

JAR - 6 / 1

E-ISSN: 2687-3338

FEBRUARY 2024



JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ





JOURNAL OF
AVIATION
RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

6 / 1



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERĐİSİ

Yılda iki sayı olarak yayımlanan uluslararası hakemli,
açık erişimli ve bilimsel bir dergidir.

Cilt: 6
Sayı: 1
Yıl: 2024

2019 yılından itibaren yayımlanmaktadır.

© Telif Hakları Kanunu çerçevesinde makale sahipleri ve
Yayın Kurulu'nun izni olmaksızın hiçbir şekilde
kopyalanamaz, çoğaltılamaz. Yazıların bilim,
dil ve hukuk açısından sorumluluğu
yazarlarına aittir.

Elektronik ortamda yayımlanmaktadır.
<https://dergipark.org.tr/jar>
Ulaşmak için tarayınız:

This is a scholarly, international, peer-reviewed, open-access
journal published international journal published twice a year.

Volume: 6
Issue: 1
Year: 2024

Published since 2019.

© The contents of the journal are copyrighted and may not
be copied or reproduced without the permission of the
publisher. The authors bear responsibility for the
statements or opinions of their
published articles.

This journal is published digitally.
<https://dergipark.org.tr/jar>
Scan for access:



Yazışma Adresi:
Süleyman Demirel Üniversitesi
Sivil Havacılık Yüksekokulu Müdürlüğü
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Posta:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telefon:
+90 246 211 85 00

Dahili:
8505

Correspondence Address:
Süleyman Demirel University
Directorate of Civil Aviation School
Keçiborlu / Isparta - Türkiye

E-Mail:
journalofaviationresearch@gmail.com

Telephone:
+90 246 211 85 00

Ext:
8505



JOURNAL OF AVIATION RESEARCH

HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

Yayın Sahibi

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Baş Editör

Doç. Dr. İnan Eryılmaz

Editör Kurulu

Doç. Dr. İnan Eryılmaz
Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Yasin Şöhret
Dr. Öğr. Üyesi Şener Odabaşoğlu
Dr. Öğr. Üyesi Leyla Adiloğlu Yalçinkaya
Dr. Tamer Saraçyakupoğlu
Doç. Dr. Vahap Önen
Doç. Dr. Gökhan Tanrıverdi

Dil Editörleri

Doç. Dr. Deniz Dirik
Doç. Dr. Tuğba Erhan

Yayın ve Danışma Kurulu

Prof. Dr. Cem Harun Meydan
Prof. Dr. Dukagjin Leka
Prof. Dr. Ender Gerece
Prof. Dr. Ferişt Kolbakır
Prof. Dr. Osman Ergüven Vatandaş
Doç. Dr. Akansel Yalçinkaya
Doç. Dr. Asena Altın Gülova
Doç. Dr. Burcu Güneri Çangarlı
Doç. Dr. Engin Kanbur
Doç. Dr. Eyüp Bayram Şekerli
Doç. Dr. Ferhan Sayın
Doç. Dr. Florina Oana Virlanuta
Doç. Dr. Güler Tozkoparan
Doç. Dr. Hakkı Aktaş
Doç. Dr. Mehmet Kaya
Doç. Dr. Önder Altuntaş
Doç. Dr. Özgür Demirtaş
Doç. Dr. Rüstem Barış Yeşilay
Doç. Dr. Semih Soran
Dr. Öğr. Üyesi Birsan Açıkcel
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin Uzunbacak
Dr. Öğr. Üyesi Muhittin Hasan Uncular
Dr. Öğr. Üyesi Rukiye Sönmez
Dr. Öğr. Üyesi Tahsin Akçakanat
Dr. Öğr. Üyesi Uğur Turhan
Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürleri Akgün

Grafik Tasarım

Dr. Öğr. Üyesi Rıza Gürleri Akgün

Owner

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editor in Chef

Assoc. Prof. Dr. İnan Eryılmaz, Ph.D.

Editorial Board

Assoc. Prof. İnan Eryılmaz, Ph.D.
Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Yasin Şöhret, Ph.D.
Asst. Prof. Şener Odabaşoğlu, Ph.D.
Asst. Prof. Leyla Adiloğlu Yalçinkaya, Ph.D.
Tamer Saraçyakupoğlu, Ph.D.
Assoc. Prof. Vahap Önen, Ph.D.
Assoc. Prof. Gökhan Tanrıverdi, Ph.D.

Language Editors

Assoc. Prof. Deniz Dirik, Ph.D.
Assoc. Prof. Tuğba Erhan, Ph.D.

Editorial and Advisory Board

Prof. Cem Harun Meydan, Ph.D.
Prof. Dukagjin Leka, Ph.D.
Prof. Ender Gerece, Ph.D.
Prof. Ferişt Kolbakır, Ph.D.
Prof. Osman Ergüven Vatandaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Akansel Yalçinkaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Asena Altın Gülova, Ph.D.
Assoc. Prof. Burcu Güneri Çangarlı, Ph.D.
Assoc. Prof. Engin Kanbur, Ph.D.
Assoc. Prof. Eyüp Bayram Şekerli
Assoc. Prof. Ferhan Sayın, Ph.D.
Assoc. Prof. Florina Oana Virlanuta, Ph.D.
Assoc. Prof. Güler Tozkoparan, Ph.D.
Assoc. Prof. Hakkı Aktaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Mehmet Kaya, Ph.D.
Assoc. Prof. Önder Altuntaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Özgür Demirtaş, Ph.D.
Assoc. Prof. Rüstem Barış Yeşilay, Ph.D.
Assoc. Prof. Semih Soran, Ph.D.
Asst. Prof. Birsan Açıkcel, Ph.D.
Asst. Prof. Hasan Hüseyin Uzunbacak, Ph.D.
Asst. Prof. Muhittin Hasan Uncular, Ph.D.
Asst. Prof. Rukiye Sönmez, Ph.D.
Asst. Prof. Tahsin Akçakanat, Ph.D.
Asst. Prof. Uğur Turhan, Ph.D.
Asst. Prof. Rıza Gürleri Akgün, Ph.D.

Graphic Design

Asst. Prof. Rıza Gürleri Akgün, Ph.D.



JOURNAL OF
**AVIATION
RESEARCH**
HAVACILIK ARAŞTIRMALARI DERGİSİ

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

MEVLÜT COŞKUN TEZCAN

Pisagor Bulanık Kümelere Entegre AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Uçak Tipi Seçiminin Optimizasyonu: Havayolu İşlemleri İçin Model Önerisi

Optimization of Aircraft Type Selection by Integrated AHP and TOPSIS Methods on Pythagorean Fuzzy Sets: Model Suggestion for Airline Processing 1 - 24

BURAK ÇINAR

Air Warfare Over Europe: An Exploration of The Luftwaffe Experience

Avrupa Üzerinde Hava Savaşı: Luftwaffe Deneyiminin Keşfi 25 - 52

Derleme Makaleler / Review Articles

ENGİN GÖDE - ATANUR TEOMAN - MELİH CEMAL KUŞHAN - KÜRŞAT TONBUL - GÖKHAN İBRAHİM ÖĞÜNÇ - BATUHAN DAZ

İnsansız Hava Araçları (İHA) İçin Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) Bağımsız Navigasyon

Global Navigation Satellite System (GNSS) Independent Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV) 53 - 88

ARİF TUNCAL - UFUK EROL

Integrating Unmanned Aerial Vehicles in Airspace: A Systematic Review

İnsansız Hava Araçlarının Hava Sahasına Entegrasyonu: Sistemik Bir İnceleme 89- 115



Pisagor Bulanık Kümelere Entegre AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Uçak Tipi Seçiminin Optimizasyonu: Havayolu İşlemeleri İçin Model Önerisi

Mevlüt Coşkun TEZCAN¹ 

Araştırma Makalesi	DOI: 10.51785/jar.1371387	
Gönderi Tarihi: 04.10.2023	Kabul Tarihi: 22.01.2024	Online Yayın Tarihi: 28.02.2024

Öz

Bu çalışma ile havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçak tipi seçim kararının optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Havayollarında birbirine yakın kapasite ve teknik özelliklerdeki uçak tipleri arasından hangisi veya hangilerinin seçilerek satın alma kararı oldukça farklı açılardan incelenmesi gereken, zaman alıcı ve karmaşık bir problemdir. Bir uçak tipi bir yönden üstün gelirken diğeri farklı bir yönden üstün gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda birden fazla kriteri, verilen önem sırasına göre aynı anda dikkate alarak alternatifler arasında sıralama yapmaya olanak sağlayan modellere yönelmek faydalı olmaktadır. Bu tip uçak seçimi ya da uçak seçim kriterlerini önceliklendirme problemleri incelendiğinde literatürde sıklıkla çok kriterli karar verme (ÇKKV) modellerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu çalışmada da aynı bakış açısıyla ÇKKV problemi olarak düşünülen uçak tipi seçimi, belirsizliklerin ve sözel değerlendirmelerin daha iyi modellenebilmesine imkan tanıyan bulanık mantık ile birleştirilmiş ve bir bulanık ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Bu kapsamda bulanık kümelere görece yeni bir yaklaşım olan Pisagor Bulanık Kümelere ile Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması (TOPSIS) hibrit modeli üzerinde çalışılmış ve 6 kriter ile 8 alternatif uçak arasında seçim yapılmıştır. Uygulama iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada çalışmaya dahil edilen 3 uzman karar verici tarafından AHP anketi doldurularak aralık değerli Pisagor bulanık AHP yöntemiyle kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. İkinci aşamada ise aynı karar vericilerin değerlendirmeleri ve aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS metodolojisi ile alternatifler sıralanmıştır. Sonuç olarak Airbus A350-1000 tipi uçak ideal çözüme en yakın alternatif olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uçak seçimi, Havayolu, Pisagor Bulanık Kümelere, AHP, TOPSIS.

JEL Sınıflandırma: C69, L93, M11.

Optimization of Aircraft Type Selection by Integrated AHP and TOPSIS Methods on Pythagorean Fuzzy Sets: Model Suggestion for Airline Processing

Abstract

It is aimed to optimize the wide-body passenger aircraft type selection decision for airline companies in this study. The decision to choose which aircraft types with similar capacities and technical specifications are selected in airlines is a time-consuming and complex problem that requires to be examined from a different perspective. One type of aircraft may prevail in one direction, while the other may prevail in another. In such cases, it is useful to take into account the models that allow ranking among alternatives by considering more than one criterion simultaneously in order of importance. When this type of aircraft selection or prioritization of aircraft selection criteria is examined, it is seen that multi-criteria decision-making (MCDM) models are frequently recommended in the literature. In this study, aircraft type selection, considered an MCDM problem from the same point of view, is combined with fuzzy logic, which allows better modeling of uncertainties and verbal evaluations that are pondered as a fuzzy MCDM problem. In this context, Pythagorean Fuzzy Sets,

¹ Doktor, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kıbrıs, coskun_tezcan@hotmail.com

which are a relatively new approach to fuzzy sets, and the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) hybrid model have been studied, and a choice has been made between 6 criteria and 8 alternative planes. The application consists of two stages. In the first stage, the criteria weights were calculated using the interval-valued Pythagorean fuzzy AHP method by filling out the AHP questionnaire by 3 expert decision-makers included in the study. In the second stage, the evaluations and interval values of the same decision-makers were listed with the interval-valued Pythagorean fuzzy TOPSIS methodology. As a result, the Airbus A350-1000 type aircraft was determined as the closest alternative to the ideal solution.

Keywords: Aircraft selection, Airline, Pythagorean Fuzzy Sets, AHP, TOPSIS

JEL Classification: C69, L93, M11.

GİRİŞ

Hizmet sektöründe girdi, etki ve kapasitesi ile ön plana çıkan havacılık sektörü, bu alanda faaliyet gösteren işletmeler, sahip olduğu nitelikli insan gücü, kullanılmakta olan gelişmiş teknoloji ve uluslararası kurallara sahip olan yapısı ile önemli unsurları barındıran bir sistemdir (Akyurt ve Yaşlıoğlu, 2018: 428). Havacılık sisteminin merkezinde yer alan havayolu taşımacılığı insanların ve kargoların yer ve zaman faydası oluşturacak şekilde hava aracı kullanılarak yer değiştirmesi şeklinde ifade edilmektedir (Gerede, 2015: 3). Havayolu taşımacılığının ilk yıllarında 2 ya da 3 kişilik kapasitesi bulunan uçaklar ile taşımacılık gerçekleştirilirken, bu işlem günümüzde yüzlerce koltuk kapasitesi olan uçaklar ile gerçekleştirilmektedir. Havacılık sektörünün bu hızlı gelişmesinde bu alandaki serbestleşme hareketleri, globalleşme, nüfus artış trendi ve teknolojiye yeni yeniliklerin son derecede önemli katkıları olmuştur. Özellikle neo-liberal dalgalanmanın etkisi ile 1978 yılında ABD’de başlayan ve sonrasında diğer ülkelere de yayılan havacılıkta deregülasyon (kuralsızlaştırma) süreci ile özel işletmelerin havacılığa girişinin temin edilmesi havacılık sektörünün hızlı bir atılım göstermesini sağlamıştır. Havacılıktaki serbestleşme hareketleri ve globalleşme ile birlikte elektronik alanındaki ilerlemeler, malzeme teknolojileri ve jet motorlarındaki devrimsel gelişmeler doğrultusunda konfor ve güvenlik faktörünü bir üst segmente taşıyan uçakların imal edilmesi, havayolu ulaşımının önemli bir gelişmeye sahne olmasını ve bu gelişimin sürmesini sağlamaktadır.

Havayolu taşımacılığı, ortaya koymuş olduğu bu gelişim ile hız, emniyet, kalite ve konfor gibi avantajlar sunarak, havayolu taşımacılığına olan talebin her geçen gün artmasını sağlamakta ve ulaştırma sektörü içerisinde itici güç unsurlarından birisi olarak ön plana çıkmaktadır. Havayolu taşımacılığına duyulan talep sektörde kritik bir aktör olan havayolu şirketleri ile filo sayılarının artmasını da sağlamıştır. Havayolu şirketlerinin filo yapılarını genişletmek üzere yaptıkları uçak alımları havayolu şirketleri için yüksek yatırım maliyetlerinden kaynaklı olarak stratejik bir öneme sahiptir. Ayrıca havayolu işletmeleri uçak alırken yatırım maliyetlerinin haricinde çevresel etki, konfor, sürat ve benzeri birçok etkeni de dikkate almak durumundadır. Günümüzde ülkeler ve havalimanı otoriteleri uçakların yarattığı sera gazı salınımı ve gürültü düzeyi gibi çevresel etkileri göz önünde bulundurmaktadır. Bu çerçevede uçakların gürültü seviyesi, yakıt sarfiyatı ve emisyon miktarı gibi teknik özellikleri önemli hale gelmektedir. Bununla birlikte yolcuların kabin içi eğlence sistemi, koltuk aralığı ve genişliği gibi konfor beklentileri de artmaktadır. Bu noktada havayolu şirketleri ülkeler ve yolcuların beklentilerini maksimum düzeyde karşılamak amacıyla ve kendi çıkarları doğrultusunda teknik, operasyonel ve ekonomik faktörler arasında en iyi kombinasyona sahip uçak tiplerine yönelmektedir. Havayollarının

farklı gereksinimlerine karşılık vermek isteyen uçak imalatçısı firmalar ise farklı tipte uçaklar üretmektedirler (Kartal, 2022: 1).

Karar verme süreci, gerçekleştirilmesi tasarlanan hedef ve işlemlerin, karar verici yapı tarafından muhtemel alternatifler içerisinde, en uygun kriterleri sağlayan ihtimalin değerlendirilerek alternatifler içerisinde seçilmesidir. Günümüzde karar problemleri birden fazla kritere ve alternatife sahip karmaşık problemler halini almıştır, bu nedenle karar problemlerinin çözülmesi artık daha da zorlaşmış durumdadır. Bu tarz problemler çok kriterli karar verme (ÇKKV) teknikleri ile çözülebilmektedir. ÇKKV, seçilmesi planlanan ve fazla sayıda alternatifleri, kriterleri ve kısıtları temelinde barındıran problemlerin çözümüne imkân sağlayan yöntemler bütünüdür. ÇKKV yöntemleri mevcut alternatifler içerisinde performansları en iyiden en kötüye sıralayarak karar verici için performans sıralaması gerektiren her türlü alanda kullanılmaktadır. ÇKKV'de karar alma probleminin çözümünde bir süreç vardır. Problem çözümü bu işlemler takip edilerek sürdürülür ve optimum alternatif belirlenir.

Karar verme aşamalarında insanın dahil olduğu ve subjektif değerlendirmelerin yapıldığı süreçlerde genellikle bir belirsizlik söz konusu olmaktadır. Bu sebeple ÇKKV problemi olarak düşünülen uçak tipi seçimi, belirsizliklerin ve sözel değerlendirmelerin daha iyi modellenbilmesine imkan tanıyan bulanık mantık ile birleştirilmiş ve bir bulanık ÇKKV problemi olarak ele alınmıştır. Belirsizlik içeren bu karar probleminin çözümü için değişik ÇKKV yöntemleri ve farklı bulanık küme uzantıları incelenmiş, uygulamada yaygın kullanımı sebebiyle Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ile İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralaması (TOPSIS) yöntemleri tercih edilmiştir ve uçak seçim probleminde bir çalışma bulunmaması sebebiyle de bu modelde bulanık kümelerle görece yeni bir yaklaşım olan Pisagor bulanık kümelerin (Pythagorean Fuzzy Sets/PFS) kullanılmasına karar verilmiştir.

Havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçağı seçim kararının optimize edilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada kriter ağırlıklarının aralık değerli Pisagor bulanık AHP (Interval Valued Pythagorean Fuzzy AHP/IVPF-AHP) yöntemi ile elde edildiği, alternatif uçak tiplerinin ise aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS (IVPF-TOPSIS) yöntemi ile sıralandığı hibrit bir model önerilmektedir. Çalışmanın bir sonraki bölümünde havayolu işletmelerinde filo planlanması sürecine ilişkin kavramsal çerçeveye değinilmiş ve literatürde ÇKKV yöntemleri kullanılarak uçak seçimi üzerine yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bundan sonraki bölümlerde ise sırasıyla yöntem, bulgular, tartışma ve sonuç kısımları yer almıştır.

1. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

1.1.Havayolu İşletmelerinde Filo Planlaması

Havayolu şirketlerinin filosu, havayolu tarafından herhangi bir zamanda işletilen toplam uçak sayısı ile belirli uçak tiplerinden oluşmaktadır. Filo yapısı oluşturmak havayolu şirketlerinin kurumsal ve operasyonel performanslarını, kapasite geliştirmelerini ve sürdürülebilirliklerini etkileyen en mühim uzun vadeli stratejik kararlardan biridir (Belobaba vd., 2009: 154). Havayolu şirketlerinin filo planları, gelişen uçak teknolojisi ve rekabet

halindeki havayollarının filo kararlarından etkilenmektedir. Bu bağlamda havayollarının filo yapılarını doğru bir biçimde oluşturmaları süratle değişim gösteren pazar şartlarına hızlı bir biçimde uyum sağlamaları ve gereksinimleri karşılama bakımından kritik öneme sahiptir.

Filo planlamasında kritik karar süreçlerinden birisi uçak tipi seçimidir. Havayolu şirketlerinin birçok değerlendirme kriterini aynı anda dikkate alarak farklı uçak alternatifleri arasından operasyonlarına en uygun uçak tipini doğru bir biçimde seçmesi diğer havayollarına nazaran stratejik rekabet avantajı elde etmelerini sağlamaktadır. Ayrıca sektörel, çevresel ve iktisadi kaynakların aktif ve verimli bir biçimde kullanılmasını temin etmektedir (Kiracı ve Bakır, 2018: 15).

Uçuş mesafesi ve hizmet verilen uçuş noktaları arasındaki taleplere bağlı olarak ekonomik ve karlı uçuş operasyonları için farklı tip ve büyüklükte uçaklara gereksinim duyulmaktadır. Bu noktada uçak seçim prosesi tüm havayolu şirketleri için çok önemli ve zor bir görevdir. Havayolu işletmeleri uyguladıkları iş modeli ve ağ yapıları çerçevesinde havayolunun gelecek projeksiyonuna göre uçak tercihinde bulunmaktadırlar. Düşük maliyetli havayolları ile talebe göre tarifesiz seferler yapan charter taşıyıcılar tipik olarak ekonomi sınıf kabin konfigürasyonuna sahip bir ya da birkaç uçak tipinden oluşan filo yapısına sahip olmakta iken, tam hizmet sunan havayolu işletmeleri ise sektörde tüm pazar bölümlerine hizmet verebilmek amacıyla business ve ekonomi sınıf kabin konfigürasyonuna sahip pek çok uçak tipinden müteşekkil heterojen bir filo yapısına sahip olmaktadır. Ayrıca genel uçuş ağına bağlı olarak, kıta içindeki uçuşlarda bölgesel ve kısa menzilli uçaklara, kıtalararası uçuşlarda ise orta ve uzun menzilli uçaklara gereksinim duyulmaktadır. Bunların dışında değişik uçuş noktalarındaki talepler çerçevesinde uçakların boyutları da farklılaşmaktadır. Yoğun havalimanlarında slot (kapasite kullanımı) sıkıntısı ve yüksek iniş ücretleri, havayolu firmalarını tercih ettikleri bazı uçuş noktalarında uçuş frekansını azaltmaya ancak söz konusu bu uçuşlarda geniş gövdeli uçak kullanımına zorlamaktadır (Schmitt ve Gollnick, 2006: 6-7).

1.2. Literatür Taraması

Havayolu yolcu ve kargo taşımacılığında kullanılan birçok uçak modeli bulunmaktadır. Uçak tipi seçimi havayolu şirketlerinin stratejik hedefleri, operasyonel gereksinimleri ve finansal durumuyla bütünleşen bir süreç olup, doğru uçak tipi seçiminde detaylı bir analiz ve planlama yapmak önemlidir. Literatürde uçak seçim probleminin çözümü ile işletmelerin doğru karar alabilmesi adına birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Bu çalışmalardan bazıları şu şekildedir;

Wang ve Chang (2007), Tayvan Hava Kuvvetleri Akademisi için eğitim amaçlı uçak modeli seçimi üzerine çalışmış, yöntem olarak da TOPSIS' i kullanmışlardır. Çalışmada yakıt kapasitesi, güç, servis tavanı, maksimum ve minimum G kuvveti limiti, iniş takımları açık halde maksimum operasyon hızı, flaplar aşağıda maksimum operasyon hızı, yangın durumunda minimum uçuş hızı, maksimum seyir hızı, ekonomik seyir hızı, deniz seviyesinde maksimum tırmanma oranı, kalkış mesafesi, iniş mesafesi, kalkış ve 50 feet yüksekliğe ulaşmak için gereken mesafe, 50 feet yükseklikten iniş ve tam duruş için gereken mesafe olmak üzere 16 kriter belirlenmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirilen T-34, PC-7, PC-9, PC-7 MK2, T-6A, KT-1 ve T-27 tipi uçak alternatifleri arasından KT-1'in en iyi

alternatif olduğu belirlenmiştir.

Özdemir ve arkadaşları (2011) çalışmalarında, Türk Hava Yolları işletmesi için uçak seçim problemini Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process/ ANP) yöntemini kullanarak ele almışlardır. Çalışmada satın alma maliyeti, operasyon maliyeti, bakım maliyeti, kurtarma maliyeti alt kriterlerini içeren maliyet kriteri; teslimat süresi ve faydalı ömür alt kriterlerini içeren zaman kriteri; boyut, güvenlik, güvenilirlik ve hizmet kalitesine uygunluk alt kriterlerini içeren fiziksel özellikler kriterleri çerçevesinde A319, A320 ve B737 uçakları değerlendirilmiştir. Çalışma sonucuna göre en uygun uçağın B737 olduğu tespit edilmiştir.

Dozic ve Kalic (2014) çalışmasında, Güneydoğu Avrupa bölgesinde 27 rotada bölgesel uçuşlar gerçekleştirdiği varsayılan Belgrad Havalimanı merkezli bir havayolu işletmesi için uçak seçim kararını AHP yöntemi ile değerlendirmiştir. Çalışmada 6 kriter üzerinden ERJ-190, CRJ-700, CRJ-900, CRJ-1000, ATR 72-500, ATR 72-600 ve Q 400 uçakları değerlendirmeye alınmıştır. Bölgesel uçuşlar için ATR 72-600 modeli en uygun uçak olarak belirlenmiştir.

Bruno ve arkadaşları (2015) çalışmasında, AHP ve Bulanık Küme Teorisini birlikte kullanarak Air Italy için gerekli uçak tipi seçimini anlatmaktadır. Çalışmada birim operasyonel maliyet, uçak fiyatı, seyir hızı, koltuk konforu, otonomi, kabin bagaj bölmesi boyutu, çevre kirliliği ve gürültü kriterleri baz alınarak Bombardier CRJ-1000, Sukhoi SSJ-100 ve Embraer ERJ-190 tipi uçaklar değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıklarının AHP yöntemi ile belirlendiği, alternatif uçak tiplerinin ise Bulanık Küme Teorisi ile sıralandığı çalışmada havayolu işletmesi için en uygun uçağın Sukhoi SSJ-100 olduğu kararına varılmıştır.

Kiracı ve Bakır (2018a), çalışmalarında, herhangi bir havayolu işletmesi için kısa ve orta mesafe uçuşlarda kullanılacak uçak tipi seçiminde TOPSIS yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada yakıt tüketimi, fiyat, yolcu kapasitesi, menzil ve hız kriterleri doğrultusunda A320, A321, B737-800 ve B737-900ER tipi uçaklar karşılaştırılmıştır. Buna göre en uygun uçak tipi B737-800 olarak belirlenmiş ve bu uçak tipini sırası ile B737-900ER, A321, A320 uçakları takip etmiştir.

Kiracı ve Bakır (2018b), yapmış oldukları başka bir çalışmada ÇKKV yöntemlerini kullanarak ticari uçak seçimi yapmaktadır. Bu çalışmada yakıt tüketimi, fiyat, koltuk kapasitesi, menzil, maksimum yük kapasitesi, hız ve gaz emisyon miktarı kriterlerini kullanmışlardır. Kriter ağırlıkları AHP yöntemi ile belirlendikten sonra COPRAS ve MOORA yöntemleri uygulanarak uçak alternatiflerinin sıralaması elde edilmiştir. Her iki yöntemde de sıralama aynı çıkmış ve en iyi uçak tipinin B737-800 olduğu tespit edilmiştir. Bu uçağı sırası ile B737-900ER, A321 ve A320 takip etmiştir.

Güntut (2019), düşük maliyetli bir havayolu için filo planlama optimizasyonu yapabilmek amacıyla bulanık TOPSIS yöntemini kullanmıştır. Çalışmasında ilk olarak, karar vericilerle birlikte 4 farklı uçak üreticisine ait 17 farklı dar gövdeli uçak modelini değerlendirerek, 5 adet ana kriter ve bu kriterlere bağlı 21 adet alt kriter belirlenmiştir. Sonrasında iki aşamalı değerlendirme sürecine geçilmiştir. İlk aşamada, karar vericiler tarafından sözel değişkenler kullanılarak kriterler değerlendirilmiş ve ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci aşamada, karar vericiler tarafından sözel değişkenler kullanılarak uçak alternatiflerinin performansları ifade

edilmiştir. Son olarak elde edilen veriler kullanılarak bulanık TOPSIS yöntemiyle hesaplamalar yapılmış ve alternatiflerin sıralanması sağlanmıştır.

Akyurt ve Kabadayı (2020) çalışmasında, Türkiye’de faaliyet gösteren bir hava kargo işletmesi için uçak seçim problemini ele almışlardır. Çalışmada maliyet, operasyonel uyumluluk ve zaman ana kriterleri altında tanımlı 16 alt kriter belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında bulanık AHP yöntemi, kargo uçağı alternatiflerinin sıralanmasında ise bulanık gri ilişkisel analiz (GIA) yöntemi kullanılmıştır. Buna göre firma için en faydalı uçak tipi B777F olarak belirlenirken ikinci sırada A320-200F, üçüncü sırada A310-300F son olarak da B747-400F yer almıştır.

Durmaz ve Gencer (2020) çalışmasında, Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığı’nın kullanımına uygun akrobasi uçağı seçimi JSMAA programına yeni bir yazılım SMAA-2 ve SWARA-SMAA-2 yöntemleri ile analiz edilmiştir. Analizde uçak performansı, uluslararası prestij, pilot adaptasyonu, lojistik performans ve ekonomiklik kriterleri dikkate alınarak KT-1T, HÜRKUŞ-B, F-16, JF-17 tipi uçaklar arasında seçim yapılmış ve en uygun uçak modelinin F-16 olduğu görülmüştür.

Kiracı ve Akan (2020), herhangi bir havayolu işletmesi için uçak seçimini AHP ve TOPSIS yöntemlerinin Aralık Tip-2 Bulanık Küme (Interval Type-2 Fuzzy Sets) uzantısına entegre edildiği hibrid bir model kapsamında incelemiştir. Çalışmada ekonomik performans, teknik performans ve çevresel etki olmak üzere 3 ana kriter; koltuk/mil başına yakıt tüketimi, uçak hizmet ömrü, maksimum kalkış ağırlığı, koltuk kapasitesi, işletme maliyeti, uçak fiyatı, kirlilik ve gürültü olmak üzere 8 alt kriter kullanmışlardır. A320neo, A321neo, B737max8 ve B737max9 tipi uçaklar arasında yapılan değerlendirmede A321neo en iyi alternatif olarak belirlenmiştir.

Lozano ve Rodriguez (2020), İspanya Hava Kuvvetleri için ileri eğitim uçağı seçimini AHP ve Bulanık İdeal Referans Yöntemi (FRIM) kapsamında incelemiştir. Kriter olarak çatışma yüksekliği, dayanıklılık, itiş gücü, kalkış ağırlığı, kalkış mesafesi, hız, menzil, taktiksel kapasite, manevra yeteneği, ergonomi ve uyumluluk kriterlerini baz almışlardır. Çalışmada alternatif olarak değerlendirilen KAI T-50, Alenia Aermacchi M-346 Master, Yakovlev YAK-130, Northrop F-5 Freedom Fighter uçak tipleri arasından Alenia Aermacchi M-346 Master en avantajlı model olarak saptanmıştır.

Kocakaya ve arkadaşları (2021), Türkiye’de oluşturulacak bölgesel havacılık operasyonları için jet motorlu uçak modelinin seçim kararını küresel bulanık AHP ve küresel bulanık TOPSIS yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada maliyet, teknik özellikler ve emniyet geçmişi ana kriterleri çerçevesinde 10 alt kriter ile 9 alternatif uçak değerlendirilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre küresel ağırlıklı aritmetik ortalama (SWAM) operatörüne göre Bombardier CRJ100/200 uçağı, küresel ağırlıklı geometrik ortalama (SWGGM) operatörüne bağlı olarak da Embraer ERJ-135 uçağı en iyi seçenek olarak tespit edilmiştir.

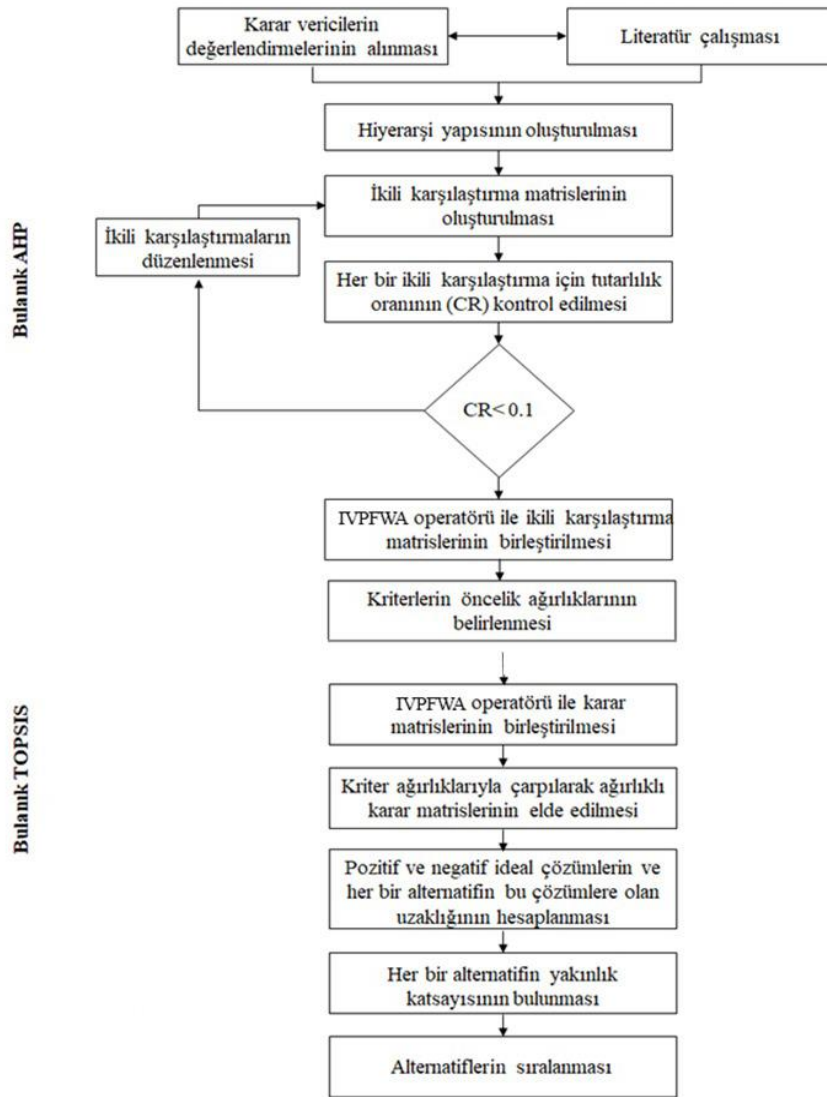
Kocaoğlu ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, Türkiye’de filo alımını hedeflemeyen kişi veya işletmeler için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanarak pistonlu tek motorlu uçak seçimi gerçekleştirmiştir. Çalışma sportif, bireysel ve eğitim amaçlı kullanılabilir 3 uçak

alternatifi arasından 8 kriter esas alınarak yapılmıştır. Çalışmalarında uçağın satın alma maliyeti, motor gücü, menzil, minimum kalkış mesafesi, servis tavanı, faydalı yük ve hız kriterlerini değerlendirdikleri görülmüştür.

2. YÖNTEM

2.1.Araştırma Modeli

Bu araştırmanın amacı havayolu işletmeleri için geniş gövde yolcu uçağı seçim kararını bulanık ÇKKV yöntemleri ile analiz etmektir. Çalışmada kriter ağırlıklarının aralık değerli Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak elde edildiği ve sonrasında alternatif uçak tiplerinin aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS yöntemiyle sıralandığı hibrit bir model önerilmektedir. Önerilen metodoloji kriter ağırlıklarının elde edilmesi ve tutarlılık testlerinin yapılması ile alternatiflerin sıralanması olmak üzere 2 aşamadan oluşmakta ve akış diyagramı özet olarak Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu çalışma Etik Kurul izni gerektirmemektedir.



Şekil 1. Araştırma Modeli

2.2. Bulanık Kümeler

Mantığı ilk olarak sistemli bir şekilde ele alan ve mantık biliminin temellerini atan Aristoteles (M.Ö. 384-322) ile klasik mantık süreci başlamıştır. Boolean mantığı olarak da bilinen klasik mantığın temelinde kıyasa dayalı iki değerli bir anlayış yatmaktadır. Diğer bir deyişle klasik mantıkta sorulan sorunun cevabı ya doğrudur ya da yanlış. Programlama dilinde ise bu cevaplar 0 (yanlış ise) ve 1 (doğru ise) şeklinde ifade edildiğinden 0-1 mantığı olarak da bilinmektedir. Ancak gerçek dünyada doğru ya da yanlış gibi yalnızca iki kesin değerden söz etmek çoğu zaman mümkün değildir. Azerbaycan asıllı matematikçi ve bilgisayar bilimcisi Lotfi A. Zadeh 2 değerli mantığın limitleri üzerine çalışmış ve 1965 yılında yayınladığı bir makalesinde bulanık mantık kuramını ortaya atmıştır (Paksoy vd., 2013).

Klasik mantık ile bulanık mantık kavramları birbirinden farklı olduğu gibi klasik küme ile bulanık küme kavramları da birbirinden farklı şekilde tanımlanmaktadır. Klasik küme teorisinde bir elemanın bir kümeye ait olup olmadığı net bir şekilde belirli olup karakteristik fonksiyonla gösterilir. x elemanının kümenin elemanı olup olmamasına göre karakteristik fonksiyon 0 ya da 1 değerini alır (Peng ve Selvachandran, 2019; Şimşek vd, 2022). Klasik kümelerdeki ait ya da ait olmama durumuna karşın bulanık küme teorisinde kısmi aitlik durumu bulunmaktadır. Bulanık küme, “bir elemanın ilgili kümeye ait olmasının $[0,1]$ sürekli aralığında karakteristik fonksiyona atanan sayının büyüklüğü ile açıklandığı küme” olarak tanımlanmaktadır (Altaş, 1999).

Zadeh’in 1965 yılında bulanık küme teorisini ortaya atmasıyla birlikte belirsizliği ve kesin olmama durumunu ele alan birçok teori geliştirilmiştir. Zadeh’in sunduğu klasik bulanık küme teorisi bir elemanın kümeye ait olma derecesi üzerine kuruluyken, zamanla elemanın kümeye ait olmama derecesi, kümeye ait olup olmama konusundaki kararsızlığın derecesi vb. konularında da çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda Tablo 1’de tarihsel gelişimi gösterilen bulanık küme uzantıları ortaya çıkmıştır.

Tablo 1. Bulanık Küme Uzantıları

Tarih	Araştırmacı	Bulanık Küme Tipi
1965	Zadeh	Klasik Bulanık Kümeler (Ordinart Fuzzy Sets)
1975	Zadeh	Tip-2 Bulanık Kümeler (Type-2 Fuzzy Sets)
1975	Zadeh, Sambuc ve Jahn	Aralık Değerli Bulanık Kümeler (Interval-Valued Fuzzy Sets)
1986	Atanassov	Sezgisel Bulanık Kümeler (Intuitionistic Fuzzy Sets)
2007	Garibaldi ve Ozen	Durağan Olmayan Bulanık Kümeler (Nonstationary Fuzzy Sets)
2010	Torra	Tereddütlü Bulanık Kümeler (Hesitant Fuzzy Sets)
2013	Yager	Pisagor Bulanık Kümeler (Pythagorean Fuzzy Sets)
2014	Cuong	Resimli Bulanık Kümeler (Picture Fuzzy Sets)
2019	Kutlu, Gündoğdu ve Kahraman	Küresel Bulanık Kümeler (Spherical Fuzzy Sets)

Kaynak: Kabak ve Erdebilli, 2021; Kahraman, Öztayşı ve Onar, 2016.

2.2.1. Pisagor Bulanık Kümeler

Antanassov’un 1986 yılında sunduğu sezgisel bulanık kümeler (IFS), bulanık kümedeki bir elemanın hem üye olma hem de üye olmama derecelerine dayanmaktadır. Klasik bulanık kümelerde üye olma ve üye olmama derecelerinin toplamı daima 1 iken sezgisel bulanık

kümelerde bu toplam 1'den küçük veya eşit olmalıdır. Her zaman bir elemanın üye olmama derecesinin 1- üye olma derecesine eşit olmadığı gerçek hayat örnekleri üzerinde bir tereddüt derecesinin olabileceği düşüncesine dayanmaktadır (Peng ve Yang, 2016).

Gerçek hayatta karşılaştığımız bazı durumlarda üyelik ve üye olmama derecelerinin toplamı birden büyük olabilir, ancak bunların kare toplamları birden küçük veya eşittir. Dolayısıyla, bu gibi durumlarda başa çıkmada yetersiz olan sezgisel bulanık kümelerin özel bir hali olan ikinci tip sezgisel bulanık kümeler Antanassov tarafından önerilmiştir. Ardından, Yager 2013 yılında sezgisel ikinci tip bulanık kümeleri Pisagor bulanık kümeler (PFS) olarak adlandırmıştır. Her bir sezgisel bulanık kümenin aynı zamanda bir Pisagor bulanık küme olduğu ancak tersinin doğru olmadığı göz önüne alındığında, Pisagor bulanık kümelerin karar verme problemleriyle başa çıkmak için daha üstün bir model olduğu belirtilmektedir (Peng ve Selvachandran, 2019). Aralık değerli Pisagor bulanık kümelerle ilişkin tanımlamalar ve matematiksel işlemler aşağıda sunulmuştur. (İlbarhar, Cebi, ve Kahraman, 2020; Peng ve Yang, 2016):

Tanım 1: \tilde{p} , X evreninde bulunan aralık değerli bir Pisagor bulanık küme (IVPFS) ve $x \in X$ olsun. x elementinin üye olma derecesi μ ve üye olmama derecesi ν , L ve U ise bu derecelerinin alt ve üst sınırlarını ifade ediyorsa, \tilde{p} kümesi Denklem 1'de belirtilen şekilde tanımlanır.

$$\tilde{p} = \{ (x, [\mu_p^L(x), \mu_p^U(x)], [\nu_p^L(x), \nu_p^U(x)]); x \in X \} \quad (1)$$

Tanım 2: $\tilde{p} = ([\mu^L, \mu^U], [\nu^L, \nu^U])$, $\tilde{p}_1 = ([\mu_1^L, \mu_1^U], [\nu_1^L, \nu_1^U])$ ve $\tilde{p}_2 = ([\mu_2^L, \mu_2^U], [\nu_2^L, \nu_2^U])$ şeklinde üç adet IVPFS olsun. $\lambda > 0$ olmak üzere pisagor bulanık sayılar ile yapılacak matematiksel işlemler Denklem 2, 3, 4, 5, 6 ve 7' de belirtilen formüller ile tanımlanır.

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 \\ = & \left(\left[\sqrt{(\mu_1^L)^2 + (\mu_2^L)^2 - (\mu_1^L)^2(\mu_2^L)^2}, \sqrt{(\mu_1^U)^2 + (\mu_2^U)^2 - (\mu_1^U)^2(\mu_2^U)^2} \right], [\nu_1^L \nu_2^L, \nu_1^U \nu_2^U] \right) \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_2 \\ = & \left([\mu_1^L \mu_2^L, \mu_1^U \mu_2^U], \left[\sqrt{(\nu_1^L)^2 + (\nu_2^L)^2 - (\nu_1^L)^2(\nu_2^L)^2}, \sqrt{(\nu_1^U)^2 + (\nu_2^U)^2 - (\nu_1^U)^2(\nu_2^U)^2} \right] \right) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\lambda \tilde{p} = \left(\left[\sqrt{1 - (1 - (\mu^L)^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - (\mu^U)^2)^\lambda} \right], [(\nu^L)^\lambda, (\nu^U)^\lambda] \right) \quad (4)$$

$$\tilde{p}^\lambda = \left([(\mu^L)^\lambda, (\mu^U)^\lambda], \left[\sqrt{1 - (1 - (\nu^L)^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - (\nu^U)^2)^\lambda} \right] \right) \quad (5)$$

$$\tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 \oplus \tilde{p}_3 = \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_3 \oplus \tilde{p}_2 \quad (6)$$

$$\tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_2 \otimes \tilde{p}_3 = \tilde{p}_1 \otimes \tilde{p}_3 \otimes \tilde{p}_2 \quad (7)$$

Tanım 3: $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık vektörü ve $w_i \in [0, 1]$; $w_i = 1$ olmak üzere aralık değerli Pisagor bulanık kümelerin aritmetik ortalama (IVPFWA) operatörü Denklem 8’de, aralık değerli Pisagor bulanık geometrik ortalama (IVPFWG) operatörü ise Denklem 9’da sunulan formüller yardımı ile hesaplanır.

$$\begin{aligned} & \text{IVPFWA}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_n) \\ &= \left(\left[\sum_{i=1}^n w_i \mu_i^L, \sum_{i=1}^n w_i \mu_i^U \right], \left[\sum_{i=1}^n w_i v_i^L, \sum_{i=1}^n w_i v_i^U \right] \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \text{IVPFWG}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_n) \\ &= \left(\left[\prod_{i=1}^n (\mu_i^L)^{w_i}, \prod_{i=1}^n (\mu_i^U)^{w_i} \right], \left[\prod_{i=1}^n (v_i^L)^{w_i}, \prod_{i=1}^n (v_i^U)^{w_i} \right] \right) \end{aligned} \quad (9)$$

2.3. Analitik Hiyerarşi Prosesi

1977 yılında Thomas Lorie Saaty tarafından geliştirilen AHP (Analytic Hierarchy Process), karar problemini hiyerarşik yapıda inceleyen toplamlı ağırlıklandırma yöntemlerinden biridir. Karar alternatifleri hiyerarşik yapının tabanını oluştururken amaç hiyerarşinin en üstünde yer almaktadır (İlbarhar, Cebi ve Kahraman, 2019). AHP yönteminin aşamaları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Tezcan, 2021: 85):

- i. Problem net bir şekilde tanımlanarak amacı, kriterleri ve alternatifleri gösteren hiyerarşik yapı oluşturulur.
- ii. Tablo 2’deki Saaty tarafından sunulan önem skalası kullanılarak önce kriterler ve varsa alt kriterler için, sonrasında ise kriterlere göre alternatiflerin kıyaslandığı ikili karşılaştırma matrisleri hazırlanır.
- iii. Her bir sütun değerinin ayrı ayrı sütun toplamına bölünmesiyle normalleştirilmiş matris hazırlanır. Satır bileşenlerinin ortalaması alınarak yüzde önem ağırlıkları bulunur ve bu ağırlıklar öncelik vektörünü oluşturur.
- iv. Tutarlılık oranı (CR=CI/RI) sayesinde kıyaslamalardaki tutarlılık ölçülür. Deneysel gözlemlere göre tutarlılık oranının %10’dan küçük olması kabul edilebilirdir ve yapılan karşılaştırmalardaki yargılar tutarlıdır. Oranın %10’dan büyük çıkması durumunda karar matrisi yeniden düzenlenmelidir.
- v. Kriterlerin öncelik vektörlerinin birleşim ile oluşturulan tüm öncelikler matrisi ile alternatiflerin öncelik vektörü çarpılıp toplanarak sonuç vektörü elde edilir. En yüksek değeri alan alternatif karar problemi için en iyi alternatif olarak seçilir.

Tablo 2. AHP Önem Skalası

Önem Derecesi	Tanım	Açıklama
1	Aynı Derecede Mühim	Faktörlerin ikisi de eşit önemde olmasıdır
3	Orta Derecede Mühim	Bir faktörün diğer faktöre göre biraz daha önemli olmasıdır. (Az Üstünlük)
5	Kuvvetli Derecede Mühim	Bir faktörün diğer faktöre göre belirgin bir şekilde önemli olmasıdır. (Fazla Üstünlük)
7	Çok Kuvvetli Derecede Mühim	Faktörlerden birinin diğerine göre yüksek düzeyde önemli olmasıdır. (Çok Üstünlük)
9	Mutlak Derecede Mühim	Faktörlerden birinin diğerine göre çok belirgin düzeyde daha önemli olmasıdır. (Kesin Üstünlük)
2,4,6,8	Ara Değerler	Faktörler arasında yukarıda bulunan derecelerin ara değerleridir. (Uzlaşma Değerleri)
Karşılıklı Değerler	a,b karşılaştırıldığında değerlerden biri (x)ise ; b,a ile karşılaştırılırken alacağı değer (1/x)'dir.	

2.4. TOPSIS Yöntemi

Hwang ve Yoon tarafından 1981 yılında geliştirilen TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesinde, kriterler için belirlenen referans pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme en uzak olması mantığına göre en iyi alternatif (ler)in belirlenmesi yöntemidir. TOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Chen, 2000; Hwang ve Yoon, 1981):

- Karar problemi tanımlanarak amaç, alternatifler ve kriterler belirlenir.
- Karar verici tarafından alternatifler (n) ve kriterler (m) değerlendirilerek $n \times m$ boyutunda karar matrisi oluşturulur.
- Normalize edilmiş standart karar matrisi oluşturulur ve ağırlık değerleriyle çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi elde edilir.
- Değerlendirme ölçütünün amacına göre her bir kriter için pozitif ve negatif ideal çözüm kümeleri oluşturulur. Değerlendirme kriterleri maksimizasyon (fayda) yönlü ise pozitif ideal çözüm ağırlıklı standart matrisinin sütunlarının en büyük değerleri olup negatif ideal çözüm için en küçük değerleridir. Değerlendirme kriterlerinin minimizasyon (maliyet) yönlü olması durumunda tam tersi değerler dikkate alınır.
- Öklid uzaklığı kullanılarak her bir alternatife ilişkin değerlendirme ölçütlerinin pozitif ve negatif ideal çözüme uzaklıkları hesaplanır.
- Pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklar üzerinden her bir alternatif için göreceli yakınlık katsayısı hesaplanır. Katsayı negatif ideal çözüme uzaklığın toplam uzaklık içindeki payını gösterdiğinden katsayısı 1'e yakın alternatifler tercih edilir.

2.5. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS Yöntemi

Çalışmada uygulanacak aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS metodolojisinin aşamaları aşağıda gösterilmektedir:

Adım 1 Karar problemi net olarak tanımlanır ve ardından problem; amaç, kriterler ve alternatiflerden oluşan bir hiyerarşi yapısına dönüştürülür.

Adım 2 Kriterler ve alternatifleri değerlendirecek karar verici ve uzmanların belirlenerek karar modeline göre kriterler için ikili karşılaştırma matrisini oluşturmaları beklenir. Öncelikle klasik AHP yöntemindeki dilsel skala ve karşılık gelen klasik değerleri kullanılarak her bir ikili karşılaştırma matrisi için Saaty'nin tutarlılık prosedürü uygulanır (Saaty, 1980). Tutarlılık oranı 0,1'den küçük olan karşılaştırma matrisi tutarlı olarak kabul edilir. Sonrasında Tablo 3'teki dilselskala ve karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılar ile ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur.

Tablo 3. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS Dilsel Skala

Sözel ifadeler	Aralık Değerli Pisagor Bulanık Sayılar ([a, b], [c, d])
Kesinlikle yüksek derecede önemli (AMI)	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
Çok yüksek derecede önemli (VHI)	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
Yüksek derecede önemli (HI)	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])
Ortalama üstü derecede önemli (SMI)	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])
Eşit derecede önemli (EI)	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])
Ortalama altı derecede önemli (SLI)	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])
Düşük derecede önemli (LI)	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])
Çok düşük derecede önemli (VLI)	([0.12, 0.25], [0.65, 0.78])
Kesinlikle düşük derecede önemli (ALI)	([0.03, 0.16], [0.74, 0.87])

Adım 3 Aralık değerli Pisagor ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) formülü kullanılarak farklı uzmanlar tarafından oluşturulan karar matrisleri birleştirilir.

$$= \left\langle \left[\sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{iL}^2)^{w_i}}, \sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{iU}^2)^{w_i}} \right], \right\rangle \quad (10)$$

$$\left[\prod_{i=1}^n v_{iL}^{w_i}, \prod_{i=1}^n v_{iU}^{w_i} \right]$$

Adım 4 Denklem 11 ve 12'deki formüller ile üyelik ve üye olmama derecelerinin alt ve üst değerleri kullanılarak fark matrisi $D = (d_{ik})_{m \times m}$ elde edilir.

$$d_{ikL} = \mu_{ikL}^2 - v_{ikU}^2 \quad (11)$$

$$d_{ikU} = \mu_{ikU}^2 - v_{ikL}^2 \quad (12)$$

Adım 5 Denklem 13 ve 14 vasıtasıyla aralıklı çarpım matrisi $S = (s_{ik})_{m \times m}$ elde edilir.

$$s_{ikL} = \sqrt{1000^{d_{ikL}}} \quad (13)$$

$$s_{ikU} = \sqrt{1000d_{ikU}} \quad (14)$$

Adım 6 İkili karşılaştırma matrisi elemanları r_{ik} için denklem 15 vasıtasıyla belirlilik değeri T_{ik} hesaplanır.

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ikU}^2 - \mu_{ikL}^2) - (v_{ikU}^2 - v_{ikL}^2) \quad (15)$$

Adım 7 Belirlilik değeri ve aralıklı çarpım matrisinin çarpılmasıyla normalizasyon öncesi ağırlık matrisi $T = (t_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ikL} + s_{ikU}}{2} \right) \tau_{ik} \quad (16)$$

Adım 8 Normalleştirilmiş öncelik ağırlıkları w_i Denklem 17 vasıtasıyla hesaplanır.

$$w_i = \frac{\sum_{k=1}^m t_{ik}}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m t_{ik}} \quad (17)$$

Kriter ağırlıklarının ardından alternatiflerin sıralanacak olduğu 2. aşama, uzmanların değerlendirmelerini toplayarak 9. Adım ile başlar ve alternatifleri önceliklendirerek sona erer.

Adım 9 Karar vericilerin her bir alternatifi Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla değerlendirmesi istenir ve ardından dilsel ifadeler aynı çizelge yardımıyla karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülerek Pisagor karar matrisleri $D = C_j(X_i)_{m \times n}$ oluşturulur. Burada $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ve $X_i (i = 1, 2, \dots, m)$ sırasıyla kriterleri ve alternatifleri göstermekte olup karar matrisi D aşağıdaki gibidir.

$$D = C_j(x_i)_{m \times n} =$$

$$\begin{bmatrix} ([\mu_{11}^L(u), \mu_{11}^U(u)], [V_{11}^L(u), V_{11}^U(u)]) & \dots & ([\mu_{1n}^L(u), \mu_{1n}^U(u)], [V_{1n}^L(u), V_{1n}^U(u)]) \\ ([\mu_{m1}^L(u), \mu_{m1}^U(u)], [V_{m1}^L(u), V_{m1}^U(u)]) & \dots & ([\mu_{mn}^L(u), \mu_{mn}^U(u)], [V_{mn}^L(u), V_{mn}^U(u)]) \end{bmatrix}$$

Adım 10 Birden fazla karar verici olması durumunda öncelikle her bir uzmanın ayrı ayrı karar matrisini oluşturması talep edilir. Ardından denklem 10'daki aralık değerli Pisagor bulanık ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) ile karar matrisleri birleştirilir.

Adım 11 Denklem 18 kullanılarak kriter ağırlıkları ile değerlendirme matrisleri çarpılarak ağırlıklı aralık değerli Pisagor bulanık karar matrisi $D = C_j(X_{iw})_{m \times n}$ oluşturulur.

$$\lambda. \tilde{a} = \left\{ \left[\sqrt{1 - (1 - a^2)^\lambda}, \sqrt{1 - (1 - b^2)^\lambda} \right], [c^\lambda, d^\lambda] \right\} \quad (18)$$

Adım 12 Aşağıdaki skor fonksiyonu vasıtasıyla ağırlıklı aralık değerli Pisagor bulanık karar matrisi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
& \text{Score}(C_j(x_{iw})) \\
&= \left((\mu_p^L(u))^2 + (\mu_p^U(u))^2 - (v_p^L(u))^2 - (v_p^U(u))^2 \right) / 2 \quad (19)
\end{aligned}$$

$$\text{Score}(\tilde{P}) \in [-1, 1]$$

Adım 13 Bir önceki adımda elde edilen skor değerleriyle aralık değerli Pisagor bulanık pozitif ideal çözüm (IVPF-PIS) X^* ve negatif ideal çözüm (IVPF-NIS) X^- ile hesaplanır.

$$X^* = \{C_j \max_i < \text{Score}(C_j(x_{iw})) > \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (20)$$

$$X^- = \{C_j \min_i < \text{Score}(C_j(x_{iw})) > \mid j = 1, 2, \dots, n\} \quad (21)$$

Adım 14 Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı Denklem 22 ve 23 vasıtasıyla hesaplanır.

$$\begin{aligned}
d(X_{ij}, X_j^+) &= \frac{1}{4n} \sum_{j=1}^n \left(|(\mu_{ij}^L)^2 - (\mu_j^+)^2| + |(\mu_{ij}^U)^2 - (\mu_j^+)^2| \right. \\
&\quad \left. + |(v_{ij}^L)^2 - (v_j^+)^2| + |(v_{ij}^U)^2 - (v_j^+)^2| \right) \quad (22)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d(X_{ij}, X_j^-) &= \frac{1}{4n} \sum_{j=1}^n \left(|(\mu_{ij}^L)^2 - (\mu_j^-)^2| + |(\mu_{ij}^U)^2 - (\mu_j^-)^2| \right. \\
&\quad \left. + |(v_{ij}^L)^2 - (v_j^-)^2| + |(v_{ij}^U)^2 - (v_j^-)^2| \right) \quad (23)
\end{aligned}$$

Adım 15 Denklem 24 vasıtasıyla her bir alternatifin yakınlık katsayısı elde edilir ve yakınlık katsayısına göre alternatifler sıralanarak en iyi çözüm bulunur.

$$\text{Yakınlık Katsayısı}_i = \frac{d(X_{ij}, X_j^-)}{d(X_{ij}, X_j^-) + d(X_{ij}, X_j^+)} \quad (24)$$

3. BULGULAR

Havayolu işletmeleri açısından uçak seçim kararının hangi kriterlere göre analiz edileceği ve bu kriterler üzerinden hangi uçak modelinin seçilmesi gerektiği bu çalışmanın konusu olarak incelenmektedir. Modelin uygulamasına geçilmeden önce uçak seçimi üzerine kapsamlı bir literatür taraması yapılmış, ardından farklı havayolu işletmelerinin filo planlama departmanında çalışan 3 uzman karar verici ile görüşülerek modelde değerlendirmeye alınmak üzere 6 kriter belirlenmiştir: Yakıt tüketimi (C1), işletme ve yedek parça maliyeti (C2), satın alma maliyeti (C3), maksimum koltuk kapasitesi (C4), menzil (C5), maksimum kalkış ağırlığı/MTOW (C6). Sonrasında kriterler açısından değerlendirilmek üzere yeni nesil geniş gövde yolcu uçakları arasından 8 alternatif uçak

modelinin alternatifler kümesi olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmada kullanılan alternatifler: B787-10 (A1), B787-9 (A2), B787-8 (A3), A350-1000 (A4), A350-900 (A5), A330-900 (A6), A330-800 (A7), A330-300 (A8) olarak belirlenmiştir.

Çalışmada değerlendirmeye alınan 6 kriter ve 8 alternatif ile KV1, KV2, KV3 olmak üzere 3 uzman karar vericinin değerlendirmeleri Bölüm 2.5. Aralık Değerli Pisagor Bulanık AHP-TOPSIS' te verilen adımlar üzerinden analiz edilmiştir. Her bir karar vericinin Tablo 3'te verilen dilsel skalayı kullanarak AHP anketine verdiği cevaplar sonucunda oluşan ikili karşılaştırmalar KV1, KV2 ve KV3 için sırasıyla Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. İkili Karşılaştırmalar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	EI, EI, EI	SLI, VHI, EI	SLI, SMI, SMI	EI, EI, EI	EI, EI, SMI	SLI, SMI, HI
C2		EI, EI, EI	SMI, LI, EI	SMI, VLI, EI	VHI, VLI, EI	SMI, SLI, SMI
C3			EI, EI, EI	EI, EI, SMI	SMI, SMI, SMI	SMI, SMI, VHI
C4				EI, EI, EI	HI, SMI, EI	SMI, SMI, HI
C5					EI, EI, EI	EI, EI, SMI
C6						EI, EI, EI

Her bir ikili karşılaştırma için klasik AHP yöntemindeki dilsel skala ve karşılık gelen klasik değerleri kullanılarak tutarlılık oranı hesap edilmiştir. KV1, KV2 ve KV3 için tutarlılık oranı sırasıyla 0.089, 0.071, 0.095 olarak hesaplanmış ve 0.1'den küçük olduğundan tüm karar vericilerin değerlendirmeleri tutarlı kabul edilerek modelin uygulanmasına geçilmiştir. Çalışmada eşit önem derecesine sahip 3 uzman karar vericinin değerlendirmeleri Tablo 3'teki dilsel skala baz alınarak karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılar ile eşleştirildiği ikili karşılaştırma matrisleri denklem 10'daki aralık değerli Pisagor ağırlıklı aritmetik (IVPFWA) operatörüyle birleştirilmiş ve aşağıdaki ikili karşılaştırma matrisi elde edilmiştir (Tablo 5).

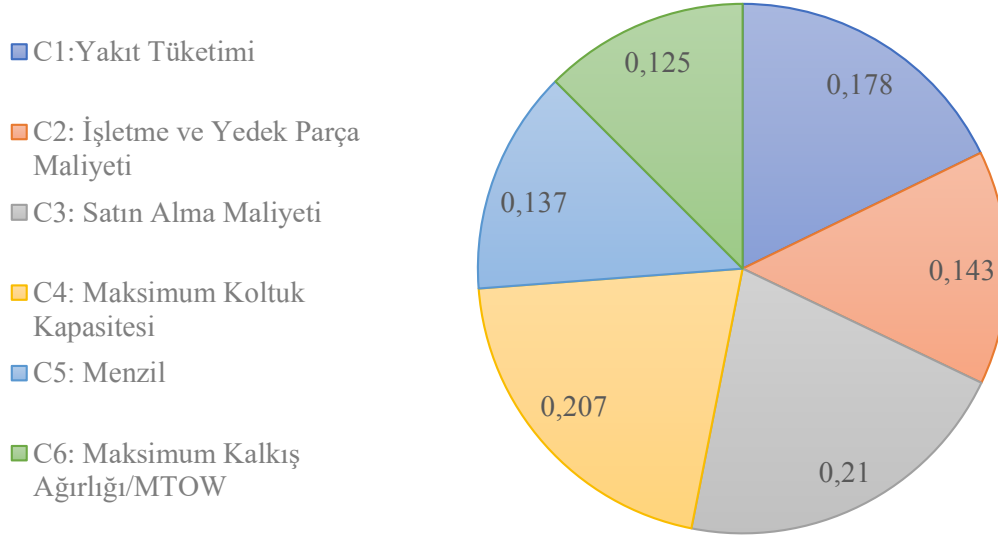
Tablo 5. IVPFWA Operatörüyle Oluşturulmuş İkili Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.48, 0.62], [0.28, 0.42])	([0.42, 0.55], [0.35, 0.48])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.44])
C2		([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.37, 0.5], [0.4, 0.53])	([0.36, 0.49], [0.42, 0.56])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.46])	([0.42, 0.55], [0.35, 0.48])
C3			([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])	([0.47, 0.6], [0.3, 0.43])	([0.54, 0.68], [0.22, 0.36])
C4				([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.48, 0.61], [0.29, 0.42])	([0.5, 0.63], [0.27, 0.4])
C5					([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.41, 0.54], [0.35, 0.48])
C6						([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])

Birleştirilmiş karar matrisi üzerinden Bölüm 2.5.'deki adım 4-5-6-7 uygulanmış ve sonuçlarında sırasıyla fark matrisi, aralıklı çarpım matrisi, belirlilik değeri ve Tablo 6'daki normalizasyon öncesi ağırlık matrisleri hesaplanmıştır. Sonrasında Denklem 17 vasıtasıyla normalize edilmiş öncelik ağırlıkları Şekil 2'deki gibi elde edilmiştir

Tablo 6. Normalizasyon Öncesi Ağırlık Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1.00	1.52	1.04	0.83	1.00	1.32
C2	0.66	1.00	0.76	0.68	1.27	1.04
C3	0.96	1.32	1.00	1.00	1.41	2.22
C4	1.20	1.48	1.00	1.00	1.49	1.73
C5	1.00	0.79	0.71	0.67	1.00	1.00
C6	0.76	0.96	0.45	0.58	1.00	1.00

**Şekil 2.** Kriterlerin Normalize Edilmiş Öncelik Vektörü

Kriter ağırlıklarının bulunmasıyla birlikte 1. Aşama tamamlanmış, ardından karar vericilerin her bir kriter için alternatifleri değerlendirmesiyle modelin 2. Aşaması uygulanmaya başlamıştır. Her bir karar vericinin Tablo 3'teki dilsel skala yardımıyla alternatifleri değerlendirmesi ve ardından ifadelerin aynı tablo yardımıyla karşılık gelen aralık değerli Pisagor bulanık sayılara dönüştürülerek oluşturulan karar matrisleri KV1, KV2 ve KV3 için sırasıyla Tablo 7, 8 ve 9 ile aşağıda sunulmuştur.

Tablo 7. KV1 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A3	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A4	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A5	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])

A6	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A7	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A8	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])

Tablo 8. KV2 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A3	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A4	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A5	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A6	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.60], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A7	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A8	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.30, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])

Tablo 9. KV3 Tarafından Yapılan Değerlendirme Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])
A3	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])
A4	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])
A5	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A6	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])
A7	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.21, 0.34], [0.56, 0.69])	([0.12, 0.25], [0.65, 0.78])
A8	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.38, 0.51], [0.38, 0.51])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.30, 0.43], [0.47, 0.60])	([0.47, 0.60], [0.30, 0.43])	([0.74, 0.87], [0.03, 0.16])

Karar vericilerin yapmış olduğu sözel değerlendirmeler Tablo 3'teki aralık değerli Pisagor bulanık sayı karşılıkları üzerinden Denklem 10'daki aralık değerli Pisagor bulanık ağırlıklı aritmetik ortalama (IVPFWA) ile alternatiflerin kriterler bakımından değerlendirildiği karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 10. IVPFWA Operatörü ile Birleştirilmiş Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.59, 0.73], [0.14, 0.31])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.54, 0.67], [0.23, 0.37])	([0.45, 0.58], [0.31, 0.45])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.34])	([0.65, 0.78], [0.12, 0.25])
A2	([0.48, 0.61], [0.29, 0.42])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])	([0.59, 0.73], [0.14, 0.32])	([0.6, 0.74], [0.13, 0.3])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.56, 0.7], [0.2, 0.35])
A3	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.57, 0.7], [0.2, 0.33])	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.5, 0.63], [0.26, 0.4])	([0.59, 0.73], [0.14, 0.32])	([0.57, 0.71], [0.19, 0.33])
A4	([0.66, 0.8], [0.07, 0.24])	([0.64, 0.78], [0.1, 0.26])	([0.56, 0.71], [0.16, 0.35])	([0.56, 0.7], [0.16, 0.35])	([0.69, 0.83], [0.06, 0.21])	([0.71, 0.85], [0.05, 0.19])
A5	([0.63, 0.77], [0.11, 0.27])	([0.71, 0.85], [0.05, 0.19])	([0.51, 0.64], [0.26, 0.4])	([0.66, 0.8], [0.07, 0.24])	([0.62, 0.75], [0.14, 0.28])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])
A6	([0.6, 0.74], [0.13, 0.3])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])	([0.51, 0.64], [0.26, 0.4])	([0.57, 0.72], [0.15, 0.33])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.66, 0.79], [0.09, 0.24])
A7	([0.43, 0.56], [0.33, 0.47])	([0.59, 0.72], [0.17, 0.31])	([0.37, 0.5], [0.4, 0.54])	([0.45, 0.58], [0.31, 0.45])	([0.48, 0.61], [0.29, 0.43])	([0.56, 0.69], [0.21, 0.37])
A8	([0.57, 0.72], [0.15, 0.33])	([0.55, 0.68], [0.21, 0.35])	([0.46, 0.59], [0.31, 0.44])	([0.48, 0.62], [0.28, 0.42])	([0.61, 0.75], [0.12, 0.29])	([0.68, 0.82], [0.08, 0.22])

Aralık değerli Pisagor bulanık sayının bir skaler ile çarpımını gösteren denklem 18'deki şekilde Şekil 2'deki kriter ağırlıkları ile Tablo 10'daki birleştirilmiş karar matrisi çarpılmış ve aşağıdaki ağırlıklı karar matrisi elde edilmiştir (Tablo11).

Tablo 11. IVPFWA Operatörü ile Birleştirilmiş Ağırlıklı Karar Matrisi

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	([0.91, 0.95], [0.7, 0.81])	([0.93, 0.96], [0.78, 0.84])	([0.88, 0.92], [0.73, 0.81])	([0.85, 0.89], [0.78, 0.84])	([0.92, 0.95], [0.81, 0.86])	([0.95, 0.97], [0.77, 0.84])
A2	([0.88, 0.92], [0.8, 0.86])	([0.95, 0.97], [0.69, 0.8])	([0.89, 0.94], [0.67, 0.79])	([0.9, 0.94], [0.66, 0.78])	([0.93, 0.96], [0.79, 0.85])	([0.93, 0.96], [0.82, 0.88])
A3	([0.86, 0.9], [0.82, 0.87])	([0.92, 0.95], [0.79, 0.85])	([0.84, 0.89], [0.8, 0.85])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.93, 0.96], [0.77, 0.86])	([0.93, 0.96], [0.81, 0.87])
A4	([0.93, 0.96], [0.62, 0.77])	([0.94, 0.96], [0.72, 0.82])	([0.89, 0.93], [0.68, 0.8])	([0.88, 0.93], [0.68, 0.8])	([0.95, 0.97], [0.68, 0.81])	([0.96, 0.98], [0.68, 0.81])
A5	([0.92, 0.95], [0.68, 0.79])	([0.95, 0.98], [0.65, 0.79])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.92, 0.96], [0.57, 0.74])	([0.94, 0.96], [0.77, 0.84])	([0.95, 0.97], [0.72, 0.83])
A6	([0.91, 0.95], [0.7, 0.81])	([0.95, 0.97], [0.69, 0.8])	([0.87, 0.91], [0.75, 0.83])	([0.89, 0.93], [0.67, 0.79])	([0.93, 0.96], [0.79, 0.85])	([0.95, 0.97], [0.74, 0.84])
A7	([0.86, 0.9], [0.82, 0.87])	([0.93, 0.96], [0.78, 0.84])	([0.81, 0.86], [0.83, 0.88])	([0.85, 0.89], [0.78, 0.84])	([0.91, 0.94], [0.84, 0.89])	([0.93, 0.95], [0.82, 0.88])
A8	([0.91, 0.94], [0.71, 0.82])	([0.92, 0.95], [0.8, 0.86])	([0.85, 0.9], [0.78, 0.84])	([0.86, 0.9], [0.77, 0.84])	([0.94, 0.96], [0.75, 0.84])	([0.95, 0.97], [0.72, 0.83])

Ardından ağırlıklı karar matrisi Denklem 19'deki skor fonksiyonu vasıtasıyla durulaştırılmış ve Tablo 12'de sunulmuştur.

Tablo 12. Ağırlıklı Karar Matrisinin Skor Fonksiyon Değerleri

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	3.366	2.676	2.309	1.554	1.914	2.003
A2	2.036	3.414	2.800	2.818	2.052	1.578
A3	1.401	2.507	1.379	1.832	1.868	1.616
A4	3.864	3.067	2.589	2.253	2.533	2.251
A5	3.433	3.689	2.079	3.421	2.182	2.133
A6	3.137	3.414	2.079	2.631	2.052	2.047
A7	1.401	2.676	0.907	1.554	1.458	1.546
A8	2.913	2.183	1.742	1.642	2.156	2.133

Her kriter için skor fonksiyonlarının aldığı en büyük ve en küçük değerleri üzerinden pozitif ideal çözüm (PIS) ve negatif ideal çözüm (NIS) saptanmıştır. Bulunan çözümler Tablo 12’de en büyük değerler sarı ile, en küçük değerler ise gri renk ile gösterilmiştir. Tablo 11’deki ağırlıklı değerler en büyük ve en küçük değerlere karşılık gelmesine göre pozitif ve negatif ideal çözüm olarak Tablo 13’te sunulmuştur.

Tablo 13. Aralık değerli Pisagor Bulanık Pozitif ve Negatif İdeal Çözümler

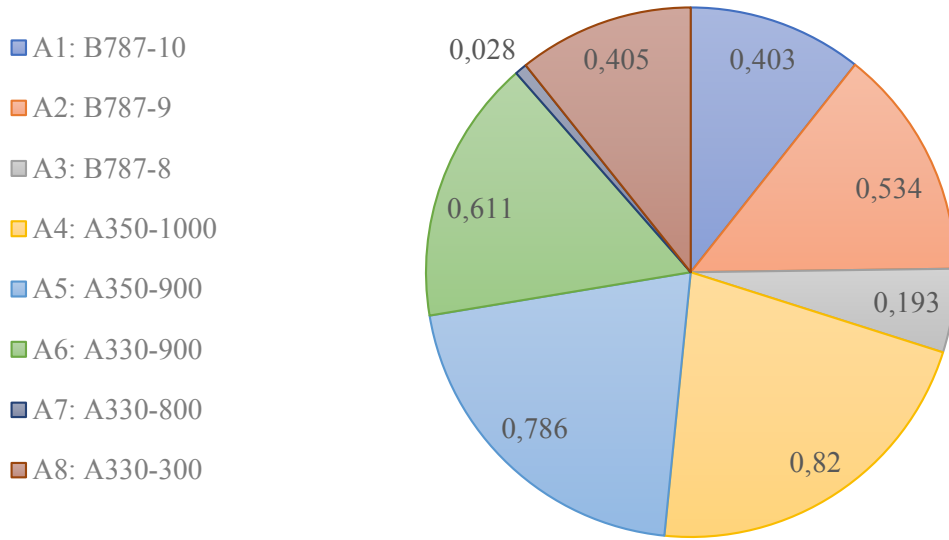
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
X^+	[[0.93, 0.96], [0.62, 0.77]]	[[0.95, 0.98], [0.65, 0.79]]	[[0.89, 0.94], [0.67, 0.79]]	[[0.92, 0.96], [0.57, 0.74]]	[[0.95, 0.97], [0.68, 0.81]]	[[0.96, 0.98], [0.68, 0.81]]
X^-	[[0.86, 0.9], [0.82, 0.87]]	[[0.92, 0.95], [0.8, 0.86]]	[[0.81, 0.86], [0.83, 0.88]]	[[0.85, 0.89], [0.78, 0.84]]	[[0.91, 0.94], [0.84, 0.89]]	[[0.93, 0.95], [0.82, 0.88]]

Son olarak, her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan mesafeleri sırasıyla denklem 22 ve 23 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Denklem 24 ile mesafeler üzerinden yakınlık katsayısı hesaplanmış ve elde edilen bilgiler Tablo 14’de sunulmuştur.

Tablo 14. İdeal Çözümlere Olan Mesafeler ve Yakınlık Katsayıları

	$d(X_{ij}, X_j^+)$	$d(X_{ij}, X_j^-)$	Yakınlık Katsayısı
A1	0.087	0.059	0.403
A2	0.068	0.078	0.534
A3	0.118	0.028	0.193
A4	0.026	0.120	0.820
A5	0.031	0.115	0.786
A6	0.057	0.089	0.611
A7	0.142	0.004	0.028
A8	0.087	0.059	0.405

Yakınlık katsayıları büyükten küçüğe doğru sıralandığında en uygun alternatif A4 (A350-1000) olarak bulunmuş ve tüm alternatif sıralaması $A4 > A5 > A6 > A2 > A8 > A1 > A3 > A7$ şeklinde çıkmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Alternatiflerin Sıralaması

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Küresel ekonominin ve şehirleşmenin büyümesi havayolu taşımacılığını büyüyen bir pazar olarak tutmaya devam etmektedir. İki büyük ticari uçak üreticisi olan Airbus ve Boeing, yaptıkları pazar araştırmasına göre, havayolu trafiğindeki büyümenin devam edeceğini tahmin etmektedir. Airbus, “Global Market Forecast 2019-2038” araştırmasına göre, 20 yıllık aralık için yüzde 4.3’lük büyüme öngörürken, Boeing, “Commercial Market Outlook 2019-2038” araştırmasına göre, yüzde 4.6’lık büyüme öngörmektedir. Bu büyüme tahminlerine göre, havayolu taşımacılığını kullanan yolcu sayısının giderek artması beklenmektedir. Yolcu sayısındaki artış beraberinde uçak sayısını da artıracaktır. Airbus, aynı araştırmaya göre, 2019’da 22.680 olan yolcu uçak sayısının 2038’de 47.680 olacağını öngörmektedir (Tezcan ve Aktaş, 2002: 3). Benzer şekilde, küresel bir danışmanlık şirketi olan Oliver Wyman’ın havacılık sektörünün geleceğine yönelik 2018 yılında yayınladığı raporda aynı yıl için dünya genelinde 5273 adet geniş gövdeli yolcu uçağının kullanımda olduğu, 2028 yılına yönelik tahminde ise bu sayının 7377 olacağı belirtilmektedir (Oliver Wyman, 2018).

Havayolu taşımacılığının temel bileşenlerinden birisi olan uçaklar yüksek satın alma maliyetleri nedeniyle havayolu işletmeleri için en önemli maliyet kalemlerinden birisi olmaktadır. Bu nedenle yatırım sermayesinin geri kazanılması süreci ancak uzun vadede ve farklı uçak alternatifleri arasından piyasa koşulları ile havayollarının gereksinimlerini en iyi şekilde karşılayan uçak tip (ler)inin seçimi ile tamamlanabilecektir. Farklı uçak alternatifleri arasından filoya dahil edilmesi gereken uçak tip (ler)inin seçimi havayollarının kurumsal ve operasyonel performanslarını, kapasite geliştirmelerini ve sürdürülebilirliklerini etkileyen stratejik bir karardır. Mevcut literatür, uçak tipi seçiminde çeşitli niceliksel ve niteliksel faktörlerin önemli bir rol oynadığı ve bu durumun da filo planlamacıları açısından yüksek karmaşıklık düzeyinde bir problem olduğunu göstermektedir. Bu noktadan hareketle bu

araştırmada, havayolu işletmelerinin yatırım planları içerisinde çok büyük bir yere sahip olan uçak tipi seçimi planlarının daha doğru yapılabilmesine yardımcı olmak ve literatüre katkı sağlayabilmek için geniş gövdeli yolcu uçak tipi seçimi problemi ele alınmıştır. Karar problemindeki belirsizlik ve sözel ifadelerin daha iyi modellenmesi, çalışmada bulanık ÇKKV yöntemlerinin kullanılmasına sebebiyet vermiştir. Bu bağlamda farklı bulanık küme uzantıları ve değişik ÇKKV yöntemleri incelenmiş, bulanık kümelerle görece yeni bir yaklaşım olması ve uçak seçim alanında bir çalışma bulunmaması sebebiyle aralık değerli Pisagor bulanık kümeler ve bu tip karar problemlerinde yaygın kullanımı ve güvenilirliği nedeniyle bulanık AHP-TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. Çalışmada kriter ağırlıklarının hesaplanmasında aralık değerli Pisagor bulanık AHP, alternatiflerin kriterler açısından değerlendirilmesinde ise aralık değerli Pisagor bulanık TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır.

Aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS metodolojisinin uçak seçim probleminde uygulanması sonucunda;

- IVPF-AHP yöntemi kullanılarak satın alma maliyetinin uçak seçiminde en önemli kriter olduğu tespit edilmiştir. Satın alma maliyetinin ardından ise sırayla koltuk kapasitesi, yakıt tüketimi, işletme ve yedek parça maliyeti, menzil ve maksimum kalkış ağırlığı/MTOW kriterleri gelmektedir.
- Metodolojinin ikinci aşamasını oluşturan IVPF-TOPSIS yöntemi ile alternatif uçak tipleri sıralandığında, A350-1000 uçak tipinin ideal çözüme en yakın alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer alternatiflerin ideal sıralaması ise şu şekilde tespit edilmiştir: A350-900, A330-900, B787-9 Dreamliner, A330-300, B787-10 Dreamliner, B787-8 Dreamliner, A330-800.

Bu çalışmada uçak tipi seçiminde literatürde henüz kullanılmamış bir model kurularak bu alanda aralık değerli Pisagor bulanık AHP-TOPSIS tekniği bu probleme uygulanmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilecek gelecek çalışmalarda alternatif uçak sayısı ve kriter sayısının artırılması modeli destekleyecektir. Metot içerisinde bilgisine başvuru uzman sayısının daha artırılması kriter önemlerinin belirlenmesinde önemli bir fayda sağlayacaktır. Ayrıca oluşturulan bu model, farklı sektörlerde de uygulanabilecek ve gerçekleştirilen bu çalışma benzeri ÇKKV problemlerine uygulanma aşamasında rehberlik edebilecektir.

Bu uygulamada önerilen yöntemlerin gelecek çalışmalarda farklı bulanık kümeler ile geliştirilmesi ve var olan yöntemlerle kıyaslanması sağlanabilir. Bu çalışmada ÇKKV yöntemlerinden yalnızca iki tanesi kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda TOPSIS yerine VIKOR ya da WASPAS gibi başka ÇKKV yöntemlerinden de yararlanılabilir. Ayrıca tip-2 bulanık kümeler ya da resim bulanık kümeler de kullanılabilir. Bu bulanık kümeler kullanılarak elde edilen sonuçlar bu çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılabilir ya da çalışmada kullanılan aralık değerli bulanık kümeler yerine üçgensel ya da yamuk bulanık kümeler kullanılarak da çalışmalar yeniden ele alınabilir.

KAYNAKÇA

- Akyurt, İ. Z., & Kabadayı, N. (2020). Bulanık AHP ve bulanık gri ilişkisel analiz yöntemleri ile kargo uçak tipi seçimi: Bir Türk havayolu firmasında uygulama. *Journal of Yasar University*, 15(57), 38-55.
- Akyurt, İ. Z., & Yaşlıoğlu, D. (2018). Havacılık sektöründe ekip planlama yönetimi: Bir Türk havayolu örneği. *Journal of Business Research Turk*, 10(1), 424-446.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık mantık: Bulanıklılık kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85.
- Belobaba, P., Odoni, A., & Barnhart, C. (2009). *The global airline industry*. West Sussex: Wiley Publication.
- Bruno, G., Esposito, E., & Genovese, A. (2015). A model for aircraft evaluation to support strategic decisions. *Expert Systems with Applications*, 42(13), 5580-5590.
- Chen, C. T. (2000). Extensions of the TOPSIS for Group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114, 1-9.
- Dozic, S., & Kalic, M. (2014). An AHP approach to aircraft selection process. *Transportation Research Procedia*, 3, 165-174.
- Durmaz, K. İ., & Gencer, C. (2020). JSMAA tabanlı yeni bir eklenti: SWARA-JSMAA ve akrobasi uçağı seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1487-1498.
- Garg, H. (2016). A novel accuracy function under interval-valued Pythagorean fuzzy environment for solving multicriteria decision making problem. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 31, 529-540.
- Gerede, E. (2015). *Havayolu Taşımacılığı ve ekonomik düzenlemeler teori ve Türkiye uygulaması*. Ankara: Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Güntut, C. (2019). *Bulanık Topsis yöntemiyle düşük maliyetli bir havayolu için filo planlama optimizasyonu* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag.
- İlbahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2019). A state-of-the-art review on multi- attribute renewable energy decision making. *Energy Strategy Rev*, 25, 18-33.
- İlbahar, E., Cebi, S., & Kahraman, C. (2020). Assessment of renewable energy alternatives with pythagorean Fuzzy WASPAS method: A case study of Turkey. *In Advances in Intelligent Systems and Computing*, 888-895.
- Kabak, M., & Erdebilli, B. (2021). *Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri - MS Excel ve software çözümlü uygulamalar*. Ankara: Nobel Yayın.
- Kahraman, C., Öztaysi, B., & Onar, S. C. (2016). A comprehensive literature review of 50 years of fuzzy set theory. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(Supplement 1), 3.
- Kartal, M. (2022). *Havayolu İşletmeleri için uçak seçim stratejisinde SWARA tabanlı EDAS ve COPRAS yöntemlerinin kullanımı* (Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi, Çorum.

- Kiracı, K., & Akan, E. (2020). Aircraft selection by applying AHP and TOPSIS in interval type-2 fuzzy sets. *Journal of Air Transport Management*, 89, 1-16.
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018a). Hava aracı seçim problemlerinde çok kriterli karar verme yöntemlerinin kullanılması ve bir uygulama. *Journal of Transportation and Logistics*, 3(1), 13-24.
- Kiracı, K., & Bakır, M. (2018b). Application of commercial aircraft selection in aviation Industry through multi-criteria decision making methods. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 16(4), 307-332.
- Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M., & Aydın, U. (2021). Türkiye’de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: Küresel bulanık AHP-TOPSIS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulama Dergisi*, 4(1), 27-58.
- Kocaoğlu, B., Odabaşoğlu, Ş., & Özaslan, İ. H. (2021). Türkiye’de pistonlu tek motorlu uçak seçiminde çok kriterli karar verme AHP ve TOPSIS yöntemlerinin kullanılması. *Journal of Aviation Research*, 3(2), 243-263.
- Lozano, J. M. S., & Rodriguez, O. N. (2020). Application of fuzzy reference ideal method (FRIM) to the military advanced training aircraft selection. *Applied Soft Computing Journal*, 88, 1-12.
- Oliver, W. (2018). Global Fleet & MRO market forecast commentary 2018-2028, <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2018/jan/2018-2028-fleetand-mro-forecast-commentary.html>. Erişim Tarihi: 23.08.2022.
- Özdemir, Y., Basligil, H., & Karaca, M. (2011). Aircraft selection using analytic network process: A case for Turkish airlines. *Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE) Vol II*, London, 9-13.
- Paksoy, T., Yapıcı Pehlivan, N., & Özceylan, E. (2013). *Bulanık küme teorisi (1st ed.)*. Ankara: Nobel Yayın.
- Peng, X., & Selvachandran, G. (2019). Pythagorean fuzzy set: State of the art and future directions. *Artificial Intelligence Review*, 52(3), 1873-1927.
- Peng, X., & Yang, Y. (2016). Fundamental properties of interval-valued Pythagorean fuzzy aggregation operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 31, 444-487.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic Hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation*. New York: McGraw-Hill.
- Sancar, S. (2022). *Pisagor bulanık AHP ve pisagor bulanık WASPAS yöntemleri ile bakım stratejisi seçimi: Gazete matbaası örneği* (Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi). İbn Haldun Üniversitesi, İstanbul.
- Schmitt, D., & Gollnick, V. (2016). *Air transport system*. New York: Springer.
- Seker, S., & Kahraman, C. (2020). Socio-economic evaluation model for sustainable solar PV panels using a novel integrated MCDM methodology: A case in Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038012120308351>). Erişim tarihi 27.08.2023.
- Şimşek, H., Özaslan, İ. H., & Eryılmaz, İ. (2022). Pilot Selection in Airline Organizations with the Analytical Hierarchy Process. *Journal of Aviation*, 6(2), 218-227. <https://doi.org/10.30518/jav.1111580>.

- Tezcan, M. C. (2022). Uçak Teknisyenlerinde negatif vijilans faktörlerin analitik belirlenmesi ve vijilans düzeylerinin ölçümü. *Journal of Aviation Research*, 4(1), 76-104.
- Tezcan, M. C., & Aktaş, B. B. (2022). İş sağlığı ve güvenliği performans değerlendirmesi: Uçak bakım organizasyonu üzerine bir araştırma. *OHS ACADEMY*, 5(1), 1-12.
- Wang, T., & Chang, T. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 33(4), 870-880.



Bu eser [Creative Commons Atf-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) ile lisanslanmıştır.



Air Warfare Over Europe: An Exploration of The Luftwaffe Experience

Burak ÇINAR¹

Araştırma Makalesi	DOI: 10.51785/jar.1372232	
Gönderi Tarihi: 06.10.2023	Kabul Tarihi: 17.02.2024	Online Yayın Tarihi: 28.02.2024

Abstract

The First World War was characterized by trench warfare, rendering infantry charges ineffective against integrated defence systems comprising barbed wires, rifles, machine guns, and howitzers. The introduction of new war machines, such as tanks and chemical weapons on the ground and aircraft in the air, reshaped the nature of warfare. Aircraft became imperative swiftly, and in the Second World War, it began to dominate warfare. In this article, the air war in the Second World War was discussed according to the rise and fall of the German air power after the theoretical developments mentioned in the first part. In the second part, the German air activities in early operations were explained. The third part was particularized to how the change in the air war on the extension and expansion of the war affected the German air power. The fourth part was on the strategic outcomes of the German attitude toward aviation technology. There are not strong claims made in this article; however, the interpretation of the subject aims to form the basis for further research.

Key Words: Second World War, Air War in Europe, Luftwaffe, Jet Fighters, Aviation Technology.

JEL Classification: M10, L93, L94.

Avrupa Üzerinde Hava Savaşı: Luftwaffe Deneyiminin Keşfi

Öz

Birinci Dünya Savaşı'na dikenli teller, tüfekler, makineli tüfekler ve obüslerden oluşan entegre savunma sistemini piyade hücumlarının delme şansı bulamadığı siper savaşı hâkim olmuştu. Onları destek amacıyla karada tanklar ve kimyasal silahlar, havada ise uçaklar gibi yeni savaş makineleri devreye sokuldu. Uçak hızla zorunluluk haline geldi ve İkinci Dünya Savaşı'nda savaşa hâkim olacak şekilde yükselmeye başladı. Bu makalede, birinci bölümde teorik gelişmelerden bahsedildikten sonra, İkinci Dünya Savaşı'ndaki hava savaşı, Alman hava gücünün yükseliş ve düşüşüne göre ele alınmıştır. İkinci bölümde erken harekâtlarda Alman hava faaliyetleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde hava savaşındaki değişimin savaşın uzaması ve yayılmasının Alman hava gücünü nasıl etkilediğine değinilmiştir. Dördüncü bölümde Almanya'nın havacılık teknolojisindeki tutumunun stratejik sonuçları ele alınmıştır. Bu makalede güçlü bir iddiada bulunulmamaktadır; ancak konunun yorumlanması daha sonraki araştırmalara zemin oluşturmayı amaçlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İkinci Dünya Savaşı, Avrupa Hava Savaşı, Luftwaffe, Jet Avcı Uçakları, Havacılık Teknolojisi.

JEL Sınıflandırma: M10, L93, L94.

¹ Doç. Dr., Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, burakcinar@ohu.edu.tr

INTRODUCTION

In the First World War, traditional infantry-based operations proved ineffective against technological advancements. Infantry battalions seemed to disintegrate when faced with the formidable defence systems comprising integrated barbed wires, rifles, machine guns, and howitzers. The introduction of newborn tanks, though promising, was akin to infants attempting to fulfil tactical obligations.

The emergence of air forces as a new branch of armies just before the Great War marked a significant shift. Primitive aircraft showcased the dynamic potential for development, outpacing progress in other branches during the early stages of the conflict. These aircraft swiftly replaced balloons in reconnaissance missions and demonstrated versatility in bombing or strafing ground targets.

Throughout the Great War, aircraft played multifaceted roles, serving in reconnaissance, bombing, strafing, maritime patrol, and interception missions. Primitive bomber aircraft conducted both tactical bombings and strategic operations, often in conjunction with zeppelins. The widespread use of aircraft led to their evolution, prompting warring parties to develop and produce thousands of diverse aircraft types during the war.

The First World War was the most exhaustive war up to that time. The restoration of Europe restricted military development in the early interwar period, which hampered all army branches. The development of aviation narrowed and largely shifted to civilian use, for postal services, passenger transportation, air racing, or aerial acrobatics. Many adventurers tried breaking records in the interwar period, making aviation popular in people's eyes.

Late in the interwar period, the political situation got hot, and the development of military aviation gained speed. In the latter part of the interwar period, the political climate intensified, and military aviation witnessed a rapid acceleration in development. As the Second World War approached, biplane technology came to an end, and modern monoplane types emerged. On the eve of the war, the Germans achieved maiden flights with both rocket and jet planes. Those developments in aviation indicated that the forthcoming war would be beyond the First World War's dynamism.

This research is based on analyzing some events in World War II aviation, focusing on the German air power. It is divided into four parts. In the first, the effects of theories on the air battles of the Second World War were explained. Second, the role of the air forces in the first half of the war is expressed. This is to differentiate aerial struggles between two world wars. Therefore, some cases in the Second World War are emphasised. The third part includes how the air war changed during the extended war. The fourth is on technological issues in the same period.

1. FLOATING THEORIES

Air Warfare was initially concentrated on the tactical targets supporting the ground units. Initiating with preliminary considerations, it is contended that early perspectives suggest the potential for utilizing air power in a strategic capacity, wherein its capabilities could propel a nation towards achieving total victory. Strategic bombings began in the First World War, when a German zeppelin dropped bombs on the east coast of England, killing or injuring

twenty people in January 1915. On May 25, 1917, long-range German Gotha bombers began to bomb Britain, stepping in as the first strategic bombers (Neillands, 2003: 12). However, the volume and effect of early strategic bombings were not enough to win the war. Therefore, many aviation experts believed coercive bombings could have ended the war by destroying the enemy's industries and breaking morale.

Italian General Giulio Douhet, stemming from an artillery background, stands as a pioneering figure in the theoretical advancements of aerial warfare. He observed early actions in aviation between 1908 and 1930 (Meilinger, 2020: 1), the period when the aircraft were primitive to conduct decisive operations; nonetheless, he was capable of creating the first universal claims on the strategic importance of owning an air power. In the Tripolitanian War between Italy and the Ottoman Empire, Italian pilots began dropping small bombs by hand. During the war in Tripolitania, Italian aircraft were also used for artillery spotting, transportation of supplies and personnel, and bombing troops, supplies, and facilities, both day and night (Meilinger, 2020: 3). Douhet focused on the bombing role of the aircraft much more. In the early days of the First World War, he emphasised massive bombing and claimed the importance of possessing a 500-bomber armada that could drop 125 tons of bombs daily over enemy targets (Meilinger, 2020: 3-4). His first strategic claim was the bombing of Istanbul with a bomber force that could drop 100 tons daily and force the Ottoman government to open the Dardanelles to Allied shipping (Meilinger, 2020: 5). Alexander de Seversky later remarked that such a type of attack, aiming at the heart of the octopus, effectively paralyzes its tentacles (Seversky, 1978: 240). This strategic approach was proposed by Seversky against Japan during the latter stages of the Second World War.

On the other hand, in Britain, Marshal of the R.A.F. Hugh Trenchard, was one of the early defendants as well as an operator of strategic bombing in late World War II. He successfully directed his Royal Flying Corps and later R.A.F. bombers to the targets in Western Germany about at 320 km from the bases in France. One of his trainees was Arthur Tedder, a prominent military air leader in the Second World War (Grant, 2004: 79-80).

In the interwar period, air forces mutually owned strategic bombing aircraft, notwithstanding, tactical bomber production got the most shares. Major General Walther Wever, Chief of Staff of the *Luftwaffe* (German Air Forces, 1933-1946) in 1935-1936, pointed out that the objective of an air force was to defeat enemy armed forces and outlined its operational tasks in five clauses. The fifth clause, "to paralyze the enemy armed forces by stopping production in the armaments factories" (Corum, 1977: 138), indicates the significance of strategic bombing in Douhet's way. Wever saw *Luftwaffe* as not a supportive branch; conversely, he offered air forces as a strategic arm that could prevent enemy reserves from reaching the front (Corum, 1977: 138). It is noteworthy that a primary factor contributing to Germany's defeat on the Eastern Front was the Red Army's adept management of strategic reserves.

In 1932, British politician Stanley Baldwin underlined the importance of strategic bombing, telling the British House of Common that "there is no greater cause of that fear than the fear of the air" and pointing out the appalling speed of an air attack. He also marked the dual role of a transport aircraft in both civilian and military contexts (Lord President of the Council

Stanley Baldwin's speech, 1932). Five years after Baldwin's speech, the air wing of the German Legion *Kondor* put it into practice with a small-scale test in Guernica, Spain, in 1937, followed by medium-scale bombings of Rotterdam in 1940 and Belgrade in 1941, and a large-scale bombing of London in 1940. The temporality and limitation of these bombings stemmed from the fact that they were carried out by medium bombers, as the Luftwaffe had not yet deployed a considerable number of strategic bombers. In contrast, the RAF and the USAAF spearheaded the extensive production of strategic bombers.

Germans' dealing with bombers' roles restrained the evolution of the German air power. Wever's sudden death in 1936 and lack of strategic resources (Overy, 1981: 132) in Germany formed the *Luftwaffe's* near-future tendency to use tactical means rather than strategic ones based on the production of smaller aircraft (Corum, 1977: 138; Macksey, 1978: 46-47). *Luftwaffe* possessed strategic bombers, but they were never produced in a wide range. Focused on the *Blitzkrieg*, the Germans tended to use air power to support the panzer units as a part of their new method of combined arms operation. Nevertheless, if the war was not out in 1939, Göring's aim was to create a force of 2.400 medium and 800 heavy bombers in 1942 (Overy, 1981: 132).

The Germans displayed a reluctance to employ strategic bombing extensively, as they prioritized the formation of large air units for tactical accomplishments. Nevertheless, they intended to use air power for offensive purposes. *Luftwaffe* Major-General Helmuth Wilberg prepared "*Luftwaffe* Regulation 16" in 1935; the primarily offensive nature of air power was stressed: "From the start of the conflict, the air forces bring the war to the enemy" (Corum, 1977: 140). It rejected Douhet's theory, as stated: "Attacks against cities made for the purpose of inducing terror in the civilian populace are to be avoided on principle" (Corum, 1977: 143-144). Instead, the Germans made air power the second pillar of their new-born theory, the *Blitzkrieg*, developed by General Heinz Guderian who announced in his 1937-published book "*Achtung Panzer!*" It was based on a concentrated panzer assault on the weakest point of the enemy's defence, to penetrate it, fall back to the enemy concentration, cut the enemy communication, and surround massive enemy units. This became the Third Reich's main instrument for expansion. To ease ground forces' duties, panzer forces needed immediate aerial close support; and the *Sturzkampfgeschwader*² units dominated the skies by the beginning of the operation. This introduced the first efficient direct air-ground collaboration at the tactical level, and it gave air power an important role. The interaction between panzer platoons and Junkers Ju-87 *Stuka* dive-bombers was facilitated through UHF antennas, and that resulted in heightened successes across tactical, operational, and strategic levels. Assault aircraft underwent significant advancements in both armour and armaments, enhancing their protection, firepower, and utilization of guns and rockets. The Germans specifically developed the Hs-129 for anti-tank missions, and it entered into service in 1942.

The Superiority of air power means many things on a tactical level, but it is hard to say it is the only winner. This thought was created by American military thinkers, like Harry A.

² German dive-bomber squadron. According to the *Luftwaffe's* organization, a *Geschwader* had 94 aircraft including a *Stab* (staff) with four aircraft and three *Gruppen*. A *Gruppe* had 30 aircraft including a *Stab* (staff) with three aircraft and three *Staffeln* each with nine aircraft. From the mid-war period several fighters *Gruppen* operated a fourth *Staffel* and, if all four had strengths of 16 aircraft; with three aircraft of *Gruppe Stab*, each of those *Gruppen* were established at 67 aircraft (Price, 1997: 16-17).

Sachaklian, William L. Mitchell, and Alexander P. de Seversky, who carried air dominance to a geopolitical theory. The Wright Brothers before them, with their technical view, saw their new machine make future wars impossible; they estimated the effects of the air war in the future better than all other soldiers. Aviation technologies went far during the Second World War, and the inauguration of early jets heralded the war in the near future as hard enough that in a new total war, the belligerents could never ask for World War I-type attrition in the air. Nevertheless, it has not been tested because the retaliatory effects of conventional weapons were all shadowed by the rapid development of nuclear weapons. At least, the geopolitical aspect of the world's dominance via air power faded. The qualification of air power is strategically more defensive than offensive, as the Wright Brothers said before.³ The inauguration of jets legitimated the Wright Brothers for the next war. Aircraft carrying atomic bombs and ALBMs (Air-Launch Ballistic Missiles) equipped with nuclear warheads make us think the aircraft can be more offensive. Having the most deterrence makes nuclear weapons most defensive on a strategic level. Nevertheless, we should distinguish the terms into two categories, the era of conventional weapons and the era of nuclear weapons. In 1962, during the Missile Crisis in Cuba, both sides proved they were not courageous enough to put the military procedures into effect, even after mutual ultimatums.

The successes of all theories on aerial warfare in the Second World War can be subject to arguable validity. The effectiveness, weighed against moral values and the impact on humanity, becomes two questionable criteria. The debatable nature arises when considering whether the strategic bombings were deemed fruitful, even if they came at the cost of tens of thousands of civilian lives. As a part of the combined force, the air forces had their own duties for one side; otherwise, it is hard to say for the losers. The Germans' exertion in the field and in R&D was not less than that of their enemies, and they had the same theoretical approaches. However, the problem of losing the air war was not everything in Germany; the country succeeded in the most production effort in 1944, while the massive bombings increased its effect. The problem for Germany was basically two-front warfare between the Soviet Union, which had the most powerful ground forces, and the United States, which had the most powerful air force.

Beginning with Douhet, early aviators believed air power was properly used to lead armies and navies to organise on a new basis, but that did not mean air power would replace them (Overy, 1981: 15). The effect of air power on the sea was demonstrated during an exercise in 1919 by William Mitchell, bombing the obsolete German battleship SMS *Ostfriesland* (Correll, 2021). During the interwar period, the American, Japanese, and British aircraft carriers were active. The Germans were aware of those developments, and they also planned to build aircraft carriers, but they had to cancel. Nevertheless, the Germans could control the

³ Wright Brothers noted to history in 1917: When my brother and I built and flew the first man-carrying flying machine, we thought that we were introducing into the world an invention which would make further wars practically impossible. That we were not alone in this thought is evidenced by the fact that the French Peace Society presented us with medals on account of our invention. We thought governments would realize the impossibility of winning by surprise attacks, and that no country would enter into war with another of equal size when it knew that it would have to win by simply wearing out its enemy. Nevertheless, the world finds itself in the greatest war in history. Neither side has been able to win on account of the part the aeroplane has played. Both sides know exactly what the other is doing. The two sides are apparently nearly equal in aerial equipment, and it seems to me that unless present conditions can be changed, the war will continue for years. *Orville to C. M. Hitchcock, June 21, 1917*, http://www.smithsonianeducation.org/educators/lesson_plans/wright/flights_future.html (19.10.2020).

eastern side of the North Atlantic efficiently. However, by political means, the Germans lacked air-sea coordination. *Reichsmarschall*⁴ Hermann Göring, the owner of all German air power, was very reluctant to give any air support to another branch of the armed forces. Lacking substantial air power, the *Kriegsmarine* (German Navy, 1935-1945) found itself unable to execute swift responses to incidents. This inefficiency significantly impacted the effectiveness of sea battles involving the *Kriegsmarine*, leading to operational challenges for both German U-boats and the High Seas fleet during the latter half of the war.

2. EARLY AIR OPERATIONS

Conditions of the First World War made the air war conventional. Air power displayed her new-born capabilities with primitive machines; nevertheless, many military and political leaders saw its importance and the bright future ahead. Countries without air power have not had a chance to resist yet. However, development in aerial technologies in the interwar period made the air force a leading branch of the armed forces.

German air power was a modern organisation that played a major role in the German expansion in Europe. Germany's anti-clockwise invasion of Austria, Czechoslovakia, Poland, Denmark, Norway, the Benelux, France, Britain, North Africa, the Balkans, and Russia was hampered only by the British efforts in the Battle of Britain. The scenario resembled an extended air duel, wherein the Luftwaffe struggled to overpower the RAF, hindering the preparation for a German invasion of Britain. This development highlighted the constraints of German air power, suggesting that the efficiency of the Luftwaffe could diminish with the prolonged duration of the war.

The extended war divided *Luftwaffe*'s power barely in three, among the east, the west, and the south. However, the *Luftwaffe* had to send squadrons to Norway, Sicily, Sardinia, and the Balkans due to security reasons, because it was responsible for the protection of all European skies in 1941, a very large area compared to the end of the Battle of Britain. German allies also had indigenous aircraft types, but they could not be matched with modern German fighters and bombers as well as their opponents had. Germany's factories transferred some aircraft to strengthen her allies' air power.

Before the USA entered the war, Germany and her allies had enough aircraft production to overcome the British and Soviet aviation technologies. Even U.S. involvement in the war could not break the German resistance in the air until February 1944.

2.1. Modern Air War Becomes Imperative

Blitzkrieg gave leading role to the panzer forces, as it made the head assistant of the panzers, close-support aircraft. The conduct of operations with combined arms made the system a little more complex; the actions of both panzers and air forces were prominent. Hence, the Second World War changed the character of air warfare and made it imperative. Both in Poland, Norway, and France, the *Luftwaffe*'s warplanes swept the skies and made it possible to support the ground forces effectively. In Poland and France, the *Luftwaffe* conducted its operations as part of the system integrated with the ground units. In Norway, the *Luftwaffe*'s

⁴ *Reichsführer* is a unique rank for Herman Göring who was in charge after Hitler as well as the chief of the *Luftwaffe*.

duty was expanded to actualize the landings along with the *Kriegsmarine*. After the landings, the *Luftwaffe* would go back to the main role in which the German aircraft conducted operations to support the ground units. However, the *Luftwaffe*'s role was expanded again in the Battle of Britain by two steps. First, the *Luftwaffe* units were laid a burden on preparing the preconditions for landings. Second, it had to support the *German High Seas Fleet*. After the landings, *Luftwaffe*'s role would be back to support the ground forces. The Battle of Britain came after three campaigns in Poland, Norway, and France. Following a period of wear and tear, the *Luftwaffe*'s role experienced a resurgence. However, this miscalculation marked the Germans' initial aerial delusion at the operational level, leading to strategic consequences.

2.2. Differentiated Air Warfare

Due to light casualties, the campaign in Poland was successfully completed by the *Luftwaffe*. After Poland, the *Wehrmacht* (German Armed Forces, 1935-1945) continuously forced its limit during the first half of the war. The first high-risk operation was directed to Norway, which required an overseas operation, while the German offensive to the Benelux and France was very close. This brought a high-risk, strange air operation to Norway.

In Norway, the Germans had disadvantages in the beginning. Due to restricted capabilities, the German plan was based on deception, surprise, and attack at once on key objectives such as ports and airfields. *Luftwaffe* aimed to capture airfields in the hinterland to provide immediate air support to both sea and ground units, secure Norwegian coasts, and provide close support for further inland operations by April 9, 1940. There was a great problem: *Luftwaffe*'s fighters could not have enough fuel to get back to Germany. The first fighter waves, including Messerschmitt Bf-110s, were long-range fighters with two propellers and two engines that would have landed on enemy airfields if the paratroopers had not captured them so quickly. In fact, paratroopers and out-of-fuel German fighters captured those airfields simultaneously in some cases (Bekker, 1975: 120-127).

Leveraging their initiative and geographical advantage, the Germans successfully occupied Norwegian airfields. This strategic move facilitated easier operations in Norway, a region not in close proximity to the British coasts. Possible urgent support from England by air and sea would have taken time, which offered the Anglo-French landings disarray. The Allies were not able to defeat the German forces in Norway, but they had some local successes that could not clear the way to victory. When the Germans attacked France and the Benelux on May 10, 1940, the Allies were in trouble on the main front. *Luftwaffe* was able to overcome its missions in France and led the panzer troops hastily forward. German aircraft proved their worth in the system.

The Battle of Britain in 1940 and the Invasion of the Balkans were large-scale operations in which the *Luftwaffe* played major roles. *Luftwaffe* conducted all of the operations during the Battle of Britain; however, its failure concluded with the cancellation of the invasion of Britain. In Yugoslavia and Greece, the *Luftwaffe* was able to sweep the skies after France. Like Norway, Crete was a small-scale campaign for the *Luftwaffe*; however, the course of events forced the whole operation to take place on its own. Probably, Crete left unfinished another small-scale campaign in Malta.

2.2.1. Battle of Britain

By Fall of France, Hitler aimed the British motherland, the second overseas activity after Norway. It seems to have similarities to Norway, but nevertheless, it was all different. In Norway, the *Luftwaffe* aimed just at tactical targets. In Britain, the morale of the British people in defence was higher than that of the Norwegians. Britain had a powerful and some experienced army, while the British defence industry was active and extensive. Consequently, both strategic and tactical targets in Britain must have been targeted. The *Luftwaffe* proved sufficient for conducting operations aimed at tactical targets; however, it had never attempted operations against both strategic and tactical targets, particularly against a major power.

Herein, operations in France were probably illusive for further offensive operations by the *Luftwaffe*. France looked stronger than Germany on paper and had the second-largest army after the Soviet Union in Europe. In France, the *Blitzkrieg* swept the Allied armies in one and a half months, so the Germans did not need to overcome strategic targets. This provided *Luftwaffe*'s squadrons with a unique opportunity to focus on tactical targets, efficiently supporting the ground vanguards. Within a mere three weeks, France succumbed, and the subsequent three weeks marked the decisive blow. Despite fighting along with the British and Belgians, France gave up because there were not effective French politicians or military seniors in office, most were not long-sighted enough to catch the necessities of modern warfare, both on land and in the air. However, in the First World War, France was the first to own over 34,000 military aircraft (Gilmour, 2012: 24). The problem was those seniors' views of the air force as a part of the army, instead of an independent branch, in the interwar period. The role of the military aircraft was restricted to reconnaissance and ground support, inherited from the First World War (Gilmour, 2012: 25-26). Production efforts in aviation also remained limited. France reacted to the Germans when *L'Armée de l'Air* was far from prepared. The Air Force was not able to encounter the *Luftwaffe* with a lack of modern organization and tactical view, so the result was that the French ground forces were exposed to a three-dimensional combined-arms assault that paralyzed operational and tactical commanders (Higham & Harris, 2006: 43). However, *L'Armée de l'Air* had owned 4,360 combat aircraft, including 790 new ones, on May 10, 1940, against the *Luftwaffe*'s 3,634. The French aviation industry also delivered 1,131 aircraft, including 668 fighters, between 10 May and 12 June (Sutherland & Canwell, 2011: 5, 14).

Similar to the strategy in France, Hitler aimed to blitz the British mainland swiftly. The occupation of Britain held greater significance than the fall of France, as it represented the last formidable democracy in Europe, potentially serving as a crucial beachhead for future endeavours. The British Royal Navy also had a strong fleet to defend the island, but at the same time, it was disincentive in the Mediterranean. If Britain had fallen, the Royal Navy counteracted that Germany secured its back to the North Atlantic for her further operations to the east.

The German air campaign over Britain was immediately started after the French campaign. The *Luftwaffe* carried the war to the British mainland; however, it gained nothing but casualties. Britain was close to France. Nevertheless, the German fighters' dogfight

capability was limited over the southern British coasts, where they were rigged out by radar installations that provided vital early airborne warning to the British squadrons. These were exclusive targets for the German bombers, were less important in France. While the German squadrons were on air, the British were aware of them, so they could easily estimate their target zone, where they concentrated. When the British fighters went into a dogfight, their German counterparts had a short time to deal with them because of their limited fuel. Inevitably, the German Messerschmitt Bf-109 escorts were to go back home, leaving the bomber formations alone, which were vulnerable to the British fighter squadrons. The Luftwaffe had to fight slow medium bombers under the cover of fast short-range fighters during the Battle of Britain (Overy, 1981: 43). On the other hand, the bulk of the British fighter squadrons on the mainland were *Spitfires* and *Hurricanes*, which overrode the might of Bf-110 long-range fighters.⁵ The Battle of Britain was the first fierce campaign for the Germans.

The bombing of London was initiated in retaliation for the British nocturnal bombing of Berlin, triggered by an incident where a German medium bomber mistakenly dropped its bomb over London. Ironically, this shift in German strategy unintentionally altered the fate of the operation. Because the Germans had not started landings, the *Luftwaffe* continued its task on a strategic level alone. In other words, the *Luftwaffe* had a prior role in which, for the first time, warplanes got ahead of panzers. Although the bombing of London diminished the morale of London citizens and forced many of them to leave the city, that strategy did not work and led Hitler to postpone landings.

The exaggeration of enemy casualties in the air led to misperceptions of strategy on the right track. The Germans did wrong with the numbers during the Battle of Britain because they failed to estimate their enemies' numbers of production, pilot numbers, and operational fighters. This was, perhaps, one of the reasons they lost the campaign. Even now, wrong statistics can hamper a country's material and spiritual outputs, dragging its economic, social, military, or political areas into inefficiency. The British Bomber Command was also victim to the same mistake in the late war, while they were bombing the German cities to make the German people feel like giving up. Neither the Germans gave up, nor did the German industry collapse. There again, the British bomber losses increased. Thus, wrong statistics could lead to wrong tactics or strategies, which is an indispensable part of military intelligence.

During the campaign, the *Luftwaffe* was the only branch responsible for preparing conditions for both the *Kriegsmarine* and the *Heeres* (German Ground Forces). This campaign clearly indicated the *Luftwaffe's* limits. By the Battle of Britain, both sides attached more importance to their aircraft production. Now, the *Luftwaffe* had to be organized for a two-front war.

⁵ Destruction and damage percentage of the Bf-110 was the highest by far amongst all types of the German aircrafts during the Battle of Britain (Murray, 1989: 57-58, tables IX-X)

2.2.2. Meaning of Belgrade

Early in 1941, the Germans had to secure the Balkans, which threatened as a new front when the Italians attacked Greece but failed. An Albanian-based Italian offensive into Greece was repulsed. At the same time, the British pushed the Italian assault in Egypt back to Libya and annihilated most of the Italian army in North Africa. This paved the way for some British units to transfer to the Balkans to help Greece. Outcomes in the Balkans brought the German response, who felt her nearer operations against Russia.

Air bombing was like carrying the horror strategy of ancient and medieval times into aerial warfare. Strategic bombing primarily targeted industry and civilian morale. *Luftwaffe* had also used horror bombings on Warsaw, Rotterdam, Paris, and London in 1940. The first three had great effects because those attempts took part in the Polish, French, and Dutch army's collapse. Those bombings were used in parallel with ground movements to skip a stage and reach total victory. The *Luftwaffe*'s role in this early strategy worked well, and three countries surrendered after those bombings.

The bombing of Belgrade was mainly political; it was Hitler's punishment and intimidation operation that broke Yugoslavian morale; however, it did not have a direct effect on Greece's decision to surrender and put Turkey out of the war. It had a possible political effect on the Turkish government, which preferred getting relations with Germany closer, which could prevent Turkish collaboration with the Allies. A few days after the fall of Crete, Halder noted concluding a nonaggression pact with Turkey on June 3, 1940 (Burdick & Jacobsen, 1988: 397), which came true on June 18.

The Germans were to account for the air forces of minor neutral countries, could have been involved in the war. Switzerland and Sweden were inland countries in the Third Reich's Europe, so they were ineffective. Therefore, Turkey, Spain, and Portugal had importance if they joined war on the Allied side. Among them, Turkey was the most important one, with its geopolitical location as well as its good relations with the Allies. Turkey was so close to Polesi Oilfields and South Russia as an airbase. Hitler knew that and wanted the British to stay far from the Balkans, out of the bomber range of Romanian petroleum in 1940. His all-time fears were the British bases in Thrace, nearby Ploesti Oil Refineries. In his secret letter to Mussolini, Hitler had written Turkey's special importance to be a trump for having Bulgaria, on November 20, 1940. He added that they would try to come to an agreement with Turkey (Öndeş, 1976: 747). The Western Allies gradually increased military support for Turkey during the war. Even Hitler prevented Ribbentrop's further actions to press Turkey to join the Axis in early 1941.

Germany swept the Balkans in half a month. On April 17, the *Luftwaffe* bombed Belgrade without hesitation. This was like the Mongolian horror strategy in the 13th century adapted to aerial warfare. One intimidation address was Turkey, to take her on the Axis side, or at least to hinder Anglo-Turkish collaboration. Turkey got anxious; however, the German horror strategy did not directly take Turkey into action. Nevertheless, Turkey became more cautious about supporting the British. This, perhaps, caused a postponement of Turkish involvement in the war against Germany until February 1945. In other words, the

punishment of the Belgrade people helped the decisiveness of the Turkish administrators to be out of war.

2.2.3. Norway, Crete, and Malta

There were smaller overseas operations; two were to Norway and Crete, where the *Luftwaffe* led to the victory, and one more to Malta, which was unfulfilled. All the highly risky air-landing operations to Crete were close to disaster and achieved at a high cost, which made Hitler reluctant to undertake similar further operations, which probably affected the launch of combined arms operations against Malta.

In April 1940, Norway was the earliest operation that forced the *Luftwaffe*'s limits. The long-range and potential of British naval aviation were two main obstacles to the tasks of the *Luftwaffe*. In the early stages, German air units shared maximum responsibility for the operation with the *Kriegsmarine*. After the capture of key airfields, air operations in later stages were off the ground. Hardly, Messerschmitt Bf-110s, German fighters with the longest range, were very close to being out of fuel in the first hours. In one case, some Me-110s were compelled to land before the German paratroopers captured Fornebu Airfield near Oslo with losses (Bekker, 1975: 120-127). However, the Allies were a bit surprised to react at the time. This eased the continuation of further operations in Norway.

In April 1941, the Germans invaded Yugoslavia and Greece simultaneously. However, the capitulation of the Balkans and the evacuation of the British units that arrived in Greece were not enough for Hitler, who desired to secure Germany's back in Europe for the forthcoming Operation *Barbarossa*.⁶ Crete acted as a rallying area during the evacuation of Greece, like a furuncle. Hitler ordered an invasion of Crete, as it was the last place to threaten European soil. Operation *Merkur*⁷ was expedited and brought the Germans into such a condition that it was the second highest risky air operation after Norway. Thousands of troops had to be transported by air, while airborne operations would have been supported by seaborne landings. However, seaborne landings were all hindered by the British supremacy in the East Mediterranean, which laid the burden on the airborne troops. The Germans won both high-risk operations in Norway and Crete against the British lack of sufficient naval support. The occupation of Crete was very costly. Later, the US Army used the German experience in Crete, adding its military doctrine to the revised FM 100-5 (Ross, 1992: 3).

At the beginning of June, there were not any beachheads or rallying areas around Europe. Now Turkey, where the British tried to persuade them to procure a new stronghold, was intimidated enough from the west that she could never be in a formation against Germany, while the German air power in Greece and Bulgaria was nearby and strong. After the Germans settled in those areas along with Turkey's western coasts, they kept some air power as a menace here. This went on until the accelerated evacuation of the German forces in autumn 1944.

Malta meant more than Crete, with the most strategic point being the middle of the Mediterranean. It was the closest island to both Europe and North Africa and historically

⁶ Codename of the German invasion of Russia.

⁷ Codename of the German invasion of Crete.

served as a naval base, a strong checkpoint, and a focal point for the invaders, e.g., the Arabs, Normans, Turks, Spanish, French, and British. By 1814, the island had been under British possession and had contributed to British interests in the Mediterranean for 150 years.

Demands from the Governor of Malta for defensive weapons began in the 1930s, dating back to the Abyssinian Crisis in 1935. Then the island was defenceless and the possibility of the threat of the *Regia Aeronautica* (Italian Air Forces) had emerged. The British Mediterranean Fleet temporarily left Malta for Alexandria, Egypt, for about one year (Budden, 1996: 447).

The air battle over Malta in the Second World War was a strange action. The British, thanks to their ability to possess Malta during the war, cleared the main shipping route between Gibraltar and Alexandria and stressed the enemy supply route between Italy and Libya. This determined the major problem of Axis logistics during the campaigns in North Africa. Malta became an issue among Field Marshals Kesselring, Rommel, Italian military seniors, and Hitler, who never trusted the Italian military. The British strengthened the air defence of Malta during the first half of the war, and Malta-based air attacks hampered further Axis movement in the Mediterranean theatre.

The air battle around the island was also like an extension of the Battle of Britain in a tight region. For example, in the first week of October 1942, 114 Axis aircraft were shot down for the loss of 27 *Spitfires*, and the trend continued (Budden, 1996: 465). In May 1943, the surrender of the Axis forces in Tunisia signalled the end of the Air Battle of Malta. During the battle, 2,700 Axis aircraft were shot down, resulting in the loss of 707 British aircraft and damage to 735 (Budden, 1996: 466). The most dangerous period for the island was October 11-19, 1942; the intensity of the Axis attacks at the top could check the Malta-based attacks to the Axis shipping (Budden, 1996: 466). On the other hand, in August 1942, when the Pedestal Convoy arrived, the island had just a 10-day supply (Budden, 1996: 447).

Those show that such an air struggle for Malta could prove Douhet's claims of air power could bring the opponents on her knees and have possibility at the operational level instead of on a strategic level. On the other hand, at the strategic level, the Gulf War in 1990-1991 validated Douhet's claims if there is an asymmetrical strength between the opposite sides. Struggle between equal powers: it is hard to believe Douhet's type was won by air power, especially after Germany's resistance during the late war.

3. CHANGING AIR BATTLES IN THE EYE OF THE WAR

The opening of the Eastern Front on June 22, 1941, brought Germany a historical fate in which it divided resources across multiple fronts. Now, beside its offensive obligations in Russia and North Africa, the *Luftwaffe* was also responsible for defending Norway, France, and southern Italy. By the time in the North African Front closed in May 1943, the disposition of the *Luftwaffe* was 50.7 % in the East Front, 16.5 % in the West Front, 14.9 % in Germany, 13.5 % in Italy, and 4.4% in the Balkans. The Air Battle of Germany decisively changed those ratios in five months; in October, the disposition of the *Luftwaffe* was 37.6 % in the East Front, 18.8 % in the West Front, 24.8 % in Germany, 9.3 % in Italy, and 9.5 % in the Balkans (Mandel, 1986: 136). This dramatic change clearly shows how costly air battles over the German skies helped the Allied ground units battling on all other fronts.

Different geographies, different climates, extended borders, and increasing depth depend on evolving operations; all were prognostications for the near future. By late 1941, the emergence of critical situations had damaged the German air power more, such as in Demyansk, Stalingrad, Malta, and Tunisia. The Germans were not able to close any fronts after 1941, but the Allies did it in North Africa in 1943, continued with Italy getting out of the war, and laid the burden of defending the South European coasts to the Germans alone. On the other hand, the Air Battle of Germany escalated in 1943.⁸ As the war extended, the *Luftwaffe* became unable to defend the indefensible.

3.1. Renewing Air Operations According to Changing Conditions

When the Germans attacked Russia, the greatest front in history opened and demanded the most expanded military branches be operational. Campaigns in Russia were not similar to previous ones in which the *Blitzkrieg* improved it as a suitable doctrine for the Germans. Russian land was enormously wide and deep, which prevented the success of deep penetration. Paris was about 350 km from the border, while Moscow was about 1.000 km, nearly three times. The German High Command strategy was based on the annihilation of the Soviet armies in huge pockets that could change the strategic depth in favour of their own. This was done by four panzer groups well supported by the *Luftwaffe*'s squadrons. German squadrons succeeded in making a surprise all over the front. According to the Russians who accepted the *Luftwaffe*'s role in the early successes of the Barbarossa, the Germans destroyed 1,200 Soviet aircraft, including 800 on the ground with many modern ones, and raided over 66 airfields until noon on June 22, 1941 (Bekker, 1975: 341-342). Until November 1941, the Germans seemed victorious. In late November, the battery of the German machine alerted.

The fact is that; in history, the depth of the Russian geography compelled all army branches of the invaders to exhaustion. Neither Karl XII of Sweden nor Napoleon could overcome this situation. Although the broad plains in Russia were highly suitable for the *Blitzkrieg* method, geographic depth maintained its advantage in favour of the Soviet armies, which swarmed the re-established defence lines. After the Germans penetrated the first Soviet defence line near the border in late June 1941, the Russians managed to establish it on the road to Moscow three times in three and a half months. The Red Army strategy was clearly to retard the German advance at all costs, to deal with the invincible German Army when it was exhausted in early winter, and it worked.

The Germans achieved air superiority in the first hours and broke the Soviet air resistance along with the border. During their advance deep into the Russian ground, the *Luftwaffe* went on mauling the rest of the VVS's (*Voyenno-Vozdushnye Sily*, Soviet Air Forces) air strength. However, the *Luftwaffe*'s sorties had rarefied by October and sharply decreased next month. Extended logistic lines, primitive conditions on the roads, and a lack of railway conveyance hampered all logistic efforts that badly affected the *Luftwaffe*.

In 1941, air superiority and close-support missions were not enough for the armoured thrust, and the German spearhead, Second Panzer Group, was first checked at Yelnya in early

⁸ Note that; Germany had to keep some squadrons against a surprise attack from Turkey, even in 1944.

August. When mud and snow in autumn restrained most of the aircraft sorties, air support diminished both in the central and northern regions. Lack of air support made gaining ground difficult, and the ground units began to stall. By late 1941, less than 30 % of the *Luftwaffe* units were operational (Higham & Harris, 2006: 210). On December 5, the Soviet counter-offensive overran many of the Germans exhausted in the line of battle and threw the Germans back along the East Front. On the East Front, German air power was limited to tactical targets. There were not enough strategic bombers like the He-177 *Greif*, the Fw-200 *Kondor*, and the Ju-290. All were produced in limited numbers; He-177 and Ju-290 entered the service in the middle of the war because of restricted materials and production capacity in the first half of the war. Many of those bombers were allocated different roles other than bombing, e.g., maritime patrol and transportation. Then *Luftwaffe* never conducted massive air raids targeting dense production facilities beyond the Urals, as the same happened over Britain.

After their first clear defeat, the Germans reorganized their divisions, and this paved the way for the 1942 Summer Offensive, Operation *Blau*. The first objective was to capture petroleum reserves in the Caucasus, which was very important for both panzers and aircraft. The strategic demand of the German war machine was unveiled, and the German armour columns with a two-prong attack advanced in the south third of the East Front. Three main objectives were in the south; Maykop was 305 km from the frontline near Taganrog at the start of the offensive, while Grozny was 685 and Baku was 1.160. In the north, Stalingrad was 425 km east, and Voronej was 435 km north of Taganrog. However, the Germans had not yet understood that the extensive lines of logistics were a second enemy. In early autumn 1942, the *Luftwaffe* units and panzer divisions were alerting in supply. The German advance deep into the Caucasus totally failed when they were checked by the Russians at the west of Grozny. In the north, the bulk of the German army was entrapped.

VVS squadrons were strong on the Eastern Black Sea coasts to protect the Soviet Black Sea Fleet, so the *Luftwaffe*'s support for the German ground units fighting in the Caucasus was on a vulnerable line to the front. Direct bomber flights from Crimea were not very possible due to the Soviet air resistance as the frontline extended. This situation brought the Germans back to the same condition as the year before, and the German war machine was exhausted again. Mud and snow hampered the German advanced operations both in the Caucasus and Stalingrad regions, giving way to the Soviet counter-offensive. The Soviet operational plan was well-prepared and aimed for the same strategic result as the destruction of whole German units in the south, possessing more than one third of the East Front. German air losses in Stalingrad were also appalling and irreplaceable in a short time. The German retreat was also quick and long, which increased material losses. Nevertheless, thanks to Field Marshal Erich von Manstein's efforts, the Germans withdrew, correspondingly decreasing additional aircraft losses on the ground.

Heavy losses in the Battle of Stalingrad, which nearly wiped out the German reserves, were an occasion for the excess *Luftwaffe* ground crew to transfer to land warfare.⁹ The concept of the *Luftwaffe* Field Division, comprised of 200.000-250.000 men, barely stood on this development. Until the end of the war, 21 *Luftwaffe* field divisions were activated (Ellis, 1993: 135).

Russian air resistance was ineffective in the first year of the war in Russia, and the Germans maintained their air superiority until 1944. This does not mean the Russian pilots were not able to defeat their German counterparts. Lack of training and a couple of modern aircraft compelled the Russians to a desperate counteraction. Beginning in late 1942, modern Soviet aircraft and experienced crews raised the resistance. On the eve of the German offensive to seal the Kursk pocket, Operation *Zitadelle*, in early July 1943, the VVS had the power to attempt a pre-emptive raid on the German airfields, even if it was a failure. In 1944, Russian air power made its presence felt all over the front. During all the Soviet operations during the last year of the war, VVS was able to rule the skies.

3.1.1. Airlift Operations

In the Second World War, airlifts became imperative depending on the same circumstances. It was first tried in the First World War, when the German Zeppelin Z.59 departed from Bulgaria on November 21, 1917. It crossed Western Anatolia to the south and navigated to German East Africa via Egypt. Its mission was to supply the German forces manoeuvring as they were surrounded by the Allied forces in Sudan. That expedition was a failure (Banks, 1998: 285).

Successful German airlift experience dates back to the Spanish Civil War, in which the *Luftwaffe*'s Junkers Ju-52 transports, escorted by six Heinkel He-51 biplane fighters, along with *Regia Aeronautica*'s aircraft, transported General Francisco Franco's troops from Morocco to Spain in July-August of 1936. They carried 13.523 men and 258.548 kg of stores in less than two weeks (Macksey, 1978: 49). In the Second World War, transports and bombers were able to achieve longer range, endurance, and payload capacity, and their production was now in higher numbers to make large-scale airlift operations possible. During the war, airlift was a useful strategy on different levels. In Norway, North Africa, the East Front, and the West Front, the belligerents applied to the airlift when there were nonviable circumstances in logistics on the ground. This occurred at tactical, operational, or strategic levels.

In the early Second World War, as the largest air transport force, the *Luftwaffe* could field 500 transports (Higham & Harris, 2006: 203). However, airborne operations were conducted over the enemy air zone; if the resistance was high, directly proportional casualties were on the rise. German planning was initially tactical and strategic surprise being attackers, as in the Crete example. However, in Crete, some 350 German aircraft were lost or damaged, more than half were transporters, while Colonel General Franz Halder indicated in his diary on May 28, 1940, that 170 unserviceable out of 600 transporters were totally lost. Halder

⁹ *Luftwaffe Field Division* concept was also backed by Göring, who claimed all about the air in Germany was his possession with political reasons. However, because the *Luftwaffe* officers of those divisions could not comprehend the ground warfare, command of those divisions were transferred to the *Heeres* in late 1943.

noted, "Transport considerably depleted." (The German Campaign in the Balkans, 2006: 141, Burdick & Jacobsen, 1988: 395). Other airlift operations were to surround units at different levels; a division in Narvik, a corps in Demyansk, or an army in Stalingrad. In those cases, urgent retreats brought some units into a situation that needed supply to endure.

The first airlift was at operational level to Narvik, north of Norway. Here, the German 3rd *Gebirgsjäger* Division (equivalent to the mountain division), which had to leave the city, hampered its logistic process. German transport aircraft supplied the division, which it could resist until the British evacuated Norway.

The airlift actions of the *Luftwaffe* spilled over with high casualties and chaos. The reasons behind major airlifts were Hitler's unawareness in the conduct of military operations; he forbade any tactical or strategic withdrawals when the Germans were exposed to the Soviet counterattack after a deep penetration. Because the German area of operations in the east was larger than other fronts, both tactical and operational levels also contained strategic issues. For example, the retreat from Stalingrad to the Dnepr, losing the east of Ukraine, was an important political and economic issue. Hitler was such a person that he never comprehended the distinctness of the East Front, and stubbornly refused the withdrawal in spite of the risk of destruction of all Army Group South, including the Seventeenth and First Panzer armies retreating from the Caucasus.

On the East Front, large plains were very suitable for deep penetration that often ended up with massive encirclements, reciprocally. One prominent example was the airlift to Demyansk pocket, where the Soviet armies surrounded about 100.000 Germans, started on February 20, 1942; the transporters carried 24.303 tons of stores for three months. It was a successful large-scale airlift; the Russians failed to break the German resistance. However, it was at a loss of 265 aircraft. A small-scale airlift to Kholm also followed Demyansk in the same region (Bekker, 1975: 409-410).

Supplying about 100.000 Germans in Demyansk overshadowed the logical calculations of 250.000 surrounded men in Stalingrad. Soviet armies surrounded the bulk of the Germans and her allies in Stalingrad in late November 1942, which required the largest-scale airlift at that time. Stalingrad was the deepest territory in the Russian soil, and the Soviet leaders prepared well against the pocket, which was populated by the Axis 2½ or 3 times in comparison with Demyansk (Hayward, 1997: 24). Göring told Hitler the *Luftwaffe* could overcome to supply the encircled Axis units. His miscalculated statement dragged the German Sixth Army in the pocket to a bad fate and capped it off in 2½ months. The depth of the battlefield was in favour of the Russian fighter squadrons' resistance, and the Russian ground units raised it, advancing. By this way, the *Luftwaffe*'s losses rose to 488 transports and bomber aircraft (Bekker, 1975: 450). However, it was far to supply 250.000 men in the pocket. Some confusion on expended words among Hitler, Göring, and Colonel General Hans Jeshonneck, *Luftwaffe*'s Chief of the General Staff, airlift capability to Stalingrad pocket became an illusion. Other seniors of the *Luftwaffe*'s grand units supporting the Army Group South were aware of the situation and attempted warnings to military leaders, both local and GHQ. Hitler was a philodox and preferred to believe Göring's assurance and Jeshonneck's unstudied first accounts. He continued to be a slave to his own emotions and

insisted on maintaining airlift to the pocket instead of the Sixth Army's breakthrough back (Hayward, 1997: 22-24, 30-31, 35).

In the same month when the Battle of Stalingrad began, the last phase of the North African campaign was also started by Operation Torch, the Allied invasion of Morocco, Algeria, and Tunisia under the Vichy French. The Germans quickly reacted and occupied Tunisia before the Allies, and all Axis forces in North Africa were withdrawn here. This brought an overseas logistics issue as large as in Stalingrad within the same month. Tunisia was the last foothold of the Axis armies in North Africa, so that level of supply was strategic. Unlike Stalingrad, the Axis forces were defending a larger area using geographical conditions efficiently; by this means, a large part of the hinterland made the airfields useful. German and Italian air units replenished the ground forces in Tunisia and extended the campaign in North Africa for about six months. *Luftwaffe* losses were heavy again, including casualties during the Battle of Malta.

3.1.2. Effects of Geographical Expansion

On the East Front, long distances required the development of aircraft types to a certain extent. Especially long-range fighters were necessary in Russia. While the Bf-109s lacked range; their domestic rivals, the FW-190s, could go far. Nevertheless, both were not able to overcome the needs of the *Blitzkrieg* as in the early times. Nevertheless, the German pilots felt comfortable because their enemies' aircraft was not able to counterbalance. However, German air power in the centre of gravity was exhausted in the first winter.

While the opponents on the East Front had been focused on tactical targets, the situation on the West Front made air campaigns in the region utterly different. The West Front opened on September 3, 1939, when the Allies declared war on Germany. There were not any serious actions until May 10, 1940, the day the Germans launched "Case Yellow".¹⁰ During the campaign, the *Luftwaffe* barely focused on the tactical targets to clear way for the armour thrust and successfully supported the panzers. The plains at close distances here were gifted with close air support. However, during the Battle of Britain, the *Luftwaffe* went on targeting the points with dual functions, both tactical and strategic, like radar stations, shipping, and airfields at a distance. In France, the German aircraft fought over the land, which was hastily occupied. However, this was not the same in Britain. During the course of the campaign, a German bombing misdirected to London, a strategic target, spelled the RAF (Royal Air Force) squadrons to resist. So that air campaign in Britain was a failure, and landing on the island was postponed.

After the Battle of Britain, the Germans focused on the east, and especially the invasion of Russia yielded no result. On the other hand, it gave the British armament enough time to build-up. RAF bombers followed Douhet under the influence of Air-Vice Marshal Sir Arthur Harris, C-in-C Bomber Command, and began bombing the German cities at night in the middle of the war; however, this attempt was far from obtaining a strategic result. The British were not able to conduct daylight bombings because their fighters were insufficient both in numbers and in range. They were not superior to their German counterparts, either. Air

¹⁰ Codename of the first phase of invasion of France and the Benelux.

warfare on the West Front effectively started after the USAAF (United States Army Air Force) fighter and bomber squadrons deployed in Britain in large numbers. Americans undertook daylight bombings with their more capable fighters and bombers, while the British maintained their ability to attack German cities by night.

Aerial defence is vital if a country has dense industry-directed war output. This is the strategic defence that could neutralize the outcomes of Douhet's theory of strategic bombing. The Germans prepared the air defence of Europe with radar webs and fighter squadrons. Strategic bombing was conducted through continuous and long-term attacks on non-military targets. Supporters saw it as a war-winning weapon through starving economic resources and undermining national morale (Overy, 1981: 15). Allies gave priority to the strategic bombing to hamper German arms production heavily as well as to break the psychological power of the people. None of them were coercive enough because of two means; German resistance in the air was strong despite heavy losses, and the German people endured the war under the strength of a fearful organization of the Nazi regime. The Germans had also transferred some of their military output to underground factories. Later, the American reckoning on coercive bombing would also not work in North Vietnam, either. As in Germany in 1945, occupation of the region was necessary in the Vietnam War, too.

Allied tactical bombings were limited to the campaign in North Africa and increased slowly. After the Axis surrendered in Tunisia on May 13, 1943, the Allies launched a quick deployment to land on the Italian coasts. On the Italian Front, the Allied air forces mostly focused on the tactical targets, while strategic bombings to South Germany, Romania, and Hungary were also arranged. The advance in Italy, easily checked by the Germans, obliged the opening of the West Front. To actualize the Overlord,¹¹ the Allies had to break the *Luftwaffe's* resistance in Western Europe. This led to the Allies arranging a one-week costly operation in the middle of February 1944, which drew the *Luftwaffe* fighter power on their own, and mutual heavy losses ended the *Luftwaffe* threat to upcoming landings. By this means, the Allies began to concentrate on the tactical targets in France. When the Allies overwhelmed the *Luftwaffe* in the air, they could also concentrate both strategic and tactical targets together easier until the end of the war.

4. MILITARY TECHNOLOGY

The technical abilities of air machines are the prerequisites for tactics, strategies, and theories of air war. Basically, planes fly and attack from altitude. Therefore, in the Tripolitanian War, Italian pilots began to drop small bombs by hand. The Ottomans, who did not have any airplanes at that time, developed primitive anti-aircraft tactics, which caused aircraft upgrades. Italian aircraft were short-range machines, were not durable, and could not carry many bombs because of the limited power of their engines. Early planes had only limited roles as reconnaissance, strafing, and very light bombing.

Thirty years after the Tripolitanian War, a bomber was an aircraft obligated to particularly bomb, along with its abilities in shape, size, and devices attached for its task. Bombers in the Second World War were generally categorized as light, medium, and heavy according to

¹¹ Codename of the Allied invasion of France.

their weight, which was a result of their large wingspan and fuselage, engines, armed equipment, and payload capacity. A medium bomber could deliver about 2,000 kilograms of bombs to the target. This increase occurred in 25-30 years and enabled dense and more efficient bombing methods. The development of well-protected heavy bombers with a payload between 5.000-10.000 kilograms brought major cities as primitive targets for massive raids. USAAF (United States Army Air Force) commissioned two main strategic bombers to carry the weight of daylight bombing against Germany; the B-17 *Flying Fortress* could deliver 2.724-5.800 kg of bombs to targets in various ranges, while the B-24 *Liberator* did 3.629-5.443 kg (Gunston, 1990: 200, 204).

Galland offered the characteristics of a good fighter in order: speed, manoeuvrability, acceleration, climbing, and a stable platform of weapons (Cunningham, 1978: 17). Fighters' qualities involved manoeuvrability, speed, acceleration, firepower, amount of ammunition, and range; all could be developed for the contest with rivals. The Germans developed the Bf-109, a qualitative fighter, in the early war, which had been approved in the Spanish Civil War by 1937. Its advanced types continued their successes in the campaigns in Poland, Benelux, and France. However, the Bf-109 technically failed during the Battle of Britain because its operational range was so short that Bf-109 groups were not able to escort the bombers deep into England. Both sides learned from the Bf-109s' deficiencies. The Germans produced new fighters like the Focke Wulf FW-190 with extended range and increased later Bf-109 types of operational range continually. On the other side, the USAAF requested long-range fighters to escort heavy bombers, and it was concluded with the delivery of P-51 fighters with external fuel tanks. The range issue of the German fighters became apparent after Germany invaded Russia. Thus, the German fighters suffered from the range both in the west and in the east while they were in offensive positions. This clearly shows that the *Luftwaffe* was not ready for deep offensive actions against major powers.

The combat radius of the American heavy bomber B-17 *Flying Fortress*, which was the most difficult one for the German fighters to shoot down, had a range of approximately 800 km in late 1941, and the combat radius of the Army Air Corps' best fighter was around 320 km. The best American fighter could stay aloft for 70-90 minutes at most, while the B-17 could endure more than five hours (Hammel, 1994: 2). Hence, the USAAF could not support the British bombers over Germany effectively; it also could not overwhelm the Japanese expansion because the American fighter pilots had the same problem as their German counterparts experienced in the Battle of Britain. Offensive plans by both tactical and strategic bombers required long-range escort fighters. So, both the Americans and the Germans experienced the question of long-range fighters in a year after they entered the war.

In 1942, the US bombers could eventually reach targets nearly 1.750 km from their bases in England, but the fighters could still fly only 400 km in one direction and no farther (Hammel, 1994: 9). Thus, those bombers could raid Berlin just on paper, daring that this could be fatal. The British Bomber Command resumed bombing Berlin at night. On the night of February 15-16, 1944, they dispatched 891 bombers and dropped 2.642 tons of bombs; however, at a cost of 43 bombers, only 320 Berliners died (Neillands, 2003: 12). Allied air supremacy provided a broad area to escort medium and heavy bomber formations with P-51s in 1944. The P-51D's maximum range was 2.093 km with external tanks (Gunston, 1990: 242). Later,

Göring attributed, he understood the fact that they lost the war to the occurrence of the American fighters over Berlin after the first daylight raid on Berlin, on March 4, 1944 (Astor, 1998: 255-256).¹² The combat range of the FW-190 A-8 was about 400-500 km, introduced in 1944, while the Bf-109 G-6 was the same introduced in early 1943. Messerschmitt Me-262 *Schwalbe*, the first jet fighter to enter the *Luftwaffe*'s service with a one-year delay in late 1944, had a far greater operational range than the FW-190 and Bf-109 variants. Me-262's range gave their own shelters built deep into Germany against increasing airfield raids.

4.1. Effects of Technological Expansion

There were two revolutionary achievements in aviation technologies during the Second World War. The first was the delivery of the aircraft with jet propulsion. The second was the use of rocket propulsion in several subfields of aviation. Both were mainly addressed to the successes of the German scientists, which accelerated the acquisition of both technologies into the battle. German jets Me-262 and Arado Ar-234 *Blitz* and the rocket-powered aircraft Messerschmitt Me-163 *Komet* entered service in late war, while serial production of another jet, Heinkel He-162 *Salamander*, was started but never used. Allies also ended the war partly with the use of similar weapons; the British Gloster *Meteors* were commissioned only for hunting the V-1 cruise missiles, and the American P-80 *Shooting Star* was delivered too late for the dogfights. The Germans were the only ones to standardized jet and rocket aircraft and create tactical and strategic perspectives. Those jets were the first fruits of the new-born aerial technology and brought along initial problems like overheating short-lived engines, however, among them, Me-262 went into serial production and delivered service in higher numbers.

4.1.1. Strategic Failure of Technological Success in Rocketry

As the first rocket engine aircraft in the service, the Me-163 *Komet* was the outcome of a revolutionary step; however, it was far from carrying the air power to the strategic result. It improved a rocket-propelled engine was not very suitable for the air war. It was not useful because of very short time of endurance, just eight minutes, and also suffered high attrition through accidents; nevertheless 370 were in the service. This aircraft could only climb very fast to the ceiling, observe the bomber formations, and attack them only twice in a nosedive. *Komets* could use air-to-air rockets or cannons. It seems impossible to shoot down because of their high velocity; they reached at a top speed of 960 km/h. Me-163 had some psychological effect on the US bomber crew (Gunston, 1990: 72-73). About 300 *Komets* entered the service. However, Me-163s credited only nine victories at a cost of 14 in action, and 80 % were lost during takeoffs and landings (Hess, 1996: 19). *Luftwaffe* also used rocket technology on heavily loaded air transports to carry out their takeoff with heavy loads.

Rocket engines are more efficient in use with delivery vehicles against strategic targets. As a part of aerial warfare, Second World War rocketry had three aspects: "on air", "to the

¹² "When did you know that the *Luftwaffe* was losing control of the air?" General asked after the war Goering told Spaatz. "When the American long-range fighters were able to escort the bombers as far as Hanover," Goering replied, "it was not long before they got to Berlin." Goering said he could not believe his eyes when he saw them over his capital. Goering then observed: "The reason for the failure of the *Luftwaffe* against the Allied Air Forces was the success of the American Air Forces in putting out a long-range escort fighter airplane which enabled the bombers to penetrate deep into Reich territory and still have a constant and strong fighter cover. Without this escort the air offensive would never have succeeded." From: "Mustang", *Air Force Magazine*, March 1964, 80-86, p. 85.

ground”, and “out of the atmosphere”. The Germans developed air-to-air, air-to-ground, and anti-shipping versions of the aircraft for tactical use. They also developed the V-1 cruise and the V-2 ballistic missiles and used them in thousands by 1944. V-1 was introduced in strategic bombing by June 13, one week after D-Day, where the *Luftwaffe* resistance in Western Europe was softening up. In one sense it was good timing because the German propelled fighter force could not stop the Allied daily bombing after the Big Week¹³ in February. Those missiles did not require any pilots, which the *Luftwaffe* suffered both in training and numbers, so that the V-1s may have been perceived as a saver weapon. However, it was just a terror weapon with a high CEP (circular error probability); the V-1 was not efficient enough to create an effect on the British industry. The US industry, which dominated the Allied production, was already out of range. V-2 was more developed as the first ballistic missile operating out of the atmosphere, but it was also far from saving the condition. Although it was the most revolutionary and effective weapon after the atomic bomb, the V-2 was an expensive solution for bombing cities, with a great CEP and each missile worth about \$50,000 (Peterson, 1995b: 666).

In the first half of the war, the Germans focused on tactical objectives so that they did not need those expensive weapons. However, they continued investment in the missile research, which could give an opportunity to retaliate the Allied bombings of the German cities without any casualties. When a B-17 was shot down over enemy territory, all ten of its crew members became KIAs, MIAs, or POWs. V-1 and V-2 missiles were unpiloted, provided that their operational use was without any human casualty. On the other hand, targeting equipment helped navigators of a B-17 had a chance to find primary targets over a large area, while those missiles at that time were making blind strokes. V-missiles’ effects were limited as much as the British night bombings on the opponents’ psychology.

However, history shows a powerful air force is not an only weapon for a major power give up. Its winning effect is remained limited with only minor powers. Nevertheless, advances in rocket technology earned the Germans an advantage not wasting more pilots on terror bombing in 1944. If the V-missiles were used in the early stages of the war, the Germans could use them for strategic bombings in the area where the Germans were absolutely lack of, thus the *Luftwaffe* could direct all the frontier squadrons to the tactical targets. In 1944, it was too late. Major General Dr. Walter Dornberger, responsible for development of the V-2 missiles, revealed to Hitler that the military value of those missiles very limited (Overy, 1981: 105). On the other hand, the V-2 missiles alone were at a cost of production of over 24,000 fighters (Murray, 1989: 287). All information on the V-missiles shows the effective role of those weapons in the Second World War remains limited; however, under those circumstances, it was also exciting.

4.1.2. Jet Relations

Production and use of rocket technology in the late war were completely a waste. On the contrary, jet technology had the potential to be a turning point. The most revolutionary

¹³ Big Week was between 20 and 25 February 1944, in which the Allied air forces undertook the *Luftwaffe* at all costs. Allies succeeded in breaking the German air resistance in the air what the Germans could not do in the Battle of Britain and skies in the West Europe cleared for the Overlord.

advance in the air during the war was clearly jet-engine aircraft. During the Second World War, German scientists were able to carry military technology beyond their age. Just a few days before the outbreak of the Second World War, the Heinkel He-178, the first jet-propelled aircraft in history, made its maiden flight. Despite its impracticability, this symbolized the German aviation advanced in leap, could provide the *Luftwaffe* a rapid aircraft for both offensive and defensive means in the short term. This way, the *Luftwaffe* could have three main advantages. First, jet fighter squadrons could react quickly to bombing raids. They could catch them even over the English Channel because this type of interception would keep bombers away from targets. Second, jet fighters had a great superiority in both level run and climbing speed, which made them able to thrust into bomber formations, escalating the Allied fighter escorts. This was the only solution to stop the American daylight bombing, which was causing major damage to the German heavy industry. Third, jet fighter squadrons were tending to be hastily directed to another point by their overwhelming speed and long-range capability. This could restrict Allied deceptions by blunting the German radars. Thus, the Germans had caught the opportunity of range for developing strategic air defence.

In late 1944, some Me-262 and Ar-234 jet units were operational. Me-262 was the only weapon that could have won the war in the air on behalf of the Germans. Owning the Me-262 means that a decisive attack straight to the bombers with a short arrival time and outrunning the escorts became possible. The time the jets entered the service in numbers, their strategic usage was stonewalled by tightened space by the Allied advances from the east, west and south as well as shortages of both fuel and trained pilots.

The Germans could not take advantage of the jet fighters until 1944, when it was too late. By the time Heinkel He-280 production phase had been abandoned, the Me-262 was the only jet fighter to deal with massive American daylight bombing. Although the Me-262 was ready for service, Hitler's decision to convert it to the blitz-bomber (Heaton, 1997: 51) postponed its production as a high-speed interceptor, and the Me-262 began to rise not before the end of 1944, when the German aviation fuel was very limited in stock. On November 2, 1943, Hitler directly involved the production of the aircraft, to be fitted out as bombers (Ziegler, 2004: 50). The worse, he did not forget it and asked it of Field Marshall Erhard Milch, Chief of German Aircraft Production, in a meeting on May 23, 1944, and after he had not hear what he had wanted, he gave full responsibility to produce the so-called *bomber-blitz* to Göring (Price, 1997: 349-350). This postponed the Me-262 entering the service in massive numbers, and the Germans could deploy only 220 (Vat, 1997: 198) out of 1.433 produced (Gunston, 1990: 74). Me-262 production had been planned to reach 1.250 aircraft per month by April 1945 (Wright, 1968: 91); this number could also finish Allied daylight bombings, even in early 1945, if there was enough fuel and experienced pilots. If half of those produced were operational in late 1943 or about 18 jet fighter wings in full strength. This statistic doubles General Adolf Galland, a famous German ace and Inspector General of Fighters, laid down as a condition that a 300 operational Me-262 could stop the daylight bombing (Cunningham, 1978: 19). According to Galland and Milch, to stop massive daylight bombings, they needed four times more piston-engine fighters against the bombers (Bekker, 1975: 512-513). In his book "The First and the Last", Galland saw the development of the

Me-262 as a leap in aviation technology, and he wrote that he would rather have one Me-262 than five Bf-109s (Galland, 1990: 261).

Under 1943 conditions, a Me-262 operator airfield could defend more area with a large radius, had the shortest arrival time that a propeller aircraft could never do. The Americans tightly packed the formation of bombers with the well-defended B-17s was the best solution until the long-range fighters' escort. However, statistics on casualties in 1943 show it was not a war winning solution. While the Me-262 was not operational in numbers in 1943, the German piston-engine fighters engaged them, and the American casualties were not low.

Hitler did not pay attention to the *Luftwaffe* experts and Albert Speer, the Minister of Armaments and War Production, and his wrong decision caused a considerable loss of time. Me-262's postponement dragged its mass production to a period of lack of jet fuel and trained pilots. The reality was that the *Luftwaffe* had just 30.000 tons of petroleum in March 1945, and it could not receive further supplies until autumn (Lucas, 1987: 100). In 1945, very few could operate together. Nevertheless, they showed their ability to penetrate the defence of massive fighter escorts to the bombers, due to their superior speed and acceleration.

4.1.3. Production Efficiency

Governments set the production balance during wartime. They decided the production priorities considering the volume of the economy, raw materials, manpower, research and development level, and capabilities of the armed forces, as well as the situation of the country in wartime. During the Second World War, the *Luftwaffe*'s power was a good example of the inefficient use of a qualitative force. Two factors led to this. First, the Germans were not prepared for the all-out-war when the Allies declared war on September 3, 1939. Mismanagement of the German economy until late 1942 constrained efficient output, which limited arms production. Second, the German government was all influenced by Hitler, resulting in all settings of his mind in military doctrines. As per usual, the arrangement of wartime output is related to the military demands, which were submitted by the military authorities who witnessed the facts on the front. The "Hitler effect" broke it and output was set to Hitler's desire. This dragged the *Luftwaffe* to overcome impracticable duty when Germany was overwhelmingly defensive on the ground by July 1943. Hitler persisted in offensive actions that affected aircraft output. On the other hand, there was also a debate among the *Luftwaffe* seniors on the production of tactical and strategic bombers until 1942, which was solved when the V-missiles became operational.

In the German aviation industry, the main problem was reflecting the governmental view of the industry in general based on the short-term German economic development, which was barely corrupt. This put off the aviation industry an efficient mobilization to realize qualitative-quantitative balance in aircraft production. When the war broke out, the German industry was nearly in full capacity. However, the Germans failed to expand their industrial complexes, so that the construction of facilities declined for three years after a peak of 1938-1939, while their British enemies succeeded it between 1940 and 1942 (Overy, 1981: 161). On the eve of the war, Fritz Todt, former Reich Minister of Armaments and War Production, also cut funds for the German industry, just after the first expansion of the aviation industry

between 1935 and 1938 (Overy, 1981: 165). A second expansion was planned by 1941; however, it was not fast enough under conditions of war (Overy, 1981: 166).

The largest producer in Germany was Junkers, which had only two factories in 1944 and over 10.000 employees; one had 14.000 and the other had 12.000. In Britain, 12 factories had over 10.000 employees, including two firms with 25.000 each, while in the majority of the aviation factories in the United States had 20.000-40.000 employees. Both in Germany and Britain, small firms were adopted in aircraft production. Governmental contracts with British firms were 12.000, while they were 17.000 in Germany (Overy, 1981: 168). Some components were produced at small workshops; thus, production sometimes could be slowed due to component shortages (Overy, 1981: 170). The rise in air raids over the German cities by 1943 caused some temporary interruptions in aircraft production. The United States was the only country with an industry far from the frontlines and was out of hazard. This shows that American economic mobilization was more efficient than all the European countries. Besides, Williamson Murray's determination is so important that he said the Germans lost the air war over Europe in 1943 and 1944, between July 1940 and December 1941, due to aircraft output, aircraft losses, and aircrew replacement (Murray, 1989: 92).

CONCLUSION

The organization of the *Luftwaffe* and high numbers of aircraft production in the Interwar, show that the Germans exercised due care for the air power. With the availability of modern combat aircraft, the Germans, ahead of their three major opponents in Europe, built two-thirds more aircraft than the British between 1937 and 1939. German aircraft production doubled that of the British, tripled that of the French, and was nearly equal to that of the Soviets between 1933 and 1939 (Hooton, 1999: 279, Appendix 5). Investment in the air force was a strong reason for quick German dominance in Europe. However, in 1939, Germany was ready for only a limited war, not an all-out war, which necessitated the expansion of the war over time. A second reason that terribly affected the course of war on a strategic level was political; the ghost of the two-front war strategy brought the *Luftwaffe*, in particular, into division after the attrition of the early campaigns. German production capacity was far from meeting *Luftwaffe*'s demands. In 1942, the Russians were able to produce 25.000 aircraft for one main front; while the Germans only produced 15.000 for three major fronts, including a growing number of defence aircraft, for the Reich itself (Overy, 1981: 71).

When the Germans had enough power to rule the skies, they occupied the heart of Europe. The first phase of their supremacy was invasion, based on ground forces engaged with air support. However, occupations brought expansion, and protecting much area with ground forces was not easy. Here, air power was an important factor for the defence as much as it was very important for the offense. However, the Germans failed to stabilize their strategies on air after early conquests. First, the Battle of Britain proved the limits of the German air power, led by geography and production capabilities. After the Battle of Britain, they needed defensive doctrine for the western risks, but they ignored it. This caused them to fall off balance in 1943, when simultaneous and incessant attacks on the ground from the east and on the air from the west occurred. Even in late 1943, the *Luftwaffe* was relying on *Zerstörer*

units with slow fighters carrying heavy armament, which were vulnerable to fighter escorts, to stop the USAAF's daily bombings.

Geographical expansion also imposed new obligations on the Luftwaffe. Risky deep operations sometimes created new demands by the ground units, which ended up in such airlifts as in Demyansk, Kholm, and Stalingrad. Failure or success, all airlift operations were costly.

The Germans had prioritised tactical bombing. They went on ignoring strategic bombing and used air power for its prior goals as reconnaissance and close support. Development and serial production of the German ill-developed strategic bomber He-177 *Greif* was late and produced in limited numbers. Although Göring decided its wide production in mid 1944, it was cancelled in two months. Germans saw strategic bombing as punitive rather than long exhaustive campaign, like the Assyrian or the Mongolian horror strategy in the Ancient or Medieval times. On the other hand, production of strategic bombers in high numbers could suspend the German military output to affect productions of panzers, U-boats, fighters and tactical bombers. The fact is that the German industry was not ready for war in 1939; it grew in expected maturity in 1943.

Luftwaffe was also the air force using technology ahead of their opponents. German propelled aircrafts were qualitative served the purpose, and their upgrades maintained during the war. German jets entered the service as the fastest aircraft of the war, ironically, the Germans failed to make them instruments of taking strategic results. This shows the most criteria lying behind the German ineffectualness were not production statistics or R&D, but mismanagement and doctrinal short-sightedness. In the early war, strategic bombings were unrecognized and limited to a few punishment attacks like London and Belgrade. By this way, the Germans ignored the destruction of the British industry, which they engaged its output in the fronts, in North Africa and Malta as well as in the East Front, owing to lend-lease. V-missiles could be a solution, but they were introduced to the war very late. V-2s were fired at targets for the last eight months of the war. On the other hand, the Allies carried the German rehearsal with 40-ton bombing in Guernica, to the 2.000-3.000-ton bombing of the German cities in a few years. The Germans were not able to eliminate the issue of unbalanced strategic bombing.

Efficiency necessitates meeting the requirements at the right time. *Luftwaffe* was expected to be a well-managed branch, if Hitler and Göring were not the decision-makers. There were also dualities influential over the aircraft production and doctrine rooted back to the late interwar years. Perhaps it was a time that everybody had taken up to find a way of victory being offensive, nobody exercised due care to the possibility of the air force being defensive. This thought was placed by Hitler's attitudes, hard to replace even in early 1945.

REFERENCES

- Astor, G. (1998). *The Mighty Eighth*. New York: Dell Publishing.
- Banks, A. (1998). *A Military Atlas of the First World War*. Barnsley: Leo Cooper.
- Bekker, C. (1975). *4.000 Metreden Hücüm* (S. Tiryakioğlu, Translator). İstanbul: Baskan Yayınları.
- Budden, M. J. (1996). Defending the Indefensible? The Air Defence of Malta, 1936-1940, *War in History*, 6(4), pp. 447-467.
- Burdick, C. & Jacobsen, H-A. (1988). *The Halder War Diary 1939-1942*. Novato: Presidio.
- Coldwell, D. & Muller, R. (2007). *The Luftwaffe over Germany Defense of the Reich*. Barnsley: Frontline Books.
- Correll, J. T. (2021). "Billy Mitchell and the Battleships", *Air&Space Forces Magazine*, July 21, <https://www.airandspaceforces.com/article/billy-mitchell-ostfriesland/> (February 12, 2024).
- Gilmour, C. (2012). "What was the Primary Reason for the Collapse of the French Air Force in 1940", *The Royal Canadian Air Force Magazine*, 1(2) Spring, pp. 22-29.
- Corum, J. S. (1977). *Luftwaffe Creating the Operational Air War, 1918-1940*. Lawrence: University Press of Kansas.
- Crevel, M. v. (1991). *Technology and War*. Oxford: Brassey's.
- Cunningham, B. (1978). Galland, *Code One*, 2(3), p. 19.
- Ellis, (1993). J. *The World War II Databook*. Manchester: Aurum Press.
- Galland, A. (1990). *The First and the Last* (M. Savill, Translator). New York: Buccaneer Books.
- Grant, R. (2004). Air Force Magazine, February, pp. 76-80, <https://www.airandspaceforces.com/PDF/MagazineArchive/Documents/2004/February%202004/0204trench.pdf> (February 10, 2024).
- Gunston, B. (1990). *The Illustrated Encyclopedia of Combat Aircraft of World War II*. London: Tiger Books.
- Hammel, E. (1994). *Air War Europa Chronology 1942-1945*. Pacifica: Pacifica Press.
- Hayward, Joel S. A. (1997). Stalingrad An Examination of Hitler's Decision to Airlift, *Airpower Journal*, XI (1) Spring, pp. 21-38., https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Volume-11_Issue-1-4/1997_Vol11_No1.pdf (February 10, 2024).
- Heaton, C. D. (1997). Luftwaffe General Adolf Galland, *World War II Magazine*, January, pp. 46-52.
- Held, W. (1990). *Battle Over the Third Reich*. New Malden Surrey: Air Research Publications.
- Hess, W. N. (1996). *German Jets versus the U.S. Army Air Force*. North Branch: Specialty Press.
- Higham R. & Harris, S. J. (Eds.). (2006). Why Air Forces Fail the Anatomy of Defeat. İçinde Corum, J. S. *Defeat of the Luftwaffe, 1935-1945*, pp. 203-226. Lexington: The University Press of Kentucky.

- Hooton, E. R. (1999). *Phoenix Triumphant the Rise and Rise of the Luftwaffe*. London: Brockhampton Press.
- Levine, A. J. (1992). *The Strategic Bombing of Germany, 1940-1945*. London: Praeger.
- Lord President of the Council Stanley Baldwin's speech, "A Fear for Future"; HC Deb 10 November 1932 Erişim. Adresi: <https://api.parliament.uk/historic-hansard/commons/1932/nov/10/international-affairs>. Erişim Tarihi: 09.10.2020.
- Lucas, J. (1987). *World War Two Through German Eyes*. London: Arms & Armour Press.
- Macksey, K. (1978). *Kesselring The Making of the Luftwaffe*. Barnsley: Frontline Books.
- Macksey, K. (1993). *Military Errors of World War Two*. London: Arms and Armour.
- Mandel, E. (1986). *The Meaning of the Second World War*. London: Verso.
- Meilinger, P. S. (Ed.). (2020). The Paths of Heaven: The Evolution of Airpower Theory. P. S. Meilinger, *Giulio Douhet and the Origins of Airpower Theory* (pp. 1-40). Maxwell Air Force Base: Air University Press. https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/AUPress/Books/B_0029_MEILINGER_PATHS_OF_HEAVEN.pdf (February 08, 2024).
- Mitcham Jr, S. W. (1997). *Eagles of the Third Reich*. Novato, Presidio.
- Murray, W. (1989). *Luftwaffe*. Baltimore: Nautical & Aviation Publishing.
- Neillands, R. (2003). *The Bomber War*. New York: The Overlook Press.
- Öndeş, O. (1976). 2. *Dünya Savaşı*. İstanbul: Altın Kitaplar.
- Overy, R. J. (1981). *The Air War 1939-1945*. New York: Stein and Day.
- Pape, R. A. (1996). *Bombing to Win*. Ithaca: Cornell University Press.
- Peterson, E. N. (1995a). *An Analytical History of World War II Volume 1*. New York: Peter Lang.
- Peterson, E. N. (1995b). *An Analytical History of World War II Volume 2*. New York: Peter Lang.
- Price, A. (1995). The Messerschmitt 262 White Hope of the Luftwaffe, *Air International*, June, pp. 348-356.
- Price, A. (1997). *The Luftwaffe Data Book*, London: Greenhill Books.
- Ross, Jr, B. (1992). *The Battle of Crete and its Implications for Modern Contingency Operations*, Fort Leavenworth: School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College.
- Seversky, A. P. d. (1978). *Hava Kuvveti İle Zafer* (A. Kut Translator). İstanbul: Harp Akademileri Basımevi.
- Sutherland, J. & Canwell D. (2011). *Vichy Air Force at War*. Barnsley: Pen & Sword.
- German Report Series, *The German Campaign in the Balkans – Spring (1941)*. (2006). Uckfield: The Naval & Military Press Ltd.
- Vat, D. V. der. (1997). *The Good Nazi*. London: Weidenfeld & Nicholson.
- Webster, C. & Frankland, N. (1994). *The Strategic Bombing of Germany 1939-1945 Volume III Victory*. London: Imperial War Museum.
- Wright, G. (1968). *The Ordeal of Total War*. New York: Harper Torchbox.

Ziegler, M. (2004). *Hitler's Jet Plane the Me 262 Story*. London: Greenhill Books.



Bu eser [Creative Commons Atif-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) ile lisanslanmıştır.



İnsansız Hava Araçları (İHA) İçin Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS) Bağımsız Navigasyon

Engin GÖDE¹

Atanur TEOMAN²

Melih Cemal KUŞHAN³

Kürşat TONBUL⁴

Gökhan İbrahim ÖĞÜNÇ⁵

Batuhan DAZ⁶

Derleme Makale

DOI: 10.51785/jar.1370785

Gönderi Tarihi: 03.10.2023

Kabul Tarihi: 28.01.2024

Online Yayın Tarihi: 28.02.2024

Öz

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) otonom navigasyon yapabilmesi, Global Navigation Satellite System (GNSS-Küresel Navigasyon Uydu Sistemi) ile sunulan konumlarının doğru olarak belirlenmesine bağlıdır. Uçuş esnasında konum belirlemek ve çevresel oryantasyon için İHA'lar genellikle GNSS, Inertial Measurement Unit (IMU, Ataletsel Ölçüm Birimi-AÖB), jiroskop ve ivmeölçer gibi elektronik ekipmanlarla donatılmıştır. Ancak, kötü hava koşulları, engellerin veya arazilerin varlığı, uyduların elverişsiz konumu, aldatma (spoofing) ve karıştırma (jamming) nedeniyle GNSS sinyali kaybolabilir veya bozulabilir. Bu gibi GNSS sinyali kaybolma veya bozulma durumlarında, AÖB tek başına güvenilir İHA konum bilgisi sağlayamaz hale gelmektedir. Özellikle yeterli görüşün olmadığı ve manuel kullanım ile İHA'nın kalkış noktasına getirilemediği durumlarda GNSS sinyalinin kaybolması büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu çalışmada, yapılan GNSS bağımsız uçuş ve navigasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Hibrit navigasyon çözümlerinin kullanılmasının GNSS bağımsız İHA uçuşlarında büyük öneme sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: İHA, GNSS-bağımsız, navigasyon.

JEL Sınıflandırma: M10, M19.

Global Navigation Satellite System (GNSS) Independent Navigation for Unmanned Aerial Vehicles (UAV)

Abstract

The ability of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) to perform autonomous navigation depends on the accurate determination of their positions provided by the Global Navigation Satellite System (GNSS). For position determination and environmental orientation during flight, UAVs are usually equipped with electronic equipment such as GNSS, Inertial Measurement Unit (IMU), gyroscope and accelerometer. However, the GNSS signal may be lost or distorted due to poor weather, obstacles or terrain, the unfavorable position of satellites, spoofing and jamming. In such cases of GNSS signal loss or deterioration, the IMU alone becomes unable to provide reliable UAV location information. Especially in cases where there is not enough visibility and the UAV cannot be brought to the take-off point by manual operation, the loss of the GNSS signal causes great losses. In this paper, GNSS independent flight and navigation studies are included. It is seen that the use of hybrid navigation solutions has great importance in GNSS independent UAV flights.

Key Words: UAV, GNSS-independent, navigation.

JEL Classification: M10, M19.

¹Doktor, STM Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret A.Ş. engin.gode@stm.com.tr (Sorumlu yazar)

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, ataaymnn@gmail.com

³Profesör Doktor, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, erzesk@gmail.com

⁴Savunma Sanayi Başkanlığı, kursattonbul@gmail.com

⁵Profesör Doktor, Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, gokhan.ogunc@gmail.com

⁶Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, batuhandazeee@gmail.com

GİRİŞ

İHA'lar hem sivil hem de askeri uygulamalarda geniş kullanım alanlarına sahiptir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). Birçok savunma, keşif ve gözetleme operasyonu için İHA'lar merkezi bir rol oynamaktadır (Russell vd., 2020). Bu araçlar insanlar için düşman ortamlarında yer alan ulaşılması imkânsız veya tehlikeli görevleri gerçekleştirebilmektedirler (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). İlk dronlar, radyo ünitesi tarafından yer istasyonu ile insan operatörü tarafından kontrol edilmekteydi. Ancak günümüzde İHA'lar daha karmaşık sistemlere sahip olup, önceden programlanmış uçuş planları ile otonom olarak uçabilmektedir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

Navigasyon, zamana göre önceden tanımlanmış bir referansa göre olan bağıl konum, hız ve oryantasyon olarak tanımlanabilir (Veth, 2006). İHA'ların otonom navigasyonu, yaygın olarak GNSS ile sağlanan konum belirleme olayına bağlıdır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). İHA'lar GNSS'e dayalı açık ortam engel tanımalı uçuşta iyi performans göstermektedir (Perez-Grau vd., 2018). Ancak çoğu durumda, bir dronu bir verici ile manuel olarak kontrol etmek için bir insanlı pilota ihtiyaç vardır ve yeterli açık GNSS koşulları altında otonom görev icrası kısmen mümkün olmaktadır (Bi vd., 2017).

Ticari İHA'ların çoğu uygun durum (konum, hız ve duruş) tahmini elde etmek için Inertial Navigation System (INS, Ataletsel Navigasyon Sistemi-ANS) ve GNSS bilgi füzyonunu kullanırlar. Bazı küçük ve mikro İHA'lar, kısıtlı alan, boyut, ağırlık, güç ve maliyet nedeniyle sensör kullanımında sınırlamalarla karşılaşmaktadır ve bu İHA'lar mağaralar, tüneller, kentsel ve doğal alanlar, kanyonlar ve şehir merkezi alanları gibi zorlu ortamlarda görev yapmaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018). Otonom bir İHA uçuşu sırasında konum ve yön belirlemek için genellikle GNSS ile birlikte üç jiroskop ve üç ivmeölçerden oluşan AÖB'yi kullanmaktadır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). İHA boyutundan bağımsız olarak, GNSS, AÖB tarafından sergilenen sapmayı sınırlandırmada hayati bir rol oynamakta ve araca mutlak konum bilgisi sağlamaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018). Ancak, gerçek çalışma ortamları dinamik olan bu ortamlar kısmen bilinmektedir ve genellikle GNSS erişimsizdir (Mohta vd., 2018). GNSS sinyali; kapalı ortamlarda, yer altında, kentsel ve doğal kanyonlarda, kötü hava koşulları, engellerin veya arazilerin varlığı, uyduların elverişsiz konumu, aldatma ve karıştırma nedenleriyle kaybolabilmekte veya bozulabilmektedir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011; DeFranco vd., 2014). Genel olarak, GNSS sinyalinin zayıf olduğu ya da bu sinyale erişim olmayan ortamlarda, navigasyon sorunları nedeniyle otonom uçuşlar engellenmektedir. Bu durum görev icrasında önemli zorluklara yol açmakta veya en azından İHA'nın kabiliyetlerini sınırlayan manuel kullanımı gerektirmektedir (Causa vd., 2018).

Konumlandırma için yalnızca GNSS'ye güvenmek, sinyal karıştırma veya platformun ele geçirilmesi açısından güvenlik sorunlarına neden olduğundan, potansiyel olarak savunmasız bir sistemle neticelenebilmektedir (Perez-Grau vd., 2018). Bu şartlardaki İHA kullanımlarında GNSS'in olmaması navigasyon ve karar mekanizmaları için İHA'ya monte edilmiş dışa duyarlı sensörlerin kullanımını gerektirmektedir (Sampedro vd., 2019). İHA'ların otonom navigasyonunda genellikle yerleşik AÖB kullanılır. AÖB, üç ivmeölçere ve başlangıç noktasından doğrusal hareketi ve açısal hareketi bulmak için jiroskopa sahiptir.

Ancak AÖB ölçümleri zaman içinde birikmiş hatalardan zarar görmektedir. Bu sapma hataları çok küçük bile olsa zamanla birikerek büyük bir değere ulaşmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016). İHA durum tahmin çözümündeki (konum, hız ve duruş) bu sapmalar yüzünden AÖB tek başına güvenilir İHA konum bilgisi sağlayamaz hale gelmektedir. Bu durum ise İHA konumunun doğru olarak belirlenmesinde hatalara yol açmaktadır. İHA özellikle, pilotun görüş alanından çıktığında ve manuel olarak kalkış noktasına İHA'nın geri getirilemediği durumlarda bu konum belirleme hataları yüzünden hayati derecedeki kötü sonuçlarla karşılaşılabilir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011).

Geleneksel olarak, birikmiş hatayı telafi etmek için GNSS konum ölçümleri, AÖB ölçümleri ile birleştirilir. Ancak GNSS sinyalleri her yerde mevcut değildir ve düşman bölgelerinde, bina yapılarında ve su kütlelerinde kesintiye uğramakta veya erişimsiz hale gelmektedir. GNSS, erişimsiz ortamlarda navigasyon için görsel odometri ve Simultaneous Localization and Mapping (SLAM-Eş Zamanlı Lokalizasyon ve Haritalama) gibi alternatif yöntemler yaygın olarak kullanılan tekniklerdir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016). GNSS erişimsiz ortamlarda navigasyon çalışmaları üzerinde çok çalışılan bir teknolojik alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

1. YÖNTEM

Bu çalışmada İHA'ların GNSS-erişimsiz ortamlardaki navigasyon seçenekleri araştırılmıştır. Literatürde yer alan GNSS-bağımsız navigasyon tekniklerine ve çalışmalarına yer verilmiştir. Literatür taramasında uluslararası dergiler, uluslararası sempozyum/konferans sunum ve bildiri kitapçıkları, North Atlantic Treaty Organization (NATO-Kuzey Atlantik Antlaşması Örgütü) Teknik Raporları, ulusal dergiler ve internet kaynakları kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında GNSS-bağımsız navigasyon konusundaki ilgili araştırma sonuçlarından önce GNSS ve GNSS erişimine engelleyici durumlar, olaylar ve cihazlar hakkında yapılan literatür araştırması sonuçlarına çalışmanın ön kısmında yer verilmiştir. GNSS-bağımsız navigasyon ana konusu ile ilgili literatür araştırmasında ise öncelikli olarak GNSS-bağımsız navigasyon konu başlığı altında yapılan geniş kapsamlı derleme çalışmaları analiz edilmiştir. Bu analiz çalışmaları sonucunda konu üzerinde yüksek uygulanabilirliğe sahip spesifik başlıklar üzerinde literatür taramaları gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalarda ortak ve yenilikçi uygun çalışmalar kapsama dahil edilmiştir.

2. KÜRESEL NAVİGASYON UYDU SİSTEMLERİ (GNSS)

Uydu navigasyonu, otonom coğrafi mekansal konumlandırma sağlamak için uyduları kullanan bir sistemdir. Bu sistem uydu navigasyon cihazlarının, uydulardan radyo ile bir görüş hattı boyunca iletilen zaman sinyallerini kullanarak yüksek hassasiyetle (birkaç santimetreye kadar) konumlarını (boylam, enlem ve irtifa/rakım) belirlemesine olanak tanır. Sistem, konum sağlamak, navigasyon yapmak veya alıcı takılmış bir cihazın konumunu izlemek (uydu takibi) için kullanılabilir. Sinyaller aynı zamanda elektronik alıcının mevcut yerel zamanı yüksek bir hassasiyetle hesaplamasına izin verir, bu da zaman senkronizasyonuna olanak tanır (Satellite Navigation, 2024).

Küresel kapsamaya sahip bir uydu navigasyon sistemi, GNSS olarak adlandırılabilir (Satellite Navigation, 2024). Günümüzde hassas konum bilgisi üretilmesi amacıyla tüm dünyayı kapsayacak şekilde tasarlanmış 4 (dört) küresel ve yerel ihtiyaçları karşılamaya yönelik planlanmış 2 (iki) bölgesel konumlandırma sistemi bulunmaktadır (Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022). Amerika Birleşik Devletleri'nin (ABD), küresel konumlandırma sistemi Global Positioning System (GPS-Küresel Konumlandırma Sistemi), Rusya'nın küresel konumlandırma sistemi Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS - Küresel Uydu Konumlandırma Sistemi), Çin'in küresel konumlandırma sistemi BeiDou ve Avrupa Birliği'ne ait küresel konumlandırma sistemi Galileo tamamen çalışır durumdaki sistemlerdir. Japonya'nın bölgesel konumlandırma sistemi Quasi-Zenith Satellite System (QZSS-Quasi Zenith Uydu Sistemi), GPS'ten bağımsız uydu navigasyonu ile GPS'in doğruluğunu artırmak için GPS uydu tabanlı bir büyütme sistemidir. Hindistan bölgesel konumlandırma uydu sisteminin (Indian Regional Navigation Satellite System (IRNSS- Hint Bölgesel Navigasyon Uydu Sistemi)), uzun vadede küresel bir sürüme geçmesi planlanmaktadır (Satellite Navigation, 2024). GNSS'a ait ilişkin temel bilgiler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Küresel Navigasyon Uydu Sistemlerinin Karşılaştırılması

	Kurucu	Kapsam	Rakım (m)	Uydu Sayısı
GPS	ABD Uzay Kuvvetleri	Küresel	20.180	32
GLONASS	Roskosmos	Küresel	19.130	24
Galileo	GSA ve ESA	Küresel	23.222	30
BeiDou	CNSA	Küresel	21.528 35.786	35
QZSS	JAXA	Bölgesel	32.000 40.000	4
IRNSS/NavIC	ISRO	Bölgesel	36.000	8 (7 tanesi yörüngede)

Kaynak: Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022

GPS'i en gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan GNSS'dir (Schmidt, 2019). GPS, (aslen Navstar GPS), ABD hükümetine ait olan ve Birleşik Devletler Uzay Kuvvetleri tarafından işletilen uydu tabanlı bir radyo navigasyon sistemidir. Dört veya daha fazla GPS uydusuna engelsiz bir görüş hattının olduğu, Dünya üzerinde veya yakınında herhangi bir yerdeki bir GPS alıcısına coğrafi konum ve zaman bilgisi sağlayan GNSS'lerden biridir. Dünyanın her yerindeki askeri, sivil ve ticari kullanıcılara kritik konumlandırma yetenekleri sağlar. GPS sistemini oluşturan ABD hükümeti, kontrol edip ve idamesini sağlasa da, GPS alıcısı olan herkes sisteme ücretsiz olarak erişebilir. GPS projesi, 1960'ların sınıflandırılmış mühendislik tasarım çalışmaları da dahil olmak üzere geçmişteki birkaç fikri birleştirerek önceki navigasyon sistemlerinin sınırlamalarının üstesinden gelmek için 1973'te ABD Savunma Bakanlığı tarafından başlatılmıştır. İlk prototip uzay aracı 1978 yılında fırlatılmış ve 24 uydudan oluşan kümelenme 1993 yılında faaliyete geçmiştir (Global Positioning System, 2024). Gerçek zamanlı kinematik yaklaşımıyla GPS kullanımında 1 cm'ye kadar yüksek konumlandırma doğruluğu elde edilebilir (Pavlenko vd., 2019).

GLONASS, Rusya Federasyonu'nun sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. Tamamen işlevsel durumda olan sistem 24+ uydudan oluşur (Other Global Navigation

Satellite Systems, 2021). GLONASS, askeri ve sivil kullanıcılar için radyonavigasyon-uydu hizmetinin bir parçası olarak çalışan bir Rus uydu navigasyon sistemidir. GPS'e bir alternatif sunar ve küresel kapsam ve karşılaştırılabilir hassasiyetle çalışan ikinci navigasyon sistemidir. Hem GPS hem de GLONASS'ı destekleyen uydu navigasyon cihazları daha fazla uyduya sahiptir. Bu durum özellikle binaların bazı uyduların görüşünü engelleyebileceği yerleşim alanlarda cihaz konumlarının daha hızlı ve doğru bir şekilde sabitlenebileceği anlamına gelmektedir. GPS sistemlerine GLONASS takviyesi, yüksek enlemlerde (kuzey veya güney) konumlandırmayı da iyileştirmektedir. 12 Ekim 1982'den başlayarak, 1995'te uydu sisteminin tamamlanmasına kadar, çok sayıda roket fırlatma ile sisteme uydular eklenmiştir. GPS sinyali almanın sorunlu olabileceği enlemlerde (kuzey veya güney), GLONASS'ın yörüngesi, onu özellikle yüksekte kullanım için uygun hale getirmektedir. Küresel kapsama alanına sahip tamamen işlevsel bir uydu sistemi 24 uydudan oluşurken, Rusya topraklarını kapsamak için 18 uydu gereklidir. Konum sabitlemesi için alıcının en az dört uydunun menziline olması gerekmektedir (Glonass, 2023).

Galileo, Avrupa Birliği tarafından European Space Agency (ESA-Avrupa Uzay Ajansı) aracılığıyla oluşturulan, European Union Agency for the Space Programme (EUSPA-Avrupa Birliği Uzay Programı Ajansı) tarafından işletilen, 2016 yılında yürürlüğe giren ve merkezi Prag'da (Fucino (İtalya) ve Oberpfaffenhofen (Almanya) iki yer operasyon merkezi ile birlikte) bulunan küresel bir navigasyon uydu sistemidir. 10 milyar avroluk proje İtalyan astronom Galileo Galilei'nin adını almıştır. Galileo'nun amaçlarından biri, Avrupalı siyasi ve askeri yetkililerin operatörlerinin herhangi bir zamanda devre dışı bırakılabilecek veya bozulabilecek ABD GPS veya Rus GLONASS sistemlerine güvenmek zorunda kalmamaları için bağımsız bir yüksek hassasiyetli konumlandırma sistemi sağlamaktır. Temel (düşük hassasiyetli) Galileo hizmetlerinin kullanımı ücretsizdir ve herkese açıktır. Tamamen şifrelenmiş, yüksek hassasiyetli bir hizmet ise devlet tarafından yetkilendirilmiş kullanıcılara ücretsiz olarak sunulmaktadır. Galileo, 1 m hassasiyet içinde yatay ve dikey konum ölçümleri sağlamak üzere tasarlanmıştır. Harekat sistemine dahil olan ilk uydu 21 Ekim 2011 tarihinde fırlatılmıştır (Galileo (satellite navigation), 2023). Galileo sistemi, 3 adet yörünge üzerinde yer alan 30 adet uydudan oluşmaktadır. Bu uydular 23.222 km yüksekte konumlandırılmıştır. Her bir yörüngede 8 işlevsel ve 2 adet yedek uydu bulunmaktadır (Pırtı, Gündoğan ve Şimşek, 2022). Galileo sistemi, yayın efemerisi kullanıldığında 1 m'den daha düşük bir doğruluğa (GPS: 3 m) ve uydu yörüngeleri ve saatler için gerçek zamanlı düzeltmeler kullanıldığında uzayda 1.6 cm'lik sinyal aralığı hatasına (GPS: 2.3 cm, GLONASS ve BeiDou: 4-6 cm) sahip olarak GPS'ten daha yüksek bir doğruluğa sahiptir. Sistem, ABD (GPS), Rusya (GLONASS) ve Çin'in (BeiDou) daha askeri odaklı sistemlerinin aksine, öncelikle sivil kullanıma yöneliktir. Avrupa sistemi yalnızca olağan dışı durumlarda (silahlı bir çatışma gibi) askeri amaçlarla kapatılabilir (Galileo (satellite navigation), 2023).

BeiDou veya BeiDou Navigation Satellite System (BDS-BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi), Çin Halk Cumhuriyeti'nin sahip olduğu ve işlettiği küresel bir GNSS'dir. BDS resmi olarak 2020 yılında devreye alınmıştır. İşletim sistemi 35 uydudan oluşmaktadır. BDS, daha önce pusula olarak adlandırılmaktadır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021). BDS, askeri ve ticari amaçlı bir uydu navigasyon sistemidir. İki ayrı uydu sisteminden

oluşur. Resmi adı BeiDou Uydu Navigasyon Deney Sistemi olan ve aynı zamanda BeiDou-1 olarak da bilinen ilk BeiDou sistemi, 2000 yılından başlayarak, özellikle Çin ve komşu bölgelerdeki kullanıcılar için sınırlı kapsama ve navigasyon hizmetleri sunan üç uydudan oluşmaktadır. BeiDou-1, 2012'nin sonunda hizmet dışı bırakılmıştır. Resmi olarak BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi olarak adlandırılan ve aynı zamanda COMPASS veya BeiDou-2 olarak da bilinen sistemin ikinci nesli, Aralık 2011'de 10 uyduluk kısmi bir sistemle yörüngede Çin'de faaliyete geçmiştir. Aralık 2012 tarihinden itibaren Asya-Pasifik bölgesindeki müşterilerine hizmet vermektedir. 2015 yılında Çin, küresel kapsama için üçüncü nesil BeiDou sistemini (BeiDou-3) piyasaya sürmüştür. İlk BDS-3 uydusu 30 Mart 2015'te fırlatılmış olup, 27 Aralık 2018'de BeiDou Navigasyon Uydu Sistemi küresel hizmet vermeye başlamıştır. Sistem, Rusya'nın GLONASS'ı, Avrupa Galileo konumlandırma sistemi ve ABD'nin GPS'ine bir alternatif sunarak, zamanlama ve navigasyon için tam küresel kapsama alanı sağlamaktadır (BeiDou, 2024).

IRNSS, Hindistan hükümeti tarafından sahip olunan ve işletilen bölgesel bir GNSS'dir. IRNSS, Hindistan bölgesini ve Hindistan anakarasının 1500 km çevresini kapsayacak şekilde tasarlanmış otonom bir sistemdir. Sistem 7 uydudan oluşmaktadır. 2016'da Hindistan, IRNSS'yi Navigation Indian Constellation (NavIC, "denizci" veya "navigatör" anlamına gelir) olarak yeniden adlandırmıştır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021).

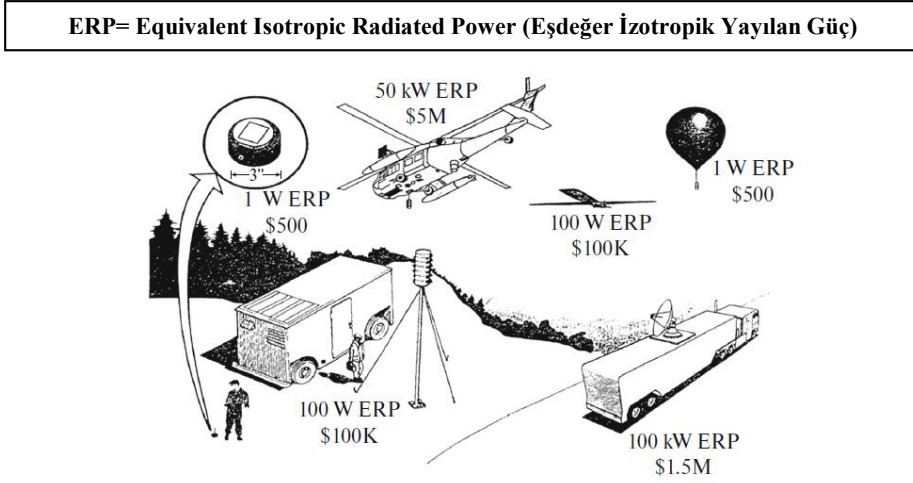
QZSS, Japonya Hükümeti'nin sahibi olduğu ve QZS System Service Inc. (QSS) tarafından işletilen bölgesel bir GNSS'dir. QZSS, Doğu Asya ve Okyanusya'da kapsama alanını iyileştirmek için GPS'i tamamlamaktadır. Japonya, QZSS hizmetlerinin resmi olarak 2018'de 4 operasyonel uydula başladığını ilan etti ve otonom yetenek için uydu sistemini yakın zamana kadar 7 uyduya genişletmeyi planlamaktadır (Other Global Navigation Satellite Systems, 2021).

3. GNSS KARIŞTIRICILAR (JAMMER)

GNSS küresel kapsama alanı, hafif alıcılar, yüksek doğruluk ve düşük maliyet gibi çekici özelliklerinden dolayı İHA'lar için önde gelen konumlandırma çözümüdür. Fakat, GNSS potansiyel sorunlara sahiptir. GNSS'nin düşük sinyal-gürültü oranı nedeniyle bu tür konum sistemleri hem karıştırmaya (jammimg) hem de aldatmaya (spoofing) yatkındır (Gryte vd., 2019). GNSS uydularından çok uzak mesafelerden sağlanan işaretlerin platformlara çok düşük seviyelerde, hatta sistemlerin gürültü tabanlarının bile altında ulaşmaları, GNSS işaretlerinin bilerek veya yanlışlıkla karıştırılmasını veya aldatılmasını mümkün kılmaktadır (Mutluer ve Ünal, 2021). Bu sorunların üstesinden gelmenin bir alternatifi, yedekli konumlandırma sistemlerini kullanmaktır. Böyle bir yedekli kullanım aynı zamanda GNSS kullanıcı ekipmanlarındaki donanım veya yazılım tek nokta hatalarının ya da GNSS sinyalleri ile ilgili sorunların (sinyal engelleme, güneş rüzgârları gibi) azaltılmasına da yardımcı olmaktadır. İHA'ların daha sık kullanılmasıyla birlikte, GNSS'e alternatif çözümler, güvenli ve sürekli operasyonlar için daha ön plana çıkmaktadır (Gryte vd., 2019).

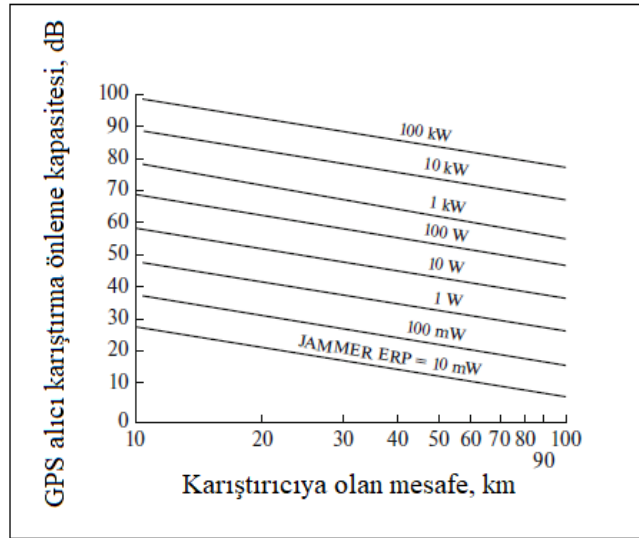
Karıştırıcılara ait temsili görseller Şekil 1'de sunulmuştur. Yüksek güçlü karıştırıcılar, yaydıkları yüksek güç nedeniyle bulunması ve saldırı düzenlenmesi kolay hedeflerdir. Düşük güce sahip karıştırıcıları bulmak ise zordur. Bu karıştırıcılara karşı alıcı içindeki

gelişmiş karıştırma önleme teknolojisi, antenin iyileştirilmesi veya bir ANS/karıştırma yapılamayan cihaz entegrasyonu ile önlem alınması önemlidir (Schmidt, 2019).



Şekil 1. Karıştırıcı Örnekleri (Schmidt, 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Gerekli karıştırma önleme sınırı ve karıştırıcı gücü arasındaki dengeyi belirlemek için Şekil 2'deki hesap tekniği oldukça yararlıdır (Schmidt, 2019).



Şekil 2. GPS Karıştırma Hesapları (Schmidt, 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Karıştırmaya karşı alınabilecek önlemlerde kullanılan teknikler aşağıdaki şekilde özetlenebilir (Schmidt, 2019):

- Düşük maliyetli, yüksek doğruluklu AÖB'ler,
- Uzayda sinyallerin iyileştirilmesi,
- Artırılmış doğruluk,
- Mcode ve Mspot,

- Geliştirilmiş alıcılar,
- AÖB ile derin entegrasyon
- Aldatmaya karşı koruma teknikleri,
- Daha yüksek karıştırma önleme elektronığı,
- Daha yüksek performanslı, daha düşük maliyetli uyarlanabilir antenler,
- Dijital hüzme-oluşturma,
- Modern algoritmalar.

GPS'in askeri kullanımları arasında navigasyon ve zamanlama uygulamaları yer almaktadır ve GPS frekans bantlarındaki karıştırma büyük bir büyük endişe kaynağıdır. GPS sinyali Dünya üzerinde 12500 mil uzaklıkta parlayan 25 watt'lık bir ampule benzetilebilir ve dış kaynaktan Dünya'ya gelinceye kadar çok zayıflar (yaklaşık 1.6×10^{-16} watt). Bir alıcının arka plan gürültüsünde bir GPS uydusundan gelen sinyali alma ve bu sinyale kilitlenme yeteneğinin bir ölçüsü, arka plan gürültüsü veya karıştırma sinyali (J) gücünün, alıcının GPS sinyalinin işlemeye devam edebildiği uydu sinyal (S) gücüne maksimum oranıdır. Genellikle karıştırma-sinyal oranı (J/S) olarak adlandırılan bu oran birden oldukça büyüktür. Örneğin Defense Advanced GPS Receiver (DAGR-Savunma Gelişmiş GPS Alıcısını) kullanarak, sivil L1 C/A GPS sinyalini yakalamak için gerekli maksimum J/S 250'dir. P(Y) sinyalini yakalarken ise, maksimum J/S çok daha büyüktür (2500'e kadar ulaşmaktadır) (Schmidt, 2019).

Alıcı, P(Y) sinyalini yakaladığında GPS sinyalinden 12600 kata kadar daha güçlü sinyal karıştırma durumunda bu P(Y) sinyale kilitli kalabilir. Ancak karıştırıcı yaklaşık olarak sadece 2×10^{-12} watt'tan daha büyük bir güce gerek duyduğu için alıcının yanında yer alan bir karıştırıcı, alıcının GPS sinyaline kilitli olarak kalmasında önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Kişisel koruma cihazları ve karıştırıcılar (tipik olarak 300 watt) bu güç seviyesini kolayca aşabilir. Bu nedenle, karıştırma yapılan bir ortamda GPS kullanılamayabilir (Schmidt, 2019).

GPS sinyalinin zayıflamasına ağaçlar, binalar veya anten yönü neden olabilmekte ve dolayısıyla parazit olmadan bile sinyal/gürültü oranı azalmaktadır. Bu sinyal kaybı, kasıtlı karıştırma ve parazit olmadan bile etkin karıştırma/sinyal (J/S) oranında bir artışa neden olabilir (Schmidt, 2019).

Amerika Savunma Bakanlığı yeni uydular satın alarak ve onları kontrol eden sistemleri iyileştirerek GPS'i her zaman modernleştirmektedir. Bir GPS alıcısının doğruluğu, uydulara gönderilen verilerdeki hatalardan, uydular tarafından yayınlanan verilerden, atmosferik etkilerden ve diğer hata kaynaklardan etkilenebilir. Askeri alıcılar mevcut uyduları kullanarak rutin olarak 3 m doğruluktan daha iyi bir doğruluk sağlamaktadırlar ve gelecekte de bu alıcıların Blok III GPS uyduları kullanarak 1 metreden daha iyi (0.15 m) doğruluk sağlaması beklenmektedir (Schmidt, 2019).

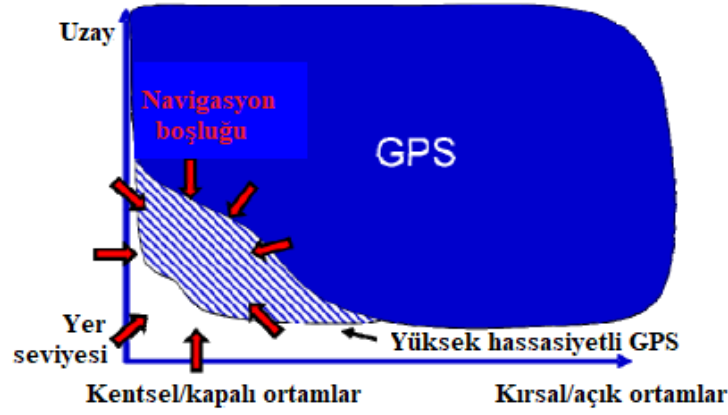
Askeri sistemler için GPS'teki bir başka önemli gelişme daha güvenli olarak tasarlanmış ve mevcut Y-kodundan daha iyi karıştırma direncine sahip M-kodunun kullanımı olacaktır. Daha yüksek güçlü bir sinyale sahip olan bu sistem (mevcut sinyal seviyelerinin +20 dBW

üzerinde) sinyal karıştırma direncini artırmak amacıyla bir operasyon alanı üzerinde yerel kapsama alanı için mevcut olacaktır (Schmidt, 2019).

4. GNSS ERİŞİMSİZ ORTAMLARDA İHA NAVİGASYONU

Küçük otonom İHA'ların birçok alanda kullanılması, İHA'ların 3B (Boyut) kartezyen uzayda tanımlı bir yolu takip etmesini veya tanımlanan bir konuma gitmesini gerektirmektedir. Tipik olarak, bu nedenle, bir GNSS alıcısı kullanılarak elde edilen İHA konum bilgisi normal durumlarda yeterli olmaktadır ve GNSS'in güçlü olması özellikle kolluk kuvvetleri ve savunma uygulamaları için büyük önem arz etmektedir (Unicomb vd., 2017). İHA navigasyonunda konum, hız ve duruş tahmini için en yaygın yaklaşımlar AÖB ve GNSS verilerinin füzyonunu esas almaktadır (Vetrella vd., 2015). Ancak, açık gökyüzüne erişim olmayan ortamlarda, GNSS uydusuna erişim olmayabilir veya sınırlı sayıda uyduya ulaşılabilir. Bazı durumlarda ise görüş hattı olsa bile, GNSS karıştırması veya haberleşme enterferansı nedeniyle GNSS uydu sinyallerine erişimde güçlükler olmaktadır. GNSS erişimsiz ortamlarda konum tahmin modunda ANS tarafından sergilenen hızlı sapma nedeniyle ANS/GNSS entegre çözümü güvenilir hale gelmektedir (Zahran vd., 2018). GNSS performansı uydunun geometrisine oldukça bağlı olduğu için ve daha önemlisi radyo sinyali yolu üzerindeki engellerden kaynaklı parazit girdiler ve emilim nedeniyle İHA'ların GNSS erişimsiz şartlar altında görev yapabilme yeteneğine sahip olması gerekmektedir (Vetrella vd., 2015).

Otonom araçların en zorlu yeteneklerden biri karmaşık ortamlarda, özellikle de GNSS erişimsiz ortamlarda navigasyon ve görev icrasıdır (Qin vd., 2019). İHA otonom operasyonu, bir görevi lokalize etmek ve planlamak için temel olarak GNSS kullanımına dayanır, ancak GNSS'in sınırlandırıldığı veya olmadığı ortamlar sık karşılaşılan bir durumdur (Vanegas vd., 2019). Kapalı ve oldukça kentsel ortamlarda navigasyon, GNSS'in performans gösteremediği bir “navigasyon boşluğu”dur ve alternatif navigasyon tekniklerinin kullanılması, bu boşluğu doldurmanın potansiyel yollarından biridir. Herhangi bir sistem gibi navigasyon sensörlerinin de güçlü ve zayıf yönleri vardır. Örneğin, GPS çok iyi derecede doğruluğa sahiptir, ancak uydu sinyallerinin kaybı nedeniyle kesintilere uğramaktadır. Atalet sensörleri yalnızca karıştırma yapılamayan yerçekimi ve platform dinamiklerine dayanır, ancak zamanla büyüyen ve sonunda kabul edilemez hatalar sergilerler. GPS'teki yetersizlikler (navigasyon boşluğu) Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekildeki yatay eksen kentsel/kapalı ve kırsal/açık ortamlar arasındaki sürekliliği temsil etmektedir. Dikey eksen yer seviyesinden uzaya kadar yaklaşık yüksekliği temsil etmektedir (Miller vd., 2011).



Şekil 3. Navigasyon Boşluğu (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

GNSS erişimsiz ortamlarda geliştirilmesi gerekli navigasyon sistem gereksinimlerini şu şekilde özetlenebilir; (a) belirsiz bir görev süresini destekleyen, (b) gerçek zamanlı 3B bölge performans desteği olan, (c) kentsel ortamlarda ve yerleşim ve çoğu ticari binaların içinde lokalizasyonu destekleyen, (ç) bilinmeyen (haritalanmamış) veya kısmi olarak bilinen (kısmi olarak haritalanmamış) ortamlardaki operasyonları destekleyen, (d) güç kesilmesi durumlarında lokalizasyonu destekleyen ve ayrı bir başlangıç bölgesi gerektirmeyen, (e) bireysel tekil kullanıcı istasyonlarını destekleyen, (f) geçici bir kayıptan sonra yeniden navigasyon yeteneği elde eden, (g) düşük maliyetli ve düşük ağırlıklı, (ğ) kullanıcının hareket etmesini gerektirmeyen, (h) belirli bir düzeyde bütünlük, doğruluk, kullanıma hazır olma ve taktik görev gereklilikleri ile tutarlı hizmet sürekliliğe sahip sistemlerdir (Miller vd., 2011).

Engellere yakın olarak güvenli bir şekilde İHA kullanımı için hızlı reaksiyon sürelerinin gerekli olduğu durumlarda insan operatörler için bazı GNSS'siz senaryolar çeşitli sorunlar teşkil etmektedir. Harici hareket izleme sistemlerinin yardımıyla İHA kullanımı kolaylaşsa da İHA uzaklaştığında veya harici lokalizasyon sürdürülemediğinde yine kullanım zorlukları ortaya çıkmaktadır (Lu, 2022). Ayrıca GNSS, aldatma, karıştırma ve çevresel etkilere karşı savunmasız kalabilmekte, kapalı iç mekanlarda kesintiye uğramakta ve kanyon, ormanlık alan gibi bölgelerde güvenilirliği azalmakta ve hava koşullarından da kolaylıkla etkilenebilmektedir (Gyagenda vd., 2022; Wang vd., 2012; Wang vd., 2013). Sistemin bu eksiklikleri GNSS'den bağımsız navigasyon çözümlerinin gelişmesine neden olmuştur. İnsansız kara taşıtları ile başlayan GNSS bağımsız navigasyon çözümleri bu araçlar için belirli bir uygunluk seviyesine ulaşmıştır. Ancak hava araçlarındaki uygulama iki boyut yerine üç boyutlu ortamın devreye girmesi nedeniyle daha sınırlı bir seviyededir (Gyagenda vd., 2022). İHA'nın açık bir gökyüzü görüşe sahip olması koşuluyla (güvenilir bir GNSS konumlandırması elde etmek için) İHA'lar GNSS yol noktalarını (way-point) içeren önceden tanımlanmış rotalara programlanabilmektedir (Vanegas vd., 2019). Ancak İHA'lar için hareket planlama problemi, bu araçların hızlı, karmaşık ve belirsiz dinamiklere ve yük sınırlamalarına sahip oldukları 3 boyutlu uzayda gerçek zamanlı navigasyon yapmaları ve sürekli çevre ile etkileşim içinde olmaları nedeniyle oldukça zordur (Liao vd., 2016).

Hız, baş istikameti, irtifa ve konum İHA navigasyonunu etkileyen en önemli parametrelerdir (Gyagenda vd., 2022). Bu bilgiler uçuş kontrol birimi için gerekli girdilerdir (Gryte vd., 2019). Navigasyon ve kontrol çözümünde yüksek düzeyde doğruluk ve güvenilirliğe ihtiyaç duyulduğu için otonom iniş, en karmaşık ve kritik aşamadır. Bir mobil platforma otonom iniş için bir navigasyon sistemi uygularken aracın konum, hız ve duruşunu ölçmek ve belirlemek için çoklu sensörlerin geri bildirimine sahip olmak gereklidir (Alarcon, Santamaria ve Viguria, 2015).

4.1. GNSS-Erişimsiz Ortamlardaki Navigasyon Teknikleri

Navigasyon, derinlemesine analiz edilmesi gereken kritik öneme sahip bir konudur. Dış ortamlarda, İHA'lar GPS gibi uzay tabanlı uydulardan yararlanarak lokalizasyon yapabilir. Ancak uydu navigasyon sisteminin hassasiyeti özellikle sivil uygulamalar başta olmak üzere sınırlıdır. GPS ile elde edilebilen konum doğruluğu askeri uygulamalarda ≤ 1 m ve sivil uygulamalarda ise yaklaşık 10 m'dir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). GNSS-erişimsiz ortamlarda navigasyon, üzerine çalışılan en popüler konulardan biridir ve çeşitli teknikler bu alan için geliştirilmiştir.

4.1.1. Atalet Navigasyon Sistemleri ve Sensörleri

İHA'lar küresel olarak birçok araştırmacının, kuruluşun ve hatta sıradan kullanıcıların dikkatini çekmiştir. Platform üzerinde insan bulunmaması nedeniyle, İHA'ların çevre ile etkileşimini sağlamak için insan duyularına benzeyen ve çeşitli durumlarda ortaya çıkan insan reflekslerini taklit eden sensörlerle donatılması gerekmektedir. İHA'lar artık günlük yaşamda çok çeşitli faaliyetlerde, askeri ve sivil uygulamalarda farklı alanlarda önemli bir rol oynamaktadır ve insan hayatını tehlikeye atmadan tehlikeli görevleri yerine getirerek, zaman ve iş gücü tasarrufu sağlamaktadır. Askeri veya sivil alanlarda icra edilen tüm görev durumlarında, İHA'ların otonom olarak çalışması gereklidir. İHA'ların insan müdahalesi olmadan görevlerini otonom olarak yerine getirmesi için gözlem ve karar vermede platformda bulunan yerleşik sensörler kullanılır (Zahran vd., 2018).

Küçük İHA'lardaki yerleşim sınırlaması nedeniyle, otopilot ve sensörlerin boyut ve ağırlık açısından küçük olması ve İHA'nın düşük güç tüketimi gerçekleştirmesi gereklidir. Tüm İHA'lar, boyutu, görevi veya maliyeti ne olursa olsun, konum, hız ve duruş tespiti için esas olarak GNSS ile ANS'ye ihtiyaç duyar (Zahran vd., 2018). Küresel koordinatlara erişim olmayan durumlarda, bir İHA kendi ANS bilgisine güvenmelidir (Russell vd., 2020). GNSS, mutlak hızı ve aracın konumu tahmin ederek, atalet sensörlerinin birikmiş hatalarını sınırlandırabilmektedir. Ancak küçük İHA'ların GNSS erişimi olmayan ortamlardaki otonomisinde uçuş ortamına ilişkin herhangi bir ön bilgi olmaksızın araç durumunun belirlenmesi için diğer sensörlerin AÖB ile füzyonu gerekir. Bu otonomi çevrimiçi bir harita oluşturan ve o harita üzerindeki 6 serbestlik dereceli konumu tahmin edebilen SLAM gibi teknikler ile sağlanabilmektedir (Wang vd., 2013).

İHA'lar tipik olarak Genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) kullanılarak, üç eksenli bir ivmeölçer, üç eksenli bir jiroskop, bir yerleşik AÖB, üç eksenli bir manyetometre, bir yükseklik sensörü, bir barometre ve optik akış sensörleri içeren çok sayıda sensörden elde edilen bilgilerin füzyonunu sağlayan navigasyon birimlerinden oluşur. Böyle bir sistem İHA

duruşunu yeterince doğru tahmin ederek, İHA'yı kontrol etmeyi ve İHA stabilizasyonunun sağlanmasını mümkün kılmaktadır. İHA'nın kartezyen konumu ancak bir GNSS alıcısı navigasyon ünitesine bağlı olduğunda gözlemlenebilir hale gelmektedir (Unicomb vd., 2017; Shang vd., 2017).

ANS'ler karıştırılmaz birimlerdir. ANS'deki ana hata kaynakları jiroskop ve ivmeölçer atalet sensörlerindeki hatalar, yanlış navigasyon sistemi başlatma durumları ve hesaplamalarda kullanılan yerçekimi modelindeki kusurlardır. Ancak, neredeyse tüm ANS'lerde, en büyük hatalar atalet sensörlerinden kaynaklanmaktadır. Büyük hatalar jiroskoplar için açılma oranların, ivmeölçerler içinse belirli kuvvetlerin ölçümünde ortaya çıkmaktadır. Her iki sistem için de en büyük iki hata genellikle jiroskop sapması için derece/saat oranında ölçülen kararsızlık yanılması (veya ivmeölçer yanılması için mikro g) ve algılanan atalet miktarının parts per million (ppm-milyonda bir birim) cinsinden ölçülen ölçek faktörü kararlılığıdır (Schmidt, 2019).

GNSS erişimi olmayan ortamlar için gerekli olan İHA navigasyon sensörleri; duruş sensörleri, lokalizasyon sensörleri, irtifa sensörleri, haritalama sensörleri ve engel tanıma sensörleri şeklinde sınıflandırılabilir. Bu sensörler için başka bir sınıflandırma da atalet sensörleri, görü sensörleri, Light Detection and Ranging (LiDAR- Işık Tespiti ve Uzaklık Tayini) sensörleri, radyo sensörleri, radar sensörleri ve akustik sensörler şeklinde yapılabilir. Sensör seçim kriterlerinde dinamik aralık, hata özellikleri, bant genişliği, araç faydalı yükü kısıtlamaları, çözünürlük, tepki süresi, çalışma ortamı, uçuş ayarları, hesaplama kaynakları ve güç kullanılabilirliği dikkate alınmaktadır. Görü sensörleri lokalizasyon, lokalizasyon ve haritalama, geçiş hızı tahmini, iniş alanı algılama, engel tanıma, durum tahmini ve iniş alanı tespiti ve iniş uygulamalarında kullanılmaktadır (Gyagenda vd., 2022). Laser Range Finder (LRF-Lazer Mesafe Ölçer) tabanlı yaklaşımlarla karşılaştırıldığında, kamera sistemleri hafifliği ve düşük maliyeti nedeniyle rekabetçi alternatiflerdir. Daha da önemlisi kamera sistemleri doğal olarak 2B LRF sistemine göre daha fazla bilgi içermektedir (Qin vd., 2016). Radarlar, pitot tüpleri, manyetometreler, LiDAR ve kameralar bağımsız atalet sistemlerinin yanlışlığını ve ANS'nin sapmalarını azaltmak için kullanılmaktadır. GNSS erişimsiz ortamda doğru bir navigasyon çözümüne ulaşmak için bu sensör verilerinin ANS ile füzyonu gereklidir. Her ne kadar bu füzyon yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları olmasına rağmen, bu yöntemler hala bağımsız konum belirleme çözümünden daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca tüm bu yardımcı yöntemlerinin ekstra bir sensörün eklenmesi gibi ortak dezavantajları vardır. Bu da, ekstra ağırlık, ekstra güç tüketimi, ekstra maliyet ve bu sensörlerin çalışma sınırlamaları nedeniyle ek kısıtlama anlamına gelmektedir (Zahran vd., 2018). Lokalizasyon kapsamında ise yer seviyesinden yükseklik ölçüm teknikleri altimetre ile ölçüm (sonar, barometre, lazer telemetri, radar) ve bilgisayar görüşü (stereo kamera ve hareket yakalama sistemi) ile ölçüm sınıflarına ayrılır (Gyagenda vd., 2022).

Bir AÖB genellikle iki ortogonal sensör üçlüsünden oluşmaktadır. Sensör üçlüsünden biri, üç adet tek eksenli ivmeölçerden, diğer sensör üçlüsü ise üç adet tek eksenli jiroskoptan oluşur. İki sensör üçlüsü nominal olarak paraleldir ve jiroskopun orijini ivmeölçer üçlüsünün orijini olarak tanımlanır (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Bir eksen boyunca meydana gelen ivme aşağıdaki eşitlik (1) ile ifade edilebilir, burada termal kayma dikkate alınmaz:

$$\ddot{Z}_a = \ddot{Z} + g + \epsilon_a + S_a g \quad (1)$$

Eşitlik (1)'de \ddot{Z}_a : Sensör çıkışında ölçülen ivme; \ddot{Z} : İvmenin (dikkate alınan noktadaki) gerçek değeri; g : Yerçekimi ivmesi; ϵ_a : Sapma; S_a : Ölçek faktörüdür (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Nesne tanıma sorunu ile ilgili olarak, klasik bilgisayarlı görü algoritmaları genellikle çalışılan ortamın koşullarına (Örn; aydınlatma koşulları, arka plan çeşitliliği, dağınıklık vb.) çok bağlıdır. Bu nedenle kesin bir nesne tespiti yapmak ve görüntü düzleminde olası hataları ortadan kaldırmak için algoritma parametreleri her yeni ortam ele alındığında tekrar düzenlenmelidir. Ayrıca, bu düzenleme prosedürü genellikle deneme-yanılma testleri ile gerçekleştirildiği için oldukça zor bir görev haline gelebilmektedir. Anlamlı veri kümeleri üzerinde öğretildiklerinde makine öğreniminin kullanımı çeşitli ortamlarda yürütülebilen çok yönlü çözümler sağlayarak bu sınırlamaların ve zorlukların üstesinden gelebilmektedir. Ancak, bazı makine öğrenimi modelleri nesne tanıma için İHA'lara uygun olmayan (hesaplama kısıtları yüzünden) çok sayıda parametrelili derin modeller içermektedir (Sampedro vd., 2019). İHA'ların engellerin doğasına bağlı olarak farklı çarpışmalardan kaçınma stratejilerini de benimsemesi gerekebilir. Reaktif çarpışmayı önlemek için uçuş yörünge planlayıcısından elde edilen sensör verileri gerekmektedir (Perez-Grau vd., 2018).

Radar üretimindeki gelişmeler ile küçük ve mikro İHA'ların navigasyonuna uygun mikro radarların geliştirilmesi uygulanabilir hale gelmiştir. Radarlar GNSS kesintisi sırasında AÖB sapmasını sınırlamak için kullanılabilir. Radarlar, LiDAR ile aynı dezavantajlara sahip olsa da, çevresel değişikliklere karşı daha az duyarlı olduğu için bazı açılardan kameralardan veya LiDAR'dan daha pratik uygulamalara sahiptir (Zahran vd., 2018). Küçük İHA'lar için, çok ağır olan lazer gibi geleneksel sensörler havada kısıt teşkil etmektedir (Zhang vd., 2016). Lazer sensörlerin kullanımında, kısıtlı İHA çalışma yüksekliği (irtifa) ve veri iletimi için düşük bant genişliği söz konusudur (Mebarki ve Lippiello, 2014).

Küçük İHA'ların gerçek ağırlığı, boyut yapısı, kinetik enerjisi ve GPS-karıştırmalı ortam, geleneksel navigasyon sensörlerinin kullanımını sınırlandırmaktadır. Bahsedilen bu durum, zengin hareket kapasitesi ve çevre bilgileri içeren görsel sensörlerin kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Optik akış teknikleri, navigasyon sorununa karşı böcek ve kuş uçuşları gibi doğal çözümlerdir. Çeşitli navigasyon alt görevleri tek başına optik akışla veya mesafe tahmini, hız tahmini, dikey iniş vb. dahil olmak üzere atalet ölçümleriyle gerçekleştirilmektedir (Zhang vd., 2016).

4.1.2. Kalman Filtresi

Navigasyon algoritmalarıyla ilgili olarak en yaygın kullanılan tekniklerde Kalman Filtresi (KF) ve özellikle de Genişletilmiş Kalman Filtresi (GKF) kullanılır (Benini, Mancini ve Longhi, 2013). Görü ve atalet verilerinin füzyonu, GKF'nin uygulanması yoluyla gerçekleştirilir. GKF, hesaplanan sistem parametrelerindeki hataları tahmin eder. Doğrusallaştırma hatalarının etkilerini en aza indirmek için sistem parametreleri mevcut hata tahminleri ortadan kaldırılarak periyodik olarak düzeltilir (Miller vd., 2011). Ancak, GKF

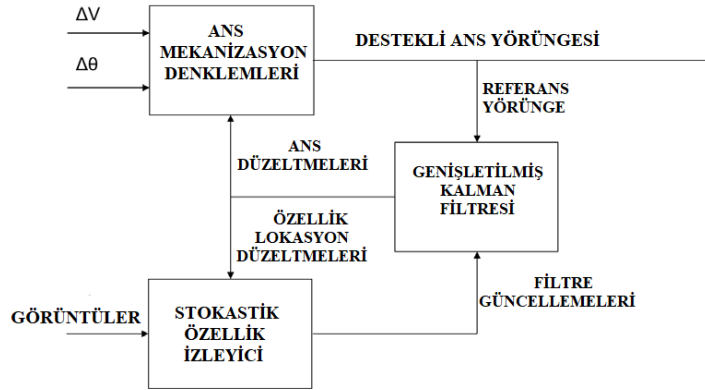
gerçek zamanlı araç konumu güncellemeleri sağlamasına rağmen doğrusal olmayan modellerle çözümleme yaparken, doğrusallaştırmadan zarar görebilecek doğrusal sistem modellerini esas alır. Kalman Filtresi, cihaz ve bilinen en az üç nokta arasında yapılan aralıklı ölçümler temelinde bir mobil cihazın x ve y koordinatlarının tahmini için uygundur. Kalman filtresi gibi GKF de kestirim ve tahmin olmak üzere iki adımda uygulanmaktadır. GKF doğrusallaştırma ile Bayes kuralının optimalliğine yaklaşan bir plansız durum tahminidir (Benini, Mancini ve Longhi, 2013).

Uçuş sırasında, navigasyon durumu AÖB mekanizasyon süreci aracılığıyla ivmeölçer ve jiroskop ham ölçümlerinden elde edilir. GNSS sinyali mevcut olduğunda, her iki sistemin çözümleri arasındaki fark GKF'ye beslenir. GKF'den elde edilen çıktılar, ivmeölçer hataları, jiroskop hataları, ölçek faktörleri ve navigasyon durumunda tahmin edilen hatalardır. Filtre durumu eşitlik (2)'de yer alan 21 adet durumdan oluşur:

$$\delta x = [\delta r^n \delta v^n \delta \varepsilon^n b_a d_g s_a s_g]^T \quad (2)$$

δr^n : Konum; δv^n : Hız; $\delta \varepsilon^n$: Duruş hata vektörü; b_a : İvme hatası s_a : Ölçek faktörü; d_g : Jiroskop sapması; s_g : Ölçek faktörüdür (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

Görü destekli navigasyonun bir blok diyagramı Şekil 4'te gösterilmektedir. GKF'nin türetilmesini sağlamak için temel ölçüm (görüntü düzlemindeki özelliğin piksel konumu) ile durum (kullanıcının konumu ve hızı) arasında bir ilişki kurulmalıdır. Bu ilişki doğrusal değildir (Miller vd., 2011) ve genel ifadesi eşitlik (3)'te verilmiştir:



Şekil 4. GKF ile Görü-Destekli Ataletsel Navigasyon Filtresi Blok Diyagramı (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

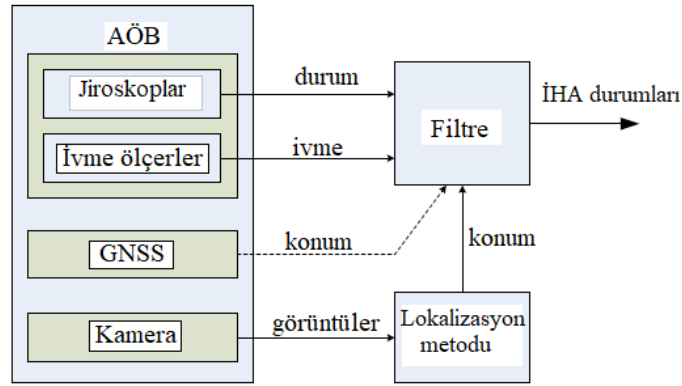
$$\tilde{z}(t_i) = \mathbf{h}\{\mathbf{p}_N(t_i), \mathbf{C}_b^N(t_i), \mathbf{y}_N(t_i), \mathbf{T}_c^{\text{pix}}\} + \mathbf{v}(t_i) \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te \mathbf{p}_N : Navigasyon çerçevesindeki kullanıcı konumu; \mathbf{C}_b^N : gövde; \mathbf{y}_N : Navigasyon çerçevesindeki özellik konumu; $\mathbf{T}_c^{\text{pix}}$: Homojen kamera projeksiyon matrisi; \mathbf{v} : Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ve \mathbf{h} : Doğrusal olmayan bir fonksiyondur.

4.1.3. GNSS-Erişimsiz Ortamlarda Görü-Destekli Ataletsel Navigasyon Sistemi

GNSS araç konum bilgisini sağlamak için harici kaynaklara (uydulara) ihtiyaç duyar, bu nedenle GNSS kentsel alanlarda düzgün çalışmaz, alçak irtifalarda güvenilir değildir ve uydu sinyal kesilmelerine maruz kalır. Ancak görü, piksel yapısındaki çözümü ile zengin bilgi sağlar, pasiftir, hafif ve düşük maliyetli donanım gerektirir. Ayrıca işlemci teknolojisinde ilerlemeler yerleşik algoritmalarda büyük öneme sahip olan görüntü akış hızının gelişmesini sağlamıştır (Mebarki ve Lippiello, 2014).

GNSS sinyalinin olmadığı veya zayıf olduğu ortamlardaki uçuş için olası bir çözüm, hâlihazırda mevcut olan navigasyon sistemini desteklemek için bir görü sisteminin entegrasyonudur (Şekil 5). Bir lokalizasyon yöntemi görüntülerde önceden çıkarılmış bazı özellikleri algılamak için ve dolayısıyla GNSS sinyali kaybolduğunda İHA'nın konumunu hesaplamak için kullanılabilir. Bir Kalman filtresi de konum sensörlü atalet sensörlerinden gelen sinyallerin füzyonu için değerlendirilebilir (GNSS veya GNSS'in mevcut olmadığı durumundaki görü sistemi). Görü tabanlı çözümler ve video kameralar İHA'lar için standart donanım haline geldiği için caziptirler. Ayrıca, kameralar renk ve doku gibi zengin bilgiler sağlar (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). AÖB ve kameranın temel özellikleri, doğru tahmin sağlamak için birbirleriyle çalışmaya çok uygundur. AÖB'ler ideal olarak navigasyon amacıyla seçilir, çünkü ölçüm verilerini daha yüksek bir örnekleme hızında sağlayabilir. Ancak zamanla AÖB ölçümleri sapma gösterir ve hatalar birikir. Görü sensörü diğer şekilde davranır, ölçümler, yakalanan görüntünün işlenmesi için uzun süre gerekmesi nedeniyle düşük örnekleme hızındadır ve ölçüm zamanla sapmaz. Görü ve atalet sensörlerinin füzyonu ile İHA'nın daha iyi bir duruş tahmini sağlanır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

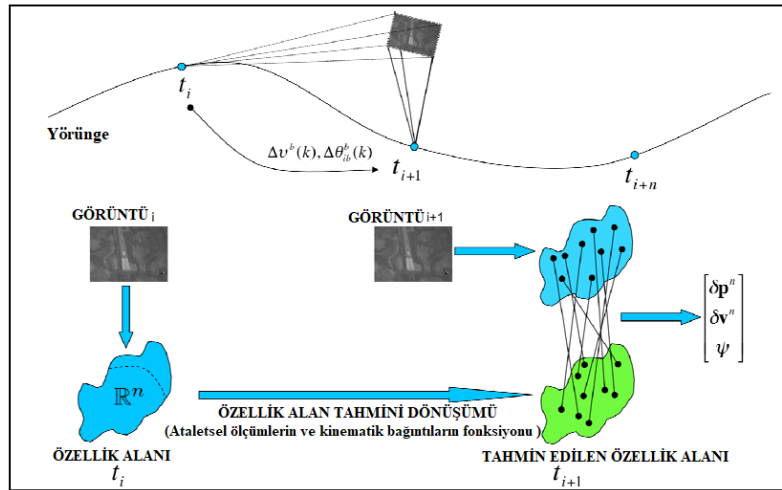


Şekil 5. GNSS-Bağımsız Navigasyon Mimarisi (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011)
(Yeniden düzenlenmiştir).

Görü-destekli navigasyon, pasif sinyal navigasyonu için mükemmel bir çözümdür. Bunun nedenlerine bakılacak olursa, ilk olarak birçok hayvan, navigasyon için görsel bilgileri kullanmaktadır. Aslında, oküler-vestibüler sistem insanlar için birincil navigasyon paketini sağlamaktadır. İkincisi, optik sensörler doğası gereği yüksek bant genişliğine sahiptir. Bu durum çok hassas açısız çözünürlük potansiyeline neden olmaktadır. Son olarak, dijital görüntüleme sensörleri rahatça bulunabilir ve ara yüzlerle kolaylıkla kullanılabilir, bu avantajlar da onları navigasyon potansiyelinin araştırılması için çok pratik bir çözüm haline getirmektedir (Miller vd., 2011).

Görü-destekli yöntemler, özellik-tabanlı veya optik-akış tabanlı olarak sınıflandırılır. Özellik-tabanlı yöntemler, çoklu çerçeveler üzerindeki sahnede yer alan özelliklerin (veya “yer işaretlerinin”) karşılıklarını belirlerken, optik-akışa dayalı yöntemler tipik olarak çerçeveler arasındaki görüntünün bütün bir kısmı için karşılıkları belirler. Optik akış yöntemleri genellikle göreceli hız belirlenmesi, açılal oranlar veya engellerden kaçınmaya odaklanarak temel hareket algılama için önerilmiştir. Özellik izleme-tabanlı navigasyon yöntemleri ise hem sabit montajlı görüntüleme sensörleri hem de gimbal-montajlı detektörler için önerilmiştir (Miller vd., 2011).

Birçok özellik-izleme tabanlı navigasyon yöntemi hedef konumun bilgisinden (ya ön bilgi olarak, binoküler stereopsis yoluyla ya da arazi homografisinden yararlanarak) yararlanır ve ters yörünge izdüşüm problemini çözer. Eğer bölge hakkında bir ön bilgi yoksa, navigasyon durumunun kestirimi tamamen olay yerinin tahmini ile ilişkilidir. Özellik-tabanlı görü/ataletsel entegre navigasyonun temel konsepti, Şekil 6'da gösterilmiştir (Miller vd., 2011).



Şekil 6. Görüntü-Destekli Atalet Algoritmasına Genel Bakış (Miller vd., 2011) (Yeniden düzenlenmiştir).

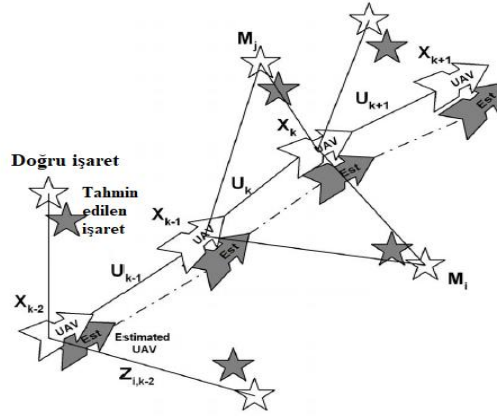
Algoritma şu temel adımlardan oluşur: t_i zamanında sistem, dijital görüntüleme cihazını kullanarak bir ortam görüntüsü alır ve bu görüntüyü özellik alanı olarak adlandırılan bir alanda bir dizi ayrık özelliğe dönüştürür. Ardından hem navigasyon durumu hem de özellik alanı durumu bir sonraki görüntüleme olayı olan t_{i+1} 'e ilerletilir. t_{i+1} 'de başka bir görüntü yakalanır ve özellik alanına dönüştürülür. Hem t_{i+1} zamanında yakalanan görüntü çerçevesinin özellik alanı, hem de ilerletilmiş özellik alanı, t_i ile t_{i+1} anı arasındaki özellikleri birleştiren istatistiksel özellik uyum algoritmasına girdi oluştururlar. Son olarak, yörünge hatası, bir Kalman tahmin edicisindeki bu ilişkili özellikler kullanılarak tahmin edilir (Miller vd., 2011).

4.1.4. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM-Eşzamanlı Lokalizasyon ve Haritalama)

Genel olarak, uçuş için geliştirilen sistemler ve algoritmalar tamamen bilinmeyen ortamlarda 3B ortamın haritasını çıkararak navigasyon çözümleri sağlamak zorundadır. Bu çözümler

SLAM teknikleri olarak adlandırılır ve bu tekniklerde atalet verisi ile lazer ve/veya görü verilerinin füzyonu kullanılmaktadır. Özellikle görsel SLAM'de uçuş boyunca alınan görüntülerdeki eş noktalar takip edilir (Vetrella vd., 2015). Esas olarak eş zamanlı araç duruş tahminine ve harita oluşumuna bağı olan SLAM, GNSS sinyali yokluğunda kullanılabilcek alternatif bir yöntemdir. SLAM, kameralar, sonar veya LiDAR gibi çeşitli sensörlerin kullanılmasıyla uygulanabilir (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

SLAM tekniğinde, çevreleyen ortam için aşamalı olarak tutarlı bir canlı harita oluşturulur ve bu canlı haritada eşleştirme yapılarak aracın durumu tahmin edilir. SLAM teknolojisindeki ilerleme, çevredeki ortamın canlı bir haritasını oluşturmaya ve aynı zamanda çevresinin yerleşik haritasını kullanarak aracın lokalizasyonuna olanak tanımıştır. Bu lokalizasyon teknolojisi ile aracın uzak ortamlara navigasyonu gerçekleştirebilmektedir. Görev ortamında hareket eden ve bilinmeyen görüntü özelliklerini yakalayan kamera monte edilmiş bir araca uygulanan bu yöntem Şekil 7'de sunulmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu; 2016; Whyte ve Bailey, 2006).



Şekil 7. SLAM (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

Şekil 7'de:

X_k = k anındaki araç durum vektörü,

U_k = k-1'den k'ya gitmek için araç kontrol vektörü,

M_i = i. görüntü özellik yer vektörü'dür (Burada i. görüntü özelliğinin statik olduğu kabul edilmektedir),

Z_{ik} = k anında, i. görüntü özelliği araç kamerasından elde edilir.

SLAM adımları aşağıdaki şekildedir:

1. Aracın ilk konumu X_{k-1} 'in, araç konumunun yüksek belirsizliği ile birlikte haritada önceden var olan görüntü özelliklerine sahip bir başlangıç olduğu varsayılır.
2. Araç X_{k-1} 'den X_k 'ye hareket etmeye başladığında, hareket modeli, yeni konumuna ilişkin yeni tahminler sağlar ve ayrıca yer belirsizliği bu sırada artar.
3. Araç hareketi sırasında haritaya yeni özellikler M_i eklenir ve mevcut özellik ölçümü güncellenir.

4. Öngörülen gözlem ve gerçek gözlem arasındaki fark hesaplanır.
5. Aracın mevcut durum tahmini güncellenir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

SLAM, kapalı mekan İHA navigasyon uygulamaları için standart bir teknik haline gelmiştir (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). Görü yöntemi, ağırlık, maliyet ve bilgi açısından küçük İHA'ların otonom navigasyonu için GNSS'e iyi bir alternatif olarak görünmektedir. Görü sensörleri İHA'ların gözetleme görevleri için yıllardır kullanılmaktadır. Ayrıca bu sensörler küçük İHA'ların otonom navigasyon ve kontrolünde de önemli bir rol oynamaktadır. Görü ölçümü ile SLAM'in kullanılması çok fazla ilgi gören uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır. Görsel 3B SLAM kısmen yapılandırılmış ortamlarda görev yapan İHA'lar için geliştirilmiştir. Bu algoritmada araç, uniform hareketli rijit bir gövde olarak modellenmiştir ve ivme sistem gürültüsü olarak kabul edilir. Önerilen başka bir görsel SLAM sistemi, yalnızca doğal gözlem olarak yer işaretlerini alır. Bu sistemde İHA'nın hareketini tahmin etmek için homografi tabanlı yaklaşım kullanılmıştır ve yeni bir dönüm noktası olan yer işaretleri başlatma yöntemi geliştirilmiştir (Wang vd., 2013). LiDAR tabanlı SLAM, küçük ve mikro İHA'lar ile kullanılması halinde ağırlık, maliyet, boyut ve güç tüketimi açısından bazı dezavantajlara sahiptir (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

SLAM ve odometri yaklaşımları kısa vadeli lokalizasyonda ve hatta döngü kayıpsız uzun yörüngelerde iyi sonuçlar vermiştir (Perez-Grau vd., 2018). Ancak SLAM, geniş alanlara uygulandığında hala sorunlarla karşılaşmaktadır (Rady, Kandil ve Badreddin, 2011). Görsel SLAM'e dayalı robot lokalizasyonunu tahmin etmek için monoküler görüşlü, atalet sensörleri ile yükseklik sensörlerinin (barometreler, ultrasonik sensörler veya lazerler gibi) füzyonunu içeren yaklaşımlar bulmak çok yaygındır. Bu yaklaşımlar aynı bölge tekrar tekrar ziyaret edildiğinde çok iyi çalışmakta, ancak bilinmeyen senaryolarda yüksek hızlı İHA hareketlerinde genellikle başarısız olmaktadır. Optik akış yaklaşımları da aynı sensörleri kullanmaktadır, ancak sadece doğrusal hızları tahmin etmeyi amaçlar. Bu yaklaşımların görüntülenen ortamın yaklaşık olarak düzlemsel olması durumunda İHA'larda yukarı ve aşağı bakan kameralar için iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ancak lokalizasyon (odometri) için hız entegrasyonu hızla sapma göstermekte ve bu yöntemler uzun vadeli lokalizasyon için kullanılamamaktadır (Perez-Grau vd., 2018).

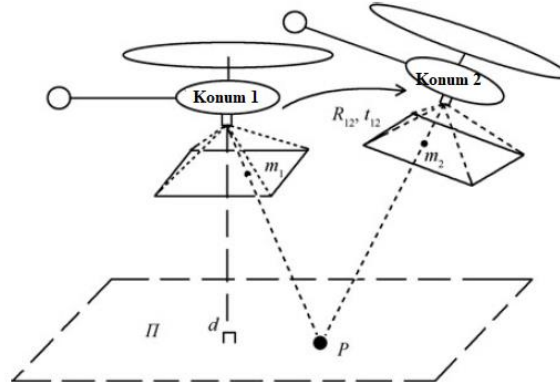
SLAM içerisinde homografi tabanlı bir yöntemde (Wang vd., 2013) araç hareketi 6 serbestlik dereceli olarak hesaplamalarda kullanılmıştır. Daha sonra, görü ölçümünün dolaylı bir GKF tarafından atalet sensörlerinin çıktısı ile füzyonu sağlanmıştır. Homografi, ölçek, döndürme ve öteleme dahil iki görüntü arasındaki dönüşümü belirtmek için kullanılır ve eşitlik (4)'teki şekilde tanımlanır:

$$\lambda \tilde{m}_2 = H \tilde{m}_1 \quad (4)$$

Eşitlik (4)'te \tilde{m}_1 ve \tilde{m}_2 : Piksel koordinatlardaki iki ardışık çerçevenin karşılık gelen özellikleri için homojen konumlar; H : Homografi matrisi; ve λ : ölçek faktörüdür.

Küçük bir İHA'nın üzerinde aşağı doğru bakan bir kamera ile uçtuğu varsayıldığında m_1 ve m_2 Şekil 8'de gösterildiği gibi düzlem Π 'deki sabit bir P noktasının kamera

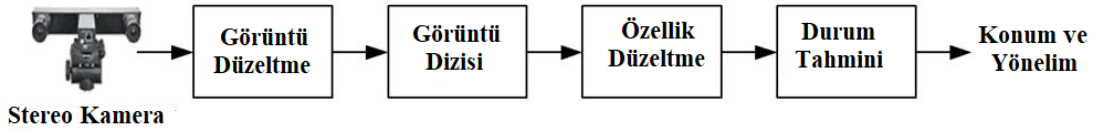
koordinatlarındaki iki izdüşümüdür. R_{12} ve t_{12} sırasıyla dönüşüm matrisi ve yer değiştirme vektörüdür ve her ikisi de aracın hareketini ifade etmek için konum 1'in kamera koordinatlarında tanımlanmıştır (Wang vd., 2013).



Şekil 8. Bir Düzlemdeki Aynı Sabit Noktanın İki Görünümü (Wang vd., 2013) (Yeniden düzenlenmiştir).

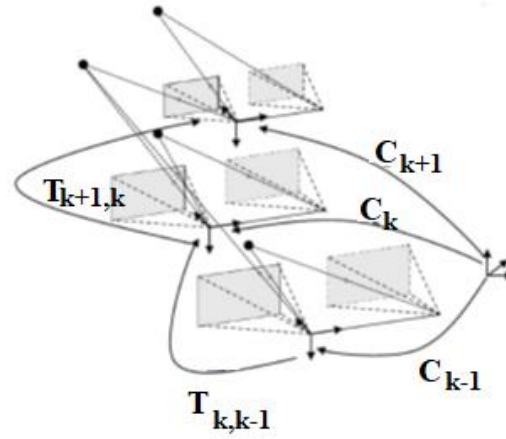
4.1.5. Görsel Odometri

Görsel Odometri, bir veya daha fazla platform üzeri kamera tarafından çekilen görüntü dizisi üzerinde hareketin neden olduğu sapmayı analiz ederek navigasyon halindeki aracının konumunu ve yönelimini kademeli olarak tahmin eden bir prosedürdür. Bu tekniğin blok diyagramı Şekil 9'da gösterilmiştir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).



Şekil 9. Görsel Odometri Blok Diyagramı (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

Görsel odometri, görüntü düzleminde yakalanan nokta özelliklerinin izlenmesi ile aracın mevcut konumunu hesaplar. Yer değiştirme, görüntü çerçevelerinden kademeli olarak hesaplanır. İHA'ya monte edilen kamera çevrede uçmakta ve Şekil 10'da gösterilen görüntüler her anlık k zamanında sırayla alınmaktadır (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).



Şekil 10. Görsel Odometri Tekniği (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016) (Yeniden düzenlenmiştir).

İHA (Kamera) konum dönüşümünün ardışık görüntüleri eşitlik (5)'te gösterilmiştir,

$$T_k = [R_{k,k-1} t_{k,k-1}; 0 \ 1] \quad (5)$$

Eşitlik (5)'te R: Rotasyonel matrisi; ve t: Yer değiştirme vektörünü göstermektedir.

Kamera poz seti $C_{0:n} = [C_0, \dots, C_n]$ $k=0$ anında çekilen çerçeve ile ilgili olarak alınan araç kamera dönüşümlerini içermektedir. Mevcut poz C_n , tüm kamera dönüşümlerinin $T_k, k=1 \dots n$, integralini alarak tahmin edilebilir ve eşitlik (6) ile ifade edilir (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016).

$$C_n = C_{n-1} T_n \quad (6)$$

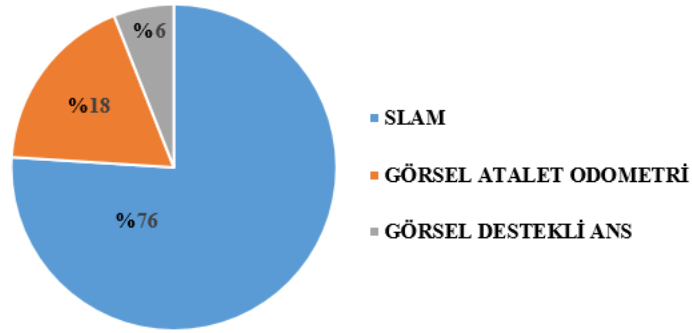
4.2. GNSS-Bağımsız Navigasyon Çözümlerinin Uygulama Alanları

Otonom navigasyon tüm navigasyon bileşenlerinin birbirleri ile etkileşimli olarak çalışmasını gerektirmektedir. Navigasyon sorunlarının karmaşıklığı, yapılan araştırmaları Tablo 2'de gösterilen GNSS-bağımsız özel çözüm yollarına yöneltmiştir. Bu araştırmalarda lokalizasyon en büyük paya sahiptir (Gyagenda vd., 2022).

Tablo 2. GNSS-Bağımsız İHA Navigasyon Araştırmalarının Dağılımı

Araştırma Kapsamı	Yüzdelerik Dağılım
Lokalizasyon	%62
Tam Navigasyon	%16
Yaklaşma ve/veya iniş	%11
Geçiş Hızı	%4
Engelden Kaçma	%3
Durum Tahmini	%2
Hareket Planlama	%1
Haritalama	%1

Burada Lokalizasyon “ben neredeyim?” sorusuna araç konumunu tahmin ederek cevap vermek olarak tanımlanabilir. Bu yetenek sadece navigasyon için değil, aynı zamanda nesne işleme, çoklu robot koordinasyonu, keşif ve haritalama için de gereklidir. Lokalizasyon teknikleri şu şekilde özetlenebilir: LiDAR, SLAM, Görsel SLAM, Görsel Atalet Odometrisi, Havadan Havaya Destek (GPS), ANS, İşaret Vericiler, Bilgi Tabanlı Lokalizasyon, Radar Odometri ve Hareket Yakalama Sistemi. Lokalizasyon tekniklerinin tam navigasyon çözümleri içerisindeki dağılımı Şekil 11’de sunulmuştur (Benini, Mancini ve Longhi, 2013; Gyagenda vd., 2022). Lokalizasyon teknikleri arasında görsel lokalizasyonun popülerliği, düşük ağırlığı, görü sensörlerinin düşük güç tüketimi ve çevreyi iyi şekilde tanımlamasından kaynaklanmaktadır (Gyagenda vd., 2022).



Şekil 11. Tam Navigasyon Çözümleri Arasındaki Lokalizasyon Tekniklerinin Dağılımı

Yapılan GNSS-bağımsız navigasyon çalışmalarındaki tam navigasyon (full navigation) çözümleri Tablo 3’te sunulmuştur. Tablo 3’ten görüleceği üzere AÖB modern GNSS-bağımsız navigasyon çözümlerinin hepsinde kullanılmıştır. Ayrıca görü %94 üzerindeki oranla en popüler atalet destekli metottur. Gelecekteki GNSS-bağımsız navigasyon çözümleri için atalet-görsel entegrasyonun büyük bir öneme sahip olacağı değerlendirilmektedir (Gyagenda vd., 2022).

Tablo 3. GNSS Bağımsız Tam Navigasyon Çözümleri

Metot	Ortam	Lokalizasyon	Referans
Görü, lazer telemetri, AÖB	Kısmen bilinen kapalı mekan	LiDAR SLAM	(Mohta vd., 2018)
Görü, lazer telemetri, AÖB	Kapalı mekan	2B SLAM	(Sampedro vd., 2019)
Görü, AÖB	Bilinmeyen, yapılandırılmamış	Görsel SLAM	(Vanegas, vd., 2019)
Görü, lazer telemetri, AÖB	Bilinen kapalı mekan	2B SLAM	(Bi vd., (2017).
Görüntü, AÖB	Bilinen dış mekan	Görsel-destekli ANS	(Kuroswiski, de Oliveira, ve Shiguemori, 2018)
Görü, lazer telemetri, AÖB	Bilinmeyen karışık dış ve kapalı mekan	2B SLAM	(Tang vd., 2019)
Görü, AÖB, sonar	Kapalı mekan ve dış mekan	Görsel SLAM	(Valenti vd., 2018)
Görü, AÖB	Kapalı mekanda bilinen yapı	Görsel Atalet Odometri	(Vanegas ve Gonzalez, 2016)

Görü, sonar, AÖB	Kapalı yapı	Görsel SLAM	(Leishman, McLain ve Beard, 2014)
Görü, lazer telemetri, AÖB	Kapalı mekan	2B SLAM	(Nieuwenhuisen, Droschel, Beul ve Behnke, 2016)
Görü, sonar, AÖB	Yapılandırılmamış, kısmen bilinen kapalı mekan	Görsel SLAM	(Li vd., 2013)
Lazer telemetri, AÖB	Yapılandırılmamış, bilinmeyen kapalı ve dış mekan	LiDAR SLAM	(Bachrach, Prentice, He ve Roy, 2011)
Görü ve AÖB	Karmaşık kapalı ve dış mekan	Görsel SLAM	(Schmid vd., 2014)
Görü ve AÖB	Bilinen kapalı mekan	Görsel SLAM	(Perez-Grau vd., 2018).
Görü ve AÖB	Kısmen bilinen kapalı mekan	Görsel SLAM	(Oleynikova vd., 2020)
Görü ve AÖB	Karışık kapalı ve açık mekan	Görsel Atalet Odometri	(Lutz P., 2020)
Görü ve AÖB	Karışık bilinmeyen kapalı ve açık mekan	Görsel Atalet Odometri	(Lin vd., 2018)

GNSS erişimsiz ortamlardaki araç/platform tipi özelinde görsel navigasyon çalışmalarının özeti Tablo 4'te sunulmuştur (Balamurugan, Valarmathi ve Naidu, 2016):

Tablo 4. GNSS Erişimsiz Ortamlardaki Görsel Navigasyon Çalışmaları

Sıra No	Araç Tipi	Strateji	Kullanılan Sensör	Yıl	Referans
1	AscTec Pelican Quadrotor	Görsel odometri	Stereo kamera	2015	(Fu, Carrio ve Campoy, 2015)
2	Quadrotor (GTQ)	GKF ile görsel SLAM ve Lazer SLAM	AÖB, sonar, taramalı lazer ve kamera	2014	(Magree ve Johnson, 2014)
3	Hexacopter	GKF ile görsel SLAM	AÖB, monoküler kamera	2014	(Scaramuzza vd., 2014)
4	Mikrokopter	GKF	AÖB, monocular kamera, GPS, barometrik altimetre	2014	(Chambers vd., 2014)
5	Altı tekerlekli insansız yer aracı	Bayesian bilgi filtresi (GKF)	AÖB ve stereo kamera	2013	(Barrett, Gennert, ve Michalson, 2013).
6	AscTec Pelican mikro hava aracı (MHA)	Görsel odometri ve SLAM	Stereo kamera	2013	(Sanfourche, Vittori ve Besnerais, 2013)
7	Uçuş verileri ile simülasyon	Unscented Kalman Filter (UKF-Kokusuz Kalman Filtresi)	AÖB, GPS ve kamera	2013	(Angelino, Baraniello, ve Cicala, 2013)
8	Quadrotor	Sabit GKF	AÖB ve Red Green Blue-Depth (RGBD-Kırmızı Yeşil Mavi-Derinlik) odometri (kinect)	2013	(Li vd., 2013)
9	Asctec Pelican Quadrotor	UKF	AÖB, monoküler kamera	2013	(Mebarki, Cacace ve Lippiello, 2013)

10	AscTec Firefly MHA	GKF	AÖB, basınç sensörü ve monoküler kamera	2013	(Lynen, Achteplik, Weiss, Chli ve Siegwart, 2013)
11	Quadrotor	Kalman filtreli görsel SLAM	Monoküler kamera ile AÖB	2013	(Sa vd., 2013)
12	Hexacopter	Kalman filtreli görsel SLAM	AÖB ve Wide Video Graphics Array (WVGA- Geniş Video Grafik Dizisi) monoküler kamera	2012	(Weiss Achteplik, Lynen, Chli ve Siegwart, 2012)
13	Uçuş verileri ile simülör	GKF	AÖB, monoküler kamera	2012	Samadzadegan ve Abdi, 2012)
14	Çoklu stereo koruyucu başlık takibi sistem	GKF	AÖB ve monoküler kamera	2012	Oskiper Samarasekera ve Kumar, 2012)
15	Gazla çalışan radyo kontrollü model helikopter test tezgahı	GKF ile görsel SLAM	AÖB, monoküler kamera	2012	(Wang vd., 2012)
16	Quadrocopter	GKF ile görsel SLAM	AÖB, basınç sensörü, USB Firefly monoküler kamera	2011	(Achteplik, Weiss ve Siegwart, 2011)
17	Gazla çalışan radyo kontrollü model helikopter	GKF ile görsel odometri	AÖB, monoküler kamera	2011	(Wang, Wang, Liang, Chen, ve Wu, 2012)
18	Scout B1-100 Helikopter	Önceden var olan haritaları kullanma	AÖB ve monoküler kamera	2011	(Rady, Kandil ve Badreddin, 2011)
19	Altı ayaklı paletli araç	Görsel odometri	Stereo kamera ile AÖB	2011	(Chilian, Hirschmüller ve Görner, 2011)
20	Araç verileri ile simülör	Geographic Information Systems (GIS- Coğrafi Bilgi Sistemi) verilerini kullanarak görüntü kaydı	AÖB, GPS, kamera ve GIS verisi	2010	(Gu, Zhu, Guo, Li ve Chang, 2010)
21	Araç verileri ile simülör	Görsel SLAM	Kamera	2010	(Kaiser, Gans ve Dixon, 2010)
22	Quadrotor	GKF ile görsel SLAM	AÖB, Stereo kamera, lazer mesafe ölçer ile monocular renkli kamera	2010	(Bachrach vd., 2010).
23	HMAV	GKF	AÖB ve Wi-Fi kamera	2009	(Ahrens, Levine, Andrews ve How, 2009).
24	Quadcopter	KF	AÖB ve Wi-Fi kamera	2009	(Achteplik, Zhang, Kuhnlenz ve Buss, 2009).
25	Yamaha RMAX helikopter	Görüntü kayıtlı KF	AÖB, GPS, Kamera ve uydu görüntüleri	2008	(Conte ve Doherty, 2008)

26	Araç verileri ile simülâtör	Kalman filtresi	Lazer tarayıcı ile AÖB	2008	(Soloviev, (2008)
27	Sentetik MHA uçuş verileri ile simülâtör	Epipolar kısıtlamayı UKF kullanan çerçevesi	AÖB ve stereo kamera	2008	(Taylor, 2008)
28	MHA uçuş verileri ile simülâtör	İteratif kayıt yöntemi, UKF	Monoküler kamera ile AÖB	2007	(Andersen ve Taylor, 2007)
29	MHA uçuş verileri ile simülâtör	GKF ile görsel odometri	Monoküler kamera ile AÖB	2007	(Ready ve Taylor, 2007)
30	Acrobatik 23cc helikopter	Doğrusal olmayan gözlemci	AÖB ve Webcam	2007	(Chevion, Hamel, Mahony ve Baldwin, 2007)
31	Araç verileri ile simülâtör	GKF	Kamera ile AÖB	2007	(Mourikis ve Roumeliotis, 2007).

4.3. GNSS-Erişimsiz Ortamlardaki Navigasyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar

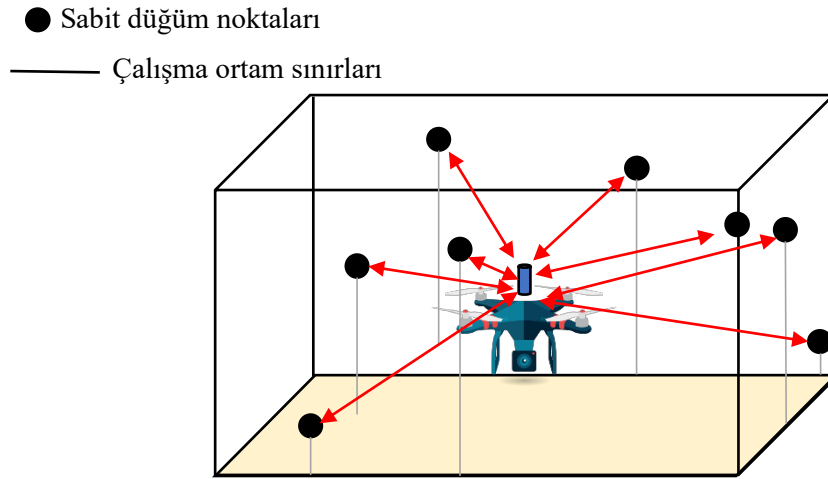
GNSS erişimsiz ortamlardaki lokalizasyon ve navigasyon sorunlarına yönelik ilk yaklaşımlarda optik akış tabanlı kontrol yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu biyomimetik yöntemde çok sayıda hesaplama veya ortama yerleştirilen yapay arazi işaretlerine ihtiyaç duyulmaz. Daha sonraları hızla gelişen gömülü hesaplama yetenekleri yerleşik optik akış hesaplamasını pratik uçuş kontrolü için mümkün kılmıştır (Zhang vd., 2015)

GNSS sinyali mevcut olmadığında konumu doğru şekilde belirlemek için biyo-ilham alan teknikler de araştırılmıştır. Mağara kırlangıcı da dahil olmak üzere bazı kuş türleri, yuvalarının olduğu karanlık mağaralarda zooloji literatüründe akustik yönelim olarak adlandırılan yönelime dayalı hareket sergilemektedir. Yarasalar tarafından kullanılan akustik radarın aksine, amaç avın yerini tespit etmek veya engellerden kaçmak değildir. Bu benzersiz kuşlar görsel ipuçları olmadan yuvanın olduğu konuma tam olarak geri dönmek için akustik sondaj (acoustics sounding) kullanır. Mağara swiftlet'leri (bir kuş türü) yankıları işleyerek 1 ve 16 kHz arasında cıvıltı sesi yayar ve geri yansıyan akustik sinyal özelliklerine dayalı olarak 1 cm'den küçük engellerden kaçarak ve bilinen yerleri tanıyarak hem tanıdık hem de bilinmeyen ortamlarda sürekli olarak gezinirler. Yapılan çalışmalar akustik navigasyon davranışının ortamda yer alan güçlü yansıtıcı nesnelere karşı olan yayılma gecikmesi hakkındaki geçici bilgilere dayandığını ileri sürmektedir. Akustik yönelimde elektromanyetik kanal cevaplarına dayalı navigasyon için optimal problema bant genişliği seçildiğinde kuşlar tarafından kısa sinyal kullanımının, önemli sonuçları olduğu görülmektedir (DeFranco vd., 2014).

Kanal durum karşılaştırması ile ilgili yapılan bir çalışmada (DeFranco vd., 2014) bir yayılma kanalının konum ilişkisinin kapalı ve açık-kapalı ortamlardaki haberleşme bağlantısında yer alan bir hedef veya alıcı-verici hareketini algılamak ve ölçmek için kullanılabilirdiği belirtilmiştir. Yapılan bu çalışmadaki konseptte İHA ilk olarak belirli bir operasyon alanı üzerinde önceden tanımlı uçuş paternini takip eder ve GNSS veya diğer harici konumlandırma yardımcılarında (haritalama aşaması) elde edilen konumlar boyunca referans kanal durumu bilgilerini toplar. Daha sonra, İHA, GNSS kullanılabilirliği olmadan

aynı genel bölgeden uçar ve konum belirlemek için yayılma ortamının (navigasyon aşaması) ölçülen kanal durumu bilgilerini kaydedilmiş bir veri tabanı ile karşılaştırır. Kanal durum karşılaştırması, kayıtlı kanal matrisi ve ölçülen kanal matrisi arasındaki farka dayalı uzay matrisinde yer alan uygun bir norm kullanılarak yapılabilmektedir (DeFranco vd., 2014).

GNSS erişimsiz ortamlarda otonom İHA navigasyonu için Ultra-Wideband (UWB-Ultra Geniş Bant) konumlandırma sisteminin kullanılması da araştırılmıştır. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmada (Tiemann, Schweikowski ve Wietfeld, 2015) kapalı mekân konumlandırma sistemi dokuz adet UWB düğüm noktasından oluşmaktadır. Şekil 12’de gösterildiği üzere bu noktalardan sekiz tanesi değişen talepleri değerlendirmek üzere sabitleme noktaları olarak görev yapmaktadır. Bir düğüm noktası ise, döngüsel bir programda sabit bir düğüm noktası seti ile değişen bir nokta olarak yapılandırılmıştır. Gömülü bir sistem üzerinde yerleşik bir gerçek zamanlı GNSS benzetimi, çoklu koordinat sistemlerinde konum bilgisi sağlayarak başarılı şekilde uygulanmıştır.



Şekil 12. İHA İç Mekan Konumlandırma Senaryosunun Gösterimi (Koifman ve Bar-Itzhack, 1999) (Yeniden düzenlenmiştir).

GNSS sinyal kaybını telafi etmek ve bağımsız ANS çözümü sapmasını azaltmak için farklı sensörler/yöntemler kullanılmıştır. Signal of Opportunity (SoOP-Fırsat Sinyali) GNSS sinyalinin engellendiği durumlar için alternatif çözümlerden birisidir. SoOP esas olarak GNSS uyduları olarak işlev gören sabit işaretlerden gelen sinyallere bağlıdır. Bu sinyaller Radio Frequency (RF-Radyo Frekansı) sinyalleri gibi navigasyon amaçlı değildir. Hafif, düşük güç tüketimi ve uygun maliyet nedeniyle kameralar görü-tabanlı veya görü destekli yaklaşımlardaki GNSS sinyal kesintisi periyotlarında en çok kullanılan sensörlerden biri olarak kabul edilir. Ancak durum tahmin performansını düşürebilen eksik özellikler, stereo kameralar kullanıldığında oluşan küçük referans mesafeleri ve çevresel değişiklikler kamera kullanımı ile ilgili dezavantajlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018).

İHA'ya ilave yük getirmeyen, AÖB hatalarını azaltan ve navigasyon çözümünü güçlendiren bir yaklaşımda araç dinamik modelinden elde edilen ek bilgiler kullanılmıştır. Bu

yaklaşımında GKF ile iki sistemin füzyonu sağlanmaktadır. Birinci sistem araç durumunu tahmin etmek için kullanılan düşük maliyetli AÖB'ye (ivmeölçer ve jiroskop) dayalı sabit ANS'dir. İkinci sistem (yardımcı) dinamik model durum denklemlerinden hesaplanan, İHA gövdesine etki eden kuvvet ve tork varyasyonlarından oluşan navigasyon durumlarını tahmin eden araç dinamik modelidir. Araç dinamik modelinin yardımcı sistem olarak kullanılması için İHA dinamik parametrelerinin tüm İHA bileşenleri içerecek detaylı şekilde modellenmesi gerekmektedir. (Koifman ve Bar-Itzhack, 1999).

GNSS erişimsiz bölgelerde uçuş için yapılan çalışmada (Zahran, Moussa ve El-Sheimy, 2018) sensör gereksinimi olmaksızın tekrarlı dinamik paternler kullanılarak İHA navigasyon duruş tahmini yapılmıştır. Verilen bir eksen ve belirlenen modlara göre görev boyunca (sıfır-hız modu, sabit hız modu ve hızlanma/yavaşlama modu gibi) dört pervaneli İHA için tekrarlı dinamik paternlerin belirlenmesinde makine öğrenimi sınıflandırıcısı kullanılmıştır. Daha sonra GKF vasıtasıyla daha iyi bir İHA duruş tahmini yapmak için belirlenen paterne göre uygun sınırlar/güncellemeler navigasyon çözümünü güçlendirmek için kullanılmıştır.

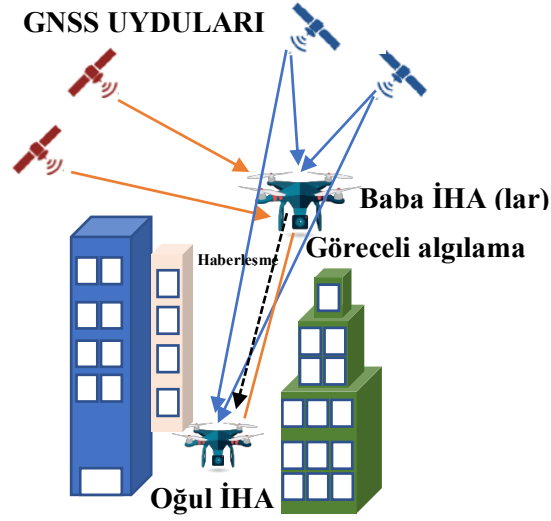
Son yıllarda, Phased-Array Radio Systems (PARS-Fazlı-Dizi Radyo Sistemleri), küçük İHA'larda yedekli bir konumlandırma sistemi olarak düşünülmüştür. PARS'ın yüksek bant genişliğine sahip bir radyo iletişim aracı olarak kullanımı birincil kullanım alanlarından. İHA bağlamında bu sistemde canlı video akışı da dahil olmak üzere kullanıcıya telemetri verisi sağlanabilmektedir. Bu sistem, yüksek sinyal-gürültü oranı, şifreli haberleşme kullanımı ve GNSS'den bağımsız olduğu için GNSS çözümlerinin güvenlik açığı yönünü tamamlamaktadır (Gryte vd., 2019).

Visual Teach and Repeat (VT&R- Görsel Öğretme ve Tekrarlama) gibi otonom rota izleme yöntemleri, harici altyapıya veya doğru bir küresel konum tahmini gerektirmeksizin yer robotları için uzun menzil navigasyonu sağlamıştır. VT&R'nin uçakta uygulanabilirliği iki farklı durumda görülmektedir: (1) "görsel izleri kullanan" bir yöntem olarak acil durum dönüşünün gerekli olduğu durumda kullanım ve (2) GNSS sinyalinin yetersiz olduğu durumlarda bir tamamlayıcı veya birincil navigasyon sistemi olarak kullanım (Warren, 2018).

Google haritasındaki konumu kullanan navigasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada (Shan, vd., 2015) Google haritasındaki mutlak bir konumu sağlamak için görüntü kaydından yararlanılmıştır. Ancak ölçek, oryantasyon ve aydınlatmadaki değişimler, yerleşik kamera tarafından haritaya görüntüyü kaydetmek için büyük bir zorluk teşkil etmektedir. Ayrıca Google haritası sürekli güncellenmediği için yerleşik çerçeve ve harita arasındaki sahne değişimleri mevcuttur. Bu sorunları gidermek amacıyla görüntü kaydı için gradyan model ve Histogram of Oriented Gradients (HOG-Yönlendirilmiş Gradyan Histogramları) kullanımı temel alınmıştır. Eşleştirme sürecini hızlandırmak için kayar pencere aramasını önleyen parçacık filtresi kullanılmıştır.

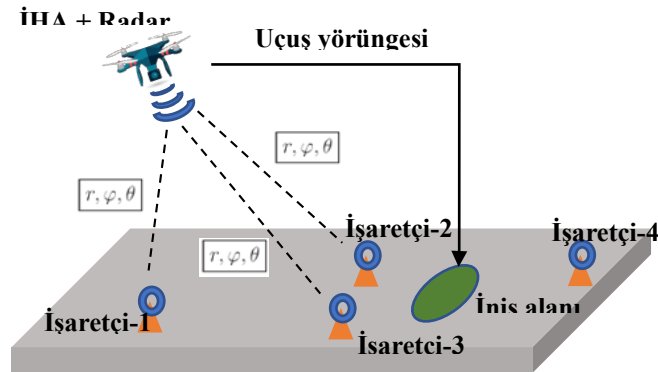
GNSS verisini kullanmayı esas alan çalışmada (Causa vd., 2018) en az iki İHA'nın (bir "oğul İHA" ve bir veya daha fazla "baba İHA") işbirliği içinde olduğu bir birlikte çalışma modeli dikkate alınmıştır. Söz konusu navigasyon konsepti Şekil 13'te gösterilmiştir. Baba İHA(lar) nominal GNSS kapsamı koşulları altında zorlu alanda uçuş yapmaktadır, dolayısıyla standart GNSS/ANS verisini kullanmaktadırlar. Bu İHA'ların rolü doğru bir veri bağlantısı

aracılığıyla bağlı algılama ve bilgi ile oğul İHA navigasyonunu desteklemektir. Diğer benzer yaklaşımlarda olduğu gibi, oğul ve baba(lar) İHA'lar arasında Line of Sight (LOS-Görüş Hattı) olması gerekmektedir.



Şekil 13. İşbirliğine Dayalı Navigasyon Senaryosu ve Konseptinin Görünümü (Causa vd., 2018) (Yeniden düzenlenmiştir).

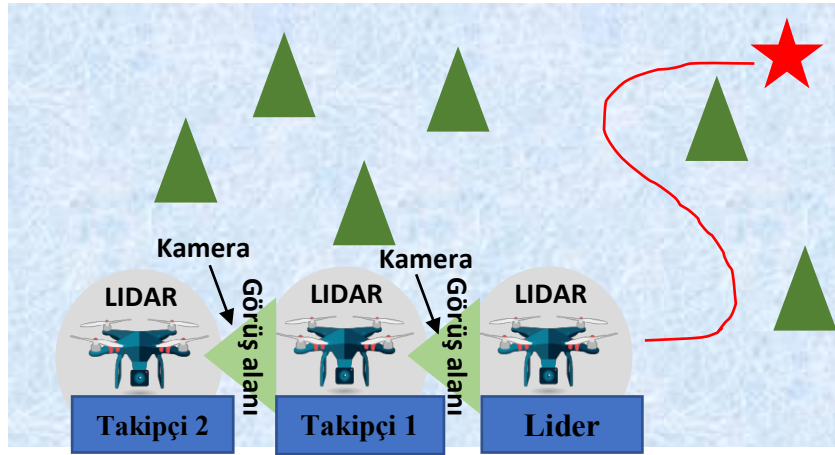
GNSS-erişimsiz ortamlarda, emniyetli bir İHA kullanımı için kablosuz konumlandırma sistemi bir alternatif olarak düşünülmüştür. Farklı sensör türleri karşılaştırıldığında, lazer tarayıcı veya kamera gibi optik sensörlerin kullanımı, performansları hava durumuna ve aydınlatma koşullarına bağlı olduğu için yeterince güvenilir değildir. Atalet sensörleri zamanla bir sapma sergilediği için konumlandırmayı etkilemektedir. Radar teknolojisi, zorlu çevre koşullarında bile yüksek konumlandırma doğruluğu sağladığı için başka umut verici bir çözüm haline gelmektedir. Şekil 14'te radar-tabanlı kablosuz lokal konumlandırma sistemi üzerinden kontrollü İHA lokalizasyonu ve inişi içeren konsept çalışma gösterilmiştir. Bu konseptte çalışmada İHA, radar transponderlerin yer aldığı işaretçilerde yapılan ölçümlere göre konumunu belirlemektedir (Pavlenko vd., 2019).



Şekil 14. Radar Tabanlı Kablosuz-Lokal Konumlandırma Sistemi ile İHA Lokalizasyon ve İniş Konsepti (Pavlenko vd., 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

Sürü hareketi bir grup olarak bir arada kalabilmek için bireylerin düzenli bir hareket içinde düzenlenen sınırlı çevresel bilgileri kullandıkları toplu bir davranış sergilemesini sağlar. Bu

hareketi doğada balıklar, böcekler ve kuşlar gibi canlılar tarafından yaygın olarak görmek mümkündür. Sürü davranışı ilk olarak 1987 yılında bir bilgisayarda Reynolds tarafından simüle edilmiştir. İHA sistemlerinde de sürü şeklinde uçuş yapabilmektedir. Mevcut sürü stratejileri genel olarak merkezi ve merkezi olmayan şekilde ikiye ayrılabilir. Merkezi strateji sürü sistemlerinin davranışlarını düzenlemek için merkezi bir birim kullanır. Ancak büyük ölçekli sistemler için bu strateji teknik olarak mümkün olmayabilir. Merkezi olmayan strateji ise biyolojik sistemleri veya doğal olayları ilham kaynağı olarak alan İHA'lar arasındaki etkileşimi esas almaktadır. Tipik bir merkezi olmayan stratejide lider-takipçi esaslı yöntemde bazı takım üyeleri lider bazıları da takipçi olarak görev yapmaktadır. Bazı takım üyeleri de hem lider hem takipçi olarak sistemde yer alabilmektedir. Sürü İHA'ların GNSS erişimsiz ortamlarda kullanımı için de çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Şekil 15'te GNSS erişimsiz ortamlarda kullanılacak görü-destekli lider-takipçi sürü sistemi (çalışmada önerilen) gösterilmektedir (Tang, vd., 2019)



Şekil 15. Bilinmeyen Ortamda Görev Yapan Görü-Destekli Sürü Sistemi (Tang, vd., 2019) (Yeniden düzenlenmiştir).

5. SONUÇ

Yapılan kapsamlı araştırmada (Gyagenda vd., 2022) uygulanan navigasyon tekniklerinin genel olarak atalet, görsel, LiDAR ve radyo navigasyonunu içerdiği görülmektedir. Tam navigasyon çözümleri incelendiğinde, %76 ile SLAM tabanlı navigasyonun önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir. Görsel atalet odometrisi ve görüş destekli atalet navigasyonunun payı sırasıyla %18 ve %6'dır. Güvenilirliği, atalet sistemlerinin yüksek güncelleme oranları ve görüş tekniklerinin kalitesi ile atalet ve optik sistemlerin hibrit kullanımının GNSS bağımsız İHA navigasyonunda önemli bir role sahip olduğu görülmektedir.

GNSS sinyali kesintisinde büyük faydaları olması ve AÖB sapmalarını azaltmalarına rağmen tüm yardımcı sensörlerin İHA'ya daha fazla ağırlık, güç, boyut, maliyet ve fiziksel sınırlandırma etkisi bulunmaktadır. Bu açıdan bakıldığında küçük/mikro İHA'lara getirilen sınırlamaları dikkate alan alternatif yöntemlerin kullanılmasının ve geliştirilmesinin gerektiği görülmektedir.

Kullanıma hazır otopilot sistemlerinin yaygınlığı sayesinde, İHA uçuş kontrol ve bunlarla ilgili yapısal tasarımlar tam teknoloji olgunluk seviyeleri ulaşmış gözükmektedir. Odak noktası artık algılama, lokalizasyon, hareket planlama ve haberleşme üzerine yoğunlaşmıştır. Makine öğrenimi, aktif görüş ve diğer uyarlanabilir yapay zeka tekniklerinin sensör hata modellemesinde ve anlamsal faaliyet alanını kavramak için popüler çözümler olabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca 5G haberleşme teknolojisinin yüksek hacimli gerçek zamanlı veri akışı özelliğine sahip yerleşik veri odaklı navigasyon sistemleri için önemli bir kolaylaştırıcı olması beklenmektedir.

6. YAZAR KATKILARI

Bu çalışmanın oluşturulmasında, Engin Göde konu başlığının ve kapsamının belirlenmesinde, teknik analiz ve değerlendirmelerde ve genel koordinasyonda, Melih Cemal Kuşhan ve Gökhan İbrahim Ögünç süreç yönetiminde ve spesifik başlıkların belirlenmesinde, Atanur Teoman ve Kürşat Tonbul araştırma kapsamının yönlendirilmesinde ve Batuhan Daz literatür taramasında çeşitli katkılarda bulunmuştur.

7. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmada isimleri belirtilen yazarlar, çalışmada ele alınan konular veya materyaller hakkında herhangi bir mali veya mali olmayan çıkara sahip herhangi bir kurum veya kuruluşla herhangi bir bağlantısı veya ilgisi bulunmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- Achtelik, M., Weiss, S., & Siegwart, R. (2011). Onboard IMU and monocular vision-based control for Mavs in unknown in-and outdoor environments. *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China, 3056-3063. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5980343>.
- Achtelik, M., Zhang, T., Kuhnlenz, K., & Buss, M. (2009). Visual tracking and control of a quadcopter using a stereo camera system and inertial sensors. *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, Changchun, China, 2863-2869. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5246421>.
- Ahrens, S., Levine, D., Andrews, G., & How, J.P. (2009). Vision-based guidance and control of a hovering vehicle in unknown, GPS-denied environments. *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Kobe, Japan, 2643-2648. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5152680>.
- Alarcon, F., Santamaria, D., & Viguria, A. (2015). UAV helicopter relative state estimation for autonomous landing on moving platforms in a GPS-denied scenario. *IFAC-Papers Online*, 48(9), 37-42. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.056>.
- Andersen, E.D., & Taylor, C.N. (2007). Improving MAV pose estimation using visual information. *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Diego, CA, USA, 3745-3750. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4399563>.
- Angelino, C.V., Baraniello, V.R., & Cicala, L. (2013). High altitude UAV navigation using IMU, GPS and camera. *Proceedings of the 16th International Conference on Information Fusion*, Istanbul, Turkey, 647-654. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6641342>.
- Bachrach, A., de Winter, A., Ruijie He, Hemann, G., Prentice, S., & Roy, N. (2010). RANGE - Robust autonomous navigation in GPS-denied environments. *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Anchorage, AK, USA, 1096-1097. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5509990>.
- Bachrach, A., Prentice, S., He, R., & Roy, N. (2011). RANGE-Robust autonomous navigation in GPS-denied environments. *J. Field Robotics*, 28(5), 644-666. <https://doi.org/10.1002/rob.20400>.
- Balamurugan, G., Valarmathi, J., & Naidu, V. P. S. (2016). Survey on UAV navigation in GPS denied environments. *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Paralakhemundi, India, 198-204. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7955787>.
- Barrett, J.M., Gennert, M.A., & Michalson, W.R. (2013). Development of a low-cost, self-contained, combined vision and inertial navigation system. *2013 IEEE Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*, Woburn, MA, USA, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6556351>.
- BeiDou. (2024). <https://en.wikipedia.org/wiki/BeiDou>. Erişim Tarihi: 05 Ocak 2024.
- Benini, A., Mancini, A., & Longhi, S. (2013). An IMU/UWB/Vision-based extended Kalman filter for mini-UAV localization in indoor environment using 802.15.4a wireless sensor network. *J Intell Robot Syst*, 70, 461-476. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-012-9742-1>.
- Bi, Y., Lan, M., Li, J., Zhang, K., Qin, H., Lai, S., & Chen, B. M. (2017). Robust autonomous

- flight and mission management for MAVs in GPS-denied environments. *2017 11th Asian Control Conference (ASCC), Gold Coast, QLD, Australia*, 67-72. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8287144>.
- Causa, F., Vetrella, A.R., Fasano, G., & Accardo, D. (2018). Multi-UAV formation geometries for cooperative navigation in GNSS-challenging environments. *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey, CA, USA*, 775-785. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8373453>.
- Chambers, A., Scherer, S., Yoder, L., Jain, S., Nuske, S., & Singh, S. (2014). Robust multi-sensor fusion for micro aerial vehicle navigation in GPS-degraded/denied environments. *2014 American Control Conference Portland, OR, USA*, 1892-1899. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6859341>.
- Chevion, T., Hamel, T., Mahony, R., & Baldwin, G. (2007). Robust nonlinear fusion of inertial and visual data for position, velocity and attitude estimation of UAV. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, 2010-2016*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4209381>.
- Chilian, A., Hirschmüller, H., & Görner, M. (2011). Multi-sensor data fusion for robust pose estimation of a six-legged walking robot. *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA*, 2497-2504. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6094484>.
- Conte, G., & Doherty, P. (2008). An Integrated UAV navigation system based on aerial image matching. *2008 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA*, 1-10. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4526556>.
- DeFranco, P., Mackie, J.D., Morin, M., & Warnick, K.F. (2014). Bio-inspired electromagnetic orientation for UAVs in a GPS-denied environment using MIMO channel sounding. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 62(10), 5250-5259. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6861435>.
- Fu, C., Carrio, A., & Campoy, P. (2015). Efficient visual odometry and mapping for unmanned aerial vehicle using ARM-based stereo vision pre-processing system. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Denver, CO, USA*, 957-962. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7152384>.
- Galileo (satellite navigation). (2023). [https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(satellite_navigation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Galileo_(satellite_navigation)) Erişim Tarihi: 31 Aralık 2023.
- Global Positioning System. (2024). https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System Erişim Tarihi: 10 Ocak 2024.
- Glonass. (2023). <https://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS> Erişim Tarihi: 24 Aralık 2023.
- Gryte, K., Bryne, T.H., Albrektsen, S.M., & Johansen, T.A. (2019). Field test results of GNSS-denied inertial navigation aided by phased-array radio systems for UAVs. *2019 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Atlanta, GA, USA*, 1398-1406. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8798057>.
- Gu, D.-Y., Zhu, C.-F., Guo, J., Li, S.-X., & Chang, H.-X. (2010). Vision-aided UAV navigation using GIS data. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, QingDao, China*, 78-82. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5550944>.
- Gyagenda, N., Hatilima, J.V., Roth, H., & Zhmud, V. (2022). A review of GNSS-independent UAV navigation techniques. *Robotics and Autonomous Systems*, 152,

104069. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104069>.
- Kaiser, M.K., Gans, N.R., & Dixon, W.E. (2010). Vision-based estimation for guidance, navigation, and control of an aerial vehicle. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46(3), 1064-1077. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5545174>.
- Koifman, M., & Bar-Itzhack, I.Y. (1999). Inertial navigation system aided by aircraft dynamics. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 7(4), 487-493. <https://ieeexplore.ieee.org/document/772164>.
- Kuroswiski, A.R., de Oliveira, N.M.F., & Shiguemori, E.H. (2018). Autonomous long-range navigation in GNSS-denied environment with low-cost UAV platform. *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Canada, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8369592>.
- Leishman, R.C., McLain, T.W., & Beard, R.W. (2014). Relative navigation approach for vision-based aerial GPS-denied navigation. *J. Intell. Robot. Syst.* 74, 97-111. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9914-7>.
- Li, D., Li, Q., Cheng, N., Wu, Q., Song, J., & Tang, L. (2013). Combined RGBD-inertial based state estimation for MAV in GPS-denied indoor environments. *2013 9th Asian Control Conference (ASCC) Istanbul, Turkey*, 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6606361>.
- Li, Q., Li, D.-C., Wu, Q., Tang, L., Huo, Y., Zhang, Y., & Cheng, N. (2013). Autonomous navigation and environment modeling for MAVs in 3-D enclosed industrial environments. *Computers in Industry*, 64(9), 1161-1177. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.06.010>.
- Liao, F., Lai, S., Hu, Y., Cui, J., Wang, J.L., Teo, R., & Lin, F. (2016). 3D motion planning for UAVs in GPS-denied unknown forest environment. *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Gothenburg, Sweden, 246-251. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7535393>.
- Lin, Y., Gao, F., Qin, T., Gao, W., Liu, T., Wu, W., ... Shen, S. (2018). Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion. *J. Field Robotics* 35(1), 23-51. <https://doi.org/10.1002/rob.21732>.
- Lu, H. (2022). Flight in GPS-denied environment: Autonomous navigation system for micro-aerial vehicle. *Aerospace Science and Technology*, 124, 107521. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107521>.
- Lutz, P., Müller, M. G., Maier, M., Stoneman, S., Tomić, T., Bargen, I., ... Triebel, R. (2020). ARDEA-An MAV with skills for future planetary missions. *J. Field Robotics*, 37(4), 515-551. <https://doi.org/10.1002/rob.21949>.
- Lynen S., Achtelik, M.W., Weiss, S., Chli, M., & Siegwart, R. (2013). A robust and modular multi-sensor fusion approach applied to MAV navigation. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Tokyo, Japan*, 3923-3929. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6696917>.
- Magree, D., & Johnson, E.N. (2014). Combined laser and vision-aided inertial navigation for an indoor unmanned aerial vehicle. *2014 American Control Conference Portland, OR, USA, 1900-1905*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6858995>.
- Mebarki, R., & Lippiello, V. (2014). Image moments-based velocity estimation of UAVs in GPS denied environments. *2014 IEEE International Symposium on Safety, Security,*

- and Rescue Robotics Hokkaido*, Japan, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7017659>.
- Mebarki, R., Cacace, J., & Lippiello, V. (2013). Velocity estimation of an UAV using visual and IMU data in a GPS-denied environment. *2013 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) Linköping*, Sweden, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6719334>.
- Miller, M.M., Soloviev, A., de Haag, M.U., & Veth, M. (2011). *Navigation in GPS Denied Environments: Feature-Aided Inertial Systems*. NATO, RTO-EN-SET-116. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA581023.pdf>.
- Mohta, K., Watterson, M., Mulgaonkar, Y., Liu, S., Qu, C., Makineni, A., ... Kumar, V. (2018). Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1), 101-120. <https://doi.org/10.1002/rob.21774>.
- Mourikis, A.I., & Roumeliotis, S.I. (2007). A Multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation Rome, Italy*, 3565-3572. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4209642>.
- Mutluer, E., & Ünal, A. (2021). GNSS uygulamaları için karıştırmaya dayanıklı anten dizisi tasarımı. *URSI-Türkiye X. Bilimsel Kongresi*, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli. http://ursitr2021.gtu.edu.tr/MCMSR/papers/URSI-TR_2020_paper_58.pdf.
- Nieuwenhuisen, M., Droschel, D., Beul, M., & Behnke, S. (2016). Autonomous navigation for micro aerial vehicles in complex GNSS-denied environments. *J. Intell. Robot. Syst.*, 84, 199-216. <https://doi.org/10.1007/s10846-015-0274-3>.
- Oleynikova, H., Lanegger, C., Taylor, Z., Pantic, M., Millane, A., Siegwart, R., & Nieto, J. (2020). An open-source system for vision-based micro-aerial vehicle mapping, planning, and flight in cluttered environments. *J. Field Robotics*, 37(4), 642-666. <https://doi.org/10.1002/rob.21950>.
- Oskiper, T., Samarasekera, S., & Kumar, R. (2012). Multi-sensor navigation algorithm using monocular camera, IMU and GPS for large scale augmented reality. *2012 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, Atlanta, GA, USA, 71-80. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6402541>.
- Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS). (2021). <https://www.gps.gov/systems/gnss/>_Erişim Tarihi: 19 Ekim 2021.
- Pavlenko, T., Schütz, M., Vossiek, M., Walter, T., & Montenegro, S. (2019). Wireless local positioning system for controlled UAV landing in GNSS-denied environment. *2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)* Turin, Italy, 171-175. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8869587>.
- Perez-Grau, F.J., Ragel, R., Caballero, F., Viguria, A., & Ollero, A. (2018). An architecture for robust UAV navigation in GPS-denied areas. *Journal of Field Robotics*, 35(1), 121-145. <https://doi.org/10.1002/rob.21757>.
- Pırtı, A., Gündoğan, Z.Ö., & Şimşek, M. (2022). QZSS uyduları ve sinyal yapıları. *Geomatik Dergisi*, 7(3), 243-252. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1912939>.
- Qin, H., Bi, Y., Ang, K. Z. Y., Wang, K., Li, J., Lan, M., ... Lin, F. (2016). A stereo and rotating laser framework for UAV navigation in GPS denied environment. *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society Florence*, Italy, 6061-6066. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7793246>.

- Qin, H., Meng, Z., Meng, W., Chen, X., Sun, H., Lin, F., & Ang, M. (2019). Autonomous exploration and mapping system using heterogeneous UAVs and UGVs in GPS-denied environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1339-1350. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8598942>.
- Rady, S., Kandil, A.A., & Badreddin, E. (2011). A hybrid localization approach for UAV in GPS denied areas. *2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, Kyoto, Japan, 1269-1274. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6147631>.
- Ready, B.B., & Taylor, C.N. (2007). Improving accuracy of MAV pose estimation using visual odometry. *2007 American Control Conference* New York, NY, USA. 3721-3726. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4283137>.
- Russell, J.S., Ye, M., Anderson, B.D.O., Hmam, H., & Sarunic, P. (2020). Cooperative localization of a GPS-denied UAV using direction-of-arrival measurements. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(3), 1966-1978. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8878024>.
- Sa, I., He, H., Huynh, V., & Corke, P. (2013). Monocular vision based autonomous navigation for a cost-effective MAV in GPS-denied environments. *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Wollongong, NSW, Australia*, 1355-1360. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6584283>.
- Samadzadegan, F., & Abdi, G. (2012). Autonomous navigation of unmanned aerial vehicles based on multi-sensor data fusion. *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)* Tehran, Iran, 868-873. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6292475>.
- Sampedro, C., Rodriguez-Ramos, A., Bavle, H., Carrio, A., de la Puente, P., & Campoy, P. (2019). A fully-autonomous aerial robot for search and rescue applications in indoor environments using learning-based techniques. *J Intell Robot Syst*, 95, 601-627. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0898-1>.
- Sanfourche, M., Vittori, V., & Le Besnerais, G. (2013). Evo: A realtime embedded stereo odometry for MAV applications. *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* Tokyo, Japan, 2107-2114. <https://ieeexplore.ieee.org/document/669665>.
- Satellite Navigation. (2024). https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation. Erişim Tarihi: 02 Ocak 2024.
- Scaramuzza, D., Achtelik, M. C., Doitsidis, L., Friedrich, F., Kosmatopoulos, E., Martinelli, A., ... Meier, L. (2014). Vision-controlled micro flying robots: From system design to autonomous navigation and mapping in GPS-denied environments. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 21(3), 26-40. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6880770>.
- Schmid, K., Lutz, P, Tomić, T., Mair, E., & Hirschmüller. (2014). Autonomous vision-based micro air vehicle for indoor and outdoor navigation. *J. Field Robotics*, 31(4), 537-570. <https://doi.org/10.1002/rob.21506>.
- Schmidt, G.T. (2019). GPS based navigation systems in difficult environments. *Gyroscopy Navig*, 10, 41-53. <https://doi.org/10.1134/S207510871902007X>.
- Shan, M., Wang, F., Lin, F., Gao, Z., Tang, Y. Z., & Chen, B. M. (2015). Google map aided visual navigation for UAVs in GPS-denied environment. *2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* Zhuhai, China, 114-119.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7418753>.

- Shang, C., Cheng, L., Yu, Q., Wang, X., Peng, R., Chen, Y., ... Zhu, Q. (2017). Micro aerial vehicle autonomous flight control in tunnel environment. *2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)* Kunming, China, 93-98. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8321597>.
- Soloviev, A. (2008). Tight coupling of GPS, laser scanner, and inertial measurements for navigation in urban environments. *2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* Monterey, CA, USA, 511-525. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4570059>.
- Tang, Y., Hu, Y., Cui, J., Liao, F., Lao, M., Lin, F., & Teo, R. (2019). Vision-Aided multi-UAV autonomous flocking in GPS-denied environment. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(1), 616-626. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8333748>.
- Taylor, C.N. (2008). Fusion of inertial, vision, and air pressure sensors for MAV navigation. *2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Seoul, Korea (South), 475-480. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4648040>.
- Tiemann, J., Schweikowski, F., & Wietfeld, C. (2015). Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments. *2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)* Banff, AB, Canada, 1-7. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7346960>.
- Unicomb, J., Dantanarayana, L., Arukgoda, J., Ranasinghe, R., Dissanayake, G., & Furukawa, T. (2017). Distance function based 6DOF localization for unmanned aerial vehicles in GPS denied environments. *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, BC, Canada, 5292-5297. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8206421>.
- Valenti, F., Giaquinto, D., Musto, L., Zinelli, A., Bertozzi, M., & Broggi, A. (2018). Enabling computer vision-based autonomous navigation for unmanned aerial vehicles in cluttered GPS-denied environments. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE Hawaii, USA, 3886-3891. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8569695>.
- Vanegas, F., & Gonzalez, F. (2016). Uncertainty based online planning for UAV target finding in cluttered and GPS-denied environments. *2016 IEEE Aerospace Conference*, IEEE, Montana, USA, 706-714. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7500566>.
- Vanegas, F., Gaston, K.J., Roberts, J., & Gonzalez, F. (2019). A framework for UAV navigation and exploration in GPS-denied environments. *2019 IEEE Aerospace Conference Big Sky*, MT, USA, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8741612>.
- Veth, M. J. (2006). *Fusion of Imaging and Inertial Sensors for Navigation* [Doctoral dissertation, Air University]. <https://scholar.afit.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4339&context=etd>.
- Vetrella, A.R., Savvaris, A., Fasano, G., & Accardo D. (2015). RGB-D camera-based quadrotor navigation in GPS-denied and low light environments using known 3D markers. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* Denver, CO, USA, 185-192. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7152290>.

- Wang C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., & Wu, Y. (2012). Monocular vision and IMU based navigation for a small unmanned helicopter. *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)* Singapore, 1694-1699. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6360998>.
- Wang, C., Wang, T., Liang, J., Chen, Y., Zhang, Y., & Wang, C. (2012). Monocular visual SLAM for small UAVs in GPS-denied environments. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* Guangzhou, China, 896-901. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6491082>.
- Wang, C.-L., Wang, T.-M., Liang, J.-H., Zhang, Y.-C., & Zhou, Y. (2013). Bearing-only visual SLAM for small unmanned aerial vehicles in GPS-denied environments. *Int. J. Autom. Comput.*, 10, 387-396. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11633-013-0735-8>.
- Warren, M. (2018). Towards visual teach and repeat for GPS-denied flight of a fixed-wing UAV. M Hutter & R. Siegwart, R (Eds.) *Field and Service Robotics* (s. 481-498). Springer Proceedings in Advanced Robotics 5. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67361-5_31.
- Weiss S, Achtelik, M.W., Lynen S., Chli, M., & Siegwart, R. (2012). Real-time onboard visual-inertial state estimation and self-calibration of MAVs in unknown environments. *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation* Saint Paul, MN, USA, 957-964. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6225147>.
- Whyte, H.D., & Bailey, T. (2006). Simultaneous localisation and mapping: Part I the essential algorithm. *Australian Centre for Field Robotics (ACFR) J04*, The University of Sydney, Sydney NSW, Australia. https://people.eecs.berkeley.edu/~pabbeel/cs287-fa09/readings/Durrant-Whyte_Bailey_SLAM-tutorial-I.pdf.
- Zahran, S., Moussa, A., & El-Sheimy, N. (2018). Enhanced UAV navigation in GNSS denied environment using repeated dynamics pattern recognition. *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)* Monterey, CA, USA, 1135-1142. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8373497>.
- Zahran, S., Moussa, A., El-Sheimy, N., & Sesay, A.B. (2018). Hybrid machine learning VDM for UAVs in GNSS-denied environment. *Navigation - Journal of The Institute of Navigation*, 65(3), 477-492. <https://doi.org/10.1002/navi.249>.
- Zhang, X., Xian, B., Zhao, B., & Zhang, Y. (2015). Autonomous flight control of a nano quadrotor helicopter in a GPS-denied environment using on-board vision. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(10), 6392-6403. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7080923>.
- Zhang, Y., Wang, T., Cai, Z., Wang, Y., & You, Z. (2016). The use of optical flow for UAV motion estimation in indoor environment. *Proceedings of 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference* Nanjing, China, 785-790. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7828885>.





Integrating Unmanned Aerial Vehicles in Airspace: A Systematic Review

Arif TUNCAL¹

Ufuk EROL²

İnceleme Makalesi	DOI: 10.51785/jar.1393271	
Gönderi Tarihi: 20.11.2023	Kabul Tarihi: 13.02.2024	Online Yayın Tarihi: 28.02.2024

Abstract

In this article, a comprehensive review of the integration of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) into shared airspace is presented. By applying a systematic review methodology, the study clarifies the main challenges, problems, and possible fixes related to safety, coordination, and regulatory frameworks. The results demonstrate the critical role that several elements play in supporting the safety of UAV integration. These elements include multi-layered airspace models, careful path planning, secure communication networks, Conflict Detection and Resolution (CDR) strategies, and strong regulations. The paper explores the potential of Human-in-the-loop Reinforcement Learning (HRL) and Reinforcement Learning (RL) algorithms to train UAVs for maneuvering through complex terrain and adapting to changing circumstances. The study's conclusions highlight the importance of ongoing research projects, stakeholder cooperation and continuous support for technology developments-all of which are necessary to ensure the safe and orderly integration of UAVs into airspace.

Key Words: Autonomous Vehicles; Artificial Intelligence; Reinforcement Learning; Unmanned Aerial Vehicle; Unmanned Traffic Management

JEL Classification: M10, L93, L94.

İnsansız Hava Araçlarının Hava Sahasına Entegrasyonu: Sistemik Bir İnceleme

Öz

Bu makalede, İnsansız Hava Araçlarının (İHA) ortak hava sahasına entegrasyonu kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Sistemik inceleme metodolojisi kullanılarak çalışmada yasal düzenlemeler, uçuş emniyeti ve koordinasyon ile ilgili temel zorlukları, sorunları ve olası çözümleri ortaya koymaktadır. Bulgular çok katmanlı hava sahası modelleri, dikkatli rota planlama, güvenli iletişim ağları, çatışma tespiti ve çözümü stratejileri ile yapısal olarak güçlendirilmiş düzenlemeler dahil olmak üzere çeşitli unsurların İHA entegrasyonunda kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Ayrıca İHA'ların karmaşık hava sahalarında ve değişken koşullara uyum sağlamalarını desteklemek adına önerilen çözümleri inceleyerek Reinforcement Learning (RL) ve Human-in-the-loop Reinforcement Learning (HRL) algoritmalarının potansiyeli ortaya konmuştur. Çalışmanın sonuçları, İHA'ların hava sahasına emniyetli ve düzenli bir şekilde entegre edilmesi için araştırma projelerinin sürekli olarak yürütülmesinin, paydaş işbirliğinin ve teknoloji geliştirmelerine kararlı desteğin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Aracı; İnsansız Hava Aracı Sistemleri Trafik Yönetimi; Otonom Araçlar; Reinforcement Learning; Sistemik İnceleme; Yapay Zeka

JEL Sınıflandırma: M10, L93, L94.

¹ Air Traffic Controller, General Directorate Of State Airports Authority and Air Navigation Service Provider, atuncal@gmail.com

² Assist. Prof. Dr., İstanbul Esenyurt University, ufukerol@esenyurt.edu.tr

INTRODUCTION

The rapid evolution of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) has been driven by technological advancements in control, miniaturization, and computerization, resulting in the emergence of secure, lightweight, robust, and cost-efficient UAVs (Mohsan et al., 2023). This progress has led to a substantial growth in the drone industry, with UAVs finding applications in various sectors (Sharma et al., 2022). UAVs are now used for purposes such as wireless coverage, military operations, agriculture, medical services, environmental monitoring, climate research, and delivery and transportation (Adoni et al., 2023; Al-Shareeda et al., 2023). By 2035, the global market for UAVs was projected to range between \$74 billion and \$641 billion, driven by current applications and the potential growth of cargo and air taxi uses (Wiedemann et al., 2023).

The integration of UAVs into traditional Air Traffic Management (ATM), primarily designed for manned aircraft, poses a significant challenge (Tuncal & Uslu, 2021). This integration necessitates the development of new procedures, technologies, and regulations to ensure safe and efficient UAV operations. Moreover, the establishment of a robust framework for managing UAV traffic in lower airspace, referred to as Unmanned Traffic Management (UTM), is imperative to regulate the escalating number of UAVs effectively (Davies et al., 2021; Volkert et al., 2019).

The projected increase in delivery drones and the expected growth of the commercial small non-model UAVs worldwide have critical implications, challenges, and opportunities for both ATM and UTM. The rising use of drones and air-taxis will lead to more congested airspace, necessitating the implementation of UTM initiatives to ensure safe and efficient operations (Chin et al., 2021). Challenges related to integrating UAVs into the UTM concept within the dynamic and congested airspace alongside manned aircraft include the absence of an air navigation or air traffic control system, the risk of collisions between UAVs, the possibility of unmanaged UAVs without centralized control, and potential threats to aircraft and aviation infrastructure (Bolz & Nowacki, 2023; Rithic & Arulmozhi, 2023; Shan et al., 2023). To address these challenges, the integration of UTM with existing ATM is necessary. This integration allows for seamless coordination and communication between manned aircraft and UAVs, ensuring their safe coexistence in shared airspace (Geister & Korn, 2013; Kainrath et al., 2022; Raju et al., 2018). Integrating UTM with ATM is crucial for the safe and efficient management of both manned and unmanned aircraft in shared airspace, requiring the development of new procedures, technologies, and regulations to ensure safe and efficient UAV operations while accommodating the growing number of UAVs (Barnhart et al., 2021; Patrikar et al., 2022).

This paper aims to address a significant gap in the field of integrating UAVs into shared airspace. While existing research delves into specific aspects of this intricate challenge, a comprehensive framework that covers essential components and potential solutions is still missing. This study addresses a crucial gap by offering a systematic review of essential aspects concerning the integration of UAVs into airspace, training UAVs for dynamic environments, handling UAV emergencies and crashes, and ensuring the security of UAV communication and data transmission. By reviewing existing literature, pointing out

limitations, and suggesting practical solutions, this work intends to help policymakers, researchers, and entrepreneurs navigate the complexities of UAV integration. However, the limitations of our focus, primarily on technological aspects, are acknowledged, and further exploration of the broader socio-economic and legal implications is encouraged. It is strongly believed that the transformative potential of UAVs will be unlocked and their smooth integration into our skies ensured through collaborative efforts involving various stakeholders, along with ongoing research and technological innovation.

1. METHODS AND MATERIALS

The methodology used in this study is a systematic review approach aimed at addressing the research questions related to UAV technology and its impact. This approach follows a systematic review process, which includes the formulation of research questions, the selection of appropriate databases, a clearly defined search strategy, explicit inclusion and exclusion criteria, rigorous quality assessment, and a comprehensive screening process (Ahn, & Kang, 2018; Newman, & Gough, 2020). This systematic approach ensures the reliability and relevance of the literature selected for the review, facilitating a thorough examination of the challenges and solutions in UTM. Ultimately, it contributes to the safe and efficient coexistence of unmanned and manned aviation in shared airspace. The systematic review process was structured as follows.

1.1. Research Questions and Selection Criteria

To guide the literature review process, a set of research questions (Q1-Q4) was formulated, as presented in Table 1. These questions were carefully designed to investigate various aspects of UAV technology and its integration into shared airspace.

Table 1. Key Themes and Research Questions

Key Themes	Research Questions
Integration of UAVs into Airspace	How can the integration of UAVs into shared airspace be optimized?
Training UAVs for Dynamic Environments	How can UAVs be trained for safe navigation in complex environments?
Handling UAV Emergencies and Crashes	How can UAV operators and technology be better equipped to handle in-flight emergencies and crashes?
Security of UAV Communication and Data Transmission	How can UAV communication systems be optimized for maximum security and data transmission efficiency?

The selection of research questions in the study is logically based on the pivotal role they play in addressing key challenges related to UAV integration into shared airspace, focusing particularly on UTM and ATM aspects.

"Q1. How can the integration of UAVs into shared airspace be optimized?" is a fundamental question as it delves into the heart of UTM and ATM. Optimizing the integration of UAVs is crucial for ensuring the safety, efficiency, and seamless coexistence of UAVs with manned aircraft in shared airspace. It involves the development of conflict detection and resolution methods, airspace models, regulations, and communication networks, all of which are central to the effective management of air traffic in a mixed environment.

"Q2. How can UAVs be trained for safe navigation in complex environments?" is essential for the safe integration of UAVs into shared airspace. Training UAVs for complex

environments involves the development of navigation and obstacle avoidance systems, which are integral to UTM and ATM. It is imperative for UAVs to adaptively respond to obstacles and changes in mission objectives to prevent accidents or incidents, ensuring the safety of both manned and unmanned aircraft.

"Q3. How can UAV operators and technology be better equipped to handle in-flight emergencies and crashes?" addresses the need for preparedness in handling emergencies, which is a vital aspect of UTM. UAV operators and technology must be well-equipped to respond to in-flight emergencies to ensure safe operations. Handling such situations plays a key role in enhancing the overall safety and risk management within shared airspace.

"Q4. How can UAV communication systems be optimized for maximum security and data transmission efficiency?" is paramount in the context of UTM and ATM. Communication systems are the backbone of air traffic management, and ensuring their security and efficiency is central to managing UAV operations in shared airspace. Optimization of communication systems contributes to data exchange, tracking, and coordination of both UAVs and manned aircraft.

In summary, these four questions have been selected for the study because they collectively address core issues related to UTM and ATM, playing a pivotal role in the integration of UAVs into shared airspace. The logical progression from optimizing integration, training UAVs, equipping operators, and optimizing communication systems ensures a comprehensive examination of the challenges and solutions in UTM, ultimately contributing to the safe and efficient coexistence of unmanned and manned aviation.

1.2. Database and Search Strategy

Database Selection: Established academic databases, including IEEE, Science Direct, EBSCO, and Web of Science, which are renowned sources for scholarly research, were systematically explored to identify relevant research.

Systematic Keyword-Based Search Method: A systematic keyword-based search approach was employed to identify pertinent publications. Specific keywords, as outlined in Table 2, were employed, focusing on UAVs. These keywords were carefully chosen to facilitate a comprehensive examination of all facets of UAV technology and its impact on shared airspace.

Table 2. Research Keywords

UAV	UAV Obstacle Avoidance
UAV Collision Avoidance	UAV Path Planning
UAV Collision Detection	UAV Regulations
UAV Communication	UAV Restrictions
UAV Conflict Detection	UAV Safety
UAV Conflict Management	UAV Security
UAV Control	UAV Navigation
UAV Data Security	UAV Technology
UAV Deployment	UAV Traffic
UAV Emergency Landing System	UAV Traffic Management
UAV Environment	UAV Trajectory
UAV Flight	UAV Trajectory Planning
UAV Incidents	Unmanned Aerial Vehicles
UAV Integration	Unmanned Traffic Management
UAV Networks	UTM

1.3. Inclusion and Exclusion Criteria

Inclusion Criteria: While formulating the inclusion criteria, our objective was to classify research papers closely relevant to UAV technology and its various dimensions. Additionally, papers that provided insightful analyses of related fields, such as autonomous systems, aviation, and communication, were considered for inclusion if they were deemed pertinent to the core study issues.

Duplicates and Quality Assessment: To ensure the quality and originality of the selected literature, a meticulous process was undertaken to identify and eliminate duplicate papers found in multiple databases. Subsequently, the selected publications underwent a rigorous assessment for both quality and significance. The final dataset was refined to exclude papers that did not conform to established scientific standards or lacked a peer-review process, thus ensuring the precision and consistency of the data gathered for this literature review.

1.4. Screening of Papers

Title Screening: In the initial phase of screening, papers were assessed based solely on their titles to determine their alignment with the predefined criteria. The primary objective of this phase was to identify papers that did not directly address the research questions.

Abstract Review: In an additional screening step, abstracts of papers for which the relevance could not be ascertained from the title alone were carefully reviewed. This step ensured that the selected papers were specifically focused on addressing the research issues.

1.5. Data Analysis

After completing the screening process, an extensive review and synthesis were conducted on the chosen papers. To offer comprehensive analyses of the research questions, it was necessary to gather and integrate data from the selected publications. The conclusions presented in this study are drawn from the literature review, which is founded upon the previously analyzed data.

2. RESULTS

Several critical aspects are covered in the findings of the systematic review. These encompass the examination of procedural and regulatory necessities for seamless UAV

integration into shared airspace, with an emphasis on airspace management and compliance frameworks. Additionally, methods to train UAVs for adaptive navigation within dynamic environments are explored, along with protocols for managing emergencies and unexpected failures during UAV operations. Security measures for safeguarding UAV communication channels and data transmission against potential vulnerabilities or threats are also investigated.

2.1. Integration of UAVs into Airspace

UAVs have emerged as a transformative technology with vast potential in various industries, but their integration into shared airspace alongside manned aircraft poses complex challenges. As these autonomous systems proliferate, addressing concerns related to safety, coordination, and regulations becomes pivotal. Here are some of the key strategies and technologies that can facilitate the integration of UAVs into the airspace:

CDR methods:

An efficient and effective CDR system for UAVs can be designed using various methods proposed in the literature. One approach involves utilizing a non-rigid hierarchical discrete grid structure and coding method for spatial three-dimensional grids, which optimizes the identification ability of grid vertices, edges, and faces. This optimization results in improved conflict detection and path planning methods (Xue et al., 2023). Another method encompasses the use of a Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm (MADDPG) to train UAVs for path planning tasks under conditions of incomplete information. This approach achieves fast and accurate dynamic path planning for multiple UAVs (X. Wu et al., 2022). Furthermore, a conflict detection algorithm that considers the immediate trajectory as a straight line can be applied with nonlinear mobilities, providing acceptable performance in terms of false and missed alarms (Isufaj et al., 2022). In addition, a Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL) approach based on graph neural networks can be used to model multi-UAV conflict resolution, allowing cooperative agents to communicate and generate resolution maneuvers (Yang et al., 2021). CDR methods are essential for solving conflicts, such as possible collisions, between UAVs of different service providers in shared airspace. State-of-the-art algorithms, such as ORCA, have been adapted for UAV operations to address practical considerations, including navigation inaccuracies, communication overhead, and flight phases (Ho et al., 2018a; 2018b).

Rule-based conflict management (RBCM):

RBCM plays a crucial role in resolving conflicts and ensuring safe UAV operations within shared airspace. This approach involves applying deconfliction methods sequentially based on predefined rules. The first stage of RBCM occurs during the generation of flight plans, where potential conflicts are identified and avoided as part of a strategic deconfliction process (Alharbi et al., 2020). The second stage, known as pre-tactical deconfliction, addresses conflicts by introducing ground delays to the UAV, effectively resolving issues (Acevedo et al., 2020). In the third stage, tactical deconfliction is employed, and UAVs temporarily hover or loiter in the last waypoint before the conflict area until the conflict time window elapses (Radanovic et al., 2019). This rule-based strategy, which differs from

existing approaches, emphasizes the sequential application of deconfliction methods (Ho et al., 2018a). The design of this approach incorporates realistic airspace constraints and considers potential airspace modernization concepts (Isufaj et al., 2022).

Multilayer low-altitude airspace models:

Theoretical models of airspace, depicted as intricate multilayer networks comprising nodes and airways, offer valuable insights for grappling with the intricate challenge of UTM (Labib et al., 2019a). In the pursuit of designing a multilayer model tailored to low-altitude airspace for UAVs, the literature presents various approaches. One method entail dividing the airspace into distinct air corridors that safely circumvent buildings and obstacles. This is accomplished by mapping structures using USGS Lidar data and simulating the coordination of UAV systems as perfect fluid flow, complete with streamlines produced by solving the method known as the Laplace partial differential equation (El Asslouj et al., 2023). An alternative approach involves representing airspace as a weighted multilayer network, incorporating nodes and airways. This framework facilitates the abstract representation of UAV traffic and proves to be invaluable for conducting experimental simulations and validation (Labib et al., 2019b; Shrestha et al., 2022). Through the integration of these distinct methodologies, the development of a comprehensive multilayer low-altitude airspace model tailored to UAVs becomes feasible. Such a model holds the potential to significantly contribute to the secure and efficient administration of UAV traffic.

Path planning schemes:

Efficient pre-flight mission planning techniques and collision-avoidance algorithms are instrumental in establishing conflict-free flight paths for UAVs prior to their missions. Automating the path planning process, specifically tailored for collision avoidance, contributes significantly to ensuring both efficiency and safety in flight paths (Lamba et al., 2021). Path planning strategies for UAVs encompass a range of techniques and algorithms. One approach involves the utilization of advanced artificial intelligence techniques, notably RL, to enable UAV navigation in unstructured environments (Z. Liu et al., 2023). An alternative approach combines clothoid curves and graph theory to optimize trajectory planning for fixed-wing UAV formations in order to prevent collisions (Chronis et al., 2023). Furthermore, the application of genetic algorithms serves to compute the most efficient path distribution schemes, enhancing material distribution efficiency in critical scenarios (Blasi et al., 2023). Real-time conflict detection and intelligent resolution methods, including the multi-agent deep deterministic policy gradient algorithm, offer dynamic path planning solutions for multiple UAVs (Xue et al., 2023). Moreover, an integrated air-ground collaborative unmanned system path planning framework is a viable solution, wherein UAVs play a pivotal role in path planning for ground-based Unmanned Ground Vehicles (UGVs), particularly in search and rescue missions (Y. Sun et al., 2022).

Secure and reliable communication networks:

Establishing a secure and reliable communication network is paramount to effectively utilize hundreds or even thousands of UAVs simultaneously. Traditional satellite-based UAV communication systems exhibit limitations, including slow data transmission links, even

when dealing with only a small drone fleet. Overcoming these constraints can be achieved through the strategy of local data storage on each individual drone during its mission, subsequently consolidating the collected intelligence upon its return (Bian et al., 2013). Various approaches have been proposed in the literature to design a secure and reliable communication network for UAVs. One approach center on the deployment of UAV relay networks, employing Q-learning algorithms to minimize the number of nodes and ensure communication reliability (W. Wang et al., 2023). Another approach addresses collision avoidance during UAV flight by breaking down reliable UAV services into sub-problems and leveraging interpretable artificial intelligence frameworks for transparent and trustworthy decision-making (Quan et al., 2023). Additionally, the design of secure Integrated Sensing and Communication (ISAC) systems for UAVs entails tasks such as tracking and predicting the location of legitimate users, formulating trajectory design problems, and developing efficient iterative algorithms for optimal solutions (J. Wu et al., 2023).

Regulations and guidelines:

Regulations and guidelines governing UAV operations, including flight restrictions in sensitive areas and safety requirements, should be seamlessly integrated into existing aviation regulations. This integration is crucial to ensure uniformity and safety within shared airspace (Çınar&Tuncal, 2023; Ho, 2018a; 2018b). Designing UAV regulations and guidelines necessitates a tailored approach, accounting for specific applications, measurement objectives, and an assessment of measurement uncertainty (Balestrieri et al., 2021). It is imperative to confront critical challenges, including privacy, safety, security, public inconvenience, and trespassing. Comparing these regulations against predefined criteria is essential to identify any potential shortcomings (McTegg et al., 2022). Additionally, the formulation of guidance laws, based on robust feedback linearization principles, can ensure the autonomous navigation of UAVs towards predetermined waypoints, even in the presence of external disturbances like wind gusts (Y.Y. Chen et al., 2014). The development of comprehensive national legislation becomes paramount, particularly in distinguishing between the recreational and commercial utilization of UAVs and attributing responsibility to the pilot for any accidents or incidents (Cracknell, 2017). Aligning UAV regulations with a country's specific needs and applications is fundamental in facilitating the effective use of UAVs and promoting overall progress (Shrestha et al., 2019).

Trajectory coordination:

Equipping UAVs with decision capabilities to update their trajectories (4D contracts) when facing unpredictable events or when priority trajectories are added to the airspace can help improve coordination and deconfliction into shared airspace (Picard, 2022). Trajectory coordination for UAVs can be designed by employing multiple UAVs coordinated by a base station to help ground users offload their sensing data (Gong et al.,2023). The trajectory planning aims to collect all ground users' data, while the network formation optimizes the multi-hop UAV network topology to minimize energy consumption and transmission delay (J. Xu et al., 2022; Shi et al., 2022).

In conclusion, the successful integration of UAVs into shared airspace requires a multifaceted approach that encompasses conflict detection and resolution methods, rule-based conflict management, the development of multilayer low-altitude airspace models, advanced path planning schemes, secure communication networks, and robust regulations and guidelines. Furthermore, trajectory coordination mechanisms are crucial in enhancing coordination and deconfliction among UAVs. By leveraging these strategies and technologies, we can ensure that UAV operations not only coexist safely with manned aircraft but also contribute to the growth of industries and applications that benefit from the use of UAVs. As the UAV market continues to evolve, these integrated approaches are essential for optimizing their integration into shared airspace.

2.2. Training UAVs for Dynamic Environments

Training UAVs to navigate complex, dynamic environments and dynamically adjust their flight trajectories when confronted with unforeseen obstacles or alterations in mission objectives can be accomplished through a range of methodologies. These strategies empower UAVs to effectively respond to unexpected challenges or shifts in their mission goals, thereby enhancing their overall performance and safety within intricate and ever-changing environments. Here are some of the approaches that have been explored:

RL algorithms:

RL algorithms, including Deep Q Learning, Actor-Critic (AC), and Advantaged Actor-Critic (A2C), have found applications in training UAVs for automatic obstacle avoidance and the optimization of avoidance decision-making models in complex scenarios (Han et al., 2019; Zhang et al., 2023b). These RL algorithms employ modular learning, where intricate tasks are decomposed into simpler components, allowing individual learning before interconnecting them and safe navigation and avoidance of dynamic obstacles (Z. Xu et al., 2022). UAVs can be trained using Deep Reinforcement Learning (DRL) algorithms to autonomously adapt their flight trajectories in complex environments and in response to changes in mission objectives (Ye et al., 2023). This approach accelerates learning and facilitates the transfer of information between modules (Choi et al., 2023).

Combining RL with Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs):

The RL and MOEAs has emerged as a promising strategy for enhancing autonomous UAV navigation in large-scale complex environments (An et al., 2023). This integration seeks to generate a diverse set of non-dominating parameters for the reward function, ultimately leading to versatile decision-making preferences, improved convergence, and enhanced performance. RL algorithms have been tailored to combine with multi-objective evolutionary algorithms for UAV applications. One approach involves the utilization of a decentralized partially observable Markov decision process (Dec-POMDP) model and multi-agent RL, specifically employing a parametrized deep Q-network (P-DQN) for the action space. The QMIX framework aggregates local critics of each UAV, contributing to an effective combination (Yin, & Yu, 2021). Another avenue of exploration is the amalgamation of evolutionary strategies with the off-policy DRL algorithm TD3. This innovative approach incorporates a multi-buffer system to enable unhindered exploration in

the policy search space, contributing to the effective convergence of algorithms (Altin, 2020; Callaghan, 2023). Furthermore, a genetic algorithm-based K-means (GAK-means) algorithm is proposed for cell partitioning, complemented by Q-learning-based deployment and movement algorithms to facilitate 3-D positioning and dynamic movement of UAVs (X. Liu et al., 2019). These approaches represent a concerted effort to harness the synergies between RL and evolutionary algorithms for UAV applications, paving the way for improved performance and navigation in complex environments.

HRL algorithms:

HRL offers a dynamic approach to adapting UAV reward functions for obstacle avoidance, reducing training convergence time, and enhancing efficiency and precision in large-scale 3D complex environments (G. Li et al., 2023). To implement HRL for UAVs, DRL techniques are combined with human expertise. In HRL, humans play a pivotal role in defining reward functions and decision-making related to problem-solving and deploying learned solutions (Taylor, 2023). In tasks involving continuous action spaces, a Q value-dependent policy (QDP)-based HRL algorithm can be utilized. Here, human experts selectively provide guidance to the agent during the early stages of learning, significantly improving learning speed and performance in continuous action space tasks (B. Luo et al., 2023). Furthermore, trajectory design mechanisms are employed to optimize the energy efficiency of UAV- aerial base stations in 3D space, where RL algorithms like multi-armed bandit with upper confidence bound contribute to this optimization (Arani et al., 2021).

Heuristic dynamic reward functions:

Designing heuristic dynamic reward functions is instrumental in guiding UAV navigation and enhancing obstacle avoidance capabilities, particularly in scenarios like ultra-low altitude flight in complex environments for missions (Zhang et al., 2023a; 2023b). The design of heuristic dynamic reward functions for UAVs can encompass various approaches. For instance, incorporating situational information such as angle and speed can address the challenge of sparse rewards, thereby aiding convergence (Xie et al., 2022). Another strategy involves constructing and estimating simplified trajectories to the target using third-order Bezier curves, applicable in both two-dimensional and three-dimensional virtual environments (Tovarnov & Bykov, 2022). Furthermore, the redesign of reward functions based on the state space and the acquisition of status information through vehicle cameras can enhance agent learning efficiency and convergence in image-based end-to-end vehicle following methods (Xiao et al., 2022). The concept of heuristic reward function design involves providing additional rewards beyond those supplied by the underlying Markov Decision Process, expediting the learning system's progress (Wei et al., 2004).

Combining neural networks with Interfered Fluid Dynamical System (IFDS):

The integration of neural networks and IFDS has been proposed for real-time obstacle avoidance within three-dimensional dynamic complex environments, wherein the neural network is utilized to adapt the coefficients of the IFDS in response to the environmental conditions (Y. Wang et al., 2020). To enhance UAV performance, neural networks can be combined with IFDS. One approach involves the utilization of neural networks to

dynamically modify the IFDS coefficients based on the surrounding environment (Celestini et al., 2022). This enables UAVs to flexibly adjust their flight trajectories to circumvent obstacles in intricate three-dimensional settings (Y. Wang et al., 2020). Another approach entails the use of neural networks to mitigate inversion errors in the control system arising from uncertainties in UAV and actuator dynamics (Wijnker et al., 2019). By employing neural networks to compensate for parameter uncertainties and disturbances, this approach enhances the robustness and accuracy of attitude and trajectory control (Xiang et al., 2016). These amalgamations of neural networks and IFDS hold promise for optimizing UAV trajectories and ensuring safety in dynamic environments (J. Sun et al., 2021).

In conclusion, the training of UAVs for safe navigation in complex environments is achievable through a spectrum of strategies, including RL algorithms, the integration of RL with MOEAs, HRL, heuristic dynamic reward functions, and the combination of neural networks with IFDS. These methodologies empower UAVs to dynamically adapt their flight trajectories in response to evolving scenarios, ensuring their ability to navigate safely in the presence of unforeseen obstacles. By harnessing the power of these training approaches, UAVs are better equipped to excel in intricate, ever-changing environments, enhancing their performance and safety in diverse applications.

2.3. Handling UAV Emergencies and Crashes

In the ever-evolving realm of UAV technology, the imperative of ensuring safety and efficiency has gained paramount importance. This section casts a spotlight on a spectrum of pivotal elements within UAV systems, spanning from crafting emergency landing procedures and real-time monitoring and communication solutions to the development of collision avoidance systems and robust mechanisms for investigation and reporting. Each of these facets addresses distinct challenges and advances, collectively contributing to the enhancement of safety and performance in the realm of UAVs.

Emergency landing procedures:

In terms of flight safety, the landing is the most important aspect of a routine flight (Saraçyakupoğlu et al., 2020). UAVs should be equipped with robust emergency landing procedures to ensure their safe descent in the event of system failures or other emergencies. Various approaches can be employed to design these emergency landing procedures, each catering to specific challenges and safety considerations. One approach involves leveraging depth maps obtained from RGB-d cameras to identify suitable landing platforms, particularly in intricate ground environments (Bu et al., 2022). Another innovative method utilizes real-time semantic segmentation networks to classify terrain and determine optimal landing spots based on safety evaluations (T. Wang et al., 2023). DRL is another promising avenue to detect secure landing sites and autonomously guide UAVs to a safe landing, while considering various safety constraints (Bartolomei et al., 2022). Additionally, a waypoint path planning method based on terminal velocity prediction can be employed to chart a secure landing path for UAVs during emergencies (Kim et al., 2020). Furthermore, an offline semi-automated approach may be adopted to identify suitable emergency landing sites along UAV flight paths, with considerations for factors such as surface type and prevailing wind conditions (Ayhan et al., 2018).

Real-time monitoring and communication:

UAV operators must be equipped with real-time monitoring and communication capabilities to effectively respond to emergency situations. Designing real-time monitoring and communication solutions for UAVs involves the integration of various technologies, each contributing to improved situational awareness and decision-making. One innovative approach is optimizing UAV trajectory design to serve as both downlink transmitters and radar receivers. This allows for real-time tracking and predictive location assessment based on delay measurements extracted from sensing echoes (J. Wu et al., 2023). Another avenue leverages the fusion of UAV technology with modern 4G/5G communication networks. Key technologies such as multi-base station relay, antenna optimization, and PTZ measurement and control are harnessed to meet real-time and remote interaction requirements effectively (Q. Li et al., 2022). Furthermore, the integration of Software-Defined Networks (SDN) with Digital Twin (DT) technology offers capabilities for real-time monitoring, network performance analysis, and virtualization. This revolutionary combination transforms the design, implementation, and maintenance of software-defined UAV networks, enhancing their agility and adaptability (Abir & Chowdhury, 2023).

Collision avoidance systems:

UAVs are required to be equipped with collision avoidance systems that enable them to detect and evade other aircraft or obstacles, especially when faced with potential collision scenarios (Lamba et al., 2021). Developing collision avoidance systems for UAVs involves diverse methodologies and technologies to enhance their safety measures. One such approach involves the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation software to analyze the impact of integrating anti-collision devices on UAVs. This analysis delves into their hovering capabilities, flow field characteristics, and aerodynamic configurations (X. Li et al., 2023). An alternative methodology is the combination of DRL with global planning to establish a hybrid collision-avoidance mechanism. This hybrid system is geared towards real-time navigation in intricate environments, ensuring efficient obstacle avoidance (C. Zhang et al., 2023). Furthermore, an intelligent game theory-based collision avoidance method is employed, characterized by the design of a suitable controller through a pay-off function. The purpose is to achieve a stable positioning of UAVs without collision incidents (Maurya et al., 2022). In addition to these approaches, the Force Field Protocol (FFP) is introduced, incorporating artificial potential fields and wireless communication. FFP serves to autonomously detect and maintain a safe separation distance between UAVs, enhancing collision avoidance (Wubben et al., 2023). Lastly, genetic algorithms play a vital role in the autonomous collision avoidance process. These algorithms are instrumental in optimizing collision avoidance paths, thus ensuring the safety of UAV flights (Y. Sun & Dang, 2022).

Investigation and reporting:

UAV operators should be required to investigate and report any emergencies or crashes to the appropriate authorities for further analysis and improvement of safety measures. Procedures and mechanisms that can enhance the investigation and reporting of UAV emergencies or crashes by operators include the use of data field analysis and natural language processing algorithms to automate the analysis of reported issues and extract

keywords from reports (Khan et al., 2022). The Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) can be combined with an Analytical Hierarchical Process (AHP) decision-making model to assess the risk of accidents and identify causes. Clear regulations and procedures for reporting and analyzing UAV incidents are necessary to improve the safe integration of unmanned and manned aviation (Alharasees et al., 2022). Additionally, raising awareness among UAV users about the need to report incidents and involving them in the investigative process can contribute to the assessment and development of strategies for integrating manned and unmanned aviation (Konert & Kasprzyk, 2021).

In conclusion, the safe integration of UAVs into shared airspace demands a holistic approach that encompasses various critical elements. Robust emergency landing procedures, real-time monitoring and communication solutions, advanced collision avoidance systems, and effective mechanisms for investigation and reporting are vital components of this approach. By combining these strategies, UAV operators and technology can better prepare for and respond to in-flight emergencies and crashes, thereby contributing to the overall safety and efficiency of UAV operations within shared airspace. As the UAV industry continues to evolve, the continued development and implementation of these measures are essential for the seamless coexistence of unmanned and manned aviation.

2.4. Security of UAV Communication and Data Transmission

In an era marked by the increasing demand for secure and efficient communication within UAV networks, a multitude of challenges and innovative solutions have come to the forefront. This section delves into several critical aspects of UAV communication systems, addressing issues such as limited bandwidth, Line-of-Sight (LoS) vulnerabilities, covert communication, quantum security, and resilience to attacks. These challenges have prompted the development of diverse strategies and technologies aimed at enhancing the security and effectiveness of UAV communications.

Limited bandwidth:

Traditional satellite-based UAV communication systems have notable limitations, including slow data transmission links, even in scenarios involving a limited number of drones (Bian et al., 2013). This restricted bandwidth poses challenges for the real-time transmission of collected information, necessitating alternative strategies. One approach involves storing data locally on each drone during its mission and consolidating this information upon the UAVs' return. The limited bandwidth available for UAVs can be addressed through the utilization of various techniques aimed at enhancing communication security and data transmission. Techniques such as wireless power transfer, physical layer security, and trajectory optimization play a crucial role in maximizing system utility, improving secrecy rates, and minimizing information eavesdropping. Moreover, deploying multiple UAVs can optimize coverage and offloading, considering various user tasks and preferences related to residual energy and processing delay (Lu et al., 2022). For further enhancement, a joint optimization approach can be applied, considering wireless charging duration, trajectory, and transmit power. This optimization accounts for factors such as limited battery capacity, maximum flying speed, and energy-harvesting causal constraints (Tang et al., 2021). Furthermore, the optimization of trajectory, flight duration, and user scheduling can

significantly improve energy efficiency while considering constraints related to eavesdropping rate and outage probability for secure data transmission (X. Chen et al., 2023).

LoS vulnerabilities:

UAV-assisted communication frequently relies on LoS air-ground channels, which are susceptible to attacks by malicious users (Jiang et al., 2021). This heightened vulnerability of LoS channels necessitates the development of techniques to ensure secure communication in such scenarios. To address LoS vulnerabilities for UAVs and enhance secure communication and data transmissions, various approaches have been proposed in the literature. One strategy involves optimizing the UAV's trajectory and flight duration to maximize energy efficiency and ensure the freshness and security of transmissions (X. Chen et al., 2023). Another method focuses on robust trajectory planning, considering the presence of multiple jammers and imperfect power and location information. The objective here is to maximize the worst-case Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR) (Lingyun et al., 2022). Moreover, telemetry performance between UAVs and ground control stations can be analyzed to assess Received Signal Strength Indicator (RSSI) values and identify factors that may lead to degraded performance, such as voltage drops and interference from cellular base stations (Chasanah et al., 2022). Furthermore, a dual-UAV aided secure dynamic ground-to-UAV communication system can be designed. This approach involves optimizing UAV trajectories and ground devices transmit power to maximize the sum secrecy rate (Kang et al., 2022).

Covert communication:

Covert communication, which aims to conceal the existence of transmissions, is a critical requirement for enhancing security (Jiang et al., 2021). In UAV-assisted networks, achieving covert communication is particularly challenging due to the open and broadcasting nature of wireless channels. The development of effective techniques for covert communication in UAV networks is an active area of research. One approach to achieving covert communication in UAV networks leverages the high flexibility of UAVs for long-distance covert transmission. This is accomplished by dividing the transmission into two phases and optimizing transmit power and block length to meet the covertness requirement. Furthermore, the UAV's location can be optimized to maximize effective throughput while considering constraints related to transmit power and block length. Simulation results have demonstrated the effectiveness of this UAV relaying scheme in ensuring covert transmission (H. Luo et al., 2023). Another method involves the use of blockchain and digital twin technology to enhance the security of UAV networks. By mapping physical UAVs into Cyberspace, a virtual UAV network known as CyberUAV is created. In CyberUAV, a blockchain consensus mechanism called Proof of Network Coding (PoNC) is employed to ensure security. Analysis and simulations have illustrated the advantages of this approach in terms of both efficiency and security for UAV networks (Lu et al., 2022).

Quantum security:

As the demand for instantaneous and enhanced security continues to grow, researchers have been delving into the potential of quantum cryptography to secure UAV communications (Ralegankar et al., 2021). Implementing quantum security in practical UAV communication systems, however, comes with significant challenges, primarily the need for robust and efficient transmission protocols. Quantum security harnesses the principles of quantum communication and cryptography to ensure the security of communication and data transmissions for UAVs. Quantum communication, specifically Quantum Key Distribution (QKD), provides an exceptionally secure method for transmitting cryptographic keys. This approach safeguards the keys used for encrypting and decrypting UAV communications from eavesdropping or interception. Notably, quantum cryptography can offer unconditional security, protecting data and communications from potential threats posed by quantum computers (Kumar et al., 2023). In addition to this, quantum technologies can be applied to authenticate the identities of entities involved in UAV communication and establish secure communication channels (Conrad et al., 2023). Furthermore, quantum secure communication protocols, such as Quantum Secret Sharing (QSS), can be utilized to store highly sensitive and confidential information (Abulkasim et al., 2022). By integrating these quantum security measures, UAVs can attain robust protection for their communication and data transmissions.

Resilience to attacks:

UAV communication systems must exhibit resilience to a range of potential attacks, including jamming, eavesdropping, and data manipulation. One notable approach to bolstering this resilience is the development of a Resilience Oriented Security Inspection System (ROSIS), which is designed to enhance the security of data access and sharing among Urban Air Mobility (UAM) systems, including aircraft and Air Traffic Service Providers (ANSPs) (Wei et al., 2023). Another method involves the application of RL algorithms to optimize the secure offloading of tasks to UAVs within multi-UAV-assisted mobile edge computing systems. This optimization process considers factors like user task preferences related to residual energy and processing delays (Lu et al., 2022; Wei et al., 2023). Furthermore, defensive strategies can be employed to counteract jamming attacks and ensure secure data collection in Internet-of-Things (IoT) networks. These strategies may include the adoption of higher SINR thresholds and the utilization of intelligent UAV jammers (Lu et al., 2022).

In summary, the multifaceted landscape of UAV communication systems presents various challenges, from limited bandwidth and LoS vulnerabilities to covert communication, quantum security, and resilience to attacks. Researchers and innovators continue to explore cutting-edge solutions to address these challenges and fortify the security and efficiency of UAV communications, paving the way for the continued integration of UAVs into our evolving technological landscape.

3. CONCLUSION AND DISCUSSION

The integration of UAVs into shared airspace is a multifaceted challenge, characterized by complexities related to safety, coordination, and regulatory frameworks. A comprehensive framework, as discussed earlier, encompasses various strategies, such as CDR methods, RBCM, multilayer airspace models, path planning, secure communication networks, and regulations. These elements, coupled with trajectory coordination, collectively enhance the safe integration of UAVs into shared airspace, enabling them to harmoniously coexist with manned aircraft across diverse industries. This integrated approach is pivotal for harnessing the transformative potential of UAV technology.

The training of UAVs to navigate complex environments safely and adaptively respond to unforeseen obstacles or mission alterations relies on a diverse array of methodologies. Notably, the application of RL algorithms, both independently and in conjunction with MOEAs, has exhibited promise in elevating UAV navigation capabilities. Furthermore, the concept of HRL, which involves the integration of human expertise and guidance into the learning process, offers dynamic adaptability for UAV reward functions and obstacle avoidance. These methodologies collectively contribute to the enhancement of UAV performance and safety within intricate and dynamic environments, empowering UAVs to effectively address unexpected challenges and contribute to the field of autonomous UAV navigation.

Ensuring the safe integration of UAVs into shared airspace demands a holistic strategy that encompasses several critical elements. Robust emergency landing procedures, real-time monitoring, communication solutions, advanced collision avoidance systems, and effective mechanisms for investigation and reporting are pivotal components of this approach. By amalgamating these strategies, UAV operators and technology can better prepare for and respond to in-flight emergencies and crashes, ultimately contributing to the overall safety and efficiency of UAV operations within shared airspace. As the UAV industry continually evolves, the ongoing development and implementation of these measures remain indispensable for the seamless coexistence of unmanned and manned aviation.

The evolving landscape of UAV communication systems introduces a diverse array of challenges, including issues related to limited bandwidth, LoS vulnerabilities, covert communication, quantum security, and resilience to attacks. In response to these challenges, researchers and innovators are actively exploring cutting-edge solutions to bolster the security and efficiency of UAV communications. These advancements play a pivotal role in facilitating the seamless integration of UAVs into our ever-evolving technological environment. As the demand for secure and efficient communication within UAV networks continues to grow, these pioneering efforts are instrumental in shaping the future of UAV technology and its multifaceted applications.

In conclusion, this paper explores the complexities of incorporating UAVs into shared airspace and reveals how complex this process is. The results are well-received by scholars, policymakers, and business professionals, opening the door to important developments.

Firstly, our research emphasizes how crucial it is to have a thorough framework with coordination and safety as its cornerstones. A variety of methods, such as risk-based collision management, layered airspace models, and cooperative decision-making techniques, should

serve as the cornerstone upon which this framework is constructed. Robust regulations and secure communication networks also need to be deeply embedded in this framework.

Secondly, the research highlights the exciting possibilities for UAV training that come with human-in-the-loop and reinforcement learning techniques. These advanced techniques enable UAVs to operate in shared airspace more safely and effectively by enabling them to maneuver through challenging environments with resilience and agility.

Thirdly, to ensure the safety of UAV operations, the research highlights the critical importance of strong protocols, real-time monitoring, sophisticated collision avoidance systems, and exhaustive investigative mechanisms. Depending on the environment can be created and the smooth integration of UAVs into our skies can be aided by putting these precautions into place.

Fourthly, the results show how UAV communication presents an intricate balance between opportunities and challenges. Researchers are working hard to improve security and efficiency because they know how important they are to the smooth coexistence of manned aircraft and UAVs.

The study defines a useful framework for additional research in the field of UAV integration. Future research efforts are directed by its insights toward the creation of resilient traffic management systems, sophisticated AI-powered operations, and cutting-edge communication technologies targeted to the particular requirements of UAV applications. We hope that this work will act as a catalyst for the advancement of UAV integration into a future marked by efficiency, safety, and harmony for researchers, policymakers, and industry professionals.

Nomenclature

A2C: Advantaged Actor-Critic
AC: Actor-Critic
AHP: Analytical Hierarchical Process
ANSP: Air Navigation Service Provider
ATM: Air Traffic Management
CDR: Conflict Detection and Resolution
CFD: Computational Fluid Dynamics
DRL: Deep Reinforcement Learning
DT: Digital Twin
FFP: Force Field Protocol
HFCAS: Human Factors Analysis and Classification System
HRL: Human-in-the-loop Reinforcement Learning
IFDS: Interfered Fluid Dynamical System
IoT: Internet-of-Things
ISAC: Integrated Sensing and Communication
LoS: Line-of-Sight

MADDPG: Multi-agent Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm
MARL: Multi-Agent Reinforcement Learning
MOEA: Multi-Objective Evolutionary Algorithm
PoNC: Proof of Network Coding
QDP: Q Value-Dependent Policy
QKD: Quantum Key Distribution
QSS: Quantum Secret Sharing
RBCM: Rule-Based Conflict Management
RL: Reinforcement Learning
ROSIS: Resilience Oriented Security Inspection System
RSSI: Received Signal Strength Indicator
SDN: Software-Defined Networks
SINR: Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio
UAM: Urban Air Mobility
UAV: Unmanned Aerial Vehicle
UGV: Unmanned Ground Vehicle
UTM: Unmanned Traffic Management

Author Contributions

Arif TUNCAL: Literature review, Methodology, Data curation, Formal analysis, Editing, Writing, Validation

Ufuk EROL: Supervision, Editing, Critical review, Validation, Finalization.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

A special appreciation to Dr. Tamer SARAÇYAKUPOĞLU for evaluating the content of the article and providing valuable suggestions.

REFERENCES

- Abir, M. A. B. S., & Chowdhury, M. Z. (2023). Digital Twin-based Software-defined UAV Networks Using Queuing Model. In *2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* (pp. 479-483). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SPIN57001.2023.10116319>
- Abulkasim, H., Goncalves, B., Mashatan, A., & Ghose, S. (2022). Authenticated Secure Quantum-Based Communication Scheme in Internet-of-Drones Deployment. *IEEE*, 10, 94963-94972. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3204793>
- Acevedo, J. J., Capitán, C., Capitiin, J., Castaño, A. R., & Ollero, A. (2020). A Geometrical Approach based on 4D Grids for Conflict Management of Multiple UAVs operating in U-space. In *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. <https://doi.org/10.1109/ICUAS48674.2020.9213929>
- Adoni, W. Y. H., Lorenz, S., Fareedh, J. S., Gloaguen, R., & Bussmann, M. (2023). Investigation of Autonomous Multi-UAV Systems for Target Detection in Distributed Environment: Current Developments and Open Challenges. *Drones*, 7(4), 263. <https://doi.org/10.3390/drones7040263>
- Ahn, E., & Kang, H. (2018). Introduction to systematic review and meta-analysis. *Korean Journal of Anesthesiology*, 71(2), 103-112. <https://doi.org/10.4097/kjae.2018.71.2.103>
- Alharasees, O., Abdalla, M. S., & Kale, U. (2022). Analysis of Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) of UAV Operators. In *2022 New Trends in Aviation Development (NTAD)* (pp. 10-14). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NTAD57912.2022.10013492>
- Alharbi, A., Poujade, A., Malandrakis, K., Petrugin, I., Panagiotakopoulos, D., & Tsourdos, A. (2020). Rule-based conflict management for unmanned traffic management scenarios. In *2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. <https://doi.org/10.1109/DASC50938.2020.9256690>
- Al-Shareeda, M. A., Saare, M. A., & Manickam, S. (2023). Unmanned aerial vehicle: a review and future directions. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS)*, 30(2), 778-786. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i2.pp778-786>
- Altin, U. C. (2020). Evolutionary reinforcement learning for the coordination of swarm UAVs. In *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIU49456.2020.9302227>
- An, G., Wu, Z., Shen, Z., Shang, K., & Ishibuchi, H. (2023). Evolutionary Multi-Objective Deep Reinforcement Learning for Autonomous UAV Navigation in Large-Scale Complex Environments. In *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference* (pp. 633-641). <https://doi.org/10.1145/3583131.3590446>
- Arani, A. H., Azari, M. M., Hu, P., Zhu, Y., Yanikomeroğlu, H., & Safavi-Naeini, S. (2021). Reinforcement learning for energy-efficient trajectory design of UAVs. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(11), 9060-9070. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3118322>
- Ayhan, B., Kwan, C., Um, Y. B., Budavari, B., & Larkin, J. (2018). Semi-automated emergency landing site selection approach for UAVs. *IEEE Transactions on*

Aerospace and Electronic Systems, 55(4), 1892-1906.
<https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2879529>

- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., Picariello, F., & Tudosa, I. (2021). Guidelines for an Unmanned Aerial Vehicle-based measurement instrument design. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(4), 89-95.
<https://doi.org/10.1109/MIM.2021.9448256>
- Barnhart, R. K., Marshall, D. M., & Shappee, E. (2021). *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*, 3e. Boca Raton: CRC Press.
- Bartolomei, L., Kompis, Y., Teixeira, L., & Chli, M. (2022). Autonomous emergency landing for multicopters using deep reinforcement learning. In *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3392-3399). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981152>
- Bian J., Xie, M., & Şeker, R. (2013). *Towards a Secure and Reliable Communication Network for Large-scale UAV Systems Deployed in Hostile Environments*. Computer Science.
- Blasi, L., D'Amato, E., Notaro, I., & Raspaolo, G. (2023). Clothoid-Based Path Planning for a Formation of Fixed-Wing UAVs. *Electronics*, 12(10), 2204.
<https://doi.org/10.3390/electronics12102204>
- Bolz, K., & Nowacki, G. (2023). Air transport safety in UAV operational conditions. *Journal of Civil Engineering and Transport*, 5 (1). <https://doi.org/10.24136/tren.2023.001>
- Bu, N., Ge, J., Yang, J., & Ru, H. (2022). Emergency Landing System of Rotor UAV in Complex Ground Environment. In *International Conference on Autonomous Unmanned Systems* (pp. 2954-2964). Singapore: Springer Nature Singapore.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-0479-2_273
- Callaghan, A., Mason, K., & Mannion, P. (2023). Evolutionary Strategy Guided Reinforcement Learning via MultiBuffer Communication. *arXiv preprint arXiv:2306.11535*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11535>
- Celestini, D., Primatesta, S., & Capello, E. (2022). Trajectory planning for UAVs based on interfered fluid dynamical system and Bézier curves. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(4), 9620-9626. <https://doi.org/10.1109/LRA.2022.3191855>
- Chasanah, N., Rismayanti, I., Kusuma, W. T., Pranoto, F. S., Prabowo, Y., & Kusumoaji, D. (2022). Performance Investigation of Link Failure Line-of-Sight (LOS) Communication UAV. In *2022 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)* (pp. 1-6). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/ICARES56907.2022.9993526>
- Chen, X., Zhao, N., Chang, Z., Hämäläinen, T., & Wang, X. (2023). UAV-aided secure short-packet data collection and transmission. *IEEE Transactions on Communications*.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3244954>
- Chen, Y. Y., Chen, Y. L., & Zhou, B. H. (2014). Robust guidance law design for UAVs. In *11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA)* (pp. 44-49).
- Chin, C., Gopalakrishnan, K., Balakrishnan, H., Egorov, M., & Evans, A. (2021). Efficient and fair traffic flow management for on-demand air mobility. *CEAS Aeronautical Journal*, 1-11. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13272-021-00553-3>

- Choi, J., Kim, H. M., Hwang, H. J., Kim, Y. D., & Kim, C. O. (2023). Modular Reinforcement Learning for Autonomous UAV Flight Control. *Drones*, 7(7), 418. <https://doi.org/10.3390/drones7070418>
- Chronis, C., Anagnostopoulos, G., Politi, E., Garyfallou, A., Varlamis, I., & Dimitrakopoulos, G. (2023). Path planning of autonomous UAVs using reinforcement learning. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2526, No. 1, p. 012088). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2526/1/012088>
- Conrad, A., Isaac, S., Cochran, R., Sanchez-Rosales, D., Rezaei, T., Javid, T., Schroeder, A.J., Golba, G., Gauthier, D., & Kwiat, P. (2023). Drone-based quantum communication links. In *Quantum Computing, Communication, and Simulation III* (Vol. 12446, pp. 99-106). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2647923>
- Cracknell, A. P. (2017). UAVs: regulations and law enforcement. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 3054-3067. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1302115>
- Çınar, E., & Tuncal, A. (2023). A Comprehensive Analysis of Society's Perspective on Urban Air Mobility. *Journal of Aviation*, 7(3), 353-364. <https://doi.org/10.30518/jav.1324997>
- Davies, L., Vagapov, Y., Grout, V., Cunningham, S., & Anuchin, A. (2021). Review of air traffic management systems for UAV integration into urban airspace. In *2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWED52055.2021.9376343>
- El Asslouj, A., Atkins, E., & Rastgoftar, H. (2023, June). Can a Laplace PDE Define Air Corridors through Low-Altitude Airspace?. In *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10180409>
- Geister, D., & Korn, B. (2013). Operational integration of UAS into the ATM system. In *AIAA Infotech@ Aerospace (I@A) Conference* (p. 5051). <https://doi.org/10.2514/6.2013-5051>
- Gong, S., Wang, M., Gu, B., Zhang, W., Hoang, D. T., & Niyato, D. (2023). Bayesian Optimization Enhanced Deep Reinforcement Learning for Trajectory Planning and Network Formation in Multi-UAV Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.13396>
- Han, X., Wang, J., Zhang, Q., Qin, X., & Sun, M. (2019). Multi-uav automatic dynamic obstacle avoidance with experience-shared a2c. In *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (pp. 330-335). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923344>
- Ho, F., Geraldes, R., Goncalves, A., Cavazza, M., & Prendinger, H. (2018b). Simulating shared airspace for service UAVs with conflict resolution. In *Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems* (pp. 2192-2194). <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3237383.3238117>
- Ho, F., Geraldes, R., Gonçalves, A., Cavazza, M., & Prendinger, H. (2018a). Improved conflict detection and resolution for service UAVs in shared airspace. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(2), 1231-1242. <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2889459>

- Isufaj, R., Omeri, M., & Piera, M. A. (2022). Multi-UAV conflict resolution with graph convolutional reinforcement learning. *Applied Sciences*, 12(2), 610. <https://doi.org/10.3390/app12020610>.
- Jiang, X., Chen, X., Tang, J., Zhao, N., Zhang, X. Y., Niyato, D., & Wong, K. K. (2021). Covert communication in UAV-assisted air-ground networks. *IEEE Wireless Communications*, 28(4), 190-197. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000454>
- Kainrath, K., Gruber, M., Hinze, A., Fluehr, H., & Leitgeb, E. (2022). Towards Unmanned Aerial Vehicle UTM-integration using mobile radio networks. In *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO)* (pp. 465-469). IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIPRO55190.2022.9803420>
- Kang, H., Li, W., Mišić, J., Mišić, V. B., & Chang, X. (2022). Dual-UAV Aided Secure Dynamic G2U Communication. In *2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCC55528.2022.9912939>
- Khan, A., Ferramosca, M. L., Ivaki, N., & Madeira, H. (2022). Classifying Fault Category and Severity of UAV Flight Controllers' Reported Issues. In *2022 6th International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)* (pp. 45-54). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSRS56243.2022.10067593>
- Kim, Y. W., Lee, D. Y., Tahk, M. J., & Lee, C. H. (2020). A New Path Planning Algorithm for Forced Landing of UAVs in Emergency Using Velocity Prediction Method. In *2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 62-66). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MED48518.2020.9183166>
- Konert, A., & Kasprzyk, P. (2021). UAS Safety Operation—Legal issues on reporting UAS incidents. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 103(3), 51. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-021-01448-5>
- Kumar, A., Krishnamurthi, R., Sharma, G., Jain, S., Srikanth, P., Sharma, K., & Aneja, N. (2023). Revolutionizing Modern Networks: Advances in AI, Machine Learning, and Blockchain for Quantum Satellites and UAV-based Communication. *arXiv preprint arXiv:2303.11753*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.11753>
- Labib, N. S., Danoy, G., Musial, J., Brust, M. R., & Bouvry, P. (2019a). A multilayer low-altitude airspace model for UAV traffic management. In *Proceedings of the 9th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications* (pp. 57-63). <https://doi.org/10.1145/3345838.3355998>
- Labib, N.S., Danoy, G., Musial, J., Brust, M. R., & Bouvry, P. (2019b). Internet of unmanned aerial vehicles—A multilayer low-altitude airspace model for distributed UAV traffic management. *Sensors*, 19(21), 4779. <https://doi.org/10.3390/s19214779>
- Lamba, M. A., Tangade, S. S., Nawaz, S. S., & Manvi, S. S. (2021). Path Planning Scheme for Collision Avoidance in Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management System. In *2021 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONECCT52877.2021.9622656>
- Li, G., Zuo, H., & Xu, J. (2023). Research on the Influence of UAV Anti-collision Device on Aerodynamic Shape. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2477, No. 1, p. 012096). IOP Publishing. DOI:10.1088/1742-6596/2477/1/012096

- Li, Q., Zhang, D., Wang, H., Liu, K., & Liu, Y. (2022). A design method for the inspection network of over-the-horizon UAV based on 4G/5G communication network. In *2022 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)* (pp. 240-244). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCECE54139.2022.9712840>
- Li, X., Fang, J., Du, K., Mei, K., & Xue, J. (2023). UAV Obstacle Avoidance by Human-in-the-Loop Reinforcement in Arbitrary 3D Environment. *arXiv preprint arXiv:2304.05959*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.05959>
- Lingyun, Z. H. O. U., Xiaotong, Z. H. A. O., Xin, G. U. A. N., Enbin, S. O. N. G., Xin, Z. E. N. G., & Qingjiang, S. H. I. (2022). Robust trajectory planning for UAV communication systems in the presence of jammers. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(10), 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.10.038>
- Liu, X., Liu, Y., & Chen, Y. (2019). Reinforcement learning in multiple-UAV networks: Deployment and movement design. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(8), 8036-8049. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2922849>
- Liu, Z., Di, X., Wang, Q., & Wang, L. (2023). Path planning based on joint distribution of distribution vehicles and UAVs. In *2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)* (pp. 1504-1508). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10176924>
- Lu, W., Mo, Y., Feng, Y., Gao, Y., Zhao, N., Wu, Y., & Nallanathan, A. (2022). Secure transmission for multi-UAV-assisted mobile edge computing based on reinforcement learning. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 10(3), 1270-1282. <https://doi.org/10.1109/TNSE.2022.3185130>
- Luo, B., Wu, Z., Zhou, F., & Wang, B. C. (2023). Human-in-the-Loop Reinforcement Learning in Continuous-Action Space. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2023.3289315>
- Luo, H., Wu, Y., Sun, G., Yu, H., Xu, S., & Guizani, M. (2023). ESCM: An Efficient and Secure Communication Mechanism for UAV Networks. *arXiv preprint arXiv:2304.13244*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.13244>
- Maurya, H. L., Singh, P., Yogi, S., Behera, L., & Verma, N. K. (2022). An Intelligent Game Theory Approach for Collision Avoidance of Multi-UAVs. In *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence: ICCI 2021* (pp. 27-39). Springer Nature Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-2126-1_3
- McTegg, S. J., Tarsha Kurdi, F., Simmons, S., & Gharineiat, Z. (2022). Comparative approach of unmanned aerial vehicle restrictions in controlled airspaces. *Remote Sensing*, 14(4), 822. <https://doi.org/10.3390/rs14040822>
- Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): Practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, 16(1), 109-137. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11370-022-00452-4>
- Newman, M., & Gough, D. (2020). *Systematic reviews in educational research: Methodology, perspectives and application*. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-27602-7_1

- Patrikar, J., Dantas, J., Ghosh, S., Kapoor, P., Higgins, I., Aloor, J. J., Navarro, I., Sun, J., Stoler, B., Hamidi, M., Baijal, R., Moon, B., Oh, J., & Scherer, S. (2022). Challenges in Close-Proximity Safe and Seamless Operation of Manned and Unmanned Aircraft in Shared Airspace. *arXiv preprint arXiv:2211.06932*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.06932>
- Picard, G. (2022). Trajectory Coordination based on Distributed Constraint Optimization Techniques in Unmanned Air Traffic Management. In *21st International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2022)*. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/3535850.3535969>
- Quan, Y., Cheng, N., Wang, X., Shen, J., Ma, L., & Yin, Z. (2023). Interpretable and Secure Trajectory Optimization for UAV-Assisted Communication. In *2023 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.02002>
- Radanovic, M., Omeri, M., & Piera, M. A. (2019). Test analysis of a scalable UAV conflict management framework. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233(16), 6076-6088. <https://doi.org/10.1177/0954410019875241>
- Raju, P., Rios, J., & Jordan, A. (2018). UTM—A complementary set of services to ATM. In *2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS)* (pp. 2F2-1). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2018.8384849>
- Ralegankar, V. K., Bagul, J., Thakkar, B., Gupta, R., Tanwar, S., Sharma, G., & Davidson, I. E. (2021). Quantum cryptography-as-a-service for secure UAV communication: applications, challenges, and case study. *IEEE Access*, 10, 1475-1492. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3138753>
- Rithic, C. H., & Arulmozhi, N. (2023). Real-Time Implementation of RF-based Mobile Fleet Localization and Collision Avoidance System in Wireless Sensor Network for Drones and Gliders. In *2023 7th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)* (pp. 1459-1465). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICCS56967.2023.10142713>
- Saraçyakupoğlu, T., Delibaş, H. D., & Özçelik, A. D. (2022). A Computational Determination of a Nozzle Activated Fixed-Wing UAV. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6(2), 292-306. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1128158>
- Shan, L., Li, H. B., Miura, R., Matsuda, T., & Matsumura, T. (2023). A Novel Collision Avoidance Strategy with D2D Communications for UAV Systems. *Drones*, 7(5), 283. <https://doi.org/10.3390/drones7050283>
- Sharma, S., Kulkarni, P., & Pathak, P. (2022). Applications of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Improved Business Management. In *2022 International Interdisciplinary Humanitarian Conference for Sustainability (IIHC)* (pp. 53-57). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IIHC55949.2022.10060638>
- Shi, H. R., Lu, F. X., Wu, L., & Xia, J. W. (2022). Trajectory Optimization of Multi-UAVs for Marine Target Tracking during Approaching Stage. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5472105>

- Shrestha, R., Kim, D., Choi, J., & Kim, S. (2022). A Novel E/E Architecture for Low Altitude UAVs. In *2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 346-350). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCAS48785.2022.9937942>
- Shrestha, R., Zevenbergen, J., Panday, U. S., Awasthi, B., & Karki, S. (2019). Revisiting the current UAV regulations in Nepal: A step towards the legal dimension for UAVs' efficient application. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 107-114. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-W3-107-2019>
- Sun, J., Zhang, H., Xu, W., Li, H., Zhang, J., Ke, J., & Yan, H. (2021). Improving security performance of dual UAVs system with unknown eavesdropper location. In *Proceedings of the International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation* (pp. 257-258). <https://doi.org/10.1145/3450268.3453509>
- Sun, S., & Dang, S. (2022). Study on collision avoidance strategy of multiple UAVs based on genetic algorithm. In *4th International Conference on Information Science, Electrical, and Automation Engineering (ISEAE 2022)* (Vol. 12257, pp. 303-309). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2639508>
- Sun, Y., Li, L., Zhou, C., Yang, S., Shi, D., & An, H. (2022). Design and Implementation of a Collaborative Air-Ground Unmanned System Path Planning Framework. In *China Intelligent Robotics Annual Conference* (pp. 83-96). Singapore: Springer Nature Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-0301-6_7
- Tang, G., Du, P., Lei, H., Ansari, I. S., & Fu, Y. (2021). Trajectory design and communication resources allocation for wireless powered secure UAV communication systems. *IEEE Systems Journal*, 16(4), 6300-6308. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3132010>
- Taylor, M. E. (2023). Reinforcement Learning Requires Human-in-the-Loop Framing and Approaches. In *HHA1* (pp. 351-360). https://alaworkshop2023.github.io/papers/ALA2023_paper_29.pdf
- Tovarnov, M. S., & Bykov, N. V. (2022). Reinforcement learning reward function in unmanned aerial vehicle control tasks. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2308, No. 1, p. 012004). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2308/1/012004>
- Tuncal, A., & Uslu, S. (2021). Kentsel Hava Hareketliliği Kavramının Gelişiminde İki Önemli Faktör: ATM ve Toplum. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 23(41), 564-577.
- Volkert, A., Hackbarth, H., Lieb, T. J., & Kern, S. (2019). Flight tests of ranges and latencies of a threefold redundant C2 multi-link solution for small drones in VLL airspace. In *2019 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)* (pp. 1-14). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2019.8735265>
- Wang, T., Xiang, S., Men, Z., Ye, M., Zhang, Y., Xie, A., & Zhejiang Lab. (2023). An Emergency Landing Spot Detection Algorithm Based on Semantic Segmentation and Safety Evaluation. Presented at Forum 79. <https://doi.org/10.4050/F-0079-2023-18018>.
- Wang, W., Wei, X., Jia, Y., & Chen, M. (2023). UAV relay network deployment through the area with barriers. *Ad Hoc Networks*, 103222. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103222>

- Wang, Y., Wang, H., Wen, J., Lun, Y., & Wu, J. (2020). Obstacle avoidance of UAV based on neural networks and interfered fluid dynamical system. In *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)* (pp. 1066-1071). <https://doi.org/10.1109/ICUS50048.2020.9274988>
- Wei, S., Li, L., Chen, G., Blasch, E., Chang, K. C., Clemons, T. M., & Pham, K. (2023). ROSIS: Resilience Oriented Security Inspection System against False Data Injection Attacks. In *2023 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-11). IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO55745.2023.10115584>
- Wei, Y., Zhao, M., Zhang, F., & Hu, Y. (2004). Research of a heuristic reward function for reinforcement learning algorithms. In *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation* (IEEE Cat. No. 04EX788) (Vol. 3, pp. 2676-2680). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2004.1342083>
- Wiedemann, M., Vij, A., & Banerjee, R. (2023). Validating the benefits of increased drone uptake for Australia: geographic, demographic and social insights. Department of Infrastructure, Transport, Regional Development, Communications and the Arts (Australia). <https://apo.org.au/node/322458>
- Wijnker, D., van Dijk, T., Snellen, M., de Croon, G., & De Wagter, C. (2019). Hear-and-avoid for UAVs using convolutional neural networks. In *Proceedings of the 11th International Micro Air Vehicle Competition and Conference (IMAV2019)*, Madrid, Spain (Vol. 30). <https://www.imavs.org/papers/2019/19.pdf>
- Wu, J., Yuan, W., & Hanzo, L. (2023). When UAVs Meet ISAC: Real-Time Trajectory Design for Secure Communications. *arXiv preprint arXiv:2306.14140*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.14140>
- Wu, X., Lei, Y., Tong, X., Zhang, Y., Li, H., Qiu, C., Guo, C., Sun, Y., & Lai, G. (2022). A Non-rigid Hierarchical Discrete Grid Structure and its Application to UAVs Conflict Detection and Path Planning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58(6), 5393-5411. <https://doi.org/10.1109/TAES.2022.3170323>
- Wubben, J., Calafate, C. T., Cano, J. C., & Manzoni, P. (2023). FFP: A Force Field Protocol for the tactical management of UAV conflicts. *Ad Hoc Networks*, 140, 103078. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103078>
- Xiang, T., Jiang, F., Hao, Q., & Cong, W. (2016). Adaptive flight control for quadrotor UAVs with dynamic inversion and neural networks. In *2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)* (pp. 174-179). <https://doi.org/10.1109/MFI.2016.7849485>
- Xiao, Q., Zhang, X., Jiang, L., & Wang, M. (2022). Design of Reward Functions Based on The DDQN Algorithm. In *2022 14th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)* (pp. 600-604). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMTMA54903.2022.00125>
- Xie, R., Huang, C., Wang, Z., & Han, J. (2022). A Deep Reinforcement Learning Algorithm Based on Short-Term Advantage for Air Game Decision-Making. In *International Conference on Autonomous Unmanned Systems* (pp. 3884-3894). Singapore: Springer Nature Singapore. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-99-0479-2_359

- Xu, J., Wu, W., & Sun, Y. (2022). Multi-UAVs Trajectory Planning Method with Coordinated Attack Angle-Time Constraints. In *2022 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. <https://doi.org/10.1109/ICUS55513.2022.9987057>
- Xu, Z., Deng, D., Dong, Y., & Shimada, K. (2022). DPMPC-Planner: A real-time UAV trajectory planning framework for complex static environments with dynamic obstacles. In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 250-256). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022.9811886>
- Xue, J., Zhu, J., Du, J., Kang, W., & Xiao, J. (2023). Dynamic Path Planning for Multiple UAVs with Incomplete Information. *Electronics*, 12(4), 980. <https://doi.org/10.3390/electronics12040980>
- Yang, T., De Maio, A., Zheng, J., Su, T., Carotenuto, V., & Aubry, A. (2021). An adaptive radar signal processor for UAVs detection with super-resolution capabilities. *IEEE Sensors Journal*, 21(18), 20778-20787. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3093779>
- Ye, B., Li, J., Li, J., Liu, C., Li, J., & Yang, Y. (2023). Deep reinforcement learning-based diving/pull-out control for bioinspired morphing UAVs. *Unmanned Systems*, 11(02), 191-202. <https://doi.org/10.1142/S2301385023410066>
- Yin, S., & Yu, F. R. (2021). Resource allocation and trajectory design in UAV-aided cellular networks based on multiagent reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(4), 2933-2943. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3094651
- Zhang, D., Li, X., Ren, G., Yao, J., Chen, K., & Li, X. (2023a). Three-Dimensional Path Planning of UAVs in a Complex Dynamic Environment Based on Environment Exploration Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient. *Symmetry*, 15(7), 1371. <https://doi.org/10.3390/sym15071371>
- Zhang, D., Xuan, Z., Zhang, Y., Yao, J., Li, X., & Li, X. (2023b). Path Planning of Unmanned Aerial Vehicle in Complex Environments Based on State-Detection Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient. *Machines*, 11(1), 108. <https://doi.org/10.3390/machines11010108>
- Zhang, S., Li, Y., Ye, F., Geng, X., Zhou, Z., & Shi, T. (2023). A Hybrid Human-in-the-Loop Deep Reinforcement Learning Method for UAV Motion Planning for Long Trajectories with Unpredictable Obstacles. *Drones*, 7(5), 311. <https://doi.org/10.3390/drones7050311>



Bu eser [Creative Commons Atf-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)