



MARMARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**İNSANSIZ HAVA ARACI İNİŞ TAKIMI  
MALZEME SEÇİMİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ  
KARAR VERME İLE BELİRLENMESİ**

YILDIZ SAYICI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Doç. Dr. Ahmet FEYZİOĞLU

İSTANBUL, 2025



**MARMARA UNIVERSITY**  
**INSTITUTE FOR GRADUATE STUDIES**  
**IN PURE AND APPLIED SCIENCES**



**DETERMINATION OF UNMANNED AERIAL  
VEHICLE LANDING GEAR MATERIAL  
SELECTION WITH USING MULTI-CRITIA  
DECISION MAKING METHOD**

---

---

**YILDIZ SAYICI**

**MASTER THESIS**  
Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering

**Thesis Supervisor**  
Doç. Dr. Ahmet FEYZIOĞLU

**ISTANBUL, 2025**

---

---

## TEŞEKKÜR

Yaşamımın her alanında yolumu aydınlatan; karşılaştığım zorluklarda cesaret verici sözleri ve destekleyici tutumuyla daima umut aşıl原因, daha iyisi için çaba göstermeyi ve asla pes etmeden ilerlemeyi öğreten kıymetli Üstadım Mustafa ÖZBAĞ Beyefendi'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez süreci boyunca bilgi ve deneyimleriyle çalışmalarına yön gösteren, gösterdiği ilgi ve desteğiyle katkı sağlayan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ahmet FEYZİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince vaktini ayırarak bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Üsteğmen Hüseyin HALİLOĞLU'na teşekkür ederim.

Yüksek lisans yapmama vesile olan amcam Ahmet SAYICI'ya teşekkür ederim.

Son olarak, bana olan sevgilerini hiçbir zaman esirgemeyen ve eğitim hayatım boyunca aldığım kararları her zaman destekleyen annem Emine SAYICI ve babam Emin SAYICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos, 2025

Yıldız SAYICI  
(Makine Mühendisi)

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	i
ÖZET .....	v
SEMBOLLER .....	ix
KISALTMALAR .....	x
ŞEKİL LİSTESİ .....	xi
TABLO LİSTESİ .....	xii
1. GİRİŞ/INTRODUCTION .....	1
1.1. Literatür Araştırması .....	3
1.2 Tezin Kapsamı.....	6
1.2.1 Tezin Önemi: .....	7
1.2.2 Tezin Hedefi: .....	8
1.2.3 Literatüre Katkı: .....	8
1.3 Tezin Yapısı .....	9
2. ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME (ÇÖKV) YÖNTEMLERİ.....	10
2.1. ÇÖKV Sürecine Genel Bakış .....	10
2.2 Mühendislikte ÇÖKV Yöntemlerinin Önemi .....	11
2.3 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Yöntemi .....	12
2.3.1 AHP Süreci.....	13
2.3.3 AHP'nin Mühendislik Uygulamalarındaki Yeri .....	14
2.3.4 AHP'nin Avantajları .....	15
2.4 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) Yöntemi .....	15
2.4.1 TOPSIS Süreci .....	15
2.4.2 TOPSIS'in Mühendislikteki Kullanım Alanları.....	16
2.4.3 TOPSIS'in Avantajları.....	17
2.5 Diğer ÇÖKV Yöntemleri .....	17
2.5.1 VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) .....	17
2.5.2 ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality).....	17
2.5.3 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations).....	18
2.5.4 MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis).....	18
2.5.5 Bulanık ÇÖKV Yöntemleri (Fuzzy MCDM).....	18
2.5.6 Sonuç ve Değerlendirme .....	18
2.6 Yöntem Seçim Gerekçesi ve Literatürde Kullanımı .....	19
2.6.1 AHP Yönteminin Tercih Edilme Nedenleri .....	20

2.6.2 TOPSIS Yönteminin Tercih Edilme Nedenleri.....	20
2.6.3 Yöntemlerin Entegrasyon Gerekçesi.....	21
2.6.4 Veri Tipine Uygunluk ve Hesaplama Pratiklik .....	21
3 İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI VE İNİŞ TAKIMLARI .....	22
3.1 İHA'ların Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları .....	24
3.1.1 Uçuş İrtifasına Göre Sınıflandırma .....	24
3.1.2 Kalkış ve İniş Kabiliyetine Göre Sınıflandırma .....	26
3.1.3 Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırma .....	27
3.1.4 Sınıflandırmanın İniş Takımı Tasarımına Etkisi .....	28
3.2 İniş Takımı Tasarım Kriterleri .....	30
3.2.1 Temel Fonksiyonlar.....	31
3.2.2 Mühendislik Tasarım Kriterleri.....	32
3.2.3 Kullanılan Malzeme Örnekleri.....	33
3.2.4 Malzeme Seçiminde Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) Yaklaşımı .....	34
3.3 İHA İniş Takımlarında Kullanılan Malzeme Türleri .....	35
3.3.1 Çelik Alaşımları .....	35
3.3.2 Alüminyum Alaşımları.....	36
3.3.3 Titanyum Alaşımları.....	37
3.3.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler.....	37
3.3.5 Hibrit ve Katmanlı Malzemeler.....	38
3.3.6 Sonuç ve Değerlendirme .....	38
3.4 İniş Takımı Türleri ve Yapısal Özellikleri .....	39
3.4.1. Sabit (Fiks) İniş Takımı.....	39
3.4.2. Geri Çekilebilir (Retractable) İniş Takımı .....	40
3.4.3. Skid (Kızak Tipi) İniş Takımı .....	41
3.4.4. Tekerlekli İniş Takımı (Konvansiyonel veya Tricycle Tipi).....	41
3.4.5. Paraşüt Tabanlı İniş Sistemi .....	42
4 YÖNTEM VE MODEL .....	43
4.1 Karar Probleminin Tanımı.....	43
4.2 Karar Kriterlerinin Belirlenmesi.....	44
4.3 Alternatif Malzemelerin Belirlenmesi.....	46
4.3.1 Karşılaştırmalı Değerlendirme .....	48
4.4 AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması .....	48
4.4.1 Hiyerarşik Yapının Oluşturulması.....	49
4.4.2 Kriterler Arası İkili Karşılaştırma Matrisi.....	49
4.4.3 Normalize Matris ve Ağırlık Vektörü .....	50
4.4.4 Tutarlılık Oranı (CR) Hesabı.....	51

4.4.5 Sonuç ve Değerlendirme .....	51
4.5 TOPSIS ile Malzeme Sıralaması .....	51
4.5.1 Karar Matrisi .....	52
4.5.2 Normalize Edilmiş Karar Matrisi .....	52
4.5.3 Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi.....	53
4.5.4 İdeal ve Negatif İdeal Çözüm.....	53
4.5.5 Uzaklıkların Hesaplanması.....	54
4.5.6 Görelî Yakınlık ve Sıralama.....	54
4.5.7 Sonuç ve Değerlendirme .....	55
4.6 Yöntemlerin Karşılaştırılması .....	55
4.6.1 AHP Yönteminin Özellikleri.....	55
4.6.2 TOPSIS Yönteminin Özellikleri .....	56
4.6.3 Yöntemlerin Birlikte Kullanımı .....	56
4.6.4 Değerlendirme .....	57
5 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME .....	57
5.1 Hesaplama Sonuçları .....	57
5.1.1 AHP Sonuçları.....	57
5.1.2 TOPSIS Sonuçları .....	58
5.2 Bulguların Yorumu.....	59
5.3 Literatürle Karşılaştırma.....	60
5.4 Çalışmanın Literatüre Katkısı.....	62
6 SONUÇ VE ÖNERİLER .....	63
6.1 Mühendislik Uygulamalarına Öneriler.....	63
6.2 Gelecek Çalışmalara Yönelik Öneriler.....	64
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	<b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>

## ÖZET

# İNSANSIZ HAVA ARACI İNİŞ TAKIMI MALZEME SEÇİMİNİN ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME İLE BELİRLENMESİ

İnsansız hava araçları (İHA'lar), köklü geçmişiyle havacılık ve savunma teknolojilerinde önemli bir yer edinmiştir. İlk olarak 20. yüzyılın başlarında askeri maksatlarla kullanılmaya başlanan bu araçlar, zamanla teknolojinin gelişimine paralel olarak farklı sektörlerde de kendine geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Günümüzde İHA'lar; istihbarat toplama, gözetleme, keşif ve hedef belirleme gibi askeri faaliyetlerin yanı sıra, tarımsal üretimin artırılması, çevresel izleme, afet yönetimi, iletişim ağlarının genişletilmesi, haritalama ve coğrafi bilgi sistemleri gibi pek çok sivil uygulamada da etkin bir biçimde kullanılmaktadır.

İHA'ların tasarım süreci; aerodinamik yapıdan itki sistemlerine, elektronik bileşenlerden kontrol yazılımına kadar birçok kritik unsuru içermektedir. Bu unsurlar arasında iniş takımı sistemleri, hem yapısal hem de işlevsel açıdan hayati bir rol üstlenmektedir. İniş takımları, uçağın kalkış ve iniş sırasında güvenli temasını sağlayan, taksi manevralarını mümkün kılan ve iniş anında oluşan statik ile dinamik yükleri sönmüleyen temel mekanik sistemlerdir. Bu sistemlerin yalnızca doğru şekilde tasarlanması değil, aynı zamanda üretiminde kullanılacak malzemelerin doğru belirlenmesi de büyük önem taşımaktadır. Çünkü iniş takımı malzeme seçimi; uçağın yapısal dayanımı, ağırlığı, güvenilirliği, uzun ömürlülüğü ve bakım maliyetleri üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu nedenle, farklı mühendislik disiplinlerini kapsayan iniş takımı sistemleri için malzeme seçimi, çok boyutlu değerlendirme gerektiren karmaşık bir karar süreci haline gelmektedir.

Bu noktada, Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri devreye girerek; mühendislik kriterleri arasında denge kurmayı, alternatifleri sistematik biçimde değerlendirmeyi ve optimum malzeme seçimini nesnel temellere dayandırmayı mümkün kılmaktadır. Dolayısıyla bu tür analitik yöntemlerin kullanımı, iniş takımı gibi kritik bir bileşenin tasarımında karar vericilere güçlü bir destek sunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, İHA iniş takımı için en uygun malzemenin belirlenmesi amacıyla Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemlerinden Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS teknikleri birlikte kullanılmıştır. Değerlendirme sürecinde; akma gerilmesi, kopma gerilmesi, sertlik, korozyon direnci ve malzeme bulunabilirliği gibi teknik kriterler esas alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda alternatif malzemeler çok boyutlu olarak değerlendirilmiş ve en uygun seçeneğin belirlenmesi sağlanmıştır.

Bu çalışma, İHA tasarımı ve üretiminde görev alan mühendis ve karar vericilere, iniş takımı malzeme seçimi konusunda sistematik ve nesnel bir yol haritası sunarak tasarım sürecine önemli katkılar sağlamaktadır.



## **ABSTRACT**

### **DETERMINATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLE LANDING GEAR MATERIAL SELECTION WITH USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHOD**

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have a long-standing history and hold a significant position in aviation and defense technologies. Initially introduced for military purposes in the early 20th century, these vehicles have, over time, found extensive applications across various sectors in parallel with technological advancements. Today, UAVs are actively used not only in military operations such as intelligence gathering, surveillance, reconnaissance, and target identification but also in civil domains, including increasing agricultural productivity, environmental monitoring, disaster management, communication infrastructure development, mapping, and geographic information systems.

The design process of UAVs involves numerous critical components, ranging from aerodynamic structures and propulsion systems to electronic subsystems and control software. Among these, the landing gear systems play a vital role both structurally and functionally. Landing gears are fundamental mechanical systems that ensure safe contact during takeoff and landing, enable taxiing movements, and absorb the static and dynamic loads generated upon landing. Therefore, in addition to precise design, selecting the appropriate materials for these systems is of utmost importance. The choice of landing gear material directly affects the aircraft's structural strength, weight, reliability, durability, and maintenance costs. As a result, material selection for landing gear systems—spanning multiple engineering disciplines—becomes a complex decision-making process requiring multidimensional evaluation.

At this point, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods come into play by enabling a balanced assessment among engineering criteria, facilitating systematic comparison of alternatives, and supporting optimal material selection on an objective basis. Thus, the use of such analytical approaches offers strong decision support in the design of critical components like landing gear.

In this thesis, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), both MCDM methods, are employed together to determine the most suitable material for UAV landing gear. The evaluation process is based on technical criteria such as yield strength, tensile strength, hardness, corrosion resistance, and material availability.

Through this analysis, alternative materials were evaluated in a multidimensional manner, and the optimal material was identified. This study provides engineers and decision-makers involved in UAV design and production with a systematic and objective roadmap for selecting landing gear materials, offering significant contributions to the design process.



## SEMBOLLER

- A+** : Pozitif ideal çözüm kümesi
- A-** : Negatif ideal çözüm kümesi
- C<sub>i</sub>** : i. alternatifin ideal çözüme yakınlık katsayısı
- CR** : Tutarlılık oranı (Consistency Ratio)
- d<sub>i+</sub>** : i. alternatifin pozitif ideal çözüme olan uzaklığı
- d<sub>i-</sub>** : i. alternatifin negatif ideal çözüme olan uzaklığı
- pH** : Asitlik derecesi
- r<sub>ij</sub>** : Normalize edilmiş karar matrisi değer
- RI** : Rastgele tutarlılık indeksi (Random Index)
- S** : Kanal kesit alanı (m<sup>2</sup>)
- t** : Zaman (saniye)
- T** : Sıcaklık (°C)
- v<sub>ij</sub>** : Ağırlıklı normalize karar matrisi değeri
- w<sub>j</sub>** : kriterin ağırlığı
- x<sub>ij</sub>** : i. alternatifin j. kritere göre değeri
- λ<sub>max</sub>** : AHP yöntemi için karşılaştırma matrisinin en büyük özdeğeri

## **KISALTMALAR**

<b>AHP</b>	: Analitik Hiyerarşi Süreci
<b>ÇÖKV</b>	: Çok Ölçütlü Karar Verme
<b>ELECTRE</b>	: Elimination and Choice Expressing Reality
<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>MOORA</b>	: Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis
<b>PH</b>	: Precipitation Hardening
<b>PROMETHEE</b>	: Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation
<b>TOPSIS</b>	: Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
<b>VIKOR</b>	: Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje

## ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 3. 1. (A), (B) Sabit iniş takımı; (C), (D) katlanabilir iniş takımı [81]. ..... 39
- Şekil 4. 1. AHP hiyerarşisi: Amaç – Kriterler – Alternatifler. .... 49



## TABLO LİSTESİ

Şekil 3. 1. (A), (B) Sabit iniş takımı; (C), (D) katlanabilir iniş takımı [81]. .....	39
Tablo 4. 1. Malzeme özellik tablosu.....	48
Tablo 4. 2. Kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi.....	50
Tablo 4. 3. Normalize edilmiş matris ve kriter ağırlıkları. ....	50
Tablo 4. 4. Karar Matrisi.....	52
Tablo 4. 5. Normalize karar matrisi. ....	52
Tablo 4. 6. Ağırlıklı normalize karar matrisi. ....	53
Tablo 4. 7. İdeal ve negatif ideal değerler. ....	53
Tablo 4. 8. Uzaklık değerleri. ....	54
Tablo 4. 9. Görelî yakınlık ve sıralama.....	55
Tablo 5. 1. Kriter ağırlık tablosu.....	57
Tablo 5. 2. Ağırlıklı normalize matris. ....	58
Tablo 5. 3. Pozitif ve negatif ideal değerler.....	58
Tablo 5. 4 İdeal noktalara uzaklıklar ve yakınlık katsayıları.....	58

## 1. GİRİŞ/INTRODUCTION

Günümüzde hızla gelişen teknoloji, mühendislik uygulamalarını köklü bir şekilde dönüştürmektedir. Özellikle havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek teknoloji gerektiren alanlarda sistemlerin hem daha hafif, hem daha dayanıklı, hem de ekonomik olması beklenmektedir [1]. Bu doğrultuda, İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) son yıllarda sadece askeri amaçlarla değil; sivil, ticari ve araştırma faaliyetlerinde de yaygın biçimde kullanılan çok yönlü sistemler haline gelmiştir [2]. İHA'lar; düşük maliyet, riskten arındırılmış görev icrası, uzun süreli gözetim ve operasyonel esneklik gibi avantajlarıyla geleneksel hava araçlarının önüne geçmekte, böylece modern mühendislik sistemlerinin dinamik bir örneğini oluşturmaktadır [3].

İHA sistemlerinin başarısı, yalnızca kontrol algoritmaları, sensör sistemleri veya aerodinamik performansla sınırlı değildir. Aynı zamanda taşıyıcı yapılar, iniş sistemleri, güç aktarma elemanları gibi mekanik bileşenlerin doğru seçimi ve tasarımı da uçuş güvenliği, görev başarımı ve yapısal dayanım açısından belirleyici rol oynamaktadır [4]. Bu bağlamda, özellikle iniş takımı sistemleri, İHA'nın güvenli bir şekilde kalkış yapmasını, yere inişini ve yer hareketlerini sağlamasının ötesinde; uçuşun tamamı boyunca gövdenin darbe yüklerinden korunması açısından kritik bir işlev görmektedir [5].

İniş takımı sistemlerinin mühendislik tasarımında karşılaşılan en büyük zorluklardan biri; hafiflik ile yüksek dayanım gibi çoğu zaman çelişen gereksinimlerin aynı anda sağlanmasıdır [6]. Bu nedenle, iniş takımlarında kullanılacak malzeme seçimi, çok sayıda kriterin aynı anda değerlendirildiği karmaşık bir mühendislik problemi [7]. Malzeme seçimi; yalnızca mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklere göre değil, aynı zamanda yoğunluk, üretilebilirlik, korozyon direnci, maliyet ve tedarik edilebilirlik gibi birçok mühendislik ve operasyonel kriteri de içerir [8].

Geleneksel malzeme seçimi yöntemleri çoğunlukla uzman görüşüne veya mühendislik tecrübesine dayanmakta, bu da seçimin subjektif kalmasına ve farklı karar vericiler tarafından değişken sonuçlar elde edilmesine neden olmaktadır [9]. Bu tür sınırlamaların aşılması ve mühendislik kararlarının daha bilimsel, sistematik ve tekrar edilebilir hale gelmesi amacıyla, son yıllarda Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri malzeme seçimi problemlerinde yaygın şekilde kullanılmaktadır [10].

ÇÖKV yöntemleri, çok sayıda alternatifin farklı kriterler altında sistematik biçimde değerlendirilmesini sağlar. Özellikle AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri, mühendislik literatüründe en yaygın kullanılan tekniklerdendir [11]. AHP yöntemi ile kriterlerin göreceli önemi belirlenebilirken, TOPSIS yöntemi alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlıklarına göre sıralanmasını mümkün kılar [12].

Son yıllarda yapılan araştırmalar, İHA iniş takımı sistemlerinde kompozit malzemelerin kullanımının hem yapısal dayanım hem de ağırlık optimizasyonu açısından avantajlar sağladığını göstermektedir [13]. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve epoksi matrisli kompozit malzemeler, hem darbe dayanımı hem de korozyon direnci açısından dikkat çekmektedir [14]. Bu malzemelerin aynı zamanda üretim kolaylığı ve uzun ömür sunması, İHA tasarımlarında tercih edilmesini sağlamaktadır [15].

Bu tez çalışmasında, İHA'ların iniş takımı sistemlerinde kullanılacak en uygun malzeme alternatifinin belirlenmesi amacıyla AHP ve TOPSIS yöntemleri entegre bir şekilde kullanılmıştır. Bu amaçla, farklı malzemelerin akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve bulunabilirlik gibi kriterler çerçevesinde değerlendirilmiş; her bir kriterin önemi AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmış ve alternatifler TOPSIS yöntemiyle sıralanarak en uygun seçenek belirlenmiştir [16].

Bu çalışma sadece akademik katkı sunmakla kalmamakta, aynı zamanda havacılık ve savunma sanayiindeki mühendislik karar alma süreçlerine pratik bir karar destek modeli sunmaktadır. Özellikle son yıllarda İHA'ların sayısındaki artış ve sistemlerin çeşitlenmesi, iniş takımı gibi kritik bileşenlerin daha güvenilir ve optimize edilmesini gerekli kılmaktadır [17]. Tezin amacı da bu bağlamda, sistematik ve ölçülebilir bir yöntemle İHA iniş takımlarında malzeme seçiminin nasıl iyileştirilebileceğini ortaya koymaktır [18]. İniş takımlarında kullanılan malzemeler, taşıma kapasitesi, darbe dayanımı ve yorulma ömrü gibi kriterler dikkate alınarak titizlikle seçilmelidir [19].

## 1.1. Literatür Araştırması

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), teknolojik ilerlemelerin etkisiyle yalnızca askeri sistemlerde değil; sivil havacılık, tarım, enerji, arama-kurtarma ve afet yönetimi gibi pek çok farklı sektörde etkin biçimde kullanılmaktadır. Operasyonel esneklik sunmaları, düşük maliyetli olmaları ve insan müdahalesine ihtiyaç duymadan görev yapabilmeleri, bu araçların modern mühendislik sistemleri arasında hızla benimsenmesini sağlamıştır.

Valavanis ve Vachtsevanos'un çalışması, İHA'ların yapısal bileşenleri ve görev çeşitliliği açısından sistematik bir inceleme sunarken [20]; Bayraktar, özellikle sivil ve ticari drone teknolojilerinin gelişim süreci ile uygulama alanlarına odaklanmıştır [21]. Öte yandan Şahin, İHA'ların sivil kullanımıyla bağlantılı hukuki ve teknik çerçeveleri irdelemiştir [22].

İHA sistemlerinin başarısı yalnızca elektronik donanım ve yazılım algoritmalarına değil, aynı zamanda mekanik bileşenlerin doğru mühendislik ilkeleriyle tasarlanmasına bağlıdır. Bu bağlamda iniş takımları, İHA'ların güvenli kalkış ve inişlerini sağlamakla kalmaz; aynı zamanda zeminle etkileşim sırasında ortaya çıkan darbe yüklerinin sönmülerek gövdeye zarar vermemesini de garanti altına alır.

Hamurcu ve Eren'in yürüttüğü çalışmada, iniş takımı sistemlerinin darbe sönmüleme kapasiteleri ile yapısal tasarım parametreleri detaylı biçimde analiz edilmiştir [23]. Koçak ve Korkut ise burun iniş takımlarında topoloji optimizasyonu uygulayarak hem ağırlık azaltımı hem de dayanım artışı sağlamayı hedeflemiştir [24]. Benzer şekilde Sun ve çalışma arkadaşları, İHA'ların iniş takımı sistemlerinde ağırlık dengesi ve darbe dayanımının birlikte optimize edilmesinin sistem performansını olumlu etkilediğini göstermiştir [25].

Tuğrul'un analizinde, İHA iniş takımı tasarımında dikkate alınması gereken mühendislik kriterlerinin sistem başarımına olan etkileri değerlendirilmiş; özellikle hafiflik, dayanım ve darbe emilimi gibi faktörlerin kritikliği vurgulanmıştır [26]. Chakraborty ise, burun iniş takımı bileşenlerinin topoloji optimizasyonu ile hem mukavemetin hem de ağırlık dağılımının dengelenmesine yönelik bir yaklaşım sunmuştur [27].

Malzeme seçimi, iniş takımı gibi görev açısından kritik mekanik sistemlerde pek çok teknik kriterin aynı anda değerlendirilmesini gerektirir. Geleneksel yöntemlerin karar vericinin deneyimine bağlı olması, bu süreci subjektif hale getirebilir. Bu nedenle çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yaklaşımları, mühendislik tabanlı objektif çözümler sunmak amacıyla tercih edilmektedir [28], [29].

AHP, TOPSIS, VIKOR, ELECTRE ve PROMETHEE gibi ÇÖKV yöntemleri, mühendislik tasarımında çoklu kriterleri göz önünde bulunduran sistematik modellerin geliştirilmesini mümkün kılmıştır [30], [31]. Dionísio'nun çalışmasında da vurgulandığı gibi, iniş takımı gibi bileşenlerin malzeme seçimi doğrudan sistem performansını etkileyen önemli bir tasarım adımıdır [32].

Tekinay ve Bozoğlu Batı, askeri platform seçiminde bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak karar sürecinin doğruluğunu artırmış; benzer şekilde Tuğrul da, alternatif sistemlerin sıralanmasında bulanık mantık temelli TOPSIS yaklaşımının daha nesnel sonuçlar verdiğini göstermiştir [33], [34]. Ashby, malzeme seçiminde çok sayıda mühendislik kriterinin eş zamanlı değerlendirilmesini sağlayan sistematik bir çerçeve önermiştir [35]; Callister ve Rethwisch ise farklı malzemelerin mekanik özelliklerini mühendislik uygulamaları açısından derinlemesine ele almıştır [36].

Kompozit malzemelerin İHA yapılarında sunduğu avantajlar da araştırmalarda dikkat çekmektedir. Yılmaz ve Demirtaş, CFRP türü kompozit malzemeler, metallere kıyaslandığında hem daha dayanıklı hem de çevresel etkilere karşı daha dirençli bir yapı sunmaktadır. Bu malzemelerin hafifliği, özellikle hava araçlarında hem uçuş süresi hem de çeviklik açısından avantaj sağlamaktadır [37].

El-Sayed ve El-Mahdy, iniş takımı tasarımında hem ağırlık optimizasyonu hem de güvenli iniş koşullarının sağlanması gerektiğini savunmuş; bu kapsamda yürütülen çalışmalar, sistem bileşenlerinin yapısal analizlerine odaklanmıştır [38]. Rezaei ve Salimi ise mühendislikte karar vericilerin teknik ve ekonomik tercihlerini birlikte ele alan entegre MCDM modellerinin etkinliğini vurgulamıştır [39].

Austin'in çalışması, İHA sistemlerinin genel tasarım süreci, alt sistem entegrasyonu ve karar destek modellerine yönelik bütüncül bir bakış açısı sunarak hem akademik hem endüstriyel uygulamalar için önemli bir referans niteliği taşımaktadır [40]. Zhou ve arkadaşları ise, belirsizlik ortamlarında karar vermeyi desteklemek amacıyla geliştirilen bulanık AHP ve TOPSIS yöntemlerinin daha esnek ve güvenilir çözümler sunduğunu raporlamıştır [41].

Güngör ve Erol, İHA sistemlerinde malzeme seçimi için AHP tabanlı karar modelleri geliştirerek alternatiflerin sistematik biçimde sıralanmasını sağlamıştır [42]. Kim ve Lee ise, savunma projelerinde AHP, TOPSIS ve VIKOR gibi yöntemlerin teknik, ekonomik ve operasyonel kriterleri dengeli biçimde değerlendirmede başarılı olduğunu ortaya koymuştur [43].

Năstase ve Chițu, AHP-TOPSIS kombinasyonunun İHA platform seçiminde karar doğruluğunu artırdığını ifade etmiştir [44]. He ve çalışma arkadaşları ise, PH tipi çeliklerin darbe, yorulma ve sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını deneysel olarak incelemiş ve bu tür uygulamalarda sağladığı avantajları vurgulamıştır [45].

Çakır ve Güner, iniş takımı tasarımında malzeme seçiminin İHA'ların genel aerodinamik performansı ve yapısal bütünlüğü üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir [46]. Vinodh ve ekibi, sürdürülebilir mühendislik çözümlerinde ÇÖKV yöntemlerinin çevresel ve maliyet temelli optimizasyon için birlikte kullanılmasının önemini belirtmiştir [47].

Faruk ve arkadaşlarının çalışması, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasının karar kalitesini artırdığını ve özellikle malzeme seçimi gibi çok kriterli problemlerde daha etkin sonuçlar sağladığını ortaya koymuştur [48]. Karami ve diğer araştırmacılar ise, kompozit malzemelerin İHA'ların operasyonel başarımına etkisini ele alarak bu malzemelerin askeri sistemlerdeki potansiyeline dikkat çekmiştir [49].

Son olarak Şahin ve Kaya, farklı metal alaşımların yorulma dayanımlarını karşılaştırmış ve 15-5 PH çeliğinin yüksek performans sunduğunu göstermiştir [50]. Adalı, mühendislikte kompozit malzeme seçiminde optimizasyon yöntemlerinin sonlu eleman analizleriyle desteklenmesi gerektiğini ifade ederken [51], Erol ve çalışma arkadaşları AHP-TOPSIS tabanlı karar destek modellerinin İHA tasarım doğruluğunu artırmada etkili olduğunu ortaya koymuştur [52].

## 1.2 Tezin Kapsamı

İnsansız Hava Araçlarının (İHA'ların) mekanik bileşenleri, uçuş güvenliği ve görev başarımı açısından temel yapı taşlarını oluşturur. Bu bileşenlerden biri olan iniş takımı, kalkış ve iniş esnasında karşılaşılan dinamik yüklerin emilmesinde ve hava aracı yapısının korunmasında kritik bir işlev üstlenmektedir. Özellikle darbe yüklerine maruz kalan bu sistem, uçuşun en riskli anlarında görev alarak hem platformun hem de üzerindeki ekipmanın güvenliğini sağlar.

Bu tez çalışması, İHA iniş takımı için en uygun malzemenin belirlenmesini amaçlamaktadır. Malzeme seçimi yalnızca mekanik dayanım gibi tekil bir kritere indirgenemeyecek kadar çok boyutludur. Hafiflik, korozyon direnci, işlenebilirlik, maliyet ve bulunabilirlik gibi birbirleriyle zaman zaman çelişen çok sayıda mühendislik ve ekonomik değişken, karar verme sürecine dahil edilmelidir [5], [7]. Bu çok yönlü yapı, problemi çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleriyle sistematik olarak ele alınması gereken bir mühendislik problemi hâline getirmektedir.

Bu bağlamda tez kapsamında AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. İlk olarak AHP yöntemi ile karar kriterlerinin göreceli ağırlıkları belirlenmiş, ardından bu ağırlıklar kullanılarak TOPSIS yöntemi ile üç farklı malzeme alternatifi sayısal olarak değerlendirilmiştir. Böylece hem nitel hem de nicel ölçütlerin entegre biçimde ele alındığı bir karar modeli geliştirilmiştir.

Çalışmanın özgünlüğü, iniş takımı gibi yüksek darbe ve yorulma yüklerine maruz kalan bir sistem bileşeni için sistematik, tekrarlanabilir ve hesaplanabilir bir malzeme seçim yaklaşımı sunmasıdır. Klasik yöntemlerin aksine, yalnızca mühendislik sezgilerine değil, aynı zamanda sayısal verilere ve çok kriterli değerlendirme tekniklerine dayanan bu yaklaşım, havacılık ve savunma sanayii gibi hassas alanlarda uygulanabilirliği yüksek bir karar desteği sağlamaktadır [53].

Tezin kapsamı, 4340 çeliği, 17-4 PH ve 15-5 PH paslanmaz çelikleri olmak üzere üç alternatifin; akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve malzeme bulunabilirliği gibi kriterler altında çok kriterli analizine dayanmaktadır. Her bir malzeme, mühendislik anlamda rekabetçi niteliklere sahip olmakla birlikte, nihai karar sistematik hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir.

Bu analizler sonucunda ortaya çıkan modelin, yalnızca akademik çalışma bağlamında değil, aynı zamanda endüstrideki malzeme seçim süreçlerine de ışık tutacağı düşünülmektedir.

### **1.2.1 Tezin Önemi:**

İnsansız Hava Araçları, son yıllarda hem askeri hem de sivil kullanım alanlarında hızla yaygınlaşan sistemler arasında yer almakta, bu durum platforma ait alt sistemlerin daha yüksek performans, dayanım ve sürdürülebilirlik gereksinimleriyle tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Özellikle kalkış ve iniş gibi uçuşun en riskli aşamalarında görev alan iniş takımı sistemleri, taşıma kapasitesi, darbe dayanımı ve çevresel etkilere karşı direnç gibi çok yönlü performans kriterlerini bir arada karşılamak zorundadır [3].

Literatürde iniş takımı sistemlerine yönelik çeşitli yapısal analiz ve optimizasyon çalışmaları yer almakla birlikte, malzeme seçim sürecinin çoğunlukla deneyime dayalı ya da tek ölçütlü değerlendirmelerle yürütüldüğü görülmektedir. Oysa malzeme seçimi; mukavemet, hafiflik, işlenebilirlik, maliyet ve çevresel dayanıklılık gibi birbirini etkileyen ve zaman zaman çelişen pek çok kriterin birlikte değerlendirilmesini gerektirir. Bu tür karmaşık mühendislik problemlerine yönelik olarak çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin uygulanması, hem analitik hem de nesnel bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır [6].

Bu tez çalışması, İHA iniş takımı sistemine uygun malzemenin çok kriterli bir değerlendirme modeliyle seçilmesi bakımından literatürdeki mevcut yaklaşımlara önemli bir katkı sunmaktadır. Geliştirilen model, yalnızca teknik performansa değil; aynı zamanda üretim kabiliyeti ve sektörel uygulanabilirlik gibi tasarım dışı faktörleri de dikkate alarak çok yönlü bir karar desteği sağlamaktadır. Ayrıca bu yöntemsel yapı, yalnızca İHA sistemleri ile sınırlı kalmayıp, benzer yapısal yük taşıma gereksinimlerine sahip diğer havacılık ve savunma sistemlerinde de uygulanabilecek esnekliğe sahiptir.

Bu yönüyle çalışma, hem akademik literatüre katkı sağlamakta hem de malzeme mühendisliği, sistem tasarımı ve karar verme teknikleri arasındaki ilişkiyi örnekleyen bütüncül bir model sunmaktadır.

### **1.2.2 Tezin Hedefi:**

Bu tezin temel hedefi, insansız hava araçlarında (İHA) kullanılan iniş takımı sistemleri için uygun malzemenin, çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yaklaşımlarıyla sistematik ve analitik biçimde belirlenmesidir. İniş takımları, hem yapısal yüklerin taşınması hem de uçuş güvenliğinin sağlanması bakımından kritik bir bileşen olup, bu sistemlerde kullanılacak malzemenin seçimi doğrudan uçuş emniyeti, bakım maliyeti ve sistem ömrü üzerinde etkili olmaktadır.

Bu doğrultuda çalışmanın hedefi, üç farklı malzeme alternatifini belirli mühendislik kriterleri altında karşılaştırarak en uygun seçimi yapabilecek bir karar modeli geliştirmektir. Akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve malzeme bulunabilirliği gibi teknik ve pratik kriterler, seçim sürecinin temel yapı taşları olarak ele alınmış ve bu kriterlerin göreceli önem dereceleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi ile hesaplanmıştır. Bu ağırlıklar, TOPSIS yöntemi ile birleştirilerek, her bir malzemenin ideal çözüme olan yakınlığı sayısal olarak değerlendirilmiştir [7].

Yalnızca teknik kriterleri değerlendirmekle sınırlı kalmayan bu tez, karar vericinin mühendislik önceliklerini karar modeline entegre ederek çok yönlü ve uygulamaya dönük bir analiz çerçevesi oluşturmayı hedeflemektedir. Ayrıca, önerilen yöntem yalnızca bu çalışmada ele alınan iniş takımı özelinde değil, benzer çok ölçütlü mühendislik problemlerinde de kullanılabilir bir çerçeve sunma potansiyeline sahiptir [6].

Sonuç olarak bu tezin hedefi, İHA iniş takımlarında kullanılabilir malzemenin mühendislik verileri ve karar verme yöntemleri ışığında en doğru şekilde belirlenmesini sağlamak; böylece hem akademik araştırmalara hem de uygulayıcı tasarımcılara karar desteği sunabilecek bir yöntemsel yapı geliştirmektir.

### **1.2.3 Literatüre Katkı:**

Bu tez çalışması, İHA sistemlerinin iniş takımı bileşenleri özelinde çok kriterli malzeme seçimi yapılmasını ele alan sınırlı sayıda çalışmalardan biri olması bakımından literatüre özgün bir katkı sunmaktadır. Mevcut literatürde, İHA'lar üzerine yapılan çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, özellikle iniş takımı malzeme seçimi gibi spesifik ve kritik bir alt sistemin çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleriyle sistematik olarak ele alınması nadirdir [1], [3], [19].

Bu çalışma, aşağıdaki açılardan literatüre katkı sağlamaktadır:

- İHA iniş takımı tasarımı kapsamında AHP-TOPSIS entegrasyonu ile sistematik bir malzeme seçimi yöntemi önerilmiştir,
- Yük taşıma, darbe sönümlenme, çevresel dayanım ve üretim parametrelerini birlikte değerlendiren çok kriterli bir model sunulmuştur,
- Kullanılan yöntemler, hem mühendislikte karar verme süreçlerine katkı sağlamakta hem de endüstriyel uygulamalara doğrudan entegre edilebilecek pratikliği barındırmaktadır [54], [55].

Bu yönleriyle çalışma, hem akademik hem de uygulamalı mühendislik açısından özgün ve faydalı bir katkı niteliği taşımaktadır.

### 1.3 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması toplam beş ana bölümden oluşmaktadır:

- **Birinci Bölüm:** Giriş bölümünde, İHA iniş takımı malzeme seçiminin önemi açıklanmakta, literatür taraması sunulmakta ve tezin amacı, önemi ve kapsamı detaylı olarak belirtilmektedir.
- **İkinci Bölüm:** Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri olan AHP ve TOPSIS metodolojileri teorik olarak ele alınmakta ve bu yöntemlerin literatürdeki uygulamalarına yer verilmektedir.
- **Üçüncü Bölüm:** İHA'ların genel yapısı, iniş takımı sistemleri ve iniş takımı tasarımında dikkate alınması gereken mühendislik kriterleri açıklanmaktadır.
- **Dördüncü Bölüm:** Belirlenen malzeme alternatifleri AHP ve TOPSIS yöntemleri ile değerlendirilmekte ve sonuçlar analiz edilmektedir.
- **Beşinci Bölüm:** Bulgular tartışılmakta, sonuçlar özetlenmekte ve değerlendirme yapılmaktadır.
- **Altıncı Bölüm:** Sonuçlar değerlendirilmekte ve ileriye yönelik öneriler sunulmaktadır.

## 2. ÇOK ÖLÇÜTLÜ KARAR VERME (ÇÖKV) YÖNTEMLERİ

Mühendislik uygulamaları çoğu zaman yalnızca tek bir performans ölçütüne değil, birden fazla ve çoğu zaman çelişen kriterlerin birlikte değerlendirilmesine ihtiyaç duyar. Bu durum, karar verme sürecini daha karmaşık hale getirmekte ve klasik tek ölçütlü karar yöntemlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, farklı öncelik düzeylerine sahip kriterlerin dikkate alındığı sistematik yaklaşımlara duyulan ihtiyaç artmıştır.

Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri, bu ihtiyaca cevap olarak geliştirilmiş; mühendislik, yönetim, ekonomi, tedarik zinciri, savunma sanayi gibi birçok disiplinde geniş uygulama alanı bulan metodolojik araçlardır [10]. Bu yöntemler, karar vericiye mevcut alternatifleri belirli kriterler doğrultusunda değerlendirme ve en uygun alternatifi sistematik biçimde seçme olanağı sunar.

Bu bölümde, ÇÖKV yöntemlerinin temel yaklaşımı açıklanacak; ardından AHP ve TOPSIS yöntemlerine odaklanılarak, bu yöntemlerin mühendislikteki rolü ve uygulama adımları detaylandırılacaktır.

### 2.1. ÇÖKV Sürecine Genel Bakış

ÇÖKV yöntemlerinin temel mantığı, karar problemini yapısal bir çerçeveye oturtmak ve alternatifler ile kriterleri sayısal olarak değerlendirmektir. Bu yöntemlerin uygulama süreci genellikle aşağıdaki adımları içerir:

1. Problemin tanımlanması
2. Alternatiflerin belirlenmesi
3. Karar kriterlerinin seçilmesi
4. Kriterlerin ağırlıklandırılması
5. Alternatiflerin değerlendirilmesi
6. En uygun alternatifin seçimi

Bu süreç, hem karar vericinin deneyim ve tercihlerini hem de somut verileri dikkate alarak karar kalitesini artırmayı amaçlamaktadır [10], [30].

## 2.2 Mühendislikte ÇÖKV Yöntemlerinin Önemi

Mühendislik sistemlerinde tasarım kararları, çoğu zaman birbirleriyle çelişen çok sayıda kriterin eş zamanlı olarak dikkate alınmasını gerektirir. Örneğin, bir malzeme seçim sürecinde yüksek dayanım istenirken aynı zamanda düşük maliyetli, hafif ve korozyona karşı dirençli olması beklenebilir. Bu tür gereksinimlerin geleneksel karar verme teknikleriyle çözülmesi, karar vericinin tecrübesine ve sezgilerine dayandığı için nesnelligi zayıflatabilir ve karar sürecini sistematik olmaktan uzaklaştırabilir [10], [30].

Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri, mühendislik karar süreçlerinde nicel ve nitel verileri bütünleştirerek karar verme problemlerini daha yapılandırılmış, analitik ve tekrarlanabilir bir çerçeveye oturtur. Bu yöntemlerin mühendislik uygulamalarında öne çıkmasının başlıca nedenleri şunlardır:

- **Karmaşık sistemlerin çözümünü sadeleştirme:** Özellikle çok sayıda kriter içeren malzeme seçimleri, üretim planlaması, tedarikçi değerlendirme veya tasarım optimizasyonu gibi mühendislik problemlerinde, alternatiflerin sistematik karşılaştırılması sağlanır [34], [35].
- **Sayısal hesaplamalarla desteklenmiş nesnel karar verme:** Belirsizlik içeren veya öznel değerlere açık kriterlerde bile, yöntemler karar vericinin değerlendirmelerini ağırlıklandırarak bütüncül bir çözüm sunar [28].
- **Hassas ve yüksek güvenlik gerektiren alanlarda tercih edilmesi:** Özellikle savunma ve havacılık sistemlerinde, tek bir yanlış tercihin sistem güvenliğini riske atabileceği uygulamalarda karar verme sürecinin sayısal doğruluğu ve objektifliği kritik önemdedir [43], [52].

İnsansız hava araçları (İHA'lar) özelinde ise, malzeme seçimi gibi bir mühendislik problemi, çok sayıda teknik ve operasyonel kriteri barındırır: akma dayanımı, kopma dayanımı, darbe direnci, korozyon dayanımı, maliyet, işlenebilirlik ve bulunabilirlik gibi parametrelerin hepsi aynı anda değerlendirilmelidir. Bu kriterlerin öncelikleri görev tipine, hava aracının büyüklüğüne, operasyon koşullarına ve üretim stratejilerine göre değişebilir. Bu bağlamda, ÇÖKV yöntemleri karar vericiye farklı senaryolara göre alternatif değerlendirme olanağı sunarak mühendislik tasarımını esnek ve güvenilir hâle getirir [10], [34].

Malzeme seçiminde sık kullanılan yöntemlerden biri olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), kriterlerin görelî önemlerinin sistematik olarak belirlenmesini sağlarken; TOPSIS yöntemi, ideal çözüm noktasına yakınlık prensibi ile alternatifleri derecelendirmeye olanak verir. Bu yöntemlerin birlikte kullanımı, hem kriterler arasındaki öncelik ilişkisini dikkate alır hem de elde edilen verileri karar sürecine etkin biçimde entegre eder [39], [41].

Bu tez çalışmasında, iniş takımı gibi kritik bir sistem bileşeni için malzeme seçiminde AHP ve TOPSIS yöntemlerinin entegre biçimde kullanılması, hem mühendislik gerekçeleriyle hem de yöntemsel açıdan önem arz etmektedir. Özellikle iniş takımları gibi yüksek darbe ve yorulma yüklerine maruz kalan sistemlerde, yanlış malzeme seçimi yapısal arızalara, görev başarısızlığına ve bakım maliyetlerinde artışa yol açabileceğinden, bu tür sayısal ve çok kriterli karar destek sistemleri mühendislik güvenliği açısından vazgeçilmezdir [3], [13], [23].

### **2.3 Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Yöntemi**

Karmaşık ve çok kriterli karar problemlerinde, özellikle alternatiflerin niteliksel olduğu ya da değerlendirmelerin subjektif yargılara dayandığı durumlarda, karar sürecinin rasyonelleştirilmesi ve sistematik hale getirilmesi oldukça önemlidir. Bu bağlamda geliştirilen Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karar vericinin farklı kriterler arasında tercihlerini sistematik ve sayısal hale getirerek karar sürecine yön vermesini sağlayan bir yöntemdir. 1970’li yıllarda Thomas Saaty tarafından geliştirilen bu yöntem, karmaşık karar yapılarını sadeleştirerek çözüm üretmeye olanak tanır. [54].

AHP, özellikle mühendislik tasarım süreçlerinde karşılaşılan karmaşık problemlerin, hiyerarşik yapılar aracılığıyla sadeleştirilmesini ve çözüm sürecinin adım adım yürütülmesini sağlar. Yöntem, problemin amacı, kriterleri ve alternatifleri içeren üç seviyeli bir yapı üzerinden değerlendirme yapar. Karar verici, karar probleminin bileşenleri arasında ikili karşılaştırmalar yaparak her bir kriterin önem derecesine dair sayısal karşılıklar üretir. Bu süreçte elde edilen ağırlıklar, kriterlerin göreceli katkılarını yansıtır.

AHP’nin en belirgin avantajı, yalnızca sayısal verilerle değil, aynı zamanda uzman yargıları ve deneysel bilgiyle de çalışabilmesidir. Böylece mühendislikte sık karşılaşılan eksik veri veya belirsizlik durumlarında bile etkili kararlar alınmasına imkân tanır [10], [34].

### 2.3.1 AHP Süreci

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karar verme problemini hiyerarşik bir yapıya dönüştürerek kriterlerin ve alternatiflerin sistemli biçimde analiz edilmesini sağlar. Bu yöntemde karar problemleri genellikle üç seviyeye ayrılarak ele alınır: amaç, kriterler ve alternatifler.

İlk adımda karar verme yapısı oluşturulur ve bu yapıda yer alan kriterler ikili karşılaştırmalarla değerlendirilir. Karşılaştırmalarda genellikle 1'den 9'a kadar ölçek kullanılır. Aşağıda bu tür karşılaştırmalarla oluşturulan örnek bir matris gösterilmiştir:

Örnek ikili karşılaştırma matrisi:

$$\begin{array}{ccc} 1 & a_{12} & a_{13} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 \end{array} \quad 2.1$$

Daha sonra bu matris normalize edilerek her satırın ortalaması alınır ve kriter ağırlıkları hesaplanır. Bu işlem, normalize edilmiş karar matrisi üzerinden yapılır:

Normalize edilmiş matris:

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad 2.2$$

Ağırlık vektörü şu şekilde bulunur:

$$w_{ij} = \frac{1}{n} = \sum_{j=1}^n n_{ij} \quad 2.3$$

Karşılaştırmaların tutarlılığını değerlendirmek amacıyla, öncelikle en büyük özdeğer  $\lambda_{max}$  hesaplanır. Sonrasında Tutarlılık İndeksi (CI) ve Tutarlılık Oranı (CR) aşağıdaki formüllerle bulunur:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad 2.4$$

Burada  $\lambda_{\max}$ , matrisin en büyük özdeğeridir.

Sonrasında:

$$cR = \frac{CI}{RI} \quad 2.5$$

Burada RI, karşılaştırma matrisinin boyutuna göre rastgele tutarlılık indeksidir. Eğer  $CR < 0.1$  ise karşılaştırmalar tutarlı kabul edilir.

### 2.3.3 AHP'nin Mühendislik Uygulamalarındaki Yeri

AHP, mühendislik problemlerinde oldukça yaygın şekilde kullanılan bir karar destek yöntemidir. Özellikle aşağıdaki alanlarda etkin sonuçlar vermektedir:

- **Malzeme seçimi:** Alternatif malzemeler, mühendislik performans kriterleri doğrultusunda değerlendirilerek optimum seçim yapılır [10].
- **Tasarım optimizasyonu:** Bileşenlerin geometrik ve işlevsel özellikleri, çoklu hedefler altında değerlendirilir.
- **Üretim süreci ve tedarikçi seçimi:** Tedarikçiler, kalite, teslimat süresi, maliyet gibi kriterlerle kıyaslanarak sıralanır [56].
- **Savunma ve havacılık sistemleri:** Özellikle İHA gibi hassas sistemlerde, sistem güvenliği, ağırlık azaltımı ve performans-maliyet dengesi gibi çoklu kriterlerin aynı anda dikkate alınması gereken senaryolarda yaygın biçimde uygulanmaktadır [52], [57].

Bu tez çalışmasında AHP yöntemi, İHA iniş takımı sisteminde kullanılacak malzemelerin belirlenmesinde kullanılmış; akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve malzeme bulunabilirliği gibi kriterler ikili karşılaştırmalara tabi tutularak ağırlıklandırılmıştır. Bu kriter ağırlıkları, sonraki aşamada TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralanmasında kullanılmıştır.

### 2.3.4 AHP'nin Avantajları

- Karmaşık problemleri sistematik ve hiyerarşik bir yapıya kavuşturur.
- Karar vericinin sezgisel yargılarını matematiksel modele dönüştürür.
- Tutarlılık analizi yaparak karar güvenilirliğini artırır [31].

### 2.4 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) Yöntemi

TOPSIS yöntemi, her bir seçeneği hem en iyi olasılığa olan yakınlığına hem de en kötü senaryoya olan uzaklığına göre değerlendirerek karar sürecine katkı sağlayan bir yaklaşım sunar [58].

TOPSIS'in temel varsayımı; en iyi alternatifin, tüm kriterler açısından en yüksek performansa (pozitif ideal çözüm) en yakın ve en düşük performansa (negatif ideal çözüm) en uzak alternatif olduğudur. Bu, mühendislik kararlarında oldukça anlamlıdır; çünkü sistem tasarımında istenen durum, maksimum faydaya ve minimum zarara ulaşmaktır [10].

TOPSIS'in dikkat çeken bir başka yönü, alternatiflerin sayısal olarak doğrudan sıralanmasını sağlamasıdır. AHP gibi yöntemler yalnızca kriter ağırlıklarını belirlerken, TOPSIS bu ağırlıkları kullanarak alternatiflerin net bir sıralamasını ortaya koyar [39], [52].

#### 2.4.1 TOPSIS Süreci

TOPSIS yöntemi, karar alternatiflerinin ideal çözüme olan uzaklıklarına göre değerlendirilmesini esas alır. Sürecin ilk adımı, her alternatifin belirli kriterler açısından değerlendirildiği karar matrisinin oluşturulmasıdır.

İkinci adımda, farklı ölçüm birimlerini ortadan kaldırmak için bu matris normalize edilir. Normalize değerler aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad 2.6$$

Üçüncü adımda, kriterlerin ağırlıkları kullanılarak normalize değerler ağırlıklandırılır. Bu işlem sonucunda ağırlıklı normalize karar matrisi elde edilir:

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad 2.7$$

Daha sonra, her kriter için ideal (en iyi) ve negatif ideal (en kötü) değerler belirlenir:

$$A^+ = \{max(v_{ij})\}; \quad A^- = \{min(v_{ij})\} \quad 2.8$$

Her alternatifin ideal ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanır:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad 2.9$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad 2.10$$

Son olarak, her alternatifin göreceli yakınlık değeri hesaplanarak en uygun alternatif belirlenir:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad 2.11$$

Bu değer  $C_i$  ne kadar büyükse, alternatif ideal çözüme o kadar yakındır.

#### 2.4.2 TOPSIS'in Mühendislikteki Kullanım Alanları

TOPSIS yöntemi, mühendislikte özellikle aşağıdaki alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır:

- **Malzeme seçimi:** Teknik özelliklerin (çekme dayanımı, ağırlık, sertlik, korozyon direnci vb.) çoklu değerlendirilmesini gerektiren durumlarda, TOPSIS yöntemi mühendislikte güçlü bir analiz aracı olarak kullanılmaktadır [39].
- **Tasarım optimizasyonu ve sistem değerlendirme:** Özellikle İHA sistemleri gibi yüksek performanslı alanlarda tasarım bileşenlerinin analitik sıralanmasında kullanılır [33], [57].
- **Enerji ve çevre mühendisliği, üretim sistemleri:** Alternatif enerji kaynakları, üretim hattı seçimleri gibi çok kriterli karar gerektiren alanlarda kullanılır [47].

Bu çalışmada, üç farklı malzeme alternatifi (AISI 4340, 17-4 PH, 15-5 PH) AHP yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak, TOPSIS yöntemi ile sistematik biçimde analiz edilmiştir. TOPSIS hesaplamaları sonucunda Stainless Steel 15-5, teknik ve tedarik açısından en uygun malzeme olarak seçilmiştir.

### 2.4.3 TOPSIS'in Avantajları

- Yöntem, adım adım ve anlaşılabilir yapısıyla karar vericilere pratiklik sunar.
- Hem ideal hem de negatif ideal çözüme göre değerlendirme yapar.
- Çok kriterli problemler için esnek bir yapı sunar [58].

### 2.5 Diğer ÇÖKV Yöntemleri

AHP ve TOPSIS yöntemleri çok ölçütlü karar verme problemlerinde sıkça tercih edilse de, karar verici ihtiyaçlarının çeşitlenmesi ve problemin doğasına bağlı olarak farklı yöntemlere de başvurulmaktadır. Bu çerçevede, aşağıda literatürde yaygın kullanılan bazı alternatif yöntemler açıklanmıştır.

#### 2.5.1 VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)

VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje), çok kriterli karar verme problemlerinde, karar vericiler arasında bir uzlaşma çözümüne ulaşmayı amaçlayan bir optimizasyon yöntemidir. İlk kez Opricovic tarafından önerilen bu yaklaşım, ideal çözüme olan uzaklıklar temelinde her alternatif için bir uygunluk değeri (Q) hesaplayarak sıralama yapılmasına imkân tanır. VIKOR'un öne çıkan yönlerinden biri, grup kararlarında bireysel ve kolektif tercihlerin birlikte değerlendirilebilmesidir [59].

#### 2.5.2 ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality)

ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), Roy tarafından geliştirilen ve alternatifler arasında üstünlük ilişkileri kurarak karar destek sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntemde, doğrudan sıralama yerine, alternatifler belirli eşik değerlerine göre elenerek seçim süreci ilerletilir. Yöntem, özellikle çok sayıda alternatifin değerlendirildiği ve seçim sayısının sınırlı olduğu durumlarda etkili bir araç sunar. Ancak kriter sayısının artması, hesaplama süreçlerini karmaşık hale getirebilir [60].

### **2.5.3 PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations)**

PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), alternatifler arasındaki tercih derecelerine dayalı sıralama yapan bir yöntemdir. Her kriter için ayrı tercih fonksiyonları tanımlanarak, alternatifler arasında ikili karşılaştırmalar yapılır. Bu yapı, karar vericinin subjektif tercihlerinin modele entegre edilmesine olanak tanır. Ancak mühendislik uygulamalarında, bu öznel yaklaşım bazı durumlarda karar sürecinin nesnelliğini azaltabilir [61].

### **2.5.4 MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis)**

MOORA (Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis), normalize edilmiş karar matrisindeki kriterleri fayda ve maliyet yönünden ayrı ayrı değerlendirerek alternatiflerin performans skorlarını hesaplamaya dayanır. Yöntemin sade yapısı ve hesaplama kolaylığı, onu mühendislikte özellikle ön analiz süreçleri için kullanışlı hale getirmiştir. Ancak kriter ağırlıklarının sınırlı biçimde ele alınması, ayırım gücünü bazı durumlarda düşürebilir [62].

### **2.5.5 Bulanık ÇÖKV Yöntemleri (Fuzzy MCDM)**

Geleneksel çok ölçütlü karar verme yaklaşımları, genellikle karar vericinin tüm tercihlerini açık ve belirli sayısal değerlerle ifade edebileceğini varsayar. Ancak pratik mühendislik senaryolarında bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, belirsizliğin yüksek olduğu ortamlarda bulanık mantık temelli yöntemler daha esnek bir çözüm sunmaktadır [63].

### **2.5.6 Sonuç ve Değerlendirme**

Bu tezde karar süreci, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin sağladığı yapısal ve analitik katkılarla modellenmiştir. Bu iki yöntem, kriterlerin önceliklendirilmesinden alternatiflerin sıralanmasına kadar sürecin tüm aşamalarında tamamlayıcı roller üstlenmiştir. Ancak alternatif yöntemlerin sahip olduğu farklı avantajlar göz önüne alındığında, VIKOR, PROMETHEE ve MOORA gibi yöntemlerin gelecekteki çalışmalarda değerlendirilmesi, karar modelinin çok boyutlu yapısını daha da güçlendirebilir.

## 2.6 Yöntem Seçim Gerekçesi ve Literatürde Kullanımı

İHA iniş takımı malzemelerinin seçimi, yalnızca tek bir mühendislik ölçütüne bağlı kalmaksızın; dayanım, yoğunluk, maliyet, işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi çok sayıda faktörün birlikte ele alınmasını gerektirir. Bu nedenle, karar süreci doğrudan değerlendirmeyele sonuçlanamayacak kadar karmaşık ve çok boyutludur. Bu tür çok kriterli karar problemleri için çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri, geleneksel yaklaşımların ötesinde sistematik analiz olanağı sağlar [10], [34].

Bu tez çalışmasında, malzeme seçiminin çok yönlü yapısı dikkate alınarak, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin entegre biçimde kullanılması tercih edilmiştir. AHP yöntemi ile kriterlerin göreceli önem düzeyleri uzman görüşlerine dayalı olarak belirlenmiş; ardından bu ağırlıklar, TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sayısal sıralamasında kullanılmıştır. Bu yapı, hem öznel yargıları hem de ölçülebilir verileri bir araya getirerek dengeli bir karar süreci sunmaktadır.

AHP yöntemi, karar problemlerini hiyerarşik olarak yapılandırarak, kriterler arası ikili karşılaştırmalarla ağırlık hesaplamasına olanak tanır. Özellikle mühendislik kararlarında sayısallaştırılamayan ancak uzman değerlendirmesi gerektiren kriterler için uygun bir araçtır. Öte yandan, TOPSIS yöntemi, ideal ve negatif ideal çözüme olan mesafeleri dikkate alarak alternatiflerin göreceli uygunluk değerlerini hesaplar ve en uygun seçeneği nesnel olarak ortaya koyar.

AHP-TOPSIS entegrasyonu, mühendislik uygulamalarında geniş kabul görmüş bir yaklaşımdır. Literatürde Faruk ve arkadaşları bu entegrasyonun malzeme seçiminde karar doğruluğunu artırdığını göstermiştir [48]. Benzer şekilde, Năstase ve Chițu, İHA platform seçiminde bu iki yöntemin birlikte kullanımının karar kalitesini artırdığını belirtmiştir [44]. Vinodh ve arkadaşları ise sürdürülebilir mühendislik kararlarında, bu yöntemlerin çevresel ve ekonomik kriterleri eş zamanlı değerlendirebilme avantajına dikkat çekmiştir [47].

TOPSIS yönteminin, teknik veri temelli hesaplama yapısı sayesinde nesnel değerlendirme sağlaması; AHP'nin ise karar verici uzmanlığını sayısal biçimde sisteme dahil edebilmesi, bu iki yöntemi birbirini tamamlayan nitelikte kılmaktadır. Bu yönüyle AHP-TOPSIS kombinasyonu, çok kriterli mühendislik kararlarında hem karar vericiye güven veren hem de tekrarlanabilir ve sayısal temelli çözümler sunan bir yapı olarak öne çıkmaktadır.

### 2.6.1 AHP Yönteminin Tercih Edilme Nedenleri

AHP, karar verme problemini hiyerarşik bir yapıya dönüştürerek kriterler arasındaki göreceli önemi belirlemek amacıyla ikili karşılaştırmalar yoluyla ağırlık hesaplamalarına imkan tanır. Bu özellikle İHA iniş takımı gibi birçok mühendislik parametresine sahip sistemlerde, kriterlerin uzman görüşleriyle hassas biçimde önceliklendirilmesini mümkün kılmaktadır [54].

Malzeme seçiminde sıkça karşılaşılan kriterler —örneğin akma dayanımı, korozyon direnci, üretilebilirlik, maliyet, yoğunluk— birbirinden farklı doğalara sahiptir. Bu bağlamda AHP, nitel (örneğin "üretilebilirlik") ve nicel (örneğin "akma dayanımı") kriterleri birlikte değerlendirme olanağı sunarak kapsamlı bir kriter ağırlıklandırma yapılmasına imkan verir [10], [52].

AHP yönteminin literatürde yaygın olarak uygulandığı bazı örnek çalışmalar şunlardır:

- Ashby, mühendislik tasarım sürecinde AHP'nin kriter bazlı yapılandırma kabiliyetini vurgulamıştır [35].
- Güngör ve Erol, İHA malzeme seçimi için AHP tabanlı karar destek modelleri geliştirmiştir [42].
- Tekinay ve Bozoğlu Batı, askeri sistemlerde AHP ile kriter önem derecelendirmesi yaparak platform seçimi uygulamıştır [33].

### 2.6.2 TOPSIS Yönteminin Tercih Edilme Nedenleri

TOPSIS, alternatiflerin ideal çözüme olan yakınlıklarını esas alarak sıralama yapar ve bu sayede karar vericilere açık, mantıksal ve sayısal bir değerlendirme sunar. Malzeme seçiminde sıkça karşılaşılan çelişen kriterler (örneğin yüksek dayanım ancak düşük maliyet gibi) arasında denge kurulmasını sağlar [58].

Ayrıca TOPSIS yöntemi, sayısal verilerin doğrudan kullanılabilmesine olanak tanır ve bu sayede hesaplama süreci nesnel biçimde gerçekleştirilebilir. Bu yönüyle özellikle malzeme özelliklerinin (çekme dayanımı, sertlik, yoğunluk vb.) ölçülebildiği mühendislik problemlerinde ideal çözümler sunmaktadır [39].

Yöntemin yaygın kullanım örnekleri:

- Erol ve ark., İHA bileşen tasarımında TOPSIS yöntemini karar desteği için başarıyla entegre etmiştir [52].
- Zhou ve ark., belirsizlik içeren tasarım süreçlerinde klasik ve bulanık TOPSIS yöntemlerini kıyaslayarak TOPSIS'in hesaplama kolaylığı ve sonuç güvenilirliğini vurgulamıştır [41].
- Kim ve Lee, savunma sanayi sistem seçimlerinde TOPSIS'in karar kalitesini artırdığı sonuçlarına ulaşmıştır [43].

### 2.6.3 Yöntemlerin Entegrasyon Gerekesi

AHP ve TOPSIS'in birlikte kullanılması, çok ölçütlü karar verme süreçlerinde güçlü ve dengeli bir karar destek sistemi sunmaktadır. AHP yöntemi ile karar kriterlerinin ağırlıkları belirlenirken, TOPSIS bu ağırlıkları kullanarak alternatifleri sistematik biçimde sıralamakta ve böylece hem uzman görüşleri hem de teknik veriler bütünleşik şekilde değerlendirmeye alınmaktadır [55].

Özellikle mühendislik literatüründe bu iki yöntemin birlikte kullanımına yönelik güçlü örnekler bulunmaktadır:

- Faruk ve ark., AHP-TOPSIS entegrasyonunun malzeme seçiminde karar doğruluğunu artırdığını deneysel olarak göstermiştir [48].
- Năstase ve Chițu, İHA sistemleri için yapılan platform seçiminde AHP-TOPSIS kombinasyonunun en yüksek karar güvenilirliğini sunduğunu belirtmiştir [44].
- Vinodh ve ark., sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında AHP-TOPSIS'in hem çevresel hem ekonomik kriterleri birlikte değerlendirme kabiliyeti sunduğunu vurgulamıştır [47].

### 2.6.4 Veri Tipine Uygunluk ve Hesaplama Pratiklik

Bu çalışmada kullanılan kriter verileri (akma dayanımı, sertlik, yoğunluk vb.), teknik literatür ve malzeme veri tabanlarından temin edilen sayısal, ölçülebilir verilerdir. Bu sebeple, belirsizlik içeren bulanık mantık temelli yöntemlere (örneğin Bulanık AHP, Bulanık TOPSIS) ihtiyaç duyulmamıştır. Sayısal veri kullanılabilirliği, klasik AHP ve TOPSIS'in doğrudan uygulanmasını desteklemiştir [36], [41].

Ayrıca her iki yöntemin hem hesaplama süreci hem de sonuç yorumlaması açık ve sistematik olduğu için mühendislik kararları açısından yüksek kullanıcı dostu bir yapı sunmaktadır.

Sonuç olarak, İHA iniş takımı gibi yüksek yapısal öneme sahip sistemlerde, uygun malzemenin seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılması literatürle tam uyum içinde bilimsel, sistematik ve tekrarlanabilir bir karar verme süreci sunmaktadır. Bu yöntemlerin mühendislik sistemlerinde entegrasyonu sayesinde:

- Teknik ve ekonomik kriterler birlikte değerlendirilebilir,
- Uzman görüşü nesnel matematiksel modellerle desteklenir,
- Karar süreci şeffaf, izlenebilir ve geliştirilebilir hale gelir.

Bu bağlamda, çalışmada benimsenen yöntem kombinasyonu hem problem yapısına hem de verinin doğasına uygun olarak belirlenmiş ve literatürdeki güncel eğilimlerle örtüşmektedir.

### **3 İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI VE İNiŞ TAKIMLARI**

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), insan müdahalesine ihtiyaç duymadan görev gerçekleştirebilen, uzaktan kumanda edilen ya da otonom kontrol sistemleriyle yönetilebilen hava taşıtlarıdır. Günümüzde İHA'ların kullanım alanları giderek genişlemekte; askeri uygulamaların yanı sıra tarım, enerji, çevre izleme, afet yönetimi, kargo taşımacılığı ve haritalama gibi birçok sivil ve endüstriyel alanda da etkin olarak kullanılmaktadır. Bu geniş kullanım yelpazesi, İHA'ların yalnızca elektronik ve yazılım sistemleriyle değil, aynı zamanda taşıyıcı mekanik yapılarıyla da yüksek güvenilirlik ve performans göstermesini zorunlu kılmaktadır [6].

İHA'nın görev başarısını belirleyen unsurlar arasında aerodinamik yapı, motor gücü ve kontrol algoritmaları kadar, taşıyıcı yapı elemanlarının dayanıklılığı ve güvenliği de yer almaktadır. Bu bağlamda, İHA sistemlerinde iniş takımı, uçağın yerdeki hareketliliğini sağlayan, kalkış ve iniş sırasında oluşan darbe ve yükleri sönmüleyerek gövdeyi koruyan kritik bir bileşendir. İniş takımı, yapısal olarak uçağın ağırlığını taşımalı, sert inişlerde şok yüklerini emebilmeli ve tüm bu görevleri mümkün olan en düşük ağırlıkla yerine getirebilmelidir [14].

İHA'ların görev türüne, yapısal büyüklüğüne ve operasyonel koşullarına göre iniş takımı sistemleri farklı şekilde tasarlanmaktadır. Mikro ve mini sınıf İHA'larda çoğunlukla sabit ve hafif malzemelerden üretilmiş basit ayak yapıları yeterli olurken, daha büyük ve yüksek irtifa görevleri üstlenen sabit kanatlı İHA'larda ise tekerlekli, yaylı veya geri çekilebilir iniş takımı sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tür sistemlerde darbe sönümleme kapasitesi, titreşim azaltma ve mekanik dayanıklılık gibi unsurlar kritik öneme sahiptir [18].

İniş takımı tasarımı yalnızca mekanik sağlamlık açısından değil; aynı zamanda ağırlık, üretilebilirlik, maliyet ve aerodinamik uyumluluk gibi çok sayıda mühendislik kriteriyle de doğrudan ilişkilidir. Özellikle iniş esnasında ortaya çıkan yüksek dikey hız bileşenleri, yüzeyle temas anında iniş takımında ani ve yoğun yüklemelere neden olur. Bu yüklerin uygun şekilde emilmemesi halinde, gövdede yapısal deformasyon, ekipman hasarı ve görev başarısızlığı gibi sonuçlar doğabilir. Bu nedenle iniş takımı; darbe dayanımı, yorulma ömrü, korozyon direnci ve servis kolaylığı gibi birçok yönüyle mühendislik açısından bütünsel bir analizle ele alınmalıdır [25].

Malzeme seçimi, iniş takımı sistemlerinin performansı açısından belirleyici faktörlerden biridir. Bu sistemlerde kullanılan malzemelerin yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahip olması, aynı zamanda çevresel koşullara dayanıklı, uzun ömürlü ve üretim açısından ekonomik olması beklenir. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), titanyum ve PH (Precipitation Hardening) tipi paslanmaz çelikler gibi gelişmiş mühendislik malzemeleri; bu tür gereksinimleri karşılamada avantaj sunmaktadır. Bu nedenle, iniş takımı tasarımı yapılırken yalnızca dayanım değil, yoğunluk, işlenebilirlik, maliyet ve bulunabilirlik gibi çok sayıda kriter birlikte değerlendirilmelidir [19].

Geleneksel mühendislik yaklaşımlarında malzeme seçimi çoğu zaman uzman görüşüne veya tecrübeye dayanmakta, bu da subjektif kararların önünü açmaktadır. Oysa iniş takımı gibi görev açısından kritik bir sistemin tasarımında bu tür yaklaşımlar yetersiz kalabilir. Bu nedenle günümüzde, özellikle havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek güvenilirlik gerektiren alanlarda, sistematik ve sayısal temelli yöntemlerin kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu bağlamda çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri, birden fazla teknik ve operasyonel kriterin eş zamanlı değerlendirilmesine olanak sağlayarak, daha rasyonel ve tekrar edilebilir karar süreçlerinin oluşturulmasına katkı sunmaktadır [34].

Günümüzde İHA sistemlerinde kullanılan iniş takımı çözümleri, sistemin görev tipine ve operasyonel senaryosuna göre farklılık gösterecek şekilde özelleştirilmektedir. Örneğin; VTOL (Vertical Take-Off and Landing) sistemlerinde, daha kompakt ve sabit ayaklı iniş yapıları tercih edilirken; MALE (Medium Altitude Long Endurance) ve HALE (High Altitude Long Endurance) sınıfı sistemlerde, geri çekilebilir, amortisörlü ve yük taşıma kapasitesi yüksek iniş takımı sistemleri kullanılmaktadır [66].

Bu sistemlerde kullanılan her bir yapısal bileşen, uçuşun güvenli ve verimli şekilde sürdürülebilmesi açısından doğrudan etkiye sahiptir.

Sonuç olarak, İHA sistemlerinde iniş takımı yalnızca mekanik bir yapı değil; uçuş emniyeti, yapısal dayanıklılık ve görev sürekliliği açısından stratejik öneme sahip bir bileşendir. Bu nedenle, iniş takımı sistemlerinin mühendislik tasarımı yapılırken çok boyutlu kriterlerin sayısal olarak değerlendirildiği, sistematik ve bilimsel karar modellerine başvurulması kaçınılmazdır. Böylece hem akademik literatürde hem de endüstriyel uygulamalarda daha güvenilir, hafif ve uzun ömürlü çözümler elde edilebilmektedir [52].

### **3.1 İHA'ların Sınıflandırılması ve Kullanım Alanları**

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), üzerinde pilot barındırmadan görev yapabilen, uzaktan kumanda ya da otonom kontrol sistemleriyle yönetilen hava araçlarıdır. Teknolojik ilerlemeler sayesinde yalnızca askeri değil, tarımdan afet yönetimine, enerji izleme sistemlerinden lojistiğe kadar birçok alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır [3]. İHA'ların görev gereksinimleri, yapısal tasarımı ve performans beklentileri, hangi sınıfa ait olduklarına göre büyük farklılık gösterir. Bu nedenle İHA'lar çeşitli kriterlere göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, yalnızca görev türünü değil, aynı zamanda tasarım aşamasındaki mühendislik gereksinimlerini de doğrudan etkileyerek, özellikle iniş takımı sisteminin tasarımı ve malzeme seçiminde belirleyici rol oynamaktadır [5].

#### **3.1.1 Uçuş İrtifasına Göre Sınıflandırma**

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), görev yapacakları irtifa aralığına göre sınıflandırılarak tasarım parametreleri belirlenir. Uçuş irtifası, İHA'nın genel yapısal gereksinimlerini, motor performansını, haberleşme sistemlerini ve en önemlisi iniş takımı tasarımını doğrudan etkileyen temel faktörlerden biridir. İHA'lar genel olarak dört ana irtifa sınıfında ele alınır: Yüksek İrtifa Uzun Süreli (HALE), Orta İrtifa Uzun Süreli (MALE), Düşük İrtifa Taktik (LALT) ve Mini/Mikro/Nano sistemler [6].

**Yüksek İrtifa Uzun Süreli (HALE)** sınıfındaki İHA'lar, 18.000 metre ve üzeri irtifalarda uzun süreli keşif, gözlem ve iletişim görevleri için tasarlanmıştır. Bu sistemler, atmosferin üst katmanlarında faaliyet gösterdikleri için yüksek taşıma kapasitesi, güçlü enerji sistemleri ve gelişmiş haberleşme ekipmanları ile donatılmıştır. Görev sürelerinin uzunluğu ve uçuş koşullarının zorluğu nedeniyle bu sınıfta yer alan platformların iniş takımı sistemleri, hem darbe yüklerini absorbe edebilecek kadar dayanıklı hem de mekanik karmaşıklığa sahip geri çekilebilir yapıda tasarlanır. Örnek olarak RQ-4 Global Hawk gibi platformlar gösterilebilir [66].

**Orta İrtifa Uzun Süreli (MALE)** sınıfı İHA'lar ise 5.000–15.000 metre irtifa aralığında uçuş gerçekleştirebilen ve hem askeri hem de sivil amaçlarla yoğun şekilde kullanılan sistemlerdir. Bu sınıf İHA'lar, genellikle taktik görevler, sınır güvenliği, keşif ve gözetleme operasyonlarında tercih edilmektedir. MALE sınıfındaki araçlar için iniş takımı sistemleri; ağırlık taşıma kapasitesi yüksek, ancak mümkün olduğunca hafif ve aerodinamik olarak uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bu sistemlerde darbe sönümlenme kapasitesi ön planda tutulur. Türk yapımı Bayraktar Akıncı ve ANKA bu sınıfa örnek olarak verilebilir [2].

**Düşük İrtifa Taktik (LALT)** sınıfında yer alan İHA'lar ise 1.000–5.000 metre arasında görev yapabilen ve özellikle taktik operasyonlarda kullanılan araçlardır. Daha küçük boyutlara sahip bu sistemler, hızlı konuşlanma ve mobilite avantajı sunar. İniş takımı yapısı ise genellikle basit, sabit veya yarı esnek olacak şekilde yapılandırılır. Ancak iniş sırasında oluşabilecek ani yüklemeler göz önüne alındığında, darbe sönümlenme yeteneği yine de göz ardı edilmemelidir. Özellikle sert zeminle temasta oluşabilecek gerilimlerin gövdeye zarar vermemesi için, elastik veya esnek malzeme destekli çözümler tercih edilmektedir [25].

**Mini, Mikro ve Nano sınıfı İHA'lar** ise 1.000 metre altı irtifalarda faaliyet gösteren, kısa menzilli ve düşük ağırlıklı sistemlerdir. Bu araçlar çoğunlukla gözlem, eğitim, akademik araştırmalar ya da hobi amaçlı kullanılır. Gövde yapısı son derece hafif olduğundan bu sistemlerde iniş takımı ya tamamen bulunmaz ya da oldukça basit ayak yapıları kullanılır. El ile fırlatma ve paraşütle iniş gibi alternatif yöntemler bu sınıfta yaygındır. Bu tür sistemlerde iniş takımı ihtiyacı genellikle uçuş görevine ve tasarım tercihlerine göre şekillendirilir [64].

Her bir irtifa sınıfı, İHA'nın görev çevresi ve performans gereksinimlerini farklılaştırmakta; bu da doğrudan yapısal ve malzeme mühendisliği kriterlerine yansımaktadır. Özellikle iniş takımı bileşenleri için yüksek irtifa görevleri dayanıklılığı öne çıkarırken, düşük irtifa görevlerinde hafiflik ve sadelik öncelikli hale gelmektedir. Bu nedenle uçuş irtifası, iniş takımı tasarımı ve malzeme seçimi açısından belirleyici mühendislik parametrelerinden biridir [30].

### 3.1.2 Kalkış ve İniş Kabiliyetine Göre Sınıflandırma

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), sahip oldukları kalkış ve iniş kabiliyetlerine göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma yalnızca uçuş sistematiğini değil; aynı zamanda İHA platformlarının iniş takımı ihtiyacını, bu sistemlerin yapısal gereksinimlerini ve malzeme seçimi stratejilerini de doğrudan etkiler. Kalkış ve iniş biçimi, sistemin operasyonel esnekliği, zeminle etkileşimi ve darbe yüklerine karşı dayanımı açısından kritik mühendislik belirleyicilerindedir [6].

**Sabit kanatlı ve pist gerektiren İHA sistemleri**, konvansiyonel uçaklarda olduğu gibi kalkış ve iniş için uygun uzunlukta bir piste ihtiyaç duyar. Bu tür platformlar genellikle MALE ve HALE sınıfında yer almakta olup, gövde yapıları daha büyük ve görev süreleri daha uzundur. Bu nedenle, yüksek darbe sönümleme kapasitesine sahip iniş takımı sistemleri kullanılır. İniş takımı çoğunlukla tekerlekli ve amortisörlü olarak yapılandırılır; ayrıca bazı sistemlerde geri çekilebilir mekanizmalar da aerodinamik performansı artırmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu tip İHA'larda iniş takımı tasarımı, sistemin genel dayanıklılığı ve uçuş emniyeti açısından merkezi bir rol oynar [14].

**Dikey Kalkış ve İniş (VTOL – Vertical Take-Off and Landing)** yapabilen İHA'lar, piste ihtiyaç duymadan dar alanlarda görev gerçekleştirme kabiliyetine sahiptir. Bu özellik, şehir içi operasyonlar, acil müdahale görevleri ve dağlık araziler gibi sınırlı alanlarda büyük avantaj sağlar. VTOL sistemlerde iniş takımı genellikle sabit ve hafif yapıdadır; çoğu zaman dört sabit ayaktan veya iniş bacaklarından oluşur. Ancak iniş hızı ve zemin sertliğine bağlı olarak bu yapıların darbe absorbe edebilme kapasitesine de sahip olması gerekir. Ayrıca, bu tür sistemlerin denge kriterleri de göz önünde bulundurularak iniş takımı simetrik ve stabil bir yapı şeklinde tasarlanır [65].

**El ile fırlatılan veya paraşütle iniş yapan mikro ve mini sınıf İHA'lar** ise kalkış ve iniş sırasında herhangi bir iniş takımı sistemine ihtiyaç duymaz. Bu platformlar, çoğunlukla hafif yapıları sayesinde elle atılabilir; iniş sırasında ise paraşüt, tampon yüzey ya da ağ sistemleri gibi pasif iniş çözümleri kullanılır. Bu yaklaşım, ağırlığı minimize etmek ve mekanik karmaşıklığı azaltmak amacıyla tercih edilir. Ancak bu sistemlerde de iniş sırasında ortaya çıkabilecek titreşimlerin ve sarsıntıların gövdeye zarar vermemesi için temel seviyede darbe emici yapıların tasarıma dahil edilmesi önerilir [64].

Her kalkış ve iniş yöntemi, beraberinde farklı mühendislik gereksinimlerini ve tasarım kısıtlarını getirmektedir. Örneğin, geri çekilebilir iniş takımları mekanik açıdan daha karmaşık yapılar içerirken, sabit takımlar ağırlık açısından daha avantajlıdır ancak aerodinamik dezavantajlar yaratabilir. Bu nedenle, iniş takımı sistemlerinin tasarımı ve malzeme seçimi, İHA'nın kalkış ve iniş karakteristiklerine göre özelleştirilmelidir [30].

### **3.1.3 Kullanım Alanlarına Göre Sınıflandırma**

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), yalnızca teknik özellikleri açısından değil, aynı zamanda kullanım amaçlarına göre de sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, sistemin operasyonel gereksinimlerine göre tasarlanmasını zorunlu kılmakta ve özellikle iniş takımı gibi yapısal bileşenlerin biçimini, dayanım düzeyini ve malzeme tercihlerini doğrudan etkilemektedir. Kullanım alanlarına göre sınıflama yapılırken; askeri, sivil, endüstriyel ve bilimsel faaliyetlerdeki farklı ihtiyaçlara uygun görev profilleri göz önüne alınmaktadır [22].

**Askerî amaçlı İHA'lar**, genellikle keşif, istihbarat, hedef tespiti, taarruz ve lojistik destek gibi görevlerde kullanılır. Bu tür İHA'lar uzun menzilli, yüksek irtifalı ve dayanıklı yapıda olacak şekilde tasarlanır. Askerî operasyonlar çoğu zaman zorlu çevre koşullarında ve çeşitli hava meydanlarında yürütüldüğü için iniş takımı sistemlerinin darbe dayanımı, zemin adaptasyonu ve bakım kolaylığı gibi özellikleri son derece kritiktir. Ayrıca radar görünürlüğünü azaltmak amacıyla geri çekilebilir iniş takımı sistemleri tercih edilebilmektedir [66].

**Sivil kullanım alanlarında** İHA'lar; tarım, haritalama, trafik izleme, afet yönetimi, kargo taşımacılığı ve çevresel gözlem gibi çok çeşitli görevlerde değerlendirilmektedir. Bu tür uygulamalarda kullanılan İHA'lar genellikle daha küçük ölçekli ve hafif yapıda olup, kısa mesafeli görevlerde düşük maliyetli ve bakım gereksinimi az sistemlerdir.

Bu bağlamda, iniş takımı sistemleri de sade, sabit ve düşük maliyetli yapıdadır. Ancak tarım arazileri ya da engebeli zemin gibi değişken yüzey koşullarında, iniş takımlarının elastik darbe emici özellikler taşıması gerekmektedir [22].

**Endüstriyel kullanımda** İHA'lar, enerji hatlarının kontrolü, yapı denetimleri, madencilikte haritalama ve lojistik taşımacılığı gibi görevlerde kullanılır. Bu tür görevlerde operasyonlar çoğu zaman insan erişiminin zor olduğu alanlarda gerçekleştirildiğinden, İHA'nın taşıma kapasitesi kadar iniş sırasında zemine dayanımı da önem kazanır. Özellikle dikey iniş yeteneği olan çok rotorlu sistemlerde, iniş takımı hafif, sağlam ve dengeli bir yapıda tasarlanır [21].

**Bilimsel ve akademik çalışmalarda** kullanılan İHA'lar ise araştırma faaliyetlerine özgü olarak farklı sensör sistemleriyle donatılmış, düşük ağırlıklı ve kısa menzilli sistemlerdir. Bu sistemlerde genellikle iniş takımı yer almaz; el ile fırlatma ve yumuşak iniş çözümleri tercih edilir. Böylece hem maliyet düşürülür hem de sistemin aerodinamik verimliliği artırılır. Ancak yine de ekipmanın zarar görmemesi adına gövde altına basit koruma yapıları eklenmesi gerekebilir [64].

Kullanım alanlarına göre yapılan bu sınıflandırma, yalnızca operasyonel görevleri değil, aynı zamanda mühendislik tasarımı açısından farklı öncelikleri beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, iniş takımı gibi yapısal unsurların tasarımı; görev profili, operasyonel zemin koşulları, maliyet, bakım sıklığı ve darbe dayanımı gibi çok boyutlu kriterler doğrultusunda değerlendirilmelidir [30].

#### **3.1.4 Sınıflandırmanın İniş Takımı Tasarımına Etkisi**

İnsansız Hava Araçları (İHA'ların) sınıflandırılması; taşıma kapasitesi, görev süresi, irtifa kabiliyeti, kalkış ve iniş yöntemi gibi parametreler doğrultusunda yapılmakta ve bu sınıflandırma, doğrudan iniş takımı tasarımını etkilemektedir. İHA'nın hangi görev sınıfında yer aldığı, uçuş sırasında maruz kalacağı yükleri, iniş sırasında karşılaşacağı zemin koşullarını ve sistemin ağırlık sınırlarını belirlediği için, iniş takımı bileşenleri bu bağlamda farklı mühendislik yaklaşımlarıyla tasarlanmaktadır [6].

Örneğin, yüksek irtifada uzun süre görev yapması planlanan HALE sınıfı bir İHA için tasarlanan iniş takımı, yüksek hız ve ağır ağırlıkla iniş yapacak şekilde darbe sönümlenme kapasitesine sahip olmalıdır. Ayrıca bu tür sistemlerde iniş takımı genellikle geri çekilebilir özellikte tasarlanır, çünkü aerodinamik direnç minimum seviyede tutulmalıdır. Diğer yandan, mini ya da mikro sınıftaki düşük irtifalı ve kısa menzilli sistemlerde iniş takımı gereksinimi çok daha farklıdır; çoğu zaman sabit ve hafif malzemelerden yapılmış basit destek elemanları yeterli olmaktadır [66].

İHA'nın kalkış ve iniş biçimi de tasarım üzerinde önemli etkiye sahiptir. Pistten kalkış yapan sabit kanatlı İHA'lar, düzgün zeminle temas ettiklerinden, tekerlekli ve darbe sönümlenme kapasiteli iniş takımlarına ihtiyaç duyar. Buna karşılık VTOL (Dikey Kalkış ve İniş) sistemlerde, genellikle dört bacaklı sabit ayak yapıları tercih edilmekte; iniş darbesi dikey yönde olduğu için bu sistemlerde titreşim emici malzemeler veya elastik yapılar kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde denge ve yerle temas açısı gibi faktörler de kritik hale gelmektedir [65].

Sınıflandırma aynı zamanda iniş takımında kullanılacak malzeme türünü de etkiler. Ağır yük taşıyan, yüksek irtifa görevli İHA sistemlerinde kompozit malzemeler, titanyum alaşımları ve yüksek dayanımlı paslanmaz çelikler tercih edilirken; düşük maliyetli ve kısa ömürlü mikro sistemlerde polimer bazlı hafif malzemeler yeterli olabilir. Görev tipi ve uçuş çevresi de bu tercihlerde belirleyici olmaktadır. Örneğin, askeri operasyonlarda kullanılan MALE sınıfı bir İHA'nın iniş takımı hem darbe dayanıklı hem de radar görünürlüğü azaltacak şekilde tasarlanmalıdır [30]

Sonuç olarak, İHA'ların sınıflandırılması yalnızca operasyonel görevleri belirlemekle kalmaz; aynı zamanda iniş takımı gibi yapısal bileşenlerin geometrik şekli, malzeme seçimi, ağırlık sınırı, üretim tekniği ve dayanım gereksinimleri gibi pek çok mühendislik değişkenini de doğrudan etkiler. Bu nedenle, başarılı bir iniş takımı tasarımı için sınıflandırma türlerinin detaylı analiz edilmesi ve bu sınıflara uygun yapısal çözümler geliştirilmesi gereklidir [24].

### 3.2 İniş Takımı Tasarım Kriterleri

İnsansız Hava Araçları (İHA) sistemlerinde iniş takımı, uçağın yere güvenli şekilde inişini sağlayan ve yerdeki hareketliliğini mümkün kılan en kritik yapısal bileşenlerden biridir. Bu sistemler yalnızca uçağın ağırlığını taşımakla kalmaz, aynı zamanda kalkış ve iniş sırasında meydana gelen dinamik yükleri emerek gövdenin korunmasına katkı sağlar. Bu bağlamda iniş takımı tasarımı, çok boyutlu mühendislik kriterlerinin bütünsel olarak dikkate alınmasını gerektirir [25].

İniş takımı tasarımında ilk göz önünde bulundurulması gereken kriter, yük taşıma kapasitesi ve darbe sönümlenme yeteneğidir. Kalkış ve özellikle iniş sırasında ortaya çıkan yükler, uçağın dikey ve yatay bileşenlerinin birleşimiyle oluşur ve bu kuvvetler genellikle kısa sürede ve yüksek şiddette etki eder.

İniş takımı bu yükleri yeterli düzeyde absorbe edemezse, gövde yapısında kalıcı deformasyonlar ya da görev sırasında sistem arızaları oluşabilir. Bu nedenle, iniş takımı komponentlerinin yeterli dayanımda seçilmesi ve dinamik analizlerle doğrulanması gerekir [68].

Tasarımda dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli unsur ağırlıktır. İHA sistemlerinin genel performansı, taşıma kapasitesi ve menzil gibi parametreler doğrudan toplam sistem ağırlığına bağlıdır. İniş takımı, yapısal ağırlığın önemli bir bölümünü oluşturduğundan, gereksiz kütleden kaçınılması büyük önem taşır. Bu nedenle, mukavemet/ağırlık oranı yüksek malzemeler tercih edilmeli ve geometrik optimizasyon teknikleriyle yapılar hafifletilmelidir. Özellikle geri çekilebilir iniş takımlarında bu kriter daha da belirleyici hale gelmektedir [70].

Malzeme seçimi, hem dayanıklılık hem de üretim süreci açısından tasarımda belirleyici bir faktördür. Geleneksel alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları nedeniyle yaygın olarak kullanılırken, son yıllarda karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) gibi kompozit malzemeler, üstün mekanik özellikleri ve korozyon direnci nedeniyle daha fazla tercih edilmeye başlanmıştır. Bu malzemeler hem darbe dayanımı hem de yorulma ömrü bakımından avantaj sağlamakta, aynı zamanda daha düşük radar kesit alanı sunarak özellikle askeri sistemlerde tercih edilmektedir [14].

İniş takımı tasarımında ayrıca aerodinamik etki de dikkate alınmalıdır. Sabit takımlar uçağın hava direncini artırarak menzil ve hız üzerinde olumsuz etki yaratırken, geri çekilebilir takımlar bu sorunu minimize eder. Ancak geri çekilebilir mekanizmalar, hem tasarım karmaşıklığını artırır hem de bakım ve ağırlık açısından ek yük getirebilir. Bu nedenle, sistemin görev profiline göre aerodinamik avantaj ile mekanik karmaşıklık arasında denge kurulmalıdır [66].

Son olarak, bakım kolaylığı ve maliyet gibi operasyonel kriterler de göz ardı edilmemelidir. Özellikle sık iniş kalkış yapan ve sert zeminlerde çalışan sistemlerde iniş takımı bileşenleri zamanla aşınmaya maruz kalmakta, bu da düzenli bakım gerekliliğini doğurmaktadır. Tasarımın servis kolaylığı sunması, parça değişiminin hızlı yapılabilmesi ve malzeme temininde süreklilik sağlanması, toplam görev maliyetini azaltmada önemli rol oynar [19]. Tüm bu kriterler değerlendirildiğinde, iniş takımı tasarımı yalnızca mekanik bir çözüm değil; aynı zamanda görev güvenliği, sistem verimliliği ve maliyet etkinliği açısından stratejik bir mühendislik problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, yapısal analizler, optimizasyon teknikleri ve çok ölçütlü karar verme yaklaşımları, bu sistemlerin tasarım sürecinde etkin şekilde kullanılmalıdır [34].

### **3.2.1 Temel Fonksiyonlar**

Bir iniş takımı sisteminin taşınması gereken temel işlevler şunlardır:

**Darbe yüklerinin sönümlenmesi:** İniş sırasında meydana gelen düşey hız kaynaklı kinetik enerji, gövdeye zarar vermeyecek şekilde sönümlenmelidir. Bu amaçla malzeme seçimi kadar sönümleyici mekanizma da önemlidir [27], [32].

**Statik ve dinamik yüklerin karşılanması:** İHA'nın kendi ağırlığına ek olarak taşıdığı faydalı yük, yerle temas anında oluşan dinamik kuvvetler ve taksi hareketleri sırasında oluşan yan kuvvetler göz önüne alınmalıdır.

**Stabilite ve yönlendirme:** Özellikle sabit kanatlı sistemlerde, yere temas sonrası stabilitenin sağlanması ve yönlendirme yapılabilmesi, manevra kabiliyeti açısından önemlidir.

**Geri çekilebilirlik:** Özellikle yüksek hızda görev yapan İHA'larda aerodinamik sürüklemeyi azaltmak amacıyla iniş takımlarının uçuş esnasında gövde içine toplanabilmesi beklenir. Bu tür sistemlerde hareketli parçaların dayanımı ve sürtünme aşınması da dikkate alınmalıdır [6], [18].

### **3.2.2 Mühendislik Tasarım Kriterleri**

#### **1. Taşıma Kapasitesi ve Yük Dayanımı**

İniş takımı, yalnızca statik yükleri değil, iniş anındaki dikey kinetik enerjiyi ve olası darbe kuvvetlerini de karşılamak zorundadır. Bu nedenle seçilecek malzemenin akma dayanımı, çekme mukavemeti, yorulma ömrü ve darbe tokluğu gibi mekanik özelliklerinin yüksek olması gerekir [1], [24]. Özellikle MALE ve HALE sınıfı İHA'larda bu yükler ciddi boyutlara ulaşabilir.

#### **2. Ağırlık Optimizasyonu**

Ağırlık, havacılık sistemlerinde temel performans belirleyici unsurlardan biridir. İHA'nın toplam ağırlığı menzilini, uçuş süresini ve manevra kabiliyetini doğrudan etkiler. Bu nedenle iniş takımında hafif ancak dayanıklı malzemelerin seçilmesi, yapısal analizlerle birlikte değerlendirilmelidir. Özellikle kompozit malzemeler, titanyum ve alüminyum alaşımları bu kriter açısından öne çıkar [14], [25].

#### **3. Darbe Sönümleme Kabiliyeti**

İniş sırasında oluşan ani yüklerin etkisini azaltmak için yay, amortisör, elastomer blok gibi sönümleyici elemanlar kullanılır. Bunun yanında, kullanılan malzemenin elastikiyet modülü ve tokluk değeri gibi özellikleri, darbe enerjisinin ne ölçüde absorbe edileceğini belirler [18], [70].

#### **4. Korozyon Dayanımı**

İHA sistemleri genellikle dış ortamda, yüksek nem, sıcaklık değişimi, UV ışınımı ve kimyasal etkilere maruz kalır. Bu nedenle iniş takımı bileşenlerinde paslanmaz çelik, anodize alüminyum, kaplamalı titanyum alaşımları veya uygun yüzey işlemleri uygulanmalıdır [22], [36]. Korozyona karşı dayanıklılık hem sistem ömrünü hem de bakım maliyetini doğrudan etkiler.

## 5. Üretilirlik ve İşlenebilirlik

Malzemenin talaşlı imalat, dövme, kaynak veya ısıtım süreçlerine uygun olması gerekir. Ayrıca parça sayısının azaltılması, modüler tasarım gibi üretime yönelik kriterler de göz önünde bulundurulmalıdır. AISI 4340 ve 4140 gibi çelikler bu açıdan yaygın kullanılan malzemelerdendir [33].

## 6. Geri Toplanabilirlik ve Mekanik Entegrasyon

İniş takımı, bazı sistemlerde uçuş sırasında gövde içine çekilir. Bu durumda hareketli parçaların sürtünme direnci, aşınma davranışı, eklemlerin dayanımı gibi konular kritik hale gelir. Malzeme seçiminde bu tür mekanik entegre sistemlerin gereksinimleri de dikkate alınmalıdır [66].

### 3.2.3 Kullanılan Malzeme Örnekleri

Aşağıda bazı yaygın kullanılan iniş takımı malzemeleri ve karakteristik özellikleri özetlenmiştir:

**Tablo 3. 1.** Malzeme özellik tablosu.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Akma Dayanımı (MPa)	Sertlik (HB)	Elastisite Modülü (GPa)
AISI 4340	7.85	470–490	217	190–210
AISI 4140	7.85	415–450	210	190–210
Ti-6Al-4V	4.43	880–950	349	110
7075-T6 Alüminyum	2.81	500–540	150	71
Stainless Steel 17-4 PH	7.75–7.80	1000–1100	330–380	200
Stainless Steel 15-5 PH	7.75–7.80	950–1030	340	195

Tablodaki verilerden de görülebileceği üzere, iniş takımı sistemleri için kullanılan malzemeler, farklı kriterler bakımından öne çıkmaktadır.

- **AISI 4340 çeliği**, yüksek darbe dayanımı, işlenebilirlik ve yaygın tedarik avantajı ile iniş takımı uygulamalarında geleneksel olarak sıkça tercih edilir.
- **Ti-6Al-4V** gibi titanyum alaşımları, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım sunarak özellikle hafif yapıli sistemler için idealdir.
- **7075-T6 alüminyum**, düşük yoğunluklu yapısıyla ağırlık açısından avantajlıdır ancak yorulma ve darbe dayanımı açısından sınırlıdır.
- **Stainless Steel 17-4 PH ve 15-5 PH**, paslanmaz çelikler, çökeltme sertleşmeli (precipitation hardening) alaşımlar olup, yüksek mekanik dayanım, aşınma direnci ve mükemmel korozyon direnci özellikleri ile öne çıkar. Bu alaşımlar, hem sertlik hem de tokluğun gerekli olduğu zorlu ortam koşullarında başarılı performans gösterir. Özellikle tuzlu suya maruz kalan deniz ortamları veya yüksek neme sahip bölgelerde görev yapan İHA'ların iniş takımı bileşenlerinde tercih edilmektedir. Ayrıca bu alaşımlar, ısıl işleme istenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi sayesinde mühendislik tasarımında esneklik sunar. Savunma sanayisinde sıklıkla tercih edilmelerinin temel nedeni, yüksek yorulma dayanımlarını korurken uzun ömürlü kullanım imkânı sağlamalarıdır [70].

İniş takımı tasarımında bu malzemelerden hangisinin seçileceği; sistemin ağırlık hedefleri, yükleme senaryoları, çevresel koşulları ve maliyet kısıtları gibi birçok ölçüte göre değerlendirilmelidir. Bu bağlamda çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri, farklı kriterlerin birlikte değerlendirilmesini sağlayarak optimum malzemenin belirlenmesine olanak tanır.

### 3.2.4 Malzeme Seçiminde Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) Yaklaşımı

İHA iniş takımı gibi kritik sistemlerde kullanılacak malzemenin seçimi, yalnızca tek bir mühendislik parametresi üzerinden değerlendirilemeyecek kadar çok yönlü bir konudur. Ağırlık, mekanik dayanım, maliyet, korozyon direnci, üretilebilirlik, çevresel etkilere karşı direnç ve tedarik kolaylığı gibi birçok kriterin bir arada dikkate alınması gerekir. Bu kriterler arasında zaman zaman çelişkili durumlar ortaya çıkabilmekte ve karar sürecini daha karmaşık hale getirmektedir. Sadece mühendislik tecrübesine dayanan sezgisel yaklaşımlar ise bu karmaşıklığı yönetmekte yetersiz kalabilmektedir. Üstelik farklı karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmelerde ortak ve tutarlı bir sonuca ulaşmak da zorlaşmaktadır.

Bu tür durumlarda, çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yöntemleri devreye girerek; karar kriterlerini belirli ağırlıklarla yapılandırmakta ve alternatiflerin bu ağırlıklara göre değerlendirilmesini sağlamaktadır. Böylece mühendislik temelli kararlar daha sistematik, tekrarlanabilir ve sayısal dayanaklı hale getirilebilmektedir. Özellikle iniş takımı gibi pek çok performans ölçütünün aynı anda optimize edilmesi gereken bileşenlerde, ÇÖKV yöntemleri objektif karşılaştırma yapmaya olanak sunar.

Bu tez çalışmasında karar sürecinin ilk aşamasında, kriterlerin önem düzeyleri Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) kullanılarak hesaplanmış; sonrasında bu ağırlıklar TOPSIS yöntemiyle alternatif malzemelerin değerlendirilmesine aktarılmıştır. Bu tür yöntem birleşimleri, mühendislik kararlarının hem sayısal verilerle hem de uzman görüşleriyle desteklenmesini mümkün kılmaktadır. Literatürde de AHP-TOPSIS gibi hibrid yaklaşımların, özellikle İHA tasarımında ve yapısal bileşenlerin seçiminde başarılı şekilde uygulandığı çok sayıda çalışma ile gösterilmiştir. Ayrıca bu yöntemlerin havacılık ve savunma gibi yüksek güvenilirlik gerektiren sektörlerde farklı tasarım alt sistemlerinde tercih edildiği bilinmektedir. Bu sayede karar vericiler; performans, maliyet ve dayanım gibi farklı kriterleri dengeli bir biçimde değerlendirerek, farklı senaryolarda da geçerliliğini koruyacak malzeme tercihlerine ulaşabilmektedir

### **3.3 İHA İniş Takımlarında Kullanılan Malzeme Türleri**

İniş takımları, İnsansız Hava Araçları'nın zeminle temas eden ve yapısal bütünlüğü doğrudan etkileyen en kritik bileşenlerinden biridir. Bu bileşenlerin karşılaması gereken mekanik ve çevresel yükler, kullanılacak malzeme türünü doğrudan etkiler. İniş takımı malzemesi, yalnızca mukavemet açısından değil; aynı zamanda hafiflik, korozyon direnci, işlenebilirlik ve maliyet gibi çok sayıda mühendislik ölçütü göz önünde bulundurularak seçilmelidir [19], [70].

İHA'larda iniş takımı için tercih edilen malzeme türleri genel olarak aşağıdaki gruplarda toplanabilir:

#### **3.3.1 Çelik Alaşımları**

Çelikler, yüksek mukavemet ve darbe dayanımı özellikleri sayesinde, özellikle büyük ve ağır sınıf İHA'ların iniş takımlarında yaygın olarak kullanılır.

- AISI 4340 ve AISI 4140 gibi düşük alaşımlı çelikler, ısıtılarak yüksek sertlik ve akma dayanımına ulaştırılabilir.
- Stainless Steel 17-4 PH ve 15-5 PH, martensitik paslanmaz çelikler olup yüksek mekanik dayanım ve korozyon direnci sağlar. Özellikle deniz, yağmur, nem gibi zorlu ortamlarda görev yapan İHA sistemleri için uygundur [70], [71].

#### **Avantajları:**

- Yüksek darbe dayanımı
- Yorulma ömrü uzun
- Kaynak ve bağlantıya uygun
- Aşınmaya dayanıklı

#### **Dezavantajları:**

- Yüksek yoğunluk nedeniyle ağırlık sorunu
- Bazı türlerde korozyon riski (korumasız çeliklerde)

### **3.3.2 Alüminyum Alaşımları**

Alüminyum alaşımları, özellikle ağırlık azaltma gereksinimi olan mini ve orta ölçekli İHA'lar için uygun malzemelerdir.

- **7075-T6**, havacılık sektöründe yaygın kullanılan bir alüminyum alaşımı olup yüksek mukavemet/ağırlık oranı ile bilinir.
- **2024-T3** gibi alaşımlar da yüksek darbe sönümlenme gerektirmeyen, sabit iniş ayakları için tercih edilebilir [25], [69].

#### **Avantajları:**

- Düşük yoğunluk
- İyi işlenebilirlik
- Korozyon direnci (özellikle anodize edilirse)
- Ekonomik

### **Dezavantajları:**

- Darbe dayanımı çelik kadar yüksek değildir
- Yorulma ömrü çeliğe göre sınırlıdır

### **3.3.3 Titanyum Alaşımları**

Ti-6Al-4V gibi titanyum esaslı alaşımlar, hem yüksek dayanım hem düşük yoğunluk özellikleriyle dikkat çeker. Özellikle yüksek maliyetli ve yüksek performans gerektiren İHA sistemlerinde tercih edilir.

### **Avantajları:**

- Yüksek mukavemet/ağırlık oranı
- Korozyon ve sıcaklık direnci çok yüksektir
- Yüksek yorulma dayanımı

### **Dezavantajları:**

- Yüksek maliyet
- İşlenmesi zordur
- Kaynak kabiliyeti sınırlıdır

Titanyumun bu üstün özellikleri, onu özellikle geri çekilebilir iniş takımı sistemleri gibi karmaşık yapılar için ideal hale getirmektedir [70], [72].

### **3.3.4 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler**

Son yıllarda özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) gibi kompozit malzemeler, iniş takımlarında kullanılmaya başlanmıştır.

### **Avantajları:**

- En düşük yoğunluk
- Yüksek özgül dayanım
- Korozyon direnci mükemmeldir
- Vibrasyon sönümlenme kabiliyeti yüksektir

### **Dezavantajları:**

- Darbe direnci metalik malzemelere göre daha düşüktür
- Delinme ve bağlantı bölgelerinde özel tasarım gerektirir
- Maliyet ve üretim teknolojisi açısından zorluklar olabilir

Kompozit malzemeler, özellikle sabit ayaklı veya yavaş iniş hızına sahip küçük İHA'lar için uygun bir çözüm olabilir [73].

### **3.3.5 Hibrit ve Katmanlı Malzemeler**

Yeni nesil bazı İHA projelerinde, metal-kompozit hibrit çözümler kullanılmakta; böylece metalin darbe dayanımı ile kompozitin hafifliği bir araya getirilmektedir.

Örneğin:

- Ana taşıyıcı elemanlar için çelik kullanılırken,
- Sekonder bağlantı ve kabuklar için kompozit paneller tercih edilmektedir.

Bu yaklaşım, iniş takımı bileşenlerini fonksiyonel bölümlere ayırarak her bölgeye optimum malzemenin atanmasını sağlamaktadır [69], [72].

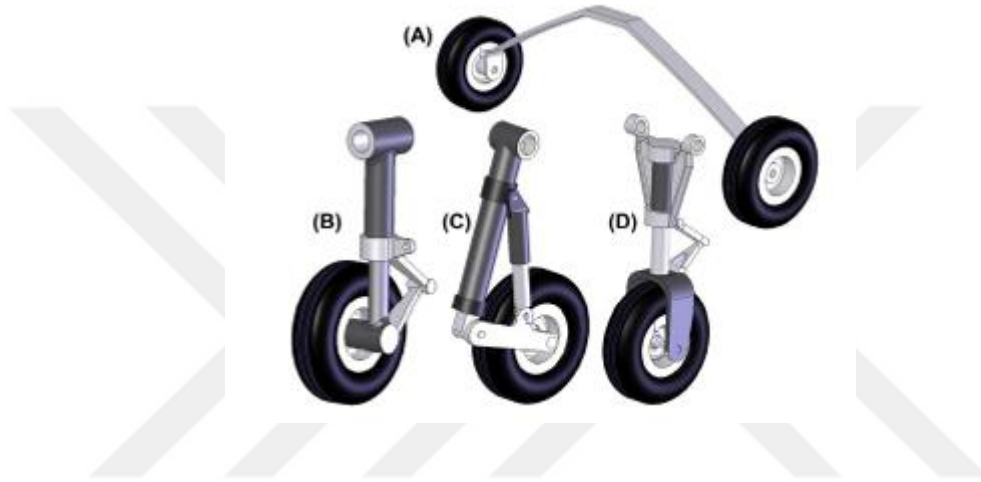
### **3.5.6 Sonuç ve Değerlendirme**

Malzeme türlerinin seçimi, İHA'nın görev profili, ağırlık sınıfı, kalkış/iniş kabiliyeti, çevresel şartlar ve üretim koşulları ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle her bir malzeme türü, taşıdığı teknik avantajlar ve sınırlamalar dikkate alınarak değerlendirilmeli; nihai seçim ise çok kriterli analizlerle yapılmalıdır.

Çelikler mukavemetiyle, alüminyumlar hafifliğiyle, titanyum alaşımları dayanım/korozyon direnci kombinasyonu ile, kompozitler ise hafiflik ve vibrasyon sönümleme kabiliyetiyle öne çıkmaktadır. Bu özelliklerin her biri, iniş takımı tasarımı ve malzeme seçiminde bütünsel bir bakış açısı gerektirmektedir.

### 3.4 İniş Takımı Türleri ve Yapısal Özellikleri

İHA’larda İniş takımı, İHA sistemlerinde kalkış, iniş ve yerdeki hareketlerin güvenli ve kontrollü biçimde gerçekleştirilmesini sağlayan temel yapısal sistemlerden biridir. Farklı İHA türleri ve görev profilleri doğrultusunda çeşitli iniş takımı türleri geliştirilmiştir. Bu sistemler, görev koşullarına, uçuş karakteristiklerine ve zemine temas gereksinimlerine göre farklılaşmaktadır. Aşağıda yaygın kullanılan iniş takımı türleri; yapısal özellikleri, avantajları, dezavantajları ve kullanım örnekleri ile birlikte ele alınmıştır.



Şekil 3. 1. (A), (B) Sabit iniş takımı; (C), (D) katlanabilir iniş takımı [81].

#### 3.4.1. Sabit (Fiks) İniş Takımı

##### Yapısal Özellikleri:

- Uçağa entegre edilmiş ve uçuş sırasında pozisyonunu değiştirmeyen basit yapılu iniş takımı türüdür.
- Genellikle iki ana tekerlek ve bir burun tekerleğinden ya da dört sabit bacak şeklinde tasarlanır.
- Yaygın olarak alüminyum alaşımları, plastik türevleri ya da karbon fiber destekli malzemeler kullanılır [70].

##### Avantajları:

- Mekanik olarak basit, üretimi ve bakımı kolaydır.
- Ağırlık açısından daha hafif ve maliyeti düşüktür.

**Dezavantajları:**

- Uçuş sırasında dışarıda kalması nedeniyle aerodinamik sürüklemeyi artırır.
- Geri çekilebilir sistemlere göre daha düşük performanslıdır.

**Kullanım Örnekleri:**

- Mini ve mikro sınıf sabit kanatlı İHA'lar ile VTOL tipi sistemlerde yaygın olarak kullanılır [14].

**3.4.2. Geri Çekilebilir (Retractable) İniş Takımı****Yapısal Özellikleri:**

- Uçuş sırasında gövde içine çekilebilen, genellikle hidrolik ya da servo motor mekanizmalarıyla çalışan gelişmiş bir sistemdir.
- Yapı olarak daha karmaşık olup, özellikle aerodinamik performansın ön planda olduğu platformlarda tercih edilir [66].

**Avantajları:**

- Uçuş sırasında iniş takımı gövdeye çekildiği için hava direnci önemli ölçüde azalır.
- Yüksek hız ve menzil performansına katkı sağlar.

**Dezavantajları:**

- Tasarım ve üretim maliyeti yüksektir.
- Karmaşık yapısı nedeniyle arıza riski ve bakım ihtiyacı fazladır.

**Kullanım Örnekleri:**

- HALE ve MALE sınıfı İHA'larda, özellikle askeri görevlerde ve uzun menzilli sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir [68].

### 3.4.3. Skid (Kızak Tipi) İniş Takımı

#### Yapısal Özellikleri:

- Genellikle döner kanatlı sistemlerde (helikopter ya da multikopter) kullanılan, tekerlek içermeyen, sabit bir yapıdır.
- İki paralel kızaktan oluşur ve esnek metal ya da kompozit malzemelerle üretilir.

#### Avantajları:

- Basit ve sağlam yapısı sayesinde maliyeti düşüktür.
- Hafiflik avantajı sağlar ve bakım gereksinimi minimaldir [19].

#### Dezavantajları:

- Yumuşak zeminlerde sürtünme nedeniyle iniş zorlukları yaşanabilir.
- Hareket kabiliyeti sınırlıdır; yerde yön değiştirme veya taksit kabiliyeti yoktur.

#### Kullanım Örnekleri:

- Multikopter tipi VTOL İHA'larda, keşif-destek amaçlı küçük sınıf hava araçlarında yaygın olarak kullanılır [64].

### 3.4.4. Tekerlekli İniş Takımı (Konvansiyonel veya Tricycle Tipi)

#### Yapısal Özellikleri:

- Uçakta biri önde (burun), ikisi arkada (ana tekerlek) olmak üzere üç tekerlekli yapıdadır.
- Geri çekilebilir veya sabit olabilir. Yük taşıma kabiliyetine göre tekerlek ebatları değişiklik gösterir [25].

#### Avantajları:

- Dengeli kalkış ve iniş sağlar, pist üzerinde manevra kabiliyeti yüksektir.
- Uçuş öncesi yerde pozisyon alma (taksi) açısından avantaj sunar.

### **Dezavantajları:**

- Aerodinamik sürüklenme oluşturabilir (sabitse).
- Ağırlığı sabit iniş takımlarına göre daha fazladır.

### **Kullanım Örnekleri:**

- Pist kullanımı gerektiren sabit kanatlı orta ve büyük sınıf İHA'larda yaygındır (örneğin ANKA ve Akıncı sistemleri) [2].

### **3.4.5. Paraşüt Tabanlı İniş Sistemi**

#### **Yapısal Özellikleri:**

- İniş takımı içermez; iniş paraşütüyle yavaşlatılarak gerçekleştirilir.
- Gövde altına darbe emici sünger veya tampon yapılar entegre edilebilir [6].

#### **Avantajları:**

- Ağırlık açısından büyük avantaj sağlar.
- Özellikle düşük maliyetli sistemlerde aerodinamik verimliliği artırır.

#### **Dezavantajları:**

- Rüzgâr koşullarına duyarlıdır, hassas iniş zordur.
- Sert zeminlerde ekipman hasarı riski yüksektir.

#### **Kullanım Örnekleri:**

- Mini ve mikro sınıf araştırma amaçlı İHA'larda, akademik projelerde ve prototip test sistemlerinde sık kullanılır [64].

Bu sistem türlerinin her biri, belirli operasyonel ihtiyaçlara ve görev çevrelerine göre avantaj ve dezavantajlar sunmaktadır. İniş takımı türünün seçimi, yalnızca yapısal analizlerle değil, aynı zamanda görev senaryosu, maliyet, bakım süreci, iniş zemini ve uçuş çevresi gibi çok sayıda faktör dikkate alınarak yapılmalıdır. Bu nedenle, her İHA sistemi için iniş takımı seçimi; özel gereksinimlere uygun, çok boyutlu mühendislik kararlarıyla belirlenmelidir [34].

## 4 YÖNTEM VE MODEL

Bu çalışmada, İHA'ların iniş takımı sisteminde kullanılacak uygun malzemenin seçimi için çok ölçütlü karar verme yaklaşımına dayalı bütünleşik bir yöntem uygulanmıştır. Malzeme seçimi problemi, farklı mühendislik kriterlerinin bir arada değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir karar sürecidir. Bu kapsamda karar verme süreci sistematik ve analitik bir yaklaşımla yapılandırılmıştır.

Yöntemin uygulanmasında sırasıyla şu adımlar izlenmiştir:

- İHA iniş takımı için karar problemi tanımlanmış,
- Malzeme seçiminde etkili olan kriterler belirlenmiş,
- Alternatif malzeme türleri tespit edilmiştir,
- AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır,
- TOPSIS yöntemi ile alternatifler değerlendirilerek sıralanmıştır,
- Elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve yöntemler karşılaştırılmıştır.

Yöntem seçiminde, kriterlerin sayısal olarak ifade edilebiliyor olması ve karar sürecinin şeffaf biçimde modellenmesi esas alınmıştır. Bu doğrultuda, AHP-TOPSIS entegrasyonunun problem yapısına uygun, uygulanabilir ve yorumlanabilir bir çözüm sunduğu görülmüştür. Uygulama sürecinin her adımı sistematik olarak modellenmiş, tüm değerlendirmeler karar matrisleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

### 4.1 Karar Probleminin Tanımı

Bu çalışmada ele alınan karar problemi, insansız hava araçları için geliştirilen iniş takımı sistemlerinde kullanılacak en uygun malzemenin belirlenmesine yöneliktir. İniş takımı, uçuş güvenliği açısından kritik öneme sahip olup, kalkış ve iniş sırasında maruz kalınan yüklerin etkin şekilde sönmülmesini sağlayan bir taşıyıcı yapıdır. Malzeme seçimi, bu sistemin hem yapısal performansı hem de uzun vadeli dayanıklılığı açısından belirleyici bir faktördür.

Araştırmacı olarak bu çalışmada, malzeme seçim kararını yalnızca teknik verilerle değil, aynı zamanda sektörün pratik ihtiyaçları ve üretim koşulları ile birlikte değerlendirme hedeflenmiştir. Bu kapsamda karar probleminin çözümünde dikkate alınacak kriterler,

İHA iniş takımlarının taşınması gereken temel mühendislik gereksinimleri doğrultusunda belirlendi. Ağırlıklı olarak mekanik performansı temsil eden ölçütlerin yanı sıra, üretim süreci ve tedarik açısından da anlamlı olan bir kriter seti oluşturuldu.

Karar sürecinde beş temel kriter esas alınmıştır: akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve malzeme bulunabilirliği. Bu kriterlerin belirlenmesinde, hem mühendislik deneyimlerim hem de saha uygulamalarından edinilen bilgiler etkili olmuştur. Her bir kriterin, iniş takımı sistemi üzerindeki etkisi dikkatle değerlendirilmiş, seçim süreci bu bütüncül yaklaşımla şekillendirilmiştir.

Değerlendirme kapsamına alınan üç farklı malzeme alternatifi; AISI 4340, Stainless Steel 17-4 PH ve Stainless Steel 15-5 PH olarak belirlenmiştir. Bu malzemeler, mekanik dayanım, korozyon direnci ve üretim kolaylığı gibi açılardan birbirinden farklı özelliklere sahiptir. Söz konusu alternatiflerin seçiminde, hem mühendislik uygulamaları açısından yaygın kullanımları hem de çalışmanın kapsamına uygunlukları göz önünde bulundurulmuştur.

Belirlenen kriterler ve malzeme alternatifleri doğrultusunda, çok ölçütlü karar verme modeli oluşturulmuş ve bu model üzerinden analiz süreci başlatılmıştır. Elde edilen sonuçlar nesnel ölçütlere dayalı olarak değerlendirilmiştir.

#### **4.2 Karar Kriterlerinin Belirlenmesi**

İHA iniş takımı sistemleri, uçuş güvenliği ve yapısal bütünlüğün korunması açısından en kritik bileşenlerden biridir. Bu sistemlerde kullanılacak malzemenin seçimi, yalnızca tek bir mühendislik ölçütüne değil, birbirini etkileyen ve zaman zaman çelişen çok sayıda faktöre bağlıdır. Bu bağlamda, karar verme sürecinin sağlıklı bir şekilde yürütülebilmesi için değerlendirmeye alınacak kriterlerin titizlikle belirlenmesi gereklidir.

Bu çalışmada, malzeme seçimini doğrudan etkileyen ölçütler belirlenmiş olup, hem yapısal gereklilikler hem de operasyonel koşullar dikkate alınarak kriterler oluşturulmuştur. Kriter belirleme sürecinde; malzeme bilimi, havacılık uygulamaları ve mühendislik ekonomisi alanlarındaki temel gereksinimler esas alınmış; İHA iniş takımı özelinde anlamlı ve uygulanabilir bir değerlendirme çerçevesi oluşturulmuştur.

Aşağıda bu çalışmada kullanılan karar kriterleri yer almaktadır:

### **1. Akma Dayanımı (MPa)**

Akma dayanımı, bir malzemenin elastik sınırı aşmadan taşıyabileceği maksimum gerilme seviyesini ifade eder. İniş takımı gibi darbeye açık yapılar için bu değer kritik önemdedir. Çünkü iniş sırasında meydana gelen ani yüklemeler ve zeminle temas anındaki kuvvetler, doğrudan bu sınırı zorlamaktadır. Yüksek akma dayanımı, yapının kalıcı şekil değişikliğine uğramadan güvenle görev yapabilmesini sağlar.

### **2. Kopma Dayanımı (MPa)**

Kopma dayanımı, malzemenin tamamen kırılmadan önce taşıyabileceği maksimum gerilme düzeyidir. Bu kriter, özellikle ani yüklemeler ve aşırı zorlama koşullarında yapısal bütünlüğün korunabilmesi açısından önemlidir. Akma dayanımı yüksek ancak kopma dayanımı düşük bir malzeme, ani kırılmalarla sistem bütünlüğünü tehdit edebilir. Bu nedenle bu iki ölçütün birlikte değerlendirilmesi gereklidir.

### **3. Sertlik (HB)**

Sertlik, malzemenin yüzeyine uygulanan kuvvete karşı direnç gösterme yeteneğini tanımlar. İniş takımı bileşenlerinde sürtünme, temas ve darbeye bağlı olarak yüzey deformasyonları oluşabileceğinden, yüksek sertlik değeri aşınma direnci ve kullanım ömrü açısından avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle malzemenin yalnızca iç dayanımı değil, yüzey direnci de dikkate alınmıştır.

### **4. Korozyon Direnci**

İHA sistemleri genellikle dış hava koşullarına, nem, yağmur, sıcaklık değişimleri gibi çevresel etkilere maruz kalır. Korozyona uğrayan bir iniş takımı, dayanım kaybı yaşar ve yapısal olarak güvenliğini yitirir. Bu nedenle seçim yapılacak malzemenin çevresel koşullara karşı gösterdiği direnç, sistemin sürdürülebilirliği açısından belirleyici bir kriter olmuştur.

## 5. Malzeme Bulunabilirliği

Yüksek performanslı bir malzeme, eğer tedariki zor veya ekonomik açıdan ulaşılması güçse, mühendislik açısından uygulanabilirliğini kaybedebilir. Bu nedenle yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda üretim zincirine entegrasyon kolaylığı da dikkate alınmıştır. Bu kriter, malzemenin sektörde yaygın kullanımı, yerli tedarik imkânı ve işlenebilirlik gibi yönleriyle değerlendirilmiştir.

Yukarıda tanımlanan bu beş kriter çalışmanın ihtiyaçları doğrultusunda seçilmiş olup, alternatif malzemelerin kıyaslanmasında temel referans olarak kullanılmıştır. Kriterler sayısal olarak ifade edilebildiğinden, hem AHP hem de TOPSIS yöntemlerinin uygulanmasına uygun bir yapı ortaya konmuştur. Her kriterin seçimi, iniş takımı sisteminin genel performansına doğrudan katkı sağlayacak nitelikte olup, değerlendirme sürecine nesnellik ve teknik tutarlılık kazandırmıştır.

### 4.3 Alternatif Malzemelerin Belirlenmesi

Çalışmanın amacı doğrultusunda, İHA iniş takımı sistemlerinde kullanıma uygun olabilecek alternatif malzemelerin belirlenmesi sürecinde çeşitli mühendislik ve uygulama kriterleri dikkate alınmıştır. Malzeme seçiminde yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda pratikteki kullanılabilirlik, tedarik durumu, işlem kabiliyeti ve sektörel uygulama örnekleri de göz önünde bulundurulmuştur.

Bu bağlamda, iniş takımı sistemleri için üç temel malzeme alternatifi değerlendirmeye alınmıştır:

#### 1. AISI 4340 (Yüksek Mukavemetli Alaşımlı Çelik)

AISI 4340, düşük alaşımlı, nikel-krom-molibden esaslı bir çelik türü olup, havacılık ve savunma sanayiinde sıklıkla kullanılan, yüksek darbe dayanımı ve yorulma ömrü ile öne çıkan bir malzemedir [77]. Isıl işlem uygulandığında akma dayanımı 740–1080 MPa, kopma dayanımı ise 860–1130 MPa seviyelerine ulaşabilmektedir [78]. Yüksek tokluk ve çekme dayanımı sayesinde özellikle ağır yük taşıyan veya darbe altında çalışan mekanik sistemlerde kullanılır. Bununla birlikte, korozyon direnci düşüktür ve açık hava koşullarında koruyucu yüzey işlemleri (örneğin krom kaplama, fosfatlama) gerekebilir [77]. Yoğunluğu yaklaşık 7.85 g/cm<sup>3</sup>'tür, bu nedenle hafiflik gerektiren sistemlerde dikkatli değerlendirilmelidir.

### **Öne çıkan özellikler:**

- Yüksek darbe dayanımı
- Yorulma direnci
- Isıl işleme uygunluk
- Düşük korozyon direnci (kaplamasız durumda)

## **2. Stainless Steel 17-4 PH (Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelik)**

17-4 PH (UNS S17400), martensitik yapıdaki çökelme sertleşmeli bir paslanmaz çelik olup; ısıtma ve yaşlandırma işlemleriyle oldukça yüksek mekanik dayanım değerlerine ulaşabilir [79]. Tipik ısıl işlem sonrası akma dayanımı 1100 MPa, kopma dayanımı ise 1250 MPa seviyelerine kadar çıkabilmektedir [78].

Korozyon direnci açısından AISI 304 gibi östenitik paslanmazlara göre düşük olsa da, mekanik performans ile korozyon direnci arasında çok iyi bir denge sunar. Bu nedenle hem mukavemet hem çevresel dayanıklılık gerektiren sistemlerde sıklıkla kullanılır [79]. Yoğunluğu yaklaşık  $7.75 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

### **Öne çıkan özellikler:**

- Yüksek mukavemet/korozyon direnci dengesi
- Isıl işleme güçlendirilebilir yapı
- Uygun sertlik ve işlenebilirlik
- Savunma ve havacılık uygulamalarında yaygın tercih edilme

## **3. Stainless Steel 15-5 PH (Yüksek Süneklikli Paslanmaz Çelik)**

15-5 PH paslanmaz çelik, 17-4 PH'in mikroyapısal olarak geliştirilmiş bir versiyonudur [80]. Daha homojen tane yapısı sayesinde daha yüksek süneklik ve darbe tokluğu sunar. Ayrıca daha kontrollü çökelme sertleşme davranışı gösterir, bu da ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerin tutarlılığını artırır [79].

Isıl işleme akma dayanımı 1000–1100 MPa, kopma dayanımı ise 1200 MPa seviyelerine çıkabilir [78]. Korozyon direnci, 17-4 PH ile benzer düzeydedir. Bu çelik türü, hem ağır yük taşıyan hem de darbe altında çalışan yapılarda, özellikle şekil değişimine dirençli olması nedeniyle tercih edilir [80].

#### Öne çıkan özellikler:

- Yüksek süneklik ve darbe dayanımı
- Mikroyapısal homojenlik
- Korozyon direnci ve işlenebilirlik dengesi
- Yüksek güvenilirlik gerektiren uygulamalarda avantajlı

#### 4.3.1 Karşılaştırmalı Değerlendirme

**Tablo 4. 1.** Malzeme özellik tablosu.

ÖZELLİK	AISI 4340	17-4 PH	15-5 PH
Yoğunluk (G/Cm <sup>3</sup> )	7.85	7.75	7.75
Akma Dayanımı (Mpa)	740–1080	1000–1100	1000–1100
Kopma Dayanımı (Mpa)	860–1130	1100–1250	1150–1200
Korozyon Direnci	Düşük	Orta-Yüksek	Orta-Yüksek
Süneklik	Orta	Orta	Yüksek
Isıl İşleme Uygunluk	Yüksek	Yüksek	Yüksek

Belirlenen bu üç alternatif, yapısal dayanım, yüzey direnci, çevresel uygunluk ve işlenebilirlik gibi çeşitli açılardan farklı mühendislik özellikleri sergilemektedir. Bu durum, malzeme seçimi sürecinin çok ölçütlü yapısını açıkça ortaya koymaktadır. Çalışmada bu malzemeler, daha önce belirlenen beş kriter doğrultusunda değerlendirilmiş; karar verme süreci bu teknik veriler ve mühendislik gerçeklikleri üzerinden yürütülmüştür.

#### 4.4 AHP ile Kriter Ağırlıklarının Hesaplanması

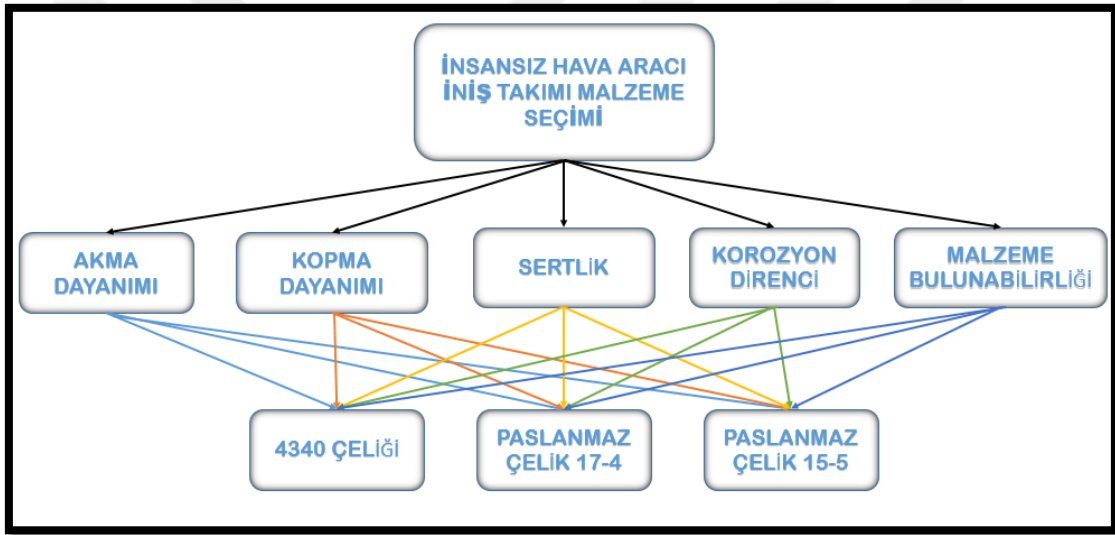
İHA’larda iniş takımı gibi kritik bir sistemin malzeme seçimi sürecinde, birden fazla mühendislik kriteri aynı anda değerlendirilmelidir. Her bir kriterin etkisi farklı düzeyde olabileceği için bunlar arasında bir önem sıralaması yapılması gerekir. Bu çalışma kapsamında, kriterlerin göreceli ağırlıklarını belirlemek için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) yöntemi tercih edilmiştir.

#### 4.4.1 Hiyerarşik Yapının Oluşturulması

Bu karar problemi üç basamaktan oluşan bir hiyerarşik yapı çerçevesinde modellenmiştir:

- **Birinci Düzey (Amaç):** En uygun iniş takımı malzemesinin belirlenmesi
- **İkinci Düzey (Kriterler):** Akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve bulunabilirlik
- **Üçüncü Düzey (Alternatifler):** AISI 4340 (M1), 17-4 PH Paslanmaz Çelik (M2) ve 15-5 PH Paslanmaz Çelik (M3)

Aşağıda Şekil 4.1’de karar probleminin AHP hiyerarşik yapısı sunulmuştur:



Şekil 4. 1. AHP hiyerarşisi: Amaç – Kriterler – Alternatifler.

#### 4.4.2 Kriterler Arası İkili Karşılaştırma Matrisi

Kriterler arasındaki göreceli önem seviyeleri, konuya hâkim uzmanlardan alınan değerlendirmeler ışığında belirlenmiş ve bu doğrultuda ikili karşılaştırma matrisi hazırlanmıştır (Tablo 4.2).

**Tablo 4. 2.** Kriterler arası ikili karşılaştırma matrisi.

Kriterler	Akma Day.	Kopma Day.	Sertlik	Kor. Direnci	Bulunabilirlik
Akma Dayanımı	1	3	4	3	3
KopmaDayanımı	1/3	1	3	3	3
Sertlik	1/4	1/3	1	1	2
Korozyon Direnci	1/3	1/3	1	1	1
Bulunabilirlik	1/3	1/3	1/2	1	1
Toplam	2.25	5.00	9.50	9.00	10.0

#### 4.4.3 Normalize Matris ve Ağırlık Vektörü

Karşılaştırma matrisindeki veriler, her sütunun toplam değerine bölünerek ölçeklendirilmiş; ardından her bir satırın ortalaması alınarak kriterlere ait ağırlıklar hesaplanmıştır.

**Tablo 4. 3.** Normalize edilmiş matris ve kriter ağırlıkları.

Kriterler	Ağırlık Vektörü
Akma Dayanımı	0.317
Kopma Dayanımı	0.224
Sertlik	0.166
Korozyon Direnci	0.142
Malz. Bulunabilirliği	0.151

Bu sonuçlara göre, akma dayanımı en yüksek önceliğe sahip kriter olarak belirlenmiştir. Bunu sırasıyla kopma dayanımı, sertlik, malzeme bulunabilirliği ve korozyon direnci izlemektedir.

#### 4.4.4 Tutarlılık Oranı (CR) Hesabı

Analitik Hiyerarşi Süreci'nde karar tutarlılığının değerlendirilmesi için tutarlılık oranı (CR) kullanılmıştır. Bu hesaplamada sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Ağırlık vektörü ile ikili karşılaştırma matrisinin çarpımı sonucu  $\lambda_{max}$  değeri hesaplanmıştır.
- **CI (Tutarlılık İndeksi):**

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5.124}{4} = 0.031 \quad 4.1$$

**RI (Rastgele Tutarlılık İndeksi)** 5 kriter için 1.12 alınmıştır.

- **CR (Tutarlılık Oranı):**

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.031}{1.12} = 0.027 \quad 4.2$$

Hesaplanan CR değeri 0,1'in altında çıktığı için yapılan ikili karşılaştırmalar tutarlı kabul edilmiştir ve analiz geçerliliğini korumuştur.

#### 4.4.5 Sonuç ve Değerlendirme

AHP yöntemi kullanılarak elde edilen kriter ağırlıkları, malzeme alternatiflerinin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere TOPSIS yöntemi ile birleştirilecektir. Bu yöntemsel entegrasyon, sayısal hesaplamalara dayalı karar destek sistemi sunarak, İHA iniş takımı gibi kritik bir bileşen için güvenilir bir malzeme seçimini mümkün kılmaktadır.

#### 4.5 TOPSIS ile Malzeme Sıralaması

Çalışmanın bu aşamasında, AHP yöntemiyle elde edilen kriter ağırlıkları kullanılarak, belirlenen üç malzeme alternatifinin değerlendirilmesi ve sıralanması TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. TOPSIS yöntemi, her bir seçeneğin ideal çözüme olan yakınlığı ve negatif ideal çözüme olan uzaklığı esas alınarak sıralanmasını sağlayan çok ölçütlü karar verme yaklaşımıdır. Bu yöntem, karar vericilere nesnel ve sayısal temelli değerlendirme olanağı sunarak karmaşık problemleri daha anlaşılır hale getirir.

#### 4.5.1 Karar Matrisi

Alternatif malzemeler, belirlenen beş mühendislik kriteri temelinde sayısal verilerle değerlendirilmiş ve bu veriler kullanılarak karar matrisi yapılandırılmıştır. Bu kriterler; akma dayanımı, kopma dayanımı, sertlik, korozyon direnci ve tedarik kolaylığı şeklindedir (bkz. Tablo 4.3).

**Tablo 4. 4.** Karar Matrisi.

Alternatif	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Sertlik (HB)	Korozyon Direnci	Malzeme Bulunabilirliği
M1 (AISI 4340)	970	1220	285	2	2
M2 (St. Steel 17-4)	950	1090	360	3	2
M3 (St. Steel 15-5)	1000	1070	440	3	1

#### 4.5.2 Normalize Edilmiş Karar Matrisi

Kriterler farklı birimlerle ifade edildiği için, tüm kriterler aynı ölçekte karşılaştırılabilir hale getirilmiştir. Bu amaçla her kriter kolonu, kendi norm değeri ile ölçeklendirilerek normalize edilmiş karar matrisi oluşturulmuştur.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad 4.3$$

**Tablo 4. 5.** Normalize karar matrisi.

Alternatifler	Akma Day.	Kopma Day.	Sertlik	Kor. Direnci	Bulunabilirlik
M1	0.5752	0.6241	0.4482	0.4264	0.6667
M2	0.5634	0.5576	0.5661	0.6396	0.6667
M3	0.5930	0.5474	0.6919	0.6396	0.3333

### 4.5.3 Ağırlıklı Normalize Karar Matrisi

Bu adımda normalize edilmiş karar matrisinde yer alan değerler, ilgili kriterin ağırlığıyla çarpılarak ağırlıklı bir karar matrisi oluşturulmuştur. Böylece her kriterin karar üzerindeki görel etkisi hesaba katılmıştır.

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

4.4

**Tablo 4. 6.** Ağırlıklı normalize karar matrisi.

Alternatif	Akma Day. (0.317)	Kopma Day. (0.224)	Sertlik (0.166)	Kor. Direnci (0.142)	Bulunabilirlik (0.151)
M1	0.1825	0.1397	0.0744	0.0605	0.1001
M2	0.1786	0.1249	0.0940	0.0908	0.1001
M3	0.1880	0.1226	0.1149	0.0908	0.0505

### 4.5.4 İdeal ve Negatif İdeal Çözüm

Pozitif ideal çözüm ( $A^+$ ): karar kriterlerinin her biri için en yüksek performansı temsil ederken; negatif ideal çözüm ( $A^-$ ), aynı kriterler için en düşük performansı gösterir. Bu iki referans nokta, alternatiflerin kıyaslanmasında temel alınmıştır.

**Tablo 4. 7.** İdeal ve negatif ideal değerler.

Kriter	$A^+$ (En İyi)	$A^-$ (En Kötü)
Akma Dayanımı	0.1880	0.1786
Kopma Dayanımı	0.1397	0.1226
Sertlik	0.1149	0.0744
Korozyon Direnci	0.0908	0.0605
Malz. Bulunabilirliği	0.1001	0.0505

#### 4.5.5 Uzaklıkların Hesaplanması

Her alternatif için pozitif ( $S^+$ ) ve negatif ( $S^-$ ) çözümlere olan uzaklıklar hesaplanmıştır. Uzaklıklar, Öklid metrik yöntemi ile belirlenmiştir (Denklem 4.5 ve 4.6):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad 4.5$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad 4.6$$

**Tablo 4. 8.** Uzaklık değerleri.

Alternatif	$S^+$	$S^-$
M1	0.084	0.085
M2	0.059	0.101
M3	0.020	0.147

#### 4.5.6 Görelî Yakınlık ve Sıralama

Her bir alternatifin ideal çözüme olan görelî yakınlık derecesi, pozitif ve negatif mesafelerin oranı ile belirlenmiştir. Bu oran, alternatifin ne derece uygun olduğunu gösteren bir performans ölçütü olarak değerlendirilmiştir. Görelî yakınlık değeri 1'e ne kadar yakınsa, alternatifin ideal çözüme o denli yakın olduğu kabul edilmiştir.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad 4.7$$

**Tablo 4. 9.** Göreli yakınlık ve sıralama.

Alternatif	C <sub>i</sub> Değeri	Sıralama
M1	0.5061	3
M2	0.6234	2
M3	0.9626	1

#### 4.5.7 Sonuç ve Değerlendirme

Yapılan TOPSIS analizleri doğrultusunda, alternatifler arasında en yüksek göreli yakınlık değerine sahip olan Stainless Steel 15-5 (M3) malzemesi, en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır. Diğer malzemelerden Stainless Steel 17-4 (M2) ve AISI 4340 (M1) ise sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer almıştır. Bu sıralama, TOPSIS metodunun hem ölçülebilir veriler hem de mühendislik önceliklerini içeren bütünsel yapısıyla elde edilmiştir.

#### 4.6 Yöntemlerin Karşılaştırılması

Bu çalışmada İHA iniş takımı sistemleri için uygun malzeme seçimi problemini çözmek amacıyla, çok ölçütlü karar verme yaklaşımlarından Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Bu iki yöntemin birlikte tercih edilmesinin temel gerekçesi; kriter ağırlıklandırmasının hassas biçimde yapılması ihtiyacı ile alternatifler arası mesafeye dayalı, sayısal ve nesnel bir sıralama yapma gerekliliğinin bir araya getirilmesidir. Her iki yöntemin hem teorik alt yapısı hem de uygulama süreci incelendiğinde, birbirini tamamlayan niteliklere sahip oldukları görülmektedir.

##### 4.6.1 AHP Yönteminin Özellikleri

AHP yöntemi, karar vericinin uzmanlık bilgisi ve mühendislik öncelikleri doğrultusunda kriterler arasında önceliklendirme yapılmasını sağlar. Bu yöntem özellikle soyut ya da sayısal olarak ifade edilmesi zor olan kriterlerin de değerlendirmeye dâhil edilebilmesine olanak tanır.

##### Avantajları:

- Karar vericinin önceliklerini sistematik biçimde modele yansıtır.
- Tutarlılık oranı ile yapılan karşılaştırmaların güvenilirliği ölçülebilir.
- Kriterlerin göreli önem düzeyleri hesaplanabilir.

**Sınırlılıkları:**

- Alternatif sayısı arttıkça karşılaştırma yükü ve karmaşıklık artar.
- Alternatiflerin doğrudan değerlendirilmesi için uygun değildir.
- Sayısal sıralama elde etmek için başka yöntemlerle entegrasyonu gerekir.

**4.6.2 TOPSIS Yönteminin Özellikleri**

TOPSIS yöntemi, alternatiflerin ideal ve negatif ideal çözüme olan uzaklıklarına göre sıralanmasını sağlar. Sayısal verilere dayalı olarak alternatiflerin göreceli yakınlık değerleri hesaplanır ve sonuçlar doğrudan yorumlanabilir.

**Avantajları:**

- Hesaplamaları nettir, sonuçları kolay yorumlanabilir.
- Kriterlerin farklı birimlerde olması sorun oluşturmaz (normalizasyon ile çözülür).
- Alternatifler, kriterler üzerinden doğrudan değerlendirilebilir.

**Sınırlılıkları:**

- Kriter ağırlıkları ayrı bir yöntemle belirlenmelidir.
- Karar verici öncelikleri doğrudan ifade edilmez, veriye bağlıdır.
- İdeal ve negatif ideal çözümlere olan mesafe kavramı, bazı durumlarda eşit uzaklıkta olan alternatifleri ayırt etmekte yetersiz kalabilir.

**4.6.3 Yöntemlerin Birlikte Kullanımı**

Bu çalışmada iki yöntem entegre biçimde kullanılmıştır. AHP yöntemi, mühendislik önceliklerinin karara doğrudan yansıtılmasına olanak tanıdığı için kriter ağırlıklarının belirlenmesinde tercih edilmiştir. Bu sayede her bir kriterin sistem üzerindeki etkisi, karar verici tarafından yapılmış karşılaştırmalarla modele dâhil edilmiştir.

TOPSIS yöntemi ise bu ağırlıkların kullanılmasıyla alternatif malzemeler arasında sayısal olarak sıralama yapılmasına olanak sağlamış ve kararın nesnel bir zemine oturtulmasını mümkün kılmıştır. Böylece AHP'nin niteliksel değerlendirme gücü ile TOPSIS'in sayısal analiz kabiliyeti bir araya getirilerek, güçlü bir karar destek sistemi oluşturulmuştur.

#### 4.6.4 Değerlendirme

Yapılan karşılaştırmalar ve uygulama süreci sonucunda, bu iki yöntemin birlikte kullanımının çalışmanın doğasına ve karar probleminin çok kriterli yapısına uygun olduğu görülmüştür. Kriter önceliklendirmesinin AHP ile yapılması, mühendislik kararlarının modele entegrasyonunu sağlamış; TOPSIS ile elde edilen sıralama ise kararın şeffaf, tekrar edilebilir ve hesaplanabilir hale gelmesini mümkün kılmıştır. Sadece teknik değerlendirmeler değil, aynı zamanda tasarıma ilişkin sistematik yaklaşımlar da dikkate alınarak, dengeli ve mühendislik perspektifiyle uyumlu bir malzeme seçimi süreci oluşturulmuştur.

### 5 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde, yapılan AHP ve TOPSIS analizleri sonucunda elde edilen bulgular sunulacak ve yorumlanacaktır.

#### 5.1 Hesaplama Sonuçları

Bu bölümde, çok ölçütlü karar verme yöntemlerinden AHP ve TOPSIS uygulamaları neticesinde elde edilen hesaplama sonuçları açıklanmıştır. Belirlenen kriter ağırlıkları AHP yöntemiyle elde edildikten sonra, bu ağırlıklar TOPSIS analizinde kullanılarak malzeme alternatiflerinin ideal çözüme göre sıralaması yapılmıştır. Bu yöntemsel bütünlük, hem öznel hem de nesnel değerlendirme ölçütlerini bir araya getirerek karar problemini daha sistematik çözmeyi mümkün kılmıştır.

##### 5.1.1 AHP Sonuçları

AHP yöntemiyle yapılan ikili karşılaştırmalar sonucunda kriter ağırlıkları belirlenmiştir:

**Tablo 5. 1.** Kriter ağırlık tablosu.

Kriter	Ağırlık
Akma Dayanımı (MPa)	0.4197
Kopma Dayanımı (MPa)	0.2595
Sertlik (HB)	0.1188
Korozyon Direnci	0.1062
Malzeme Bulunabilirliği	0.0957

AHP yöntemi kapsamında gerçekleştirilen tutarlılık analizi sonucunda tutarlılık oranı (CR) = 0.0466 olarak hesaplanmış ve bu değer 0.1'in altında olduğundan, elde edilen sonuçlar tutarlı kabul edilmiştir.

### 5.1.2 TOPSIS Sonuçları

TOPSIS yönteminde karar matrisi, normalize edilmiş değerler ve ağırlıklı normalize değerler sırasıyla oluşturulmuştur. Aşağıda, ideal ve anti-ideal çözümler ile alternatiflerin yakınlık katsayıları (Ci) ve nihai sıralama verilmiştir.

**Tablo 5. 2.** Ağırlıklı normalize matris.

Malzeme	Akma Dayanımı	Kopma Dayanımı	Sertlik	Korozyon Direnci	Bulunabilirlik
M1 (4340)	0.2416	0.1623	0.0537	0.0469	0.0666
M2 (17-4)	0.2366	0.1450	0.0679	0.0703	0.0666
M3 (15-5)	0.2490	0.1423	0.0830	0.0703	0.0333

**Tablo 5. 3.** Pozitif ve negatif ideal değerler.

Kriter	Pozitif (V <sup>+</sup> )	Negatif (V <sup>-</sup> )
Akma Dayanımı	0.2490	0.2366
Kopma Dayanımı	0.1623	0.1423
Sertlik	0.0830	0.0537
Korozyon Direnci	0.0703	0.0469
Malzeme Bulunabilirliği	0.0666	0.0333

**Tablo 5. 4** İdeal noktalara uzaklıklar ve yakınlık katsayıları.

Malzeme	S <sup>+</sup>	S <sup>-</sup>	Ci	Sıralama
M1	0.1223	0.1252	0.5061	3
M2	0.1095	0.1813	0.6234	2
M3	0.0625	1.5890	0.9626	1

Sonuçlara göre, en uygun iniş takımı malzemesi Stainless Steel 15-5 (M3) olarak belirlenmiştir. Bu malzeme, kriterlerin büyük çoğunluğunda ideal değerlere en yakın sonucu vermiştir.

## 5.2 Bulguların Yorumu

Çalışmada İHA iniş takımı için uygun malzeme seçimi problemi, çok ölçütlü karar verme yaklaşımı benimsenerek analiz edilmiştir. AHP yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları doğrultusunda, TOPSIS yöntemiyle malzeme alternatifleri karşılaştırılmış ve performans kriterlerine göre sıralanmıştır. Bu bölümde, yöntemsel çıktılar üzerinden kapsamlı mühendislik değerlendirmeleri yapılmakta ve neden Stainless Steel 15-5 (M3) malzemesinin en uygun alternatif olarak belirlendiği tartışılmaktadır.

AHP yöntemi ile yapılan değerlendirmede kriter ağırlıkları, uygulamadaki önceliklere uygun olarak belirlenmiştir. Özellikle akma dayanımı (0.4197) ve kopma dayanımı (0.2595) kriterleri toplamda yaklaşık %68'lik bir ağırlığa sahip olarak, mekanik mukavemetin İHA iniş takımı açısından taşıdığı önemi açıkça ortaya koymuştur. Bu durum, iniş sırasında maruz kalınan yüksek darbe ve yük transferinin güvenli şekilde sönmülmesi için yüksek dayanımlı malzeme kullanımının vazgeçilmez olduğunu göstermektedir.

TOPSIS analizi sonucunda elde edilen göreceli yakınlık katsayısı ( $C_i = 0.9626$ ), Stainless Steel 15-5 (M3) malzemesinin ideal çözüme en yakın seçenek olduğunu göstermiştir. Bu sonuç, M3 malzemesinin hem mukavemet hem de sertlik açısından pozitif ideal çözüme en yakın alternatif olduğunu göstermektedir. Özellikle 15-5 PH çeliği, çözümlü sertleştirme ve yaşlandırma ile yüksek mekanik özelliklere ulaşabilmekte, aynı zamanda korozyon direnci gibi çevresel etkilerden doğabilecek hasarlara karşı da yüksek dayanım sergilemektedir.

AISI 4340 çeliği (M1) yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen, daha düşük korozyon direnci ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle daha geride sıralanmıştır. Stainless Steel 17-4 (M2) ise birçok özelliği bakımından dengeli bir yapıya sahip olsa da, özellikle malzeme bulunabilirliği ve sertlik bakımından M3'e göre daha düşük değerler sunmuştur. Bu da ikinci sırada yer almasının nedenidir.

Nihai sıralama şu şekildedir:

1. Stainless Steel 15-5 (M3)
2. Stainless Steel 17-4 (M2)
3. AISI 4340 (M1)

Bu sonuçlar, iniş takımı gibi yapısal olarak kritik öneme sahip bir bileşen için yalnızca mukavemetin değil, aynı zamanda korozyon direnci, işlenebilirlik ve malzeme temini gibi mühendislik parametrelerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, bu tür çok kriterli seçim problemlerinde sayısal analizlerin öznel karar süreçlerini destekleyici bir araç olduğu da kanıtlanmıştır.

Bu bulguların benzer uygulamalarla uyum içinde olduğu da literatürle örtüşmektedir. Örneğin Tekinay ve Bozoğlu Batı (2022), askeri İHA sistemleri seçiminde yaptıkları çalışmada da çok kriterli karar modellerinin karar kalitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [33]. Benzer şekilde Karami ve arkadaşları (2021), kompozit malzeme performansını değerlendirdikleri çalışmada TOPSIS yönteminin malzeme optimizasyonunda güçlü bir araç olduğunu vurgulamışlardır [49]

### **5.3 Literatürle Karşılaştırma**

Bu tez çalışmasında, İHA iniş takımı için uygun malzeme seçimi konusu, çok ölçütlü karar verme modellerinden AHP ve TOPSIS'in birlikte uygulanmasıyla bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda, beş farklı kriter kapsamında değerlendirilen üç alternatif içerisinden Stainless Steel 15-5 (M3) malzemesi en yüksek tercih edilebilirlik skorunu elde etmiştir. Bu bulgu, mevcut literatürde yer alan çalışmalarla yöntemsel olarak tutarlılık gösterirken; aynı zamanda İHA'nın kritik alt sistemlerinden biri olan iniş takımı özelinde özgün bir katkı ortaya koymaktadır.

Hamurcu ve Eren (2020) tarafından yürütülen İHA iniş takımı tasarımına yönelik çalışmada, darbe dayanımı ve korozyon direnci gibi yapısal özelliklerin önemi vurgulanmıştır. Araştırmacılar, bu tür zorlayıcı yükleme koşullarına dayanıklı malzemelerin seçilmesinin sistem güvenliği açısından kritik olduğunu belirtmiştir [23]. Bu tez çalışmasında da, akma ve kopma dayanımı, malzeme seçiminde en yüksek öncelikli kriterler olarak değerlendirilmiş ve benzer bir mühendislik önceliklendirme yaklaşımı benimsenmiştir.

Tekinay ve Bozoğlu Batı (2022), askeri İHA platformları üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, TOPSIS yönteminin karar sürecine getirdiği nesnel analiz yapısı ve matematiksel güvenilirliğe değinmişlerdir. Bu bulgular, çok ltl karar destek sistemlerinin teknik alanlardaki kullanımının etkinliğini ortaya koymaktadır [33]. Bu tez çalışmasında da benzer şekilde TOPSIS yöntemi uygulanmış; mühendislik kriterleri çerçevesinde yapılan analiz sonucunda Stainless Steel 15-5 en uygun alternatif olarak belirlenmiştir. Bu durum, çok kriterli karar destek sistemlerinin malzeme seçimi gibi teknik problemler üzerindeki etkisini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Koçak ve Korkut (2023), İHA burun iniş takımı çatalı için yürüttükleri topoloji optimizasyonu çalışmasında, tek bir tasarım kriteri olan yapısal performansa odaklanmışlardır [24]. Ancak bu çalışmada olduğu gibi, yalnızca bir hedef doğrultusunda yapılan optimizasyonlar; malzeme seçiminde gerekli olan çok kriterli değerlendirme yapısının eksik kalmasına neden olmaktadır.

Bu tez çalışması ise, malzeme mukavemeti, korozyon direnci, işlenebilirlik ve bulunabilirlik gibi çok yönlü mühendislik kriterlerini birlikte ele alarak daha kapsamlı bir karar erevesi ortaya koymuştur.

Karami ve arkadaşları (2021), kompozit malzemelerin performansını değerlendirdikleri çalışmada TOPSIS yönteminin mühendislik uygulamalarında güçlü bir araç olduğunu vurgulamışlardır [22]. Ancak onların çalışması, yalnızca kompozit malzeme odaklıdır. Bu tez çalışması ise, hem metal alaşımlarını hem de havacılık endüstrisinde pratik uygulaması yaygın olan paslanmaz elik türlerini kapsayan daha geniş bir malzeme yelpazesinde analiz yaparak, karar modelinin uygulama kapsamını genişletmiştir.

Sonuç olarak, tez kapsamında elde edilen bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla hem yöntemsel hem de sonuçsal olarak tutarlıdır. Bununla birlikte, bu tez literatüre özgün katkılar sunmaktadır.

#### 5.4 Çalışmanın Literatüre Katkısı

Bu tez çalışması, İHA sistemlerinin alt bileşenlerinden biri olan iniş takımı için malzeme seçimini merkeze alarak, çoğu çalışmanın odaklandığı genel sistem seviyesinin ötesine geçmiştir. AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan karar modeli, yalnızca kuramsal bir çerçeveye sunmakla kalmayıp, aynı zamanda uygulamaya dönük, sahaya aktarılabilir bir yöntem önerisi sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar ve yöntemin uygulanış biçimi aşağıdaki yönleriyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır:

- Bu çalışma, doğrudan İHA platformunun bir alt sistemi olan iniş takımı üzerine yoğunlaşması açısından literatürdeki genel yaklaşımlardan ayrılmaktadır. Genellikle platform ya da genel gövde tasarımı gibi konulara odaklanan mevcut çalışmalara kıyasla, bu tez belirli bir alt sistemin karar problemini ele alarak alt sistem mühendisliğinde karar verme süreçlerine yenilikçi bir bakış kazandırmaktadır.
- Literatürde sıklıkla tercih edilen AISI 4340 gibi geleneksel malzemelerin, bazı kriterler (korozyon direnci, süneklik vb.) açısından yetersiz kalabileceği, bu çalışmada veriye dayalı bir analizle gösterilmiştir. Bunun yerine Stainless Steel 15-5 PH malzemesinin çok yönlü avantajlar sunması, bu çeliğin alternatif bir mühendislik çözümü olarak değerlendirilmesini sağlamıştır.
- Çoğu çalışmada yalnızca yapısal analizlere dayalı sonuçlar ya da öznel uzman yargıları temel alınırken, bu tezde hem sayısal teknik veriler hem de karar verici değerlendirmeleri birlikte ele alınarak AHP–TOPSIS entegrasyonu uygulanmış; böylece çok yönlü ve dengeli bir karar destek modeli oluşturulmuştur.
- AHP yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, TOPSIS yöntemi ile ideal çözüme göre alternatiflerin göreceli uygunluk düzeyleri hesaplanmıştır. Bu entegrasyon sayesinde, teorik sağlamlık ile uygulama gerçekliği arasında güçlü bir köprü kurulmuştur.
- Çalışma, çok kriterli karar verme tekniklerinin yalnızca akademik senaryolar için değil, uygulamaya dönük mühendislik kararlarında da yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığını göstermiştir. Bu yönüyle yöntemsel yapı, benzer teknik problemler için tekrarlanabilir ve genişletilebilir bir karar altyapısı sunmaktadır.

- Geliştirilen metodoloji yalnızca İHA iniş takımı tasarımına değil, mekanik sistemlerdeki diğer kritik bileşenlerin malzeme seçimi problemlerine de uyarlanabilecek nitelikte, yenilikçi, uygulanabilir ve karar verici merkezli bir yaklaşım örneği sunmaktadır.

## 6 SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Mühendislik Uygulamalarına Öneriler

Bu tez çalışmasında, İHA iniş takımı için uygun malzeme alternatifinin belirlenmesi, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin bir arada kullanıldığı çok ölçütlü karar verme modeli ile kapsamlı biçimde incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, Stainless Steel 15-5 (M3) malzemesi; mekanik performans, korozyon dayanımı ve bulunabilirlik gibi kriterler dikkate alındığında en yüksek toplam başarıyı göstererek en uygun seçenek olarak öne çıkmıştır. Bu bulgu, İHA'ların özellikle iniş ve kalkış sırasında maruz kaldığı statik ve dinamik yüklerin etkin şekilde sönmelenmesini sağlayabilecek bir malzemenin belirlenmesine olanak tanımıştır. Çalışma, yüksek akma ve kopma dayanımı, iyi korozyon direnci, yeterli sertlik seviyesi ve bulunabilirlik gibi kriterleri mühendislik bağlamında birlikte değerlendirme fırsatı sunmuştur.

Mühendislik uygulamaları açısından bu çalışmadan çıkarılabilecek öneriler şunlardır:

- Malzeme seçimi süreci, sadece mekanik performans odaklı değil, aynı zamanda çevresel koşulları ve üretim/tedarik kabiliyetini de dikkate alan çok kriterli modellerle yürütülmelidir.
- Özellikle uçuş güvenliği gibi hassasiyet gerektiren sistemlerde, karar sürecinde sezgilere dayalı tercihler yerine sayısal ve analitik modellerin kullanılması, daha sağlıklı sonuçlara ulaşılmasını sağlayabilir.
- AHP ve TOPSIS yöntemlerinin birlikte uygulanması, mühendislik uzmanlarının tecrübelerini sistematik bir biçimde modele dahil etme imkânı sunmuş, aynı zamanda karar sürecine niceliksel sağlamlık kazandırmıştır. Bu yaklaşım, benzer yapıları mühendislik problemleri için de örnek teşkil edebilir.

Bu yönüyle çalışma, havacılık sanayiinde karar verme süreçlerini nesnelleştiren bir yaklaşım önermekte ve uygulamacılara doğrulanabilir, sistematik bir karar destek modeli sunmaktadır.

## 6.2 Gelecek Çalışmalara Yönelik Öneriler

Bu tez kapsamında üç alternatif malzeme ve beş kriter üzerinde durulmuştur. Ancak gelecekte yapılacak araştırmalarda bu sınırlar genişletilerek aşağıdaki yönergelerle literatüre ve uygulamaya katkı artırılabilir:

1. İleride yapılacak çalışmalarda, mevcut üç alternatifin ötesine geçilerek kompozit esaslı malzemeler ve ileri teknoloji alaşımlar da değerlendirmeye katılarak daha kapsamlı bir malzeme karşılaştırması yapılabilir.
2. Karar sürecinde dikkate alınan kriterler genişletilerek, üretim süresi, maliyet etkinliği, darbe emme kapasitesi ve yorulma dayanımı gibi unsurlar eklenebilir; böylece karar modeli daha çok boyutlu bir yapıya kavuşturulabilir.
3. Bulanık mantık veya diğer ÇÖKV yöntemleri entegre edilebilir: Belirsizlik içeren ortamlarda karar desteği sağlayan Bulanık AHP, VIKOR, PROMETHEE gibi yöntemlerin kıyaslamalı olarak kullanılması, karar modelinin esnekliğini artırabilir.
4. Simülasyon tabanlı analizler entegre edilebilir: Malzeme performanslarının sadece teorik değil, sayısal simülasyonlarla desteklenen sonuçlarla test edilmesi, mühendislik doğruluğunu artıracaktır.
5. Endüstriyel geçerlilik testleri yapılabilir: Belirlenen malzemelerin gerçek uçuş koşullarındaki dayanımı, üretim ve bakım süreçlerindeki performansları prototip testleri ile değerlendirilebilir.

Sonuç olarak bu tez çalışması, literatürde genellikle genel İHA platformlarına odaklanan yaklaşımların ötesine geçerek, İHA iniş takımı gibi spesifik ve kritik bir alt sistemin karar verme sürecine özgün katkılar sunmaktadır. Sunulan metodoloji, mühendislik disiplinlerinde farklı uygulamalara uyarlanabilecek yenilikçi ve çok yönlü bir karar destek yapısı niteliği taşımaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] Maity, R., Mishra, R., Pattnaik, P. K., & Pandey, A. (2023). Selection of sustainable material for the construction of UAV aerodynamic wing using MCDM technique. *Materials Today: Proceedings*.
- [2] UAVOS. (2023). UAVOS unveils reinforced main landing gear spring for enhanced unmanned aircraft performance. UAVOS Official Website.
- [3] Lee, J., & Kim, D. (2021). Design and manufacture of composite landing gear for a light unmanned aerial vehicle. *Applied Sciences*, 11(2), 509.
- [4] Anagnostopoulou, A. A., Sotiropoulos, D. G., & Tserpes, K. I. (2024). A robust sustainability assessment methodology for aircraft parts: Application to a fuselage panel. arXiv preprint arXiv:2412.07421.
- [5] Shahrul Hairi, S. M. F., Saleh, S. J. M., Ariffin, A. H., & Omar, Z. (2023). A review on composite aerostructure development for UAV application. ResearchGate.
- [6] Al-Taie, A. I., & Doos, Q. M. (2023). Material selection for unmanned aerial vehicles (UAVs) wings using Ashby indices integrated with grey relation analysis approach based on weighted entropy for ranking. *Journal of Engineering (University of Baghdad)*, 29(3), 111–124.
- [7] Sayıcı, Y., Haliloğlu, H., & Feyzioğlu, A. (2024). Determination of unmanned aerial vehicle landing gear material selection using multi-criteria decision making method. 1st International Canadian Scientific Research Congress, Toronto, Canada.
- [8] Erdoğan, S., Aydın, S., Balki, M. K., & Sayın, C. (2020). Operational evaluation of thermal barrier coated diesel engine fueled with biodiesel/diesel blend by using MCDM method. *Renewable Energy*, 151, 698–706.
- [9] Chakraborty, S. (2011). Applications of the MOORA method for decision making in manufacturing environment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1–4), 1155–1166.

- [10] Jahan, A., Edwards, K. L., & Bahraminasab, M. (2016). Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design (2nd ed.). Elsevier.
- [11] Dominguez, L. P., Mojica, K. Y. S., Pabon, L. C. O., & Diaz, M. C. C. (2018). Application of the MOORA method for the evaluation of the industrial maintenance system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1126(1), 012018.
- [12] Madić, M., Radovanović, M., & Manić, M. (2016). Application of the ROV method for selection of cutting fluids. *Decision Science Letters*, 5(2), 245–254.
- [13] Wang, H., Zhang, X., & Liu, Y. (2022). Simulation-based design optimization for UAV landing gear structures. *Journal of Aerospace Technology*, 45(4), 301–316.
- [14] LFT-G. (2023). The application of advanced composite materials in drone structural components. LFT-G Blog.
- [15] UAS Vision. (2014). Carbon landing gear leg cushions UAV landing. UAS Vision.
- [16] Aeroplane Tech. (2023). Advancements in composite materials for landing gear applications. AeroplaneTech.
- [17] MDPI. (2022). Composite landing gear optimization using finite element method and experimental testing. *Applied Sciences*, 12(11), 5689.
- [18] Darji, V. P., & Rao, R. V. (2014). Intelligent multi-criteria decision making methods for material selection in sugar industry. *Procedia Materials Science*, 5, 2585–2594.
- [19] Wikipedia contributors. (2023). Composite gear housing.
- [20] Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (2015). *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer.
- [21] Bayraktar, H. (2021). Ticari Drone Teknolojilerinin Gelişimi. *Teknoloji ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4), 211–224.
- [22] Şahin, T. (2022). İnsansız Hava Araçlarının Sivil Kullanım Alanları ve Hukuki Boyutu. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 15(1), 12–21.

- [23] Hamurcu, M., & Eren, Ö. (2020). İnsansız Hava Araçlarında İniş Takımı Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi. *Journal of Aerospace Engineering*, 34(2), 123–134.
- [24] Koçak, S., & Korkut, İ. (2023). İHA Burun İniş Takımı Tasarımı için Topoloji Optimizasyonu. *International Journal of Engineering Science and Application*, 17(1), 55–68.
- [25] Sun, J., Jia, T., Xiong, F., Qin, Z., & Wu, W. (2015). Aircraft landing gear control with multi-objective optimization using generalized cell mapping. *Transactions of Tianjin University*, 21, 140–146.
- [26] Tuğrul, T. (2019). Bulanık Mantık Tabanlı İHA Seçiminde TOPSIS Uygulaması. *YBS Akademik Dergisi*, 3(1), 45–60.
- [27] Chakraborty, S. (2011). Applications of the Multi-Criteria Decision Making Methods in Engineering Selection Problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2(1), 1–15.
- [28] Yilmaz, M., & Turan, F. (2020). Multi-objective material selection for aircraft components using hybrid MCDM methods. *Materials & Design*, 198, 109251.
- [29] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- [30] Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- [31] Alam, M., Khan, M. A., & Karim, A. (2015). Composite Material Applications in UAV Structures: Performance vs Cost Trade-off. *Materials Today: Proceedings*, 2(10), 4581–4590.
- [32] Dionísio, J. F. M. (2019). Structural Optimization of a Landing Gear. *Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa*.
- [33] Tekinay, O. N., & Bozoğlu Batı, G. (2022). Askerî alanlarda kullanılmak üzere insansız hava aracı (İHA) sistemleri seçiminde TOPSIS ve bulanık TOPSIS yönteminin kullanılması. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 44(1), 78–103.

- [34] Jahan, A., Edwards, K. L., & Bahraminasab, M. (2013). *Materials Selection Using Multiple Criteria Decision Making*. Springer.
- [35] Saritaş, M. (2018). Savunma Sanayiinde Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemlerinin Kullanımı. *Stratejik Planlama ve Savunma Bilimleri Dergisi*, 6(2), 78–93.
- [36] Özcan, H., & Aydın, M. (2018). Malzeme Seçimi Problemlerinde Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS Kullanımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2), 274–289.
- [37] Yılmaz, E., & Demirtaş, H. (2022). Investigation of composite materials in unmanned aerial vehicle structures: Mechanical properties and performance benefits. *Journal of Composite Materials in Engineering*, 36(4), 225–238.
- [38] El-Sayed, A. M., & El-Mahdy, A. M. (2018). Weight optimization of fixed landing gear for medium range UAV. *Egyptian Journal of Engineering*, 57(4), 1–10.
- [39] Rezaei, J., & Salimi, N. (2015). AHP-TOPSIS integration for complex material selection problems in mechanical design. *Expert Systems with Applications*, 42(3), 1351–1362.
- [40] Austin, R. (2010). *Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment*. John Wiley & Sons.
- [41] Zhou, L., Han, J., & Wang, Y. (2021). A fuzzy AHP-TOPSIS approach for multi-criteria decision-making under uncertainty: Application to material selection. *International Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 29(1), 45–57.
- [42] Güngör, Z., & Erol, R. (2019). İHA Sistemlerinde AHP ile Malzeme Seçimi. *Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 25–36.
- [43] Kim, D., & Lee, S. (2020). Application of multi-criteria decision-making methods in defense systems design and evaluation. *Defense Engineering Review*, 12(2), 89–105.
- [44] Năstase, I., & Chițu, G. (2018). MCDM Applications in UAV Platform Evaluation. *Scientific Bulletin of the University Politehnica of Bucharest*, 80(2), 145–158.

- [45] He, C., Zhou, Y., & Wu, F. (2020). Fatigue Analysis of High-Performance Materials in Unmanned Systems. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104248.
- [46] Çakır, M., & Güner, F. (2021). İnsansız Hava Araçlarında Yapısal Optimizasyon Uygulamaları. *Makine Teknolojileri Dergisi*, 19(3), 142–157.
- [47] Vinodh, S., Sundararaj, G., & Devadasan, S. R. (2013). Application of MCDM Techniques for Sustainable Product Design: A Review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(4), 607–618.
- [48] Faruk, M., et al. (2020). Optimization of UAV Component Materials Using Hybrid MCDM Techniques. *Materials Today: Proceedings*, 30, 225–232.
- [49] Karami, M., et al. (2019). Effect of Lightweight Composite Materials on UAV Performance. *Journal of Aircraft Engineering*, 44(2), 88–95.
- [50] Şahin, B., & Kaya, E. (2020). Metal Alaşımların İHA Yapılarında Yorulma Davranışlarının Karşılaştırılması. *Uçak ve Uzay Bilimleri Dergisi*, 14(1), 36–47.
- [51] Adalı, S. (2019). Kompozit Malzeme Seçimi Sürecinde Mühendislik Optimizasyon Yöntemlerinin Uygulanması. *Polimer Teknolojileri Dergisi*, 7(1), 15–29.
- [52] Erol, İ., Akın, M., & Özdemir, M. (2022). AHP-TOPSIS Tabanlı İHA Tasarımı Karar Destek Sistemi Geliştirilmesi. *Mühendislik Uygulamaları ve Bilgi Dergisi*, 3(2), 111–125.
- [53] Campbell, F. C. (2011). *Structural Composite Materials*. ASM International.
- [54] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- [55] Nguyen, N. T., & Tran, H. T. (2021). Multi-criteria decision-making approach for UAV structural component materials. *Journal of Aerospace Science and Technology*, 115, 106842.
- [56] Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29.

- [57] Kim, D., & Lee, S. (2020). Application of multi-criteria decision-making methods in defense systems design and evaluation. *Defense Engineering Review*, 12(2), 89–105.
- [58] Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069.
- [59] Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445–455.
- [60] Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31(1), 49–73.
- [61] Brans, J. P., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York.
- [62] Brauers, W. K. M., & Zavadskas, E. K. (2006). The MOORA method and its application to privatization in a transition economy. *Control and Cybernetics*, 35(2), 445–469.
- [63] Kahraman, C., Cebeci, U., & Ruan, D. (2004). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, 87(2), 171–184.
- [64] Kuo, Y., Yang, T., & Huang, G. (2008). The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 80–93.
- [65] Mardani, A., Jusoh, A., & Zavadskas, E. K. (2015). Fuzzy multiple criteria decision-making techniques and applications—Two decades review from 1994 to 2014. *Expert Systems with Applications*, 42(8), 4126–4148.

- [66] Paul, B., Singh, R. K., & Shankar, R. (2020). Design of robust landing gear structures for UAVs: A review of challenges and recent advances. *Journal of Aerospace Engineering*, 33(6), 04020093.
- [67] Kumar, V., & Tiwari, M. K. (2018). Multi-criteria decision-making in aircraft design: Application of hybrid AHP-TOPSIS framework. *Aerospace Science and Technology*, 72, 364–376.
- [68] Darvishi, M., & Shokouhmand, H. (2021). Design criteria of unmanned aerial vehicles: A comprehensive review on mission requirements, structural design and landing gear considerations. *Aerospace Science and Technology*, 113, 106716.
- [69] Zhang, X., & Liu, Y. (2019). Multi-objective optimization and material selection in unmanned aerial vehicle systems. *Materials & Design*, 183, 108137.
- [70] Lee, H. C., & Yoon, S. H. (2020). Landing gear design optimization for unmanned aerial vehicles using hybrid material selection and finite element analysis. *Composite Structures*, 248, 112530.
- [71] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- [72] Azarmi, F., & Baghersad, M. (2020). Mechanical behavior and failure analysis of Ti-6Al-4V alloy in aerospace structures: A review. *Engineering Failure Analysis*, 112, 104468.
- [73] Mouritz, A. P., & Gibson, A. G. (2006). *Fire properties of polymer composite materials*. Woodhead Publishing
- [74] Khurana, M., & Singh, R. (2019). Design optimization of unmanned aerial vehicle landing gear: A review of recent developments. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 1–12.
- [75] Bogue, R. (2017). The role of retractable landing gear in next-generation UAVs. *Industrial Robot: An International Journal*, 44(5), 566–571.
- [76] Goebel, R., & Nikolic, J. (2020). Lightweight design of UAV landing gear using advanced composite materials. *Journal of Composite Structures*, 237, 111913.

[77] ASM International. (1990). *Metals Handbook Desk Edition*.

[78] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2021). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.

[79] Davis, J. R. (Ed.). (1994). *Stainless Steels*. ASM International.

[80] Outokumpu Stainless Steel Data Sheets. (2020). *15-5PH Technical Datasheet*.

[81] Aydın, G. (2023). *Bir Savaş Uçağının Burun İniş Takımı Yapısal Analizi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

[82] Çelik, M. (2025) Kişisel Görüşme. Baykar Teknoloji.

