



JASS

Journal of Aviation and Space Studies
Havacılık ve Uzay alışmaları Dergisi

An Academic Journal (Akademik Dergi)

**Journal
of
Aviation and Space Studies
(J. Aviat. Space Stud.)**

JASS

(Havacılık ve Uzay alışmaları Dergisi)

E-ISSN: 2757-7317

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jass>

Year/Yıl: 2025, Volume/Cilt: 5, Issue/Sayı: 1

February (şubat) 2025



Journal of Aviation and Space Studies (Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi)

Publisher
(Yayımcı)

University of Turkish Aeronautical Association
(Türk Hava Kurumu Üniversitesi)

Owner on behalf of the University
(Üniversite adına İmtiyaz Sahibi)

Prof. Dr. Rahmi Er

Editor-in-Chief
(Başeditör)

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Ali Uğur Sazaklıoğlu

General information
(Genel bilgiler)

International, interdisciplinary, open access,
electronical, peer-reviewed, periodical, biannually
(Uluslararası, disiplinlerarası, açık erişimli, elektronik,
hakemli, periyodik, yılda iki sayı)

E-ISSN

2757-7317

Journal abbreviation
(Dergi adı kısaltması)

J. Aviat. Space Stud.

Web address
(İnternet adresi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jass>

E-mail address
(E-posta adresi)

jass@thk.edu.tr

Correspondence address
(İletişim adresi)

Türk Hava Kurumu Üniversitesi Rektörlüğü,
Bahçekapı Mahallesi, Okul Sokak, No: 11, 06790,
Etimesgut, Ankara, Türkiye

Journal of Aviation and Space Studies (Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi)

EDITORIAL BOARD (EDİTÖR KURULU)

Editor-in-Chief (Başeditör)

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Ali Uğur Sazaklıoğlu – UTAA (THKÜ), Türkiye

Editorial Advisory Board (Yayın Kurulu)

Prof. Dr. Çetin Şentürk – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Mehmet Halûk Aksel – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Uğur Murat Leloğlu – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Yaşar Köse – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Aliye Atay – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Hicran Kasa – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Ali Uğur Sazaklıoğlu – UTAA (THKÜ), Türkiye

Section Editors (Alan Editörleri)

Prof. Dr. Çetin Şentürk – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Kürşad Melih Güleren – Eskisehir Osmangazi University (EOGÜ), Türkiye

Prof. Dr. Mehmet Halûk Aksel – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Melahat Bilge Demirköz – Middle East Technical University (ODTÜ), Türkiye

Prof. Dr. Melih Kuşhan – Eskisehir Osmangazi University (EOGÜ), Türkiye

Prof. Dr. Tahsin Çağrı Şişman – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Tuğrul Oktay – Erciyes University (ERÜ), Türkiye

Prof. Dr. Uğur Murat Leloğlu – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Volkan Bakış – Akdeniz University (Akdeniz Üniversitesi), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Bahar Aşçı – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Reza Aghazadeh – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Didem Göçmen – UTAA (THKÜ), Türkiye

LAYOUT EDITORS (REDAKTÖR VE MİZANPAJ EDİTÖRLERİ)

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Mert Akın – UTAA (THKÜ), Türkiye

Lect. (Öğr. Gör.) Dr. Çağrı Kaygısız – UTAA (THKÜ), Türkiye

Lect. (Öğr. Gör.) Suna Karakaş Şakar – UTAA (THKÜ), Türkiye

Rsc. Assist. (Arş. Gör.) Hikmet Kübra Bayram – UTAA (THKÜ), Türkiye

ISSUE EDITORS (SAYI EDİTÖRLERİ)

Prof. Dr. Çetin Şentürk – UTAA (THKÜ), Türkiye

Prof. Dr. Kürşad Melih Güleren – Eskisehir Osmangazi University (EOGÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Bahar Aşçı – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Reza Aghazadeh – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Ali Uğur Sazaklıoğlu – UTAA (THKÜ), Türkiye

ISSUE REVIEWERS (SAYI HAKEMLERİ)

Prof. Dr. Gürel Çam – İskenderun Technical University (İskenderun Teknik Üniversitesi), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Ataollah Khanlari – Tarsus University (Tarsus Üniversitesi), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Koray Özsoy – Isparta University of Applied Sciences (ISUBÜ), Türkiye

Assoc. Prof. Dr. (Doç. Dr.) Muharrem Hilmi Aksoy – Konya Technical University (Konya Teknik Üniversitesi), Türkiye

Dr. Arif Furkan Mendi, Havelsan, Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Ayşe Meriç Yazıcı – İstanbul Gelisim University (İGÜ), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Esra Hasdemir – Atılım University (Atılım Üniversitesi), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Fulya Kahrıman – Kocaeli University (Kocaeli Üniversitesi),
Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Human Amiri – Sivas Science and Technology University (SBTÜ),
Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Mert Akın – UTAA (THKÜ), Türkiye

Assist. Prof. Dr. (Dr. Öğr. Üyesi) Osman Babayiğit – Karamanoğlu Mehmetbey University (KMÜ),
Türkiye

(# of Reviewers from other Institutions)/(Total # of Reviewers)=10/11≈91%

(Diğer Kurumlardan olan Hakemlerin Sayısı)/(Toplam Hakem Sayısı)=10/11≈%91

Journal of Aviation and Space Studies (Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi)

AIMS & SCOPE

Journal of Aviation and Space Studies is an international, open access, electronic, peer-reviewed, nonprofit, interdisciplinary journal that embraces the highest standards in terms of publication ethics, published by [University of Turkish Aeronautical Association](#), the university of Turkish Aeronautical Association that has an important role and activity in the national and international platforms about Aviation. The main aim of the journal is to increase the exchange of knowledge and to have a contribution in the development of the scientific background in the field of aviation and aerospace by publishing the studies in the regarding interdisciplinary research fields.

In this manner, the aviation and/or aerospace oriented studies in engineering sciences, natural sciences and social sciences are in the scope of the journal. The research areas in the scope of the journal are including but not limited to:

- Aviation and Space History
- Aviation and Space Economics
- Aviation and Space Management
- International Relations in Aviation and Space
- Security Studies in Aviation and Space
- Law in Aviation and Space
- Space Policy
- Software Engineering in Aviation and Space
- Orbital Mechanics and Space Environment
- Attitude Determination and Control
- Spacecrafts and Payloads
- Propulsion Systems and Plasma
- Aviation and Space Engineering (General)

The journal accepts the original research articles and review articles written in Turkish or English.

AMAÇ & KAPSAM

Havacılık ve Uzay Çalışmaları Dergisi ulusal ve uluslararası platformlarda Havacılık için önemli bir rolü ve etkinliği bulunan Türk Hava Kurumu'nun üniversitesi olan [Türk Hava Kurumu Üniversitesi](#)'nin yayımcısı olduğu uluslararası, açık erişimli, elektronik, hakemli, yayın etiği için en yüksek standartları benimseyen ve kâr amacı olmayan disiplinlerarası bir dergidir. Derginin temel amacı, havacılık ve uzay bilimleri ile ilgili disiplinlerarası çalışmaları konunun ilgililerine ulaştırarak bu alanlardaki bilgi paylaşımını artırmak ve bilimsel altyapının gelişmesine katkıda bulunmaktır.

Bu bağlamda; mühendislik bilimlerinin, temel bilimlerin ve sosyal bilimlerin havacılık ve uzay bilimleri odaklı çalışmaları derginin kapsamında yer almaktadır. Derginin kapsamına giren araştırma alanları, aşağıdakilerle sınırlı olmaksızın, şunlardır:

- Havacılık ve Uzay Tarihi
- Havacılık ve Uzay Ekonomisi
- Havacılık ve Uzay İşletmeciliği
- Havacılık ve Uzay Çalışmalarında Uluslararası İlişkiler
- Havacılık ve Uzay Alanındaki Güvenlik Çalışmaları
- Havacılık ve Uzay Hukuku
- Uzay Politikası
- Havacılık ve Uzay Alanında Yazılım
- Yörünge Mekaniği ve Uzay Ortamı
- Yönelim Belirleme ve Kontrol
- Uzay Araçları ve Görev Yükleri
- İtki Sistemleri ve Plazma
- Havacılık ve Uzay Mühendisliği (Genel)

Dergiye Türkçe ya da İngilizce yazılmış özgün araştırma makaleleri ve derleme makaleler kabul edilmektedir.

ABSTRACTING & INDEXING (TARANMA & DİZİNLER)

The papers published in JASS are included in the following databases/resources (Dergide yayımlanan makaleler aşağıda verilen dizinlerde/kaynaklarda yer almaktadır):

- Google Scholar
- Asos Index
- Crossref
- ROAD
- Journal Factor
- CiteFactor
- Academic Resource Index
- Index Copernicus International (ICI World of Journals)

MANUSCRIPT EVALUATION PROCESS

Manuscripts found suitable for the Journal are sent to Section Editors by the Editor-in-Chief to appoint the reviewers. The manuscripts undergo peer review process by two reviewers, however if it is necessary, a third reviewer may be included into the process. The peer review is handled as double-blind and whole process is established online through DergiPark. During the initial check, the manuscripts are inspected by the iThenticate software for plagiarism prevention.

MAKALE DEĞERLENDİRME SÜRECİ

Dergiye uygun bulunan makaleler hakem görevlendirilmesi için Başeditör tarafından Alan Editörlerine gönderilir. Makaleler iki hakemin yer aldığı değerlendirme sürecinden geçer, fakat gerekli olması durumunda üçüncü bir hakem sürece dahil edilebilir. Hakem süreci çift-kör olarak gerçekleştirilir ve tüm değerlendirme süreci DergiPark üzerinden çevrimiçi olarak yürütülür. İlk kontrol esnasında, makaleler intihal engellenmesi açısından iThenticate yazılımı vasıtasıyla incelenir.

PERMISSIONS

The papers published in the journal are licensed under [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#). According to the regarding license, the materials of the papers may directly be used by the third parties in noncommercial purposes by giving appropriate credit, under the restriction that they distribute their contributions under the same license.

İZİNLER

Bu dergide yayımlanan makaleler [Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı](#) ile lisanslanmıştır. Söz konusu lisans kapsamında makalelerin içerikleri üçüncü partiler tarafından gayri ticari amaçlarla, katkılarını aynı lisans kapsamında dağıtmak şartıyla uygun bir şekilde referans vererek doğrudan kullanılabilir.

NOTICE

No responsibility is assumed by the Journal/Publisher from any use of any methods, instructions or ideas contained in the materials herein. Authors are responsible for the opinions stated in the papers in the Journal. The papers published in the Journal meet the research and publication ethics standards.

UYARI

Dergi/Yayıncı, Dergideki materyallerde yer alan herhangi bir yöntem, talimat veya fikrin kullanımından dolayı hiçbir sorumluluk kabul etmemektedir. Dergideki makalelerde belirtilen görüşlerden ilgili yazarlar sorumludur. Dergide yayımlanan makaleler araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

CONTENTS (İÇİNDEKİLER)

Research Paper (Araştırma Makalesi)

Machine learning-based inflight food waste prediction for sustainable aviation.....1
Duygu Aghazadeh

Review Paper (Derleme Makalesi)

Eklemeli imalatta kullanılan yeni malzemeler: Uzay araştırmaları.....17
Mehmet Musab Arslan, Büşra Çalık, Gültekin Uzun

Research Paper (Araştırma Makalesi)

Uzay kaynaklarının kullanımının hukuki ve ekonomik etkileri.....35
Mehmet Erkan Killoğlu

Theoretical Paper (Teorik Makale)

Serrasyonlu kanat kenarları ve gürültü azaltma: Aerodinamik çalışmalara genel bir bakış.....48
Şükran Yeşil, Melih Yıldız

Theoretical Paper (Teorik Makale)

Aerodynamic performance analysis of NACA 0015 airfoil at low Reynolds numbers.....65
Mustafa Buğday



Research Paper

Machine learning-based inflight food waste prediction for sustainable aviation

Duygu Aghazadeh¹

Abstract. The study delves into the utilization of machine learning to predict and reduce inflight food waste, improving sustainability in aviation logistics. Inflight food waste, a major environmental problem, is determined by passenger choices, flight parameters, and catering services. The research presents two efficient machine learning algorithms, that are, Multiple Linear and Random Forest Regression to perform food waste prediction during the flights. The models are trained using a synthetically created dataset of 10,000 records and 15 features, which include factors such as meal type, waste weight, and passenger number. The study undertakes considerable feature engineering, including the development of new features such as "Waste per Passenger" and "Meal Efficiency" to increase forecast accuracy. A correlation analysis is also used to determine the most influential characteristics. The models' performance is assessed in a Python-based computational environment, with MLR concentrating on linear links between food waste and predictors and RFR on non-linear interactions. The results show that both models can effectively forecast inflight food waste, with RFR being more adaptable to complicated patterns. The research concludes with recommendations for airline managers to apply data-driven waste reduction techniques that correspond with overall sustainability goals in aviation logistics. The models created are a useful tool for optimizing inflight food, lowering environmental impact, and contributing to the industry's sustainability initiatives.

Keywords: Inflight food waste, multiple linear regression, sustainability, random forest regression.

Araştırma Makalesi

Sürdürülebilir havacılık için makine öğrenimine dayalı uçuş içi yemek israfı tahmini

Öz. Bu çalışma, havacılık lojistiğinde sürdürülebilirliği iyileştirmek için uçak içi gıda israfını tahmin etmek ve azaltmak amacıyla makine öğreniminin kullanımını araştırmaktadır. Büyük bir çevresel sorun olan uçak içi gıda israfı, yolcu tercihleri, uçuş parametreleri ve ikram hizmetleri tarafından belirlenmektedir. Bu araştırma, uçuşlar sırasında gıda israfı tahmini yapmak için Çoklu Doğrusal ve Rastgele Orman Regresyonu olmak üzere iki etkili makine öğrenimi algoritması sunmaktadır. Modeller, yemek türü, israf ağırlığı ve yolcu sayısı gibi faktörleri içeren 10.000 kayıt ve 15 özellikten oluşan sentetik olarak oluşturulmuş bir veri kümesi kullanılarak eğitilmiştir. Çalışma, tahmin doğruluğunu artırmak için "Yolcu Başına İsrar" ve "Yemek Verimliliği" gibi yeni özelliklerin geliştirilmesi de dahil olmak üzere önemli özellik mühendisliği üstlenmektedir. En etkili özellikleri belirlemek için bir korelasyon analizi de kullanılmaktadır. Modellerin performansı, Python tabanlı bir hesaplama ortamında değerlendirilmekte olup Çoklu Doğrusal Regresyon yiyecek israfı ve göstergeler arasındaki doğrusal bağlantılara, Rastgele Orman Regresyonu ise doğrusal olmayan etkileşimlere odaklanmaktadır. Sonuçlar, her iki modelin de uçuş sırasındaki gıda israfını etkili bir şekilde tahmin edebildiğini ve Rastgele Orman Regresyonunun karmaşık kalıplara daha iyi uyum sağladığını göstermektedir. Araştırma, havayolu yöneticilerine havacılık lojistiğindeki genel sürdürülebilirlik hedeflerine karşılık gelen veri odaklı israf azaltma tekniklerini uygulamaları yönünde önerilerle sonuçlanmaktadır. Oluşturulan modeller, uçuş sırasındaki yiyecekleri optimize etmek, çevresel etkiyi azaltmak ve sektörün sürdürülebilirlik girişimlerine katkıda bulunmak için kullanışlı bir araçtır.

Anahtar Kelimeler: Uçuş içi yemek israfı, çoklu doğrusal regresyon, sürdürülebilirlik, rastgele orman regresyonu.

¹ Logistics Management Department, University of Turkish Aeronautical Association, 06790, Ankara, Türkiye; daghazadeh@tbk.edu.tr (Corresponding Author)

<https://doi.org/10.52995/jass.1536614>

Received: August 21, 2024; Accepted: September 15, 2024; Published: February 28, 2025

© 2025 University of Turkish Aeronautical Association. All rights reserved.

This paper is licensed under [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



1. INTRODUCTION

Aviation logistics refers to the process of planning, executing, and overseeing the movement of goods, services, and information within the aviation industry (Wu & Yang, 2021). This encompasses the administration of resources, infrastructure, and services associated with air transportation, such as aircraft, airports, and ground handling operations. Aviation logistics is important because it facilitates the transfer of goods, services, and people via air transportation. Aviation logistics is critical to international trade, emergency response, and tourism. It allows for the prompt delivery of high-value and time-sensitive items, the support of supply chains, and the ability to respond quickly to disasters and medical situations. Furthermore, air logistics helps to spur economic growth, create jobs, and link regions and nations. It has an important role in supporting numerous businesses and building international relationships (Sambo & Hlengwa, 2018).

Aviation logistics has always been popular, and it is anticipated to be imposed to an exponential growth through the next few years. In 2019, airlines globally transported around 4.5 billion passengers, with this figure expected to rise to approximately 10.0 billion by 2040 (Lohawala & Wen, 2024). This demonstrates a significant and growing demand for air travel, emphasizing the significance of tackling sustainability issues in aviation logistics in order to successfully reduce the unpleasant effects of aviation on the environment (Lohawala & Wen, 2024). The growing popularity of air logistics is having severe consequences for the environment due to the sector's large contribution to climate change and health issues. In the context of aviation logistics and food waste management, sustainability entails reducing the environmental effect of food waste, guaranteeing social responsibility in food handling and trash management, and ensuring economic viability. Airlines and catering firms may help the environment by decreasing food waste, addressing food insecurity, and promoting ethical corporate behavior. This may be done by strategies such as food waste avoidance, reuse, recycling, and energy recovery, in line with the Food Waste Hierarchy (FWH) and CSR standards.

Machine Learning (ML) is a subsection of artificial intelligence that trains computers to learn from data without requiring programming expertise. This technology is quickly altering different sectors, and its potential to solve the critical issue of food waste is enormous. Machine learning algorithms can identify patterns and trends in enormous amounts of data that humans may ignore. This skill has proven useful in the battle against food waste, from farm to fork. According to (Rodrigues, Miguéis, Freitas, & Machado, 2024), short-term demand forecasts are enhanced by utilization of machine learning methods by catering services which leads to the food waste reduction. The study shows that using machine learning to forecast future demand can result in a 14% to 52% reduction in the number of wasted meals and a 3% to 16% reduction in unmet demand when compared to baseline model projections. This can improve food service quality while reducing food waste, therefore lessening its environmental, social, and economic effects.

The chief idea in this research is to predict the inflight food waste amount using effective machine learning algorithms. Hence, considering the features, their characteristic and objective of the research, two efficient and fast algorithms are suggested, that are, Multiple Linear Regression (MLR) and Random Forest Regression (RFR). As far as the author's knowledge, there is not any publicly available inflight waste dataset, hence, the developed models are applied to a synthetically generated dataset, and the results proved the accuracy and efficiency of the suggested algorithms.

The paper is organized as follows: First, the existing literature on food waste reduction, inflight food waste reduction and machine learning in food waste reduction is surveyed. Next, the materials and methods are explained. Section 4 provides the steps and equations for the developed approaches, then in Section 5 the numerical results are analyzed. In the conclusion section, useful managerial insights are drawn using the results from the analysis.

2. LITERATURE REVIEW

In this section, the existing literature on inflight food waste reduction and general food waste reduction are investigated. Available researches are analyzed based on the solution techniques they implemented and the performance that their supposed model has shown. Based on our investigation, there are a limited number of researches which consider inflight waste prediction. Not all of the related researches utilize machine learning methods for carrying out the forecasting operation.

(Blanca-Alcubilla, et al., 2019) aims at enhancing the in cabin waste management and waste production minimization through inflight waste analysis. They evaluate 145 airplanes, separated by flight time and passenger

class, and categorized and described the waste into 20 distinct elements. The research seeks to offer a complete, representative, and tailored analysis for the food waste produced in aviation sector aiming at reduction of the waste and giving evidence for a greener management system. The investigation is conducted as part of the European initiative LIFE + Zero Cabin Waste. They distinguish between modified and unmanipulated materials and identified particular materials deemed trash. They make recommendations based on waste characterization, such as employing bi-compartmentalized garbage carts and removing unpopular foods from menus to decrease waste creation, as well. Another study which does not directly focus on waste amount reduction and tackles the factors effecting waste production is (van der Walt & Bean, 2022). The article assesses the benefits of integrating product substitution and meal demand uncertainty in an inventory decision-making model as a potential solution to the inflight catering industry's waste problem. The authors develop a stochastic and multi-objective decision-making model that seeks to discover the most efficient combination of meals to order for a certain trip, given the industry's two competing objectives. The model is intended to balance the relevance of limiting the number of meals loaded onboard a flight in order to save waste while simultaneously decreasing the probability of meal shortages and disgruntled passengers. The article proposes to decrease inflight food waste by including product substitution and meal demand uncertainty into the inventory decision-making model. (Hast, 2019) compares machine learning algorithms (MLAs) for forecasting consumer demand for inflight meals and identifies relevant data elements for this prediction. The study's goal is to find the best number of inflight meals to load onboard a commercial flight in order to reduce food waste upon landing. The study is closely connected to inflight food waste prediction since it aims to address the challenge that airline firms confront when selecting how many meals to carry in order to minimize waste while meeting consumer demand. The project uses MLAs and past flight data to anticipate the number of meals for each trip, decreasing food waste and enhancing customer happiness.

(Megodawickrama, 2017) looks at how passenger load factor fluctuation affects average daily flight kitchen waste in Sri Lanka's airline catering business. The study seeks to find viable techniques for reducing food waste in flight kitchens by studying the variation in passenger load factor (PLF) within 24 hours of an airline's expected time of departure (ETD) for average daily flight kitchen waste. They use historical data from 14 international airlines catered by a flight catering company. It focuses on variables such as initial passenger load factor, final passenger load factor, passenger load factor variability, and number of meals catered per day as independent variables, with production waste per meal as the dependent variable. The study's findings reveals that there is inconsistency in the client airline's initial and final passenger loads, resulting in uncertainty on the manufacturing floor. This inconsistency results in swings in the average daily kitchen waste per meal, which impacts the profit margin. The study also finds that increasing the number of meals per day reduces production waste per meal, and that demand uncertainty has a substantial impact on waste rise in the production area. Overall, the study emphasizes the need of controlling passenger load factor fluctuation in flight kitchens to reduce food wastage. It advocates creating a robust forecasting system and deploying a meal bank system to reduce production waste through smart menu planning. In (Tofalli, Loizia, & Zorpas, 2018), researchers perform a compositional analysis of garbage generated during flights, with an emphasis on food waste, paper, and plastics, as well as how passengers and airline rules influence waste output. The research finds that passenger behaviors and each airline's policy generated various types of trash during flights, particularly food waste. According to the study, customers' food selections and airline rules, such as whether they serve complimentary meals or sell food during flights, have a substantial impact on inflight food waste. For example, giving passengers the choice of reserving or not booking their meals when booking their flights might help to decrease food waste and losses.

In (Dhir, Talwar, Kaur, & Malibari, 2020), a systematic literature review (SLR) is used to critically examine the current condition of food waste in the hotel and food services sectors. This technique is implemented by searching, evaluating, and synthesizing peer-reviewed literature to identify relevant research themes and gaps in existing knowledge. The study focuses on collecting chosen articles around nine topics reflecting various elements of food waste, such as waste generating sources, residual handling, and waste reduction strategies. Furthermore, the authors conduct detailed study profiling to offer summary statistics on the selected papers' research design, data analysis methodologies, variables explored, and theoretical lens applied. The study finishes with a paradigm that combines the findings to inform future empirical research in the field.

Inflight food waste prediction and reduction can be considered from two different aspects: airline-based factors and customer-based factors. Our research is distinguishable from (Halizahari, Mohamad, Anis, & Wan, 2021), in that, they analyze the effect of customer related features such as customer meal preferences on the amount of waste produced instead of investigating the firm related factors. They implement multiple linear regression method

as well, and report that among all the features waste management and food quality from the customer side are the most influential items. (Teoh, 2018) proposes a bi-objective inflight food waste reduction model aiming at reducing food waste while increasing customers' expectations of inflight catering service. The strategy entails developing a bi-objective optimization model that incorporates both the supply (airline) and demand (passengers) sides under uncertainty. The concept provides the option of offering a light meal in addition to a conventional meal, allowing customers to choose their meal type during the trip booking process and alter their meal selection before aircraft departure or during their flight. The model is intended to maximize the number of regular and light meals, taking into account both reserved and unreserved meal options. An exemplary case study is performed to show the applicability of the constructed model, utilizing data from international long-haul flights operated by Malaysia Airlines.

However, there is a vast amount of research regarding food waste reduction/ prediction, only a limited part of them concentrates on inflight generated waste management. Major part of the papers investigate the food waste management/ reduction operations in catering firms. To be more illustrative, (Thamagasorn & Pharino, 2019) studies the quantity and composition of food waste created throughout the Halal food production process in the aircraft catering industry. A food waste audit, material flow analysis (MFA), and eco-efficiency analysis are among the techniques used. The food waste inspection involves separating food waste into types, taking pictures, gathering financial documents, and inventorying food purchases. The MFA is utilized to identify hotspots in the food production process, while the eco-efficiency analysis evaluated food commodities as high, medium, or low eco-efficiency, indicating low to high priority for food waste management action. (Ross, 2014) studies food waste in an airline caterer's production kitchen, with the goal of quantifying the waste, understanding why it is generated, and developing solutions to prevent, reduce, or divert it. The study uses a mixed techniques approach, which includes trash audits, observations, document analysis, and interviews. The author also performs qualitative research to better understand the reasons of food waste, an essential factor that is sometimes neglected by quantitative data alone. To identify the causes leading to waste generation, the study uses a system model and process architecture particularly tailored for the production operations of an airline-catering kitchen. The study's goal is to give insights into the airline catering sector, which has had little publicly available research, as well as to evaluate the implementation of waste avoidance techniques. (Phothisuk, 2019) intends to investigate the waste situation, waste types, waste reduction recommendations, and waste reduction outcomes from Thai airlines' inflight services. The researchers conduct qualitative research, which includes document analysis and in-depth interviews with airline officials and flight attendants from several Thai carriers. The data is collected and evaluated using content analysis techniques.

According to the author's current knowledge, literature lacks research on implementation of machine learning methods put forward in this study, namely, multiple linear regression and random forest regression, to predict the amount of food waste generated during a flight. The paper mainly aims at assessing the effect of different features on the amount of the food waste generated in the flights and predict the waste values according to the features recognized as vital.

3. MATERIALS AND METHODS

3.1. Dataset Characteristics

Due to the limited open-source dataset and researches in this field, we used synthetically generated data. The dataset used in this research is simulated based on real life data, that is, the airplane characteristics and the ratios among features are adjusted and taken into account based on the real-life cases. The dataset closely resembles real-world aircraft operations, particularly in the areas of inflight meals and trash management. To exemplify, considering flight duration hours, duration data is consistent with real flight timings, which range from small local trips to long-haul international flights. In reality, flight lengths are crucial when organizing food services since longer trips require more meals and snacks. In terms of passenger count, it reflects usual airline capacity, which varies according to aircraft type. For example, smaller regional planes carry fewer passengers than bigger aircraft such as the Boeing 777 or Airbus A380. One of the features which directly influence the amount of waste produced, is the meals prepared/served. Airlines prepare meals according to the number of passengers, level of service (economy, business, first), and flight time. The quantity of meals provided is frequently somewhat lower than the amount produced owing to a variety of circumstances such as passenger preferences, dietary restrictions, or pre-booked special meals. Uneaten meals, are potential waste production resources, which are left uneaten owing to over-preparation, changing passenger preferences, or flight delays. The data covers this feature, which is a potential source for a considerable amount of food waste in aircraft.

Overall, the dataset represents the complexities of inflight meal and trash management, which are essential considerations in sustainable airline logistics. The data shows real-world difficulties and potential for development in decreasing food waste and increasing operational efficiency.

Dataset is made up of different features related to flight data. To ensure that the size of dataset does not lead to the problem of curse of dimensionality, the generated dataset is planned in a way that it contains 10,000 rows and 15 columns which correspond to the features. Dataset contains parameters and features which affect the possible amount of the inflight food waste. These features and their types are presented in Table 1:

Table 1. Main Features and Their Types

Feature	Type
Date	Categorical - DateTime
Flight ID	Categorical-Numerical/ID
Flight Duration Hours	Numerical
Passengers	Numerical
Meal Type	Categorical - String
Time of Day	Categorical - String
Destination	Categorical - String
Meals Prepared	Numerical
Meals Served	Numerical
Uneaten Meals	Numerical
Waste Weight kg	Numerical
Waste Type	Categorical - String
Waste Cost USD	Numerical
Loading Time min	Numerical

3.1.1. Feature engineering

Feature engineering is a fundamental step in machine learning that entails converting raw data into useful features that improve model performance. By carefully choosing, changing, and generating features, data scientists may increase machine learning models' accuracy, efficiency, and interpretability. The efficacy of these models is frequently dependent on the quality of the features given, making feature engineering a critical stage in the data science pipeline. The following main strategies are frequently used to refine features and improve the prediction power of machine learning systems:

1. Feature Selection: This entails finding and picking the most relevant characteristics from the data that contribute the most to the desired variable. Common techniques include correlation analysis, recursive feature removal, and regularization methods like as Lasso.
2. Feature Transformation: This approach includes modifying existing characteristics to improve their prediction potential. Examples include:
 - I. Normalization and standardization including scaling characteristics to a standard range or distribution.
 - II. Logarithmic Transformations: Used to deal with skewed data distributions.
 - III. Polynomial Features: Adding new features by increasing current ones to a power.
3. Feature Creation: Existing features can be combined or manipulated to create new ones. For example:
 - I. Interaction Terms: Creating features that depict the interaction of two or more existing features.
 - II. Aggregated features: Data summation (e.g., mean, sum, count) across groups or time periods.
4. Handling Missing Data: Dealing with missing values is an important part of feature engineering. To highlight missing values, strategies like imputation (e.g., mean, median, mode) or the creation of an indicator variable are used.
5. Encoding Categorical Variables: Converting categorical data into a numerical representation that machine learning algorithms can handle. Techniques include:

- I. One-hot encoding involves creating binary columns for each category.
- II. Label encoding involves assigning a unique number to each category.

Feature engineering is necessary because machine learning algorithms frequently cannot operate well with raw data. The process of developing features can:

1. Improve Model Performance: Well-engineered features can result in considerable increases in model accuracy and resilience.
2. Reduce Model Complexity: By carefully choosing and designing features, you may minimize the dimensionality of your data, resulting in simpler and more interpretable models.
3. Improve Generalization: Good feature engineering can decrease overfitting, allowing the model to generalize more effectively to new data.

Using feature creation technique, more informative and influential features are created from the existing data. Extra features, their type and the way they were generated are presented below in Table 2:

Table 2. Extra Features, Their Type and Formula

Extra Features	Type	Formula
Waste per Passenger	Numerical	Waste Weight kg / Passengers
Meal Efficiency	Numerical	Meals Served / Meals Prepared
Appetite Index	Numerical	Meals Served / Passengers
Uneaten Meals per Passenger	Numerical	Uneaten Meals / Passengers
Waste Cost per kg	Numerical	Waste Cost USD / Waste Weight kg

3.1.2 Feature analysis

Feature analysis is an essential component of data preparation and exploratory data analysis (EDA) in any data science or machine learning effort. It entails analyzing the properties and distribution of each feature in a dataset to better understand the underlying patterns, identify outliers, and uncover relationships between features. This technique aids in assessing the importance of each feature, directing feature selection, and offering insights for model selection and tweaking. Mean, Max, Min and standard deviation for numerical features is presented in Table 3:

Table 3. Exploratory Data Analysis Results for Numerical Features

	Mean	Max	Min	Std
Flight Duration Hours	7.97	15.00	1.00	4.02
Passengers	200.00	254.00	152.00	14.22
Meals Prepared	249.87	308.00	191.00	15.86
Meals Served	199.84	251.00	151.00	14.06
Uneaten Meals	20.02	39.00	5.00	4.48
Waste Weight kg	14.92	25.00	5.00	5.76
Waste Cost USD	176.18	300.00	50.00	72.46
Loading Time min	45.18	60.00	30.00	8.63
Storage Temp C	5.01	8.00	2.00	1.74
Waste per Passenger	0.07	0.15	0.02	0.03
Meal Efficiency	0.80	1.00	0.55	0.08
Appetite Index	1.00	1.43	0.71	0.10
Uneaten Meals per Passenger	0.10	0.20	0.03	0.02
Waste Cost per kg	14.24	59.10	2.00	9.47

Figure 1 presents the charts for different numerical features utilized in the process of prediction:

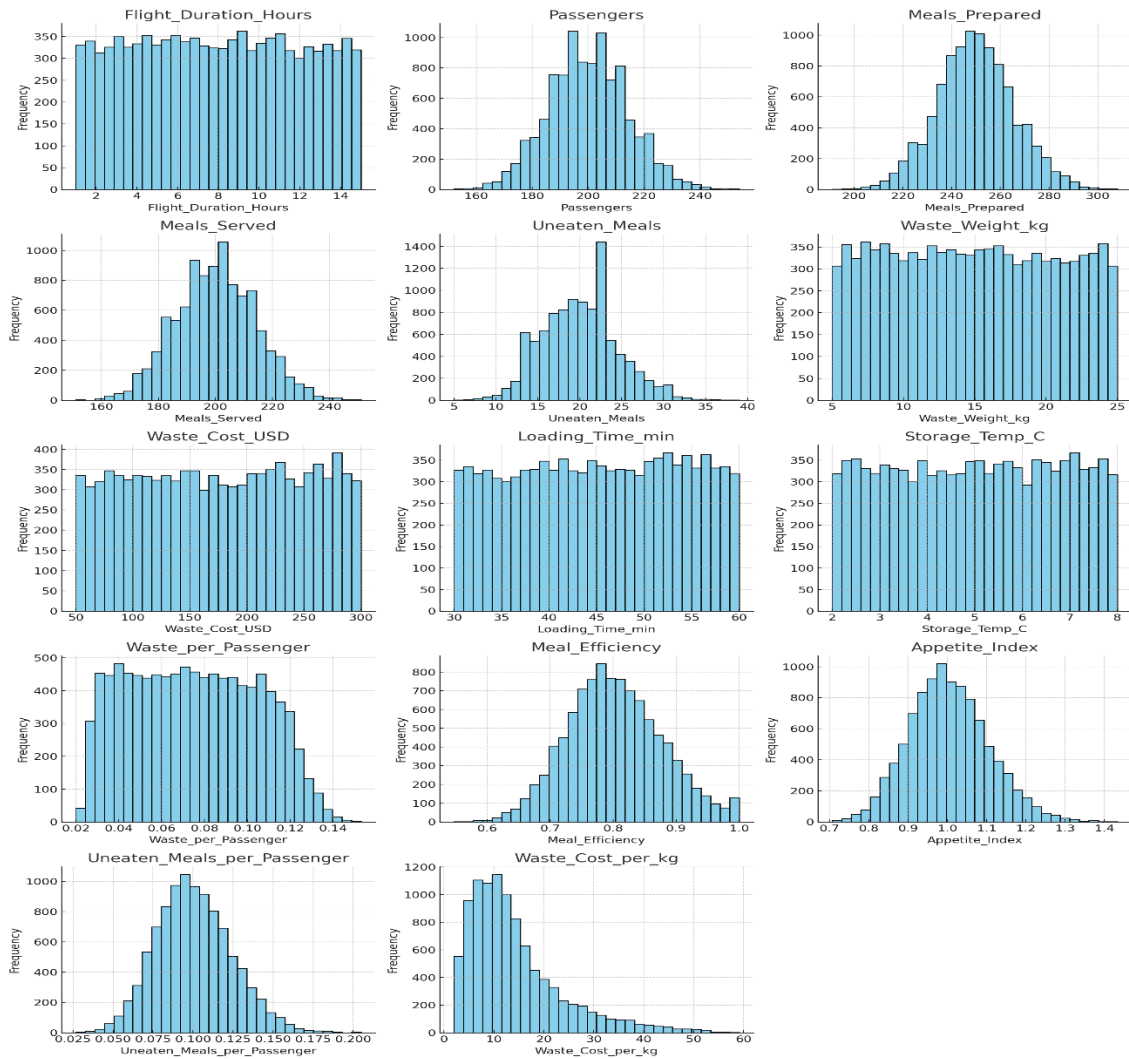


Figure 1. Histograms for Numerical Features

3.2. Correlation Analysis

This paper mainly aims at predicting the inflight food waste amount based on flight, customer and meals information. In order to yield more effective and accurate results, correlation analysis is carried out. Correlation analysis is a statistical procedure that determines and describes the degree and direction of a link between two variables. Correlation analysis determines if and how strongly two variables are connected. Using correlation coefficient values for each feature, they are ordered and selected based on their influence on the amount of waste generated. The following table illustrates the correlation coefficient for each of the features in relation to waste weight:

Table 4. Correlation Coefficient for each of the Features in Relation to Waste Weight Kilogram

Features	Waste Weight (kg)
Waste per Passenger	0.981
Meals Prepared	0.012
Passengers	0.004
Uneaten Meals	0.003
Loading Time min	0.001
Uneaten Meals per Passenger	0.000
Waste Cost USD	-0.002
Flight ID	-0.003

Flight Duration Hours	-0.007
Storage Temp C	-0.013
Appetite Index	-0.022
Meals Served	-0.023
Meal Efficiency	-0.025
Waste Cost per kg	-0.666

The correlation coefficient values indicate that waste per passenger is the most correlated feature with a value of 0.981. Using feature selection, which is defined as the process of identifying the most important variables (features) from a larger collection of data that contribute the most to a model's prediction performance. The primary purpose is to increase model efficiency and accuracy by removing unnecessary or redundant features, lowering the risk of overfitting, and reducing computing complexity. Four of the highly correlated features are selected for the prediction model generation:

1. Waste per Passenger,
2. Waste Cost per kg,
3. Meals Prepared
4. Passengers.

4. DEVELOPED APPROACHES

Here, two powerful machine learning methods are suggested for performing the forecasting task: Multiple linear regression and Random Forest regression. The following subsections describe the proposed techniques and give the formula.

4.1. Multiple Linear Regression

Modeling the relationship between a single variable (often denoted as Y) and two or more independent variables (predictors, denoted as $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) can be performed by developing a Multiple Linear Regression (MLR) model. MLR, known as a statistical method which is appropriate for this aim, is used to anticipate the value of the dependent variable based on the values of the independent factors and to comprehend how modification in the independent variables effect changes in the dependent variable. MLR is employed when the result or dependent variable is impacted by several factors. Some common uses are given below:

Economics: Predicting consumer spending based on income, age, and educational attainment.

Healthcare: Evaluating the impact of many risk variables on health outcomes, such as blood pressure, which is affected by age, food, and activity.

Marketing involves determining the influence of promotion, price, and product quality on sales.

Environmental Science: Modeling the effects of temperature, humidity, and pollution on agricultural productivity.

Considering the very basic formula for the multiple linear regression model, we have:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon,$$

where

1. Y is the dependent variable (the outcome you are predicting or explaining), in our case, Waste Weight kg,
2. β_0 is the intercept (the value of Y when all X_i are 0),
3. $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ are the coefficients corresponding to each independent variable (representing the change in Y for a one-unit change in X , assuming all other variables are held constant),

4. ϵ is the error term, signifying the variation between Y' 's observed and expected values.

4.2. Random Forest Regression

Random Forest Regression (RFR) is a type of regression that does not make the same assumptions as linear regression. It entails creating numerous regression trees using a random subset of data from the training set and then averaging the regression tree solutions to predict the target variable with the minimum mean squared error (MSE). Unlike linear regression, RFR automatically integrates interactions between distinct predictor variables and does not need variable selection, making it simpler to accept complicated, non-linear interactions among variables. Random Forest Regression is an ensemble learning approach for regression challenges that trains many decision trees and delivers the average of their predictions. It is an extension of the Random Forest technique, which is usually used for classification but can also predict continuous values in regression.

Random Forest Regression is utilized when the connection between input features and target variables is complicated, non-linear, and contains feature interactions that are challenging to represent using typical linear models. This method works well when dealing with big amounts of data and several features. The data contains complicated patterns that are difficult to represent with a single model. Overfitting is a risk, and Random Forest tends to lessen overfitting when compared to individual decision trees.

RFR is preferred to other regression methods due to the following characteristics:

1. Reduction of Overfitting: Random Forest reduces overfitting by averaging multiple decision trees. To increase variety and lower the possibility of overfitting, each tree is trained using a random subset of features on a random part of the data.
2. Handling Non-Linear Relationships: It captures non-linear relationships and interactions between features that linear models might miss.
3. Robustness to Outliers and Noise: Because it aggregates predictions from multiple trees, it is less sensitive to outliers and noisy data.
4. Feature Importance: Random Forest provides a measure of feature importance, helping to identify which features are most predictive of the target variable.
5. Versatility: It performs well with both categorical and continuous input features and doesn't require extensive data preprocessing like normalization or scaling.
6. Parallelization: Since trees in a forest are independent of each other, the model can be parallelized, leading to faster computation times on large datasets.

RFR does not have a single clear formula, unlike linear regression. Instead, the steps are as follows:

1. Bootstrap Sampling: Select n samples at random from the dataset and replace them to construct a subset of the data for each tree.
2. Tree Building: Create a decision tree for each subgroup. Each node selects a random selection of characteristics and determines the optimum split from this subset.
3. Prediction:
 - I. For every tree: Predict the output (a continuous value) using the decision rules of the tree.
 - II. Final Output: The final forecast is the average of all the trees in the forest.

5. NUMERICAL RESULTS AND ANALYSIS

This section provides numerical results from implemented techniques and reveals hidden information in the available dataset. Additionally, some useful managerial insights related to inflight food waste management and reduction are drawn. The following subsections provide the technical information of the environment used for data analysis, results for MLP and RFR, correspondingly.

5.1. Technical Environment

This research is conducted using a computing environment with the following hardware and software specifications:

5.1.1. Hardware configuration

The computations are performed on a system equipped with an Intel® Core i5-1135G7 processor, operating at a clock speed of 2.40 GHz. The system had 32 GB of RAM for storage.

5.1.2. Software environment

The implementation is carried out using Python 3.10, within a PyCharm Community environment. Key libraries utilized in the analysis include pandas (version 1.2.3) for data manipulation, NumPy (version 1.19.2) for numerical computations, scikit-learn (version 0.24.1) for machine learning algorithms, statsmodels (version 0.12.2) for statistical modeling, and matplotlib (version 3.3.4) for data visualization. The research environment is managed using a Conda virtual environment configured with Python 3.8.

5.1.3. Execution details

The entire analysis, including data preprocessing, model training, and evaluation, is executed using PyCharm Community Edition. The total execution time for the project is approximately 15 minutes. The Random Forest model training was optimized using parallel processing techniques to enhance computational efficiency.

5.1.4. Special configurations

No special configurations are required beyond standard library settings, except for enabling parallel processing during the Random Forest model training to accelerate the computation.

5.2. Multiple Linear Regression Results

To implement the MLR algorithm, first the dataset is prepared and the most influential features are selected as: Waste per Passenger, Waste Cost per kg, Meals Prepared, Passengers. The target variable which is aimed to be predicted is Waste Weight kg.

Training and testing sets are generated with an 80-20 ratio. This is done by calling the `train_test_split` method in the `sklearn.model_selection` module, which ensures that 80% of the data is utilized for training and 20% for testing. A random state of 42 is used to assure repeatability. A multiple linear regression model is employed for analyzing the data. The model fitting is conducted using the training data. The `statsmodels` library facilitates the construction and fitting of the multiple linear regression model. The multiple linear regression model's performance is thoroughly examined using a number of statistical criteria to ensure a comprehensive grasp of its predictive capabilities. The following metrics were computed:

1. Mean Squared Error (MSE): MSE measures the average squared difference between the observed actual outcomes and the outcomes predicted by the model. It provides an indication of the model's accuracy, with lower values indicating better performance.
2. Root Mean Squared Error (RMSE): RMSE is the square root of MSE and provides an error metric in the same units as the dependent variable, making it more interpretable. Like MSE, lower RMSE values signify better model performance.
3. Mean Absolute Error (MAE): MAE represents the average absolute difference between observed and predicted values. It is a straightforward measure of prediction accuracy, with lower values indicating better performance.
4. R-squared (R^2): R^2 is a statistical measure that represents the proportion of the variance for the dependent variable that is explained by the independent variables in the model. An R^2 value closer to 1 indicates a higher explanatory power of the model.
5. Adjusted R-squared: Adjusted R^2 adjusts the R^2 value based on the number of predictors in the model, providing a more accurate measure when multiple predictors are used. It penalizes the addition of non-significant predictors, thereby preventing overfitting.
6. Mean Absolute Percentage Error (MAPE): MAPE measures the accuracy of the model's predictions as a percentage, making it easier to understand the model's performance in relative terms. Lower MAPE values indicate higher accuracy.
7. Coefficient of Determination (COD): COD, another term for R^2 , reflects the goodness of fit of the model. It quantifies the proportion of the variance in the dependent variable that is predictable from the independent variables.

The model is trained on 80% of the dataset and tested on the remaining 20%. Model results and values for evaluation metrics are summarized in Table 5 and Table 6, respectively, providing a comprehensive overview of the

model's predictive performance. These metrics collectively indicate the robustness of the model and its suitability for predicting Waste Weight kg based on the selected features.

Table 5. Model Results for MLR

	Coefficients	P-Value	CI 2.5%	CI 97.5%
Const	-14.410	0.000	-14.624	-14.196
Waste per Passenger	196.924	0.000	196.491	197.357
Waste Cost per kg	-0.004	0.000	-0.005	-0.002
Meals Prepared	0.000	0.708	-0.001	0.000
Passengers	0.073	0.000	0.073	0.074

Table 6. MLR Model Performance Evaluation Metrics

Metric	Value
Mean Squared Error (MSE)	0.177
Root Mean Squared Error (RMSE)	0.420
Mean Absolute Error (MAE)	0.291
R-squared	0.995
Adjusted R-squared	0.994
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	2.576
Coefficient of Determination (COD)	0.995

The following chart shows the results from MLR in terms of actual and predicted waste amount:

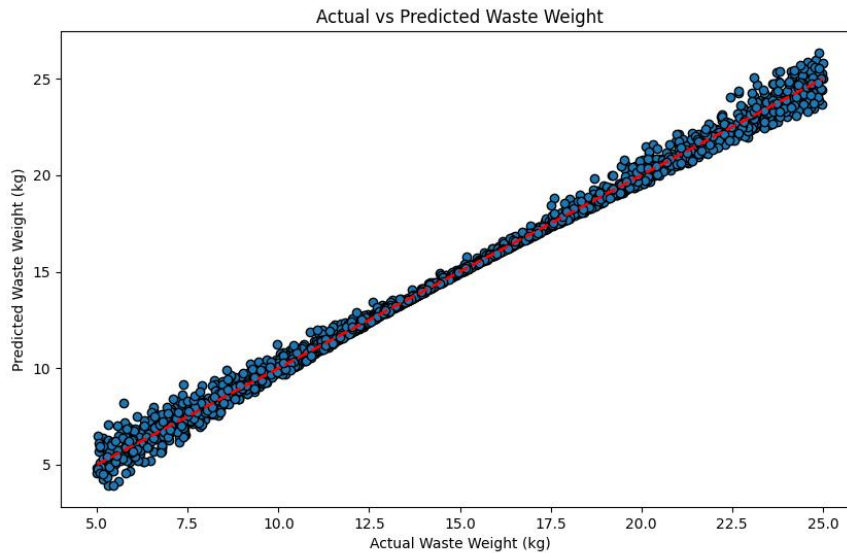


Figure 2. Actual Waste vs Predicted Waste Weight

The following sections discuss the model findings and the performance metrics.

5.2.1. Interpretation of the model findings

Table 5 summarizes the multiple linear regression analysis findings. The model has four predictor variables: waste per passenger, waste cost per kg, meals prepared, and passengers. The intercept (constant) term is -14.41, which represents the dependent variable's baseline level when all predictors are zero. The coefficient for Waste per Passenger

is 196.92, and the p-value is less than 0.001, indicating a significant positive link and statistical significance. Waste Cost per Kg has a negative coefficient of -0.0037 and a highly significant p-value, showing a minor but significant inverse association with the dependent variable. In contrast, Meals Prepared has a coefficient of -0.00011 and a high p-value (0.708), indicating no significant influence. Passengers have a positive and substantial influence, with a coefficient of 0.073. The confidence intervals supplied for each coefficient enhances its dependability.

5.2.2. Interpretation of model performance evaluation results

The model evaluation results indicate an excellent performance of the multiple linear regression model in predicting Waste Weight kg. The key metrics are interpreted as follows:

1. Mean Squared Error (MSE): An MSE of 0.177 suggests that on average, the squared errors of the predictions are quite low, indicating high accuracy of the model.
2. Root Mean Squared Error (RMSE): An RMSE of 0.420 implies that the model's predictions deviate from the actual values by approximately 0.42 units of Waste Weight kg on average. This relatively low RMSE further supports the high accuracy of the model.
3. Mean Absolute Error (MAE): An MAE of 0.291 indicates that, on average, the model's predictions are off by about 0.291 units of Waste Weight kg, which is a small error margin, signifying precise predictions.
4. R-squared (R^2): An R^2 of 0.995 means that 99.5% of the variance in Waste Weight kg is explained by the model. This extremely high R^2 indicates an excellent fit of the model to the data.
5. Adjusted R-squared: An adjusted R^2 of 0.994, very close to the R^2 value, confirms that the model's predictors are highly significant and that the model is not overfitting.
6. Mean Absolute Percentage Error (MAPE): A MAPE of 2.576 indicates that the model's predictions deviate from the actual values by an average of 2.576%, which is a very low percentage error, suggesting high predictive accuracy.
7. Coefficient of Determination (COD): COD, synonymous with R^2 , also shows that 99.5% of the variance in Waste Weight kg is predictable from the independent variables, reinforcing the robustness of the model.

5.2.3. Insights on reducing food waste based on model results

The multiple linear regression model gives valuable insights into the factors that influence food waste, allowing us to develop meaningful waste-reduction initiatives. Here are some important findings drawn from the model's performance and feature significance:

1. Optimize the Meals Prepared:
 - I. Feature Insight: Meals Prepared is a predictor in the model, showing a direct link to Waste Weight kg.
 - II. Actionable Strategy: By studying the link between the quantity of meals cooked and the waste generated, operations may be changed to better match meal preparation to passenger demand. Implementing real-time data analytics and demand predictions can assist in preparing the appropriate number of meals, eliminating overproduction and waste.
2. Manage Waste per Passenger:
 - I. Feature Insight: Waste per Passenger is another key predictor. This shows that individual passenger behavior and waste creation are important considerations.
 - II. Actionable Strategies: Initiatives to educate passengers about waste reduction, such as giving reduced portion sizes or allowing them to modify meal quantities, can help reduce waste per passenger. Encouraging passengers to pre-select meals can also help to better match culinary tastes, resulting in less wasted food.
3. Control waste costs per kilogram:
 - I. Feature Insight: Waste Cost per kg influences total waste weight, suggesting a relationship between trash disposal costs and waste generation.
 - II. Actionable Strategies: Recycling and composting can help to reduce trash disposal costs. Furthermore, rewarding waste reduction through cost-saving strategies might encourage

employees and passengers to reduce waste. Implementing a strong waste management system that monitors trash disposal expenses and discovers cost-cutting alternatives can be useful.

4. Monitor Passenger Numbers:

- I. Feature Insight: The number of passengers is a strong predictor of waste weight.
- II. Actionable Strategy: Accurate passenger forecasts can aid in improved meal planning and waste control. Implementing dynamic inventory management systems that change meal preparation based on real-time passenger data will help guarantee that food supply and demand match more closely, decreasing waste.

Considering the insights drawn from the analysis, firms may considerably minimize food waste by concentrating on the regression model's essential parameters, which include meals provided, waste per passenger, waste cost per kilogram, and passenger numbers. Using data-driven initiatives and developing a sustainable culture may result in more efficient operations, financial savings, and a beneficial environmental effect.

5.3. Random Forest Regression Results

This research aims at implementing a Random Forest Regression model to estimate inflight waste amounts based on several key features: waste per passenger, waste cost per kilogram, the number of meals prepared, and the number of passengers. Random Forest Regression, a robust ensemble learning method, is particularly effective for handling complex datasets with multiple features and non-linear relationships. It operates by constructing a multitude of decision trees during training and outputs the average prediction of the individual trees, thereby improving predictive accuracy and controlling overfitting.

The model is developed using the Python programming language within a PyCharm environment. The dataset is split into training (80%) and testing (20%) subsets to evaluate the model's performance. The Random Forest Regressor from the scikit-learn library is used with 100 estimators, ensuring a sufficient number of trees to capture the intricacies of the data. The "random_state" parameter is set to 42 to ensure the reproducibility of results.

5.3.1. Model evaluation

The model's performance is evaluated using several metrics as tabulated in Table 7:

Table 7. Performance Evaluation for Random Forest Regression Method

Metric	Value
Mean Absolute Error (MAE)	0.041
Root Mean Squared Error (RMSE)	0.070
R-squared	1.000
Explained Variance	1.000
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	0.003

These metrics demonstrate the model's high accuracy, with an R-squared value very close to 1, indicating that the model explains nearly all the variability in the response data. The low MAE and RMSE values further suggest minimal errors in the predictions. The Explained Variance Score reflects the proportion of the variance that the model accounts for, and the MAPE provides an intuitive measure of the error in percentage terms. The predicted and actual waste weights are illustrated in Figure 3:

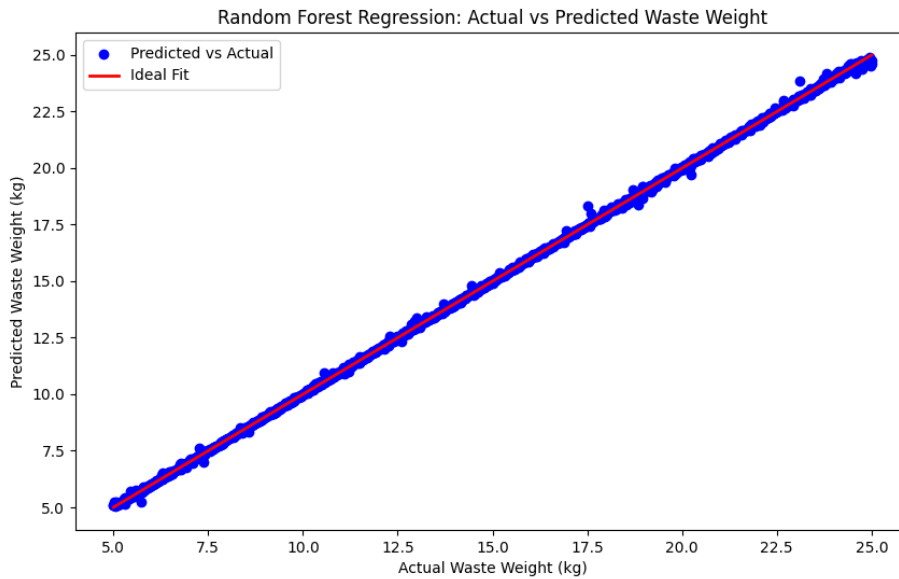


Figure 3. Random Forest Regression: Actual vs. Predicted Waste Weight

The Random Forest model also offers insights into how important each feature is in predicting inflight waste weight. The Waste per Passenger, Waste Cost per kg, Meals prepared, and Passengers are identified as significant contributors, with their importance ranking derived from the mean decrease in impurity criterion used within each decision tree.

To summarize, the Random Forest Regression model developed in this study effectively predicts inflight waste amounts with high accuracy, providing valuable insights for optimizing waste management strategies in aviation logistics. By integrating these predictions with operational decision-making, airlines can enhance sustainability, reduce unnecessary waste, and improve overall efficiency.

The use of a Random Forest Regression model to analyze inflight food waste reveals crucial factors—such as meal preparation, passenger count, waste per passenger, and waste disposal costs—that have a substantial impact on waste creation. Based on these findings, airlines may improve meal forecasting by more precisely matching meal portions with passenger data, avoiding unnecessary food production and waste. Additionally, integrating dynamic pricing for trash management and providing passengers with configurable meal options might help to further reduce waste. These efforts will not only lower the environmental effect of inflight operations, but will also result in financial savings, increased passenger pleasure, and a greater commitment to corporate social responsibility.

5.4. Comparison of the Performance for Suggested Solution Techniques

When comparing the results for inflight food waste management, the Random Forest regression model significantly outperforms the multiple regression method across various key performance metrics:

1. Error Metrics:
 - I. The Mean Absolute Error (MAE) for Random Forest is significantly lower (0.041) compared to the multiple regression method (0.291). Similarly, the Root Mean Squared Error (RMSE) for Random Forest (0.070) is much lower than that of multiple regression (0.420). These lower error values indicate that the Random Forest model's predictions are closer to the actual waste amounts, making it a more accurate predictor.
 - II. The Mean Absolute Percentage Error (MAPE) also favors Random Forest, with an exceptionally low value of 0.003, compared to 2.576 for multiple regression. A lower MAPE indicates that the Random Forest model's predictions have less relative error, making it more reliable for practical decision-making.
2. Goodness of Fit:

- I. The R-squared and Adjusted R-squared values for multiple regression are 0.995 and 0.994, respectively, indicating a very good fit. However, the R-squared and Explained Variance for the Random Forest model are both 1.000, suggesting a near-perfect fit to the data.
- II. The Coefficient of Determination (COD), which is equivalent to the R-squared value for multiple regression, further supports this comparison, where Random Forest again demonstrates superior predictive performance.

Given these results, the Random Forest regression model is the superior choice for inflight food waste management due to its higher accuracy, lower prediction errors, and better overall model fit. This model's potential to recognize complicated correlations and interconnections in data makes it ideal for anticipating inflight garbage, enabling more effective and accurate management tactics that can drastically cut waste and improve sustainability efforts.

6. CONCLUSION

In this research, we addressed the critical issue of in-flight food waste in the airline logistics business, with a focus on employing machine learning methodologies to anticipate and reduce loss. The study emphasizes the environmental, economic, and social consequences of inflight food waste, which aligns with the overall aims of sustainable airline logistics. The aviation industry has witnessed extraordinary expansion, and this is anticipated to continue in the future decades. This expansion, although economically advantageous, presents considerable sustainability concerns, notably in terms of managing inflight food waste. This waste has a significant environmental impact, increasing greenhouse gas emissions and other types of pollution. Furthermore, the economic impact of food waste, which includes trash disposal costs and resource loss, highlights the importance of appropriate waste management systems.

Machine learning provides an alternate perspective to this problem. By studying trends in huge datasets, machine learning algorithms can reliably forecast the amount of food waste created during flights, allowing airlines to optimize their meal supply procedures. In this study, we developed and tested two predictive machine learning models to forecast onboard food wastage using a range of information such as passenger count, meal type, and flight length. The results show that these models are successful at forecasting inflight food waste. The Multiple Linear Regression model, while basic and easy to understand, gave useful insights into the linear correlations between the selected parameters and waste generation. Considering prediction accuracy, RFR model beat the other model because of its ability to capture non-linear correlations and data interactions.

The study's key results include identifying the most relevant factors impacting food waste, such as waste per passenger and meal efficiency. These insights can help airlines make data-driven waste-reduction decisions, such as tailoring meal preparations to passenger data and flight parameters. The managerial implications of this study are important. Airlines that use machine learning-based waste prediction models can improve operational efficiency, minimize food waste costs, and contribute to environmental sustainability. The models created in this work may be linked into airline decision-making processes, generating real-time forecasts that guide meal provisioning and waste management techniques.

In conclusion, this study highlights the potential for machine learning to handle the major issue of in-flight food waste in the airline sector. Airlines may achieve more sustainable operations by utilizing data and sophisticated analytics, lowering their environmental impact while increasing profits. Future study might build on this work by combining real-world data from numerous airlines and investigating new machine learning approaches to improve forecast accuracy and operational efficiency. The continuing development and use of such models will be critical to reaching the overall objective of sustainable aviation logistics.

ETHICAL STATEMENT & GENERAL STATEMENTS

This paper meets the research and publication ethics standards.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

The authors have read and approved the final manuscript.

FUNDING

Not applicable.

AVAILABILITY OF DATA AND MATERIALS

Not applicable.

COMPETING INTERESTS

The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

- Blanca-Alcubilla, G., Roca, M., Bala, A., Sanz, N., De Castro, N., & Fullana-I-Palmer, P. (2019). Airplane cabin waste characterization: Knowing the waste for sustainable management and future recommendations. *Waste Management, 96*, pp. 57-64. doi:10.1016/j.wasman.2019.07.002
- Dhir, A., Talwar, S., Kaur, P., & Malibari, A. (2020). Food waste in hospitality and food services: A systematic literature review and framework development approach. *Journal of Cleaner Production, 270*(122861). doi:10.1016/j.jclepro.2020.122861
- Halizahari, M., Mohamad, M. H., Anis, W., & Wan, A. (2021). A study on in-flight catering impacts on food waste. *Solid State Technology, 64*(2), pp. 4656-4667.
- Hast, M. (2019). Evaluation of machine learning algorithms for customer demand prediction of in-flight meals. Retrieved February 6, 2025, from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1337269/FULLTEXT01.pdf>
- Lohawala, N., & Wen, Z. P. (2024). *Navigating Sustainable Skies: Challenges and Strategies for Greener Aviation*. Retrieved February 21, 2025, from https://media.rff.org/documents/Report_24-07.pdf
- Megodawickrama, P. L. (2017). Impact of Passenger Load Factor Variability on Average Daily Flight Kitchen Waste in Flight Catering Industry in Sri Lanka. Retrieved from <http://dl.lib.uom.lk/bitstream/handle/123/14193/TH3665.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Phothisuk, A. (2019). Waste reduction from the in-flight services of Airlines in Thailand. *St. Theresa Journal of Humanities and Social Sciences, 5*(2), pp. 110-119.
- Rodrigues, M., Miguéis, V., Freitas, S., & Machado, T. (2024). Machine learning models for short-term demand forecasting in food catering services: A solution to reduce food waste. *Journal of Cleaner Production, 435*(140265).
- Ross, J. (2014). Food waste in an airline caterer's production kitchen. University of Otago. Retrieved February 6, 2025, from <https://hdl.handle.net/10523/5486>
- Sambo, N., & Hlengwa, D. (2018). Post-flight food waste and corporate social responsibility at South Africa Airways: Perceptions of employees at Air Chefs South Africa. *African Journal of Hospitality, Tourism and Leisure, 7*, pp. 1-17.
- Teoh, L. E. (2018). A bi-objective optimization approach for inflight food waste reduction. *E3S Web of Conferences, 65*. 10.1051/e3sconf/20186504001: EDP Sciences. doi:10.1051/e3sconf/20186504001
- Thamagasorn, M., & Pharino, C. (2019). An analysis of food waste from a flight catering business for sustainable food waste management: A case study of halal food production process. *Journal of Cleaner Production, 228*, pp. 845-855.
- Tofalli, N., Loizia, P., & Zorpas, A. A. (2018). Passengers waste production during flights. *Environmental Science and Pollution Research, 25*(36), pp. 35764-35775. doi:10.1007/s11356-017-0800-x
- van der Walt, A., & Bean, W. L. (2022). Inventory management for the in-flight catering industry: A case of uncertain demand and product substitutability. *Computers & Industrial Engineering, 165*(107914). doi:10.1016/j.cie.2021.107914
- Wu, P. J., & Yang, C. K. (2021). Sustainable development in aviation logistics: Successful drivers and business strategies. *Business Strategy and the Environment, 30*(8), pp. 3763-3771.



Derleme Makalesi

Eklmeli imalatta kullanılan yeni malzemeler: Uzay araştırmaları

Mehmet Musab Arslan¹, Būřra alık² ve Gūltekin Uzun³

Öz. Diğer sektörlerde ve iş alanlarında olduğu gibi uzay alanında da eklmeli imalatın giderek yaygınlaşması, kullanılan malzemelerin çeşitliliğini ve önemini artırmaktadır. Uzay ortamının zorlu koşulları, bu alandaki malzeme seçiminde yenilikçi ve özel çözümler gerektirmektedir. Bu çalışma, uzay ortamının özel gereksinimlerine uygun olarak geliştirilen eklmeli imalatla kullanılan malzemelerin hangi amaçlarla kullanıldığını, bu malzemelerin örneklerini ve ileriki aşamalarda faydalarını incelemektedir. Çalışmada, eklmeli imalatın uzay keşfi ve kolonizasyon hedefleri açısından taşıdığı önem de vurgulanmıştır. Uzayda karşılaşılabilecek çeşitli zorluklar, malzeme bilimi ve mühendislik alanında yeni stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Eklmeli imalat, bu ihtiyaçlara yanıt verecek şekilde yerel kaynakların etkin bir biçimde kullanılmasına olanak tanıyarak, sürdürülebilir çözümler sunmaktadır. Sonuç olarak, eklmeli imalat uzay sektöründeki yeni malzemelerle kullanımı, uzay keşfi ve kolonizasyon hedeflerine ulaşmak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu alandaki ilerlemelerin, insanlığın uzaydaki varlığını kalıcı hale getirme çabalarına büyük katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Eklmeli imalat, uzay sektörü, regolit malzeme, yerinde üretim.

Review Paper

New materials used in additive manufacturing: Space research

Abstract. As in the other sectors and industries, the increasing prevalence of additive manufacturing in the space field is enhancing the diversity and importance of the materials used. The challenging conditions of the space environment necessitate innovative and specialized solutions in material selection. This study examines the materials used in additive manufacturing developed for the unique requirements of the space environment, their intended purposes, examples of usage, and the benefits they may provide in the future. The importance of additive manufacturing in relation to space exploration and colonization goals is also emphasized. The various challenges encountered in space require the development of new strategies in material science and engineering. Additive manufacturing offers sustainable solutions by enabling the effective use of local resources. In conclusion, the use of new materials in additive manufacturing within the space sector is expected to play a critical role in achieving the goals of space exploration and colonization. Advancements in this field are anticipated to significantly contribute to humanity's efforts to establish a permanent presence in space.

Keywords: Additive manufacturing, space industry, regolith material, on-site production.

1 Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş. (TUSAŞ), 06980, Ankara, Türkiye; mehmetmusab.arslan@tai.com.tr

2 İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazî Üniversitesi, 06560, Ankara, Türkiye; busracalik@gazi.edu.tr (Sorumlu Yazar)

3 İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazî Üniversitesi, 06560, Ankara, Türkiye; uzun.gultekin@gazi.edu.tr

<https://doi.org/10.52995/jass.1553603>

Geliş Tarihi: 20 Eylül 2024; Kabul Tarihi: 27 Kasım 2024; Yayımlanma Tarihi: 28 Şubat 2025

© 2025 Türk Hava Kurumu Üniversitesi. Tüm hakları saklıdır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Uzay çalışmalarında dikkat edilen durumlar ve sınır koşulları, uzay ortamından ya da diğer gezegenlerin ortamlarından kaynaklı yerçekimi, enerjinin ulaşımı, kullanılabilir malzemelerin sınırlı olması olarak sıralanabilir. Uzay çalışmalarında 1950'li yıllardan başlayan ivmelenme, günümüzde birçok imalat, lojistik, bilimsel araştırma gibi alanlarda da yaşanmaktadır. Uzay sektörünü hedefleyen ve iş alanı olarak seçen üretim yöntemleri giderek kendilerini geliştirmekte, günden güne yeni üretim yollarında ve malzemelerde entegre olmaktadır.

Küresel ısınmanın giderek artması, maliyetlerin küresel krizlerle yaşanan enflasyona paralel Şekilde artması birçok sektörü etkilediği gibi uzay sektörünü de etkilemektedir. Lojistik ve ulaşım sektöründeki sıfır emisyon hedefleri olduğu gibi üretim aşamalarında da maliyet ve atık malzeme azaltımına yönelik hedefler ve projeler bulunmaktadır. Uzay sektöründe; maliyetlerin yüksek olması, lojistik imkanının sınırlı olması, araştırma çalışmalarında vaktin kısıtlı olması gibi sınırlardan dolayı özellikle parça üretimi dşnldğnde maliyetlerin düşürülmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda, parçaların üretiminde kullanılan malzemelerin optimizasyonu, 3D yazıcılar gibi gelişmiş üretim teknolojilerinin kullanımı ve modüler tasarım yaklaşımları gibi yöntemlerle üretim süreçleri daha verimli hale getirilmeye çalışılmaktadır. Uydular için uzun süreli hizmet sürelerinin hedeflenmesi, yerinde bilimsel çalışmalar için uzayda koloni çalışmaları paralelinde eklemeli imalatın yeni malzemelerle entegre edilip kullanılması elzemdir.

Bu derleme çalışmasında uzay sektöründeki faaliyetlerin ve araştırmaların eklemeli imalatta kullanılan yeni malzemeler açısından incelenmesi hedeflenmiştir. Eklemeli imalatta kullanılan yeni teknolojilerin, çalışmaların hedefleri ve odağı incelendiğinde, imalatta hız, malzeme sarfiyatında azalma, enerji tasarrufu gibi olgular grlmektedir. (am, Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM), 2022), (am & Gnen, Challenges and opportunities in the production of magnesium parts by directed energy deposition processes, 2024), (Güler, Serindağ, & am, 2022). Eklemeli imalatın sağlayabileceği evre dostu özellikler ve düşük ekipman maliyetleri gibi avantajlar, uzay endüstrisinde sürdürülebilir bir üretim modeli oluşturulmasında kilit rol oynamaktadır. Karmaşık geometrik yapıya sahip parçaların hafif ve dayanıklı malzemelerden üretilmesi, eklemeli imalatın uzay sektöründeki önemini artırmaktadır. Polimer malzemelerin yanı sıra eklemeli imalat yüksek performanslı metal bileşenlerin üretiminde büyük bir potansiyele sahiptir ve bu teknoloji, uzay araştırmalarında gerekli olan hafiflik ve dayanıklılık gereksinimlerini karşılamak için uygun bir çözüm sunmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle, eklemeli imalatın sağladığı yeni malzeme seçenekleri ve üretim yöntemleri, uzay programlarının ihtiyaçlarına cevap vermektedir. Geleneksel metal ve organik malzemelerin ötesinde, yerçekimi ve malzeme taşınımı gibi zorluklar nedeniyle alternatif malzemelere yönelim artmıştır. Özellikle Ay ve Mars gibi diğer gezegenlerde yerleşim kurma hedefleri doğrultusunda, yerinde malzeme kullanımı önem kazanmıştır; bu amaçla toprak örnekleri araştırılmakta ve taklit malzemeler geliştirilerek eklemeli imalat süreçlerinde test edilmektedir.

Uzay programlarında eklemeli imalatın faydaları arasında roket ve uydu malzemelerinin hafifletilmesi ve hizmet ömürlerinin uzatılması yer almaktadır. Ayrıca, otomotiv ve havacılık sektrlerinde edinilen deneyimler, uzay sektöründeki uygulamaların artmasına katkıda bulunmuştur. Bu alışma, gelecekte eklemeli imalat yöntemlerinin gelişimini ve yeni malzeme yelpazesinin genişlemesini sağlayacak potansiyeli ortaya koymaktadır.

2. EKLEMELİ İMALAT VE UZAY ARAŞTIRMALARI

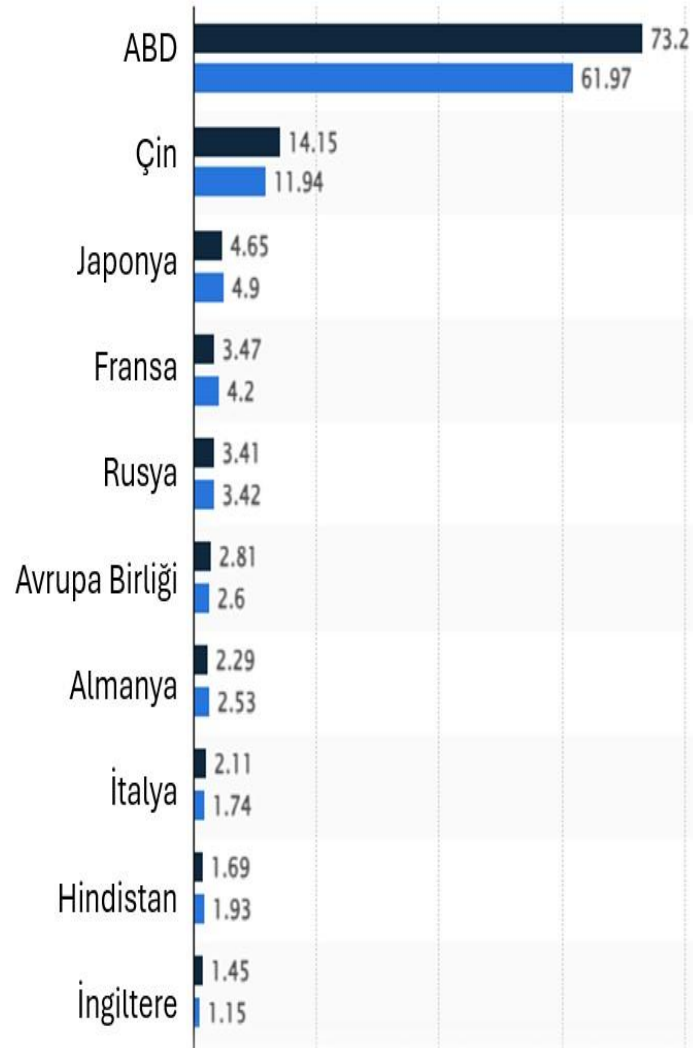
Eklemeli imalat, ardışık malzeme ekleme yoluyla fiziksel nesnelere oluşturma olarak nitelendirilir (Uluslararası Standardizasyon Kuruluğu (ISO) ve Amerikan Malzeme ve Test Topluluğu (ASTM), 2020). Malzeme sarfiyatındaki avantajı, geleneksel üretim yöntemlerine göre tasarım avantajları, eklemeli imalatı uzay sektöründe gün geçtikçe daha cazip hale getirmektedir (Williams & Butler-Jones, 2019). Eklemeli imalat yöntemlerinin ve süreçlerinin geliştirilmesi, birden fazla fonksiyonun yerine getirilmesini sağlayacak karmaşık parçaların üretiminin geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Eklemeli imalatın bu pozitif özelliği sayesinde yüksek adetli parçaların birbiri ile birleştirilmesi daha mümkün olmaktadır (Yang & Zhao, 2018). Diğer retim yöntemleriyle parça azaltmak mümkün olduğu gibi eklemeli imalat ile bu avantaj daha fazla kullanılacaktır.

Eklemeli imalatın kullanımı gerek havacılık gerek otomotiv gibi sektrlerde günden güne payını arttırmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda özellikle Ni-esaslı süper alaşımlar ve paslanmaz çelikler gibi birçok alaşımdan eklemeli imalat ile parça üretimi konusunda birçok çalışmalar yapılmıştır (Bölükbaşı, Serindağ, Gürol, Gnen, & am, 2023), (Gürol,

ve diğerleri, 2023), (Güven, Gürol, Koçak, & Çam, Investigation into the influence of boronizing on the wear behavior of additively manufactured Inconel 625 alloy at elevated temperature, 2023), (Güven, Gürol, Koçak, & Çam, A new approach to improve some properties of wire arc additively manufactured stainless steel components: Simultaneous homogenization and boriding, 2023), (Ceritbinmez, Güven, Gürol, & Çam, 2023). Bu iki sektör özelinde düşünüldüğünde yapılan çalışmaların yüksek adetli ve yüksek güvenlik faktörüne sahip parçaların üretilmesi, kullanılması ve test edilmesi; diğer sektörler için bir referans oluşturmaktadır. Sadece metal ile eklemeli imalat alanında değil, inşaat sektöründe de çimento ve yapı malzemelerinin eklemeli imalat ile kullanımı görülebilmektedir (Jamali, Kaushal, & Najafi, 2021). Uzay sektöründe de sadece uydu ve roketler için metal kullanımı değil, yerinde bilimsel araştırmalar için koloni çalışmalarının başlatılması hedefiyle regolit malzemelerin eklemeli imalat ile kullanımı araştırılmaktadır.

2.1. Uzay Sektöründeki Çalışmalar

Uzay sektöründeki çalışmalar incelendiğinde uydu, roket, bilimsel araştırmalar, keşif çalışmaları gibi alanlarda birçok çalışma görülmektedir. Her ülke için uzay çalışmaları iletişim, haberleşme gibi ana ihtiyaçları sağlaması sebebiyle yüksek önem göstermektedir. Bu çalışmaların devamı ve geliştirilmesi için ülkeler uzay çalışmalarına yaptıkları yatırımları giderek arttırmaktadır. Şekil 1’de uzay programlarına yatırım yapan ülkelerin yatırım maliyetlerine göre sıralaması verilmektedir. Bu listede özellikle ABD ve Çin gibi ekonomik olarak güçlü ülkelerin %10’un üzerinde harcama paylarının arttığı görülmektedir.



Şekil 1. Ülkeler Bazında Uzay Programları Harcamaları (Milyar Dolar Bazında) (Statista, 2024)

Tüm ülkeler kendi iletişim ağlarını kurabilmek, haberleşme sistemlerini oluşturabilmek ve istihbarat faaliyetlerini yürütebilmek için Dünya yörüngesine uydu göndermek mecburiyetindedir. Uydu çalışmalarının geçmişi incelendiğinde, ilk insan yapımı uydunun Sputnik I olduğu görülmektedir. NASA, “Sovyetler Birliği’nin Sputnik I uydusunu

başarılı bir şekilde yolladığı 4 Kasım 1957’de tarih değişti.” ibaresi bulunmaktadır (NASA, Sputnik, 2023). Sputnik I uydusunun fırlatılması, soğuk savaş yıllarında Sovyetler Birliği için önemli bir avantaj sağlamıştır. O tarihten bugüne ise uydular; uzay araştırmaları, bilimsel keşiflerin yanı sıra iletişim, navigasyon ve hava durumu tahmini gibi birçok alanda da önemli bir rol oynamaktadır. Tablo 1 incelendiğinde yıllara göre yörüngeye fırlatılan uydu sayıları görölmektedir. Yörüngeye atılan uydu sayıları 1957 senesinde 2 adetle başlarken 2022 senesine geldiğimizde bu sayı 2474 adede ulaşmıştır. Bu artışta, teknolojinin giderek daha çok gelişmesiyle mikro-uyduların faaliyetlerinin ve imkanlarının artmasının önemli etkisi vardır. Ekonomik olarak büyük uzay çalışmalarına yönelik çalışma yapamayan ölkeler, büyük bütçeler ayırmadan uzay sektöründe yer edinebilmek için mikro-uydulara yönelmiştir (Pixalytics, 2023).

Tablo 1. Yıllara göre Yörüngeye Fırlatılan Toplam Uydu Sayısı (Adet Bazında) (Pixalytics, 2023)

1957	2	1974	128	1991	135	2008	109
1958	8	1975	158	1992	130	2009	125
1959	14	1976	158	1993	108	2010	120
1960	20	1977	137	1994	123	2011	129
1961	38	1978	165	1995	105	2012	134
1962	77	1979	124	1996	100	2013	210
1963	72	1980	130	1997	152	2014	241
1964	107	1981	158	1998	157	2015	222
1965	163	1982	145	1999	129	2016	221
1966	145	1983	154	2000	121	2017	456
1967	159	1984	163	2001	86	2018	453
1968	140	1985	165	2002	96	2019	586
1969	138	1986	134	2003	88	2020	1274
1970	130	1987	135	2004	74	2021	1810
1971	156	1988	145	2005	72	2022	2474
1972	133	1989	139	2006	95	2023	1354
1973	138	1990	168	2007	111		

Bu uyduların yörüngeye yerleştirilmesinde roketlerin payı çok büyüktür. 2. Dünya Savaşı ile silah sektöründe büyük bir sıçrama meydana gelmiştir. Bu sıçrama ile füzelerin büyük tahribat ve uzun menzillere ulaşabilmesi amacıyla başta Almanya olmak üzere, savaşa katılan ölkeler roket yapımına önem vermiştir. Uzun menzillere ulaşan roketler, uzay sektöründe de dünya dışına ulaşmak için akla gelen ilk ulaşım aracı olmuştur. Dünya dışına yollanan ilk cisim 1944 yılı haziran ayında 189 km yüksekliğe ulaşan V-2 roketidir. Günümüzde uzaya yollanan roketlerin sayısının, Tablo 1’de yer alan fırlatılan uydu miktarı düşünöldüğünde çok fazla olduğu düşünölebilir. Uydu yollamak ya da astronot yollamak amacıyla kullanılan roketlerin boş yakıt tanklarının yörüngeye bırakılması, üretimlerinin zor ve uzun süreler gerektirmesi gibi zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar günümüzde roketlerin tekrar kullanılması, geri indirilmesi ile büyük ölçüde aşılmıştır. Roketlerin tekrar kullanılması amacıyla SpaceX (ABD) firmasının yaptığı çalışmalar devrim niteliğindedir. SpaceX firmasının ürettiği Falcon 9 roketleri tekrar kullanılabilir olarak tasarlanmış ve geliştirilmiştir. şu ana kadar Falcon 9 roketleri toplam 349 kez kalkış gerçekleştirmiştir. Toplam iniş sayısı 306 olup, bu roketler toplam 280 kez tekrar kullanılmıştır (SpaceX, Falcon 9, 2024).



Şekil 2. Falcon 9 Block 5'in İlk Uçuşu (Bangladeş'e Ait Bangabandhu-1 Uydusu Fırlatılmıştır.) (CBS News, 2018)

2.2. Uzay Alanındaki Gelecek Çalışmalar

İnsanlık olarak uzay hep merak edilen ve araştırılan bir alan olmuştur. Uzayın dünyadan keşfi belirli limitler ile sınırlandırılmış olsa da teknolojinin gelişmesiyle bu sınırlar giderek daha da ötelenmektedir. Öte yandan insanlık olarak uzaya dair bilgimiz arttıkça hedeflediğimiz, ulaşmak istediğimiz uzaklıkların boyutu da artmaktadır. Sadece güneş sistemi değil keşfedilen diğer yıldız sistemleri incelenebilmektedir. Günümüzde Voyager-1 ve Voyager-2 uyduları sayesinde sadece Güneş'ten Plüton'a değil, Güneş sisteminin dışında kalan alanlar da incelenmeye başlanmıştır. Şu anda yaklaşık 164 Astronomik Birim uzaklıkta olan ($2,45 \times 10^{10}$ km) Voyager-1 uydusu, Ağustos 2012'de yıldızlar arası sisteme geçmiştir (NASA, Voyager Görevi, 2024).

İnsanlık olarak dünya dışında karşılaşılan ilk yapı olarak Ay karşımıza çıkmaktadır. Yerdeki teleskoplar ile Ay'ın yüzeyi incelenebilmektedir. Ancak mesafe arttıkça daha gelişmiş teleskoplara ihtiyaç duyulmaktadır. Gerek yörüngeye yerleştirilen teleskop uydular gerekse dünya yüzeyine yerleştirilen büyük radyo-teleskoplar sayesinde ölçülebilen mesafeler artmıştır. Toplanan veriler yorumlanarak ve yeniden hesaplanarak uzak yıldız sistemlerinin gezegen sayıları ve hatta bu gezegenlerin yüzeylerindeki sıcaklıklar yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Kepler-90 yıldız sistemi, tek yıldızla sahip olması ve gezegenlerinin yıldızdan uzaklaştıkça büyümesi gibi özelliklerle Güneş Sistemimizin ikizi olarak nitelendirilmektedir (NASA, Kepler-90 Sistemi Gezegen Boyutları, 2020). Güneş sistemimize en yakın yıldız sistemi olan Alpha Centauri yıldız sistemi, Güneş sistemi ve Kepler-90 sisteminin aksine 3 yıldız içermektedir. Alpha Centauri A, Alpha Centauri B ve Proxima Centauri yıldızlarından oluşan bu sistem içerisinde Alpha Centauri A ve B yıldızları yörüngelerinde henüz bulunan bir gezegen olmamasına karşın, Proxima Centauri yıldızı etrafında iki adet gezegen keşfedilmiştir (NASA, Alpha Centauri Üçlü Yıldız Sistemi Dünya'dan Yaklaşık 4 Işık Yılı Uzaklıkta, 2024). Dünyamızdan yapılan incelemelerin mesafeden kaynaklı sınırlı olması ve uzay boşluğunda bulunan veri akışını sekteye uğratan birçok gök cisimi bulunmasından kaynaklı, başta en yakın yıldız sistemi olan Alpha Centauri olmak üzere uzak yıldız sistemlerine minik uydular atılması düşünülmektedir. Bu kapsamda bilinen en büyük projelerden biri olan Breakthrough StarShot projesi, Alpha Centauri yıldız sistemine nanocraft adı verilen küçük uyduları lazer ile fırlatılarak incelemeyi hedeflemektedir. Proje kapsamında Nanocraft'lar ile yerinde inceleme yapılarak yıldız sistemi yerinde incelenecektir (Breakthrough İnisyatifleri, 2024).

Uzayın büyüklüğüne ve yapısına dair araştırmalar başlarda basit teleskoplar ile gerçekleştirilirken, günümüzde uydular ve radyo teleskoplar ile yürütülmektedir. Bu gelişimin gelecekte daha fazla ilerlemesi öngörülmektedir. Uzay programlarına ayrılan bütçelerin artması, bu öngörüğü desteklemektedir. Keşif çalışmalarını ve fizik, biyoloji ve kimya gibi ana bilim dallarındaki yüksek gelişim sayesinde keşfedilen gezegenlerin yapısı ve atmosferik koşullar hesaplanabilmektedir. İnsan nüfusunun giderek artması ve dünyadaki kaynakların sınırlı olması, uzay çalışmalarındaki kolonizasyon çalışmalarının yönünü etkilemektedir. Küresel ısınma, doğal kaynakların insanlar bazında payının azalması gibi sebeplerden dolayı Dünya dışı yerleşim ve koloni çalışmalarının geliştirilmesine yol açmıştır. Yakın

gelecekte uzay seyahatlerinin artması beklendiği gibi, diğer uzak galaksilere göre daha yakın olan Ay ve Mars gibi uzay cisimlerine koloni kurma amacıyla büyük projeler başlatılmıştır. Sadece lkeler bazında değil uzay ajansları ve uzay çalışmaları yapan firmalar tarafından büyük ölçekli projeler başlatılmıştır. rnek olarak, SpaceX (ABD) firmasının Mars Kolonizasyonu Programı ile Starship uzay araçları ile Dünya'dan Mars'a insan ve hammadde taşınımı gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Mars'ın Dünya'ya en yakın gezegenlerden biri olması, Mars yüzeyinde bir günün 24 saat 37 dakika ile Dünya gününe çok yakın olması gibi sebepler Mars gezegenini tercih edilebilir kılmıştır (SpaceX, Mars'a İnsan Uzay Uuğu, 2024).

Dünya'da bulunan materyallerin sınırları belli olmakla birlikte, Dünya yüzeyinden çok aşağıda bulunan malzeme kaynaklarına ulaşmak çok yüksek maliyetler gerektirmektedir. Uzay çalışmalarında kullanılan zirkonyum, demir, magnezyum gibi elementlerin koloniler kurulduğunda yerinde kullanımı hedeflenmektedir. Bu kapsamda yapılan asteroid ve gezegen madenciliği faaliyetleri hakkında şu an için araştırmalar yapılmakta, yakın gelecekte ise bu faaliyetleri gerçekleştirmek hedeflenmektedir. Bu alanda yapılan ve ilk başarılı rneği olan Stardust uzay aracı, 1999 senesinde 5535 Anfrank adlı asteroid üzerinden toz parçaları toplayıp 2006 senesinde Dünya'ya dönmüştür. Yıldızlararası tozların edinilmesi, incelenmesi ile Güneş sistemimizin oluşumu hakkında önemli veriler elde edilmiştir (NASA Jet Propulsion Laboratuvarı, 2009).

3. EKLEMELİ İMALATTA KULLANILAN YENİ MALZEMELER: UZAY ARAŞTIRMALARI

3.1. Uzay Faaliyetlerinde Eklemlı İmalat

Eklemlı imalatın günümüzde sağladığı avantajlar, uzay sektöründeki kullanımı da dşnldğnde daha da önemli hale gelmektedir. Uzay taşımacılığının uzay roketleri ile gerçekleştirilmesi, roketlerdeki ağırlık azaltımı çalışmaları ile büyük miktarlarda yakıt tasarrufu sağlanabilir. Robotlar yardımıyla yerinde kaynak kullanımıyla erken üretime başlanarak, araştırma çalışmalarının verimli sresinin arttırılması mümkün olacaktır. Hem önemli vakit kazançları hem de yüksek btli projelerde maliyetlerin azaltılması, eklemlı imalatı vazgeçilmez seçeneklerden biri haline getirmiştir.

Eklemlı imalat, uzay araştırmalarında sürdürülebilirlik ve verimlilik hedeflerine katkı sağlayan devrim niteliğinde bir teknolojidir. Bu teknoloji, uzay ortamının zorlu koşullarında gerekli dayanıklılığı sağlayan karmaşık geometrilere sahip parçaların hızlı ve düşük maliyetle üretilmesine olanak tanır. Özellikle, uzun vadeli uzay görevlerinde yerinde üretim imkânı sunması, yedek parça ve yapı elemanlarının taşınma ihtiyaını minimuma indirir. Uzay ortamında kritik yapıların ve bileşenlerin tamir edilmesi veya yeniden üretilmesi gibi benzersiz bir avantaj sağlamaktadır. Mars veya Ay gibi uzak gezegenlerde koloni kurulması hedeflendiğinde, yerel malzemelerin kullanılması ile yerinde üretim yapılması, lojistik zorlukları ve maliyetleri azaltmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir uzay keşfi için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Uzay faaliyetlerinde eklemlı imalat, aynı zamanda hafif ama yüksek dayanımlı yapıların tasarımında geniş bir tasarım özgürlüğü sunar. Geleneksel retim yöntemlerine kıyasla, eklemlı imalatla üretilen parçalar, daha az malzeme israfı ve optimize edilmiş yapısal tasarımlarla üretilir. Bu zellik, roketlerde yakıt tasarrufu sağlanmasına ve uzay araçlarının daha yüksek performansla çalışmasına katkıda bulunur.

NASA, ESA gibi uzay ajansları ve özel sektör firmaları, eklemlı imalatın sunduğu avantajları kullanarak daha verimli, dayanıklı ve özelleştirilebilir bileşenler geliştirmektedir. Örneğin, uzay istasyonlarında kullanılan bazı yedek parçaların yerinde üretilmesi sayesinde, görev sırasında ihtiyaç duyulan kritik parçaların hızlıca temin edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu yaklaşım, uzun süreli uzay görevlerinde güvenilirliği arttırmakta ve maliyetleri düşürmektedir.

İmalat yöntemleri ve üretim sektörleri dşnldğnde eklemlı imalat, geleneksel üretim yöntemlerine göre daha yeni bir teknoloji olarak grlmektedir. Eklemlı imalat, kendi içerisinde birçok üretim yöntemi olarak değerlendirilmelidir. Chuck Hull'un 1986 yılında "Stereolitografi (SLA) ile üç Boyutlu Nesnelerin retilimi için Aparat" patentini alması ve 3 boyutlu baskı makineleri ile bu fikrini ticarileştirilmesi ile SLA, yeni bir imalat yöntemi olarak ortaya çıkmıştır (U.S. Patent No. 4, 575, 330, 1986). Seçmeli Lazer Ergitme (SLM) yöntemi, 1990 senesinde Fraunhofer Enstitüsü'nün geliştirdiği ve Focke&Schwarze GmbH firması tarafından ticari hale getirdiği bir eklemlı imalat yöntemi olmuştur. Havacılık ve savunma gibi sanayiiler için zorlu gereksinimleri karşılamada karmaşık

parçaların üretiminde bir seçenek olarak benimsenmesini sağlamıştır (Özsoy, Duman, & İçkale Gültekin, 2019). Günümüzde eklemeli imalatın kullanımının artmasıyla ve teknolojisinin gelişmesiyle, uzay sektöründeki kullanımına yönelik uzay ajansları, belirli standartlar oluşturmaktadır (NASA, Metallerde Lazer Toz Yatak Füzyonu ile Eklemeli olarak Üretilmiş Uzay Uçuş Donanımı Standardı, 2017).

3.2. Regolit Malzemeler

Regolit, sözlük tanımı itibarıyla kayayı örten gevşek kayalık malzemelere denmektedir (Etymonline, 2024). Ay gibi doğal uyduların ya da Mars, Venüs gibi kaya gezegenlerin yüzeyinde Regolit toprak (ince taneli toprak, kuma benzer) bulunmaktadır. Regolit toprakların, Ay'a ve Mars'a giden uzay araçları tarafından hem yerinde hem de Dünya'da incelenmesi ile artık içeriğine ulaşılabilmektedir. Dünya'da uzaydaki bu toprak malzemelerin benzerleri üretilmeye çalışılmaktadır. Bu taklit edilen topraklar ile çeşitli deneylerin Dünya'da yapılması mümkün olmaktadır.

Birçok uzay çalışması yapan uzay ajansı, kendi Regolit taklitlerini üretmektedir. Bu üretilen taklit topraklar Apollo görevlerinde elde edilen ay regolitleri ile karşılaştırılarak çalışmalar, deneyler ve araştırmalara konu olmaktadır. Koloni çalışmaları düşünülerek bu taklit topraklarda tarım çalışmaları denendiği gibi barınma ihtiyacını giderebilmek için eklemeli imalat denemeleri yapılmaktadır.

Regolit taklit malzemelerin eklemeli imalat yöntemiyle kullanılması sonucunda, uzayda, Mars ve Ay yüzeylerinde yerinde kaynak kullanımı amacıyla yüzeydeki Regolit malzemenin de kullanılabilmesi hedeflenmektedir. Regolit malzemelerin kullanımı, güneş radyasyonundan korunma, meteoritlerden korunma, aşırı sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılık ve kapalı ortamların basınçlandırılması için önemlidir. Ay ve Mars'ın atmosferlerinin Dünya'nınkine benzemeyen şekilde, daha düşük yoğunluklu ve güneşin radyasyonundan koruyamayacak şekilde olması, yüzeyde yüksek sıcaklıklara sebep olmaktadır. Aynı şekilde düşük yoğunluğa sahip atmosferler, sera etkisi oluşturulmadığı için güneşi görmeyen yüzeyler çok düşük sıcaklıkları görmektedir. Araştırma çalışmalarının uzayda gerçekleştirilmesi için Regolit malzemeler kullanılarak yapılar inşa edilmesi elzemdir.

3.3. Ay Regolit Taklitleri

İnsanlık olarak uzaya dair ilk karşımıza çıkan yapı uydumuz olan Ay'dır. Gel git etkisi gibi insan yaşantısına doğrudan etki eden ayın hareketleri zaman zaman dini zaman zaman tarımsal işlemler için takip edilmiştir. Sadece ayın konumu değil, ayın yapısı da insanlığın her zaman ilgisini çeken bir konu olmuştur. Soğuk savaş yıllarında uzay yarışlarında Ay'a ayak basmak, yarışın önemli bir aşaması olmuştur.

En yakın uzay komşumuz ve doğal uydumuz olan Ay hem yerçekiminin az olması hem de atmosfer gibi koruyucu bir katman olmamasından ötürü bize uzay hakkında birçok bilgi verebilmektedir. Bu araştırmalar için uzay ajansları astronotlar yollamış, ek olarak robotlar ve aya yollanan uydular aracılığı ile Ay yüzeyini haritalandırmıştır. Yapılan araştırmaların süresini uzatmak, daha yerinde araştırmalar yapmak için insanlı misyonların artması gerekmektedir. Bu amaç ile Ay'a koloniler kurulması amacıyla araştırmalar ve yarışmalar düzenlenmektedir.

Neredeyse her ülke ve uzay ajansı, Ay'a dair araştırmalarını yürütmek için taklit Ay regolitleri imal etmekte ve geliştirmektedir. Taklit edilen örnekler ile hali hazırda örneklerini inşaat sektöründe gördüğümüz gibi yapıların inşa edilmesi araştırmaların ve yarışmaların konusu olmuştur. Şekil 3'te görüldüğü gibi yapıların inşa edilebilmesi için Regolit malzemelerle üretim denemeleri gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. ESA Tarafından Ay'a Eklemele İmalat ile İnşa Edilmesi Planlanan Habitatlar (Avrupa Uzay Ajansı (ESA), 2024)

Tablo 2, Dünya çapında geliştirilen Ay Regolit Taklitlerini ve geliŐtirilme amaçlarını içermektedir. Bu liste ihtimaldir ki günümüzde daha uzun ve daha fazla örnek içermektedir. Bu tabloda yer alan Deniz tabiri (Mare), aya bakıldığında karanlık kalan kısımlar için kullanılmıştır. Yaylalar ifadesi ise Ay'ın yüzeyindeki açık renkli krater izleri için kullanılmıştır.

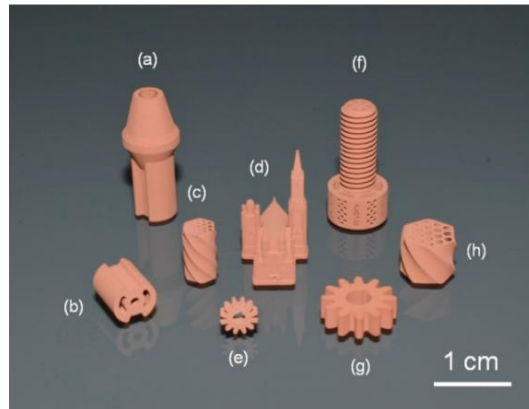
Tablo 2. Dünya apında Geliştirilen Ay Regolit Taklitleri ve Tipleri (Taylor, Pieters, & Britt, 2016)

Dünya apındaki Ay Regolit Taklitleri	Tip
MLS-1 Minnesota Ay Regolit Taklidi	Yüksek Ilmenit Denizi (genel kullanım)
MLS-1P	Yüksek Ti Denizi (deneysel, toplu halde değil)
MLS-2	Yaylalar (genel kullanım)
ALS Arizona Ay Regolit Taklidi	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
JSC-1 Johnson Uzay Merkezi	Düşük Ti Denizi (genel kullanım)
FJS-1 (tip 1) Fuji Japon Regolit Taklidi	Düşük Ti Denizi
FJS-1 (tip 2)	Düşük Ti Denizi
FJS-1 (tip 3)	Yüksek Ti Denizi
MKS-1 MSFC	Düşük Ti Denizi (kullanım amacı bilinmiyor)
JSC-1A,-1AF	Yaylalar (genel kullanım)
OB-1 Olivine-Bytownite	Yaylalar (genel kullanım jeoteknik)
CAS-1	Düşük Ti Denizi (genel kullanım)
GCA-1 Goddard Uzay Merkezi	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
NU-LHT-1M & ID NASA/USGS-Ay Yaylaları	Yaylalar (genel kullanım)

NU-LHT-2M & 2C	Yaylalar (genel kullanım)
Oshima baz Taklidi	Yüksek Ti Denizi (genel kullanım)
Kohyama baz Taklidi	Orta; yaylalar ve deniz
NAO-1 (Li ve ark., 2008)	Yaylalar (genel kullanım)
CLRS-1 Çin Ay Regolit Taklidi	Düşük Ti Denizi (genel kullanım)
CLRS-2	Yüksek Ti Denizi (genel kullanım)
CUG-1	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
GRC-1 &-3	Jeoteknik, standart araç hareketlilik taklidi
TJ-1	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
TJ-2	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
KOHLIS-1 Koh Ay Regolit Taklidi	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
BP-1 Black Point	Düşük Ti Denizi (jeoteknik)
CSM-CL Colorado Maden Okulu Colorado Lavı	Jeoteknik

Bu taklit ay topraklarının eklemeli imalat ile kullanılması koloni çalışmalarını hızlandıracağı gibi, karmaşık yapılar için de çimento görevi görecektir.

Yapılan örnek bir çalışma incelendiğinde (Altun, ve diğerleri, 2021), Avrupa Astronot Merkezi tarafından geliştirilen bir Ay Regolit Taklidi olan EAC1A kullanılmıştır. Parçacık boyutu küçültmek için 150 gr EAC1A tozu 150 ml izopropanol ile 24 h boyunca öğütülmüş ve sonrasında bir kurutma kabini içinde solvent uzaklaştırılmıştır. Seramik malzeme baskısı için uygun olan CeraFab 7500 tezgâhı kullanılmıştır. Malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla Regolit malzemeler için 1000 °C üzerindeki sıcaklık değerleri uygundur (Allen, Graf, & McKay, 1994). Ek olarak EAC1A tozu için erimeye başladığı sıcaklık yaklaşık olarak 1000 °C olmasından dolayı çalışmada 1000 °C olarak sinterleme sıcaklığı seçilmiştir (Engelschön, ve diğerleri, 2020). Şekil 4'te çalışma kapsamında üretilen sinterlenmiş parçalar görülmektedir. Çok karmaşık ve küçük boyuttaki parçaların üretiminin mümkün olduğu bu ürünlerden anlaşılabilmektedir.



Şekil 4. Altun vd. Yaptığı EAC1A ile Üretilen Sinterlenmiş Parçalar (Altun, ve diğerleri, 2021)

Sadece küçük boyutlar için değil, büyük çaptaki üretimler için NASA gibi büyük kuruluşlar yarışmalar düzenlemektedir. Sadece üretim için değil, Ay'da yapılması düşünölen yapılar için de mimari tasarım çalışmalarını yürütölmektedir (Büyük Fikir, 2024).



Şekil 5. SpaceFactory AI Firması Tarafından Yürütölen Lina Projesi Ay'a Habitat Kurma Amacını Taşır (SpaceFactory, Lina, 2024)

Ay'a yapılacak keşif misyonlarında, regolitin yapısal özelliklerinin ve davranışlarının test edilmesi, görevlerin başarısını artırır. Bu sayede, astronotların ve robotların Ay yüzeyinde karşılaşılabileceği zorluklar hakkında bilgi edinilir. Regolitin özelliklerinin detaylı incelenmesi hem keşif hem de yerleşim projeleri için başarılı bir temel oluşturur.

3.3.1. Mars regolit taklitleri

Mars, Ay'dan sonra en çok incelenen ve merak edilen gök yapılarından biridir. Ay gibi Mars'ı da incelemek amacıyla insansız uzay misyonları ile Mars'ın toprak yapısı incelenmiştir. Yine Mars'taki regolit benzerlerinin üretilmesi ile Dünya'da çalışmalar yürütölmektedir. Mars'ın, Güneş Sistemi'nin uzak mesafedeki çalışmaları için bir istasyon olarak kullanma düşüncesi sebebiyle Mars'ın kolonizasyonu için çalışmalar ve programlar planlanmaktadır. Bu yürütölen büyük çaptaki çalışmalara örnek olarak, SpaceX firmasının Mars programı örnek verilebilir. Space Factory AI firmasının Marsha projesi ise Mars'ta habitat oluşturmayı hedeflemektedir (SpaceFactory, Marsha, 2024).



Şekil 6. Marsha Habitat Projesi, Mars Regolitini Kullanarak Yapı Oluşturmayı Hedeflemektedir (SpaceFactory, Marsha, 2024)

Gelecek koloni çalışmaları için yapısal çalışmalar önemlidir. Bu kapsamda birçok Mars Regolit Taklitleri geliştirilmiştir. Tablo 3'te bazı Mars regolit malzemelerin özellikleri bulunmaktadır. Bu tablodaki değerler incelendiğinde boyutlar ve kohezyon etkileri arasında çok fark bulunmaktadır. Bu listede yer almayan Mars Regolit

Taklitleri bulunduğu gibi, çoğu uzay ajansı ve programı ile yenilerinin geliştirilmesi hedeflendiği için bu listenin çok daha uzaması mümkündür.

Tablo 3. Bazı Mars Regolit Taklit Malzemeleri ve Bilgileri (Taylor, Pieters, & Britt, 2016)

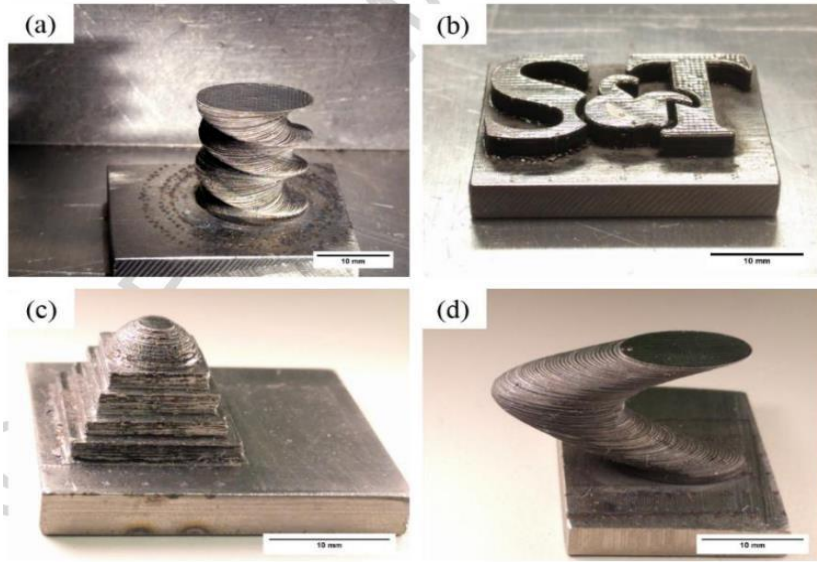
Mars Regolit Taklitleri	Parçacık Şekli	Parçacık Boyutu (μm)	Hacim Yoğunluğu (g/cc)	Kohezyon (kPa)	İç Sürtünme Açısı ($^{\circ}$)
JSC Mars-1	-	<1 mm	0,85-0,89	0,06-0,09	40,8-41,4
ES-1	Açısal	<3-30	0,54-1,21	1,3-3,9	29,5-32,3
ES-2	Açısal ila alt açılı	60-250	1,24-1,44	Çok az	38,2-41,4
ES-3	Alt yuvarlak ila yuvarlak	300-800	1,46-1,64	0,3-1,4	34,3-35,8
ES-4*	-	-	1,8-2,2	0-4	38-44
JMSS-1	Açısal ila alt açılı	300 (ortalama)	<1 (mm)	1,45 (ortalama)	0,33
MGS-1	-	122 (ortalama)	1,29	-	-
MMS kumu	Açısal	-	1,38 - 1,34	0,81	38
MMS tozu	Açısal	-	1,08 - 0,91	0,38	31
UC Mars1	Açısal ila alt açılı	-	2,7	-	35
MER Yard	-	1,43-1,78	0,09-0,10	0,149	47,9-53,3
Mars Yard	-	1,49-1,78	-	-	35,1-37,2
M90	Alt açılı	-	1,32-1,52	1,4-2,8	29-37
GRC-3	-	0,15 (ortalama)	1,52-1,94	-	37,8-47,8

3.3.2. Bulk metalik camlar (BMG)

Uydular ve uzay istasyonu gibi insan yapımı ürünler, çok uzun süreler kullanılmak üzere tasarlanır ve üretilir. Uzun sürelerin hedeflenmesinin ana sebeplerinden biri çok yüksek maliyetlerin bulunmasıdır. Parçaların kırılıma uğraması ya da değişim vakitleri gelmesi durumunda, parça değişimi için ya çok zor görevler belirlenmekte ya da ana üründen vazgeçilmektedir. Yüksek esneklik ve mukavemete sahip parçalar her zaman tercih edildiği gibi, malzemenin yorulmaya karşı direnci de önemlidir.

BMG'nin içeriğinde zirkonyum, demir, alüminyum, nikel, titanyum ve bakır gibi elementler bulunur. Dökme Metalik Camlar, 1960'larda Dr. Duwez tarafından California Teknoloji Enstitü'nde keşfedilmiştir (Amorphology, 2024). Sıvı metal alaşımının çok hızlı bir şekilde soğutulması ile elde edilir. Metal atomlarının düzensiz bir kristal oluşturması çok hızlı soğutma ile mümkün olmaz. Cam benzeri bir yapıya yani amorf bir yapıya sahip olmaktadır. Bu amorf yapının getirilerine örnek vermek gerekirse, geleneksel metal alaşımlarının aksine daha az kırılğan ve darbelere karşı daha dayanıklıdır. Aşınma ve korozyona karşı dirençli olması denizciliğin yanı sıra havacılık sektöründe de kullanımının yolunu açmaktadır. Uzay sektöründe ise kullanımı, NASA'nın dişli üretiminde BMG materyallerini kullanma amacı ile artmıştır. Talaşlı imalat ile üretimi sağlanırken, hafifletme ya da topoloji optimizasyonu sonucu eklemeli imalat ile denemeler gerçekleştirilmektedir.

Shen ve diğerlerinin yaptığı çalışmada (Shen, Li, Chen, & Tsai, 2017), Lazer Toz Yatak Ergitme (LFP) teknolojisi ile soğuma/koruma sistemleri yardımıyla amorf metalik parçalar üretilmiştir. Parçaların üretilme aşamasında parça üzerinde ısı birikimini önlemek amacıyla lazer atım tekrarlama hızı 1 Hz olarak ayarlanmıştır. Parça kenar yapılarının temiz ve pürüzsüz şekilde üretilmesi için 30 ns lazer atım süresi, 100 mJ lazer atım enerjisi ve 5 kHz lazer atım tekrarlama parametrelerine uygun UV lazer kullanılmıştır. Parça geometrileri incelendiğinde, diğer eklemeli imalat yöntemleri ile benzeri şekilde karmaşık geometrilerin başarılı şekilde ortaya çıktığı görölmektedir. Bu gibi çalışmaların devamı ve gelişmesi ile BMG materyallerin üretimdeki payı da artacaktır.

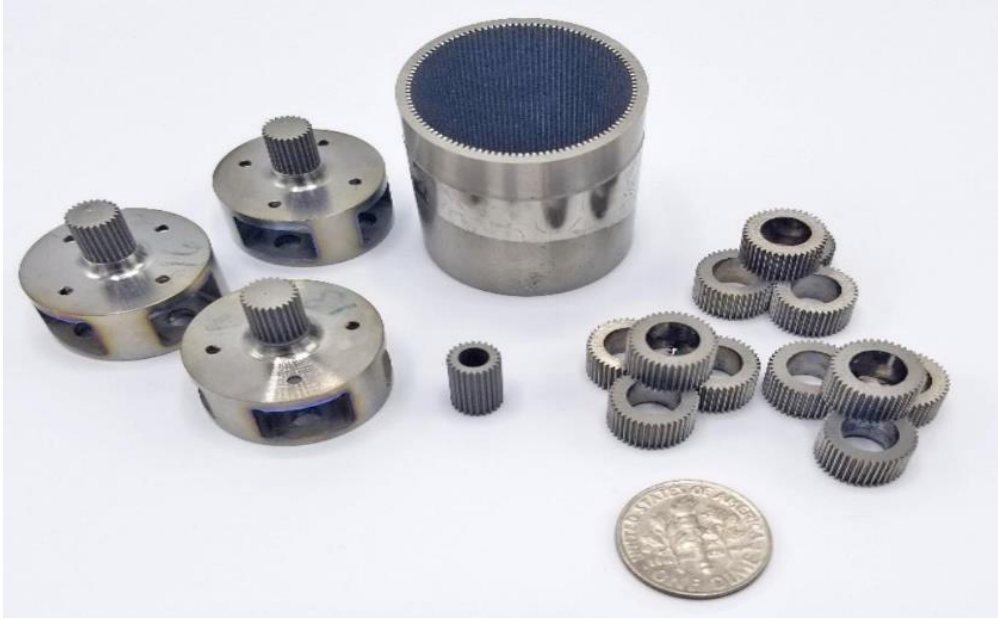


şekil 7. LFP ile Üretilen Amorf Metal Parçalar (Shen, Li, Chen, & Tsai, 2017)

BMG materyalinin kullanımına yönelik bir diğer örnek, NASA tarafından BMG materyalleri kullanılarak dişli yapılmasıdır. İncelemek amacıyla insansız araç yollanması düşünölen güneş sistemi parçalarından biri de Jüpiter'in uydusu olan Europa'dır. Bu uydunun yüzeyinin buz ile kaplı olduğu gözlemlenmiş, bu buzun kalınlığının ise 19-25 km olduğu tahmin edilmektedir. Büyük buz kütesinin altında sıvı halde bir büyük gölün keşfedilmesi, yeni bir habitat bulunmuş olma ihtimalini de kuvvetlendirmektedir (Johns Hopkins Üniversitesi Uygulamalı Fizik Laboratuvarı (JHUAPL), 2023). Bu ihtimalin incelenmesi ve araştırılması amacıyla insansız uzay araçları yollanması muhtemeldir. Europa Jüpiter'in 95 uydusu arasında en büyük 4. Uydusu olmakla birlikte, ortalama -160°C yüzey sıcaklığı araştırmaların önemli bir kısıtı durumundadır.

Düşük yüzey sıcaklıklarına sahip uzaydaki diğer gök cisimlerinin de araştırılması için, soğuk ortamlarda dayanıklı ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş malzemeler ile parçalar üretilmesi gerekmektedir. NASA bu kapsamda

BMG kullanılarak sadece dişli değil, civata, somun gibi yapısal bağlayıcıların da üretilmesi amacıyla çalışmalar yürütmektedir (NASA Bilim, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik Müdürlüğü (STMD), 2024).



Şekil 8. BMG materyali ile üretilmiş dişli kutusu montajı parçaları (NASA Bilim, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik Müdürlüğü (STMD), 2024)

3.3.3. Seramik matrisli kompozitler (CMC)

Seramikler, içeriğinde silisyum ve alüminyum içermekte olup, lif halindeki karbon fiber, fiberglas gibi katkılarla kompozit hale getirilebilir. Silisyum ve Alüminyum oksitlerden kaynaklı yüksek akustik yalıtım özelliği bulunmaktadır. Ek olarak düşük ısı iletkenlik ve yüksek ısı dayanıklılığı özelliklerinden dolayı roketlerin nozul kısımlarında kullanılır. Ek olarak koloni çalışmaları için gürültüyü engellemek amacıyla yaşam alanları duvarlarında kullanılabilir. Bu yapının oluşturulması ve fazla ağırlıklardan kurtulmak için topoloji optimizasyonu çalışmaları yapılması durumunda eklemeli imalat ile üretim elzem hale gelmektedir (Voxel Matters, 2022).

Lu vd. (2017)'nin araştırmasında geleceğin CMC eklemeli imalat odak noktaları olarak, lif arayüz tabakası, yoğunluk ve geometrik hassasiyet, yeni katkı üretim teknikleri belirlenmiştir. Özellikle yoğunluk ve geometrik konusunda, eklemeli imalat ile CMC materyallerinin kullanılması, yüksek gözenekliliğe ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gibi düzeltilmesi gereken sorunları barındırmaktadır. CMC içerisine lif, toz gibi takviyeleri daha küçük ve homojen bir şekilde malzemeye yayılması konusunda çalışmanın gerekliliğine de işaret etmektedirler (Lu, Cao, Song, Li, & Lu, 2019).

Roket nozullarında kullanılması düşünülen CMC malzeme ile ilgili yapılan bir çalışmada (Valentine & Gradl, 2019) küçük ölçekli olarak üretilen roket nozulları üretilmiştir. Kompozit şekilde kullanılan CMC'nin kullanılması, ağırlığı önemli bir miktarda düşürmekle beraber, üretim maliyetlerinin de düşürülmesi potansiyelini de içermektedir.



Şekil 9. CMC ile Üretilen Küçük Ölçekli Roket Nozul Çalışması. Soldan Sağa Sırasıyla Preseramik Malzeme, Isıtılmış Seramik ve Test Görüntüleri (Valentine & Gradl, 2019)

3.3.4. Miselyum

Mantarların, oksijene ihtiyaç duymadan fermentasyon ile hücresel solunum yapıyor olmaları, oksijenin olmadığı ortamlardaki önemini arttırmaktadır. Organik canlılar olmaları sebebiyle de bir karbon kaynağı olarak görülebilir. Miselyum ise mantarların toprağın altında kalan kısmındaki yapıya verilen isimdir. Mantarların toprağı iyi bir şekilde tutunmalarını sağlamaktadır. Sağlam ve organik olmaları sebebiyle uzayda kullanılabilir besin kaynağı olarak düşünölmektedir. Ancak Hollanda’da bir sanatçının yaptığı eser ile miselyum oluşturarak, sandalye gibi ev eşyalarının üretilebileceğı de görölmüştür (3D Yazdırma Kartı, 2013). Eşyaların bir karbon kaynağı olarak geri dönüşümü sağlandığında gübre olarak kullanılabilmesi gibi faydaları bulunmaktadır. Oksijene ihtiyaç duymamaları ise ortamdaki az miktarda oksijenin de harcanmayacak olmasından dolayı bir avantaj sunar.



Şekil 10. Mantarlar Yardımıyla Üretilen Sandalye Çalışması (3D Yazdırma Kartı, 2013)

Miselyum yapının oluşturulması için bir nevi kalıp üretilir, mürekkep olarak kahve çekirdekleri kullanılır. Şu anda 7 gün gibi çok uzun süreler ile bu üretim gerçekleşse de önden üretime başlanabilmesi bu etkiyi kırmaktadır. Miselyum ile eklemeli imalat 5 adımı içermektedir. İlk olarak kullanılacak Hidrojel ile Mantar hücreleri karıştırılarak malzeme hazırlanır. Diğer adım olarak elde edilen malzemeyi yumuşak bir malzeme olduğu için bir kalıba ya da zemine oturtmak gerekmektedir.

Bu kalıp veya zemin üzerinde eklemeli imalat gerçekleştirilir. Ardından mantarın büyümesi beklenir.

Miselyum hücreleri şeker ve kahve çekirdeğı tozu gibi malzemeleri kullanarak büyümektedirler. Mantarların kalıp sınırlarına dayanması sonrası miselyum havasız alkollü ortamda bırakılarak hücrelerin kuruması sağlanır. Böylelikle artık miselyum hücreleri büyüyemez. Miselyum ile üretilen ürünler çok sıkı bir ağ oluşturduğu için su geçirmez bir yapıya sahiptirler. Sadece sandalye gibi ev eşyaları değil miselyum hücrelerin osmotik basıncı kullanılarak robotik kollar ve kışkaçlar da yapılabilir (Geleceğın Malzemeleri, 2024).



Şekil 11. Miselyum ile Üretilen Robotik Kol Ucu (Geleceğin Malzemeleri, 2024)

4. SONUÇ VE YORUMLAR

Bu çalışmada, eklemeli imalatın teknolojiyle paralel şekilde gelişmesi sonucunda daha fazla alana hitap eden bir üretim yolu seçeneği olarak Uzay sektörü özelinde tercih edilmesi incelenmiştir. Eklemeli imalat kapsamında kullanılan malzemelerin, bildiğimiz metal ve PLA (poliaktik asit) gibi organik malzemeler dışında kalan farklı malzemelerin kullanımı araştırılmaktadır. Bununla birlikte, uzay programları kapsamında hedeflenen çalışmaların limitlerinden dolayı eklemeli imalat ile yıllarca kullanılan malzemelerin dışına çıkmıştır. İnsanlık hedeflerinin, dünya gezegeni dışına çıkmaya başlamasıyla gereksinimler de değişme ve gelişme göstermektedir. Hali hazırda kullanılan malzemeler, yerçekimi, malzeme taşınımının zor olması ve atmosfer gibi kısıtlardan kaynaklı kullanım açısından uygun olmamaktadır.

Gelecek uzay çalışmaları düşünüldüğünde diğer gezegenler üzerinde kurulması düşünülen yerleşimler için dünyadan malzeme taşınması mümkün olmamaktadır. Yerinde malzeme kullanımı amacıyla Ay ve Mars'tan toprak örnekleri alınıp incelenmekte, bu topraklara benzer içeriğe sahip taklit topraklar oluşturulmaktadır. Taklit edilen topraklar ile eklemeli imalat için denemeler yapılmaktadır. NASA tarafından düzenlenen 3 Boyutlu Yazdırılmış Yaşam Alanı yarışması ile uzayda yaşam alanları oluşturmak için eklemeli imalatın kullanımına yönelik fikirler değerlendirilmiş, bu fikirlerin bazıları inşaat aşamasına getirilmiştir (NASA, 3D-Baskılı Habitat Yarışması, 2023). Ek olarak roket ve uydular ile daha fazla keşif yapılması amacıyla malzeme araştırmaları devam etmektedir. Uyduların hizmet sürelerini uzatmak, roketlerin kullanacağı yakıt miktarını düşürmek gibi amaçlarla uzay programlarında eklemeli imalat, hafifletme çalışmaları ile paralel şekilde kendine yer edinmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak NASA'nın geliştirdiği RAMPT Projesi kapsamında lazer tozuyla yönlendirilmiş enerji biriktirme (LP-DED) yöntemiyle ürettikleri roket nozulu üretilip test edilmesi gösterilebilir (Ridgeway, 2024).

Otomotiv, havacılık gibi sektörlerde uygulanan çok adetli ve yüksek güvenlik katsayılarına sahip parçaların eklemeli imalat ile üretilmesi birçok diğer sektöre yol göstermiştir. Uzay sektöründe eklemeli imalat uygulamalarının artması, yapılan keşif çalışmaları ve koloni çalışmaları gibi gelişmelerle ihtiyaçların değişmesine doğrudan bağlıdır. Gelecekte eklemeli imalat yöntemlerinin gelişimi için uzay sektöründe yapılan çalışmalar, yeni malzemeler ve birçok kısıtın getirdiği geliştiricilik ile yol gösterici olacaktır. Bu çalışma uzay sektöründeki gelişmelerle ve yeni ihtiyaçların doğurduğu kullanılan malzeme yelpazesinin artması ile güncellenebilir. Uzay çalışmalarında meydana gelen gelişim sonucu yeni alanların ortaya çıkmasının beklenmesi doğaldır. Bu çalışmada incelenen Regolit, BMG ve CMC gibi yapay yollarla oluşturulan malzemelerin yanı sıra Miselyum gibi organik ve doğal malzemelerin de gelişmesi ve kullanılması beklenmektedir.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Fikir/Kavram: M. M. Arslan; Tasarım: M. M. Arslan, B. alık ve G. Uzun; Veri Toplama/İşleme: M. M. Arslan ve B. alık; Analiz/Yorum: M. M. Arslan, B. alık ve G. Uzun. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİğİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŐMALAR

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- 3D Yazdırma Kartı. (2013). *Mantar ve Mantar ile Muhteşem 3D Yazdırma*. <https://3dprintboard.com/showthread.php?4192-Amazing-3D-Printing-with-Mushrooms-and-Fungus> adresinden alındı
- Allen, C. C., Graf, J. C., & McKay, D. S. (1994). Sintering Bricks on the Moon. *Engineering, Construction, and Operations in Space IV, ASCE*. içinde 1220–1229.
- Altun, A. A., Ertl, F., Marechal, M., Makaya, A., Sgambati, A., & Schwentenwein, M. (2021). Additive manufacturing of lunar regolith structures. *Open Ceramics*, 5. doi:10.1016/j.oceram.2021.100058
- Amorphology. (2024). *Uygulamalar*. <https://amorphology.com/applications> adresinden alındı
- Avrupa Uzay Ajansı (ESA). (2024). *Dünyadışı Üretim Sempozyumu: Uzayda Yeni Bir Ev Nasıl İnşa Edilir?* https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Off-Earth_manufacturing_symposium_how_to_build_a_new_home_in_space adresinden alındı
- Bölükbaşı, Ö. S., Serindağ, T., Gürol, U., Günen, A., & am, G. (2023). Improving oxidation resistance of wire arc additive manufactured Inconel 625 Ni-based superalloy by pack aluminizing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 46, s. 89-97. doi:10.1016/j.cirpj.2023.07.011
- Breakthrough İnişiatifleri. (2024). *Yıldızlararası Yolculuk*. <https://breakthroughinitiatives.org> adresinden alındı
- Büyük Fikir. (2024). *Büyük Fikir Yarışması*. <https://bigidea.nianet.org/2024-challenge> adresinden alındı
- CBS News. (2018). *SpaceX Bugün İlk Block 5 Falcon 9'u Fırlatmaya Hazırlanıyor*. <https://www.nasaspaceflight.com> adresinden alındı
- Ceritbinmez, F., Günen, A., Gürol, U., & am, G. (2023). A comparative study on drillability of Inconel 625 alloy fabricated by wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 89, s. 150-169. doi:10.1016/j.jmapro.2023.01.072
- am, G. (2022). Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM). *Materials Today: Proceedings*, 62(1), s. 77-85. doi:10.1016/j.matpr.2022.02.137
- am, G., & Günen, A. (2024). Challenges and opportunities in the production of magnesium parts by directed energy deposition processes. *Journal of Magnesium and Alloys*, 12, s. 1663-1686. doi:10.1016/j.jma.2024.05.004
- Engelschiön, V., Eriksson, S., Cowley, A., Fateri, M., Meurisse, A., Kueppers, U., & Sperl, M. (2020). EAC1A: A novel large-volume lunar regolith simulant. *Sci. Rep.* 10, s. 1–9.
- Etymonline. (2024). *Regolith*. <https://www.etymonline.com/word/regolith> adresinden alındı
- Geleceğin Malzemeleri. (2024). *Mantar Mürekkebi*. <https://futureofmaterials.com/en/materials/myceliumink/#:~:text=A%20Fungus%20Based%20Ink%20for%203D%20Printing.&text=Under%20the%20right%20conditions%2C%20mycelium,example%20of%20a%20living%20material> adresinden alındı

- Güler, S., Serindağ, H. T., & Çam, G. (2022). Wire arc additive manufacturing (WAAM): Recent developments and prospects. *Mühendis ve Makine*, 63(706), s. 82-116. doi:10.46399/muhendismakina.1085716
- Günen, A., Gürol, U., Koçak, M., & Çam, G. (2023). A new approach to improve some properties of wire arc additively manufactured stainless steel components: Simultaneous homogenization and boriding. *Surface & Coating Technology*, 460. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129395.
- Günen, A., Gürol, U., Koçak, M., & Çam, G. (2023). Investigation into the influence of boronizing on the wear behavior of additively manufactured Inconel 625 alloy at elevated temperature. *Progress in Additive Manufacturing*, 8, s. 1281-1301. doi:10.1007/s40964-023-00398-8.
- Gürol, U., Altınay, Y., Günen, A., Bölükbaşı, Ö. S., Koçak, M., & Çam, G. (2023). Effect of powder-pack aluminizing on microstructure and oxidation resistance of wire arc additively manufactured stainless steels. *Surface & Coating Technology*, 468. doi:10.1016/j.surfcoat.2023.129742
- Hull, C. &. (1986). *U.S. Patent No. 4, 575, 330*.
- Jamali, K., Kaushal, V., & Najafi, M. (2021). Evolution of additive manufacturing in civil infrastructure systems: A ten-year review. *Infrastructures*, 6(8). doi:10.3390/infrastructures6080108
- Johns Hopkins Üniversitesi Uygulamalı Fizik Laboratuvarı (JHUAPL). (2023). *Bilim adamları, Avrupa'da Yeraltı Büyük Gölü'nde Kamt Buldu*. <https://www.jhuapl.edu/news/newsreleases/111116-scientists-find-evidence-subsurface-great-lakeeuropa#:~:text=In%20a%20finding%20of%20significance,new%20potential%20habitat%20for%20life adresinden alındı>
- Lu, Z., Cao, J., Song, Z., Li, D., & Lu, B. (2019). Research progress of ceramic matrix composite parts based on additive manufacturing technology. *Virtual and Physical Prototyping*. doi:10.1080/17452759.2019.1607759
- NASA. (2017). *Metallerde Lazer Toz Yatakları Füzayonun ile Eklemeli Olarak Üretilmiş Uzay Uçuş Donanımı Standardı*.
- NASA. (2020). *Kepler-90 Sistemi Gezegen Boyutları*. <https://www.nasa.gov/imagearticle/kepler-90-system-planet-sizes adresinden alındı>
- NASA. (2023). *3D-Baskılı Habitat Yarışması*. <https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/centennial-challenges/3d-printed-habitat-challenge adresinden alındı>
- NASA. (2023). *Sputnik*. <https://www.nasa.gov/history/sputnik adresinden alındı>
- NASA. (2024). *Alpha Centauri Üçlü Yıldız Sistemi Dünya'dan Yaklaşık 4 Işık Yılı Uzaklıkta*. <https://science.nasa.gov/resource/the-bright-star-alpha-centauri-and-its-surroundings adresinden alındı>
- NASA. (2024). *Voyager Görevi*. <https://voyager.jpl.nasa.gov adresinden alındı>
- NASA Bilim, Teknoloji, Mühendislik ve Matematik Müdürlüğü (STMD). (2024). *Toplu Metalik Cam Dişliler*. <https://www.nasa.gov/stmd-game-changing-development/bulk-metallic-glassgears adresinden alındı>
- NASA Jet Propulsion Laboratuvarı. (2009). *Stardust Basın Kitleri*. <https://www.jpl.nasa.gov/missions/stardust adresinden alındı>
- Özsoy, K., Duman, B., & İçkale Gültekin, D. (2019). Metal part production with additive manufacturing for aerospace and defense industry. *International Journal of Technical Sciences*, 11(3), s. 201–210. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/918027 adresinden alındı>
- Pixalytics. (2023). *2023'te Dünya'nın yörüngesinde dönen uydular*. <https://www.pixalytics.com/tag/satellite adresinden alındı>
- Ridgeway, B. (2024). *NASA Katmanlı Üretim Projesi, Ajans, Endüstri ve Roket Üreticileri İçin Geleceği Şekillendiriyor*. NASA. <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/marshall/nasa-additive-manufacturing-project-shapes-future-for-agency-industry-rocket-makers/ adresinden alındı>
- Shen, Y., Li, Y., Chen, C., & Tsai, H.-L. (2017). 3D printing of large, complex metallic glass structures. *Materials & Design*, 117(5), s. 213-222. doi:10.1016/j.matdes.2016.12.087
- SpaceFactory. (2024). *Lina*. <https://spacefactory.ai/lina adresinden alındı>
- SpaceFactory. (2024). *Marsha*. <https://spacefactory.ai/marsha adresinden alındı>

- SpaceX. (2024). *Falcon 9*. <https://www.spacex.com/launches> adresinden alındı
- SpaceX. (2024). *Mars'a İnsan Uzay Uçuşu*. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/elon-musk-mars-spacex-human-mission-spacescience> adresinden alındı
- Statista. (2024). *Uzay programlarına yapılan küresel devlet harcamaları: Önde gelen ülkeler*. <https://www.statista.com/statistics/745717/global-governmental-spending-on-space-programsleading-countries/> adresinden alındı
- Taylor, L. A., Pieters, C. M., & Britt, D. (2016). Evaluations of lunar regolith simulants. *Planetary and Space Science*, 126, s. 1–7. doi:10.1016/j.pss.2016.04.005
- Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu (ISO) ve Amerikan Malzeme ve Test Topluluğu (ASTM). (2020). *Uzay ve Uzay Sistemleri Kelime Hazinesi*, 52900.
- Valentine, P. G., & Gradl, P. R. (2019). Extreme-temperature carbon- and ceramic-matrix composite nozzle extensions for liquid rocket engines. *70th International Astronautical Congress (IAC)*, (s. IAC-19-C2.4.9).
- Voxel Matters. (2022). *Novel process by HRL Laboratories creates 3D-printed ceramic matrix composites*. <https://www.voxelmatters.com/novel-process-by-hrl-laboratories-creates-3dprinted-ceramic-matrix-composites> adresinden alındı
- Williams, H., & Butler-Jones, E. (2019). Additive manufacturing standards for space resource utilization. *Additive Manufacturing*, 28, s. 676-681. doi:10.1016/j.addma.2019.06.007
- Yang, S., & Zhao, Y. F. (2018). Additive manufacturing-enabled part count reduction: A lifecycle perspective. *Journal of Mechanical Design*. doi:10.1115/1.4038922



Araştırma Makalesi

Uzay kaynaklarının kullanımının hukuki ve ekonomik etkileri

Mehmet Erkan Kılıoğlu¹

Öz. Uzay araştırmalarının günümüzde özel şirketlere de açılması uluslararası kamuoyunun gündemini her geçen gün daha fazla işgal etmekte ve bu konu ile ilgili tartışmaları da beraberinde getirmektedir. Daha önce tamamıyla devletlerin kontrolündeki bir alan olan uzay araştırmalarında, uydu iletişim hizmetleri, uydu fırlatma, uzaktan algılama, uydu fotoğrafçılığı, TV yayıncılığı, navigasyon ve hava durumu tahmini gibi hizmet alanlarında özel şirketler de faaliyet göstermektedir. Her geçen gün daha fazla gündeme gelen tartışma beraberinde uzay kaynaklarının kullanımı, uzayda madencilik, uzayda mülkiyet hakkı, gök cisimleri ve bunların kaynakları üzerinde egemenlik tesisi gibi bir dizi tartışmayı da beraberinde getirmektedir. Özel şirketlerin bu sayılan faaliyet alanlarına ve bu konu ile ilgili tartışmalara uzay kaynaklarının kullanımı da eklenmiştir. Bu alanda gelişmekte olan hukuk normlarının kurucu metni olan 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması, uzayda egemenlik iddiası ve mülkiyet hakkı tesisine yasak getirmiş ve olası ilhak girişimlerinin gerginliğe yol açmasının önüne geçmek için uzayın insanlığın ortak mirası olduğu iddiasını ortaya atmıştır. Soğuk Savaş döneminde uluslararası ilişkilerde nispeten istikrar sağlayan bu söylem günümüzde gelişen teknoloji ve artan talepler ve uzayın sunduğu potansiyeller sebebiyle hızla hükümsüz kalmaya doğru gitmektedir. Bu çalışmada bu konulara değinilecek ve insanlığın ortak mirası söylemi ve temelini 5 antlaşmanın oluşturduğu uzay hukukunun gerek devletlerin gerekse de gerçek ve tüzel kişilerin uzayda, uzay kaynaklarında mülkiyet ve egemenlik hakkı tesisi iddialarının durumu konusunda bir tartışma yürütülecektir.

Anahtar Kelimeler: Dış Uzay Antlaşması, insanlığın ortak mirası, özel mülkiyet, özel şirketler, uydular.

Research Paper

The legal and economic aspects of use of space resources

Abstract. Nowadays, the opening of space research to private companies occupies the agenda of the international public and brings about discussions on this issue. In space research, which was previously an area entirely under the control of states, private companies also operate in service areas such as satellite communication services, satellite launches, remote sensing, satellite photography, TV broadcasting, navigation and weather forecasting. The debate, which is becoming more popular, brings with it a series of discussions such as the use of space resources, space mining, property rights in space, and establishing sovereignty over celestial bodies and their resources. The use of space resources has also been added to the above-mentioned areas of activity of private companies and discussions on this subject. The Outer Space Treaty of 1967, which is the founding text of the developing legal norms in this field, banned the assertion of sovereignty and establishment of property rights in space and claimed that space is the common heritage of mankind. This discourse, which provided relative stability in international relations during the Cold War, is rapidly becoming obsolete today due to developing technology, increasing demands and the potentials offered by space. In this study, these issues will be discussed and a discussion will be held on the discourse of the common heritage of humanity and the status of space law.

Keywords: The Outer Space Treaty, common heritage of mankind, private property, private enterprises, satellites.

1 Siyaset Bilimi ve Kamu Yönetimi Bölümü, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, 17020, Çanakkale, Türkiye; mehmeterkan@comu.edu.tr (Sorumlu Yazar)
<https://doi.org/10.52995/jass.1596314>

Geliş Tarihi: 4 Aralık 2024; Kabul Tarihi: 31 Ocak 2025; Yayımlanma Tarihi: 28 Şubat 2025

© 2025 Türk Hava Kurumu Üniversitesi. Tüm hakları saklıdır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Uzay araştırmalarının başlaması, büyük güç rekabeti ve silahlanma yarışında uzayın da bir alan olarak kullanılabilceği düşüncesi yüksek riskli ve yüksek maliyetli bu alandaki çalışmaların maliyet etkin ve sürdürülebilir hale getirilmesi düşüncesini beraberinde getirmiştir. İlk başta askeri amaçlı olarak başlayan uzay araştırmaları sırasında, uzay ve uzaydaki gök cisimlerinin sahip olduğu neredeyse sınırsız ekonomik potansiyel daha yakinen anlaşılmıştır. Bu yüzden hem uzay araştırmaları hem de bu alanda keşfedilen ekonomik potansiyelin işletilmesi ve arzı için kanuni bir altyapı ve düzenleme ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Zira uzayın sunduğu ekonomik kaynak ve potansiyel sadece uzay araştırmaları yapan ülkelerin değil neredeyse tüm devletlerin yönetimlerinin ve büyük şirketlerin dikkatini çekmektedir. Bu noktada, Soğuk Savaş döneminde ABD-Sovyetler Birliği rekabeti ile gündeme gelen ve bu rekabette önemli bir nokta olan keza dünyaya olan yakınlığı sebebiyle en kolay ulaşılabilecek gök cisimi olan Ay, öncelikli hedef olmuştur. Ay, sahip olduğu tahmin edilen ekonomik kaynakları sebebiyle de uzay araştırmalarında önemli bir sıçrama tahtası olma potansiyeline de sahiptir. Yapılan araştırmalarda Ay toprağında oksijen olduğu görülmüştür. Yüzeyinde bulunan kraterlerde donmuş halde su bulunduğu da tespit edilmiştir.

Ay, sunduğu kaynaklarla uzay araçlarının burada yapılmasına ve tüm malzemelerin dünyadan, devasa bir maliyetle taşınmasından kaçınılmasına imkân verebilir. Keza Ay'da bulunan Helyum-3 izotopu da enerji üretiminde kullanılabilir. Helyum-3 bazı uzmanlara göre ideal bir yakıttır, zira hem çok güçlüdür hem de nükleer reaksiyon sırasında çok cüz'î bir radyasyon yayılmasına sebep olmaktadır (Schmitt, 2006). Umut vaat eden bu yeni yakıtın işletilmesi ve enerji üretimi için dünyaya getirilmesi de planlar arasındadır (Schmitt, 2004, s. 58-61). Bu noktada Ay'da kalıcı bir yerleşim, üs kurma görevinin 1 Katrilyon Dolar'a mal olacağı tahmin edilmektedir. Ancak bu rakam kesin değildir, olası bir görevin bunun çok daha fazlasına mal olacağını da savunan uzmanlar bulunmaktadır (Day, 2004).

Ay'dan sonra bir diğer önemli ekonomik kaynak noktası, son yıllarda üzerindeki araştırmaların yoğunlaştığı Mars gezegenidir. NASA'nın Phoenix aracı da Mars da araştırmalarda kullanılmıştır ve gezegende su olduğuna dair izler bulmuştur (Moskowitz, Proof! Water ice found on Mars, 2008), (Moskowitz, Minerals Needed for Life Found on Mars, 2008), (Wall, 2011), (Brown, Cantillo, & Webster, 2015), (Tillman, 2018), (Steigerwald, 2021), (Sutter, 2024). Keza gezegende yüksek konsantrasyona sahip Metan bulunması da yüzeyde olmasa bile yeraltında yaşam olabileceği düşüncesini gündeme getirmiştir (Space Daily, 2004), (Witasse, Lefèvre, & Forget, 2009), (Voosen, 2018). Uzayda su ve diğer ekonomik değeri olan kaynakların bulunduğu bir diğer gök cisimleri ise asteroidlerdir (Schmitt, 2004). Bu noktada asteroidlerde madencilik yapmanın Ay kaynaklarını işletmekten daha az maliyetli olacağı ve asteroidlerdeki kaynakların kalitesinin daha yüksek olacağı da iddia edilmektedir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 202).

Uzay kaynaklarının kullanımının uzay araştırmalarını hızlandıracağı açıktır. Elde edilen kaynakların yerinde kullanılması, dünyanın kaynaklarına olan bağımlılığın ve uzaya faydalı yük taşıma kapasitesindeki sınırlamanın aşılmasını sağlayacaktır. Ancak tüm bunların hepsinin fırlatma maliyetlerinin düşmesi ve uzay madenciliği teknolojisinin gelişmesi ile hızlanacağı açıktır. Keza gök cisimlerinden elde edilen kaynakların Dünya'ya taşınabilmesi de ayrıca gereklidir. Ancak her hâlükârda fırlatma maliyetleri ve Dünyadan yörüngeye sınırlı yük taşıma kapasitesi sebebiyle bazı uzay araçlarının uzayda imalatı ve gereken yakıtın Ay ve diğer gök cisimlerinden elde edilmesi bir zorunluluk halini alacaktır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 203). Sahip olduğu büyük potansiyeli sebebiyle Ay, Mars ve Asteroidlerdeki kaynakların ekonomik ve ticari amaçlı kullanımı son yıllarda artan bir şekilde büyük devletlerin gündeminde yer almaktadır. ABD, bu amaçla 2000'li yılların başlarında "A Renewed Spirit of Discovery: The President Vision for Space Exploration" adlı belge yayınlanmıştır (White House, 2006), (NASA, 2004). George W. Bush yönetiminin uzay araştırmalarına bakışının açıklandığı bu belgeden NASA, Şubat 2004'te yayınlanan "The Vision for Space Exploration" adlı doküman üretilmiştir. Şu anda ABD Uzay Keşif Politikası-U.S. Space Exploration Policy olarak tanımlanan bu politika yaklaşımı; 2020 yılında Ay'a geri dönülmesini, Mars ve diğer gök cisimlerindeki araştırmaların sürdürülmesi öngörmektedir (NASA, 2004). Politika kapsamında Ay'a geri dönülmesi planlanmaktadır zira Ay'da kurulacak olan kalıcı üsün yeni uzay araştırmaları ve keşiflere destek sağlayacağı, yine uzay kaynaklarının keşif ve kullanımına imkân sağlayacağı öngörülmektedir. Bu yaklaşımı diğer uzay araştırmaları yapan devletler de paylaşmaktadır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 203). Bu konuda faaliyet gösteren devletlerden birisi olan Rusya Federasyonu da Ay'daki Helyum-3 izotopunu çıkarmak için detaylı bir çalışma takvimi hazırlamış ve ilan etmiştir. Bu planlara göre 20 yıl içinde Ay'da kalıcı bir üs inşası, 2020 yılı itibarıyla da Helyum-3 madenciliğine başlanması öngörülmüştür ancak görüldüğu kadarıyla planlara uyulamamıştır. Keza izotopun Dünya'ya taşınması için de nakliye hattı kurulması da planlar arasında olmuştur (Parthasarathy, 2006). Ancak bu sayılanların hepsi planlama aşamasında kalmıştır.

Avrupa Birliği de bu konuda aksiyon almaya çalışmış ve 27 Eylül 2003'te Ay'a bir araç göndermiştir. 15 Kasım 2004 tarihinde Ay etrafında yörüngeye giren araç, Ay yüzeyinin kimyasal analizini yapan minyatür araçları taşımıştır (Clery, 2003). Çin de Ay'ı keşfetme yönünde isteği olduğunu açıkça ifade etmiştir. Bunun Ay'da madencilik amaçlı olduğunu da açıklamasına eklemiştir (Hao, 2004). 14 Eylül 2007'de Japonya da Kaguya aracı (SELENE görevi) ile Ay araştırmalarına katılmıştır. Japon aracı Ay yörüngesinde incelemelerde bulunmuş ancak yzeeye inmemiştir (Kato, Sasaki, Takizawa, ve diğerleri, 2010, s. 3-19), (Malik, 2020). Japon Uzay Ajansı-Japanese Space Agency (JAXA), 2025 yılı ve sonrasında Ay'da kalıcı bir s inşa etme isteğinin olduğunu da açıklamış ve bu amaca yönelik uzun vadeli bir uzay programı üzerinde çalışıldığını da ilan etmiştir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 204). Hindistan da 2008 yılında Ay yörüngesine girecek ve yörüngeden tüm Ay yüzeyinin kimyasal analizini yapacak olan 525 kg ağırlığındaki Chandrayaan-1 aracını uzaya göndermiştir (The European Space Agency-ESA, 2008). Bunu 2023 yılında Ay yüzeyine inen ve Mars'ta kullanılabenzerlik gösteren bir keşif aracını içeren Chandrayaan-2 misyonu izlemiştir. Hindistan da Rusya ve Çin gibi ay kaynaklarını, özellikle de Helyum-3 izotopunu kullanabilmek için çıkarmayı planlamaktadır (Moltz, 2011, s. 110-135). Bu noktada mali kaynak yetersizlikleri veya kısıtlaması, devletlerin uzay araştırmalarında, teknolojik gelişme ile birlikte ortaya çıkan en önemli sınırlandırıcı etken olmaktadır. Ancak Dünya'da azalan doğal kaynaklar ve yeni maden ve enerji kaynakları bulma ihtiyaı, uzay araştırmaları konusunda önemli bir motivasyon kaynağı olmaya devam etmektedir. Bu yüzden ortaya çıkan uzay araştırmaları, uzayın ve kaynaklarının keşfi ve bu kaynakların etkin ve verimli kullanımı için en iyi yolun ne olacağı sorusunu ortaya çıkarmıştır. İşte bu çalışmada Ay başta olmak üzere gök cisimlerinin, bunların doğal kaynaklarının keşfi ve ekonomik amaçlı kullanımlarının ortaya çıkaracağı muhtemel ekonomik ve hukuki sorunlar ve bunlara olası gzmler üzerinde çalışılacaktır. Çalışmanın bu konuları tartışmaya açarak ve bu noktalara dikkat çekerek, benzer çalışmalarının ortaya çıkmasına destek olması ve Uzay, Uzay Hukuk ve Ekonomisi alanındaki bilgi birikiminin artması için gerekli olan bilimsel-fikri zemine katkıda bulunması amaçlanmıştır. Bu konu ile ilgili olarak çalışmanın ortaya çıkarılması aşamasında başta uzay hukuku olmak üzere konu ile ilgili düzenlemelerin temelini oluşturan antlaşmalar, çalışma kapsamında değinilecek olan uzay hukuku, uzayda egemenlik tesisi ve mülkiyet hakkı ile ilgili yapılan çalışmalar (kitap ve makaleler) incelenmiş ve literatür taramasında kullanılmış, yapılan hazırlık sonucunda bu çalışma ortaya çıkmıştır.

2. UZAY ARAşTIRMALARINDA YENİ AKTÖRLER: ÖZEL şİRKETLER

Uzay araştırmalarında, başından beri en önemli aktörler devletler olmuştur. Devletler bu alana kaynak ayırmış ve yatırım yapmış, uzayın keşfi ve uzay araştırmalarını yrtmuşlerdir (Mirzai, 2023). Bunu askeri ve stratejik amaçlı olduğu gibi, prestij ve psikolojik etki amaçlı olarak da srdrmuşler, rakip kamptan teknolojik açıdan ne kadar ileride olduklarını dünyanın geri kalan kısmına da göstermeyi amaçlamışlardır. Bu durum hala devam etmektedir. Ancak 1970 ve 1980'lerde, daha önce tamamen askeri amaçlı olarak kullanılan hava fotoğrafçılığı, hava durumu tahmini, seyrüsefer ve iletişim gibi uygulamaların sivil amaçlı kullanıma da açılması sonucunda bu alanlarda ilk özel şirketler ve uydular da görülmeye başlanmıştır (Weinzierl, 2018, s. 173, 174). Bu kapsamda Intelsat, Inmarsat, Intersputnik, Eutelsat ve Arapsat gibi devletlerarası örgütler ortaya çıkmıştır. Uluslararası antlaşmalarla, devletlerarasında kurulan bu örgütler, spesifik uzay merkezli olarak hizmet sağlayacak tüzel kişiler olarak oluşturulmuştur (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 204).

90'li yıllarda gelişen Küreselleşme söyleminin de oluşturduğu ortam sonucunda bu alana özel sektörler de yeni aktörler olarak dâhil olmaya başlamıştır (Weinzierl, 2018, s. 173, 174), (Mirzai, 2023), (Mansfield, 2024). Özel şirketler uzay araştırmalarının başından beri bu alanda alt yüklenici olarak var olsalar da bunlar çoğunlukla askeri amaçlı araç ve teknoloji üreten şirketler ağırlıklı olmuştur ve devletlerin uzay programları için gereken parçaları üretmişlerdir. Bu durum özel sektörün uzayı kendi ticari ve ekonomik amaçları için kullanma isteğinin artması ile değişmiştir. Bunda Küreselleşme, zelleştirme, sermayenin ve işgücünün serbest dolaşımı gibi 1990'lı yıllarda oldukça popüler olan söylemlerinde destekleyici etkisi olmuştur. 1970 ve 1980'li yıllarda kurulan uluslararası örgütlerin çoğunun da bu dönemde özelleştirilmiş olması da bu taleplere olumlu yönde destek olmuştur. Günümüzde ise özel sektör, iletişim, uzaktan algılama, navigasyon gibi alanlarda oldukça faal bir şekilde hizmet sunmaktadır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 205). Bu durumda uzay araştırmalarında artık özel sektörün de faaliyet göstermesinin kaçınılmaz olduğu düşüncesinin etkisi olmuştur. Hatta bu durum artık genel kabul gören bir olgudur. Bu düşüncenin de etkisiyle uzay endüstrisi alanında önemli değişimler yaşanmaktadır. Özel şirketlerin sunduğu ticari hizmetler (iletişim, navigasyon ve uzaktan algılama gibi) fırlatma maliyetlerinin düşmesi sonucunda daha düşük ve uygun gzmler haline gelmiştir (Sharma, 2021), (Urvoy, 2023). Özel şirketler mevcut hizmet sağlayıcılarına alternatifler sunması sebebiyle artan bir şekilde askeri-güvenlik örgütleri tarafından kullanılmaktadır. Bunun geri dönüşü olarak ise özel sektör de artan bir şekilde

kamunun kullanıma açtığı askeri temelli teknolojiyi kullanmaktadır. Bu duruma en güzel örnek ise GPS ve İnternet'tir. Bu noktada özel sektörün dâhil olduğu uzay araştırmalarının amacı ve doğası sürekli değişmektedir. Bu noktada özel sektörün uzay ve uzay kaynakları ile ilgili amacı sadece bu sayılanların ekonomik amaçlı kullanımı değildir. Bu alanda hâkim olmayı ve Kolonyalizm döneminde olduğu gibi devletlerle eşit şartlarda rekabet eden, hatta onların önünde giden bir yapı kurmayı amaçlamaktadırlar (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 205, 206).

3. ÖZEL ŞİRKETLERİN UZAY ARAŞTIRMALARINA KATILIMLARI İLE İLGİLİ HUKUKİ DÜZENLEMELER

Uluslararası toplum, dış uzayla ilgili uluslararası hukuki düzenlemeleri BM Dış Uzayın Barışçıl Kullanımı Komitesi (UN Committee on Peaceful Use of Outer Space-UNCOPUOS) vasıtasıyla yapmıştır (Singh, 1989, s. 289), (Machisio, 2005, s. 220, 221), (Mayence, 2017, s. 254-265), (Froehlich, Seffinga, & Qiu, 2020, s. 29-106). Temelini uluslararası antlaşmaların oluşturduğu bu rejimin temel metni 125 ülke tarafından imzalanan 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması'dır. Antlaşma 27 Ocak 1967'de imzaya açılmış, 10 Ekim 1967 tarihinde de yürürlüğe girmiştir (Adolph, 2006, s. 963), (Chaben, 2020, s. 79), (Katman, 2022, s. 69). Dış Uzay Antlaşması sıklıkla uzay araştırmaları ve dış uzayın Magna Carta'sı olarak adlandırılmaktadır (Qizhi, 1997, s. 93), (Hobe, 2009, s. 105-150), (Lachs, 2010, s. 27-39), (Lyll & Larsen, 2018, s. 1-22). Kurucu maddeleri sebebiyle de anayasal önemde değerlendirilmektedir (Koplow, 2019, s. 76, 105). Bu kapsamda Dış Uzay Antlaşması tartışmasız bir şekilde dış uzaydaki veya uzayla ilgili faaliyetlerin tamamının ihtiyacı olan yasal altyapıyı sağlamıştır (Gabrynowicz, 2004, s. 1041, 1042), (Von der Dunk, 2015, s. 29, 43-48). Bununla birlikte Dış Uzay Antlaşması, Soğuk Savaş döneminin bir sonucudur; bu yüzden de üslubunda o dönemin gergin ortamının yansımaları vardır (Freeland, 2005, s. 4), (Von der Dunk, 2020, s. 3-10). Soğuk Savaş döneminde uzay varlıklarına sahip devletler, uzay araştırmaları ve faaliyetlerini ulusal güvenlik konusu ile irtibatlı bir konu olarak değerlendirmişlerdir (Ercan & Gürsel, 2022, s. 884). Bu yüzden antlaşmanın öncelikli amacı, Soğuk Savaş'ın askeri rekabetinin dış uzaya da taşınmasının önlenmesidir (Nam, 2023, s. 152). Bu durumu garantiye almak için de sahiplenme, işgal veya benzeri yollarla toprak kazanımı, bunun sonucunda da egemenlik ve mülkiyet hakkı talepleri yasaklanmıştır (Christol, 1982, s. 20-37), (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 85), (Jankowitsch, 2015, s. 1-26). Bu durum Antlaşma'nın 2. Maddesinde teyit edilmiştir (Cheng, 1997, s. 434-444), (Von der Dunk, 1997, s. 119), (Viikari, 2002, s. 17-21), (Freeland & Jakhu, 2009, s. 44, 48-55), (Tronchetti, 2009, s. 26-33, 41-45), (Von der Dunk, 2015, s. 55-60). Devletler için önerilen egemenlik ve mülkiyet hakkı tesisi yasağının kapsamına vatandaşlarının dâhil edilmesi de talep edilmiştir. Bu talebin arkasında yatan sebep; şahısların özel mülkiyet talebi yoluyla yasağı delmelerinin önüne geçmektir (Sattler, 2005, s. 23, 28). Uzay araştırmaları da sadece barışçı kullanımla sınırlandırılmıştır (Hobe & Hedman, 2009, s. 151-166). Ek olarak uzayın herhangi bir kısmı veya gök cisimlerinde Kitle İmha Silahları'nın (KİS) bulundurulması veya yörüngede bekletilmesi yasaklanmıştır (Christol, 1982, s. 24-37), (Cheng, 1997, s. 530), (Tronchetti, 2015, s. 331, 335, 338-341). Dış Uzay Antlaşması bu dönemde gök cisimlerindeki doğal kaynakların kullanımı konusuna değinmemiştir zira o dönemde bu kaynakların işletilmesi teknolojik olarak mümkün görülmemiştir (Adolph, 2006, s. 963), (Von der Dunk, 2023, s. 99).

Bu antlaşmanın, yukarıda değinilenler de dâhil olmak üzere, bazı kısımları takip eden 4 antlaşmada da kullanılmıştır (Adolph, 2006, s. 962). Bunlar sırayla:

- Kurtarma Antlaşması, 3 Aralık 1968'de yürürlüğe girmiştir.
- Sorumluluk Sözleşmesi, 1 Eylül 1972 tarihinde yürürlüğe girmiştir.
- Tescil Sözleşmesi, 15 Eylül 1976'da yürürlüğe girmiştir.
- Ay Antlaşması, 11 Temmuz 1984'te yürürlüğe girmiştir (Adolph, 2006, s. 963), (Katman, 2022, s. 69-70).

Diğer önemli antlaşmalarla birlikte, dış uzayla ilgili bu antlaşmalar, dış uzayla ilgili hukuki rejimin ve bu alandaki kaynakların nasıl kullanılacağına şartlarını tayin etmiş ve normların temelini oluşturmuştur (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 215). 1960 ve 70'li yıllarda uzayla ilgili uluslararası hukuki rejimin temelleri atılırken bu alanda faal olabilen tek aktör devletlerdir (Weinzierl, 2018, s. 173). Zira uzay araştırmaları büyük sermaye ve teknoloji yatırımı gerektiren yüksek riskli bir alan olmuştur (Undseth, Jolly, & Olivari, 2021, s. 8). Bu yüzden bu düzenlemelerin hepsi devletlerin öncelikleri ve ihtiyaçlarına göre yapılmıştır (Weinzierl, 2018, s. 173). Devletler bu alanda hâkim konumlarını hala devam ettirmektedirler. Devletlerin uzay araştırmalarında oynadığı birbirini zaman zaman tamamlayan, zaman zaman da çatışan üç farklı rolü olmaktadır. Bunlar sırasıyla:

- Ana tedarikçi ve geliştirmeci olan devlet,

- Ana müşteri olan devlet,
- Özel sektörün ana ortağı olan devlet'tir. (Undseth, Jolly, & Olivari, 2021, s. 8).

Devletlerin bu rolleri sırasında değişen siyasi ve ekonomik şartlar sebebiyle özel sektör de bu alanda faal olmaya başlamıştır. Bunun sonucunda özel sektör de sadece devletlerin tekelinde olarak görülen bu alanda daha görünür hale gelmiştir (Weinzierl, 2018, s. 173, 174). Ancak bu durum, bir sorunu da beraberinde getirmiş, mevcut hukuki yapının özel sektörün ihtiyaçlarını da karşılayacak şekilde dönüştürülmesi ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Tüm bu sayılanlara rağmen devletler hala hem bu alanda hem de uluslararası siyasette en önemli aktörlerdir. Özellikle, Uzay Hukuku alanında da devletlerin baskın rolü hala sürmektedir. Devletler, antlaşmalar yoluyla uzay hukukunu oluşturmuşlar, rakiplerine ve diğer aktörlere haklar vermiş ve yükümlülükler yüklemişlerdir. Devletler ayrıca bu alanda faal olan uluslararası örgütler kurmuş ve onları yönetmiştir. Bu örgütler yoluyla özel sektörü ve özel şirketleri desteklemiş, onlara çalışma izni ve imkânı vermişlerdir (Malanczuk, 1997, s. 23-36). Devletlerin bu baskın durumu, yakın-orta vadede sürecektir. Keza Uzay Hukuku'nun gelişmesinde de etkili olmaya devam edecekleri aşikârdır. Uzay araştırmalarının ticarileştirilmesi ve özelleştirilmesi, özel sektöre de açılmasını savunanlara göre, uzaydaki kaynakların keşfi ve kullanımında tamamen ekonomik ve teknolojik etkilere ve faydalara odaklanmak gereklidir. Uluslararası hukukun temelindeki hukuki çevre tali önemde olmalıdır (Dinkin, 2004). Ancak yine de aşağıda değinilecek olan hukuki prensiplerin, özel sektörün uzay kaynaklarının keşfi ve kullanımı esnasında dikkate alınmalıdır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 216).

3.1. Keşif ve Kullanım Serbestisi

Dış Uzay Antlaşması'nın 1. Maddesi'nin (2) fıkrasında dış uzayın keşfi ve kullanımında tüm devletlerin hakkının olduğu ilan edilmiştir. Antlaşmaya imza koyan tüm taraflar, uzayın keşfi sürecinde tüm insanlığın çıkarlarının, faydasının gözetilmesi ve uzay araştırmalarının barışçı amaçlar için yürütülmesi talebini kabul etmiştir. Dış uzay, tüm insanların ortak mirası ve faydası olduğu için, kaynakları da tüm ülkelerin çıkarı ve faydasına kullanılmalıdır. Bunu yaparken de tüm ülkelere eşit şekilde muamele edilmeli, ekonomik veya bilimsel gelişmişlik düzeyleri bir engel veya eleme sebebi olmamalıdır (Adolph, 2006, s. 963, 964). Ay Antlaşması, Dış Uzay Antlaşması'ndan bu ve benzeri pek çok maddeyi almış ve kendi bünyesine adapte etmiştir (Von der Dunk, 2023, s. 104, 105). Bu antlaşma gökçisimlerindeki kaynakların kullanımı konusuna dikkat çekmeye çalışılmış; uzay araştırmalarının, devletler, şirketler veya şahısların değil, tüm insanlığın faydasına olacak şekilde yapılması ideal olarak ortaya konmuştur (Adolph, 2006, s. 963). Bu durum da Ay ve doğal kaynakların insanlığın ortak mirası olduğunun ilanı güvenceye alınmaya çalışılmıştır (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 85), (Von der Dunk, 2015, s. 101-103). Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerin İnsanlığın Ortak Mirası doktrinini desteklemek için kendilerine özgü sebepleri olmuştur. O dönemde ABD ve Sovyetler Birliği bu yaklaşımı desteklemiştir zira bu sayede rakip kampın uzayda hâkimiyet kurmasının önüne geçmişlerdir (Grünner, 2004, s. 299, 324). Gelişmekte olan ülkeler de doktrini desteklememiştir ve bu sayede uzayın sunduğu kaynaklara ulaşmaktan men edilmelerinin önüne geçmeyi amaçlamışlardır (Adolph, 2006, s. 964).

Ay Antlaşması'nın 11. Maddesi'nin (2) fıkrası doğal kaynakların yerinde kullanımı tabiri ile doğal kaynakların insanlığın ortak mirası olduğuna atıfta bulunarak kimsenin mülkiyetine giremeyeceği de garanti altına alınmaya çalışılmıştır (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 85), (Tronchetti, 2010, s. 55, 56). Ancak şu nokta açıktır ki, doğal kaynaklar bir kere çıkarıldıktan sonra artık Ay'ın bir parçası olmaktan çıkmaktadır, bu yüzden de sahiplenilmeye açık hale gelmektedir. Genel kapsamda doğal kaynakların çıkarılmasından sonra mülkiyetlerinin özel şirketlere devri için uluslararası bir rejime ihtiyaç duyulmaktadır (Von der Dunk, 2023, s. 105).

Özel şirketlerin uzay kaynaklarını kullanımı konusu ihtilafli iken, Ay Antlaşması devletlere Ay'ın kaynaklarını çıkarma, işleme ve kullanma hakkı vermektedir. Bu konuda devletler de bir ayrımcılığa tabi olmadan, eşit haklara sahiptirler (Von der Dunk, 2023, s. 105). Ay ve diğer gökçisimlerindeki uzay kaynaklarının ticari amaçlı kullanımı Ay Antlaşması kapsamında mümkün olarak görülmektedir (Von der Dunk, 2023, s. 106). Antlaşma, bu kullanımı ekonomik açıdan uygun ve kârlı hale geldiğinde devletlerin Ay'ın kaynaklarının kullanımı için bir rejim oluşturmalarını uygun görmüştür (Tronchetti, 2010, s. 54, 55). Bu sayılanlara ek olarak, Ay Antlaşması'nın 6. Maddesi'nin (1) fıkrasında da Ay'da ve diğer gökçisimlerinde bilimsel araştırma yapma özgürlüğüne yeniden vurgu yapılmıştır. Bu hak devletler tarafından tek başına veya kendi özel şirketleri yoluyla kullanılabilirdiği gibi, uluslararası örgütlere katılım yoluyla da kullanılabilir. Uluslararası Uzay Hukuku'na göre özel şirketler dış uzayın, Ay ve diğer gökçisimlerinin keşfi ve kullanımı hakkından doğrudan yararlanamazlar; Özel şirketlerin uzayda bir kaynağın tamamı veya bir kısmını, mülkiyet hakkı ilan etmeden, kullanmasının mümkün olup olmayacağı noktasında başından beri ihtilaf vardır (Sattler, 2005, s. 28). Bu noktada hâkim olan görüşe göre kendilerine ancak kullanma imtiyazı verilebilir. Bu imtiyazı verecek olan bağlı oldukları devletlerdir ve ilgili devletin iç hukukuna göre imtiyaz verilecektir. Ay ve diğer gökçisimlerinin

devletler ve kendi özel şirketleri tarafından keşfi ve kullanımı hakkı, mutlak bir hak değildir, kanun sınırları içerisinde uygulanmalıdır. Uygulama sırasında herhangi bir ayrımcılık yapmaktan da devletlerin kaçınması gerekmektedir. Yapılan işlemler ve fiillerin uluslararası hukukla uyumlu olması da bir zarurettir. Bu noktada özel şirketlerin uluslararası hukuka uymasını sağlamak ilgili devletin yükümlülüğüdür (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 217).

3.2. Devletlerin Sorumluluğu ve Verilen Zarardan Sorumlu Olma

Devletin fiili ve faaliyetin sonucu arasında illiyet bağı olursa fiilden sorumlu tutulmasını öngören uluslararası hukuk normundan farklı olarak, Dış Uzay Antlaşması'nın 6. Maddesi, antlaşmaya üye olan devletlere ciddi sorumluluklar yüklemekte ve fiillerin sonuçlarından mesul olduklarını belirtmektedir. Ancak bu sorumluluk sadece devletlerin kendi tüzel kişilikleri ile sınırlı değildir; devletlerin tabiiyetindeki özel şirketler de antlaşmalar ve uluslararası hukuk hükümlerinden mesul tutulmaktadır. Bu sorumluluk sebebiyle ilgili devlet, kendi özel hukuk süljelerinin uzaya ilgili faaliyetlerini sürekli kontrol ve denetim altında tutmak durumundadır. Yine 6. Maddeye göre sorumlu devlet sayısı birden fazla olabilir. Ancak özel sektör şirketlerinin uzay araştırmalarında daha fazla rol alması bu alandaki ve ilgili devlet konusundaki anlaşmazlıkların artmasına neden olacaktır. Bu duruma hukuki bir düzenleme ile çözüm bulunması gerekmektedir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 217).

Uzaya gönderilen veya orada imal edilen bir uzay aracı, onu uzaya gönderen veya imal eden ülkenin mülkiyetindedir ve onun kanunlarına tabidir. Bu yüzden ilgili devletin kendi mülkiyetinde olan uzay aracından sorumludur. Ek olarak vatandaşlarının faaliyetlerinden de sorumludur. Bu yüzden onları koruma hakkına da sahiptir (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 84). Bu durum Dış Uzay Antlaşması'nda da teyitlidir. Dış Uzay Antlaşması'nın 7. Maddesine göre uzaya araç gönderen her devlet bu faaliyet sırasında diğer devletlere, vatandaşlarına veya tüzel kişilerine, uzay araçlarına veya bu araçların parçalarına verecekleri her türlü zarardan mesuldür. Bu prensip 1972 tarihli Sorumluluk Sözleşmesi ile daha da genişletilmiştir. Bu antlaşmaya göre uzaya araç gönderen devlet, uzay araçlarının dünya yüzeyinde iken veya uçuş sırasında yol açacağı her türlü zararı karşılamakla yükümlüdür (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 82). Dış Uzay Antlaşması ve Sorumluluk Sözleşmesi, uzay araştırmaları yapan devletlere ek sorumluluklar yükleyecek gibi gözükse de hiçbir devlet bir kaza sonucunda ciddi bir mali külfetin altına girmemiştir. Diğer yandan verilecek olan zarardan devletlerin sorumlu olması, uzay araştırmalarına dâhil olan özel şirketler için pozitif bir devlet desteği olarak anlaşılmalıdır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 217).

3.3. Özel Şirketlerin Ruhsatlandırılması

Dış Uzay Antlaşması'nın 3. Maddesi devlet dışı örgütlerin dış uzaydaki faaliyetlerinin, antlaşmaya tabi devletlerin izni ve sürekli denetimine tabi olduğunu hükme bağlamıştır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 219). Uzay araştırmaları konusunda Dünya genelinde ulusal kamu kurumları tarafından tanınan, açıkça tarif edilen bir dizi mülkiyet ve hak sahipliği türleri vardır (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 82). Daha önce de ifade edilen uluslararası sorumluluk ve bununla irtibatlı olarak devletlerin muhtemel sorumlulukları, kendi özel şirketlerinin iş yapma ve faaliyet türlerinin ana hareket noktası olmuştur. Özel şirketlerin çalışma izni alma şekli standart değildir, ülkeden ülkeye değişebilmektedir. Örneğin radyo iletişimi alanında uluslararası hukuk, uzaydaki iletişim faaliyetleri de dâhil, tüm devletlerin özel şirketlerinin uluslararası hukuk kurallarına uymakla yükümlü olduklarını ve hepsinin geçerli ulusal izinlerinin olmasını şart koşmuştur. Bu yetkilendirme ve çalışma izni, özel şirketlerin uzay çalışmalarına katılmalarının önüne set çekmek ve zora sokmak için uygulamaya konulan bir bürokratik prosedür müdür, zaman zaman uzay araştırmalarında özel sektörün payının artırılmasını savunanlar tarafından gündeme getirilen bir soru olarak karşımıza çıkmaktadır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 219). Genel olarak bakıldığında, devletlerin dış uzay veya gök cisimleri üzerinde hak iddia etmelerini yasaklamıştır. Ancak bu durum uzay araştırmalarına yatırım yapmak isteyen özel sektörü sıklıkla engellemekte, özel sektörün ve uzayın ticari amaçlı kullanımına açılmasının önünde önemli bir engel olarak gösterilmektedir (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 81).

4. UZAYDA MÜLKİYET HAKKI ve TİCARİ KÂRIN PAYLAŞIMI

Uzayın ticarileşmesi konusunu kurumsal ve kanuni bir düzleme oturtmak için çerçevesi iyi çizilmiş bir mülkiyet hakları sistemi tesisine ihtiyaç olduğu düşüncesi özel sektör tarafında hâkim bir düşüncedir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 219). Zira uzaydan dünyaya getirilen her şey kişiler, şirketler veya devletlerin malı olmaktadır. B.M. Antlaşmalarında da buna muhalif bir hüküm yoktur (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 83). Ancak fiiliyatta birkaç devlet dışında, dünya üzerindeki devletlerin büyük kısmının uzaya ulaşma imkânı şu an için yoktur (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 84), (Adolph, 2006, s. 964). Bu durumun da etkisiyle şirketler, kaynaklar üzerindeki mülkiyet ve

sahiplik haklarını tanıyıp, garantiye alarak yatırım yapacakları ve işletecekleri kaynakların ellerinden alınmayacağı konusunda kendilerini ve yatırımlarını güvenceye almaya çalışmaktadırlar. Ancak devletlerarasında akdedilen dış uzayla ilgili 5 antlaşmada, uzayın kimsenin mülkiyetinde olamayacağı, herkesin erişim ve kullanımına açık bir alan olduğu teyit edilmiştir. Bu durum “insanlığın ortak mirası” tabiri ile somutlaştırılmıştır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 219). İnsanlığın Ortak Mirası prensibi ve sadece insanlığın faydasına kullanılması prensibi bu sebepten dolayı uluslararası antlaşmaların hareket noktasıdır. Konunun uzmanlarına göre de uzayı insanlığın ortak mirası olduğu noktasından hareketle uzay, Terra Nullius değil, Terra Communis olarak değerlendirilmelidir. Ancak bu noktada mülkiyet hakkı tartışmasını daha da karmaşıklaştırmaktadır, zira Terra Nullius kavramının kabulü beraberinde egemenlik ve mülkiyet hak ve taleplerini getirecektir (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 85). Buna ek olarak uzay ve uzay kaynaklarının işletimi konusundaki yasal belirsizlikler, keza doğal kaynakların ve gök cisimlerinin mülkiyet haklarını kazanma konusundaki kanuni boşluklar bu alanda özel sektörün geniş kapsamlı yatırım yapma isteği ve ihtimalini zora sokmuştur. Mevcut uzay hukukuna göre, uzayda özel mülkiyet konusunda bazı sınırlamalar olsa da bunlar çözüm bulunamayacak konular değildir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 219). Zira uzayda bir bölgenin veya gök cisminin mülkiyetine sahip olamama, özel sektörün bunları kâr amaçlı kullanımına engel değildir (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 84). Ancak fiiliyatta birkaç devlet dışında, dünya üzerindeki devletlerin büyük kısmının uzaya ulaşma imkânı şu an için yoktur.

Dış Uzay Antlaşması'nın 2. Maddesinde; Dış uzayın, Ay ve diğer gök cisimlerinin, egemenlik hakkıyla, işgal yoluyla veya başka şekillerde sahiplenilemeyeceği açıkça ifade edilmiştir (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 84, 85). Sahiplenme, etkin bir kontrol ve kullanım ile diğer tarafların kaynağı kullanımını engellemeyi dikte eder. Ulusal sahiplenme terimi kapsamlı bir şekilde sahiplenme için geliştirilmiştir ve sahiplenmenin tüm şekillerini bünyesinde barındırmaktadır. Bu sayede devlet ve kamu kesimi, özel şirketler veya kişilerin kaynakları veya gök cisimlerini sahiplenmesi ve üzerinde hak iddia etmesine imkân vermektedir. Ancak Gorove bu maddeyi farklı yorumlamaktadır. Hâkim görüşün aksine Gorove; 2. Madde'nin sadece ulusal sahiplenmeyi yasakladığını, bu yüzden özel şirketlerin ve kişilerin hak iddiası ve sahipliklerinde bir sınırlama olmayacağını iddia etmektedir (Gorove, 1969, s. 349-354). Ancak Gorove'nin iddiası kabul edilebilecek gibi değildir. Zira madde bu şekilde yorumlanacak olursa, madde hem kendisini hem de antlaşmayı ilga etmekte, amacını imkânsız hale getirmektedir (Christol, 1984, s. 217-218).

Uzaydaki resmi mülkiyet hakları ve taşınmazların satışı konusunda artan tartışmalara cevap teşkil etmesi için International Institute for Space Law (IISL) 2004 yılında bir rapor yayınlamış, Ay ve diğer gök cisimlerindeki mülkiyet hakkı taleplerinin geçerliliği konusunu açıklığa kavuşturmaya çalışmıştır. Bu rapora göre Dış Uzay Antlaşması, uzaydaki tüm toprak ve mülkiyet hakkı taleplerini en başından yasaklamıştır. (Madde 2) Özel şirketler de bu yasak kapsamındadır. Ek olarak aynı antlaşmanın 6. Maddesi, dış uzayda devlet dışı örgütlerin faaliyetleri, Ay ve diğer gök cisimleri dâhil olmak üzere, izne tabidir ve antlaşma üye ülkelerin sürekli denetimi altında olmalıdır, demektedir. Bu yüzden IISL Raporunda, 2. Maddedeki ulusal sahiplenme, 6. Maddedeki devlet dışı örgütler yoluyla sahiplenmenin de ulusal bir faaliyet olarak kabul edilmesi gerektiği için, aynı türden faaliyet olarak değerlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir. IISL'nin görüşüne göre bu türden faaliyetlerde bulunanların taleplerine yasal bir karşılık bulma ve hak elde etme ihtimali yoktur. Keza Dış Uzay Antlaşmasının imzacısı olan devletler, aynı antlaşmanın 2. ve 6. Maddesi gereğince, hukuk sistemleri de Ay ve diğer gök cisimlerinin tamamı veya belli bir kısmının mülkiyet haklarını edinme taleplerinin hiçbir yasal karşılığı ve tanınmış bir hukuki sonucu da olamayacağını garanti altına almalıdır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 220, 221).

Dış Uzay Antlaşması'nın 2. Maddesindeki hükümler, Ay Antlaşması'nın 11. Maddesi'nin (2) fıkrasında yeniden teyit edilmiştir. Bu hükümler aynı maddenin (3) fıkrasında daha da pekiştirilmiştir. Buna göre Ay ve gök cisimlerinin sadece yüzeyi değil, yüzeyinin altındaki bir kısmı veya doğal kaynakları da hiç kimsenin mülkiyeti altına girmeyecek ve malı olmayacaktır. Ancak Ay Antlaşması'nın 6. Maddesi'nin (2) fıkrasında Ay'ın madenleri, mineralleri ve diğer kaynaklarını bilimsel araştırmalar ve keşif için toplayacak kamu veya özel sektör tüzel kişileri bu kaynakları kullanabilecek ve kendi uzay görevlerini desteklemek için kullanabilecektir. Tüm bu maddeler ışığında Ay Antlaşması, 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması'nın geliştirilmiş ve revize edilmiş hali olduğunu söylemek mümkündür (United Nations, 1987, s. 331). Bu noktada 2003 yılında Nevada Federal Bölge Mahkemesi bir asteroidin mülkiyeti konusunda açılan davayı örnek olay olarak incelemek yerinde olacaktır. Gregory William Nemitz isimli bir ABD vatandaşı Archimedes Institute web sayfasından Eros 433 Asteroidi ile ilgili olarak mülkiyet iddiasında bulunmuştur (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 92). Bu durumu takiben NASA, Eros Asteroidine Near Earth Asteroid Rendezvous (NEAR) uzay aracını göndermiştir (Cheng, 1997, s. 3-29), (Bell & Mitton, 2002). Bunun üzerine Nemitz, NASA'ya bir ihtarname göndermiş, park ve depolama ücreti talep etmiştir. NASA, Nemitz'in bu talebine olumsuz cevap

vermiştir. Bunun üzerine Nemitz konu ile ilgili kanun yoluna başvurmuş, NASA'nın NEAR aracının mülkiyet haklarını ihlal ettiğini iddia etmiştir (Davidson, 2005). Ancak mahkeme Nemitz'i itirazında haksız bulmuş ve asteroidin mülkiyet hakkı konusunda kanuni dayanağı bulunmadığına hükmetmiştir. Keza Ay ve Dış Uzay Antlaşması'na göre bu türden bir mülkiyet hakkının olmadığı ifade edilmiştir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 221, 222).

4.1. Dış Uzayda Mülkiyet Hakkı Talepleri

Uluslararası hukuk rejiminin yasaklamasına rağmen bazı devletler veya gerçek kişiler taleplerini ilan ederek gökcisimleri üzerinde hak talebinde bulunmuştur. Hatta bu kapsamda gökcisimlerini satanlar dahi vardır. Bu kapsamda 1980 yılında Dennis Hope isimli bir ABD vatandaşı San Francisco'da Dünya ve Güneş hariç olmak üzere güneş sistemimizdeki gökcisimleri ile ilgili mülkiyet başvurusunda bulunmuştur (Hertzfeld & von der Dunk, 2005, s. 92), (Jaggard, 2009), (Koebler, 2013), (Moskovitz, 2013), (Schultz, 2013), (Toosi, 2019). Bu başvuruya ek olarak BM Genel Kurulu, AD ve Sovyetler Birliği yönetimlerini de talepleri hakkında bilgilendirme yoluna gitmiştir. Talepleri ile ilgili olarak kendisine geri dönüş yapılmamasını ise taleplerinde haklı olduğunun ikrarı ve ispatı olarak ilan etmiştir. Taleplerini 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması'ndaki bir kanuni boşluğa dayandırmıştır. Hope'un iddiasına göre antlaşma devletlerin dış uzayda mülkiyet sahibi olmasını yasaklarken aynı yasak ve sınırlamaya kişiler ve şirketler dâhil edilmemiştir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 222). Bu konu ile ilgili olarak verilen hukuki mütalalarda, uzaydaki gökcisimleri ile ilgili hak iddiaları ve mülkiyet taleplerinin yok hükmünde olduğunu, 1967 tarihli Dış Uzay Antlaşması'nın geçerli olduğunu de facto olarak ilan edilmiştir. Ancak Hope iddiasından geri adım atmamış ve kendi ifadesine göre 3,5 milyon gerçek ve tüzel kişiye uzayda taşınmaz satmıştır. Hope'un girişiminin elde etmiş olduğu başarı üzerine benzer girişimler hızla çoğalmıştır. Bunlardan birisi olan Ay Cumhuriyeti-Lunar Republic uluslararası bir ticaret şirketi tarzında örgütlenmiştir ve web sayfasında verilen bilgiye göre 200'den fazla ülkede faaliyet izni almıştır. Mevcut uluslararası hukuka göre hiçbir devlet veya özel şirket Ay üzerinde toprak sahibi olamayacağı ilan edilmiştir. Yine Ay Antlaşması'nda Ay'ın yönetimi için uluslararası bir yönetim kurulması önerilmiştir. Bu öneriyi bir fırsat olarak görenler de bağımsız ve egemen bir Ay Cumhuriyeti kurulması önerisini ortaya atmıştır. Yönetimi kendi vatandaşı olan kişiler seçecektir. Bu yönetim, Ay'ın keşfi ve yerleşime açılması için uzun vadeli bir plan hazırlayacaktır ve kaynaklarını işletecektir. Ay Cumhuriyeti yönetimi, Ay'ın barışçı şekilde ilhakı ile kaynaklarının kullanımı ve işletilmesine rehberlik etmekle görevlendirilmiştir. Ayrıca belirli bölgelerde özel mülkiyet hakkı tesisine de imkân sağlayacaktır. Bu kapsamda ana amacı Ay'daki toprak ve arazi sahiplerinin haklarını korumak ve geliştirmek olan bir Ay sicili oluşturulmuştur (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 223).

Ay Cumhuriyeti tarafından yapılan toprak satışları Lunar Settlement Initiative ile irtibatlı ve uyumlu bir şekilde yürütülmektedir. Lunar Settlement Initiative'in ana amacı ise Ay'da özel sektörün geliştirilmesinin teşviki, Ay'ın özel sektör tarafından desteklenecek şekilde keşfi ve yerleşime açılmasıdır. Bu girişim, kamu-özel sektör ortaklığı şeklinde bir yapı öngörmektedir. Nihai amaç; Ay'da insan yerleşiminin başlamasıdır. Girişim tarafından kurulacak yerleşimler ise uluslararası hukuka göre yasal olarak tanınmalıdır. Ancak öneriler Dış Uzay Antlaşması'nın ihlali anlamına da gelmektedir. Bu yüzden hâlihazırda uluslararası hukuka aykırıdır ve onun koruması altında olamaz (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 224).

4.2. SALT Antlaşmaları, Ticari Faaliyetler ve Kâr Paylaşımı

Dış Uzay Antlaşması'nın 1. Maddesi'nin (1) fıkrasına göre Ay'ın ve diğer gökcisimlerinin keşfi ve kullanımı tüm devletlerin çıkarına olacak bir şekilde yapılmalıdır. Bunu yaparken ülkelerin ekonomik ve bilimsel gelişmişlik seviyeleri bir değerlendirme ölçeği olmamalıdır. Bu yasal prensip, Ay ve diğer gökcisimleri keşfedilmeyi bekleyen insanlığın ortak mallarıdır. Keşifleri, kullanımları ve kaynakların geliştirilmesi kamu yararına ve devletlerin kontrolleri veya hâkimiyet taleplerine tabi değildir (Christol, 1982). Dış Uzay Antlaşması'nın hazırlık safhası incelendiğinde, tüm devletler arasında ortalama bir denge kurulmaya çalışıldığı görülmektedir. Antlaşmada değinilen "Ortak Çıkar-Common Interest" prensibi dış uzayın bağımsızlığını ve dış uzayın sahiplenilmemesini teminat altına alan diğer prensiplerin de temelini oluşturmaktadır. Keza Ay ve diğer gökcisimlerinin keşfeden veya kullanan tüm diğer devletlerin de çıkarlarına saygı gösterilmesini öncelemektedir. Bu sayede uzay araştırmalarının uluslararası bir gerginlik kaynağı veya kriz sebebi olmadan gerçekleştirilmesinin desteklenmesi planlanmıştır. Dış Uzay Antlaşması'nın 1. Maddesi'nin (1) fıkrasına tabi tüm uzay araştırmalarında bu kurallara uyulmalıdır ve bu çalışmalarda tüm devletlerin faydası gözetilmelidir. Ancak bu dış uzayın keşfi ve kullanımında elde edilecek faydanın tüm diğer devletlerle paylaşılmak zorunda olduğu şeklinde anlaşılmalıdır. Bu paylaşımın nasıl yapılacağı, antlaşmaya üye olan ülkelerin

kendisine bırakılmıştır. Antlaşma'nın 1. Maddesi ile ilgili bu yorum tüm uzay araştırması yapan devletler ve diğer ülkeler tarafından kabul görmüştür (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 228, 229).

Ay Antlaşması'nın 11. Maddesine göre Ay ve diğer gök cisimleri ve bunların doğal kaynakları insanlığın ortak mirasıdır. Bu özel sektör açısından en tartışmalı maddesidir. Ay Antlaşmasında bu prensip sıklıkla farklı, yanlış ve eksik yorumlanmıştır (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 229). Ay Antlaşması'nın hazırlık safhasında ABD ve gelişmekte olan ülkeler insanlığın ortak mirası yaklaşımını desteklemiştir. Ancak Sovyetler Birliği buna muhalefet etmiştir (Galloway, 1980). UNCOPUOS'un 1979 yılında yapılan alt komitesi görüşmesinin son oturumunda Sovyetler Birliği bu tanıma olan muhalefetini kaldırmıştır. Bunda Ay Antlaşması'nın nihai halinin ortaya çıkmasının da etkisi vardır. İnsanlığın Ortak Mirası tabirinin anlamı ve kapsamı netleştirilmiştir. Ay Antlaşmasına göre Ay'daki kaynakların kullanımı mümkün hale geldiğinde uluslararası bir yönetim kurulmalıdır. Burada kullanım tabiri ile kastedilen doğal kaynakların ticari amaçlı olarak çıkarılması ve işlenmesidir (Jakhu & Buzdugan, 2008, s. 230). Kurulması öngörülen uluslararası yönetimin dayanacağı prensipler antlaşmanın 11. Maddesi'nin (7) fıkrasında açıklanmıştır. Bunlardan bir tanesi doğal kaynaklardan elde edilen faydanın tüm devletler tarafından eşit şekilde paylaşılmasını öngörmektedir. Ancak yine Ay Antlaşmasına göre Ay ve diğer gök cisimlerindeki doğal kaynakları işletecek olan özel şirketler elde ettikleri faydayı paylaşmak zorunda değildir. Ay'daki doğal kaynakları inceleme ve uzay araştırma çalışmalarını desteklemek için yasal olarak toplama, çıkarma ve kullanma hakkına sahiptirler. Ancak ticari olarak çıkarma durumunda, durum tartışmalı bir hal alacaktır. Yine de Ay Antlaşması, Dış Uzay Antlaşmasına göre özel sektörün faydasını daha fazla gözetmektedir.

5. SONUÇ

Dünya genelinde uzay araştırmalarına katılan devletler, uzay araştırmalarını özel sektöre açmakta, onların bu alanda yatırım yapmasına müsaade etmektedir. Bunun sonucunda uzay araştırmaları ve bir dizi destekleyici sektörde hızlı bir büyüme gözlenmektedir. Uzunca bir süre, Soğuk Savaş döneminin iki süper gücünün prestij ve rekabet alanı olarak kalan uzay araştırmaları, uzayın ve kaynaklarının ticari olarak kullanılması düşüncesinin gelişmesinden sonra hızla ticarileşme başlamıştır. Bu alana özel sektörün artan katılımı bazı güvenlik (askeri ve ticari) endişelerine sebep olsa da, uzay araştırmalarının çeşitlenmesi ve maliyetlerin düşmesini beraberinde getirmesi beklenmektedir. Sıklıkla mevcut uluslararası hukukun sınırlamalarına (ruhsat gerekleri gibi), İnsanlığın Ortak Mirası prensibine takılan özel sektörün uzay araştırmalarına katılma girişimi artık bir aşama sonrasındır. Zira uzayın sunduğu devasa ekonomik potansiyel bu alana sadece devletleri çekmemektedir.

Soğuk Savaş döneminde iki blok arasında her alandaki rekabetin sürdürüldüğu yeni bir alan olarak uzay araştırmaları ortaya çıkmıştır. İlk başlarda uzay araştırmalarında ortaya çıkan rekabet tamamen askeri amaçlı olduğu için uzayın sunduğu ekonomik potansiyel dikkate alınmamış, daha sonraki dönemlerde değerlendirilmek üzere ötelenmiştir. Ancak olası bir tırmandırma yaşanmaması için, insan varlığına tamamen düşman olan bu alanla ilgili olarak İnsanlığın Ortak Mirası söylemi geliştirilmiş ve rekabet sınırlandırılmaya çalışılmıştır. Ancak Soğuk Savaş'ın sona ermesi ve gelişen teknoloji ve uzay kaynaklı, uydulardan kaynaklanan hizmetlerin gündelik hayatımızın hemen her alanında artan kullanımı, el değmemiş, bakir ve kaynakları mevcut kavrayışımıza göre sınırsız olan bu yeni alana dikkatlerin yönelmesini beraberinde getirmiştir. Değişen şartlar sebebiyle Soğuk Savaş döneminin uzay ve kaynakları ile ilgili sınırlamaları ve yasaklamalarının artık geçerli ve caydırıcı olamayacağı açıktır. Bu alanda ilk adımı uzay araştırmalarına katılan devletlerden birisi atacak ve yasaklamaların sınırını geçecektir. O andan itibaren aynen Coğrafi Keşifler veya Sömürgecilik döneminde olduğu gibi devletlerle birlikte şirketler yoluyla da mülkiyet hakları kurulup, bunun daha sonra devletler lehine egemenlik haklarına dönüşmesini beklemek yanlış olmayacaktır. Bu noktada hukuk olayları takip edecek, ortaya çıkan fiili durumu bir norma bağlamak ve düzenlemek için devreye girecektir.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- Adolph, J. (2006). The recent boom in private space development and the necessity of an international framework embracing private property rights to encourage investment. *The International Lawyer*, 40(4), s. 961-985.
- Bell, J., & Mitton, J. (Eds.) (2002). *Asteroid Rendezvous: NEAR Shoemaker's Adventures at Eros*. New York: Cambridge University Press.
- Brown, D., Cantillo, L., & Webster, G. (2015). NASA Confirms Evidence that Liquid Water Flows on Today's Mars. NASA. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-confirms-evidence-that-liquid-water-flows-on-todays-mars/> adresinden alındı.
- Chaben, J. B. (2020). Extending humanity's reach. *Journal of Strategic Security*, 13(3), s. 75-98.
- Cheng, A. F. (1997). Near Earth Asteroid Rendezvous: Mission Overview. C. T Russell (Dü) içinde, *The Near Earth Asteroid Rendezvous Mission* (s. 3-29). Dordrecht: Springer.
- Cheng, B. (1997). *Studies in International Space Law*. Oxford: Clarendon Press.
- Christol, C. (1982). *The Modern International Law of Outer Space*. New York, NY: Pergamon Press.
- Christol, C. Q. (1984). Article 2 of the 1967 principles treaty revisited. *Annals Air & Space Law*, 9, s. 217-265.
- Clery, D. (2003). Europe Goes to the Moon. *Science*. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.science.org/content/article/europe-goes-moon> (Son erişim: 29.10.2024) adresinden alındı.
- Davidson, K. (2005). Final Frontier for Lawyers-Property Rights in Space/Land Claims, Commercial Schemes and Dreams Have Legal Eagles Hovering. Sfgate.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.sfgate.com/news/article/Final-frontier-for-lawyers-property-rights-in-2564610.php> (Son erişim: 29.10.2024) adresinden alındı.
- Day, D. A. (2004). Whispers in the echo chamber: Why the Media Says the Space Plan Costs a Trillion Dollars. *The Space Review*. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.thespacereview.com/article/119/1> (Son erişim: 29.10.2024) adresinden alındı.
- Dinkin, S. (2004). Property Rights and Space Commercialization. *The Space Review*. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.thespacereview.com/article/141/1> adresinden alındı.
- Ercan, A., & Gürsel, S. (2022). Değişen uluslararası güvenlik bağlamında uzay güvenliği ve uzayda silahsızlanma çabaları. *Gaziantepe University Journal of Social Sciences*, 21(2), s. 881-896.
- Freeland, S. (2005). Up, up and . . . back: The emergence of space tourism and its impact on the international law of outer space. *Chicago Journal of International Law*, 6(1), s. 1-22.
- Freeland, S., & Jakhu, R. (2009). Article II. S. Hobe, B. Schmidt-Tedd, K.-U. Schrogl, and G. M. Goh (Dü) içinde *Cologne Commentary on Space Law: V. 1, Outer Space Treaty* (s. 44-63). Cologne: Carl Heymanns Verlag.
- Froehlich, A., Seffinga, V., & Qiu, R. (2020). The development of the mandates of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space (COPUOS) and the Conference on Disarmament (CD) and the Collaboration Between the Forums. A. Froehlich, V. Seffinga, (Dü.) içinde *The United Nations and Space Security: Conflicting Mandates Between UNCOPUOS and the CD* (s. 29-106). Cham: Springer.
- Gabrynowicz, J. I. (2004). Space law: Its cold war origins and challenges in the era of globalization. *Suffolk University Law Review*, 37(4), s. 1041-1065.
- Galloway, E. (1980). *Agreement Governing the Activities of States on the Moon and Other Celestial Bodies*. Washington: Committee on Commerce, Science, and Transportation, United States Senate.
- Gorove, S. (1969). Interpreting article II of the Outer Space Treaty. *Fordham Law Review*, 37(3), s. 349-354.

- Gruner, B. (2004). A new hope for international space law: Incorporating nineteenth century first possession principles into the 1967 space treaty for the colonization of outer space in the twenty-first century. *Seton Hall Law Review*, 35(1), s. 299-357.
- Hao, H. (2004). China's Lunar Exploration is not for Helium-3. *People's Daily Online*.
- Hertzfeld, H. R., & von der Dunk, F. G. (2005). Bringing space law into the commercial world: Property rights without sovereignty. *Chicago Journal of International Law*, 6(1), s. 81-99.
- Hobe, S. (2009). Historical Background. S. Hobe, B. Schmidt-Tedd & K-U. Schrogl (Dü) içinde *Cologne Commentary on Space Law: Outer Space Treaty* (Cilt 1) (s. 105-150). Cologne: Carl Heymanns Verlag .
- Hobe, S., & Hedman, N. (2009). Preamble. S. Hobe, B. Schmidt-Tedd & K-U. Schrogl (Dü) içinde *Cologne Commentary on Space Law: Outer Space Treaty* (Cilt 1) (s. 151-166). Cologne: Carl Heymanns Verlag.
- Jaggard, V. (2009). Who Owns the Moon? The Galactic Government vs. the UN. National Geographic. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.nationalgeographic.com/science/article/space-who-owns-moon-science> adresinden alındı.
- Jakhu, R., & Buzdugan, M. (2008). Development of the natural resources of the Moon and other celestial bodies: Economic and legal aspects. *Astropolitics*, 6(3), s. 201-250.
- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Kaguya (SELENE). Ekim 29, 2014 tarihinde https://www.kaguya.jaxa.jp/index_e.htm adresinden alındı.
- Jankowitsch, P. (2015). The Background and History of Space Law. F. G. von der Dunk and F. Tronchetti (Dü) içinde *Handbook of Space Law: Research Handbooks in International Law Series* (s. 1-26). Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Katıman E. (2022). Uluslararası hukukta uzay ajansları ve ulusal uzay hukukunda yasal çerçeve yeterlilik sorunu. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 9(2), s. 66-84.
- Kato, M., Sasaki, S., Takizawa, Y., & the Kaguya project team. (2010). The Kaguya Mission overview. *Space Science Reviews*, 154, 3-19.
- Koebler, J. (2013). Meet the Man Who Owns the Moon. U.S. News. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.usnews.com/news/articles/2013/03/25/meet-the-man-who-owns-the-moon> adresinden alındı.
- Koplow, D. A. (2019). Exoatmospheric plowshares: using a nuclear explosive device for planetary defense against an incoming asteroid. *UCLA Journal of International Law and Foreign Affairs*, 23(1), s. 76-158.
- Lachs, M. (2010). *The Law of Outer Space: An Experience in Contemporary Law Making*. Leiden: Koninklijke Brill.
- Lyall, F., & Larsen, P. B. (2018). *Space Law: A Treatise* (2d ed.). New York: Routledge.
- Malanczuk, P. (1997). *Actors: States, International Organizations, Private Entities*. G. Lafferranderie and D. Crowther (Dü) içinde *Outlook on Space Law Over the Next 30 Years* (s. 23-36). The Hague: Kluwer Law International.
- Malik, T. (2020). Japan Launches Kaguya Probe on Moon Mission. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/4345-japan-launches-kaguya-probe-moon-mission.html> adresinden alındı.
- Mansfield, S. (2024). Private Sector Innovation and Its Impact on the Space Industry. Space Daily. Ekim 29, 2024 tarihinde https://www.spacedaily.com/reports/Private_Sector_Innovation_and_Its_Impact_on_the_Space_Industry_999.html adresinden alındı.
- Marchisio, S. (2005). The Evolutionary stages of the Legal Subcommittee of the United Nations Committee on Peaceful Uses of Outer Space. *Journal of Space Law*, 31, s. 220-221.
- Mayence, J.-F. (2017). The Role of UNCOPUOS in the International Regulation of Non-governmental Space Activities. J. Wouters, P. De Man, R. Hansen (Dü) içinde *Commercial Uses of Space and Space Tourism* (s. 254-265). Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Limited.
- Mirzai, S. (2023). The Rise of Private Companies in Space Exploration: Revolutionizing the Final Frontier. Medium. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://medium.com/techcrate/the-rise-of-private-companies-in-space-exploration-revolutionizing-the-final-frontier-71d0a273b419> adresinden alındı.
- Moltz, J. C. (2011). The Indian Space Program: Rising to a Challenge. J. C. Moltz (Eds.), *Asia's Space Race: National Motivations, Regional Rivalries, and International Risks* içinde (s. 110-135). New York, NY: Columbia University Press.

- Moskowitz, C. (2008). Proof! Water Ice Found on Mars. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/5546-proof-water-ice-mars.html> adresinden alındı.
- Moskowitz, C. (2008). Minerals Needed for Life Found on Mars. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/5566-minerals-needed-life-mars.html> adresinden alındı.
- Moskowitz, C. (2013). Lunar Real Estate Agent has 'Sold' 7.5% of Moon. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/20948-moon-property-ownership.html> adresinden alındı.
- Nam, Y. (2023). One-way ticket to Mars: The privatisation of the space industry and its environmental impact on earth and beyond. *Northeastern Journal of Law and Social Policy*, 19(1), s. 150-176.
- NASA, (2004). Vision for Space Exploration. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.nasa.gov/history/vision-for-space-exploration/> adresinden alındı.
- Parthasarathy, K. S. (2006). Mining the Moon. *The Tribune*.
- Qizhi, H. (1997). The Outer Space Treaty in perspective. *Journal of Space Law*, 25(2), s. 93-100.
- Sattler, R. (2005). Transporting a legal system for property rights: From the earth to the stars. *Chicago Journal of International Law*, 6(1), s. 23-44.
- Schmitt, H. H. (2004). Mining the Moon. *Popular Mechanics*, 181(10), s. 58-61.
- Schmitt, H. (2006). *Return to the Moon: Exploration, enterprise, and energy in the Human Settlement of Space*. New York, NY: Copernicus Books.
- Schultz, C. (2013). Dennis Hope Thinks He Owns the Moon. *Smithsonian Magazine*. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/dennis-hope-thinks-he-owns-the-moon-1460757/> adresinden alındı.
- Sharma, M. (2021). The Privatized Frontier: The Ethical Implications and Role of Private Companies in Space Exploration. *The Space Review*. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.thespacereview.com/article/4238/1> adresinden alındı.
- Singh, N., & MacWhinney, E. (1989). *Nuclear Weapons and Contemporary International Law*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Space Daily (2004). The Martian Methane Surprise. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.spacedaily.com/news/mars-life-04y.html> adresinden alındı.
- Steigerwald, W. (2021). First You See It, Then You Don't: Scientists Closer to Explaining Mars Methane Mystery. NASA. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.nasa.gov/solar-system/first-you-see-it-then-you-dont-scientists-closer-to-explaining-mars-methane-mystery/> adresinden alındı.
- Sutter, P. (2024). What's Behind the Martian Methane Mystery?. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/what-is-behind-martian-methane-mystery> adresinden alındı.
- The European Space Agency (ESA) (2008). Chandrayaan-1 Now in Lunar Orbit. Ekim 29, 2024 tarihinde https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Chandrayaan-1_now_in_lunar_orbit adresinden alındı.
- The White House (2006). A Renewed Spirit of Discovery. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://georgewbush-whitehouse.archives.gov/infocus/space/index.html> adresinden alındı.
- Tillman, N. T. (2018). Water on Mars: Exploration & Evidence. Space.com. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.space.com/17048-water-on-mars.html> adresinden alındı.
- Toosi, N. (2019). Who Owns the Moon?. *Politico*. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.politico.com/agenda/story/2019/06/13/space-travel-moon-resources-000899/> adresinden alındı.
- Tronchetti, F. (2009). *The exploitation of natural resources of the Moon and other celestial bodies: A Proposal for a legal regime*. Leiden: Martinus Nijhoff Publishers.
- Tronchetti, F. (2015). Legal Aspects of the Military Uses of Outer Space. F. G. von der Dunk and F. Tronchetti (Dü) içinde *Handbook of Space Law: Research Handbooks in International Law Series* (s. 331-381). Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Undseth, M., Jolly, C., & Olivari, M. (2021). Evolving Public-Private Relations in the Space Sector: Lessons Learned for the post COVID-19 Era. OECD Science, Technology And Industry Policy Papers, No. 114. OECD Publishing.

- United Nations (1987). Vienna Convention on the Law of Treaties. New York: United Nations, Treaty Series 1155, 331.
- Urvoy, H. (2023). Regulating Space: Who is Keeping Track of Private Companies Trying to Reach the Stars?. Euro News. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.euronews.com/2023/05/11/regulating-space-who-is-keeping-track-of-private-companies-trying-to-reach-the-stars> adresinden alındı.
- Wall, M. (2011). NASA Rover Finds Convincing Evidence of Water on Ancient Mars. Space.com. <https://www.space.com/13862-mars-rover-opportunity-ancient-water-evidence.html> adresinden alındı.
- Weinzierl, M. (2018). Space, the final frontier. *The Journal of Economic Perspectives*, 32(2), s. 173-192.
- Witasse, O., Lefèvre, F., & Forget, F. (2009). Mars, Methane and Mysteries. The European Space Agency-ESA. Ekim 29, 2024 tarihinde https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Mars_Express/Mars_methane_and_mysteries adresinden alındı.
- Viikari, L. (2002). *From Manganese Nodules to Lunar Regolith*. Rovaniemi: University of Lapland.
- Von der Dunk, F. G. (1997). The dark side of the Moon, the status of the Moon: Public concepts and private enterprise. *College of Law, Space, Cyber, and Telecommunications Law Program Faculty Publications*, 49, s. 119-124.
- Von der Dunk, F. G. (2015). International Space Law. F. G. von der Dunk and F. Tronchetti (Dü) içinde *Handbook of Space Law: Research Handbooks in International Law Series* (s. 29-126). Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited.
- Von der Dunk, F. G. (2020). *Advanced Introduction to Space Law*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Ltd.
- Von der Dunk, F. G. (2023). Property rights over the Moon or on the Moon? The legality of space resource exploitation on celestial bodies. *Journal of Law & Innovation*, 6(1), s. 95-134.
- Voosen, P. (2018). Martian Methane-Spotted in 2004-has Mysteriously Vanished. Science. Ekim 29, 2024 tarihinde <https://www.science.org/content/article/martian-methane-spotted-2004-has-mysteriously-vanished> adresinden alındı.



Teorik Makale

Serrasyonlu kanat kenarları ve gürültü azaltma: Aerodinamik çalışmalara genel bir bakış

Şükran Yeşil¹ ve Melih Yıldız²

Öz. Bu çalışma, havacılık sektöründe önemli bir sorun olan aerodinamik gürültü kaynaklarını ve bu gürültülerin azaltılmasına yönelik çözüm önerilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Uçaklar ve diğer hava araçları, yüksek hızlarda hareket ederken, özellikle kanat firar kenarlarında oluşan türbülanslı akışlar nedeniyle çevresel ve operasyonel sorunlara yol açan çeşitli gürültü mekanizmaları üretmektedir. Bu çalışmanın amacı, aerodinamik gürültünün kaynaklarının anlaşılması ve azaltılması için yenilikçi çözüm stratejilerini ortaya koymaktır. Araştırmada, firar kenarlarının geometrik modifikasyonu ve serrasyonların kullanımı üzerine yoğunlaşmış ve bu yaklaşımların türbülans bozma ve gürültü seviyelerini düşürmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Serrasyonların, düşük frekanslı gürültü bileşenlerini azaltırken aerodinamik performansı koruduğu deneysel ve sayısal analizlerle desteklenmiştir. Çalışma, literatürde daha önce ele alınan teorik yaklaşımları ve analitik modelleri kapsamına alarak serrasyonlu firar kenarlarının gürültü azaltma potansiyelini değerlendirmektedir. Bu çalışma, havacılık endüstrisinde çevresel gürültü yönetimi ve aerodinamik verimlilik hedeflerine yönelik stratejik yaklaşımlar sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalara temel oluşturan bu çalışma, sessiz ve çevre dostu hava araçlarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aerodinamik gürültü, firar kenarı serrasyonları, gürültü kontrolü.

Theoretical Paper

Serrated wing edges and noise reduction: An overview of aerodynamic studies

Abstract. This study provides a detailed examination of aerodynamic noise sources, a significant issue in the aviation industry, and presents solution proposals for noise reduction. Aircraft and other aerial vehicles generate various noise mechanisms, particularly due to turbulent flows occurring at the trailing edges of wings during high-speed operations, leading to environmental and operational challenges. The aim of this study is to understand the sources of aerodynamic noise and to propose innovative strategies for its mitigation. The research focuses on the geometric modification of trailing edges and the use of serrations, observing that these approaches effectively disrupt turbulence and reduce noise levels. Experimental and numerical analyses have demonstrated that serrations reduce low-frequency noise components while maintaining aerodynamic performance. The study evaluates the noise reduction potential of serrated trailing edges by incorporating theoretical approaches and analytical models previously discussed in the literature. This study offers strategic approaches aimed at achieving environmental noise management and aerodynamic efficiency in the aviation industry. Serving as a foundation for future research, this work contributes to the development of quieter and more environmentally friendly aerial vehicles.

Keywords: Aerodynamic noise, trailing edge serrations, noise control.

1 Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye; sukranyesil0@gmail.com (Sorumlu Yazar)

2 Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, 38039, Kayseri, Türkiye; melihy@erciyes.edu.tr

<https://doi.org/10.52995/jass.1571905>

Geliş Tarihi: 22 Ekim 2024; Kabul Tarihi: 5 Şubat 2025; Yayınlanma Tarihi: 28 Şubat 2025

© 2025 Türk Hava Kurumu Üniversitesi. Tüm hakları saklıdır.

Bu makale Creative Commons Atıf-GayriTicari-AynıLisanslaPaylaş 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır.



1. GİRİŞ

Havacılık endüstrisi, son yıllarda çevresel etkileri en aza indirmek ve verimliliği artırmak amacıyla gürültü azaltma stratejilerine büyük önem vermektedir. Gürültü, özellikle uçakların ve diğer havacılık araçlarının aerodinamik performansını etkileyen ve çevresel kirliliğe yol açan önemli bir sorundur. Aerodinamik sesin kontrolü ve azaltılması, bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarının odak noktasıdır. Çeşitli gürültü mekanizmalarının anlaşılması ve etkin bir şekilde yönetilmesi, uçakların daha sessiz, çevre dostu ve verimli hale getirilmesine yönelik çabaların merkezinde yer almaktadır.

Gürültü kaynakları, özellikle uçak kanatları ve rüzgâr türbinleri gibi aerodinamik yüzeylerde ortaya çıkan çeşitli fiziksel süreçlerle ilişkilidir. Türbülanslı sınır tabaka firar kenarı gürültüsü (TBL-FK), akım ayrılması-stall gürültüsü, laminar sınır tabaka girdap dökülme gürültüsü (LBL VS), kanat ucu girdabı oluşumu gürültüsü ve firar kenarı küntlüğü girdap dökülme gürültüsü gibi ana gürültü kaynakları, bu süreçlerin karmaşıklığını ve gürültü üretiminin ardındaki mekanizmaları gözler önüne sermektedir (Brooks, Stuart, & Marcolini, 1989).

Tablo 1. Gürültü Kaynakları

Gürültü Kaynağı	Detaylar
Türbülanslı sınır tabaka firar kenarı (TBL-FK) gürültüsü	Türbülansın firar kenarında oluşturduğu gürültü
Akım ayrılması/stall gürültüsü	Akışın ayrılması sonucu oluşan gürültü
Laminar sınır tabaka girdap dökülme (LBL VS) gürültüsü	Laminar akışta girdap dökülmesinden kaynaklanan gürültü
Kanat ucu girdabı oluşumu gürültüsü	Kanat ucunda girdap oluşumundan kaynaklanan gürültü
Firar kenarı küntlüğü girdap dökülme gürültüsü	Künt firar kenarında oluşan girdap kaynaklı gürültü

Gürültü azaltma stratejileri ise aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Aktif yöntemler, plazma aktüatörleri veya sentetik jetler gibi teknolojik bileşenlerin kullanımıyla akış özelliklerini kontrol etmeyi ve gürültüyü azaltmayı amaçlarken, pasif yöntemler ise aerodinamik yüzeylerin tasarımında yapılan değişiklikler, malzeme seçimi ve titreşim kontrolü gibi tekniklerle gürültüyü azaltmayı hedefler (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Bu bağlamda, sınır tabakasının yapısını değiştirme ve kenar işleme yöntemleri, aerodinamik yüzeylerdeki türbülansı azaltarak gürültü seviyelerini düşürmeye yönelik önemli yaklaşımlar olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 2. Gürültü Azaltma Yöntemleri

Yöntem Kategorisi	Yöntem Türü	Özellikler ve Amaç	Örnek Teknolojiler/Metotlar
Aktif Yöntemler	Akış Kontrol Teknolojileri	Akış özelliklerini değiştirmek ve gürültüyü azaltmak için dışarıdan enerji uygulanır.	Plazma aktüatörleri, sentetik jetler, piezoelektrik cihazlar
	Gürültü Yönetimi	Gürültü kaynağını tespit ederek aktif karşı sinyal üretimi yapılır.	Aktif gürültü iptal sistemleri
Pasif Yöntemler	Aerodinamik Yüzey Modifikasyonları	Gürültü kaynağını pasif olarak kontrol etmek için yüzey tasarımı optimize edilir.	Firar/hücum kenarı serrasyonları, kanat ucu tasarımları
	Malzeme Seçimi	Akustik olarak uygun malzemelerle ses emilimi sağlanır.	Gürültü emici paneller, kompozit malzemeler

Titreşim Kontrolü	Gürültüye neden olan titreşimleri azaltarak aeroelastik etkiler kontrol edilir.	Titreşim sönümleyiciler, elastomer kaplamalar
-------------------	---------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

Özellikle firar kenarı serrasyonlarının kullanımı, gürültü azaltma çalışmalarında dikkat çeken bir yenilik olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu serrasyonlar, sınır tabakasındaki türbülansın etkisini azaltarak ve ses dalgalarının saçılmasını artırarak, gürültü seviyelerini önemli ölçüde düşürebilmektedir. Gürültü azaltma tekniklerinin geliştirilmesi, havacılık endüstrisinin daha sürdürülebilir bir geleceğe adım atmasına yardımcı olurken, çevresel etkilerin en aza indirilmesine ve toplumsal kabul edilebilirliğin artırılmasına katkıda bulunacaktır. Bu bağlamda Tablo 2'de ele alınan Pasif Yöntemler kategorisi – Aerodinamik Yüzey Modifikasyonları – Firar/hücum kenarı serrasyonları (kanat ucu tasarımları) konu başlığı bu makalede detaylıca incelenmektedir.

2. KENAR İŞLEME YÖNTEMLERİ

Aerodinamik kenar tasarımları, hava akışının kontrol edilmesi, performansın artırılması ve gürültü seviyelerinin düşürülmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Uçak kanatları, rüzgâr türbinleri, otomobil gövdeleri ve diğer aerodinamik yüzeylerde bulunan bu kenarlar, akışın yönlendirilmesi, sürtünmenin azaltılması ve türbülansın kontrol altına alınması için kritik rol oynamaktadır. Bu tasarımlar, akışın yüzeyden ayrılmasını geciktirerek, enerji verimliliğini artırabilir ve aynı zamanda aeroakustik performansı iyileştirebilmektedir (Wang, Zhao, Lu, Song, & Bennett, 2019).

Aerodinamik uygulamalarda, özellikle gürültü azaltımı ve akış performansını optimize etme hedefi, kenar tasarımının önemini her zamankinden daha belirgin hale getirmiştir. Kenar işleme yöntemleri, akışın stabilitesini artırırken türbülansı ve ses emisyonlarını azaltmayı amaçlayan stratejik yaklaşımlar sunmaktadır. Bu yöntemlerin doğru bir şekilde uygulanması, sadece performansı artırmakla kalmaz, aynı zamanda çevresel etkileri de minimize etmeyi amaçlamıştır (Lee, ve diğerleri, 2021). Aerodinamik yapıların etkinliğini maksimize etmek ve sürdürülebilir tasarımlar geliştirmek için kenar işleme tekniklerinin derinlemesine incelenmesi ve optimize edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, bu makalede kenar işleme yöntemlerinin teorik ve analitik açıdan değerlendirilmesi yapılacaktır.

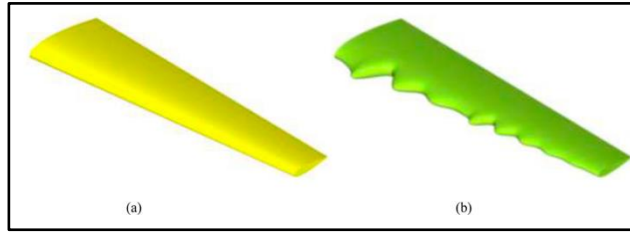
2.1. Hücum Kenarı Serrasyonları

Kenar işleme yöntemleri, aerodinamik yüzeylerdeki gürültüyü azaltmak ve performansı artırmak için kullanılan yenilikçi stratejilerden biri olarak görülmektedir. Hücum kenarı serrasyonları (HKS), bu yöntemlerden biri olarak özellikle havacılık endüstrisinde büyük ilgi görmektedir. HKS, kanat profillerinin hücum kenarındaki şekil değişikliklerini ifade eder ve bu değişiklikler, akış kontrolünü sağlayarak taşıma kuvvetini artırırken aerodinamik gürültüyü azaltabilmektedir. Optimize edilmiş HKS tasarımları, sessiz ve verimli hava araçlarının geliştirilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir.

Hücum kenarı serrasyonları (HKS), özellikle aerodinamik ve aeroakustik performansı optimize etmek için araştırılan yenilikçi yöntemlerden biri olduğu görülmektedir. (Kim, ve diğerleri, 2022) çalışmasında, NACA 65(12)-10 kanat profiline uygulanan HKS tasarımları, gürültü azaltımı ve aerodinamik performans üzerindeki etkilerini anlamak için kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, serrasyonların optimize edilmesiyle hem taşıma kuvvetinin artırıldığı hem de akışın kontrol edilerek gürültü seviyesinin düşürüldüğü görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün minimize edilmesi ve akışın daha etkin bir şekilde yönlendirilmesi, deneysel çalışmalarda elde edilen başarıyı desteklemiştir. Benzer şekilde, hücum kenarındaki şekil değişikliklerinin akış ayrılmalarını kontrol etmesi, laminar-türbülans geçişi geciktirmesi ve gürültü seviyesini düşürmesi HKS'nin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışmada kanat profilinin performansını artırmak amacıyla kullanılan hücum kenarı serrasyonlarının kanat profilleri, 3D yazıcı ile üretilmiş ve yüzey pürüzlülüğü $Ra=0,23 \mu m$ olarak belirlenmiştir. Deneysel, etkili Reynolds sayısının 10^6 'ya çıkarılması için, kanat profilinin 0,56 m yukarısında bir ızgara (grid) yerleştirilmiştir. Bu ızgara, akışkanlık yoğunluğunu artırarak laminar ayrılma baloncuklarının boyutunu azaltmayı hedeflemiştir. Çalışmada, kanat profilinin taşıma katsayısının (C_L) hücum açısına (α) bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir. Özellikle, ızgara ile yapılan testlerde, C_L 'nin α açısı 5° 'ye kadar lineer bir artış gösterdiği ve maksimum taşıma katsayısının yaklaşık $14,5^\circ$ 'de elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durum, kanat profilinin alt yüzeyinde büyük bir laminar ayrılma baloncuğunun (large separation bubble) oluştuğunu ve bu baloncuğun negatif basınç bölgeleri yarattığını göstermektedir. Laminar ayrılma baloncukları, akışın ayrılmasına ve dolayısıyla taşıma kuvvetinin azalmasına neden olabilmektedir.

Serrasyonların etkisi, kanat profiline aerodinamik performansını iyileştirmede kritik bir rol oynamaktadır. Serrasyonlar, akışın daha düzgün bir şekilde dağılmasını sağlayarak, laminar ayrılma baloncuklarının boyutunu küçültmekte ve bu sayede daha yüksek taşıma katsayıları elde edilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, serrasyonlar, hava akışının ses seviyesini azaltarak aeroakustik performansı da iyileştirmektedir. Bu çalışma, serrasyonların aerodinamik ve aeroakustik özellikler üzerindeki olumlu etkilerini vurgulamaktadır (Kim, ve diğerleri, 2022).

Biyonik tasarım yaklaşımlarının aerodinamik optimizasyon üzerindeki etkilerini inceleyen Lu ve ekibi, tuberkül tasarımlarını optimize ederek kanat profillerinin performansını artırmaya yönelik kapsamlı bir metodoloji geliştirmiştir. Araştırmanın temel bileşenleri arasında geometrik dönüşüm, sayısal akışkanlar dinamiği (CFD) analizi ve optimizasyon teknikleri yer almaktadır. Geometrik dönüşüm aşamasında, önde bulunan tuberküllerin tasarımını optimize etmek için F-spline eğrileri kullanılarak parametrik bir dönüşüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, farklı tuberkül konfigürasyonlarının oluşturulmasına olanak tanımakta ve akışın daha iyi yönetilmesi ile aerodinamik performansın artırılması amacıyla optimize edilmiştir. Aerodinamik performansın değerlendirilmesi için, Reynolds sayısı 10^5 olan koşullarda NACA0020 kesit profili kullanılarak üç boyutlu akış simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, akışın laminar ve türbülanslı özelliklerini incelemek için Reynolds-ortalama Navier-Stokes denklemleri kullanılarak yapılmış ve akışın ayrışma noktaları, vortex yapıları ve basınç dağılımları gibi önemli aerodinamik parametreler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Optimizasyon süreci, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) ve Kriging Modeli tabanlı Response Surface Method (RSM) kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, geniş bir tasarım alanında yeterli bir global arama yapma imkânı sunarak, optimal tasarımın elde edilmesine kadar devam etmiştir. Serrasyonlar, kanat profiline üst ve alt yüzeylerinde vortex yapılarının oluşumunu etkileyerek, akışın ayrışmasını ve taşıma kuvvetini artırmaktadır. Çalışmada, tuberküllerin varlığının akışın daha iyi kontrol edilmesine ve stall açısının artırılmasına yardımcı olduğu gösterilmiştir. Elde edilen dört optimal biyonik kanat profili, stall açısını artırmış ve taşıma kuvvetini önemli ölçüde iyileştirmiştir (Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021). Çalışmada kullanılan kanat profili geometrileri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İki Kanat Geometrilerinin Karşılaştırılması: (a) Düzgün Kanat Profili (b) Serrasyonlu Kanat Profili (Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021)

Agrawal ve Sharma çalışmalarında dairesel bir silindir ve kanat profili arasındaki aerodinamik etkileşimden kaynaklanan gürültüyü sayısal olarak analiz etmişlerdir. Sıkıştırılmaz Large Eddy Simulation (LES) ve Curle'nin akustik benzetimini kullanarak yapılan bu çalışmada, serrasyonlu bir kanat profili kullanımının aerodinamik gürültüyü azaltabileceği ve uzak alan ses seviyesinde yaklaşık 1,5 dB'lik bir azalma sağladığı bulunmuştur (Agrawal & Sharma, 2016).

Bu çalışmaların her biri, HKS ve diğer kenar işleme yöntemlerinin hem aerodinamik performansı iyileştirme hem de gürültü azaltma potansiyeli sunduğunu ve bu alanlardaki araştırmaların havacılık teknolojilerinin daha sürdürülebilir hale getirilmesine katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

2.2. Firar Kenarı Serrasyonlarının Rolü

Firar kenarı, kanat ya da pervane gibi aerodinamik yüzeylerin arka bölümüdür ve bu bölge, akışın ayrılma ve yeniden birleşme noktasıdır (Aşkan & Tangöz, 2018). Bu durum, aerodinamik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Aerodinamik gürültü, yaklaşık altmış yıldır hem teknolojik bir zorluk hem de analitik, sayısal ve deneysel araştırmaların merkezinde yer almıştır. Firar kenarlarının tasarımı, gürültü azaltma, taşıma kuvvetinin artırılması ve genel aerodinamik verimliliğin iyileştirilmesi amacıyla önemli bir araştırma alanıdır. Özellikle son yirmi yılda, türbülanslı akışta firar kenarı gürültüsünü azaltmaya yönelik çalışmalarda artış gözlenmektedir. Literatürdeki çalışmalar, kanat profillerinin hücum ya da firar kenarlarında serrasyonlar oluşturularak gürültüyü azaltma

potansiyeli hakkında bilgi vermektedir. Ye vd., serrasyonlu firar kenarlarının akışın kontrolünü sağlayarak hem gürültüyü azaltma hem de aerodinamik performansı artırma potansiyeline sahip olduğunu çalışmalarında belirtmiştir (Ye, Zheng, Zhang, & Li, 2022). Bu yaklaşım, havacılık endüstrisi ve rüzgâr enerjisi sektöründe daha sessiz ve verimli kanatların tasarlanmasına olanak tanıyabileceği görülmüştür. Ancak, çeşitli firar kenarı tasarımlarının karşılaştırmalı bir analizi ve bu tasarımların optimizasyonu için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Firar kenarlarının aerodinamik ve akustik özelliklerinin derinlemesine anlaşılması ve optimize edilmesi hem havacılık hem de rüzgâr enerjisi sektörlerinde daha sessiz ve verimli sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Qaissi, Elsayed, Faqir, & Essadiqi, 2023). Bu bilgiler doğrultusunda, firar kenarı serrasyonları bu makalede teorik tahminler, sayısal simülasyon çalışmaları ve deneysel çalışmalar olmak üzere üç aşamada incelenmiştir. Teorik tahminler, serrasyonların aerodinamik ve akustik performans üzerindeki etkilerini öngörmek için temel bir çerçeve sunarken, sayısal simülasyon çalışmaları akış yapısını detaylı bir şekilde modelleyerek bu etkileri görselleştirme ve analiz etme imkânı sağlamaktadır. Son olarak, deneysel çalışmalar, bu teorik ve sayısal sonuçların gerçek dünya koşullarında doğrulanmasına olanak tanımaktadır.

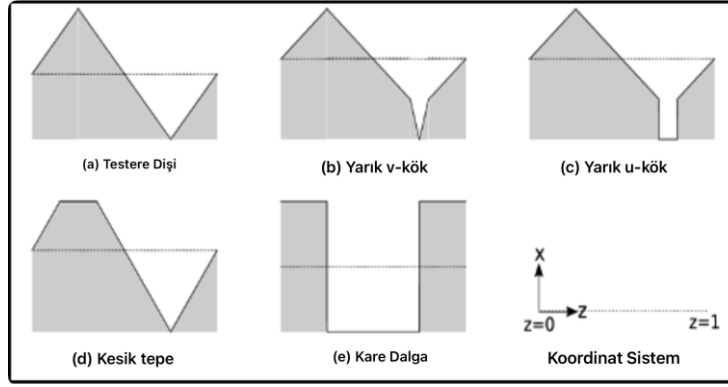
2.2.1. Teorik tahminler

Serrasyonlu kenar tasarımlarının, düşük Mach sayılı türbülanslı akışlarda ve çeşitli geometrik parametrelerde gürültü azaltmadaki potansiyeli uzun zamandır ilgi çeken bir araştırma konusu olmaktadır. Bu konudaki teorik çalışmalar, serrasyonların ses üretimine etkisini inceleyerek daha verimli tasarımlar geliştirmeye ışık tutmaktadır. Bu bağlamda, Howe (Howe, 1991) ve Ayton (Ayton, 2018) tarafından yapılan teorik çalışmalar, serrasyon geometrisinin akustik etkilerini farklı yaklaşımlarla değerlendirmektedir. Her iki çalışma da teorik tahminlere dayalı olarak, serrasyonlu kenarların gürültü azaltma performansını belirleyen kritik faktörleri ortaya koymaktadır.

Serrasyonlu bir kenara sahip bir plakadan kaynaklanan gürültüyle ilgili ilk teorik tahminler, 1991 yılında M. S. Howe tarafından yapılmıştır (Lee, ve diğerleri, 2021). Howe, düşük Mach sayılı türbülanslı akışın düz bir plaka kanadının serrasyonlu kenarı üzerinde ürettiği gürültüyü teorik olarak incelemiştir. (Howe, 1991) çalışmasına göre, serrasyonlu kenarın ses yoğunluğunu azaltma potansiyeline sahip olduğu uzun zamandır düşünülmektedir. Howe, sesin azalmasını, ses üretimine katkıda bulunan kanat kenarının açıklık uzunluğunda etkili bir azalmadan kaynaklandığını öne sürmüştür. Bu teoriye göre, düzgün değişen serrasyonların ses azaltma etkisi, kanat kenarının açıklık uzunluğunda etkili bir azalma ile ilişkilidir. Ayrıca, jet motoru test hücrelerinin çevresel gürültüsünü azaltmak için egzoz rampasının serrasyonlu olması gerektiğini öneren çalışmalar, bu yöntemle 5 dB veya daha fazla bir azalma sağlanabileceğini göstermiştir. Howe'un bu yöntemle birlikte, serrasyonlu kenar tasarımının gürültü azaltma potansiyelini belirlemek amacıyla eğim açısı, boyutlar ve serrasyon tipi gibi faktörler incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, eğim açısının gürültü seviyelerinde belirgin azalmalar sağlayabileceği gözlemlenmiştir. Howe, kenarlarının akış yönüne göre 45 dereceden daha küçük bir açıyla eğimli olan veya $\lambda/h < 4$ olan serrasyonların, firar kenarı gürültü azaltmasını yaklaşık olarak $10 \log[1 + (4h/\lambda)^2]$ dB olarak bildirmiştir. Burada, λ spanwise dalga boyunu ve h kökten uca mesafeyi temsil etmektedir. Ayrıca, serrasyon tipinin (düzgün serrasyonlu veya sinüzoidal serrasyonlu) gürültü azaltma potansiyelini etkilediği ve uygun bir serrasyon tipinin seçilmesinin gürültü azaltma performansını artırabileceği sonucuna varılmıştır.

Howe'un teorik analizleri, serrasyonların kanat kenarındaki açıklık uzunluğunda yarattığı azalmaların gürültü seviyelerinde belirgin bir düşüşe yol açabileceğini göstermektedir. Bu teorik temele dayanan daha sonraki çalışmalarda, Ayton gibi araştırmacılar serrasyonlu geometrilerin aerodinamik gürültü üzerindeki etkilerini daha ayrıntılı olarak incelemiş ve farklı geometrik düzenlemelerin, özellikle yüksek frekanslarda gürültü azaltımında belirgin farklar yarattığını gözlemlenmişlerdir (Ayton, 2018).

Çalışma sırasında analiz edilen beş farklı firar kenarı geometrisi kullanılmıştır (Şekil 2): Serrasyonlu, yarı V-kök, yarı U-kök, kesik tepe ve kare dalga olarak gösterilmektedir. Analizler, bu geometrilerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü azaltma potansiyelini ortaya koymaktadır. Düşük frekanslarda (yaklaşık 200 Hz civarında), kare dalga geometrisi, gürültü seviyelerinde yaklaşık 10 dB'lik bir azalma sağlamaktadır. Bu, düşük frekanslarda yıkıcı girişimin etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. Fırar Kenarı Geometrileri (Ayton, 2018)

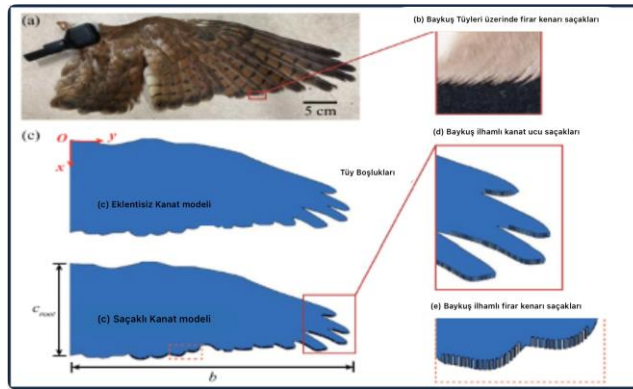
Yüksek frekanslarda (yaklaşık 2000 Hz ve üzeri) serrasyonların etkisi daha belirgin halde incelenen çalışmada görülmektedir. Ayrıca çalışmada, serrasyonların, akustik enerjinin düşük kesim modlarından yüksek kesim modlarına yeniden dağıtılmasına yardımcı olduğu belirtilmektedir. Bu mekanizma, özellikle düz kesim olmayan geometriler için daha etkili olmaktadır. Düz kenar geometrisi ile karşılaştırıldığında, serrasyonlu kenar geometrisi, 4000 Hz'de gürültü seviyelerinde yaklaşık 4 dB'lik bir azalma sağlamaktadır.

Genel olarak, serrasyonların aerodinamik gürültü üzerindeki etkileri, hem deneysel hem de analitik sonuçlarla desteklenerek, gelecekteki aerodinamik tasarımlar için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır (Ayton, 2018).

Çalışmalardan elde edilen bulgular, fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü üzerinde önemli bir azaltma etkisi sağladığını ortaya koymaktadır. Howe'un teorik analizleri, serrasyonların kanat kenarındaki açıklık uzunluğunu küçülterek ses yoğunluğunu azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Ayton'un sayısal simülasyonlar ve teorik tahminlere dayanan çalışması ise, farklı geometrik düzenlemelerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü seviyelerinde önemli azalmalar sağladığını ortaya koymuştur.

2.2.2. Sayısal simülasyon çalışmaları

Optimizasyon odaklı yaklaşımlar, mühendislik tasarımlarına yeni bir boyut kazandırırken, doğadan ilham alan biyomimetik çözümler, yenilikçi uygulamaların kapısını aralamaktadır (Timothy, 2024). Bu tür çalışmalar, doğal sistemlerin benzersiz gürültü azaltma mekanizmalarını teknolojiyle birleştirmeyi amaçlaması bir simülasyon örneği olarak görülebilmektedir. Başlıca doğal simülasyon örneği olarak dikkat edilen husus baykuş kanatları olarak literatürde yer almaktadır. Baykuş kanatları, doğanın mühendislik harikalarından biri olarak kabul edilmekte ve özellikle sessiz uçuş yetenekleri ile dikkat çekmektedir. Bu doğal tasarım, modern havacılıkta gürültü azaltma ve aerodinamik performansın artırılması konusunda ilham kaynağı olmuştur. Jiaxin Rong ve arkadaşlarının çalışması, baykuş kanatlarının özel geometrik özelliklerinin aerodinamik performansa ve gürültü seviyelerine etkilerini araştırmaktadır. Şekil 3'te gösterilen kıvrımlı hücum kenarı, dalgalı fırar kenarı ve tüy yuvaları gibi detayların aerodinamik avantajları ve gürültü azaltma potansiyeli, aeroakustik simülasyonlar kullanılarak değerlendirilmiştir (Rong, ve diğerleri, 2024).



Şekil 3. (a) Japon Baykuşunun (Ninox Japonica) Sağ Kanadının Bir Fotoğrafı (b) Baykuş Tüyünün Fırar Kenarının Yakın Çekimi (c) Baykuş Kanat Geometrisine Dayalı İki 3D Kanat Modeli (d) Kanat Ucundaki Saçak Benzeri Yapılar (e) Fırar Kenarı üzerindeki Saçak Benzeri Yapılar (Rong, ve diğerleri, 2024)

Simülasyon sonuçları, baykuş kanatlarının firar kenarındaki saçakların hem aerodinamik performansı artırdığını hem de gürültü seviyelerini düşürdüğünü göstermektedir. Firar kenar saçakları, akışı düzenleyerek taşıma kuvvetini artırmakta ve sürüklenme kuvvetini azaltmaktadır. Ayrıca, saçaklar akışın düzensizliklerini azaltarak ve girdap oluşumunu kontrol ederek gürültü seviyelerini düşürmektedir. Saçakların esnekliği ve şekli, akış üzerindeki etkileri belirleyerek, esnek saçakların akışı daha etkili bir şekilde kontrol edebildiği ve gürültüyü azaltabildiği bulunmuştur (Rong, ve diğerleri, 2024). Bu amaçla aşağıda kanat modelleri ve akustik simülasyonlara ayrıca yer verilmiştir.

- ⇒ **Kanat Modelleri:** Baykuş kanatlarının geometrik özelliklerine dayalı olarak iki farklı kanat modeli oluşturulmuştur. Bu modeller, kıvrımlı hücum kenarı, dalgalı firar kenarı ve firar kenarı saçakları gibi özel özellikler içermektedir.
- ⇒ **Aeroakustik Simülasyonlar:** Kanat modellerinin aerodinamik ve akustik performanslarını değerlendirmek için simülasyonlar yapılmıştır. Bu simülasyonlar, saçakların akış üzerindeki etkilerini ve gürültü seviyelerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

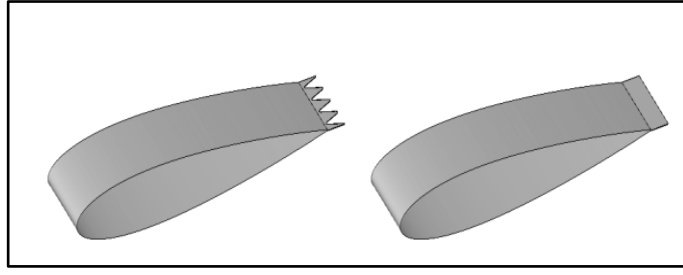
Firar kenarı serrasyonları, yalnızca gürültü azaltma amacıyla değil, aynı zamanda aerodinamik verimliliği artırmak için de kullanılabileceğini göstermek için Jones ve Sandberg, NACA-0012 kanat profilinin firar kenarına eklenen serrasyonların (Şekil 4) aerodinamik gürültü üzerindeki etkilerini incelemektedir. Kanat profili gürültüsü, özellikle rüzgâr türbinleri ve diğer aerodinamik yapılar için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Çalışmanın temel amacı, serrasyonların kanat profilinin kendine ait gürültü seviyelerini nasıl etkilediğini anlamak ve bu bilgiyi daha iyi tasarımlar geliştirmek için kullanmaktır.

Araştırmada, doğrudan sayısal simülasyon (DNS) yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, akışın karmaşık dinamiklerini modellemek için tercih edilmiştir ve özellikle yüksek Reynolds sayıları ile karakterize edilen akışlarda etkili sonuçlar vermektedir. Çalışmada, NACA-0012 kanat profilinin 5° ve 7° açılarıyla incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu açıların seçilmesi, akışın laminar ve türbülanslı bölgeleri arasındaki geçişin incelenmesine olanak tanımaktadır. Reynolds sayısı, akışın karakterini belirleyen önemli bir parametre olup, bu çalışmada $Re=5 \times 10^4$ olarak belirlenmiştir. Bu değer, akışın laminar ve türbülanslı özelliklerini etkileyen bir aralıkta yer almaktadır.

Serrasyonlar, düz bir plaka uzantısı olarak tasarlanmış ve bu sayede sınır tabakasının etkisi minimize edilmiştir. Serrasyonların geometrisi, akışın dinamiklerini değiştirecek şekilde optimize edilmiştir. Serrasyonların, akışın altındaki gürültü seviyelerini azaltma potansiyeli, özellikle düşük frekanslı gürültüde belirgin hale gelmiştir. Çalışma, serrasyonların akışın altındaki gürültü seviyelerini 2-3 dB oranında azaltabileceğini göstermektedir. Bu azalma, özellikle düşük frekanslarda daha belirgin hale gelmiş ve rüzgâr hızı arttıkça etkisi artmıştır.

Serrasyonların etkisi, akışın üst yüzeyindeki ek gürültü kaynaklarının etkisiyle de ilişkilidir. Düşük frekanslarda, firar kenarı gürültüsü baskınken, yüksek frekanslarda üst yüzeydeki ek gürültü kaynakları daha önemli hale gelmektedir. Serrasyonlar, akışın altındaki gürültü seviyelerini azaltarak, akışın üst yüzeyindeki gürültü kaynaklarının etkisini dengelemektedir. Bu durum, akışın dinamiklerini ve gürültü üretim mekanizmalarını anlamak için önemlidir (Jones & Sandberg, 2010).

Sonuç olarak bu çalışma, serrasyonların kanat profili gürültüsünü azaltma potansiyelini ortaya koymuş ve bu mekanizmaların anlaşılmasının, gelecekteki tasarım iyileştirmeleri için önemli bir temel oluşturduğunu göstermiştir. Serrasyonların aerodinamik performansı olumsuz etkilemeden gürültü seviyelerini azaltma yeteneği, rüzgâr türbini ve diğer aerodinamik yapıların tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Bu bulgular, kanat profili tasarımında gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesine yönelik yeni yaklaşımlar sunmaktadır (Jones & Sandberg, 2010).



Şekil 4. Serrasyonlu (solda) ve Düz (sağda) Firar Kenarı Uzantısı ile Kanat Profili Geometrisi (Jones & Sandberg, 2010)

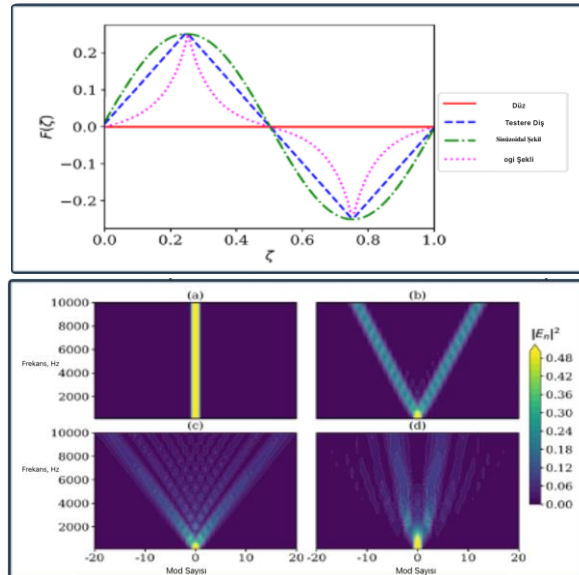
Serrasyonların şekli, boyutlandırılması ve geometrik parametrelerinin akış dinamikleri üzerindeki etkisi, özellikle düşük gürültü hedefleyen uygulamalarda büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu kapsamda, Pavel Kholodov ve Stéphane Moreau 2021 yılında firar kenarı serrasyonlu şekillerinin gürültü azaltma üzerindeki etkilerini optimize etmek amacıyla bir çalışma yürütmüştür (Kholodov & Moreau, 2021). Bu çalışma, hava akışının gürültü azaltma potansiyelini artırmak amacıyla firar kenarı serrasyonlarının optimizasyonunu ele almaktadır. Serrasyonların aerodinamik etkileri, özellikle Reynolds sayısı ile ilişkilidir. Bu çalışma bağlamında, düşük Reynolds sayılarında (10^4 civarı) serrasyonların etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Düşük Reynolds sayılarında, serrasyonlar, akışın daha düzenli hale gelmesine ve dolayısıyla gürültü seviyelerinin düşmesine yardımcı olmaktadır. Ancak, yüksek Reynolds sayılarında, akışın daha karmaşık hale gelmesi ve türbülansın artması, serrasyonların etkisini azaltabilmektedir.

Çalışmada, serrasyonların şekli, genliği ve dalga boyu gibi geometrik parametreler üzerinde durulmuştur.

Serrasyon Genliği: Serrasyon genliğinin artırılması, gürültü düzeyinin azalmasında olumlu bir etki yaratmıştır. Serrasyonların genliğinin artırılması, akışın bölgesel dinamiklerini değiştirerek, aerodinamik gürültüyü etkili bir şekilde azaltmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, daha yüksek genlikli serrasyonların gürültü azaltmada daha fazla verim sağladığını göstermektedir.

Serrasyon Dalga Boyu: Farklı dalga boylarına sahip serrasyon yapılarının incelendiği analizler, dalga boyunun uzaması ile optimal şeklin ogi'den testere dişli ve daha sonra sinusoidal veya v şekline geçiş yaptığını ortaya koymuştur (Şekil 5). Bu geçiş, gürültü azaltmanın daha homojen ve etkili bir şekilde sağlanması açısından önemlidir. Özellikle daha uzun dalga boylarında gürültü azaltma etkisinin belirgin ölçüde arttığı görülmüştür.

Serrasyon Şekli: Çalışmada, serrasyonların şeklinin gürültü üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Serrasyonlar Ayton'un çalışmaları baz alınarak (Ayton, 2018), genellikle üç ana şekil altında sınıflandırılmaktadır: kesik tepe (chopped-peak), v-köklü (v-rooted) ve dişli (sawtooth) serrasyonlar. Yapılan optimizasyon çalışmaları, en iyi gürültü azaltma performansını sağlayan şeklin kesik tepe ve v-köklü serrasyonların bir kombinasyonu olduğunu göstermiştir. Bu bulgu, Ayton'un teorik bulgularını da desteklemektedir; zira yarık v-köklü serrasyonların, düz ve dikdörtgen kesitli şekillere göre daha faydalı olduğu ortaya konmuştur.



Şekil 5. Farklı Fırar Kesit Şekilleri için Oluşturulan Radyasyon İntegralinin Kontur Grafları: (a) Düz Kenar (b) Serrasyon Şekil (c) Sinüzoidal Şekil (d) Ogi Şekil (Kholodov & Moreau, 2021)

Analitik model, serrasyonların etkisini daha iyi anlamak için çeşitli geometrik parametreleri incelemektedir. Serrasyonların genliği ve dalga boyu gürültü azaltma performansını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Serrasyonların genliği arttıkça, gürültü azaltma potansiyeli de artmakta, ancak belirli bir noktadan sonra (genlik/ dalga boyu 0,15) bu etki azalmaktadır. Çalışmada, en iyi gürültü azaltma performansının, yüksek frekanslarda (1000 Hz üzeri) 10 dB'ye kadar bir azalma sağladığı belirtilmiştir. Özellikle, serrasyonların dalga boyunun artmasıyla birlikte, optimal şeklin değiştiği ve gürültü azaltma marjının en iyi ve en kötü şekil arasında azaldığı gözlemlenmiştir.

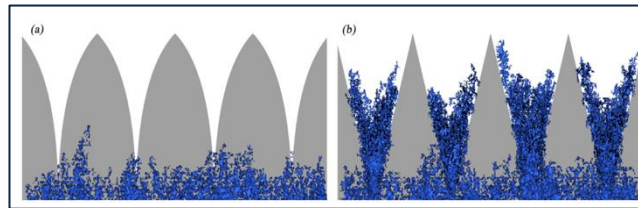
Bu çalışma, fırar kenarı serrasyonlarının şeklinin ve geometrik parametrelerinin, hava akışının gürültü seviyeleri üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemekte ve optimizasyon süreçleri ile en iyi performansı sağlayan tasarımları ortaya koymaktadır. Serrasyonların aerodinamik özellikleri, özellikle Reynolds sayısı gibi faktörlerle birleştiğinde, gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Çalışma, serrasyonların gürültü azaltma potansiyelinin, akış koşullarına bağlı olarak değiştiğini ve bu nedenle tasarım süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli bir faktör olduğunu vurgulamaktadır.

2017 yılında fırar kenarı geometrilerinin akustik performans üzerindeki etkilerini inceleyen diğer bir çalışmada Avallone ve ekibi özellikle geleneksel dişli (sawtooth) ve demir şekilli (iron-shaped) (Şekil 6) fırar kenarı serrasyonlarının akış dinamikleri ve gürültü spektrumları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde analiz etmiştir.

Deneyel tasarımda, düz bir plaka üzerinde sıfır hücum açısıyla birlikte dişli fırar kenar geometrileri incelenmiştir. Deneyel model, üçgen dişliler ve demir şekilli dişliler ile donatılmıştır. Akustik gürültü, Ffowcs-Williams ve Hawkins (FWH) analojisi kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneylerde, serbest akış hızı $U_1=20\text{m/s}$ olarak belirlenmiştir. Bu koşullar altında, farklı Reynolds sayıları hesaplanmıştır.

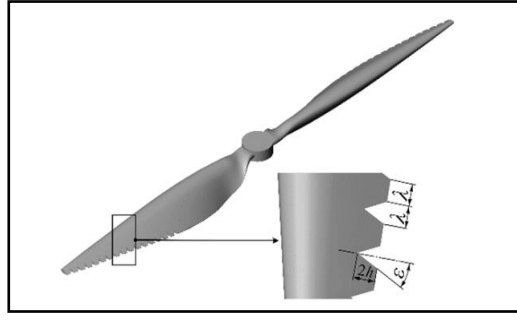
Çalışmada, demir şekilli dişlinin, geleneksel üçgen dişlilere göre daha iyi bir gürültü azaltma performansı sergilediği bulunmuştur. Özellikle, yüksek frekanslarda gürültü azaltma yoğunluğu $10 \log[1 + (4h/\lambda)^2]$ dB formülü ile tahmin edilmiştir. Burada λ dişli dalga boyunu, h ise dişli yüksekliğini temsil etmektedir. Deneyel sonuçlar, demir şekilli dişlilerin, geleneksel tasarımlara göre daha düşük gürültü seviyeleri sağladığını göstermektedir. Belirli frekans aralıklarında gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir; bu azalma, özellikle düşük frekanslarda daha belirgin olup, gürültü seviyelerinde yaklaşık 3 dB ile 5 dB arasında bir düşüş sağlanmıştır.

Akustik güç spektrumları, mikrofon ile kaydedilen basınç dalgalanmalarının zaman serilerinden elde edilmiştir. Bu veriler, dişli tasarımlarının akustik performansını değerlendirmek için kullanılmıştır. Sonuçlar, aeroakustik tasarımlar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda, farklı dişli geometrileri ve akış koşulları altında daha fazla deney yapılması önerilmektedir (Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017).



Şekil 6. Demir Şekilli (a) ve Üçgen Serrasyon (b) Fırar Kenarı (Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017)

Fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltma üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar, farklı tasarımların performansını değerlendirmeye yönelik önemli bulgular sunmaktadır. 2018 yılında Jieyan Chen ve ekibinin gerçekleştirdiği çalışma, yarı düz uçlu serrasyonlu kenarların (Şekil 7) aerodinamik gürültü performansını incelemek amacıyla dar serrasyonlu ve geniş serrasyonlu kanatların serrasyon tasarımını karşılaştırmaktadır. Araştırma, bu kanatların 3000 RPM dönerken gürültü seviyelerini nasıl etkilediğini değerlendirmek için çeşitli konumlarda gürültü ölçümleri gerçekleştirmiştir (Chen, Xie, & Lee, 2023).



Şekil 7. Yarım Düz Uçlu Serrasyonlu Pervane (Chen, Xie, & Lee, 2023)

Elde edilen sonuçlar, geniş serrasyonlu kanadın genel olarak daha etkili bir gürültü azaltma performansı sergilediğini göstermektedir. Geniş serrasyonlu kanat, belirli bir konumda 3,3 dBA'ya kadar gürültü azaltma sağlarken, dar serrasyonlu kanat ise daha düşük bir gürültü azaltma performansı göstermiştir. Bu durum, geniş serrasyonların akışın daha düzgün bir şekilde dağılmasına olanak tanıdığı ve dolayısıyla aerodinamik gürültüyü daha etkili bir şekilde azalttığı sonucunu desteklemektedir.

Gürültü spektrum analizi, döner kanatların aerodinamik gürültüsünün iki ana bileşenden oluştuğunu ortaya koymaktadır: döner gürültü ve geniş bant gürültüsü. Geniş serrasyonlu kanat, 600 Hz ile 2000 Hz arasındaki frekanslarda geniş bant gürültüsünü etkili bir şekilde azaltmış, bu frekans aralığında ses basıncı seviyeleri (SPL) sürekli olarak azalmıştır. Bu durum, gürültü seviyesinin düşmesine katkıda bulunmuş ve geniş serrasyonların aerodinamik performansı olumsuz etkilemeden gürültüyü azaltma potansiyelini vurgulamaktadır. Geniş serrasyonlu kanat, aerodinamik gürültü azaltma açısından daha avantajlı bir tasarım olarak öne çıkmakta ve bu çalışma, gelecekteki araştırmalar için önemli bir temel oluşturmaktadır. Bu bulgular bir araya geldiğinde, firar kenarı serrasyonlarının sadece gürültü azaltmada değil, aynı zamanda aerodinamik verimliliği artırmada da önemli bir araç olduğu görülmektedir. Her bir çalışmanın sunduğu farklı perspektifler, serrasyon tasarımı ve optimizasyonuna yönelik daha bütüncül yaklaşımlar geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu nedenle, bu araştırmaların sonuçları, gelecekteki mühendislik uygulamalarında ve gürültü azaltmaya yönelik yenilikçi tasarımların geliştirilmesinde yol gösterici bir rol üstlenmektedir.

Kanat profili gürültüsünün azaltılması için yenilikçi yaklaşımlar geliştirmek, havacılık ve mühendislik alanında önemli bir araştırma konusudur. Bu bağlamda, Chenghao Yang ve ekibi (Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024), hava üfleme ve firar kenarı kesitliliğini birleştiren hibrit üfleme-kesitlilik yöntemini inceleyerek, pasif ve aktif kontrol stratejilerinin birleşiminden elde edilen üstün gürültü azaltma performansını detaylı bir şekilde değerlendirmiştir. Çalışmada, NACA0012 tipi bir kanat profili üzerinde Reynolds sayısı $Re=4 \times 10^5$ koşullarında hava üfleme, firar kenarı kesitliliği ve hibrit üfleme-kesitlilik yöntemlerinin etkileri incelenmiştir (Şekil 8).

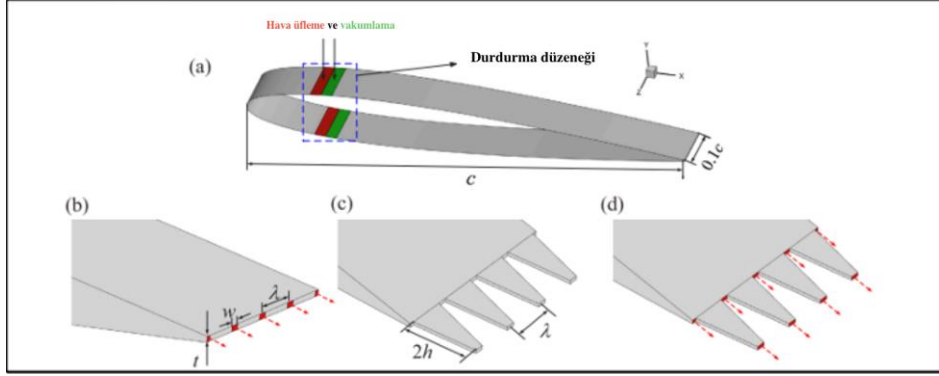
Hibrit yöntemin üç gürültü azaltım mekanizması üzerinden çalıştığı belirtilmektedir: üfleme, firar kenarı kökü ve ucu üzerindeki serrasyona doğru akış hareketini ortadan kaldırarak zorunlu akış hizalaması sağlamaktadır; yakın akıntıda türbülans enerjisini zayıflatmakta ve firar kenarında gürültü kaynaklarının yıkıcı müdahalesine neden olarak gürültü kaynaklarının arasındaki koheransı azaltmaktadır.

NACA 0012 kanat profilinin türbülanslı sınır tabakası firar kenarı gürültüsü üzerindeki etkilerini analiz etmek için incompressible Large Eddy Simulation (LES) yöntemi kullanılmıştır. Bu sayısal yöntem, ANSYS Fluent 19.2 ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, Ffowcs Williams-Hawkins akustik benzetimi kullanılarak yakın alan akış verileri ve akustik alan tahmin edilmiştir. Bu yöntemler, hava üfleme, firar kenarı serrasyonu ve hibrit üfleme-serrasyonu kontrol yöntemlerinin kanat profilinin kendi gürültüsü üzerindeki etkilerini karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçları şu şekilde özetlenebilmektedir:

- Hibrit üfleme-kesitlilik yöntemi geniş bant gürültüsünde %20,5 ve genel ses basınç seviyesinde 5,7 dB'ye kadar maksimum azalma sağlamıştır.

- Hibrit yöntem, üfleme, firar kenarı kökü ve ucu üzerindeki serrasyona doğru akış hareketini ortadan kaldırarak zorunlu akış hizalaması sağlamıştır.
- Yakın akıntıda türbülans enerjisini zayıflatarak gürültü azaltımı sağlamıştır.
- Firar kenarında gürültü kaynaklarının yıkıcı müdahalesine neden olarak gürültü kaynaklarının arasındaki koheransı azaltmıştır.
- Hibrit yöntem, aktif ve pasif kontrol yöntemlerine kıyasla üstün performans sergilemiştir.



Şekil 8. NACA0012 Kanat Profili Konfigürasyon Taslağı (Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024)

Şekil 8'de, (a)'daki kırmızı ve yeşil alan, tetikleme için tekdüze bir üfleme ve emmeyi temsil eder; (b)'deki kırmızı oklar, firar kenardaki üfleme jetlerini gösterir; (c)'de firar kenarı serrasyonlu durumu ve (d)'de serrasyon kökünde ve ucunda lokal üfleme ile hibrit üfleme-serrasyon durumu gösterilmektedir.

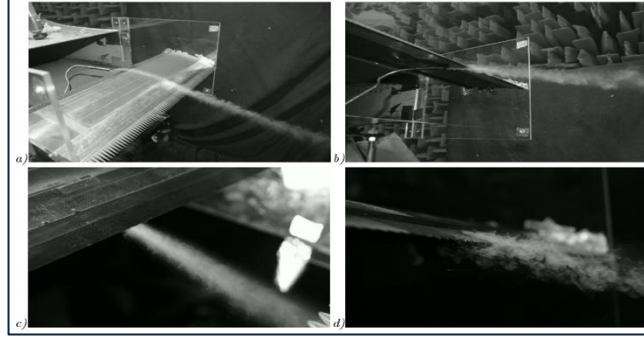
Firar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltma üzerindeki etkilerini inceleyen sayısal simülasyon çalışmalarından elde edilen bulgular, bu tasarım unsurlarının hem aerodinamik verimliliği artırma hem de gürültü seviyelerini düşürme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Baykuş kanatları gibi doğal tasarımlardan ilham alınarak yapılan simülasyonlar, serrasyonların aerodinamik performansı artırırken gürültüyü azalttığını ortaya koymuştur. Çalışmalarda, firar kenarı serrasyonlarının şekli, boyutu ve geometrik parametreleri, düşük Reynolds sayılarında özellikle etkili gürültü azaltma sağlarken, yüksek Reynolds sayılarında etkilerinin daha az belirgin olduğu bulunmuştur. Ayrıca, hibrit üfleme-kesitlilik yöntemlerinin birleştirilmesiyle sağlanan gürültü azaltma performansı, pasif ve aktif kontrol stratejilerinin kombinasyonunun gürültü seviyelerini daha etkili bir şekilde düşürebileceğini göstermektedir.

2.2.3. Deneysel çalışmalar

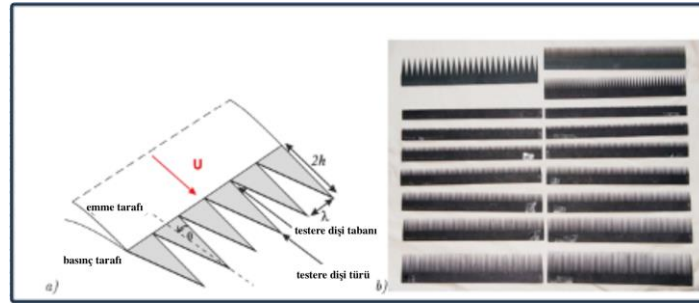
Gruber ve arkadaşları, NACA65(12)-10 profiline sahip bir kanat profili üzerinde serrasyonlu kenarların etkilerini deneysel olarak incelemiş (Şekil 9) ve Howe'un teorik modeli ile karşılaştırmıştır (Gruber, Joseph, & Chong, 2012). Deneyler, açık jetli bir rüzgâr tüneline gerçekleştirilmiştir. NACA65(12)-10 kanat profili üzerinde farklı serrasyonlu kenar geometrileri kullanılarak akustik ve aerodinamik ölçümler yapılmıştır. Test edilen geometriler, serrasyon yüksekliği (h), serrasyon periyodu (λ), sınır tabakası kalınlığı (δ) gibi parametreler üzerinden incelenmiştir (Şekil 10). Ayrıca, Strouhal sayısı ($St = f\delta/U0$) ve frekans bağımlılığı değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, keskin serrasyonlu kenarların belirli frekans aralıklarında gürültüyü azaltmada etkili olduğunu göstermiştir. Özellikle, gürültü azaltımının en etkili olduğu frekans aralığı, $St\delta = f\delta/U0 \sim 1$ olarak belirlenmiştir. Serrasyon yüksekliği ($h/\delta > 0,5$) arttıkça gürültü azaltımının daha belirgin hale geldiği ve $h/\delta > 2$ olduğunda maksimum verimliliğe ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ancak, h/λ oranının, Howe'nin teorik modeline göre, ses güç seviyesi farkında belirgin bir etki yaratmadığı tespit edilmiştir.

Howe'un teorik modelinin, bazı durumlarda deneysel verilerle uyumlu olmadığı ve gürültü azaltma seviyelerini aşırı tahmin ettiği görülmüştür. Bu, modelin sınır tabakası kalınlığı ve serrasyon geometrisi gibi parametreler üzerindeki etkisinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, gürültü azalmalarının yalnızca $\omega\delta/Uc < 9$ için gerçekleştiği ve $\omega\delta/Uc > 9$ için gürültü artışları olduğu belirlenmiştir.

Gruber ve arkadaşlarının çalışması, serrasyonlu kenarların gürültü azaltım potansiyelini başarılı bir şekilde ortaya koymuş, ancak Howe'un analitik çözümünün bazı durumlarda deneysel verilerle uyumlu olmadığını ve modelin iyileştirilmesi gerektiğini göstermiştir.



Şekil 9. Kanat Profili Etrafındaki Akışın Deneysel İncelenmesi (Gruber, Joseph, & Chong, 2012)



Şekil 10. (a) Bir Test Parametreleri h ve λ ile Test Edilen Serrasyonlu Kenarın bir Taslağı (b) Bir Lazer Kesici ile Üretilmiş Serrasyonlu Firar Kenarı Takımlarından bir Örneği Gösteren bir Fotoğraf (Gruber, Joseph, & Chong, 2012)

Havacılık endüstrisinde gürültü kontrolü, çevresel ve regülasyon gereksinimleri açısından büyük bir öneme sahiptir. Özellikle, tonal gürültü kontrolü, uçak performansını olumsuz etkileyebilecek unsurlardan biridir (Xie, Zhu, & Lee, 2023). Tze Pei Chong ve arkadaşları, NACA-0012 profiline sahip bir kanat profili üzerinde firar kenarı serrasyonlarının tonal gürültü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektedir (Chong & Joseph, 2013).

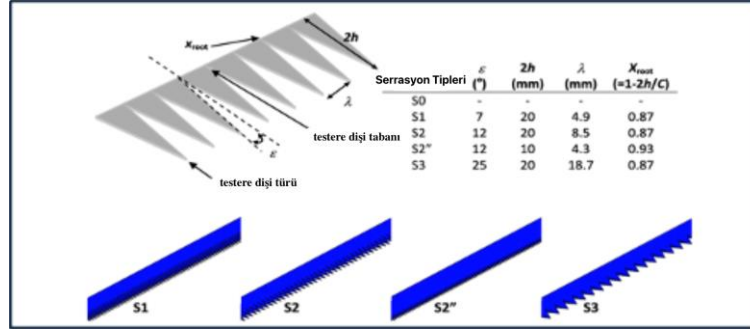
Deneysel çalışmalar, 0,15 m veter uzunluğuna ve 0,45 m kanat açıklığına sahip NACA-0012 kanat profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Firar kenarı serrasyonları üzerinde serrasyon açısı (ϵ), kökten uca mesafe ($2h$) ve serrasyon dalga boyu (λ) gibi parametreler test edilmiştir (Şekil 11).

Çalışmada, hava akış hızları 10 ile 60 m/s arasında değişirken, bu hızlar 1×10^5 ile 6×10^5 arasında Reynolds sayıları ile ilişkilendirilmiştir. Bu geniş Reynolds sayısı aralığı, düşük ve orta hızlarda kanat profilinin performansını anlamak için kritik öneme sahiptir.

Firar kenarındaki serrasyonların etkisi, özellikle tonal gürültü seviyelerinin azaltılması açısından belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Çalışmada, serrasyon açısı (ϵ) ve serrasyon uzunluğu ($2h$) gibi iki ana parametrenin, tonal gürültü seviyelerini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Serrasyonların, akışın kararsızlıklarını ve gürültü kaynaklarını nasıl etkilediği üzerine yapılan analizler, Tollmien-Schlichting (T-S) dalgaları ve ayrılma baloncuklarının (separation bubble) rolünü vurgulamaktadır. Bu iki unsur, kanat profilinin firar kenarından yayılan tonal gürültünün etkili bir şekilde radyasyonunu sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Serrasyonlar, akışın yapısını değiştirerek, firar kenarı üzerindeki akış kararsızlıklarını azaltmakta ve bu sayede gürültü seviyelerini düşürmektedir. Özellikle, serrasyonlu firar kenarının varlığı, akışın daha karmaşık hale gelmesine ve bu sayede gürültü kaynaklarının etkisinin azalmasına yol açmaktadır. Çalışmada, düz firar kenarı ile serrasyonlu firar kenarı arasındaki farklar incelenmiş ve serrasyonlu firar kenarının, akışın kararsızlıklarını bastırarak, gürültü seviyelerini önemli ölçüde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Tonal gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma sağlanmış ve bu azalma, 3 dB ile 10 dB arasında değişen değerlerle ifade edilmiştir.

Ayrıca, deneysel ölçümler sırasında, akışın ayrılma noktalarının belirlenmesi için geliştirilen bir teknik, ayrılma bölgesinin varlığını tespit etmekte kullanılmıştır. Bu teknik, T–S dalgalarının konvektif faz kaymasını kullanarak, ayrılma noktasının kanat profilinin basınç yüzeyine yakın bir konumda olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, serrasyonlu firar kenarlarının aerodinamik performansını ve gürültü kontrolünü etkileyen önemli bir faktördür.



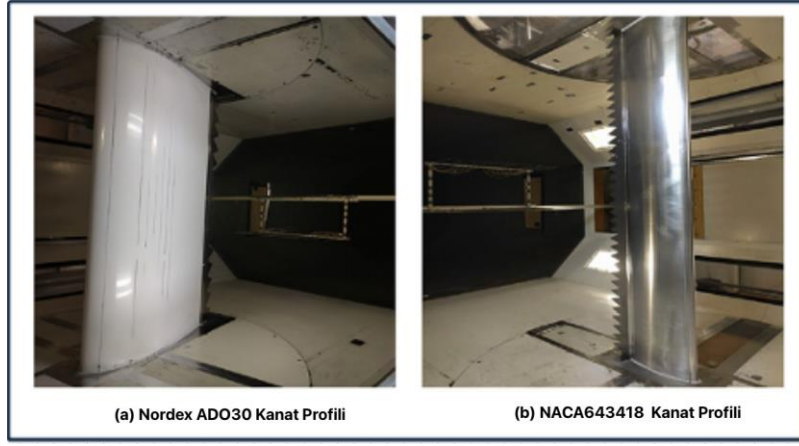
Şekil 11. Kanat Profilinin Firar Kenarındaki Serrasyonla İlişkili Parametreler (Chong & Joseph, 2013)

Rüzgâr türbinleri, enerji üretiminde önemli bir rol oynamaktadır, ancak bu türbinlerin çalışma sırasında ürettiği gürültü, çevresel etki ve toplumsal kabul açısından sorun teşkil edebilir. Bu nedenle, rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik özelliklerini iyileştirmek ve gürültüyü azaltmak için yeni yöntemler geliştirmek önemlidir (Liu, 2017). Llorente & Ragni (Llorente & Ragni, 2020) çalışmalarında, rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik performansını artırmak amacıyla firar kenarı serrasyonlarının etkilerini detaylı bir şekilde incelemektedir. Araştırmada, Nordex ADO30 ve NACA64 3 418 (Şekil 12) gibi iki farklı kanat profili kullanılarak, serrasyonların aerodinamik özellikler üzerindeki etkileri deneysel rüzgâr tüneli testleri ile değerlendirilmiştir. Rüzgâr tüneli testleri, 75 m/s hızda çalıştırılarak, ADO30 için $Re_c = 3,10^6$ ve NACA64 3 418 için $Re_c = 1,10^6$ gibi chord tabanlı Reynolds sayıları elde edilmiştir.

Firar kenarı serrasyonlarının özellikle taşıma katsayısında önemli artışlar sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışmada, serrasyonların firar kenar uzunluğunun azaltılması gibi bir etki yaratarak, belirli hücum açılarında taşıma kuvvetini artırdığı belirtilmiştir. NACA64 3 418 kanat profili için yapılan testlerde, serrasyonların varlığı ile birlikte maksimum taşıma katsayısında %15'e kadar bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum, serrasyonların flap gibi davrandığını ve böylece rüzgâr türbini performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Serrasyonların flap açısı ile birlikte artırılması, genellikle taşıma kuvvetinde bir artışla ilişkilendirilmiştir, ancak bu durumun sürüklenme kuvvetinde aynı oranda bir artışa neden olmadığı vurgulanmıştır. Bu, türbinin operasyonel verimliliği açısından faydalı bir durumdur.

Ayrıca, firar kenarı serrasyonlarının gürültü azaltma potansiyeli de önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir. Çalışmada, serrasyonların uygulanması ile birlikte gürültü seviyelerinde belirgin bir azalma sağlandığı belirtilmiştir. Yapılan deneylerde, firar kenarı serrasyonları ile donatılmış bir rüzgâr türbini, 3 dB'e kadar gürültü seviyesinde azalma göstermiştir. Bu azalma, özellikle düşük ve orta frekanslarda daha belirgin olup, yüksek frekanslarda ise bazı dezavantajlar ortaya çıkabilmektedir. Çalışmada, serrasyonların etkisinin tam bir rüzgâr türbini analizi için genişletilmesi amacıyla Bladed yazılımı kullanılmıştır. Serrasyonlar, kanat uzunluğunun son %40'lık kısmına yerleştirilmiş ve bu sayede aerodinamik verimlilikteki artışlar hesaplanmıştır.

Özetle, firar kenarı serrasyonlarının rüzgâr türbini performansına olan etkileri, toplam yükler ve enerji üretimi açısından nicel olarak değerlendirilmiştir. Serrasyonların varlığı ile yokluğu arasındaki güç eğrileri karşılaştırılmış ve teorik tahminlerle deneysel veriler arasında tutarlılık sağlanmıştır. Bu çalışma, rüzgâr enerjisi endüstrisinde gürültü azaltma ve aerodinamik verimliliği artırma potansiyeli taşıyan bir yaklaşım sunmaktadır. Serrasyonların aerodinamik performans üzerindeki etkileri hem deneysel hem de teorik olarak desteklenmiş ve bu alandaki bilgi birikimine önemli katkılarda bulunmuştur.



Şekil 12. Fırar Kenarı Serrasyonlu ve Serrasyonsuz olarak Test Edilen iki Farklı Kanat Profili Modeli (Llorente & Ragni, 2020)

3. TARTIŞMA

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, fırar kenarı serrasyonlarının aerodinamik gürültü azaltmada önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Serrasyonların türbülanslı akış yapısını bozarak gürültü seviyelerini düşürdüğü ve bu sırada aerodinamik performansı koruduğu bulgusu, literatürdeki birçok çalışma ile paralellik göstermektedir. Ancak, bazı teorik modellerin deneysel sonuçlarla tam anlamıyla örtüşmediği ve özellikle sınır tabakası kalınlığı gibi faktörlerin gürültü azaltma performansı üzerindeki etkilerinin daha fazla araştırılması gerektiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada, fırar kenarı serrasyonlarının, özellikle düşük frekanslı gürültü bileşenlerini etkili bir şekilde azaltabildiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, serrasyonların aerodinamik yapıların gürültü yönetiminde ne kadar önemli bir araç olduğunu vurgulamaktadır. Bununla birlikte, bu modifikasyonların bazı uçuş koşullarında, özellikle yüksek hızlarda, beklenenden daha az etkili olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Serrasyon geometrisinin optimize edilmesi, bu teknolojinin potansiyelini tam olarak kullanmak için kritik bir faktördür. Bu bağlamda, fırar kenarı tasarımında yapılan bu tür modifikasyonların sadece gürültü azaltımı için değil, aynı zamanda uçakların genel performansını iyileştirmek için de kullanılabileceği görülmüştür. Gelecekteki çalışmaların, farklı geometrik yapıların ve uçuş koşullarının etkilerini daha derinlemesine incelemesi, havacılık ve diğer aerodinamik uygulamalarda sürdürülebilir gürültü azaltma stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, havacılık sektöründe gürültü azaltmaya yönelik aerodinamik stratejilerin teorik temelleri ve pratik uygulamaları incelenmiştir. Çalışmanın ana odağı, özellikle fırar kenarı tasarımlarının aerodinamik performansa ve gürültü azaltımına olan etkilerini anlamaya yöneliktir. Literatürde ele alınan türbülanslı sınır tabaka fırar kenarı gürültüsü, akışın ayrılmasına bağlı olarak ortaya çıkan gürültü türleri gibi gürültü mekanizmaları, fırar kenarlarının optimize edilmesiyle kontrol edilebilmektedir. Elde edilen bulgular, fırar kenarı serrasyonlarının ve diğer geometrik modifikasyonların, özellikle düşük frekanslı gürültü bileşenlerini etkili bir şekilde azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgu, fırar kenarlarında yapılan aerodinamik tasarım değişikliklerinin, sadece gürültü seviyelerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda uçak performansını da iyileştirebileceğini ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan çalışmalar, serrasyonlar gibi kenar geometrisi modifikasyonlarının, özellikle yüksek Reynolds sayılarında aerodinamik gürültünün baskın olduğu durumlarda etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, serrasyonların akışın laminar-türbülans geçiş sürecini etkileyerek, türbülans yoğunluğunu ve dolayısıyla gürültü seviyelerini azalttığı da literatürle desteklenmektedir. Sonuç yorumları Tablo 3'te özetlenerek karşılaştırma sağlanması amaçlanmıştır.

Tablo 3. Fırar Kenarı Serrasyonları ile ilgili Çalışmaların Sonuçlarının Özeti

Yöntem	Çalışma	Elde Edilen Veriler	Sağladığı Faydalar
Teorik Modelleme ve Matematiksel Analiz	(Howe, 1991)	Serrasyonların ses yoğunluğunu azaltma etkisi	Serrasyonların ses azaltma potansiyelini açıklamış ve aerodinamik tasarımlar için rehberlik sağlamıştır.
	(Ayton, 2018)	Farklı fırar kenarı geometrilerinin gürültü seviyeleri üzerindeki etkileri	Serrasyonlu geometrilerin düşük ve yüksek frekanslarda gürültü azaltma potansiyelini göstermiştir.
Simülasyon ve Optimizasyon	(Kholodov & Moreau, 2021)	Serrasyon şekilleri ve dalga boylarının gürültü performansı	Dalga boyu ve genişliği optimize edilerek maksimum gürültü azaltımı elde edilmiştir.
	(Chen, Xie, & Lee, 2023)	Geniş ve dar serrasyonların aerodinamik gürültü üzerindeki etkileri	Geniş serrasyonlu kanat, belirli bir konumda 3,3 dBA'ya kadar gürültü azaltma sağlarken, dar serrasyonlu kanat ise daha düşük bir gürültü azaltma performansı göstermiştir.
	(Yang, Liu, Zhang, & Bi, 2024)	Hibrit üfleme-kesitlilik yönteminin gürültü azaltma etkileri	Geniş bant gürültüsünde %20,5, ses basınç seviyesinde 5,7 dB azalma sağlamıştır.
	(Agrawal & Sharma, 2016)	Kanat profili etrafındaki akışın akustik etkileri	Uzak alan ses seviyesinde 1,5 dB azalma sağlamıştır.
	(Avallone, Van Der Velden, & Ragni, 2017)	Serrasyon geometrisinin gürültü azaltma potansiyeli	Demir şekilli serrasyonlar geleneksel dişli serrasyonlara kıyasla daha fazla gürültü azaltmıştır.
	(Jones & Sandberg, 2010)	Serrasyonların türbülans üzerindeki etkileri	Türbülanslı akışın karışımını artırarak ses enerjisinin dağılmasını sağlamıştır.
	(Kim, ve diğerleri, 2022)	Kanat profillerinin yüzey pürüzlülüğü ve akış kontrolü etkileri	Laminar ayrılma baloncuklarını azaltarak taşıma katsayısını artırmış ve aeroakustik performansı iyileştirmiştir.
Deneysel Testler	(Gruber, Joseph, & Chong, 2012)	Serrasyonların gürültü azaltma performansı	Serrasyon yükseklik ve periyodu artırıldığında gürültü seviyelerinde azalma sağlamıştır.
	(Llorente & Ragni, 2020)	Serrasyonlu rüzgar türbini kanatlarının aerodinamik ve akustik etkileri	Taşıma kuvvetini artırmış ve gürültü seviyelerinde 3 dB azalma sağlamıştır.
	(Chong & Joseph, 2013)	Serrasyonların tonal gürültüyü 3-10 dB azalttığı	Gürültü kaynağı kontrolüne katkı sağlamıştır.

	(Rong, ve diğerleri, 2024)	Baykuş kanadı geometrisinin aerodinamik avantajları ve gürültü azaltma potansiyeli	Girdap oluşumunu kontrol ederek taşıma kuvvetini artırmış ve gürültü seviyelerini düşürmüştür.
Biyonik Tasarımlar	(Lu, Li, Chang, Chuang, & Xing, 2021)	Serrasyonlu kanat geometrisinin taşıma kuvveti ve stall açısı üzerindeki etkileri	Doğal yapılardan ilham alınarak akış kontrolü ve aerodinamik verimlilik sağlandı. Akış ayrışmasını kontrol ederek taşıma kuvvetini artırmış ve stall açısını iyileştirmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, firar kenarı tasarım modifikasyonlarının hem aerodinamik performans hem de gürültü azaltımı açısından önemli faydalar sunduğunu ortaya koymaktadır. Literatürdeki bulgularla uyumlu olarak, firar kenarı geometrisinin optimize edilmesi, havacılık araçlarında gürültü kontrolü için etkin bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, bu modifikasyonların farklı uçuş koşullarındaki performansını daha ayrıntılı olarak incelemeli ve endüstriyel uygulamalara yönelik rehber niteliğinde öneriler geliştirmelidir. Bu bağlamda, firar kenarı tasarımına yönelik araştırmaların, havacılık endüstrisinin çevresel ve operasyonel hedeflerine ulaşmasında kritik bir rol oynamaya devam edeceği değerlendirilmektedir.

ETİK BEYAN & GENEL AÇIKLAMALAR

Bu makale araştırma ve yayın etiği standartlarını karşılamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

Fikir/Kavram: Ş. Yeşil ve M. Yıldız; Tasarım: Ş. Yeşil; Veri Toplama/İşleme: Ş. Yeşil; Analiz/Yorum: Ş. Yeşil. Tüm yazarlar makalenin son halini okumuştur ve onaylamıştır.

FON

Söz konusu değildir.

VERİ VE MALZEME MÜSAİTLİĞİ

Söz konusu değildir.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışmalarının bulunmadığını belirtmektedir.

KAYNAKÇA

- Agrawal, B. R., & Sharma, A. (2016). Numerical analysis of aerodynamic noise mitigation via leading edge serrations for a rod-airfoil configuration. *International Journal of Aeroacoustics*, 15(8), s. 734-756. doi:10.1177/1475472X16672322
- Aşkan, A., & Tangöz, S. (2018). The impact of aspect ratio on aerodynamic performance and flow separation behavior of a model wing composed from different profiles. *Journal of Energy Systems*, 2(4), s. 224-237. doi:10.30521/jes.454215
- Avallone, F., Van Der Velden, W. C., & Ragni, D. (2017). Benefits of curved serrations on broadband trailing-edge noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 400, s. 167-177. doi:10.1016/j.jsv.2017.04.007
- Ayton, L. J. (2018). Analytic solution for aerodynamic noise generated by plates with spanwise-varying trailing edges. *Journal of Fluid Mechanics*, 849, s. 448-466. doi:10.1017/jfm.2018.431
- Brooks, F., Stuart, D., & Marcolini, A. (1989). *Airfoil Self-Noise and Prediction*. Şubat 15, 2025 tarihinde <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890016302/downloads/19890016302.pdf> adresinden alındı
- Chen, J., Xie, J., & Lee, H.-M. (2023). Noise attenuation by half flat tip serrated trailing edge in rotating blades. *Journal of Physics: Conference Series*, 2489(1). doi:10.1088/1742-6596/2489/1/012022

- Chong, T. P., & Joseph, P. F. (2013). An experimental study of airfoil instability tonal noise with trailing edge serrations. *Journal of Sound and Vibration*, 332(24), s. 6335-6358. doi:10.1016/j.jsv.2013.06.033
- Gruber, M., Joseph, P., & Chong, T. (2012). On the mechanisms of serrated airfoil trailing edge noise reduction. *17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (32nd AIAA Aeroacoustics Conference)*. doi:10.2514/6.2011-2781
- Howe, M. S. (1991). Noise produced by a sawtooth trailing edge. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90(1), s. 482-487. doi:10.1121/1.401273
- Jones, L., & Sandberg, R. (2010). Numerical investigation of airfoil self-noise reduction by addition of trailing-edge serrations. *16th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. doi:10.2514/6.2010-3703
- Kholodov, P., & Moreau, S. (2021). Optimization of trailing-edge serrations with and without slits for broadband noise reduction. *Journal of Sound and Vibration*, 490. doi:10.1016/j.jsv.2020.115736
- Kim, J.-H., Choi, K.-S., Lacagnina, G., Paruchuri, C., Joseph, P., Hasheminejad, S. M., . . . Pinelli, A. (2022). Aerodynamic and aeroacoustic optimization of leading-edge undulation of a NACA 65(12)-10 airfoil. *AIAA Journal*, 60(4), s. 2342-2353.
- Lee, S., Ayton, L., Bertagnolio, F., Moreau, S., Chong, T. P., & Joseph, P. (2021). Turbulent boundary layer trailing-edge noise: Theory, computation, experiment, and application. *Progress in Aerospace Sciences*, 126. doi:10.1016/j.paerosci.2021.100737
- Liu, W. Y. (2017). A review on wind turbine noise mechanism and de-noising techniques. *Renewable Energy*, 108, s. 311-320. doi:10.1016/j.renene.2017.02.034
- Llorente, E., & Ragni, D. (2020). Trailing-edge serrations effect on the performance of a wind turbine. *Renewable Energy*, 147, s. 437-446. doi:10.1016/j.renene.2019.08.128
- Lu, Y., Li, Z., Chang, X., Chuang, Z., & Xing, J. (2021). An aerodynamic optimization design study on the bio-inspired airfoil with leading-edge tubercles. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 15(1), s. 292-312. doi:10.1080/19942060.2020.1856723
- Qaissi, K., Elsayed, O., Faqir, M., & Essadiqi, E. (2023). Aerodynamic optimization of trailing-edge-serrations for a wind turbine blade using Taguchi modified additive model. *Energies*, 16(3). doi:10.3390/en16031099
- Rong, J., Jiang, Y., Murayama, Y., Ishibashi, R., M. M., & Liu, H. (2024). Trailing-edge fringes enable robust aerodynamic force production and noise suppression in an owl wing model. *Bioinspiration & Biomimetics*, 19(1). doi:10.1088/1748-3190/ad0aa9
- Timothy, M. P. (2024). Biomimetic engineering: Designing solutions inspired by nature. *Journal of Biological and Applied Science*, 3(2), s. 45-48.
- Wang, Y., Zhao, K., Lu, X.-Y., Song, Y.-B., & Bennett, G. J. (2019). Bio-inspired aerodynamic noise control: A bibliographic review. *Applied Sciences*, 9(11). doi:10.3390/app9112224
- Xie, J., Zhu, L., & Lee, H. M. (2023). Aircraft noise reduction strategies and analysis of the effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2). doi:10.3390/ijerph20021352
- Yang, C., Liu, Y., Zhang, X., & Bi, C. (2024). Hybrid control of aerofoil self-noise by coupling air blowing and trailing-edge serration. *Journal of Sound and Vibration*, 575. doi:10.1016/j.jsv.2024.118265
- Ye, X., Zheng, N., Zhang, R., & Li, C. (2022). Effect of serrated trailing-edge blades on aerodynamic noise of an axial fan. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36(6), s. 2937-2948. doi:10.1007/s12206-022-0526-7



Theoretical Paper

Aerodynamic performance analysis of NACA 0015 airfoil at low Reynolds numbers

Mustafa Buğday¹

Abstract. This study aims to enhance the aerodynamic performance of a NACA 0015 series symmetric airfoil. The research was conducted using the Ansys Fluid Flow (CFD) module. The analysis area comprised 300,000 mesh elements. Several comparative analyses were conducted at low Reynold number (Re) and angles of attack ranging from $\alpha=0$ to 10° . An increase in the angle of attack typically led to an elevation in the aerodynamic force coefficients (C_l , C_d , and C_l/C_d). In our study, the optimal values were attained at $\alpha=8^\circ$, utilizing the Spalart-Allmaras turbulence model and $Re=1 \times 10^6$, in comparison with analogous studies in literature. A 30% increase in lift coefficient (C_l) was attained relative to the initial condition. Furthermore, owing to the pressure differential between the lower and upper surfaces of the wing profile, the average velocity values recorded were 29.6 m/s and 18.1 m/s, respectively. Consistent with these findings, it is believed that this series, particularly favored in wind turbines, may operate more efficiently and effectively in the future with the test data acquired from experimental settings.

Keywords: Airfoil, NACA 0015, Ansys, CFD.

Teorik Makale

NACA 0015 kanat profilinin düşük Reynolds sayılarında aerodinamik performans analizi

Öz. Bu çalışma, NACA 0015 serisi simetrik bir kanat profilinin aerodinamik performansını artırmayı amaçlamaktadır. Araştırma, Ansys Fluid Flow (CFD) modülü kullanılarak yürütülmüştür. Analiz alanı 300.000 mesh elemandan oluşmaktadır. Birkaç karşılaştırmalı analiz, düşük Reynolds sayılarında ve $\alpha=0^\circ$ ile 10° arasında değişen hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. Hücum açısındaki bir artış genellikle aerodinamik kuvvet katsayılarında (C_l , C_d ve C_l/C_d) bir yükselmeye yol açmıştır. Çalışmamızda, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, Spalart-Allmaras türbülans modeli ve $Re=1 \times 10^6$ kullanılarak $\alpha=8^\circ$ 'de optimum değerlere ulaşılmıştır. Başlangıç koşuluna göre kaldırma katsayısında (C_l) %30'luk bir artış elde edilmiştir. Ayrıca kanat profilinin alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkından dolayı kaydedilen ortalama hız değerleri sırasıyla 29,6 m/s ve 18,1 m/s olmuştur. Bu bulgularla tutarlı olarak, özellikle rüzgâr türbinlerinde tercih edilen bu serinin, deneysel ortamlardan elde edilen test verileriyle gelecekte daha verimli ve etkili çalışabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kanat profili, NACA 0015, Ansys, CFD.

*1 Department of Mechanical Engineering, Karabük University, 78000, Karabük, Türkiye; mustafabugday@karabuk.edu.tr (Corresponding Author)
<https://doi.org/10.52995/jass.1619615>*

Received: January 14, 2025; Accepted: February 12, 2025; Published: February 28, 2025

© 2025 University of Turkish Aeronautical Association. All rights reserved.

This paper is licensed under [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



1. INTRODUCTION

Airfoils are crucial elements in numerous applications, especially in wind turbine design and aviation, as they directly affect aerodynamic performance, efficiency, and overall functionality. The design and optimization of airfoils entail a complex interaction of geometric parameters, flow characteristics, and operational conditions. A principal factor in airfoil design is the lift-to-drag ratio (L/D ratio), an essential performance metric. A high lift-to-drag (L/D) ratio signifies that an airfoil can produce substantial lift while reducing drag, thereby improving the efficiency of aircraft and wind turbines (Feng, 2023). Optimizing airfoil geometries to attain an ideal lift-to-drag ratio is crucial for enhancing performance. Diverse techniques, such as genetic algorithms and response surface methodologies, have been utilized to optimize airfoil designs, facilitating customized aerodynamic properties that satisfy operational criteria (He & Agarwal, 2014), (Sun, 2011). The selection of airfoil in wind turbines can profoundly influence the turbine's efficiency and power output (He & Agarwal, 2014), (Li, et al., 2018). The design process frequently utilizes sophisticated computational methods, including Ansys CFD software, to analyze and optimize airfoil configurations based on aerodynamic efficiency (Berger, Raffener, Senfter, & Pillei, 2024), (Tanürün, Akın, Acır, & Şahin, 2024). Furthermore, the incorporation of advanced design methodologies, including inverse airfoil design techniques, has surfaced as a viable strategy to improve airfoil performance. These methods facilitate the exact customization of airfoil geometries to attain specific aerodynamic properties, especially in low-speed contexts such as Darrieus-type vertical axis wind turbines (Saeed, Paraschivoiu, Trifu, Hess, & Gabrys, 2011). Computational fluid dynamics (CFD) and experimental validation are essential for evaluating the efficiency of these designs (Gopalarathnam & Selig, 2001).

The 4-digit NACA airfoils, including the NACA 0015 and NACA 4412, are defined by their thickness and chamber, which affect lift and drag properties. The NACA 0015 airfoil is extensively analyzed due to its symmetrical design, which provides a consistent lift-to-drag ratio across multiple angles of attack, rendering it appropriate for diverse applications, such as small wind turbines and general aviation aircraft (Abramova, Alieva, Sudakov, & Khrabrov, 2024), (Hassan, Andan, Asrar, & Sapardi, 2023). The NACA 4412, featuring a cambered configuration, offers improved lift properties, especially at reduced velocities, advantageous for scenarios necessitating significant lift during takeoff and landing (Arif, et al., 2022). Recent studies have illustrated the efficacy of NACA airfoils across various operational conditions. Computational fluid dynamics (CFD) analyses indicate that the NACA 0015 airfoil demonstrates advantageous aerodynamic performance, providing substantial insights into the impact of angle of attack variations on lift and drag coefficients (Abramova, Alieva, Sudakov, & Khrabrov, 2024), (Hassan, Andan, Asrar, & Sapardi, 2023). The incorporation of features like morphing trailing edges has been investigated to enhance aerodynamic performance, suggesting that these alterations can result in better lift-to-drag ratios across different flight conditions (Ai, Jawahar, & Azarpeyvand, 2016), (Jawahar, Qing, & Azarpeyvand, 2018). Experimental validation studies have compared the aerodynamic properties of different NACA airfoils, demonstrating that airfoil thickness and configuration substantially affect stall characteristics and overall performance (Abed, 2023), (Bangga, Hutani, & Heramarwan, 2021). The NACA 0015 airfoil demonstrates effective performance under dynamic stall conditions, essential for vertical axis wind turbine applications (Bangga, Hutani, & Heramarwan, 2021). The incorporation of vortex generators and additional flow control devices has been investigated to improve performance by postponing flow separation and augmenting lift (Bangga, Hutani, & Heramarwan, 2021).

The examination of NACA airfoils at low Re is essential for applications in micro aerial vehicles, unmanned aerial vehicles, and other aerodynamic devices functioning in low-speed environments. Aerodynamics at low Re poses distinct challenges, including flow separation, stall characteristics, and diminished lift-to-drag ratios, which considerably impact the performance of airfoils like the NACA 4415 and NACA 0012. Studies demonstrate that the NACA 4415 airfoil, although efficient at elevated Re, shows inadequate performance at low Re, especially regarding lift and drag properties. Research indicates that at Re as low as 300,000, the lift and drag coefficients of the NACA 4415 are inadequate, resulting in stall problems and diminished aerodynamic efficiency (Ayaz Ümütlü, Kiral, & Karadeniz, 2023), (Julian, Siswanto, Wahyuni, & Bunga, 2023). Experimental investigations substantiate this, revealing the stall behavior of airfoils such as the NACA 2415 and NACA 0015 at Re near 50,000, where considerable flow separation transpires, resulting in a loss of lift (Ayaz Ümütlü, Kiral, & Karadeniz, 2023), (Pack Melton, Hannon, Yao, & Harris, 2008). The aerodynamic efficacy of airfoils at low Re can be improved through diverse modifications and methodologies. The integration of vortex generators has demonstrated enhancement in lift characteristics by postponing flow separation, thereby improving the stall performance of airfoils such as the NACA 4415, as evidenced

in "Lift Enhancement of NACA 4415 Airfoil using Biomimetic Shark Skin Vortex Generator" (Zulkefli, Ahamat, Mohd Safri, Mohd Nur, & Mohd Rafie, 2019). Moreover, research employing computational fluid dynamics (CFD) has shown that refining the geometry of airfoils, including modifications to camber and thickness, can enhance aerodynamic performance at low Re (Hu & Tamai, 2008), (Nepal, Qijun, Bo, Kamruzzaman, & Adhikari, 2023). Ongoing research in this domain is crucial for enhancing the design of efficient airfoils appropriate for low-speed applications.

The examination of turbulence models concerning airfoil performance is essential for comprehending aerodynamic properties and enhancing designs for diverse applications, such as aviation and wind energy. Turbulence considerably impacts the flow surrounding airfoils, affecting lift and drag coefficients, which are essential parameters in aerodynamic performance. Recent studies have employed diverse turbulence models to accurately simulate airflow around airfoils. The study on the NACA 0018 airfoil employed the Spalart-Allmaras turbulence model, demonstrating its efficacy in validating experimental results and analyzing the aerodynamic performance of various airfoil configurations (Kaya, 2024). These findings underscore the necessity of choosing suitable turbulence models to achieve dependable simulations that inform design enhancements. The impact of turbulence on aerodynamic performance is exemplified by Almusawi et al. (Almusawi, Rishack, & Al-fahham, 2022) who discovered that incorporating a semicircular groove on the NACA 0012 airfoil enhanced lift efficiency and diminished drag, highlighting the significance of surface modifications in controlling turbulent flow. Furthermore, research has concentrated on refining established turbulence models, including the Spalart-Allmaras model, to incorporate turbulence energy backscatter, thereby improving the predictive accuracy of simulations related to airfoil interactions with turbulent flows (Liu, Lu, Fang, & Gao, 2011). This alteration is especially pertinent in enhancing airfoil designs for improved performance across diverse flow conditions. The choice and implementation of turbulence models are crucial in the aerodynamic assessment of airfoils. Research consistently demonstrates that effective turbulence modeling can substantially enhance the comprehension and forecasting of airfoil performance in turbulent conditions, thereby informing the design of more efficient aerodynamic structures.

This study examined the aerodynamic performance of the NACA 0015 airfoil at low Re utilizing different turbulence models, specifically the Spalart-Allmaras and Standard K-Epsilon models. The results achieved will enhance the efficiency of airfoils utilized in the aviation and renewable energy sectors. Ultimately, a systematic approach to airfoil design, incorporating computer-aided computational techniques and experimental validations, will yield effective and efficient outcomes in meeting the aerodynamic demands of contemporary engineering challenges related to NACA airfoils.

2. METHODS

2.1. Mathematical Model

2.1.1. Continuity equation

For steady-state flows, the continuity equation is expressed as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0. \quad (1)$$

The density as a function of time in the steady state is given as

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

Consequently, the steady-state continuity equation is shown as follows:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0. \quad (3)$$

2.1.2. Momentum equation

For two-dimensional steady flows, the momentum equation is as follows:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + (f_x)_{\text{viscose}}, \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y + (f_y)_{\text{viscose}}, \quad (5)$$

where ρ is density, and f_x and f_y are surface forces.

2.1.3. Energy equation

For the steady state flows, the energy equation is as follows:

$$\vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} - \vec{\nabla} \cdot (P \vec{V}) + \rho (\vec{f} \cdot \vec{V}) + \dot{Q} + \dot{W}, \quad (6)$$

where the viscous exists and has an impact on the energy equation, as indicated by (\dot{Q}) and (\dot{W}) . A partial differential equation, Eq. (6), links the variables in the flow field at a particular location in space.

2.1.4. Transport equation for the Spalart-Almaras model

The Spalart-Almaras model's transported variable ($\tilde{\gamma}$) yields the following transport equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{\gamma}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\gamma} u_i) &= G_\gamma \\ + \frac{1}{\sigma_\gamma} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\gamma}) \frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\gamma}}{\partial x_j} \right)^2 \right] &- Y_\gamma + S_\gamma, \end{aligned} \quad (7)$$

where G_γ represents the generation of turbulent viscosity and Y_γ represents the turbulent viscosity destruction that occurs close to the wall because of viscous damping. The constant coefficients, denoted as C_{b2} and σ_γ are equivalent to 0.67 and 0.622, respectively. S_γ is the user-defined source term, and γ is the molecular kinematic viscosity. The turbulent viscosity is calculated using the following equation, which is used to model turbulent viscosity:

$$\mu_t = \rho \tilde{\gamma} f_{v1}, \quad (8)$$

where the viscous damping function, f_{v1} , can be found as follows:

$$f_{v1} = \frac{X^3}{x^3 + C_{v1}^3}, \quad (9)$$

$$X = \frac{\tilde{\gamma}}{\gamma}. \quad (10)$$

The constant coefficient, C_{v1} , is equivalent to 7.1. Using Eqs. (11) and (12), the production term is determined:

$$G_\gamma = C_{b1} \rho \tilde{S} \tilde{\gamma}, \quad (11)$$

$$\tilde{S} \equiv S + \frac{\tilde{\gamma}}{K^2 d^2} f_{v2}, \quad (12)$$

which has the constant coefficients $C_{b1}=0.1355$ and $K=0.4187$ as C_{b1} and K respectively. S is the scalar measure of the deformation tensor, and d is the distance from the wall. The following formulas explain how to determine the turbulent destruction (Y_γ):

$$Y_\gamma = C_{w1} \rho f_w \left(\frac{\tilde{\gamma}}{d} \right)^2, \quad (13)$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{1/6}, \quad (14)$$

$$g = r + C_{w2} (r^6 - r), \quad (15)$$

$$r \equiv \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{S} K^2 d^2}, \quad (16)$$

where \tilde{S} is derived from Eq. (12) and the constant coefficients are C_{w1} , C_{w2} , and C_{w3} . Additionally, the constant values can be found as:

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{K^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma_{\bar{y}}}. \quad (17)$$

After solving the earlier equation, $C_{w1} = 3.2059$ is found, and C_{w2} and C_{w3} equal 0.3 and 2.0, respectively (Spalart & Allmaras, 1992).

2.1.5. Standard K-Epsilon model

A semi-empirical model (Launder, 1972), the k-ε standard model depends on the kinetic energy of turbulence and how quickly it dissipates. In this model, the flow is assumed to be fully turbulent, and the molecular viscosity may be very small. For turbulent flows, this model is therefore applied. The K-Epsilon model's transport equation is displayed in equations (18) and (19).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k, \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (19)$$

$$C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon,$$

where Y_M represents the fluctuating dilation contribution in compressible turbulence and G_k represents the turbulent kinetic energy; $C_{1\varepsilon}$ and $C_{2\varepsilon}$ are constant coefficients that equal 1.44 and 1.92, respectively; σ_k and σ_ε are the turbulent Prandtl numbers for k and ε , which equal 1 and 1.3, respectively. Similarly, μ_t can be found as

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}, \quad (20)$$

where C_μ is equal to 0.09.

2.1.6. Airfoil loads

The pressure coefficient (C_p) is obtained from (Medjroubi, Stoevesandt, Carmo, & Peinke, 2011):

$$C_p \equiv \frac{P - P_\infty}{q_\infty}. \quad (21)$$

The dynamic pressure, q_∞ , is found by

$$q_\infty = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2. \quad (22)$$

The following is the dynamic pressure as a function of M_∞ :

$$q_\infty = \frac{1}{2} \frac{\gamma q_\infty}{\gamma q_\infty} \rho_\infty V_\infty^2 = \frac{\gamma}{2} P_\infty \left[\frac{\rho_\infty}{\gamma P_\infty} \right] V_\infty^2, \quad (23)$$

and

$$a_\infty^2 = \frac{\gamma P_\infty}{\rho_\infty}. \quad (24)$$

Thus, we obtain q_∞ as follows:

$$q_\infty = \frac{\gamma}{2} P_\infty \frac{V_\infty^2}{a_\infty^2} = \frac{\gamma}{2} P_\infty M_\infty^2. \quad (25)$$

After considering Eqs. (21) and (25), C_p is as follows:

$$C_p = \frac{2}{\gamma M_\infty^2} \left(\frac{P}{P_\infty} - 1 \right). \quad (26)$$

Assuming that C is the airfoil's chord and α is the angle of attack, the following values of C_N and C_X are obtained (Li, Sherwin, & Bearman, 2002):

$$C_N = \int_{x=0}^{x=C} (C_{P,\text{low}} - C_{P,\text{up}}) d\left(\frac{x}{c}\right), \quad (27)$$

$$C_X = \int_{x=0}^{x=C} \left(C_{P,\text{up}} \left(\frac{dY}{dX} \right)_{\text{up}} - C_{P,\text{low}} \left(\frac{dY}{dX} \right)_{\text{low}} \right) d\left(\frac{x}{c}\right). \quad (28)$$

Ultimately, the coefficients of lift and drag are found to be:

$$C_D = C_X \cos \alpha + C_N \sin \alpha, \quad (29)$$

$$C_L = C_N \cos \alpha - C_X \sin \alpha. \quad (30)$$

2.2. Geometry

The coordinates of the NACA 0015 airfoil profile were obtained from the Airfoil Tools (Dell'Orso & Amitay, 2018), (Sato, Asada, Nonomura, Kawai, & Fujii, 2017), (Siau, et al., 2010). The resultant file was transmitted to the Ansys drawing module to generate the overall geometry of the analysis. The semicircular region preceding the airfoil represents the inlet boundary condition, while the vertical line aligned with the flow direction represents the outlet boundary condition. The dimensions of the drawing geometry are presented in Figure 1.

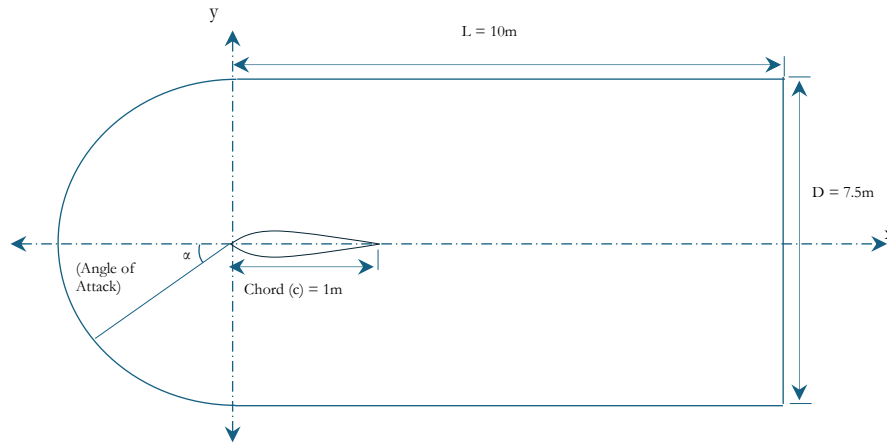


Figure 1. Boundary Domain

2.3. Mesh Independence Test

The same turbulence model (Spalart-Allmaras) and $Re = 200,000$ were employed to create rectangular meshes with a progressively enhancing mesh configuration to accurately simulate the boundary layer. A mesh convergence study was conducted involving 15 different experiments with mesh elements ranging from 40,000 to 500,000. Figure 2 illustrates the variation of lift and drag coefficients associated with different quantities of mesh elements at an angle of attack of 0° . The illustration indicates that meshes surpassing 300,000 elements yield precise results with minimal variance. Consequently, meshes comprising 300,000 elements were chosen for the ensuing simulations. Figure 3 shows the mesh structure and boundary conditions established within the analysis region.

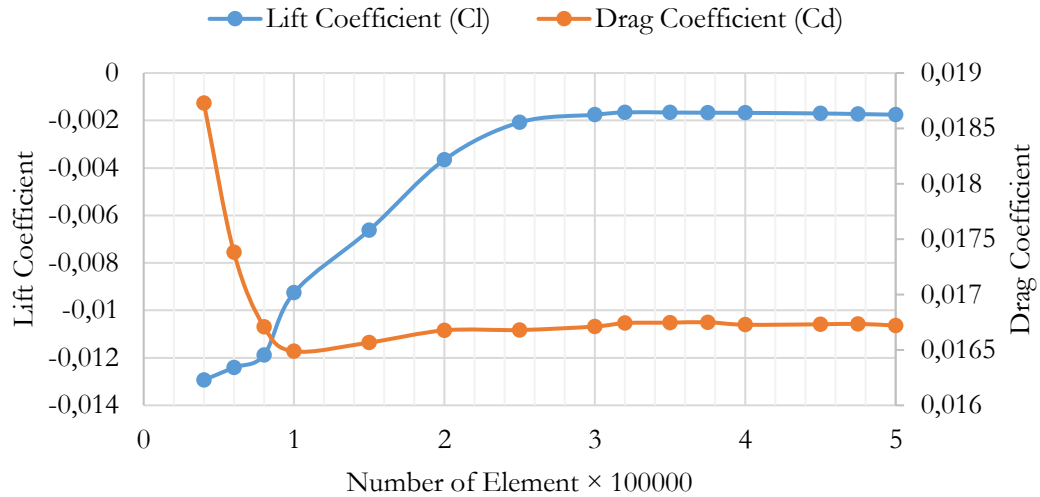


Figure 2. Variation of Lift and Drag Coefficient Depending on the Number of Elements

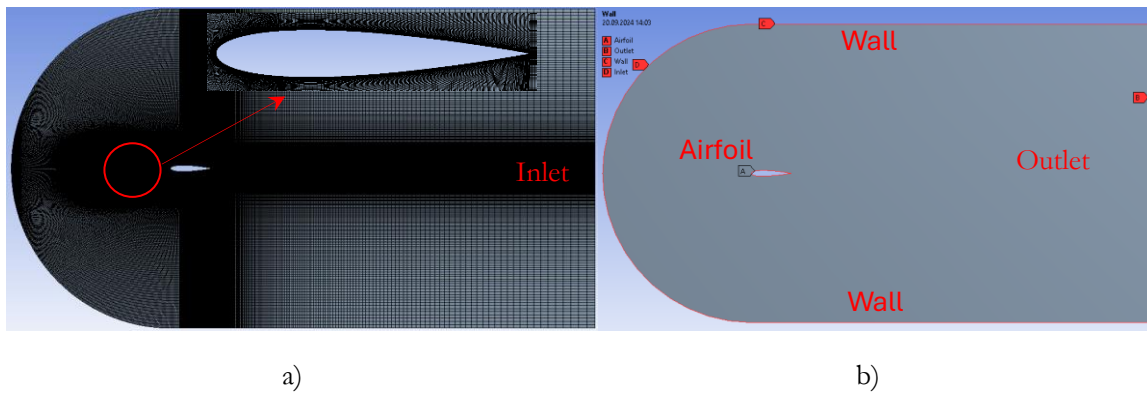


Figure 3. a) Mesh Structure b) Boundary Conditions Created in the Analysis Region

2.4. CFD Parameters

The analyses were conducted at low Re of 2×10^5 , 4×10^5 , 6×10^5 , 8×10^5 , and 1×10^6 , respectively. The turbulence models considered in this study were Spalart-Allmaras and K-Epsilon. Based on the acquired data, the most suitable turbulence model was determined by evaluating their performance. The dynamic viscosity was recorded as 1.789×10^{-5} kg/ms, and the air density was noted as 1.23 kg/m³. The gauge pressure is zero. Ambient atmospheric conditions and no-slip boundary conditions are implemented at the exit and walls, respectively. The geometry of the wing profile is delineated as the wall boundary. When the angle of attack surpasses the stall angle, the K-Epsilon ($k-\epsilon$) turbulence model, primarily designed for fully developed turbulence, faces limitations in accurately predicting separated flows and is less effective in capturing complex flow separation and reattachment phenomena. Table 1 shows the parameters used in the analysis in detail.

Table 1. CFD Parameters

Boundary Condition	Type
Density of Fluid	1.23 kg/m ³
Operating Pressure	101325 Pa
Re	2×10^5 , 4×10^5 , 6×10^5 , 8×10^5 , 1×10^6
Model	Spalart-Allmaras and K-Epsilon
Viscosity	1.7894×10^{-5} Pa·s
Angle of Attack	-10, 10 step by 1

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Validation

The CFD simulation results for the NACA 0015 airfoil closely align with the experimental data from Mazumder (Mazumder, 2024) and Bogateanu (Bogateanu, Dumitrache, Dumitrescu, & Stoica, 2014) for $Re=8\times 10^5$ and $Re=1\times 10^6$. The simulations precisely align with the experimentally observed trends for the aerodynamic force coefficients (C_l and C_d) across various angles of attack. These comparisons demonstrate that the simulation results are dependable and align with the established experimental findings. The numerical data for $Re=8\times 10^5$ and $Re=1\times 10^6$, along with the corresponding experimental data, are displayed in Tables 2 and 3 for comparison.

Table 2. Comparison of Aerodynamic Force Coefficients (C_l and C_d) at $Re = 8\times 10^5$

Angel of Attack (α)	CFD	Mazumder (Mazumder, 2024)	CFD	Mazumder (Mazumder, 2024)
	C_l	C_l	C_d	C_d
-10	-0.9601	-0.9652	0.01533	0.0115
-9	-0.9100	-0.82324	0.01299	0.011
-8	-0.8565	-0.78336	0.01148	0.0105
-7	-0.7809	-0.7865	0.01076	0.01
-6	-0.6831	-0.6798	0.00979	0.0095
-5	-0.5806	-0.5966	0.0088	0.009
-4	-0.4509	-0.4499	0.0079	0.0085
-3	-0.3249	-0.3189	0.0075	0.008
-2	-0.2052	-0.2044	0.00698	0.0075
-1	-0.0998	-0.1006	0.006811	0.007
0	0.0000	0	0.006788	0.0065
1	0.1270	0.1266	0.006811	0.007
2	0.2612	0.2595	0.00698	0.0075
3	0.4136	0.3955	0.0075	0.008
4	0.5739	0.5622	0.0079	0.0085
5	0.7388	0.7022	0.0088	0.009
6	0.8694	0.8465	0.00979	0.0095
7	0.9939	0.9647	0.01076	0.01
8	1.0900	1.108	0.01148	0.0105
9	1.1581	1.1036	0.01299	0.011
10	1.2233	1.2307	0.01533	0.0115

Table 3. Comparison of Aerodynamic Force Coefficients (C_l and C_d) at $Re = 1\times 10^6$

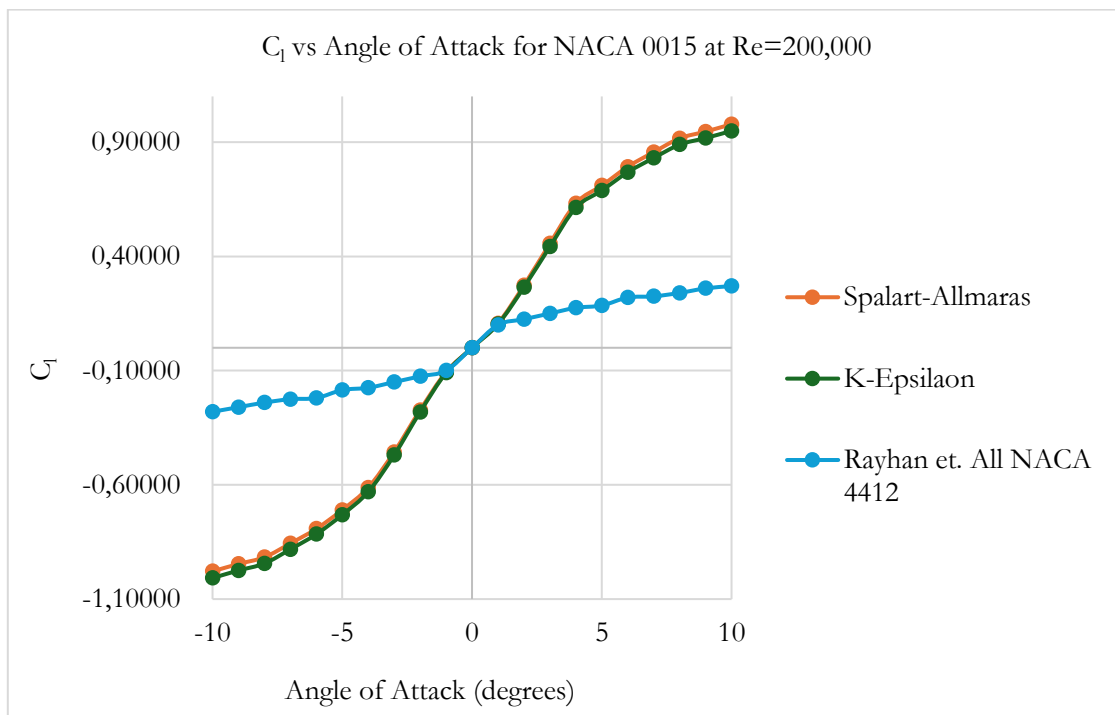
Angel of Attack (α)	CFD	Bogateanu (Bogateanu, Dumitrache, Dumitrescu, & Stoica, 2014)	CFD	Bogateanu (Bogateanu, Dumitrache, Dumitrescu, & Stoica, 2014)
	C_l	C_l	C_d	C_d
-10	-0.94282	-0.9422	0.01498	0.014325069
-9	-0.882215	-0.86532	0.01355	0.012954761
-8	-0.768315	-0.7566	0.01201	0.011458112
-7	-0.655095	-0.64321	0.01095	0.010165551
-6	-0.54655	-0.52334	0.0095	0.008950739

-5	-0.45594	-0.46258	0.0086	0.007988607
-4	-0.36788	-0.35632	0.0078	0.00719169
-3	-0.277185	-0.26591	0.00693	0.00667661
-2	-0.185215	-0.18643	0.00684	0.006346181
-1	-0.092735	-0.10103	0.00644	0.006180966
0	0	0	0.0064	0.006142092
1	0.125465	0.1233	0.00644	0.006820853
2	0.250585	0.2533	0.00684	0.0070142
3	0.3749	0.3699	0.00693	0.007379411
4	0.49772	0.48996	0.0078	0.00794871
5	0.61686	0.62077	0.0086	0.008829513
6	0.739565	0.70956	0.0095	0.009892922
7	0.88642	0.88951	0.01095	0.011235609
8	1.0396	1.0261	0.01201	0.012664229
9	1.193815	1.2014	0.01355	0.01431842
10	1.275465	1.28067	0.015833	0.01582223

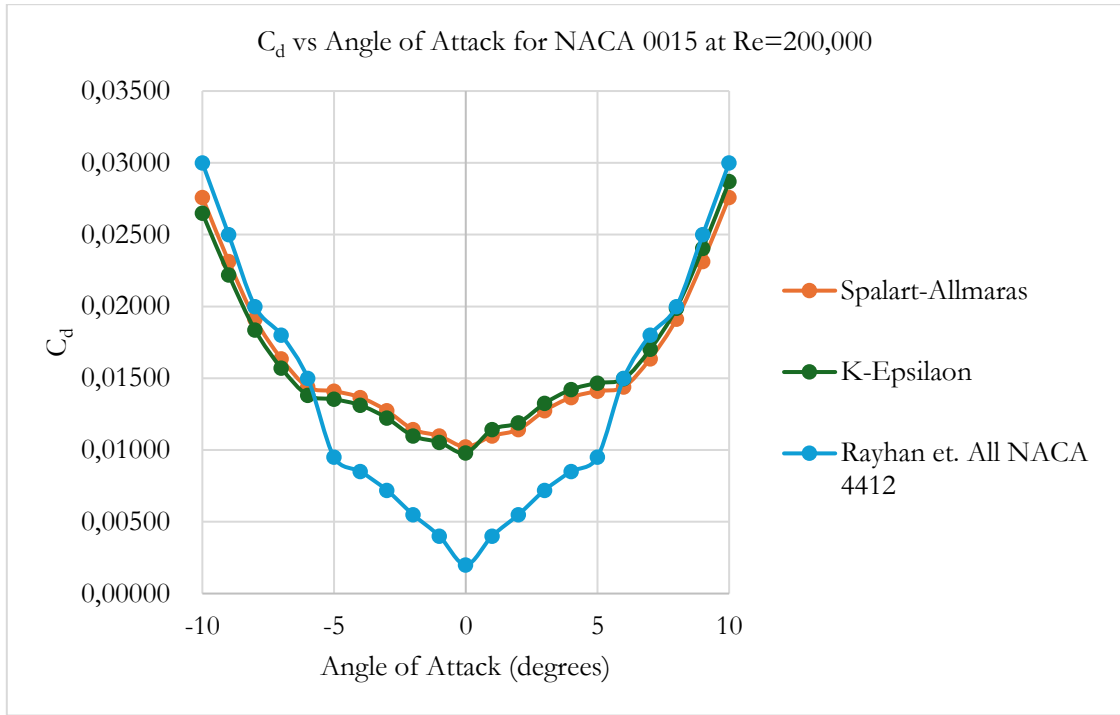
3.2. Results

3.2.1. Aerodynamic forces

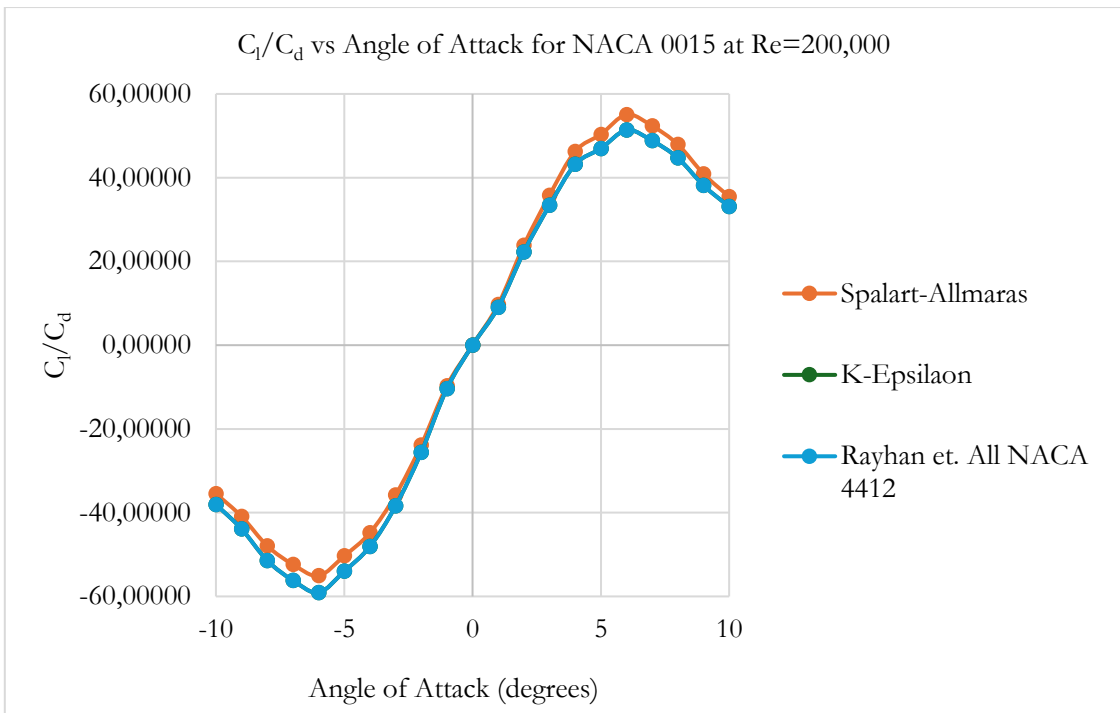
The aerodynamic force coefficients of NACA 0015 at variable $Re=200,000-1,000,000$ and attack angles (-10, 10) are given comparatively in Figure 4. In Figure 6, comparisons are made with two different turbulence models (Spalart-Allmaras, K-Epsilon), experimental calculations and the results of different studies in literature.



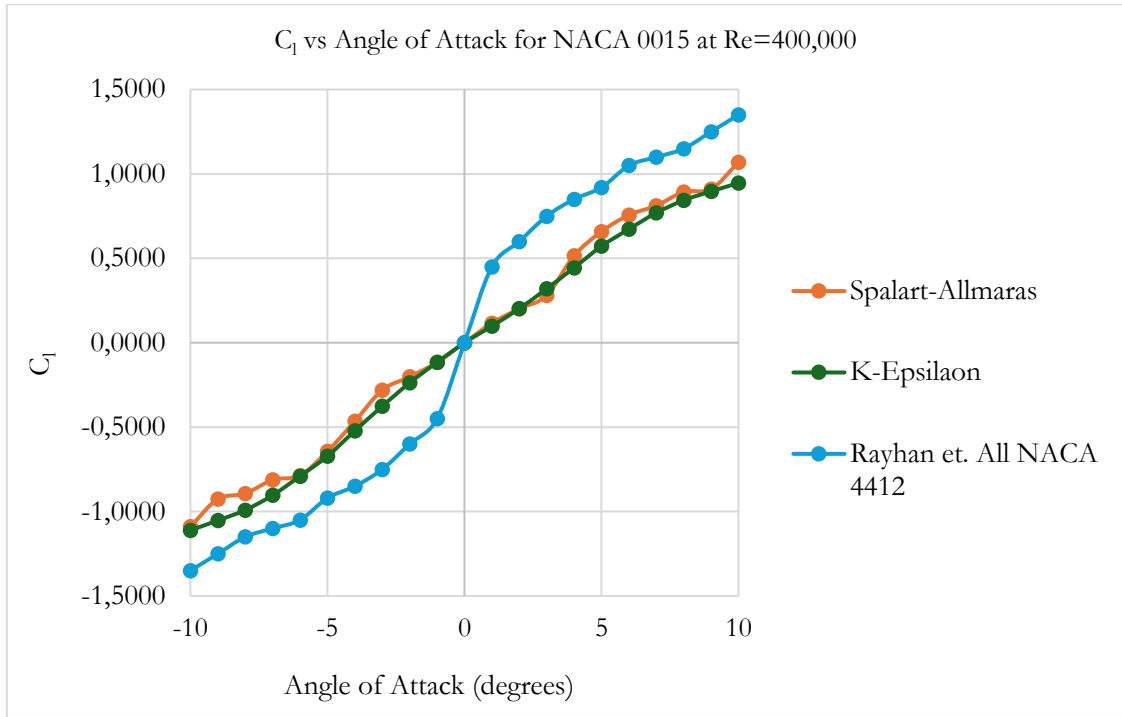
a1)



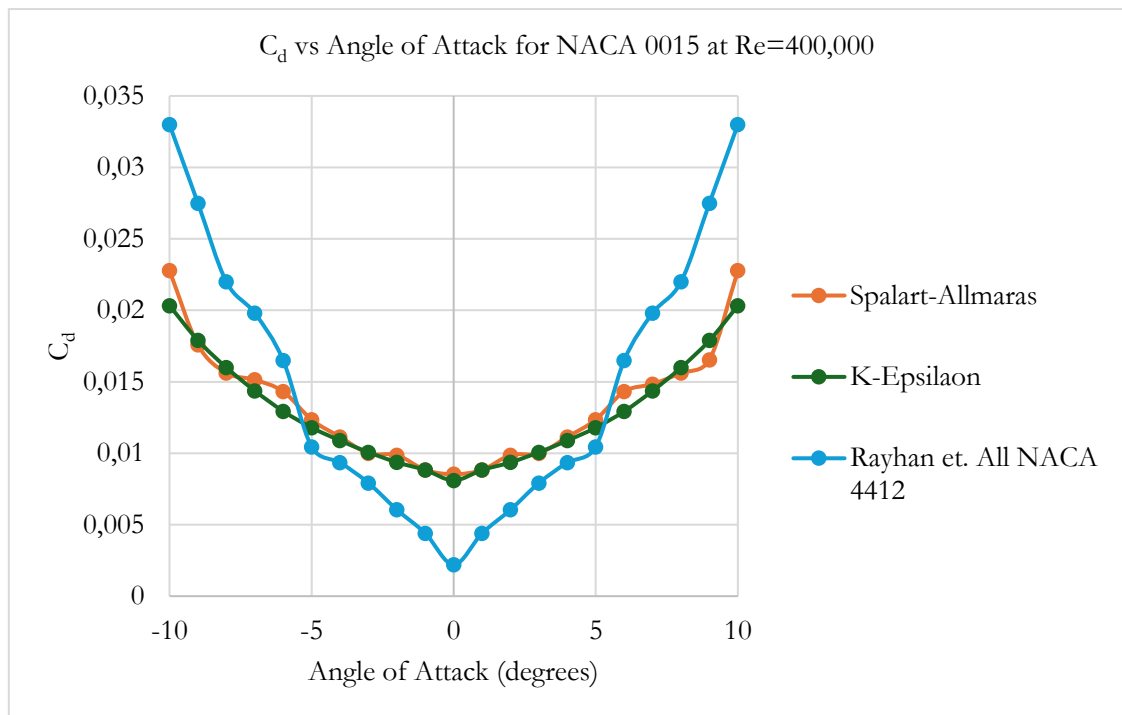
a2)



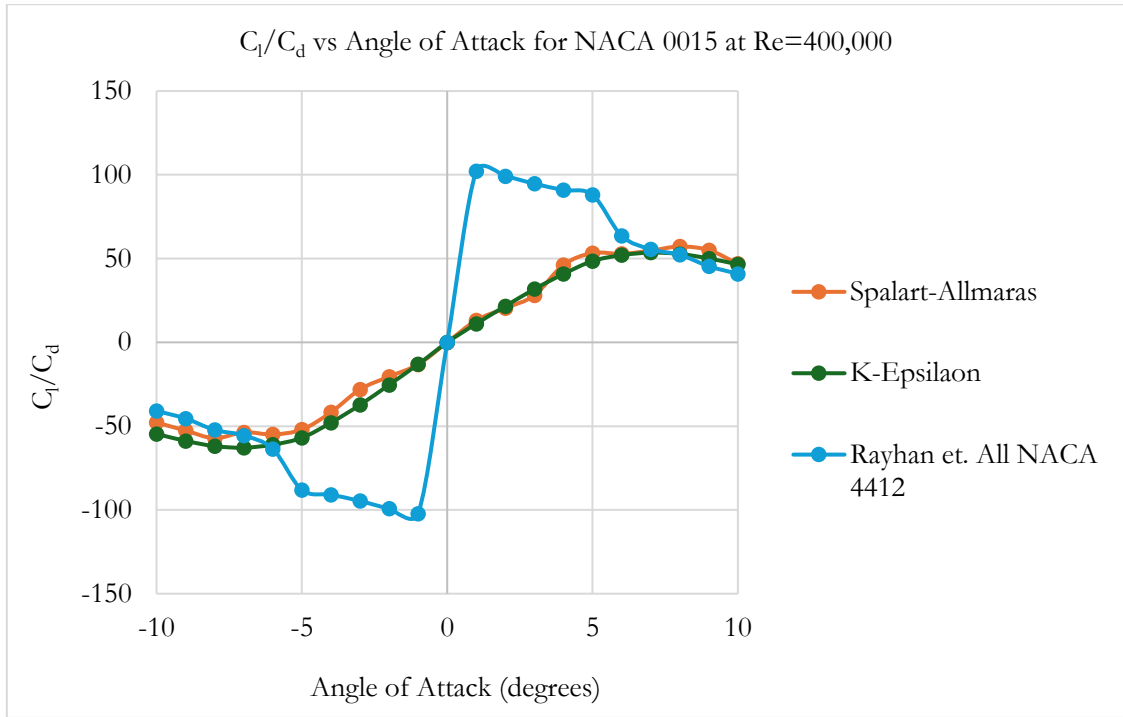
a3)



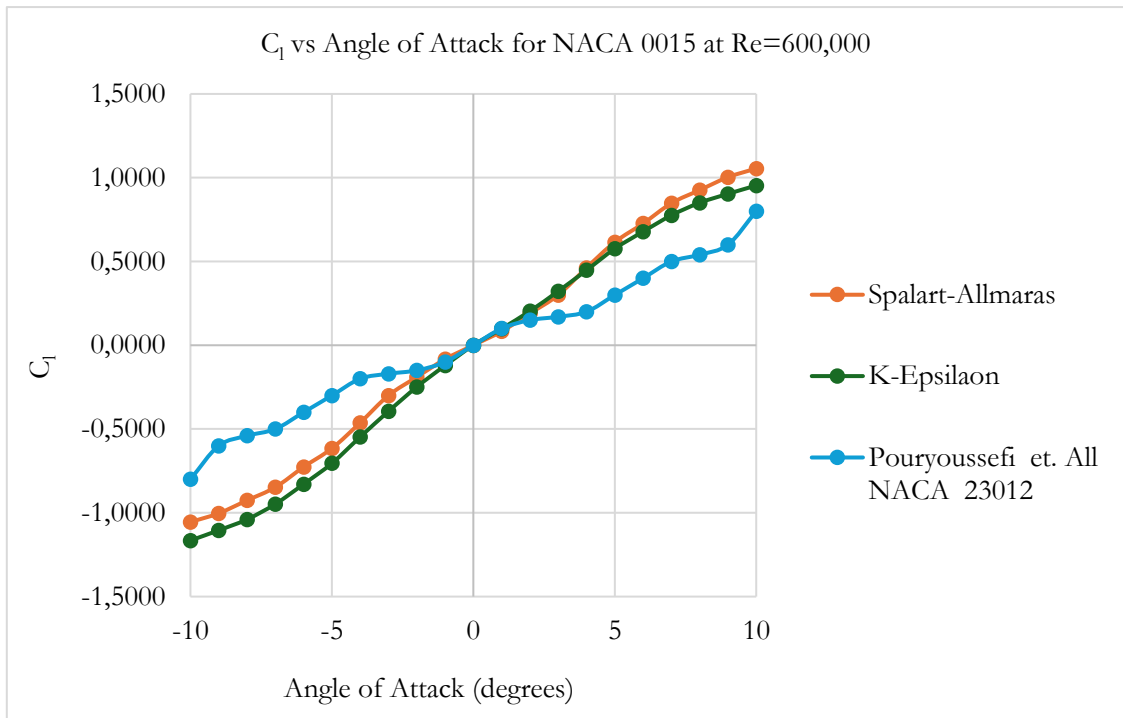
b1)



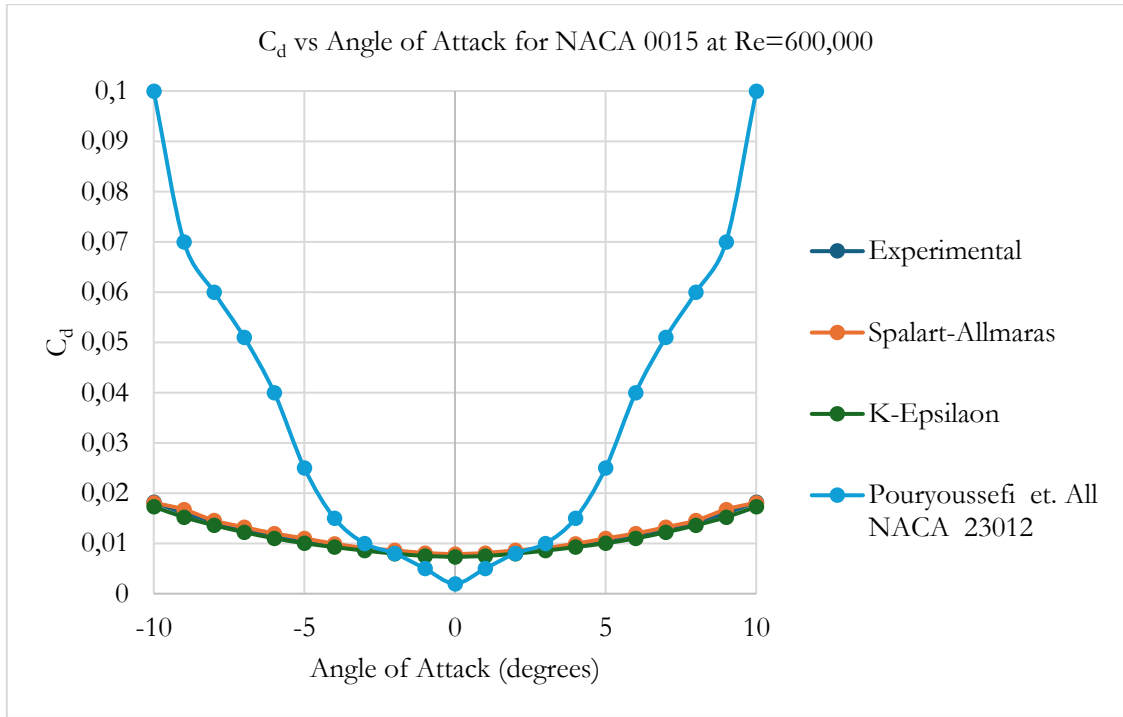
b2)



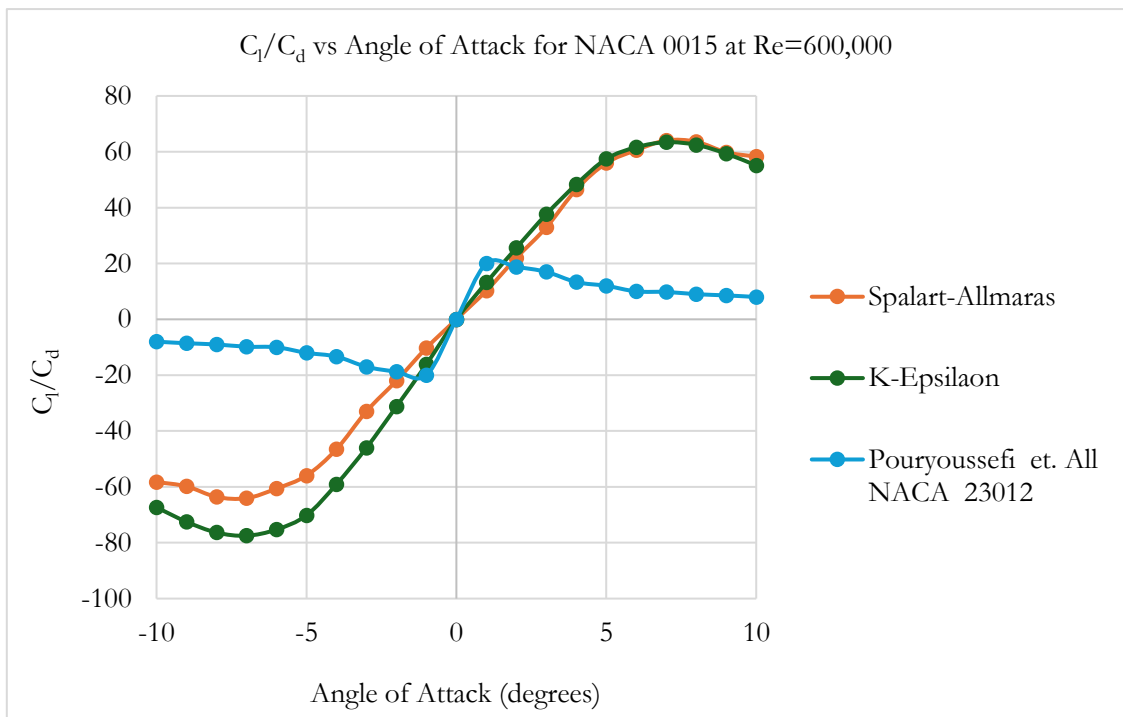
b3)



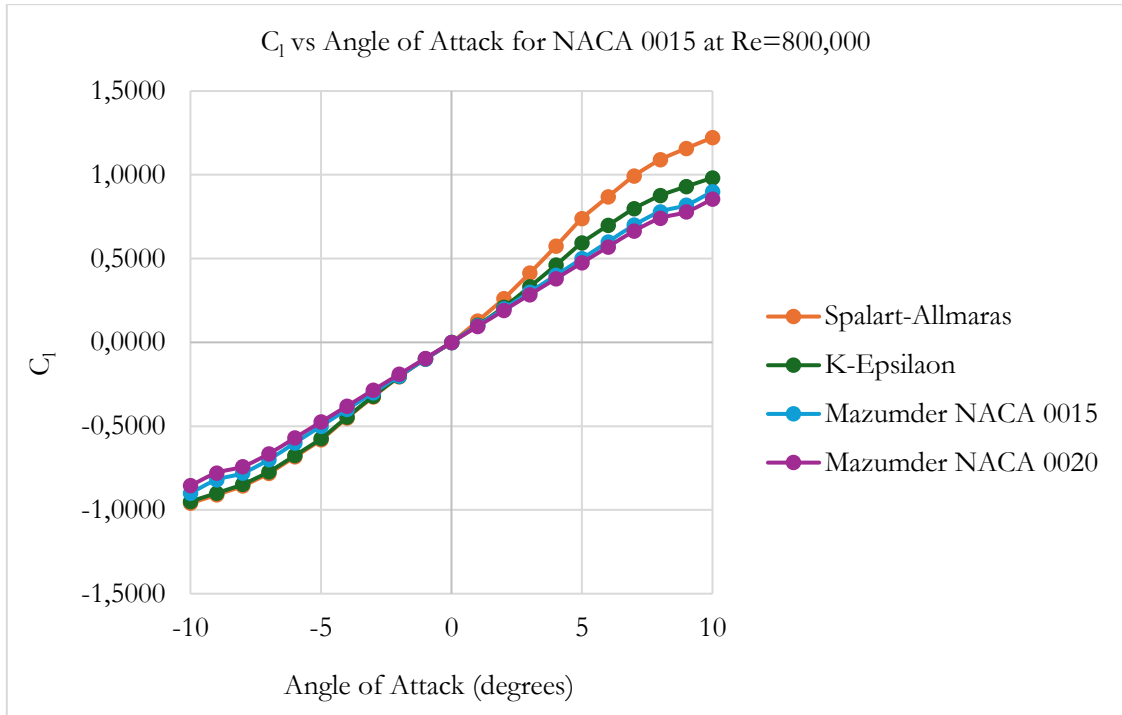
c1)



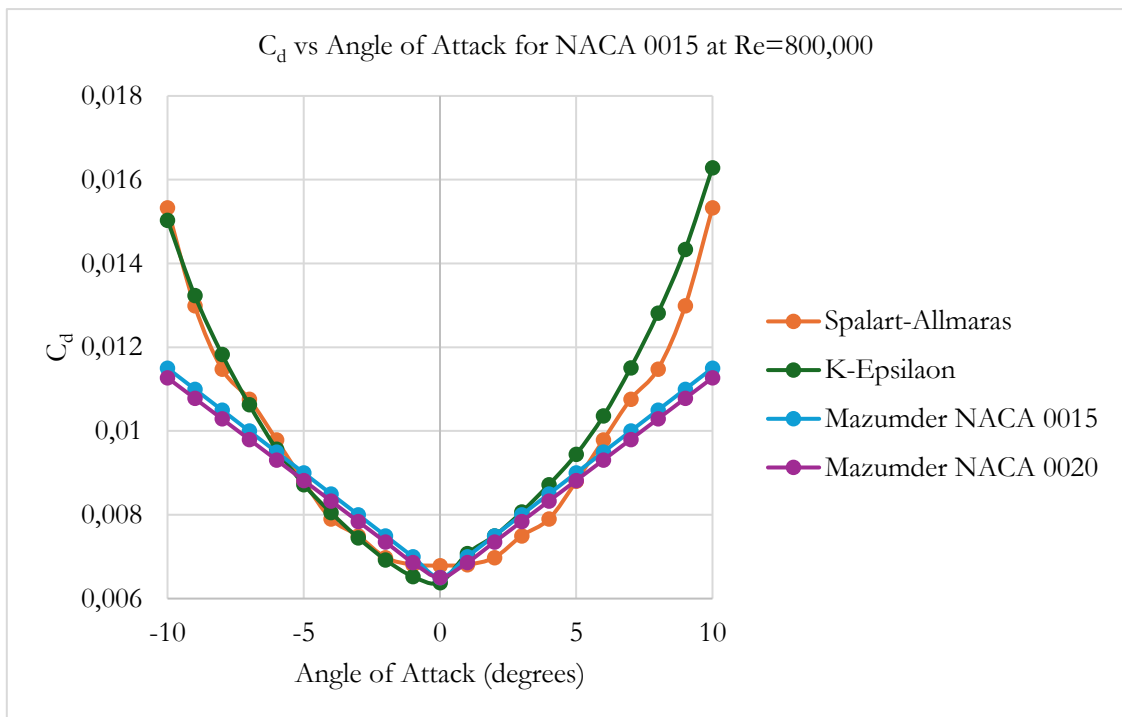
c2)



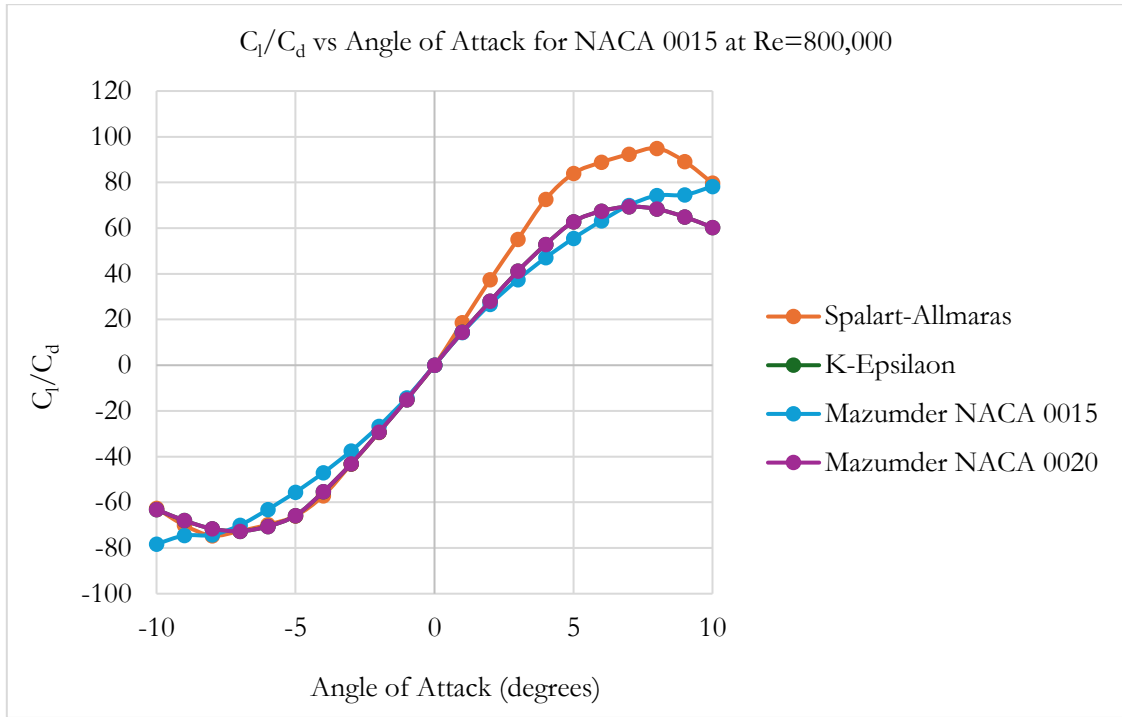
c3)



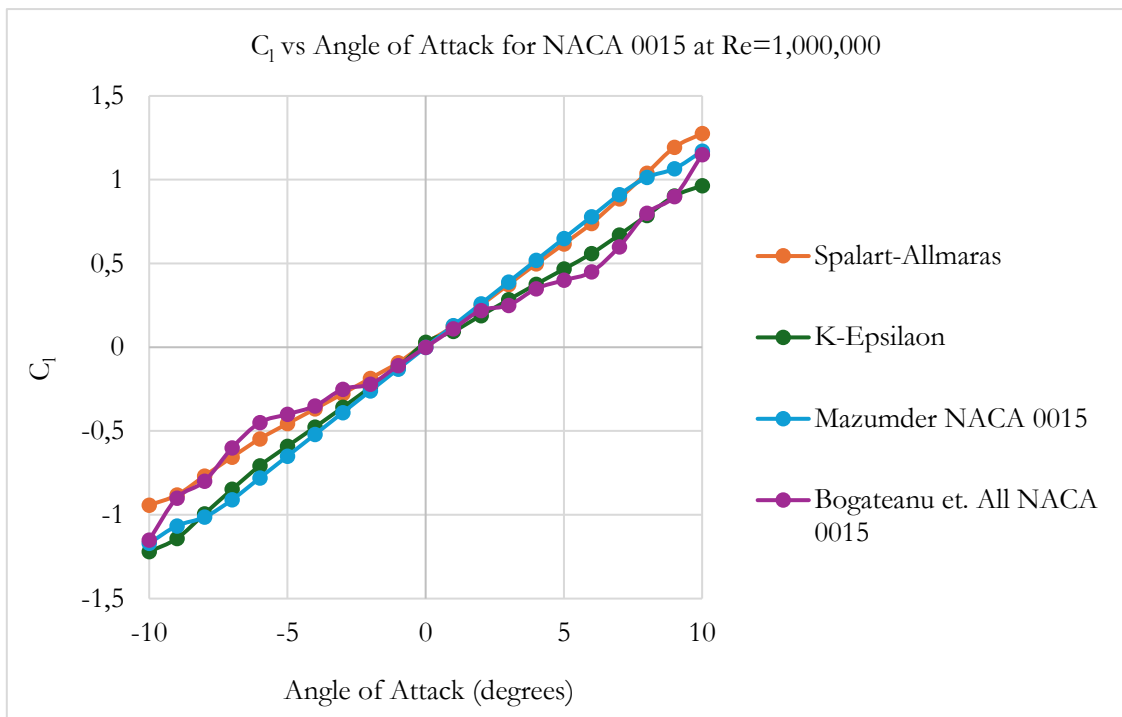
d1)



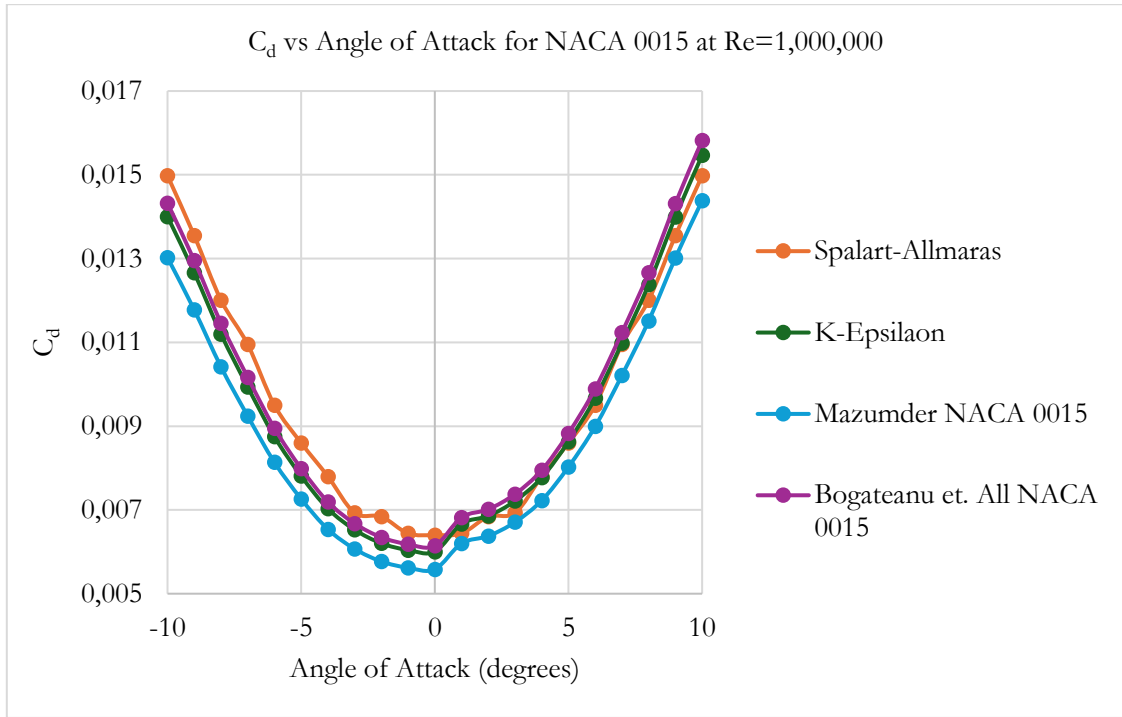
d2)



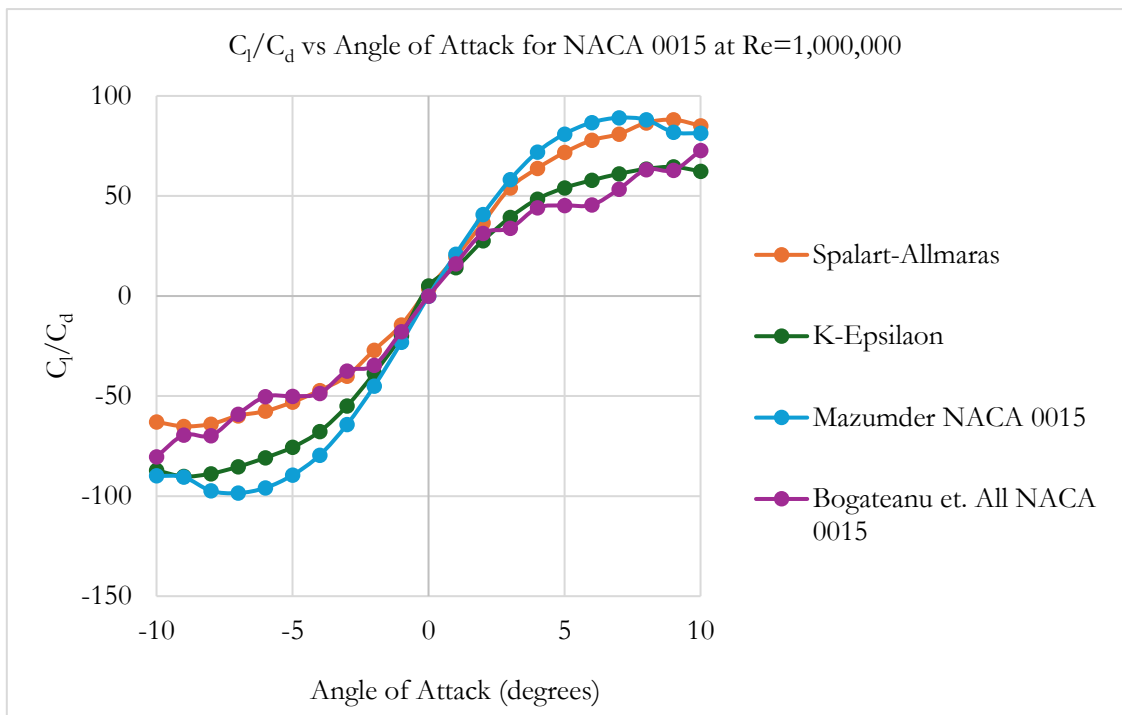
d3)



e1)



e2)



e3)

Figure 4. Aerodynamic Force Coefficients of the NACA 0015 Airfoil are a1) C_l , a2) C_d , a3) C_l/C_d for $Re=200,000$; b1) C_l , b2) C_d , b3) C_l/C_d for $Re= 400,000$; c1) C_l , c2) C_d , c3) C_l/C_d for $Re= 600,000$; d1) C_l , d2) C_d , d3) C_l/C_d for $Re= 800,000$; e1) C_l , e2) C_d , e3) C_l/C_d

Figure 4 illustrates that an increase in the angle of attack resulted in elevated aerodynamic force coefficients across all instances (C_l , C_d and C_l/C_d). The maximum lift coefficients (C_l) exhibited a linear increase up to $\alpha=8^\circ$, followed by a decline in the rate of increase. Based on observations from the graphs, a subsequent decline is observed, following a logarithmic trend. The experimental results are largely consistent with the Spalart-Allmaras turbulence model. A distinct deviation is evident in the K-Epsilon turbulence model across all Re . Comparison of the experimental and simulation results using the Spalart-Allmaras turbulence model (for $\alpha = 8^\circ$) shows varying trends

across different Reynolds numbers. Specifically, for $Re=200,000$, the simulation predicts a 3% decrease compared to the experimental data, while for $Re=400,000$, it shows a 4% increase. At $Re=600,000$, a slight decrease of 1% is observed, whereas for $Re=800,000$ and $Re=1,000,000$, the simulation results indicate significant increases of 12% and 15%, respectively. A comparable scenario led to a 5% reduction for $Re=200,000$, an 8% augmentation for $Re=400,000$, a 9% reduction for $Re=600,000$, a 10% reduction for $Re=800,000$, and a 13% reduction for $Re=1,000,000$ in the K-Epsilon turbulence model.

Figure 4 illustrates that the drag force coefficients (C_d) exhibit a logarithmic increase in relation to the angle of attack and Re . In this comparison of experimental data with data from alternative turbulence models, the most significant increase (for $\alpha=8^\circ$) is observed at $Re=1,000,000$ in the K-Epsilon turbulence model, amounting to 5%.

In addition, the results of the lift coefficient-drag ratio (C_l/C_d) examined at different Re and angles of attack are given in Figure 4 a3, b3, c3, d3 and e3. Here, this ratio, which increases linearly up to $\alpha=8^\circ$, exhibits a logarithmic decrease after $\alpha=8^\circ$. When the relevant graphs are examined, we can say that the experimental experiments and the Spalart-Almaras turbulence model are more compatible. As a result, while the C_l/C_d ratio is lower at low Re , the difference between them is calculated to be higher at high Re . The largest difference with a 17% decrease was observed in the K-Epsilon turbulence model with $Re=1,000,000$ (for $\alpha=8^\circ$), and the least difference with a 1% decrease was observed in the Spalart-Almaras turbulence model with $Re=600,000$. These data show that the NACA 0015 airfoil can improve the forward stall aerodynamic performance without significantly affecting the operating range. The data obtained agree with the literature.

The results show that the Spalart-Almaras turbulence model is more compatible (Mazumder, 2024), (Rayhan, Hossain, Mim, & Ali, 2024), (Pouryoussefi, Mirzaei, Nazemi, Fouladi, & Doostmahmoudi, 2016). In the light of the data obtained, the optimum aerodynamic values were determined as the angle of attack $\alpha=8^\circ$, $Re=1,000,000$.

3.2.2. Surface pressure and velocity

The distribution of the surface pressure coefficient across the upper and lower surfaces of the NACA 0015 airfoil, along with the comparison of velocity values, yields critical insights into the underlying mechanism. Figure 5 presents the surface pressure distribution curve.

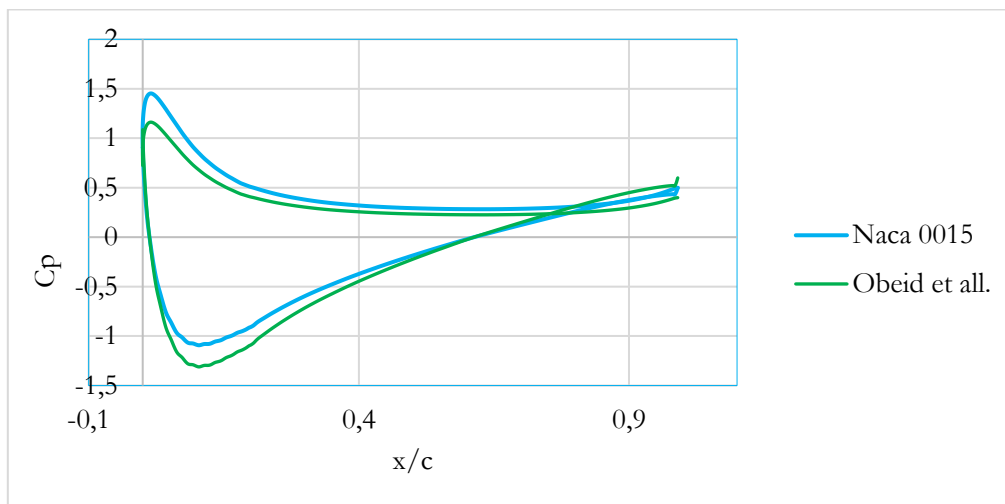


Figure 5. Pressure Coefficient Distribution Curve along the Upper and Lower Surfaces for Angle of Attack $\alpha=8^\circ$

At low angles of attack, the C_p distribution exhibits negative pressure at the apex. After this juncture, the pressure coefficient progressively escalates along the chord. It attains its peak value when $C_p=-1.1$ at the stop line. Figure 6 illustrates that the flow remains adhered to the suction surface before commencing separation. The pressure coefficient increases as the flow on the lower surface decelerates, while it decreases as the flow speed on the upper surface accelerates. Consequently, as the pressure differential between the lower and upper surfaces escalates, the lift force correspondingly increases. The acquired values align with the literature (Obeid, Jha, & Ahmadi, 2017).

Figure 6 shows the velocity contour generated on the NACA 0015 airfoil. The impact of the variation in pressure differential between the lower and upper surfaces is distinctly evident from the alterations in velocity depicted on the velocity contour. This impact is seen in Figure 6b.

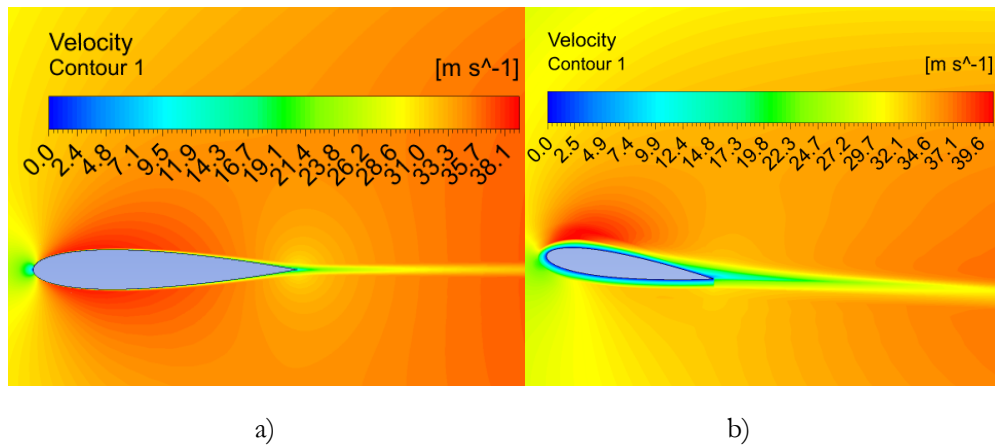


Figure 6. Velocity Magnitude Contour of NACA 0015 Airfoil for Angle of Attack a) $\alpha=0^\circ$ and b) $\alpha=8^\circ$

In Figure 6a, the average speed values in the upper and lower regions of the wing profile are 36.5 m/s. In Figure 6b, the average speed values in the upper and lower regions of the wing profile are determined to be 29.6 m/s and 18.1 m/s, respectively (The average speed is calculated along a line). In Figure 6a, the equivalence of average speed values in the upper and lower regions can be attributed to an angle of attack of 0 degrees. In Figure 5, the pressure differential between the upper and lower sections of the wing profile also influenced the average velocity values.

4. CONCLUSION

This study analyzes and compares the aerodynamic performance of the NACA 0015 airfoil. An inner slot with a chord length of 1 meter is chosen. CFD simulations are conducted at low Re (200,000, 400,000, 600,000, 800,000 and 1,000,000) and varying angles of attack ($\alpha=-10^\circ, 10^\circ$). Two distinct turbulence models, Spalart-Allmaras and K-Epsilon are employed in the simulations. The studies utilizing the Spalart-Allmaras turbulence model demonstrate enhanced performance. The findings derived from the study are as follows:

- The increase of the angle of attack led to an elevation in the aerodynamic force coefficients across all instances (C_l , C_d and C_l/C_d). In the conducted studies, the angle of attack was constrained to $\alpha=-10^\circ, 10^\circ$. Literature studies indicate a reduction in force coefficients, particularly after $\alpha=15^\circ$.
- Upon evaluation of the results, optimal aerodynamic performance is noted at $Re=1,000,000$ using the Spalart-Allmaras turbulence model.
- The pressure coefficient (C_p) on the upper and lower surfaces of the airfoil at an angle of attack $\alpha=8^\circ$ was computed. A negative pressure coefficient (maximum $C_p=-1.1$) was observed on the upper surface, whereas a positive pressure coefficient (maximum $C_p=1.5$) was detected on the lower surface. The disparity in pressure coefficients on the surfaces also influenced the average velocity on the upper and lower surfaces. The average speed on the upper surface at an angle of attack $\alpha=8^\circ$ was determined to be 29.6 m/s, while the average speed on the lower surface was calculated to be 18.1 m/s.

The results indicate that the NACA 0015 airfoil could be an effective means to enhance aerodynamic performance. In forthcoming research, we intend to fabricate this airfoil in an experimental setting and conduct a comprehensive simulation of the wing. We intend to commercialize the study based on the results acquired from testing this airfoil in an experimental wind turbine.

ETHICAL STATEMENT & GENERAL STATEMENTS

This article meets the standards of research and publication ethics.

AUTHORS' CONTRIBUTIONS

All authors have read and approved the final manuscript.

FUNDING

Not applicable.

AVAILABILITY OF DATA AND MATERIALS

Not applicable.

COMPETING INTERESTS

The authors declare that they have no competing interests.

REFERENCES

- Abed, K. N. (2023). The effect of location and shape of vortex generators on aerodynamic characteristics of a NACA 4415 airfoil. *Al-Nabrain Journal for Engineering Sciences*, 26(3), pp. 198–204. doi:10.29194/NJES.26030198
- Abramova, K. A., Alieva, D. A., Sudakov, V. G., & Khrabrov, A. N. (2024). Modeling of the unsteady aerodynamic characteristics of the NACA 0015 airfoil from the data of numerical calculations of the flow. *Fluid Dynamics*, 59(1), s. 130–44. doi:10.1134/S0015462823602929
- Ai, Q., Jawahar, H. K., & Azarpeyvand, M. (2016). Experimental investigation of aerodynamic performance of airfoils fitted with morphing trailing edges. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. doi:10.2514/6.2016-1563
- Almusawi, M., Rishack, Q., & Al-fahham, M. (2022). Effect of spanwise semicircular groove on NACA 0012 airfoil. *Basrah Journal for Engineering Science*, 22(2), pp. 23–26. doi:10.33971/bjes.22.2.4
- Arif, M. S., Afzal, M. J., Javaid, F., Tayyaba, S., Ashraf, M. W., Ishraque, G. F., & Hossain, M. K. (2022). Laminar flow analysis of NACA 4412 airfoil through ANSYS fluent. *Proceedings of International Exchange and Innovation Conference on Engineering & Sciences (IEICES)*, 8, pp. 394–399. doi:10.5109/5909123
- Ayaz Ümütlü, H. C., Kiral, Z., & Karadeniz, Z. H. (2023). Experimental investigation of NACA 4415 airfoil using vibration data for stall detection. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(10), pp. 1551–1559. doi:10.1108/AEAT-03-2023-0077
- Bangga, G., Hutani, S., & Heramarwan, H. (2021). The effects of airfoil thickness on dynamic stall characteristics of high-solidity vertical axis wind turbines. *Advanced Theory and Simulations*, 4(6). doi:10.1002/adts.202000204
- Berger, M., Raffener, P., Senfter, T., & Pillei, M. (2024). A comparison between 2D DeepCFD, 2D CFD simulations and 2D/2C PIV measurements of NACA 0012 and NACA 6412 airfoils. *Engineering Science and Technology, an International Journal*(57). doi:10.1016/j.jestch.2024.101794
- Bogateanu, R., Dumitrache, A., Dumitrescu, H., & Stoica, C. I. (2014). Reynolds number effects on the aerodynamic performance of small VAWTs. *Scientific Bulletin-University Politehnica of Bucharest*, 76(1). Retrieved Feb 21, 2025, from https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/full084_828545.pdf
- Dell'Orso, H., & Amitay, M. (2018). Parametric investigation of stall cell formation on a NACA 0015 airfoil. *AIAA Journal*, 56(8), pp. 3216–3228. doi:10.2514/1.J056850
- Feng, Y. (2023). A numerical study on the optimization of an airfoil design. *Theoretical and Natural Science*, 11(1), pp. 199–206. doi:10.54254/2753-8818/11/20230408
- Gopalarathnam, A., & Selig, M. S. (2001). Low-speed natural-laminar-flow airfoils: Case study in inverse airfoil design. *Journal of Aircraft*, 38(1), pp. 57–63. doi:10.2514/2.2734
- Hassan, M. I., Andan, A. D., Asrar, W., & Sapardi, M. A. (2023). Large Eddy simulation of low Reynolds number flow around a NACA0015 airfoil with modified trailing edges. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 112(1), pp. 57–79. doi:10.37934/aram.112.1.5779
- He, Y., & Agarwal, R. K. (2014). Shape optimization of NREL S809 airfoil for wind turbine blades using a multiobjective genetic algorithm. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2014, pp. 1–13. doi:10.1155/2014/864210

- Hu, H., & Tamai, M. (2008). Bioinspired corrugated airfoil at low Reynolds numbers. *Journal of Aircraft*, 45(6), pp. 2068–2077. doi:10.2514/1.37173
- Jawahar, K. H., Q. A., & Azarpeyvand, M. (2018). Aerodynamic and aeroacoustic performance of airfoils fitted with morphing trailing-edges. *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. doi:10.2514/6.2018-2815
- Julian, J., Siswanto, S. A., Wahyuni, F., & Bunga, N. T. (2023). Analysis of the use of bio flap on NACA 4415 with numerical methods. *Jurnal Asimetri: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, pp. 251–262. doi:10.35814/asiimetrik.v5i2.4768
- Kaya, A. F. (2024). Investigation of a rib structure effect on the aerodynamic performance of a plain flapped symmetrical airfoil. *Journal of Polytechnic*, 27(3), pp. 967–974. doi:10.2339/politeknik.1159822
- Launder, B. E. (1972). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press.
- Li, L., Sherwin, S. J., & Bearman, P. W. (2002). A moving frame of reference algorithm for fluid/structure interaction of rotating and translating bodies. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 38(2), pp. 187–206. doi:10.1002/flid.216
- Li, S., Li, Y., Yang, C., Zhang, X., Wang, Q., Li, D., . . . Wang, T. (2018). Design and testing of a LUT airfoil for straight-bladed vertical axis wind turbines. *Applied Sciences*, 8(11). doi:10.3390/app8112266
- Liu, Y., Lu, L., Fang, L., & Gao, F. (2011). Modification of Spalart–Allmaras model with consideration of turbulence energy backscatter using velocity helicity. *Physics Letters A*, 375(24), pp. 2377–2381. doi:10.1016/j.physleta.2011.05.023
- Mazumder, H. M. (2024). CFD Analysis of NACA Airfoils for Wind Turbine and Aerospace Applications at Low Reynolds Numbers. Bangladesh University of Engineering and Technology (BUET).
- Medjroubi, W., Stoevesandt, B., Carmo, B., & Peinke, J. (2011). High-order numerical simulations of the flow around a heaving airfoil. *Computers & Fluids*, 51(1), pp. 68–84. doi:10.1016/j.compfluid.2011.07.015
- Nepal, S., Qijun, Z., Bo, W., Kamruzzaman, M., & Adhikari, S. (2023). Aerodynamic simulation and optimization of micro aerial vehicle rotor airfoil at low Reynolds number. *Asian Review of Mechanical Engineering*, 12(1), pp. 24–38. doi:10.51983/arme-2023.12.1.3670
- Obeid, S., Jha, R., & Ahmadi, G. (2017). RANS simulations of aerodynamic performance of NACA 0015 flapped airfoil. *Fluids*, 2(1). doi:10.3390/fluids2010002
- Pack Melton, L., Hannon, J., Yao, C.-S., & Harris, J. (2008). Active flow control at low Reynolds numbers on a NACA 0015 airfoil. *26th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. doi:10.2514/6.2008-6407
- Pouryoussefi, S. G., Mirzaei, M., Nazemi, M.-M., Fouladi, M., & Doostmahmoudi, A. (2016). Experimental study of Ice accretion effects on aerodynamic performance of an NACA 23012 airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(3), pp. 585–595. doi:10.1016/j.cja.2016.03.002
- Rayhan, A. M., Hossain, M. S., Mim, R. H., & Ali, M. (2024). Computational and experimental study on the aerodynamic performance of NACA 4412 airfoil with slot and groove. *Heliyon*, 10(11). doi:10.1016/j.heliyon.2024.e31595
- Saeed, F., Paraschivoiu, I., Trifu, O., Hess, M., & Gabrys, C. (2011). Inverse airfoil design method for low-speed straight-bladed Darrieus-type VAWT applications. *Wind Engineering*, 35(3), pp. 357–67. doi:10.1260/0309-524X.35.3.357
- Sato, M., Asada, K., Nonomura, T., Kawai, S., & Fujii, K. (2017). Large-Eddy simulation of NACA 0015 airfoil flow at Reynolds number of 1.6×10^6 . *AIAA Journal*, 55(2), pp. 673–679. doi:10.2514/1.J054963
- Siau, W. L., Bonnet, J. P., Tensi, J., Cordier, L., Noack, B. R., & Cattafesta, L. (2010). Transient dynamics of the flow around a NACA 0015 airfoil using fluidic vortex generators. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31(3), pp. 450–459.
- Spalart, P., & Allmaras, S. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. doi:10.2514/6.1992-439
- Sun, H. (2011). Wind turbine airfoil design using response surface method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(5), pp. 1335–40. doi:10.1007/s12206-011-0310-6
- Tanürün, H. E., Akın, A. G., Acır, A., & Şahin, İ. (2024). Experimental numerical investigation of roughness structure in wind turbine airfoil at low Reynolds number. *International Journal of Thermodynamics*, 27(3), pp. 26–36. doi:10.5541/ijot.1455513

Zulkefli, N. F., Ahamat, M. A., Mohd Safri, N. F., Mohd Nur, N., & Mohd Rafie, A. S. (2019). Lift enhancement of NACA 4415 airfoil using biomimetic shark skin vortex generator. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)* , 8(4), pp. 9231–9234. doi:10.35940/ijrte.D9222.118419