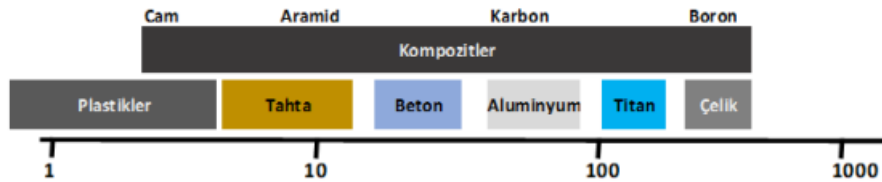
4.5.Şekiller (Figures)



Şekil 1. Kompozit malzeme(Composite material)



Şekil 2. Bazı malzeme ve kompozitlerin yoğunluk (kg/m³) özellikleri(Density (kg/m³) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



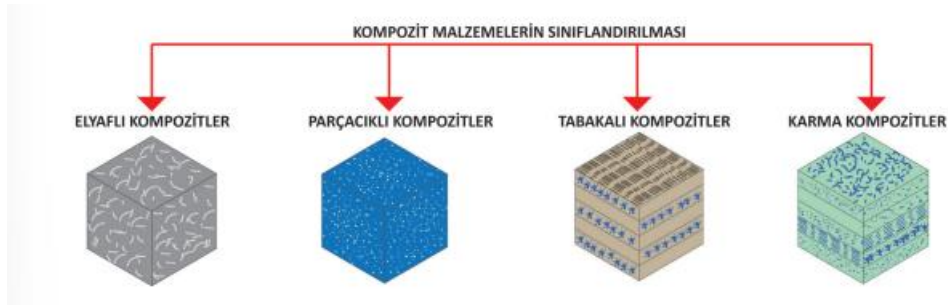
Şekil 3. Bazı malzeme ve kompozitlerin elastikiyet modülü (GPa) özellikleri(Modulus of elasticity (GPa) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



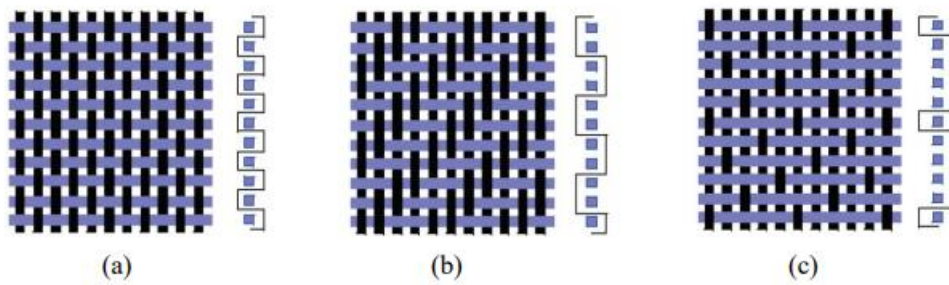
Şekil 4. Bazı malzeme ve kompozitlerin çekme mukavemeti (MPa) özellikleri(Tensile strength (MPa) properties of some materials and composites) (Çobanoğlu, 2017: 197)



Şekil 5. Termoset bağlayıcı, epoksi reçine ve epoksi sertleştirici(Thermosetting binder, epoxy resin and epoxy hardener)



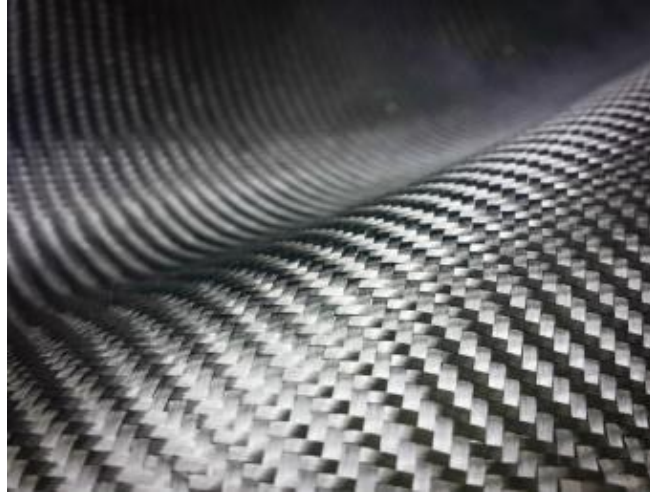
Şekil 6. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması(Classification of composite materials)



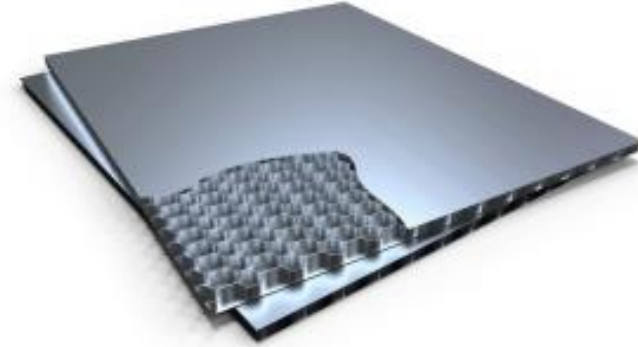
Şekil 7. En çok kullanılan örgü tipleri; (a) Düz örgü, (b) İkili örgü, (c) Beş koşumlu saten örgü(The most commonly used weave types are; (a) plain weave, (b) double weave, (c) satin weave with five harnesses)



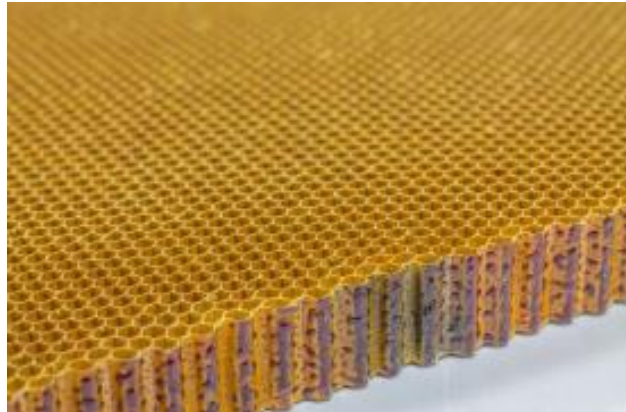
Şekil 9. Cam elyafı(Fibreglass)



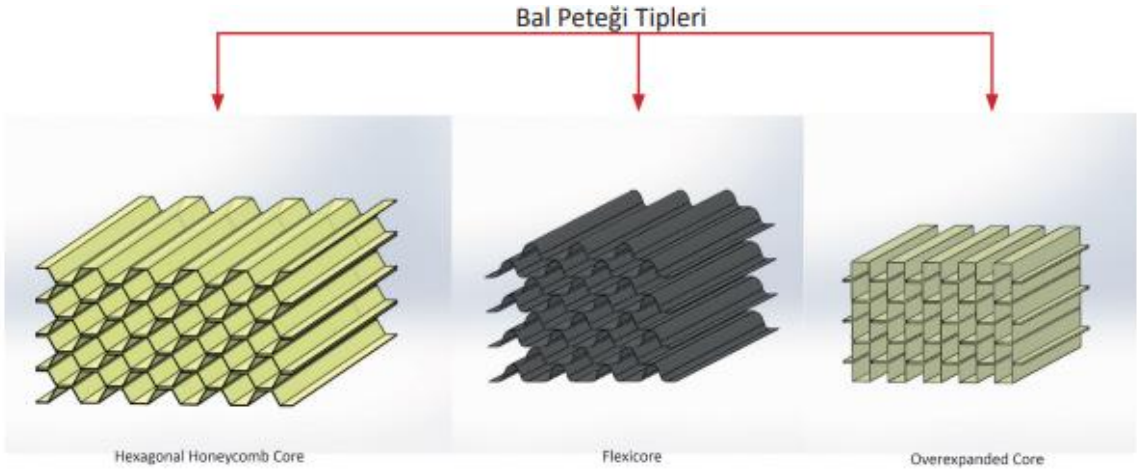
Şekil 10. Karbon elyafı(Carbon fibre)



Şekil 11. Sandviç panel örneği(Sandwich panel sample)



Şekil 12. Bal peteği yapı örneği(Honey comb structure example)



2. Şekil 13. Bal peteği yapısı çeşitleri(Types of honeycomb structure) (Taşkıran, 2010: 19-80)



Şekil 14. Tahribatsız muayene işlemi(Non-destructive testing)



Şekil 15. Cüruf kalıntısı(Slag residue)



Şekil 16. Çatlak süreksizliği(Crack discontinuity)



Şekil 17. Korozyon(Corrosion)



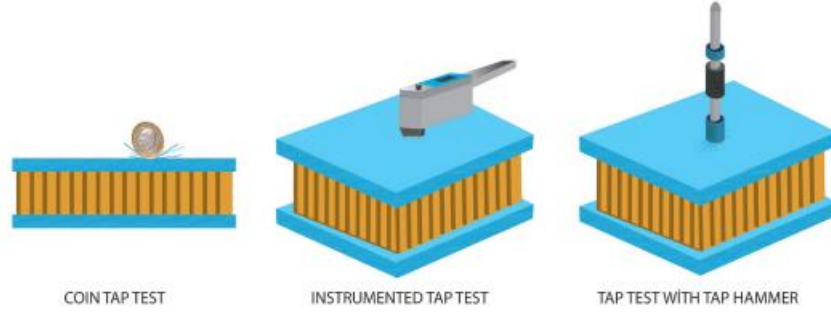
Şekil 18. Boroskop (Boroscope)



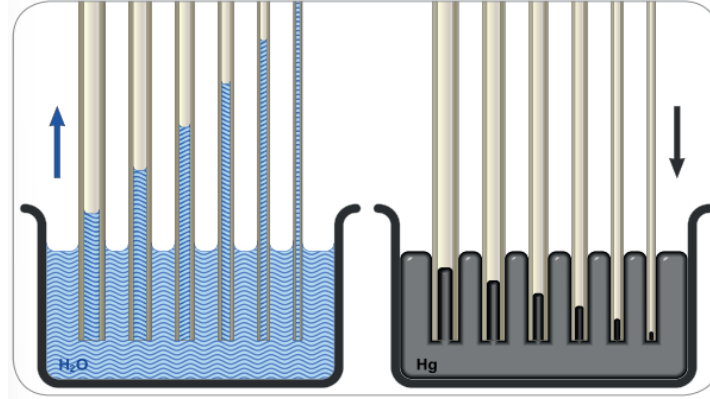
Şekil 19. Teleskopik ayna(Telesopic mirror)



Şekil 20. Fener(Flashlight)



Şekil 21. Tap test yöntemleri(Tap test methods)



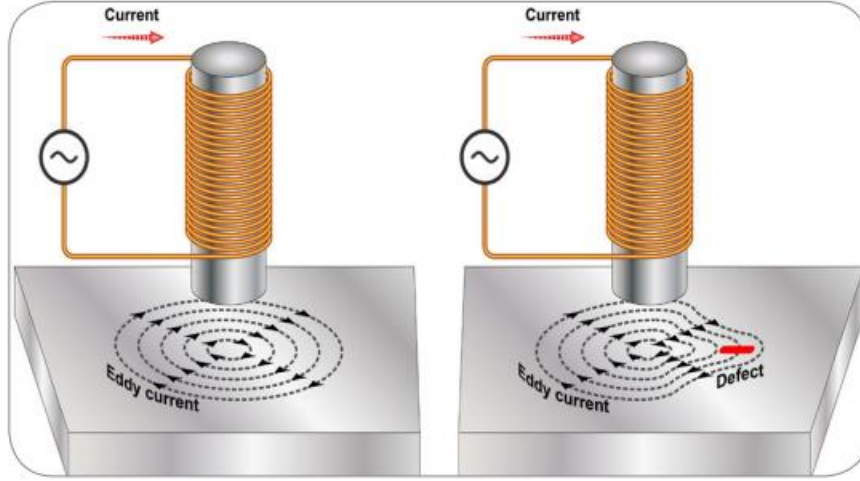
Şekil 22. Çeşitli çaplarda kapiler hareket(Capillary movement in various diameters)



Şekil 23. Penetrant sıvısı(Penetrant liquid)



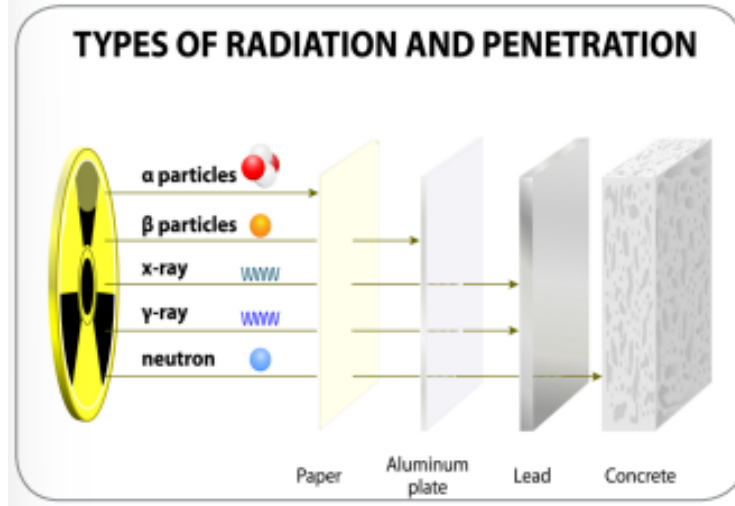
Şekil 24. Geliştirici ve temizleyici (Developer and cleaner)



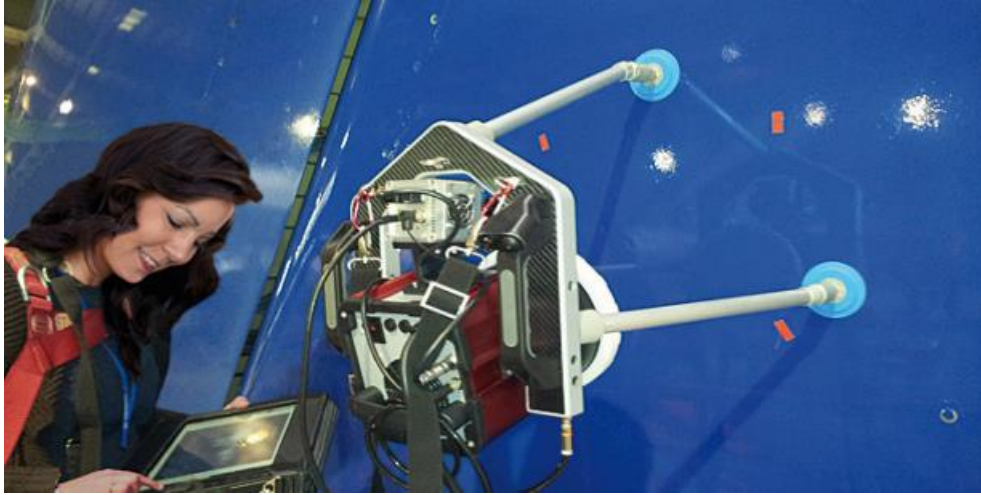
Şekil 25. Eddy akımlarının oluşumu(Eddy current formation)



Şekil 26. Ultrasonik test cihazı ile kontrolü(Control with ultrasonic tester)



Şekil 27. Radyasyon türleri ve nüfuziyet kabiliyetleri(Radiation types and penetration capabilities)



Şekil 28. Sivil havacılıkta termografi kullanımı(Use of thermography in civil aviation) (“Automation Technology GmbH”, 2023)

5. Tablolar (Tables)

Tablo 1. Bağlayıcı ve Güçlendirici Örnekleri(Connector and Reinforcer Examples)

Matris (Bağlayıcılar)	Güçlendiriciler
Polimerler	Elyaf (Fiberler)
Seramikler	Partiküller
Metaller	Pullar (Whishers)

SONUÇ (CONCLUSION)

Havacılık sektöründe ileri teknoloji ürünler olan çeşitli malzemeler kullanılmaktadır. Havacılık sektörünü gelişmesi bu sektörde kullanılan malzemelerin de gelişmesine bağlıdır. Kompozit malzemelerinin gelişmesi ile havacılıkta kullanılan kompozit malzemeler buna verilebilecek en güzel örnektir. Kompozit malzemeler günümüz yeni nesil uçaklarının %50'sini ve her geçen gün daha fazlasını oluşturmaktadır. Bu malzemelerin gelişmesi, güvenilirliğinin artırılması ve bakım maliyetlerinin azaltılması gerekmektedir.

Havacılıkta kullanılan en yaygın malzeme kompozitlerdir. Uçaklarda kullanılan bu kompozit yapıların yaşlarının ilerlemesi, bakım ve onarım maliyeti endişelerini de beraberinde getirmektedir. Bu yapılarda tekrarlı yüklerin ve korozif atmosfer şartları gibi çeşitli sebeplerden aşınma, yırtılma ve değişik sıra dışı hasarlar meydana gelmektedir. Bu hasarlar sonucunda çok ciddi ve maddi kayıplar meydana gelmektedir. Bu yüzden malzeme hasara uğramadan muayene etmek son derece önemlidir. Büyük ve yüzeyde oluşan hasarları çıplak gözle görmek mümkündür. Fakat iç ve dış küçük hasarların tespiti için farklı muayene tekniklerine ihtiyaç vardır. Bu teknikler önceki bölümlerde açıklanmış olan Endüksiyon akım, penetrant sıvısı, ultrasonik, röntgen vb. gibi tekniklerdir. Bu muayene tekniklerini kullanmak son derece önem ve nitelikli personel gerektirir. Bu teknikler kullanarak arıza tespiti yapılabilir fakat belirli malzemelerde, yapılarda kullanılabilir ve bu teknikler ile hasarın miktarını belirlemek çok zordur. Bu eksiklikleri kapatmak amacıyla özellikle son yıllarda akıllı sistemlerin hasar tespit için geliştirilmeye başlanmıştır. Akıllı hasar tespit sistemleri ilerleyen yıllarda havacılık için çok daha elzem olacağı açıkça tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Yağcı, T. , Çidem, A., & Durmuş, H. (2018). Geçmişten günümüze tahribatsız muayene yöntemleri. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 3(27), 49-61.
2. Kaya, A.İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*,29, 38-45.
3. Arı, A. C. (2023). Kompozit Malzemelerin Tahribatsız Muayene Yöntemlerinden Olan Ultrasonik Test ile Ölçülmesi Üzerine Yapılan Çalışmaların İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Tasarım ve Teknoloji Dergisi*, 4(1-2), 1-10.
4. Yılmaz, U., & Evci, C. (2015). Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2), 77-109.
5. Şahin, Y. (2006). Kompozit malzemelere giriş. Seçkin Yayınevi, Ankara.
6. Onursal, M. (2010). *Uçaklarda kullanılan metal malzemelere uygulanan tahribatsız muayeneler*. (Yüksek lisans tezi).
7. Fidan, S. (2011). *Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi*.
8. Yenilmez, F. (2018). *Metal ve polimer esaslı malzemelerin enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu*. (Yüksek lisans tezi).
9. Taşkıran, C. (2010). *Tabakalı kompozit levhaların sıcaklığa bağlı düşük enerjili darbe davranışlarının incelenmesi*. (Doktora tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
10. Çobanoğlu,T. (2021). *Havacılık sektöründe kompozit metal malzeme kombinasyonlarında delik delme prosesinin iyileştirilmesi*. (Doktora tezi). (Tez no: 91438).
11. Automation Technology GmbH. (2023, 12 26). Active Thermography for Nondestructive Composites Testing. Quality Magazine: <https://www.qualitymag.com/articles/91207-active-thermography-for-nondestructive-composites-testing>

UÇAK SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTRONİK SİSTEMLERİN GELİŞİMİ VE TARİHÇESİ

Muhammet Ali KARA^{1*}

Fatma YILDIRIM DALKIRAN²

¹ Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Melikgazi/Kayseri

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Melikgazi/Kayseri

ÖZET

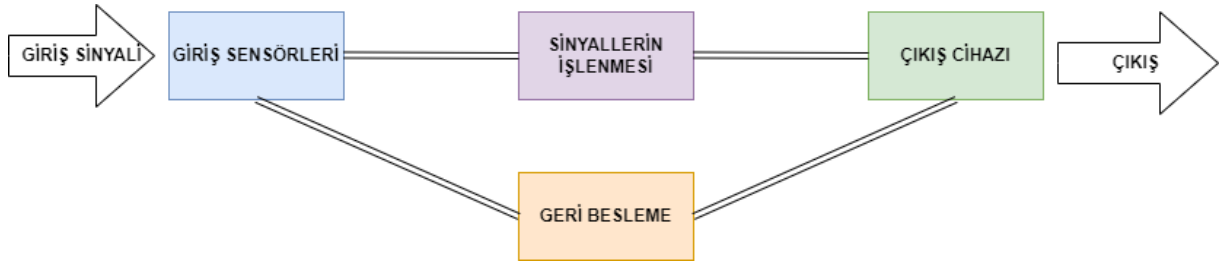
1903 yılında ilk uçuşun gerçekleştirildiğinden, günümüze kadar olan süre zarfında sayısız uçuş denemesi ve uçak tasarım girişimleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde uçuşların ve uçak tasarımlarının daha konforlu ve daha güvenli hale gelmesi üzerine çalışılmaktadır. Günümüzde kullanılan çoğu teknolojinin temel taşı olan elektronik sistemler, şimdi ve gelecekte üretilecek olan uçak tasarımlarında ciddi rol oynayacaktır. Bu çalışmada elektronik teknolojisinin temellerinden, günümüz uçaklarındaki kullanımından, “Fly by Wire” kavramının yeni nesil uçaklarda kullanılmasından ve elektronik sistemler sayesinde uçakların nasıl daha konforlu ve daha güvenli bir hale geldiğinden bahsedilecektir.

GİRİŞ

1947 yılında ilk transistörün icat edilmesinden sonra sırasıyla 1958 ve 1969 yıllarında entegre devreler (IC) ve mikroişlemciler icat edildi. 1969 yılından kısa bir süre sonra analog sinyalleri işleyen operasyonel yükselteçler (OPAMP) icat edildi. Bu analog devreler, içlerinde analog çoğaltıcıları, analog-dijital (ADC) ve dijital-analog (DAC) dönüştürücüleri, analog filtreleri içeriyordu [1]. Elektronik teknolojisinde yaşanan bu gelişmeler, o dönem havacılık paydaşları tarafından aktif bir şekilde takip ediliyordu. Yaşanan bu gelişmelerden sonra, elektronik devreler 1958-1969 yılları arasında uçuşa yardımcı teçhizatlarda aktif bir şekilde kullanılmaya başlandı [2]. Nitekim bu teçhizatlar pistten yayılan sinyallere göre kötü hava şartlarında iniş ve kalkış yapabilmeye olanak sağlıyordu. Daha sonraki yıllarda çok daha fazla veriyi işleyen ve yöneten bilgisayar sistemlerinin gelişmesiyle uçaklarda artık elektronik tabanlı sistemler, kontrolcü olarak görev almaya başlamıştır [2].

2. Elektronik Sistem Temelleri

Elektronik sistem, elektriksel sinyalleri işleyerek, bu sinyallere göre çıkış sinyali üretir. Elektriksel olmayan giriş sinyalleri ise sensörler aracılığıyla algılanır ve bu sinyaller, elektriksel sinyallere dönüştürülür. Dönüştürülen sinyaller işlenerek, çıkışta kontrol edilmek istenen cihaza gönderilir. Bu cihaz, elektriksel olarak aldığı sinyallerinden bir çıkış sinyali üretir. Üretilen bu sinyal yapılacak işleme göre çıkış bilgisi sunar. Elektronik sistem, Şekil 1’ de de görüldüğü gibi 4 temel yapıdan oluşur. Bunlar giriş sensörleri, elektriksel sinyallerin işlenmesi, çıkış cihazları ve geri beslemedir [3]. Giriş sensörleri, elektriksel olmayan sinyalleri elektriksel sinyale dönüştürür. Örnek olarak bir noktaya uygulanan basınç bilgileri piezoelektrik sensörler aracılığıyla elektriksel sinyallere dönüştürülür. 2. yapı olan elektriksel sinyallerin işlenmesi, elektriksel sinyallerin entegre devreler aracılığıyla istenilen şekle getirilmesidir. Çıkış cihazları ise, üretilen elektriksel sinyallerin istenilen işlemleri yapması için ilgili cihazlara gönderilmesini sağlar. Örneğin çıkışta aktüatörün hareket etmesi isteniyorsa bir servo-motor kullanılabilir. 4. yapı, geri beslemedir. Çıkışta üretilen çıkış sinyali tekrar giriş hattına gönderilerek, sistemin kararlı olması sağlanır.



Şekil 1: Elektronik sistem çalışma yapısı

3. Uçaklarda Kullanılan Elektronik Tabanlı, Uçuşa Yardımcı Teçhizatlar

Elektronik tabanlı sistemlerin hayatımıza girdiği dönem, şüphesiz İkinci Dünya Savaşı dönemidir. Bu sistemler, İkinci Dünya Savaşı sırasında balistik ve menzil hesaplamaları gibi alanlarda kullanıldığı gibi sonraki dönemlerde hava tahminleri, yüksek hızlı menzil hesaplamaları ve pek çok bilimsel alanda yapılan çalışmalarda ve hesaplamalarda kullanılmıştır [3]. 1947 ile 1980 yılları arasında elektronik tabanlı sistemlerin gelişmesi havacılık sektöründe de bir etki yaratmıştır. O yıllarda pilotlar hava şartlarının olumsuz olduğu zamanlarda uçmayı tercih etmiyorlardı. Bu sorunun aşılması için yetkililer, elektronik sistem kontrolünde olan bir aletli iniş sisteminin gerçekleştirilmesi gerekliliğini öne sürmüşler ve aletli iniş sistemini (Instrument Landing System, ILS) geliştirerek, havacılık sektöründe kullanılmasını sağlamışlardır. Bu gelişmelerle birlikte uçuşa yardımcı teçhizatlar, yere yakınlık ikaz sistemi (Ground Proximity Warning System, GPWS), trafik çarpışmaları önleyici sistem (Traffic Collision Avoidance System, TCAS) ve küresel konum belirleme sistemi (Global Position System, GPS) sistemleri ortaya konmuş ve hatta kullanımı havacılık sektöründe zorunlu hale getirilmiştir. Bu teknolojilerin gelişmesinde alınan sinyalleri işleyebilecek elektronik sistem önemli bir yapı taşı olmuştur [2].

3.1. ILS

1940'lı yıllarda, uçakların uçuşlarının kötü hava şartlarında aksamasını önlemek için CAA (Civil Aviation Authority) tarafından ABD Başkanı Roosevelt'e ILS sisteminin bir versiyonu sunulmuştur [2]. O zaman alınan kararlar gereği bu sistemin uçaklara konulması ertelenmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra ILS sistemi sivil havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır. 1947'li yıllarda CAA yöneticisi T. P. Wright, ILS sistemini kullanan havayolları için iniş koşullarını değiştirdi. İniş için gerekli olan azami irtifa 100 feet değerinde, görüş mesafesi normal şartların dörtte-biri kadar azaltıldı. Bu yıllarda ILS sisteminin çok gelişmiş olmadığını düşünen bazı devlet yetkilileri tam otomatik bir ILS sistemi geliştirilmesi konusunda tavsiyelerde bulunmuştur. 1960'lı yıllara kadar da ILS çok fazla kullanılmamıştır. 1964 yılında ilk kez Mesafe ölçüm ekipmanı (Distance Measurement Equipment, DME) sistemi ILS sistemiyle birleştirildi. ILS sisteminin günümüzdeki versiyonunun kullanılması bu yılda olmuştur. ILS sistemi, 3 tane önemli antenden aldığı verileri elektronik devreler aracılığıyla kendi diline çevirerek, göstergelere pist orta hiza, pist süzülüş hattı ve pist mesafesi hakkında bilgiler sağlar. Sistemin çalışmasındaki en büyük avantaj, antenlerden alınan verilerin elektronik dile çevrilerek göstergelere aktarılmasıdır.

ILS bileşenlerinden localizer, havalimanı pistinde bulunan verici localizer anteni tarafından yayılan 90 ve 120 Hz. sinyalleri uçaktaki alıcı localizer anteni tarafından algılar. Algılanan 90 ve 120 Hz'lik sinyaller elektronik devre aracılığıyla sinyallerin kesiştiği noktada pist-orta hizasını gösterecek şekilde, kokpitte bulunan göstergeye gönderilir. Gösterge, uçağın almış olduğu sinyallere göre uçağın pistin sağında mı, yoksa solunda mı olduğu bilgisini verir.

a. *Glide Slope*: Havalimanı pistinde bulunan Glide Slope anteni tarafından yayılan 90 Hz ve 150 Hz sinyaller, genellikle uçakta radomda veya bazen uçak gövdesinin ön kısmında bulunan Glide Slope anteni

tarafından algılanır. Algılanan 90Hz ve 150 Hz’lik sinyaller elektronik devre aracılığıyla sinyallerin kesiştiği noktada pist süzülüş hattını gösterecek şekilde, kokpitte bulunan göstereye gönderilir. Gösterge, uçağın almış olduğu sinyallere göre uçağın pist süzülüş hattının üstünde mi, yoksa altında mı olduğu bilgisini sağlar.

b. *Marker*: Marker sistemi uçağa, havalimanı pistine olan mesafe hakkında bilgi verir. Piste yakın noktalara yerleştirilmiş olan, genellikle Outer ve Middle marker olarak isimlendirilen 2 tane marker anteni piste yaklaşan uçaklara sinyaller gönderir. Bu sinyaller, uçaklarda gövdenin altında bulunan marker anteni tarafından algılanır. Algılanan bu sinyaller, elektronik devreler sayesinde kokpitte ilgili marker göstergesi ışığını yakar. Pilot bu durum sonucunda bulunmuş olduğu pistin dokümanına bakarak, yanan marker göstergesinden piste ne kadar uzaklıkta olduğunu öğrenir.

1971 yılında NASA tarafından mikrodalga iniş sisteminin (Microwave Landing System, MLS) sivil havacılıkta kullanılması ile ilgili ulusal bir plan yayınlanmıştır [2]. Bu yıllarda ILS sisteminin yetersizliği sivil havacılık otoriteleri tarafından biliniyordu ama ILS sisteminin birçok havalimanı pistinde aktif olarak kullanılması, ILS sistemi yerine MLS sisteminin kullanılmasını daha zor bir hale getirmiştir. Nitekim ILS sistemi günümüzde halen aktif olarak kullanılmaktadır. Ancak FAA’ nın 1989’ da kesin yaklaşma politikası ile ilgili yayınladığı karar, ilerleyen zamanlarda ILS sisteminin yerine daha kesin yaklaşımlar veren bir sistemin kullanılacağını planlandığını göstermektedir. Elektronik teknolojisinin gelişmesiyle alınan sinyalleri daha kesin ve daha noktasal hesaplayan elektronik sistemler, bu teknolojilerin gelişmesinde önemli rol oynayacaktır.

3.2 Ground Proximity Warning System (GPWS)

1960’ lı yılların başında uçak üreticileri ve yan kuruluşlar, sivil havacılık tarihinde meydana gelmiş olan bazı kazaları göz önünde bulundurarak, uçakların yere gereğinden fazla ve tehlikeli bir şekilde alçaldıklarında pilotları uyarabilecek bir sistem geliştirmeye başladılar. Böylece aynı yılın ortalarında radyo altimetre adlı yeni bir cihaz denemeleri başlamış oldu. Bu cihaz, yaklaşık 2500 irtifa altında pilotlara anlık yükseklik bilgisini verebilecek kapasiteydi. Sistem, gönderdiği sinyalleri alan ve aldığı bu sinyalin gidiş-dönüş arasındaki süre farkından yüksekliğini hesaplayabilmekteydi. Sistem geliştiricileri, radyo altimetreyi GPWS sistemine, irtifa bilgisi sağlaması için kullanmışlardır. Anlık alınan irtifa bilgileri ile yere gereğinden fazla yaklaştığında sesli olarak ikaz veren bir GPWS sistemini geliştirmelerine yardımcı oldu. Sistemin ilk prototipi 1968 yılında 3 tane farklı ikaz üretebilecek düzeydeydi. Nitekim daha sonraki yıllarda geliştirilen EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System) günümüzde aktif olarak kullanılmaktadır. GPWS sistemi 7 tane farklı ikaz üreterek pilotları bilgilendirmek için kullanılmaktadır [4,5].

- a. Mod 1: Aşırı alçalma oranı
- b. Mod 2: Araziye aşırı yaklaşma
- c. Mod 3: Kalkıştan sonra alçalma
- d. Mod 4: Emniyetsiz arazi mesafesi
- e. Mod 5: Glide Slope hattından alçalma
- f. Mod 6: Durum farkındalığı; aşırı yatış açısı ve emniyetsiz irtifa hakkında uyarı
- g. Mod 7: Emniyetsiz rüzgar değişim oranı

Yukarıda verilen modlar aracılığıyla pilot sesli bir şekilde uyarılır. Her modun kendine ait ikaz sesi vardır ve pilot duyduğu bu ikaza göre gerekli işlemleri uygular. 1974 yılında FAA, büyük turbo-jet ve turbo-prop uçaklarda GPWS sisteminin olmasını zorunlu kılmıştır. GPWS sisteminin zorunlu kılınmasından sonra arazi çarpmalarında %85 oranında azalma görülmüştür [5]. Son zamanlarda yaşanmış Isparta uçak kazası raporunda, MD-83 uçağında GPWS sisteminin bozuk olmasına rağmen uçağın sefere verildiği görülmüştür. Bunun sonucunda pisti tam olarak bulamayan pilotlar, pist etrafında dolanmaya başlamışlar. Pist etrafında bulunan Türbetepe’ ye aşırı yaklaşan pilotları uyarın herhangi bir GPWS sistemi olmadığı için uçak, 30 Kasım 2007 tarihinde Türbetepe’ ye çarpmıştır [6].

3.3 TCAS

1956 yılının haziran ayında havacılık tarihine, o zamana kadar yaşanan en ölümcül kaza kaydedilmiştir. Bu kazada Lockheed L-1049 Super Constellation ile Douglas DC-7, 21000 feet’te Amerika’da bulunan Grand Canyon üzerinde birbirleriyle çarpışmışlardır. Bu kazada maalesef hayatta kalan kimse olmamıştır ve 128 kişi hayatını kaybetmiştir [7]. Havacılığın yavaş geliştiği bu dönemlerde maalesef uçaklarda, etrafındaki uçakların durumunu, irtifalarını ve konumlarını gösteren sistemler bulunmuyordu. Tüm sorumluluk pilotların üzerindeymiş, hatta o zamanlar havacılıkta “See and Be Seen” sözü pilotlar arasında meşhurmüş [7]. 1981 yılında FAA, TCAS sisteminin oluşturulmasına yönelik kararlar almıştır. İlk yıllarda TCAS sistemi, hava trafik kontrol radar işaret sistemi (Air Traffic Control Radar Beacon System, ATRBS) transponderi ile kullanılıyordu. Daha sonraki yıllarda yeni nesil transponder olarak bilinen DABS (Discrete Address Beacon System) ile, sonraki yıllarda da Mode S olarak anılan, sistemle uyumlu olarak çalışmaya başlamıştır [8]. 3 tane TCAS sistemi geliştirilmiştir.

TCAS 1: Küçük uçaklar için sadece trafik tavsiyeleri (Traffic Advisory, TA) sağlar, manevra tavsiyeleri sağlamaz.

TCAS 2: Büyük uçaklar için TA ve dikey-manevra tavsiyeleri sağlar.

TCAS 3: TCAS 2’ ye ek olarak yatay-manevra tavsiyeleri de sağlar.

FAA, 1989 yılında 30’ dan fazla yolcu taşıyan tüm uçaklarda TCAS 2 sisteminin kullanılması için, 10 ile 30 yolcu taşıyan uçaklarda TCAS 1 sisteminin kullanılması için kural yayınlamıştır ve böylelikle bu yıllarda TCAS sisteminin kullanılması hava taşımacılığında yaygınlaşmıştır.

TCAS sisteminin çalışmasında en önemli unsur uçakta bulunan transponder sisteminin aktif edilmesidir. Uçakta aktif edilen transponder, çevresindeki uçaklara sorgulayıcı sinyaller gönderir. Eğer karşıdaki uçağın da transponder sistemi aktif edilmişse, bu sorgulayıcı sinyaller yansıma yoluyla tekrar, gönderen uçağa gelir. Eğer gelişmiş “Mode S” transponder kullanılıyorsa uçağın kuyruk kodu, irtifa bilgisi ve uçağın alçaldığı veya yükseldiği bilgisi verilirken, “Mode C”de irtifa ve kuyruk kodu bilgisi, “Mode A”da ise sadece uçağın kuyruk kodu bilgisi verilir. Geri gelen bu sinyaller, TCAS anteni tarafından alınır ve elektronik devre aracılığıyla bilgiler işlenir, daha sonra kokpitte EFIS gösterge panellerinde gösterilir. TCAS sistemi, pilotlara hem görüntülü olarak hem de sesli olarak ikaz üretebilir. TCAS sistemi yerde bulunan hava trafik kontrol (Air Traffic Control, ATC) antenleri tarafından da sorgulanabilir. Bunun sonucunda ATC yetkilileri uçaklar hakkında ilgili bilgilere sahip olur ve uçakları koordineli bir şekilde iniş için hazırlar. FAA, terminal etrafında bulunan ve transponder taşıyan tüm uçaklarının seferlerinin, ATC’nin kontrolü altında gerçekleşmesi konusunda bildiri yayınlamıştır [2]. Çünkü pist alanının geniş olması ve uçaklar arasında gerçekleşen TCAS haberleşmesinde bazı aksaklıkların yaşanmasını engellemek ve yerden yayılan radarın çoğu uçağı daha ayrıntılı göstermesi için gereklidir. TCAS sisteminin gelişmesinin ardından uçak çarpışmalarında kayda değer bir azalma görülmüştür. Şekil 2’ de uçuşa yardımcı teçhizatların hangi yıllarda kullanılmaya başlandığına dair bilgiler yer almaktadır.

UÇUŞA YARDIMCI TEÇHİZATLAR	
ILS	1964
GPWS	1974
TCAS	1989
GPS	1995

Şekil 2: Uçuşa yardımcı teçhizatların hangi yıllarda kullanılmaya başlandığına dair bilgiler [2].

3.4 Global Position System (GPS)

1951 yılında Dr. Ivan Getting, radyo sinyallerinin alıcıya varışlarındaki süre farkına bakarak 3 boyutlu, konum hesaplayabilen bir sistem tasarlamıştır [9]. Daha sonrasında Sputnik bilim adamları, uyduların

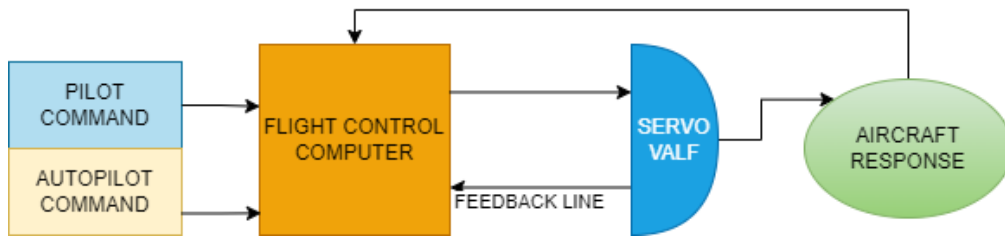
yerinin kesin olarak bilinmesi halinde, doppler deformasyonu ile efemeris bilgisinin hesaplanabileceğini ortaya koymuştur [9]. Yaşanan bu gelişmelerin ardından, GPS sistemi, havacılık tarihinde ilk olarak 1983 yılında kullanılarak, bu sistemi kullanan bir uçak, Atlantik'i geçerek Paris'e inmiştir [2]. 1989-1994 yıllarında 24 tane uydunun yerleştirilmesiyle GPS sisteminin tamamen operasyonel olabileceği 1994 yılında kamuoyuna bildirilmiştir. Havacılıkta seyrüsefer yardımcısı olarak kullanılan bu sistem, uçuşun her fazında; kullanılabilir. GPS sistemi L1, L2 ve L5 olmak üzere 3 farklı frekansta yayın yapar. Uçaklarda bulunan antenler aracılığıyla en az 4 tane uydudan GPS sinyalleri alınır. Uydulardan alınan bu sinyallerin elektronik devreler aracılığıyla süre farklarına göre uçağın konumu hesaplanır ve ardından hesaplanan konum bilgisi kokpitte bulunan göstergelere gönderilir. GPS sisteminin gelişmesinin ardından uçaklarda seyrüsefer ile ilgili sorunlar, özellikle okyanus aşırı uçuşlarda minimuma inmiştir [9].

3.5 Yeni Nesil Uçaklarda “FLY BY WIRE” Teknolojisinin Kullanılması

1984 yılında AIRBUS uçak üreticisi tarafından, A320 uçağını tanıtmış, tanıtırken birçok teknik gelişmelerden ve en göze çarpan özelliği olan “FLY BY WIRE” teknolojisinden bahsetmiştir [10]. A320 uçağı, eski nesil mekanik göstergeler ve sistemlerden ziyade yeni nesil elektronik sistemlerle tasarlanmıştır. O yıllarda havacılık sektöründe 2 tane farklı düşünce yapısı vardı. Bazı sektör çalışanları, mekanik sistemlerin pilota daha fazla yardımcı olduğunu ve mekanik sistemlerin ve göstergelerin daha güvenli olduğunu savunurken, diğer grup ise elektronik sistemlerin ve göstergelerin daha güvenli olduğunu ve hata payının düşük olduğunu düşünüyordu. Nitekim yaşanan gelişmelerin ardından AIRBUS şirketi tarafından tanıtılan “FLY BY WIRE” teknolojisi, günümüzde aktif olarak üretilen uçaklarda kullanılmaktadır.

3.5.1 “FLY BY WIRE” Teknolojisi

“FLY BY WIRE” sistemi mekanik bağlantının yerini, elektriksel bağlantının almasını temsil eder. Sistem, pilotlardan, otopilottan veya uçuşa etki edecek sensörlerden alınan elektriksel sinyalleri uçuş kontrol bilgisayarına (Flight Control Computer, FCC) iletir. İletilen bu veriler, bilgisayar tabanlı sistemle işlenerek, uçuş kontrol yüzeylerine veya uçuş için önemli olan sistemlere gönderilir. FLY BY WIRE sistemi, mekanik bağlantının yerini almasıyla ağırlığı azalttığı gibi uçuş güvenliğini, kararlılığını ve uçağın manevra kabiliyetini artırması gibi birçok avantajı da sağlamıştır. İlk olarak askeri havacılıkta ve Concorde uçağında bu sistemin temelleri atılsa da, AIRBUS şirketinin “FLY BY WIRE” sistemiyle ürettiği A320 uçağıyla aktif olarak sivil havacılıkta kullanılmaya başlanmıştır [10]. Daha sonraki yıllarda BOEING ve AIRBUS şirketinin ürettiği uçaklarının tümünde bu teknoloji kullanılmaya başlanmıştır [10].



Şekil 3: “FLY BY WIRE” sisteminin çalışma yapısı

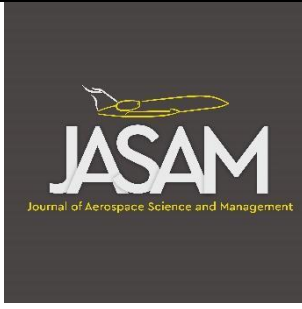
Şekil 3’de “FLY BY WIRE” sisteminin çalışma prensibi gösterilmektedir. Pilottan, Otopilottan veya sensörlerden alınan veriler FCC’ye gönderilmektedir. Daha sonra ilgili servo valf veya sensör hattı enerjilendirilir. Enerjilenen bu hatlar hareket ederek, verilen komutu gerçekleştirir, feedback hattı aracılığıyla valfin durumu sürekli olarak FCC’ye gönderilir. Daha sonra servo valfin hareketi sonucu uçakta oluşan durum tekrardan FCC’ye gönderilerek uçağın kararlı bir halde tutulması sağlanır. Bu veriler aynı zamanda kaydedilerek Flight Data Recorder’a gönderilir. [11]

SONUÇ

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından teknolojinin gelişimi farklı bir noktaya gelmiştir. İlk olarak elektronik tabanlı sistemlerin temel taşı olan transistör icat edilmiştir. Daha sonrasında entegre devreler ve daha karmaşık mikroişlemciler üretilmiştir. 1950-1980 yılları arasında havacılık sektöründe kullanılan elektronik sistemler, genel olarak, uçuşa yardımcı teçhizatların antenlerinden aldığı verileri işleyerek, bilgiyi ilgili sistemin göstergesine dijital veri olarak göndermesi temeline dayanıyordu. Bunun sonucunda pilot bu teçhizatlar sayesinde daha kötü hava şartlarında, daha güvenli uçuşlar gerçekleştiriyordu. Nitekim havacılık otoritelerinin bu teçhizatları zamanla, havayolları operatörlerine zorunlu kılmasıyla elektronik tabanlı sistemler havacılıkta yavaş yavaş yer edinmeye başlamıştır. 1984 yılında, AIRBUS şirketinin "FLY BY WIRE" teknolojisini tanıtmalarıyla uçuşlarda artık elektronik sistemler, uçak sistemlerinde elektronik kontrolcü olarak karşımıza çıkmıştır. Bu yeni tasarım, daha güvenli ve daha konforlu bir uçuş sunduğu için uçak üreticileri tarafından benimsenmiştir. Nitekim 1980'lerden günümüze kadar olan süre zarfında uçak kazalarında azalma, uçuş güvenliğinde artış sağlandığı için "FLY BY WIRE" teknolojisi etkinliğini arttırarak, uçak sistemlerinde yerini almıştır. Günümüzde sürdürülebilirlik kapsamında hava taşımacılığının daha yeşil ve karbon emisyonu daha düşük olması istenmektedir. Günümüz uçakları göz önüne alındığında, uçağın en büyük ve önemli sistemi olan motorlar, halen mekanik bir sistem tabanlıdır ve bir uçuş fazında tonlarca yakıt sarfiyatına sahiptir. Mekanik sistemli motorların yerine, elektrikli jet motorların üretilmesi uçak üreticileri ve parça imalat üreticileri tarafından sürdürülebilir havacılık kapsamında en büyük gelişme olacağı düşünülmektedir. Nitekim Eviation şirketinin "ALICE" olarak adlandırdığı ve karbon emisyonu sıfır olan uçağı, ilk uçuşunu 27 Eylül 2022 yılında gerçekleştirmiştir [12]. Honeywell şirketinin elektrikli jet motorları olan ARGE çalışmaları devam etmektedir [13]. Bu durum göz önüne alındığında gelecek uçak tasarımlarında elektrik-elektronik tabanlı sistemlerin daha aktif bir şekilde rol alacağı ve yaklaşık %90'a yakın oranda elektrik-elektronik tabanlı sistemler olacağı ön görülen bir gerçektir. Sonuç olarak, havacılık sektörünün yeni gelişen teknolojilerle "Uçuşu daha güvenli hale getirme" ilkesi her zaman havacılık sektörünü üst seviyelere taşıyacak ve uçakların en güvenli ulaştırma aracı olarak kalmasını sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

1. <https://www.elprocus.com/know-about-brief-history-of-electronics-and-their-generations/>
2. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/history/chronolog_history/b-chron.pdf
3. https://resource.download.wjec.co.uk/vtc/2016-17/16-17_1-8/discovering-electronics-chapter-1-digital.pdf
4. https://www.faa.gov/lessons_learned/transport_airplane/accidents/N6902C
5. <https://services.tubitak.gov.tr/edergi/yazi.pdf;jsessionid=oZ1YaRAWjXn1ep6ZcxfskGN?dergiKodu=4&cilt=14&sayi=163&sayfa=14&yaziid=2583>
6. https://www.emo.org.tr/ekler/89afcc635c3fde3_ek.pdf?dergi=
7. <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/tcas-system-preventing-midair-collisions-harman-ja-6399.pdf>
8. <https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/tcas-system-preventing-midair-collisions-harman-ja-6399.pdf>
9. https://www.aiaa.org/docs/default-source/uploadedfiles/about-aiaa/press-room/videos/iaf-60th-anniv-gps-nomination.pdf?sfvrsn=9bc64bfa_0
10. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-06-safety-innovation-1-fly-by-wire-fbw>
11. <https://airandspace.si.edu/explore/stories/evolution-commercial-airliner>
12. <https://www.eviation.com/aircraft/>
13. <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/electric-power/hybrid-electric-electric-propulsion>



Alınma
01 Ocak 2020
Düzeltilme
01 Şubat 2020
Kabul
01 Mart 2020

* Sorumlu yazar.
e-mail: sorumlu yazar@mail.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- Eklemeli İmalat
- Yüzey Kalitesi
- İkincil İşlem
- Titanyum
- Lazer Parlatma

Eklemeli İmalat ile Üretilen Ti6Al4V Alaşımında İkincil İşlemlerin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Birinci Yazar¹, İkinci Yazar^{2*}, Üçüncü Yazar³, ...

¹ Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Ti6Al4V alaşımı, havacılık ve uzay endüstrilerinde sıkça tercih edilen bir malzemedir. Bu alaşım, yüksek spesifik mukavemet değeri, üstün korozyon direnci, düşük yoğunluğu ve yüksek kırılma tokluğu gibi özellikleri sayesinde, çeşitli uygulamalarda en fazla tercih edilen alaşımlardan biridir. Günümüzde Ti6Al4V alaşımıyla komponent üretiminde en çok tercih edilen yöntem, talaşlı üretimdir. Ne var ki, yüksek maliyet, fazla malzeme atığı ve geometrik sınırlamalar gibi çeşitli kısıtlamalar, araştırmacıları alternatif üretim yöntemleri keşfetmeye yönlendirmektedir. Bu alternatiflerin şu anda en popüler olanı ise eklemeli imalattır. Malzemeleri katman katman biriktirme ve bunların sinterlenmesi prensibi ile çalışan eklemeli imalat, karmaşık tasarım imkanları, malzeme verimliliği, hızlı prototipleme, kişiye özel üretim, hafif ve dayanıklı parça üretimi ile sürdürülebilirlik gibi avantajlarından dolayı ön plana çıkmaktadır. Ancak, eklemeli imalatın mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi gibi önemli dezavantajlarına henüz etkili bir şekilde çözüm üretilmemiştir. Bu dezavantajlardan en öne çıkanı düşük yüzey kalitesidir. Düşük yüzey kalitesi, malzemenin mekanik performansında azalmaya, korozyon hassasiyetinde artışa, yorulma ömründe düşüşe, görsel estetik sorunlara ve işlevselliğin azalmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı eklemeli imalat ile üretilen parçaların yüzey kalitesini geliştirmek için ikincil işlemlerin uygulanması günümüzde sık başvurulan bir yöntemdir. Bu çalışmanın ana amacı yüzey kalitesini geliştirmek için uygulanan ikincil işlemleri tek bir çalışma altında toplamaktır. Bu amaca yönelik olarak Türkiye ve dünyada bu konuda yapılan çalışmalar incelenmiş ve eklemeli imalat ile üretilen Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesi üzerinde ikincil işlemlerin etkisi tartışılmıştır.

The Effect of Secondary Processes on the Surface Quality of Ti6Al4V Alloy Produced by Additive Manufacturing

First Author¹, Second Author^{2*}, Third Author³, ...

¹ Department of aeronautical engineering, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Received
01 Ocak 2020
Revised
01 Şubat 2020
Accepted
01 Mart 2020

* Corresponding author.
e-mail:
coresponding@mail.edu.tr

Keywords:

- Additive Manufacturing
- Surface Quality
- Secondary processes
- Titanium
- Laser Polishing

Ti6Al4V alloy is a widely preferred material in the aerospace industries. Thanks to its high specific strength, superior corrosion resistance, low density and high fracture toughness, this alloy has been the most researched and used alloy in various applications. Today, machining is the most preferred method of component production with Ti6Al4V material. However, various constraints such as high cost, excess material waste and geometrical limitations have led researchers to explore alternative manufacturing methods. The most popular of these alternatives at present is additive manufacturing. Additive manufacturing, which works on the principle of layer-by-layer deposition of materials and their sintering, stands out due to its advantages such as complex design possibilities, material efficiency, rapid prototyping, customized production, lightweight and durable parts and sustainability. However, significant disadvantages of additive manufacturing, such as mechanical properties and surface quality, have not yet been effectively addressed. The most prominent of these disadvantages is low surface quality. Low surface quality causes various negative effects such as decreased mechanical performance of the material, increased corrosion susceptibility, decreased fatigue life, visual aesthetic problems and reduced functionality. For this reason, the application of secondary processes to improve the surface quality of parts produced by additive manufacturing is nowadays a common method. The main purpose of this study is to collect the secondary processes applied to improve surface quality under a single study. For this purpose, the studies carried out in Turkey and in the world on this subject are reviewed and the effect of secondary treatments on the surface quality of Ti6Al4V alloy produced by additive manufacturing is discussed.

1.Giriş (Introduction)

Ti6Al4V alaşımı, dünya genelinde tercih edilen titanyum alaşımları arasında en yaygın olanı olarak kabul edilmekte olup, küresel titanyum ürün pazarının neredeyse yarısını oluşturmaktadır. Ti6Al4V, ağırlıkça %6 Al ve %4 V içeren bir alfa-beta tipi titanyum alaşımıdır ve mükemmel korozyon direnci ile birlikte üstün bir mukavemet ve tokluk kombinasyonuna sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılık ve uzay uygulamalarında, uçak gaz türbin diskleri, motor muhafazası, kompresör bıçakları ve cerrahi implantlar gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır [1]. Ti6Al4V ürünlerinin geleneksel üretimi, hammaddeyi dövme, dökme ve haddeleme aşamalarını içerir ve bunun ardından nihai şekil ve boyutlara kadar işlenir. Ancak, bu konvansiyonel üretim süreçleri genellikle büyük miktarda malzeme israfına, yüksek üretim maliyetine ve uzun teslim sürelerine neden olur [2]. Bu koşullar altında, geometrik karmaşıklıklara sahip Ti6Al4V ürünlerinin imalatında kullanılan eklemeli üretim (EÜ), doğrudan CAD modellerinden ağ şekline yakın yapılar üretebilen ve katman katman malzeme ekleyen gelişmiş bir üretim teknolojisi olarak dikkate değer bir kapasite sunmaktadır [3,4].

Bilgisayar destekli tasarım kullanılarak üç boyutlu bir nesnenin katman katman oluşturulmasının ilk biçimi, 1980'lerde model ve prototip parçaların hızlı prototipleme amacıyla geliştirilen dönemde ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, mühendislerin tasarımlarını somut bir forma dönüştürmelerine yardımcı olmak üzere geliştirilmiştir. Hızlı prototipleme, önceki EÜ süreçlerinden birini temsil eder ve sadece modellerin değil, aynı zamanda fiziksel parçaların üretilmesine de olanak tanır. Bu sürecin ürün geliştirme alanında sunduğu temel avantajlar arasında zaman ve maliyet tasarrufu, etkileşim ve sonuç olarak ürün geliştirme döngüsü bulunmaktadır [5]. EÜ, düşük üretim hacimleri, karmaşık tasarımlar ve üretim sürecinde oluşan tasarım değişiklikleri gerekliliklerinde büyük ölçüde fayda yaratmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinin tasarım kısıtlamalarını aşarak, karmaşık parçaların üretimine olanak tanır [6]. Son yıllarda geniş bir kabul gören EÜ yöntemleri, sahip oldukları avantajlarla birlikte, belirli sınırlayıcı dezavantajlara da sahiptir. Özellikle yüzey kalitesi açısından, diğer üretim yöntemleriyle üretilmiş parçalara göre, EÜ ile üretilmiş parçalar daha belirgin bir pürüzlülük sergileme eğilimindedir [7]. Ancak, dinamik yükler altında çalışacak parçalarda etkili yüzey kalitesi aranmaktadır. Çünkü düşük yüzey kalitesi, parçanın korozyon ve yorulma direncini azaltarak istenilen performansın sağlanmasına engel olabilmektedir [8]. Eklemeli imalatın belirgin dezavantajını azaltmak amacıyla, imalat sonrasında parçalar genellikle ikinci bir işleme tabi tutularak yüzey kaliteleri iyileştirilmektedir.

Eİ ile üretilmiş metal parçaların yüzey iyileştirme aşamasında çeşitli yöntemlere başvurulabilmektedir. Bu yöntemlerin seçimi, kullanılan malzeme, parça boyutu, geometrisi, hedeflenen yüzey kalitesi, iç yapısındaki değişiklikler gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. Bu yüzey bitirme işlemleri, kendi içlerinde çeşitli avantajlar ve dezavantajlar içermektedir. Bu bağlamda, belirli işlemler hızlı ve üstün sonuçlar ortaya koyabilmektedir, ancak aynı zamanda karmaşık geometriye yüzeylere uygulanma zorluğuyla karşılaşılmaktadır. Öte yandan, bazı prosedürler karmaşık geometriye yüzeylere uygulanabilme yeteneğine sahip olmakla birlikte, bu durumda oldukça zaman alıcı olabilmektedir. Yüzey bitirme işlemleri genellikle mekanik, termal veya kimyasal temellere dayanmaktadır [9]. Bu işlemlerden bazılarını termal, lazer peening, lazerle parlatma, talaşlı imalat ve aşındırıcı son işlem şeklinde sıralanabilir. Eİ parçaları için uygulanan termal son işlem yöntemi, artık gerilmeleri önemli ölçüde hafifletebilir, çatlama olasılığını azaltabilir ve mikroyapıyı homojenleştirebilir [10]. Lazer peening, malzemenin yüzeyine dik olarak uygulanan bir plastik sıkıştırma işlemi olup, bu işlem yanıl genişlemelere neden olmaktadır. Kalın veya sınırlı parçalarda lazer peening uygulandığında, enine gerilmeye karşı direnç kapasitesi, yerel basınç gerilmelerinin birikmesine yol açmaktadır [11]. Lazerle parlatma, Eİ parçalarının yüzey kalitesini artırmak amacıyla potansiyel bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Lazer parlatma işlemi sırasında, enerji kaynağı malzemenin yüzeyini ışınladığında, morfolojik tepe noktaları hızla erime sıcaklığına erişebilir. Sıvı haldeki malzeme, yerçekimi etkisi ve yüzey geriliminin etkisi nedeniyle erimiş bir havuz oluştuktan sonra aynı seviyeye hızla yeniden dağılır. Lazer ışını yüzey taramayı sonlandırdığında, ısıdan etkilenen bölgenin sıcaklığı, erimiş havuzun katılaşmasına neden olarak yüzey pürüzlülüğünü azaltır [12]. Talaşlı imalat ve aşındırıcı son işlem, çeşitli sektörlerde kullanılan geleneksel üretim yöntemleri arasında yer alır. Bu yöntemler, fonksiyonel parçaların form doğruluğunu ve yüzey kalitesini artırmak amacıyla uygulanmaktadır. Bu geleneksel son işlem yöntemleri, Eİ parçalarında yaygın bir şekilde kullanılabilir kılınmıştır. Zira bu parçaların geniş bir kullanım alanı ve etkin performans gösterme özellikleri bulunmaktadır [13].

2. Titanyum (Titanium)

18. yüzyılın sonlarına doğru keşfedilen titanyum elementi, ticari anlamda kullanılmaya Amerika'da 1950'li yıllarda başlamıştır [15]. Yer kabuğundaki yaklaşık %0,6'lık konsantrasyonuyla, titanyum, alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra metaller arasında en bol bulunan dördüncü metal konumundadır. Kromdan 20 kat, nikelden 30 kat, bakırdan 60 kat, tungstenden 100 kat ve molibdenden 600 kat daha fazla olarak öne çıkmaktadır. Doğada genellikle rutile (TiO_2) veya ilmenit ($FeTiO_3$) mineralleri şeklinde bulunmaktadır. Bu metal, 1789 yılında William McGregor tarafından keşfedilmiştir. İlk kez %98-99 saflıkta titanyumun elde edilmesi ise 1910 yılına, Hunter tarafından gerçekleştirilmiştir [14]. Titanyumun %98'i, TiO_2 bileşiği olarak bilinen titanyum dioksit formunda bulunmaktadır ve genellikle madenlerden çıkartılarak işlenmektedir. Bu işlem, cevher ve madenlerin geniş alanlara yayılmasından kaynaklanan zorluklar içermektedir [16]. Titanyum elde etmek amacıyla, magnezyumun erime sıcaklığına kadar ısıtılarak argon ve helyum gazları kullanılmaktadır. Titan sıvı hale geldiğinde magnezyum ile reaksiyona girmekte ve bu da titanyumun oluşmasına yol açmaktadır [17]. Titanyum, hafif olmasına rağmen, oldukça sağlam mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin, öz kütlesi çeliğin neredeyse yarısı kadar olmasına rağmen, özgül dayanımı çeliğe göre daha yüksektir [18]. Titanyumun yorulma dayanımı diğer metallerle karşılaştırıldığında oldukça yüksektir ve ısıl genleşme katsayısı daha düşük olmasına rağmen, bu özelliği sayesinde yüksek sıcaklık koşullarında tercih edilebilir [19,20].

3. Titanyumun kullanım alanları (Usage areas of titanium)

Titanyum, 1790 yılında keşfedilmiş olmasına rağmen, geliştirilmesi 1900'lerin başlarına kadar uzanmıştır. Ayrıca, bu metal 20. yüzyılın ikinci yarısına kadar geniş çapta kullanılmamıştır. Ancak günümüzde, titanyum kullanımını desteklemek için yaklaşık 50 yıllık modern endüstriyel uygulama ve tasarım deneyimine sahiptir. Bu kullanımın büyük bir kısmı, uçaklar gibi askeri uygulamalarda veya gaz türbini motorlarında olduğu gibi öne çıkmaktadır. Özellikle SR71 uçağı titanyumun etkin olarak kullanıldığı bir

uçaktır. Daha yeni kullanım alanları arasında ise golf sopaları ve bisikletler gibi ürünler bulunmaktadır. Titanyum, benzersiz yoğunluğu, korozyon direnci ve alüminyum, çelikler ve süper alaşımlar gibi rakip malzemelere göre göreceli mukavemet avantajları sayesinde birçok sektörde önemli bir rol oynamaktadır [1]. Titanyumun en yaygın kullanılan alaşımlarından biri de Ti6Al4V alaşımıdır.

4. Ti6Al4V alaşımı (Ti6Al4V alloy)

Ti6Al4V, mühendislik, tıp ve araştırma alanlarında geniş bir kullanım alanına sahip olan çok-fazlı bir alaşımdır ($\alpha+\beta$). Alüminyum (Al, %6, α -stabilizatör) ve vanadyum (V, %4, β -stabilizatör) gibi alaşım elementlerinin yanı sıra, demir (Fe, %0.25) ve oksijen (O, %0.2) gibi iz elementleri de içerir. Temel olarak titanyumdan oluşan bu alaşım, özellikle performans ve mukavemet açısından çeşitli endüstri dallarında yaygın bir tercih haline gelmiştir. Alaşımın uygulanabilirlik alanı oldukça geniştir. Havacılık ve uzay endüstrisinde (türbin kanatları, yapısal elemanlar), biyomedikal alanda (osseointegrasyon, ortopedik cihazlar, diş implantları ve tekerlekli sandalyeler) ve spor ekipmanları sektöründe (golf sopaları, bisiklet çerçeveleri) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [21,22]. Malzeme, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, düşük elastik modül, in-vivo ortamlara karşı tam bir inertlik, korozyon direnci ve ayrıca kemik ile diğer dokularla entegrasyon kapasitesi gibi geniş kapsamlı özelliklere sahiptir [21,23]. Ancak, Ti64 alaşımı, uygulanabilirlik kapsamını sınırlayan özgün davranışsal özelliklere de sahiptir. Bu alaşım, ticari olarak saf (CP) titanyumdan daha yüksek mukavemetiyle bilinmektedir [24].

5. Eklemeli imalat (Additive manufacturing)

1980'li yıllarda başlayan gelişmeler sonucunda ortaya çıkan "3B baskı", aynı zamanda "hızlı prototipleme" ve "katı serbest biçimli imalat" gibi terimlerle anılan bir eklemeli imalat sürecidir. Bu yöntem, aşındırıcı imalat yöntemlerinden, özellikle freze ve torna gibi geleneksel yöntemlerden ayrılarak metal, plastik, kompozit ve çeşitli malzemeleri birleştirerek nesnelerin oluşturulmasını sağlar. Tasarım verileri kullanılarak malzemeler, katmanlar halinde bir araya getirilir. Bu nedenle, "katmanlı imalat" veya "eklemeli katmanlı imalat" terimleri de bu süreci tanımlamak için kullanılabilir [25,26]. Eİ terimi, endüstriyel uygulamalar için gereken özelliklere sahip parçaların yanı sıra prototiplerin üretimini (tasarım doğrulaması, form ve uygunluk kontrolü için), kalıpların ve konsept parçaların üretimini içeren geniş bir kapsama sahiptir [25].

Eİ metaller ve plastikler başta olmak üzere çeşitli malzemelere uygulanabilir. Sıfıra yakın malzeme atığı ile üretilmesinden dolayı parçaların üretimi sonrasında minimal işleme ihtiyaç duyar. Ayrıca, Eİ çok karmaşık ve detaylı geometrilere sahip parçaların üretimini başarıyla gerçekleştirebilir. Bu özellikleri sayesinde tasarımcılara ve mühendislere düşük hacimlerde ekonomik bir şekilde üretilebilecek benzersiz ürünler tasarlama esnekliği sunar. Tasarım özgürlüğünün bir örneği, geleneksel üretim yöntemleriyle mümkün olmayan tek bir karmaşık yapıda yeniden tasarlanabilmesidir. Eİ teknolojisinin çevresel ve ekolojik açıdan umut vadeden nitelikleri de bu yöntemi daha çekici kılmaktadır [27]. Eİ uygulama alanları ve gelecekte kullanılması düşünülen alanlar Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Belirli nihai pazarlara göre Eİ uygulamaları [28]

Sektörler	Güncel Uygulamalar	Gelecekteki Potansiyel Uygulamalar
Ticari Havacılık ve Savunma	<ul style="list-style-type: none">Konsept modelleme ve prototiplemeYapısal ve yapısal olmayan üretim parçalarıDüşük hacimli yedek parçalarKarmaşık motor parçaları	<ul style="list-style-type: none">Eklemeli olarak üretilen elektroniklerin doğrudan parçalara gömülmesiUçak kanadı bileşenleriDiğer yapısal hava taşıtı bileşenleri
Uzay	<ul style="list-style-type: none">Uzay araştırmaları için özel parçalar	<ul style="list-style-type: none">Uzayda talep üzerine parça/yedek parça

	<ul style="list-style-type: none"> Hafif, yüksek mukavemetli malzemelerin kullanıldığı yapılar 	<ul style="list-style-type: none"> Uzayda doğrudan üretilebilen büyük yapılar
Otomotiv	<ul style="list-style-type: none"> Son kullanım için hızlı prototipleme ve üretim otomobil parçaları Antika arabalar ve yarış arabaları için parçalar ve montajlar Araçların tamamı için hızlı parça üretimi 	<ul style="list-style-type: none"> Sofistike otomobil bileşenleri Otomobil bileşenlerinin düşük kaynaklarla üretimi
Tüketici ürünleri/perakende	<ul style="list-style-type: none"> Hızlı prototipleme Tasarım iterasyonlarının oluşturulması ve test edilmesi Kişiyeye özel mücevher ve saatler Sınırlı ürün özelleştirme Müşterilerle birlikte tasarlama ve yaratma 	<ul style="list-style-type: none"> Özelleştirilmiş yaşam alanları Tüketici ürünlerinde artan kitle özelleştirmesi.
Sağlık	<ul style="list-style-type: none"> Protezler ve implantlar Tıbbi aletler ve modeller İşitme cihazları ve diş implantları 	<ul style="list-style-type: none"> Organ nakli için organ geliştirme Büyük ölçekli ilaç üretimi Rejeneratif tedavi için insan dokularının geliştirilmesi

6.Eklemeli imalatın avantaj/dezavantajları (Advantages/disadvantages of additive manufacturing)

Eklemeli imalat geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu avantajlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir;

- Geleneksel yöntemlere kıyasla daha az takım ihtiyacı duymaktadır,
- Katman katman malzeme ekleyerek üretim yapıldığı için atık miktarı daha azdır,
- Sadece Eİ tezgahıyla, yardımcı ekipman olmasa bile, nihai ürünler üretilebilir,
- Karmaşık tasarımı olan zorlu geometrilerin üretimini mümkün kılar,
- Diğer yöntemlere kıyasla, iç yapısı daha homojen olan parçalar üretilebilir,

Dezavantajlarından bazıları da şu şekilde sıralanabilir;

- Tezgah maliyetleri yüksektir,
- Tezgah boyutları, üretilecek parça boyutlarını sınırlar,
- Eİ ile üretilen ürünlerde genellikle pürüzlü yüzeyler elde edilmektedir,
- Diğer üretim yöntemlerine kıyasla, tezgah malzemeleri ve bakım maliyetleri genellikle daha yüksektir,
- Hammadde tedarikindeki zorluklar, tekelleşme ve yüksek maliyetler gibi faktörlerle karşılaşılmaktadır,
- Eİ sektöründe deneyimli eleman eksikliği henüz giderilememiştir

7.Eklemeli imalat ikincil işlemler (Additive manufacturing post processing)

Eİ işleme süreci, tek aşamalı veya çok aşamalı olmak üzere iki farklı şekilde incelenebilir. Eğer hedeflenen ürün, işlem sırasında tek bir adımda elde ediliyorsa, bu durumda işlem tek aşamalı olarak adlandırılır. Diğer bir durumda, ürün, işlemin ardından uygulanan ikincil işlemlerle veya aşamalarla elde ediliyorsa, bu süreç çok aşamalı Eİ işlemi olarak tanımlanır. Eİ üretiminin ardından, nihai ürün elde edilmesi için ikincil işlemler önerilmekte ve uygulanmaktadır. Bu ikincil işlemler, üretim sonrasında parçaların mekanik, yüzey ve tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan işlemleri içermektedir. Yeni geliştirilen Eİ makinelerine, hibrit yeni nesil makinelerin üretimine başlanmıştır, bunlar da ikincil

işlemleri entegre ederek daha geniş bir işleme kapasitesi sunmaktadır. Genel anlamıyla ikincil işlemler aşağıdaki gibidir [29].

- Mekanik ikincil işlemler.
 - Son Paso Talaş Kaldırma
 - Manyetik aşındırıcı ile yüzey işlem
 - Tamburla yüzey işlem
 - Aşındırıcı akışkan ile yüzey işlem
 - Ultrasonik operasyonlar
 - Sürükleyerek yüzey işlem
 - Vibrasyonlu yüzey işlem
 - Bilyeli dövme
 - Ezerek parlatma
 - Püskürtme
- Kimyasal İkincil İşlemler
 - Kimyasal parlatma
 - Elektrokimyasal parlatma
 - Elektrokaplama
 - Kimyasal dağlama
 - Buharlı parlatma
 - Aseton daldırma
- Termal İkincil İşlemler
 - Lazerle dövme
 - Lazerle parlatma
 - Isıl işlem

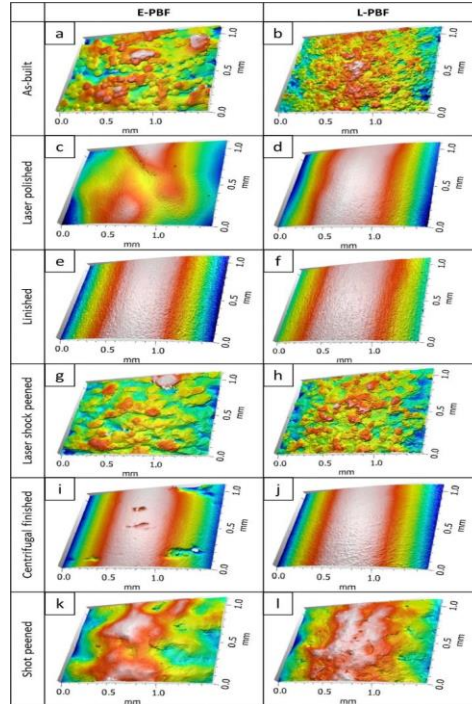
8.Literatür araştırması (Literature survey)

Havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan komponentlerden ilk beklenen hafifliktir. Bununla beraber, gün geçtikçe çalışma koşullarının zorlaşması ve bu koşullara dayanıklılık da beklentiler arasındadır. Günümüz şartlarında üstün korozyon direnci, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı titanyum alaşımları bu beklentileri karşılayan malzemelerden biridir [30]. Havacılık uygulamaları için en bilinen titanyum alaşımlarından olan Ti6Al4V'nin geleneksel üretim süreci, öncelikle dökme hammaddelerin dövülmesini, ardından haddelenmesini ve nihayetinde istenen şekil ve boyutlara işlenmesini içermektedir. Ancak, bu geleneksel üretim metotları büyük miktarlarda malzeme israfına, geometri kısıtlamasına, yüksek üretim maliyetlerine ve uzun teslim sürelerine neden olmaktadır. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için geliştirilen alternatif üretim yöntemlerinden en kabul göreni Eİ'dir. Eİ, geleneksel üretim yöntemlerinin aksine katman katman malzeme ekleyerek CAD modellerinden karmaşık geometrileri üretebilen gelişmiş bir üretim teknolojisidir ve Ti6Al4V ürünlerinin imalatında önemli avantajlar sunmaktadır. Ancak Eİ, yüzey kalitesi, maliyet, boyut hassasiyeti, kalite standartları, üretim parametrelerinin henüz optimize edilmemiş olması ve güvenilirlik gibi çeşitli dezavantajları barındırmaktadır [31]. Bu dezavantajların giderilmesi için imalatçılar ve araştırmacılar yoğun bir mesai harcamaktadır ve sonuçlarını literatüre sunmaktadırlar. Örneğin; Yıldırım ve ark. [34] SLM ile üretilen Ti6Al4V numuneleri için işlem parametrelerini lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer odak çapı olarak belirlemiş ve yüzey kalitesine etkilerini analiz etmişlerdir. Değişken parametrelere ait değerler kullanılarak 16 adet Ti6Al4V üretilmiştir (Tablo 2). Üretilen deney numunelerine Taguchi dikey dizini kullanılarak deney tasarımı ve sonuçların analizini yapmışlardır. S/N analizi yaparak gerçekleştirdikleri optimizasyonda en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini veren işlem parametreleri 250 W lazer gücü, 60 µm tarama mesafesi, 75 µm lazer odak çapı ve 150 mm/s tarama hızı olarak bulduklarını iddia etmişlerdir.

Tablo 2. SLM yönteminde kullanılan değişken işlem parametre ve değerleri.

Proses Parametreleri	Parametre Seviyeleri
Lazer Gücü (W)	190,210,230,250
Tarama Mesafesi (μm)	60,90,120,150
Tarama Hızı (mm/s)	150,300,450,600
Lazer Odak çapı (μm)	75,80,85,90

Sadali ve diğ. [36] SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V örnekleri üzerinde, tarama hızı parametresinin mikro gözenekler, yüzey morfolojisi ve pürüzlülük üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İncelemede, 695, 775 ve 853 mm/sn gibi farklı tarama hızı değerleri kullanılmıştır. Numunelerin işlenmesinde kullanılan parametreler arasında 775 mm/sn tarama hızı, 175 W lazer gücü, 0.12 mm tarama mesafesi ve 30 μm katman kalınlığı kullanılarak üretilen numunelerin yüzey morfolojisi ve mikro yapısının yüksek kalitede olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmalarının sonuçlarına göre, minimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) değeri olarak 0.506 μm elde edildiğini ifade etmişlerdir. Burada bazı örnekleri verilen literatür incelendiğinde çalışmaların ağırlıklı olarak üretim parametrelerinin optimize edilmesine yönelik olduğu görülmektedir. Ancak, doğru parameter grubu ile üretilse dahi sorun olmayan devam edecek şeylerden birisi de yüzey kalitesidir. Bu nedenle yüzey kalitesini geliştirmek için ikinci işlemlerin uygulanması önem arz etmektedir ve literatürde bununla ilgili çalışmaların sayısı azımsanmayacak seviyededir. Örneğin; Kahlin ve ark. [32] iki farklı (E-PBF ve L-PBF) eklemeli üretim yöntemi kullanarak sabit üretim parametreleri altında Ti6Al4V alaşımı üretmişlerdir. Üretilen deney numunelerine beş farklı ikincil işlem (lazer polishing, linishing, laser shock peening, centrifugal finishing, shot peening) uygulamışlardır. Elde edilen yüzey kalitesini değerlendirebilmek adına yüzeylere ait topoğrafya haritaları çıkarılmış ve yüzey kaliteleri değerlendirilmiştir. Doğru bir değerlendirme yapabilmek için ikincil işlemsiz bir yüzeyi de analize dahil etmişlerdir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar en iyi yüzey kalitesinin linished uygulanmış numunede elde edildiğini rapor etmişlerdir. Uygulanan işleme göre yüzeylerin topoğrafya haritası Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Üretildiği gibi ve ikincil işlem uygulanmış numuneler için ölçülen yüzey topografyasına genel bir bakış. Görüntülerin eğrilik düzeltilmesi yapılmadığına dikkat edin. (a) E-PBF üretildiği haliyle, (b) L-PBF üretildiği haliyle, (c) E-PBF lazerle parlatılmış, (d) L-PBF lazerle parlatılmış, (e) E-PBF astarlanmış, (f) L-PBF

astarlanmış, (g) E-PBF lazerle şoklanmış, (h) L-PBF lazerle şoklanmış, (i) E-PBF santrifüjle işlenmiş, (j) L-PBF santrifüjle işlenmiş, (k) E-PBF atış küreleme, (l) L-PBF atış küreleme.

Benzer şekilde Nesli ve ark. [35] EBM yöntemi kullanarak, 30 mm (x) × 10 mm (y) × 10 mm (z) boyutlarındaki Ti-6Al-4V numunelerini ARCAM A2X EBM makinesinde üretmişlerdir. Optimum sonuçlar elde etmek için ARCAM A2X ile işlem parametrelerini belirlemiş ve bu kapsamda katman kalınlığını 50 µm olarak ayarlamışlardır. Bağlı yoğunluğu %98 olan bir numune ürettikten sonra üzerine lazer parlatma olarak adlandırılan ikincil işlemi uygulamışlar ve yüzey kalitesi bakımından incelemişlerdir (Tablo 3). Lazer parlatma EBM Ti-6Al-4V parçasının yüzey pürüzlülüğünü lazer parametrelerine bağlı olarak %75,1 ila %91,6 oranında azaltmıştır. Dolayısıyla lazer parlatma EBM Ti-6Al-4V parça yüzeylerinde yüzey kalitesini as-built yüzeylere kıyasla yüksek miktarda iyileştirdiğini öne sürmüşlerdir. Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri Tablo 3'te sunulmuştur. Yaşar [37] SLE (Seçici Lazer Erime) yöntemi kullanarak, tarama hızı ve lazer gücü parametrelerini değiştirdiği titanyum alaşım (Ti6Al4V) 6 adet numunenin üretildiği bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu numunelere, mekanik ve tribolojik özelliklerini artırmak amacıyla ısıl işlem ve kumlama işlemi uygulanmıştır. Araştırmanın sonuçları, yüzey pürüzlülüğü (Ra), mikrosertlik testleri (Vickers), aşınma testleri ve mikroyapı analizi (SEM) gibi çeşitli çıktı parametrelerini içermiştir. İkincil işlemlerin uygulanması, Ra değerinin artmasına yol açmıştır. En yüksek Ra değeri, 800 mm/s tarama hızına sahip numunede ortaya çıkmış olup aynı zamanda ısıl işlem görmüş ve kumlanmış, bu değer 19,51 µm olarak belirlenmiştir. Isıl işlemler ve kumlama gibi ikincil işlemler, sertliği artırmıştır; en üst düzeyde sertlik, 1000 mm/s tarama hızına sahip ve ısıl işlem uygulanmış, ardından kumlanmış numunede 359 HV olarak kaydedildiğini iddia etmiştir.

Tablo 3. Lazer parlatma deneysel çalışmalarında kullanılan sabit ve değişken lazer parametreleri

Sabit Lazer Parametreleri	Değer	Değişken Lazer Parametreleri	Değer
Dalga Boyu	1030–1080 nm	Lazer Gücü	300-800 W
Kollimatör Odak Uzunluğu	50 mm	Tarama Hızı	100-450 mm/sn
Odak Uzunluğu	250 mm	Kapak Aralığı	0.02-0.04 mm
Nokta Çapı	250 µm	Darbe Genişliği	0.0002-0.0007 s
Çalışma Alanı Boyutu	160mm × 160mm × 254mm (x-y-z)	Tarama Stratejisi	Zig Zag & Uni-directional

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma, günümüzde giderek artan hassasiyet gereksinimleriyle öne çıkan sektörlerde, eklemeli imalatın gelecekteki üretim proseslerini şekillendireceği önemli bir gerçeği vurgulamaktadır. Özellikle havacılık endüstrisinde, eklemeli imalatın sunduğu avantajlar, hafif yapıli bileşenlerin, karmaşık geometrilerin ve hassas tasarımların üretimindeki kısıtlamaları aşma potansiyeline sahiptir. Bu araştırma, Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatla üretilmesi sürecinde, üretim parametrelerinin ve sonrasında uygulanan ikincil işlemlerin tribolojik ve mekanik özellikleri nasıl etkilediğini detaylı bir şekilde incelemektedir. Özellikle yüzey pürüzlülüğünün malzeme performansındaki kritik rolünü vurgulayarak, elde edilen bulgular gelecekteki eklemeli imalat uygulamalarında daha üstün performans elde etme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ti6Al4V alaşımının, hem mekanik özellikleri hem de işlenebilirliği

açısından eklemeli imalatla sıkça tercih edilen bir malzeme olması, bu çalışmanın bulgularını daha da önemli kılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, eklemeli imalatın havacılık ve uzay sektörlerinde yaygın bir şekilde benimsenmesinin, malzeme mühendisliği ve tasarım alanlarında nasıl bir dönüşüme neden olabileceğine dair önemli bir perspektif sunmaktadır. Gelecek çalışmalar, bu alandaki bilgi boşluklarını doldurarak, eklemeli imalat yöntemlerinin titanyum alaşımları gibi önemli malzemelerle uyumlu hale getirilmesine ve daha geniş bir uygulama yelpazesine yayılmasına katkı sağlayabilir. Bu, endüstriyel uygulamalarda eklemeli imalatın daha fazla benimsenmesini ve bu teknolojinin potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirmesini destekleyebilir [2].

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Donachie, M. J. (2000). *Titanium: a technical guide*. ASM international.
2. Liu, S., & Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552.
3. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., & Borille, A. V. (2015). Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. *Procedia Cirp*, 35, 55-60.
4. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., ... & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of cleaner production*, 135, 1559-1570.
5. Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
6. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive manufacturing technologies* (Vol. 17, pp. 160-186). Cham, Switzerland: Springer.
7. Kumbhar, N. N., & Mulay, A. V. (2018). Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 99, 481-487.
8. Ippolito, R., Iuliano, L., & Gatto, A. (1995). Benchmarking of rapid prototyping techniques in terms of dimensional accuracy and surface finish. *CIRP annals*, 44(1), 157-160.
9. Ermergen, T., & Taylan, F. (2020). EKLEMELİ İMALAT İLE İMAL EDİLMİŞ METAL PARÇALARIN YÜZEY BİTİRME İŞLEMLERİ. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 12(1), 45-55.
10. Maamoun, A. H., Elbestawi, M., Dosbaeva, G. K., & Veldhuis, S. C. (2018). Thermal post-processing of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting using recycled powder. *Additive Manufacturing*, 21, 234-247.
11. Hackel, L., Rankin, J. R., Rubenchik, A., King, W. E., & Matthews, M. (2018). Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing. *Additive Manufacturing*, 24, 67-75.
12. Wang, Q., Morrow, J. D., Ma, C., Duffie, N. A., & Pfefferkorn, F. E. (2015). Surface prediction model for thermocapillary regime pulsed laser micro polishing of metals. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 340-348.
13. Bai, Y., Chaudhari, A., & Wang, H. (2020). Investigation on the microstructure and machinability of ASTM A131 steel manufactured by directed energy deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 276, 116410.
14. Perihan, O. Y. A. R. (2015). Titanyum ve Özellikleri. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 25, 151-159.
15. Greitemeier, D., Dalle Donne, C., Syassen, F., Eufinger, J., & Melz, T. (2016). Effect of surface roughness on fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V. *Materials Science and Technology*, 32(7), 629-634.
16. Weissbach, W., Anık, S., Anık, E. S., & Vural, M. (1998). *Malzeme bilgisi ve muayenesi*. Birsen Yayınevi.
17. YAMAN, K. (2018). Ti6Al4V alaşımı yüzeyinde hidrotermal yöntemi ile hidroksiapatit (HAP) oluşturulması/Creating hydroxyapatite (HAP) by hydrothermal method in Ti6Al4V alloy surface.
18. Henriques, V. A. R., Galvani, E. T., Petroni, S. L. G., Paula, M. S. M., & Lemos, T. G. (2010). Production of Ti-13Nb-13Zr alloy for surgical implants by powder metallurgy. *Journal of materials science*, 45, 5844-5850.

19. Anselme, K., & Bigerelle, M. (2005). Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion. *Acta biomaterialia*, 1(2), 211-222.
20. ENSARİOĞLU, C., & ÇAKIR, M. C. (2005). Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü-Bölüm I. *Mühendis ve Makina*, 46(546), 36-46.
21. Pottirayil, A., & Kailas, S. V. (2017). Dry sliding wear behavior of Ti-6Al-4V pin against SS316L disk at constant contact pressure. *Journal of Tribology*, 139(2), 021603.
22. Bhattacharyya, D., Viswanathan, G. B., Vogel, S. C., Williams, D. J., Venkatesh, V., & Fraser, H. L. (2006). A study of the mechanism of α to β phase transformation by tracking texture evolution with temperature in Ti-6Al-4V using neutron diffraction. *Scripta Materialia*, 54(2), 231-236.
23. Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants-A review. *Progress in materials science*, 54(3), 397-425.
24. Chiou, S. T., Tsai, H. L., & Lee, W. S. (2007). Effects of strain rate and temperature on the deformation and fracture behaviour of titanium alloy. *Materials transactions*, 48(9), 2525-2533.
25. Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of mechanical engineering*, 8, 215-243.
26. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., ... & Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593-612.
27. Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 389-405.
28. Vitale, M., Cottelear, M., & Holdowsky, J. (2016). An overview of additive manufacturing. *Defense AT&L, November-December*, 6-13.
29. Şirin, T. B. (2021). *Elektron Demeti Ile Ergitme Eklemeli Imalat Yöntemiyle Üretilen Farklı Geometrilerdeki Ti-6Al-4V Alaşım Malzemelerine Uygulanan İkincil İşlemlerin Malzemenin Yüzey Bütünlüğüne Etkisinin İncelenmesi* (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)).
30. Lin, Z., Song, K., & Yu, X. (2021). A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 24-45.
31. Nakatani, M., Masuo, H., Tanaka, Y., & Murakami, Y. (2019). Effect of surface roughness on fatigue strength of Ti-6Al-4V alloy manufactured by additive manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, 19, 294-301.
32. Kahlin, M., Ansell, H., Basu, D., Kerwin, A., Newton, L., Smith, B., & Moverare, J. J. (2020). Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue*, 134, 105497.
33. Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of materials engineering and performance*, 22, 3872-3883.
34. AYDIN, D. S., Özsoy, A. L., & YILDIRIM, Ç. V. (2022). Ti6Al4V Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Taguchi Metodu Kullanılarak Proses Parametrelerinin Optimizasyonu. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 230-236.
35. Nesli, S., & Yılmaz, O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 271-289.
36. Sadali, M. F., Hassan, M. Z., Ahmad, F., Yahaya, H., & Rasid, Z. A. (2020). Influence of selective laser melting scanning speed parameter on the surface morphology, surface roughness, and micropores for manufactured Ti6Al4V parts. *Journal of materials research*, 35(15), 2025-2035.
37. Yaşar, S. (2023). *Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalat yöntemiyle üretiminde işlem parametreleri değişiminin tribolojik özelliklere etkisi* (Doctoral dissertation, Bursa Uludağ University (Turkey)).

Aktif ve Pasif Akışların Kanat Profili Üzerine Etkisi

Mücahit Yazanel

Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Hava araçlarının hareketi sırasında kanat yüzeyi üzerinde oluşan sürükleme kuvveti, aerodinamik performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Bir kanat profilinin aerodinamik açıdan yüksek verimliliği için taşıma kuvvetinin yüksek; sürükleme kuvvetinin düşük olması beklenir. Sürükleme kuvvetini azaltma yönünde geçmişten günümüze kadar pek çok araştırmalar, deneysel çalışmalar ve çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu durum sınır tabakanın inceltilerek model üzerindeki akım ayrılmasının geciktirilmesi ile mümkündür. Bu bağlamda akış kontrol yöntemleri önem kazanır. Akış kontrol yöntemleri, akış kontrol özelliklerine göre aktif ve pasif olmak üzere iki farklı akış kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Pasif akış kontrol yönteminde, sisteme herhangi bir enerji girişi uygulanmadan çeşitli cihazların eklenmesi ve yüzey üzerinde yapısal değişikliklerin yapılmasıyla uygulanan bir kontrol yöntemidir. Pasif akış kontrol yönteminin aksine aktif akış kontrol yöntemlerinde yüzeyde üfleme ve emme, akustik uyarım, DBD plazma aktüatör, periyodik dönme veya salınım gibi harici bir enerji girdisinin olmasıdır. Aktif akış kontrolünde sistemin enerji girişiyle kontrol edilmesi pasif akış kontrol yöntemine göre tepki süresini kısa tutmakla birlikte anlık tepki imkanı sağlamaktadır. (Akansu vd., 2013)

ABSTRACT

The drag force that occurs on the wing surface during the movement of aircraft negatively affects aerodynamic performance. For high aerodynamic efficiency of an airfoil, the lift force is high; The drag force is expected to be low. Many researches, experimental studies and various applications have been carried out from past to present to reduce the drag force. This is possible by delaying the flow separation on the model by thinning the boundary layer. In this context, flow control methods become important. Two different flow control methods, active and passive, have been developed according to flow control features. Passive flow control method is a control method applied by adding various devices and making structural changes on the surface without applying any energy input to the system. Unlike passive flow control methods, active flow control methods involve an external energy input such as blowing and suction on the surface, acoustic stimulation, DBD plasma actuator, periodic rotation or oscillation. In active flow control, controlling the system with energy input keeps the response time shorter compared to the passive flow control method and provides instant response. (Akansu vd., 2013)

1. Giriş (Introduction)

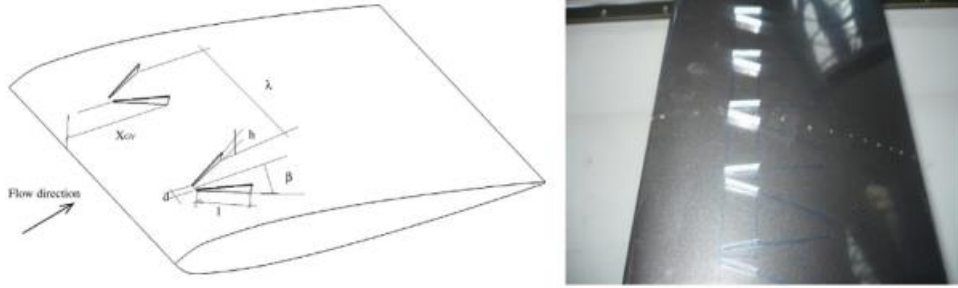
Bir kanat profilinin aerodinamik açıdan yüksek verimliliği için taşıma kuvvetinin yüksek; sürükleme kuvvetinin düşük olması beklenir. Bu durum sınır tabakanın inceltilerek model üzerindeki akım ayrılmasının geciktirilmesi ile mümkündür. Bu bağlamda akış kontrol yöntemleri önem kazanmaktadır. Akış kontrol yöntemleri, akışın özelliklerine göre aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılır.

1.1. Pasif Akış Kontrol Yöntemi (Passive Flow Control Method)

Pasif akış kontrolü; girdap üreteçleri (Anders, 2000) ve kavite (Chernyshenko vd., 2003) olduğu gibi çıkıntılı veya girintili yüzey yapılarına sahip şekillerden oluşup akım ayrılmasını geciktirmeye yönelik yöntemlerdir. Pasif akış kontrol yönteminde enerji kullanılmadan sadece yapısal değişiklikler

uygulanarak akış özelliklerinde iyileştirmeler yapılır. Bu yöntemler ile model üzerinde sürüklemenin azalması sağlanırken aerodinamik verimde bir artış gözlemlenir. (Akbıyık, 2014)

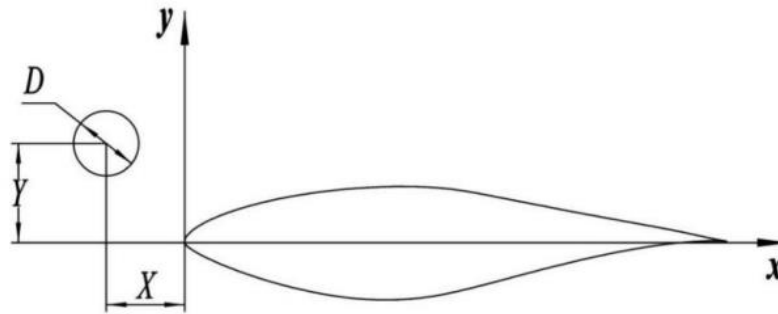
1.1.1. NACA4415 Kanat Profiline Vorteks Üreteci Uygulama (NACA 4415 airfoil using vortex generators)



Şekil 1. Kanat vorteks üreteçli (Wing with vortex generators)

Fouatih vd. (2016) çalışmalarında akış ayrılmasını kontrol etmek için girdap üreteçlerini Şekil 1’de olduğu gibi NACA 4415 kanat profiline uygulayarak deneysel çalışma yapmışlardır. Optimal konfigürasyonu bulmak için beş geometric parameter denemesi üzerine uygulama yapmışlardır. Girdap üretecinin kalınlık, yükseklik, konum ve açı yönlendirme gibi farklı konfigürasyonları incelemişlerdir. Deneylerini 2×10^5 Reynolds sayısında ve 21 m/s hızında yapmışlardır.

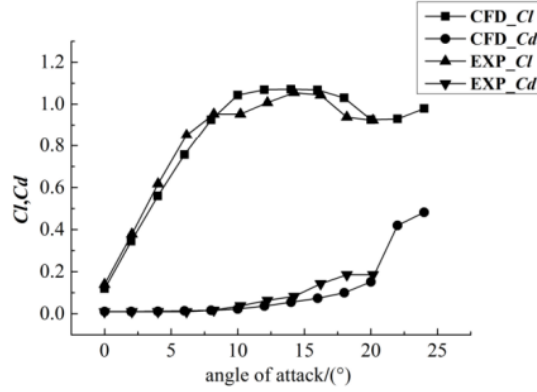
1.1.2 Salınımlı Mikro Silindir Kullanarak Stall Halindeki Kanat Profilinin Pasif Akış Kontrolü (Passive Flow Control of a Stalled Airfoil Using an Oscillating Micro-cylinder)



Şekil 2. S809 hücum kenarına yakın mikro silindir şeması (Schematic of micro-cylinder near the S809 leading edge)

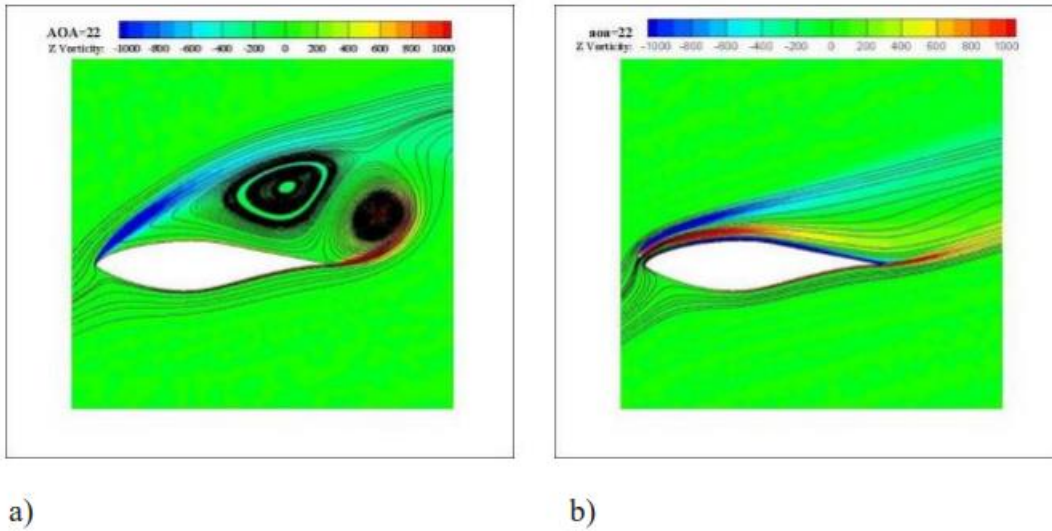
Shi vd. (2019)), çalışmalarında Şekil 2’de görüldüğü gibi S809 kanat profili hücum kenarına yakın konuma salınımlı mikro silindir konumlandırarak pasif akış kontrolünü 1×10^6 Reynolds sayısında sayısal olarak incelemiştir. Kanat profili veter uzunlu $c=0.5\text{m}$ ’dir. Mikro silindir etkisini gözlemlemek için mikro silindir olan ve olmayan çalışmaları farklı hücum açılarında uygulamıştır. Statik ve salınımlı olarak kullanılan mikro-silindirlerde; statik mikro silindir $10^\circ - 24^\circ$ hücum açısı arasında aerodinamik performansta iyileşme sağlamıştır. Daha sonrasında statik mikro silindiri salınımlı olanla değiştirip

çalışmasını tekrarladığında statik mikro silindirin akışı iyi kontrol edemediği durumlarda, salınlı silindir ile daha iyi bir akış kontrol elde edilebileceğini saptamıştır. Aynı kaldırma sürüklenme oranında salınlı mikro silindirin çapının statik mikro silindir çapından daha küçük olduğu görülmüştür.



Şekil 3. S809 kanat profili kaldırma ve sürüklenme katsayısının deneysel ve sayısal olarak farklı hücum açılarında karşılaştırılması (The comparison of lift and drag between numerical simulation of single S809 with experimental at different angle of attack)

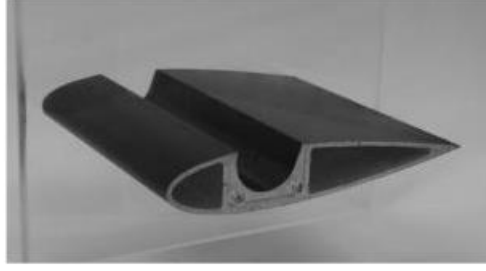
Şekil 3'te görüldüğü üzere sayısal çalışmasını deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmıştır ve sayısal çalışmasını doğrulamıştır.



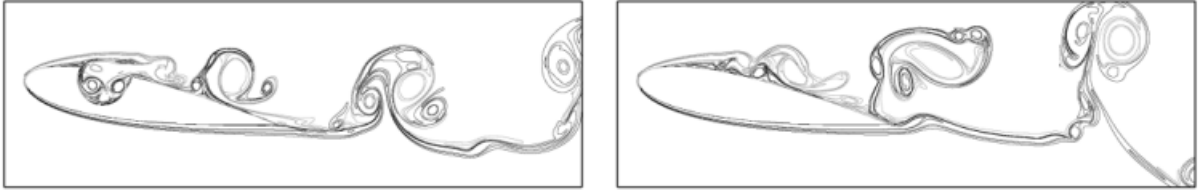
Şekil 4. a) 22° hücum açısında streamline vorteks b) Mikro silindir eklenmiş kanat profilinde 22° hücum açısında streamline vorteks (a) Streamline- vorticity at 22° attack angle b) Streamline- vorticity at 22° attack angle with micro-cylinder)

Shi vd. (2018) Şekil 4'te görüldüğü üzere analiz simülasyonlarında 22° hücum açısında akış kontrolü uygulanmayan kanat profili yüzeyinden akış daha erken ayrılır ve ayrılan akış daha geniş iz bölgesi oluşturduğunu simüle etmişlerdir. Mikro silindir olan modelde ise akım ayrılmasının firar kenarına yaklaştığını ve akışın kontrol edildiğini göstermişlerdir.

1.1.3 Cavity Akış Kontrol Yöntemi (Cavity Flow Control Method)



Şekil 5. Cavity oluşturulmuş NACA0018 kanat profili (NACA0018 airfoil with cavity)



Şekil 6. Cavity Modelin Kanat Profili Akışına Etkisi (Effect of cavity model on airfoil flow)

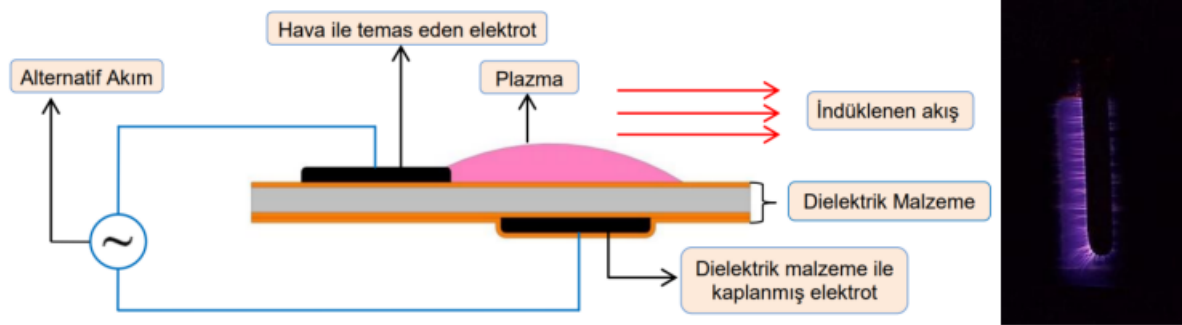
Olsman ve Colonius, (2011), çalışmasında şekil 5' te gibi kanat profiline cavity ekleyerek kaldırma-sürüklenme oranını DNS sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemiyle sayısal olarak incelemiştir. 165mm chord uzunluğuna sahip kanat profilinde cavity genişliği 34mm olarak tasarlamıştır. Çalışmaları cavity olan kanat profilinin, normal kanat profiliyle karşılaştırıldığında daha yüksek kaldırma-sürüklenme oranlarına sahip olduğunu göstermiştir. Kaldırma-sürüklenme oranındaki en önemli artış, 10° hücum açısında gözlemlenmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi cavity içerisinde akış vorteksleri oluşmaktadır ve akış yüzeyden ayrılması geciktirilmektedir.

1.2 Aktif Akış Kontrol Yöntemi (Active Flow Control Method)

Pasif akış kontrollerinden farklı olarak aktif akış kontrolleri, akış kontrolü yapılacak sisteme enerji verilmesi tekniğine dayanır. Aktif akış kontrol yöntemlerine yönelik çalışmalara Dielektrik Bariyer Deşarj (DBD) plazma aktüatörü (Thomas vd., 2008) , yüzey ısıtma veya soğutma (Aris vd., 2008), akustik uyarma (Hsiao & Shyu, 1991), sisteme salınımlı veya dönen parçalar ekleme (Béra vd., 2000; Schulmeister vd., 2017) ve sentetik jet (Smith vd., 1998) örnek verilebilir. Literatürdeki bu çalışmalar aktif akış kontrol yöntemleri sayesinde uçakların durma (stall) açısını, taşıma kuvvetini, yakıt verimliliğini ve manevra kabiliyetini artırmasının yanı sıra laminar rejimden türbülanslı rejime geçişin hızlandırılabilceğini göstermektedir.

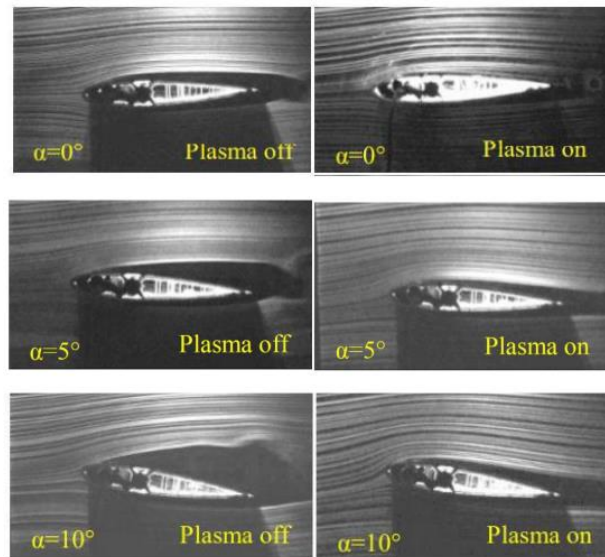
1.2.1 DBD Plazma Aktüatör (DBD Plasma Actuator)

Plazma aktüatörler iki elektrottan ve bu elektrotların arasına yerleştirilen bir dielektrik malzemenin oluşur. Elektrotlardan biri havaya maruz bırakılırken diğeri dielektrik malzeme ile gömülüdür (Corke vd., 2007). Elektrotlara yüksek AC voltajı uygulandığında elektrik potansiyeli en yüksek olan bölgede iyonizasyon meydana gelir ve bu da plazma deşarj bölgesini oluşturur. İyonların çarpışmasıyla oluşan momentum ortam havasına aktarılır ve plazma aktüatörü, cismin yüzeyindeki iki elektrot arasında bir hız oluşturur. Böylece hava hızlandırılır ve akışın yüzeyden ayrılması geciktirilir. Bu sayede kontrollü bir akış elde edilir. DBD plazma aktüatörleri, hareketli parçası olmayan tamamen elektrikli cihazlar olması sebebiyle sisteme anlık tepki vermektedir.(Choi vd., 2015)

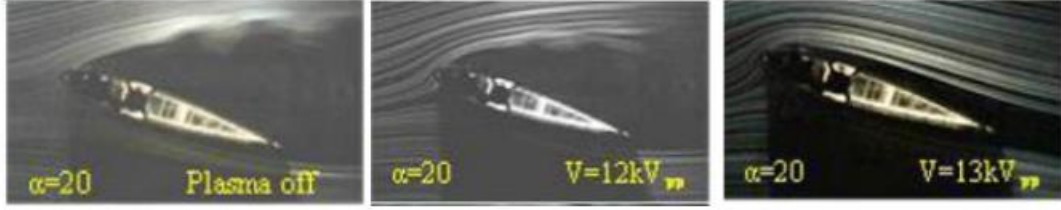


Şekil 7. (a) DBD plazma aktüatör şeması (b) Plazma deşarj bölgesi (a)DBD plasma actuator diagram b) Plasma discharge zone)

Şekil 7 (a)'da görüldüğü üzere DBD plazma aktüatörler iki elektrot ve bu elektrotlar arasına yerleştirilmiş dielektrik malzemeden oluşmaktadır. Elektrotlardan biri havaya maruz bırakılırken diğeri dielektrik malzeme ile kaplanır. Elektrotlara alternatif akım uygulandığında Şekil 7 (b)'de görülen plazma deşarj bölgesi elde edilerek akış indüklenir ve akışın yüzeye tutunması sağlanır. Bu yöntemle hava araçlarında kanat üzerinde akış kontrolü yapılabilmektedir. Bu sistemin avantajları; Hareketli parça içermemesi, hafif olması, otomatik çalışma özelliği, düşük üretim maliyeti, hızlı tepki verme, sağlamlık, basit üretim, düşük güç tüketimi, yüksek frekanslı gerçek zamanlı kontrol yeteneği, kolay ve hızlı bakım kontrolleridir. Ayrıca geniş frekans aralıklarında hızlı tepki verir ve yüksek voltaj (tipik olarak 1-100 kHz'de 5-50 kV) uygulandığında sınır tabakasındaki hava akışını 10 m/s'ye kadar hızlandırır. Böylece akışın yüzeye tutunmasına yardımcı olur (Neretti, 2016).



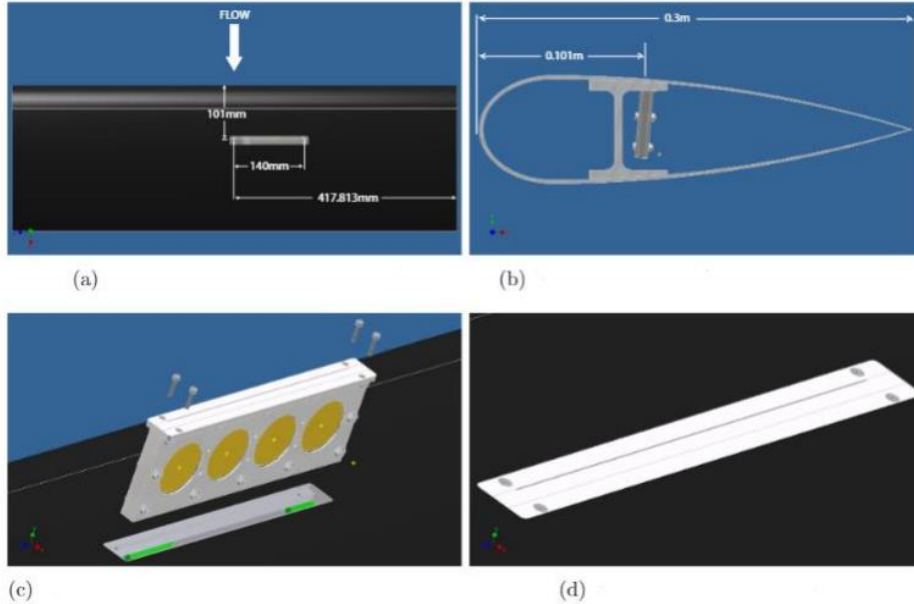
Şekil 8. NACA0015 kanat profili etrafında akış yapısı (Flow structure around NACA0015 airfoil) (Akansu vd.,)



Şekil 9. Akış yapısına farklı voltaj değerlerinin etkisi (Effect of different voltage values on flow structure) (Akansu vd., 2013)

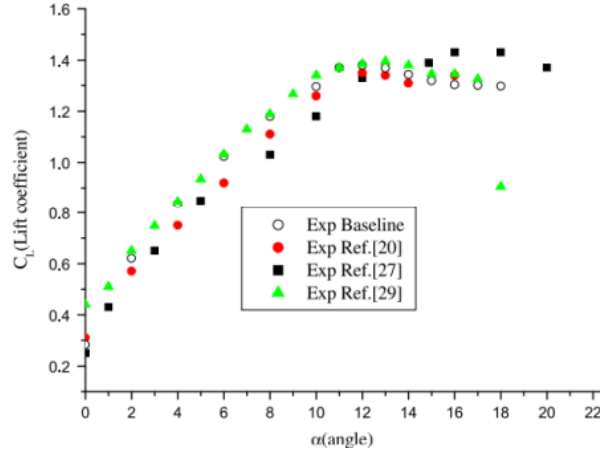
Akansu vd. (2013) yaptıkları çalışmada, plazma aktüatörünü kanat profiline 0° , 5° , 10° hücum açısında 12 kV voltaj ve 4 kHz frekansta uygulamıştır. Plazma aktüatörü $Re = 15000$ 'de ve $x/c = 0,1$ konumunda deneysel çalışmasını yapmıştır. Hücum açısı arttıkça üst yüzeyde akım ayrılması hücum kenarına doğru kademeli olarak artmaktadır ve iz bölgesi genişliği artmaktadır. Hücum açısı $\alpha = 20^\circ$ 'ye yükseldiğinde DBD plazma aktüatörün etkisini büyük oranda kaybetmiştir. Daha sonra deney 13 kV ile tekrarlanılarak, kanat yüzeyinden ayrılan akış tekrar kontrol edilmiştir (Şekil 9). Dielektrik tabaka kalınlığının ve voltaj değerinin arttıkça indüklenen hızın arttığı sonucuna varmışlardır. Kaldırma katsayısı değeri, plazma açıkken 10° hücum açısında, $Re 30000$ 'de, 1,9 m/s'lik serbest akış hızlarında 0,5'ten 1,0'a yükseldiğini elde etmişlerdir. Kanat profili geometrisi 150 mm giriş uzunluğuna ve 570 mm açıklık uzunluğuna sahiptir.

1.2.2 Sentetik Jet Akış Kontrol Yöntemi (Synthetic Jet Flow Control Method)

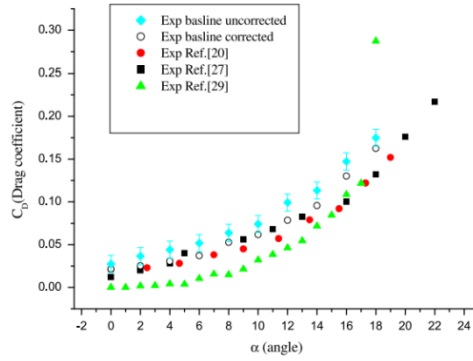


Şekil 10. a) NACA 0025 üst görünüm b) Naca 0025 ve sentetik jet aktüatör yan görünüm c) Tasarım genişlemesi NACA 0025 ve Sentetik Jet d) NACA 0025 + Sentetik Jet Aktüatör (a)Top view of NACA 0025 airfoil b) Side view of NACA 0025 airfoil+ sentetik jet actuator c) Exploded assembly NACA 0025 airfoil + sentetik jet actuator d) NACA 0025+ sentetik jet actuator) Goodfellow (2010), çalışmasında NACA 0025 kanat profili için şekil 10'da görüldüğü gibi sentetik jet uygulaması yaparak akış özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Deneyler Reynolds sayısı 100,000 ve hücum açısı $\alpha = 5^\circ$ 'de gerçekleştirilmiştir. Sentetik Jeti kanat yüzeyinin hemen altına monte etmiştir. Kanat profili veter uzunluğu 30 cm, akış hızı 2.8m/s – 18m/s aralığındadır. Çalışmasında farklı voltaj değerlerinin sürüklenme katsayısı üzerine etkisini de incelemiştir.

2. Sonuç (Conclusion)

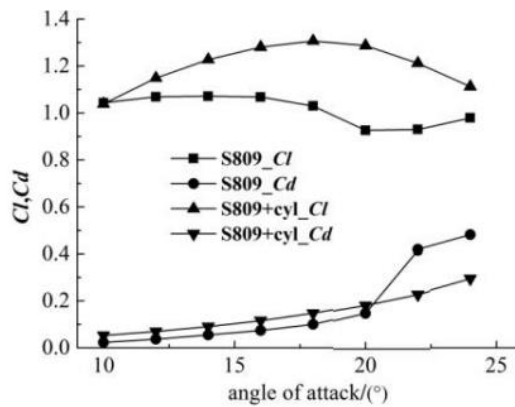


Şekil 11. Farklı hücum açılarında kaldırma katsayısı (Lift coefficient versus attack angle)



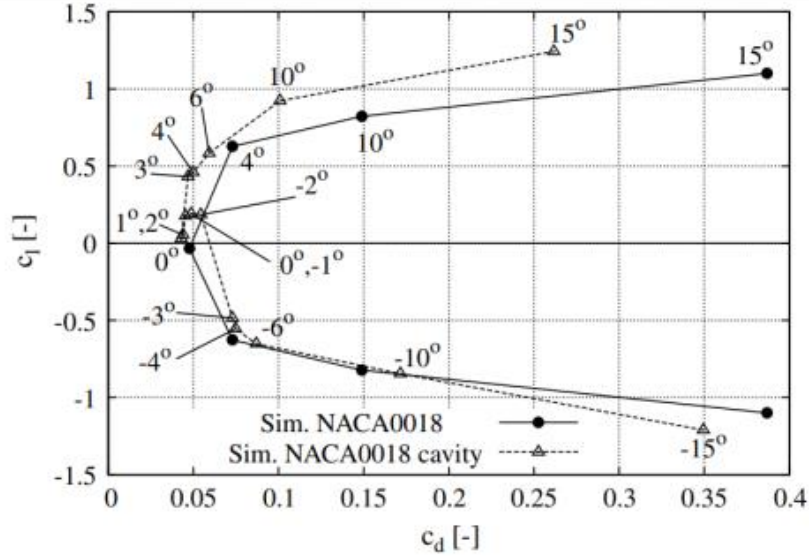
Şekil 12. Farklı hücum açılarında sürükleme katsayısı (Drag coefficient versus attack angle)

Fouatih vd. (2016) çalışmalarında Şekil11 ve Şekil12’de gözükten sonuçlara göre üçgen şekilli girdap oluşturucuların sınır tabakası ayrılmasını kontrol etmek için en uygun olduğunu ortaya koyduğunu gözlemlemişlerdir. Mikro vorteks üreteçlerinin daha az parazit sürükleme oluşturmasıyla akışı kontrol etmede oldukça etkili olduğunu bulmuşlardır. Birleştirilmiş girdap jeneratörlerine sahip bir kanat profili için maksimum kaldırma katsayısı %21 oranında arttığını ve akış ayrılmasını 17° geciktirildiğini gözlemlemişlerdir.



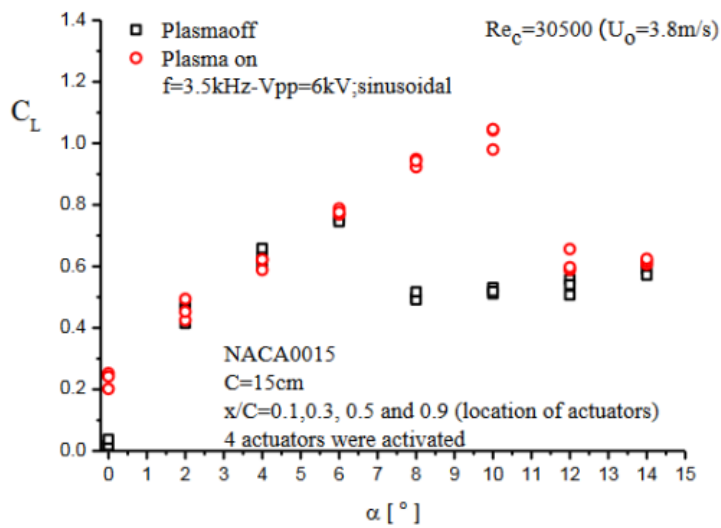
Şekil 13. Kanat profilinin ve mikro silindirik kanat profilinin farklı hücum açılarında kaldırma/sürükleme oranı (The Curve of the Lift-drag Ratio and the Angle of Attack of the Airfoil with and without Control Airfoil) (Shi vd. 2018)

Şekil 13'te gösterildiği gibi $10^\circ - 24^\circ$ hücum açısı aralığında kaldırma katsayısı mikro silindir tarafından önemli ölçüde artmıştır ve en önemli artış 20° hücum açısında hesaplanmıştır. Sürüklenme katsayısı $10^\circ - 20^\circ$ hücum açısı aralığında normal kanat profiline göre biraz daha yüksek olduğunu fakat 20° hücum açısından sonra önemli derecede azaldığını hesaplanmıştır.



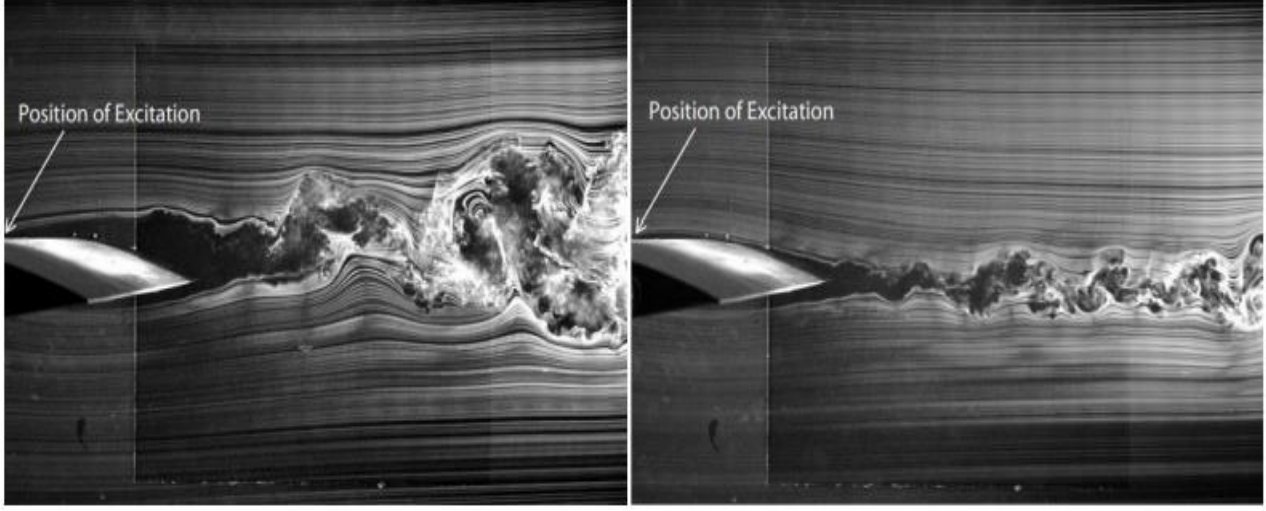
Şekil 14. Cavity olan ve cavity olmayan NACA0018 kanat profiline kaldırma katsayısı ile sürüklenme katsayısı karşılaştırması (Comparison of lift coefficient and drag coefficient of NACA0018 airfoil with and without cavity)

Olman ve Colonius, (2011), cavity çalışmasında şekil 14'te görüldüğü gibi 10° hücum açısı değerine kadar kaldırma katsayısında ve sürüklenme katsayısında azalma meydana geldiğini, 10° 'den yüksek hücum açıları ise kaldırma kuvveti katsayısının normal kanat profiline göre arttığını ve sürüklenme kuvveti katsayısının düştüğünü analiz etmiştir.

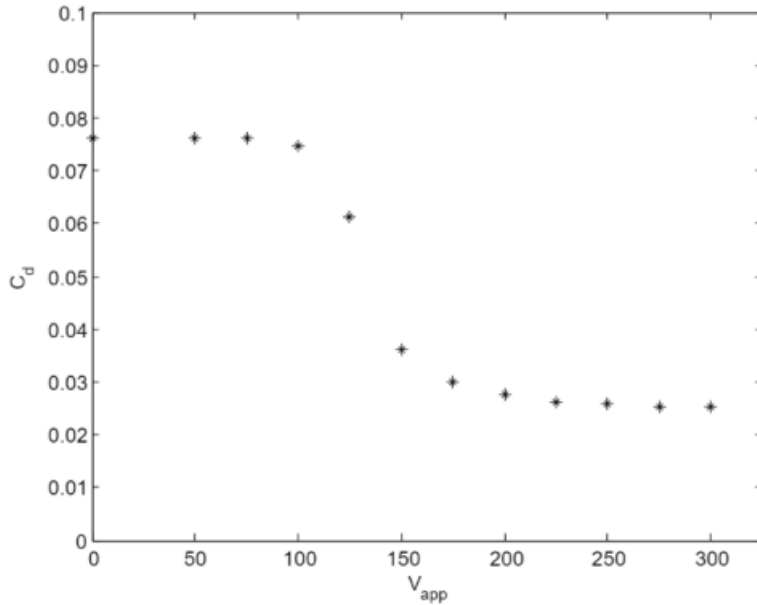


Şekil 15. $Re = 30500$ kaldırma katsayısı farklı hücum açıları (Lift coefficient versus attack angle at $Re = 30500$)

Akansu vd. (2013) DBD plazma aktüatör uyguladığı kanat profilinde dört adet plazmayı aktif ettiğinde, plazmasız kanat profiliyle kaldırma katsayısı değerlerini karşılaştırmıştır. Şekil 15'te görüldüğü üzere stall açısını 6°'dan 10° hücum açısına geciktirmeyi başarmıştır. Kaldırma katsayısında 10° hücum açısında %100 artış gözlemleyerek değeri 0.5'ten 1.0'a yükselmiştir.



Şekil 16: Sentetik jet pasif ve aktif akış görüntülemesi (Synthetic jet passive and active imaging) (Goodfellow, 2010)



Şekil 17. Sürüklenme katsayısı V(0-300) (Drag coefficient V(0-300))

Goodfellow (2010) deneylerinde şekil 16'da görüldüğü gibi akış görselleştirme bulgularından, kanat profiline takılan sentetik Jet ile birlikte sınır tabakanın yeniden bağlandığını ve kanat profili arkasındaki iz bölgesinde önemli bir azalma olduğunu ortaya koymuştur. Şekil 17'de görülen sürüklenme katsayısı grafiğinde voltaj değerindeki artışın sürüklenme katsayısında oldukça önemli düşüş meydana geldiğini ölçmüştür.

Kaynaklar (References)

- 1) Akansu, Y. E., Karakaya, F., & Şanlısoy, A. (2013). Active control of flow around NACA 0015 airfoil by using DBD plasma actuator. EPJ web of conferences, 45, 01008. https://www.epjconferences.org/articles/epjconf/abs/2013/06/epjconf_efm2013_01008/epjconf_efm2013_01008.html
- 2) Akbıyık, H. (2014). Dairesel silindir etrafındaki akışın aktif ve pasif yöntemler ile kontrolü [Master's Thesis]. Niğde Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü.
- 3) Choi, K.-S., Jukes, T. N., Whalley, R. D., Feng, L. H., Wang, J. J., Matsunuma, T., & Segawa, T. (2015). Plasma virtual actuators for flow control. Journal of Flow Control, Measurement & Visualisation. https://eprints.ncl.ac.uk/file_store/production/212302/597B270A-CAD8-43F6-AA30-2E70FBE253E9.pdf
- 4) Corke, T. C., Post, M. L., & Orlov, D. M. (2007). SDBD plasma enhanced aerodynamics: Concepts, optimization and applications. Progress in Aerospace Sciences, 43(7-8), 193-217.
- 5) Fouatih, O. M., Medale, M., Imine, O., & Imine, B. (2016). Design optimization of the aerodynamic passive flow control on NACA 4415 airfoil using vortex generators. European Journal of Mechanics - B/Fluids, 56, 82-96. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.11.006>
- 6) Goodfellow, S. D. (2010). Active flow control using synthetic jet actuation. University of Toronto (Canada). <https://search.proquest.com/openview/cc1f1e37af4168d0bc3d0feccc568e9e/1?pqorigsite=gscholar&cbl=18750>
- 7) Neretti, G. (2016). Active flow control by using plasma actuators. Recent Progress in Some Aircraft Technologies, 57-76.
- 8) Olsman, W. F. J., & Colonius, T. (2011). Numerical Simulation of Flow over an Airfoil with a Cavity. AIAA Journal, 49(1), 143-149. <https://doi.org/10.2514/1.J050542>
- 9) Shi, X., Xu, S., Ding, L., & Huang, D. (2019). Passive flow control of a stalled airfoil using an oscillating micro-cylinder. Computers & Fluids, 178, 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.08.012>

Havacılık ve Uzay Endüstrisinde Termoplastik Matrisli Kompozit Malzemelerin Uygulamaları, Avantajları ve Geleceği

Talha Utku Öğüt

Murat Aydın

Uçak Mühendisliği bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Günümüzde kompozit malzemeler; havacılık ve uzay, sağlık, otomotiv, ulaşım, gıda başta olmak üzere birçok sektörde birincil malzeme haline gelmiştir. Bir kompozit malzeme çeşidi olan termoplastik matrisli kompozit malzemelerin son yıllarda havacılık ve uzay sektöründe kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu durumun başlıca nedenleri arasında geri dönüştürülerek tekrardan kullanılabilmesi, yüksek mekanik özellik değerleri, hafif olmaları, kimyasal ve fiziksel hasarlara karşı yüksek direnç göstermeleri, uzun depolama ömürlerinin olması, hızlı üretilibilmeleri ve üretim aşamaların çevreci olması vb. birçok avantajlar yer almaktadır. Tüm bu avantajları yüzünden termoplastik kompozit malzemelere geleceğin malzemesi adı verilmiştir. Buna karşın ham maddesinin pahalı olması yüzünden termoplastik malzeme çeşitlerinin çok azı matris malzemesi olarak yüksek performans gerektiren uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Son yıllarda hammadde maliyetinin azalması, kullanımının artması ve özelliklerinin geliştirilmesi adına AR-GE çalışmaları ve uluslararası projeler (WOT, Clean Sky, TAPAS vb.) yapılmış ve yapılmaktadır. Bu çalışmada termoplastik malzemelerin genel özellikleri, avantaj ve dezavantajları, havacılık ve uzay sektörü uygulamaları, son dönemde gerçekleşen yenilikler hakkında araştırma yapılmıştır.

Applications, Advantages and Future of The Thermoplastic Composites Materials in Aerospace Industry

ABSTRACT

Today, composite materials have become the primary materials in many sectors, especially aerospace, healthcare, automotive, transportation and food. The use of thermoplastic matrix composite materials, which is a type of composite material, has become widespread in the aerospace industry in recent years. The main reasons for this situation include many advantages such as their ability to be recycled and reused, high mechanical property values, light weight, high resistance to chemical and physical damage, long storage life, rapid production and environmentally friendly production stages, etc. Because of all these advantages, thermoplastic composite materials have been called the materials of the future. However, due to the expensive raw material, very few thermoplastic material types are used as matrix materials in application areas that require high performance. In recent years, R&D studies and international projects (WOT, Clean Sky, TAPAS, etc.) have been conducted and are being conducted to reduce the cost of raw materials, increase their use and improve their properties. In this study, research was conducted on the general properties, advantages and disadvantages of thermoplastic materials, aerospace sector applications, and recent innovations.

1. Giriş (Introduction)

Birbirinden farklı özellikte iki ya da daha fazla malzemeyi çeşitli yöntemlerle bir araya getirerek oluşturulan ve kendini oluşturan bileşiklerden sergilediği özellikler açısından üstün olan malzemeye kompozit malzeme adı verilmektedir. Kompozit malzemenin, kendini oluşturan bileşiklere kıyasla dayanım, tokluk, ısı direnç, hafiflik, termal yalıtım ve iletkenlik vb. özelliklerde gelişme beklenmektedir (Callister & Rethwisch, 2013), (AKKAYA vd., 2021).

Kompozit malzemeler üretim çeşitliliği yüzünden yapısında bulunan takviye ve matris malzeme baz alınarak sınıflandırılmaktadır. Takviye malzemelerin kompozit yapıyı oluşturan matris malzemelere destek olmak, malzemenin sertlik ve ısı direncini arttırmak, gelen yükü taşımak gibi görevleri vardır. Takviye malzemeler elyafı, parçacıklı, tabakalı, karma olmak üzere 4'e ayrılmaktadır. Matris malzemelerin ise elyafları korumak, yapısal şekli muhafaza etmek, yüzey kalitesinin iyi olmasını sağlamak vb. birçok görevi vardır (Polat, 2019). Matris malzemesine göre kompozit malzemeler kendi içinde polimer matris malzemeler, metal matris malzemeler ve seramik matris malzemeler olmak üzere 3'e ayrılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler günümüzde birçok alanda kullanılan kompozit malzemeler olup petrokimya tabanlı malzemelerdir. Polimer matrisli malzemeler kendi içinde termoset ve termoplastik matrisler olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır (Kaya, 2016).

2. Termosetler (Thermosets)

Termosetler oda sıcaklığında sıvı halde bulunan, bir veya iki bileşenden oluşan malzemelerdir. Katı yapısındaki hale gelmesi için, malzemeye sertleştirici eklenmesi ya da dışardan enerji verilmesi gerekmektedir. Malzemenin sertleşmemesi için ise dondurucuda muhafaza edilmesi elzemdir. Aksi takdirde oda sıcaklığında belirli bir süre sonra sertleşmeye başlayacaktır. Kovalent bağların oluşturduğu kimyasal çapraz bağlar tarafından rijit hale getirilir. Rijit hale gelmesinin sebebi bağların, üç boyutlu olarak çapraz şekilde bir araya gelmesi, polimer zincirlerindeki hareket ve kaymayı engellemesidir (Sönmez, 2009). Bu sebepten ötürü termoplastik malzemelere göre daha serttir. Malzeme içerisinde çapraz bağlama oranı arttıkça cisim daha da rijit hale gelir, malzemenin darbe dayanımı azalır, ısı denge ve sıcaklık dayanımı artar. Ayrıca rijitlik görece istenilen bir özellik olsa da bağların çapraz olarak bağlanması sonucunda termoset matrisli malzemeler ısıtıldıklarında erimez ve yumuşama özelliği gösteremezler. Bu özellikleri yüzünden termoset matrisli malzemeler eritilip tekrardan kullanılamamaktadır. Günümüzde birçok alanda kullanılan termoset malzemelere, polyester, epoksi, yüksek sıcaklık reçineleri, fenolik, silikon, poliimid, poliüretan, Vinil ester örnek olarak verilebilir (Chawla, 2012).

3. Termoplastikler (Thermoplastics)

Termoplastikler oda sıcaklığında katı halde bulunan, uzun polimer yapılı, lineer zincirlere sahip, yüksek molekül ağırlıklı viskoz malzemelerdir. Zincir içerisinde kovalent bağlıdır. Zincirler arasında herhangi bir düzen bulunmaz ve birbirlerine zayıf metalik Van der Waals bağları ile bağlıdır. Bu sebepten ötürü termoset malzemelerin aksine rijit değildirler. Isıtıldıklarında yumuşarlar ve viskoziteleri düşer. Sıcaklığa bağlı olarak elastik modülü, mukavemet, süneklik özellikleri değişkenlik gösterir. Soğutulduklarında ise mikro yapıları bozulmaz ve tekrardan orijinal mekanik özellikleri ile kullanılabilirler. Isıtılma işlemi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiğinden çok tekrar edilmesi durumunda geri dönüştürülebilirlik özellikleri kaybolabilir ayrıca termoplastiklerin özellikleri kullanılan takviye maddesi ve elyaf türüne göre büyük oranda değişiklik göstermektedir. (Jiang vd., 2005), (Ünal, 2013).

Termoplastikler kendi içinde amorf ve kristalin olmak üzere 2'ye ayrılırlar. Buna karşın gerçekte yüzde yüz kristalin yapı görülemez. Kristalin ve yarı kristalin eğilim içindedirler. Kristallik derecesi, termoplastik malzemelerin üretim gerekliliklerini ve termal özelliklerini belirlemektedir (Harper, 2002).

Kristal yapı mukavemet ve sertlik sağlarken, amorf yapı elastikiyet sağlamaktadır. PEI, PPC, PC, PPO, ABS, PS, PVC amorf yapıdaki, PEKK, PEEK, LM PAEK, PPS, PET, PA, POM, PP, HDPE, LDPE yarı-kristalin yapıdaki termoplastik kompozit malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

Termoplastik matrisli kompozit üretiminde büyük oranda basınç ve ısı kullanılmakta ve ekstrüzyon, enjeksiyon kalıplama, elyaf ve filament sıkıştırma, transfer kalıplama, şişirme, rotasyonel kalıplama, termoform kalıplama, döküm gibi yöntemler kullanılarak şekillendirme yapılmaktadır (Zeyrek vd., 2022).

3.1. Avantajları (Advantages)

- Geri dönüştürülebilirlik özellikleri sayesinde birçok kez kullanılırlar.
- Üretimleri termosetlere göre daha hızlı ve güvenlidir. Kütleme işlemi olmaksızın basınç ve ısı altında katılaştıkları için herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmez.
- Farklı üretim metotları vardır.
- Hafiftirler.
- Termoplastik malzemeler (özellikle PEEK ve PEKK), epoksi malzemelere benzer bir mekanik özellik göstermekle beraber epoksiden daha dayanıklı malzemelerdir.
- Korozyona, aşınmaya ve yangına çok iyi direnç gösterirler.
- Uzun ömürlüdürler. Depolama sorunlarını ortadan kaldırır. Termosetler gibi dondurucuda depolanmaları ve muhafaza edilmeleri gerekmez. Temiz oda şartlarına ihtiyaç duymazlar.
- Isı altında kaynak ve birleştirme işlemine olanak sağladıkları için montaj kolaylığı sağlarlar.
- Süneklikleri, çözünmeleri, akma ve darbe dayanımları yüksektir.
- Katı halleri yapışmaz olduğundan taşıma işlemi kolaylıkla gerçekleşir.

3.2. Dezavantajları (Disadvantages)

- Hammaddeleri pahalı malzemelerdir.
- Çekme dayanımları ve rijitlikleri düşüktürler.
- Yapışkan olmadıklarından dolayı ekstra yöntemler kullanılarak bağlanılmaları gerekir.
- Oda sıcaklığında
- Oda sıcaklığında boşluklu, yarıklı, sert bir yapıya bürünebilirler. Bu yüzden oda sıcaklığında işlenmeleri zordur.

4. Havacılıkta Termoplastik Malzemeler (Thermoplastics in Aerospace Industry)

Termoplastik malzeme 1960'lı yılların sonlarına doğru takviyesiz bir şekilde üretilmeye başlanmış ve o tarihten itibaren 1970 ve 1980'li yıllarda savunma ve askeri alanlarda kompozit madde üretiminde termoplastikler kullanılmıştır. Termoset malzemelere göre daha dayanıklı, işlenebilir ve neredeyse her türlü mekanik özelliği karşılayabilir durumda olması termoplastik malzemeleri ön plana çıkarmıştır. Buna karşın 1990'lı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nin askeri alanlarda maliyeti azaltma politikasının sonucunda termoplastik malzemelere ilgi azalmış ve büyük tedarik şirketleri termoplastik malzeme üretimini durdurmuştur. Bu tarihten itibaren termoplastikler yerine termoset kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır.

Termoplastik kullanımı ticari havacılık sektöründe uçak üretiminin her geçen gün artması sonucunda termoset kompozit üretiminin bu boyutta üretim hacmini karşılayamayacağı görüşü üzerine tekrardan ön plana çıkmış ve bu kapsamda farklı havacılık şirketlerinin destekleri ile 2009 yılında başlayan TAPAS projeleri, 2015 de başlatılan Yarının Kanadı (WOT) projesi ve 2017 de başlayan Clean Sky projesinde termoplastiklerin birincil uçak yapılarında daha fazla kullanılması için çalışmalar yapılmıştır. (CompositesWorld, 2022).

Havacılık sektörü uygulamalarında termoplastik kompozitler tek yönlü bantlar, prepreg kumaşlar ve laminantlar formunda kullanılmaktadır. Çoğunlukla takviye malzemesi olarak karbon elyaf, cam elyaf ve aramid elyaf tercih edilir. Termoplastik matrisli kompozitler için sıcak preslerde sıkıştırma işlemi uygulanarak kalıplama yapılması tercih edilse de otomatik elyaf yerleştirme (AFP) ve otomatik bant serme (ATL) yöntemleri de günümüzde tercih edilen yöntemler arasındadır.(Cenk Kurtuluş, 2020)

Polietereterketon (PEEK), polieterketonketon (PEKK), low-melt poliarileterketon (LM PAEK), polieterimit (PEI), polifenilen sülfür (PPS), Akrilonitril bütadien stiren (ABS) havacılık ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılan başlıca termoplastiklerdir. Bazı üreticiler poliamid (PA), polipropilen (PP) ve buna benzer termoplastik malzemeler kullansa da büyük havacılık uygulamaları için kullanımın uygun olmadığı görülmüştür.



Şekil 1. Termoplastik kompozitlerin uçaklardaki başlıca uygulamaları (Cenk Kurtuluş, 2020).

1980 yılından itibaren termoplastik kompozitler havacılıkta önemli uygulamalarda etkin şekilde kullanılmıştır. PPS malzemesi yüksek sıcaklıklarda bile olağanüstü ısı denge ve yüksek sıcaklık direncine sahip kritik bir termoplastiktir. Orta düzeyde darbe dayanımına sahiptir. Bu sebeple darbe direncinin öncelikli olmadığı uygulama alanlarında kullanılmaktadır (Ozturk vd., 2023). Karbon fiber takviyeli PPS kompozit malzemesinin Airbus j burun üretiminde kullanılması termoplastik kompozitlerin ticari havacılık sektöründe gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır. Ayrıca Airbus A340-600 ve A380 modellerinde termoplastik kaplamalar ve panellerden yararlanılmıştır. Gulfstream G650 modelinde karbon fiber takviyeli PPS kompozit malzemeyle üretilen istikamet dümeni (rudder) ve irtifa dümeni (elavator) kullanılmıştır (Chris Red, 2023). Yüksek mekanik strese dayanabilmesi havacılık sektöründe dünya genelinde PPS kompozit en çok kullanılan termoplastik malzeme türlerinden biri olmasını sağlar.



Şekil 2. Gulfstream G650 istikamet dümeni ve jet gösterimi (van Ingen vd., 2010).

PEI Kompozitleri pek çok açıdan avantajlı bir malzemedir. Yüksek sıcaklık şartlarında mekanik özellikleri koruma ve uzun süreli dayanım ömrü en temel avantajlarıdır. Elektrik yalıtımını sahip olan PEI uçağın iç kısımları gibi daha geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yakın dönemde eklemeli imalat yöntemi (3D baskı) kullanılarak termoplastik malzeme üretimi oldukça hızlanmıştır. PEI kullanılarak pratik ve kaliteli prototipler, küçük hacimli parçalar 3D yazıcı ile üretilebiliyor. Airbus A350 XWB

modelinde eklemeli imalat yöntemi kullanılarak (3D baskı) üretilen PEI termoplastik malzeme kullanımı görülmektedir. Ayrıca Aurora Flight Science ve Stratasys ortak çalışması olan ve dünyanın ilk 3D yazıcısı ile üretilme özelliği taşıyan jet motorlu insansız hava aracının yüzde 80'lik kısmı PEI bazlı malzemelerden oluşmaktadır (Zeyrek vd., 2022).



Şekil 3. 3D baskı ile üretilen PEI bazlı İHA (Aaron Pearson, 2020)

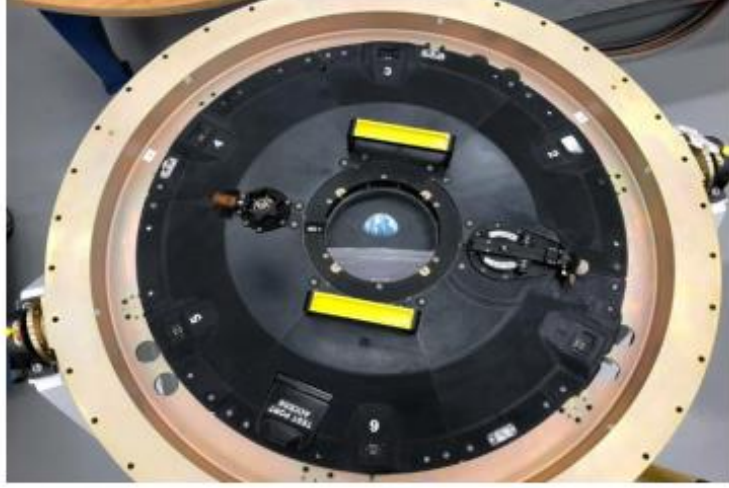
PAEK ailesinin en çok kullanılan polimerleri PEKK , PEEK, LM PAEK havacılık endüstrisi için gelecek vaat eden malzemelerin başında gelmektedir. Üç polimer malzeme de yüksek sıcaklık direnci, kimyasal solvent direnci, daha yüksek bir camsı geçiş sıcaklığı ve işleme için daha düşük bir erime sıcaklığı sunmaktadır.

Kendi içerisinde ise PEKK , PEEK'ye göre daha yüksek bir camsı geçiş sıcaklığına (160 °c – 140°c) ve daha düşük bir erime sıcaklığına (340°c – 390°c) sahiptir. PEKK'in, PEEK ile daha düşük bir erime sıcaklığında aynı performansı sağlayabilme özelliği malzemeyi bir adım daha ön plana çıkarmaktadır (CompositesWorld, 2022). Yüksek boyutsal stabilite ve yüksek mekanik dirence sahip olan PEKK, braketler gibi yapısal elamanlarda kullanılmaktadır. Tüm bu avantajlarına karşın en çok kullanılan termoplastiklerden olan PEEK ve PPS'ye nazaran daha maliyetli bir termoplastiktir. Bu sebeple malzeme kullanılırken performans maliyet hesaplamalarının dikkatlice yapılması gerekmektedir. TAPAS 2 araştırmalarını örnek alan GKN fokker, karbon takviyeli PEKK orthogrid gövde panelini geliştirmiş ve kullanmıştır. Ayrıca aynı şirket yine PEKK polimerini kullanarak termoplastik yatay kuyruk gösterici geliştirmiştir. Aşağıdaki şekilde PEEK kullanılarak üretilen İki parça gösterilmektedir.



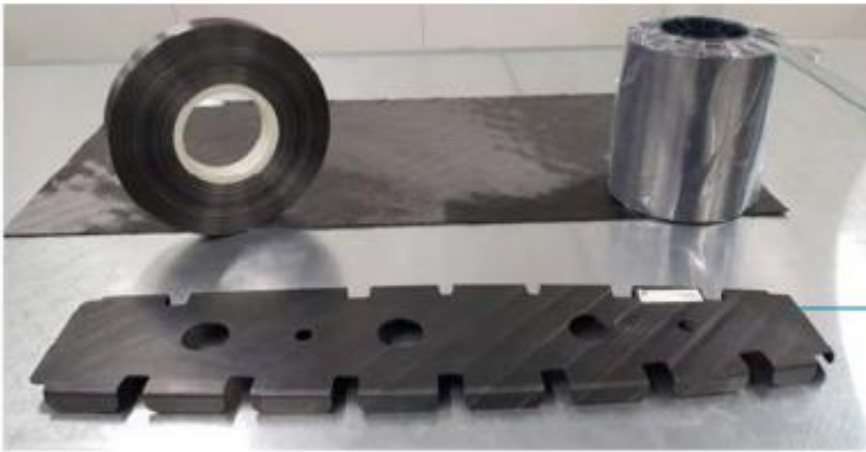
Şekil 4. Üretilen ilk karbon fiber takviyeli PEKK gövde paneli ve PEKK kullanılarak üretilen yatay kuyruk gösterici (van Ingen vd., 2012), (Jeff Sloan, 2018).

PEKK havacılık sektörünün yanında uzay uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu kapsamda NASA tarafından PEKK kompozitleri hakkında araştırma yürütülmektedir. Araştırma kapsamında Orion uzay aracı için 3D baskı yoluyla üretilen kenetleme kapağı kullanılmıştır. Aşağıda Orion uzay aracı kenetleme kapağı gösterilmiştir.



Şekil 5. Orion uzay aracı kenetleme kapağı gösterimi (Listek, 2019).

PEEK, yüksek mekanik mukavemet, yüksek kimyasal direnç gösteren ve bu özelliklerinden ötürü yüksek sıcaklıklarda uzun süreli olarak kullanılabilen önemli bir termoplastik malzemedir. PEKK' e benzer özellik gösteren malzeme braketler, termal kalkanlar ve genel olarak yapısal parçalarda kullanılmaktadır. LM PAEK ise daha hızlı bir şekilde işleme arayışından sonra ortaya çıktı. TAPAS 1 geliştirme programında tanıtılmıştır. LM PAEK özellikle ATL gibi otomatik işleme yöntemlerinde avantaj sağlamaktadır. Özellikle karbon takviyeli TC1225 LM PAEK termoplastik malzemesinde erime sıcaklığının 304 °c olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki şekilde ATL kullanılarak işlenen bir laminant gösterilmektedir.



Şekil 6. Yarı karbon fiber takviyeli LM PAEK bant gösterimi (Jeff Sloan, 2018)

ABS, hafif ve sert bir polimerdir. Mukavemet ve yüksek sıcaklığının en önemli isterlerden biri olmadığı uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Buna karşın ABS ile diğer termoplastik malzemeler karıştırılarak hafif , kimyasal ve alev dayanımı yüksek malzemeler elde edilir. Bu nedenle yapısal çok fazla etkilemeyen ve hafiflik istenilen alanlarda tercih edilmektedirler. Örneğin ticari uçakların kabin içi

uygulamalarında ve insansız hava araçlarında kullanılırlar. Aşağıda 3D baskı yöntemi ve ABS kullanılarak üretilen İHA ve gövde parçaları gösterilmektedir.



Şekil 7. 3D baskı yöntemi ile üretilen ABS bazlı İHA ve parçaların gösterimi (ebrary.net, -)

5. Sonuç (Conclusion)

Gün geçtikçe kullanımı ve üretimi artan termoplastik matrisli kompozit malzemeler havacılık sektörü için önemini arttırmaktadır. Yapılan araştırma sonucunda; malzeme ve üretim tekniklerinde gerçekleşen yenilikler ile uçak ve uzay yapılarında termoplastik matrisli kompozit malzemelerin kullanılmasının maliyet, zaman ve kalite açısından yarar sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bu kapsamda bazı projeler ve yapılar incelenmiş, PPS, PEEK ve PEKK termoplastiklerinin en çok kullanılan termoplastikler olduğu anlaşılmıştır. Özellikle 3D baskı ile üretilen kompozit malzemelerin, insansız hava araçları ve uçak yapılarında kullanımının yaygınlaştığı gözlemlenmiştir. PAEK ailesinin PEEK, PEKK ve LM PAEK termoplastiklerinin, havacılık sektörünün geleceği için önem farz eden termoplastikler olduğu ve bu yönde yapılan araştırmaların hız kazandığı gözlemlenmiştir. Son olarak tüm araştırmalar ışığında dünya ve ülkemizde termoplastik kompozitler ile ilgili araştırma ve projelerin artmasının gerekliliği anlaşılmıştır.

6. Kaynaklar (References)

1. Aaron Pearson. (2020). World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV Tops 150 MPH.
2. AKKAYA, E., OLGUN, H., & ÇAVDAR, U. (2021). Termoplastik Malzemelerin Kullanım Alanları ve Avantajları.
3. Bigg, D. M., Hiscock, D. F., Preston, J. R., & Bradbury, E. J. (1988). High Performance Thermoplastic Matrix Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1(2), 146-160.
4. Callister, W. D., & Rethwisch, D. D. (2013). Malzeme bilimi ve mühendisliği. Nobel.
5. Carraher Jr, C. E. (2017). Carraher's polymer chemistry. CRC press.
6. Cenk Kurtuluş. (2020). Termoplastik Esaslı Kompozitler Havacılık Sektöründe Uçuşa Geçiyor – Kompozit Hayalleri.
7. Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media.
8. Chris Red. (2023, Aralık 20). Thermoplastics in Aerospace Composites Outlook, 2014-2023.
9. CompositesWorld. (2022). Thermoplastic Composites | CompositesWorld.

-
10. ebrary.net. (-). Fused Deposition Modeling (FDM), Sealing Components. Ebrary.
 11. Elvan ATEŞ, Oğuzhan BAŞ, Dr. Mete BAKIR, & Prof. Dr. Fahrettin ÖZTÜR. (2021). Havacılık malzemelerinde rönesans.
 12. Harper, C. A. (Ed.). (2002). Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites (4th Edition). McGraw-Hill Education.
 13. Jeff Sloan. (2018). PEEK vs. PEKK vs. PAEK and continuous compression molding.
 14. Jiang, G., Wong, W. H., Pickering, S. J., Rudd, C. D., & Walker, G. S. (2005). Study of a fluidised bed process for recycling carbon fibre from polymer composite. 7th World Congress for Chemical Engineering.
 15. Karaaslan, N. H. (2015). Helikopter Rotor Palalarında Kullanılan Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi. YÖK Tez veri tabanından erişildi (Tez no: 223279).
 16. Kaya, A. İ. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi, 29, 38-45.
 17. Listek, V. (2019, Kasım 30). Interview with Lockheed: “Orion Spacecraft Has 200 3D Printed Components”. 3DPrint.Com | The Voice of 3D Printing / Additive Manufacturing.
 18. Ozturk, F., Cobanoglu, M., & Ece, R. E. (2023). Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 08927057231222820.
 19. Polat, B. (2019). Cam takviyeli polimer matrisli termoplastik kompozitlerin mekanik özelliklerinin araştırılması. [Master’s Thesis, İskenderun Teknik Üniversitesi/Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine ...]. YÖK Tez veri tabanından erişildi (Tez no: 558216).
 20. Rana, S., & Figueiro, R. (2016). Advanced composite materials for aerospace engineering: Processing, properties and applications. Woodhead Publishing.
 21. Sönmez, M. (2009). Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye’den dört örnek firma üzerine bir inceleme [Yüksek lisans tezi]. Fen Bilimleri Enstitüsü. YÖK Tez veri tabanından erişildi (Tez no: 291977).
 22. Ünal, A. R. (2013). Geri dönüşmüş termoplastik matrisli kompozitlerin otomotiv endüstrisinde uygulaması.
 23. Van Ingen, J. W., Buitenhuis, A., Wijngaarden, M., & Simmons, F. (2010, Mayıs 19). Development of the Gulfstream G650 induction welded thermoplastic elevators and rudder.
 24. Van Ingen, J. W., Lantermans, P., Lippers, I., & Aerostructures, F. (2012, Ocak 1). Impact behavior of a butt jointed thermoplastic stiffened skin panel.
 25. Zeyrek, B., Aydoğan, B., Dilekcan, E., & Ozturk, F. (2022). Review of thermoplastic composites in aerospace industry. Int. J. Eng. Tech. Inf, 3, 1-6.

Kubilay Yusuf ÖZDEMİR

4035030129

Danışman: Dr.Öğr.Üyesi Eda ÇINAROĞLU

Aralık 2023

CRITIC Temelli TOPSIS Yöntemi ile Dünyanın En İşlek Havalimanlarının Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi

ÖZET

Günümüzde havayolu ulaşımının gelişimi ve yolcu sayısı artışı ile birlikte müşterilerin verilen hizmet kalitesi konusunda beklentileri de değişmektedir. Her havaalanında verilen hizmetler yolcuları aynı düzeyde tatmin etmemekte, hizmet kalitesi açısından alınan sonuçlar değişkenlik göstermektedir. Havayollarına artan talepten ötürü yolcu sayısının artması ve hizmet kalitesinin müşteriler tarafından farklı biçimde ve platformlarda değerlendirilmeye başlaması önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, havalimanlarında hizmet kalitesini iyileştirme ve düzenleme programı olan ve hizmet standartlarını profesyonel denetim analizi ile değerlendiren Skytrax internet sitesinden edinilen veriler ile dünyanın en işlek dokuz havalimanı (Atlanta-ABD, Dubai-Birleşik Arap Emirlikleri, Tokyo-Japonya, London- İngiltere, Dallas-ABD, Denver-ABD, Guangzhou-Çin, İstanbul-Türkiye ve Chicago-ABD) analize tabi tutulmuştur. Değerlendirme sürecinde havalimanına kara ulaşımı, güvenlik taraması, göçmenlik hizmeti, yol bulma ve tabela, varış, ayrılış, transfer, terminal konforu, terminal tesisleri, alışveriş tesisleri ve yiyecek-ıçecek hizmetleri kriterler olarak belirlenmiştir. Çalışmanın amacı, dünyanın en işlek dokuz havalimanının hizmet kalitesi açısından değerlendirilmesi ve hizmet kalitesi düşük olan havalimanlarının hizmet kalitesini iyileştirme önerilerinin geliştirilmesidir. Çalışmada, kriter ağırlıklarının belirlenmesi aşamasında CRITIC yöntemi, havalimanlarının hizmet kalitesi açısından değerlendirilmesi aşamasında ise TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. CRITIC yöntemi sonucunda önem ağırlığı en yüksek olan kriterin göçmenlik hizmetleri olduğu sonucuna ulaşılmıştır. TOPSIS yöntemi ile havalimanları hizmet kalitesi değerlendirmesi sonucunda İstanbul Havalimanı en yüksek hizmet kalitesine sahip havalimanı olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hizmet kalitesi, TOPSIS, CRITIC, Çok kriterli karar verme, havalimanları.

ABSTRACT

Today, with the development of airline transportation and the increase in the number of passengers, the expectations of customers regarding the quality of service provided are also changing. The services provided at each airport do not satisfy the passengers at the same level and the results obtained in terms of service quality vary. Due to the increasing demand for airlines, the number of passengers has increased and service quality is being evaluated by customers in different ways and platforms. In this study, nine of the world's busiest airports (Atlanta-USA, Dubai-UAE, Tokyo-Japan, Tokyo-Japan, London-UK, Dallas-USA, Denver- USA, Guangzhou-China, Istanbul-Turkey and Chicago-USA) are analyzed with the data obtained from the Skytrax website, which is a program to improve and regulate service quality at airports and evaluates service standards through professional audit analysis. The criteria for the evaluation process are ground transportation to the airport, security screening, immigration service, wayfinding and signage, arrival, departure, transfer, terminal comfort, terminal facilities, shopping facilities and food and beverage services. The aim of the study is to evaluate nine of the world's busiest airports in terms of service quality and to develop suggestions for improving the service quality of airports with low service quality. In the

study CRITIC method is used to determine the criteria weights and TOPSIS method is used to evaluate the airports in terms of service quality. As a result of the CRITIC method, it is concluded that the criterion with the highest importance is immigration services. As a result of the airport service quality evaluation using the TOPSIS method, Istanbul Airport is determined as the airport with the highest service quality.

Key Words: Service quality, TOPSIS, CRITIC, multi-criteria decision making, airports.

SONUÇ ve ÖNERİLER

Havacılığın gelişmesi nedeniyle sektöre olan talep de artmıştır. Artan talep havaalanlarında uçuş sayısını da doğru oranda artırmıştır. Havalimanları daha fazla yolcuya hizmet vermeleri ve uçuşların artmasından kaynaklı hizmet kalitelerini geliştirme yoluna gitmişlerdir ve geliştirdikleri havaalanı hizmet kalitesiyle yolcu sayısını daha da artırmayı arzulamışlardır (Chonsalasin, vd., 2021). Hizmet kalitesinin geliştirilmesi havaalanları içerisinde uygulanması gereken ve yolcuların da seyahat edebilmeleri için izlemeleri gereken aşamaların kolaylaştırılması özelliğine sahiptir. Yolcuların beklentilerini karşılayabilmek adına havalimanlarının hizmet kalitesini değerlendirmek için uygulanan yöntem sonuçlarını dikkate almaları, hizmet kalitelerini geliştirmeleri ve tekrar tercih edilmeleri açısından önemlidir.

Bu çalışma, dünyanın en işlek dokuz havalimanının hizmet kalitesi yönünden değerlendirilmesini kapsamaktadır. Çalışmada bu havalimanının seçilme nedeni söz konusu havalimanlarının yoğunluk yönünden önde gelen havalimanları olmasıdır. Bu havalimanlarının negatif ve pozitif yönlerinin değerlendirilmesi ve seçilen bu havalimanları içinde hizmet kalitesi anlamında en önde gelen havalimanının diğerlerine örnek teşkil etmesi ve eksikliklerinin giderilmesi açısından politikalar önerilmesi hedeflenmiştir. Hizmet kalitesini ölçmek ve geliştirmek için ÇKKV yöntemlerinden olan CRITIC destekli TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. Skytrax anket temelli bir derecelendirme sistemi olmasına rağmen kullandığı yöntemlerin uluslararası kabul görmesi ve oluşturduğu anketlerin diğer anketlere göre kapsamlı ve geniş çaplı olması bu sistemin verilerinin kullanımını beraberinde getirmiştir. Veriler ve kullanılan yöntemler neticesinde ulaşılan sonuçlar değerlendirilecek olursa; ulaşım için havayolunu tercih eden yolcular havalimanlarında hizmet kalitesi kriterlerinden

LHH 0,02 0,02 3

DWUH 0,03 0,01 6

DH 0,03 0,01 8

GBUH 0,02 0,02 4

İH 0,00 0,03 1

COUH 0,03 0,00 9

göçmenlik hizmetlerine daha fazla önem atfetmişlerdir. CRITIC yöntemi sonucunda, kriter önem ağırlığı en yüksek olan kriter göçmenlik hizmetleri olmuştur. CRITIC yöntemini ile elde edilen kriter önem ağırlıkları kullanılarak gerçekleştirilen TOPSIS yöntemi analizi sonucunda ise hizmet kalitesi sıralamasında ilk sırada İstanbul Havalimanı'nın yer aldığı saptanmıştır. İstanbul Havalimanı'nı Tokyo Haneda ve Londra Heathrow Havalimanı takip etmektedir. Bu havalimanları dünya üzerindeki en işlek havalimanları olduğu için hizmet kalitesini en çok etkileyen faktör olarak karşımıza personellerin yaklaşımı, personel sayısının fazla olması ve hem gelen hem de giden yolcular için bilgiye ulaşımın daha kolay olması ile geride kalan diğer havalimanlarından ayrılmaktadır. Aynı zamanda geride kalan havalimanlarında personel yaklaşımı, personel sayısının fazla olması ve kolay bilgiye ulaşımın yanında salon ve terminal eksikliği de görülmektedir. Çalışmada geçen havalimanlarında var olan yoğunluktan dolayı salon ve terminaller yahut geniş alanlar vazgeçilmez unsurlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmadaki geride kalan havalimanları yukarıda hizmet kalitesi anlamında değindiğimiz nedenlere dikkat etmeli ve bu nedenler üzerine çalışma yapmaları gerekmektedir.

Havalimanlarında hizmet kalitesi değerlendirilmesi kapsamında gerçekleştirilen ve geniş kapsamlı bir veri seti ile çok sayıda kriter esas alınarak yapılan bu çalışmanın literatüre katkı sağlayacağı ümit edilmektedir. Gelecek çalışmalarda havalimanlarında hizmet kalitesinin değerlendirilmesi konusu farklı ÇKKV teknikleri ile analize tabi tutulabilir. Ulaşılan sıralama sonuçları mevcut çalışma bulguları ile kıyaslanabilir.

KAYNAKÇA

Akdeniz, E. (2021). Kabin İçi Hizmet Kalitesi Açısından Farklı Zaman Kesitlerine Yönelik Bir Karşılaştırma: En İyi Hava Yolu İşletmesinin Seçimi. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 20(77), 273-288.

Altınkurt, T. & Merdivenci F. (2020). Ahp Tabanlı Edas Yöntemleriyle Havayolu İşletmelerinde Hizmet Kalitesinin Değerlendirilmesi. *Aksaray Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(4), 49-58.

Altın, F. G., Karaatlı, M., & Budak, İ. (2017). Avrupa'nın En Büyük 20 Havalimanının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Ve Veri Zarflama Analizi İle Değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(4), 1049-1064.

Alptekin, N., & Şıklar, E. (2015). Türk Hisse Senedi Emeklilik Yatırım Fonlarının Çok Kriterli Performans Değerlendirmesi: Topsis Metodu. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* (25).
Ayrım, Y., & Can, G. F. (2017). Risk Değerlendirmesinde Critic Metodu İle Sektörlerin Karşılaştırması. *Journal Of Turkish Operations Management*, 1(1), 67-78.

Bakır, M., & Atalık, Ö. (2019). Havayolu İşletmelerinde E-Hizmet Kalitesi Boyutlarının Önem Düzeylerinin Belirlenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 14(1), 149-168.

Bakır, M. & Akan, Ş. (2018). Havaalanlarında Hizmet Kalitesinin Entropi Ve Topsis Yöntemleri İle Değerlendirilmesi: Avrupa'nın En Yoğun Havaalanları Üzerine Bir Uygulama. *Elektronik Sosyal Bilimler Dergisi*, 17 (66), S. 632-651.

Bakır M. Ve Alptekin N. (2018). Hizmet Kalitesi Ölçümüne Yeni Bir Yaklaşım: Codas Yöntemi İle Havayolu İşletmeleri Üzerine Bir Uygulama. *Bmj*, 6(4), 1336-1353.

Barakat, H., Yeniterzi, R. & Martin-Domingo, L. (2021). Applying Deep Learning Models To Twitter Data To Detect Airport Service Quality. *Journal Of Air Transport Management*, V. 91, P. 1-8.

Chang, Y. Ve Yeh C. (2002). A Survey Analysis Of Service Quality For Domestic Airlines. *European Journal Of Operational Reserch*, 139, Ss. 166-177.

Chen, I. S. (2016). A Combined Mcdm Model Based On Dematel And Anp For The Selection Of Airline Service Quality İmprovement Criteria: A Study Based On The Taiwanese Airline İndustry. *Journal Of Air Transport Management*, 57, 7-18.

Chonsalasin, D., Jomnonkwo, S. & Ratanavaraha, V. (2021). Measurement Model Of Passengers' Expectations Of Airport Service Quality. *International Journal Of Transportation Science And Technology*, 10 (4), P. 342-352.

Çınaroğlu, E. (2021). Critic Temelli Marcos Yöntemi İle Yenilikçi Ve Girişimci Üniversite Analizi. *Girişimcilik Ve İnovasyon Yönetimi Dergisi*, 10(1), 111-133.

Demir, H.H., (2012). Evaluation Of Service Quality Of Airway Companies Giving Domestic Services In Turkey With Fuzzy Set Approach. *International Journal Of Electronics; Mechanical And Mechatronics Engineering*, 2(3), 233-239.

-
- Gedik, M.S. & Bayram, Ö.Ö. (2022). Avrupa'daki Düşük Maliyetli Havayolu İşletmelerinin Kabin Hizmeti Kalitesinin Entropi Tabanlı Aras Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Retorik Dergisi*, 2(2), 71-85.
- İnan, T.T. (2017). Hizmet Ve Konfor Parametrelerine İlişkin En İyi Havayolunun Seçimi Örnek Ahp Uygulaması. *Akademik Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(56), 425-439.
- Kazançoğlu, Y., & Kazançoğlu, İ. (2013). Benchmarking Service Quality Performance Of Airlines İn Turkey. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 8(1), 59-91.
- Keleş, M. K., Özdağoğlu, A., & Işıldak, B. (2021). Yolcular Açısından Havalimanlarının Değerlendirilmesine Yönelik Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Bir Uygulama. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(2), 419-456.
- Keshavarz Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2017). A New Hybrid Simulation-Based Assignment Approach For Evaluating Airlines With Multiple Service Quality Criteria. *Journal Of Air Transport Management*, (63), 45-60.
- Kuo, M. S., Ve Liang, G. S., (2011), "Combining Vikor With Gra Techniques To Evaluate Service Quality Of Airports Under Fuzzy Environment", *Expert Systems With Applications*, 38:3, 1304-1312.
- Liou, J.Jh., Hsu, C-C., Vd., (2011). Using A Modified Grey Relation Method For Improving Airline Service Quality. *Tourism Management*, 32(6), 1381-1388.
- Liou, J. J., & Tzeng, G. H. (2007). A Non-Additive Model For Evaluating Airline Service Quality. *Journal Of Air Transport Management*, 13(3), 131-138.
- Nejati, M., & Shafaei, A. (2009). Ranking Airlines' Service Quality Factors Using A Fuzzy Approach: Study Of The Iranian Society. *International Journal Of Quality And Reliability Management*, 26(3), 247-260.
- Önüt, S., Akbaş, S., Vd., (2008). The Comparison Of Service Quality Of Domestic Airlines İn Turkey. *Journal Of Engineering And Natural Sciences*, 25(4), 349-358.
- Öztürk, D., & Onurlubaş, E. (2019). Havayolu Taşımacılığında Hizmet Kalitesinin Ahp Ve Topsis Yöntemleri İle Değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 10, 81-97.
- Pandey, M.M. (2016). Evaluating The Service Quality Of Airports İn Thailand Using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Method. *Journal Of Air Transport Management*, V.57, 241-249.
- Sultan Gedik Göçer, "Firma Performansının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi İle Stratejik Analizi: Havacılık Sektöründe Bir Uygulama". Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli, Kocaeli Üniversitesi, 2019.
- Tsaur, S. H., Chang, T. Y., & Yen, C. H. (2002). "The Evaluation Of Airline Service Quality By Fuzzy Mcdm". *Tourism Management*, 23(2), 107-115.
- V.M. Oliveria, A., F. Oliveria, B. & D. Vassallo, M. (2023). Airport Service Quality Perception And Flight Delays: Examining The Influence Of Psychosituational Latent Traits Of Respondents İn Passenger Satisfaction Surveys. *Research İn Transportation Economics*, V.102, P. 1-24.

**PID YÖNTEMİ İLE ADAPTİF KONTROL YAKLAŞIMI
OLAN MRAC YÖNTEMİ KULLANILMASI VE
KARŞILAŞTIRILMASI**

İdil Sena DURUKAN

Uçak Mühendisliği (YL) Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, adaptif kontrol yaklaşımının Model Referanslı Adaptif Kontrol (MRAC) yöntemi ile birleştirilmesini incelemekte ve bu birleşimin değişken sistemlerdeki performansı nasıl etkilediğini değerlendirmektedir. Adaptif kontrol, sistemlerin belirsizliklerle başa çıkmasına ve değişken koşullara uyum sağlamasına olanak tanıyan bir kontrol metodolojisidir. MRAC yöntemi ise bir referans modeline dayalı olarak sistem parametrelerini ayarlayarak istenen performansı elde etmeyi hedefler. Bu çalışma, adaptif kontrolün genel ilkelerini, MRAC yönteminin temel prensiplerini ve bu iki yaklaşımın birleştirilmesinin sistem performansına olan etkisini ele almaktadır. Özellikle, İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) gibi dinamik ve değişken sistemlerin adaptif kontrol yaklaşımları ile nasıl optimize edilebileceği örneklerle incelenmektedir. Bu çalışma, adaptif kontrol ve MRAC yönteminin, değişken sistemlerde istenen performansı elde etme ve belirsizliklerle başa çıkma yeteneğini nasıl artırabileceğine dair bir bakış sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, Uyarlanabilir Kontrol, Model Referanslı Uyarlanabilir Denetleyici, MRAC, PID.

**USING AND COMPARISON OF PID METHOD AND
MRAC METHOD, WHICH IS AN ADAPTIVE
CONTROL APPROACH**

İdil Sena DURUKAN

Aeronautical Engineering (MSc) Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

This study investigates the integration of adaptive control approach with Model Reference Adaptive Control (MRAC) method and evaluates how this combination affects the performance of variable systems. Adaptive control is a methodology that allows systems to cope with uncertainties and adapt to changing conditions. On the other hand, the MRAC method aims to adjust system parameters based on a reference model to achieve desired performance. This abstract addresses the general principles of adaptive control, the fundamental principles of MRAC, and the impact of combining these two approaches on system performance. Particularly, it examines how dynamic and variable systems, such as Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), can be optimized through adaptive control approaches. This study provides an overview of how adaptive control and the MRAC method could enhance the ability to achieve desired performance and deal with uncertainties in variable systems.

Keywords: Unmanned Aerial, Vehicles, Adaptive Control, Model Reference, Adaptive Controller, MRAC, PID.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde endüstriyel sistemlerin karmaşıklığı ve değişkenliği, kontrol sistemlerinde esneklik ve uyum yeteneği gereksinimini artırmaktadır. Bu bağlamda, adaptif kontrol yaklaşımları sistemlerin değişen koşullara uyum sağlamasını sağlayarak önemli bir rol oynamaktadır. Bu makalede, adaptif kontrolün önde gelen bir yöntemi olan Model Referanslı Adaptif Kontrol (MRAC), değişken sistemlerde istenen performansı sağlamak için nasıl kullanılabileceği incelenecektir. Adaptif kontrol, sistemlerin belirsizliklerle başa çıkmasını ve zamanla değişen koşullara uyum sağlamasını amaçlayan bir kontrol yaklaşımıdır. Bu bağlamda, MRAC yöntemi, bir referans modeline dayalı olarak istenen performansı elde etmek için sistem parametrelerini ayarlar. Bu yöntem, sistemdeki belirsizlikleri azaltmak ve istenen davranışı elde etmek için geri besleme kontrolü sağlar. Bu makalede, adaptif kontrol prensipleri ve RAC yönteminin temel ilkeleri incelenecek, ardından adaptif kontrol yaklaşımının nasıl MRAC ile birleştirilebileceği ve bu birleşimin sistem performansı üzerindeki etkileri ele alınacaktır. Ayrıca, havacılık uygulamalardan örnekler ve literatürdeki çalışmaların incelenmesi ile birlikte adaptif kontrolün MRAC yöntemiyle birleşiminin gelecekteki potansiyel etkileri üzerine bir değerlendirme yapılacaktır. Özellikle İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), örneğin quadrotorlar, günümüzde dinamik ve değişken sistemlerin adaptif kontrol yaklaşımlarıyla mükemmel bir örnek sunmaktadır. Bu araçlar, hava koşullarının aniden değişebileceği, hız, yükseklik ve stabilite gibi parametrelerin sürekli optimize edilmesi gereken sistemlerdir. Adaptif kontrol yaklaşımları, özellikle Model Referanslı Adaptif Kontrol (MRAC), İHA'ların kararlılık, hassasiyet ve performansını artırmak için ideal bir çözüm sunabilir. Örneğin, quadrotorların manevra kabiliyetini artırmak veya dış etkilere karşı daha dirençli hale getirmek için adaptif kontrol algoritmaları, bu hava araçlarının daha güvenilir ve etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayabilir. Bu bağlamda, adaptif kontrol yaklaşımlarının İHA'lar gibi dinamik ve değişken sistemlerde MRAC yöntemiyle nasıl entegre edilebileceği, gelecekteki İHA teknolojilerinin geliştirilmesinde kritik bir rol oynayabilir. İHA sisteminin sağlamlığı ve anti-parazit yeteneği, uçuş kontrolünün temel konularıdır [1]. Yeterince harekete geçirilmemiş, güçlü bir şekilde bağlanmış, çok değişkenli ve doğrusal olmayan karmaşık bir araştırma hedefi olarak, dört rotorlu uçağın yalnızca normal koşullar altında çalışmanın tutum kontrol problemini çözmesi gerekmez, aynı zamanda gerçek uçuş kapma sürecinde aşağıdakiler gibi çeşitli belirsiz rahatsızlıklardan da muzdariptir: rüzgar hızı, merkez ofseti, kütle değişimi vb. gibi faktörlerin etkilidir. [2]. Bu nedenle, dört rotorlu uçak durum kontrol algoritmasının uyarlanabilirliği ve sağlamlığı için yüksek gereksinimler öne sürülmektedir. Günümüzde, quadrotorun tutum kontrolü üzerine oranintegral-türev (PID) kontrolü [3, 4], kayan kipli kontrol [5, 6], tahmine dayalı kontrol [7] ve diğer yöntemler gibi bazı yöntemler üzerinde çalışılmaktadır. Ancak bu tür yöntemler genellikle sistem modelindeki parametrelerin değişmemesini gerektirir ve pratik uygulamaların başarılması zordur. PID gibi klasik kontrol algoritmaları, İHA'lara olan dış müdahalelerde veya ortamın değişmesi durumunda elde edilen kontrol ideal değildir ve dengeli bir duruma uyarlanması zordur. Model referanslı uyarlamalı kontrol (MRAC) algoritması, güçlü bir kendi kendine uyarlanabilirliğe ve sistemdeki yavaş zamanla değişen bozulmayı ve belirsiz bozulmayı bastırmada önemli avantajlara sahiptir [8]. Ancak sistem dinamiği modelinin hatalı parametreleri nedeniyle sistem kontrolü taraflı olacaktır. Gerçek uçuş sürecinde değişen ortamla birlikte sistem parametreleri değişeceği gibi uçuş süresiyle de değişecektir. Model referanslı uyarlamalı kontrol, belirsiz parametrelerin neden olduğu tutum istikrarsızlığını optimize edebilir.

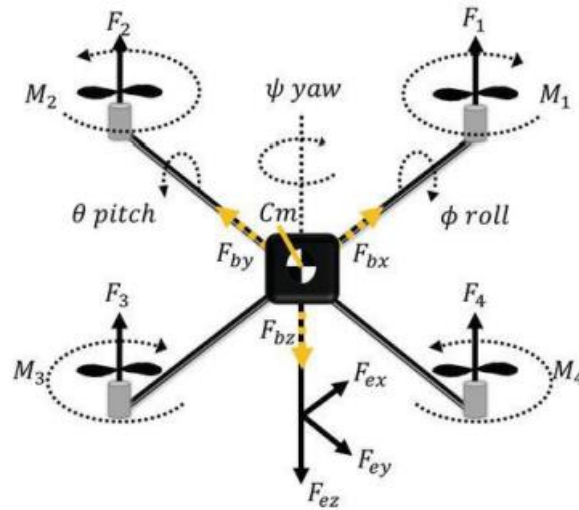
Bu çalışma, adaptif kontrol yaklaşımlarının, özellikle de MRAC yönteminin, değişken sistemlerde istenen performansı elde etme ve sistemlerin belirsizliklerle başa çıkma yeteneğini artırma potansiyelini vurgulamayı amaçlamaktadır. Bir diğer yandan, rahatsız edici ortamda İHA'nın tutum uyarlamalı kontrol algoritması incelenmiş ve uyarlamalı kontrol yasası önerilmiştir. Ters Lyapunov fonksiyon [9] yöntemi sayesinde geleneksel statik kontrolörlerdeki sabit kazanç yerine belirsizliklere uyum sağlayabilen dinamik kazançlı geri beslemeli kontrolör tasarlanmıştır. Sayısal simülasyon deneylerinin sonuçları, klasik PID algoritması gibi geleneksel kontrol algoritmalarıyla karşılaştırıldığında, uyarlanabilir kontrol

yasasının uyarlanabilirlik açısından bariz avantajlara sahip olduğunu ve geniş bir aralıktaki bozulmanın etkisini etkili bir şekilde bastırabildiğini kanıtlayabilir.

2. 4-ROTORLU İHA DİNAMİĞİ VE MODELLEMESİ (QUADROTOR DYNAMICS AND MODELING)

2.1 Dinamik Model (Dynamic Model)

Bu bölümde öncelikle quadrotorun kinematik ve dinamik modeli detaylandırılmaktadır. Bu makaledeki dört rotorlu motorlar için “X” çerçevesi kullanılmıştır. Dört rotorlu İHA'nın hareket modellemesi ve 6 serbestlik dereceli tanımı Şekil 1'te gösterilmektedir.



Şekil 1- 4 Rotorlu İHA koordinat sistemi (Quadrotor Coordinate System)

Hem koordinat sisteminin tanımı hem de Euler Açılarının pozitif yönü sağ-el kuralı tanımına uygundur. F_1, F_2, F_3, F_4 okları her bir pervanelerin ürettiği yukarı doğru itme kuvvetini gösterir. Toplam itme kuvveti, tüm pervanelere etki eden sonuçta ortaya çıkan dikey kuvvettir. Yuvarlanma, gövde çerçevesinin x eksenini etrafındaki dönme açısıdır; Yunuslama, gövde çerçevesinin y eksenini etrafındaki dönme açısıdır; Yalpalama, gövde çerçevesinin z eksenini etrafındaki dönme açısıdır. Her Euler açısı sağ el kuralını takip eder ve bunların gövde çerçevesinden dünya eylemsizlik çerçevesine dönme matrisleri (1)(2)(3)'te tanımlanır.

$$R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

Gövde çerçevesinden eylemsizlik çerçevesine R_b^w dönüş matrisini elde etmek için üç dönme matrisi çarpılır.

$$R_b^w = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\theta\sin\phi & \sin\psi\sin\phi + \cos\psi\sin\theta\cos\phi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\phi + \sin\psi\sin\theta\sin\phi & -\cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

1 ve 3 numaralı motorların saat yönünün tersine, 2 ve 4 numaralı motorların ise saat yönünde dönmesi öngörülmektedir. X tipi İHA'nın kuvvet analizi sayesinde, esas olarak yerçekimi mg 'den, dört pervanenin itme kuvveti F_i 'den ve havanın dört pervaneye olan hava direnci momentinden τ_i etkilendiği bilinmelidir.

ω_i , i 'inci pervanenin dönme hızıdır ve τ_i , i 'inci pervanenin ürettiği sürüklenme torkudur. İtke F_i (5) ile tanımlanabilir ve sürüklenme torku τ_i (6) ile ifade edilebilir,

$$F_i = k\omega_i^2 \quad (5)$$

$$\tau_i = \pm d\omega_i^2 \quad (6)$$

Burada k , rotor kanatlarının çapına, hava yoğunluğuna, uçuş hızına ve diğer parametrelere bağlı olan bir itme katsayısıdır ve d , hava yoğunluğuna, pervane boyutuna ve diğer aerodinamik parametrelere bağlı olan sürüklenme katsayısıdır. Aşağıda dört rotorun dört kontrol girişi verilmiştir; F , pervanenin ürettiği toplam çekme kuvvetidir. Burada τ_ϕ dönme torku, τ_θ eğim torku ve τ_ψ sapma torkudur. l , rotor dönme eksenlerinin merkezi ile quadrotor merkezi arasındaki mesafeyi ifade eder.

Dört rotorlu İHA'nın doğrusal olmayan modeli (7) ile açıklanmaktadır. Bu formül aracılığıyla, ortaya çıkan itme ve tork, her bir pervanenin itme kuvvetiyle eşleştirilebilir.

$$\begin{cases} F = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \tau_\phi = \sqrt{2}kl(\omega_1^2 - \omega_2^2 - \omega_3^2 + \omega_4^2)/2 \\ \tau_\theta = \sqrt{2}kl(\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_3^2 - \omega_4^2)/2 \\ \tau_\psi = d(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{cases} \quad (7)$$

Modeli basitleştirmek için, dört rotorlu İHA'nın katı bir gövde olduğu varsayılır ve tahrik motorunun dinamik özellikleri dikkate alınmaz. Kinematik ve dinamik bilgisine göre çok rotorlu İHA'nın dinamik model formülü (8),

$$\begin{cases} \dot{p} = v \\ \dot{v} = ge_3 - \frac{F}{m}R_b^w e_3 \\ \dot{R}_b^w = R_b^w \hat{\Omega} \\ J\dot{\Omega} = -\Omega \times (J\Omega) + G_a + \tau \\ G_a = \sum_{i=1}^4 J_a (\Omega \times e_3) (-1)^{i+1} \omega_i \end{cases} \quad (8)$$

Burada, $p, v \in R^3$ eylemsizlik çerçevesinde ifade edilen aracın konumunu ve doğrusal hızını temsil eder. g standart yer çekimi ivmesidir. $J \in R^{3 \times 3}$, eylemsizlik momentini temsil eder. Ga , jiroskopik torktur. Ja , tüm motor rotorunun ve pervanenin dönme eksenini etrafındaki toplam atalet momentini belirtir. Ω , cismin dönme açısal hızıdır. $\tau \in R$, pervanenin gövde şaftı üzerinde ürettiği torktur. Ω , vektörün çarpık simetri matris fonksiyonunu belirtir.

Daha sonra, dört rotorlu İHA'nın dünya koordinat sistemindeki doğrusal yer değiştirmesini, gövde çerçevesine göre (p, q, r) açısal hızını ve dünya çerçevesindeki Euler (ϕ, θ, ψ) oranlarını temsil etmek için (x, y, z) kullanırız. Newton'un ikinci yasasına ve Euler denklemine göre dört rotorlu İHA'nın doğrusal olmayan matematiksel modeli (9),

$$\begin{cases} \ddot{x} = -F(\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) / m \\ \ddot{y} = F(\cos \psi \sin \phi - \sin \psi \sin \theta \cos \phi) / m \\ \ddot{z} = -F(\cos \theta \cos \phi) / m + g \\ \dot{\phi} = p + q \sin \phi \tan \theta + r \cos \phi \tan \theta \\ \dot{\theta} = q \cos \phi - r \sin \phi \\ \dot{\psi} = q \sin \phi / \cos \theta + r \cos \phi / \cos \theta \\ \ddot{\phi} = \tau_\phi / I_{xx} + \dot{\theta} \dot{\psi} (I_{yy} - I_{zz}) / I_{xx} \\ \ddot{\theta} = \tau_\theta / I_{yy} + \dot{\phi} \dot{\psi} (I_{zz} - I_{xx}) / I_{yy} \\ \ddot{\psi} = \tau_\psi / I_{zz} + \dot{\phi} \dot{\theta} (I_{xx} - I_{yy}) / I_{zz} \end{cases} \quad (9)$$

Burada I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} sırasıyla x, y ve z eksenleri etrafındaki eylemsizlik momentidir.

2.2 Durum Uzay Gösterimi (State-Space Representation)

Dört rotorlu İHA, gövde düzlemine dik olarak F itme kuvvetine sahip dört serbestlik dereceli girişe $(F, \tau_\phi, \tau_\theta, \tau_\psi)$ ve yuvarlanma, yunuslama ve yalpalama oluşturan üç momente sahiptir. Kontrol edilmesi gereken, İHA'nın altı derecelik (x, y, z) yer değiştirme ve (ϕ, θ, ψ) dönme serbestliğidir, dolayısıyla bu, eksik çalıştırılan bir sistemdir [10]. Hareket denklemini temsil etmek için durum uzayına çevrildiğinde, X durum vektörü aşağıdaki gibi temsil edilir:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T \quad (10)$$

Yukarıdaki on iki durum değişkeni de aşağıda verilen değişkenlere karşılık gelmektedir:

$$X = [x, y, z, \phi, \theta, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, p, q, r]^T \quad (11)$$

Simüle edilen sonuçlar, $(\phi, \theta, \psi) \approx (p, q, r)$ varsayımının geçerli olduğunu, durum uzayındaki ilişkinin ve (9) aşağıdaki değişikliklere sahip olduğunu göstermektedir:

$$\begin{cases} \dot{x}_{10} = \tau_\phi / I_{xx} + x_{11} x_{12} (I_{yy} - I_{zz}) / I_{xx} \\ \dot{x}_{11} = \tau_\theta / I_{yy} + x_{10} x_{12} (I_{zz} - I_{xx}) / I_{yy} \\ \dot{x}_{12} = \tau_\psi / I_{zz} + x_{10} x_{11} (I_{xx} - I_{yy}) / I_{zz} \end{cases} \quad (12)$$

3. MODEL REFERANSLI UYARLANABİLİR KONTROL TASARIMI (ADAPTIVE CONTROL DESIGN WITH MODEL REFERENCE)

3.1 Doğrusallaştırma (Linearization)

Bir denge noktası yakınında doğrusallaştırmayı tartışmadan önce, öncelikle havada asılı kalma durumundaki İHA hareketi doğrusallaştırılmalıdır. Doğrusallaştırılmış durum ile X_e durumundaki dört giriş ve doğrusallaştırılmış kontrol girişi U_e arasındaki dengeyi sağlamak için gereklidir. Lyapunov kararlılık teorisine göre [9] sistem, denge noktası yakınında yerel olarak asimptotik olarak kararlı olabilir. Gezinme sırasında denge noktasına ulaşmak için doğrusal bir geri beslemeli denetleyici tasarlanmıştır. Quadrotorun dinamiği $f(X,U)$ ile tanımlanabilir; burada U giriş vektörüdür ve X durum vektörüdür. Havada denge noktasına ulaşıldığında, bu andaki durum uzayı X_e ve $f(X_e, U_e) = 0$ 'dir. Bu andaki,

$$X_e = [x_e, y_e, z_e, 0, 0, \psi_e, 0, 0, 0, 0, 0]^T \quad \text{ve}$$

Pervane dönüş hızı ω_e aşağıda gösterilmiştir:

$$\omega_e = \sqrt{mg/4k} \quad (13)$$

Yalnızca doğrusal olmayan, zamanla değişmeyen sistem doğrusallaştırılırsa yalnızca yerel değerler elde edilebilir.

$\Delta X = A\Delta X + B\Delta U$ 'i doğrusal olarak temsil etmek için burada ΔX ve ΔU denge noktasındaki sapmalardır. A ve B şu şekilde hesaplanabilen Jacobian matrisleridir:

$$A = \begin{bmatrix} O_{6 \times 6} & I_{6 \times 6} \\ C & O_{6 \times 6} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} O_{8 \times 4} \\ D \end{bmatrix} \quad (15)$$

Burada $O_{i \times j}$ ve $I_{i \times j}$ sırasıyla sıfır ve birim matrislerdir. C ve D matrisleri aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & g \sin \psi_e & g \cos \psi_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g \cos \psi_e & g \sin \psi_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D = \begin{bmatrix} k/m & k/m & k/m & k/m \\ \frac{\sqrt{2}kl}{2I_{xx}} & -\frac{\sqrt{2}kl}{2I_{xx}} & -\frac{\sqrt{2}kl}{2I_{xx}} & \frac{\sqrt{2}kl}{2I_{xx}} \\ \frac{\sqrt{2}kl}{2I_{yy}} & \frac{\sqrt{2}kl}{2I_{yy}} & -\frac{\sqrt{2}kl}{2I_{yy}} & -\frac{\sqrt{2}kl}{2I_{yy}} \\ d/I_{zz} & -d/I_{zz} & d/I_{zz} & -d/I_{zz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Doğrusal bir denetleyici tasarlanmanın adımı, tüm özdeğerlerin kapalı döngü sisteminin sol yarı düzlemine düşeceği bir K kazanç matrisi bulmaktır. Yani $\Delta U = -K\Delta X$ olur ve sistem şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U = (A - BK)\Delta X \quad (18)$$

3.2 Uyarlanabilir Kontrol Tasarımı (Adaptive Control Design)

Kolaylık sağlamak için, yukarıdaki ΔX ve ΔU pertürbasyonlarını durum ve girdi olarak varsayılarak; İlk olarak, uyumsuz parametrelere sahip bir "tahmin edici ortam" oluşturmak için quadcopter için yanlış parametre değerlerini kullanılır. Daha sonra uyarlanabilir kontrol yasasının referans model sinyalinin doğrusal kontrol yasasından daha doğru bir şekilde takip edebildiği gösterilebilir. Tahmin edici ortam şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{x}(t) = Apmx(t) + Bpmu(t) \quad (19)$$

Referans modeli şu şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{x}(t) = Amx(t) + Bmr(t) \quad (20)$$

Gerçek doğrusallaştırılmış model bir referans model olarak kullanılabilir. Bu, $Am = A$ ve $Bm = B$ anlamına gelir. $r(t)$, $x(t)$ 'nin istenen konuma gelmesini sağlayan referans modelin kontrol girişidir.

Kontrolör şu şekilde tasarlanabilir:

$$u(t) = K_x^T(t)x(t) + K_r^T(t)r(t) \quad (21)$$

$K_x \in R^{12 \times 4}$, $K_r \in R^{4 \times 4}$ olmak şartı ile.

Adaptasyon yasaları şu şekilde gösterilmektedir:

$$\dot{K}_x(t) = -\Gamma_x x(t) e^T(t) P B \quad (22)$$

$$\dot{K}_r(t) = -\Gamma_r x(t) e^T(t) P B \quad (23)$$

$e(t)$, $e(t) = x(t) - x_m(t)$ olarak tanımlanan izleme hatasıdır, P , Riccati denkleminde elde edilen pozitif tanımlı matristir ve Γ , keyfi uyarlanabilir kazanç matrisidir.

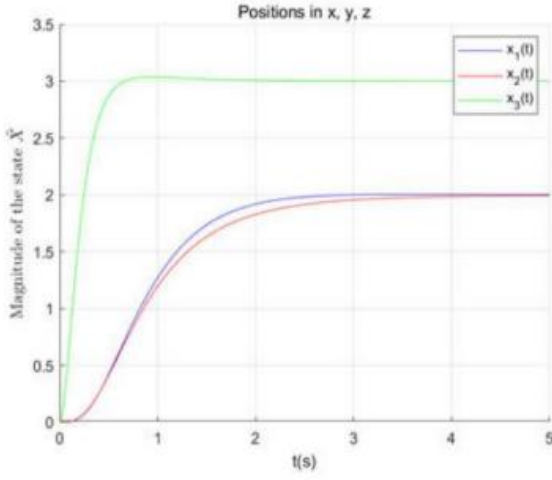
4. Simülasyon Ve Tartışma (Simulation And Discussion)

Önerilen doğrusal MRAC denetleyiciyi doğrulamak için İHA'nın parametrelerini hesaplama formülüne girilir ve istenen havada kalma konumunu yani sabit konumu [2,2,3] koordinatları olarak tasarlanmaktadır. Simülasyon parametreleri Tablo 1'de tablolanmıştır.

Tablo 1: Simülasyon Parametreleri (Simulation Parameters)

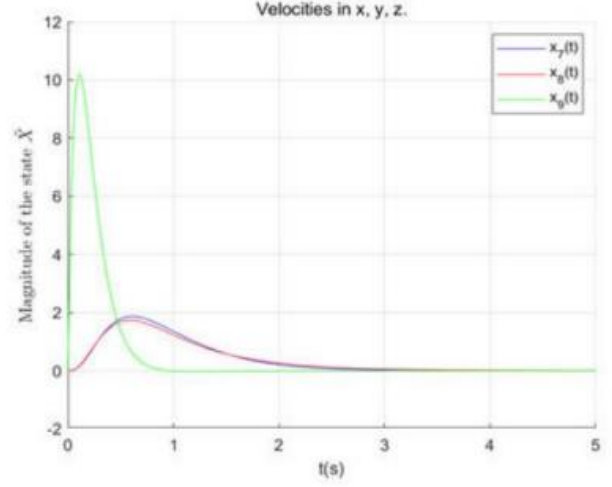
Sembol	Tanım	Değer
M	İHA Ağırlığı	1.7 kg
R_r	Rotor Çapı	0.279 m
l	Çapraz Mesafenin Yarıları	0.241m
I_{xx}	Atalet Momenti (x eksen)	0.0095 kgm^2
I_{yy}	Atalet Momenti (y eksen)	0.0095 kgm^2
I_{zz}	Atalet Momenti (z eksen)	0.0186 kgm^2

Aşağıda (18) 'deki doğrusal kontrolörün 12 doğrusallaştırılmış durumu için yanıt grafikleri verilmiştir. İHA'nın en sonunda sorunsuz bir şekilde sabit pozisyona döneceği ve üç Euler açısının sonunda 0 olacağı ve sabit kalacağı görülmekte, bu da İHA'nın sonunda sola veya öne eğilmeyeceğini göstermektedir. Açısal hız ve doğrusal hız da kademeli olarak 0'a yaklaşır; bu, İHA'nın nihayet kararlı hale geldiğinde sapma düzleminde neredeyse hiç salınımının olmadığını gösterir.



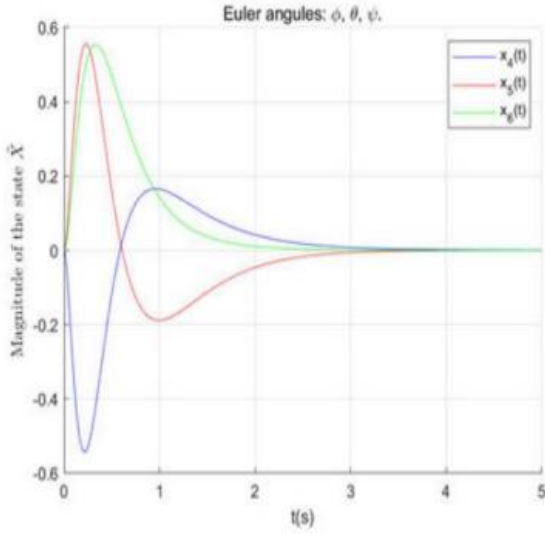
Şekil 2: Durum-Konum Grafiği (State-Position Graph)

$$(a) \text{Durum } [x_1, x_2, x_3]^T = [x, y, z]^T$$



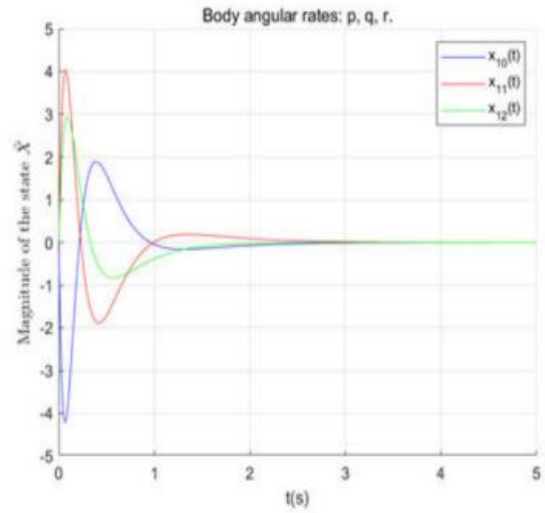
Şekil 4: Durum-Konum Grafiği (State-Position Graph)

$$(c) \text{Durum } [x_7, x_8, x_9]^T = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$$



Şekil 3: Durum-Konum Grafiği (State-Position Graph)

$$(b) \text{Durum } [x_4, x_5, x_6]^T = [\phi, \theta, \psi]^T$$

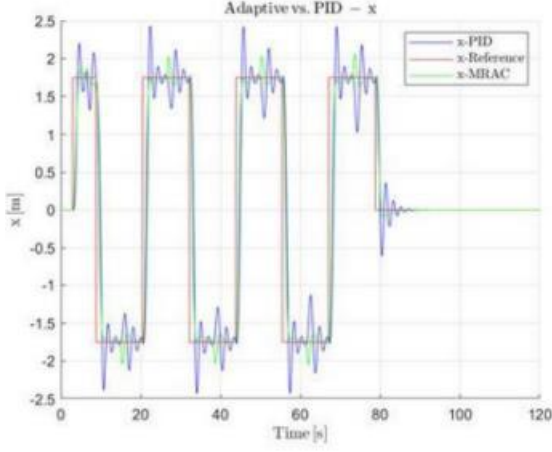


Şekil 5: Durum-Konum Grafiği (State-Position Graph)

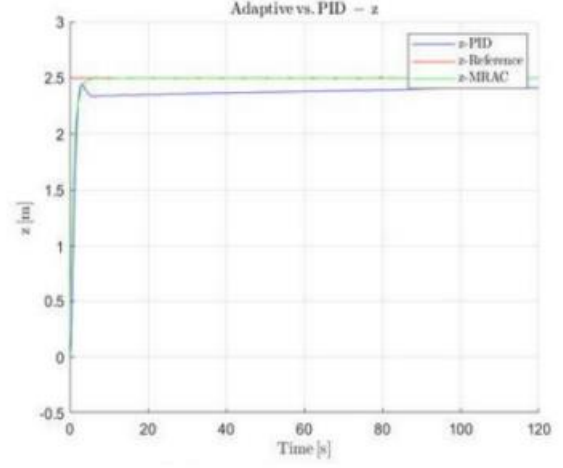
$$(d) \text{Durum } [x_{10}, x_{11}, x_{12}]^T = [p, q, r]^T$$

Yukarıdaki şekillerde bulunan (a), (b), (c) ve (d) grafikleri on iki durum değişkeninin yörüngesini göstermektedir. İyi bir kontrolör, eğim ve yuvarlanma açılarını sabit tutarken gerekli pozisyona ve sapma açısına ulaşabilmelidir.

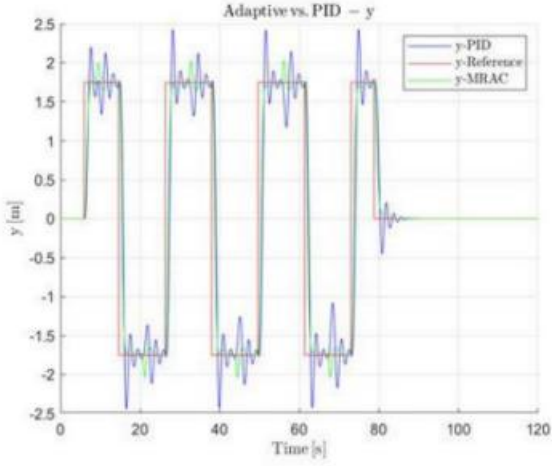
İHA'nın tutum kararlılığı performansının karşılaştırılmasını test etmek için ilk olarak İHA'nın kare uçuşuna PID kontrolü ve model referans uyarlamalı kontrolü uygulanmıştır. Quadrotor İHA'nın yörünge farkı sırasıyla elde edilebilir ve yanlış kontrol teknolojisi, ideal referans yörünge ile karşılaştırılarak denetleyicinin performansı daha iyi değerlendirilebilir.



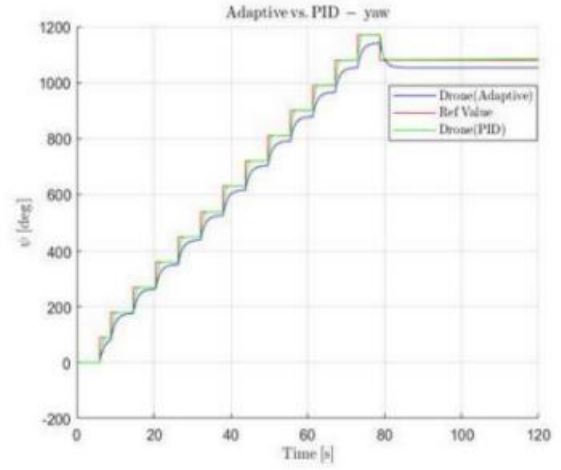
Şekil 6: x Ekseni Karşılaştırması (x-Axis Comparison)



Şekil 8: z Ekseni Karşılaştırması (z-Axis Comparison)

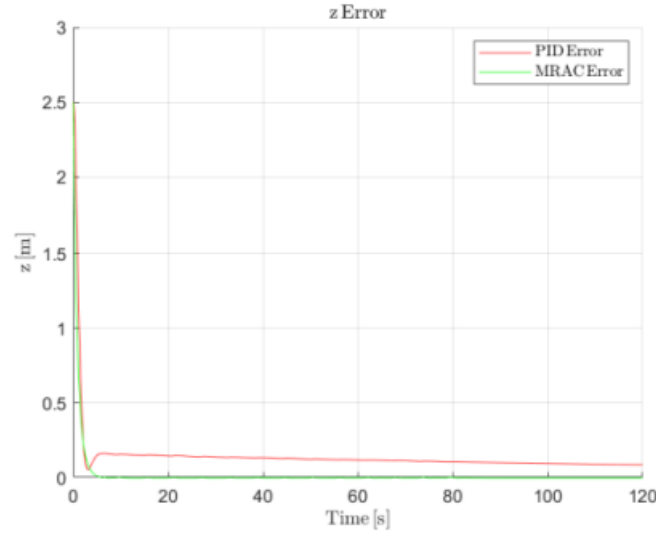


Şekil 7: y Ekseni Karşılaştırması (y-Axis Comparison)



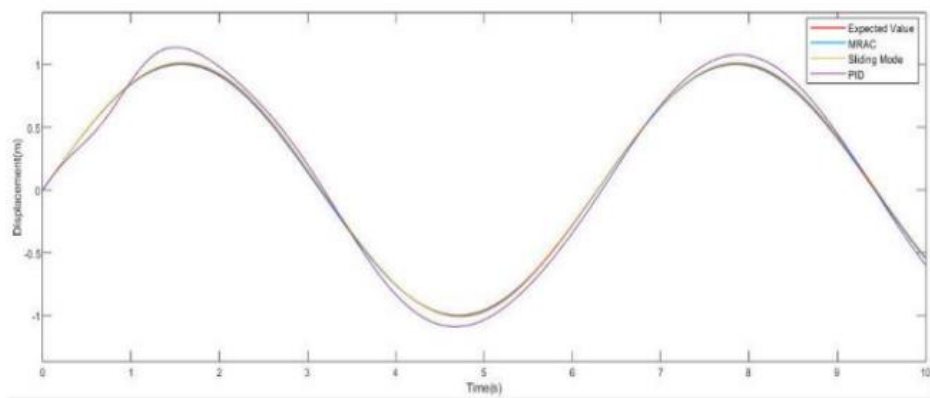
Şekil 9: Yalpalama Momenti Karşılaştırması (Yaw Moment Comparison)

Şekil 2 ve Şekil 3'ten, x ekseninde ve y ekseninde PID titreşim genliğinin model referans uyarlamalı kontrolünkinden daha büyük ve titreşimin daha sık olduğu görülebilir. Her ne kadar 80'li yıllardan sonra sabit kaldığında sabit konumunu koruyabilse de, model referans uyarlamalı kontrolünün uçuş sırasında parazit önleme yeteneği ve takip kontrol performansı açısından daha iyi sağlamlığa ve daha iyi performansa sahip olduğu açıktır. Şekil 4, z ekseninde, PID ile referans model arasında her zaman bir mesafe boşluğu bulunurken, model referans uyarlamalı kontrolünün nihayet referans modelle aynı seviyede kalabildiğini göstermektedir. Bunun nedeni, iki haftalık uçuştan sonra, x ekseninde ve y ekseninde bu süre zarfında sürekli olarak değişmesi nedeniyle, İHA'nın Euler açısında yunuslama hareketinin meydana gelmesi ve bunun sonucunda nihai irtifa konumlandırmasının gerçek referans model konumlandırmasından daha düşük olması olabilir. Yalpa açısının karşılaştırılması da bunu kanıtlayabilir. Sapma açısının her belirli periyotta değişmesi sürecinde, bu değer her zaman gerçek referans modelinin değerinden daha düşüktür; bu, uçuş süreci bozulduktan sonra Euler açısının kararsız olacağını ve dolayısıyla sonuçta yer değiştirme hatalarına dönüşeceğini gösterir.

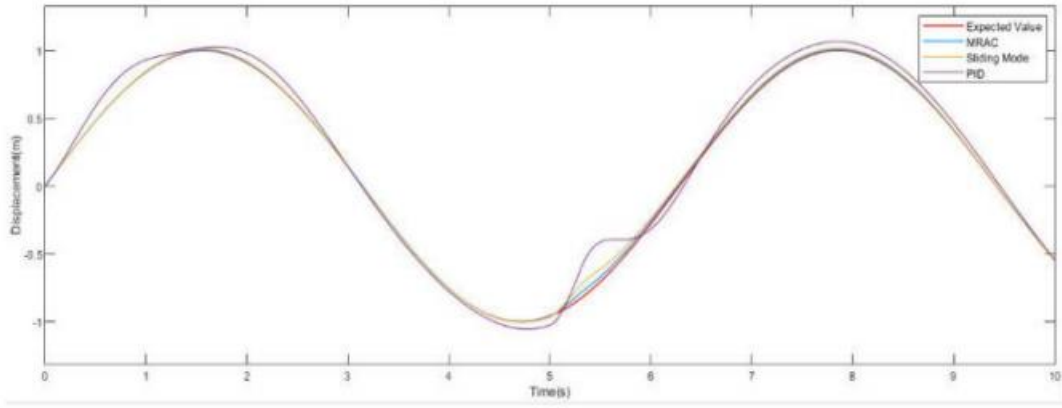


Şekil 10: Stabilizasyondan önce ve sonra z ekseninde hata
(Error in z-axis before and after stabilization)

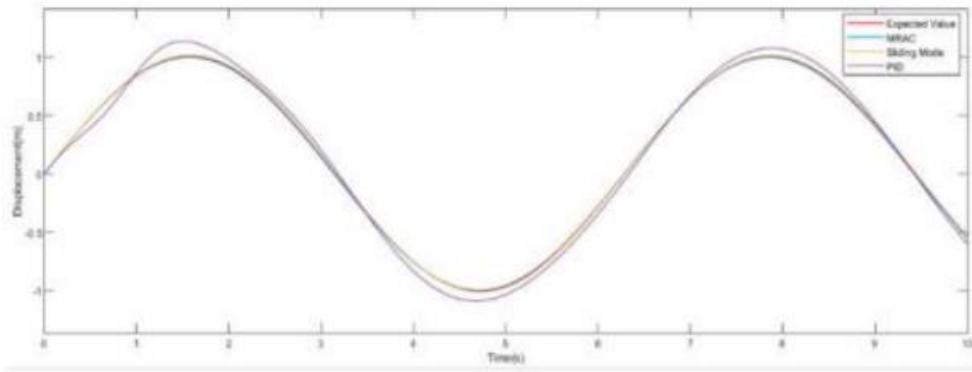
Son olarak, önerilen modelin sağlamlığını doğrulamak için, nesneyi kavrarken kuvvet etkisinden sonra uyarlanabilir esnek tutucuyla donatılmış İHA'nın uyarlanabilir algoritmasını doğrulamak için, uyarlanabilir esnek tutucuyla donatılmış dört rotorlu İHA, zorlamalı müdahalenin etkisi altında nesneyi kavramadan önce ve sonra kontrol ve izleme etkisini incelemek için araştırma nesnesi olarak alınmıştır. Dış bozucuyu $\sin(0,3)t$ olarak ayarlanmış olup, İHA 5s-5,3s'de yakaladığında uç efektörden gelen 10N anlık kuvvet bozulmasını simüle edilmiştir ve model referansı uyarlanabilir kontrolünü PID kontrolü ve kayan mod kontrolüyle karşılaştırılmıştır. [10] Üç yöndeki yer değiştirmenin karşılaştırmalı simülasyon eğrileri Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterildiği gibi elde edilebilir.



Şekil 11: x'in Yer değiştirme değişimi (Displacement change of x)



Şekil 12: y'nin Yer Değiştirme Değişimi (Displacement change of y)

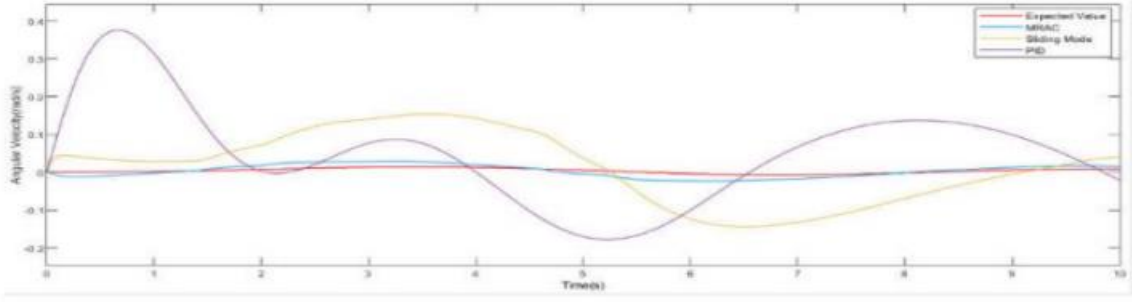


Şekil 13: z'nin Yer Değiştirme Değişimi (Displacement change of z)

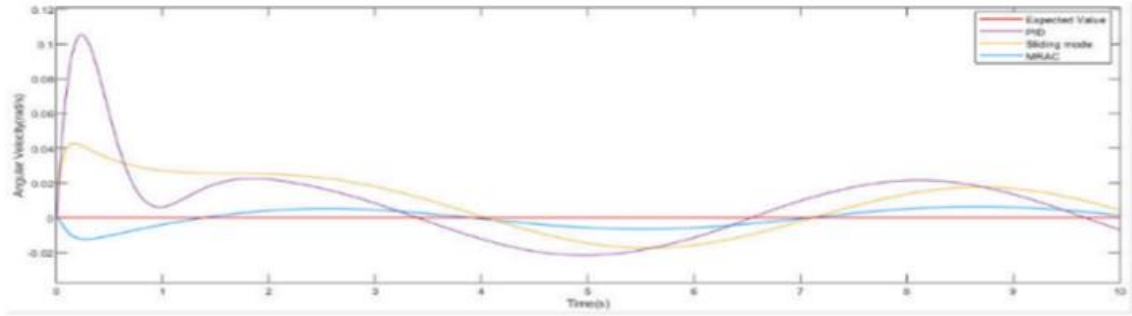
Üç yer değiştirmede, x yönündeki yer değiştirme açısından 5 saniyeden 5,3 saniyeye kadar sürekli kuvvet etkisine maruz kaldığında, üç kontrolör x ekseninde ofset üretecektir. Ofset, model referansı uyarlamalı kontrol < kayan modlu kontrol > PID kontrolüdür ve x eksenindeki model referansı uyarlamalı kontrolün yer değiştirme temeli, referans modelle örtüşür; bu, model referansı uyarlamalı kontrolün, zorunlu müdahale ve diğer faktörler nedeniyle rahatsız edildikten sonra parametreleri ayarlamak için hızlı bir şekilde uyum sağlayabileceğini gösterir. PID kontrolü ve kayan mod kontrolü, kavrama işlemindeki kuvvetin ani ve göz ardı edilemeyecek şekilde bozulması nedeniyle sistem parametreleri değiştiğinde zaman içindeki bozulmaya karşı koyamaz, bu da kavrama işleminde kenetleme tırnağının konumunu belirsiz hale getirir, bu da kavrama başarısını ciddi şekilde azaltır ve y ekseninde ve z eksenindeki performans aynıdır.

Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12, bu süreçte açısal hızın değişimini açıklamaktadır. İdeal referans modelinin açısal hızı 0'a yakındır çünkü İHA'nın uçuş sürecinde açıyı istediği gibi döndürmesine gerek yoktur. Şekilden görülebileceği gibi, tutuculu İHA'nın açısal hızı, ağırlık merkezi ofseti nedeniyle uçuş sürecinde kararsızdır ve PID en fazla dalgalanır.

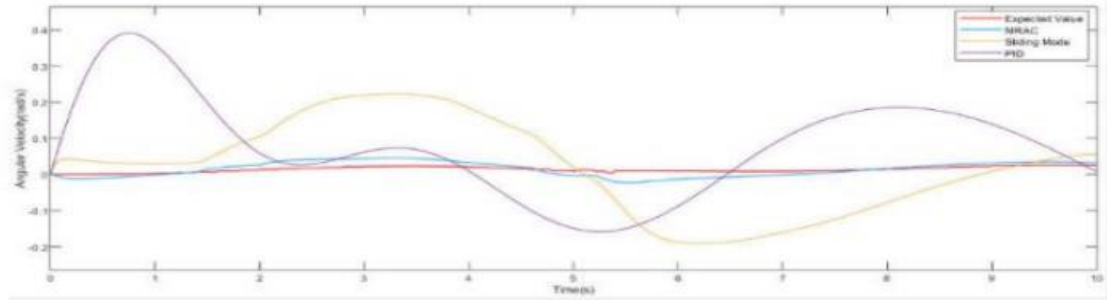
Model referans uyarlamalının üç yönündeki açısal hız ideal değere yakınlaşabilir; bu aynı zamanda uçuş sürecinin çevresel girişim ve ağırlık merkezi ofseti gibi girişim faktörlerine maruz kalsa bile model referans uyarlamalı kontrolünün de girişime direnebileceği ve İHA'nın stabilitesini koruyabileceği anlamına gelir.



Şekil 10: Açısal hız değişimi (p) (Angular velocity change (p))



Şekil 11: Açısal hız değişimi (q) (Angular velocity change (q))



Şekil 12: Açısal hız değişimi (r) (Angular velocity change (r))

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu araştırma, tutuculu bir İHA'ya uygun, referans uyarlanabilir bir kontrolör modeli önermektedir. Önceki deneylerden, İHA'nın etkili bir şekilde sabit bir havada kalma pozisyonuna yaklaşabildiği görülebilmektedir. İzleme görevinde MRAC'ın performansını daha fazla karşılaştırmak için, izleme görevindeki MRAC ve PID kontrolünün konum koordinatları ve sapma açısının yakınsaması karşılaştırılır. İster konumdaki ister sapma açısındaki değişiklik olsun, MRAC'ın değişim sapmasının referans değerine daha yakın olduğu ve z eksenindeki hatanın daha küçük olduğu görülmektedir. Bu nedenle tasarlanan kontrolör diğer kontrolörlere göre daha hızlı yakınsama hızı ve daha iyi sağlamlık göstermekte, İHA'nın kavrama görev kararlılığı PID kontrolüne göre daha küçük bir hata payı ile sağlanmaktadır. Tasarlanan kontrolör, İHA'nın faydalı yükü taşıırken dinamik özelliklerini stabilize etmek için kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Wang, T., Umemoto, K., Endo, T., & Matsuno, F. (2021). Modeling and Control of a Quadrotor UAV Equipped With a Flexible Arm in Vertical Plane. *IEEE Access*, 9, 98476-98489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3095536>
- Thomas, J., Loianno, G., Polin, J., Sreenath, K., & Kumar, V. (2014). Toward autonomous avian-inspired grasping for micro aerial vehicles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 9(2), 025010. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/2/025010>
- Qi, J., Kang, J., & Lu, X. (2018). Design of Autonomous Indoor Aerial Manipulator. 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), 263-268. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2018.8630538>
- Ghadiok, V., Goldin, J., & Ren, W. (2011). Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 4645-4651. <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094690>
- Mofid, O., Mobayen, S., & Wong, W.-K. (2021). Adaptive Terminal Sliding Mode Control for Attitude and Position Tracking Control of Quadrotor UAVs in the Existence of External Disturbance. *IEEE Access*, 9, 3428-3440. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3047659>
- Shi, X., Cheng Y., Yin C., Dadras S., & Huang X., (2019) Design of fractional-order backstepping sliding mode control for quadrotor UAV, *Asian Journal of Control*, 21 156-171. <https://doi.org/10.1002/asjc.1946>
- Song, X., & Hu, S. (2019). Hierarchy-Based Adaptive Generalized Predictive Control for Aerial Grasping of a Quadrotor Manipulator. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 24(4), 451-458. <https://doi.org/10.1007/s12204-019-2081-7>
- Yilmaz, E., Zaki, H., & Unel, M. (2019). Nonlinear Adaptive Control of an Aerial Manipulation System. 2019 18th European Control Conference (ECC), 3916-3921. <https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8795709>
- Şahan, G. (2021). Relaxations of Conditions of Lyapunov Functions. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 238-244. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.808371>
- Chen, G., Zhou, J., Wang, L., Wang, Y., Yin, Y., & Ding, Z. (2022). Modeling and Adaptive Controlling of Quadrotor UAV with Flexible Gripper. 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 1984-1991. <https://doi.org/10.1109/ITAIC54216.2022.9836966>

HAVA ARACI GAZ TÜRBİNLİ MOTOR MALZEMELERİ

Erkan KUZZEY

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Seminer Dersi Ödevi, Ocak 2024

ÖZET

Havacılıkta önce emniyet ilkesi olmasına rağmen olası giderler havayolu taşımacılığı şirketlerin gidişatını belirleyen bir numaralı etken olası giderlerdir. Üretim maliyetleri, satın alma ve kiralama masrafları ayrıldığında geriye işletme giderleri kalmaktadır. Bakım maliyetleri ise işletme giderleri içerisinde büyük yer tutmaktadır. Tasarım ve üretim aşamasında hava aracında kullanılan malzemelerin işletme maliyetlerine etkisi yüksektir. Bu etki yüksek gerilim ve sıcaklık altında çalışan hava aracı motorları için daha fazladır. Gelişen teknoloji takip edilerek hava aracı motorunun malzemelerinin iyileştirilmesi motor performansını artırabilir ve motorun kullanım ömrünü uzatabilir. Motor kullanım ömrünün ve motor performansının artması işletme maliyetlerini büyük ölçüde doğrudan etkiler. Yüksek sıcaklık çalışma koşullarına daha uygun malzemelerin tercihi bakım maliyetlerini de oldukça düşürecektir. Bu derleme ile hava aracı motorlarının temel bölümlerinde; kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz, tasarım aşamasında malzeme seçiminin geldiği son nokta ele alınıp tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uçak Motoru, Kompresör, Türbin, Yanma Odası, Egzoz

GİRİŞ

Uçak gövde yapılarında ve jet motoru bileşenlerinde kullanılan malzemeler başarılı tasarım, üretim, uçakların sertifikasyonu, işletimi ve bakımı açılarından çok önemlidir. Malzemeler uçağın neredeyse her yönünü etkiler. Bu tasarım değişkenlerinden birkaçı;

1. Yeni uçağın satın alma maliyeti,
2. Mevcut uçaklara yönelik yapısal yükseltmelerin(iyileştirme) maliyeti,
3. Uçak gövdesi, yapısal bileşenler ve motorlar için tasarım seçenekleri,
4. Uçağın yakıt tüketimi,
5. Uçağın operasyonel performansı (hız, menzil ve faydalı yük),
6. Motorların gücü ve yakıt verimliliği,
7. Uçak gövdesinin hizmet içi bakımı (muayene ve onarımı) ve motorlar,
8. Uçak gövdesinin ve motorların güvenliği, güvenilirliği ve çalışma ömrü,
9. Ve kullanım ömrü sonunda uçağın imha edilmesi ve geri dönüştürülmesidir[1-4].

Yapısal malzemeler hava aracının kanatları, kuyruğu, iniş takımları ve gövdesinde kullanıldığı için tasarım aşamasında bu malzemelerin seçimi önemlidir. Uçağı ileri itmek için itki üretirken çeşitli kuvvetleri karşılayan motorlar için malzeme seçimi kendi başına bir araştırma sahasıdır.

Tasarım aşamasında malzemelerin hava aracı için önemli birçok özelliği göz önünde bulundurulur. Bu özellikler arasında;

- Fiziksel özellikler (örneğin yoğunluk),
- Mekanik özellikler (örneğin sertlik, mukavemet ve tokluk),
- Kimyasal özellikler (örneğin korozyon ve oksidasyon),
- Termal özellikler (örneğin ısı kapasitesi, termal iletkenlik) ve
- Elektriksel özellikler (örneğin elektriksel iletkenlik) bulunur [2, 4, 5].

1. TEMEL HAVA ARACI MALZEMELERİ

Genel olarak, hava aracı malzemelerinden hava aracında kullanılma yüzdelerine göre söz edilmektedir. Kullanımı toplam ağırlığın %1'inden az olan malzemelerin grafiklerde isimlerinden bahsedilmez. Bu durumda temel hava aracı malzemelerinden söz etmek daha aydınlatıcıdır. Hava araçlarında en çok tercih edilen malzeme türleri aşağıdaki gibidir:

- Alüminyum
- Titanyum
- Magnezyum
- Çelik
- Süper Alaşımlar
- Fiber-Polimer Kompozitler
- Fiber-Metal Tabakalar [3, 6, 7].

1.1. Alüminyum

Alüminyum 1920'lerde ve 1930'larda yaygın uçak gövdesi malzemesi olarak kullanılan ahşabın yerini aldığından beri en çok tercih edilen uçak malzemesidir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımı en çok kullanılan çeşididir. Özellikle 2000 yılından önce yapılmış birçok ticari ve askeri uçağın gövde, kanat ve destek yapıları alüminyum alaşımlarından yapılmıştır. Alüminyum Çoğu uçağın yapısal ağırlığının %70-80'ini ve hacim olarak %50'den fazlasını oluşturur. Son yıllarda pek çok askeri uçak ve helikopterde Fiber-polimer kompozitlerin kullanılması nedeniyle alüminyum malzemelerin kullanımı azalmıştır. Kompozit malzemelerin kullanımının artması alüminyum kullanımını etkilemiştir, ancak alüminyum hava aracı yapısal malzemesi olarak önemini korumaktadır [3, 6, 7].

1.2. Titanyum

Titanyum alaşımları hem uçak gövdesi yapılarında hem de jet motoru bileşenlerinde kullanılır. Orta seviye ağırlıkları ve yüksek yapısal özellikleri nedeniyle (örn. sertlik, mukavemet, tokluk, yorulma), mükemmel korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta mekanik özelliklerini koruma yeteneği sayesinde jet motorlarının vazgeçilmezidir. Farklı karışımlar ile çeşitli tipte titanyum alaşımları jet motorlarında kullanılmaktadır. Ti-6Al-4 tipi jet motorlarda yaygın olarak kullanılır. Titanyum alaşımları modern jet motorlarının ağırlığının %25-30'unu oluşturur ve 400-500 °C'ye kadar çalışabilir hava aracı parçalarında kullanılır. Fan bıçakları, düşük basınç kompresör parçaları, ateşleme bujileri ve egzoz bölümündeki nozzle parçaları titanyum alaşımı içermektedir[3, 6, 7].

1.3. Magnezyum

Magnezyum en hafif metallere biridir. 1940 ve 1950 yılları arasında hafif hava aracı üretiminde yaygın olarak kullanılmıştır. Alüminyum ve kompozitlerin kullanımının artmasıyla kullanımdan neredeyse kalkmıştır. Modern hava aracı ve helikopterlerde toplam ağırlığın % 2 sini oluşturmaktadır. Alüminyuma göre yüksek üretim maliyeti düşük sertlik ve mukavemeti üretimde rolünü düşürmüştür [7]. İlave olarak magnezyumun korozyon direnci çok düşüktür. Bu sebepten gaz türbin motorlarında kullanılmaz. Piston motorlu uçakların dişli kutusunda ve dişli kutusu yuvasında, helikopterlerin ana transmisyon yuvalarında kullanılır [3, 6].

1.4. Çelik Alaşımaları

Yapısal mühendislikte en yaygın kullanılan malzeme olmasına rağmen hava araçlarında kullanımı toplam ağırlık olarak %5 ile %10 arasında değişmektedir. Isıl işlem ile çok yüksek mukavemette, alüminyum alaşımlarının üç katı, titanyum alaşımlarının ise 2 katı kadar, malzeme üretilmektedir. Yüksek elastik modülü iyi yorulma direncine ve kırılma sertliğine sahiptir. Bu özellikleri çeliği iniş takımları ve kanat kafes yapısı gibi emniyet açısından kritik bölgelerde vazgeçilmez yapmaktadır [6]. İstenilen özellikleri karşılmasına rağmen çeliğin az kullanılmasının sebebi yoğunluğudur. Alüminyumun yaklaşık olarak 3 katı yoğunluğa sahip ve titanyumdan %50 daha yoğundur. Buna ek olarak; çeliklerin bazı yük sek mukavemetli tipleri alüminyum ve titanyuma göre korozyona daha duyarlıdır ve gevrektiler. Gevreklikleri çatlamlarına sebep olmaktadır [7].

1.5. Süper Alaşımlar

Süper alaşımlar jet motorlarında kullanılan bir grup nikel, demir-nikel ve kobalt alaşımıdır. Bu metaller mükemmel ısıya dayanıklılık özelliklerine sahiptir ve yüksek sıcaklıklarda sertlik, mukavemet, tokluk ve boyutsal stabilitelerini koruma özellikleri diğer havacılık yapısal malzemelerinden çok daha yüksektir [6]. Süper alaşımlar aynı zamanda jet motorlarında yüksek sıcaklıklarda kullanıldığında korozyona ve oksidasyona karşı iyi bir dirence sahiptir. En önemli süper alaşım türü yüksek konsantrasyonda krom, demir, titanyum ve kobalt ve diğer alaşım elementleri içeren nikel bazlı malzemedir. Nikel süper alaşımları gaz türbinli motorların en sıcak bölümlerinin çalışma aralığına uygun 800–1000 °C sıcaklıklarda uzun süre çalışabilir. Süper alaşımlar yüksek basınçlı türbin kanatları ve diskleri, yanma odası, art yakıcılar ve itme ters çeviriciler (Thrust Reverser) gibi motor bileşenlerinde kullanılır [3].

1.6. Fiber-Polimer Kompozitler

Kompozitler bir polimer matris içinde (genellikle epoksi) sürekli elyaflardan (genellikle karbon) oluşan yüksek sertlik, mukavemet ve yorulma performansına sahip hafif malzemelerdir [3, 4]. Alüminyumun yanı sıra, karbon fiber kompozit de uçakların ve helikopterlerin gövdesinde en sık kullanılan yapısal malzemedir. Kompozitler alüminyum alaşımlarından daha hafif ve daha güçlüdür ancak aynı zamanda daha pahalıdır ve darbe hasarına karşı daha hassastır [3, 4]. Karbon fiber kompozitler kanatlar, gövde, kuyruk takımı ve kontrol yüzeyleri dahil (örneğin rudder, elevatör, aileronlar) uçakların ana yapılarında kullanılırlar. Kompozitler hava alığı fan bıçakları gibi jet motorunun soğuk bölümlerinde ağırlığı azaltmak için kullanılır [6, 7]. Karbonun yanı sıra cam elyafı içeren kompozitler, radomlarda, aerodinamik kaplamalar gibi ikincil yapısal bileşenlerde kullanılır. Aramid elyaf içeren yüksek darbe dayanımı gerektiren bileşenlerde kullanılır [7].

1.7. Fiber-Metal Tabakalar

Fiber-metal tabakalar (laminatlar) (FML), ince birleştirilmiş metal levhalar ve fiber-polimer kompozitlerden oluşan hafif yapısal malzemelerdir. Bu birleşim ile tek başına metal yapıdan daha hafif, daha dayanıklı ve yorulma dayanımı daha yüksek, tek başına kompozitten daha iyi çarpma hasarı dayanımı ve hasar toleransı daha iyi malzeme üretilir. En yaygın FML ince cam elyaf kompozit katmanlarına bağlanmış ince alüminyum alaşım katmanlarından oluşan GLARE'dir (cam takviyeli alüminyumdan türetilen bir isim). FML'ler uçaklarda yaygın olarak kullanılan yapısal malzemeler değildir. Günümüzde yalnızca Airbus 380 (gövdede) ve C17 GlobeMaster III (kargo kapılarında) hava araçlarında kullanılmaktadır [6, 7].

2. GAZ TÜRBİNLİ MOTOR MALZEMELERİ

Motorlar hava araçlarının en sıcak bölümleridir. Bu nedenle motorların üretimindeki malzeme tercihinde sıcaklığın etkileri çok daha önemlidir. Malzeme mukavemetini etkileyen değişkenlerin etki derecesi sıcaklık ile doğru orantılıdır. Fakat kullanılan malzemenin çalıştığı ortam sıcaklığı, malzemenin erime noktasına yaklaştıkça sürünme etkileri oldukça artmaktadır. Yük veya gerilim etkisi altında malzemede zamanla oluşan kalıcı biçim değişikliklerine sürünme denir. Sürünme herhangi bir sıcaklıkta malzemenin kendi ağırlığı nedeniyle bile gerçekleşebilir. Sıcaklık kullanılan malzemenin erime sıcaklığına yaklaştıkça sürünmenin etkileri daha belirgin hale gelir. Sürünme etkileri, motor sıcak bölümlerinde kullanılan malzemeler için kritiktir. Motorun sıcak bölümlerinin malzeme tercihinde sürünme faktörü belirleyicidir [7]. Bu makalede hava aracı motor türlerinden gaz türbinli motorlar ele alınmıştır. Hava araçlarındaki gaz türbinli motorlarda ağırlıkça en çok malzeme kompresör, yanma odası, türbin ve egzoz bölümlerinde kullanılır [7]. Çalışmada temel olarak bu bölümlerde kullanılan malzemeler üzerinde durulmuştur.

2.1. Kompresör Bölümü

Motor kompresör bölümünde sıcaklık, motorun diğer bölümlerine göre daha düşüktür. Ses altı hızlarda uçan hava araçlarında kompresör bölümünün sıcaklığı 200-250 °C arasında değişir [7]. Ses üstü hızlarda uçan hava araçlarında ise bu bölgenin sıcaklığı 500 ile 600 °C arasında değişmektedir. Kompresör bölümünde yukarıda belirtilen sıcaklıklarda sürünme etkilerine dayanıklı yüksek özgül mukavemeti (mukavemet/ağırlık) olan korozyona dayanıklı titanyum alaşımları kullanılır [8]. Geleceğin çok yüksek hızlı hava araçları düşünüldüğünde hipersonik hızlarda ($4 < M$) uçmak daha yaygın hale gelecektir. Hipersonik hızlarda kompresör bölümünün çalışma sıcaklığı 600 °C sıcaklığı aşmaktadır. Sürünme etkilerinden dolayı kompresörlerde titanyum alaşımı değil de süper alaşımların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat titanyum alaşımlarına göre süper alaşımlar daha düşük özgül mukavemete sahiptir. Süper alaşımların tercihi toplam ağırlığı oldukça artıracaktır. Bu problemin üstesinden gelmek için titanyum alüminidler süper alaşımların alternatifi olarak kullanılmaktadır. Titanyum alüminidler (Ti-Al) 600 ile 850 °C arası çalışma sıcaklıklarında mekanik özelliklerini korur ve süper alaşımlardan daha hafiftir [9].

2.2. Yanma Odası Bölümü

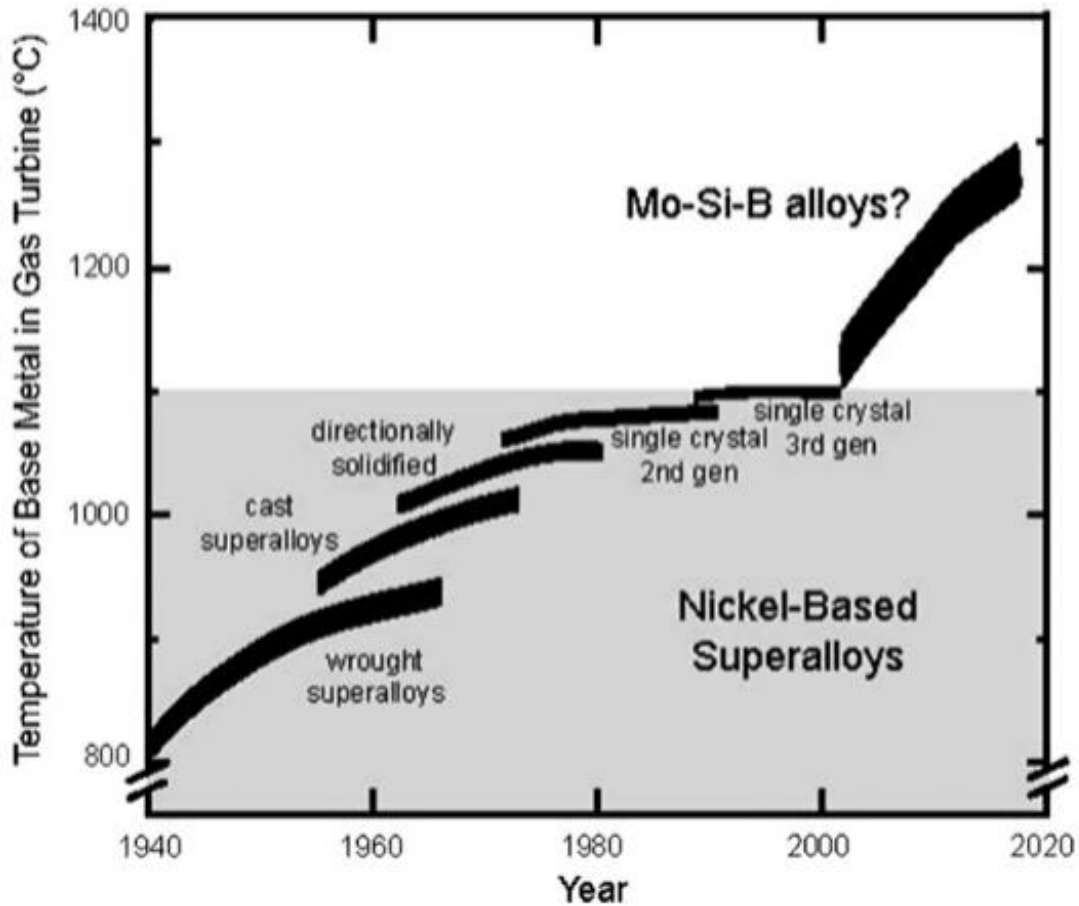
Hava aracı motorlarında yanma; tutuşma, alevin yayılması ve alevin sürekliliği değişkenleri ile anılır. Tutuşma, alevin yayılması ve alevin sürekliliği değişkenleri yanma verimini ve sonuç olarak motor verimini belirler. Bu değişkenler üzerinde yapılan değişiklikler ile yanma odası verimi artırılmaktadır [10]. Yanma odasında temel olarak kompresörden gelen havanın basıncını düşürmeden yanma verimini artırmak amaçlanır. Bu bölgede sıcaklık 1700 °C 'nin üzerine çıkmaktadır. Kullanılan malzemenin sıcaklıkla mukavemet değişimi hesaplandığında süper alaşımların kullanımı gerektiği anlaşılır. Süper alaşımların kullanım ömrünü uzatmak için metal yüzeylere seramik termal kaplama yapılmaktadır [11].

2.3. Türbin Bölümü

Türbin bölümü motorun en sıcak bölümüdür. Türbin bölümü ses altı hızlarda uçan hava araçlarında 1000 °C sıcaklığa ulaşır. Ses üstü hızlarda uçan hava araçlarında ise bu bölgenin sıcaklığı 1500 °C'yi bulmaktadır. Bu koşullar türbinde belirtilen sıcaklıklarda sürünme etkilerini karşılamak için ısıya dayanıklı nikel bazlı süper alaşımların kullanılması gerektirmektedir [8, 12]. Türbin bölümünde kullanılan malzemelerin sürünme direnci ile birlikte çekme mukavemeti, mikroyapısal stabilite ve döngüsel yorulma direnci, termal yorulma direnci ve sıcak korozyon direnci özelliklerinin geliştirilmesi

gerekir. Ses üstü hızlarda uçan hava aracı motorlarının türbin bölümü genellikle mekanik oluşturulan (MA) süper alaşımlar (örn. MA6000), toz metalurjisi ile oluşturulan (P/M) süper alaşımlar (örn. P/M IN-792), tek kristal yapı (SC) süper alaşımlar (örn. TMS-75, Rene’N6, CMSX-1fl, vb.), yönlü katılaştırılmış (DS) süper alaşımlar (Hastelloy X, Haynes 188 ve benzeri) gibi nikel bazlı ve kobalt bazlı süper alaşım malzemelerden üretilir [13]. Termal verimliliğin türbin giriş sıcaklığının doğrudan bir fonksiyonu olduğu keşfedildikten sonra türbin verimini artıracak daha yüksek ısı kapasitesi olan malzemeler araştırılmaya başlandı. Bu doğrultuda tasarımlarda erime noktası daha yüksek olan (>2500 °C) molibden bazlı süper alaşımlar yer aldı. Molibden süper alaşımlarıyla birlikte türbin giriş sıcaklığı artırıldı [14]. Şekil 2.1’de süper alaşımların yıllara göre sıcaklık kapasitelerindeki değişim verilmiştir [8].

Süper alaşımlardan daha yüksek verim alabilmek için termal bariyer kaplamalar (Thermal Barrier Coating-TBC) kullanılmaktadır. Termal bariyer kaplamada ana metalin üzerine seramik kaplama yapılır. Metal yüzeyleri kaplayan bu seramik katman metali devirsel ısı gerilimlerinden korur ve normalden daha soğuk tutar. Bu sayede türbin girişinde daha yüksek hızlara izin verilir [15].



Şekil 2.1. Süper alaşımların yıllara göre sıcaklık kapasitesi değişimi [8]

Gelecekte hipersonik uçuşlar yaygınlaşacağı bilinmektedir. Dolayısıyla çok yüksek hızlara uyum sağlayacak motor malzemesi ihtiyacı doğacaktır. Hava aracı motorunun sıcak bölümlerinde kullanılmak üzere önerilen malzeme seramik matrisli alüminyum fiberli kompozit malzemelerdir [8].

2.4. Egzoz Bölümü

Geleneksel hava araçlarındaki gaz türbinli motorlarda egzoz bölümü türbinde enerjisi işe çevrilen gazın bir miktar tepkiyle veya yok sayılacak kadar az bir tepkiyle dışarı atıldığı bölümdür. Gaz enerjisinin bir kısmını kaybettiği için bu bölge türbin bölümüne göre daha soğuktur. Art yanmalı motorlu hava araçlarında ise yanan gaz sonradan yakıldığı için bu gölge türbin bölümünden bir miktar daha sıcak olabilmektedir. Fakat bu fark çeşitli soğutma işlemleri ile kapatılmaktadır [16]. Gaz türbinli motorların egzoz bölümlerinde titanyum alaşımları ve süper alaşımlar kullanılmaktadır. Art yanmalı motorlarda ise kullanılan metalin ömrünü uzatmak ve ısı verimi artırmak için bu bölgede metal yüzeyleri seramik termal kaplama ile kaplanır [16]. Egzoz bölümünün iç kısmında nikel bazlı süper alaşımlar tercih edilir. Dış kasa bölümünde ise titanyum alaşımları kullanılır [16].

SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompresör stator kanatçıkları ve rotor kanatçıkları, türbin rotor kanatçıkları ve egzoz kanatçıkları radyal ve aksenal kuvvetlerin etkisinde çalışır. Kompresör ve türbin bölümlerden ayrı ayrı yanma odası ve egzoz bölümlerine gönderilen gaz kütleleri de radyal ve aksenal kuvvetlere sabittir. Bahsedilen bölgeler için malzeme seçiminde bu radyal ve aksenal kuvvetler iyi analiz edilmelidir. Sıcaklığın malzeme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği incelenen çalışmalarda görülmüştür. Yüksek sıcaklarda mikroyapısal stabilitesi yüksek malzemelerin kullanılması yanma odası, özellikle türbin bölümlerinden yüksek performans elde etmenin anahtarıdır. Böylece;

- Yanma odası, türbin ve egzoz bölümlerinde süper alaşımların kullanılması,
- Türbin rotor ve egzoz kanatçıklarının tek kristal yapıda üretilmesi,
- Yanma odası, türbin ve egzoz bölümlerinde metallere seramik termal kaplama

yapılması motor performansını artırır işletme maliyetlerini azaltır.

Kompresör bölümünde ise yüksek hız uçuşlarını karşılamak için titanyum alaşımlarının yetersiz kaldığı çalışmalarda görülmektedir. Bu bölgede süper alaşım kullanımı ağırlığı oldukça artırdığından, bunun yerine titanyum alüminidler tercih edilmektedir. Titanyum alüminidler önce kullanılan titanyum alaşımlarından sıcaklığa daha dirençli ve süper alaşımlara göre yoğunluğu daha düşüktür. Titanyum alüminidlerin kullanımı yaygındır ve araştırma geliştirmeye açıktır. Seramik matrisli alüminyum fiber yapı malzemeler geleceğin hipersonik hızlarda uçacağı öngörülen hava araçlarının yüksek sıcaklık bölgeleri için araştırılmakta ve geliştirilmektedir. Bu kompozit yapının süper alaşımlara göre düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek termal stabilite özelliklerini göstermesi beklenmektedir. Seramik matrisli malzemeler yeni yeni geliştirilmektedir ve araştırmacılara geniş bir çalışma alanı sunmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] D. Bino Prince Raja, G. Ramanan, I. Gowda V. Patil, ve P. Suganthi, “Static structural analysis and testing of aircraft wing spar using composite material”, Mater Today Proc, c. 64, ss. 416-424, Oca. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.04.762.

[2] S. Kilimtzidis, A. Kotzakolios, ve V. Kostopoulos, “Efficient structural optimisation of composite materials aircraft wings”, Compos Struct, c. 303, s. 116268, Oca. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116268.

-
- [3] J. Y. (John Y. Mann, I. S. Milligan, International Committee on Aeronautical Fatigue., ve Australia. Department of Supply., Aircraft fatigue: design, operational, and economic aspects; proceedings. Pergamon Press Australia, 1972. Erişim: 26 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.sciencedirect.com:5070/book/9780080175263/aircraft-fatigue>
- [4] L. R. Jenkinson ve J. F. Marchman, “Aircraft Design Projects: For Engineering Students”, Aircraft Design Projects: For Engineering Students, ss. 1-371, 2003, doi: 10.1016/B978-0-7506-5772-3.X5000-5.
- [5] F. AHMAD, M. Al AWADH, ve S. NOOR, “Optimum alternate material selection methodology for an aircraft skin”, Chinese Journal of Aeronautics, c. 36, sy 7, ss. 476-488, Tem. 2023, doi: 10.1016/J.CJA.2023.05.019.
- [6] A. P. Mouritz, Introduction to Aerospace Materials. Elsevier Inc., 2012. doi: 10.2514/4.869198.
- [7] T. H. G. Megson, Aircraft Structures for Engineering Students. Elsevier, 2021. doi: 10.1016/B978-0-12-822868-5.09989-7.
- [8] Z. Huda ve P. Edi, “Materials selection in design of structures and engines of supersonic aircrafts: A review”, Materials & Design (1980-2015), c. 46, ss. 552-560, Nis. 2013, doi: 10.1016/J.MATDES.2012.10.001.
- [9] J. J. S. Dilip, H. Miyanaji, A. Lassell, T. L. Starr, ve B. Stucker, “A novel method to fabricate TiAl intermetallic alloy 3D parts using additive manufacturing”, Defence Technology, c. 13, sy 2, ss. 72-76, Nis. 2017, doi: 10.1016/J.DT.2016.08.001.
- [10] G. A. Q. Abdulrahman, N. A. A. Qasem, B. Imteyaz, A. M. Abdallah, ve M. A. Habib, “A review of aircraft subsonic and supersonic combustors”, Aerosp Sci Technol, c. 132, s. 108067, Oca. 2023, doi: 10.1016/J.AST.2022.108067.
- [11] K. Sharma, A. Aditya, ve G. Srinivas, “Material failure analysis and engine combustion instabilities of both air and non-air breathing engines”, Mater Today Proc, c. 27, ss. 231-237, Oca. 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.10.105.
- [12] M. P. Boyce, “Gas Turbine Engineering Handbook, Fourth Edition”, Gas Turbine Engineering Handbook, Fourth Edition, ss. 1-956, Oca. 2011, doi: 10.1016/C2009-0-64242-2.
- [13] R. C. Reed, T. Tao, ve N. Warnken, “Alloys-By-Design: Application to nickelbased single crystal superalloys”, Acta Mater, c. 57, sy 19, ss. 5898-5913, Kas. 2009, doi: 10.1016/J. ACTAMAT.2009.08.018.
- [14] J. H. Perepezko, “The Hotter the Engine, the Better”, Science (1979), c. 326, sy 5956, ss. 1068-1069, Kas. 2009, doi: 10.1126/SCIENCE.1179327.
- [15] T. Sadowski ve P. Golewski, “Multidisciplinary analysis of the operational temperature increase of turbine blades in combustion engines by application of the ceramic thermal barrier coatings (TBC)”, Comput Mater Sci, c. 50, sy 4, ss. 1326-1335, Şub. 2011, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2010.05.032.
- [16] S. Biswas, S. Ramachandra, P. Hans, ve S. P. Suresh Kumar, “Materials for Gas Turbine Engines: Present Status, Future Trends and Indigenous Efforts”, 2022, doi: 10.1007/s41745-022-00295-z.

TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİNDEN MEKANİK ALAŞIMLAMA

MUSTAFA ÖZCANLAR

ÖZET

Malzeme üretim yöntemlerinden toz metalurjisi önemli bir yere sahiptir. Toz metalurjisi işlemleri; toz metallere, seramikler, parçacık takviyeli kompozitler, plastik kalıplama ve metal dövme gibi birçok tekniğin sentezinden oluşmaktadır [1]. Özellikle bu yöntemle üretilen alaşımlar günümüzde kendinden yağlamalı yataklar, otomotiv güç aktarma elemanları, ortopedik protezler, şarj edilebilir piller ve jet motoru parçaları birçok alanda kullanılmaktadır. Toz metalurjisiyle üretilen parçaların özellikleri; toz taneciklerin şekli, boyutu, bileşimi, presleme basıncı, sinterleme süresi ve sinterleme sıcaklığı gibi çok sayıda parametreye bağlıdır [1]. Bu yöntemin diğer üretim yöntemlerine göre birçok avantajları bulunmaktadır. Toz metalurjisinde yaygın olarak kullanılan toz üretim yöntemleri vardır bunlar kimyasal, elektroliz, atomizasyon ve mekanik üretim yöntemidir. Araştırmam da özellikle mekanik alaşımlama üzerinde duracağım. Mekanik alaşımlama kimyasal ya da ısıl işlemleri uygulamadan metallere alaşımlanması yöntemidir [2]. Üretilen tozların avantajlarına ve bu yöntemde dikkat edilmesi gereken parametrelere dikkat çekeceğim. Bunlar; kullanılan tozun hammaddesi ve boyutları, öğütücünün tipi, öğütücü kap, öğütücü hızı, öğütme zamanı öğütücü kollar, öğütücü bilyalar, toz/bilya oranı, kabın doluluk oranı, değirmenin atmosferi, değirmenin sıcaklığıdır. Bu parametrelere dikkat ettiğimiz zaman üretilen tozun istenilen özelliklerde olmasını sağlamasını çalışacağım.

1.GİRİŞ

Toz metalurjisi yöntemleri; matriksi oluşturan toz malzemeler ve takviye edilecek elementlerin klasik yöntem ile karıştırılması ve daha sonra soğuk presleme yapılarak sinterlenmesi şeklindedir. Bu yöntem işlem kolaylığından dolayı magnezyum matriks alaşımlı, alüminyum matriks alaşımlı, titanyum matriks alaşımlı ve bakır matriks alaşımlı kompozit malzeme üretiminde sıkça kullanılmaktadır [3]. Toz metalurjisi yöntemiyle parça üretiminin avantaj ve dezavantajlarının kavranabilmesi için, bazı önemli parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bunlar; şekil karmaşıklığı, şekil boyutları, malzeme sistemleri, toleranslar, fiziksel ve mekanik özellikler, maliyet şeklinde sıralanmaktadır. Bu parametreler detaylı incelendiğinde, toz metalurjisi yönteminin, dövme ve döküm gibi yöntemlere göre birtakım avantajları ve bazı sınırlamaları mevcuttur [4].

1.2. Toz Metalurjisi Avantajları

Ergitme kayıpları azdır. Parça üretimi sırasında ham malzemelerin %99'u kullanılarak malzeme kaybının ortadan kalkması Konveksiyonel yöntemlere üretilmeyen alaşımların üretilmesine imkân verir. Bu maddede anlatılmak istenen şudur; Bazı metaller alaşım olarak döküm yoluyla elde edilemez bunlara çinko ve titanyum örnek verilebilir. Titanyum 1668 °C de erirken çinko (buharlaştırma sıcaklığı 907 °C) o sıcaklıkta buharlaşmaktadır. Bu yüzden bazı alaşımlar sadece bu yöntemle üretilir. Metal olmayan malzemeler metal malzemeler içerisine homojen olarak yayılabilir. Uygun toleransta ve yüzey kalitesinde parçalar üretilir. Sinterlenmiş parçalarda gözeneklilik veya tam doluluk sağlanabilir. Yüksek termal dayanıma ve mukavemete sahip kristal ve amorf yapıların yalnızca bu yöntemle üretilmesi karmaşık yapıdaki küçük boyutlu şekillerin seri bir şekilde üretilmesidir [4].

1.3. Toz Metalurjisi Dezavantajları

Toleranslar talaşlı imalata göre daha kabadır. Tozların kalıp içerisinde akışkanlıkları sınırlıdır. Girift (çok karışmış olan parçalar) parçaların üretimi sınırlıdır. Seri imalat yapılmazsa sıkıştırma ve sinterleme gibi toz metalurjisi ünitelerinin ilk yatırım maliyetlerinin oldukça yüksek olması Çok büyük boyutlu parça

üretiminin yapılamaması şeklindedir. Mekanik özellikler bazı işlemler yapılmadığı takdirde iyileştirilemez [5].

2. TOZ ÜRETİM TEKNİKLERİ

Metalik tozların üretiminde uygulanan yöntemler, tozların çeşitli özelliklerini belirler. Tozların geometrik şekilleri imalat tekniklerine göre küresel, karmaşık şekil gibi birçok çeşit olabilir. Tozların yüzeyi de imalat tekniğine bağlı farklılık gösterebilmektedir. Malzemelerin birçoğu özelliklerine uygun yöntemlerle toz durumuna getirilmesi mümkündür. En yaygın olarak mekanik yöntemler, kimyasal yöntemler, elektroliz yöntemi, atomizasyon yöntemidir [2].

2.1. Elektroliz Yöntemi

Elektrolizle toz üretim tekniğinde, bir elektroliz hücresinin katodu üzerinde belirli çalışma koşullarında element tozları biriktirilmektedir. Elektrolizle toz üretimi, hücreye uygulanan belirli bir voltajda anodun çözünmesiyle başlar katot üzerindeki birikinti sıyrılır, yıkanır, kurutulur ve öğütülerek toz haline getirilir. Sonrasında gerilmeleri azaltmak ve uçucu maddeleri gidermek için tavlama işlemi uygulanır [2]. Bu yöntemle, oksitlerden meydana gelen tozlar elektrolitik banyoda katoda akım vererek çökertilir veya kırabilmesi iyi özellikte katotta birikir. Banyo için kullanılan tekne kurşun ile kaplıdır. Sülfürik asit ile bakır sülfat elektrolitik görevini alır. Krom, paladyum, demir, bakır, mangan, çinko ve gümüş örnek metaller arasında gösterilebilir. Elektroliz yönteminin diğer yöntemlerden en önemli üstünlüğü, yüksek saflıkta toz üretimidir. Elektroliz tekniğiyle üretilen tozlar, genellikle süngerimsi veya dentritik şekillidir. Tozların özellikleri, biriktirme sırasındaki banyo şartlarına ve sonraki işlem basamaklarına bağlıdır [6].

2.3. Kimyasal Üretim Yöntemleri

Kimyasal yöntem ile metalik tozların imalatı, metal oksitlerinin (Tungsten, nikel, bakır, kobalt, demir ve molibden) hidrojen veya CO gibi indirgeyici gazların yardımıyla oksitlerinden indirgenmesidir. Bu teknikte imal edilen demir-sünger tozu, bu tekniğe verilebilecek en önemli örnektir. Demir oksit cevherinin ideal özellikte indirgeyici elemanlar kullanılarak süngerimsi bir hale dönüştürülerek sünger demir elde edilir. Kireç taşı ve kok ile karıştırılan magnetit, seramik kaplara konular. 1260 sıcaklık seviyesindeki fırınlarda seramik kaplar içerisindeki karışım 68 saat bekletilir. Sünger demir, indirgenme işleminin gerçekleşmesiyle elde edilir [6].

2.4. Atomizasyon Yöntemleri

Atomizasyon, akışkan metalin mekanik olarak ya da belirli bir hıza sahip sıvı veya gaz akımı ile parçalanması işlemidir. Diğer toz üretim tekniklerine göre atomizasyon yöntemleri, metal ve alaşım tozlarının üretiminde en çok tercih edilen yöntem olup metalik tozların %90'ı bu yöntemle üretilmektedir. Yüksek enerjili öğütme esnasında, toz parçacıklar hızlıca yassılaşıp, soğuk kaynaklanıp, kırılır ve tekrardan kaynaklanır. İki tane çelik bilyanın çarpışma esnasında aralarında bir miktar toz sıkışır. Yaklaşık 1000 adet parçacık toplam 0,2 mg ağırlığında her çarpışma sırasında sıkışır. Oluşan çarpma kuvvetinin etkisiyle toz parçacıklarını plastik deformasyona uğratar, bu da kırılmaya ve deformasyon sertleşmesine neden olur. Başlangıç aşamasında parçacıklar yumuşak olduğundan (sünek-kırılgan veya sünek-sünek malzeme kombinasyonu kullanıldığında), büyük parçacıklar elde edilmesi ve parçacıkların birlikte kaynaklanması eğilimi yüksektir. Gayet geniş parçacık boyut grupları oluşur ve bazıları başlangıç parçacıklarından üç kat daha büyük olabiliyor. Bu yöntemin temel prensibi, eriyik haldeki metalin çok ince bir şerit halinde akıtılması ve bu sırada bir su veya gaz jeti ile çok küçük parçacıklara ayrılarak soğutulmasıdır. Azot, argon ve hava en sık kullanılan gazlar iken, su ise en sık tercih edilen sıvıdır. Bu üretim yöntemi üç temel aşamadan oluşmakta olup bunlar; ergitme, atomizasyon, katılaşma ve soğumadır [4].

3. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Mekanik alaşımlama kimyasal ya da ısı işlemleri uygulamadan metallerin alaşımlaması yöntemidir. Yoğun bir öğütme uygulamasıyla, sürekli olarak plastik deformasyon, kırılma, soğuk kaynak, yeniden

kırılma ve kaynaklanmayla son derece homojen ve gayet ince mikro yapılar, asal bir atmosfer ortamında bu teknikle elde edilme yöntemidir 13. Genellikle katı hal alaşımlaması olarak adlandırılan mekanik alaşımlama/öğütme tekniği, tane boyutu gayet ince ve kontrollü mikro yapıya sahip tozlardan meydana gelen 18 kompozit metal alaşım tozları imalatında kullanılan, yüksek enerjili ve kuru öğütme yöntemidir [2].

3.1. Mekanik Alaşımlama Avantajları

Sıvı fazda birbiri içerisinde (Cu-Pb) ya da katı fazda (Fe-Cu) gibi çözünmeyen elementlerin alaşımlandırılması, Normal ergitme teknikleriyle elde edilmesi zor ya da olanaksız olan elementlerin (WC-Co gibi), mekanik alaşımlamayla bir katı kal işlemi olması dolayısıyla elde edilebilir, Nitrür, oksit ve karbürlerin alaşımlama esnasında katı, sıvı ve gaz halinde takviye edilebilirliği, Birbirinden çok farklı ergime sıcaklığındaki malzemelerden olan intermetaliklerin elde edilmesi, Alaşımlamada, termodinamik açılarından kompozisyon sınırlılığı bulunmamaktadır. Böylelikle sıra dışı ve farklı alaşımların üretilmesine imkân sağlar, Partiküllerin yardımıyla, toparlanmayı ve yeniden kristalleşmeyi engellemesi ya da yavaşlatılmasıyla malzemelerin yüksek sıcaklık kararlılığının yükseltilmesi, Homojen dağılmış matris içerisindeki partiküllerin yardımıyla dislokasyon hareketlerini engelleyen bariyerlerin meydana getirilmesi, Termal kararlılığı gelişmiş, aşınma ve korozyon direnci yüksek uygun malzemelerin elde edilmesi, Fabrikasyon ve depolama açısından kolaylık, Tek seferde oldukça fazla tozun alaşımlandırılması ve elde edilmesi, Nano kristalli malzemelerin elde edilmesine imkan sağlaması, Kritik sıcaklıklarda sinterlemeyle ısı işlem imkanı vermesi, Arzu edilen tepkimeleri gerçekleştirmesi ya da hızlandırması, Sinterleme ve preslemeyle yüzde yüze yakın yoğunlukta ürün elde edilmesi [2].

3.2. Mekanik Alaşımlama Parametreleri

3.2.1. Kullanılan Hammadde ve Boyutları

1 ila 200 µm boyutlarında aşırı miktarda bulunan, mekanik alaşımlama için kullanılan başlangıç ürünleri saf ticari tozlardır. Lakin parçacık toz boyutu öğütme bilyasının ölçülerinden küçük olmak şartıyla çok önem arz etmez [2].

3.2.2. Kullanılan Bilyalar

En fazla kullanılan bilya malzemeleri olarak, takım çeliği, temperlenmiş çelik, sertleştirilmiş çelik, sertleştirilmiş kromlu çelik, rulman çeliği, paslanmaz çeliği sayabiliriz [2].

3.2.3. Toz-Bilya Oranı

Doldurma oranı olarakta, bilyalarının ağırlığının toza oranı bazı durumlarda adlandırılır. Bu durum birçok araştırmacı tarafından 1:1 gibi küçük değerlerden, 220:1 gibi büyük değerlerle ispatlanmıştır [2].

3.2.4. Sıcaklığın Etkisi

Sıcaklık, mekanik alaşımlama uygulamasında önemli bir faktördür. Mekanik alaşımlama sırasında tozlara etkiyen sıcaklık ara faz oluşumu, amorf yapı (cam) oluşumu, alaşımlama gibi uygulamalar üzerinde çok büyük etmendir [2].

3.2.5. Öğütme Hızı

Toza aktarılan enerjinin değirmenin daha hızlı döndürüldükçe daha fazla olacağını tahmin etmek mümkündür. Kullanılabilecek hızı belirli sınırlamalar konulmasının sebebinin değirmenin tasarımına bağlayabiliriz [2].

3.2.6. Öğütücü Değirmenin Tipi

Öğütmenin değişik sıcaklıklarda kontrol yetenekleri, işlem hızı, tozun kırılma zamanının en aza indirmeye, tozun niceliği, tozun tipi, istenilen en son oluşum gibi özellikler değirmenin tipine, mekanik

alaşım uygulama bağdır. Çoğunlukla yatay bilyalı, atritör tipi ve titreşimli öğütücüler tercih edilmektedir [2].

3.2.6.1. Titreşimli Bilyalı Değirmen

Salınım hareketi ileri-geri hazne bitiminin yanal hareketleriyle birleştirilir olduğundan haznenin sekiz şeklinde hareket ettiği görülür. Bilyalar tozlara haznenin salınımlıyla çarparak, haznenin sonu tozu karıştırır ve öğütür [2].

3.2.6.2. Yatay Bilyalı Değirmen

Hazne içerisindeki malzeme ve öğütme bilyelerin, dönen disk tarafından oluşan kuvvet ve kendi eksenleri etrafında dönen hazneler tarafından oluşan merkezkaç kuvveti tarafından etki olur [2].

3.2.6.3. Atritör Değirmeni

Yarısı küçük çelik bilyelerle doldurulmuş olan dönen bir yatay tamburdan oluşur, atritör değirmen metal tozların bulunduğu kısım tamburun dönmesiyle meydana gelir. Öğütme oranı yüksek hızlardaki dönmelerde artış gösterir [2].

3.2.7. Öğütme zamanı

En önemli unsur öğütme zamanıdır. Toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanma durumunu yakalayacak şekilde zaman seçilir, normalde. Öğütme yoğunluğuna, bilye toz oranına, öğütme sıcaklığına ve değirmen tipine göre, gerekli zaman değişir. Özel toz sistemi ve yukarıdaki unsurların her bir kombinasyonu için zaman belirlenmelidir [2].

4. KAYNAKÇA

- [1] T. Enstitüye ve V. Tarih, “İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMLERİ İLE ÜRETİLMİŞ Al-Fe TABANLI SiC VE Y 2 O 3 PEKİŞTİRİCİLİ KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU YÜKSEK LİSANS TEZİ Met. Müh. Ahmet Umut SÖYLER (506051421) OCAK 2008”.
- [2] Y. Lisans Tezi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Danışman ve S. Osman YILMAZ, “MEKANİK ALAŞIMLAMA YÖNTEMİ ile (B 4 C+FeTi) TAKVİYELİ Fe ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİ Ahmet MİLLİ”, 2017.
- [3] DUTDİBİ CEREN, “Mekanik Alaşım ve Sinterleme Süreçleriyle Al₁₂Si-xSiC v Al₁₂Si-xB₄ (X=AĞIRLIKÇA %5, %10 ve%15) Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyon Çalışmaları”, İstanbul, Ara. 211M.S.
- [4] S. Erman, “TOZ METAL ÇELİKLERDE MEKANİK ALAŞIMLAMAMIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 2019 YÜKSEK LİSANS TEZİ İMALAT MÜHENDİSLİĞİ”.
- [5] S. Chakrabarty, “POWDER METALLURGY TECHNOLOGY”, *Cambridge international science publishing*, c. 5, sy 3, ss. 248-253, 2020, Erişim: 04 Aralık 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: https://www.academia.edu/42225480/POWDER_METALLURGY_TECHNOLOGY
- [6] J. S. Benjamin, “Mechanical alloying — A perspective”, *Metal Powder Report*, c. 45, sy 2, ss. 122-127, Şub. 1990, doi: 10.1016/S0026-0657(10)80124-9.

HAVACILIKTA OPTİMAL KONTROL: PERFORMANS VE VERİMLİLİĞİN ARTIRILMASI

Seda Erkmen

Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ

ÖZET

Bu çalışma havacılıkta optimal kontrolün kritik rolünü incelemektedir. Basitleştirilmiş modeller ve kısıtlamalar içinde çalışan sistemlerde kullanılan, tipik olarak frekans domenindeki teknikleri kullanan klasik kontrol sistemleri, çoklu-giriş çoklu-çıkış (MIMO) sistemler gibi karmaşık sistem modellerinde yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine, karmaşık sistem modellerinde, örneğin bir hava aracının durum kontrol, irtifa kontrol ve yakıt tüketimi gibi karmaşık sistemleri kontrol edebilmek için optimal kontrol algoritmaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Optimal kontrol algoritmaları, bir sistemin veya bir sürecin performansının verimini en üst seviyeye çıkarmak için tasarlanan kontrol stratejisi olarak tanımlanabilir. Havacılıkta, uçakların güvenli ve verimli bir şekilde uçabilmesini sağlamak için kullanılır. Örneğin irtifa, hız ve yakıt tüketimi gibi çeşitli parametreleri kontrol etmenin en verimli yolunu belirleyerek uçağın performansını optimize etmeye yardımcı olur. Doğrudan kontrol ettiği parametreler dışında optimizasyon sonucu bir dizi faydalı sonuç alınmaktadır. Örneğin uçakların yakıt tasarrufunu maksimuma çıkarmak için kısıtlamalar altında optimize edilmiş rotayı izlemesi operasyonel maliyetlerin azaltılması, çevresel sürdürülebilirliğin iyileştirilmesi ve yakıt verimliliğinin artırılmasıyla sonuçlanır. Konu başlığı altında optimal kontrolün ve uygulama alanlarının anlaşılması, optimal kontrolün havacılıktaki uygulamaları ve bu uygulamaların hava aracı performansı ve verimliliğine etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, Performans, Kontrol, Verimlilik, Havacılık

ABSTRACT

OPTIMAL CONTROL IN AVIATION: INCREASING PERFORMANCE AND EFFICIENCY

This study examines the critical role of optimal control in aviation. Classical control systems, which typically use frequency domain techniques and are used in systems operating within simplified models and constraints, are inadequate in complex system models such as multiple-input multiple-output (MIMO) systems. Instead, optimal control algorithms are widely used in complex system models to control complex systems such as attitude control, altitude control and fuel consumption of an aircraft. Optimal control algorithms can be defined as a control strategy designed to maximize the efficiency of the performance of a system or a process. It is used in aviation to ensure that aircraft can fly safely and efficiently. It helps optimize the aircraft's performance by determining the most efficient way to control various parameters, for example altitude, speed and fuel consumption. Apart from the parameters it directly controls, a number of useful results are obtained as a result of optimization. For example, aircraft following an optimized route within constraints to maximize fuel savings on a designated route results in reducing operational costs, improving environmental sustainability and increasing fuel efficiency. Under the subject heading, it is aimed to understand optimal control and its application areas, to examine the applications of optimal control in aviation and the effects of these applications on aircraft performance and efficiency.

Keywords: Optimization, Performance, Control, Efficiency, Aviation

1.GİRİŞ

Havacılıkta, performansı ve verimliliği arttırmak önemli bir hedef olmaya devam etmektedir. Bu performans hedeflerine örnek olarak süzülme uçuşu menzilin, uçağın erişebileceği maksimum hızın, uçağın mutlak tavanının artırılması, yakıt tüketiminin ve güç gereksiniminin azaltılması verilebilir [1]. Bu değişiklik gösteren hedeflerden bazıları gerçekleştirilirken hedef örneği olarak verilen bazı parametreler ise uçuş koşulu için kısıtlama olacaktır. Örneğin uçağın menzili artırılırken uçak için bir yakıt tüketimi 6000 litre ile sınırlandırılabilir. Modern teknolojinin gerektirdiği karmaşık sistemler ve performans kriterlerini karşılamak için klasik kontrol yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Klasik kontrol yöntemleri yerine günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan optimal kontrol teorisi, sistemin fiziksel kısıtlamalarını karşılamakla beraber amaç fonksiyonu olarak verilen belirli bir performans kriterini en aza indirmeyi veya en üst düzeye çıkarmayı amaçlar. [2] Bu teori, yakıt tüketimini, çevresel etki ve operasyonel maliyetleri en aza indirmek için gelişmiş algoritmalar, gelişmiş sistemler ve yenilikçi stratejiler sunarak klasik uçuş kontrolü yöntemlerinin ötesine geçer.

2.OPTİMAL KONTROL TEORİSİ

2.1. Optimal Kontrol Teorisi Nedir?

Optimal kontrol teorisi, belirli bir performans kriterini veya amacını optimize etmek için bir sistem için en iyi kontrol stratejisini bulmaya odaklanan kontrol teorisi alanını ifade eder. Daha basit bir ifadeyle, belirli bir performans ölçüsünü en aza indirirken veya en üst düzeye çıkarırken istenen sonucu elde etmek için dinamik bir sistemin girdilerini zaman içinde manipüle etmenin en etkili yolunun belirlenmesini içerir.

Optimal kontrol problemleri matematiksel olarak zorlayıcı olabilir ve sistemin spesifik özelliklerine ve optimizasyon kriterlerine bağlı olarak farklı yöntemler kullanılabilir. Genel olarak optimal kontrol, verilen kısıtlamalar altında mümkün olan en iyi sistem performansına yol açan kontrol stratejilerinin tasarlanması için bir çerçeve sağlar. Optimal kontrol geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu alanlardan bazıları havacılık, robotik, ekonomi ve finanstır [2]. Örnek olarak;

- Havacılıkta optimal kontrol ilkeleri kullanılarak hava koşullarına, hava trafiğine ve diğer faktörlere dayalı olarak bir uçak için yakıt açısından en verimli rotanın planlanması,
- Robotikte otonom araçların trafikte gezinmesi, trafik kurallarına uyması ve varış noktalarına verimli bir şekilde ulaşması için en uygun kontrol algoritmalarının tasarlanması verilebilir.

2.2. Optimal Kontrol Teorisi Kavram ve Bileşenleri

Optimal Kontrol Teorisinin bazı temel kavramları ve bileşenleri şunlardır: Dinamik Sistemler: Optimal Kontrol Teorisi, zaman içinde gelişen sistemler olan dinamik sistemlerle ilgilenir. Bu sistemler diferansiyel denklemler veya fark denklemleri ile tanımlanabilir. Matematiksel olarak dinamik bir sistem, bir başlangıç değer problemi ile tanımlanır. Bunun anlamı, bir zaman kavramının olduğu ve bir zamandaki bir durumun daha sonra bir duruma veya muhtemelen bir durumlar koleksiyonuna dönüştüğüdür. [3]

Amaç Fonksiyonu veya Maliyet Fonksiyonu: Optimal kontroldeki amaç, maliyet fonksiyonu olarak da bilinen bir amaç fonksiyonunu en aza indiren veya en üst düzeye çıkaran bir kontrol stratejisi bulmaktır. Amaç fonksiyonu bir performans ölçüsünü veya sistem kalitesinin bir ölçüsünü temsil eder.

Kontrol Girişi: Kontrol girişi, karar vericinin sistemin davranışını etkilemek için manipüle edebileceği değişken veya değişkenler kümesidir. Optimal kontrol stratejisi, en iyi performansı elde etmek için bu girdilerin zaman içinde nasıl ayarlanması gerektiğini belirler.

Durum Değişkenleri: Sistemin herhangi bir andaki durumunu tanımlayan değişkenlerdir. Optimal kontrol stratejisi, amaç fonksiyonunu optimize ederken sistemi başlangıç durumundan istenen son duruma yönlendirmeyi amaçlar. Durum değişkenleri, sistemin mevcut durumu ve girdileri bilindiğinde sistemin gelecekteki davranışını belirleyen değişkenlerdir. [4]

Kısıtlamalar: Sistem üzerinde veya optimizasyon sürecinde dikkate alınması gereken kontrol girdileri üzerinde kısıtlamalar olabilir. Bu kısıtlamalar fiziksel sınırlamalar, kaynak kısıtlamaları veya diğer kısıtlamalar olabilir.

Pontryagin'in Maksimum Prensi: Bu, optimal kontrol teorisindeki temel bir teoremdir ve adını Rus matematikçi Lev Pontryagin'den almıştır. Optimal kontrolü sistemle ilişkili Hamilton fonksiyonuyla ilişkilendirerek optimal kontrol stratejisi için gerekli koşulları sağlar. Prensip, belirli kısıtlamalara tabi dinamik bir sistem bağlamında bir kontrolün optimal olması için gerekli koşulları sağlar. [5]

3.MATEMATİKSEL MODELLEME VE PERFORMANS

3.1. Matematiksel Modelleme

Optimal kontrol probleminin formülasyonu şunları gerektirir [2]:

1. Kontrol edilecek sistemin matematiksel modeli,
2. Performans indeksinin spesifikasyonu,
3. Durumlara ilişkin tüm sınır koşullarının belirtilmesi ve yerine getirilmesi gereken kısıtlamalar
4. Hangi değişkenlerin serbest olduğunun belirtilmesi/belirlenmesi.

Sistemin dinamik davranışı bir dizi diferansiyel denklemle tanımlanır. Sistemin $x(t)$ ile gösterilen durumu, bu denklemlere göre zaman içinde gelişir. Sistem dinamikleri tipik olarak aşağıdaki şekilde temsil edilir [6]:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t)$$

Burada;

- $x(t)$ sistemin t anındaki durum vektörüdür.
- $\dot{x}(t)$ $x(t)$ 'nin zamana göre türevini temsil eder
- $u(t)$ kontrol girişidir.
- f , sistemin dinamiğini temsil eden fonksiyondur. (1)

3.2. Kontrolcü Performansı

Optimal kontrolde, maliyet fonksiyonu veya amaç fonksiyonu olarak da bilinen performans indeksi, belirli bir kontrol stratejisinin arzu edilirliliğini ölçmek için kullanılan anahtar bir kavramdır. Birincil amaç, bu performans indeksini en aza indiren veya en üst düzeye çıkaran kontrol girdilerini bulmaktır. Performans indeksinin şekli, kontrol edilen sistemin belirli hedeflerine ve kısıtlamalarına bağlıdır. Optimal kontrolde performans indeksinin genel yapısı aşağıda verilmiştir [7]:

$$J = h(x(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} g(x(t), u(t), t) dt$$

Bu eşitlikte

- J performans indeksidir.
- $h(x(t_f), t_f)$ sistemin t_f anındaki son durumuna ilişkin maliyeti temsil eden terminal maliyettir.
- $g(x(t), u(t), t)$, t zamanındaki anlık maliyettir (Lagrangian) ve genellikle durum vektörünün, kontrol girişinin ve zamanın bir fonksiyonudur.

3.3. Kontrolcü Performansının Havacılık Örnekleriyle Açıklanması

- 1- Havacılıkta, özellikle kalkış sırasında bir uçağın yörünge optimizasyonuna yönelik optimal kontrolün bir örneğini ele alalım. Durum değişkenlerini, kontrol girişini, sistem dinamiklerini ve performans indeksini tanımlayalım. Durum değişkenleri: $x(t)$, Uçağın t zamanındaki konumunu, hızını ve irtifasını temsil eden durum vektörü. Kontrol girişi: $u(t)$, elevatör veya itki ayarını temsil eden kontrol girişi. Performans İndeksi: $J(u)$, sorunsuz bir yükseliş sağlarken kalkış süresini en aza indirecek şekilde tasarlanmıştır. Bu problem için en uygun kontrol çözümü, belirlenen dinamiklere ve kısıtlamalara bağlı kalarak uçağın en kısa sürede havalanmasına olanak tanıyan elevatör veya itki ayarını bulmayı amaçlamaktadır.
- 2- Bir gözetleme görevi için bir quadcopter drone'a uygulanan optimal kontrolcü örneğini ele alalım. Amaç, enerji tüketimini en aza indirirken drone'u önceden tanımlanmış bir yolda yönlendiren bir kontrol cihazı tasarlamaktır. Bu senaryoda optimal kontrolcünün performansı çeşitli yönlerde dayalı olarak değerlendirilebilir: Amaç fonksiyonu: Amaç, gözetleme görevi sırasında toplam enerji tüketimini en aza indirmektir. Amaç fonksiyonu, quadcopter'in tüm görev süresi boyunca tükettiği gücün integrali olarak tanımlanabilir. Verimlilik ve Kaynak Kullanımı: Optimal kontrol cihazı, drone'un tahrik sistemini verimli bir şekilde kullanan kontrol komutları oluşturmalıdır. Bu, gereksiz enerji harcamasını en aza indirirken istenen yörüngeye ulaşmak için rotor hızlarının ve açılarının ayarlanmasını içerir. İzleme ve Ayar Noktası Kontrolü: Optimal kontrolcünün önceden tanımlanmış gözetim yolunu doğru bir şekilde takip etmesi gerekir. Drone'un konumunun ve yönünün istenen yörüngeyle yakından eşleşmesi sağlanarak izleme hataları en aza indirilmelidir. Sağlamlık: Optimal kontrol cihazı, sert rüzgarlar veya sensör gürültüsü gibi bozucu etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Sağlamlık, drone'nun dinamiklerini etkileyebilecek öngörülemeyen faktörlerin varlığında bile iyi performansı sürdürmesini sağlar. Gerçek Zamanlı Uyarılma: Görev sırasında çevresel koşullar değişirse (örneğin rüzgar hızının artması), optimal kontrolcünün gerçek zamanlı olarak uyum sağlaması gerekir. Bu, değişiklikleri telafi etmek ve optimal performansı sürdürmek için kontrol girdilerinin ayarlanmasını içerebilir. Kısıtlama Memnuniyeti: Kontrol cihazının rotor hızı kısıtlamaları, pil kapasitesi ve çarpışmalardan kaçınma gibi fiziksel sınırlar dahilinde çalışması gerekir. Optimal kontrolcü bu kısıtlamaların görev boyunca karşılanmasını sağlamalıdır. Hesaplama Verimliliği: Optimal kontrolcünün hesaplama verimliliği, özellikle gerçek zamanlı çalışan bir drone için çok önemlidir. Kontrolcü, görev sırasında hızlı karar almaya imkan verecek şekilde optimal

kontrol girdilerini verimli bir şekilde hesaplayabilmelidir. Takaslar: Enerji tüketimi ile görevin tamamlanma süresi arasında ödünleşimler olabilir. Optimal kontrolcünün makul bir zaman dilimi içinde görev hedeflerine ulaşmak ile enerji kullanımını en aza indirmek arasında bir denge kurması gerekir. Duyarlılık analizi: Optimal kontrol cihazı, drone kütlesindeki değişiklikler, rotor verimliliği veya batarya özellikleri gibi parametrelerdeki değişikliklere karşı hassasiyet açısından değerlendirilmelidir. Duyarlılık analizi, bu parametrelerdeki değişikliklerin optimal kontrol stratejisini nasıl etkilediğini anlamaya yardımcı olur. Deneysel Doğrulama: Optimal kontrolcünün performansı simülasyonlar ve gerçek dünya deneyleri yoluyla doğrulanmalıdır. Bu, çeşitli koşullar altında beklendiği gibi performans gösterdiğinden emin olmak için denetleyicinin farklı senaryolarda test edilmesini içerir. Özetle, quadcopter gözetim örneğindeki optimal kontrolcünün performansı, drone'u önceden tanımlanmış yol boyunca verimli bir şekilde yönlendirme, enerji tüketimini en aza indirme, değişen koşullara uyum sağlama ve hesaplama açısından verimli ve sağlam olurken operasyonel kısıtlamaları karşılama becerisine dayalı olarak değerlendirilir. Deneysel doğrulama, kontrolcünün gerçek dünya senaryolarındaki etkinliğinin doğrulanmasına yardımcı olur.

4.HAVACILIKTA OPTİMAL KONTROL

4.1. Havacılıkta Optimal Kontrol Uygulama Alanları

Kolaylık sağlamak amacıyla, havacılıkta optimal kontrolün uygulama alanlarını dört kategoriye ayırırız:

1. Performans: Optimal kontrol, havacılık sistemlerinin performansının artırılmasında önemli bir rol oynar. Yakıt verimliliği, uçak rotası optimizasyonu, uçuş süresi optimizasyonu optimal kontrolün havacılıkta performansa etkilerine bazı örnekler olarak verilebilir.
2. Navigasyon: Optimal kontrolün havacılıkta navigasyon alanında çeşitli uygulamaları vardır. Uçağın yörüngesini, rehberliğini ve navigasyon stratejilerini optimize etmede önemli bir rol oynayarak verimliliğin, güvenliğin ve görev başarısının artırılmasına katkıda bulunur.
3. Yönlendirme (Rehberlik): Optimal kontrol, havacılık yönlendirme sistemlerinde çok önemli bir rol oynar ve uçuşun farklı aşamalarında uçağın hassasiyetine, verimliliğine ve güvenliğine katkıda bulunur. Hassas yaklaşma ve iniş, sıkışık hava sahasında yol planlama, çarpışmadan kaçınma örnek olarak verilebilir.
4. Kontrol: Optimal kontrol, havacılıkta, uçağın davranışını yöneten kontrol sistemlerinin tasarımı ve uygulanması için yaygın olarak kullanılmaktadır. Otopilot sistemleri, uçuş kontrol sistemi tasarımı, uzay araçlarında itki kontrolü gibi uygulamaları vardır.

4.2. Havacılıkta Optimal Kontrol Uygulamaları

1- Optimal Tırmanma Yörüngeleri

Yakıt açısından en verimli tırmanma yörüngesini belirlemek için optimal kontrol kullanılır. Bu, motor verimliliği ve atmosferik koşullar gibi faktörleri göz önünde bulundurarak yakıt tüketimini en aza indirmek için uçağın tırmanma hızının, hava hızının ve irtifa profilinin optimize edilmesini içerir. Optimal kontrol, yakıt tüketimini en aza indirmek ile seyir yüksekliğine tırmanmak için gereken süreyi azaltmak arasında bir denge kurulmasına yardımcı olur [8].

2- Manevra Süresi

Manevra sırasında dönüşü gerçekleştirmek için harcanan süresi en aza indirmeyi hedefler. Kontrol sistemi dönüş sırasında yatış açısını dinamik olarak ayarlayacak ve manevra için harcanan süreyi en aza indirecek şekilde optimize edecektir.

3- Minimum Yakıt Tüketimi

Yakıt tüketimini en aza indirmek, havacılıkta verimliliği artırmak ve operasyonel maliyetleri azaltmak açısından kritik bir hedeftir. Yakıt kullanımını en aza indiren uçuş yörüngelerini ve kontrol stratejilerini belirlemek için sıklıkla optimal kontrol teknikleri kullanılır. Optimizasyon sürecinden elde edilen optimal kontrol girdileri seyir aşamasında uçağın uçuş kontrol sistemine uygulanabilmektedir. Bu, minimum yakıt tüketimine ulaşmak için uçağın optimal gaz kelebeği ayarı ve irtifa dümeni sapması ile çalışmasını sağlar.

5.SONUÇ

Bu araştırmada optimal kontrol teorisi ve havacılık üzerinde uygulamaları ele alınmıştır. Uygulama alanı olan dinamik sistemler üzerinde, verilen kısıtlamalar çerçevesinde bir amaç fonksiyonunu maksimize veya minimize eden optimal kontrol teorisinin karmaşık matematiksel işlemler gerektirdiği görülmüştür. Uygulanacak kontrol yönteminin seçimi sistemin özel gereksinimlerine ve hesaplama karmaşıklığı ile gerçek dünya koşullarına uyulanabilirlik arasında istenen dengeye bağlıdır. 4.2. bölümde, optimal kontrol uygulamalarının havacılıktaki uygulamalarına 3 örnek ile yer verilmiştir. Verilen örneklerden optimal kontrol algoritmalarının yakıt tüketimini en aza indirmek, tırmanma süresini ve manevra süresini azaltmak gibi önemli performans parametrelerini etkilediği görülmüştür. Manevra süresinin azaltılması uçağın manevra kabiliyetini arttıracak ve bu da askeri uçaklarda önemli avantaj sağlayacaktır. Optimal kontrolle tırmanma süresinin minimize edilmesi yakıt tüketiminin azalmasını sağlayacaktır. Yakıt tüketiminin azaltılması da görev maliyetini düşürürken bunun yanı sıra kirliliğin de azalması demektir. Bu incelemeler optimal kontrol bir performans indeksini optimize ederken havacılıkta bu optimizasyon sonucunun tek bir faydadan fazlasını sağladığını göstermiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Anderson, J.D. (1978). Introduction to flight, New York: McGraw-Hill
2. Becerra, V. M. (2008). Optimal control. Scholarpedia, 3(1), 5354.
http://www.scholarpedia.org/article/Optimal_control
3. Meiss, J. D. (2007). Differential dynamical systems. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics
4. Dorf, R. C. , Bishop, R. H. (1967). Modern control systems, London: Pearson
5. Kopp, R. E. (1962). Pontryagin maximum principle. In Mathematics in Science and Engineering (Vol. 5, pp. 255-279). Amsterdam:Elsevier
6. Luenberger, D. G. (1979). : Introduction to dynamic systems, theory, models, and applications. New York: John Wiley & Sons.
7. Kirk, D. E. (1970). Optimal control theory: an introduction. New York: Dover Publications Inc.
8. Kant, P. (1981). Theory and applications of optimal control in aerospace systems, The Netherlands: Harford House.



Erciyes Üniversitesi

Uçak Mühendisliği Yüksek Lisans

Muhammed Can AYTEKİN

Melih YILDIZ

Araştırma Konuları

Araştırma yaparken TUSAŞ Lift- Up, Lift- Up+ ve Lift- Up++ programlarındaki Uçak Mühendisliği ile alakalı tez başlıklarından yararlandım. Google Scholar ile Uçak Mühendisliği alanındaki yazılmış tezleri inceledim. Ayrıca danışmanım ile görüştim.

1. 3D Printer Teknolojisi ile Havacılık Sektörüne Yönelik Chaff - Flare Magazine Geliştirilmesi

Bu çalışmada, termoplastik kompozit malzemeleri imal etmek için iki tip polimer filament (Akrilonitril Bütadien Stiren ve Polilaktik asit) ve altıgen boron nitür (h-BN) (ağırlık yüzdeleri %0,1 - 0,2 ve 0,3 idi) kullanılmıştır. Termoplastik kompozitler 3D baskı yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Uçaklarda bulunan pilotun ve uçakların güvenliği için hayati öneme sahiptir. Uçaklarda yanıtıcı fişeklerin pilot tarafından ateşlenmesi komutu verildiğinde chaff magazinlerinden hareket başlar. Yapılan çalışmada Chaff magazin tasarımının netleşmesi ile termoplastik polimer çeşidi olan poli laktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) filamentinin geliştirilmesi için filamentlerin yüzeyine hegzagonal bor nitür/ grafen nano plakalar eklenmesi ve kaplanması yapılmıştır. Kaplanmış filamentlerden üretilen test numunelerine çekme, eğme ve ısıl dayanım testleri yapılarak hangi oranda kaplamanın en ideal sonuç verdiği tespit edilecektir. Bu sayede istenilen ısıl, mekanik özelliklere sahip filamentlere sahip olunacak ve ardından 3D yazıcı ile chaff magazin prototip üretimi yapılacaktır. Projede ticari olarak satılan içerisinde mikron büyüklükte karbon elyaf ve Naylon 6 polimeri bulunan diğer bir filament çeşidi ile de chaff magazin prototipi üretilenektir. Bu süreç ise nihai ürün elde edilene kadar devam edecektir.

Anahtar Kelimeler — 3D baskı, hegzagonal bor nitür, PLA, ABS, mekanik ve ısıl test [1]

2. Havacılıkta Kullanılan Yakıt Ölçüm Prob'ları Araştırması ve Geliştirilmesi

Uçaklarda kullanılan yakıt ölçüm poplarının yerleştirilmesi ve mekanizmalarının öğrenilmesi ve araştırılması ayrıca bir aircraft için kullanılması mümkün yerli bir apparatusun geliştirilmesi prototip haline getirilmesi. Araçtaki yakıt miktarının ölçülmesi, itme kuvveti sağlayan motorun ne kadar yakıt tükettiğini görmek için değerini ve miktarını belirlemek için çok önemlidir. Ayrıca yakıt deposunda kalan yakıt miktarının değerini de belirleyebiliriz. Yakıt ölçüm problemlerinin bazı türleri vardır. Aktif kapasitif prob ve pasif problemler. Yakıt miktarını ölçmek olan tüm problemlerin amaçları aynıdır. Bu nedenle kullanım alanları farklıdır. Otomobil, kamyon gibi araçlarda şamandıralı problemler kullanılıyor. Uçaklarda hızlı hareket edebilen ve dönebilen ultrasonik problemler kullanılmaktadır. Bu nedenle pasif problemler, uçağın deposunda kalan yakıt miktarını ölçmek için kullanışlı olamaz. Bu çalışmada hem aktif kapasitif hem de pasif yakıt tankı ölçüm problemlerinin savunma sanayinde etkinliğini ve kullanılabilirliğini belirleyeceğiz

Anahtar kelimeler – Probe, ölçüm, yakıt, tank [1]

3. Düşük Hızlı Darbeye Maruz Kalan FML'nin Yapısal Tepkisinin Modellenmesi

Günden güne hızla büyüyen ve gelişen bir sektör olan havacılık endüstrisinin yenilikçi ve gelişmiş malzemelere duyduğu ihtiyaç her daim kendini hissettirmektedir. Daha iyi mekanik özelliklere sahip malzeme elde etmek amacıyla ortaya çıkan fiber metal laminat çeşitlerinden biri olan Glare, alüminyum metal levhaların arasına cam fiber/epoksi katmanların serilmesiyle elde edilmektedir. Uçaklarda kargo zemininde ve gövde yapısında kullanılan Glare'in düşük hızda çarpmalara karşı göstereceği yapısal tepki konusunda kesin fikir sahibi olmak son derece gereklidir. Bu çalışmada, bir Glare malzemenin düşük hızlı darbe davranışının MATLAB programı kullanılarak modellenmesi, model sonuçlarının literatür verileri ile karşılaştırılarak modelin doğrulanması, ve iki farklı malzemenin yapısal tepkilerinin karşılaştırılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır

Anahtar Kelimeler — fiber metal laminat, glare, darbe tepkisi. [1]

4. Hareketli Winglet Tasarımı ve Aerodinamik Analizi

Bu çalışmada Onera M6 kanadı üzerine farklı uçuş rejimlerinde aerodinamik verimliliği artırmak için değişken cant açılı winglet tasarımı yapılmıştır. Bu wingletlerin aerodinamik analizleri yapılmış ve hareket yeteneği için bir mekanizma tasarlanmıştır. Wingletler uçağın sonlu kanat yapısından dolayı oluşan kanat ucu girdaplarının olumsuz etkilerini önlemek amacıyla tasarlanmış ek yapısal bileşenlerdir. Çalışmada wingletin cant açısı parametresi bağımsız değişken olarak ele alınmış ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemlerinden Spalart Allmaras türbülans modeli kullanılarak kanadın aerodinamik parametreleri hesaplanmıştır. Bu sayede her uçuş rejimi için wingletlere en uygun cant açısı verilerek tüm uçuşun aerodinamik performans verimliliği artırılacaktır.

Anahtar Kelimeler — Cant Açısı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Hareketli Winglet, Kanat Ucu Girdabı, Onera M6. [1]

5. Ozon Gazının Jet Türbinli Motorlarda Yanma Verimliliğine Etkisi ve Ozonu Absorbe Edecek Malzemelerin Araştırılması

Bu çalışma iki ana başlık altında ele alınmıştır. Bunlardan ilki ozonun yanma sürecine olan etkilerinin incelenmesidir. İkincisi ise ozonu absorbe edebilecek malzeme araştırmalarıdır. Ozon ilaveli yanma ile ilgili şimdiye kadar yapılan çalışmalar, ozonun tutuşmayı hızlandırma, alev yayılımını ve alev stabilizasyonunu geliştirme, emisyonları ve yakıtın reaktivite özelliklerini değiştirmek için yakıtı işleme ve belirli kirletici oluşumunu azaltma yeteneğine sahip olduğu göstermiştir. Bu kapsamda, ozonun jet türbinli motorlarda yanma olayına etkisi ANSYS Fluent ticari yazılımı kullanılarak farklı koşullar altında

incelenmiştir. İkinci olarak, son yıllarda uçaklar yakıt sarfiyatını azaltmak için 13.716 km gibi yüksek irtifalarda uçuş yapmaya başlamışlardır. Yüksek irtifalarda ozonun fazla olması ve uçağın iklimlendirme sistemine giriş yapması sebebi ile pilot ve yolcularda sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Ozonun ayrışması için yapılan çalışmalar absorpsiyon, termal bozunma ve kataliz yöntemlerini içermektedir. Ozonun ayrışması için en çok kullanılan yöntem ise ozonun aktif karbon ile adsorbe edilip değerli metallerin veya metal oksitlerin yardımı ile katalize edilmesidir. Çalışma kapsamında ise TiO₂/AC filtresi tasarlanmış ve uçuşun gerçekleştiği ortam göz önüne alınarak ozonun ayrışmasını etkileyecek faktörler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler — Ozon Filtreleme, Gaz Türbini, Ozon, Yanma Verimi [1]

6. Model Jet Motorunda Jet Yakıtına Biyoyakıt İlavesinin Motor Performansına ve Emisyonlara Etkisinin İncelenmesi

Biyoyakıt takviyeli fosil yakıtlar dış ticaret açığının azalması gibi doğrudan ekonomik katkılarının yanı sıra fosil yakıtların kanserojen etkilerinin azalması, küresel ısınma etkisinin azalması gibi dolaylı ekonomik katkıları sayesinde gün geçtikçe kullanımı artmaktadır. Ülkemizde özellikle savunma sanayinde yapılan insansız hava aracı atılımı gelecekte daha küçük insansız hava araçlarının kullanımının her geçen gün yaygınlaşmasını sağlayarak daha etkin ve ekonomik çözümlere ulaşmamızı sağlayacaktır. Bu tez çalışmasında, aspir yağından biyoyakıt elde edilmiş, yük hücresi ve arduino ile hassas bir ağırlık ölçüm cihazı tasarlanmış, model jet motorunda kerosene çeşitli oranlarda biyoyakıt ilavesinin motor performansına ve emisyonlara etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Biyoyakıt, Model Jet Motoru, Emisyon, Yanma Verimi, Alternatif Yakıtlar [2]

Araştırmalarım sonucunda tez yazım aşamasında tez konumun Aerodinamik, Yapısal ve Malzeme biliminin içeriğine uygun bir tez konusu belirlemem gerektiğini düşünüyorum 6. Konu başlığındaki tezi inceledim danışmam hocamın vasıtası ile buldum ve şu an onu incelemekteyim. Bu tezin üstüne daha farklı ne konulabilir ve bu tezi nasıl daha geliştirebiliriz bunun için araştırmalar yapacağım bu araştırmaları da akademik olarak uygun yazmaya özen göstereceğim.

Kaynakça

1. https://liftup.tusas.com/app_settings/dtmcrJs47ktqEQc2soAM4BBJ0HCnfYiuom9SXevQ.pdf
2. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>



Journal of Aerospace Science and
Management

Vol: XXX, No: XXX, 2021 (xx-xx)

E-ISSN: 1234-1234

(Araştırma Makalesi / Derleme)



<https://jasam.erciyes.edu.tr/>

<https://havacilik.erciyes.edu.tr/>

Alınma
01 Ocak 2024
Düzeltilme
01 Şubat 2024
Kabul
01 Mart 2024

* Veysel KILIÇ.
e-mail: 553veys@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

- Jet A Yakıtı
- Yakıt Katkı Maddesi
- Su Kirliliği

Sıcaklık Değişimine Bağlı Olarak Jet Yakıtlarında Su Kirliliği Ve Eklenen Katkı Maddeleri

Veysel KILIÇ¹,

¹ Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Havacılık alanındaki gelişmeler gün geçtikçe daha da ileriye doğru gitmektedir. Görüldüğü üzere gelişim arttıkça hava cihazlarının deniz seviyesinden yüksekliği yani irtifası da buna bağlı olarak artmaktadır. İrtifanın artmasına bağlı olarak sıcaklık düşmesi gayet öngörülebilir bir haldedir. Sıcaklık seviyesinin düşmesi hava araçlarında belli başlı sorunlarında beraberinde getirir. Yapılan araştırmanın konusu Jet- A yakıtının bulunduğu uçaklarda irtifa yükselmesi ve sıcaklık düşmesine bağlı olarak yakıtın içinde bulunan su molekülleri donma noktasının etkisi ile buz kristallerine dönüşüyor ve bu sebepten dolayı birikip tıkanmalara dolayısıyla da su kirliliklerine sebep oluyor olması ve bu sorunun çözümü için kullanılan mevcut çözüm yollarından yakıt katkı maddelerinin incelenmesi üzerinedir. Jet- A yakıtının donma noktası sıcaklığı -40 C° ' dir. 10 ton yakıtta maksimum 300 gram su bulunması her jet yakıtında bir miktar su bulunduğunu ispatlar. Su bulunma yüzdesi hava aracının performans gereksinimlerine göre değişkenlik gösterir. Araştırmanın sonunda katkı maddelerin özellikleri ve Jet- A yakıtına etkileri göz önüne alınmıştır. Bu veriler belirtilip araştırmanın içinde bulunmaktadır

Received
01 Ocak 2024
Revised
01 Şubat 2024
Accepted
01 Mart 2024

* Veysel KILIÇ.
e-mail:
553veys@gmail.com

Keywords:

- Jet A Fuel
- Fuel Additives
- Water Pollution

Water Pollution and Additives Added in Jet Fuels Due to Temperature Change

Veysel KILIÇ¹,

¹ Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ABSTRACT

Developments in the field of aviation are moving further and further every day. As it can be seen, as the development increases, the altitude of the aerial devices increases accordingly. Depending on the increase in altitude, the temperature drop is quite predictable. The decrease in the temperature level brings with it certain problems in air vehicles. The subject of the research is that the water molecules contained in the fuel turn into ice crystals due to the rise in altitude and temperature drop on the airplanes containing Jet-A fuel, and therefore accumulate and cause water pollution through blockages, and the study of fuel additives from the existing solutions used to solve this

problem. The freezing point temperature of Jet-A fuel is -40° C. the presence of a maximum of 300 grams of water in 10 tons of fuel proves that there is a certain amount of water in each jet fuel. The percentage of water availability varies according to the performance requirements of the aircraft. At the end of the research, the properties of the additives and their effects on Jet- A fuel were taken into consideration. These data are stated and included in the research.

1.Giriş (Introduction)

Uçaklarda yakıt tanklarının temiz olması uçuşun güvenilirliğini ve verimini artırmaktadır. Günümüzde yakıt tanklarındaki en önemli problem su kirliliğidir. Yakıt tanklarında su kirliliğine sebep olan sorunlar yakıtta çözünmüş suyun çökmesi ve nemli havanın yoğunlaşması olarak belirlenmiştir. Yakıt içindeki biriken su; korozyona, motorun performansını etkileyecek tıkanmalara, tank içinde bakteri üremesine ve uçuşun güvenliğe tehdit edecek bambaşka sorunlara sebep olur. Bu durumun önlenmesinde çeşitli çözümler alınmaktadır. Araştırmada referans alınan çözüm yolu yakıtın içine katkı maddelerinin koyulmasıdır. Yakıt katkı maddeleri mevcut jet yakıtı olan Jet- A'nın içinde bulunarak yakıtın donma noktası sıcaklığını düşürmeyi sağlamaktadır.

1.1. Jet Yakıtları (Jet Fuels)

Petrol, hidrokarbonlardan oluşmuş, sudan biraz daha yoğun olacak şekilde, rengi koyu olan doğal yanıcı bir mineral yağdır. Petrol denilince akla sadece kullanılan benzin, dizel(motorin), gaz yağı vb. gelmez aynı zamanda ham petrol de kastedilir. Petrol oluşumuna bakılınca eski deniz diplerine çöken hayvan ve bitkilerin üzerine tabii olaylarla yer tabakalarının yığılması ve meydana gelen bu havasız ortamda uygun, ısı, basınç altında bakterilerinde yardımı ile oluşurlar. Milyonlarca yıl önce biriken petrol, yine milyonlarca yıl sonra yer kabuğunun hareketi ile beraber rezervuar adı verilen kaya haznelerde ortaya çıktı. Petrol kuyuları açılarak ham olarak çıkarılan petrol damıtılarak çok çeşitli ürünler elde edilir. Petrolün damıtılması ile elde edilen ürünlerin arasındaki seçim durumu damıtma kulesinden çıkış sırasına göredir. Birinci petrol damıtma kulesinde 150° - 200° C aralığında elde edilen bir üründür. Önceleri aydınlatma amacıyla kullanıma açılırken daha sonralarda ise ısıtma, soğutma, traktör yakıtı ve jet yakıtı olarak kullanılmaya da başlanmıştır. Jet yakıtı gaz türbinli motorlarla çalışan uçaklarda kullanılmak üzere tasarlanmış bir tür havacılık yakıtıdır. Jet yakıtı, genel itibarıyla yukarıda da belirtilen kerosen adı verilen bir tür hafif yakıttan oluşur. Yaklaşık yüzde 30 kerosen ve yüzde 70 benzin karışımı olacak şekilde buldukları belirtilmesine rağmen içerik oranı değişkenlik gösterebilir. Renk olarak hafif saman ile şeffaf olacak şekildedir.

1.2. Jet Yakıtı Özellikleri (Jet Fuel Properties)

Jet yakıtlarının ayrı yarı farklı özellikleri vardır. Bu kısımda genel özelliklerine bakılacaktır.

- Yanma Verimliliği: Yakıtın ne kadar iyi ve tam olarak yanabilmesini ifade eder. Jet yakıtları da sahip olduğu yüksek enerji yoğunluktan ve optimize edilmiş yanma özelliklerinden dolayı kullanıldıkları uçak motorlarında yanma verimliliğinin yüksek olmasını sağlar. Uçak motorlarına aynı zamanda düşük yanma artışı ve yüksek ısı yayım etkisinden dolayı fazlaca güç elde ettirirler.
- Yüksek Yanma Sıcaklığı: Uçak motorlarında yakıt, işleme girdikleri ortamdan dolayı yani uçaktan dolayı yüksek basınç ve sıcaklık altında hızla yanar. Jet yakıtları başlığın isminden de anlaşılacağı üzere

yüksek yanma sıcaklığına dayanabilme özelliğine sahiptir. Bu durumda da uçak motorlarının yüksek itki üretmesine ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

- **Düşük Kükürt İçeriği:** Kükürt, yanma esnasında atmosfere salınan zararlı 8 emisyonlardan biridir. Jet yakıtları özellikleri itibariyle düşük kükürt içeriğine sahiptir. Havacılık alanında çalışmalar yapanlar da bu özelliğinden dolayı çevreye daha az zarar vermek için jet yakıtlarını tercih ediyor.
- **Uçuculuk:** Kaynama noktası düşük olduğu için jet yakıtları, hızlı buharlaşabilme özelliğine sahiptirler. Uçak motorlarında da bu durumdan hızlıca buharlaşma ve yanmasıyla faydalanılır. Uçucu özellikleri, yakıtın püskürtme sistemlerinde, karbüratörlerde veya enjektörlerde etkili bir şekilde dağılmasını sağlar.
- **Düşük Donma Noktası:** Araştırmanın özünde yatan sebeplerden biri olan düşük donma noktası jet yakıtlarına avantaj katmıştır. Düşük donma noktası, yakıtın düşük sıcaklıklarda sıvı formda kalmasını sağlar ve yakıtın motorlara sorunsuz bir şekilde ulaşmasını sağlar. Belirli bir irtifaya kadar ve iklim koşullarında sorunsuz çalışabilmesi için düşük donma noktası özelliğine sahip olan jet yakıtları kullanılır. Ama sahip olunan jet yakıtlarına ve gelişen havacılık endüstrisine bakılırsa donma noktasını daha da düşüğe almak avantajlı bir durum oluşturacaktır.

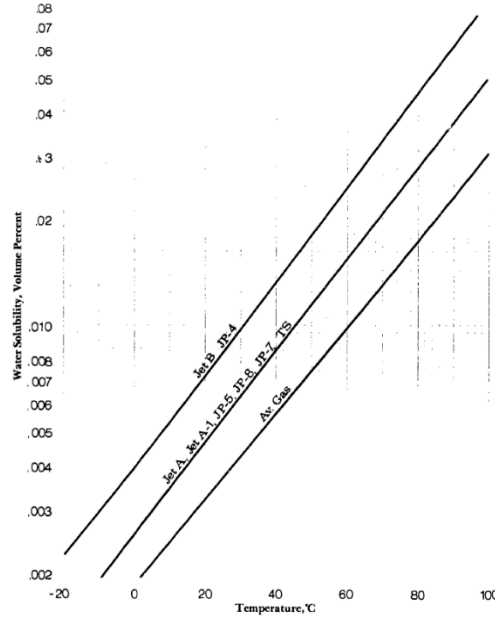
1.1.2. Jet A Yakıtı (Jet A Fuel)

Jet- A yakıtı yapılan araştırmalar sonucunda genel kullanım itibariyle ticari havacılıkta kullanılan bir jet yakıt çeşididir. Özellikle yolcu uçaklarında tercih edilen bu yakıt çeşidi, geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ticari yolcu uçakları (Boeing 737, Boeing 747, Boeing 767, Boeing 777, Airbus A320, Airbus A330, Airbus A340, Airbus A350 gibi geniş gövdeli ve dar gövdeli yolcu uçaklar), iş jetleri (Gulfstream serisi, Bombardier Global serisi, Dassault Falcon serisi), hava kargo uçaklar, ikincil hava taşıtları (askeri savaş uçakları, tanker uçakları, hava ambulansları ve özel hükümet uçakları). Genel manada kullanıldığı uçaklar bu şekildedir ancak her uçak modeli ve üretici, yakıt gereksinimlerini ve spesifikasyonlarını dikkate alır, bu nedenle uçakların tam olarak hangi yakıtı kullandığını belirlemek için uçak üreticisinin belirttiği spesifikasyonlara başvurmak önemlidir. Bu sayede jet yakıtının türü, miktarı vb. özellikleri değişiklik gösterir. Jet- A yakıtı havacılık dışında; enerji üretimi, endüstriyel, ısıtma, denizcilik, ısıtma ve ısıtma sistemleri, jeneratörler ve acil durum güç kaynakları gibi birçok alanda da faaliyet halindedir. Jet A ve Jet A1' in özelliklerini detaylandıran tablo aşağıda belirtilmiştir.

Tablo 1. Jet A ve Jet A1

Özellikler	Jet A	Jet A1
Alevlenme Noktası (°C)	38	38
Yoğunluk (kg/l)	0.820	0.804
Kendinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	210	210
Enerji Yoğunluğu (kWh/L)	98	96
Buharlaşma Noktası (°C)	175	175
Donma Noktası (°C)	-40	-47

Yukarı da görüldüğü üzere belirtilen özelliklerin çoğunda aynı görünüyor. Temel fark olan ve bu araştırma konusundaki yakıt seçiminde Jet-A yakıtının seçilme sebebi olan donma noktası sıcaklığıdır. Jet-A1 yakıtının daha düşük donma noktası sıcaklığına sahip olmasından ötürü Jet-A yakıtını daha düşüğe çekilmesi istenmektedir. Bundan dolayı araştırmada ki referans yakıt Jet-A yakıtı olmuştur



Şekil 1. Jet A yakıtı ve diğer yakıtlar arasındaki sıcaklık-su çözünürlüğü grafiği

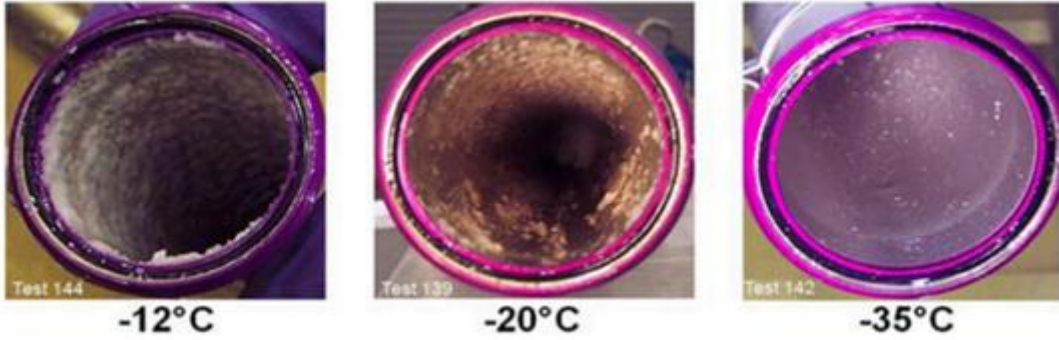
1.2. Su Kirliliği (Water Pollution)

Su her zaman mevcuttur. Amacımız bulunan su miktarını minimal hale indirmektir. 10 ton yakıtın içinde maksimum 300 gr. suyun bulunması bu durumu ispatlar. Su, yakıtta serbest su, asılı su ve çözünmüş su olarak bulunabilir. Yalnızca toplu olarak serbest faz suyu olarak bilinen su salyangozları veya asılı su gibi serbest su, kirletici olarak kabul edilir. Araştırma konusunda belirtildiği üzere Jet A yakıtının bulunduğu yakıt tankında irtifanın artmasıyla beraber sıcaklık düşüşüne bağlı olarak yakıt içinde bulunan su kristalleri toplu hale gelerek buzlanmayı ve bu da yakıt tankı içinde su kirliliğini oluşturur. Bu duruma çözünmüş suyun çökeltilmesi denir. Su kirliliğinin oluşum şekli sadece belirtilen sebeple olmamakla beraber diğer bir sebebi vardır. Onu da nemli havanın yoğunlaşması olarak adlandırabiliriz. Uçak alçaldığı sırada yakıt deposu içindeki ve dışındaki basınç farkının oluşmasından dolayı havanın yakıt deposuna yoğunlaşması suyun çökmesine yol açar ve bu durumda su kirliliği olur. Çözüm kısmında ele alacağımız sorun çözünmüş suyun çökeltilmesidir. Bu problem kapsamında su birikimini engellemek üzere birden çok fikre ulaşılmıştır. Günümüzde de yakıtta çözünmüş olan suyun çökmesini önlemek için 4 yaygın metot kullanılmaktadır:

- Yakıt Distilasyonunun Kesme Noktası Aralığı
- Alternatif Yakıt
- Yakıt Sıcaklığının Düşürülmesinin Önlenmesi
- Yakıt Katkı Maddesi Kullanımı

Araştırmada detaylandırılan çözüm yolu yakıt maddesi kullanımıdır. Araştırma konusu olan yakıt katkı maddelerinin kullanımının amacı yakıtı istenilen özelliklere getirip mevcut performansını artırmaktır. Bu sebepten ötürü yakıtın içinde çözünmüş olan su kristallerinin bir araya gelerek çökmesini engellemesinde bu yöntem kullanılır. Metilen mavisi, tripropilen glikol, dietilen glikol monoetil eter (Dİ-EGME), di-etilen glikol monoetil eter (DEGME), izopropil alkol gibi yakıt içinde buluna katkı maddeleri

yakıtın içinde bulunan su kristallerinin irtifaya bağılı olarak toplu halde bulunmasını engellemek maksadıyla yakıtın içinde etkileşim oluştururlar. Bu sayede biriken su kristalleri toplu halde bulunması engellenir. Katkı maddeleri arasındaki temel ayrım Jet A yakıtı ile girdikleri etkileşimin sonuçları olarak ve düşürdükleri sıcaklık değeri olarak değişir.



Şekil 2.1 Belirli sıcaklıklarda yakıt besleme borularından geçen jet yakıtının buz birikimi testinden alınan fotoğraflar

1.2.1. Su Kirliliği Bağılı Olarak Oluşan Etkiler (Consequences Due to Water Pollution)

İrtifanın artmasıyla oluşan sıcaklık düşmesinden ötürü oluşabilecek sorunlar içinde biriken su moleküllerinin etkisiyle oluşan

- korozyon,
- biriken su parçacıklarının buz haline gelmesinden dolayı oluşacak olan 20 tıkanmalara,
- süzgeç/ayırıcı ekipmanında zayıf su kaynaşmasına neden olan yüzey aktif madde sorununun,
- yakıt filtreleri gibi bileşenlerin ömrünün kısılmasına,
- kokpit kısmında bulunan yakıt miktar göstergesinin arızalı hale gelmesine ve doğru veriyi göstermemesine kadar geniş bir aralığa sahiptir. Uçak yakıt işleme sistemlerinde ve uçak yakıt sistemlerinin kendilerinde, mikrobiyolojik büyüme filtrelerin tıkanmasına neden olabilir. Aynı zamanda uçak yakıt sondasının kirlenmesine ve motor yakıt pompasının tutukluk yapmasına neden olabilirler. Eğer toplam bir şekilde göz önüne alınırsa en ciddi sorun olan kanat tankı korozyonu su, pas, yüzey aktif maddeler ve bu mikroorganizmalar arasındaki etkileşimle ilişkilendirilmiştir. Çözüm olarak yapılan çalışmalar sonucunda bu sayılan sorunlar sadece su kirliliğine bağılı olmamakla beraber hem yakıt sisteminde hem de faaliyette olan hava aracının “good housekeeping” yani iyi bir temizlik adı altında kontrollü sağlanmalıdır.



Şekil 3.1. Uçak depolarında bulunan yakıt miktarı göstergesi

2. Literatür Taraması (Literature Review)

Jet A yakıtı, havacılık sektöründe sıkça kullanılan bir tür jet yakıtıdır. Çok kullanılmasından dolayı günümüzde bu yakıttan daha fazla verim elde edebilmek için pek çok çalışmanın konusu olmuştur. Bu konuların en önemlilerinden bir tanesi ise yakıtın içinde çözünmüş halde bulunan sudur. Çözünmüş halde bulunan bu su özellikle soğuk hava şartlarında tehlike oluşturmaktadır. Soğuk hava koşulları, havacılık sektöründe önemli bir endişe kaynağıdır. Uçakların benzin veya jet A yakıtının depolanması ve kullanımı sırasında, düşük sıcaklıkların yakıt içinde su kristallerinin oluşumuna neden olabileceği bilinmektedir. Bu su kristalleri, uçak motorlarının performansını ve güvenliğini etkileyebilir. Bu nedenle, bu alanda yapılan araştırmalar, bu olumsuz etkilerin anlaşılması ve önlenmesi için büyük önem taşımaktadır. Benzin veya jet A yakıtlarının içindeki su kristallerinin 2 oluşumu, soğuk hava koşullarının bir sonucu olarak gerçekleşir. Yakıt içindeki su, çeşitli kaynaklardan gelebilir: atmosferdeki nemin kondensasyonu, depolama tanklarında birikmiş olan suyun serbest kalması veya yakıtın üretim sürecindeki nemin varlığı. Düşük sıcaklıklar, bu suyun kristal şeklinde donması ve yakıtın içinde buz kristallerinin oluşmasına yol açar. Yakıt içinde oluşan su kristalleri, havacılık sistemleri üzerinde çeşitli olumsuz etkilere neden olabilir. İlk olarak, bu kristaller, yakıt filtrelerini tıkararak yakıt akışını engelleyebilir ve motorların düzgün çalışmasını etkileyebilir. Ayrıca, su kristalleri, yakıtın içinde çözünmüş olan katı partiküllerin birleşmesine neden olarak çökme oluşumunu hızlandırabilir. Bu, yakıt sisteminin tıkanmasına ve motor bileşenlerinde hasara yol açabilir. Ayrıca, yakıtın içindeki buz kristalleri, motorlarda buzlanmaya neden olabilir ve motor performansını azaltabilir. Bu konuda yapılan araştırmalar, jet A yakıtının soğuk hava koşullarında su kristallerinin oluşumunu engellemek için çeşitli yöntemlerin kullanılabileceğini göstermiştir. Bunlardan biri, yakıtın içindeki su miktarını azaltmak için yakıtın depolandığı ortamın sıcaklığı ve nem seviyesinin kontrol altında tutulmasıdır. Daha düşük sıcaklıklarda, yakıtın içindeki su miktarı artar ve bu da su kristallerinin oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle, yakıtın depolandığı ortamın sıcaklığı kontrol edilerek, yakıtın içindeki su miktarı azaltılabilir. Ayrıca, bazı kimyasal katkı maddeleri de kullanılarak su kristallerinin oluşumu engellenebilir. Örneğin, metanol gibi bazı alkol türleri, yakıtın içindeki suyun alkolle birleşerek daha düşük sıcaklıklarda bile donma noktasını düşürmesini sağlar. Böylece su kristallerinin oluşumu engellenir. Bunun yanı sıra su filtrasyon sistemleri de su kristallerinin yakıt sistemine girmesini önlemek için kullanılır. Bu sistemler, yakıtın içindeki suyu ve su kristallerini filtreleyerek yakıtın motorlara zarar vermeden kullanılmasını sağlar. Bu yöntemlerin uygulanması yakıtın kalitesini etkileyebilir ancak bu etkinin büyüklüğü, kullanılan yöntem ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişebilir. Örneğin, bazı kimyasal katkı maddeleri yakıtın kalitesini düşürebilirken diğerleri yakıtın kalitesini artırabilir. Ayrıca yakıtın depolandığı ortamın sıcaklık ve nem seviyesinin kontrol edilmesi yakıtın kalitesini korumak için önemlidir. Daha yüksek sıcaklıklar, yakıtın kalitesini

düşürebilirken daha düşük sıcaklıklar ve yüksek nem seviyeleri de yakıtın kalitesini etkileyebilir. Ancak, bu yöntemlerin havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılması, yakıtın kalitesinin 3 standartlara uygun olmasını sağlamak için sıkı kontrollerin yapılmasını gerektirir. Bu kontroller, yakıtın kalitesinin korunmasına ve güvenli uçuşların sağlanmasına yardımcı olur. Sonuç olarak, bu yöntemlerin uygulanması, yakıtın kalitesini etkileyebilir ancak bu etki, kullanılan yöntem ve uygulama koşullarına bağlı olarak değişebilir. Havacılık endüstrisinde, yakıtın kalitesinin korunması için sıkı kontroller yapılır. Ve bu kontroller, güvenli uçuşların sağlanmasına yardımcı olur. Sonuç olarak bu konuda yapılan araştırmalar, jet A yakıtının soğuk hava koşullarında su kristallerinin oluşumunu engellemek için çeşitli yöntemlerin kullanılabileceğini göstermiştir. Bu yöntemler, havacılık endüstrisinde güvenli uçuşların sağlanması için önemlidir ve gelecekte bu alanda yapılacak araştırmalarla daha da geliştirilebilir. Soğuk hava koşullarında benzin veya jet A yakıtının içinde oluşan su kristalleri, havacılık sektöründe önemli bir sorun olarak kabul edilmektedir. Bu su kristalleri, motorların performansını ve güvenliğini etkileyebilir. Bu nedenle, su kristallerinin oluşumu ve etkileri üzerine yapılan araştırmalar, önleme ve çözüm yöntemlerinin geliştirilmesinde büyük bir öneme sahiptir. Havacılık endüstrisi, bu sorunu ele almak için sürekli olarak yeni teknolojiler ve stratejiler araştırmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, bu alandaki bilgilerimizi artıracak ve havacılık güvenliğini iyileştirmek için daha etkili çözümler sunacaktır. Jet A yakıtı, özellikle turbofan ve turboprop motorlarla çalışan çeşitli uçaklarda yaygın olarak kullanılır. Tipik olarak Jet A yakıtı kullanan bazı uçakları aşağıda verilmiştir:

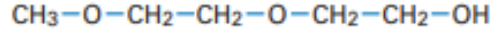
- – Ticari uçaklar: Jet A yakıtı, Boeing 737, Airbus A320, Boeing 747 ve Airbus A380 gibi büyük ticari jet uçaklarında kullanılan birincil yakıttır.
- – İş jetleri: Gulfstream G650, Bombardier Global Express ve Cessna Citation serisi gibi modeller de dahil olmak üzere birçok iş jeti, operasyonları için Jet A yakıtına güveniyor.
- – Bölgesel uçaklar: Embraer E-Jet serisi (E170, E175, E190, E195) ve Bombardier CRJ serisi (CRJ700, CRJ900, CRJ1000) gibi bölgesel uçaklar genellikle Jet A yakıtı kullanır.
- – Askeri uçaklar: Savaş uçakları, nakliye uçakları ve gözetleme uçakları gibi çeşitli 4 askeri uçaklar genellikle Jet A yakıtı ile çalışır. Örnekler arasında F-16 Fighting Falcon, C-17 Globemaster III ve P-8 Poseidon sayılabilir.
- – Turboprop uçaklar: ATR 72, Bombardier Q400 ve Pilatus PC-12 gibi modeller de dahil olmak üzere birçok turboprop uçak, Jet A yakıtı kullanılarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Jet A yakıtı yaygın olarak kullanılırken, bazı uçakların motor tipine, tasarımına veya operasyonel özelliklerine bağlı olarak belirli yakıt gereksinimlerine veya alternatif yakıt seçeneklerine sahip olabileceğine dikkat etmek önemlidir.

2.1. Buzlanma Önleyici Katkı Maddeleri (Anti-icing Additives)

Jet-A yakıtında kullanılan donma önleyici katkı maddeleri, yakıt sisteminde potansiyel olarak yakıt akışını engelleyebilecek ve uçağın performansını ve güvenliğini olumsuz yönde etkileyebilecek buz kristallerinin oluşmasını veya katı birikintilerin oluşmasını önlemek için tasarlanmıştır. Bu katkı maddeleri tipik olarak yakıtın özelliklerini değiştiren ve düşük sıcaklıkta çalışabilirliğini artıran kimyasal bileşiklerden oluşur. Donma önleyici katkı maddelerinin birincil işlevi, yakıtın donma noktasını düşürmek ve daha düşük sıcaklıklarda sıvı halde kalmasını sağlamaktır. Bu, fiziksel ve kimyasal mekanizmaların bir kombinasyonu ile elde edilir. Kullanılan yaygın bir katkı maddesi türü, "soğuk akış iyileştiriciler" veya "akış geliştirici polimerler" olarak bilinen organik bileşiklerin bir karışımıdır." Bu polimerler kristal değiştirici görevi görerek yakıt içindeki buz kristallerinin oluşumunu ve büyümesini engeller. Donma önleyici katkı maddeleri, yeni ortaya çıkan buz kristallerinin veya katı tortuların yüzeylerine adsorbe edilerek çalışır, böylece morfolojilerini değiştirir ve daha fazla büyümeyi önler. Bu adsorpsiyon işlemi, kristallerin etrafında koruyucu bir tabaka oluşturarak, daha büyük buz kütlelerini

toplama ve oluşturma yeteneklerini azaltır. Katkı maddeleri, kristal büyümesini engelleyerek kristallerin yakıtta küçük kalmasını ve dağılmasını sağlayarak yakıt hatlarında, filtrelerde veya motor bileşenlerinde tıkanma riskini azaltır.

2.1.1. Dietilen Glikol Monometil Eter (Diethylene Glycol Monomethyl Ether)



Şekil 4. Dietilen Glikol Monometil Eter

Metoksidiglikol veya metil karbitol olarak da bilinen Dietilen Glikol Monometil Eter (DiEGME), hafif, hoş bir kokuya sahip berrak, renksiz bir sıvıdır. Kimyasal formülü C₅H₁₂O₃'tür. DiEGME, etilen glikolden türetilen organik bileşikler olan glikol eter ailesinin bir üyesidir. Dietilen glikol monometil eter, bir eter-alkol türevidir. Eter nispeten tepkisizdir. Yanıcı ve / veya zehirli gazlar, alkollerin alkali metaller, nitrürler ve güçlü indirgeyici maddelerle birleşmesiyle oluşur. Dietilen glikol monometil eter (DEGME), Dow tarafından Metil KARBİTOL™ çözücü ticari adı altında satılmaktadır. DiEGME, bir etilen serisi veya E serisi glikol eterdir. Öncelikle havacılık yakıtı için buz çözücü katkı maddesi olarak kullanılır. DiEGME, mükemmel ödeme gücü ve kararlılığı nedeniyle öncelikle çeşitli 29 uygulamalarda çözücü olarak kullanılır. Nispeten yüksek bir kaynama noktasına sahiptir, bu da onu yüksek sıcaklık gerektiren işlemlerde kullanıma uygun hale getirir. Bileşik genellikle bir çözücü olarak seçilir çünkü iyi buharlaşma hızı, düşük yüzey gerilimi ve çok çeşitli malzemelerle uyumluluk gibi uygun özelliklerin bir kombinasyonunu sergiler.

Fiziksel Özellikleri

- A. Kaynama noktası: 190- 196 ° C (1013 hPa)
- B. Yoğunluk: 1.018- 1.022 g / cm³ (20 ° C) DIN 51757
- C. Patlama sınırı:
- D. Parlama noktası: 87 ° C
- E. Ateşleme sıcaklığı: 215 ° C
- F. Donma Noktası: -70 ° C
- G. pH değeri: 4 - 7 (200 g / l, H₂O, 20 ° C)
- H. Buhar basıncı: 0.3 hPa (20 ° C)
- İ. Molekül ağırlığı: 120.15 g / mol 30
- J. Su ve birçok organik çözücü ile karışabilir.

Kimyasal Özellikleri

- a. DiEGME normal koşullar altında istikrarlıdır.
- b. DiEGME normal koşullar altında nispeten kararlıdır. Oldukça reaktif değildir, ancak güçlü oksitleyici maddeler ve asitlerle reaksiyona girebilir. Potansiyel kimyasal reaksiyonları önlemek için bu tür maddelerle temastan kaçınmak önemlidir.
- c. DiEGME, özellikle asidik veya alkali koşullar altında hidrolize uğrayabilir. Su ve uygun koşulların varlığında, bileşen parçalarına bölünerek metanol ve dietilen glikol elde edilebilir.
- d. DiEGME, esterler oluşturmak için karboksilik asitlerle reaksiyona girebileceği esterleşme reaksiyonlarına katılabilir. Bu özellik, belirli kimyasal işlemlerde veya belirli ürünleri formüle ederken faydalı olabilir.

- e. DiEGME su ve birçok organik çözücü ile karışabilir. Bu yüksek çözünürlük, reçineler, boyalar ve diğer bileşenler gibi çok çeşitli maddeleri çözerek çeşitli uygulamalarda etkili bir çözücü görevi görmesini sağlar.
- f. DiEGME yanıcı bir sıvıdır ve uygun dikkatle kullanılmalıdır. Bir tutuşma kaynağının varlığında tutuşacak kadar buhar üretebileceği minimum sıcaklık olan bir parlama noktasına sahiptir. Kullanıcılar, diegme'yi kullanırken veya depolarken yangın tehlikelerini önlemek için gerekli önlemleri almalıdır.

Kullanım Alanları

- a. Dietilen glikol monoetil eter, liflere nüfuz etmeyi kolaylaştırmak ve yoğun, parlak tonların üretimini teşvik etmek için kullanılan bir çözücüdür.
- b. DiEGME, çeşitli kimyasal işlemlerde reaksiyon ortamı veya yardımcı çözücü olarak kullanılır. Reaksiyonları kolaylaştırmaya, verimi artırmaya ve reaksiyon koşullarını kontrol etmeye yardımcı olabilir.
- c. Tanecik oluşturmayan ahşap lekelerinde önemli bir çözücüdür ve endüstriyel temizleyicilerin bir bileşeni olarak hizmet eder.
- d. Bileşik, elektronik endüstrisinde elektronik bileşenlerin temizlenmesi, akı kalıntılarının giderilmesi ve yarı iletken üretimi için fotolitografi işlemlerinde kullanılan fotorezistlerin üretiminde çözücü olarak kullanılır.
- e. Tekstil baskı ve boyama işlemleri, bu ürünü liflere nüfuz etmeyi kolaylaştırmak ve yoğun, parlak tonların üretimini teşvik etmek için kullanılır.
- f. Yüksek kaynama noktası ve düşük buhar basıncı, onu büküm ayarı ve iplik ve kumaş şartlandırması için faydalı kılar.
- g. Boya, vernik ve kaplamaların formülasyonunda çözücü olarak kullanılır. Reçinelerin, pigmentlerin ve diğer katkı maddelerinin çözülmesine yardımcı olarak nihai ürünün istenen özelliklerine ve kıvamına katkıda bulunur.
- h. DiEGME, bazı farmasötik preparatların formülasyonunda bazen çözücü veya yardımcı çözücü olarak kullanılır. Ayrıca ilaçlar için stabilizatör görevi görebilir, kimyasal bütünlüklerini ve raf ömrünü korumaya yardımcı olabilir.

3. Öngörülen Sonuç (Predicted Result)

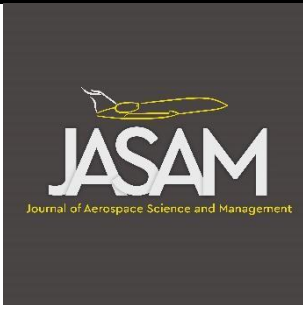
Yakıtta bulunan çözünmüş su, uçak irtifaya çıktığında yakıt sıcaklığı düştükçe mikro damlacıklar şeklinde çözeltide çökecektir. Yakıttaki suda çözünürlük, sıcaklıktaki her 1 °C düşüş için yaklaşık 2 ppm v/v azalır. Daha yüksek konsantrasyonlarda içeren Jet A-aromatiklerin suya karşı daha yüksek bir afiniteye sahip olduğu ve sıcaklık düştükçe en fazla miktarda su dökme eğiliminde olduğu bulunmuştur. Yakıt depolarındaki bir başka serbest su kaynağı, atmosferik nemin yoğunlaşmasından kaynaklanır. Uçak seyir irtifasından alçalırken havalandırma sistemi aracılığıyla yakıt depolarına hava çekilir. Havadaki nem, uzun bir uçuşun sonunda soğuk yakıt ve tank yüzeyleriyle temas ettiğinde yoğunlaşır. Bu nedenle, serbest suyun zararlı etkilerine karşı koymak için biyositler, korozyon inhibitörleri ve yakıt sistemi buzlanma önleyicileri dâhil olmak üzere çeşitli katkı maddeleri geliştirilmiştir. Bunlar moleküler düzenden sorumlu hidrojen bağı ağlarını bozarak suyun donma noktasını düşüren ve böylece kristalleşmeyi engelleyen hidrofilik maddelerdir. Şu anda bu amaç için onaylanmış katkı maddelerinden birisi de dietilen glikol monometil eterdir (DiEGME). DiEGME konsantrasyonlarında (yüzde 0,07–0,15 v/v), jet yakıtında bulunan suyun (yüzde 0,007 v/v) yalnızca -33 °C'nin altında kristalleşmeye başladığı tespit edildi. DiEGME'nin ayrıca yüksek konsantrasyonlarda mikrobiyal büyümeye karşı etkili bir caydırıcı olduğu kanıtlanmıştır. Ne yazık ki DiEGME higroskopiktir ve bu da karıştırma sırasında atmosferik suyun yüksek oranda alınmasına yol açar. DiEGME ayrıca yüksek bir su-yakıt bölme oranına sahiptir, bu da

tercihen su fazında çözündüğü anlamına gelir. Katkı maddeleri ayrıca operasyonel verimlilik açısından da önemlidir. Su ayrışma özelliklerini iyileştirerek yakıtın stabilitesini artırır. Bu da yakıtın depolama süresini uzatır ve daha uzun mesafeli uçuşlarda yakıt kalitesini korur. Böylece, uçakların daha uzun menzillerde uçabilmesine ve daha az yakıt taşımasına olanak tanır. Bu da operasyonel verimliliği artırır ve yakıt maliyetlerini düşürür. Ancak, jet yakıtlarına katkı maddesi eklemenin bazı potansiyel zararları da göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle, katkı maddeleri ek maliyetlere yol açar. Bu katkı maddelerini temin etmek, test etmek ve uygulamak için ek kaynaklar gerektirir. Bu da yakıt maliyetlerini artırabilir ve havayolu şirketleri üzerinde ek bir yük oluşturabilir. Belirli katkı maddelerinin çevresel etkileri hakkında daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bazı katkı maddeleri çevre dostu olmayabilir veya uzun süreli etkileri konusunda bilgi eksikliği olabilir. Bu nedenle, katkı maddelerinin çevresel etkileri ve 63 geri dönüşümü hakkında daha fazla çalışma yapılması önemlidir. Sonuç olarak, jet yakıtlarına katkı maddesi eklemek su kirliliğini azaltma, yakıt sistemlerini koruma ve operasyonel verimliliği artırma gibi birçok avantaj sağlar. Ancak, ek maliyetler ve çevresel etkiler gibi potansiyel zararları da dikkate almak önemlidir. Bu nedenle, katkı maddelerinin kullanımıyla ilgili kararlar dikkatlice değerlendirilmeli ve çevresel sürdürülebilirlik ile ekonomik etkiler dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rogers JD, Krynitsky JA, Churchill, AV (1963). Jet fuel contamination: water, surfactants, dirt and microbes. SAE Transactions, 281-292.
2. Yılmaz N, Atmanlı A (2016). Havacılıkta alternatif yakıt kullanılmasının incelenmesi. Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi, 1(1), 3-10.
3. Longwell JP ve Grobman J. (1979). Alternatif uçak yakıtları.155-161
4. Repetto SL, Patel R, Johnson T, Costello JF, Lam JKW, Chuck CJ (2016). Dual action additives for Jet A-1: fuel dehydrating icing inhibitors. Energy Fuels, 30(11), 9080-9088.
5. Saggese C, Singh AV, Xue X, Chu C, Kholghy MR, Zhang T, Wang H (2019). The distillation curve and sooting propensity of a typical jet fuel. Fuel, 235, 350-362
6. Lawson CP, Lim KM (2008, September). The state-of-the-art and the future of water management within fuel tanks. In 26th ICAS congress.
7. Murray BJ, Broadley SL, Morris GJ. (2011). Supercooling of water droplets in jet aviation fuel. Fuel, 90(1), 433-435.
8. Lam JKW, Hetherington JI, Carpenter MD. (2013). Ice growth in aviation jet fuel. Fuel, 113, 402-406.
9. Maloney TC, Diez FJ, Rossmann T. (2019). Ice accretion measurements of Jet A-1 in aircraft fuel lines. Fuel, 254, 115616.
10. Fu J. (2023). Dissolved water in jet fuels: a low-temperature quality and water solubility study. Fuel, 331, 125950.
11. Chen T, Xu X, Hu J, Guo L, Yang S, Zhao T, Ma J. (2022). Water behavior of current jet fuel versus operating conditions: Storage time, temperature, relative humidity and anti-icing agent. Fuel, 309, 122088.
12. Haffar I, Latil P, Flin F, Geindreau C, Bonnel F, Petillon N, Edery V. (2022). Characterization of ice particles in jet fuel at low temperature: 3D X-ray tomography vs. 2D high-speed imaging. Powder Technology, 397, 116995.
13. Haffar I, Flin F, Geindreau C, Petillon N, Gervais PC, Edery V. (2022). 3D microstructure evolution of ice in jet A-1 fuel as a function of applied temperature over time. International Journal of Heat and Mass Transfer, 183, 122158.
14. Rauch ME, Graef HW, Rozenzhak SM, Jones SE, Bleckmann CA, Kruger RL, Stone MO (2006). Characterization of microbial contamination in United States Air Force aviation fuel tanks. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 33(1), 29-36.
15. Carman ML (2006). Biofouling: The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research. Biofouling, 22, 11-21.

-
16. Johnson JU, Carpenter M, Williams C, Pons JF, McLaren D. (2022). Complexities associated with nucleation of water and ice from jet fuel in aircraft fuel systems: A critical review. *Fuel*, 310, 122329.
 17. Passman FJ. (2013). Microbial contamination and its control in fuels and fuel systems since 1980—a review. *International Biodeterioration Biodegradation*, 81, 88-104.
 18. Tomlinson S, Barker M, Venn D, Hickson L, Lam JKW. (2011). Mathematical model of water contamination in aircraft fuel tanks (No. 2011-01-2540). SAE Technical Paper.
 19. Avcı M. (2022). Alkol ve anti icing katkı maddelerinin jet yakıtı özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi (Master's thesis, Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
 20. U.S. Environmental Protection Agency. Updated Health Effects Assessment for Methyl Ethyl Ketone. EPA/600/8-89/093. Environmental Criteria and Assessment Office, Office of Health and Environmental Assessment, Office of Research and Development, Cincinnati, OH. 1990.
 21. U.S. Environmental Protection Agency. Integrated Risk Information System (IRIS) on Methyl Ethyl Ketone. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC. 1999.
 22. Logsdon, J. E., Loke, R. A. (2000). Isopropyl Alcohol. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
 23. R. Neihof, C. A. Bailey, Published 1 April 1978. Biocidal Properties of Anti-Icing Additives for Aircraft Fuels
 24. Ott, J., Gronemann, V., Pontzen, F., Fiedler, E., Grossmann, G., Kersebohm, D. B., ... Witte, C. (2000). Methanol. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*.
 25. Jack Clifton, I. I., Leikin, J. B. (2003). Methylene blue. *American journal of therapeutics*, 10(4), 289-291.
 26. Hazar, H. (2017). Investigation of the effects of tripropylene glycol addition to diesel fuel on combustion and exhaust emissions at an isolated diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 142, 62–68.
 27. PRICE, P. B. (1939). Ethyl alcohol as a germicide. *Archives of Surgery*, 38(3), 528-542.
 28. Blackmore, D. J. (1968). The bacterial production of ethyl alcohol. *Journal of the Forensic Science Society*, 8(2-3), 73-78



Journal of Aerospace Science and
Management

Vol: XXX, No: XXX, 2021 (xx-xx)

E-ISSN: 1234-1234

(Araştırma Makalesi / Derleme)



<https://jasam.erciyes.edu.tr/>

<https://havacilik.erciyes.edu.tr/>

Alınma
05 Ocak 2024
Düzeltilme
05 Ocak 2024
Kabul
18 Ocak 2024

Engin DURMUŞ
mr.engindurmus@gmail.com

Anahtar Kelimeler:

- İnsansız Hava Aracı
- Metasezgisel Algoritma
- Görev
- Planlama

Metasezgisel Algoritmalar İle İnsansız Hava Araçlarının Görev Planlaması

Engin DURMUŞ

Uçak Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Metasezgisel algoritmalar, İHA görev planlamasında, bu hava araçlarının operasyonel etkinliğini ve uçuş yollarının optimizasyonunu artırmak için kullanılan kritik teknolojik araçlardır. İHA'lar, askeri ve sivil alanlarda geniş kullanım alanlarına sahiptir, ancak karmaşık operasyonel çevreler ve dinamik görev gereksinimleri, etkili görev planlaması stratejilerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, metasezgisel algoritmalar, görev planlamasında çeşitli zorlukların üstesinden gelmek için ideal çözümler sunar. Metasezgisel algoritmalar, genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve karınca koloni optimizasyonu gibi çeşitli yöntemleri içerir. Bu algoritmalar, İHA'ların uçuş yollarını, görev zamanlamalarını ve kaynak dağılımını optimize ederken, birden fazla görevi, kısıtlamayı ve hedefi dikkate alır. Genetik algoritmalar, evrimsel süreçlerden ilham alarak çözümler üretirken, parçacık sürü optimizasyonu doğal sürü davranışlarını model alır. Karınca koloni optimizasyonu ise, karıncaların yemek bulma davranışlarını taklit ederek etkili çözümler üretir. Bu algoritmaların İHA görev planlamasında kullanılması, görevlerin daha verimli ve etkili bir şekilde yerine getirilmesini sağlar. Örneğin, arama-kurtarma operasyonları, çevresel izleme ve tarımsal denetim gibi karmaşık görevlerde, İHA'ların etkin kullanımı için bu algoritmalar hayati öneme sahiptir. Metasezgisel algoritmalar, İHA'ların hava koşulları, engeller ve acil durumlar gibi değişkenlere karşı uyarlanabilir ve dinamik çözümler sunar. Metasezgisel algoritmaların gelecekteki gelişmeleri, İHA teknolojisindeki inovasyonları ve görev planlaması stratejilerini daha da geliştirecek ve genişletecektir. Bu, İHA'ların karmaşık görevlerde daha etkili ve bağımsız bir şekilde kullanılmasını mümkün kılacak, bu da askeri ve sivil uygulamalarda onların etkinliğini ve kullanım alanlarını genişletecektir.

Mission Planning of Unmanned Aerial Vehicles using Metaheuristic Algorithms

Engin DURMUŞ

Department of Aircraft Engineering, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Metasesistical algorithms are critical technology tools in the IHA image plan to increase the operatic efficiency of these aircraft and the optimization of flight paths. UAVs have a wide range of uses in military and civilian fields, but they surround complex operas, and dynamic image requirements, the development of effective image plan strategies is a challenging process. In this connection, metasesic algorithms offer ideal solutions to overcome various difficulties in the image plan. Metasesical algorithms include various methods such as genetic algorithms, partial driving optimization, and ant colony optimization. These algorithms take into account multiple views, abbreviations and targets when optimizing the flight paths, image timings and resource distribution of UAVs. Genetic algorithms generate solutions inspired by universal durations, while partial duration optimization models natural duration behaviors. Ant colony optimization ISE follows the actions of the dark ones to find food and produces effective solutions. The use of these algorithms in IHA image planning allows images to be executed more efficiently and effectively. For example, in complex images such as search and rescue Deceptions, environmental monitoring and agricultural inspection, these algorithms are vital for the effective use of UAVs. Metasesthetic algorithms provide adaptive and dynamic solutions to changes in UAVs, such as weather conditions, obstructing and painful situations. The future developments of metasesthetic algorithms, innovations in IHA technology and imaging strategies will further develop and expand. This will make it necessary to use Ihas more effectively and independently in complex images, which will expand their effectiveness and areas of use in military and civilian applications.

Received
05 Ocak 2024
Revised
05 Ocak 2024
Accepted
18 Ocak 2024

Engin DURMUŞ
mr.engindurmus@gmail.com

Keywords:

- Unmanned Aerial Vehicle
- Metaheuristic Algorithms
- Mission
- Planning

GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsansız hava araçları, insansızlaşmanın ilk örneklerinden biri olarak, özellikle 1990'lı yıllardan itibaren adları sıkça anılan araçlardır. Bu araçların gündemde sıkça yer almalarının ana sebebi, son yıllarda terörle mücadelede aktif olarak kullanılmalarıdır. 2015 yılı itibarıyla, Türkiye İnsansız Hava Araçları (İHA) ve Silahlı İnsansız Hava Araçları (SİHA) üretiminde ve ihracatında dikkate değer bir gelişme kaydetmiştir. Bu teknolojik ilerleme, ülkenin terörle mücadele stratejilerinde İHA ve SİHA'ların etkin kullanımını mümkün kılmıştır. İHA ve SİHA'ların geliştirilmesi ve operasyonel kullanımı, Türkiye'nin bu alandaki kapasitesini artırarak, askeri ve güvenlik alanlarında önemli bir rol oynamasını sağlamıştır. Bu araçlar, sadece ulusal güvenlik ve savunma stratejilerinde değil, aynı zamanda bölgesel ve küresel güvenlik sorunlarına karşı da etkili bir araç olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'nin İHA ve SİHA teknolojisindeki bu önemli gelişmeleri, ülkenin savunma sanayii ve teknoloji ihracatı alanında uluslararası rekabetçiliğini artırmış, aynı zamanda terörle mücadelede yeni ve yenilikçi yaklaşımlar geliştirmesine olanak tanımıştır.

Günümüzde, İnsansız Hava Araçları (İHA) teknolojisi, sivil ve askeri alanlarda çeşitli uygulamalar için giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İHA'ların etkili bir şekilde kullanılabilmesi için, görev planlamalarının doğru ve etkin bir şekilde yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, metasezgisel algoritmalar, İHA görev planlamasında karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmede ve karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümünde hayati bir role sahip olmuştur. Bu çalışma, metasezgisel algoritmaların İHA görev planlamasındaki uygulamalarını ve etkinliklerini derinlemesine incelemeyi amaçlamaktadır.

İHA'ların görev planlaması, çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu faktörler arasında uçuş rotaları, hava koşulları, enerji yönetimi ve operasyonel riskler yer alır. Etkili bir görev planlaması, İHA'nın görevini başarıyla tamamlamasının yanı sıra, operasyonel verimliliği ve güvenliğini de artırır. Dolayısıyla, İHA görev planlaması, hem teknik hem de stratejik açıdan büyük bir dikkat ve uzmanlık gerektirir.

Metasezgisel algoritmalar, genellikle genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve karınca koloni optimizasyonu gibi çeşitli teknikler içerir. Bu algoritmalar, arama ve optimizasyon süreçlerinde, global en iyi çözümleri bulmak ve yerel optimumlardan kaçınmak için kullanılır. İHA görev planlamasında, metasezgisel algoritmaların kullanımı, görev planlamasını daha esnek ve adaptif hale getirerek, daha etkili çözümler sunmaktadır.

Bu çalışma, metasezgisel algoritmaların İHA görev planlaması üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. İlk olarak, İHA görev planlamasının temel prensipleri ve karşılaşılan zorluklar ele alınacak, ardından metasezgisel algoritmaların bu zorlukların üstesinden gelmede nasıl bir rol oynadığı incelenecektir. Çalışmanın metodolojisi, hem teorik analizler hem de uygulamalı vaka çalışmalarını içerecek şekilde tasarlanmıştır. Bu yaklaşım, metasezgisel algoritmaların İHA görev planlamasında sunduğu avantajları ve potansiyel sınırlamaları derinlemesine anlamayı amaçlamaktadır.

1.1. İnsansız Hava Aracı Tanımı ve Kullanım Alanları

İnsansız Hava Araçları (İHA), personel taşımadan, otonom ya da uzaktan kontrol edilebilme özelliğiyle, kameralar, silahlar ve kargo gibi çeşitli faydalı yükleri taşıyabilen, bloke edildikten sonra kaydedilen noktalara iniş yapılabilen araçlar olarak yapılabilir (Kurt ve Ün, 2015). İHA'lar ilk olarak askeri operasyonlar için kullanılmış, ilerlemenin ilerlemesi ve edinimlerinin kolaylaşması sonucunda çok çeşitli alanlarda yaygınlaşmıştır. Yangınla mücadele, fotoğrafçılık, film prodüksiyonu, reklamcılık ve spor müsabakaları gibi alanlarda video kayıtlarının yapılmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yapılan bir örnekleme göre, kişiler tarafından kullanılan İHA'ların %75.1'i fotoğraf çekimi, %58.7'si ise film çekimleri için tercih edilmektedir (Kahveci ve Can, 2017).

İnsansız Hava Araçları (İHA), uzaktan veya otomatik kontrol mekanizmaları ile yönlendirilen, pilot gerektirmeyen hava araçlarıdır. Teknolojik ilerlemelerle birlikte İHA'lar, sadece askeri alanlarda değil, aynı zamanda sivil ve ticari uygulamalarda da önemli bir yere sahip olmuştur. Bu araçlar, geleneksel manned hava araçlarına kıyasla daha düşük maliyet, yüksek manevra kabiliyeti ve erişilebilirlik açısından avantajlar sunar.

Askeri alanda İHA'lar, istihbarat toplama, gözetleme, hedef tespiti ve hassas vuruş gibi kritik görevlerde kullanılmaktadır. İHA'lar, pilotların risk altına girmesini önleyerek, düşman hatlarına sızma, uzun süreli gözetleme yapma ve riskli bölgelerde etkili operasyonlar yürütme kapasitesi sunar. Bu kullanım, askeri operasyonların etkinliğini artırırken, can kaybı riskini azaltmaktadır.

Sivil alanda İHA'lar, tarım, arama-kurtarma operasyonları, trafik ve hava kalitesi gözetimi, altyapı denetimi gibi çeşitli görevlerde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Tarım sektöründe, arazinin ve bitki sağlığının havadan izlenmesi, verimliliği artırmada büyük rol oynamaktadır. Ayrıca, doğal afetler sonrasında hızlı arama-kurtarma faaliyetleri ve zor ulaşılabilir alanlarda yardım malzemelerinin teslimatında önemli faydalar sağlamaktadır (Bendeş, 2015).

İHA teknolojisinin ilerlemesi, daha uzun uçuş süreleri, gelişmiş navigasyon sistemleri ve daha iyi görüntüleme teknikleri gibi yenilikler getirmiştir. Yapay zeka ve makine öğrenimi entegrasyonu, İHA'ların otonom operasyonlarını, karar verme yeteneklerini ve veri işleme kapasitelerini geliştirmekte, bu da daha karmaşık görevlerin yerine getirilmesini mümkün kılmaktadır.

İHA teknolojisinin geleceği, genişleyen kullanım alanları ve sürekli gelişen teknolojilerle parlak görünmektedir. Özellikle, otonom uçuş yeteneklerinin geliştirilmesi, İHA'ların işlevselliğini ve kullanım alanlarını daha da genişletecektir. Güvenli hava trafik yönetimi sistemlerinin entegrasyonu ve hukuki düzenlemelerin gelişimi, İHA'ların daha geniş çaplı ve etkin kullanımını mümkün kılacaktır. Bu, İHA teknolojisinin, gelecekte çeşitli sektörlerde hayati bir rol oynayacağını göstermektedir (Atmaca, 2012)

1.2. İnsansız Hava Aracının Fiziki Yapısı

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), geleneksel uçak tasarımlarından ayrılarak, üç ana bileşenden oluşan özgün bir yapıya sahiptir: Araç kendisi, içinde barındırdığı çeşitli faydalı yükler ve yer kontrol istasyonu. İHA'nın araç bölümü, birkaç temel parçadan meydana gelir: aerodinamik gövde, motor sistemi (bu elektrikli veya yanmalı olabilir), uçuş planlama ve kontrol sistemleri (genellikle bir bilgisayar tarafından yönetilir), navigasyon sistemi (genellikle Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) kullanılır) ve çarpışmayı önlemeye yardımcı olan güvenlik sistemleri. Bu bileşenler, İHA'nın ana yapısını ve temel işlevselliğini oluşturur. İHA'nın faydalı yük bölümünde ise çeşitli ekipmanlar bulunabilir; bunlar arasında gözetleme için kullanılan kameralar, lazer tarayıcılar, termal görüntüleme sistemleri, radarlar, meteorolojik durumu tespit eden sensörler ve bazı durumlarda silah sistemleri sayılabilir (Yardımcı, 2019). İHA'lar, insanlı hava araçları gibi hem döner kanatlı (helikopter benzeri) hem de sabit kanatlı (uçak benzeri) modellerde üretilebilir. Bu çeşitlilik, İHA'ların farklı görev ve operasyonel gereksinimlere uygun şekilde tasarlanabilmesini sağlar. Buna ek olarak, bazı özel İHA modelleri, hem döner kanatlı hem de sabit kanatlı özelliklere sahip hibrit tasarımlar olarak geliştirilmiştir, bu da araçların geniş bir uygulama yelpazesine uyum sağlamasına olanak tanır (Bendeş, 2015).

İnsansız Hava Araçları (İHA), uzaktan veya otonom olarak kontrol edilebilen, pilot gerektirmeyen hava araçlarıdır. İHA'ların fiziki yapısı, görevlerine ve çalışma ortamlarına göre farklılık gösterir. Genel olarak, bir İHA; gövde, kanatlar, pervaneler, motorlar, enerji sistemleri, kontrol sistemleri ve navigasyon ekipmanlarından oluşur. Gövde, aracın ana yapısal bileşeni olup, diğer tüm bileşenleri barındırır ve korur (Çalışkan, 2011).

İHA gövdeleri, hafif ve dayanıklı malzemelerden, genellikle karbon fiber veya kompozit malzemelerden üretilir. Gövdenin aerodinamik tasarımı, hava direncini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Gövde şekli, İHA'nın hızı, yük kapasitesi ve uçuş stabilitesi üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Özellikle askeri İHA'lar, düşük görünürlük ve radar imzası için stealth tasarımlar kullanabilir (Demirtaş, 2015).

İHA'ların propülzyon sistemi, genellikle elektrikli motorlar veya içten yanmalı motorlar ile sağlanır. Elektrikli motorlar sessiz çalışma ve düşük vibrasyon avantajları sunarken, içten yanmalı motorlar daha uzun uçuş süreleri ve daha yüksek yük kapasitesi sağlayabilir. Enerji sistemleri olarak, lityum-polimer piller, güneş panelleri veya hidrojen yakıt hücreleri kullanılabilir, bunların seçimi İHA'nın uçuş süresi ve görev gereksinimlerine bağlıdır.

İHA'ların kontrol sistemleri, yer istasyonlarından uzaktan veya otonom uçuş algoritmaları ile yönetilir. Bu sistemler, uçuş kontrol bilgisayarları, sensörler ve iletişim ekipmanları içerir. Navigasyon için genellikle GPS kullanılır, ancak bazı gelişmiş İHA'lar, INS (İç Navigasyon Sistemi) ve görüntü tabanlı navigasyon sistemleri gibi alternatif yöntemlere de sahiptir (Gülsoy, 2020).

İHA teknolojisi sürekli gelişmekte olup, gelecekteki İHA'ların daha hafif, daha dayanıklı malzemelerle ve daha gelişmiş enerji sistemleriyle donatılması beklenmektedir. Yeni nesil İHA'lar, gelişmiş aerodinamik tasarımlar, daha verimli propülzyon sistemleri ve otonom operasyonlar için daha sofistike

kontrol sistemleri ile daha etkili ve çeşitli görevlerde kullanılabilir hale gelecektir. Bu gelişmeler, İHA'ların performansını ve işlevselliğini önemli ölçüde artıracak ve yeni uygulama alanları açacaktır (Eroğlu, 2017).

1.3.İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

Günümüzde üretim aşamasında olan İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), son derece çeşitli bir yelpazede azami kalkış ağırlıkları sergilemektedir. Bu ağırlıklar, mütevazı 18 gramdan başlayarak, etkileyici bir şekilde yaklaşık 15 tonluk maksimum değerlere kadar ulaşabilmektedir. İHA teknolojisinin bu derece geniş çeşitliliği, uluslararası düzeyde bu araçların sınıflandırılmasında belirli bir standartların oluşturulmasını zorlaştırmıştır. Dolayısıyla, İHA'ların sınıflandırılması konusunda dünya genelinde bir görüş birliğine varılamamıştır. Ancak, bu alanda yaygın olarak kabul gören yöntemlerden biri, Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü (NATO)'nun geliştirdiği sınıflandırma sistemidir. NATO tarafından oluşturulan bu sınıflandırma, çeşitli İHA türlerini belirli kriterlere göre ayırmakta ve onları farklı kategorilere dahil etmektedir. Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü'nün 2016 yılında yayımladığı bir raporda, NATO'nun bu sınıflandırma sistemine dair detaylı bilgiler ve kategoriler Tablo 1'de açıklanmaktadır.

Tablo 1: NATO İHA Sınıflandırması

SINIFI	KATEGORİ	GÖREV İRTİFASI (ft)	MAKSİMUM GÖREV ÇAPI (km)
SINIF 1 150 Kg.dan hafif	Mikro <2 Kg	<200 AGL	5
	Mini 2-20 Kg	<3000 AGL	25
	Küçük >20	<5000 AGL	50
SINIF 2 150-600 kg	Taktik	<10000 AGL	200
SINIF 3 600 Kg.dan ağır	Mikro <2 Kg	<45000	Limitsiz
	Mini2 -20 Kg	<65000	Limitsiz
	Küçük >20	<65000	Limitsiz

Türkiye'de, İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) resmi sınıflandırması, Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu sınıflandırma, SHGM'nin 2016 yılında yayımladığı Tablo 2'de detaylandırılmıştır. Ülkemizin Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü'ne (NATO) üye bir devlet olması göz önüne alındığında, NATO kapsamında yapılan İnsansız Hava Araçları (İHA) sınıflandırmasının ülkemizde de kabul gördüğünü ifade edebiliriz.

1.4.İnsansız Hava Araçlarının Avantajları ve Dezavantajları

İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) avantajları, genel olarak şu şekilde özetlenebilir: Görev sırasında insan kaybı riskinin minimal olması, insanlı hava araçlarına kıyasla daha az personel eğitimi ve bakım maliyeti gerektirmesi, zorlu ve erişilmesi güç bölgelerde gösterdiği yüksek manevra kabiliyeti, ve insanlı uçaklara göre daha düşük üretim maliyeti. Diğer yandan, İHA'ların dezavantajları arasında, havada kalma süresinin sınırlı olması nedeniyle operasyon süresinin kısa olması, belirli bir irtifada operasyon yapabilme sınırlılığı, düşük faydalı yük kapasitesi, kontrol merkeziyle iletişimin kesilmesi durumunda ortaya çıkabilecek yüksek riskler, sınırlı hava koşullarında operasyon yapabilme esnekliği ve hava saldırılarına karşı daha zayıf savunma yeteneği sayılabilir (Bendeş, 2015).

İnsansız Hava Araçları (İHA), birçok alanda önemli avantajlar sunar. Bu araçlar, yüksek manevra kabiliyeti, uzun uçuş süreleri ve geniş alanlara erişim imkanı ile operasyonel etkinlik ve verimlilik sağlar. İHA'lar, özellikle erişilmesi zor veya tehlikeli bölgelerde görev yaparken, insan pilotların güvenliğini riske atmadan çalışabilirler. Bu, askeri keşif, arama-kurtarma operasyonları ve çevresel izleme gibi alanlarda İHA'ların tercih edilmesinin başlıca nedenlerindedir (Demircioğlu, 2009).

İHA'ların bir diğer önemli avantajı, maliyet etkinliğidir. İHA operasyonları, genellikle geleneksel pilotlu uçuşlara göre daha düşük maliyetlidir. Bu durum, hem satın alma hem de operasyonel maliyetleri kapsar. Ayrıca, İHA'lar, özellikle uzun süreli ve tekrarlanan görevlerde, insan pilot gereksinimini ortadan kaldırarak uzun vadeli tasarruflar sağlar (Eroğlu, 2017).

İHA'larla ilgili bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Teknik zorluklar, özellikle iletişim, kontrol sistemleri ve navigasyon konularında meydana gelir. Uzaktan kontrol edilen İHA'lar, bazen sinyal gecikmesi veya kesintisi gibi sorunlarla karşılaşabilir. Ayrıca, karmaşık hava koşulları ve engeller, İHA'ların operasyonel etkinliğini sınırlandırabilir.

İHA'ların yanlış ellerde kullanımı, güvenlik riskleri oluşturabilir. Ayrıca, İHA'ların gelişmiş gözetleme kabiliyetleri, bireysel mahremiyet haklarına müdahale edebilir (Bostancı, 2022). İHA teknolojisinin geleceği, hem avantajları hem de dezavantajları göz önünde bulundurularak şekillenecek. Teknolojik yenilikler ve gelişmeler, İHA'ların operasyonel kabiliyetlerini artırırken, aynı zamanda mevcut teknik ve güvenlik zorluklarını da azaltabilir. Güvenlik ve mahremiyetle ilgili endişelerin ele alınması, İHA teknolojisinin geniş çaplı kabulünü ve etik kullanımını teşvik edecektir. Bu gelişmeler, İHA'ların daha güvenli, etkili ve yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlayacak ve yeni uygulama alanlarını açacaktır (Demircioğlu, 2009).

Tablo 2 : Metasezgisel Algoritmaların Karşılaştırmalı Analizi

Algoritma Adı	Anahtar Özellikler	Avantajları	Dezavantajları	İHA Görev Planlaması Uygulamaları
Genetik Algoritma	Doğal seçilimi taklit eder	Çok yönlü	Yavaş olabilir	Rota optimizasyonu
Parçacık Sürü Optimizasyonu	Parçacıkların sosyal davranışını simüle eder	Basit ve etkili	Erken yakınsama sorunu olabilir	Uçuş formasyonu
Karıncalar Kolonisi Optimizasyonu	Karıncaların yol bulma yöntemini taklit eder	Ayrık optimizasyon için iyi	Hesaplama yoğunluğu	Yol planlama
Simüle Tavlama	Metallurjide tavlama taklit eder	Yerel minimumlardan kaçınmak	Soğutma programına duyarlı	Kaynak tahsisi

Kaynak : Erol, V., 2006, Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.11.

2. Metasezgisel Yöntemler ve Analizi

Optimizasyon problemlerinin çoğunda, en iyi sonucun kabul edilebilir bir zaman dilimi içerisinde elde edilmesi genellikle mümkün değildir. Bu karmaşık optimizasyon problemleri için, makul bir sürede yaklaşık ve kabul edilebilir çözümler sunan metasezgisel yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Metasezgisel yaklaşımlar, çözüm uzayının verimli bir şekilde aranmasını sağlayan temel sezgisel yöntemlerin bir kombinasyonunu içeren yaklaşık çözüm yöntemlerinin gelişimini ifade eder. Bu

yöntemler, çözüm uzayında farklı kavramların etkili bir biçimde entegrasyonunu sağlayarak alt seviye sezgiseller için bir rehberlik ve iteratif bir üretim süreci sunar (Eroğlu, 2017).

Her bir iterasyon sürecinde, metasezgisel algoritmaların temel amacı, kullanılan bir veya daha fazla çözüm kümesi aracılığıyla en uygun veya en yakın sonuçları elde etmek yönündedir (Eroğlu, 2017). Bu algoritmalar, karmaşık optimizasyon problemlerine uygulanabilir ve çeşitli metodolojileri içermektedir. Özellikle genetik algoritmalar, karınca kolonisi optimizasyonu ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi yöntemler, bu sınıflandırmanın öne çıkan örneklerindedir. Ayrıca, tabu arama, tavlama benzetimi, kabul eşiği algoritmaları, yerel arama teknikleri ve yapay arı kolonisi algoritması da metasezgisel yaklaşımlar içerisinde değerlendirilebilen önemli metodolojiler arasında yer alır (Topal, 2019). Bu çeşitlilik, metasezgisel algoritmaların geniş bir uygulama alanına ve çeşitli problemlere uyum sağlayabilme yeteneğini göstermektedir. Her bir yöntem, kendi benzersiz özellikleri ve uygulama alanları ile karmaşık optimizasyon sorunlarının çözümünde etkili olabilmektedir.

Metasezgisel algoritmalar, karmaşık modelleme ve optimizasyon problemleri için etkili çözümler sunan güçlü araçlar olarak kabul edilmektedir. Bu tür algoritmalar, özellikle zorlu problemlere deneme-yanılma yöntemiyle kısa süre içerisinde makul çözümler bulma konusunda başarılıdır (Gandomi ve diğerleri, 2013). Doğadan esinlenen bu teknikler, görüntü işleme alanında da önemli bir yere sahiptir. Gürültü azaltma, bulanıklık giderme, görüntü iyileştirme ve restorasyon, segmentasyon, kenar tespiti, görüntü sentezi, füzyon ve örüntü tanıma gibi çeşitli görüntü işleme işlevleri için yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Ramson ve arkadaşları, 2019).

2.1. Karınca Kolonisi Algoritması

Karınca kolonisi yaklaşımı, gezgin satıcı problemi gibi konulara yönelik geliştirilmiş sezgisel bir metodolojidir (Söyler ve Kesintürk, 2007). Bu yaklaşım, temelde karıncaların feromon izlerini takip etmeleri prensibine dayanmaktadır. Karıncalar, yuvaları ile besin kaynakları arasındaki mesafeyi minimize edecek bir yol izleme eğilimindedirler. Bu canlılar, çevrelerindeki değişiklikleri algılama yeteneğine sahip olup, bulunan yol en kısa olmadığında daha kısa bir yol bulma yeteneğine sahiptirler. Karınca kolonisi algoritması, geliştirilmesinin ardından yapılan sayısız araştırma ile birlikte çeşitlilik göstermiş ve bir dizi farklı karınca kolonisi algoritması geliştirilmiştir.

2.2. Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), 1970'lerde John Holland tarafından makine öğrenmesi üzerine yapılan çalışmalar ve Charles Darwin'in evrim teorisinden ilham alarak geliştirilmiştir. Darwin'in teorisinde, farklı özelliklere sahip, üreme yeteneğine sahip bireylerin bulunduğu bir ortamda, sınırlı sayıda bireyin hayatta kalabileceği durumlarda, bireyler arasında bir eliminasyon süreci gerçekleşir. Bu süreçte, en uygun olanlar hayatta kalmayı başarır ve sonuç olarak daha güçlü bireylerin ortaya çıkmasını sağlar. Yeni oluşan popülasyonda, daha üstün genlere sahip bireyler, genlerini koruma eğiliminde olacaktır. Genetik Algoritmalar (GA), temel olarak evrimsel biyolojiden esinlenen bir düşünce yapısına dayanır ve bu prensipler etrafında geliştirilmiştir (Mohammad ve diğerleri, 2012). GA'nın uygulama alanları oldukça geniştir ve bu algoritmalar, özellikle karmaşık optimizasyon sorunlarının çözümünde kullanılmaktadır. Bunlar arasında gezgin satıcı problemi gibi klasik optimizasyon problemlerinden, daha karmaşık çizelgeleme ve montaj hattı dengelenmesi gibi endüstriyel uygulamalara, ayrıca tesis yerleşimi planlaması gibi stratejik karar verme süreçlerine kadar geniş bir yelpazede yer alır (Topal, 2019). GA'nın bu çeşitli uygulama alanları, algoritmanın esnekliğini ve çeşitli problemlere uyum sağlayabilme kapasitesini göstermektedir. Her bir uygulama alanı, GA'nın benzersiz avantajlarını ve karmaşık problemleri çözmeye konusundaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

2.3. Tavlama Benzetimi Algoritması

Tavlama Benzetimi (TB), orijinal olarak 1953 yılında Metropolis, Rosenbluth ve Teller tarafından tanıtılmıştır. Bu yöntem, başlangıçta, ısı banyosunda bulunan parçacıkların denge durumlarının dağılımını analiz etmek amacıyla geliştirilmiştir. TB, katı maddelerin ısıtılarak erime noktalarına ulaştırılması ve sonrasında bu maddelerin hızla soğutularak enerji düzeylerinin düşürülmesi prensibine dayanır. Bu süreçte, katı maddenin moleküler yapısı (özellikle kristal yapısı), uygulanan soğutma hızına bağlı olarak önemli değişiklikler gösterebilir (Erol, 2006). Bu değişiklikler, maddenin soğutma sürecinde maruz kaldığı termal şokun doğası ve şiddeti ile doğrudan ilişkilidir. Tavlama benzetimi, bu prensipleri modelleyerek, çeşitli fiziksel ve kimyasal süreçlerin simülasyonunda kullanılabilir. Özellikle, maddenin soğutulma sırasında aldığı form ve yapı, soğutma hızı ve sıcaklık değişimlerinin kontrolü ile optimize edilebilir, bu da malzemelerin özelliklerini ve işlevselliğini önemli ölçüde etkileyebilir.

Bir metalin tavlama sürecine benzer şekilde tasarlanan bu algoritma, genellikle ayrık optimizasyon problemlerinde kullanılır. Tavlama benzetimi algoritması, mevcut iyi bir çözümden vazgeçip, kötü bir çözümü kabul etme olasılığı olan 'p' değerinin, ilerleyen iterasyonlarda dinamik bir şekilde azalmasına dayanır. Başlangıç aşamasında, çözüm bölgeleri arasında sık geçişler olurken, iterasyon sayısı arttıkça ve bulunan sonuçlar iyileştikçe, 'p' değeri sıfıra yaklaşır ve çözüm uzayı daralır. Bu süreç, kötü çözüm seçme olasılığını sistematik bir şekilde azaltarak, sıcaklıkla ilişkilendirir (Şahin ve Eroğlu, 2014).

2.4. Parçacık Sürü Optimizasyonu

1995 yılında Eberhart ve Kennedy tarafından geliştirilen Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması, genetik algoritmaların yanı sıra kullanılan ve popülasyon tabanlı bir metasezgisel yaklaşım sunan bir algoritmadır. Bu yenilikçi algoritma, özellikle kuş sürülerinin ve balık sürülerinin karmaşık sosyal davranışlarını ve bu canlıların önceki nesillerin deneyimlerinden nasıl yararlandıklarını temel alarak tasarlanmıştır. PSO, bu doğal süreçlerden ilham alarak, bir problemin çözümünde bireyler arası bilgi paylaşımını ve grup dinamiklerini kullanır. Algoritmanın temel prensibi, her parçacığın (bireyin) hem kendi deneyimlerinden hem de diğer parçacıkların deneyimlerinden öğrenerek, optimal çözüme doğru hareket etmesine dayanır. Bu yaklaşım, genetik algoritmaların sunduğu evrimsel temelli çözümlere bir alternatif olarak, daha hızlı ve etkili bir optimizasyon süreci sunabilir. PSO, genetik algoritmalarla benzerlikler taşısa da, rastgele oluşturulan çözüm kümesiyle başlar ve nesiller boyunca en iyi sonucu arama sürecine dayanır. Bu algoritmada, genetik algoritmaların kullandığı çaprazlama ve mutasyon gibi operatörler kullanılmaz. PSO'da, gelecek nesiller hız vektörlerinin güncellenmesiyle oluşturulur. Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritmasında, 'parçacık' adı verilen potansiyel çözümler, çok boyutlu arama uzayında hareket ederken, en iyi performansı gösteren diğer parçacıkları model olarak yollarını belirlerler (Özkan, 2016). Algoritma, önceden tanımlanan ve belirlenen durdurma kriterlerine ulaşıldığında sona erer. Her bir parçacık, kendine has bir hızla hareket eder ve bu hız, parçacığın arama uzayında bir sonraki konumuna ulaşmasını sağlayan temel faktördür. Algoritmanın her iterasyonunda, parçacıkların performansı, yani uygunluk değerleri, yeniden değerlendirilir ve bu değerler, her bir parçacığın hafızasında saklanır. Parçacıkların hareketi esas olarak, popülasyon içindeki en başarılı bireylerden öğrenme prensibine dayanır. Bu bağlamda, hafızada tutulan en iyi kişisel değer 'Pbest', her bir parçacığın komşuluk alanındaki en iyi uygunluğa sahip birey 'Lbest' ve tüm sürü içindeki en iyi parçacık 'Gbest' olarak tanımlanır (Demirtaş, 2015). Bu bileşenler, algoritmanın genel verimliliğini ve optimizasyon sürecinin başarısını artıran kritik unsurlardır.

3. Görev Planlamasının Temel Kavramları ve Zorlukları

Görev planlaması, bir projenin veya operasyonun başarılı bir şekilde tamamlanması için kritik öneme sahip bir süreçtir. Bu süreç, kaynakların etkin kullanımını, zaman çizelgelerinin doğru belirlenmesini ve görevler arası koordinasyonun sağlanmasını içerir. Görev planlamasının temel kavramları arasında görev tanımlama, öncelik sıralaması, kaynak tahsisi ve zamanlama yer alır. Her görevin kendi özgün

gereksinimleri ve kısıtlamaları bulunur, bu da planlama sürecini karmaşık hale getirebilir. Zorluklar arasında sınırlı kaynakların yönetimi, beklenmedik durumların ortaya çıkması, paydaşlar arasındaki iletişim sorunları ve değişen öncelikler sayılabilir. Etkili bir görev planlaması, bu zorlukları aşarak projelerin zamanında ve bütçe dahilinde tamamlanmasını sağlar, bu da özellikle karmaşık ve çok disiplinli projelerde hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, görev planlaması sürecinin derinlemesine anlaşılması ve uygulanması, projelerin başarısında kilit bir rol oynar (Bostancı, 2022)

Tablo 3 : İHA Görev Planlama Senaryoları

Senaryo Açıklaması	Görev Türü	Önerilen Metasezgisel Algoritma	Beklenen Zorluklar	Potansiyel Çözümler
Şehir İçi Gözetleme	Gözetleme	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Engel kaçınma	Dinamik yol planlama
Afet Tepki	Kurtarma	Genetik Algoritma	Hızlı tepki	Evrimsel görev ayarlama
Tarımsal İzleme	İzleme	Karıncı Kolonisi Optimizasyonu	Alan kapsama	Etkin yol bulma
Paket Teslimatı	Teslimat	Simüle Tavlama	Optimal rota	Uyarlanabilir zamanlama

Kaynak : Erol, V., 2006, Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.14.

İHA (İnsansız Hava Aracı) görev planlaması, belirli bir misyonun veya operasyonun başarıyla tamamlanmasını sağlamak için kritik bir süreçtir. Bu süreç, görev tanımlaması, uçuş rotası belirleme, zamanlama, kaynak tahsisi ve risk yönetimi gibi temel kavramları içerir. Etkili bir görev planlaması, İHA'nın kapasitesini maksimize eder ve hedeflenen görevin gerekliliklerini karşılar. İHA görev planlaması, aynı zamanda, hava aracının teknik özelliklerini, operasyonel kısıtlamaları ve çevresel faktörleri dikkate alarak, en uygun uçuş planını oluşturmayı hedefler (Gülsoy, 2020).

İHA görev planlamasının ilk adımı, görevin doğru bir şekilde tanımlanması ve hedeflerin belirlenmesidir. Bu, görevin doğası, istenen çıktılar, hedef bölge ve görevin öncelikleri gibi unsurları içerir. İHA'nın hangi görevi yerine getireceğini açıkça tanımlamak, sonraki planlama aşamalarının temelini oluşturur (Topal, 2019).

İHA'nın uçuş rotası ve zamanlaması, operasyonel verimlilik açısından hayati önem taşır. Bu, hava aracının menzili, pil ömrü, hava koşulları, hava sahası kısıtlamaları ve potansiyel engeller gibi birçok faktöre bağlıdır. Ayrıca, görevin zamanlaması, belirlenen hedeflere ulaşmak için optimal bir uçuş planı oluşturmak için kritiktir (Eroğlu, 2017).

İHA görev planlamasında, kaynak yönetimi ve risk değerlendirmesi önemli rol oynar. Bu, enerji yönetimi, yedekleme sistemlerinin planlanması ve acil durum prosedürlerinin hazırlanmasını içerir. Risk değerlendirmesi, görevin güvenli ve başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağlamak için potansiyel tehlikeleri ve operasyonel riskleri analiz eder.

İHA görev planlaması, teknolojik kısıtlamalar, değişken çevresel şartlar ve hava sahası düzenlemeleri gibi bir dizi zorluğu beraberinde getirir. Gelecekte, bu zorlukların üstesinden gelmek için gelişmiş

algoritmalar, yapay zeka tabanlı sistemler ve daha gelişmiş veri analizi yöntemleri kullanılabilir. Bu gelişmeler, İHA görev planlamasının daha etkili, esnek ve güvenilir olmasını sağlayacak ve genişleyen uygulama alanlarına adapte olmasına yardımcı olacaktır.

4. İHA'ların Çeşitli Görevlerdeki Rollerinin İncelenmesi

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), geleneksel pilotlu uçuşların yerini alabilecek esneklik ve verimlilikte teknolojik yenilikler sunmaktadır. İHA'lar, özellikle erişilmesi zor veya tehlikeli olan görevler için idealdir, zira bu araçlar pilotların güvenliğini riske atmadan karmaşık operasyonları yerine getirebilir. Bu cihazlar, askeri operasyonlardan tarımsal izlemeye, arama ve kurtarma operasyonlarından altyapı denetimine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır (Gülsoy, 2020).

İHA'lar, öncelikle askeri amaçlar için tasarlanmış ve kullanılmıştır. İstihbarat toplama, gözetleme, hedef belirleme ve hatta hassas saldırı yetenekleriyle donatılmış İHA'lar, modern savaş alanında vazgeçilmez araçlar haline gelmiştir. Bu teknoloji, düşük maliyetli, yüksek etkinlik ve düşük can kaybı gibi avantajlarıyla askeri stratejilerde önemli bir yer tutmaktadır (Demircioğlu, 2009).

İHA teknolojisi, sivil ve ticari alanlarda da hızla yayılmaktadır. Tarımda bitki sağlığı izleme, doğal afet sonrası hasar değerlendirmesi, arama-kurtarma görevleri, trafik izleme ve altyapı denetimi gibi çeşitli sivil uygulamalarda İHA'lar etkili bir araç olarak kendini göstermiştir. Bu uygulamalar, İHA'ların çok yönlülüğünü ve geniş çaplı faydalarını vurgulamaktadır.

Teknolojik gelişmeler, İHA'ların işlevselliğini ve uygulama alanlarını genişletmiştir. Gelişmiş navigasyon sistemleri, uzun menzilli iletişim teknolojileri, otomatik uçuş kontrol sistemleri ve gelişmiş görüntüleme kapasiteleri, İHA'ları daha karmaşık görevler için uygun hale getirmiştir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi entegrasyonu, İHA'ların otonom yeteneklerini ve karar verme kabiliyetlerini artırmıştır (Bostancı, 2022)

İHA teknolojisinin geleceği, genişleyen kullanım alanları ve teknolojik yeniliklerle parlak görünmektedir. Otonom uçuş kabiliyetleri, İHA'ları daha bağımsız ve etkili görevler için uygun hale getirecek, hava trafik yönetimi ve hukuki düzenlemelerin entegrasyonu ise güvenli ve düzenli kullanımı mümkün kılacaktır. Bu gelişmeler, İHA'ların çeşitli sektörlerde ve görevlerde hayati roller oynamasını sağlayacak ve etkilerini daha da artıracaktır (Özkan, 2016).

5. Algoritmaların İHA Görev Planlamasındaki Uygulamaları

İnsansız Hava Araçları'nın (İHA) görev planlaması, karmaşıklığı ile öne çıkan ve çok katmanlı bir süreç olarak tanımlanabilir. Bu süreçte, İHA'ların görevlerinin, uçuş güzergahlarının, belirlenen hedeflerinin ve zamanlamalarının etkin bir şekilde optimize edilmesi gerekmektedir. Bu optimizasyon süreci, İHA'ların çevresel faktörlere, uçuş sürelerine ve enerji tüketimine duyarlılığını göz önünde bulundurarak gerçekleştirilir. İHA görev planlamasında kullanılan algoritmalar, operasyonel verimliliği artırma ve potansiyel riskleri azaltma amacı güder. Bu algoritmalar, İHA operasyonlarının başarıyla gerçekleştirilmesi için stratejik öneme sahip olup, hem maliyet etkinliğini artırma hem de operasyonel güvenliği sağlama yönünde kritik rol oynarlar. Bu bağlamda, İHA görev planlaması, hem teknik hem de stratejik boyutları içeren karmaşık bir mühendislik ve yönetim disiplindir.

İHA görev planlamasında kullanılan temel algoritmalar arasında, genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu, ve tabu arama gibi metasezgisel yöntemler yer almaktadır. Bu algoritmalar, birden fazla İHA'nın koordineli hareketlerini planlamak, uçuş rotalarını belirlemek ve hedeflere ulaşma süresini optimize etmek için kullanılır. Her algoritma, farklı planlama ihtiyaçlarına ve senaryolarına uyum sağlayabilme yeteneğine sahiptir (Gülsoy, 2020).

Gelişmiş görev planlama algoritmaları, özellikle çoklu-İHA sistemlerinde karmaşık senaryoların yönetilmesinde önemlidir. Bu tür sistemler, birden fazla İHA'nın eş zamanlı olarak farklı görevleri yerine

getirmesini gerektirir. Algoritmalar, bu İHA'ların birbirleriyle etkileşimini, çarpışma risklerini azaltmayı ve görev etkinliğini artırmayı hedefler. Bu, hem askeri hem de sivil uygulamalarda İHA'ların daha etkili kullanılmasını sağlar (Demircioğlu, 2009).

Görev esnasında ortaya çıkabilecek değişikliklere hızlıca uyum sağlayabilen dinamik planlama algoritmaları, İHA operasyonlarında kritik öneme sahiptir. Bu algoritmalar, gerçek zamanlı verileri analiz ederek, hava durumu değişiklikleri, engeller veya acil durumlar gibi beklenmedik olaylara karşı planları güncelleyebilir. Dinamik planlama, İHA'ların esnekliğini ve operasyonel güvenliğini artırarak, zorlu ortamlarda bile başarılı bir şekilde görev yapmalarını sağlar (Özkan, 2016).

Tablo 4 : Metasezgisel Algoritmaların Performans Metrikleri

Algoritma Adı	Hesaplama Süresi	Başarı Oranı	Enerji Verimliliği (İHA İçin)	Ölçeklenebilirlik
Genetik Algoritma	Orta	Yüksek	Orta	Yüksek
Parçacık Sürü Optimizasyonu	Hızlı	Orta	Yüksek	Orta
Karınca Kolonisi Optimizasyonu	Yavaş	Yüksek	Düşük	Düşük
Simüle Tavlama	Değişken	Orta	Yüksek	Orta

Kaynak: Erol, V., 2006, Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s.19.

İHA görev planlaması algoritmalarının geleceği, yapay zeka ve makine öğrenimi entegrasyonu ile daha da parlak görünmektedir. Bu teknolojiler, algoritmaların daha karmaşık senaryoları anlamasını ve daha verimli planlama yapmasını sağlayacak. Ayrıca, bu algoritmaların sürekli gelişimi, İHA'ların daha geniş ve çeşitli görev alanlarında kullanılmasına olanak tanıyacak ve İHA teknolojisinin sivil, ticari ve askeri uygulamalardaki etkinliğini artıracaktır (Bostancı, 2022)

6. Metasezgisel Algoritmalar ve İHA Görev Planlaması

Metasezgisel algoritmalar, çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan esnek ve genellikle evrimsel temelli yaklaşımlardır. İHA (İnsansız Hava Araçları) görev planlaması, çok sayıda değişkeni ve olası senaryoyu içeren karmaşık bir problem olduğundan, bu tür algoritmalar bu alanda çözüm üretme kapasitesine sahiptir. Metasezgisel algoritmalar, İHA rotalarını, zamanlamalarını ve kaynak dağılımlarını optimize ederek, etkin ve verimli bir operasyonel planın oluşturulmasına yardımcı olur (Topal, 2019).

Metasezgisel algoritmalar, genellikle karmaşık optimizasyon problemlerine uygulanabilir genel amaçlı çözüm yöntemleridir. Bu algoritmalar, global en iyi çözümleri bulmak için yerel arama yöntemleri ve rastgele arama stratejilerini birleştirir. İHA görev planlaması gibi karmaşık ve dinamik problemlerde, metasezgisel algoritmaların esnekliği ve adaptasyon kabiliyeti, onları ideal çözüm yöntemleri haline getirir. Bu algoritmalar, birden fazla hedefi, kısıtlamayı ve değişkeni dikkate alarak, etkin ve pratik çözümler üretebilir (Özkan, 2016).

İnsansız Hava Araçları (İHA) planlamasında, etkin ve verimli sonuçlar elde etmek için sıklıkla başvurulan metasezgisel algoritmalar arasında genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonu önemli bir yer tutmaktadır. Genetik algoritmalar, evrimsel biyolojiden esinlenen bir yaklaşımı benimseyerek, doğal seleksiyon ve genetik kombinasyon ilkeleri üzerinden çözüm setlerini sürekli olarak geliştirir. Bu algoritma, çeşitli çözümlerin rastgele seçilmesi, çaprazlanması ve mutasyona uğratılması suretiyle en uygun çözümlere ulaşmayı hedefler. Öte yandan, parçacık sürü optimizasyonu, doğadaki kuş sürülerinin etkileşim mekanizmalarından ilham alır ve bu mekanizmaları matematiksel bir modelle çözüm bulma sürecine uygular. Bu yöntemde, bir grup parçacık, en iyi bilinen çözümlere doğru hareket ederken birbirleriyle bilgi paylaşımı yapar ve böylece optimizasyon sürecini kolektif bir zeka üzerine inşa eder. Her iki algoritma da, İHA görev planlaması gibi karmaşık senaryolarda, rotaların ve kaynakların en uygun şekilde belirlenmesinde oldukça etkilidir. Genetik algoritmalar ve parçacık sürü optimizasyonunun bu senaryolarda uygulanması, optimizasyon süreçlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırarak, karmaşık İHA görevlerinin başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağlar (Gülsoy, 2020).

İHA görev planlamasında metasezgisel algoritmalar, uçuş rotalarını, zamanlamalarını ve kaynak tahsislerini optimize etmek için kullanılır. Bu algoritmalarla yararlanarak, İHA'lar birden fazla görevi verimli bir şekilde yerine getirebilir ve karşılaşılabilecek çeşitli operasyonel zorluklara dinamik olarak uyum sağlayabilir. Özellikle, birden fazla İHA'nın koordinasyonunu ve çarpışma önleme stratejilerini geliştirmede bu algoritmalar kritik bir role sahiptir (Demircioğlu, 2009).

Metasezgisel algoritmalar, özellikle birden fazla İHA'nın kullanıldığı karmaşık görev planlama senaryolarında avantaj sağlar. Çoklu İHA operasyonları, rotaların çakışma olasılığı, enerji yönetimi ve etkin görev dağılımı gibi ek zorluklar içerir. Bu algoritmalar, farklı İHA'ların görevlerini ve uçuş yollarını koordine ederek, bu tür zorlukların üstesinden gelmeye yardımcı olur ve operasyonel verimliliği artırır.

Gerçek dünya senaryolarında, metasezgisel algoritmalar İHA'ların karmaşık çevrelerde navigasyonunu, hedeflere ulaşımını ve görevleri yerine getirme stratejilerini iyileştirmek için kullanılır. Örneğin, arama-kurtarma operasyonları, yangın izleme ve tarımsal izleme gibi görevlerde İHA'ların etkin kullanımı için bu algoritmalar hayati öneme sahiptir. Algoritmalar, İHA'ların çevresel faktörleri ve beklenmedik durumları hesaba katmasını sağlayarak, görev başarısını maksimize eder (Topal, 2019).

İHA görev planlaması, değişken hava koşulları, engeller ve diğer beklenmedik durumlar gibi dinamik çevre unsurlarını da içerir. Metasezgisel algoritmalar, bu tür dinamik koşullara hızlı bir şekilde adapte olabilme yeteneğine sahiptir. Gerçek zamanlı veri girdilerini alarak ve sürekli olarak çözüm kümesini güncelleyerek, İHA'ların hedeflerine en etkili şekilde ulaşmasını sağlar (Gülsoy, 2020).

Metasezgisel algoritmalar ve İHA görev planlaması alanındaki gelecek araştırmalar, yapay zeka ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin entegrasyonuna odaklanabilir. Bu teknolojiler, algoritmaların problem çözme yeteneklerini geliştirecek ve daha karmaşık görev senaryolarını yönetebilir hale getirecektir. Ayrıca, enerji verimliliği ve otomatik karar verme mekanizmaları gibi konular, İHA görev planlamasının etkinliğini ve uygulama alanlarını genişletecek önemli araştırma konularıdır.

Metasezgisel algoritmaların İHA görev planlamasındaki uygulamaları sürekli gelişmektedir. Yapay zeka ve makine öğrenimi ile entegrasyon, bu algoritmaların daha da sofistike hale gelmesini ve karmaşık görev senaryolarında daha yüksek başarı oranlarına ulaşmasını sağlayacaktır (Özkan, 2016).

SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede incelenen metasezgisel algoritmalar, İnsansız Hava Araçları (İHA) görev planlamasında önemli bir etkinlik ve verimlilik artışı sağlamıştır. Genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve karınca koloni optimizasyonu gibi yöntemler, karmaşık planlama problemlerini çözmede etkili olmuştur. Bu algoritmalar, birden çok görevi, değişken hava koşullarını ve operasyonel kısıtlamaları başarıyla dikkate alarak, İHA'ların görev performansını önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu tez, İnsansız Hava

Araçları (İHA)'nın görev planlamasında metasezgisel algoritmaların kullanımını detaylı bir şekilde incelemiştir. Araştırma, çeşitli metasezgisel algoritmaların - özellikle genetik algoritmalar, parçacık sürü optimizasyonu ve karınca koloni optimizasyonu - İHA görev planlamasındaki etkinliklerini ve uygulanabilirliklerini analiz etmiştir. Bulgular, bu algoritmaların, İHA'ların rotalarını, zamanlamalarını ve kaynak dağılımlarını etkili bir şekilde optimize etmede büyük potansiyel taşıdığını göstermiştir. Tez kapsamında yapılan analizler, metasezgisel algoritmaların özellikle karmaşık ve dinamik görev senaryolarında etkili olduğunu göstermiştir. Çoklu-İHA operasyonları ve acil durum müdahaleleri gibi senaryolarda, bu algoritmaların adaptasyon kabiliyeti ve esnekliği öne çıkmıştır. İHA'ların çarpışma riskini azaltma, enerji verimliliğini maksimize etme ve hızlı tepki süreleri sunma gibi konularda bu algoritmalar kritik bir rol oynamıştır. Ancak, metasezgisel algoritmaların uygulaması sırasında bazı teknolojik ve operasyonel zorluklar da ortaya çıkmıştır. Algoritmaların karmaşıklığı, hesaplama süreleri ve gerçek zamanlı veri entegrasyonu, bu zorluklardan bazılarıdır. İHA görev planlamasında, algoritmaların gerçek zamanlı ve değişken koşullara uyum sağlayabilmesi için daha fazla geliştirilmesi gerekmektedir (Topal, 2019).

Metasezgisel algoritmalar, İHA görev planlamasında karşılaşılan çeşitli zorlukları aşmada etkili bulunmuştur. Özellikle, birden fazla İHA'nın koordinasyonu ve çarpışma önleme gibi karmaşık görevlerde, bu algoritmaların adaptasyon kabiliyeti ve esnekliği ön plana çıkmıştır. Ayrıca, algoritmaların, gerçek zamanlı veri işleme ve dinamik çevre değişikliklerine hızlı uyum sağlama yetenekleri, operasyonel verimliliği artırmada kritik rol oynamıştır (Demircioğlu, 2009).

Makalede, metasezgisel algoritmaların uygulanmasında bazı zorluklar ve sınırlamalar da ortaya konmuştur. Algoritmaların karmaşıklığı ve hesaplama yoğunluğu, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda performans sorunlarına yol açabilir. Ayrıca, algoritmaların optimizasyon sonuçları bazen belirsiz olabilir ve her zaman en iyi çözümü garanti etmez. Bu sınırlamaların, algoritmaların geliştirilmesi ve uygulama stratejilerinin optimize edilmesiyle üstesinden gelinebilir.

Gelecekteki araştırmalar, algoritmaların hesaplama verimliliğini artırmaya, daha karmaşık senaryoları desteklemeye ve gerçek zamanlı veri işleme kabiliyetlerini geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi tekniklerinin entegrasyonu, İHA görev planlamasında metasezgisel algoritmaların etkinliğini daha da artırabilir (Özkan, 2016).

Makalenin sonuçları, gelecekteki araştırmalar için bir dizi potansiyel yön ortaya koymuştur. Yapay zeka ve makine öğrenimi ile entegre edilmiş metasezgisel algoritmaların geliştirilmesi, daha sofistike ve etkin planlama çözümleri sağlayabilir. Ayrıca, İHA teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, algoritmaların bu yeni teknolojik gelişmelere uyum sağlaması ve karmaşık görev senaryolarına adapte olması gerekmektedir (Topal, 2019).

Metasezgisel algoritmaların İHA görev planlamasında önemli bir rol oynadığını ve bu alanda büyük potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Algoritmaların, İHA operasyonlarının etkinliğini ve verimliliğini artırma potansiyeli yüksektir, ancak bu potansiyelin tam olarak gerçekleştirilmesi için sürekli gelişim ve uyarlanma gerekmektedir. Gelecek araştırmaların, bu alanda karşılaşılan zorlukları aşmak ve İHA görev planlamasını

Sonuç olarak, bu tez, metasezgisel algoritmaların İHA görev planlamasında sunduğu önemli avantajları ortaya koymuştur. Ancak, bu teknolojinin tam potansiyelini açığa çıkarmak için karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek ve sürekli yenilik ve iyileştirme yapmak gerekmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar, İHA teknolojisinin gelecekteki gelişimine önemli katkılar sağlayacak ve geniş çaplı uygulamalarda İHA'ların daha etkili kullanımını mümkün kılacaktır.

Kaynaklar (References)

1. Atmaca, E. (2012). Bir kargo şirketinde araç rotalama problemi ve uygulaması. TÜBAV Bilim Dergisi, 5(2), 12-27
2. Bendeş, E., 2015, Yeni zeki görüntü birleştirme tekniklerinin geliştirilmesi, , Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri
3. Bostancı, E. (2022).Türk Savunma Sanayi Tarihi: Dönemler ve Aktörler (1834–2020). Tarih Kritik Dergisi, 8(1), 84-88.
4. Çalışkan, K., 2011, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile Araç Rotalama Probleminin Maliyetlerinin Kümeleme Tekniği ile İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
5. Demircioğlu, M., 2009, Araç rotalama probleminin sezgisel bir yaklaşım ile çözümlenmesi üzerine bir uygulama, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Adana, 24-30
6. Demirtaş Y.E., 2015, Dinamik araç rotalama problemine parçacık sürü optimizasyonu algoritması çözüm önerisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul
7. Demirtaş Y.E., 2015, Dinamik araç rotalama problemine parçacık sürü optimizasyonu algoritması çözüm önerisi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul
8. Eroğlu, S., 2017 Heterojen filolu araç rotalama probleminin meta sezgisel hibrit model ile çözümü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 27-30
9. Erol, V., 2006, Araç rotalama problemleri için popülasyon ve komşuluk tabanlı metasezgisel bir algoritmanın tasarımı ve uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
10. Gandomi, A., Yang, X.-S., Talatahari, S. ve Alavi, A., 2013, Metaheuristic Algorithms in Modeling and Optimization, In, Eds, p. 1-24.
11. Gülsoy, A. F. (2020). Türk Milli Savunma Sanayii Tarihi: Aselsan Örneği (Yüksek Lisans Tezi). Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
12. Kahveci M. ve Can N., 2017, İnsansız hava araçları: tarihçesi, tanımı, dünyada ve türkiye'deki yasal durumu, 551-535
13. Kurt Ş. ve Ün O., 2015, İnsansız hava araçları (iha) üzerine hava hukuku açısından bir değerlendirme, İstanbul-Türkiye,195-197
14. Mohammad, M., Ahmad, M., Mostafa, S., 2012 Using Genetic Algorithm in Implementing Capacitated Vehicle Routing Problem, International Conference on Computer & Information Science (ICCIS) 2012, Kuala Lumpur-Malaysia, 257-262
15. Özkan, H. (2016).İnsansız hava araçlarının/drone'ların Türk sivil havacılık hukukuna göre statüsü, unsurları ve ceza hukuku boyutuyla güncel sorunlar. TBB Dergisi, (125).
16. Ramson, J., Raju, K. L., Suresh, V. ve Anagnostopoulos, T., 2019, Nature Inspired Optimization Techniques for Image Processing—A Short Review, In, Eds, p. 113-145.
17. Söyler, H., ve Kesintürk T., 2007, Karınca Kolonisi Algoritması ile Gezen Satıcı Probleminin Çözümü, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21(4), 689-698
18. Şahin, Y., Eroğlu A., 2014, Kapasite kısıtlı araç rotalama problem için metasezgisel yöntemler: bilimsel yazın taraması, Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 19(4), 337-355
19. Topal, B. G. (2019). Türk savunma sanayiinin kobi'lerin gelişimine etkisi: kümelenme örnekler, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul.
20. Yardımcı G.,2019, İnsansız hava araçlarına Türk mevzuatından bir bakış, Journal of Aviation, 3 (1), 61-80.

HAVACILIK ALANINDA DİJİTAL İKİZ UYGULAMALARI

ÖZET

Dijital İkiz, en temel hali ile fiziksel varlık, sanal varlık (dijital ikiz) ve bu iki varlık arasındaki bağlantıdan oluşmaktadır. Bağlantı çift yönlü ve anlık veri iletimi sağlamaktadır. Bu kabiliyet sayesinde fiziksel ürün meydana gelmeden, dijital ürün üzerinden fiziksel ürünün tüm özellik ve davranışları gözlemlenebilmektedir. Bu kabiliyet bize maliyet düşürme, süreci kısaltma ve üretim öncesi hata yapabileme opsiyonu tanımaktadır. Buradan da anlaşılabilir gibi nedeni farketmeksizin üründe yapılacak değişikliklerin (örn. bir hatayı düzeltmek ya da optimizasyon yapmak gibi) sürecin en başı olan tasarım aşamasında yapılabilmesi sonraki süreçlerin daha sağlıklı ilerlemesine olanak sağlayacaktır. Bu nedenle tasarımın da ilk aşamalarında Dİ kullanılarak tüm süreci daha doğru, güvenli, hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde tamamlamak mümkün olabilir.

Bu bilgiler ışığında, bu çalışmada tasarım aşamasında Dİ kullanımına daha detaylı değinilmiş ve bu çalışmanın daha sonra yapılacak tasarım çalışmaları için bir altyapı sağlaması amaçlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada Dİ nedir? Ne için kullanılır? Avantajları nelerdir? Soruları yanıtlanacak olup havacılık alanındaki uygulamaları üzerinden temel işlevleri, sanal alanda modelleme ve modelleme çeşitleri ile veri işlemleri detaylandırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dijital İkiz, Tasarım, Havacılık

ABSTRACT

Digital Twin, in its most basic form, consists of physical entities, virtual entities (digital twin) and the connection between these two entities. The connection provides bi-directional and instantaneous data transmission. This capability gives us the option to reduce costs, shorten the process and make mistakes before production. As can be understood from here, making changes to the product (e.g. fixing a bug or optimizing) at the design stage, which is the very beginning of the process, regardless of the reason, will allow subsequent processes to progress more smoothly. For this reason, it may be possible to complete the entire process more accurately, safely, quickly and cost-effectively by using DT in the early stages of design.

In the light of this information, the use of DT in the design phase is discussed in more detail in this study, and it is aimed to provide an infrastructure for later design studies.

Also in this study, what is DT? What is it used for? What are the advantages? Their questions will be answered, and their basic functions, modeling and modeling types in the virtual field, and data processing through applications in the aviation field are detailed.

Keywords: Digital Twin, Design, Aviation

1.Giriş (Introduction)

“Dijital İkiz” kavramı ilk olarak 1960’li yıllarda NASA’nın Apollo projesi ile hayatımıza dahil olmuştur. Dünya yüzeyinden yaklaşık 200.000 mil uzaklıkta uzay aracının oksijen tankındaki sızıntı ve ana motordaki kritik hasar nedeniyle büyük bir problem ortaya çıkmıştı(Allen, 2021). NASA, bu arızayı anlayabilmek ve değerlendirmek için birden fazla simülatör kullandı ve aracın fiziksel modelini dijital komponentleri içerecek şekilde genişletti(Allen, 2021). Bu simülatörler tek başına dijital bir ikiz değildi

ancak Dİ'e atılmış ilk adımlardı. Çoklu simülasyonlar sayesinde bu kaotik duruma çabuk adapte olunabildi, uyarlamalar yapılabilir ve uzay aracının anlık koşulları ile doğru eşleşmeler yapılabilir böylece araştırmalar yapıp fayda sağlanabilir. Buradan bir ders çıkarılıp uzay görevlerinin maliyetli oluşu ve zorluğu da göz önüne alınarak bu teknolojinin üzerinde daha çok çalışıldığı ve Dİ kavramının geliştirildiğini söylemek mümkün olsa da "Dijital İkiz" olarak adlandırılması, 2003 yılında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) hakkında yapılan sunuma dayandırılabilir (Grieves, 2014).

(BENGÜ & FİDANCAN, 2021)'a göre Dİ'in endüstride sağladığı faydalar fiziksel ve siber dünya arasında köprü işlevini yerine getirerek işletmelerin akıllı üretim ve hassas yönetim ile yönetilmesine imkan sağlar ve gerçek dünyanın aynası olan dijital ikiz, fiziksel üretim sistemlerini ve süreçlerini simülasyon ile tahmin ve optimize etmektedir.

1.1. Dijital İkiz Nedir? (What is Digital Twin?)

En yaygın tanımıyla dijital ikiz, karşılık gelen ikizinin yaşamını birebir yansıtma işlevi gören karmaşık bir ürünün entegre çoklu fizik, çok ölçekli, olasılıksal simülasyonu anlamına gelir (Glaessgen & Stargel, 2012). Dİ en temel şekilde gerçek dünyada var olan bir varlığın dijital dünyada eş zamanlı temsil edilmesi olarak tanımlanabilir. Bu eş zamanlı temsil, bağlantı ile mümkündür. Ağ, fiziksel varlık ve sanal varlığın verilerini iletmek için hayati öneme sahipken bağlantı, gerçek zamanlı verilerin toplanmasına ve ayrıca kontrol komutlarının paylaşılmasına olanak tanır (Segovia & Garcia-Alfaro, 2022). Dİ, fiziksel varlıkları sanal dünyada haritalayabilme yeteneği sayesinde ilgili fiziksel varlıkların tüm yaşam döngüsünü ve sürecini yansıtabilir. Bu teknoloji kullanılarak sanal ürünün yaptığı önerilere göre fiziksel ürün, gerçek zamanlı durumlarda verdiği tepkiler bakımından daha akıllı hale getirilebilir. Sanal ürün ise fiziksel ürünün gerçek dünyadaki durumunu doğru yansıtacak şekilde daha gerçek hale getirilebilir. Dİ; teknoloji, otomotiv, havacılık, inşaat, tarım, madencilik, kamu hizmetleri, sağlık, askeri, doğal kaynaklar ve kamu güvenliği sektörleri dahil olmak üzere birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Attaran & Celik, 2023). Havacılık ve uzay sistemlerine yönelik modelleme ve simülasyon Amerika'dan Asya'ya geniş bir bölgede, farklı zamanlarda Nanjing Havacılık ve Uzay Bilimleri Üniversitesi, Pekin Havacılık ve Uzay Bilimleri Üniversitesi, Hansen Company (ABD) gibi şirketler ve üniversiteler tarafından yapılan araştırma ve iş süreçlerinde kullanılmaktadır. Örneğin, ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı (AFRL), 2008 yılında tüm uçak sistemini simüle etmek ve tüm uçağın enerji verimliliğini artırmak için modeller kullanan, model tabanlı tasarım tekniklerinin geliştirilmesi için bir program başlatmıştır (Glaessgen & Stargel, 2012). Daha önce de belirtildiği gibi dijital İkiz fiziksel ürün, sanal ürün, fiziksel ürün ile sanal ürün arasındaki bağlantı olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Sistemlerin modellenmesi ve simülasyonu dijital ikizinin kurulmasının ve geliştirilmesinin temelini oluşturur. Ürün dijital ikizinin temel işlevlerinden bazıları, fiziksel ürünlerin oluşum sürecini ve gerçek ortam davranışını simüle etmek, izlemek, teşhis etmek, tahmin etmek ve kontrol etmektir.

2. Dİ'in Temel İşlevleri (Main Functions of Digital Twin)

Simülasyon: Bir uçak ele alındığında, sanal ortamın parametre ayarlarını değiştirerek uçağın farklı hizmet ortamlarındaki çalışma şartlarını simüle edebiliriz. Farklı uçuş görevi parametrelerinin görev başarı oranı, uçak sağlığı ve ömrü vb. üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için simülasyonlar kullanılabilir gibi aynı zamanda ürün sağlığını ve hizmet ömrünü iyileştirmek amacıyla farklı arıza, bozulma ve hasar azaltma stratejilerinin etkinliğini simüle etmek ve doğrulamak için de simülasyon kullanılabilir. İzleme ve Teşhis: Ürün, üretim ya da hizmet süreci sırasında üretim/hizmet verileri (en son ürün üretim/kullanım durumu verileri, üretim/kullanım ortamı verileri gibi) ürün dijital ikizine gerçek zamanlı olarak yansıtılır. Böylelikle ürünün dijital ikizi, fiziksel ürün üretim/hizmet takibini, dinamik gerçek zamanlı olacak şekilde görsel izlemesini gerçekleştirebilir ve elde edilen incelemelerin izlenmesi ve geçmişe dayalı

olarak fiziksel arıza teşhisi ve arızaların giderilmesinde kullanılabilir (Wu vd., 2020). Tahmin: Ürünün dijital ikizinin oluşturulması yoluyla; ürün üretim süreci, fonksiyon ve performans test süreci, sanal alanda simüle edilip doğrulanabilir. Böylece potansiyel ürün tasarım kusurları, fonksiyonel kusurlar ve performans kusurları tahmin edilebilir. Bu kusurlar göz önünde bulundurularak, ürünün dijital ikizinde ilgili parametreler değiştirilerek ve ürünün üretim süreci, fonksiyon ve performans test süreci sorun çözülene kadar yeniden simüle edilebilir.

Kontrol: Ürün üretim/hizmet süreci sırasında, ürün kalitesinin ve üretim durumunun kontrolünü gerçekleştirmek için gerçek zamanlı üretim süreci verileri analiz edilir ve gerçek zamanlı hizmet verileri, fiziksel ürünün durum ve davranışının kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla analiz edilerek süreç sağlıklı şekilde sürdürülür.

3. Sanal Alan (Virtual Field)

3.1. Analitik Modeller ve AI (Analytical Models and AI)

Dijital ikizin isim kaynağı olan ikizlerden biri sanal alandır. Sanal kısmın işlevi toplamak, işlemek ve verileri analiz etmektir. Ve sanal kısım modellerden oluşmaktadır. Bu modeller genel olarak ikiye ayrılır bunlar: fizik tabanlı modeller ve veri tabanlı modellerdir. Fizik tabanlı modeller deneysel modeller, çok boyutlu modeller ve yüksek doğruluklu sayısal modelleri içerir. Veri tabanlı modellerde ise genellikle makine öğrenmesi (ML) kullanılır. Bunun nedeni makine öğrenimindeki mevcut tekniklerin, mühendislerin deney ve ön bilgi olmadan daha kısa sürede modelleme yapmasına olanak tanınmasıdır. Bunun aksine deneysel modeller, çok boyutlu modeller ve yüksek doğruluklu sayısal modeller de dahil olmak üzere fizik tabanlı modeller, mühendislerin mesleki ve matematiksel bilgisine ilişkin belirli gereksinimlere ihtiyaç duyar. Ancak her iki modelleme de farklı kullanım amaçları için farklı alanlarda kullanılabilir yani biri diğerinden daha iyidir demek doğru değildir. Yapay zekanın gelişimi bizlere kolaylık sağlayıp Dİ' in otomatikleşmesini, akıllılaşmasını sağlamıştır ve çoğu Dİ bu teknolojiyi kullanmaktadır. Sanal taraftaki çoğu yapay zeka uygulaması, veriye dayalı analitik model oluşturmak için makine öğrenimini kullanır. Bu modeller sınıflandırma, kümeleme ve oluşturma görevlerindeki kanıtlanmış performansları nedeniyle teşhis, üretim ve karar vermede yaygın olarak uygulanmaktadır (Li vd., 2021).

3.2. Fizik tabanlı model (Physics base model)

Fizik tabanlı model yaklaşımı, bir fiziksel olguyu sanalda modellemek için denklemleri kullanarak sayısal bir çözüm yapmayı ve bu çözüm üzerinden gözlem yaparak ilerlemeyi içermektedir. Fizik tabanlı modeller analitik modellerin büyük bir kısmını oluşturur ve çoğunlukla CAD, Catia, ANSYS, Siemens Nx gibi yüksek doğruluklu yazılımlar tarafından yönetilirler. Kullanım örneği olarak bu modeller rastgele senaryolar üretebilir, çatlak tespiti ve kalan kullanım ömrü (RUL) tahmini için uygun senaryoları belirlemek amacıyla ölçülebilir verilerle karşılaştırabilirler (Li vd., 2021). Montaj işleyişi gibi bir süreci simüle etmek için de yine süreç ikizleri olarak adlandırılan Dİ'ler kullanılabilir. Bu süreç ikizleri genellikle makine davranış modeli, malzeme modeli ve süreç simülasyon modeli olmak üzere üç tür model içermektedir. Süreç simülasyon modeli, operatörün izleyebileceği ve kontrol edebileceği süreci simüle etmek için kullanılırken makine davranış modeli, işlemin denetlenmesi ve doğrulanması için kullanılan malzeme modeliyle birlikte çalışarak montaj gibi alanlarda kullanılan robotların ya da üretimde CNC'lerin davranışını temsil etmek için kullanılmaktadır.

3.2.1. Deneysel ve sayısal modelleme (Experimental and numerical modeling)

Fizik tabanlı yaklaşım deneysel ve sayısal modelleme olmak üzere iki bölüme ayrılır. Deneysel Modelleme yaklaşımında mantık bir süreci ya da olguyu anlamaktır. Bu nedenle laboratuvarlarda tam ölçekli, ölçeklendirilmiş, doğrudan ölçülemeyen ya da ölçüm yapıldığında fazla maliyet çıkacak durumları gözlemlemek için deneyler yapılır. Daha sonra Dİ'de kullanılacak korelasyonlar veya modeller geliştirilir. 3B modelleme sayısal modellemeye giden ilk basamaktır. Bu bir nesnenin matematiksel temsilinin geliştirilmesi sürecini içerir. 3B modeller fizik tabanlı modelleme içeren dijital ikizlerde başlangıç noktasıdır. Bu modeller, özel yazılımlar vasıtasıyla denklemler kullanılarak oluşturulabileceği gibi 3B tarama ile de oluşturulabilir. Bunun sonucunda ise yüzeyler ya da eğriler gibi geometrilerle temsil edilirler. Ayrıca 3B modellerin kalitesi fiziksel simülatöre girdi sağladığından Dİ için oldukça önemlidir.

3.2.2. PBM'nin avantaj ve dezavantajları (Advantages and disadvantages of PBM)

Fizik tabanlı modelleme yaklaşımlarının avantajlarından bahsedecek olursak, doğa kanunlarına tabi oldukları için genellikle veriye dayalı modellerden daha az yanılırlar. Fiziksel varlığı temsil etmek için kullanılan matematiksel denklemler izlenebilen ve açıklanabilen fizik ilkelerini takip etmektedir. Bu nedenle oluşabilecek hatalar kolaylıkla tespit edilip optimize edilebilir. Ayrıca fizik tabanlı modeller, aynı fizik tarafından yönetilen görünüşte çok farklı problemlere genelleştirilebilirliklerinin yanı sıra oldukça yorumlanabilir (Rasheed vd., 2020). Ancak bu avantajlara rağmen sınırlamalar ve dezavantajlar da mevcuttur. Örneğin daha önceden de bahsedildiği gibi PBM'lerin etkinliğinin ve tasarımının önceden elde edilen mühendislik deneyim ve bilgilerine bağlı olması bir sınırlayıcıdır. Aynı zamanda bu modellerin sayısal istikrarsızlığa yatkın olmaları, hesaplamaların zorlu olması, modelleme ve girdilerdeki belirsizlikten dolayı büyük hatalara sahip olmaları ve geçmiş verileri özümseyecek mekanizmaların bulunmaması gibi durumlar da dezavantaj yaratmaktadır.

3.2.3. Veri tabanlı model (Data-driven model)

Veri tabanlı model (DDM), verileri analiz etmek ve potansiyel değerini ortaya çıkarmak için istatistikleri ve modern bilgi işlem gücünü kullanma kapasitesini temsil eder (Li vd., 2021). Yani DDM'lerin temeli verilerin değişim potansiyelini anlayarak sistemin davranışını tanımlamaktır. Sensör, veri iletimi ve veri depolama teknolojilerinin gelişmesi, bilgi işleme kapasitesinin artması, makine öğreniminin gelişerek uygulamalarının artması gibi nedenlerle DDM kullanımı son zamanlarda artış göstermektedir. Veri tabanlı modellemede çoğunlukla makine öğrenimi kullanılsa da diğer istatistiksel yaklaşımların da kullanılması mümkündür. DDM'ler, önceden kazanılmış herhangi bir fizik bilgisi olmadan çeşitli verilerden değişkenler arasındaki potansiyel bağlantıları çıkarım yapabildiği için havacılık alanında, mühendislerin sistem dinamiklerini tanımlama konusunda sınırlı yeteneğe sahip olduğu karmaşık çalışma koşulları altındaki uçak motorlarında, teşhis ve kompozit imalatı gibi problemlerin çözümünde kullanılmasına ek olarak üretim hattında da kullanılabilir. Örneğin uçak yüzeylerini boyamak için kullanılan püskürtme robotunun veri tabanlı modellemesi. (Qiu vd., 2019) bunun için detaylı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Veriye dayalı modeller daha fazla veri (deneyim) ile beslendikçe sürekli gelişim göstermeye devam ederler ve bu onların en önemli avantajlarından biridir. Negatif bir özellik olarak veriye dayalı modeller eğitilirken birtakım karar verme sorunları yaşasa da (öğrenme aşamasında) nihai eğitimini bitirdiğinde bunun üstesinden gelir ve karar vermek için kararlı hale gelir.

3.2.4. Makine öğrenmesi (Machine learning)

Makine öğrenmesi (ML), bilgisayar bilimi ve yapay zekanın alt alanlarından biridir ve yüksek performanslı bilgisayar teknolojileri tarafından desteklenen DDM'ler olarak kabul edildiği söylenebilir. Temel de makinelerin dünyayı insanlar gibi düşünebilmesi, tahmin edebilmesi ve anlayabilme kabiliyeti kazanması anlayışına dayanır. Böylece tıpkı insanlar gibi makinelerin de yeni bilgi ve beceriler kazanması, var olan bilgiyi yeniden düzenleyebilmesi beklenmektedir. ML, belirli bir programlama olmadan, verilen verileri kullanarak bilgisayar sistemlerinin öğrenmesini sağlamak için bazı özel algoritmaları kullanan bir alanı tanımlar (Meng vd., 2020). ML, algoritma ve istatistiksel modellerin bilimsel çalışmasıdır ve sadece verilerden öğrenmeye dayalı bir gelişim gösterir. ML'yi öğrenme süreçleri geri bildirimlerine göre şu üç farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür; denetimli öğrenme (bir öğretici ile öğrenme), denetimsiz öğrenme ve takviyeli öğrenme (Monostori, 2003). Sınıflandırmaların her biri farklı bir işlemi üstlenmektedir. Denetimli öğrenme açısından bakacak olursak, temelde sınıflandırma ve regresyon görevlerini gerçekleştirirken denetimsiz öğrenme, genellikle gruplama ve tahmin görevlerinde uygulanmaktadır. Takviyeli öğrenme ise planlama ve otonom karar verme için kullanılır. Örnek uygulamalar görmek için denetimli makine öğrenmesi içeren (Alexopoulos vd., 2020) çalışmasına, denetimsiz öğrenme içeren (Uzun vd., 2019) çalışmasına ve takviyeli öğrenme içeren (Andrade vd., 2021) çalışmasına bakılabilir.

3.2.5. Sensörler (Sensors)

Bilginin kaynağı sensörlerdir ve bunlar donanım ve yazılım sensörleri olarak ele alınabilir (Liu & Mrad, 2014). Süreç izleme ve kontrolünü mümkün kılmak için en yaygın uygulama, sürecin istenilen yerlerinde donanım sensörlerinin kullanılmasıdır (Kadlec vd., 2009). Donanım sensörleri, zorlu çalışma şartlarından dolayı sık servis gerektirmesi, ürün kalitesinin bozulması, ölçümde gecikmeler, erişim gereksinimleri ve yüksek maliyetler gibi birçok nedenden dolayı bazı uygulamalar için uygun değildir. Yukarıda belirtilen nedenlerle bu sensörler kullanıldığı taktirde süreç değişkenlerinin ölçülmesi güçleşir, ölçüm yapılamaz ya da ölçüm gecikmeleri ve süreksizlikler meydana gelebilir. Bu da sürecin hatalı ilerlemesine, gecikmesine, zaman kaybına, sürecin tamamen sonlanmasına ya da hatalı ürün üretimi gibi birçok olumsuzluğa neden olabilmektedir. Bu sorunları çözmek amacıyla, 'ölçülmesi zor' kalite parametrelerini tahmin etmek için süreçlerin matematiksel modellerini kullanılabilmesinin mümkün olup olmadığı düşüncesi üzerine yazılım sensörleri kavramı ortaya çıkmıştır. (Kadlec vd., 2009)'e göre modeller genellikle bilgisayar programları olduğu için "yazılım", modeller donanım benzerleriyle benzer bilgiler sağladığı için "sensör" kelimelerinin birleşimi olan "yazılım sensörü" olarak adlandırılmıştır. Yazılım sensörleri, bir dizi girdi süreci değişkenini bir kalite parametresine eşleyen matematiksel veya ampirik modellere dayanır. Böylece süreç endüstrilerindeki 'ölçülmesi zor' kalite parametreleri, bir dizi ölçümü kolay girdi süreci değişkeni kullanılarak doğru bir şekilde tahmin edilebilir (Perera vd., 2023). Yazılım sensörleri de kendi içinde sınıflandırılmaktadır. Model odaklı ve veri odaklı olmak üzere temelde iki yazılım sensör kategorisi vardır ancak bu çalışmada konuyu sınırlayabilmek adına bu detaya yer verilmemektedir.

4. Dijital İkiz'de Doğruluk (Fidelity of Digital Twin)

Dijital ikiz kavramının ilk çıkış noktası NASA'dır. NASA'nın oldukça geniş çaplı havacılık ve uzay görevleri olduğu düşünüldüğünde dijital ikizin doğruluğunun hem maliyet açısından hem de görev başarısı açısından oldukça önemli olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Dİ'in amacı, performans tahminini ve optimizasyonunu destekleyebilecek gerçekçi sistem davranışı modelini desteklemektir (Glaessgen & Stargel, 2012) ve uçan ikizinin hayatını yansıtmada son derece gerçekçi olmalıdır. Bunu yapmak için, fiziksel bir varlık, sensör teknolojileri kullanılarak sanal bir kopyaya bağlanır ve Dİ ürün yaşam döngüsünün tüm aşamalarından büyük miktarda veri toplar (Gao vd., 2022) tutarlı ve kesintisiz teknik bilgi alışverişini ve alanlar arası birlikte çalışabilirliği gerçekleştirir ve aynı zamanda uçak/uzay aracı operasyon riskini azaltır, operasyonunun güvenliğini ve verimliliğini artırır.

Havacılık endüstrisinin Dİ modelinin inşası şu üç temel teknolojiyi içerir: veri birleştirme teknolojisi, çok boyutlu ve çok ölçekli yüksek doğruluklu modelleme teknolojisi ve yeni bilgi teknolojisi (BT) ile birleştirme. Toplanan verilerin yeni BT ve İnsan-Makine Etkileşimi (HMI) analizi ile birleştirilmesi, çok boyutlu ve çok ölçekli, yüksek doğruluklu modelleme için bir temel oluşturabilir (Xiong & Wang, 2022). Değinenilen HMI, yeni BT, modelleme teknolojileri anahtar teknolojiler olarak adlandırılmakta ve tüm bu süreçte, havacılık endüstrisi Dİ'lerinin daha iyi ve akıllı hizmetler sunmasını sağlamak için birlikte çalışmaktadırlar. Daha iyi anlaşılabilirliği için Şekil 1'de yaşam döngüsü içinde temel teknolojiler arasındaki ilişki verilmiştir.



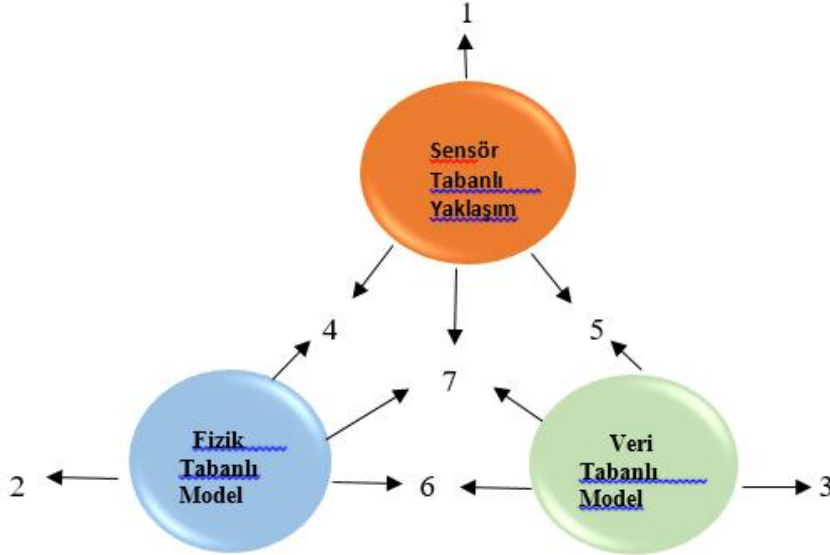
Şekil 1: Yaşam döngüsü içinde temel teknolojiler arasındaki ilişki (relationship between key technologies in the life cycle) (Xiong & Wang, 2022)

Havacılık endüstrisindeki Dİ verileri çok kaynaklı ve heterojen olma özelliğine sahiptir. Bu nedenle veri kalitesinin sağlanması, veri belirsizliğinin azaltılması, veri standartlarının birleştirilmesi, veri kullanılabilirliğinin iyileştirilmesi ve Dİ'in bilgi yönetimi yeteneğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Büyük veri, makine öğrenimi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak veri birleştirmenin verimliliği ve uygulama etkisi artırılmaktadır.

4.1. Veri Birleştirme Nedir? (What is Data Fusion?)

Veri birleştirme, birden fazla kaynaktan gelen veri ve bilgilerin otomatik tespiti, ilişkilendirilmesi, korelasyonu, tahmini ve kombinasyonu ile ilgilenen çok düzeyli, çok yönlü bir süreçtir (Liu & Mrad, 2014). (Liu & Mrad, 2014) referans alındığında birleştirme; sensör seviyesi, özellik seviyesi ve karar seviyesi olmak üzere üç seviyede uygulanabilir. Birleştirme işlemi; en düşük (sensör) seviyede, sinyalleri doğrulamak ve özellikler oluşturmak için birden fazla sensörden gelen bilgileri birleştirir. Daha yüksek bir seviyede, birleştirme işlemi tanı bilgilerini elde etmek için türetilmiş özellikleri birleştirirken en üst

düzeyde, karar verme sürecini kolaylaştırmak için deneyime dayalı bilgileri veya fiziksel model tahminlerini sinyale dayalı bilgilerle birleştirmektedir. Veri birleştirmenin avantajları aşağıda maddelenmiş ve Şekil 2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2: Dİ'de veri birleştirme işlemleri (data fusion operations in DT) (Liu vd., 2018)

1. Birleştirme işlemlerinin avantajları (Advantages of data fusion operations);

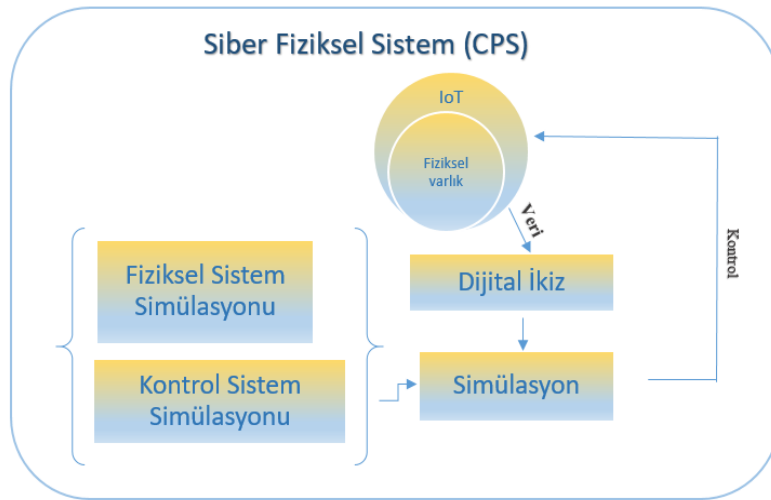
1. Sensörlerden gelen çoklu sensör verileri, özellikleri ve bilgileri birleştirilerek daha iyi bir sinyal kalitesi elde edilir.
2. Birden fazla fizik tabanlı modeli birleştirilerek model performansı iyileştirilir.
3. Birden fazla veri tabanlı model birleştirilerek model performansı iyileştirilir.
4. Sensör bilgileri fizik tabanlı modellerle birleştirilerek uyarlanabilir bir fiziksel model oluşturulur.
5. Sensör ve veri tabanlı model birleştirilerek, veriye dayalı modelin daha etkin ve kararlı çalışması sağlanır.
6. Fizik tabanlı model ve veri tabanlı model birleştirilerek tahminler geliştirilir hibrit model olarak çalışmalar yapılmaktadır,(J. Wang vd., 2022) çalışmasına bakılabilir.
7. Fizik tabanlı modeller ile veri tabanlı modellerin ve sensörlerin entegrasyonu daha güvenilir doğru kararlar alınabilmesini sağlar.

Sonuç olarak tüm bunlar havacılıkta istenen yüksek doğruluğun edinilebilmesine olanak tanımaktadır.

4.2.Dijital İkiz, CPS, Simülasyon ve IoT (Digital Twin, CPS, Simulation and IoT)

Dijital ikiz teknolojisinde derinleşmek ve daha iyi anlayabilmek için öncelikle dijital ikiz teknolojisine ilişkin temel kavramların belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada dijital ikiz, simülasyon, siber-fiziksel sistemler (CPS), Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi kavramlar arasındaki ilişki uçağın dijital ikizi temel alınarak tanımlanmaktadır. Dijital ikiz, bilgi alanındaki fiziksel varlığın ve aynı fiziksel varlığın varlığının kesin bir şekilde haritalandırılmasıdır ve fiziksel varlığın durumunun değişmesine göre gerçek zamanlı olarak değişir. Simülasyon, bir model oluşturmak ve fiziksel varlığın durumunu önceden simüle etmek ve fiziksel varlığın olası durum değişimini, tepkilerini analiz etmek için mevcut varlığı temel almaktadır. Bu bilgiler ışığında Dijital İkiz ve simülasyon arasında fark olduğu net bir şekilde anlaşılmaktadır.

IoT, verinin aktarılabileceği fiziksel varlıklar arasındaki bağlantıya dayanmaktadır. Bağlantılar, bilgisayar ağlarının ve iletişim protokollerinin uygulanmasıyla mümkün olmaktadır. Bu iletişim tipik ağ protokollerine veya özel protokollere dayanır. CPS, fiziksel varlıklar arasında bilgi aktarımına, bilgiden bilginin çıkarılmasına ve kontrol komutlarının elde edilmesi ve bu kontrol komutlarının fiziksel varlıklar üzerinde yeniden harekete geçirilmesi için bilgi analizi ve işlenmesinin sonuçlarına dayanmaktadır. Dolayısıyla IoT, CPS'nin uygulanması için altyapı olarak görülebilir. Dijital ikiz modeli oluşturmak, fiziksel varlığa dayalı bir avatar gibi sanal beden oluşturmak anlamına gelir. Dijital ikiz, fiziksel varlıkla tam uyum sağlayana kadar, fiziksel varlığın şekline ve durumuna yaklaşma sürecinden geçer. Bu kısım modelin simülasyonunu ve fiziksel varlığını kontrol etmek için denetleyiciyi kullanan, fiziksel varlığın çalışma durumunu optimize eden ve otonom karar verme yoluyla dijital ikizin simülasyon ve tahmin sonuçlarına dayanan CPS'deki bilgi sistemine karşılık gelmektedir. Verilen bilgilerin yani CPS, IoT ve Dijital İkiz arasındaki bağlantının daha net anlaşılması için aşağıdaki Şekil 3'e bakılabilir.



Şekil 3 : CPS, Simülasyon, IoT ve Dijital İkiz arasındaki ilişki (relationship between CPS, simulation, IoT and digital twin) (L. Wang, 2020)

Yukarıdaki diyagramdan görülebileceği üzere CPS üç bölümden oluşur: dijital ikiz, simülasyon ve IoT.

1. IoT, temel olarak uçağın fiziksel varlığını ve fiziksel varlık ile dijital ikiz arasındaki iletişimi içerir.
2. Dijital ikiz, fiziksel varlığa dayalı olarak inşa edilir. Dijital ikiz, fiziksel varlığa karşılık gelen yüksek hassasiyetli bir simülasyon modeline sahip olmalıdır.
3. Simülasyon kısmı dijital ikizin simülasyon tahminine dayanmaktadır.

Dijital ikiz, simülasyon ve IoT'nin birleşimi bir CPS sistemi oluşturmaktadır. Dijital ikiz ve simülasyon, CPS'nin bilgi kısmına karşılık gelirken IoT, CPS'nin fiziksel ve iletişim kısımlarına karşılık gelmektedir. Ayrıca siber-fiziksel sistemlerin günümüzün otonom olma, işlevsellik, kullanılabilirlik, güvenilirlik ve siber güvenlik seviyelerini çok aşan yeni yeteneklere sahip gelecekteki mühendislik sistemlerinin tasarımında ve geliştirilmesinde önemli bir rol oynaması beklenmektedir (Baheti & Gill, 2011).

5. Dijital İkiz Oluşturma Süreci (Creation Process of Digital Twin)

Mevcut bir fiziksel ürün göz önüne alındığında, tamamen işlevsel bir dijital ikiz oluşturmak genel olarak altı adım alır. Sıralanan bu adımların pratikte eş zamanlı gerçekleştirilebileceği unutulmamalıdır.

Sanal Temsil Oluşturma (Creating a Virtual Representation)

Dijital ikiz, fiziksel ürün hakkındaki bilgileri ve onun gerçek dünyadaki davranışını mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılan 3 boyutlu dijital temsil ile birleştirmenin bir şekli olarak kullanılmaktadır. Bu adımda kullanılan teknolojiler bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve 3D modellemedir. Her ikisi de ürün tasarımında yaygın olarak kullanılan teknolojilerdir. Sanal ürün üç unsuru içerir: öğeler, davranışlar ve kurallar (Tao, Chenget ark. 2017).

Tasarımla İlgili Karar Almayı Kolaylaştırmak için Veri İşleme (Data Processing to Facilitate Design Decision Making)

Farklı kaynaklardan (yani esas olarak fiziksel üründen ve ayrıca internetten) toplanan veriler analiz edilir, entegre edilir ve görselleştirilir. İlk olarak veri analitiği, verileri tasarımcıların karar verme amacıyla doğrudan sorgulayabileceği daha somut bilgilere dönüştürmek için gereklidir. İkinci olarak, ürün verileri farklı kaynaklardan toplandığı için veri entegrasyonu ile tek bir bileşik görünüm sağlanır. Üçüncüsü, verileri daha açık bir şekilde sunmak için veri görselleştirme teknolojileri dahil edilir. Son olarak, bir Dİ'in bilişsel yeteneğini (örn. akıl yürütme, problem çözme ve bilgi temsili) geliştirmek için gelişmiş yapay zeka teknikleri dahil edilebilir, bu sayede bazı basit öneriler otomatik olarak yapılabilir.

Davranışların Simülasyonu (Simulation of Behaviors)

Ürün tasarımında simülasyon teknolojilerinin yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. Bu adımda da simülasyon ve sanal gerçeklik (VR) teknolojileri kullanılmaktadır. Simülasyon, fiziksel ürünün sanal dünyadaki temel işlevlerini ve davranışlarını simüle etmek için kullanılır. Öte yandan sanal gerçeklik (VR) teknolojileri, tasarımcılara ve kullanıcılara simüle edilmiş ortamda sanal ürünle doğrudan etkileşime girme imkanı sağlamaktadır.

Fiziksel Ürüne Komut Verme (Commanding the Physical Product)

Dİ'in önerilerine dayanarak fiziksel ürün, çeşitli aktüatörler aracılığıyla fiziksel dünyadaki işlevini, davranışını ve yapısını uyarlanabilir şekilde ayarlama yeteneğiyle donatılmıştır. Sensörler ve aktüatörlerin dijital ikizin iki teknolojik omurgası olduğu söylenebilir. Sensörler, dış dünyayı algılamayı sağlarken, aktüatörler Dİ tarafından talep edilen ayarlamaların gerçekleştirilmesini sağlar. Ayrıca sanal ürünün bazı bölümlerinin tekrar fiziksel dünyaya yansıtılması için artırılmış gerçeklik (AR) teknolojileri de kullanılabilir. Örneğin AR, son kullanıcıların ürünlerin gerçek zamanlı durumunu görmesine olanak sağlamaktadır.

Sanal Ürün ile Bağlantı Kurma (Connecting with the Virtual Product)

Bir ikizin var olduğunu söyleyebilmek için sanal taraf ile fiziksel taraf arasında bağlantının olması şarttır. Bağlantılar ağ iletişimi, bulut bilişim ve ağ güvenliği gibi bir dizi teknoloji kullanılarak sağlanır. Ağ teknolojileri, fiziksel ürünün sanal ürüne güç sağlamak için devam eden verileri buluta göndermesine olanak tanır (Tao vd., 2019). Tüketici ürünleri için uygun ağ teknolojileri arasında Bluetooth, QR kodu, barkod, Wi-Fi, vb. yer alır. Bulut bilişim, sanal ürünün tamamen bulutta geliştirilmesine, konuşlandırılmasına ve bakımının yapılmasına olanak tanır. Bu tasarımcıların ve kullanıcıların internet erişimi olan her yerden rahatlıkla erişebilmelerine olanak tanır. Son olarak, ürün verileri doğrudan ve dolaylı olarak kullanıcı-ürün etkileşimleriyle ilgili olduğundan bağlantıların güvenliğinin garanti edilmesi kritik öneme sahiptir.

Veri Toplama (Collecting Data)

Dİ tarafından işlenmesi gereken ürünle ilgili çeşitli veri tipleri vardır. Fiziksel ürün verileri genellikle çevresel veriler, kullanıcı verileri ve etkileşimli veriler şeklinde bölünür (Tao vd., 2019). Ürün verileri kullanıcı geri dönütlerini içerir. İnteraktif veriler, stres, titreşim vb. gibi kullanıcı-ürün-çevre etkileşiminden oluşur. Sensör teknolojisi ve IoT teknolojisi kullanılarak yukarıdaki verilerden bazıları gerçek zamanlı olarak toplanabilir ve analiz edilebilir. Toplanan veriler, daha işlevsel sanal ürün oluşturmaya yönelik döngüyü besler ve döngünün başlangıcına dönlür.

6.Neden Dİ kullanıyoruz? (Why Do We Use DT?)

Bizi dijital ikiz kullanımına sevk eden birçok karmaşık sorun ve problem vardır Dİ kullanımının amacı ise bu sorunlara çözüm bulmaktır.

- Modern uçakların komponent sayıları ve teknolojideki ilerleme ile birlikte karmaşıklığın giderek artması ile hata oranları artabilir. Güvenliğin üst düzey olması gereken havacılık alanında bu kabul edilebilir bir şey değildir ve Dİ, gerek tasarım gerek onarım gerekse malzeme ömrü ve sağlığının önceden saptanabilmesi amacıyla kullanılarak katastروفik kazaların önüne geçilebilir.
- Uçak tasarım aşamasında tüm karmaşık adımlardan ayrı ayrı veriler toplanarak dijital ortamda birleştirilmesi ve dijital ortamda tasarım gerekliliklerinin karşılanıp karşılanmadığının doğrulanmasının hızlı ve düşük maliyetli bir şekilde yapılabilir.
- Bir uçak daima dinamiktir ve bileşenlerin durumu da zaman içinde hızla değişmektedir. Buna örnek olarak, uçak uçuş ortamının belirsizliği ve bu son derece belirsiz ortamda karmaşık sistemlerin kazara hasar görme olasılığının artması, bunun da uçağı hasara karşı savunmasız hale getirmesi verilebilir. Bu ortamda Dİ sayesinde anlık veri aktarımı ile olaya müdahale edilebilir ya da öngörülerde bulunulabilir böylelikle güvenlik artırılmış olur.
- Bir başka husus da bu kadar karmaşık bir sistemle karşı karşıya kaldığınızda periyodik bakım ve sistemin mevcut durumuna ilişkin doğru bir tahmin eksikliği söz konusu olmasıdır. Çok sık muayene ve bakım yapılması veya zamansız bakım nedeniyle sistemin erken arızalanabilmesi de bir diğer sorundur. Bu da yüksek bakım maliyetlerine ve uçağın yetersiz güvenilirliğine neden olmaktadır.

Bunlar ve daha birçok sorunun çözümünde, iyileştirmelerde, uçak tasarımı ve geliştirilmesinde, uçak üretimi, uçak işletme ve bakımı alanlarına yönelik dijital ikizin kullanımının araştırılması ve uygulanması giderek artmaktadır. Daha önce dijital ikizin üç bileşenden (fiziksel varlık, sanal varlık, fiziksel varlık ile sanal varlık arasındaki iletişim) oluştuğundan bahsetmiştik ve Şekil 4'te de bunun uçak üzerinde temsili gösterilmiştir. Dijital ikiz, fiziksel varlıkta bulunan sensörlerden toplanan verilerle sürekli olarak değiştirilir ve Dİ , fiziksel varlığı kontrol eder. Bu, uçağın tasarımdan bakıma kadar tüm yaşam döngüsünün simülasyonuna olanak tanır.



Şekil 4 : Bir uçak için dijital ikiz sistemi (digital twin system for an aircraft) (L. Wang, 2020)

Tasarım geliştirme açısından dijital bir ortamın kurulması yani dijital ikizin kullanılmasının avantajları göz ardı edilemez ve bu teknoloji tasarımın erken aşamalarında doğruluğa, kalite tahminine ve hataların erken tanımlanmasına olanak tanır. Üründe kolayca optimizasyon yapmayı sağlar ve en önemlisi bunu yaparken klasik yöntemlere göre maliyeti ve harcanan süreyi oldukça düşürür. Üretimde dijital ikizin kullanılması, üretim sürecini ve planlama şemasını optimize eder. Planlama kararlarının ve kaynakların tahsisinin daha rasyonel bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Sistem işletimi ve bakımı açısından,

dijital ikiz teknolojisinin geliştirilmesi, yalnızca ürünün çalışma durumunu gerçek zamanlı olarak izlemekle kalmaz, aynı zamanda toplanan verilere dayanarak ürünün gelecekteki çalışma durumunu ve olası hatalarını da tahmin edebilir. Bakım programını optimize eder, revizyon sayısını azaltır ve ürün operasyonunun güvenilirliğini artırır.

Görüldüğü üzere dijital ikizin uçaklar üzerinde de kullanıldığı farklı aşamalar ve alanlar vardır. Tasarımda Dİ kullanımının büyük artıları mevcuttur örneğin bir ürünün dijital ikizi tasarım aşamasından itibaren oluşturulabilirse daha fazla ilgili tasarım verisi, pazarlama verisi, kullanıcı deneyimi verisi vb. dijital ikize entegre edilebilir ve bu da daha iyi sonuçlar elde edilmesini, üretim aşamasında ve ürün sonrası aşamada da daha kaliteli hizmet verilmesini sağlar. Bu kısımda dijital ikiz odaklı ürün tasarımı (DTPD) için bir referans sistem sağlamaya çalışacağız.

Dijital ikizin bölümlerinden biri olan fiziksel varlıklar, kullanıcılar tarafından çalıştırılabilen gerçek yani fiziksel olarak var olan ürünlerdir. Hammadde veya parçalardan talaşlı imalat, montaj ve diğer işlemler yoluyla üretilirler. Fiziksel varlıklar; üretim, kullanım, Bakım Onarım ve Revizyon (MRO) ve diğer işlemler sırasında farklı özellik, davranış ve performans gösterirler ve bu aşamalarda birçok veri üretilir.

Sanal modeller, fiziksel ürünlerin sanal alandaki ayna görüntüleri ve birebir eşlemeleridir. Tüm yaşam döngüsü sürecini yansıtabilmenin yanı sıra ilgili fiziksel varlıkların durumunu ve davranışlarını simüle edebilir, izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kontrol edebilirler. Sanal modeller yalnızca geometrik modelleri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, mekanik analiz, sağlık durumu izleme gibi davranışları da içerirler.

Tasarım ve üretim sürecinde sanal modellerin parametreleri üretim hattına aktarılır ve sanal modeller işlenerek gerçek fiziksel ürünlere dönüştürülür. Dijital tespit veya ölçüm yoluyla ürün özellikleri, çalışma durumu ve diğer veriler sanal modellere geri beslenerek iki yönlü bir veri aktarım süreci sağlanır. Dijital ikiz, ürün modellerinin sanal alanda oluşturulmasının yanı sıra dijital modellerin fiziksel alana geri bildirimini sağlayarak kapalı döngülü bir süreç gerçekleştirir. Bu teknoloji sayesinde, veriler sürekli olarak toplanıp biriktirebilir ve tasarım, imalat, kalite kontrol, MRO gibi tüm süreç hakkında bilgi edinilebilir. Bu veriler ve bilgiler yeniden kullanılmaya ve geliştirilmeye devam edilebilir. Sonuç olarak, dijital ikiz, tüm ürün yaşam döngüsü verilerini dinamik olarak algılayarak, depolayarak ve sunarak ürünün yönetimini, takibini ve tutarlılığının korunmasını sağlayabilir.

Dİ'ler, orijinal CAD/CAE/CAM araçlarıyla işbirliği yapmak veya bunların yerini almak üzere tasarım, üretim süreci ve montajda yaygın olarak uygulanmaktadır(Li vd., 2021). Kısaca toparlamak gerekirse ürünlerin bir temsili olan sanal prototiplemede kullanılan geleneksel CAD modelinin aksine dijital ikiz, gerçek dünyada zaten mevcut olan bir fiziksel ürünün bire bir temsidir. 3D CAD modeli, tasarım süreci sırasında oldukça değerlidir ancak ürün üretim alanından çıktığında kullanışlılığını yitirir. Bunun aksine bir ürünün dijital ikizi, ürünün sahada nasıl davrandığına dair bilgi sağlayabilir, ürün tasarımını yönlendirmeye yardımcı olabilir ve başarılı ürün servis etmek için bilgi sağlayabilir.

7.Dijital İkiz Odaklı Ürün Tasarımının Yapısı (Structure of Digital Twin Focused Product Design)

Dijital ikiz bir kere başarılı bir şekilde oluşturulduktan sonra tasarımcıların farklı tasarım faaliyetlerini gerçekleştirmesine altyapı sağlayabilir. CIRP'nin (Nee and Ong 2013) tasarım teorisi ve metodoloji (DTM) sınıflandırmasına göre DTM, yeni çözümler üretme, tasarım çözümlerinin işlevsel bilgilerini zenginleştirme ve tasarım bilgisini temsil etme rollerini oynar. Yaratıcılığa, kombinasyona ve modifikasyona dayalı olarak yeni çözümler üretilir (Tomiyama vd., 2009).

Dİ'in en çok kombinasyon tabanlı tasarımda faydalı olması beklenmektedir. En sık kullanılan kombinasyona dayalı DTM, Pahl ve Beitz (Tao vd., 2019) tarafından önerilen ve tasarım sürecini dört aşamaya ayıran sistemik tasarım yaklaşımıdır. Bunlar; görevin saptanması, kavramsal tasarım, cisimleştirme tasarımı ve detay tasarımıdır. Her aşama ayrıca birden fazla alt aşamaya bölünebilir. DTPD,

sanal bir model oluşturmak için verilerden tam olarak yararlanma yeteneğini tanımladığından, tasarım sürecinin son aşaması olarak sanal doğrulama adı verilen özel bir tasarım aşamasının uygulanması önerilmektedir. Fazlar Şekil 5'te gösterilmiştir. Önerilen DTPD yapısı ilgili tasarım teorisini ve metodolojisini (DTM), veri yaşam döngüsü yönetimini(DLM) ve dijital ikizi(Dİ) bütünleştirir. DTPD mevcut DTM'lere dayalı olarak gelişir. Tasarım sürecini yapılandırmak ve çeşitli tasarım faaliyetleri için farklı türdeki verilerin nerede, nasıl ve ne şekilde kullanılacağına karar vermek için dahil edilirler. Ayrıca DTM'ler, tasarım faktörleri arasındaki ilişkiyi koordine etmeye yardımcı olan çeşitli tasarım aşamalarını açıklar. Tasarım süreci giderek dijital hale gelir. DTPD, çok büyük miktarlardaki tarihsel ve gerçek zamanlı verilere bağlıdır. DLM, ürünün yaşam döngüsü boyunca verilerle ilgilenir. DLM, fiziksel dünyadan geçmişten verileri toplayabilir, aktarabilir ve saklayabilir. Ayrıca, farklı veri türlerinin iletişimini ve etkileşimini teşvik eden verileri entegre edip işleyerek DTPD'yi teşvik eder. Ek olarak verilerin doğruluğundan emin olmayı sağlar. Aşağıda verilen Şekil 5 DTM,DT ve DLM ilişkisi göstermektedir.



Şekil 5: DT, DTP ve DLM bağıntısı (DT, DTP and DLM relation) (Tao vd., 2019)(Tao vd., 2019)

8.Ürün Yaşam Döngülerinde Dİ (DT in Product Life Cycles)

Dijital ikiz farklı alanlarda kullanılabilir ve bu çalışmada daha önce de belirtildiği gibi havacılık alanı ele alınmaktadır. Peki dijital ikiz hangi aşamalarda ve hangi amaçla kullanıyoruz? Dijital ikiz; maliyet düşürme, ürünün bakım zamanını öngörme, optimizasyon, malzemenin kullanılabilirliğini belirleme vb. gibi birçok nedenle her bir ürün yaşam döngüsü aşamasında farklı amaçlarla kullanılabilir. Ürünün dijital ikizi, tüm ürün yaşam döngüsünün veri merkezidir. Konsept tasarımdan hurdaya/geri dönüşüme kadar ürünün tüm model ve verilerini kayıt altına alır. Ürünün tüm yaşam döngüsündeki çeşitli aşamalarını yansıtan, fiziksel ürünün tüm yaşam döngüsündeki dijital arşividir. Daha iyi anlayabilmek adına öncelikle temel ürün yaşam döngüsü aşamaları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

1. Tasarım
2. Üretim
3. Kullanım
4. Ürün ömrünün tamamlanması/hurda

Dİ ikiz ile sonraki çalışmalarda tasarım yapacağımızdan dolayı tasarım adımına yoğunlaşmıştır.

Ürün Tasarımında Üretim Öncesi Dijital İkiz (Pre-production Digital Twin in Product Design)

A.Kavramsal tasarım (Concept design): Tasarım aşamasının ilk adımıdır ve oldukça önemlidir. İyi bir tasarım için tasarımcının tüm gereklilikleri doğru belirlemesi gerekmektedir. Örneğin müşteriden gelen bilgiyi, ürün pazarından gelen bilgiyi ve üretimden gelen bilgiyi iyi incelemesi ve dikkate alması, buna göre gereksinim belirlemesi sağlıklı bir başlangıç için önemlidir. Tasarım sürecinin sürekli olduğu düşünüldüğünde, ürün yaşam ömrünün ortalarına gelindiğinde toplanan veriler ve bilgiler yani müşteri geri bildirim ve ürün performansı, tasarımcıya yeni, efektif bir tasarım konsepti oluşturma konusunda yol gösterebilir. Buradan yola çıkarak (Hribernik vd., 2013) tasarımı geliştirmek için ürün Orta Ömür (OÖ) bilgisini temsil eden dijital ürün avatarlarının kullanılmasına yönelik bir konsept ortaya sunmaktadır. Aynı zamanda Dİ, tasarımın sanallaştırılmasını artırmak için kullanılır, bu sayede gerçek ürüne gerek duyulmadan tasarım hızlı bir şekilde sürdürülebilir. Ma ve ark. (2019), ürün yaşam

döngüsünde Dİ ile geliştirilmiş bir insan-makine etkileşimi yapısı önermektedir. Bu araştırmadan kavramsal tasarım aşamasında tasarımcı ve ürün arasındaki etkileşimin olduğu gözlemlenmektedir. Ek olarak simüle edilmiş dijital dünyada tasarımcılar AR/VR teknolojileriyle sanal modeli görebilir, dokunabilir veya kullanabilir (Lo vd., 2021).

B.Detay tasarım (Detail design): Ürün performansı, malzeme özellikleri, üretim süreci vb. bu aşamada dahil edilir ve belirlenir. Ürün fonksiyon tasarımı ve malzeme seçimi için Gusev ve ark. sistem, fonksiyon ve yapı seviyelerinde parametre seçimini simüle etmek ve optimize etmek için PLM'den alınan verilere dayanarak, Dİ kullanarak optimizasyon yaklaşımını İnsansız Hava Aracı (İHA) özelinde sunmaktadır (Lo vd., 2021). Başka bir çalışmada yine tasarım özelinde en uygun malzemeyi seçebilmek amacıyla, kullanılması düşünülen malzemelerin özelliklerini simüle edip optimize edebilen ve tahmin edilen özellikleri beklenen özelliklerle yinelemeli olarak karşılaştıran Dİ odaklı bir yaklaşım kullanıma sunulmaktadır (Xiang vd., 2019).

C.Tasarım doğrulaması (Design verification): Tasarımcı tasarladığı ürünlerdeki hataları, arızaları fark etmek ve bunları gidermek durumundadır. Bu nedenle bu aşamada tasarım doğrulama, test ve sanal bir prototip oluşturma gibi ürün tasarımında Dİ'nin kullanılmasına odaklanılmaktadır. Yani Dİ, ürün tasarım aşamasında süreç zincirinin doğruluğu ve şekil değişikliklerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Zamandan tasarruf etmek amacıyla zaman alıcı doğrulama süreçlerinin yerine simülasyon, sanal alanda başlatılmakta ve yürütülmektedir. (Patrikeev vd., t.y.) çalışmalarında, tasarım doğrulamasında zamandan ve maliyetten tasarruf etmek amacıyla gerçek testlerin sayısını azaltmak için bir dizi simülasyon (statik sertlik ve dinamik sertlik) gerçekleştirilerek SUV'un Dİ'nin kullanımını göstermektedir.

D.Yeniden tasarlama (redesign): Bu aşamada Dİ, eksikliklerin giderilmesi ya da tasarımın geliştirilmesi ve ürünün iyileştirilmesine yardımcı olmak amacıyla kullanılır. (Tao vd., 2019) mevcut ürünün yeniden tasarım sürecini optimize etmek için Dİ odaklı bir ürün tasarım yapısı önermektedir. Bu çerçevede sanal alan, fiziksel alandan verileri sürekli olarak toplar, analiz eder ve biriktirir. Bu veriler, süreçlerin iyileştirilebilmesi için ürünlerin tasarlanması veya yeniden tasarlanması için uygulanabilir (Lo vd., 2021). Dİ, tek tek bileşenlerin üretiminden komple montaja kadar tüm üretim sisteminin simülasyonunu, optimizasyonunu ve ayrıntılı görselleştirilmesini sağlar. Üretim planlama ve kontrol, bakım, yerleşim planlaması, lojistik ve ürün yaşam döngüsü konularına odaklanır.

E.Üretim Sonrası Dijital İkiz (Post-Production Digital Twin)

Üretim sonrasında Dİ, üretim aşamasını geçmiş sistemler için, malzemenin nitelik ve nicelik şartnamesini (BOM), kalite verilerini, teknik durum verilerini, lojistik verileri, denetim verilerini, ürün kullanım verilerini, bakım verilerini, ürün kullanım süreci izleme verilerini, ürün sağlığı tahmini ve analiz verilerini, üretim ilerleme verilerini ve ürün hurda verileri, ürün geri dönüşüm verileri de dahil olmak üzere tüm bu verileri kullanarak ekiplerin olası senaryolar altında gelişmiş sanal sistem dinamiklerin değerlendirilmesine, tasarım hassasiyetlerinin tespit edilmesine, optimizasyon sağlanmasına ve test hatalarının çözülmesine yardımcı olur. Ekipler gerçekçi ve beklenmedik olayları Dİ yardımıyla simüle ederek, çalışabilirliği iyileştirebilir ve etkileşimli, gerçekçi ortamlarda yüksek kaliteli yenilikler sağlayabilir.

F.Hizmet İçi Sistem İkizleri (In-Service System Twins)

Sürdürülebilir ikiz, hizmette olan sistemlerin tahmine dayalı analitiğini ve bakımını yönetir. Ekipler, sistem performansını optimize etmek, ideal bakım rutinleri belirlemek, anormallik tespitine dayalı öngörülerde bulunmak ve daha fazlasını gerçekleştirmek için sensörler vasıtasıyla gerçek zamanlı veri akışı analitiğinden ve makine öğreniminden yararlanabilir. Bu yetenek, sistem durumu hakkında hızlı ve gerçek zamanlı bilgiler sunarak kuruluşların sistem ömrünü en üst düzeye çıkarmak ve arızaları önlemek için en uygun operasyonel ayarlamaları yapabilmelerine yardımcı olur. Örneğin operasyondaki bir uçakta hasar tespiti için, (Seshadri & Krishnamurthy, 2017) uçak yapısal sağlık yönetimi için dijital ikize dayalı bir hasar karakterizasyon yöntemi önerir; bu yöntem, hasarın konumu, boyutu ve yönünü tahmin etmede büyük başarı göstermektedir.

9. Dijital İkiz'in Avantajları (Advantages of Digital Twin)

Tüm rapor boyunca dijital ikiz incelenirken aynı zamanda Dİ'in avantajlarına dair de fikirler sunuldu burada kısaca toparlayacak olursak havacılık alanı için düşünüldüğünde;

- Uçan bir aracın sanal bir örneği olan Dijital İkiz'in, uçan fiziki ikizinin deneyimlediği her olayı aynı şekilde deneyimleyebilmesi,
- Belirli bir fiziksel aracın yaşamını, durumunu yansıtmaya yeteneği nedeniyle dijital ikiz, sertifikasyon, filo yönetimi ve sürdürülebilirlik gibi alanlarda kullanılması,
- Araç görevdeyken dijital ikiz, bozulmaları ve anormal olayları sürekli olarak izleme ve azaltma yeteneği nedeniyle uçan aracın güvenilirliğini artırması,
- Bir aracın uçuşu sırasında meydana gelebilecek olası değişikliklerin sonuçlarına ilişkin doğru kararlar alınmasına olanak tanınması,
- Fiziksel ürün üretilmeden önce sanal ortamda hesaplamalarının, testlerinin vb. yapılarak üretimde, tasarımda ya da herhangi bir adımda yapılacak hatadan dolayı maliyeti azaltmaya imkan sağlaması,
- Dijital ikizlerin, veri analitiği, makine öğrenimi ve yapay zeka gibi ek yazılım tabanlı yeteneklerin sunulmasıyla, IoT ortamından maksimum verimlilik için yararlanılmasının önü açması ve böylelikle tasarım ekiplerine herhangi bir fiziksel çıktıdan önce yapılandırılmalarda ince ayarlar yapabilmelerine olanak sağlaması, başlıca sayabileceğimiz avantajlarındanıdır.

SONUÇ

Dijital ikiz, fiziksel olarak var olan varlığın sanal alanda birebir temsilidir. İki varlığın arasındaki bağlantı gerçek zamanlı bilgi aktarımını içermektedir. Bu gerçek zamanlı bilgi aktarımının, dijital ikizi simülasyondan ayıran en temel özellik olduğu söylenebilir. Simülasyonlar fiziksel ürün üretilene kadar ürün davranışını tahmin etmek için ürünü simüle etmeye yararlar ancak fiziksel ürün var olduğu anda işlevselliğini yitirirler bu noktada Dİ fiziksel varlık ile bağını koparmadan gerçek zamanlı olarak fiziksel ürünün şartlarını dijital ikize ileterek aynı şartları deneyimlemesini sağlamaktadır.

Dİ'in kabiliyetleri yalnızca bununla sınırlı değildir, kullanım amacına göre değişen tasarım aşamasından ürün ömrünün tamamlandığı aşamaya kadar izleme, teşhis etme, tahmin ve kontrol gibi amaçlarla geniş bir alanda kullanımı mevcuttur. Dİ geliştirme çalışmaları hala devam etse de günümüzde tasarım alanında kullanımı henüz yaygınlaşmamıştır. Oysa Dİ'in tasarım aşamasından itibaren kullanılması ile bir ürün üretim hattına girmeden tüm yaşam döngüleri sanal alanda deneyimlenebilir erken fazda hatalar düzeltilebilir ya da iyileştirmeler yapılabilir. Bu da üretici için maliyetin ciddi anlamda düşmesine, tasarımcı için daha rahat bir çalışma alanı oluşturulmasına, müşteri için istediği revizyon ya da ek isteklere daha çabuk geri bildirim verilmesine olanak tanımaktadır. Dİ yaşam döngüsünün ne kadar erken aşamasında olaya dahil edilebilirse o kadar verim artışı gözlemlenebilir (Örn. tasarım aşaması). Ki yüksek maliyetli ürün çıktısı olan ve güvenliğin gereklilikler listesinde birinci sırada olduğu havacılık alanında Dİ kullanımı tasarım hattından ürünün hurdaya çıktığı son evreye kadar sürece entegre edilebilirse maliyet ve güvenlik alanında büyük bir atılım yapılacağı öngörülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada Dİ odaklı ürün tasarımı detaylandırılmak suretiyle ürün yaşam döngüsünde Dİ kullanımına yer verilmektedir.

Konunun daha net anlaşılabilmesi için Dİ nedir? Neden Dİ kullanımıyla ilgileniyoruz ? Dİ'in avantajları nelerdir? Dİ neleri içerir ve nelerden oluşur? gibi akıllarda oluşabilecek soruların cevapları verilmeye özen gösterilmiştir. Temel bilgilerden yola çıkılarak konu özelleştirilmiş ve bu çalışmanın daha sonra yapılacak tasarım çalışmalarına temel oluşturması hedeflenmiştir.

KAYNAKÇA

1. Alexopoulos, K., Nikolakis, N., & Chryssolouris, G. (2020). Digital twin-driven supervised machine learning for the development of artificial intelligence applications in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(5), 429-439. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1747642>
2. Allen, B. D. (2021). *Digital twins and living models at NASA*. Digital Twin Summit.
3. Andrade, P., Silva, C., Ribeiro, B., & Santos, B. F. (2021). Aircraft maintenance check scheduling using reinforcement learning. *Aerospace*, 8(4), 113.
4. Attaran, M., & Celik, B. G. (2023). Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 100165.
5. Baheti, R., & Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. *The impact of control technology*, 12(1), 161-166.
6. BENGÜ, H., & FİDANCAN, C. (2021). MALİYET DÜŞÜRME YÖNTEMİ OLARAK DİJİTAL İKİZ VE OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ YERİ. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 3(2), 205-221.
7. Gao, Z., Paul, A., & Wang, X. (2022). Guest editorial: Digital twinning: Integrating AI-ML and big data analytics for virtual representation. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2), 1355-1358.
8. Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). *The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles*. 1818.
9. Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 1(2014), 1-7.
10. Hribernik, K., Wuest, T., & Thoben, K.-D. (2013). *Towards product avatars representing middle-of-life information for improving design, development and manufacturing processes*. 85-96.
11. Kadlec, P., Gabrys, B., & Strandt, S. (2009). Data-driven soft sensors in the process industry. *Computers & chemical engineering*, 33(4), 795-814.
12. Li, L., Aslam, S., Wileman, A., & Perinpanayagam, S. (2021). Digital twin in aerospace industry: A gentle introduction. *IEEE Access*, 10, 9543-9562.
13. Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). *The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin*. 020023. <https://doi.org/10.1063/1.5031520>
14. Liu, Z., & Mrad, N. (2014). *Data fusion for the diagnostics, prognostics, and health management of aircraft systems*. 389-399.
15. Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
16. Mayda, M., & Börklü, H. R. (2008). *YENİ BİR KAVRAMSAL TASARIM İŞLEM MODELİ*.
17. Meng, T., Jing, X., Yan, Z., & Pedrycz, W. (2020). A survey on machine learning for data fusion. *Information Fusion*, 57, 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.001>
18. Monostori, L. (2003). AI and machine learning techniques for managing complexity, changes and uncertainties in manufacturing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16(4), 277-291. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(03)00078-2)
19. Patrikeev, A., Tarasov, A., Borovkov, A., Aleshin, M., & Klyavin, O. (t.y.). *NVH ANALYSIS OF OFFROAD VEHICLE FRAME. EVALUATION OF MUTUAL INFLUENCE OF BODY-FRAME SYSTEM COMPONENTS*.
20. Perera, Y. S., Ratnaweera, D. A. A. C., Dasanayaka, C. H., & Abeykoon, C. (2023). The role of artificial intelligence-driven soft sensors in advanced sustainable process industries: A critical review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105988. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105988>

-
21. Qiu, S., Liu, S., Kong, D., & He, Q. (2019). Three-dimensional virtual-real mapping of aircraft automatic spray operation and online simulation monitoring. *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, 1(6), 611-621.
 22. Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980-22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
 23. Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, Modeling and Implementation of Digital Twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>
 24. Seshadri, B. R., & Krishnamurthy, T. (2017). *Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept*. 1675.
 25. Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y., & Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935-3953.
 26. Tomiyama, T., Gu, P., Jin, Y., Lutters, D., Kind, C., & Kimura, F. (2009). Design methodologies: Industrial and educational applications. *CIRP annals*, 58(2), 543-565.
 27. Uzun, M., Demirezen, M. U., Koyuncu, E., & Inalhan, G. (2019). *Design of a hybrid digital-twin flight performance model through machine learning*. 1-14.
 28. Wang, J., Li, Y., Gao, R. X., & Zhang, F. (2022). Hybrid physics-based and data-driven models for smart manufacturing: Modelling, simulation, and explainability. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 381-391. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.004>
 29. Wang, L. (2020). Application and development prospect of digital twin technology in aerospace. *IFAC-PapersOnLine*, 53(5), 732-737.
 30. Wu, J., Yang, Y., Cheng, X., Zuo, H., & Cheng, Z. (2020). The Development of Digital Twin Technology Review. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 4901-4906. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327756>
 31. Xiong, M., & Wang, H. (2022). Digital twin applications in aviation industry: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(9-10), 5677-5692.