

TÜRKİYE

# İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI DERGİSİ

E-ISSN 2687-6094

Turkish Journal of  
Unmanned Aerial Vehicles



Cilt/Volume: 6  
Sayı/Issue: 2  
Aralık/December, 2024





Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi



### Dergi Hakkında

Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi; İHA gelişimi, kullanımı ve yer bilimleri ile ilgili yapılan çalışmaları yayınlayan ve Uluslararası İndeks ve Veri tabanlarında taranan hakemli bir dergidir. Dergi insansız hava aracı (İHA), İnsansız Hava Aracı Sistemleri (İHAS) ve Uzaktan Pilotlu Uçak Sistemleri vb. dahil olmak üzere insansız hava araçlarının tasarımına ve uygulamalarına odaklanmaktadır. Aynı şekilde insansız su / su altı insansız hava araçlarına ve insansız kara araçlarına dayalı katkılar da memnuniyetle karşılanmaktadır.

### Amaç & Kapsam

Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi,

- İnsansız Hava Araçlarının kullanımı alanında ulusal ve uluslararası gelişmeleri Harita, Jeoloji, Çevre, Maden, Şehir Plancılığı, Ziraat vb. mühendislik alanı, Arkeoloji ve mimarlık ile ilgilenen bilim insanlarının bilgisine sunmak,
- Konu ile doğrudan veya dolaylı etkinliklerde bulunan bilim insanları, araştırmacılar, mühendisler ve diğer uygulayıcılar arasındaki bilgi ve deneyim paylaşımını güçlendirecek ve hızlandıracak, kolay erişilebilen, geniş katımlı bir tartışma ortamı sağlamak ve bunları yayma olanağı yaratmak,
- Türkiye'nin teknolojik ve ekonomik kalkınmasında rol oynayabilecek mesleki gelişmelere ilişkin sorunların daha etkin bir şekilde çözüme kavuşturulması açısından büyük önem taşıyan kurumlar arası iş birliğinin başlatılmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunmak,
- Türkçe'nin İnsansız Hava araçları alanında bilim dili olarak geliştirilmesini ve yabancı sözcüklerden arındırılmasını özendirmek amaçlarına sahiptir.

Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisinin kapsamı;

- ✓ İHA Tarihçe, Dünyada ve Türkiye'deki Yasal ve Hukuki Durumu
- ✓ İHA Üretimi ve İhracatı
- ✓ Askeri alanlarda İHA kullanımı (Hava-Deniz-Kara Kuvvetleri)
- ✓ Konvansiyonel (Geleneksel) ve Modern Savaşlarda İHA kullanımı
- ✓ İHA Tehditleri ve Güvenlik Yönetimi
- ✓ İHA Sensörleri
- ✓ İHA ile Artırılmış Gerçeklik ve Sanal Gerçeklik Uygulamaları
- ✓ Temel İHA Uygulamaları,
- ✓ İHA ile Yangın İzleme
- ✓ İHA ile Belgeleme Çalışmaları
- ✓ İHA Fotogrametrisi ve İHA ile Uzaktan Algılama,
- ✓ İHA LiDAR ve Uygulamaları,
- ✓ İHA ile Ormancılık Uygulamaları,
- ✓ İHA ile Karayolu Projeleri,
- ✓ İHA ile Coğrafi Bilgi Sistemleri Uygulamaları,
- ✓ İHA ile Endüstriyel Ölçmeler,
- ✓ İHA ile Deformasyon ve Heyelan Ölçmeleri,
- ✓ İHA ile Madencilik Ölçmeleri,
- ✓ İHA ile Şehircilik ve Ulaşım Planları Çalışmaları,
- ✓ İHA ile Hassas Tarım Uygulamaları,
- ✓ İHA ile yapılan tüm multidisipliner çalışmalar,

### Yayınlanma Sıklığı

Yılda 2 sayı (Haziran-Aralık)

### ISSN

2687-6094

### WEB

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

### İletişim

[tiha@mersin.edu.tr](mailto:tiha@mersin.edu.tr) / [aliulvi@mersin.edu.tr](mailto:aliulvi@mersin.edu.tr) / [aulvi78@gmail.com](mailto:aulvi78@gmail.com)



### **About Journal**

The Journal of Turkish Unmanned Aerial Vehicles is a peer-reviewed journal that publishes studies on UAV development, use, and earth sciences and is scanned in International Indexes and Databases. The journal unmanned aerial vehicle (UAV), Unmanned Aerial Vehicle Systems (UAS), and Remote Piloted Aircraft Systems (RPAS), etc. focuses on the design and applications of unmanned aerial vehicles, including. Likewise, contributions based on unmanned water/underwater drones and unmanned ground vehicles are also welcomed.

### **Aim & Scope**

Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles,

- ✚ To inform present to people about the use and developments of UAVs in the fields of Geomatics, Civil, Geology, Environment, Mining, Urban Planning, Agriculture, Archeology and Architecture,
- ✚ To provide an easily accessible and wide-ranging discussion environment that will strengthen and accelerate the sharing of knowledge and experience between scientists, researchers, engineers, and other practitioners who are involved in direct or indirect activities with the following topics.
- ✚ To contribute to the initiation and development of inter-institutional cooperation, which is of great importance in terms of solving the problems related to professional developments that can play a role in technological and economic development in the world and Turkey

The scope of Turkey Unmanned Aerial Vehicles Journal;

- ✓ UAV History, Legal and Legal Status in the World and Turkey
- ✓ UAV Production and Exportation
- ✓ UAV use in military areas (Air-Navy-Army Forces)
- ✓ Use of UAVs in Conventional (Traditional) and Modern Wars
- ✓ UAV Threats and Security Management
- ✓ UAV Sensors
- ✓ Augmented Reality and Virtual Reality Applications with UAV
- ✓ Basic UAV Applications,
- ✓ Fire Monitoring with UAV
- ✓ Documentation Studies with UAV
- ✓ UAV Photogrammetry and Remote Sensing with UAV,
- ✓ UAV LiDAR and Applications,
- ✓ Forestry Applications with UAV,
- ✓ Highway Projects with UAV,
- ✓ Geographical Information Systems Applications with UAV,
- ✓ Industrial Measurements with UAV,
- ✓ Deformation and Landslide Measurements with UAV,
- ✓ Mining Measurements with UAV,
- ✓ Urban Planning and Transportation Planning Studies with UAV,
- ✓ Precision Agriculture Practices with UAV,
- ✓ All multidisciplinary studies with UAV,

### **Publication frequency**

Biannual (June-December)

### **ISSN**

2687-6094

### **WEB**

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

### **Contact**

[tiha@mersin.edu.tr](mailto:tiha@mersin.edu.tr) / [ayasinyigit@mersin.edu.tr](mailto:ayasinyigit@mersin.edu.tr) / [aulvi78@gmail.com](mailto:aulvi78@gmail.com)



Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles

#### EDİTÖR / EDITOR

**Doç. Dr. Ali ULVİ**

Mersin University, Institute of Science and Technology / Remote Sensing and Geographic Information Systems  
Mersin

#### EDİTÖR YARDIMCILARI / CO-EDITOR

**Dr. Öğr. Üyesi Fatih VAROL**

Selçuk University, Konya/Turkey

#### EDİTÖR KURULU / EDITORIAL BOARD

- **Prof. Dr. Murat YAKAR**, Mersin University  
[myakar@mersin.edu.tr](mailto:myakar@mersin.edu.tr)
- **Prof. Dr. Hacı Murat YILMAZ**, Aksaray University  
[hmuraty@gmail.com](mailto:hmuraty@gmail.com)
- **Prof. Dr. Ömer MUTLUOĞLU**, Konya Technical University  
[omutluoglu@ktu.edu.tr](mailto:omutluoglu@ktu.edu.tr)
- **Prof. Dr. Murat UYSAL**, Afyon Kocatepe University  
[muysal@aku.edu.tr](mailto:muysal@aku.edu.tr)
- **Prof. Dr. Khalil Valizadeh KAMRAN**, University of Tabriz, Faculty of Planning and Environmental Sciences, Department of Remote Sensing and GIS, Tabriz, Iran  
[valizadeh@tabrizu.ac.ir](mailto:valizadeh@tabrizu.ac.ir)
- **Assoc. Prof. Dr. Hayri ULVİ**, Gazi University  
[hayriulvi@gmail.com](mailto:hayriulvi@gmail.com)
- **Assoc. Prof. Dr. Alper AKAR**, Erzincan Binali Yıldırım University,  
[alperakar@erzincan.edu.tr](mailto:alperakar@erzincan.edu.tr)
- **Assoc. Prof. Dr. Özlem AKAR**, Erzincan Binali Yıldırım University  
[oakar@erzincan.edu.tr](mailto:oakar@erzincan.edu.tr)
- **Dr. Nizar POLAT**, Harran University  
[nizarpolat@harran.edu.tr](mailto:nizarpolat@harran.edu.tr)
- **Dr. Atta-ur RAHMAN**, Department of Geography and Geomatics, University of Peshawar-Pakistan  
[atta-urrehman@uop.edu.pk](mailto:atta-urrehman@uop.edu.pk)

#### DANIŞMA KURULU / ADVISORY BOARD

- **Prof. Dr. İbrahim YILMAZ**,  
[iyilmaz@aku.edu.tr](mailto:iyilmaz@aku.edu.tr),  
Afyon Kocatepe University
- **Assoc. Prof. Dr. Ferruh YILMAZTÜRK**,  
[yilmazturk@aksaray.edu.tr](mailto:yilmazturk@aksaray.edu.tr),  
Aksaray University
- **Dr. Mehmet Ali DERELİ**,  
[madereli@gmail.com](mailto:madereli@gmail.com)  
Giresun University
- **Dr. Resul ÇÖMERT**,  
[rcomert@gumushane.edu.tr](mailto:rcomert@gumushane.edu.tr),  
Gümüşhane University

#### TİHA Dergisi Dil Editörleri / TUAV Journal Language Editors

**Assist. Prof. Dr. Savaş ŞAHİN**, Akdeniz University  
[savassahin@akdeniz.edu.tr](mailto:savassahin@akdeniz.edu.tr)

#### Mizanpaj

**Doç. Dr. Ali ULVİ**, Mersin University  
[aliulvi@mersin.edu.tr](mailto:aliulvi@mersin.edu.tr)

# İçindekiler

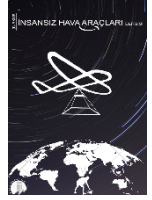
## Contents

### Araştırma Makaleleri; Research Articles\*;


Sayfa/Page No	Makale Adı ve Yazar Adı Article Name and Author Name
42 - 55*	<i>Operational Challenges and Prioritization of Potential Solutions for Integrating Vertiports into Airports</i> <i>Havalimanlarına Vertiportların Entegrasyonundaki Operasyonel Zorluklar ve Potansiyel Çözümlerin Önceliklendirilmesi</i> <b>Arif Tuncal</b>
56 - 62*	<i>İHA'ların Batarya Seviyelerinin Makine Öğrenmesi ile Tahmini</i> <i>Estimate The Battery Levels of UAVs Using Machine Learning</i> <b>Gürkan Kutlu &amp; Erdiç Avaroğlu</b>
63 - 71*	<i>İnsansız Hava Aracı Kullanarak Toprak Neminin Mısır Tarlası Örneğinde Haritalanması</i> <i>Mapping of Soil Moisture Using an Unmanned Aerial Vehicle in a Maize Field</i> <b>Fizyon Sönmez Erdoğan &amp; Mehmet Akif Erdoğan</b>
72 - 80*	<i>İnsansız Hava Araçlarında Titreşimlerin Rolü, Verimlilik Ölçüm Teknikleri ve Performans Etkileri</i> <i>Role of Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles, Efficiency Measurement Techniques, and Performance Impacts</i> <b>Ece Kalay &amp; İskender Özkul</b>

### Derleme Makaleleri; Review Articles\*\*;

S. No	Makale Adı (En./Tr.) ve Yazar Adı
81 - 90**	<i>Biyolojik Bozguna Yeni Bir Tedbir: Yapay Zekâ Destekli İnsansız Hava Araçları</i> <i>A New Measure Against Biological Defeat: Artificial Intelligence Supported UAV</i> <b>Mutlu Can Soydan</b>



## Operational Challenges and Prioritization of Potential Solutions for Integrating Vertiports into Airports

Arif Tuncal <sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> International Science and Technology University, Department of Aviation Systems and Technologies, 02-264, Warsaw, Poland;  
(arif.tuncal@istu.edu.pl; atuncal@gmail.com)



\* Corresponding Author:  
arif.tuncal@istu.edu.pl

### Research Article

**Citation:** Tuncal, A. (2024). Operational Challenges and Prioritization of Potential Solutions for Integrating Vertiports into Airports. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 42-55.

Received : 28.06.2024  
Revised : 14.08.2024  
Accepted : 03.10.2024  
Published : 31.12.2024

### Abstract

The integration of vertiports into airports for eVTOL/UAV flights poses operational challenges. The aim of the study was to propose and prioritize solutions to overcome these challenges. A comprehensive literature review identified remote vertiport networks, geofencing technology, dedicated airspace corridors, advanced collision avoidance systems and dynamic airspace management as potential solutions. These solutions were prioritized using the Analytic Hierarchy Process (AHP) based on criteria such as safety, cost, efficiency, feasibility, and sustainability. Dynamic airspace management (=0.396) was the highest priority, followed by remote vertiport networks (=0.385), dedicated airspace corridors (=0.273), geofencing technology (=0.205), and advanced collision avoidance systems (=0.137). The study highlights the importance of dynamic data sharing and real-time planning through integrated ATM/UTM systems, enhanced by AI technologies, to ensure safety and efficiency. In addition, the development of remote vertiport networks and dedicated airspace corridors is essential to manage growing air traffic and ensure the safe coexistence of eVTOL/UAVs and traditional aircraft. Geofencing technology and advanced collision avoidance systems are also essential to maintain safety and operational integrity. It is recommended that future studies focus on the integration of ATM/UTM and the application of artificial intelligence. Continued collaboration between UAM stakeholders is essential to develop effective integration strategies.

**Keywords:** Airport, electric vertical take-off and landing, unmanned aerial vehicle, unmanned traffic management, urban air mobility, vertiport.

## Havalimanlarına Vertiportların Entegrasyonundaki Operasyonel Zorluklar ve Potansiyel Çözümlerin Önceliklendirilmesi

\* Sorumlu Yazar:  
arif.tuncal@istu.edu.pl

### Araştırma Makalesi

**Alıntı:** Tuncal, A. (2024). Havalimanlarına Vertiportların Entegrasyonundaki Operasyonel Zorluklar ve Potansiyel Çözümlerin Önceliklendirilmesi. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 42-55. (in English)

Geliş : 28.06.2024  
Revizyon : 14.08.2024  
Kabul : 03.10.2024  
Yayınlama : 31.12.2024

### Özet

Vertiportların eVTOL/UAV uçuşları için havalimanlarına entegrasyonu fırsatlarla beraber operasyonel zorlukları da beraberinde getirmektedir. Bu çalışmanın amacı, bu zorlukların üstesinden gelmek için çözümler önermek ve bu çözümleri önceliklendirmektir. Kapsamlı bir literatür taraması sonucunda havalimanı civarında vertiport ağları, coğrafi sınır belirleme teknolojisi, ayrılmış hava sahası koridorları, ileri çarpışma önleme sistemleri ve dinamik hava sahası yönetimi gibi potansiyel çözümler belirlenmiştir. Bu çözümler emniyet, maliyet, verimlilik, uygulanabilirlik ve sürdürülebilirlik kriterlerine dayalı olarak Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanılarak önceliklendirilmiştir. Dinamik hava sahası yönetimi (=0.396) en yüksek önceliğe sahipken, bunu sırasıyla havalimanı civarına konumlandırılan vertiport ağları (=0.385), ayrılmış hava sahası koridorları (=0.273), coğrafi sınır belirleme teknolojisi (=0.205) ve ileri çarpışma önleme sistemleri (=0.137) takip etmiştir. Çalışma uçuş emniyeti ve verimliliği sağlamak için entegre ATM/UTM sistemleri aracılığıyla dinamik veri paylaşımı ve gerçek zamanlı planlamanın, yapay zeka teknolojileriyle desteklenmesinin önemini vurgulamaktadır. Ayrıca artan hava trafiğini yönetmek için eVTOL/UAV'ların geleneksel hava araçlarıyla emniyetli bir şekilde bir arada bulunmasını sağlamak için havalimanı civarına konumlandırılan vertiport ağlarının ve ayrılmış hava sahası koridorlarının geliştirilmesi gereklidir. Coğrafi sınır belirleme teknolojisi ve ileri çarpışma önleme sistemleri de operasyonel bütünlüğü sürdürmek için önemlidir. Gelecek çalışmaların ATM/UTM entegrasyonuna ve bu entegrasyonda yapay zekanın uygulanmasına odaklanması önerilmektedir. UAM paydaşları arasındaki sürekli iş birliği, etkili entegrasyon stratejileri geliştirme sürecine fayda sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Havalimanı, elektrikli dikey kalkış ve iniş hava aracı, insansız hava aracı, insansız hava araçları trafik yönetimi, kentsel hava hareketliliği, vertiport.

## 1. Introduction

Urbanization leads to an increase in the volume of traffic in cities, resulting in traffic congestion. Congestion causes delays, inconvenience, economic loss and air pollution (Afrin & Yodo, 2020; Jain et al., 2018). These negative effects are particularly pronounced for transport between airports and city centers, which are often located far from city centers and are often chosen for their short travel times. The provision of efficient and modern transport services between cities and airports is therefore of paramount importance (Caulfield et al., 2013).

The development of Urban Air Mobility (UAM) technologies may offer a potential solution to the challenge of providing efficient and modern transport services between cities and airports. The current period is one of great excitement for those involved in the development of UAM, as it represents a significant opportunity to fundamentally change the paradigm of urban transport (Cizrelioğulları et al., 2022; Gillis et al., 2021; Tuncal & Uslu, 2021). Defined as intra-city air mobility, UAM encompasses Electric Vertical Take-Off and Landing (eVTOL) vehicles, including Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). eVTOLs/UAVs have the potential to radically change urban transport infrastructure in the near future. It is expected that in the near future (Ackerman et al., 2021; Clarke et al., 2019; Lombaerts et al., 2020; McQueen, 2021; Qu et al., 2023). The benefits of eVTOLs/UAVs include reduced noise and emissions, increased safety, and vertical take-off and landing capabilities. eVTOLs/UAVs represent a promising solution to the urban transport challenge, providing a faster, more efficient and environmentally friendly way to travel point-to-point, offering an alternative to traditional ground transport (Eissfeldt, 2020; Guida et al., 2023; Kleinbekman et al., 2018; Mudumba et al., 2021; Raigoza et al., 2022; Rothfeld et al., 2021; Yang et al., 2020).

Traffic congestion between airports and cities is becoming increasingly problematic, making it difficult for travelers to reach their destinations. In response to this challenge, the concept of UAM is emerging as a promising solution. The proposal is to build dedicated landing infrastructure, called "vertiports", directly at airports. This initiative aims to integrate eVTOLs/UAVs into the broader framework of urban transport. Vertiports are designed to facilitate the functionality of eVTOLs/UAVs, serving both passenger and cargo operations within urban and suburban landscapes (Thu et al., 2022; Zelinski, 2020). The planned and effective integration of vertiports into airports plays a critical role in maximizing the potential of UAM (Park et al., 2020). However, in order to ensure the successful and sustainable implementation of

vertiports at airports, it is essential that factors such as space constraints, operational requirements and safety concerns are considered. The growing demand for air travel is driving the continuous upgrading of airport infrastructure, which is becoming increasingly complex (Abeyratne & Abeyratne, 2014; Zanin & Lillo, 2013). Similarly, increased traffic volume leads to more complex operations (Cheng, 2004; Sridhar et al., 2008; Tomaszewska et al., 2018; Xie et al., 2004; Zhang, 2019). In order to prevent any accidents or incidents, all safety concerns are given the highest priority at airports (Chang et al., 2015; Janic, 2000; Koscak et al., 2019).

The evolution of the UAM concept is leading to the emergence of vertiport implementations at airports. Airport vertiport operations allow eVTOLs/UAVs to operate independently of aircraft traffic and existing airport operations. Such operations can use either existing airport infrastructure or dedicated vertiport facilities. It may be necessary to construct separate vertiport facilities and implement special approach and departure procedures in the event that air traffic volumes affect operations (Michael & Meyers, 2022). The first vertiport passenger terminal in Europe was unveiled at Pontoise-Cormeilles airport in France, providing a complete passenger experience for future eVTOL/UAV operations. A vertiport has also been built at Rome's Fiumicino airport following a successful test flight, paving the way for the introduction of UAM services by 2024 (Volocopter, 2022). In the meantime, São Paulo Airport is developing plans to construct a vertiport hub, with the objective of connecting Guarulhos to other areas where eVTOLs/UAVs are in operation, by 2026 (Future Travel Experience, 2022). Furthermore, a passenger terminal testbed has been unveiled at Pontoise-Cormeilles airfield in France, offering a comprehensive passenger experience for prospective eVTOL/UAV operations (Groupe ADP, n.d.). In addition to these existing projects, the planned vertiport hub development at Al Maktoum Airport in Dubai is anticipated to commence commercial operations by the targeted timeframe of 2025-2026 (Vitale, 2023).

A review of the literature on vertiport studies revealed that the majority of research has focused on the design aspects (Peng et al., 2022; Preis, 2021; Preis, 2023; Taylor et al., 2020; Yedavalli, 2021; Zelinski, 2020), operations (Ellis et al., 2023; Preis & Hornung, 2022; Schweiger & Preis, 2022; Song et al., 2021) and capacity (Brunelli et al., 2023; Preis & Vazquez, 2022; Rimjha & Trani, 2021; Unverricht et al., 2024; Vascik & Hansman, 2019). A recent study has been conducted to develop an analytical model for eVTOL/UAV as air taxi operations and their capacity impact on airports (Ahrenhold et al., 2021). However, there appears to be a noticeable gap in the literature concerning the

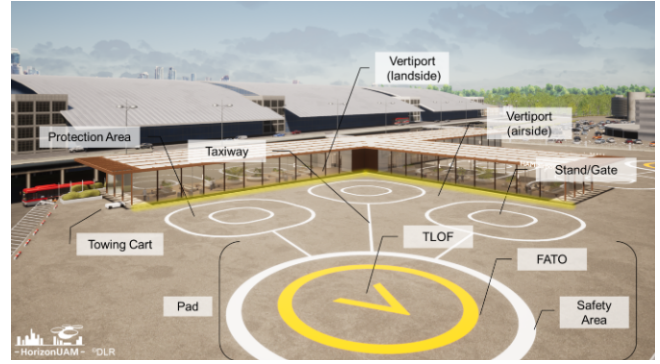
integration of vertiports into airports. Addressing this critical gap is essential for the successful implementation of UAM.

The aim of the study is to propose solutions to overcome the challenges associated with the integration of vertiports into airports and to prioritize these solutions using the Analytic Hierarchy Process (AHP). This study is important because it serves as a valuable resource for policy makers, airport operators, air navigation service providers, Unmanned Traffic Management (UTM) service providers and other stakeholders involved in the development of vertiport infrastructure. It also helps to identify key research gaps that need to be filled to ensure the safe and efficient integration of vertiports into airports.

The study acknowledges a number of limitations. These include difficulties in keeping data up to date due to rapid advances in eVTOL/UAV technologies, potential limitations in scope due to regulatory issues and differences in infrastructure, and reliance on existing research without introducing new findings. Despite these limitations, the study remains significant in providing a thorough overview of the challenges and prioritizing solutions associated with integrating vertiports into airports. This research will help shape policies and regulations to ensure the safe and efficient integration of vertiport infrastructure into the aviation system. The study first examined the topology of vertiports and then detailed the challenges and proposed solutions for integrating vertiports into airports based on existing literature.

## 2. Vertiport Topology

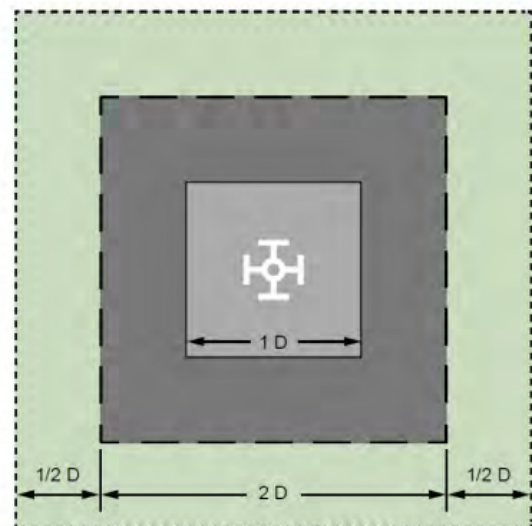
A vertiport is comprised of a series of essential and optional components, each of which contributes to the overall functionality and safety of the facility. The fundamental building blocks, illustrated in Figure 1, include one or more Final Approach and Take-off (FATO) areas, which serve as designated zones for the critical phases of flight operations. Additionally, vertiports comprise one or more Touchdown and Lift-off (TLOF) areas, which provide the specific locations for eVTOLs/UAVs to land and take-off. Protection areas are of great importance in ensuring the safety and security of both aircraft and personnel. They serve to mitigate potential hazards. Furthermore, taxiways and/or taxi-routes are established to facilitate the movement of aircraft within the vertiport, ensuring efficient ground operations. Finally, stands are designated spots where aircraft can be parked, serviced, or boarded, enhancing the operational capacity of the vertiport (Australia CASA, 2023).



**Figure 1.** Vertiport topology terms used in the context of UAM (Schweiger & Preis, 2022).

### 2.1. Final Approach and Take-off (FATO)

The FATO area represents a fundamental component of vertiports designed for UAM. It serves to facilitate aircraft operations, and each vertiport must be equipped with at least one FATO (Ahn & Hwang, 2022). This area is a designated flat zone that has been specifically designed to facilitate safe and precise maneuvers for eVTOLs/UAVs. It plays a crucial role in ensuring the safety and efficiency of autonomous on-demand flight operations (Yang & Wei, 2021). The FATO may be located at ground level, on elevated structures, or at roof-top level. The TLOF, depicted in Figure 2, is situated at the center of the FATO. It is surrounded by the safety area. It is recommended that the FATO and the safety area share the same shape as the TLOF, which may be circular, square or rectangular (Michael & Meyers, 2022).



**Figure 2.** FATO, TLOF, and safety area (Michael & Meyers, 2022).



## 2.2. Touchdown and Lift-off Area (TLOF)

A vertiport necessitates the presence of a TLOF in all instances where an aircraft is anticipated to touch down or take-off within the confines of a FATO or stand. The location, dimensions and construction of TLOFs are of great importance for the safety of operations. It should be capable of accommodating the largest eVTOL/UAV intended for service, ensuring sufficient friction, an obstacle-free surface, resistance to downwash and outwash effects, and effective drainage. Whether situated within the FATO or co-located with eVTOL/UAV stands, the TLOF must be able to bear the appropriate load, be centered accordingly, and maintain slopes not exceeding 2 percent to prevent water accumulation and ensure safe aircraft maneuvering (Australia CASA, 2023).

## 2.3. Gates/ Stands

Gates are an essential component of vertiports, providing a safe and efficient way for eVTOLs/UAV to load and unload passengers and cargo. Gates are typically located at the edge of the vertiport's TLOF or FATO, and they provide a designated area for passengers and cargo to board and disembark from aircraft (Ahn & Hwang, 2022).

Gates are designed to accommodate the specific needs of the eVTOLs/UAVs that operate at the vertiport. The size of the gate must be large enough to accommodate the aircraft's wingspan and tail rotor, and the gate must be able to support the weight of the aircraft. Furthermore, gates must be equipped with charging facilities. These positions represent critical resources that influence the capacity of vertiports and their ability to accommodate the fleet of eVTOLs/UAVs (Jin et al., 2024).

## 2.4. Taxiways

Taxiways constitute another essential component of vertiports, providing a safe and efficient means for eVTOLs/UAVs to navigate within the vertiport. They typically consist of paved surfaces linking gates, FATOs, and other areas. Taxiways are tailored to meet the specific operational requirements of eVTOLs/UAVs at the vertiport. The width of the taxiway should be sufficient to accommodate the wingspan of the aircraft, while also supporting its weight (Scott, 2022; Zhang et al., 2022).

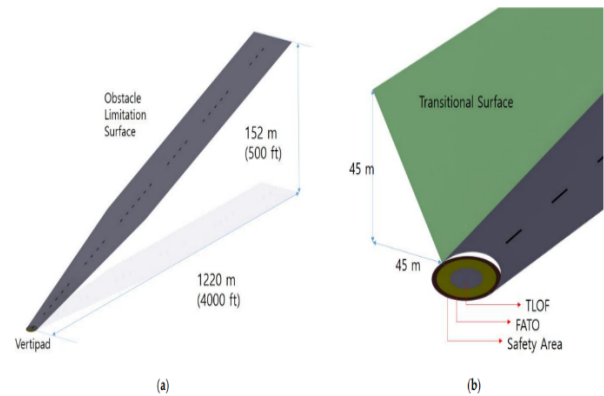
## 2.5. Vertiports Surfaces

The final approach and take-off for eVTOL/UAV is of critical importance, as accurate location information

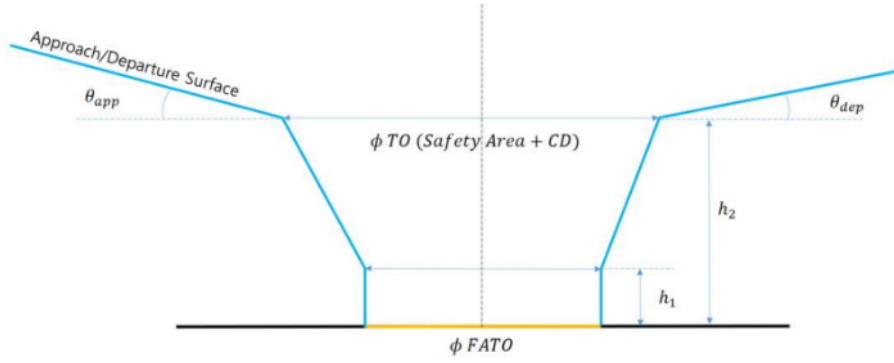
and vertical height guidance are essential for the creation of a secure operational environment (Pradeep & Wei, 2018; Ye et al., 2020). The approach/departure surface is centered on each approach/departure path for aircraft and begins at the edge of the FATO area. The slope of the runway is 8:1 (horizontal to vertical) and extends horizontally for 4.000 feet (1.220 meters) from the starting point. At the conclusion of this distance, the surface attains a width of 500 feet (152 meters) and an elevation of 500 feet (152 meters) above the vertiport. Transitional surfaces are situated in an outward and upward direction from the lateral boundaries of the primary surface and approach surfaces. These surfaces have a slope ratio of 2:1 (horizontal to vertical) and extend horizontally for 250 feet (76 meters) from the centerline of the primary and approach surfaces (Michael & Meyers, 2022).

In order to ensure the safety of aircraft operations, it is imperative that the area under the approach/departure surface is free of penetrations and obstructions. In the case of TLOFs that are designed to accommodate multi-directional operations, a minimum separation of 135 degrees is required between two surfaces. A separation distance of 60 meters between two FATOs is proposed as a reference for simultaneous helicopter operations where the maximum take-off weight does not exceed 3175 kg (European Union Safety Agency, 2022).

Figure 3(a) depicts the approach/departure surface with an 8:1 slope extending 1220 meters from the FATO, with a width of 152 meters at a height of 152 meters. Figure 3(b) illustrates the transitional surface extending outward and upward with a 2:1 slope from the lateral boundaries of the approach surface. Figure 4 depicts the dimensions of an omnidirectional obstacle-free volume, including angles and heights associated with the approach/departure and transitional surfaces.



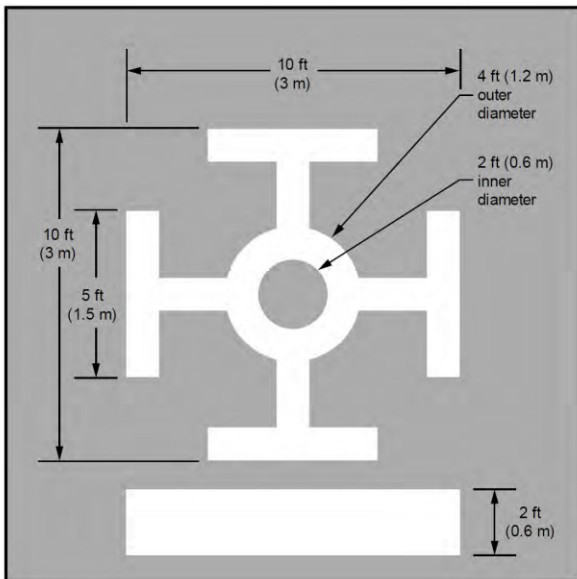
**Figure 3.** Approach/departure surface and transitional surface with a 1:8 slope: (a) approach/ departure surface; (b) transitional surface (Ahn & Hwang, 2022).



**Figure 4.** Dimensions of an omnidirectional obstacle-free volume (Ahn & Hwang, 2022).

## 2.6. Marking and Lighting

The alignment markings and lighting of flight paths are regarded as optional elements in vertiports, providing visual guidance for pilots when necessary. The vertiport identification marking serves to indicate the location of the vertiport and to highlight the TLOF, as depicted in Figure 5. Lighting is a vital component for night-time operations, assisting pilots in locating the vertiport and outlining its operational area. Wind cones play a pivotal role in indicating wind direction and magnitude. For night-time operations at vertiports, an identification beacon is a mandatory requirement; however, this requirement does not apply to vertiports located at airports (Michael & Meyers, 2022).



**Figure 5.** Vertiport identification symbol (Michael & Meyers, 2022).

## 3. Challenges to The Operational Demands of Integrating Vertiports into Existing Airports

The field of UAM is undergoing rapid development, with the potential to revolutionize urban transportation. The concept of eVTOLs/UAVs has the

capacity to transform intra-city transportation. The development of a robust network of vertiports, or specific infrastructure hubs that support eVTOL/UAV operations, is essential for the realization of UAM (Daskilewicz et al., 2018; Peng et al., 2022; Wang et al., 2022; Willey & Salmon, 2021; Wu & Zhang, 2021; Yedavalli & Cohen, 2022; Zelinski, 2020). However, integrating these hubs into existing airport ecosystems poses a complex challenge, requiring a balance between operational demands and spatial constraints (Dulchinos et al., 2022).

The main difficulty is finding space for vertiports in airports. Airports are confronted with significant challenges, including limited space and incompatible land use, which impede the ability to expand in a manner that meets the growing demand for efficient, effective, and safe operations among existing taxiways, runways, and supporting infrastructure (Forsyth, 2007; Gelhausen et al., 2013; Janic, 2016). In order to achieve a balance between optimizing operational efficiency and minimizing the enlargement of the area in question, a sophisticated approach to integration is required. Failure to achieve this situation risks jeopardizing the smooth flow of existing airport operations and compromising safety.

Another significant challenge is ensuring the safety of both traditional aircraft and eVTOL/UAV. The location of vertiports must be carefully considered to reduce the risk of collisions in the constantly changing and frequently congested airspace around airports (Schweiger & Preis, 2022). Achieving a harmonious balance between the unique operational needs of eVTOLs/UAVs and the established air traffic patterns of traditional aircraft is essential for upholding the integrity of the airspace and safety. The high volume of airport operations, coupled with the low-altitude nature of vertiport flights, creates a heightened risk of collision within the airport environment (Pothana et al., 2023). This is especially concerning for vertiports located in close proximity to runways, as the potential for conflict between vertiport and traditional aircraft is significantly increased.

#### 4. Solutions to Challenges in Integrating Vertiports into Existing Airport

The preceding discussion highlighted the intricate difficulties associated with integrating vertiports into the existing airport environments. While operational demands and constraints present significant challenges, the transformative potential of UAM necessitates a proactive approach to addressing them. This section examines potential solutions and strategies for navigating these challenges, paving the way for a seamless and successful integration of vertiports into the airport.

##### 4.1. Remote Vertiport Networks

The establishment of dedicated vertiport hubs outside the immediate airport vicinity presents a promising solution to mitigate congestion and enhance accessibility for both passengers and cargo (Peksa et al., 2023). Strategically positioned near major transportation hubs or densely populated areas, these vertiports could serve as critical nodes within the broader transportation network (Kim et al., 2023). By connecting to airports via high-speed transit links, these remote vertiports would significantly reduce the pressure on central airport infrastructure. This connectivity ensures that travelers have various transportation options to reach these remote vertiports from any point within the transportation network. Particularly in metropolitan areas plagued by congested traffic, these remote vertiports provide a rapid and efficient alternative for reaching airports, bypassing the challenges of urban traffic congestion. This accessibility feature not only enhances the overall efficiency of transportation but also provides travelers with greater flexibility and convenience in reaching their destinations.

##### 4.2. Geofencing Technology

Establishing dynamic buffer zones through the application of geofencing technology presents a promising solution to potential conflicts with existing infrastructure, particularly in the vicinity of airports and vertiports. Geofencing technology involves the creation of virtual boundaries within specific geographical areas to effectively manage and regulate the navigation of autonomous eVTOLs/UAVs (Hosseinzadeh, 2021; Stevens & Atkins, 2020; Yılmaz, & Ulvi, 2022). This approach serves as a secure alternative to detect-and-avoid mechanisms, redirecting autonomous eVTOLs/UAVs upon approaching predefined altitude or lateral boundaries (Stevens et al., 2015). The adaptable perimeters

surrounding vertiports and runways can dynamically adjust their size and configuration in response to real-time air traffic conditions. This capability ensures the secure separation of vertiport operations from conventional aircraft movements, thereby minimizing the risk of mid-air collisions.

##### 4.3. Dedicated Airspace Corridors

Integrating eVTOLs/UAVs into existing airspace requires creating dedicated airspace corridors, which is essential for their safe and efficient operation (Al-Rubaye et al., 2023). Aviation stakeholders, including airport authorities, air traffic control, and regulatory bodies, need to work together to define specific routes for eVTOLs/UAVs. This approach reduces conflicts with traditional aircraft and other eVTOLs/UAVs by keeping their traffic separate, which improves safety and efficiency (Pradeep, 2019). Dedicated corridors help manage eVTOL/UAV traffic better and support the integration of advanced Air Traffic Management (ATM) systems, strengthening the UAM framework.

##### 4.4. Advanced Collision Avoidance Systems

Airborne collision avoidance systems are crucial onboard safety tools designed to prevent aircraft from colliding, especially when air traffic control systems fail. These systems work best at lower altitudes (Smith et al., 2020). Specifically, an algorithm for low-altitude collision avoidance helps keep small aircraft safe when flying close to the ground (Lin & Wu, 2011). With the rise in air traffic and the added pressure from eVTOLs/UAVs at airports, these systems are more important than ever. As air traffic becomes more complex with the addition of eVTOL/UAV, new collision avoidance systems need to be developed. These advanced systems must be designed to handle the unique flying patterns of eVTOL/UAV, which often operate in crowded urban areas and near airports. By using these next-generation collision avoidance technologies, we can greatly enhance safety and reduce the risk of mid-air collisions in busy airspace (Sanches et al., 2020). Implementing advanced collision avoidance systems for eVTOL/UAV is essential (Alturbeh & Whidborne, 2020; Panchal et al., 2023). These systems will help manage the increased traffic and ensure safe and efficient airspace operations.

##### 4.5. Dynamic Airspace Management

Dynamic airspace management is essential for optimizing the increasingly complex dynamics of eVTOL/UAV operations in airports. One notable strategy, Collaborative Decision-Making (CDM), has

been demonstrated to generate substantial benefits for all stakeholders involved in airport operations (Auerbach & Koch, 2007). This methodology enhances the efficiency of air traffic flow management, resulting in more effective sequencing of take-offs and landings (Almeida et al., 2016). Furthermore, CDM plays a pivotal role in increasing both airfield and airspace capacity, optimizing the use of resources, and refining overall ATM strategies (Nikulin, 2018).

The integration of eVTOL/UAV into airport operations necessitates a robust framework of collaborative decision-making among airport authorities, UAM operators, and air traffic control bodies. This collaborative framework is crucial for developing and implementing effective and efficient ATM strategies (Shmelova et al., 2021). Enhancing this process involves leveraging advanced information and communication technologies to eliminate communication barriers, effectively elicit and represent knowledge, and automate decision-making processes (Karacapilidis, 2000). Moreover, the adoption of these technologies facilitates real-time data sharing and dynamic adaptation to changing conditions, further improving coordination and decision-making.

Incorporating real-time data, a dynamic air management model addresses challenges at congested airports, reconciling flight demand with limited airspace while optimizing capacity and minimizing delays (Cheng et al., 2010; Lanshou & Fuqing, 2010), including those potentially associated with vertiport operations. At the core of this concept lies the ability to reconfigure airspace boundaries and dedicated corridors based on live traffic conditions. Flexible, data-driven systems can be employed to dynamically adjust airspace sectors, accommodating fluctuations in traffic density and optimizing flight paths for airport aircraft (Gerdes et al., 2018).

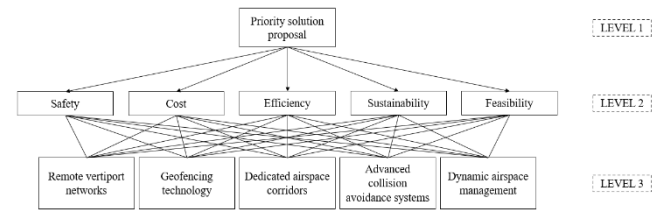
## 5. Methodology

Analytic Hierarchy Process (AHP), a multi-criteria decision making technique was used in the study. AHP can be used for decision problems with large numbers of alternatives and several criteria (Abastante et al., 2019). The problem of the study focused on determining solution priorities for the integration of vertiports with airports. This problem also serves as a goal in a hierarchical structure.

The objective represents the first level of the three-level hierarchical structure used in the study. The second level consists of criteria that contribute to the achievement of the objective. Criteria are factors that are believed to contribute to the achievement of the goal. Safety, cost, efficiency, sustainability, and feasibility are identified as evaluation criteria in this

study following expert opinions. These criteria ensure a comprehensive approach that addresses essential aspects of aviation operations and infrastructure development. Safety is paramount in aviation and involves the effective management of risks associated with aviation activities (Wipf, 2020). In addition, cost is a critical evaluation criterion as it assesses the economic viability of aviation projects (Gibson et al., 2004). Efficiency is also essential, ensuring consistent performance, optimal use of resources and maximum productivity (Dmitruk & Koshevoy, 1991). Furthermore, feasibility in aviation refers to the ability to solve complex problems and implement practical solutions (Cafieri & D'Ambrosio, 2017). Finally, sustainability is crucial due to the challenges posed by climate change and global warming, which require environmentally friendly practices in the industry (Markatos & Pantelakis, 2022).

Finally, at the third level of the hierarchy are the alternatives. Following a literature review and expert evaluation, the study identified the following solution options: remote vertiport networks, geofencing technology, dedicated airspace corridors, advanced collision avoidance systems and dynamic airspace management. AHP flowchart is shown in Figure 6.



**Figure 6.** AHP flowchart of priority solution proposal for integrating vertiports into airport.

AHP is used to quantify pairwise comparisons on a scale of 1-9 as shown in Table 1 (Saaty & Vargas, 2006). The study used the opinions of 12 experts in the aviation sector.

**Table 1.** Saaty's 1-9 scale for AHP preference.

Level of Importance and Definitions	Explanations
1: Equal importance.	Importance of elements are equal.
3: Weak importance.	First element is moderately more important than second one
5: Strong importance.	First element is strongly more important than second one.
7: Importance over the other.	First element is very strongly more important than second one.
9: Absolute importance.	First element is extremely more important than second one.
2, 4, 6, 8: Intermediate values.	Intermediate values between above mentioned values.

## 6. AHP Application

The relationship between criteria was explored using pairwise comparison matrix through AHP. The study proceeded with the normalization process observed in the implementation phases of AHP, weights were determined and the consistency ratio of the study was assessed following the calculation process. The data obtained from the expert opinions were used for pairwise comparisons, using a scale of 1-9 as a reference. Table 2 shows the comparison matrix of the decision criteria.

**Table 2.** Comparison matrix of decision criteria.

Decision Criteria	Safety	Cost	Efficiency	Feasibility	Sustainability
Safety	1.00	7.35	5.24	2.74	2.98
Cost	0.14	1.00	1.44	1.76	2.01
Efficiency	0.19	0.69	1.00	1.23	1.15
Feasibility	0.37	0.57	0.81	1.00	1.19
Sustainability	0.34	0.50	0.87	0.84	1.00
<b>Total</b>	<b>2.03</b>	<b>10.11</b>	<b>9.37</b>	<b>7.56</b>	<b>8.34</b>

**Table 3.** Normalized comparison matrix of decision criteria.

Decision Criteria	Safety	Cost	Efficiency	Feasibility	Sustainability
Safety	0.49	0.73	0.56	0.36	0.36
Cost	0.07	0.10	0.15	0.23	0.24
Efficiency	0.09	0.07	0.11	0.16	0.14
Feasibility	0.18	0.06	0.09	0.13	0.14
Sustainability	0.17	0.05	0.09	0.11	0.12
<b>Total</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>

**Table 4.** Eigenvector of decision criteria.

Decision Criteria	Eigenvector
Safety	0.500
Cost	0.159
Efficiency	0.114
Feasibility	0.120
Sustainability	0.108

The final step was to calculate consistency. Consistency is a crucial factor for the reliability of the study. The eigenvalue for each criterion, as shown in Table 5, was calculated by multiplying the row of the pairwise comparison matrix by the priority vector. For consistency, Consistency Ratio (CR) = Consistency Index (CI) / Random Index (RI) is compared to 0.10. The Consistency Index (CI) value was calculated using formula (1) and the  $\lambda_{max}$  value within the Consistency Index (CI) was calculated using formula (2). As the dimension  $n=5$ , the Random Index (RI) value used was 1.12. The calculated Consistency Ratio (CR) value was 0.064, indicating that the consistency ratio is less than 0.10, confirming that the results are consistent.

The next step was to construct the normalized comparison of decision criteria shown in Table 3. In the normalized comparison matrix, column sums equal to 1 indicate a correctly performed process.

The following stage of AHP is to determine priorities. By finding the priority vector, the criteria are weighted. For this process, the normalized comparison matrix is used and it is done by taking the arithmetic mean of the rows of the normalized comparison matrix. Table 4 shows the eigenvector of the decision criteria.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \quad (2)$$

**Table 5.** Eigenvalue of decision criteria.

Decision Criteria	Eigenvalue
Safety	2.913
Cost	0.818
Efficiency	0.590
Feasibility	0.614
Sustainability	0.554

In the continuation of the AHP application, comparison matrices per criterion for alternatives, normalized comparison matrices, and eigenvectors were calculated. Using the importance weight values derived from these calculations, the selection score for each alternative was obtained. The ranking of results is presented in Table 6.

**Table 6.** Selection score and ranking of alternatives.

Alternatives	Selection Score	Ranking
Dynamic airspace management	0.396	1
Remote vertiport networks	0.385	2
Dedicated airspace corridors	0.273	3
Geofencing technology	0.205	4
Advanced collision avoidance systems	0.137	5

## 7. Conclusion and Discussion

The design of airport vertiports for eVTOLs/UAVs presents several challenges. A literature review identified remote vertiport networks, geofencing technology, dedicated airspace corridors, advanced collision avoidance systems, and dynamic airspace management as potential solutions to these challenges. To determine the best alternative among these solutions, prioritization was carried out based on safety, cost, efficiency, feasibility, and sustainability criteria. According to the results of the study, dynamic airspace management was the highest priority solution, followed by remote vertiport networks, dedicated airspace corridors, geofencing technology, and advanced collision avoidance systems.

Dynamic airspace management facilitates the dynamic planning of airport and airspace operations. In the current CDM to minimize delays. Similar real-time data sharing systems between eVTOL/UAV operators, airport authorities, ATM, and UTM service providers would enable dynamic planning of eVTOL/UAV operations. Data shared via datalink can facilitate fully automated flights, thereby minimizing the impact of eVTOL/UAV flights on airport traffic. However, the integration of ATM/UTM is critical in this process. Integrated ATM/UTM systems enable UAM by enabling safe and efficient air taxi operations in urban environments, including airports. Given the increasing use of UAVs for various purposes, including air taxis, the UTM system aims to integrate

UAVs into segregated and non-segregated airspace and address the challenges in adopting the current ATM for UTM (Ali, 2019).

Remote vertiport networks emerged as the second priority solution. Considering the complex structures of airports and the different characteristics of traditional aircraft and eVTOLs/UAVs, the positioning of vertiports with metro connections to nearby airports can be proposed as a suitable solution. This approach could also make UAM more accessible, given the high costs associated with airports. Studies have shown that UAM services to and from airports are more expensive than intra-metropolitan travel (Coppola et al., 2024). The use of these vertiports may allow airport operations to continue without interruption. Furthermore, there is no evidence to suggest that any delays will result in safety risks.

The third priority solution is the designation of dedicated airspace corridors. In the initial stages, the majority of UAM operations will be conducted under visual flight rules, whereby aircraft navigate by visual references rather than relying on instruments, predominantly in urban areas (Lascara et al., 2019). At present, routes exist for traffic flying to and from airports under visual flight rules (Tuncal & Uslu, 2021). These routes can be used by eVTOLs/UAVs flying to vertiports at airports. However, an increase in flights could create significant risks and capacity issues for traditional aircraft using visual reference routes. The design of dedicated airspace corridors to minimize interactions between eVTOLs/UAVs and traditional aircraft and reduce the impact on airport traffic is therefore crucial. Dedicated airspace corridors provide 3D airspace for closely spaced, safe flights to avoid collisions (Asslouj et al., 2023; Toratani et al., 2023). Flights in these corridors can be conducted without traditional ATC services (Vascik & Hansman, 2020). Therefore, dedicated airspace corridors are an important solution to overcome the operational challenges of integrating vertiports into airports.

The fourth priority solution for integrating vertiports into airports is geofencing technology. This technology can impose temporal and spatial restrictions on the operation of vertiports at airports (Stevens & Atkins, 2020). The integration of geofencing technology facilitates the adaptation of vertiports to existing airport infrastructure. Particularly at busy airports, this technology can be used to protect take-off and landing routes for conventional aircraft by creating no-fly zones. Furthermore, dynamic planning can regulate flights to vertiports (Zhu & Wei, 2016) and manage flights with virtual boundaries (Hosseinzadeh, 2021), providing a safe alternative to detect-and-avoid systems (Stevens et al., 2015). Therefore, the use of

geofencing technology is considered a critical step in the process of integrating vertiports into airports.

The final priority in the solution ranking is advanced collision avoidance systems. This system plays a critical role in ensuring flight safety for both traditional aircraft and eVTOLs/UAVs. One of the main challenges in integrating vertiports into airports is flight safety. The landing phase of airport operations poses significant risks to aircraft (Kong et al., 2022; Wang et al., 2020). Any safety violation during this phase can lead to accidents. Advanced collision avoidance systems can provide situational awareness to pilots by monitoring airport flights.

In conclusion, the integration of vertiports into existing airports for eVTOL/UAV operations, while posing significant challenges, is both feasible and promising with the implementation of prioritized solutions such as dynamic airspace management, remote vertiport networks, dedicated airspace corridors, geofencing technology, and advanced collision avoidance systems. In addition, Artificial Intelligence (AI) technologies play a crucial role in enhancing ATM/UTM, providing advanced capabilities to manage complex airspace and ensure safe and efficient operations around airports. It is recommended that future studies focus on the integration of ATM/UTM and the application of AI. Ongoing collaboration between UAM stakeholders, including airport authorities, air navigation service providers, regulators, and eVTOL/UAV manufacturers, is essential to develop comprehensive and effective integration strategies. By recognizing the challenges, embracing innovative solutions, and prioritizing research and collaboration, the integration of vertiports into airports can revolutionize urban mobility, providing safer, faster, and more sustainable transport options for all.

#### Author Contributions

The study is single-authored. The author confirms sole responsibility for the conception of the study, the presented results, and the preparation of the manuscript.

#### Conflicts of Interest

There are no conflicts of interest in any part of the research paper.

#### Statement of Research and Publication Ethics

For this type of study formal consent is not required.

#### References

- Abastante, F., Corrente, S., Greco, S., Ishizaka, A., & Lami, I. (2019). A new parsimonious AHP methodology: Assigning priorities to many objects by comparing pairwise few reference objects. *Expert Systems with Applications*, 127, 109–120. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.02.036>
- Abeyratne, D. R., & Abeyratne, R. (2014). The airport business. In *Law and Regulation of Aerodromes*. 145–167).
- Ackerman, E., Cass, S., Dumiak, M., & Gallucci, M. (2021). Transportation: How safe are eVTOLs? Extremely safe—say manufacturers: News. *IEEE Spectrum*, 58(11), 6–13.
- Afrin, T., & Yodo, N. (2020). A survey of road traffic congestion measures towards a sustainable and resilient transportation system. *Sustainability*, 12(11), 4660. <https://doi.org/10.3390/su12114660>
- Ahn, B., & Hwang, H. (2022). Design criteria and accommodating capacity analysis of vertiports for urban air mobility and its application at Gimpo Airport in Korea. *Applied Sciences*, 12(12), 6077. <https://doi.org/10.3390/app12126077>
- Ahrenhold, N., Pohling, O., & Schier-Morgenthal, S. (2021). Impact of air taxis on air traffic in the vicinity of airports. *Infrastructures*, 6(10), 140. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6100140>
- Ali, B. S. (2019). Traffic management for drones flying in the city. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 26, 100310.
- Almeida, C., Li, W., Meinerz, G., & Li, L. (2016). Satisficing game approach to collaborative decision making including airport management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17, 2262–2271. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2516444>
- Al-Rubaye, S., Tsourdos, A., & Namuduri, K. (2023). Advanced air mobility operation and infrastructure for sustainable connected eVTOL vehicle. *Drones*, 7(5), 319. <https://doi.org/10.3390/drones7050319>
- Alturbeh, H., & Whidborne, J. (2020). Visual flight rules-based collision avoidance systems for UAV flying in civil aerospace. *Robotics*, 9(1), 9. <https://doi.org/10.3390/robotics9010009>
- Asslouj, A., Atkins, E., & Rastgoftar, H. (2023). Can a Laplace PDE define air corridors through low-altitude airspace? *2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICUAS57906.2023.10180409>
- Auerbach, S., & Koch, B. (2007). Cooperative approaches to managing air traffic efficiently—the airline perspective. *Journal of Air Transport Management*, 13, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2006.10.005>
- Australia CASA. (2023). Advisory circular AC 139.V-01v1.0: Guidance for vertiport design, D23/134615. Retrieved from <https://www.casa.gov.au/sites/default/files/2023->

- 07/advisory-circular-139.v-01-guidance-vertiport-design.pdf
- Brunelli, M., Ditta, C. C., & Postorino, M. N. (2023). New infrastructures for urban air mobility systems: A systematic review on vertiport location and capacity. *Journal of Air Transport Management*, 112, 102460. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102460>
- Cafieri, S., & D'Ambrosio, C. (2017). Feasibility pump for aircraft deconfliction with speed regulation. *Journal of Global Optimization*, 71, 501–515. <https://doi.org/10.1007/s10898-017-0560-7>
- Caulfield, B., Bailey, D., & Mullarkey, S. (2013). Using data envelopment analysis as a public transport project appraisal tool. *Transport Policy*, 29, 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2013.04.006>
- Chang, Y., Shao, P., & Chen, H. (2015). Performance evaluation of airport safety management systems in Taiwan. *Safety Science*, 75, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.12.006>
- Cheng, P., & Geng, R. (2010). Dynamic airspace management—Models and algorithms. *Air Traffic Control*.
- Cheng, V. H. (2004). Surface operation automation research for airport tower and flight deck automation. In *Proceedings. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (IEEE Cat. No. 04TH8749)*, 607–612. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2004.1398970>
- Cizreliloğulları, M. N., Barut, P., & Imanov, T. (2022). Future air transportation ramification: Urban air mobility (UAM) concept. *Prizren Social Science Journal*, 6(2), 24–31.
- Clarke, M., Smart, J., Botero, E. M., Maier, W., & Alonso, J. J. (2019). Strategies for posing a well-defined problem for urban air mobility vehicles. In *AIAA Scitech 2019 Forum*, 0818. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0818>
- Coppola, P., De Fabiis, F., & Silvestri, F. (2024). Urban air mobility (UAM): Airport shuttles or city-taxis? *Transport Policy*, 150, 24–34.
- Daskilewicz, M., German, B., Warren, M., Garrow, L., Boddupalli, S., & Douthat, T. (2018). Progress in vertiport placement and estimating aircraft range requirements for eVTOL daily commuting. *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2884>
- Dmitruk, A., & Koshevoy, G. (1991). On the existence of a technical efficiency criterion. *Journal of Economic Theory*, 55, 121–144. [https://doi.org/10.1016/0022-0531\(91\)90061-7](https://doi.org/10.1016/0022-0531(91)90061-7)
- Dulchinos, V., Wood, R. D., Farrahi, A., Mogford, R., Shyr, M., & Ghatas, R. (2022). Design and analysis of corridors for UAM operations. In *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC55683.2022.9925820>
- Eissfeldt, H. (2020). Sustainable urban air mobility supported with participatory noise sensing. *Sustainability*, 12(8), 3320. <https://doi.org/10.3390/su12083320>
- Ellis, K. K., Prinzel, L. J., Davies, M. D., Homola, J., Glaab, L., Krois, P., et al. (2023). An in-time aviation safety management system (IASMS) concept of operations for vertiport design and operations. In *AIAA AVIATION 2023 Forum*, 3965. <https://doi.org/10.2514/6.2023-3965>
- European Union Safety Agency. (2022). Prototype technical specifications for the design of VFR vertiports for operation with manned VTOL-capable aircraft certified in the enhanced category. Retrieved from <https://www.easa.europa.eu/document-library/general-publications/prototype-technical-designspecifications-vertiports>
- Forsyth, P. (2007). The impacts of emerging aviation trends on airport infrastructure. *Journal of Air Transport Management*, 13, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2006.10.004>
- Future Travel Experience. (2022). Mobility. Retrieved from <https://www.futuretravelexperience.com/2022/08/vp-orts-to-build-and-operate-vertiport-hub-at-sao-paulo-international-airport/>
- Gelhausen, M., Berster, P., & Wilken, D. (2013). Do airport capacity constraints have a serious impact on the future development of air traffic? *Journal of Air Transport Management*, 28, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2012.12.004>
- Gerdes, I., Temme, A., & Schultz, M. (2018). Dynamic airspace sectorisation for flight-centric operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 95, 460–480. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.032>
- Gibson, W., & Morrell, P. (2004). Theory and practice in aircraft financial evaluation. *Journal of Air Transport Management*, 10, 427–433. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2004.07.002>
- Gillis, D., Petri, M., Pratelli, A., Semanjski, I., & Semanjski, S. (2021). Urban air mobility: A state of art analysis. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2021: 21st International Conference, Cagliari, Italy, September 13–16, 2021, Proceedings, Part II*, 411–425. Springer International Publishing.
- Groupe ADP. (n.d.). Innovation. Retrieved from <https://presse.groupeadp.fr/first-vertiport-pontoise/?lang=en>
- Guida, R., Bertolino, A. C., De Martin, A., Raviola, A., Jacazio, G., & Sorli, M. (2023). On the effects of strain wave gear kinematic errors on the behavior of an electro-mechanical flight control actuator for eVTOL aircrafts. *Materials Research Proceedings*, 26, 207–212. <https://doi.org/10.21741/9781644902431-34>
- Hosseinzadeh, M. (2021). UAV geofencing: Navigation of UAVs in constrained environments. In *Unmanned Aerial Systems*, 567–594. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820276-0.00029-7>
- Jain, S., Jain, S. S., & Jain, G. V. (2018). An operational analysis and congestion estimation of urban bus



- route based on ITS. *Civil Engineering Research Journal*, 3(2), 555610. <https://doi.org/10.19080/CERJ.2018.03.555610>
- Janic, M. (2000). An assessment of risk and safety in civil aviation. *Journal of Air Transport Management*, 6, 43–50. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(99\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(99)00021-6)
- Janic, M. (2016). Analyzing, modeling, and assessing the performances of land use by airports. *International Journal of Sustainable Transportation*, 10, 683–702. <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1104566>
- Jin, Z., Ng, K. K., Zhang, C., Wu, L., & Li, A. (2024). Integrated optimization of strategic planning and service operations for urban air mobility systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 183, 104059.
- Karacapilidis, N. (2000). Integrating new information and communication technologies in a group decision support system. *International Transactions in Operational Research*, 7, 487–507. [https://doi.org/10.1016/S0969-6016\(00\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0969-6016(00)00028-9)
- Kim, W., Park, J., Yu, J. W., & Ko, J. (2023). A study on the criteria affecting UAM vertiport location based on user-oriented perspectives. *Journal of Korean Society of Transportation*, 41(2), 212–225.
- Kleinbekman, I. C., Mitici, M. A., & Wei, P. (2018). eVTOL arrival sequencing and scheduling for on-demand urban air mobility. In *2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569645>
- Kong, Y., Zhang, X., & Mahadevan, S. (2022). Bayesian deep learning for aircraft hard landing safety assessment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 17062–17076.
- Koscak, P., Jencova, E., Galanda, J., & Liptakova, D. (2019). Airports SMS penetration with occupational health protection. *2019 New Trends in Aviation Development (NTAD)*, 96–101. <https://doi.org/10.1109/NTAD.2019.8875592>
- Lanshou, H., & Fuqing, D. (2010). Dynamic air route management based on flight demand. In *2010 Second International Conference on Computer and Network Technology* (pp. 426–429). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCNT.2010.79>
- Lascara, B., Lacher, A., DeGarmo, M., Maroney, D., Niles, R., & Vempati, L. (2019). Urban air mobility airspace integration concepts: Operational concepts and exploration approaches. MITRE CORP MCLEAN VA MCLEAN. Retrieved from <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1107997.pdf>
- Lin, C., & Wu, Y. (2011). Collision avoidance solution for low-altitude flights. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 225, 779–790. <https://doi.org/10.1177/0954410011399211>
- Lombaerts, T., Kaneshige, J., Schuet, S., Aponso, B. L., Shish, K. H., & Hardy, G. (2020). Dynamic inversion-based full envelope flight control for an eVTOL vehicle using a unified framework. In *AIAA Scitech 2020 Forum* (p. 1619). <https://doi.org/10.2514/6.2020-1619>
- Markatos, D. N., & Pantelakis, S. G. (2022). Assessment of the impact of material selection on aviation sustainability, from a circular economy perspective. *Aerospace*, 9(2), 52.
- McQueen, B. (2021). Unsettled issues concerning urban air mobility infrastructure (No. EPR2021025). *SAE Technical Paper*. Retrieved from <https://saemobilus.sae.org/content/EPR2021025/>
- Michael, A. P., & Meyers, P. E. (2022). Engineering brief no. 105, vertiport design. *Memorandum, Airport Engineering Division, AAS-100, Federal Aviation Administration*. Retrieved from <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/eb-105-vertiports.pdf>
- Mudumba, S. V., Chao, H., Maheshwari, A., DeLaurentis, D. A., & Crossley, W. A. (2021). Modeling CO2 emissions from trips using urban air mobility and emerging automobile technologies. *Transportation Research Record*, 2675(9), 1224–1237. <https://doi.org/10.1177/03611981211006439>
- Nikulin, A. (2018). The system of collaborative decision making as an effective tool for the organization of the airport operation in peak loads. *Civil Aviation High Technologies*. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55>
- Panchal, I., Armanini, S., & Metz, I. (2023). Validation of collision detection and avoidance methods for urban air mobility through simulation. *ArXiv, abs/2311.18047*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.18047>
- Park, H., Sison, F., Mendez, B., Marchetti, M., & Anaya, G. (2020). Conceptual design of vertiport and UAM corridor. *San Jose State University*. Retrieved from [https://vsgc.odu.edu/acrpdesigncompetition/wp-content/uploads/sites/3/2021/06/2021-ACRP-Design-Competition\\_1st\\_Operation.pdf](https://vsgc.odu.edu/acrpdesigncompetition/wp-content/uploads/sites/3/2021/06/2021-ACRP-Design-Competition_1st_Operation.pdf)
- Peksa, M., Dandl, F., & Bogenberger, K. (2023). Hierarchical vertiport network for an urban air mobility system: Munich metropolitan area case study. *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/DASC58513.2023.10311154>
- Peng, X., Bulusu, V., & Sengupta, R. (2022). Hierarchical vertiport network design for on-demand multi-modal urban air mobility. In *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)* 1–8. IEEE. <https://doi.org/10.1109/DASC55683.2022.9925782>
- Pothana, P., Joy, J., Snyder, P., & Vidhyadharan, S. (2023). UAS air-risk assessment in and around airports. In *2023 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. 1–11. <https://doi.org/10.1109/ICNS58246.2023.10124319>
- Pradeep, P. (2019). Arrival management for eVTOL aircraft in on-demand urban air mobility. *Aerospace Engineering*. Retrieved from <https://dr.lib.iastate.edu/handle/20.500.12876/31259>

- Pradeep, P., & Wei, P. (2018). Energy efficient arrival with RTA constraint for urban eVTOL operations. In *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*.
- Preis, L. (2021). Quick sizing, throughput estimating and layout planning for VTOL aerodromes: A methodology for vertiport design. In *AIAA Aviation 2021 Forum* (p. 2372). <https://doi.org/10.2514/6.2021-2372>
- Preis, L. (2023). Estimating vertiport passenger throughput capacity for prominent eVTOL designs. *CEAS Aeronautical Journal*, 1–16.
- Preis, L., & Hornung, M. (2022). Vertiport operations modeling, agent-based simulation and parameter value specification. *Electronics*, 11(7), 1071. <https://doi.org/10.3390/electronics11071071>
- Preis, L., & Vazquez, M. H. (2022). Vertiport throughput capacity under constraints caused by vehicle design, regulations and operations. In *Delft International Conference on Urban Air-Mobility (DICUAM)*. Retrieved from <http://cdn.aanmelderusercontent.nl/i/doc/8fa60b7fcfa71ea900ce2bea2037a151>
- Qu, W., Xu, C., Tan, X., Tang, A., He, H., & Liao, X. (2023). Preliminary concept of urban air mobility traffic rules. *Drones*, 7(1), 54. <https://doi.org/10.3390/drones7010054>
- Raigoza, K., Chadwick, A., & Kishore, C. (2022). Electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicle reliability and safety analysis. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. 86717, V009T14A036. American Society of Mechanical Engineers*. <https://doi.org/10.1115/IMECE2022-97038>
- Rimjha, M., & Trani, A. (2021). Urban air mobility: Factors affecting vertiport capacity. In *2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. 1–14. <https://doi.org/10.1109/ICNS52807.2021.9441631>
- Rothfeld, R., Fu, M., Balać, M., & Antoniou, C. (2021). Potential urban air mobility travel time savings: An exploratory analysis of Munich, Paris, and San Francisco. *Sustainability*, 13(4), 2217. <https://doi.org/10.3390/su13042217>
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process*. Springer Science+Business Media, LLC.
- Sanches, M. P., Faria, R. A. P., & Cunha, S. R. (2020). Visual flight rules-based collision avoidance system for VTOL UAV. In *2020 5th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. <https://doi.org/10.1109/ICRAE50850.2020.93108>
- Schweiger, K., & Preis, L. (2022). Urban air mobility: Systematic review of scientific publications and regulations for vertiport design and operations. *Drones*, 6(7), 179. <https://doi.org/10.3390/drones6070179>
- Scott, B. I. (2022). Vertiports: Ready for takeoff... and landing. *Journal of Air Law and Commerce*, 87, 503.
- Shmelova, T., Sikirda, Y., Yatsko, M., & Kasatkin, M. (2021). Synthesis of the collaborative decision-making models for the remote pilot during flight emergency. In *2021 IEEE 6th International Conference on Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD)*. 66–70. <https://doi.org/10.1109/APUAVD53804.2021.9615175>
- Smith, M., Strohmeier, M., Lenders, V., & Martinovic, I. (2020). Understanding realistic attacks on airborne collision avoidance systems. *Journal of Transportation Security*, 15, 87–118. <https://doi.org/10.1007/s12198-021-00238-2>
- Song, K., Yeo, H., & Moon, J. H. (2021). Approach control concepts and optimal vertiport airspace design for urban air mobility (UAM) operation. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 22, 982–994.
- Sridhar, B., Grabbe, S., & Mukherjee, A. (2008). Modeling and optimization in traffic flow management. *Proceedings of the IEEE*, 96, 2060–2080. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006141>
- Stevens, M. N., Coloe, B., & Atkins, E. M. (2015). Platform-independent geofencing for low altitude UAS operations. In *15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 3329. <https://doi.org/10.2514/6.2015-3329>
- Stevens, M., & Atkins, E. (2020). Geofence definition and deconfliction for UAS traffic management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9), 5880–5889.
- Taylor, M., Saldanli, A., & Park, A. (2020). Design of a vertiport design tool. In *2020 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*. 2A2-1. <https://doi.org/10.1109/ICNS50378.2020.9222989>
- Thu, Z. W., Kim, D., Lee, J., Won, W. J., Lee, H. J., Ywet, N. L., Maw, A. A., & Lee, J. W. (2022). Multivehicle point-to-point network problem formulation for UAM operation management used with dynamic scheduling. *Applied Sciences*, 12(22), 11858. <https://doi.org/10.3390/app122211858>
- Tomaszewska, J., Krzysiak, P., Zieja, M., & Woch, M. (2018). Statistical analysis of ground-related incidents at airports. *Journal of KONES*, 25, 467–472. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.4369>
- Toratani, D., Hirabayashi, H., Senoguchi, A., & Otsuyama, T. (2023). Study on urban air mobility corridor design in the vicinity of airports. In *2023 IEEE/AIAA 42nd Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 1–7. <https://doi.org/10.1109/DASC58513.2023.10311283>
- Tuncal, A., & Uslu, S. (2021). Kentsel hava hareketliliği kavramının gelişiminde iki önemli faktör: ATM ve toplum. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 23(41), 564–577.
- Unverricht, J., Buck, B. K., Petty, B., Chancey, E. T., Politowicz, M. S., & Glaab, L. J. (2024). Vertiport management from simulation to flight: Continued human factors assessment of vertiport operations. In

- AIAA SCITECH 2024 Forum. 0526. <https://doi.org/10.2514/6.2024-0526>
- Vascik, P. D., & Hansman, R. J. (2019). Development of vertiport capacity envelopes and analysis of their sensitivity to topological and operational factors. In *AIAA Scitech 2019 Forum*. 0526. <https://doi.org/10.2514/6.2019-0526>
- Vascik, P. D., & Hansman, R. J. (2020). Allocation of airspace cutouts to enable procedurally separated small aircraft operations in terminal areas. In *AIAA AVIATION 2020 FORUM*. 2905.
- Vitale, C. (2023). Eve and Kookiejar set to advance vertiport operations in Dubai. Retrieved from <https://www.airport-technology.com/news/eve-and-kookiejar-set-to-advance-vertiport-operations-in-dubai/?cf-view>
- Volocopter. (2022). Newsroom. Retrieved from <https://www.volocopter.com/en/newsroom/italys-first-vertiport-deployed-at-fiumicino-airport>
- Wang, K., Jacquillat, A., & Vaze, V. (2022). Vertiport planning for urban aerial mobility: An adaptive discretization approach. *Manufacturing & Service Operations Management*, 24, 3215–3235. <https://doi.org/10.1287/msom.2022.1148>
- Wang, X., Sang, Y., & Zhou, G. (2020). Combining stable inversion and  $H^\infty$  synthesis for trajectory tracking and disturbance rejection control of civil aircraft auto landing. *Applied Sciences*, 10(4), 1224.
- Willey, L., & Salmon, J. (2021). A method for urban air mobility network design using hub location and subgraph isomorphism. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 125, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.102997>
- Wipf, H. (2020). Safety versus security in aviation. In *The Coupling of Safety and Security: Exploring Interrelations in Theory and Practice*. 29–41.
- Wu, Z., & Zhang, Y. (2021). Integrated network design and demand forecast for on-demand urban air mobility. *Engineering*, 7(4), 473–487. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.11.007>
- Xie, Y., Shortle, J., & Donohue, G. (2004). Airport terminal-approach safety and capacity analysis using an agent-based model. In *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004*. 2, 1349–1357.
- Yang, X., & Wei, P. (2021). Autonomous free flight operations in urban air mobility with computational guidance and collision avoidance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22, 5962–5975. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3048360>
- Yang, X., Deng, L., Liu, J., Wei, P., & Li, H. (2020). Multi-agent autonomous operations in urban air mobility with communication constraints. In *AIAA Scitech 2020 Forum* (p. 1839). <https://doi.org/10.2514/6.2020-1839>
- Ye, S., Wan, Z., Zeng, L., Li, C., & Zhang, Y. (2020). A vision-based navigation method for eVTOL final approach in urban air mobility (UAM). In *2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI)*. 645–649. <https://doi.org/10.1109/CVCI51460.2020.9338487>
- Yedavalli, P. (2021). Designing and simulating urban air mobility vertiport networks under land use constraints (No. TRBAM-21-00693). Retrieved from <https://trid.trb.org/view/1759451>
- Yedavalli, P., & Cohen, A. (2022). Planning land use constrained networks of urban air mobility infrastructure in the San Francisco Bay Area. *Transportation Research Record*, 2676, 106–116. <https://doi.org/10.1177/03611981221076839>
- Yılmaz, A., & Ulvi, H. (2022). Kentsel hava sahasında insansız hava aracı sistemleri trafik yönetimi için verilmesi gereken hizmetler ve kullanılabilir bazı teknolojiler. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(1), 8–18.
- Zanin, M., & Lillo, F. (2013). Modelling the air transport with complex networks: A short review. *The European Physical Journal Special Topics*, 215, 5–21. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2013-01711-9>
- Zelinski, S. (2020). Operational analysis of vertiport surface topology. In *2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. 1–10. <https://doi.org/10.1109/DASC50938.2020.9256794>
- Zhang, H., Fei, Y., Li, J., Li, B., & Liu, H. (2022). Method of vertiport capacity assessment based on queuing theory of unmanned aerial vehicles. *Sustainability*, 15(1), 709.
- Zhang, X. (2019). Operation and cohesion strategy of hub airport ground based on the background of multi-terminal areas. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 330 (2), 022128. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/330/2/022128>
- Zhu, G., & Wei, P. (2016). Low-altitude UAS traffic coordination with dynamic geofencing. In *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



## Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



### İHA'ların Batarya Seviyelerinin Makine Öğrenmesi ile Tahmini

Gürkan Kutlu<sup>1\*</sup>, Erdinç Avaroğlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Yenişehir Belediyesi Bilim ve Sanat Merkezi, 33110, Mersin, Türkiye; (grknktl@hotmail.com)

<sup>2</sup> Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, 33110, Mersin, Türkiye; (eavaroglu@mersin.edu.tr)



Sorumlu Yazar:  
grknktl@hotmail.com

#### Araştırma Makalesi

**Alıntı:** Kutlu, G. & Avaroğlu, E. (2024). İHA'ların Batarya Seviyelerinin Makine Öğrenmesi ile Tahmini. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 56-62.

Geliş : 14.02.2024  
Revize : 23.09.2024  
Kabul : 03.10.2024  
Yayınlama : 31.12.2024

#### Özet

Döner kanatlı insansız hava araçları (İHA), çeşitli uygulamalarda sağladıkları esneklik nedeniyle dikkat çekmektedir. Çeşitli alanlarda, geniş bir yelpazede kullanılan döner kanatlı İHA'ların daha fazla yaygınlaşmasının önündeki en büyük engel, bataryalarının kısa sürede deşarj olmasından dolayı havada kalma sürelerinin kısa olması olarak görülmektedir. Döner kanat İHA'lar da kullanılan lityum polimer (Lipo) bataryaların bir diğer dezavantajlı durumu ise kullanım ömrüdür. Lipo bataryaların toplam verebildiği akım miktarının bir göstergesi olan pil seviyesi sürekli kontrol edilmemesi ve bu seviyenin 20%'nin altına düşüşü pil ömrünü kısaltmakta ve zaman zaman yapısını tamamen bozarak İHA'yı çeşitli kırımlara uğratabilmektedir. Özellikle otonom olarak sürekli görevlerde kesintisiz çalıştırılmak istenen döner kanatlı İHA'ların; pil ömrünün uzatılması ve belirli bir pil seviyesine indiğinde otonom olarak en yakın şarj istasyonuna güvenli inişleri önem taşımaktadır. Bu çerçevede yapılan çalışmada, belirlenen bir güzergah boyunca otonom uçan bir İHA'nın iniş platformuna yatay olarak yaklaşırken ve bu platforma dikey iniş yaparken batarya seviyesindeki azalma miktarı, makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak tahmin edilmiştir. Uçuş sonunda, İHA'nın güvenli bir şekilde istenilen batarya seviyesinde yere iniş yapması hedeflenmiştir. Yatay seyir sırasında, güzergah noktaları üzerinde anlık veriler kullanılarak tahminler yapılmıştır. Dikey iniş esnasında ise, görüntü işleme teknikleri kullanılarak, farklı irtifalardan indirilen İHA'dan elde edilen verilerle tahminler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan İHA ile gerçek saha koşullarında ve farklı irtifalarda testler gerçekleştirilmiştir. Kalkış öncesinde, İHA'ya belirli bir batarya seviyesi bildirilmiş ve uçuşa başlanmıştır. Uçuş sonrasında ise İHA'nın batarya seviyesi kontrol edilerek başlangıç seviyesi ile arasındaki farklar gözlemlenmiştir. Yapılan testlerde, en yüksek 3%, en düşük ise 0% batarya seviyesi farkına ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İHA, batarya seviyesi, makine öğrenmesi, tahmin, otonom.

### Estimate The Battery Levels of UAVs Using Machine Learning

\*Corresponding Author:  
grknktl@hotmail.com

#### Research Article

**Citation:** Kutlu, G. & Avaroğlu, E. (2024). Estimate The Battery Levels of UAVs Using Machine Learning. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 56-62 (in Turkish).

Received : 14.02.2024  
Revised : 23.09.2024  
Accepted : 03.10.2024  
Published : 31.12.2024

#### Abstract

Rotary wing unmanned aerial vehicles (UAVs) attract attention due to the flexibility they provide in various applications. The biggest obstacle to the widespread use of rotary wing UAVs, which are used in a wide range of areas, is seen as the short duration of their airtime due to the short discharge of their batteries. Another disadvantage of lithium polymer (Lipo) batteries used in rotary wing UAVs is their service life. The battery level, which is an indicator of the total current that Lipo batteries can provide, is not constantly checked and this level falling below 20% shortens the battery life and sometimes completely damages the UAV by causing various breakdowns. Especially for rotary wing UAVs that are intended to be operated continuously and autonomously, extending the battery life and safely landing autonomously at the nearest charging station when they reach a certain battery level are important. In this context, in the study conducted, the amount of battery level decrease of a UAV flying autonomously along a specified route while approaching the landing platform horizontally and landing vertically on this platform was estimated using machine learning algorithms. At the end of the flight, the UAV is aimed to land safely at the desired battery level. During horizontal navigation, estimates were made using instant data on the route points. During vertical landing, estimates were made using image processing techniques and data obtained from the UAV landed from different altitudes. Tests were carried out with the UAV designed within the scope of the study under real field conditions and at different altitudes. Before take-off, a certain battery level was reported to the UAV and the flight was started. After the flight, the battery level of the UAV was checked and the differences between the initial level were observed. In the tests, the highest 3% and the lowest 0% battery level difference was reached.

**Keywords:** UAV, battery level, machine learning, prediction, autonomous.

## 1. Giriş

Kullanım alanları genişleyen insansız hava araçlarının kullanım alanlarına, güç tüketim tiplerine ve yapılacak işin spesifikliğine göre seçilen İHA farklılık göstermektedir (Zhao & Li, 2022).

İHA'lar döner kanat ve sabit kanat olmak üzere temel olarak iki farklı tip olarak karşımıza çıkar. Sabit kanat olarak adlandırılan İHA'lar kalkış ve inişlerde pist ihtiyacı olduğu için şehir içi kullanıma müsait değildir. Bu bağlamda döner kanat İHA'lar dikey kalkış iniş yapabilme yanında hızlı olmaları ve havada asılı kalabilme yeteneklerinden dolayı belirli işlerin kullanımında daha avantajlıdır (Boon vd., 2017).

Hızlı yol alabilen döner kanat İHA'lar da kendi öz yükünün yanında taşınacak faydalı yükün kütlelerinin hıza ve harcanan elektrik miktarına önemli ölçüde etkisi vardır (Thibbotuwawa vd., 2019). Çok rotorlu döner kanat İHA'lar da kullanılan lityum bazlı piller yapıları gereği akımı hızlı boşaltabilen pillerdir. Pil amperinin artırılmasıyla beraber havada kalış süresi artırılabilir fakat bu seferde İHA'nın öz ağırlık miktarı artacaktır. Döner kanat İHA'ların en büyük dezavantajı güç tüketiminden dolayı havada kalış sürelerinin kısa olmasıdır (Kardasz vd., 2016). Bir diğer dezavantajları ise darbelere karşı savunmasız olmalarıdır (Pattarakunnan vd., 2021). Bu darbelerde ortaya çıkabilecek lipo pil hasarları dikkate alınarak pilin sağlık durumları sürekli kontrol edilmelidir (Galeotti vd., 2015). Süreç sonunda pil sağlıklı gibi gözükse de performansta düşüşler de yaşanabilmektedir (Lee & Lee, 2021).

Lipo pillerin sağlığı göz önüne alındığında pilin nasıl ve hangi şartlarda kullanıldığı pil sağlığı için belirleyici etkidir (Amanor-Boadu & Guiseppi-Elie, 2020). Pilin uygun cihazlarla şarj edilip edilmediği kadar kullanım sonrası kalan batarya seviyesi de önemlidir. Çeşitli çalışmalarla bataryaların güvenli çalışma bölgesi seviyeleri ortaya konmuştur. Kullanım sonrası Lipo batarya seviyesinin 20%'nin altına düşme durumunda kısa batarya ömrü sonucu ortaya çıkmıştır (Tezde & Okumuş, 2018). Bundan dolayı İHA'ların yere inişi itibarıyla bu sınırların aşılması önemlidir.

Geçmiş dönem çalışmalar incelendiğinde birçok araştırmacı batarya güç tüketim modellemesi üzerine çalışmıştır. Alyassi vd. (2023), seçilen noktalar arasında asimetric gezgin satıcı problemi yöntemiyle en iyi güzergahı tespit edip farklı ağırlıkta İHA'ların güç tüketimini modellemiştir. Süreçte bir robotik araçla da yere inen İHA'yı şarj etmeyi başarmışlardır (Alyassi vd., 2023).

Prasetia vd. (2019), yaptığı çalışmada çizilen rota üzerinden Elastic Net Regresyon Modeli kullanılarak farklı uçuş davranışlarına göre enerji verimliliği tahmininde bulunmuşlardır (Prasetia vd., 2019).

Çaşka vd. (2023), deneysel olarak iki özdeş İHA'yı yatay ekseninde değişik hızlarda hareket ettirerek batarya tüketim modellerini araştırmış ve bu modelleri doğrusal ile doğrusal olmayan regresyon yöntemleri kullanarak geliştirmiştir (Çaşka & Gökçe, 2023).

Makineci vd. (2022), çalışmalarında İHA'ların uçuş süresi ve pil tüketimi tahminlerine ilişkin şunları belirtmiştir: Yapay Sinir Ağları (ANN), Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemleri (ANFIS) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu-Bulanık Çıkarım Sistemi (PSO-FIS) gibi makine öğrenimi algoritmaları, İHA'ların uçuş süresi (FT) ve pil tüketimi (BC) tahminlerinde etkili sonuçlar verebilir. Çalışma, ANN algoritmasının, FT ve BC tahminlerinde en yüksek doğruluğu sağladığını göstermiştir. Bu durum, ANN algoritmasının daha az sayıda iterasyon ile problemi öğrenebilmesi ve diğer algoritmalara göre daha basit bir yapıya sahip olmasının bir avantajıdır (Makineci vd., 2022).

İniş platformlarının seçimi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde ise en iyi metrik yaklaşım hedeftene nasıl iniş yapılır üzerine çalışıldığı görülmüştür. Bu alanda göze çarpan yöntemler Ir-lock ile yer hava aracı etkileşimli cihazlar, Vicon obje izleme nesnesi ile yer hava aracı etkileşimli cihazlar, Aruco Etiketleri ile görüntü işleme teknikleri ile inişlerdir.

Genel olarak araştırmacıların değerli çalışmaları incelendiğinde havada dolaşımın ve yere görüntü işleme ile metrik inişin makine öğrenmesiyle tahminini bütünsel olarak inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Havada aktif görevini gerçekleştiren İHA'nın belirli bir batarya seviyesi ile yere inmesi ve şarj olması gerekmektedir. Mevcut çalışmada İHA arm olmadan önce uçuş bilgisayarına inişle birlikte kalması istenen batarya seviyesi ve uçuş irtifası girilmiştir. İHA'nın havada gezinmesi, iniş noktasını tercih ederek o noktaya ilerlemesi ve girilen irtifadan görüntü işleme ile inişi sonrası kalan batarya seviyesi kontrol edilmiştir.

$$BST_{tüketilen} = BS_{dolaşım} + BST_{iniş noktasına gidiş} + BST_{iniş} \quad (1)$$

$BST_{tüketilen}$ : tahmin sonucu tüketilecek toplam batarya seviyesi

$BS_{dolaşım}$ : görev esnasında kullanılan batarya seviyesi

$BST_{iniş noktasına gidiş}$ : iniş noktasına gidilirken kullanılan batarya seviyesi tahmini

$BST_{iniş}$ : inişte kullanılan batarya seviyesi tahmini

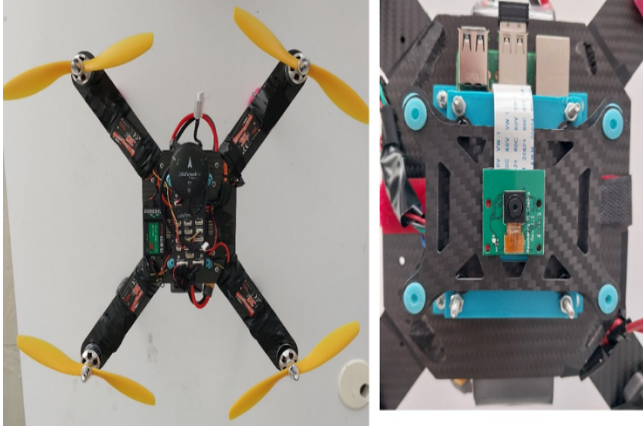
Tahminlerden ilki olan iniş noktasına gidişte kullanılan batarya seviyesi gerçek zamanlı olarak dolaşım esnasında verilerden elde edilmiştir, diğer iniş tahmini ise İHA'nın farklı irtifalardan inişleri sonrası

elde edilen veri seti ile tahminlenmiştir. Her iki tahminde de kullanılan makine öğrenmesi algoritması; diğer regresyon yöntemlere nazaran daha iyi sonuçlar elde edilen doğrusal regresyondur.

## 2. Yöntem

### 2.1. Döner Kanat İnsansız Hava Aracı

3mm karbonfiber gövdeden oluşturulan ana katman altına iki kat eklenerek orta katmana batarya en alt katmana ise uçuş bilgisayarı (Raspberry Pi) yerleştirilmiştir. En alt katmanın altına ise merkeze konuşlandırılan Raspberry Pi'nin CSI bağlantısına olarak sağlayan RaspiCam v1.3 kamera yerleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan döner kanat İHA'nın görseli Şekil 1'de gösterilmiştir. Tablo 1'de ise temel bileşenlerine yer verilmiştir.



Şekil 1. İHA'nın üst ve alt görünümü.

Tablo 1. İHA'nın donanım bileşenleri.

Donanım ve Özellikleri	Kullanım Amacı
Pixhawk 4	Uçuş Kartı
Pixhawk 4	GPS
Raspberry Pi 3 Model B+	Uçuş Bilgisayarı
Raspi Camera V1.3	Kamera
PM07	Güç Dağıtım Kartı
Emax XA2212 1400kv	Fırçasız Dc Motor
30 A Emax ESC	Motor Sürücü Kartı
8060 Pervane	Pervane
6000 mah Li-po	Batarya
FlySky FS-I6S 2.4g	Kumanda ve Alıcısı

Tablo 1'de belirtilen donanımların oluşturduğu İHA, 6000mah lityum polimer batarya ile birlikte 1478gr ağırlığa sahiptir ve tam güçte havada kalma süresi 6 dakikadır.

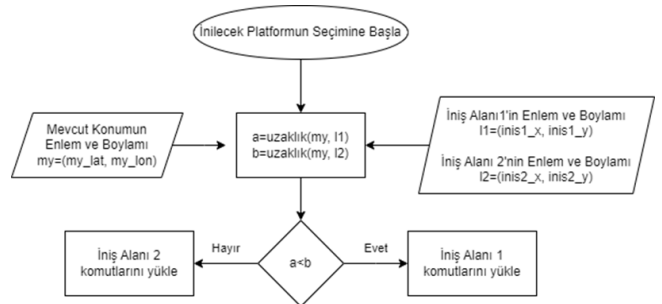
### 2.2. Çalışma Sahası

Şekil 2'de gösterilen çalışma sahası üzerinde 6 adet geçiş noktası ve iki adet iniş noktasının gps konumları alınarak bir rota oluşturulmuştur. Çalışma sahasının herhangi bir yerinden kalkan İHA 6 geçiş noktasını dögüsel olarak dolaşarak veri toplamaktadır. Toplanan veriler bir datalog dosyasına yazılmaktadır. Daha sonra bu dosyadaki veriler ışığında saniyede bir en yakın iniş noktasına giderken tüketilecek batarya seviyesini tahmin etmektedir. Mevcut irtifasından görüntü işleme ile yere inişi ise kalkış öncesi tahmin ederek kritik seviye (yere indiğinde istenilen kalan batarya seviyesi) ulaşıp ulaşılmadığını kontrol etmektedir.



Şekil 2. Çalışma sahası ve geçiş noktaları.

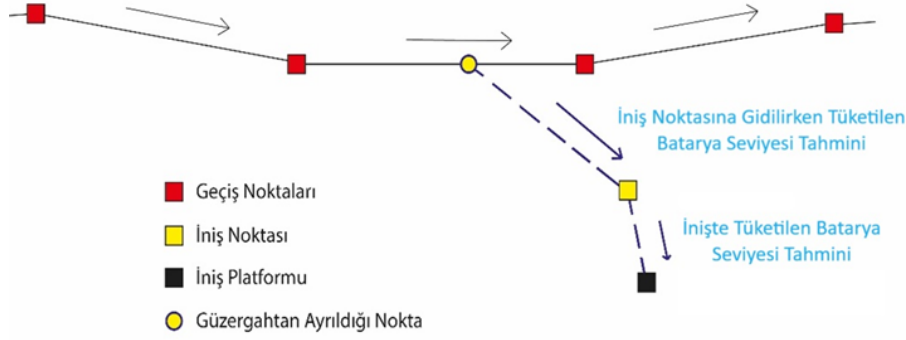
İki adet iniş noktasından yakın olanı baz alarak tahmin hesabı yapılmaktadır. Hangi platformun daha yakın olduğu ise Şekil 3'te gösterilen akış diyagramında gösterilmektedir.



Şekil 3. Yakın iniş platformunun seçimi.

### 2.3. Tahmin

Çalışmada iki adet tahmin mevcuttur. Bunlar Şekil 4'te gösterildiği gibi iniş noktasına gidişte tüketilen batarya seviyesi tahmini ve inişte tüketilen batarya seviyesi tahminidir.



Şekil 4. İHA davranışı.

Tahminlerde, makine öğrenmesinin denetimli öğrenme alanına giren regresyon modelleri kullanılmıştır. Hangi regresyon modelinin problemimize daha fazla katkı sağlayacağını belirlemek için  $R^2$ , düzeltilmiş  $R^2$  (A. $R^2$ ) ve F istatistiği değerlerinden faydalanılmıştır.

Regresyon eğrisine yaklaşımdaki hatalar karesini ifade R2 ve Ayarlanmış Adjust R2 (A.R2) değeri 1'den çıkartılarak oluşturulduğu için yüksek olan değer daha değerli olmaktadır. A. R2'nin R2 den farklı kılan ise birden fazla değişkenin işe koşulma durumunda daha iyi bir değerler sunmasıdır (Yiğit, 2018).

Modelin anlamlı olup olmamasında ise F istatistiği değerine bakılmıştır. F istatistiği değeri modeldeki en az bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde anlamlı etkisini göstermektedir. Yüksek F değeri modelin daha anlamlı olduğunu göstermektedir (Kutlu, 2024).

### 2.3.1. İniş Noktasının Tahmini

İniş noktasına gidişte tüketilecek batarya seviyesinin tahmininde, İHA'nın havadaki dolaşımında elde edilen gerçek zamanlı veriler kullanılmaktadır. Bu süreçte her geçiş noktası arasındaki mesafe, geçiş noktalarının tam orta noktalarının enlem ve boylam bilgileri ile bu orta noktadan geçiş esnasındaki bataryanın voltaj verileri bağımsız değişken olarak ele alınıp tüketilen batarya seviyesi (bağımlı değişken) miktarı dosyaya kaydedilmiştir. Şekil 5 .log dosyasında tutulan verileri göstermektedir.

wpler	mesafe	enlem	boylam	Voltaj	Bat_tuketimi
wp1-wp2	9	36.812194	34.550044	11.410	1
wp2-wp3	9	36.812154	34.550032	11.291	1
wp3-wp4	10	36.812164	34.550092	11.383	0
wp4-wp5	17	36.812219	34.550165	11.279	1
wp5-wp6	10	36.812265	34.550172	11.204	1

Şekil 5. Bağımlı ve bağımsız değişkenler.

Bağımsız değişkenlerin ve kullanılacak makine öğrenmesi algoritmasının seçiminde statmodels kütüphanesinin OLS raporları kullanılmıştır. OLS raporunun R2, A.R2 ve F İstatistiği değerleri göz önüne

alındığında Tablo 2'de gösterilen veriler ışığında en iyi model Çoklu Doğrusal Regresyon olduğuna karar verilmiştir.

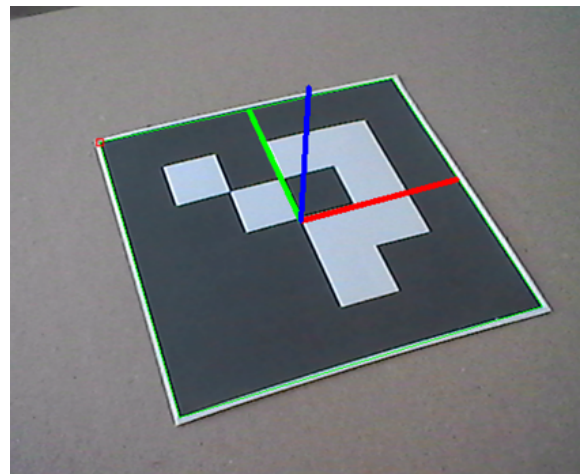
Tablo 2. Model seçimi.

	R2	A. R2	F-statistic
<b>Doğrusal Regresyon</b>	<b>0.993</b>	<b>0.993</b>	<b>1682.0</b>
<b>Polynomial Regresyon (2. derece)</b>	0.934	0.929	160.3
<b>Polynomial Regresyon (2. derece)</b>	0.658	0.627	21.6

Süreç başında doğrusal regresyon yerine doğrusal olmayan regresyon modelinin çıkma ihtimalinin daha yüksek olacağı düşünülse de süreçte tercih edilen saha tipinin dar olması her altı veride bir döngü kurulması ile benzer noktalardan geçiş model seçimini çoklu doğrusal regresyona yaklaştırdığını göstermektedir.

### 2.3.2. İniş Tahmini

İHA üzerinde inişte tüketilecek batarya seviyesi tahmini önceden görüntü işleme ile Şekil 6'da gösterilen Aruco Marker'a iniş veri kayıtları ile oluşturulmuştur.



Şekil 6. Aruco marker.

Şekil 7’de gösterilen log kayıtları farklı mesafelerden Aruco platformuna indirilen İHA’nın iniş verilerini göstermektedir.

	yükseklik	tüketilen_bat
0	375	2
1	412	3
2	429	3
3	409	5
4	903	8

Şekil 7. İniş verileri.

Yükseklik bağımsız değişkeni ile tüketilen batarya seviyesi tahmininde de diğer tahminde olduğu gibi statmodels kütüphanesinin OLS raporlarından faydalanılmıştır.

Tablo 3. İniş modelinin seçimi

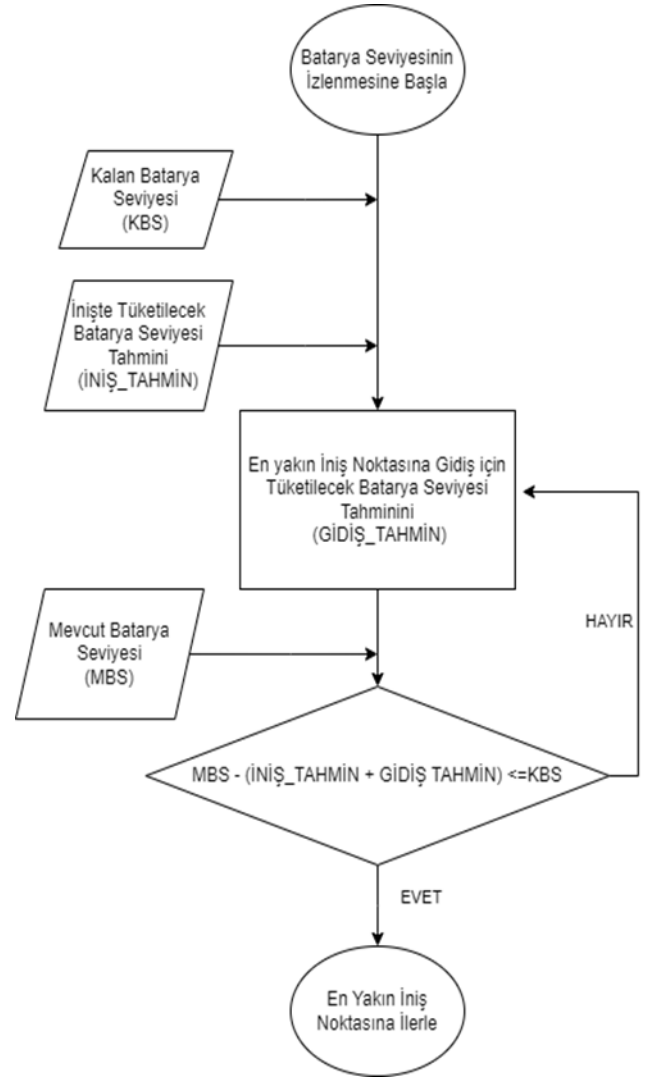
	R2	A. R2	F-statistic
<b>Doğrusal Regresyon</b>	<b>0.998</b>	<b>0.998</b>	<b>3222.0</b>
<b>Polynomial Regresyon (2. derece)</b>	0.998	0.998	2757.0
<b>Polynomial Regresyon (3. derece)</b>	0.995	0.994	292.2
<b>Polynomial Regresyon (4. derece)</b>	0.983	0.980	292.2

Tablo 3’te gösterilen veriler ışığında iniş tahmin modelinin seçiminde Doğrusal Regresyon en iyi değerleri vermektedir.

#### 2.4. Uygulama

Kalkış öncesi İHA’nın toplam süreçte tüketilecek batarya seviyesi ve uçuşun gerçekleşmesi istenen irtifa bilgileri İHA’nın uçuş bilgisayarına kaydedilmektedir. İHA’nın tüm süreç davranışını belirleyen akış diyagramı Şekil 8’de gösterilmiştir.

Her 0.1 sn de gösterilen döngü ile İHA uçuş kartından mevcut batarya seviyesini istemekte ve en yakın iniş platformuna giderken tüketebileceği batarya seviyesi miktarını gerçek zamanlı olarak havada elde ettiği verilerle tahminlemektedir. İniş tahmini ise İHA arm olmadan önce mevcut dosyadan elde ettiği verilerle elde edilmektedir. Her iki tahminde Scikit-learn kütüphanesinin lineer regresyon modeli ile oluşturulmaktadır.



Şekil 8. Tahminlere ait akış diyagramı

### 3. Bulgular ve Değerlendirme

Farklı yükseklik ve yere inişte istenen farklı batarya seviyeleri üzerine yapılan testler Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Test uçuşları.

İniş Sonrası İstenen Batarya Seviyesi	60%	50%	40%	35%	30%
Uçuş İrtifası	8m	5m	7m	6m	5m
İniş Noktasına Gidiş Tahmini	0.22%	0.29%	0.25%	0.14%	0.33%
İniş Tahmini	6.89%	4.10%	5.96%	5.04%	4.10%
İniş Sonrası Batarya Seviyesi	59%	50%	43%	34%	29%
Batarya Seviyesi Farkı	1%	0%	3%	1%	1%



Ortalama 1.2% farkla yere inen İHA'nın en iyi performansı 0% fark ile ikinci uçuş testinde 5m irtifa ve 50% batarya seviyesinde yakalanmıştır. En düşük performans ise 3% fark ile ortaya çıkmıştır, datalog kayıtları incelendiğinde bu gecikmenin ve fazla batarya tüketim sebebinin görüntü işlemedeki gecikmeden kaynaklandığı fark edilmiştir.

Tahminlerde kullanılan lineer regresyon ile 0.1 sn de doğru veriler elde edilmiştir. Raspberry Pi'nin 1 Gb Rami ile bu performansı sağlaması dikkat çekmiştir.

Tablo 5'te bulunan uzaklık verileri incelendiğinde en yakın iniş platformunun seçiminde de İHA doğru kararlar vermiştir.

**Tablo 5.** İniş platformlarına uzaklık.

1.İniş Platformun a Uzaklık	17m	6m	17m	2m	21m
2.İniş Platformun a Uzaklık	4m	21m	5m	26m	7m
İHA'nın Tercihi	2. İniş P.	1. İniş P.	2. İniş P.	1. İniş P.	2. İniş P.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Rotadaki seyir sırasında anlık olarak toplanan verilerle, İHA'nın en yakın iniş istasyonuna doğru seyahat ederken tüketebileceği batarya seviyesi tahmin edilmiştir. İHA'nın benzer rotalardan geçişi göz önüne alınarak, bu tahminde en başarılı sonuca multi lineer regresyon ile ulaşılmıştır.

İHA'nın iniş noktasına doğru batarya seviyesi miktarının tahmini için, daha önce kaydedilen iniş verileri kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilen lineer regresyon yöntemi tercih edilmiştir.

Araştırmanın sonuçlarını gözlemek adına farklı irtifa ve batarya seviyelerinde gerçekleştirilen test uçuşları yapılmıştır.

Süreçte İki farklı amaç için kullanılan lineer regresyon tahmin algoritmaları ile başarılı sonuçlar elde edildiği İHA'nın yere inişi ile istenilen ve elde edilen batarya seviyesi arasındaki farkların %0 ve %3 gibi küçük yüzdelere sahip olmasından anlaşılmaktadır.

Çalışma da uçuş esnasında uçuş kartından elde edilen batarya seviyelerinin 0 ile 100 arasında tam sayılar şeklinde olması ve geçiş noktaları arasındaki mesafenin kısa olması nedeniyle tahminlerde küçük sapmalar oluşması muhtemeldir. Bu tür bir araştırmanın geniş bir çalışma sahasında gerçekleştirilmesinin daha faydalı olacağı düşünülmektedir.

#### Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışma yüksek lisans öğrencisi olan birinci yazarın tezinin bir parçasını oluşturmaktadır.

#### Yazarların Katkısı

Birinci yazar: Literatür taraması, analiz ve yorumlama, görselleştirme, makale yazma.

İkinci yazar: Düzenleme, kontrol, makale yazma.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- Alyassi, R., Khonji, M., Karapetyan, A., Chau, S., C. -K., Elbassioni, K., & Tseng, C. -M., (2023). Autonomous Recharging and Flight Mission Planning for Battery-Operated Autonomous Drones. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 1034-1046, April 2023, doi: 10.1109/TASE.2022.3175565.
- Amanor-Boadu, J. M., & Guiseppi-Elie, A. (2020). Improved performance of li-ion polymer batteries through improved pulse charging algorithm. *Applied Sciences*, 10(3), 895.
- Boon, M. A., Drijfhout, A. P., & Tesfamichael, S. (2017). Comparison of a fixed-wing and multi-rotor UAV for environmental mapping applications: A case study. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 47-54.
- Çaşka, S. ve Gökçe, B. (2023). Mikro İnsansız Hava Aracı İçin Batarya Tüketim Modelinin Elde Edilmesi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 252-258.
- Galeotti, M., Cinà, L., Giammanco, C., Cordiner, S., & Di Carlo, A. (2015). Performance analysis and SOH (state of health) evaluation of lithium polymer batteries through electrochemical impedance spectroscopy. *Energy*, 89, 678-686.
- Kardasz P, Doskocz J, Hejduk M, Wiejkut P, Zarzycki H. (2016). Drones and Possibilities of Their Using. *J Civil Environ Eng* 6: 233.
- Kutlu, G. (2024). *Döner kanat İHA'ların şarj durumlarına göre uygun platforma görüntü işleme teknikleri ile inişi* (Yüksek lisans tezi). Mersin Üniversitesi, (Tez No: 865542). YÖK Ulusal Tez Merkezi.

- Lee, J. H., & Lee, I. S. (2021). Lithium battery SOH monitoring and an SOC estimation algorithm based on the SOH result. *Energies*, 14(15), 4506.
- Makineci, H. B., Hüsrevoğlu, M., & Karabörk, H. (2022). Estimation of UAV flight time and battery consumption for photogrammetric application using multiple machine learning algorithms. *Engineering Research Express*, 4(025050). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac7a0b>
- Pattarakunnan, K., Galos, J., Das, R., & Mouritz, A. P. (2021). Impact damage tolerance of energy storage composite structures containing lithium-ion polymer batteries. *Composite Structures*, 267, 113845.
- Praselia, A. S., Wai, R.-J., Wen, Y.-L., & Wang, Y.-K. (2019). Mission-Based Energy Consumption Prediction of Multirotor UAV. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 33055-33063, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903644.
- Tezde, E. İ., & Okumuş, H. İ. (2018). Batarya modelleri ve şarj durumu (SoC) belirleme. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(1), 21-25.
- Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Zbigniew, B., & Bocewicz, G. (2019). Energy consumption in unmanned aerial vehicles: A review of energy consumption models and their relation to the UAV routing. In *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology-ISAT 2018: Part II* (pp. 173-184). Springer International Publishing.
- Yiğit, E., Yazar, İ. & Karakoç, T. H. (2018). İnsansız hava araçları (iha)'nın kapsamlı sınıflandırması ve gelecek perspektifi. *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 3 (1), 10-19.
- Zhao, T., & Li, W. (2022). Design configuration and technical application of rotary-wing unmanned aerial vehicles. *Mechatronics and Intelligent Transportation Systems*, 1(1), 69-85.



© Author(s) 2024.

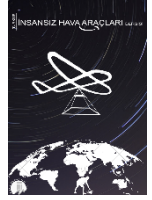
This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



## Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



# İnsansız Hava Aracı Kullanarak Toprak Neminin Mısır Tarlası Örneğinde Haritalanması

Fizyon Sönmez Erdoğan<sup>1\*</sup>, Mehmet Akif Erdoğan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, 31060, Hatay, Türkiye;  
(fizyon.sonmezerdogan@mku.edu.tr; maerdogan@mku.edu.tr)



Sorumlu Yazar:  
fizyon.sonmezerdogan@mku.edu.tr

### Araştırma Makalesi

**Alıntı:** Erdoğan, F. S. & Erdoğan, M. A. (2024). İnsansız Hava Aracı Kullanarak Toprak Neminin Mısır Tarlası Örneğinde Haritalanması. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 63-71.

Geliş : 31.05.2024  
Revize : 05.08.2024  
Kabul : 05.11.2024  
Yayınlama : 31.12.2024

### Özet

Bu çalışma mısır ekili bir parsel örneğinde insansız hava aracı kullanımı, uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla toprak neminin konumsal olarak tahmini amaçlamıştır. Dijital nem ölçer ile toplanan toprak nemi ölçümleri ile İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemine entegre bir multispektral sensör kullanılarak üretilen ortomozaik görüntüsü ve de bu görüntüden üretilen vejetasyon indislerinin girdi olarak kullanıldığı çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile toprak nemi tahmini gerçekleştirilmiştir. Üretilen sekiz vejetasyon indisi içinden %90 güven aralığına gerçekleştirilen geriye adım çoklu doğrusal regresyon analizi sonucunda önem seviyesinde çıkan kızıl eşik ve yakın kızıl ötesi bantlar ile ARVI, NDVI, kızıl eşik EVI ve kızıl eşik SAVI katmanlarından toprak nemi tahmin denklemi ( $R^2: 0,81$ ) oluşturulmuştur. Elde edilen tahmin denklemi kullanılarak tüm tarla için toprak nemi haritalanmış ve yapılan doğruluk testine göre  $R^2$  değeri 0,74 olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuç literatürde mısır ürünü için yapılan dünyanın farklı bölgelerinden benzer birkaç çalışma ile yakın doğruluk oranları sergilemekle beraber kullanılan sensör özellikleri, görüntü alım tarihleri ve vejetasyon indis kombinasyonları farklılık göstermektedir. Tüm bu sonuçlar göstermiştir ki uzaktan algılama, coğrafi bilgi sistemleri ve insansız hava aracı teknolojilerinin birlikte kullanılmasıyla çok daha ekonomik ve hızlı bir şekilde toprak neminin konumsal olarak tahmin edilmesi ve haritalanmasını olası hale getirmiştir. Bu durum aynı zamanda daha etkin tarımsal sulama planlamasına da yol açacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Hassas tarım, toprak nemi, uzaktan algılama, vejetasyon indeksleri, insansız hava aracı.

## Mapping of Soil Moisture Using an Unmanned Aerial Vehicle in a Maize Field

\*Corresponding Author:  
fizyon.sonmezerdogan@mku.edu.tr

### Research Article

**Citation:** Erdoğan, F. S. & Erdoğan, M. A. (2024). Mapping of Soil Moisture Using an Unmanned Aerial Vehicle in a Maize Field. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 63-71 (in Turkish).

Received : 31.05.2024  
Revised : 05.08.2024  
Accepted : 05.11.2024  
Published : 31.12.2024

### Abstract

This study aimed to estimate soil moisture spatially by using unmanned aerial vehicle, remote sensing and geographical information systems in a maize-cultivated parcel. The ortho-mosaic image created by a multispectral sensor integrated into the UAV system, the vegetation indices derived from this image, and the soil moisture measurements made using a digital moisture meter were utilized as inputs to predict soil moisture using a linear stepwise multiple regression method. A backward stepwise linear multiple regression at a 90% confidence interval among the eight vegetation indices that were produced led to the formation of the soil moisture prediction equation ( $R^2: 0.81$ ), which was derived from the red edge and near-infrared bands, ARVI, NDVI, red edge EVI, and red edge SAVI indices. Soil moisture was mapped for the entire field using the obtained prediction and the accuracy test revealed an  $R^2$  value of 0.74. The sensor characteristics, image capture dates, and combinations of vegetation indexes used vary, although the result is nearly identical to the accuracy rates of multiple comparable studies from various regions of the world for maize crop in the literature. These findings demonstrate that the integration of unmanned aerial vehicle (UAV) technologies, geographic information systems, and remote sensing has enabled faster and more cost-effective spatial estimation and mapping of soil moisture. Additionally, this will result in more effective irrigation planning for agriculture.

**Keywords:** Precision agriculture, soil moisture, remote sensing, vegetation indices, unmanned aerial vehicle.

## 1. Giriş

Tarımsal üretimin temel amacı birim alandan sürdürülebilir şekilde maksimum verimi elde etmektir (Cassman vd., 2010; Pretty vd., 2018; Şenol, 2021; Uslu ve Apaydın, 2021). Verim artışı sağlamanın başlıca yollarından biri de doğru zamanda doğru yerde ve doğru miktarda yapılan uygulamaları içeren tarımsal faaliyet planlaması yapmaktır (Pinter vd., 2003; Godfray vd., 2010; Tilman vd., 2011; Mulla, 2013; Ozdogan vd., 2011).

Söz konusu planlamanın en önemli parçalarından biri ise sulama yönetimidir. Su yenilenebilir bir kaynaktır ancak bulunabilirliği değişken ve sınırlıdır (Pimentel vd., 1997; Alcamo vd., 2003; Steduto vd., 2012; Foster 2015). Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin en önemli sonuçlarından biri de su kaynaklarının azalması olarak görülmektedir (Karaman ve Gökalp, 2010; Schewe vd., 2014; Gosling ve Arnell, 2016). Ekolojik dengenin korunması ve insan topluluklarının sürdürülebilir gelişiminin sağlanması için, su kaynaklarının bugün ve gelecekteki gereksinimleri karşılayabilecek en akılcı şekilde kullanılması gerekmektedir (Wada vd., 2014; Boretti ve Rosa, 2019; Yetkin ve Aşık, 2021). Söz konusu akılcı kullanım su ile direk etkileşimli olan başta tarım olmak üzere birçok soyo-ekonomik faaliyet ve sektör için zorunluluğa dönüşmüş durumdadır.

Dünyanın toplam yüzeyi 510 milyon km<sup>2</sup> olup bunun yaklaşık %71'i sularla kaplıdır. Dünyadaki toplam su miktarı 1,4 milyar km<sup>3</sup> olup, % 97,5'i okyanuslarda ve denizlerde tuzlu su olarak, % 2,5'i nehir ve göllerde tatlı su olarak bulunmaktadır (Karaman ve Gökalp, 2010; UNESCO, 2020). Dünya üzerindeki mevcut su varlıklarının sektör bazında kullanımı dikkate alındığında tarımsal faaliyetlerin sahip olduğu su kullanım oranının yaklaşık %70 olduğu görülmektedir (Yetkin ve Aşık, 2021). Mevcut suyun %70'ini kullanan tarım sektöründe suyun doğru miktarda kullanımı küresel anlamda suyun sürdürülebilirliği adına en belirgin farkı yaratacaktır. Tarımda suyun etkili kullanımının en önemli aşamalarından biri ise bitkinin su ihtiyacının ürün verimliliğini düşürmeden en ideal miktarda yani optimal kullanımının belirlenmesi olarak görülmekte olup bu da etkin tarımsal sulama planlamasını işaret etmektedir (Çakmak ve Gökalp, 2011; Molden vd., 2010; Gu vd., 2020).

Toprak neminin devamlılığı ortamda büyüyen bitkilerin ihtiyaç duydukları su ihtiyacının devamlılığının sağlanması, ürün kayıplarının önlenmesi ve üretimin sürekliliğinin sağlanması açısından son derece önemlidir (Mueller vd., 2012; Gaikwad vd., 2015; Han vd., 2023). Bunu sağlamak ise toprak neminin doğru ölçümü ile gerçekleştirilecek

olan periyodik izlemeyi içeren sulama planlaması ile çok daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Toprak neminin tahmini ise sulama programları ve yönetimi, bitkinin su ihtiyacının karşılanması, faydalı gübre uygulamaları, su kaynaklarının verimli kullanılması gibi birçok süreç ve zirai uygulama için büyük öneme sahiptir (Çetin, 2003; Reichle vd., 2022; Liu vd., 2023). Bu kapsamda gerçekleştirilmesine ihtiyaç duyulan toprak neminin geleneksel yöntemler ile geniş araziler üzerinde gravimetrik teknikleri ve noktasal ölçüm aletleri ile ölçülmesi zaman alıcı, masraflı ve yoğun bir emek gerektiren bir iştir (Sıraç ve Acar, 2017). Bu noktada uzaktan algılama tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte geniş araziler üzerinde daha kısa sürede daha düşük maliyetli olarak toprak nemi tahmin edilebilmektedir (Wagner vd., 1999; Entekhabi vd., 2010; Dorigo vd., 2017; Li vd., 2024).

Hassas tarım uygulamalarında İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanılması, İHA teknolojileri ve bu cihazlara takılacak kameraların hafiflemesi ve gelişmesi ile ivme kazanmıştır. Yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüğü daha elverişli hale getiren İHA teknolojisi yüksek çözünürlük ihtiyacı gerektiren tarımsal uygulamalar için avantaj sağlamaktadır (Hunt Jr vd., 2010; Teke vd., 2016; Xue ve Su, 2017; Radočaj vd., 2023). İHA tabanlı uzaktan algılama sistemlerinin geliştirilmesi, uzaktan algılama ve hassas tarımı bir adım öteye taşımıştır. Bitkileri izlemek için İHA'ların kullanılması, önceki yöntemlere kıyasla arazi verilerini kolay, hızlı ve uygun maliyetli bir şekilde elde etmek için büyük imkanlar sağlamaktadır (Akkamış ve Çalışkan, 2020; Gül vd., 2021). Özellikle İHA'lara entegre edilebilen görünür bantlara ek olarak yakın kızıl ötesi ve kızıl eşik gibi bantlardan da görüntü alabilen multispektal sensörlerin kullanılmasıyla daha yüksek yersel, radyometrik ve zamansal çözünürlüğü olan görüntülerin çok daha ekonomik ve hızlı bir şekilde temin edilebilmesi tarımsal alanlarda toprak nemi gibi yüksek yersel ve zamansal detay isteyen parametrelerin daha etkili tespitinin önünü açmaktadır (Hunt Jr vd., 2010; Zhang ve Kovacs, 2012; Toscano vd., 2024).

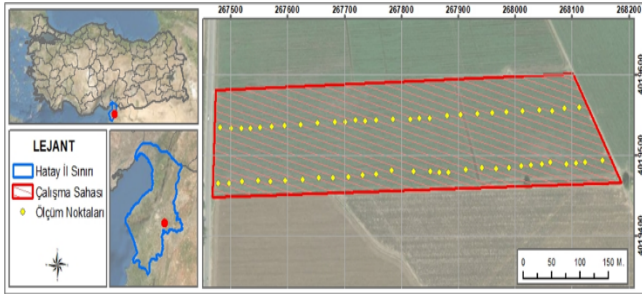
Etkin tarımsal sulama planlaması ise daha bütüncül izleme ile mümkün olmaktadır. Tarımsal sulama planlaması için yapılan geleneksel izleme yaklaşımı ya tarladan çıplak gözle yorum yapma ya da tarlanın belli noktalarına yerleştirilen toprak nemi sensörleri ile yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar genel anlamda yüksek maliyetli, zaman alıcı, kısıtlı alana dair bilgi vermesi ve düşük doğrulukta olması nedeniyle etkin sulama yönetimi adına kısıtlı bir olanak sağlamaktadır (Mouazen ve Shi, 2021; Liu vd., 2023; Soussi vd., 2024). Ancak uzaktan algılama tekniklerinin kullanılmasıyla birlikte geniş araziler üzerinde daha kısa sürede, daha düşük maliyetli, daha

yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilebilmektedir (Hajnsek vd., 2009). Bunu ortaya koymak adına bu çalışma ile Amik ovasında yer alan bir mısır tarlası örneğinde İHA ile alınmış uzaktan algılama görüntüleri kullanılarak toprak nemi Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında modellenerek tahmin edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metod

### 2.1. Çalışma Alanı ve Arazi Çalışması

Çalışma alanı Hatay sınırları dahilinde yer alan Amik Ovası'nda 2020 yılında mısır ekimi yapılan bir tarım parselidir. Çalışma alanı olan mısır tarlası ovanın orta-güney kesiminde yer almakta olup 97 dekar alana sahiptir (Şekil 1).



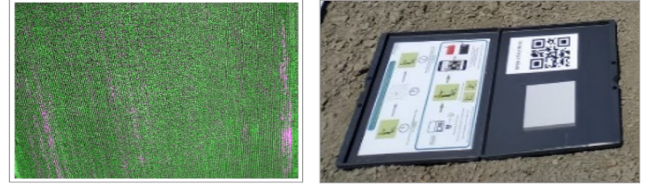
Şekil 1. Çalışma sahası ve toprak nemi ölçüm noktaları.



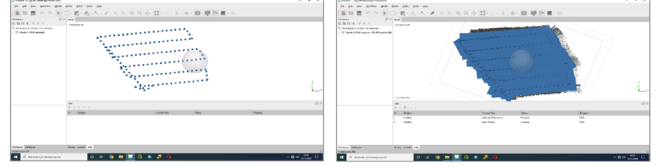
Şekil 2. Toprak Nemi ölçümü (a), DJI Phantom 4 Pro'ya entegre Micasense 3 (b).

### 2.2. Veri Ön İşleme

Doğrulama verisi tesadüfi olarak %70-%30 oranında eğitim ve test verilerine ayrılmıştır. Uçuş sonrası temin edilen 635 adet ham görüntü çerçeveleri (Şekil 3a) Agisoft Metashape 1.7 yazılımı kullanılarak ortomozaik görüntüye dönüştürülmüştür. Bu süreçte öncelikle olası atmosferik etkilerin giderilmesi ve uçuş anındaki ışığın şiddetinin ayarlanması için Micasense 3 ile entegre çalışan ışık sensörü tarafından görüntü alımı sırasında eş zamanlı olarak her çerçeve için kaydedilen ışık şiddeti kayıtları kullanılarak radyometrik düzeltme/kalibrasyon işlemi uygulanmıştır (Şekil 3). Buna ek olarak uçuş öncesi ışık reflektöründen kaydedilen görüntüler de kalibrasyon sürecine entegre edilmiştir.

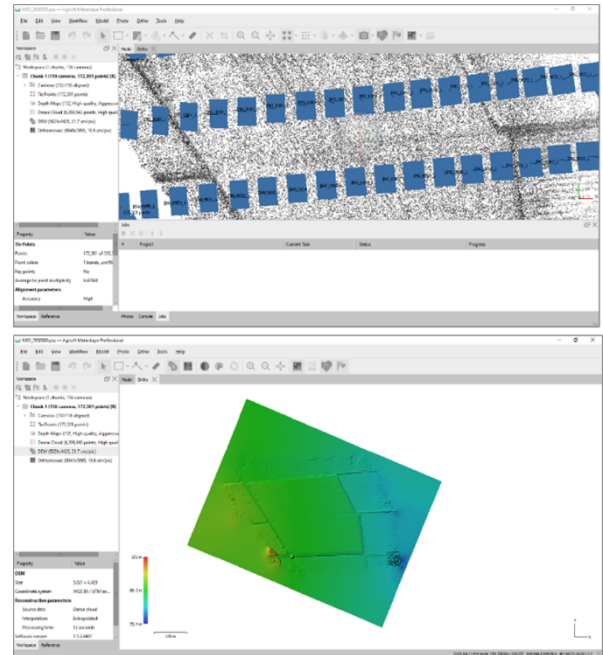


Şekil 3. Örnek bir görüntü çerçevesi (a), ışık reflektörü (b).



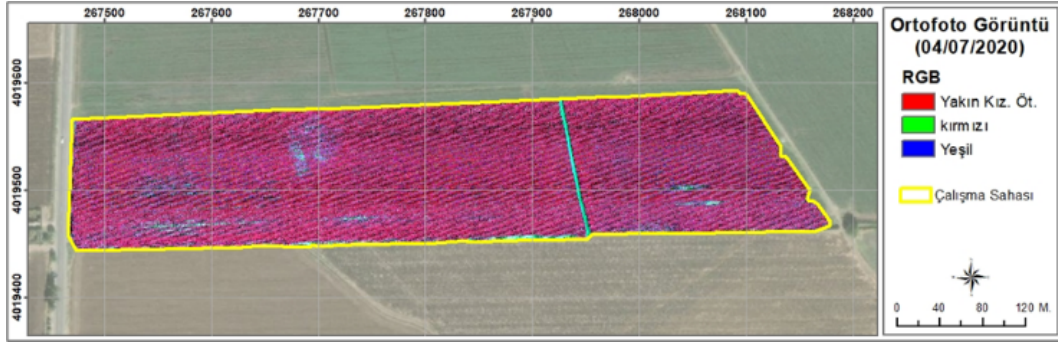
Şekil 4. Agisoft Metashape 1.7 (a) görüntü alım merkez noktaları, (b) hizalanmış görüntüler.

Konumsal olarak uyumlu hale getirilen görüntü taranıp aynı konuma ait farklı görüntüler arasındaki açı farklılıkları kullanılarak her konum için yükseklik bilgisini içeren dense cloud (nokta yükseklik bulutu) verisi üretilmiştir. Üretilen nokta bulutu verisi format dönüşümü yapılarak her konum için piksel tabanlı (raster) yükseklik verisi olan SYM (Sayısal Yüksekli Modeli) verisi üretilmiştir (Şekil 5).



Şekil 5. Agisoft Metashape 1.7 (a) nokta bulutu üretimi, (b) SYM verisi üretimi.

Konumsal olarak uyumlu hale getirilen görüntü çerçeveleri mozaik işlemi ile konumsal olarak birleştirilerek tek bir görüntüye çevrilmiş ve sonrasında üretilen SYM verisi kullanılarak alınan alana göre kesilerek ortomozaik (yüksekliğe göre kalibre edilmiş koordinatlı) görüntü üretilmiştir (Şekil 6). Üretilen ortomozaik görüntüsünün nihai yersel çözünürlüğü 10cm/piksel olacak şekilde beş banttan (mavi, yeşil, kırmızı, KE ve YKÖ) oluşmaktadır.



Şekil 6. Üretilen İHA ortomozaik görüntüsü.

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Analiz ve Modelleme

Farklı ürünler bazında tarımsal alanlarda toprak neminin hesaplanmasında girdi verisi olarak sadece NDVI (Adegoke vd., 2002; Ahmad vd., 2010; Saha vd., 2018), birden çok bitki indeksi (Hosseini ve Saradjian, 2011; Ainiwaer vd., 2020) kullanılan gerçekleştirilen toprak nemi tahmin çalışmaları vardır. Ancak mısır ekili bir tarla örneğinde birden çok bitki indeksi (kızıl eşik bitki indeksleri de dahil) ile toprak neminin hesaplanarak haritalandığı ilk örnek olarak bu çalışmada; İHA ile üretilen ortomozaik görüntüsünden üretilen; Normalize Edilmiş Vejetasyon Fark İndeksi (NDVI), Geliştirilmiş Vejetasyon İndeksi (EVI), Atmosfer Dirençli Vejetasyon İndeksi (ARVI), Toprak Ayarlı Vejetasyon İndeksi (SAVI) ve bu indekslerin YKÖ bant yerin KE bant kullanılarak üretilmesiyle elde edilen varyasyonları ile birlikte Çizelge 1’de kısa açıklamaları ve denklemleri verilen sekiz adet vejetasyon indeksi kullanılmıştır (Şekil 7). Elde edilen ilgili bitki indeksleri ile mısır için daha önce farklı çalışmalarla üretilen indeksler benzer ve yakın değerler üretilmiştir (Myers vd., 2019; Barzin vd., 2020; García-Martínez vd., 2020; Hoss vd., 2020).

Doğrulama verisinden eğitim için ayrılan 42 konuma ait toprak nem yer ölçüm değerlerinin bağımsız değişken ve zonal istatistik ile merkezi bu

konumlar olan 5 metre çaplı dairelerdeki beş yansıma bant ve sekiz vejetasyon indeksi ortalama değerleri ise bağımsız değişken olarak kullanılarak geriye adım çoklu doğrusal regresyon uygulanmıştır. Elde edilen sonuca göre mavi, yeşil, kırmızı bantlar ve EVI, kızıl eşik NDVI ve ARVI katmanları istatistiksel olarak %90 güven aralığına göre önemsiz bulunarak modelden çıkarılmış ve nihayi olarak önem seviyesinde olan KE, YKÖ bantlar ile ARVI, NDVI, kızıl eşik EVI ve SAVI katmanları ile oluşan Denklem 1’deki modele ( $R^2=0,81$ ) ulaşılmıştır. İlgili eşitlik CBS ortamında ilgili bantlara uygulanarak tarladaki anlık toprak nemi bir görüntü olarak üretilmiş ve haritaya dönüştürülmüştür (Şekil 8).

$$TN=KE*(-0.13)+YKÖ*0.11+ARVI*(-679.59)+NDVI*(-1364.84)+EVI*264.71+SAVI*1214.96+50.62 \quad (1)$$

Burada:

TN: Toprak nemi (%),

KE: Kızıl eşik değeri,

YKÖ: Yakın kızılötesi değeri,

ARVI: Atmosfer dirençli vejetasyon indeks değeri,

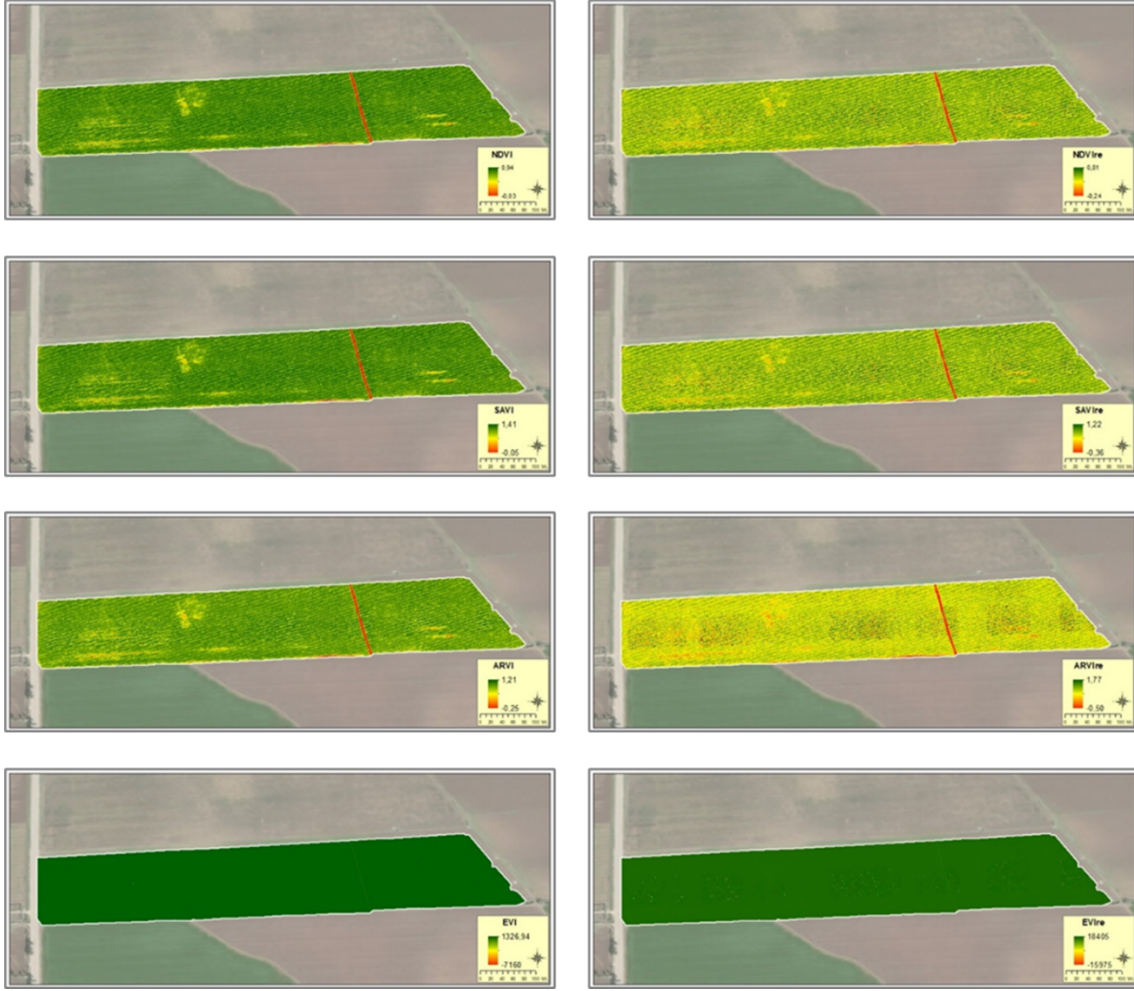
NDVI: Normalize edilmiş vejetasyon fark indeksi değeri,

EVI: Kızıl eşik geliştirilmiş vejetasyon indeksi değeri,

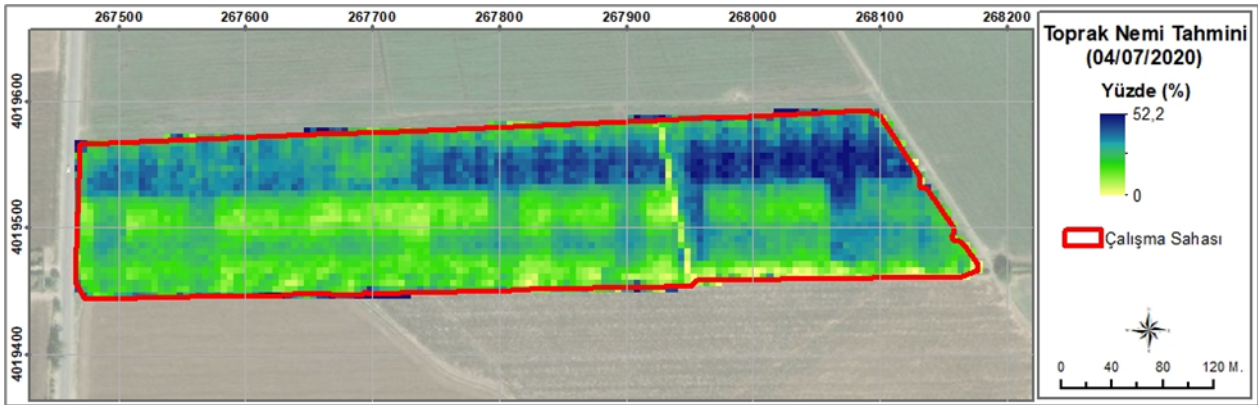
SAVI: Kızıl eşik toprak Ayarlı vejetasyon indeksi değeridir.

**Table 1.** Vejetasyon İndeksleri ve Açıklamaları.

Vejetasyon İndeksleri ve Açıklamaları	Denklemler
Normalize Edilmiş Vejetasyon Fark İndeksi (NDVI): Krolofilin en yüksek absorbe edildiği ve yansıtıldığı bandların normalize edilmiş oranlanması ile elde edilir. Bitki canlılığını ve yoğunluğunu ifade eder (Rouse vd., 1974; Tucker, 1979; Groten 1993).	$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
Geliştirilmiş Vej. İndeksi (EVI): Toprak arka plan yansımalarının ve atmosferik etkilerin azaltılması için mavi bandın kullanıldığı, NDVI’ın geliştirilmiş halidir (Liu ve Haas, 1995; Matsushita vd., 2007).	$EVI = 2.5 \left( \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE}} \right)$
Atmosfer Dirençli Vej. İndeksi (ARVI): Aerosol gibi atmosferik etkilerin giderilmesi adına kırmızı bandı mavi band ile normalize eden NDVI’ın geliştirilmiş halidir. Özellikle Çukurova gibi yüksek nemli bölgelerde daha etkin sonuçlar üretir (Kaufman ve Tanre, 1992; Huete vd., 1997).	$ARVI = \frac{\rho_{NIR} - (2\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}{\rho_{NIR} + (2\rho_{RED} - \rho_{BLUE})}$
Toprak Ayarlı Vej. İndeksi (SAVI): Vejetasyon kapalılığının az, toprak yapısının çeşitli olduğu alanlarda kırmızı ve yakın kızılötesindeki yansıma değerlerindeki farklılığı ayarlayarak toprak etkisini ortadan kaldıran bir kombinasyondur (Huete, 1988; Rondeaux vd., 1996).	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$



Şekil 7. Vejetasyon indeksleri.



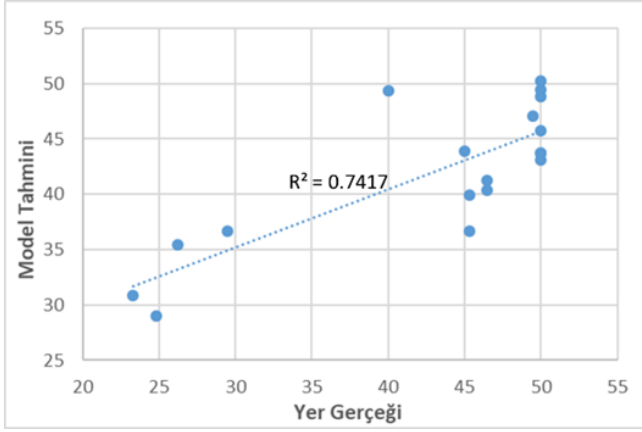
Şekil 8. Toprak nemi tahmin görüntüsü.

Mısır ekili bir tarla örneğinde toprak neminin ortomozaik bantları ve bitki indeksleri üzerinden geriye adım çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile hesaplandığı benzer bir çalışma bulunmamaktadır. Ancak Schwalbert vd. (2018) tarafından yapılan mısır rekoltesini benzer girdiler ve yöntemle hesaplandığı çalışmanın nihai dekleminde, bu çalışma ile benzer şekilde NDVI ve YKÖ açıklayıcı değişkenler olarak bulunmuştur. Zang vd. (2022) ise yaptığı çalışmada mısırın yaprak alan indeksini benzer yöntem ve veri seti ile tahmin etmeye çalışmış ve NDVI, NDVIre ve SAVIre bu çalışma ile ortak açıklayıcı değişkenler

olarak bulunmuştur. Bunlara ek olarak benzer veri seti ve yöntemle mısırdaki rekolte tahmin etmeyi amaçlayan; Gracia-Romero vd. (2017) nihai denkleminde EVI'yi, Jiang vd. (2019) ise SAVI indeksini bu çalışma ile benzer şekilde nihai açıklayıcı değişkenlerden biri olarak belirlemiştir.

Doğrulama verisinden doğruluk analizi için ayrılan 18 örnekleme sahip veri setinin konumları baz alınarak zonal istatistik uygulanarak doğrulama ve tahmin verilerini içeren bir test veri seti üretilmiştir. Bu veri seti ile tahmin ve doğrulama verileri arasındaki korelasyon hesaplanmış ve  $R^2$  değeri 0,74 olarak

bulunmuştur (Şekil 9). Mısır özelinde torak neminin bitki indeksleri kullanılarak tahmin edildiği bir başka çalışma olmasa da benzer girdi verileri ve yöntem ile torak nemini; çalı tipi bitkilerin bulunduğu tarım alanlarında tahmin eden Liang vd. (2020) çalışmalarında doğrulukğu  $R^2=0,61$  ve çok ürünli geniş bir alanda tahmin eden Qiu vd. (2019) ise  $R^2=0,8$  olarak bulmuşlardır.



Şekil 9. Toprak nemi için yer gerçeği ve model tahmini karşılaştırma grafiği.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada mısır ekili alanlar için İHA üzerinde taşınan multispektral bir kamera ile elde edilen görüntü ve bu görüntü kullanılarak üretilen vejetasyon indekslerinin uzaktan algılama yardımı ve CBS ortamında bir arada değerlendirilmesiyle toprak nemi tahmini gerçekleştirilmiştir. Buna göre görünür, KE ve YKÖ bantları içeren bir görüntünün uygun sensör ve İHA kombinasyonu ile alınabileceği ve amaca uygun yeterlilikte yüksek çözünürlüklü görüntü üretilebileceği ortaya koyulmuştur. Buna ek olarak geriye adım çoklu doğrusal regresyon ile hem girdi verilerinin elenmesi suretiyle işlem yükünün azaltılması hem de görece yeterli doğrulukta toprak neminin tahmin edilebileceği görülmüştür.

#### Bilgilendirme/Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan veri setleri TÜBİTAK 1512 - BİGG Teknogirişim Sermaye Desteği Programı Aşama 2 kapsamında desteklenen 2190170 numaralı ve "AGRONE: Tarımsal İzleme Bilgi Paketi Geliştirilmesi" başlıklı proje kapsamında üretilmiş olup ilgili proje kapsamında kurulan Geodynamic Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Danışmanlık Ltd. Şti.'nin izniyle kullanılmıştır.

#### Yazarların Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- Adegoke, J. O., & Carleton, A. M. (2002). Relations between soil moisture and satellite vegetation indices in the US Corn Belt. *Journal of Hydrometeorology*, 3(4), 395-405.
- Ahmad, S., Kalra, A., & Stephen, H. (2010). Estimating soil moisture using remote sensing data: A machine learning approach. *Advances in Water Resources*, 33(1), 69-80.
- Ainiwaer, M., Ding, J., Kasim, N., Wang, J., & Wang, J. (2020). Regional scale soil moisture content estimation based on multi-source remote sensing parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 41(9), 3346-3367.
- Akkamış, M., & Çalışkan, S. (2020). İnsansız Hava Araçları ve Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 8-16.
- Alcamo, J., Döll, P., Henrichs, T., Kaspar, F., Lehner, B., Rösch, T., & Siebert, S. (2003). Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), 317-337.
- Barzin, R., Pathak, R., Lotfi, H., Varco, J., & Bora, G. C. (2020). Use of UAS multispectral imagery at different physiological stages for yield prediction and input resource optimization in corn. *Remote Sensing*, 12(15), 2392.
- Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 15.
- Çakmak, B., & Gökalp, Z. (2011). İklim değişikliği ve etkin su kullanımı. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, (1), 87-95.
- Cassman, K. G., Grassini, P., & van Wart, J. (2010). Crop yield potential, yield trends, and global food security in a changing climate. In *Handbook of Climate Change and Agroecosystems* (pp. 37-51). London: Imperial College Press.
- Çetin, Ö. (2003). Toprak-su ilişkileri ve toprak suyu ölçüm yöntemleri. *Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Eskişehir Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü*, Genel Yayın (258), 100.
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., & Lecomte, P. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the-art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215.



- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., & Van Zyl, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- Foster, T., Brozović, N., & Butler, A. P. (2015). Why well yield matters for managing agricultural drought risk. *Weather and Climate Extremes*, 10, 11-19.
- Gaikwad, P., Devendrachari, M. C., Thimmappa, R., Paswan, B., Kottaichamy, A. J., Kotresh, H. M. N., & Hotiyl, M. O. (2015). Galvanic cell type sensor for soil moisture analysis. *Analytical Chemistry*, 87(14), 7439-7445.
- García-Martínez, H., et al. (2020). Corn grain yield estimation from vegetation indices, canopy cover, plant density, and a neural network using multispectral and RGB images acquired with unmanned aerial vehicles. *Agriculture*, 10(7), 277.
- Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., & Toulmin, C. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818.
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134, 371-385.
- Gracia-Romero, A., Kefauver, S. C., Vergara-Díaz, O., Zaman-Allah, M. A., Prasanna, B. M., Cairns, J. E., & Araus, J. L. (2017). Comparative performance of ground vs. aerially assessed RGB and multispectral indices for early-growth evaluation of maize performance under phosphorus fertilization. *Frontiers in Plant Science*, 8, 2004.
- Groten, S. M. E. (1993). NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *Remote Sensing*, 14(8), 1495-1515.
- Gu, Z., Qi, Z., Burghate, R., Yuan, S., Jiao, X., & Xu, J. (2020). Irrigation scheduling approaches and applications: A review. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(6), 04020007.
- Gül, S., Güzey, Y. Z., Yıldırım, H., & Keskin, M. (2021). Eye of the farmer in the sky: Drones. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 3(2), 69-77. <https://doi.org/10.51534/tiha.943842>
- Hajsek, I., Jagdhuber, T., Schon, H., & Papathanassiou, K. P. (2009). Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of PolSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 442-454.
- Han, Y., Qiao, D., & Lu, H. (2023). Spatial-temporal coupling pattern between irrigation demand and soil moisture dynamics throughout wheat-maize rotation system in the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 151, 126970.
- Hoss, D. F., Luz, G. L. D., Lajús, C. R., Moretto, M. A., & Tremea, G. A. (2020). Multispectral aerial images for the evaluation of maize crops. *Ciência e Agrotecnologia*, 44, e004920.
- Hosseini, M., & Saradjian, M. R. (2011). Multi-index-based soil moisture estimation using MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6799-6809.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. V., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440-451.
- Hunt Jr, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S. J., Linden, D. S., Daughtry, C. S., & McCarty, G. W. (2010). Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290-305.
- Jiang, G., Grafton, M., Pearson, D., Bretherton, M., & Holmes, A. (2019). Integration of precision farming data and spatial statistical modelling to interpret field-scale maize productivity. *Agriculture*, 9(11), 237.
- Karaman, S., & Gökalp, Z. (2010). Küresel Isınma ve İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerine Etkileri. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 59-66.
- Kaufman, Y. J., & Tanré, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.
- Li, N., Skaggs, T. H., Ellegaard, P., Bernal, A., & Scudiero, E. (2024). Relationships among soil moisture at various depths under diverse climate, land cover, and soil texture. *Science of The Total Environment*, 174583.
- Liang, M., Pause, M., Prechtel, N., & Schramm, M. (2020). Regionalization of coarse scale soil moisture products using fine-scale vegetation indices—Prospects and case study. *Remote Sensing*, 12(3), 551.
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457-465.
- Liu, K., Li, X., Wang, S., & Zhang, H. (2023). A robust gap-filling approach for European Space Agency Climate Change Initiative (ESA CCI) soil moisture integrating satellite observations, model-driven knowledge, and spatiotemporal machine learning. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(2), 577-598.
- Liu, Q., Wu, Z., Cui, N., Jin, X., Zhu, S., Jiang, S., & Gong, D. (2023). Estimation of soil moisture using multi-source remote sensing and machine learning algorithms in farming land of Northern China. *Remote Sensing*, 15(17), 4214.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: A case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651.
- Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management*, 97(4), 528-535.

- Mouazen, A. M., & Shi, Z. (2021). Estimation and mapping of soil properties based on multi-source data fusion. *Remote Sensing*, 13(5), 978.
- Mueller, N. D., Gerber, J. S., Johnston, M., Ray, D. K., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2012). Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 490(7419), 254-257.
- Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.
- Myers, E., Kerekes, J., Daughtry, C., & Russ, A. (2019). Assessing the impact of satellite revisit rate on estimation of corn phenological transition timing through shape model fitting. *Remote Sensing*, 11(21), 2558.
- Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., & Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. *Remote Sensing*, 2(9), 2274-2304.
- Pimentel, D., Houser, J., Preiss, E., White, O., Fang, H., Mesnick, L., & Alpert, S. (1997). Water resources: agriculture, the environment, and society. *BioScience*, 47(2), 97-106.
- Pinter Jr, P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S., & Upchurch, D. R. (2003). Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 647-664.
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441-446.
- Qiu, J., Crow, W. T., Wagner, W., & Zhao, T. (2019). Effect of vegetation index choice on soil moisture retrievals via the synergistic use of synthetic aperture radar and optical remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80, 47-57.
- Radočaj, D., Šiljeg, A., Marinović, R., & Jurišić, M. (2023). State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in Web of Science: A review. *Agriculture*, 13(3), 707.
- Reichle, R. H., Ardizzone, J. V., Kim, G. K., Lucchesi, R. A., Smith, E. B., & Weiss, B. H. (2022). Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission level 4 surface and root zone soil moisture (L4\_SM) product specification document.
- Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95-107.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Saha, A., Patil, M., Goyal, V. C., & Rathore, D. S. (2018). Assessment and impact of soil moisture index in agricultural drought estimation using remote sensing and GIS techniques. In *Proceedings* (Vol. 7, No. 1, p. 2). MDPI.
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., & Kabat, P. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3245-3250.
- Schwalbert, R. A., Amado, T. J., Nieto, L., Varela, S., Corassa, G. M., Horbe, T. A., & Ciampitti, I. A. (2018). Forecasting maize yield at field scale based on high-resolution satellite imagery. *Biosystems Engineering*, 171, 179-192.
- Şenol, C. (2021). Innovation, support, sustainability: Turkish economy and agriculture. *International Journal of Geography and Geography Education (IGGE)*, 44, 475-788.
- Sıraç, M., & Acar, E. (2017). Toprak nemi tahmini için Radarsat-2 verisinden çoklu saçılma katsayılarının elde edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 8(4), 759-766.
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water* (Vol. 1028, p. 99). Rome, Italy: FAO.
- Teke, M., Deveci, S., Öztoprak, F., Efendioğlu, M., Küpçü, R., Demirkesen, C., Şimşek, F. F., & Bayramın, İ. (2016). Akıllı tarım fizibilite projesi: hassas tarım uygulamaları için havadan ve yerden veri toplanması, işlenmesi ve analizi. 6. *Uzaktan Algılama-CBS Sempozyumu (UZALCBS 2016)*, 5-7 Ekim 2016, Adana.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260-20264.
- Toscano, F., Fiorentino, C., Capece, N., Erra, U., Travascia, D., Scopa, A., & D'Antonio, P. (2024). Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture: A Review. *IEEE Access*.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- UNESCO. (2020). *The United Nations world water development report 2020: Water and climate change*. UN.
- Uslu, H., & Apaydın, F. (2021). Türkiye'de tarımsal verimlilik ve alan bazlı desteklemeler üzerine ampirik bir uygulama. *Hitit Sosyal Bilimler Dergisi*, 14(2), 477-499.
- Wada, Y., Gleeson, T., & Esnault, L. (2014). Wedge approach to water stress. *Nature Geoscience*, 7(9), 615-617.
- Wagner, W., Lemoine, G., & Rott, H. (1999). A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191-207.

- Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1353691.
- Yetkin, A. K., & Aşık, M. (2021). Toprak Nem İçeriğinin İzlenmesi ve Tayininde Kullanılan Yöntemler. *BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 484-496.
- Yüksel, D., & İnanç, A. L. (2022). Geleneksel Yöntem ve Direkt Fermantasyon ile Üretilen Maraş Tarhanalarında Biyoaktif Peptitlerin Belirlenmesi. *KSÜ Tarım ve Doğa Dergisi*, 25(2), 357-366.

- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13, 693-712.
- Zhang, X., Zhang, K., Sun, Y., Zhao, Y., Zhuang, H., Ban, W., & Hao, Y. (2022). Combining spectral and texture features of UAS-based multispectral images for maize leaf area index estimation. *Remote Sensing*, 14(2), 331.



© Author(s) 2024.

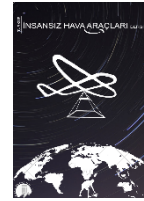
This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



## Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



# İnsansız Hava Araçlarında Titreşimlerin Rolü, Verimlilik Ölçüm Teknikleri ve Performans Etkileri

Ece Kalay <sup>1\*</sup>, İskender Özkul <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye; (ecekalay@mersin.edu.tr; iskender@mersin.edu.tr)



Sorumlu Yazar:  
ecekalay@mersin.edu.tr

### Araştırma Makalesi

**Alıntı:** Kalay, E. & Özkul, İ. (2024). İnsansız Hava Araçlarında Titreşimlerin Rolü, Verimlilik Ölçüm Teknikleri ve Performans Etkileri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 72-80.

Geliş : 31.10.2024  
Revize : 05.12.2024  
Kabul : 10.12.2024  
Yayınlama : 31.12.2024

### Özet

İnsansız hava araçlarındaki (İHA) titreşimler, uçuş kararlılığı, sensör doğruluğu ve yapısal bütünlük üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu titreşimlerin yaygın kaynakları arasında pervane dönüşü, motor dinamikleri ve aerodinamik kuvvetler bulunmaktadır. Bu titreşimlerin giderilmesi, İHA performansının ve operasyonel dayanıklılığının artırılması için gereklidir. Bu makale, titreşim dinamiklerini anlamak ve kontrol etmek için frekans analizi, mod analizi ve sonlu elemanlar analizi (SEA) gibi teorik ve deneysel titreşim analiz tekniklerini incelemektedir. Titreşim azaltma stratejileri, yapısal optimizasyon, uçuş kontrol sistemleri ve izolasyon sistemlerini içermektedir ve tüm bu stratejiler, stabilite ve dayanıklılığı artırmayı hedeflemektedir. Titreşim kaynakları ve etkilerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ile etkili mühendislik çözümlerinin uygulanması sayesinde, İHA'lar daha yüksek performans, uzun operasyonel ömür ve yüksek hassasiyet ile stabilite gerektiren sektörlerde genişletilmiş uygulama olanaklarına kavuşabilir. Sonuç olarak, titreşim azaltma yalnızca performans iyileştirmesi için değil, aynı zamanda İHA teknolojisinin zorlu ortamlarda güvenilir şekilde kullanılabilmesi için kritik bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Titreşim analizi, uçuş kararlılığı, İHA tasarımı, titreşim azaltma, dron.

## Role of Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles, Efficiency Measurement Techniques, and Performance Impacts

\*Corresponding Author:  
ecekalay@mersin.edu.tr

### Research Article

**Citation:** Kalay, E. & Özkul, İ. (2024). Role of Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles, Efficiency Measurement Techniques, and Performance Impacts. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 72-80 (in Turkish).

Received : 31.10.2024  
Revised : 05.12.2024  
Accepted : 10.12.2024  
Published : 31.12.2024

### Abstract

Vibrations in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) significantly impact flight stability, sensor accuracy, and structural integrity. Common sources of these vibrations include propeller rotation, motor dynamics, and aerodynamic forces. Mitigating these vibrations is essential for enhancing UAV performance and operational durability. This article explores theoretical and experimental vibration analysis techniques, such as frequency analysis, modal analysis, and finite element analysis (FEA), to understand and control vibration dynamics. Vibration reduction strategies encompass structural optimization, flight control systems, and isolation systems, all aimed at improving stability and durability. By accurately identifying vibration sources and effects and implementing effective engineering solutions, UAVs can achieve higher performance, extended operational life, and greater precision, enabling broader applications in industries requiring high stability. In conclusion, vibration reduction is not only crucial for performance enhancement but also for ensuring the reliable use of UAV technology in challenging environments.

**Keywords:** Vibration analysis, flight stability, UAV design, vibration reduction, drone.

## 1. Giriş

Son on yılda İHA'lara yönelik tüketici talebindeki hızlı artış, bu teknolojinin yalnızca özel bir ürün olmaktan çıkarak tarım, fotoğrafçılık, denetim ve turizm gibi birçok alanda vazgeçilmez bir araç haline gelmesini sağlamıştır. Bu artan talep, İHA teknolojisinin geniş bir yelpazede farklı ihtiyaçlara cevap verebilmesi için çeşitli modellerin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Bu modeller arasında yüksek manevra kabiliyeti ve hız sunan yarış İHA'ları, yüksek çözünürlüklü kameralarla donatılmış profesyonel çekim dronları ve tarımda verimliliği artırmayı hedefleyen hassas uygulama araçları bulunmaktadır. İHA tasarımındaki önemli ilerlemeler, yalnızca çeşitliliği değil, aynı zamanda cihazların performansını da artırmıştır. Kullanım süresini ve enerji verimliliğini önemli ölçüde geliştiren batarya iyileştirmeleri, bu gelişmeler arasında öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, gelişmiş GPS ve görüntüleme sistemleri, daha karmaşık otonom uçuşlara olanak tanıyarak, İHA'ların keşif, haritalama ve gözetim gibi görevlerdeki yeteneklerini artırmıştır. Sensör teknolojisindeki yenilikler ve yapay zeka tabanlı uçuş algoritmaları, bu cihazların hem kullanıcı dostu olmasını hem de daha karmaşık operasyonları başarıyla gerçekleştirebilmesini sağlamıştır. Bu gelişmeler, İHA'ların yalnızca bir araç olarak değil, aynı zamanda modern teknolojinin farklı sektörlerdeki uygulamalarını dönüştüren yenilikçi bir platform olarak benimsenmesine katkı sağlamıştır. (Bashi vd., 2017; Hassanalian & Abdelkefi, 2017).

İHA'lar, hafif ve dayanıklı çerçeveleriyle farklı çevresel koşullarda çalışabilecek, aynı zamanda yüksek performans sağlayabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Malzeme seçimi, yapının tasarımı ve montaj işlemlerinin sırası bu süreçte kilit konulardır (Eid & Dol, 2019).

Yapısal optimizasyon teknikleri, dört pervaneli İHA'ların tasarım sürecinde büyük önem taşımaktadır. Bu yaklaşım, modeli tasarım ve tasarım dışı alanlara ayırmayı, sonlu eleman analizi ile gerilmeleri tespit etmeyi ve daha sonra yüklerin uygulanmadığı bölgelerden malzemeyi çıkarmayı içerir. İHA'ların neredeyse tüm bileşenleri, ham malzemeler ve parçalardan monte edilmek yerine baskı yoluyla üretilir. Bu yaklaşım, özellikle 'monokok' bir şasi basıldığında son derece faydalıdır. Bu teknik, montaj için gereken süreyi kısaltmakta ve geleneksel civata ve somun montaj sisteminde görülen bağlantı hatalarını ortadan kaldırmaktadır. (Arockiadoss vd., 2024; Ren vd., 2024). Öte yandan, özellikle rüzgârlı ortamlarda aerodinamik verimlilik için tasarım yapmak son derece önemlidir. Bunun nedeni, hava akışındaki değişimlerin veya bozulmaların gövde boyunca itme

dağılımında ve sürtünmede farklılıklara yol açabilmesidir; bu da rotor açılarının değiştirilmesiyle uçuş stabilitesi ve kontrol edilebilirliğinin iyileştirilebileceği anlamına gelir. Rotorların ve çevredeki ortamın nasıl etkileşime girdiğini bilmek, her durumda iyi çalışabilecek İHA'lar tasarlamak için hayati öneme sahiptir (Ahmed vd., 2022).

İHA'ların verimli kullanımı, çeşitli teknik ve mühendislik zorluklarının ele alınmasını gerektirir. Bu sorunlar arasında titreşim problemleri özellikle dikkate değerdir. Çünkü bunlar İHA'ların güvenilirliğini ve performansını doğrudan etkilemektedir. Bu tür titreşimler, pervanelerin hareketi, aerodinamik kuvvetler ve motorlar ile sensörler gibi iç bileşenlerin çalışmasından kaynaklanabilir. Titreşim kaynaklarını ve titreşimlerin İHA performansı üzerindeki etkilerini incelemek, uçuş kararlılığını, yük güvenliğini ve yapılan işin genel verimliliğini optimize etmek için önemlidir (Redde vd., 2018).

İHA'lardaki titreşimlerin başlıca kaynakları rotor sistemi ve dinamiklerinden kaynaklanır. Ge vd. (2021), iki pervanelinin dönüşünün, uçak hareket halindeyken hem dikey hem de yatay olarak meydana gelen şok kuvvetlerini oluşturmada ana etken olduğunu gözlemlemişlerdir. Uçuş koşullarına bağlı olarak, bu titreşimler İHA'lar hızla ivmelenirken 14 G seviyesine kadar çıkabilmektedir. Bu, İHA yapısında yüksek mekanik gerilmelerin oluşabileceğini ortaya koymaktadır (Ge vd., 2021). Ayrıca, Chen (2023), motor titreşimlerinin bir İHA'nın stabilitesi için kritik olduğunu belirtmekte ve aşırı titreşimlerin uçuş performansını ve yapıyı olumsuz yönde etkileyeceğini vurgulamaktadır (Chen vd., 2023). Bununla birlikte, bu titreşimler yalnızca uçuş stabilitesini değil, aynı zamanda yerleşik sensörler tarafından toplanan verilerin kalitesini de azaltabilir; özellikle kameralarda titreşim, görüntü ve video kalitesinin bozulmasına neden olur (Verma & Collette, 2021). Titreşimler, İHA'ların performansını yalnızca aracın aktif uçuş sırasında ne kadar stabil olduğu bakımından etkilemekle kalmaz. Örneğin, tıbbi malzemelerin taşınması gibi durumlarda uçuş sırasında oluşan titreşimlerin hassas yükleri önemli ölçüde etkileyebileceği kanıtlanmıştır. Oakey vd. (2021), çalışması, İHA uçuşları sırasında yaşanan titreşim seviyelerinin, kara yolu ile taşımada kaydedilenlerden daha yüksek olduğunu ve bu durumun insülin gibi hassas ürünleri tehlikeye atabileceğini göstermiştir (Oakey vd., 2021).

Hassas yükler taşırken İHA titreşimlerini yönetmek çok önemlidir. Titreşim ölçümü ve analizi hem deneysel hem de teorik yöntemlerle yapılabilir. Ancak çoğu durumda deneysel yöntemler, gerçek zamanlı titreşimleri izlemek için ivmeölçerler ve

jiroskoplarla uçuş verilerinin toplanmasını içerir. Bektash ve Cour-Harbo (2020), titreşim analizinin, bir İHA'nın durumunu değerlendirmede kritik bir teşhis yöntemi olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, bu analiz tekniklerinin uçuş sırasında toplanan veriler üzerinde uygulanarak İHA'nın farklı parçalarının durumunu tespit etmek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir (Bektash & Cour-Harbo, 2020). Öte yandan, tamamen teorik yöntemler, yapının farklı uçuş ayarlarında titreşime nasıl tepki vereceğini tahmin etmek için çeşitli simülasyonların ve belirli modelleme tekniklerinin kullanılmasını içermektedir (Rahman & Robertson, 2019). Titreşimli çevre koşulları altında verimli bir şekilde çalışabilecek bir İHA tasarımı, sensör verilerinden uçuş kontrol sistemlerine kadar her katmanda titreşim etkilerini minimize eden bir hesaplama algoritması gerektirmektedir. Bu algoritma İHA üzerindeki ivmeölçerler ve jiroskoplar gibi sensörlerden alınan verilerle başlar ve bu veriler, hızlı Fourier dönüşümü (HFD) kullanılarak titreşimlerin frekans analizi için işlenir. Bu analiz, rezonans durumlarını önceden tespit ederek yapısal elemanların korunmasına olanak tanır (Zhou vd., 2018). Uçuş stabilitesini sağlamak için, rotor hızları ve açıları PID (Proportional, Integral, Derivative) veya Model Öngörülü Kontrol algoritmaları ile gerçek zamanlı olarak optimize edilir (Morales vd., 2014). İHA'nın algılama yeteneklerinin korunması için kalman filtresi veya partikül filtresi gibi veri temizleme algoritmaları kullanılarak sensör verilerindeki parazitler giderilir ve gürültü azaltılır (Kruithof & Egeland, 2021). Bu kapsamlı algoritmalar, İHA'nın hem uçuş stabilitesini hem de operasyonel verimliliğini koruyarak, zorlu çevre koşullarında dahi güvenilir ve hassas bir şekilde çalışmasını sağlar. Titreşimlerin etkili yönetimi, yalnızca İHA'nın performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda görev başarısını da doğrudan etkiler.

Yukarıda özetlendiği üzere, İHA'larda titreşimlerin kaynağı karmaşıktır ve operasyonel verimlilikte önemli bir rol oynar. İHA'ların tasarımını ve performansını artırmak için, çeşitli titreşimleri ve bunların etkilerini anlamak önemlidir. Bu titreşimler, araştırmacılar tarafından pratik ve teorik dalga biçimleriyle gözlemlenip ölçülebilir ve bu da teknoloji ilerlemelerine ve İHA'ların daha fazla uygulama alanı bulmasına yol açar. Bu bağlamda, araştırmamızda İHA'lara özgü titreşimlerin nedenlerini ve etkilerini, İHA performansı üzerindeki etkilerini ve bu titreşimlerin deneysel ve teorik olarak nasıl ölçüldüğünü ele almayı amaçlıyoruz.

## 2. Titreşim Kaynakları

Titreşim sorunları, İHA'ların uçuş stabilitesi, navigasyon doğruluğu ve özellikle kamera sistemleri

üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkilere sahiptir. Uçuş sırasında meydana gelen titreşimler, İHA'ların hem fiziksel yapısında hem de elektronik bileşenlerinde gerilmelere ve arızalara neden olabilir (Ahmed vd., 2022). Özellikle yüksek frekanslı titreşimlerin kamera sistemlerindeki görüntülerde 'jello' olarak bilinen bir bozulmaya yol açtığı bilinmektedir; bu durum, yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve hassas haritalama gibi görevleri yerine getirirken performans kayıplarına neden olur. Ayrıca, uzun süreli aerobik faaliyet ve titreşimler uçakların mekanik özellikleri üzerinde etkiye sahiptir; bu da nihayetinde yorulma hasarı veya parça tahribatına yol açabilir (Cai vd., 2020). Dengede olmayan bir pervane, rotor dönerken dengesiz kuvvetler üretir ve bu da İHA'nın genel dengesi ve stabilitesini olumsuz etkiler. Sonuç olarak, İHA, havadayken sürekli küçük değişiklikler yapmak zorunda kalır, bu da kontrol sistemlerinin aşırı çalışmasına ve enerji kullanımının artmasına yol açar (Ortiz Cayón, 2012).

Motorlarda titreşime neden olabilecek çeşitli faktörler motorlardaki dengesizlik, rotor ve motorun hizalanmaması ve motor hızındaki değişikliklerden oluşmaktadır. Bu tür titreşimler özellikle yüksek hızlarda ve agresif hareketlerde belirgindir ve İHA'nın stabilitesini bozar. Ek olarak, motor titreşimleri, İHA'nın elektronik devrelerinde titreşime yol açarak sensör okumalarını bozabilir veya devre işlevsizliklerine neden olabilir (Legovich vd., 2020).

Harmonik ve rastgele titreşimler, titreşimlerin sınıflandırılabilirliği iki ana grup olarak öne çıkmaktadır. Harmonik titreşimler, belirli bir frekansta etkili olabilen periyodik olarak tekrarlayan kuvvetler tarafından üretilen titreşimlerdir. Bu titreşimlerin çoğu, motorlar ve pervaneler gibi dönen parçalardaki dengesizliklerden kaynaklanır ve bu titreşimler kontrol sistemlerini etkileyerek uçuşta dengesizliğe yol açar. Harmonik titreşimler belirli bir frekans aralığında sürekli olarak var olduklarından, tespit edilmeleri ve bastırılmaları biraz daha kolaydır. Ancak, rahatsız edici frekanslar sistemin (uçak) doğal frekanslarıyla, yani bir İHA'nın yapısal elemanı ile çakıştığında, bu durum rezonansa ve uçuş sırasında hasar ya da durmaya neden olabilir (Radkowski & Szulim, 2014). Normal titreşimler ise belirli bir frekansa sahip değildir ve bu nedenle rastgele titreşimler olarak kabul edilebilir. Bu tür titreşimler, uçuş sırasındaki çevre koşulları veya uçuş dinamik koşulları, örneğin rüzgâr esintileri veya İHA belirli bir hareket yaptığında oluşabilir. Rastgele titreşimlerin tahmin edilmesi veya kontrol edilmesi zor olduğundan, İHA'nın yükseltilmiş parçalarında çeşitli sorunlara yol açabilir (Anton & Inman, 2008).

Harmonik titreşim genellikle bir sinüs eğrisi şeklinde temsil edilir. Dış bir kuvvet tarafından

tetiklenen her tekrarlayan hareket matematiksel olarak Denklem 1'deki gibi tanımlanır (Inman, 2017).

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Burada  $x(t)$  zamana bağlı olarak değişen yer değiştirmeyi temsil eder.  $A$  titreşim genliği (maksimum sapma),  $\omega$  açısal frekans,  $t$  zaman ve  $\phi$  başlangıç faz açısıdır. Başlangıç faz açısı, hareketin başlangıç anındaki konumunu ve yönünü belirler.

Doğal titreşim, bir sistemde kendi iç özellikleri nedeniyle oluşan ve başlatılması veya sürdürülmesi için herhangi bir dış kuvvet gerektirmeyen salınımı ifade eder. Bu tür titreşim, sistemin kendine özgü frekansında, yani doğal frekansında gerçekleşir. Her fiziksel sistemin bir veya daha fazla doğal frekansı vardır ve bunlar kütle ve sertlik gibi belirli sistem parametrelerine bağlıdır. Titreşimin doğal frekansı  $f_n$  Denklem 2'deki matematiksel ifade ile tanımlanır (Vreugdenhil, 1964).

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Burada,  $f_n$  doğal frekansı (Hz),  $k$  sertliği (yay sabiti),  $m$  ise kütleli ifade eder. Sistem bu frekanslarda titreştiğinde, herhangi bir dış kuvvet olmadan kendi enerjisiyle salınım yapmaya devam edecektir. İHA sistemlerinde, bu genellikle çerçevenin, pervanelerin veya gövdenin doğal frekansı ile ilişkilidir.

Yapısal rezonans ise, İHA'nın çerçevesi ve bileşenlerinin belirli frekanslarda titreştiği durumlarda meydana gelir. Her yapının kendi frekans seti vardır ve bu frekanslarda titreşim genliği çok daha yüksek olabilmektedir. Uçuş sırasındaki aerodinamik yüklerin veya pervaneye sahip bir motordan gelen titreşimlerin bir türevi olarak bu frekans aralıkları "doğal frekanslar" olarak adlandırılır (Mohsan vd., 2022). Titreşimlerin rezonans nedeniyle artması, yapısal arıza riskini artırır ve uçuş sırasında ciddi dengesizliklere yol açabilir. Bu sorun, daha büyük ve daha karmaşık İHA tasarımlarının kullanımıyla daha da kötüleşmekte ve bu da çeşitli İHA parçalarının ömrünü azaltmaktadır (Abdulrahman Al-Mashhadani, 2019).

Matematiksel olarak, rezonans, dış kuvvetin frekansının sistemin doğal frekansına ( $f_n$ ) eşit olduğu durumlarda meydana gelir. Bu durumda, sistemin tepki genliği ( $A$ ) aşağıdaki Denklem 3 ile ifade edilebilir (Craig Jr & Kurdila, 2006).

Burada,  $F_0$  dış kuvvetin genliğini,  $\omega_n$  doğal frekansın açısal frekansını ve  $\omega_{ext}$  dış kuvvetin açısal frekansını ifade eder. Eğer  $\omega_{ext} = \omega_n$  olursa, paydadaki pay sıfıra yaklaşır ve sonsuz genlik ortaya çıkar. Bu, rezonansın tehlikeli sonuçlarını göstermektedir (Craig Jr & Kurdila, 2006).

$$A = \frac{F_0}{m (\omega_n^2 - \omega_{ext}^2)} \quad (3)$$

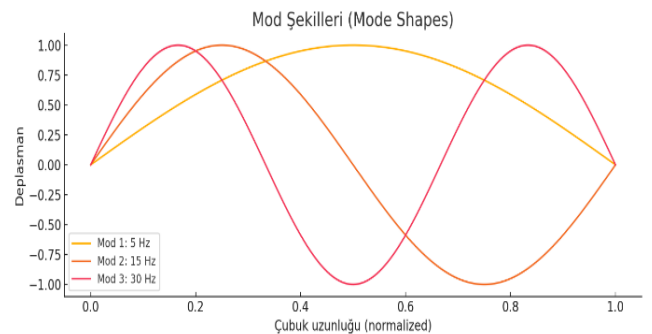
### 3. Yöntemler ve Uygulamalar

Farklı titreşim analiz yöntemleri hem deneysel hem de teorik yaklaşımlarla uygulanmaktadır. Öne çıkan ilk yöntem frekans analizidir. Bu teknik, İHA'ların belirli bir frekansta sürekli uçtuğu durumlarda titreşimi değerlendirmek için uygulanır. İHA'larda, motorların ve rotor kanatlarının belirli çalışma frekansları vardır ve bunlar sistemin doğal frekanslarıyla karşılaştırılmalıdır. Genellikle frekans analizi, HFD kullanılarak gerçekleştirilir. HFD, zamanla elde edilen verileri frekans verilerine dönüştürmek için kullanılır ve elde edilen titreşimlerin belirgin olduğu frekansları gösterir. Bu tür bilgiler, belirli frekansların sistemin doğal frekansları içinde yer alması durumunda rezonans nedeniyle titreşimlere yol açabileceğinden, İHA tasarımında önemlidir (Yin vd., 2021).

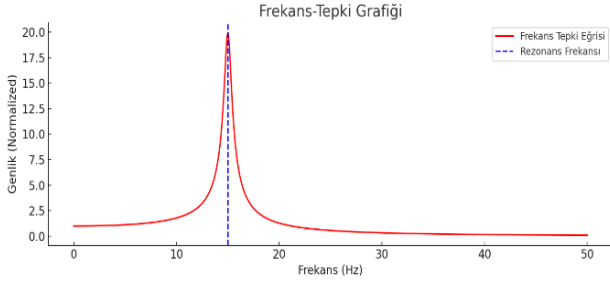
Bir diğer önemli teknik ise modal analizdir. Modal analizde, bir yapının doğal frekansı, mod şekli ve sönüm oranları belirlenir. Bu yaklaşımda, İHA'nın yapısal parçaları üzerinde titreşim testleri yapılır ve test edilen veriler, sistemin modal parametrelerini belirlemek için kullanılır.

Modal analiz, bir sistemin doğal titreşim davranışını incelemek için kullanılan temel bir yöntemdir. Bu analiz, sistemin mod şekilleri (eigenmodes) ve doğal frekansları (eigenfrequencies) üzerinden yapılır. Eigenmodes, sistemin serbest titreşim sırasında aldığı özgün şekilleri temsil ederken, eigenfrequencies, bu modlara karşılık gelen titreşim frekanslarını ifade eder (Sundararaj vd., 2021).

Şekil 1'de örnek bir sistemin ilk üç mod şekli (Mod 1, Mod 2, Mod 3) ve bu modlara karşılık gelen doğal frekanslar ( $f_1=5$  Hz,  $f_2=15$  Hz,  $f_3=30$  Hz) görselleştirilmiştir. Mod şekilleri, sistemin uzaysal deformasyon yapısını açıklarken, her modun davranışı, genlik (deplasman) ile normalize edilmiş birim uzunluk boyunca dalga şekilleriyle temsil edilmiştir.



Şekil 1. Temsili mod şekilleri ve doğal frekanslar.



**Şekil 2.** Temsili frekans-tepki fonksiyonu.

Şekil 2’de ise sistemin frekans-tepki eğrisi gösterilmiştir. Bu eğri, harici bir kuvvetin sistem üzerinde oluşturduğu genlik cevabını farklı frekanslar için ortaya koymaktadır. Özellikle,  $f_2=15$  Hz civarında görülen yüksek genlik, sistemin rezonans durumunu ifade etmektedir. Rezonans frekansı, sistemin harici bir titreşim kaynağı tarafından uyarıldığında maksimum genlik ürettiği frekanstır. Grafik, aynı zamanda sistemdeki sönüm oranının rezonans zirvesini baskıladığı ve genliği sınırladığı bir durumda damping etkisinin varlığını da göstermektedir (Bolognini vd., 2022).

Modal analiz, tasarım sürecinde veya hali hazırda mevcut İHA’lar üzerinde gerçekleştirilebilir. Bu teknik, yapının zayıf noktalarını belirlemeyi mümkün kılarak, zayıf noktaları güçlendirmeye ve İHA’nın genel gücünü artırmaya yardımcı olur. Modal analizin ilk aşaması, birkaç matrisin oluşturulmasıdır; birincisi, sistemin kütlelerinin nasıl dağıldığını gösteren kütle matrisidir (M), ikincisi ise yapının ne kadar sert olduğunu tanımlayan sertlik matrisidir (K) ve sonuncusu, çoğu zaman göz ardı edilse de sistemin zaman içinde titreşim enerjisini nasıl dağıttığını tanımlayan sönüm matrisidir (C). Serbest (sönümsüz) titreşimler için hareket Denklemi 4 aşağıdaki gibi ifade edilir (Sundararaj vd., 2021).

$$M \cdot \ddot{X} + C \cdot \dot{X} + K \cdot X = 0 \quad (4)$$

Burada M kütle matrisini, C sönüm matrisini, K sertlik matrisini, X yer değiştirme vektörünü,  $\dot{X}$  hız vektörünü ve  $\ddot{X}$  ivme vektörünü temsil etmektedir. Doğal frekansları ve mod şekillerini çözmek amacıyla Eğer “C” kütle matrisinin çarpanlarını içeren bir sertlik (rijitlik) matrisine “K” dönüşüyorsa, Denklem 5 sönümsüz bir sistemi aşağıdaki gibi basitleştirilebilir (Sundararaj vd., 2021).

$$K \cdot X = \omega^2 \cdot M \cdot X \quad (5)$$

Denklemden özdeğer ( $\omega^2$ ) doğal frekansların karesidir. Bir titreşim sisteminde doğal frekanslar, sistemin dış etkiler olmadan serbestçe titreştiğinde sahip olduğu karakteristik frekanslardır. Doğal frekanslar, sistemin fiziksel özelliklerine (kütle, rijitlik, vb.) bağlıdır ve sistemin titreşim davranışını belirler.

Örneğin; küçük bir özdeğer, sistemin düşük frekansta titreştiğini gösterir. Büyük bir özdeğer ise yüksek frekansta titreşim anlamına gelir. Özvektör (X) ise, sistemin mod şekillerini ifade eder. Mod şekilleri, sistemin doğal frekanslarından birinde titreşirken aldığı deformasyon veya hareket modelleridir. Başka bir deyişle, bir mod şekli, sistemin hangi bölgelerinin ne kadar hareket edeceğini veya hangi yönde deformasyona uğrayacağını gösterir. Örneğin; basit bir çubuğun birinci modunda çubuk genel olarak yukarı veya aşağı hareket edebilir. İkinci modunda ise bir kısmı yukarı, diğer kısmı aşağı hareket edebilir (Wang, X. vd., 2019).

Sönümlemenin dâhil edileceği analizlerde ise Rayleigh Sönüm Modeli veya alternatif yaklaşımlar kullanılabilir. Sönüm matris C, Denklem 6’da gösterilmektedir (Meirovitch, 1980; You & Zhang, 2019).

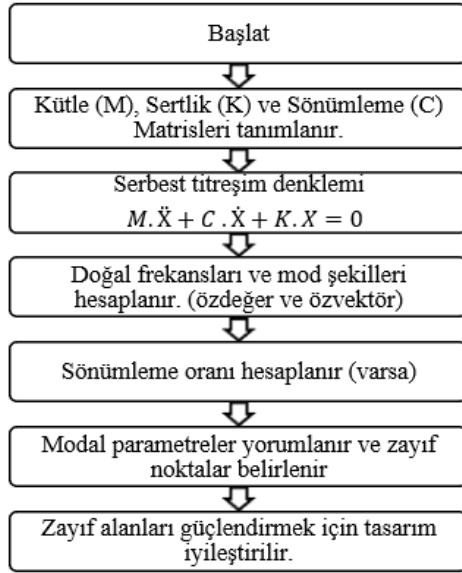
$$C = \alpha M + \beta K \quad (6)$$

Sistemin sönümleme davranışını doğru bir şekilde temsil etmek için uygun  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayı değerleri seçilmelidir. Doğal frekanslar, mod şekilleri ve sönüm oranları artık mevcut olduğuna göre, sistemin farklı titreşim koşulları altındaki tepkisi değerlendirilebilir. Bu, yapının yüksek yer değiştirme veya stres yoğunluklarına maruz kalması muhtemel bölgelerini belirleme olanağını doğurur. Modal analizden elde edilen sonuçlar, aşırı titreşimler veya stres yoğunluklarına eğilimli alanların güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Böyle bir güçlendirme, kritik alanlarda kütle veya sertlik dağılımında değişiklikler gerektirebilir; bu da İHA tasarımının stabilitesini ve dayanıklılığını artırır (Foti vd., 2012; Fu vd., 2010).

Şekil 3, modal analiz algoritmasının nasıl başlatıldığını, öncelikle modelin kütle, sertlik ve sönümleme matrislerinin oluşturulmasıyla gösterir. Bir sonraki adım, serbest titreşim denkleminin yazılmasıdır. Daha sonra, doğal frekanslar ve mod şekilleri özdeğerleri bulunarak belirlenir. Uygun olduğu yerlerde, sönümleme oranları sönümleme matrisini kullanarak hesaplanır (Butt & Omenzetter, 2012). Bu aşamaların ardından, sonuçlar değerlendirilerek herhangi bir zararlı yapısal yetersizliğin varlığı tespit edilebilir.

Tanımlanan modal analiz algoritması, yapısal sistemlerin titreşimsel tepkisini yapılandırılmış bir şekilde nicelleştirmenin bir yolunu sunar. Bu yaklaşım, doğal frekansların, mod şekillerinin ve sönüm oranlarının belirlenmesine odaklanarak, bu metodolojiyi dinamik yapıların tasarım kalitesini ve işlevselliğini artırmada temel bir bileşen haline getirir (Susilo vd., 2013).





Şekil 3. Modal analiz algoritmasına genel bakış.

Bahsedilmeye değer bir diğer yöntem de SEA yöntemidir. Bu yöntem, bir İHA'nın yapısal parçalarının performansını tahmin etmeye yardımcı olur. SEA uygulanan yüklerin yapıya olan etkilerini ve bunların ilişkili deformasyonlarını değerlendirir. Farklı malzeme ve tasarımların etkilerini modelledikten sonra, bir İHA'nın hangi parçalarının daha fazla titreşim yarattığını ve bu titreşimleri nasıl oluşturduğunu belirlemek kolaylaşır. SEA, tasarım aşamasında sadece yapısal iyileştirmelerle sınırlı değildir; aynı zamanda tamamlanmış yapıların iyileştirilmesi için de kullanılmaktadır (Hafizi vd., 2017). Yazılım analiz tekniklerinin yanı sıra, titreşim ölçüm teknikleri de titreşim analizinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tekniklerin çoğu, genellikle ivmeölçerler, jiroskoplar ve lazer doppler hız ölçerleri gibi sensörlerin kullanımıyla gerçekleştirilir. Bir İHA'nın yüzeyine yerleştirilen ivmeölçerler, sistemdeki mevcut titreşimleri algılar ve zaman içindeki ivme değişimlerini kaydeder. Bu bilgiler, frekans bileşenlerini ayırmak için analiz yazılımları tarafından işlenebilmektedir. Jiroskoplar ise, açısal hızların oranını ölçmek için kullanılır ve İHA'nın eksen üzerindeki hareketlerine ilişkin bilgi sağlar. Lazer Doppler hızölçerlerinde ise, titreşim hızı genellikle İHA'nın yüzeyine yansıtılan lazer ışığı kullanılarak ölçülür. Bu teknik oldukça hassas sonuçlar verir (Cruz & Miranda, 2017).

Dinamik tepki analizi ise, İHA'ların çeşitli dinamik yük etkilerini de dikkate almaktadır. İHA'ların farklı uçuş senaryolarına verdiği tepkiyi açıklayıcı bir şekilde ortaya koyar. Örneğin, İHA'ların çalışması veya durdurulması sırasında uygulanan dinamik yükler veya havanın hareketi, İHA'ların titreşim seviyesini değerlendirmek için kullanılır. Bu şekilde, dinamik tepki analizi, İHA tasarımında güvenlik ve

dayanıklılık açısından kritik bilgiler sunar (Kim vd., 2023).

Sonuç olarak, veri analitiği ve makine öğrenimi gibi çağdaş teknikler, İHA'ların titreşim teşhisi konusunda daha fazla önem kazanmaktadır. Makine öğrenimi modelleri, sensörler aracılığıyla elde edilen verilerin analizinde kullanılabilir ve olağandışı titreşim seviyelerini tanımlayıp tahmin etmek için uygulanabilir. Bu strateji, uçuş sırasında titreşimlerin gerçek zamanlı takibi ve olası arızaların zamanında tespiti açısından önemli faydalar sağlamaktadır.

#### 4. İHA'larda Titreşim Önleme ve Azaltma Stratejileri

Rezonans etkilerini azaltmak ve İHA yapılarının korunmasını sağlamak için tasarım ve operasyonel stratejileri bir arada içeren bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu çok boyutlu yaklaşım, titreşimlerin İHA'ların performansı ve dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkilerini gidermek için gereklidir. İHA'ların güvenli şekilde çalışmasını sağlamak için en temel önlemlerden biri, pervane ve motorların dengeli bir şekilde çalışmasıdır. Bu nedenle, uçuş güvenliği açısından kritik olan bu bileşenlerin kalibrasyonu bozulduğunda, titreşim kaynaklı dengesiz kuvvetleri önlemek amacıyla hava çerçevelerinin düzenli bakım ve ayarları yapılmalıdır. Bu tür önlemler, İHA'nın yapısal bileşenlerinde aşırı stres oluşmasını ve bunun sonucunda arızaların meydana gelmesini zorlaştıracaktır (Shin vd., 2021). İHA modeline uygun şekilde tasarlanmış motorlar ve yüksek kaliteli pervanelerden oluşan dengeli itme sistemleri, titreşimleri ve bu titreşimlerin rezonans etkisiyle çerçeveye ve diğer parçalara verebileceği zararları en aza indirir (Chen vd., 2023). Titreşim yayılma sorununu çözmenin bir diğer geçerli yolu, kameralar ve sensörler gibi hassas ekipmanlar için titreşim sönümlenme montajlarının uygulanmasıdır. Ayrıca, yapının hayati parçalarına iletilen fazla enerjiyi dağıtmaya yardımcı olan karbon fiber kompozitler gibi yüksek sönümlenme malzemelerinin seçimi de önemlidir (Perez vd., 2022; Verma vd., 2018). Maliyet açısından etkili olduğu kadar güvenilir olan pasif sönümlenme teknikleri, geniş bir İHA uygulama yelpazesinde kullanılabilir. Bu malzemelerin ve montajların İHA'lara monte edilmesi, cihazın genel stabilitesini artıracak ve hassas ekipmanların olumsuz koşullarda bile işlevsel kalmasını sağlayacaktır (Verma & Collette, 2021).

Aktif titreşim izolasyon sistemleri, özellikle zor koşullarda uçan gelişmiş İHA'lar için titreşimi kontrol etmenin yenilikçi bir yoludur. Çünkü bu tür sistemler, titreşimlerdeki değişiklikleri hızlı bir şekilde ölçen sensörlerden oluşur ve bu tür titreşimler, gerçek

zamanlı olarak engellenerek İHA'ların stabilitesini artırır ve ömrünü uzatır (Verma vd., 2020). Bu sistemlerin yüksek maliyetlerinin operasyonel maliyetleri artırabileceği doğru olsa da, özellikle gözetleme veya tıbbi malzeme teslimatı gibi kritik görevlerde İHA'ların hassas ekipmanlarını koruma yetenekleri paha biçilmezdir (Hii vd., 2019). Bu tür sistemlerin entegrasyonu, İHA'ların operasyonel yeteneklerini önemli ölçüde artırabilir ve onları çeşitli uygulamalarda daha güvenilir hale getirebilir.

Rezonans, İHA bileşenlerinin doğal frekanslarını değiştirilerek kontrol edilebilir. Bu tür örtüşmeleri önlemek için mühendisler, bir model bileşeninin kuvvetlere maruz kaldığında nasıl davranacağını tahmin etmek için SEA gibi simülasyon araçlarını kullanabilir, böylece tasarımı değiştirmek mümkün hale gelir ve dış kuvvetlerle rezonansa girmesi önlenir (Chen vd., 2023). Yüksek titreşim veya stres yaşayan zayıf bağlantıların veya kritik alanların güçlendirilmesi, İHA'ların yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde artırabilir (Wang vd., 2023). Bu proaktif yaklaşım, İHA'ların ömrünü uzatmanın yanı sıra, operasyonel ortamlarının zorluklarına karşı dayanıklı olmalarını da sağlar.

Gelişmiş sensörlerle donatılmış uçuş kontrol sistemleri, İHA'ların çevre değiştikçe pozisyon değiştirmesine olanak tanır ve gerçek zamanlı olarak titreşimleri azaltır. Ayrıca, rüzgâr hızı veya yükseklik gibi uçuşla ilgili belirli parametreleri değiştirebilir, bu da İHA'ların farklı koşullar altında stabilitesini sağlamak için gereklidir. Dış etkilere uyum sağlama yeteneği, hassas uçak içi ekipmanların ömrünü uzatmak için hayati önem taşır ve İHA'ların belirlenen görevlerinde işlevsel ve etkili kalmasını sağlar (Verma vd., 2020).

Rutin kontroller ve kalibrasyonlar, titreşime yol açabilecek aşınmanın birikimini önlemek için gereklidir. Bakım düzeni, gevşek bağlantıların kontrol edilmesi, hasarlı bileşenlerin değiştirilmesi ve verimliliği sürdürmek için sensörlerin gerektiği şekilde ayarlanmasını içermelidir (Rasid vd., 2019). Bu tür bir bakım dikkatinin gösterilmesi, aşırı titreşimlere veya hatta rezonans etkilerine neden olabilecek bileşenlerin beklenmedik arızalarını en aza indirir ve böylece İHA'ların işlevselliğini korur.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, İHA'larda titreşimlerin kaynakları, analiz yöntemleri ve kontrol stratejileri incelenmiş, literatürdeki bulgularla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. İHA'larda titreşimlerin temel kaynakları arasında pervane dengesizliği, motor titreşimleri ve yapısal rezonans öne çıkmaktadır. Bu faktörlerin uçuş stabilitesi, sensör doğruluğu ve

yapısal bütünlük üzerindeki olumsuz etkileri, performans kayıplarına ve hassas görevlerde başarısızlığa yol açabilmektedir. Araştırmamızda frekans analizi ve modal analiz gibi yöntemlerin, titreşimlerin kaynağını belirlemede ve yapısal zayıflıkları tespit etmede etkili araçlar olduğu vurgulanmıştır. Hızlı Fourier dönüşümü ve sonlu elemanlar analizi, doğal frekansların ve kritik titreşim noktalarının tespitinde önemli rol oynamaktadır. Bu yöntemlerle elde edilen bulgular, titreşim kontrolü ve yapısal iyileştirme çalışmalarına yol gösterici olmaktadır. Pratik uygulamalar açısından, pervane ve motor balansının doğru yapılması ile yüksek kaliteli malzeme seçimi, titreşimlerin azaltılmasında kritik öneme sahiptir. Özellikle karbon fiber kompozitler gibi yüksek sönümleme kapasiteli malzemelerin kullanımı, İHA'ların yapısal bütünlüğünü artırarak performanslarını iyileştirmektedir. Ayrıca, gerçek zamanlı titreşim izleme ve aktif izolasyon sistemlerinin, hassas görevlerde İHA'ların stabilitesini artırdığı görülmüştür. Sonuç olarak, titreşimlerin kaynağının doğru belirlenmesi ve uygun mühendislik çözümlerinin uygulanması, İHA'ların performansında önemli iyileştirmeler sağlayabilmektedir. Bu alandaki çalışmalar hem teorik hem de pratik açıdan İHA teknolojisinin gelişimine katkıda bulunmakta, özellikle hassas sensörler ve yük taşıma görevlerinde güvenilirliği artırmaktadır. Gelecekteki araştırmaların, titreşim kontrolüne yönelik yenilikçi malzeme ve teknolojilere odaklanmasının, İHA'ların farklı uygulama alanlarındaki etkinliğini daha da artıracakları öngörülmektedir.

## Yazarların Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## Kaynaklar

Abdulrahman Al-Mashhadani, M. (2019). Random vibrations in unmanned aerial vehicles, mathematical analysis and control methodology based on expectation and probability. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38(1), 143-153.

- Ahmed, F., Mohanta, J., Keshari, A., & Yadav, P. S. (2022). Recent advances in unmanned aerial vehicles: a review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7963-7984.
- Anton, S. R., & Inman, D. J. (2008). *Vibration energy harvesting for unmanned aerial vehicles*. Paper presented at the Active and passive smart structures and integrated systems 2008.
- Arockiadoss, A. S., Novah, R. N., Sajal, K., Pratap, S. S., Premachandra, C., & Schilberg, D. (2024). *Optimization of Monocoque Drone Frame Using Generative Design*. Paper presented at the 2024 International Conference on Image Processing and Robotics (ICIPRoB).
- Bashi, O. I. D., Hasan, W., Azis, N., Shafie, S., & Wagatsuma, H. (2017). Unmanned aerial vehicle quadcopter: A review. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 14(12), 5663-5675.
- Bekdash, O., & la Cour-Harbo, A. (2020). *Vibration analysis for anomaly detection in unmanned aircraft*. Paper presented at the Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society 2020.
- Bolognini, M., Izzo, G., Marchisotti, D., Fagiano, L., Limongelli, M. P., & Zappa, E. (2022). Vision-based modal analysis of built environment structures with multiple drones. *Automation in Construction*, 143, 104550.
- Butt, F., & Omenzetter, P. (2012). Evaluation of Seismic Response Trends from Long-Term Monitoring of Two Instrumented RC Buildings Including Soil-Structure Interaction. *Advances in Civil engineering*, 2012(1), 595238.
- Cai, Y., Lam, E., Howlett, T., & Cai, A. (2020). *Spatiotemporal analysis of "jello effect" in drone videos*. Paper presented at the Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Robots and Unmanned Systems, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10.
- Chen, K., Meng, W., Wang, J., Liu, K., & Lu, Z. (2023). An investigation on the structural vibrations of multi-rotor passenger drones. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 15, 17568293231199097.
- Craig Jr, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of structural dynamics*: John Wiley & Sons.
- Cruz, C., & Miranda, E. (2017). Evaluation of damping ratios for the seismic analysis of tall buildings. *Journal of structural engineering*, 143(1), 04016144.
- Eid, S. E., & Dol, S. S. (2019). *Design and development of lightweight-high endurance unmanned aerial vehicle for offshore search and rescue operation*. Paper presented at the 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET).
- Foti, D., Ivorra, S., & Sabbà, M. F. (2012). Dynamic investigation of an ancient masonry bell tower with operational modal analysis: A non-destructive experimental technique to obtain the dynamic characteristics of a structure.
- Fu, H., Liu, P., Zhang, Q., & Wang, Y. (2010). *Vibration modal analysis of the active magnetic bearing system based on finite element*. Paper presented at the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation.
- Ge, C., Dunno, K., Singh, M. A., Yuan, L., & Lu, L.-X. (2021). Development of a drone's vibration, shock, and atmospheric profiles. *Applied Sciences*, 11(11), 5176.
- Hafizi, Z., Aizzuddin, A., Halim, N., & Jamaludin, M. (2017). *Modal properties investigation of car body-in-white with attached windscreen and rear screen*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace sciences*, 91, 99-131.
- Hii, M. S. Y., Courtney, P., & Royall, P. G. (2019). An evaluation of the delivery of medicines using drones. *Drones*, 3(3), 52.
- Inman, D. J. (2017). *Vibration with control*: John Wiley & Sons.
- Kim, I.-H., Jung, H.-J., Yoon, S., & Park, J. W. (2023). Dynamic Response Measurement and Cable Tension Estimation Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing*, 15(16), 4000.
- Kruithof, K. H., & Egeland, M. (2021). *State estimator using hybrid kalman and particle filter for indoor uav navigation*. University of Agder.
- Legovich, Y., Maximov, Y., & Maximov, D. (2020). *Quadcopter vibration damping*. Paper presented at the 2020 13th International Conference" Management of large-scale system development"(MLSD).
- Meirovitch, L. (1980). *Computational methods in structural dynamics* (Vol. 5): Springer Science & Business Media.
- Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., & Alsharif, M. H. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147.
- Morales, R. M., Turner, M. C., Court, P., Hilditch, R., & Postlethwaite, I. (2014). Force control of semi-active valve lag dampers for vibration reduction in helicopters. *IET Control Theory & Applications*, 8(6), 409-419.
- Oakey, A., Waters, T., Zhu, W., Royall, P. G., Cherrett, T., Courtney, P., . . . Jelev, N. (2021). Quantifying the effects of vibration on medicines in transit caused by fixed-wing and multi-copter drones. *Drones*, 5(1), 22.
- Ortiz Cayón, R. J. (2012). Online video stabilization for UAV. Motion estimation and compensation for unnamed aerial vehicles.
- Perez, M., Billon, K., Gerges, T., Capsal, J.-F., Cabrera, M., Chesné, S., & Jean-Mistral, C. (2022). Vibration energy harvesting on a drone quadcopter based on piezoelectric structures. *Mechanics & Industry*, 23, 20.

- Radkowski, S., & Szulim, P. (2014). *Analysis of vibration of rotors in unmanned aircraft*. Paper presented at the 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR).
- Rahman, S., & Robertson, D. A. (2019). In-flight RCS measurements of drones and birds at K-band and W-band. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 13(2), 300-309.
- Rasid, S. M. R., Mizuno, T., Ishino, Y., Takasaki, M., Hara, M., & Yamaguchi, D. (2019). Design and control of active vibration isolation system with an active dynamic vibration absorber operating as accelerometer. *Journal of Sound and Vibration*, 438, 175-190.
- Redde, G., Kulkarni, P., Patil, P., Khedkar, D., & Chopade, J. (2018). Vibration analysis on frame and propeller of drone. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 7(5), 1-10.
- Ren, Y., Zhu, F., Sui, S., Yi, Z., & Chen, K. (2024). Enhancing Quadrotor Control Robustness with Multi-Proportional-Integral-Derivative Self-Attention-Guided Deep Reinforcement Learning. *Drones*, 8(7), 315.
- Shin, Y.-H., Kim, D., Son, S., Ham, J.-W., & Oh, K.-Y. (2021). Vibration isolation of a surveillance system equipped in a drone with mode decoupling. *Applied Sciences*, 11(4), 1961.
- Sundararaj, S., Dharsan, K., Ganeshraman, J., & Rajarajeswari, D. (2021). Structural and modal analysis of hybrid low altitude self-sustainable surveillance drone technology frame. *Materials Today: Proceedings*, 37, 409-418.
- Susilo, A. W., Achmad, W., Sri, N., & David, S. (2013). The effect of geometric structure on stiffness and damping factor of wood applicable to machine tool structure. *International Journal of Science and Engineering*, 4(2), 57-60.
- Verma, & Collette. (2021). *Active vibration isolation system for drone cameras*. Paper presented at the Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems: ICOVP 2019.
- Verma, Lafarga, V., Baron, M., & Collette, C. (2020). Active stabilization of unmanned aerial vehicle imaging platform. *Journal of Vibration and Control*, 26(19-20), 1791-1803.
- Verma, Pradhan, N. K., Nehra, R., & Prateek. (2018). *Challenge and advantage of materials in design and fabrication of composite UAV*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Verma, M., & Collette, C. (2021). Active Vibration Isolation System for Drone Cameras. En: Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems. Lecture in Mechanical Engineering: Springer, Singapore.
- Vreugdenhil, C. B. (1964). Natural frequencies of free vertical ship vibrations. *International Shipbuilding Progress*, 11(122), 458-480.
- Wang, Lu, Q., Zhang, K., & Shao, L. (2023). Design of micro-vibration suppression platform based on piezo-stack array intelligent structure. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(4), 799-810.
- Wang, X., Fan, W., Li, X., & Wang, L. (2019). Weak degradation characteristics analysis of UAV motors based on laplacian eigenmaps and variational mode decomposition. *Sensors*, 19(3), 524.
- Yin, Q., Zhao, J., Liu, Y., & Zhang, Y. (2021). The approximate calculation of the natural frequencies of a Stockbridge type vibration damper and analysis of natural frequencies' sensitivity to the structural parameters. *Mechanical Sciences*, 12(2), 863-873.
- You, C., & Zhang, R. (2019). 3D trajectory optimization in Rician fading for UAV-enabled data harvesting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 18(6), 3192-3207.
- Zhou, Y., Chang, S.-H., Wu, S., Cai, X. Y., Tang, L., & Xu, Z. (2018). FFT-APEn analysis for the vibration signal of a rotating motor. *International Journal of Acoustics & Vibration*, 23(2), 203-207.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



## Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/tiha>

e-ISSN 2687-6094



### Biyolojik Bozguna Yeni Bir Tedbir: Yapay Zekâ Destekli İnsansız Hava Araçları

Mutlu Can Soydan <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Amasya Üniversitesi, Merzifon Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Sivil Havacılık Kabin Hizmetleri Pr., 05300, Amasya, Türkiye; (mutlucansoydan3@gmail.com)



Sorumlu Yazar:  
mutlucansoydan3@gmail.com

#### Araştırma Makalesi

**Alıntı:** Soydan, M. C. (2024). (2024). Biyolojik Bozguna Yeni Bir Tedbir: Yapay Zekâ Destekli İnsansız Hava Araçları. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 6(2), 81-90.

Geliş : 11.12.2023  
Revize 1 : 26.06.2024  
Revize 2 : 27.08.2024  
Kabul : 05.11.2024  
Yayınlama : 31.12.2024

#### Özet

Kendini sıklıkla jeofiziksel, hidrolojik, teknolojik, meteorolojik, iklimsel ve biyolojik biçimleriyle gösteren afetler gün geçtikçe çeşitlenmektedir. Söz konusu durum artık mevcut anlayışların ve araçların acil bir müdahaleye yetemediğini de ortaya koymaktadır. Bu afetlerin önem sırası kıtalara, ülkelere ve bölgelere göre değişmekle birlikte, özellikle son yıllarda biyolojik afetlerin etkisinin küresel olması bu çalışmaya kaynaklık etmiştir. Nitekim biyolojik afetlerin, yayılma süresine müdahaleleri bakımından diğer afetlerden ayrı tutulması da gerekmektedir. Çalışma doğrudan bu sürenin indirgenmesi amacını gütmektedir. Şayet bu tipteki afetlerin kaynağına efektif bir müdahale sağlanabilirse etkisi azalacaktır. Çalışmada, sistematik analiz yöntemi kullanılmıştır. Analiz, araştırmanın temel fikrinin daha güçlü kanıtlar ile desteklenmesine imkân sağlaması yönünden tercih edilmiştir. Çalışma, neticede iki tip biyolojik afet müdahalesiyle temellendirilmiştir. Bunlardan ilki, biyolojik afetlerin yayılma sıklıklarının bölgesel olarak ölçülmesinin esas alındığı ilk müdahaledir. İkincisi de; bu çalışmada ilk kez ortaya koyulacak olan CAAN Modeli ile gerçekleştirilecek diğer bir müdahaledir. İlk müdahalede söz konusu ölçüm, yapay zekâ destekli bir veri akışı ile sağlanacaktır. İkinci müdahalenin çıkış noktası ise; bölgede vazifelerini sürdüren sağlık kurum/kuruluşlarının, afet ve acil durum kurum/kuruluşlarının ve sivil toplum kuruluşlarının, bölgeye yönelik bilgi akışını bir yapay zekâ destekli sivil ağ üzerinden ilgili havacılık otoritesine aktarmasıdır. Modelin bulguları çerçevesinde; bilgi akışı daha sağlıklı hale gelmiş, dönemin ve afetin ihtiyaçlarına göre insansız hava aracı o bölgenin acil ilaç vb. gibi ihtiyaçlarını rahatlıkla karşılamıştır. Çalışmanın son bölümünde dezavantajlarına nazaran, modelin avantajlarının çok daha baskın olduğu çıkarımı yapılmıştır. İnsansız hava aracı üreticileri, sağlık kurum/kuruluşları, afet ve acil durum dernekleri/başkanlıkları/müdürlükleri, sivil toplum kuruluşları ve yetkili sivil havacılık otoriteleri tam da bu noktada bu tip krizlere yeni nesil ve yapay zekâ destekli bir ağ sistemi ile müdahale etmeyi tecrübe ettikleri takdirde, ortaya çıkacaklar karşısında da hem stratejik hem de operasyonel anlamda nelere odaklanacaklarını, ne türden tedbirler alacaklarını kolaylıkla izleyebilirler.

**Anahtar Kelimeler:** Biyolojik afet, yapay zekâ, insansız hava araçları, sivil havacılık.

### A New Measure Against Biological Defeat: Artificial Intelligence Supported UAV

\*Corresponding Author:  
mutlucansoydan3@gmail.com

#### Review Article

**Citation:** Soydan, M. C. (2024). A New Measure Against Biological Defeat: Artificial Intelligence Supported UAV. *Turkish Journal of Unmanned Aerial Vehicles*, 6(2), 81-90 (in Turkish).

Received : 11.12.2023  
Revised 1 : 26.06.2024  
Revised 2 : 27.08.2024  
Accepted : 05.11.2024  
Published : 31.12.2024

#### Abstract

Natural disasters, which manifest themselves in various forms such as geophysical, hydrological, technological, meteorological, climatic, and biological, are becoming more diverse day by day. This situation reveals that existing understandings and tools are no longer sufficient for an urgent intervention. While the importance of these disasters varies according to continents, countries, and regions, the global impact of biological disasters in recent years has prompted this study. Indeed, it is necessary to treat interventions for biological disasters separately from other disasters in terms of the spread time. This study directly aims to reduce this time. If effective intervention can be provided at the source of these types of disasters, their impact will decrease. In the study, systematic analysis method was used. Analysis is preferred because it allows the basic idea of the research to be supported by stronger evidence. The study is ultimately grounded on two types of biological disaster interventions. The first one is based on measuring the regional spread frequencies of biological disasters. The second one involves the implementation of the CAAN Model being introduced for the first time in this study. In the first intervention, the measurement in question will be provided through an artificial intelligence-supported data flow. The starting point of the second intervention is for the health institutions/agencies, disaster and emergency institutions/agencies, and civil society organizations operating in the region to transfer information flow related to the region to the relevant aviation authority through an artificial intelligence-supported civil network. Within the framework of the findings of the model; the information flow has become healthier, and unmanned aerial vehicles have easily met the urgent needs of that region such as medication, based on the needs of the era and disaster. In the final section of the study, it is inferred that the advantages of the model are much more dominant compared to its disadvantages. Unmanned aerial vehicle manufacturers, healthcare institutions, disaster and emergency organizations, civil society organizations, and authorized civil aviation authorities, when they experience intervening in such crises with a next-generation and artificial intelligence-supported network system, can easily observe what they will focus on strategically and operationally, and what precautions they will take in the face of emerging challenges.

**Keywords:** Biological disaster, artificial intelligence, unmanned aerial vehicles, civil aviation.

## 1. Giriş

Afetlerin yönetimine yeni nesil bir yaklaşım için sıkça yapay zekâ<sup>1</sup> uygulamalarından, dijital dönüşümlerden ve hava araçlarının varlığından yararlanılmaktadır (Değirmen vd., 2018).

Yapay Zekâ (YZ), bilgisayar bilimi alanındaki teknolojik gelişmelere yardımcı olan ve akıllı sistemler oluşturmak için kullanılan bir mühendislik bilimidir (Aiken & Epstein, 2000). Esasında insan zekasının nasıl çalıştığına bir kopyasıdır, fakat gözlemlenebilir yöntemler sunmamaktadır. YZ, birtakım hesaplama modelleri kullanılarak problemlerin analitik ve algoritmik yönüyle ilgilenen çalışmaların bir bütünüdür (Amisha vd., 2019). Öte taraftan YZ, birtakım sistemlere gelişmiş bir zekâ yerleştirilmeye çalışılan yeni nesil bir bilgisayar bilimi olarak da tanımlanmaktadır (Andriessen & Sandberg, 1999).

Bu tanımlardan hareketle, YZ çeşitlerinin anlaşılması, ne tür bir amaca hizmet edebileceğinin anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. YZ'nin ilk türü "Reaktif Makineler" olarak adlandırılan biçimdir. Bunlar son derece sınırlı kapasiteye sahip eski YZ sistemleridir. İnsan zihninin çeşitli uyaranlara yanıt verme yeteneğini taklit ederler. Bir diğer türü de "Sınırlı Belleğe Sahip YZ" dir. Sınırlı bellekli makineler, tamamen reaktif makinelerin yeteneklerine sahip olan ve kararlar almak için geçmiş verilerden öğrenme yeteneğine sahip makinelerdir. Günümüzde bilinen mevcut uygulamaların neredeyse tamamı bu kategoriye aittir. İnsansız hava araçlarının görüntülerle öğrenme deneyimi YZ'nin bu tipten açıklanabilir (Dhokare & Gaikwad, 2021). Keza bu çalışmada da, bu tipin bir uygulaması tartışılacaktır. Bir diğeri "Zihin Teorisi" tipidir. Etkileşimde bulunan varlıkların ihtiyaçlarını, duygularını, inançlarını ve düşünce süreçlerini belirleyerek daha sağlıklı bir anlaşılma sağlama olarak tanımlanmaktadır. "Kendinin Farkında Olan YZ" tipi ise şu anda varsayımsal olarak YZ'nin gelişimindeki son aşamadır. Bu tipin, muhtemelen kendi duyguları, ihtiyaçları, inançları ve kendi arzuları da olacağı öngörülmektedir. "Genel YZ" tipi de bir insan gibi öğrenme, algılama, anlama ve işlev görme yeteneğinin toplamını ifade etmektedir. Son olarak "Yapay Süper Zeka", YZ çalışmalarının başlangıcını işaret etmesi yönünden önem arz etmektedir. Bu tip, insan çok boyutlu zekasını taklit etmesinin yanı sıra, genişletilmiş hafızası, daha hızlı veri işleme, analizi ve karar alma yetenekleri yönleriyle öne çıkmaktadır (Dhokare & Gaikwad, 2021).

Öte taraftan bu teknolojileri doğru biçimde kullanabilmenin yolu, hedef afeti iyi tanımlamaktan

geçmektedir. Bu çerçevede; araştırmanın ilk etabı, faydalanana biyolojik afetleri kavramsal bakımdan tanımlamak ve söz konusu afet türünü biyolojik ajanları, hastalıkları ve potansiyeli bakımından tasnifleyecektir. Nitekim afet yönetim süreçlerinden şüphesiz en kritik olanı; afet gerçekleşmeden harekete geçebilme dürtüsüdür.

Söz konusu alan yazında yine sıklıkla "drone teknolojisi"nin kavramsallaştığı fark edilmiş, ancak çalışmalar çoğunlukla insansız hava araçlarının görüntü alınması ve işlenmesi sürecinde kullanıldığı saptanmıştır. Bu anlamda çalışma, güncel bir bakış açısıyla söz konusu teknolojinin iletişim eksikliğine yönelecektir. Nitekim araştırma süreci içerisinde ilgili literatür taranırken daha önceki araştırmacıların; afetlerde DRR, afetlerde eylem planı ve afet sonrası analiz gibi hususlara odaklandıkları tespit edilmiştir. Ancak bu çalışmada söz konusu hususlar kapsam dışı bırakılmış; araştırma insansız hava aracı ile geliştirilmiş acil müdahale süresinin indirgenmesine odaklanmıştır.

Çalışmada sistematik analiz yöntemi; araştırmacının ana fikrine gitmesi için bir yol olarak kullanılacaktır. Bu yöntemle gerçekleşen araştırmalar birkaç adımda özetlenebilir. Bu yöntemin ilk adımı; ilgili araştırmaların incelenmesini müteakip temel problemi belirlemek, ardından çalışmanın evrenini oluşturarak temel probleme yapılacak müdahaleleri önermek (araştırmada sıkça "acil durumda gerçekleştirilecek müdahaleler" olarak söz edilecektir) ve alternatif yolları belirginleştirmektir. Nitekim sürecin daha objektif ve tekrarlanabilir olmasını sağlamak için, incelemenin fiili olarak yürütülmesinden önce araştırma prosedürlerinin tamamının açık hale getirilmesi esastır (Atlı, 2024b). İkinci adım ise; doğru bilgi kaynaklarını belirlemektir. Ardından bu çalışmaların kalitesinin belirlenmesi araştırmacıya ait olacaktır. Bir sonraki adım da; çıkarımlar (çalışma bu adımın çevresinde temellenecektir) gerçekleştirmektir. Son olarak araştırma değerlendirilecek ve birtakım önerilerde bulunacaktır.

Sistematik analiz yöntemi örnek bir çalışma ile; su florürülenmesinin güvenliği konusunda yayınlanacak olan bir araştırma üzerinden izah edilebilir. Burada konunun temelini florürleme değil, inceleme metodolojisi olması vurgulanabilir. Hatta çalışma neticede özellikle kamusal kararların alınması konusunda okuyucusuna hem teorik hem de pratik önerme/önermeler sunabiliyorsa; tam da bu noktada çalışmanın bu tipten bir yöntem ihtiyacı duyduğu belirtilebilir. Bu varsayım çalışmadan hareketle,

<sup>1</sup> Çalışmanın bu kısmından itibaren "yapay zekâ" kavramı, "YZ" ifadesi ile kısaltılacaktır.

çalışmanın bu kısmında benzeri örnekler ele alınacaktır.

Bu kısımda ele alınan çalışmalar ise, bu araştırmanın odak noktasının belirlenmesinde ve sınırının çizilmesinde önemli rol oynamıştır. Yer verilen araştırmalar, kronolojik bakımdan güncelden geçmişe göre sıralanmıştır.

İlk irdelenen çalışma Sharma vd. (2024) araştırmacılarına aittir. Gerçekleştirdikleri çalışmada, afet müdahalesi esnasında spektral verimliliği en üst düzeye çıkarmak, insansız hava araçlarının pil ömrünü artırmak ve daha sağlıklı bir kablosuz iletişim için bir güç optimizasyon tekniği önermektedir. Ludwig vd. (2023), gerçekleştirdikleri çalışmasında, 2000-2020 yılları arasında insansız hava araçları ve doğal afetler hakkında rapor veren 254 makalenin bibliyografik bir incelemesini sunmuştur. Ana bulgu olarak, afet öncesi aşamada insansız hava araçlarının risk azaltmada kullanımıyla ilgili çok az çalışma olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bushnaq ve Natalizio (2022), insansız hava aracı sisteminin, COVID-19 karantina bölgelerinde çok kullanışlı ve etkili bir araç haline geldiğini ortaya koymuşlardır. Baker vd. (2020), yaptıkları araştırmada afet sonrası çelik kirişlerdeki hasarı tespit etmek için düşük ışık koşullarında insansız hava araçlarının kullanımını araştırmışlardır, neticede dünyanın bu konuda daha fazla deneye ihtiyacı olduğuna kanaat getirmişlerdir. Estrada ve Ndoma (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada afet sonrası hasar değerlendirmesi, afet lojistiği ve afet sonrası meteorolojik değerlendirmelerin bir takım otonom hava aracı sistemleri ile gerçekleştirilmesi gerektiği bulgusuna ulaşmışlardır. Kamilaris ve Boldú (2017), araştırmalarında, oluşturdukları veri kümesine (yangın, deprem, yıkılmış binalar, tsunami ve sel gibi afetlerin görüntülerinden oluşan) dayanarak derin öğrenmenin yakın gelecekte afetleri yüksek doğrulukla tahmin etme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

“Biyolojik Afetlerde Yapay Zekâ Destekli İnsansız Hava Araçları” adlı bölüm de, araştırmanın bulgular kısmını oluşturacaktır. Son bölümde ise araştırmanın sonucu ve önerilerine ilişkin esasları yer alacaktır.

## 2. Yöntem

**Araştırmanın Tasarımı:** “Sistemik Analiz” yöntemi doğrultusunda belirlenen ölçütleri izleyerek periyodik bir literatür incelemesi çalışması yürütülmüştür. Belirlenen bu ölçütler iki ayrı şekilde alınmıştır. İlki konunun içeriğine uygun/yakın çalışmaların incelenmesi, ikincisi ise bu yöntemle uygun/yakın çalışmaların incelenmesi sağlanmıştır.

**Uygunluk Kriterleri:** Sistemik incelemeler çerçevesinde çalışmada; yayımlanmış/yayınlanma aşamasındaki lisans tezleri, kitaplar, kitap bölümleri, bilimsel araştırmalar, bilimsel makaleler ve web kaynakları incelenmiştir. Çalışmanın araştırılma sürecinde ana dil kısıtlaması yoktur, hatta sıkça İngilizce dilinden çeviriler gerçekleştirilmiştir.

**Verilerin Toplanması:** Hem ulusal hem de uluslararası kapsamda sistematik bir bilgi kaynağı araması gerçekleştirilmiştir. Arama, yine iki ayrı ölçüt çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. İlki konunun içeriğine uygun/yakın çalışmaların incelenmesi, ikincisi ise bu yöntemle uygun/yakın çalışmaların incelenmesi şeklindedir.

**Veri Çıkarım Süreci:** Gerçekleştirilen bilgi kaynağı arama sürecinden hareketle, çalışmanın temel fikri; literatürdeki çalışmalar ile desteklenerek uygun bir zemine oturtulmuştur.

**Araştırma Süreci:** Bu araştırmanın problemi belirlenirken problemin önemi ve çözümlenebilme durumu göz önünde bulundurulmuş; bu anlayış da problemin sınırlarının belirlenmesinde bir araç haline gelmiştir. Çalışmada, “Biyolojik afetlerde, YZ teknolojileri sayesinde insansız hava araçlarının kabiliyetleri kullanılabilir mi?” tipinde bir problemin cevabı aranmıştır. Bu problem, araştırmanın diğer aşamaları için kuramsal bir anlam zemini de oluşturmuştur. Çalışma temel problemine cevap ararken; biyolojik afetlerde insansız hava araçlarının buldukları konunun ve geleceklerinin irdelenmesi gibi ikincil bir amaç da edinmiştir.

Çalışma araştırmacılara biyolojik afetlerde insansız hava araçlarının daha ulaşılabilir olduğunu göstermesi bakımından önem taşımaktadır. Bu ulaşılabilirlik, nicel anlamdaki biyolojik hastalık tespitlerinin ardından; yeni nesil bir iletişim ağı ile sağlanacaktır. Araştırma insansız hava araçlarının biyolojik afetlerde faaliyetlerini sürdüreceği ve bu afetlerde sıkça kullanılacağı varsayımına dayanmaktadır. Şayet gelecekte çok daha teknolojik araçların icadı halinde, söz konusu iletişim ağı kuşkusuz çok yönlü biçimde gelişecektir.

Çalışmada irdelenen konular, araştırma hakkında esaslı bir anlayış oluşturulması açısından; uluslararası dokümanların ve bilimsel çalışmaların incelenmesi yöntemiyle derlenmiştir. Bu derlemenin yorumlanması ise birbiriyle bağlantılı ve tamamlayıcı bir yaklaşım ile ortaya koyulmuştur. Bu araştırma konusu özelinde genel çerçevenin çizilirken; ihtiyaç duyulan dokümanların ulaşılabilirlik durumu, dokümanların özgünlüğünün kontrolü, dokümanların anlaşılabilirliği, bilgilerin analiz edilebilirliği ve verilerin tarafsız olup olmaması hali bir süreç halinde gözden geçirilmiştir. Çalışmanın sonucu ve önerisi ise

sistemik bir bakış açısıyla ele alınmış ve yorumlanmıştır.

Çalışmanın derlenmesinde, sistemik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz; önceki araştırmaların detaylı ve objektif kıstaslar ile taranıp, sonuçların kolaylıkla değerlendirilmesine imkân sağlaması sebebiyle çalışmaya uygun bir yöntem olarak görülmüştür (Uman, 2011; Karacam, 2013). Araştırmanın "Giriş" bölümünde yer aldığı üzere; bu çalışmada analizin iki ayrı kıstası bulunmaktadır. İlki konunun doğrudan ilişkili olduğu ülkemiz afetlerine yönelik gerçekleşen araştırmalar, bir diğeri de ilgili araştırmaların afetlere müdahale aşamalarından hangisi/hangilerine odaklandığının saptandığı araştırmalardır.

İnsansız hava araçları ilk geliştirildiğinde, bu cihazlar manuel olarak, uzaktan kontrol ediliyordu. Ancak şimdilerde, söz konusu araçlar genellikle operasyonların bir kısmını veya tamamını otomatikleştiren YZ'yi bünyesinde barındırmaktadır. YZ'nin işin içine dahil edilmesi; görsel ve çevresel verileri toplamak ve bunları da biyolojik afetlerde uygulamak için hava aracının sensörlerine gelen verileri kullanması anlamına gelmektedir (Cao & Jiang, 2020).

Çalışma, aynı alanda gerçekleştirilmiş geçmiş çalışmaların üzerine koyacak şekilde tartışılacaktır. Bu çerçevede akademik veri tabanları kullanılarak ülkemizde bu minvalde gerçekleştirilen araştırmalar detaylıca incelenmiştir. Veri tabanları, insansız hava araçları çerçevesinde özellikle yabancı dilde oldukça fazla araştırmanın gerçekleştirildiğini ortaya koymuş, ancak çalışmayla doğrudan ilişkili araştırmalara ulaşmak amacıyla veri tabanlarındaki filtreler kullanılmıştır. Burada esas gaye, insansız hava araçlarının ülkemizde gerçekleşebilecek afetlerde etkinliğini irdeleyen çalışmalara ulaşmaktır.

Bu kısımda ele alınan benzeri çalışmalar, hem bu araştırmanın yöntemine yakın yöntemler izlemesi, hem de irdeledikleri konuların benzerliği itibarıyla bu kısımda özetlenecektir. Ayrıca bu kısımdaki araştırmalar gerçekleştirildiği yıllar itibarıyla değil; konularının benzerliği ile tasniflenmiştir.

Bu noktada ele alınan ilk araştırma, Değirmen vd. (2018) araştırmacılarına aittir. Araştırmacılar afet bölgelerinin gözetlenmesinde kullanılabilmesi amacıyla bir rota planlaması ortaya koymuştur. Programlama tabanlı bu yaklaşım, kullanılacak yer istasyonlarını da tespit etmektedir. Bir diğer araştırma Uysal vd. (2018) araştırmacılarının gerçekleştirdiği "İnsansız Hava Araçlarının Afet Yönetiminde Kullanımı" adlı çalışmadır. Araştırmada araştırmacılar tarafından bir test alanı belirlenmiş, bu alandan

yakalanan görüntülerin de arama-kurtarma ve iyileştirme faaliyetlerinde kullanılabileceği açıklanmıştır. Yine Türk (2009), gerçekleştirdiği araştırmada bir insansız hava aracından elde edilen fotogrametrik verilerin ne şekilde kullanılacağını ortaya koymuştur. Coğrafi bilgi sistemlerinin ülkemizde gerçekleşen doğal afetlerin yönetiminde zaten kullanıldığını ortaya koyması bakımından çalışma önem arz etmektedir. Keza bu tipten bir çalışma da Villi ve Yakar (2023) araştırmacılarına aittir. Bu araştırmacıların bir önceki yıl gerçekleştirdikleri çalışma ise (2022) coğrafi bilgi sistemleri uygulamalarının yanı sıra bir takım sensör tiplerini de irdelemişlerdir. Yılmaz (2019), çalışmasında insani yardım lojistiği kullanım aşamaları ve alanlarını detaylandırmıştır. Özkan (2018) de çalışmasında, ülkemizde gerçekleşebilecek olası orman yangınlarının riskli bölgelerini tespit etmiştir. Bu çerçevede neticede senaryolar halinde bir takım kabul edilebilir rota planlamaları ortaya koymuştur.

Bu araştırmalardan hareketle, ele aldığı ilkeleri ve neticede ortaya koyacağı önerisiyle söz konusu konunun ülkemizde bu yönüyle ilk kez irdelendiği tespit edilmiştir.

## 2.1. Biyolojik Afetler

İnsanoğlu tarih boyunca biyolojik hastalık etkenlerinin sebep olduğu hastalıklarla karşı karşıya kalmıştır (Tekin, 2021). Bu hastalık etkenleri<sup>2</sup>, bölgesel ve küresel ölçekte sıklıkla insanlığı tehdit etmiş ve ölümlere neden olmuştur. Bu etkenlerin sonucunda şarbon, veba, tularemi, botulinum toksini, influenza, çiçek hastalığı, ebola, risin, AIDS, VHF, SARS-CoV ve MERS gibi hastalıklar ortaya çıkmıştır (AFAD, 2023).

Tablo 1'de yayılma kolaylıkları bakımından tasniflenen biyolojik ajanlar yer almaktadır. Bu ajanların canlılarda yol açtığı birtakım hastalıklar ve daha ciddi hastalıklara sebep olabilme riskine göre potansiyelleri de tabloda yer almaktadır. "A" kategorisinde yer alan ajanlar yayılması en kolay kategori olarak ifade edilebilir. "C" kategorisindeki ajanlar ise gelecekte biyolojik silah olarak kullanılabilecek yeni tehditler olarak değerlendirilmelidir.

Tabloda yer alan biyolojik hastalıklardan korunmak; günümüzde sıklıkla maruz kaldıktan sonra birtakım tedbirler alarak, dekontamine yolla ya da tıbbi tedavi ile sağlanmaktadır. Bu yaklaşım ise afet yönetimine proaktif bir yaklaşım sergilenmesi ile örtüşmemektedir. Gelecekte insanoğlu, biyolojik afetlere afet öncesi, afet anı ve afet sonrası bir plan dahilinde müdahale yapabilmelidir (AFAD, 2023).

<sup>2</sup> Virüs, toksin ve viral boyutlarla hastalık oluşturan, bu hastalıkları da bulaşıcı hale getiren biyolojik ajanların tamamı.



**Tablo 1.** Biyolojik afetlerin kategorilendirilmesi.

Kategori	Biyolojik Ajanları	Hastalıkları	Potansiyeli
Kategori - A	- "Variola Major", - "Bacillus Anthracis", - "Yersinia Pestis", - "Clostridium Botulinum Toksini", - "Francisella Tularensis", - "Filovirüsler (Ebola, Marburg)", - "Arenavirüsler (Lassa, Junin, Machupo)"	- "Çiçek", - "Şarbon", - "Vebe", - "Botulizm", - "Tularemi", - "Viral Kanamalı Ateş"	- "Halk Sağlığı ve Ulusal Güvenlik İçin En Yüksek Riski Taşıyan Organizmalar ya da Toksinler"
Kategori - B	- "Coxiella Burnetti", - "Brucella", - "Burkholderia Mallei/Pseudomallei", - "Alfaviruslar (Venezuela, Ensefalomiyeliti)", - "Toksinler (Risin, Clostridium vb.)", - "Rickettsia Prowazekii", - "Chlamydia Psittaci", - "Salmonella Spp.", - "Shigella Dysenteriae", - "Escherichia Coli", - "Cryptosporidium Parvum", - "Vibrio Cholerae"	- "Q Ateşi", - "Bruselloz", - "Ruam/Melioidoz", - "Ensefalit", - "Toksik Sendromlar", - "Tifus", - "Psittakoz", - "Salmonellosis", - "Dizanteri", - "Gıda Zehirlenmesi", - "Cryptosporidiosis", - "Kolera"	- "İkinci Yüksek Riski Taşıyanlar, Orta Dereceli Hastalık Yapma Derecesi"
Kategori - C	- "Nipah Virüsü", - "Hantavirüs", - "Kene Kaynaklı Kanamalı Ateş ve Ensefalit Virüsü", - "Çok İlaça Dirençli Mycobacterium Tuberculosis"	- "Gelecekte Kesinlik Kazanacak Hastalıklar"	- "Yüksek Oranda Hastalığa ve Ölümüne Sebep Verme"

\*Kaynak: (AFAD, 2023) kaynağından hareketle araştırmacı tarafından oluşturulmuştur.

Bu müdahalenin en kritik noktası, hastalıkların tespiti aşamasıdır. Bu tip hastalıkların tespit süresi uzasa da; mutlaka yayılacaktır. Ancak biyolojik afetlerin acil müdahale süresine etki edilmesi halinde bu tip hastalıklar küresel bir hale dönüşmeyecektir.

## 2.2. Afet Yönetiminde Yapay Zekâ Kazanımları

Sürdürülebilirlik odağında YZ teknolojilerinin kullanımı, yeni nesil bir anlayışı beraberinde getirerek hızla artmaktadır. Bu noktadaki uygulamalar yalnız afet sonrası değil, afet öncesi riskleri de azaltmaktadır. Havadan görüntüleme ve hava tahmin uygulamaları gibi günümüz uygulamalarının yanı sıra sofistike afetlere yönelik erken uyarı sistemleri tipindeki uygulamalar da küresel havacılık sektöründeki önemli yeni nesil uygulamalar olacaktır. Bu tip YZ uygulamaları, insanoğlunu güvenli alanlara yönlerecektir (Tech Inside, 2023).

Bu uygulamaların yanı sıra, özellikle verilerin değerlendirilmesi sürecinde de YZ uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Burada esas amaç, eylem planlamasının sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Bir biyolojik afet ortaya çıkmadan, sağlık personelleri YZ verileri ile bilgilendirilebilecek, hatta simülasyon yöntemleriyle biyolojik afetlere müdahale edecek personellerin yeni bir anlayış kazanması sağlanabilecektir.

Bir diğer uygulama da biyolojik afetlerin ardından erişilemeyen yerlere ulaşabilmeyi sağlayabilecek robotik sistemlerdir. İnsan yerine insandan daha

efektif şekilde çalışabilecek robotik uygulamalar, fiziksel ortam ne kadar zor olursa olsun önemli bir rol oynayacaktır (Tech Inside, 2023).

YZ destekli dijital iletişim platformlarının giderek artacağı öngörüsü de yapılabilir. Bu öngörü, geleceğin dünyası için yanıltıcı olmayacaktır. Şüphesiz günümüzde biyolojik afetler yayılırken kurulan iletişim, söz konusu platformlardan biri ya da birkaçıyla sağlanmaktadır. Doğrudan biyolojik afetlerde kullanılacak doğrulanmış veriler, hasta ve riskli bireylerin tespitleri gibi bilgiler de bu platformlardan sağlanabilmektedir. Gelecekte bu tip iletişim platformlarının biyolojik afetler için de geliştirileceği aşikardır. Tersine mühendislikle; biyolojik afetlerin çeşitlenmesi de bu iletişim platformlarının sayısını artıracaktır.

Literatür taraması sürdürülürken; dünyada benzer ancak daha az karmaşık bir örneğinin de hayata geçirildiği saptanmıştır.

Zipline, Ruanda ve Gana'da devlet yetkilileri, yetkili sivil havacılık makamlarından gerekli izin ve görüşleri alarak sağlık hizmeti veren merkezlerle beraber iletişim alt yapısını oluşturmuştur. Ruanda'da iki, Gana'da dört dağıtım noktası kurulmuştur. Bunlar hem insansız hava araçlarının iniş-kalkış terminali olarak, hem de tıbbi malzeme deposu olarak görev yapmaktadır (Euronews, 2023).

Sağlık personeli, ilk etapta Zipline'in online eczane sorumlularına mevcut telefon hatları üzerinden bir text mesajı yoluyla sipariş yollamaktadır. Bu text mesajında acil ihtiyaç duyulan ürünün niteliği ve miktarı

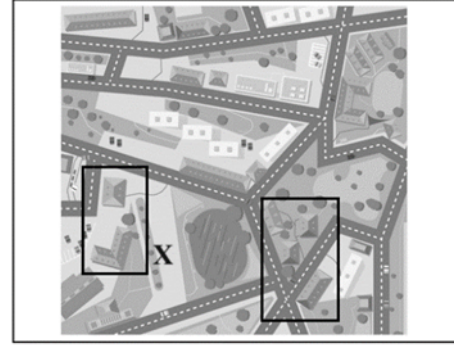
belirtilmektedir. Siparişin yönlendirildiği, en yakın dağıtım noktasındaki ekipler de talebi karşılamak üzere harekete geçmektedir. Personeller dört parçadan oluşan hava aracını uçuşa hazır hale getirmekte ve ardından kargo haznesine korunaklı biçimde ihtiyaç duyulan paket yüklenmektedir. İnsansız hava aracı, acil drone hattı için özel geliştirilen platformdan fırlatılmaktadır. Sürekli olarak GPS bağlantısı da barındıran bu araçlar, uçuş süresince uzaktan kumanda gerektirmeksizin otonom şekilde çıkış ve varış noktaları arasında hareket edebilmektedir. Varış yerine ulaştığında, ihtiyaç duyulan malzemeyi belirli bir yükseklik seviyesinde havadan bırakmaktadır. Hemen ardından açılan paraşüt de paketin deforme olmadan yere inmesini sağlamaktadır (Euronews, 2023).

Buradan hareketle, biyolojik afetlere müdahale bakımından çalışma, iki temel üzerine kurulmuştur. İlki afetlerin nicel bakımdan yayılma hızı ve bölgesel sıklıklarının ölçülerek ölçülmesidir. Bu, hastaların muayene sonuçlarına ve/veya sağlık kurum/kuruluşlarının hastalığı tespit biçimlerine bağlı olarak sağlık otoritesinin uygulamalarına bağlı olarak belirlenebilir. Zaten söz konusu sağlık kurum/kuruluşları günümüzde rahatlıkla vaka haritası ortaya koyabilmektedir. Bu noktanın geliştirilmesinde YZ algoritmalarının desteğine elbette ihtiyaç duyulacaktır. Biyolojik afetlere yapılacak müdahaledeki ikinci dayanak noktası ise doğrudan insan destekli bir sivil iletişim ağının varlığı olacaktır. Bu aşda, afet ve acil durum kurum/kuruluşları ve/veya sivil toplum kuruluşları ile koordine edilerek anlaşılacak bilgi, bu kez insansız hava araçlarını uçuş için hareketlendirecektir. Bu safhada gerçekleştirilecek uçuş, acil ilaç teslimi vb. gibi çağın gerektirdiği amaçlar için yapılabilecektir. Bu iki temellendirme, yalnızca birbirini izleyerek uygulandığında biyolojik afetlere süre bakımından optimal bir yaklaşım sağlanacaktır.

### 3. Bulgular

İnsansız hava araçları; birtakım kamera biçimleri yoluyla (termal kameralar, yüksek çözünürlüklü kameralar, LIDAR tipi sensörler vb.) geniş miktarda veri toplayacaktır. YZ, insansız hava araçlarından elde edilen bu büyük veri setlerini analiz ederek daha hızlı ve doğru neticeler elde edilmesine yardımcı olur. Veri analitiği, bu çalışmada biyolojik afetlerin nicel bakımdan izlenmesi; yani daha basit bir ifadeyle hasta sayısının izlenmesi amacıyla kullanılacaktır. Bu noktada, sağlık kurum/kuruluşlarının ortaya koyacağı vaka haritası bölgesel anlamda insansız hava aracına rehber olacaktır. Bu yolla biyolojik afetlerin henüz başlangıç aşamasında, vaka sayısının artma eğiliminde

olduğu bölgeler Şekil 1'deki kare benzeri göstergeler ile ifade edilecektir.

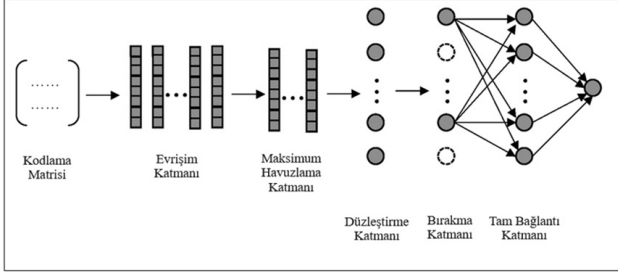


Şekil 1. Örnek basit bölge tespit görüntüsü (Kaynak: (Freepik, 2023).

Bu veriler, otonom olarak bir uçuşu mümkün kılarak operasyonu kolaylaştıracak ve erişilebilirliği artıracaktır. Bu erişim olaylığı, insansız hava araçlarının akıllı mobilite tekliflerinin bir parçası haline gelmesine sebep olacaktır. YZ tabanlı hava araçları, büyük ölçüde bilgisayar görüşüne güvenecektir (Zhu, 2019). Bu teknoloji, bu tipten araçların uçarken nesnelere algılamasına yardımcı olmuş; bilgilerin analizine ve kaydedilmesine olanak sağlamıştır. Zaten bu teknoloji insansız hava araçlarının; uzaktan algılama çalışmalarında kullanılmakta olan uydu ve uçaklara göre daha doğru, hızlı ve düşük maliyetli veriler kazandırılması anlamına da gelmektedir. Özellikle tarımsal bir amaçla elde edilen görüntüler, görüntü işleme yazılımlarında değerlendirilerek elde edilmektedir. Öte taraftan tarımsal ilaç kullanımı da günümüzde bu sistemler ile azaltılmakta ve bu sayede çevrenin korunması desteklenmektedir. Bir taraftan da yıl içerisinde özellikle tarımsal faaliyetin yoğun olduğu aylarda; aşırı çalışma temposu, traktörlerin arızalanmasına neden olabilir (Atlı, 2024). Bu sayede bu tarz bir problemin de önüne geçilecektir. Ancak şu belirtilmelidir ki, aşağıda detaylandırılacak "bilgisayar değerlendirmesi" çerçevesinde; bu araçların günümüzde büyük arazilerde kullanımı uygun, ancak küçük arazilerde kullanımı uygun değildir (Akkamış & Çalışkan, 2020).

Söz konusu bilgisayar değerlendirmesi, bir sinir ağı ile gerçekleştirilen yüksek performanslı görüntü işleme yöntemiyle çalışmaktadır. Bu sinir ağı, makine öğreniminde algoritmaları uygulamak için kullanılan katmanlı bir mimari olarak düşünülebilir. Sinir ağları, hava aracının nesneyi algılamasına, sınıflandırmasına ve izlemesine yardımcı olmaktadır. Buradaki bilgiler, aynı zamanda (fiziksel olarak karmaşık bir ortam öngörüsüyle) biyolojik afetler esnasında hava araçlarının birbirlerine çarpışmalarından kaçınmasını ve temel hedefi bulup bu hedefi izlemesini sağlayacaktır. Bu izleme gerçek

zamanlı olacaktır. Bu noktada bir derin öğrenme algoritması olan; konvolüsyon sinir ağları (CNN) tabanlı yaklaşımlar, nesne tespiti için rahatlıkla kullanılabilir. CNN, herhangi bir nesnenin diğerinden ayırt edilebilmesini de sağlayacaktır. Bu, söz konusu insansız hava aracının yine temel hedefi rahatlıkla bulabilmesine olanak sağlaması anlamına gelecektir. CNN mimarisi, aşağıda yer alan Şekil 2 ile açıklanmaktadır.



**Şekil 2.** CNN matrisi (Kaynak: (Whang vd., (2021) kaynağından hareketle, araştırmacı tarafından Türkçe'ye çevrilmiştir).

Yapay sinir ağlarının optimal biçimde uygulanabilmesi, önce makine öğrenimi algoritmalarının nesnelere birtakım bağlamlarda tanınmasını gerektirmektedir. Ardından doğru ve tam bir şekilde sınıflandırması da gerekecektir. Bu husus, insansız hava araçlarına ulaşabilmiş görüntülerin ve/veya hedeflerin algoritmaya beslenmesi yoluyla gerçekleşecektir. İlgili görüntüler de sinir ağına, nesne sınıflarının birinin diğerinden nasıl ayırt edeceğini kolaylıkla öğretecektir. İnsansız hava aracı fotogrametrisi görüntüsünde kesiştirilmiş bölgeler yer aldığına ise (IoU<sup>3</sup> olarak ifade edilebilir) makul derecede iyi olan kabul edilecektir (Stanford Üniversitesi, 2023).

Biyolojik afetlere yapılacak müdahaledeki ikinci temel ise doğrudan insan destekli bir sivil iletişim ağıdır<sup>4</sup>. Bu sivil iletişim ağı; yetkili sivil havacılık otoritesi, sağlık kurum/kuruluşu, afet ve acil durum kurum/kuruluşları ve sivil toplum kuruluşları arasında kurulacaktır. Bu ağ sayesinde; söz konusu kuruluşlarından gelecek text tipinde ya da hücreli veri ağları üzerinden gelecek farklı tipteki veriler, o ülkenin yetkili sivil havacılık otoritesi kurumca anlaşılacaktır. Anlaşılan bu veriler, bölgenin vaka sayısı bakımından gereksinimleri olduğunu teyit

edecek verilerden ibarettir. Yani yalnızca bölgenin vaka sıklığını yansıtacaktır. Bu filtrelenenin YZ destekli olarak sağlanması esastır, filtrelenme bir bölgenin diğer bölgeye göre daha çok vakaya sahip olduğunu açıkça ortaya koymaya yöneliktir.

Şekil 1'den hareketle; emsal olarak X bölgesinde, SARS vakaları Y rakamının üzerine çıktığında bölgede vazifelerini sürdüren sağlık kurum/kuruluşları, afet ve acil durum kurum/kuruluşları ve sivil toplum kuruluşları, bölgeye yönelik bilgilendirmeyi (vaka verilerini) bu YZ destekli iletişim ağı üzerinden sivil havacılık otoritesine aktaracaktır. Otorite bilgiyi teyit edemez ve/veya insansız hava araçlarına ihtiyaç olmadığına kanaat getirirse iki tarafa da ihtiyacın reddine dair bir geri bildirim verecektir. Bilginin teyit edildiği ve insansız hava araçlarının kullanımına kanaat getirdiği durumda ise yetkili otorite insansız hava araçlarının belirlenen hava sahaları üzerinde kullanımına izin verecektir. Bu sayede yetkili otorite, insansız hava araçları kabiliyetlerine tam da bu noktada erişecek ve söz konusu biyolojik afet daha fazla yayılmadan müdahale edecektir



**Şekil 3.** CAAN modeli.

Bu noktada insanoğlunun bu tip krizleri daha kolay atlatabilmeleri amacıyla geliştirilen ve bu çalışmada ilk kez ortaya atılan "Civil Aviation Authority Network" ifadesinin baş harflerinden oluşan kavram; "CAAN Modeli" (Şekil 3) bilimsel araştırmacılara, yetkili sivil havacılık otoritelerine, insansız hava aracı üreticilerine, sağlık kurum/kuruluşlarına, afet ve acil durum dernekleri/başkanlıkları/müdürlüklerine ve sivil toplum kuruluşlarına<sup>5</sup> ileriye dönük çalışmaları, teknolojik, stratejik ve operasyonel kararları için yön verebilir.

Modelde, sol kısım "sağlık otoritesi/kurum/kuruluşlarından, afet ve acil durum dernekleri/başkanlıkları/müdürlüklerinden ve sivil toplum kuruluşlarından sağlanacak olan hastanın muayene/vaka sonucunu ve bu vakanın bölgedeki

<sup>3</sup> Birleştirilmiş sınırlama, tahmin edilen sınırlama ile gerçek sınırlama üzerinde ne kadar doğru konumlandığını ölçen fonksiyondur.

<sup>4</sup> Benzer bir ağ yapısı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Daire Başkanlığı yapısı içerisinde faaliyet gösteren "Sağlık Afet ve Koordinasyon Merkezi" tarafından gerçekleştirilmektedir. Burada gerçekleştirilecek afet müdahale planları da 24.02.2022 tarihli ve 31760 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanan "Afet ve Acil Durum Müdahale Hizmetleri Yönetmeliği" ile desteklenmektedir (Acil Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü, 2024), (Afet ve Acil Durum

Yönetimi Başkanlığı, 2024). Ancak bu merkezlerin nispeten proaktif bir yaklaşım yerine, olay bildirimini ilkesiyle faaliyetlerini gerçekleştirdiği ortaya koyulabilir.

<sup>5</sup> Ülkemizde 20 tam üyesi ve 42 destekçi üyesi ile "Afet Platformu" ve sivil toplum kuruluşlarına finansman sağlamak amacıyla kurulmuş olan "Sivil Toplum İçin Destek Vakfı" gibi başlıca girişimler, ülkemizde faaliyetlerini halen gerçekleştirmektedir (Afet Platformu, 2024), (Sivil Toplum Destek, 2024).

sıklığını”, ortadaki kısım “sivil havacılık otoritesini” ve sağdaki kısım ise “insansız hava araçlarının harekete geçmesini” ifade etmektedir. Sol kısımdan alınacak veriler, ortadaki kısımda filtrelenecek (bölgenin insansız hava aracı müdahalesine ihtiyaç olup olmadığına karar verilmesi) ve ardından sağ kısımda insansız hava araçları vakit kaybetmeden havalanacaktır.

Ülkelerin yetkili sivil havacılık otoritelerine kayıtlı insansız hava araçları, “drone dropper<sup>6</sup>” araçlarıyla ilgili entegre olarak harekete geçebilir. İnsansız hava araçları, biyolojik afetlere günümüzde acil ilaç teslimi amacıyla rahatlıkla müdahale edebilirler. Ancak çağın gerektirdiği gereksinimlere göre söz konusu araçların, bu tipteki afetler için yepyeni hizmetler vermesi de sağlanabilir.

Son olarak bu çalışmanın bulgularıyla; bu çalışmaya yol gösteren bir başka çalışmanın bulgularının karşılaştırılması da önem arz etmektedir. Yine aynı yöntemle gerçekleşen bir başka çalışma (Mengist vd., 2020), çevre bilimi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Yöntemin konuya özgü mevcut bilgiyi değerlendirmesi, gelecekteki eğilimleri saptaması ve literatürde gözlemlenen boşlukların doldurulmasını amaçlaması sebepleriyle; içinde bulunulan çalışmaya benzer niteliktedir. Ayrıca özellikle kamu için uygun öneriler silsilesine varması, çalışmayı yine bu çalışma ile bağdaştırabilir.

Yine bu çalışmanın yöntemi yerine, “Analitik Hiyerarşi Prosesi” (AHP) yöntemi<sup>7</sup> de gelecek çalışmalara ışık tutabilir. Benzer bir çalışmada (Atlı, 2024a); sonuçları itibarıyla karar vericiler, çiftçiler ve diğer paydaşlar için makinelerin daha iyi çalışma koşullarında bakımını planlamaya yardımcı olacak bir kılavuz oluşturulmuştur. Yine benzer yönetime sahip bir diğer çalışmada (Atlı & Senir, 2024) amaç; tarımsal pestisitlerin tedariki için en uygun yeşil tedarikçiyi seçmektir. Bu çalışmada, en uygun tedarikçiyi seçmesi gereken tarımsal işletmelere yardımcı olmak için “Geliştirilmiş Bulanık Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi” (IMF SWARA)<sup>8</sup> ve bulanık Ağırlıklandırılmış Toplam Ürün Değerlendirmesi (WASPAS)<sup>9</sup> yöntemlerinin birleşimine dayalı bir çözüm önerilmiştir. Zaten sistematik analiz ve meta-analiz yöntemi ile yapılan çalışmaların da, ARAS<sup>10</sup> tipinde yöntemlere doğru genişlediği ve bunların gelecek çalışmalarda daha fazla tercih edilebilecek yöntemler olduğu izlenmiştir (Atlı, 2024b). Nitekim bu tipten yöntemlerle çalışma; çok

sayıda entegre İHA sistem alternatiflerini de seçebilecek ve bu seçimi bir karara bağlayabilecektir.

Gelecek araştırmalara kaynaklık sağlaması bakımından çalışma; biyolojik afetler yerine teknolojik afetler üzerine de odaklanabilir. Bu çerçevede gerçekleştirilecek yeni bir araştırma, literatüre daha vizyoner bir anlayış katabilir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Literatürde acil müdahale süresine yönelik çalışmalar yeterli seviyede değildir. Çalışma doğrudan bu sürenin indirgenmesi amacına yöneliktir. İnsansız hava araçları sayesinde biyolojik afetlerin acil müdahale süresi gelişecektir. İlaveten insansız hava araçlarının mümkün olabilecek en düşük irtifalarda uçuş yapması<sup>11</sup> model için önem teşkil edecektir. Nitekim yerden yükseklik ne denli fazla olursa görüntü içerisinde nesne sayısı da artacak ve nesnelerin anlaşılabilirliği o oranda azalacaktır.

Ayrıca insansız hava araçları günümüzde halen sınırlı bir taşıma kapasitesine ve kısıtlı bir batarya süresine sahiptir. Burada çalışmanın önerisi, en azından geçiş döneminde geleneksel araçların ve insansız hava araçlarının iş birliği yoluna gitmesi olacaktır.

Ancak bu tipteki dezavantajlara nazaran, modelin avantajlarının çok daha baskın olduğu açıktır. Biyolojik afetlerde, insansız hava araçları kabiliyetlerinden şüphesiz yararlanılmalıdır. Hatta bu kabiliyetlerden de en kısa yoldan faydalanmak da esas gaye olmalıdır. Neticede biyolojik afetler sürecinde, YZ destekli insansız hava araçlarından sırasıyla şu yollarla yararlanılmalıdır;

Araştırma içerisinde belirtildiği üzere faydalanılacak iki ayrı temel, yalnızca birbirini izleyerek uygulandığında biyolojik afetlere doğru bir yaklaşım sağlayacaktır. Öncelikle biyolojik afetlerin nicel bakımdan yayılma hızı ve bölgesel sıklıklarının ölçülmesi esastır. Bu, hastaların muayene ve/veya hastalığı tespit biçimlerine bağlı olarak sağlık otoritesinin uygulamalarına bağlı olarak belirlenebilir. Bu ölçüm yine, YZ destekli bir veri akışıyla da sağlanabilir. Bu verilerin analizi de, basit bir ifadeyle hasta sayısının yani o bölgedeki vaka sıklığının izlenmesi amacıyla uygulanacaktır. Bu yolla biyolojik afetlerin henüz emekleme aşamasında, vaka sayısının artma eğiliminde olduğu bölgeler birtakım göstergeler ile görsel üzerinde ifade edilecektir.

<sup>6</sup> İnsansız hava araçlarının fırlatıcısı veya düşürücüsü araç.

<sup>7</sup> Karar almada, grup veya bireyin önceliklerini de dikkate alan, nitel ve nicel değişkenleri bir arada değerlendiren matematiksel yöntem (Dağdeviren, vd., 2004).

<sup>8</sup> Karar vericiye önceliklerini seçme şansı veren, uzman odaklı bir yöntem. Havayolu endüstrisinde karşılaşılan problemler gibi çok sayıda problemde kullanılmaktadır (Ulu, vd., 2022).

<sup>9</sup> Karar alma süreci için özellikle ticari alanda kabul görmüş, nispeten yeni bir yaklaşım (Barbara, vd., 2023).

<sup>10</sup> Alternatifin performansını belirlemeye yardımcı olur ve her alternatifin ideal alternatifine göre oransal anlamda benzerliğini ortaya koyar (Dadelo, vd., 2012).

<sup>11</sup> Dünya üzerindeki herhangi bir ülkenin sivil havacılık otoritesinin, gelecekte ilgili talimatta belirteceği asgari irtifa seviyesi.

Biyolojik afetlere yapılacak müdahaledeki diğer aşamada ise doğrudan insan destekli bir sivil iletişim ağı esas olacaktır. Bu sivil iletişim ağı; yetkili sivil havacılık otoritesi, afet ve acil durum kurum/kuruluşları, sağlık kurum/kuruluşları ve sivil toplum kuruluşları arasında kurulacaktır. Bu ağ sayesinde söz konusu kuruluşlarından gelecek text tipindeki ya da yakın gelecekte hücrel veri ağları üzerinden gelecek farklı tipteki veriler; o ülkenin yetkili sivil havacılık otoritesi kurum tarafından filtrelenecektir. Bu filtrelenenin yine öğrenme destekli olarak sağlanması uygun olacaktır. Yani neticede sivil havacılık otoritesi, o bölgeye insansız hava aracının gereksinimine karar verirse uçuş gerçekleşecektir. Dönemin ve afetin ihtiyaçlarına göre insansız hava aracı o bölgenin acil ilaç vb. gibi ihtiyaçlarını rahatlıkla karşılayacaktır.

Biyolojik afetler süreci, sosyal medya tipi platformlar yoluyla sıklıkla yanlış bilgilendirmelerle süregelmektedir. Bu yanlışın önüne geçmenin yollarından biri yine "CAAN Modeli" olacaktır. Model sayesinde yetkili otorite, filtrelemeyi yine YZ destekli bir yolla söz konusu ağ üzerinden yapacaktır. Bilginin akışı bu yolla, daha sağlıklı hale gelecektir.

Çalışma son olarak dünyanın teknolojik gelişmelerle beraber ürkütücü, karmaşık, içinden çıkılmaz ve sağlıksız bir anlayışın içinde yer almasındansa; bilimsel önemiyet anlayışı gözeterek YZ destekli teknolojileri kullanarak biyolojik afet müdahalelerini kolaylıkla sağladığı sağlıklı bir anlayışın içinde yer almasını önermektedir.

#### Yazarların Katkısı

Makaleye tek yazarlıdır ve tüm katkı sorumlu yazara aittir.

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

#### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### Kaynaklar

- Acil Sağlık Hizmetleri Genel Müdürlüğü. (2024). *Sağlık Afet ve Koordinasyon Merkezi Birimi (SAKOM)*. Web: <https://ashgmafetacildb.saglik.gov.tr/TR-80256/saglik-afet-ve-koordinasyon-merkezi-birimi-sakom.html> [Erişim tarihi: 26.06.2024].
- AFAD (2023). *Biyolojik Ajanların Sınıflandırılması*. Web: <https://www.afad.gov.tr> [Erişim tarihi: 01.02.2023].
- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. (2024). *Türkiye Afet Müdahale Planı*. Web: <https://www.afad.gov.tr/turkiye-afet-mudahale-plani> [Erişim tarihi: 26.06.2024].

- Afet Platformu. (2024). *Afet Platformu/Üyelerimiz*. Web: <https://afetplatformu.org.tr/uyeler/> [Erişim tarihi: 26.06.2024].
- Baker, C.A., Rapp, R.R., Elwakil, E., Zhang, J. (2020). Infrastructure Assessment Post-Disaster: Remotely Sensing Bridge Structural Damage By Unmanned Aerial Vehicle In Low-Light Conditions. *Journal of Emergency Management*, 18(1), 27-41.
- Aiken, R.M., & Epstein, R.G., (2000). Ethical Guidelines for AI in Education: Starting a Conversation. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 11, 163-176.
- Akkamış, M., & Çalışkan, S. (2020). İnsansız Hava Araçları ve Tarımsal Uygulamalarda Kullanımı. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 2(1), 08-16.
- Amisha, P. M., Pathania, M., & Rathaur, V. K. (2019). Overview of Artificial Intelligence in Medicine. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, 8(7), 2328.
- Andriessen, J., & Sandberg, J. (1999). Where is Education Heading and How About AI. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 10(2), 130-150.
- Atlı, H. F. (2024a). Safety of Agricultural Machinery and Tractor Maintenance Planning With Fuzzy Logic and MCDM For Agricultural Productivity. *International Journal of Agriculture Environment and Food Sciences*, 8(1), 25-43. <https://doi.org/10.31015/jaefs.2024.1.4>.
- Atlı, H. F. (2024b). Bulanık ARAS (B-ARAS) Yönteminin Sistemik Bir İncelemesi ve Meta-Analizi. *SSD Journal*, 9(42), 1-16. <http://dx.doi.org/10.31567/ssd.1107>.
- Atlı, H. F., & Senir, G. (2024). Green Supplier Selection Using IMF SWARA and Fuzzy WASPAS Techniques for The Supply of Agricultural Pesticides. *Black Sea Journal of Agriculture*, 7(4), 377-390. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1463382>.
- Barbara, F., Moreira, M. Â. L., Fávero, L. P., & Santos, M. D. (2023). Interactive Internet-based Tool Proposal for the WASPAS Method: a Contribution for Decision-Making Process. *10th International Conference on Information Technology and Quantitative Management*, 221, 200-207.
- Bushnaq, O., & Natalizio, E. (2022). Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Disaster Management. *Nanotechnology-Based Smart Remote Sensing Networks for Disaster Prevention*, 23(4), 159-188.
- Cao, Y., & Jiang, H. (2020). Research on Emergency Logistics Management Based on Intelligent Supply Chain. *International Conference on New Energy Technology and ID*, 1(1).
- Dadelo, S., Turskıs, Z., Zavadskas, E., & Dadeliene, R. (2012). Multiple Criteria Assessment of Elite Security Personal on the Basis of ARAS and Expert Methods. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 46 (4), 65-88.
- Dağdeviren, M., Akay, D., & Kurt, M. (2004). İş Değerlendirme Sürecinde Analitik Hiyerarşi Prosesi

- ve Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19 (2), 131-138.
- Değirmen, S., Çavdur, F., & Sebatlı, A. (2018). Afet Operasyonları Yönetiminde İnsansız Hava Araçlarının Kullanımı: Gözetleme Operasyonları İçin Rota Planlama. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(4), 11-26.
- Dhokare, S., & Gaikwad, A. (2021). A Study Of Artificial Intelligence: Types, Opportunities, Challenges. *An International Bilingual Peer Reviewed Refereed Research Journal*, 11(41), 133-137.
- Estrada, M.A.R., & Ndoma, A. (2018). The Uses Of Unmanned Aerial Vehicles –UAV’s- (Or Drones) in Social Logistic: Natural Disasters Response and Humanitarian Relief Aid. *Procedia Computer Science*, 149, 375–383.
- Euronews (2023). *Zipline: Amazon ve Google’ı Geride Bırakan Acil Drone Kargo Hattı*. Web: [www.tr.euronews.com](http://www.tr.euronews.com) [Erişim tarihi: 01.02.2023].
- Freepik (2023). *Map Illustration*. Web: <https://www.freepik.com> [Erişim tarihi: 26.11.2023].
- Kamilaris, A., & Boldú, F.X.P. (2017). Disaster Monitoring using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning. *Disaster Management for Resilience and Public Safety Workshop, in Proc. of EnviroInfo2017*. Luxembourg.
- Karacam, Z. (2013). Sistematik Derleme Metodolojisi: Sistematik Derleme Hazırlamak İçin Bir Rehber. *DEUHYO ED*, 6 (1), 26-33.
- Ludwig, L., Mattedi, M.A., Ribeiro, E.A.W.W., & Spiess, M.R. (2023). Asymmetries in the application of Unmanned Aerial Vehicles in different phases of Disaster Risk Management (DRM). *Desenvolv. e Meio Ambiente usa uma Licença 423 Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional*, 62, 423-436.
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method For Conducting Systematic Literature Review and Meta-Analysis For Environmental Science Research. *MethodsX*, 7, 100777.
- Özkan, Ö. (2018). İnsansız Hava Araçları ile Türkiye’deki Orman Yangınlarının Tespiti Probleminin Tavlama Benzetimi ile En İyilenmesi. 38. *Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Kongresi*, Eskişehir, Türkiye.
- Sivil Toplum Destek. (2024). *Sivil Toplum için Destek Vakfı*. Web: <https://siviltoplumdestek.org/hakkimizda> [Erişim tarihi: 26.06.2024].
- Sharma, R., Chopra, S.R., & Gupta, A. (2024). Power Optimization of Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Future Wireless Communication Using Hybrid Beamforming Technique in Disaster Management. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 1285(012025).
- Stanford University (2023). *CNN*. Web: <https://stanford.edu> [Erişim tarihi: 26.11.2024].
- Tech Inside (2023). *Yapay Zekâ Afet Yönetimini Değiştirecek*. Web: [www.techinside.com](http://www.techinside.com) [Erişim tarihi: 01.02.2026].
- Tekin, T. (2021). Tarihten Günümüze Epidemiler, Pandemiler ve Ekonomik Sonuçları. *Journal of Süleyman Demirel University Institute of Social Sciences*, 40, 330-355.
- Türk, T. (2013). Doğal Afet Yönetiminde İnsansız Hava Araçlarının İHA Kullanılması. *Türkiye Ulusal Fotogrametri ve Uzaktan Algılama Birliği VII. Teknik Sempozyumu (TUFUAB 2013)*, Trabzon, Türkiye.
- Ulu, M., Türkan, Y. S., & Mengüç, K. (2022). Trafik Kazalarını Etkileyen Faktörlerin Ağırlıklarının BWM ve SWARA Yöntemleri ile Belirlenmesi. 5 (2), 227-238.
- Uman, L.S. (2011). Systematic Reviews and Metaanalyses. *J Can Acad Child Adolesc Psychiatry*, 20 (1), 57-59.
- Uysal, M., Yılmaz, M., Tiryakioğlu, İ., & Polat, N. (2018). İnsansız Hava Araçlarının Afet Yönetiminde Kullanımı. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences*, 6, 219-224.
- Villi, O., & Yakar, M (2023). İnsansız Hava Araçları ve CBS Uygulamaları. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 5(1), 20-33.
- Villi, O., & Yakar, M. (2022). İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Sensör Tipleri. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*, 4(2), 73-100.
- Whang, X., Yan, R., & Chen, Y. (2021). *Computational Identification of Ubiquitination Sites in Arabidopsis thaliana Using Convolutional Neural Networks*, Thermo Fisher Scientific.
- Yılmaz, Ü. (2019). İnsani Yardım Lojistiği Faaliyetlerinde İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları. *Journal of Vocational and Social Sciences of Turkey – Journal of VOSST*, 1(2), 43-54.
- Zhu, X., Zhang, G., & Sun, B. (2019). *A Comprehensive Literature Review of the Demand Forecasting Methods of Emergency Resources from the Perspective of Artificial Intelligence*. *Natural Hazards*, 97(1), 65-82.



© Author(s) 2024.

This work is distributed under <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>