



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRO-
OPTİK SİSTEM SEÇİMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK
KABA KÜME TABANLI BWM-COPRAS
YAKLAŞIMI

Atakan ÖZLEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2023
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Atakan ÖZLEK tarafından hazırlanan “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRO-OPTİK SİSTEM SEÇİMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK KABA KÜME TABANLI BWM-COPRAS” adlı tez çalışması 19 / 01 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Mehmet AKTAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL

Üye

Doç. Dr. Süleyman METE

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Atakan ÖZLEK

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ELEKTRO-OPTİK SİSTEM SEÇİMİ İÇİN BÜTÜNLEŞİK KABA KÜME TABANLI BWM-COPRAS YAKLAŞIMI

Atakan ÖZLEK

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL

2023, 81 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet AKTAN

Doç. Dr. Süleyman METE

Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL

Günümüzde insansız hava araçlarına duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan insansız hava araçları, çeşitli faydaları sayesinde gittikçe daha çok kullanılan bir teknoloji haline gelmiştir. Fakat insansız hava araçlarında ağırlık önemli bir sorundur. Taşınabilecek yük miktarı sınırlı olduğu için insansız hava araçlarına takılabilecek faydalı yükler de bu sınırlara tabidir. Bu nedenle takılacak faydalı yükler, ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak özenle seçilmelidir. Elektro-optik sistemler, insansız hava araçlarında bulunan en önemli faydalı yüklerden biridir. Eş zamanlı görüntü aktarma gibi kritik özelliklere sahip olan elektro-optik sistemler özellikle askeri alanlarda istihbarat, keşif, gözetleme ve hedefleme yapılmasına olanak sağlamaktadır. Günümüzde elektro-optik sistemlerin çok fazla modeli mevcuttur. Bu nedenle insansız hava araçlarında hangi modelin kullanılması gerektiği, cevaplanması gereken bir soru haline gelmiştir. Elektro-optik sistemlerde hangi kriterlerin daha önemli olduğu ve hangi kriterlerin geliştirilmesi gerektiği üretici firmaların odaklanması gereken alanlar haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında MALE (Orta İrtifa Uzun Havada Kalış - Medium-Altitude Long-Endurance) sınıfı insansız hava araçlarına elektro-optik sistem seçimi problemi bütünleşik bir kaba küme yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Öncelikle literatürden yararlanılarak ve alanında uzman kişilerden görüş alınarak kriter ve alternatifler belirlenmiştir. Kriterlerin ağırlıklandırması için bulanık en iyi en kötü yöntemi (BWM) kullanılmıştır. Ardından aralık değerli kaba küme tabanlı COPRAS (Complex Proportional Assessment Method) yöntemi kullanılarak alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Kriterlerin önem seviyelerinin belirlenmesi ve alternatiflerin değerlendirilmesi için teknik dokümanlardan ve uzman görüşlerinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak MALE sınıfı insansız hava araçlarına takılabilecek en uygun elektro-optik sistemin seçimi için hangi kriterlerin daha önemli olabileceği tespit edilmiştir. Çalışmanın en sonunda MALE sınıfı insansız hava araçlarına uygun olan alternatiflerin öncelik sıralaması belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık BWM, Kaba Küme COPRAS, Elektro-Optik Sistem, İnsansız Hava Aracı, MALE

ABSTRACT

MS THESIS

**INTEGRATED ROUGH SET-BASED BWM-COPRAS APPROACH FOR
ELECTRO-OPTIC SYSTEM SELECTION IN UNMANNED AERIAL
VEHICLES**

Atakan ÖZLEK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN INDUSTRIAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Dr. Bilal ERVURAL

2023, 81 Pages

Jury

Prof. Dr. Mehmet AKTAN

Assoc. Prof. Dr. Süleyman METE

Asst. Prof. Dr. Bilal ERVURAL

There is an increasing need for unmanned aerial vehicles (UAVs) today. UAVs, which have a wide range of area of use, has become a frequently used technology due to their various benefits. However, weight is a crucial concern in unmanned aerial vehicles. Since the amount of load that can be carried is limited, the payloads that can be loaded onto unmanned aerial vehicles are also subject to these limits. That is why payloads should be considered meticulously by the needs before installation. Electro-optic systems are one of the most essential payloads on UAVs. Electro-optic systems, which provide various benefits such as simultaneous image transfer, help the military immensely with intelligence, exploration, monitoring, and targeting. Electro-optic system models are abundant today. That is why choosing which model to use on UAVs has become an area of concern. In addition, determining crucial criteria and criteria requiring improvement has become a subject of interest and focus for companies.

The problem of choosing electro-optic systems for MALE UAVs is solved in this research using an integrated rough set based approach. Firstly, criteria and alternatives were determined based on a literature review and expert opinions. Fuzzy BWM (Best Worst Method) was used to weight the criteria, and alternatives were ranked with interval rough set based COPRAS (Complex Proportional Assessment Method). Technical documents and expert opinions were used to determine the importance levels of the criteria and to evaluate the alternatives. As a result, it has been determined which criteria can be more critical for selecting the most suitable electro-optical system installed on MALE UAVs. At the end of the study, the priority order of the alternatives for MALE UAVs was determined.

Keywords: Fuzzy BWM, Rough COPRAS, Electro-Optic System, Medium-Altitude Long-Endurance Unmanned Aerial Vehicle

ÖNSÖZ

İnsansız hava araçları özellikle son yıllarda hayatın her alanında daha çok karşılaşılan bir teknoloji haline gelmiştir. Dijitalleşen modern dünyada İHA'lar yoğun bir ilgi ve araştırmanın odağındadırlar. Bu tez çalışmasında MALE sınıfı İHA'larda elektro-optik sistemi seçimi problemi ele alınmıştır. Bir İHA'nın en kritik faydalı yüklerinden olan elektro-optik sistemin seçimi İHA'nın kullanım alanı ve İHA'da kullanılan parçalar gibi olguları da doğrudan etkilemektedir. Bu problemin çözümünde bütünlük kaba küme tabanlı BWM-COPRAS yaklaşımı kullanılmıştır.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisini, tecrübelerini ve desteğini esirgemeyen kıymetli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Bilal ERVURAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm hayatım boyunca bana destek olan aileme ve eşime teşekkür ederim.

Atakan ÖZLEK
KONYA-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE TABLOSU	x
KISALTMALAR	xi
1.GİRİŞ	1
2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	4
2.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihi	5
2.2. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Sınıflandırması.....	10
2.2.1. Mikro ve Mini İHA'lar.....	11
2.2.2. Taktik İHA'lar.....	12
2.2.3. MALE ve HALE İHA'lar	12
2.3. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Çeşitleri.....	14
2.3.1. Sabit Kanat İHA'lar.....	14
2.3.2. Döner Kanatlı İHA'lar.....	14
2.4. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Ana Bileşenleri	17
2.4.1. Gövde	17
2.4.2. Motor	17
2.4.3. Pervane	17
2.4.4. Güç Kaynağı / Pil	17
2.4.5. Uçuş Kontrol Platformu	19
2.4.6. Elektro-Optik Sistemler.....	19

2.4.7. Sensörler	20
2.5. Askeri Uygulamalar için İnsansız Hava Araçları.....	38
2.5.1. Muharebe Faaliyetleri için Çeşitli İnsansız Araç Kategorileri	39
2.5.2. Savaş Operasyonları için İHA'lar	39
2.5.3. Yer Kontrol İstasyonu (GCS) ve İşlevi	40
2.6. Türkiye’de İHA Sektörü ve Kullanım Alanları	43
3. LİTERATÜR TARAMASI	44
3.1. Kaba Küme Tabanlı Çalışmalar	44
3.2. BWM-COPRAS Yöntemini Kullanan Çalışmalar.....	45
3.3. İHA'lar ile İlgili Yapılan Çalışmalar	46
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	47
4.1. Materyal	47
4.2. Yöntem.....	47
4.2.1. Bulanık Kümeler	47
4.2.2. Kaba Kümeler (Rough Set)	50
4.2.3. En İyi En Kötü Yöntemi (Best Worst Method).....	52
4.2.4. Klasik COPRAS Yöntemi	54
4.2.5. Önerilen Kaba Küme Tabanlı Çok Kriterli Grup Karar Verme Yöntemi	56
5. UYGULAMA	60
5.1. Problemin Tanımlanması	60
5.2. Kriterlerin Belirlenmesi	60
5.3. Önerilen Yaklaşım ile Alternatiflerin Sıralanması.....	62
5.4. Sonuçların Karşılaştırılması	68
5.5. Duyarlılık Analizi.....	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73
EKLER	81

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. İlk Hava Torpidosu “Bug”	6
Şekil 2.2. DH82B Queen Bee	7
Şekil 2.3. “AQM-34L FIREBEE” İnsansız Keşif Uçağı.....	8
Şekil 2.4. “Hunter” İnsansız Hava Aracı.....	9
Şekil 2.5. “Helios” İnsansız Hava Aracı	10
Şekil 2.6. Teledyne Flir Şirketine Ait “Black Honer” Mikro İHA	12
Şekil 2.7. Global Haw.....	13
Şekil 2.8. “ANKA” İnsansız Hava Aracı	14
Şekil 2.9. Avidrone Aerospace Şirketinin Ürettiği “210 TL” İkiz Rotorlu İHA.....	16
Şekil 2.10. ASELSAN Şirketinin Ürettiği “Saka-1” Dört Rotorlu İHA	16
Şekil 2.11. ASELSAN Şirketinin Ürettiği “ASELFLIR-300T” Elektro-optik Sistemi .	20
Şekil 2.12. ASELSAN Şirketi Tarafından İHA’lar İçin Tasarlanan SAR.....	28
Şekil 2.13. “MQ-9 Reaper” İnsansız Hava Aracı.....	40
Şekil 2.14. “TB-2” İHA’sına Ait GCS	42
Şekil 2.15. Baykar Şirketinin Ürettiği “TB-2” İHA	43
Şekil 4.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu.....	48
Şekil 4.2. M1 ve M2 Arasındaki Kesişme Grafiği	51

ÇİZELGE TABLOSU

Çizelge 2.1. NATO'nun İHA Sınıflandırması	11
Çizelge 3.1. İHA 'lar ile İlgili Yapılan Çalışmalar.....	46
Çizelge 4.1. Dilsel Değişkenlerin Üçgen Bulanık Sayılarla İfadesi.....	49
Çizelge 4.2. Dilsel Değişkenlerin Üçgen Bulanık Sayılarla İfadesi.....	49
Çizelge 4.3. BWM Karşılaştırma Ölçeği.....	53
Çizelge 4.4. Tutarlılık Endeksi Değerleri.....	53
Çizelge 5.1. Uzmanların Deneyim Yılları	60
Çizelge 5.2. En İyi Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma Çizelgesi	62
Çizelge 5.3. En Kötü Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma Çizelgesi.....	62
Çizelge 5.4. En İyi Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma ve Ortalama Çizelgesi.....	62
Çizelge 5.5. En Kötü Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma ve Ortalama Çizelgesi ..	63
Çizelge 5.6. En İyi Kriter İçin Gri Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Vektörü... 63	
Çizelge 5.7. En Kötü Kriter İçin Gri Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Vektörü63	
Çizelge 5.8. Optimum Ağırlık Değerleri.....	65
Çizelge 5.9. Subjektif Kriterlerin Anket Çizelgesi.....	65
Çizelge 5.10. Farklı Değerlendirme Türleriyle Oluşturulan Karar Matrisi.....	66
Çizelge 5.11. Aralıklı Sayılarla Oluşturulan Karar Matrisi.....	66
Çizelge 5.12. Normalize Edilmiş Karar Matrisi	66
Çizelge 5.13. Ağırlıklı Normalize Edilmiş Karar Matrisi	67
Çizelge 5.14. Fayda ve Maliyet Kriterlerin Toplamı.....	67
Çizelge 5.15. Kaba Sayılar Normalize Matrisi.....	67
Çizelge 5.16. σ_j Matrisi.....	67
Çizelge 5.17. Nihai Net Form.....	68
Çizelge 5.18. Q_i ve N_i Matrisi	68
Çizelge 5.19. Önerilen Yaklaşım, Klasik COPRAS ve Klasik TOPSIS	69
Çizelge 5.20. Farklı Ağırlık Senaryoları	69
Çizelge 5.21. Farklı Senaryolara Ait Alternatif Sıralaması.....	70

KISALTMALAR

BAP	: Barometrik Hava Basıncı
BWM	: En İyi En Kötü Yöntem (Best–Worst Method)
CCD	: Uzaktan Teşhis TV Kamerası (Charge Coupled Device)
COPRAS	: Karmaşık Oransal Değerlendirme (Complex Proportional Assessment Method)
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
EO	: Elektro-Optik
FOG	: Fiber Optik Gyro (A fibre-optic gyroscope)
GCS	: Yer Kontrol İstasyonu (Ground Control Station)
GEO	: Dünya Yörüngesi (Geostationary Orbit)
GNSS	: Küresel Navigasyon Uydu Sistemidir (Global Navigation Satellite Systems)
GPS	: Küresel Konumlandırma Sistemi (Global Positioning System)
HALE	: Yüksek İrtifa Uzun Havada Kalış (High Altitude Long Endurance)
IMU	: Atalet Ölçüm Birimi (Inertial Measurement Unit)
IR	: InfraRed
ISR	: İstihbarat, Keşif ve Gözetleme (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance)
İHA	: İnsansız Hava Araçları
LGB	: Lazer Güdümlü Bomba
Li-Po	: Lityum-Polimer
MALE	: Orta İrtifa Uzun Havada Kalış (Medium Altitude Long Endurance)
MAV	: Mikro Hava Aracı (Micro Air Vehicle)
MEMS	: Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler (Micro Electro Mechanical Systems)
RGB	: Kırmızı Yeşil Mavi (Red, Green, And Blue)
RLG	: Halka Lazer Gyro (A Ring Laser Gyroscope)
SAR	: Yapay Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)
SBAS	: Uydu Tabanlı Büyütme Sistemleri (A Satellite Based Augmentation System)

1.GİRİŞ

Teknolojinin hızla gelişimi sayesinde hayatın her alanı bir değişim içindedir. Bu gelişim, ihtiyaç ve beklentilerin değişimini de beraberinde getirmektedir. İnsansız hava araçlarının (İHA) ortaya çıkışı ve gelişimi de bu değişimin bir parçasıdır. Lojistikten tarım ve savunma sanayisine kadar geniş bir kullanım alanı olan İHA'lar, askeri operasyonların önemli bir unsuru haline gelmiştir. Sıcak çatışmalara gerek bırakmadan arazilerin korunmasına ve gözetlenmesine olanak sağlamaktadırlar.

İHA'ların bu geniş ve çeşitli kullanım alanı ve çığır açıcı bir teknoloji olması, İHA'yı oluşturan parçaların seçimini önemli ve kritik bir süreç haline getirmiştir. Malzeme ve kullanılan teknoloji seçimi, spesifik ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak gerçekleştirilen titiz bir süreçtir. Bu nedenle İHA'lar oluşturulurken kullanım alanına bağlı olarak çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmalıdır.

İHA'ları oluşturan temel elementlerden biri taşıdığı faydalı yüklerdir. Bu faydalı yükler, sensörler, haberleşme rölesi, silahlar ve kargoları içermektedir (Karaağaç, 2014). Sensörler, faydalı yüklerin büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır ve elektro-optik (EO), kızılötesi (IR) ve yapay açıklıklı radar (SAR) sensörleri gibi çeşitlere sahiptir (Karaağaç, 2014). İHA'ların en önemli faydalı yüklerinden olan elektro-optik sistemler hedefleme, keşif, gözetleme ve hedefleme gibi alanlarda kullanılmaktadır. İHA'nın kullanılacağı alan doğrultusundaki ihtiyaçlar kapsamında içerisinde gece ve gündüz kameraları, lazerleme ve uzaklık ölçme sensörleri gibi pek çok sensör barındıran komplike bir platformdur (ASELSAN, 2022a). Bu nedenle elektro-optik sistemler, kullanıcıların istek ve ihtiyaçlarına göre üretilmektedir. Günümüzde hızla gelişen teknoloji ve İHA araştırma ve geliştirilmesine verilen önem nedeni ile elektro-optik sistemlerin farklı firmalarca üretilmiş pek çok çeşitli modeli mevcuttur. Bu nedenle bir İHA için elzem olan elektro-optik sistem seçimi bir süreç haline gelmiştir.

Bu tezin kapsamında MALE sınıfı İHA'lar için elektro-optik sistem seçim problemi çözülmüştür. Bu çözüm için literatür taraması ve uzman görüşleri ışığında 6 kriter belirlenmiştir: (i) ağırlık, (ii) optik çözünürlük, (iii) kızılötesi çözünürlük, (iv) arıza verme süresi, (v) fiyat ve (vi) lazerleme mesafesi.

Çoğu gerçek hayat grup karar verme problemlerinde ele alınması gereken bilgi heterojen olabilir. Heterojen bilgi, uzmanlar tarafından farklı biçimlerde sunulan değerlendirmeler, belirsiz, eksik ve/veya ulaşılamayan bilgi, öznel ve nesnel kriterlerin

bir arada kullanılması veya uzmanların farklı önem seviyelerine sahip olmaları durumunda ortaya çıkabilir (Ervural ve Kabak, 2019). Bu çalışmada, farklı biçim ve ölçeklerde sunulan uzman değerlendirmeleri ile nesnel skorları birlikte göz önünde bulundurarak İHA'lar için elektro-optik sistem seçimi problemi için bir yaklaşım önerilmiştir. Problemdaki belirsizliği ele almak için kaba küme ve bulanık küme teorilerini kullanır. Kaba küme, net bir kümenin yaklaşıklığı olduğundan ve yardımcı bilgilere ihtiyaç duymadan çoğunlukla orijinal verilere dayandığından, uzmanların gerçek algılarını ve orijinal verilerin nesnellliğini daha iyi gösterebilir (Song vd., 2012). Bu nedenle bu çalışmada aralık değerli kaba küme tabanlı COPRAS yöntemi kullanılarak alternatifler sıralanmıştır. Bununla birlikte dilsel terimlerle öznel kriterlere dayalı alternatifleri değerlendirmek, uzmanlar için daha kolay ve anlaşılır olduğundan uzman görüşleri bulanık dilsel terimlerle toplanmıştır. Ayrıca, kriter ağırlıkları Bulanık BWM yöntemi ile aralıklı olarak elde edilmektedir. Son olarak önerilen yaklaşımın geçerliliğini test etmek için sonuçlar klasik COPRAS ve TOPSIS yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

İHA'lar, dünyanın ve Türkiye'nin hem bugününde hem de geleceğinde önemli bir yere sahip olan bir teknolojidir. Bu tez ile MALE sınıfı İHA'larda elektro-optik sistem seçiminin bütünleşik BWM-COPRAS gibi yeni ÇKKV metodlarının entegrasyonu ile kolaylaştırılması, yeni incelenmekte olan bu spesifik alana katkı sağlaması ve gelecek çalışmalara ilham olması amaçlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan literatür araştırmasında, elektro-optik sistem seçimi için çok az sayıda çalışmaya rastlanılmıştır. Ayrıca bulanık ve kaba kümeleri birlikte ele alan bütünleşik BWM-COPRAS yaklaşımı ile karşılaşılmamıştır. Bu tez çalışması ile belirsizlik altında farklı biçimlerde sunulan uzman değerlendirmeleri ile nesnel kriterleri bir arada ele alan bir ÇKKV yaklaşımı sunulmuştur.

Çalışmanın temel katkıları şunlardır:

- Uzman görüşlerinden yararlanılarak İHA'lara elektro-optik sistem seçimi için bir karar prosedürü geliştirilmiştir.
- Bulanık ve kaba küme teorisini birlikte ele alarak COPRAS yöntemi genişletilmiştir.
- Farklı biçimlerde sunulan uzman değerlendirmeleri ile nesnel kriterleri bir arada ele alabilen bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Altı bölüme ayrılmış olan tezin ilk bölümünde araştırma konusuna giriş yapılmıştır. İkinci bölümde İHA'ların tarihçesi, sınıflandırılması ve sensörler hakkında genel bilgi verilerek bağlam güçlendirilmiştir. Üçüncü bölümde literatürde BWM ve COPRAS başta olmak üzere bulanık ÇKKV metotları ile yapılmış geçmiş çalışmalar ve kaba küme tabanlı çalışmalara yer verilmiştir. Dördüncü bölümde BWM ve COPRAS yöntemlerine ait bilgiler ve önerilen çözüm adımları anlatılmıştır. Beşinci bölümde tez kapsamında ele alınan problem sunulmuş ve çözümü gerçekleştirilmiştir. Altıncı bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.



2. İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

İHA, lojistik, araştırma ve geliştirme, askeri, sivil ve ticari uygulamalar için kullanılan pilotsuz hava araçlarıdır. Son yıllarda İHA'lar, savaş veya eğitim için silah platformları ve gerçek zamanlı keşif için yoğun olarak kullanılmaktadır. Tüm İHA'lar, otomatik pilot olarak bilinen bazı otomatik uçuş kontrol yöntemlerine sahiptir (Aleksander, 2018).

İHA dünyada öne çıkan ve sürekli geliştirilmekte olan en yeni teknolojilerden biridir. Ayrıca kullanım alanları askeri kullanımdan sivil kullanıma kadar çeşitlilik gösterebilmektedir. İHA'lar, çeşitli operasyonlarda gelişmiş stabilite ve dayanıklılıkları nedeniyle askeri ve sivil hizmetlerin farklı disiplinlerinde çok önemli bir ilgi görmektedir (Fahlstrom vd., 2022). İHA'ların kullanma alanları ve uygulamaları nesnelere interneti (IoT), 5G ve B5G'deki gelişmiş kullanımları nedeniyle olağanüstü bir şekilde genişlemektedir (Li vd., 2018).

İHA'lar, son on yılda nesne algılama ve izleme, kamu güvenliği, trafik gözetimi, askeri operasyonlar, gizli veya tehlikeli alanların keşfi, iç veya dış mekân navigasyonu, atmosferik algılama, afet sonrası operasyonlar, veri paylaşımı, altyapı yönetimi, acil durum ve kriz yönetimi, yük taşımacılığı, orman yangını izleme ve lojistik, acil sağlık hizmetlerinin ve ilaçların tedariği dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Banik vd., 2022; Yu vd., 2021).

Ayrıca İHA'lar, son zamanlarda lojistik sektöründe önemli bir araç haline gelmiştir. Drone teslimatları, trafik sıkışıklığından kaçınarak teslimat süresini kısaltma potansiyeline sahip olmaları ve geleneksel ulaşım şekillerine kıyasla karbon ayak izini azaltan doğal yapısı nedeniyle iki yönlü bir avantaja sahiptir. Bu potansiyelden yararlanmak için dünya çapında birçok şirket, gerçek dünya uygulamaları için İHA'ları geliştirmekte ve test etmektedir (Raj ve Sah, 2019).

Bir İHA, genel olarak, herhangi bir insan yerleşik operatöre ihtiyaç duymadan uçuşa ve havada kalma kabiliyetine sahip, eşdeğer insanlı sistemlerden daha uygun maliyetli operasyonlar sağlayan ve insan hayatını riske atmadan düşük maliyetli kritik görevler gerçekleştiren pilotsuz bir hava aracı olarak adlandırılmaktadır. İHA'lar uzaktan kumanda edilebilmektedir. Kontrol komutları ise uzaktan kumanda aracılığıyla bir yer baz istasyonundan sağlanmaktadır (Zhang vd., 2020). İHA'lar ayrıca, küresel konumlandırma sistemi (GPS) ve atalet ölçüm birimleri (IMU) dahil olmak üzere otopilot

ve farklı sensörler aracılığıyla kontrol işlemlerini gerçekleştirebilmektedir (Yasin vd., 2020).

İHA'lar, insanlı uçaklara kıyasla çeşitli ek yeteneklere sahiptir. Bunlar şöyledir (Karaağaç, 2012):

- Riskli ortamlarda uçuş kabiliyeti
- Tasarım esnekliği
- Havada kalma süresinin uzun olması
- Görev esnekliği ve çeşitliliği imkânı
- İnsanlı uçaklardan daha az maliyetli olmaları
- Harekât ortamında insan hayatını tehlikeye atmadan istihbarat toplayabilme ve nişan almadan atış yapabilme özellikleri
- Kuvvet koruma görevini yerine getirebilme
- Doğru ayırım özelliğine sahip olma
- Orantılı güç kullanabilmek
- Yaygın bir savaşın devam etmesinin önlenmesi

İnsansız hava aracı sistemlerinin sınırlamaları ise şöyledir:

- Sınırlı “hisset ve kaçın” yeteneği
- Veri bağlantılarına bağımlılık
- İnsan savaş uçakları kadar hızlı olamama
- Elektronik Harp Etkisi
- Hava savunma sistemlerine karşı etkisiz
- Asimetrik

2.1. İnsansız Hava Araçlarının Tarihi

İHA'ların tarihi incelendiğinde ilk olarak Temmuz 1849 yılında Avusturya'nın Venedik'i kuşatması sırasında kullanıldığı görülmektedir. Avusturya kuvvetleri, savaş sırasında Venedik şehrinin üzerinde patlamaları için zamanlanmış bombaları taşıyan 200 sıcak hava balonu fırlatmışlardır. Bu bomba taşıyan balonların bir kısmı hedefine başarı ile ulaşırken, birçoğu değişen rüzgâr koşulları sonucu hedeflerinden sapmışlardır. Hatta bazıları Avusturya hatlarına doğru geri sürüklenmişlerdir (Hodgkinson ve Johnston, 2018). Böylece her ne kadar istenen başarı sağlanamasa da bir savaş sırasında ilk defa insansız hava araçları kullanılmıştır.

İlerleyen yıllarda edinilen tecrübeler ve sabit kanatlı uçakların ortaya çıkışı, bu alanda yeni gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Özellikle 1909 – 1920 döneminde, Elmer Sperry tarafından havacılık jiroskopunun gelişimi ve Glenn Curtiss tarafından uçak gövdesi yapımı, bu alandaki ilk öncüler olan hava torpidolarının ortaya çıkmasına yol açmıştır (Barnhart vd., 2021).

Ayrıca Birinci Dünya Savaşı sırasında, hava torpido konsepti gelişimine hız kesmeden devam edilmiştir. Bu alanda çalışmalar yapan Charles Franklin önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Franklin tarafından üretilen ve “Bug” olarak isimlendirilen hava torpidosu (Şekil 2.1.) 50 mil uzaktaki bir hedefe 200 librelik bir yük taşıyabilecek şekilde tasarlanmış ve bu süreçte kullanılmıştır (Okpaleke, 2021). Her ne kadar Franklin’in ürettiği söz konusu hava torpidosu önemli faydalar sağlasa da beklentilerin gerisinde kalması nedeniyle savaş sonrasında üretimi durdurulmuştur. Bununla birlikte Franklin’in torpido sistemi belirlenmiş bir uçuş düzenini başarıyla gerçekleştiren ilk insansız uçak olarak kabul edilmiştir (Newcome, 2004).



Şekil 2.1. İlk Hava Torpidosu “Bug” (Wordpress, 2022)

I. Dünya Savaşı sonrasında uçaklar kalkış ve havada kalma konusunda tutarlı hale geldikçe, dikkatler uzaktan kumanda yeteneğinin eklenmesine çevrilmiştir. Radyo mühendisleri, dünyanın ilk gerçekten uzaktan kumandalı uçağı olan “Messenger”ı üretmek için Sperry ile birlikte çalışmışlardır. İki saatlik uçuşunu ve 90 millik isabeti

başarıyla gerçekleştiren “Messenger”, ordu için bir hava torpido konfigürasyonu olarak seçilmiş ve üretimine başlanmıştır (Newcome, 2004).

Savaşın sonra radyo kontrollü uçak gelişimi hız kesmeden devam etmiştir. Bununla birlikte teknoloji yavaş yavaş hava torpidolarından tam teşekküllü uçaklara kaymaya başlamıştır. 1931'de Birleşik Krallık, “Fairey Queen”i üretmiştir. “Fairey Queen” bir keşif uçağı olan “Fairey III F” uçağından radyo kontrollü bir İHA'ya dönüştürülmüştür. Bu gelişmeyi 1935 yılında de Havilland Tiger Moth'den türetilen “DH82B Queen Bee” isimli uçağın (Şekil 2.2.) seri üretimi takip etmiştir (Nair, 2021).



Şekil 2.2. DH82B Queen Bee (Aviationmuseum, 2022)

İlerleyen yıllarda radyo kontrollü İHA'ların kullanımı ordudan özel sektöre doğru kaymaya başlamıştır. 1934 yılında eski bir İngiliz askeri olan Reginald Denny, Amerika'ya göç etmiş ve Hollywood Bulvarı'nda bir maket uçak dükkânı açmıştır (Stewart ve Barrera, 2021). Daha sonra 1935 yılında Reginald Denny Industries isminde bir şirket kurarak İHA üretmeye başlamıştır. Denny ilk olarak 1935'te Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ordusu için RP-1 adlı bir İHA prototipi üretmeye başlamıştır. Ancak bu model çok başarılı olmamıştır. Daha sonra, 1938'de RP-1'in gelişmiş versiyonu olan RP-2'yi üretmiş ancak bazı eksiklikleri nedeniyle bunu ABD ordusuna satamamıştır. RP-2'nin üst versiyonları olan RP-3 ve RP-4'de yapılan iyileştirmeler ve gelişmeler

sonrasında ortaya çıkan OQ2 RP-4 modeli ile Denny, nihayet 1940'ta ABD ordusu ile bir sözleşme yapabilmiştir (Zaloga, 2011).

İkinci Dünya Savaşı sonrası dönemdeki gelişmelere rağmen, bu alanda çok fazla bir ilerleme kaydedilmemiştir. Bu süreç 1960'lardaki Vietnam Savaşı'na kadar sürmüştür. Vietnam Savaşı döneminde İHA'ların önemi artmaya başlamış ve özellikle savaş sırasında keşif, düşman bölgesinin görüntülerini toplama, broşür atma vb. yeni amaçlar için kullanılmıştır. Vietnam Savaşı'nın ardından, Birleşik Krallık ve Amerika Birleşik Devletleri dışındaki diğer ülkeler insansız hava teknolojisini keşfetmeye ve bu alanla ilgilenmeye başlamıştır (Keane ve Carr, 2013).

Vietnam savaşı sırasında yüksek irtifa ve dikey kalkış drone'ları da geliştirilmiş, ancak tipik olarak, savaştan sonra ilgi azalmıştır. Yabancı ülkelerdeki İHA programları kısa sürede popüler hale gelmeye başlamıştır. Başlangıçta bir Firebee tipi hava aracına dayanan ve hızla genişleyen İsrail havacılık endüstrisi 1982'de İHA'ları daha çok keşif amacıyla kullanmaya başlamıştır. 80'lerin sonlarında ve 90'ların başlarında, Amerika Birleşik Devletleri, İsrail'in hem Lübnan'da hem de Suriye'de bu tür araçları keşif ve füze önleme amacıyla etkin olarak kullanmasını örnek almış ve insansız hava sistemlerine olan ilgisini artırmıştır (Sanders, 2003). Örnek bir Firebee tipi insansız hava aracı Şekil 2.3.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 2.3. “AQM-34L FIREBEE” İnsansız Keşif Uçağı (Pimaair, 2022)

1990'lara gelindiğinde teknolojinin olgunlaşması ve ardından minyatürleştirilmesinin bir sonucu olarak, ABD ordusunun İHA'lara olan ilgisi artmaya devam etmiştir. 1990'larda ABD Savunma Bakanlığı, AAI Corporation ve bir İsrail şirketi Malat ile bir sözleşme imzalamış ve “Pioneer” drone'u üretmiştir. Bu İHA'lar 1991 Körfez Savaşı sırasında önemli askeri araçlar olarak kullanılmıştır. Başlangıçta, İHA sadece gözetleme görevleri için kullanılmış, daha sonra ise silahlandırılan İHA'lar saldırı görevlerinde kullanılmaya başlanmıştır (Keane ve Carr, 2013).

Yakın müttefikler olan ABD ve İsrail, insansız havacılığın yeni çağını başlatan ortak bir kalkınma programına başlamışlardır. Bu iki ülke, “Hunter” ve “Pioneer” İHA'larını (Şekil 2.4.) geliştirmişlerdir. Pioneer aslen donanma tarafından envantere alınmış ve Körfez Savaşı'nda düşman ateşini tespit etmede etkin bir şekilde kullanılmıştır. Aynı zamanda 1994 Balkan ihtilafı sırasında ve 1999'da Kosova'da deniz piyadeleri için bir gözetleme işlevi görmüştür (Newcome, 2004). Bu savaş alanı başarıları, İHA'ların etkili bir savaş aracı olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.4. “Hunter” İnsansız Hava Aracı (Northropgrumman, 2022a)

1990'lardaki araştırmalar ve gelişen teknoloji insansız araçlarının 24 saatten fazla ve 50.000 fitin üzerinde kalabilen araçlar yapmaya yönlendirmiştir. Ayrıca bu

araştırmalar İHA'ları daha hafif ve daha güçlü hale getirmek için yeni malzemeler kullanılmasına ve uçağı hareket ettirmek için güneş enerjisinden yararlanmaya odaklanılmasını sağlamıştır (Newcome, 2004). NASA (National Aeronautics and Space Administration) ve AeroVironment Corporation, 1990'ların sonlarında güneş enerjili Pathfinder ve Helios uçağlarını (şekil 2.5.) geliştirmiştir.



şekil 2.5. “Helios” İnsansız Hava Aracı (NASA, 2022)

Ayrıca kalkış ve iniş dahil tamamen otonom uçuşlara odaklanılmış ve ilk kez yeni Predator drone, lazer güdümlü bir tanksavar füzesi ile donatılmıştır. Böylece İHA'lar aynı anda devriye gezme, tespit etme, hedefleme ve saldırma yeteneğine sahip olmuştur (Newcome, 2004). Bu tür teknolojilerin ortaya çıkmasıyla birlikte, savaşta İHA'ların insan gücüne olan ihtiyaçı azaltabileceği ve ateş hattına daha az asker koyabileceği ortaya çıkmıştır. İHA'ların işlevselliği ve güvenilirliği arttıka, sivil ve askeri olmayan hükümet sektörlerinde de kullanım potansiyeli ortaya çıkmıştır.

2.2. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Sınıflandırması

İHA'lar için genel kabul edilen tekdüze bir sınıflandırma henüz mevcut değildir. Bunun nedeni ise İHA'ların birden fazla sınıfın özelliklerini aynı anda taşıyabilmesidir.

Bu nedenle İHA'ların sınıflandırılması konusunda dünya çapında bir fikir birliği henüz mevcut değildir. Her ülkenin kendi sınıflandırması vardır ve literatürde genel olarak en kapsamlı sınıflandırmanın ABD tarafından yapıldığı ileri sürülmektedir. Ayrıca ABD yaklaşımından ilham alan Çizelge 2.1.'deki NATO sınıflandırması, giderek daha fazla kabul gören bir çerçeve sağlamaya çalışmaktadır (Arjomandi vd., 2006). Ayrıca literatürde İHA'ların yapıları, taşıdıkları yükler, irtifa ve uçuş süresine göre sınıflandırmalarında olduğu görülmektedir. Bu tez çalışması NATO sınıflandırması kaynak alınarak yapılmıştır.

Çizelge 2.1. NATO'nun İHA Sınıflandırması (JAPCC, 2010)

Sınıfı	Kategori	Kullanım Alanı	Görev Yüksekliği (ft)	Görev Yarıçapı (km)	Örnek Platformlar
Sınıf I (150 kg'dan hafif)	Küçük >20 kg	Taktik Birim	<5000	50	Luna, Hermes 90
	Mini 2-20 kg	Taktik Alt-birim	<3000	25	Scan Eagle, Skylark, Raven, DH3, Aladin, Strix
	Mikro <2 kg	Taktik, Bireysel	<200	5	Black Widow
Sınıf II (150-600 kg)	Taktik	Taktik Düzen	<10000	200	Sperwer, Iview 250, Hermes 450, Aerostar,
Sınıf III (600kg'dan ağır)	Taarruz-Atak	Stratejik/Ulusal	<65000	Limitsiz	X-47B, Phantom Ray
	HALE	Stratejik/Ulusal	<65000	Limitsiz	Global Hawk
	MALE	Operatif/ Harekât Alanı	<45000	Limitsiz	Predator B, Predator A, Heron, Heron TP,

Her ne kadar İHA'lar için uluslararası ortak geçerliliği olan bir sınıflandırma mevcut değilse de NATO standartlarına göre irtifa, görev yarıçapı ve kalkış ağırlığı gibi faktörlere göre önerilen sınıflandırmalar şöyledir:

2.2.1. Mikro ve Mini İHA'lar

Mikro ve mini İHA'lar en küçük İHA teknolojisidir. Bu platformlar alçak irtifalarda uçmaktadır. Bu kategorideki tasarımlar, “kentsel kanyonlarda” veya binaların

içinde çalışabilen, koridorlarda uçan, dinleme ve kayıt cihazları, vericiler veya minyatür TV kameraları taşıyan İHA'lara odaklanmaktadır (Bento, 2008).

Mikro İHA'lar, mini İHA'lardan daha küçüktür ve 2 kg kadar hafiftir; mini İHA'lar 20 kilogramdan daha hafif ve 200 ile 3.000 ft arasındaki irtifalarda uçabilmektedir. Mikro ve mini İHA'lar daha çok sivil/ticari uygulamalarda kullanılmaktadır (PS ve Jeyan, 2020). Örnek bir mikro İHA Şekil 2.6.'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.6. Teledyne Flir Şirketine Ait “Black Honer” Mikro İHA (Tledyneflir, 2022)

2.2.2. Taktik İHA'lar

Taktik seviyedeki İHA'lar, 10.000 ft altında 200 km çapta haberleşme antenlerini görerek uçuş yapabilmektedirler. Genellikle askeri ve sivil alanlarda (yangın, kamu güvenliği vb.) kullanılmaktadır. En büyük sorunları kısa uçuş süresi ve uydu iletişim sistemlerinin olmaması, taktik seviyedeki İHA'ların çalışabileceği mesafeleri sınırlamaktadır.

2.2.3. MALE ve HALE İHA'lar

İHA'lar daha yüksek irtifalarda daha uzun uçuş menzili ve dayanıklılığı olan daha ağır platformlar olma eğilimindedir. Yüksek İrtifa Uzun Uçabilirlik (HALE) İHA'ları, 12.000 kilograma kadar maksimum kalkış ağırlığı ve yaklaşık 65.000 ft maksimum uçuş yüksekliğine sahip en ağır İHA'lardır. Diğer İHA'lara göre daha büyük gövdeye sahip olduklarından astronomik olarak daha büyük ve daha ağır yükleri ve daha karmaşık ekipmanları taşıyabilmektedirler (Coban ve Oktay, 2017).

35 saat havada kalma yeteneğine sahip askeri İHA Global Hawk (Şekil 2.7.) bu sınıfın belki de en iyi bilinen İHA'sıdır. Askeri olmayan HALE örneği ise, NASA tarafından işletilen elektrik/güneş enerjisiyle çalışan Helios'tur. Helios, elektrikle çalışan pervanelere güç sağlamak için güneş panelleri kullanmaktadır. Ayrıca 30.000 metrelik bir yükseklik rekoruna sahiptir. Helios İHA'nın kullanım alanları arasında Dünya'yı gözleme, haritalama ve atmosferik izleme yer almaktadır (Coban ve Oktay, 2017).



Şekil 2.7. Global Hawk (Northropgrumman, 2022b)

MALE İHA'lar, yüksek irtifalarda (<45.000 ft) uçan ağır İHA'lardır (600 kg daha ağır) ve şu anda esas olarak askeri uygulamaları desteklemek için kullanılmaktadır. Uzun menzilli İHA'larda daha ileri teknoloji kullanılmaktadır. Bu kapsamda tipik olarak yer istasyonu ile İHA arasındaki iletişim sorununun üstesinden gelmek için aktarma görevi gören bir uydu bağlantısı (veya başka bir platform) vb. teknolojiler gerektirmektedir.

“ANKA” (Şekil 2.8.) gibi MALE İHA'lar, 30 saatten fazla görev yapabilir ve ayrıca hassas güdümlü füzeleri ile donatılabilmektedirler. MALE İHA, temel olarak gözetleme ve keşif görevlerinden sorumludur (Coban ve Oktay, 2017).



Şekil 2.8. “ANKA” İnsansız Hava Aracı (Wikimedia, 2022)

2.3. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Çeşitleri

İHA'lar yapısal ve tasarım açısından bazı çeşitlere sahiptir. Bunlar aşağıda detaylı olarak verilmiştir.

2.3.1. Sabit Kanat İHA'lar

Sabit kanatlı İHA'lar, iniş ve kalkış için uygun bir piste veya kalkış için bir fırlatma mekanizmasına ve iniş için boş alana ihtiyaç duyan insansız (kanatlı) uçakları ifade etmektedir. Sabit kanatlı İHA, genel olarak uzun süreli uçuş kabiliyetine sahip olup, yüksek seyir hızlarında uçabilmekte ve genellikle uzun menzilli gözetleme operasyonları için kullanılmaktadır (Beard vd., 2005).

2.3.2. Döner Kanatlı İHA'lar

Döner kanatlı İHA'lar, rotorlu İHA'lar veya dikey kalkış ve iniş İHA'ları olarak bilinmektedir. Bu tür İHA'ların özelliği, havada asılı kalma ve yüksek manevra kabiliyeti avantajlarına sahip olmalarıdır. Bu tür İHA'lar temelde bir helikopter gibi çalışmaktadır. Bu yetenekler, başta sivil uygulamalar olmak üzere birçok hava gözetim uygulaması için kullanışlıdır (Zeng vd., 2019).

Döner kanatlı İHA'lar farklı konfigürasyonlara sahiptir. Bu konfigürasyon farklılıkları, kullanılan rotorların tipine ve sayısına bağlıdır. Rotor sayılarına göre ise aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadırlar:

- Tek Rotor
- İkiz Rotor
- Çoklu Rotor

2.3.2.1 Tek Rotorlu İHA'lar

Tek rotorlu İHA'lar bir ana uçuş mekanizması tarafından kontrol edilen bir elektrik veya gaz motoru tahrik sistemi tarafından tahrik edilen tek bir rotordan oluşmaktadır. Uçağın konumu, üç eksenli ivmeölçer ve açısal hızın yanı sıra açı değerlerini de ölçen üç eksenli jiroskoptan oluşan basit atalet ölçüm birimi ile tahmin edilmektedir. Makinenin kontrolleri İHA'nın uygun eksenindeki kontrol yüzeyi sehimi ile yapılmaktadır. Basit kamera, bu tür İHA için bir yük görevi görmektedir (Carholt vd., 2016).

2.3.2.2 İkiz Rotorlu İHA'lar

İkiz rotor konfigürasyonunda, iki ana rotor, İHA'nın ana gövdesinin kaldırılmasına katkıda bulunmaktadır. Bu rotora genellikle disk denilmektedir. Rotor diski genellikle iki ana rotorun dışında ters yönlerde dönmektedir. Bir rotor saat yönünde, diğer rotor ise saat yönünün aksinde dönmektedir. Bu nedenle İHA'nın normal eksenini için kuyruk rotoru veya başka bir yalpalama stabilizatörü gerekli değildir. İkiz rotorlu İHA'nın birçok çeşidi bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Tandem – Diğerinin önünde bir rotor
- Enine rotolar – İHA'da yan yana yerleştirilmiştir
- Koaksiyel – Rotor diski, eş merkezli tahrik milleri ile üst üste
- Birbirine Geçmeli Rotolar – Birbirinden dar bir açıda olan ikiz rotolar neredeyse dikey tahrik milleri, rotasyon sırasında rotor kanatlarını birbirine geçirmek için birbirine dişlidir, buna senkroptör de denilmektedir (Yang vd., 2015). Örnek bir ikiz rotorlu İHA Şekil 2.9.'daki gibidir.



Şekil 2.9. Avidrone Aerospace Şirketinin Ürettiği “210 TL” İkiz Rotorlu İHA (Northropgrumman, 2022c)

2.3.2.3 Çok Rotorlu İHA'lar

İkiden fazla rotor diskine sahip İHA'lardır. Her köşede bir tane olması durumunda üç rotorlu veya dört rotorlu veya altı rotorlu olabilmektedir. Çok rotorlu uçakların avantajı, uçuş kontrolü için gereken daha basit rotor mekaniğine sahip olmalarıdır. Uçuş stabilitesi ve kontrolü için kanat döndükçe hatvesi değişen karmaşık değişken hatveli rotorlar kullanan tek ve çift rotorlu helikopterlerin aksine, çok rotorlular genellikle sabit hatveli kanatlar kullanmaktadır. Araç hareketi, her biri tarafından üretilen itme ve torku değiştirmek için her rotorun bağıl hızı değiştirilerek kontrol edilmektedir (Yang vd., 2015). Örnek bir dört rotorlu İHA Şekil 2.10.'da gösterildiği gibidir.



Şekil 2.10. ASELSAN Şirketinin Ürettiği “Saka-1” Dört Rotorlu İHA (ASELSAN, 2022b)

2.4. İnsansız Hava Araçlarının (İHA) Ana Bileşenleri

İHA'lar genel olarak değişmez bazı temel parçalara ve bileşenlere sahiptir. Bununla birlikte belirli amaçlar için tip ve kullanım alanlarına göre özel unsurlar dahil edilebilmektedir (El-Faham vd., 2020). İHA'ların temel yapısı aşağıdakilerden oluşmaktadır.

2.4.1. Gövde

Gövde veya çerçeve İHA'ların ana parçasıdır. Gövdenin şekli ve malzemesi, uçuş prensibine ve mukavemet ihtiyacına göre değişmektedir (El-Faham vd., 2020).

2.4.2. Motor

İHA'lar için kullanılan üç ana motor türü bulunmaktadır. Bunlar türbin motorları (turbo fan, turbo jet, turbo prop, seyir füzeleri, deniz uygulamaları için gaz türbini), pistonlu motorlar (dizel ve ateşlemeli, iki ve dört zamanlı, turbo şarjlı ve doğal emişli) ve elektrik motorlarıdır. Bununla birlikte endüstri tarafından talep edilmesi durumunda hibrit motorlar da geliştirilmektedir (Cirigliano, 2017).

2.4.3. Pervane

Pervane, bir güç kaynağından (örneğin bir motor) edinilen dönme hareketini, ileri veya geri iten dönen bir akıma dönüştürmektedir. Pervanelerin amacı İHA'yı havada tutacak itki ve tork üretmek ve manevra yapmayı sağlamaktır (Phang vd., 2014).

2.4.4. Güç Kaynağı / Pil

İHA'nın motor tipi, uçuş süresi ve boyutu İHA'nın güç kaynağını tanımlamakta ve karakterize etmektedir. Daha büyük İHA'larda yakıt tüketen geleneksel motorlar kullanmakta iken, birçoğu pil gerektiren elektrik motorları kullanmaktadır. Lityum-Polimer (Li-Po) piller verimli olmalarının yanında çok kanatlı İHA'lar için en iyi çözümdür. Güneş enerjisi de elektrik motorlu İHA'lar için tercih edilen bir seçenek olmaktadır (Lee vd., 2012).

Motorlu tip İHA'lar genellikle benzin, metan ve hidrojen gibi çeşitli fosil yakıt kaynakları kullanmaktadır. Küçük drone'larda ve özellikle MAV'larda (Micro Air Vehicle) gerekli güç genellikle bataryadan sağlanmaktadır. Aynı zamanda bu tür İHA'ların %90'ında Li-Po pil tercih edilmektedir. Li-Po piller, düşük ağırlıklarından

dolayı en çok tercih edilen enerji kaynaklarıdır. İçten yanmalı motorlar için kullanılan fosil yakıtlar, pillerden daha fazla enerji üretmelerine rağmen son derece düşük verimliliğe sahiptir ve yakıt kullanımı MAV'lar için stabilite sorunlarına neden olabilmektedir. MAV'larda karşılaşılan temel sorunlardan birisi pil ya da fosil yakıt kullanmalarına bakılmaksızın 30 dakikadan fazla havada kalamamalarıdır (Dudek vd., 2013).

Bununla birlikte yeni teknolojiler geliştirilmeye devam etmektedir. Özellikle mikro yakıt hücresi geliştirme aşamasındadır ve bu teknoloji henüz MAV'larda kullanılmamaktadır. Günümüzde küçük Li-Po piller en yaygın kullanılan güç kaynaklarıdır. MAV'ların çeşitli görevlerde kullanılmasına ilgi artmaktadır. Ancak diğer bir sorun, daha büyük İHA'lara kıyasla MAV'ların düşük dayanıklılığa sahip olmalarıdır. Uçuş süresi de güç tüketimine bağlıdır ve MAV'lar sınırlı depolama kapasitesine sahiptir. Bu da doğal olarak MAV'ların havada kalma sürelerini etkilemekte ve 30 dakika gibi bir süreye sınırlandırmaktadır (Jung ve Kim, 2017).

İHA'larda, kanat şekli, kanat açıklığı, kanat profili, seyir hızı, hava koşulları vb. gibi farklı geometrik ve fiziksel parametreler, sürtünmenin azaltılmasında ve dolayısıyla güç tüketiminde önemli rol oynamaktadır. Aynı zamanda İHA'ların havada kalma sürelerini artırmak için tasarım parametrelerinin yanında ekstra sensör ve kameraları çalıştırmak için güneş panelleri ve piezoelektrik enerji toplayıcılar, yenilenebilir enerji kaynakları olarak kullanılmaktadır (Qin vd., 2020).

Özellikle güneş pilleri İHA'larda yıllardır kullanılan enerji kaynağıdır. Günümüzde, güneş panellerinin drone'lara montajı, uçuş dayanıklılığını artırmak için yaygın bir yöntem olarak kabul edilmekte ve genellikle güneş pilleri bulutların içinde veya altında veya karanlıkta uçarken yeterli güç üretmediğinde pil yedek olarak kullanılmaktadır. Diğer bir deyişle, İHA'lara güç sağlamak için genellikle güneş pilleri ve pilin bir kombinasyonu olan hibrit bir kaynak kullanılmaktadır (Xian-Zhong vd., 2013). İnce, esnek, hafif ve verimli olan güneş pilleri, farklı tipteki İHA'ların kanatlarına uygulanmaktadır. Güneş pillerinin başlıca sınırlamaları, yüksek maliyetleri, düşük verimleri ve sıcaklık hassasiyetleridir. Ayrıca artan sıcaklıklar güneş pillerinin güç çıkışını azaltabilmektedir (Chiaraviglio vd., 2018).

Güneş pillerinin maksimum güç çıkışı üzerinde büyük etkisi olan parametrelerden biri, güneş pili tarafından emilen güneş radyasyonu miktarıdır. Güneş pillerinin seri ve paralel bağlantıları, performanslarını iyileştirmek için gerekli voltaj ve akımı elde etmek

için kullanılmaktadır. Güneş sistemleri, drone'lar bulutların içinde veya altında veya karanlıkta uçarken yeterli güç üretememektedir. Bu nedenle enerji kaynağı olarak güneş enerjisini kullanan İHA'lar geceleri kullanılamamaktadır. Bu sorun için önerilen çözüm, taşınabilir bir jeneratör veya elektrik şebekesi gibi ortak bir güç kaynağından lazer ışığı kullanmaktır (Lee vd., 2014).

Bu lazer ışını, drone'un altına kurulan bir fotovoltaik alıcıya yönlendirilir. Bu şekilde, lazer güç ışınlama teknolojisi, çoğu drone'un sınırlamalarının üstesinden gelmek için İHA'lara sınırsız uçuş süresi sağlayabilmektedir. Kablosuz güç sistemlerinin ana avantajlarından biri, enerji kaynağının, gücün üretilmesinin daha kolay ve daha ucuz olduğu yerde olmasıdır. Lazer sistemlerinin gece kapanmasına gerek yoktur ve pili sürekli olarak şarj edebilir. Bu sistem havada kalma problemlerini çözse de uçuş menziline bazı problemlere sahiptir. Örneğin bu sistem yüksek irtifa İHA'lar için uygulanamamaktadır. Bununla birlikte uçuş menzili 5 km'den az olan döner kanatlı mikro hava araçları için uygulanabilmektedir (Lee vd., 2014).

2.4.5. Uçuş Kontrol Platformu

Her İHA, ölçüm sinyallerini toplamak, aktüatörleri çalıştırmak, iletişimi ve otonom uçuş kontrollerinin gerçek zamanlı çalışmasını desteklemek için bir aviyonik sisteme sahiptir. Bir uçuş kontrol platformu, donanım ve yazılımdan oluşmaktadır. Askeri ve ticari İHA'ların kendine özgü benzersiz özellikleri vardır (Ebeid vd., 2017).

2.4.6. Elektro-Optik Sistemler

Elektro-optik sistemler içerisinde gündüz ve gece kameraları, GPS, lazer mesafe ölçer ve termal sistemler başta olmak üzere pek çok sensör barındıran komplike bir üründür. Elektro-optik sistemler deniz, kara ve hava platformlarına entegre edilebildiği gibi portatif olarak da taşınabilmektedir. Özellikle askeri alanda istihbarat, gözetleme, keşif ve hedefleme görevlerinde kullanılmaktadırlar (ASELSAN, 2022a). Elektro-optik sistemleri oluşturan sensör ve malzemeler, entegre edileceği platformun ihtiyaçları ve kullanıcı gereksinimleri doğrultusunda farklılık gösterebilmektedir. Örneğin hava platformlarında ağırlık miktarı çok daha önemli bir kriterken, nem ve korozyon deniz platformları için daha önemli birer kriterdir.

Hava platformlarına entegre edilecek olan elektro-optik sistemler, platformun hızlanması, yavaşlaması ve olası bir türbülans koşullarında dahi stabil durabilmelidir. Bu

özelliik, görevin başarıyla ve gerektiği durumlarda gizliliğin muhafaza edilebilmesi için kritiktir. Diğer platformların aksine İHA'ların taşıyabileceği faydalı yük ağırlığı ve tüketilen enerji miktarı sınırlı olduğu için elektro-optik sistem ağırlığı ve güç kullanımının minimal düzeyde tutulması istenilmektedir (Gmkas, 2022). Hava platformları için üretilen örnek bir elektro-optik sistem Şekil 2.11.'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.11. ASELSAN Şirketinin Ürettiği “ASELFLIR-300T” Elektro-optik Sistemi (ASELSAN, 2022c)

2.4.7. Sensörler

Sensörlerin amacı etraftaki dünyayı algılamak, görmek, duymak, bu sayede İHA'ların bir pilota ihtiyaç duymaksızın bilinmeyen ve karmaşık ortamlarda akıllıca çalışabilmesini sağlamaktır. Sensörler bölünebilir işlevlerine göre üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar navigasyon, çevre algılama ve görüntülemedir (Toro ve Tsourdos, 2018).

2.4.7.1. Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) Sensörü

GPS, nesnelerin yeryüzündeki konumlarını tespit eden ABD'nin Küresel Navigasyon Uydu Sistemidir (GNSS). GPS alıcıları, üçgenleme işlemi ile üçten fazla uydudan gelen yayınları birleştirerek nesnelerin konumlarını hesaplar. Bir alıcının konumunu belirlemek için en az üç uydu gereklidir, ancak daha fazla doğruluk sağladığı için dört uyduya bağlantı idealdir. Glonass (Rusya), Beidou (Çin) ve Galileo (AB) diğer GNSS uygulamalarıdır (Şen ve Akarşlan, 2020).

2.4.7.2. Uydu Tabanlı Büyütme Sistemleri (SBAS)

SBAS sistemleri, temel GNSS sinyallerinin bütünlüğünü, doğruluğunu ve kullanılabilirliğini geliştirmeye yönelik hizmetler sağlayan jeosenkron uydu sistemleridir. Uydu tabanlı büyütme sistemleri, GNSS sistemlerinin performansını artırmak ve iyileştirmek için GEO uydularla bir yer referans ağı kullanmaktadır. SBAS, sivil (insanlı) havacılık uygulamaları için gerekli olan önemli bütünlük bilgilerini sağlamaktadır. Bugün her biri farklı bir bölgeyi kapsayan beş operasyonel SBAS bulunmaktadır. Bunlar Avrupa üzerinde EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), Kuzey Amerika üzerinde WAAS (Wide Area Augmentation System), Japonya üzerinde MSAS (MTSAT Satellite Augmentation System), Hindistan üzerinde GAGAN (GPS And Geo Augmented Navigation) ve Rusya üzerinden SDCM'dır (The System for Differential Corrections and Monitoring) (Krasuski ve Wierzbicki, 2021).

SBAS, nispeten düşük bir maliyetle bağımsız GNSS'ye kıyasla daha yüksek doğruluk performanslarına izin vermektedir. Sinyalleri tipik olarak kıtasal alanlarda alınabilir ve uygulanabilmektedir. Bütünlük bilgisi, güvenlik açısından daha kritik uygulamalarda kullanılabilir. SBAS'ın insanlı havacılıkta seyrüsefer için halihazırda yaygın olarak benimsenen bir teknoloji olması onun avantajıdır (Martins vd., 2020).

Dezavantajları, engel açısından zengin ortamlarda ve yüksek enlem alanlarında alçaktan uçan drone'lar için bir sorun olabilen doğrudan görüş hattı ihtiyacıdır. SBAS ile sayaç altı doğruluk seviyeleri elde edilir ve bu nedenle doğrusal altyapı gözetimi, tarım ve ölçme uygulamaları için kullanılabilir (Martins vd., 2020).

Hava seyrüseferinde İHA'ların kullanımı ile artan sayıda operasyon gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle İHA'nın konumunu belirlemek için daha doğru navigasyon çözümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Elbette çoğu İHA, 10 m'ye kadar veya daha iyi konumlama doğruluğu sağlayan tek frekanslı GNSS alıcıları ile donatılmıştır. Ancak belirlenen İHA koordinatlarının etkin bir şekilde iyileştirilmesini sağlamak için yeni çözümlerin uygulanması gerekmektedir (Chen vd., 2020).

SBAS, RAIM'den (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) daha iyi yatay doğruluk sağlamanın yanı sıra dikey kılavuzluk sağlama yeteneğine de sahiptir. Bu nedenle, SBAS, gökyüzünde daha az uydu bulunduğu ve daha kötü gözlemsel geometri durumlarda uçağı güvenli bir şekilde yere yaklaştırabilmektedir. SBAS, navigasyon

uydularının performansını sürekli olarak gözlemek için bir yer monitörleri ağı kullanmaktadır. Referans istasyonları ölçümlerini diferansiyel düzeltmeleri ve karşılık gelen güven sınırlarını belirleyen ana istasyonlara göndermektedir. Her ana istasyon ölçümleri işler ve verileri bir yer-uydu hattı istasyonuna iletir. Yer-uydu bağı istasyonu, bu bilgiyi son kullanıcılara sabit bir Dünya Yörüngesi (GEO) uydusu aracılığıyla iletir (Zhang ve Hsu, 2018).

Her bir SBAS'ın birden fazla ana istasyonu, yer-uydu hattı istasyonu ve GEO'su vardır, böylece herhangi bir bileşenin arızası durumunda güvenilir bir şekilde kurtulabilir. SBAS, aşağıdaki üç hizmeti desteklemektedir (Zhang ve Hsu, 2018):

1. Diferansiyel düzeltmeler: SBAS, yer ağı tarafından izlenen her uydu için diferansiyel düzeltmeler yayınlar. SBAS ayrıca, ilgilenilen bölge üzerindeki iyonosferik gecikmenin etkileri için düzeltmeler de iletir. Bu düzeltmeleri sözde aralık ölçümlerine uygulayarak, kullanıcı ekipmanı konum doğruluğunu iyileştirir.

2. Bütünlük izleme: SBAS ayrıca izlenen her uydu ve her iyonosferik düzeltme parametresi için hata sınırları yayınlar. Bu hata sınırları, diferansiyel düzeltmeler uygulandıktan sonra kalabilecek maksimum olası hava kaynaklı konum hatasını belirlemek için kullanılır. Hata sınırlarının oluşturulması, diferansiyel düzeltmelerden çok daha zordur, çünkü konum hatası sınırının gerçek hatayı aşmaması gerekir. Ayrıca, bu bilgiler herhangi bir güvenli olmayan durumun 6 saniye içinde güncellenmelidir.

3. Menzil: SBAS GEO sinyalleri, tasarımda GPS L1 kaba/alma (C/A) sinyallerine benzer ve bu nedenle SBAS etkin bir alıcı, normal bir GPS alıcısı ile temelde aynı donanımı kullanır. Ek olarak, SBAS sinyalleri, menzil için kullanılabilirliği için GPS ile senkronize edilir. Konum sabitlemenin zaman kullanılabilirliğini ve sürekliliğini iyileştirmek için GPS mesafe sinyalleri paketine ek mesafe ölçümleri eklenir. Her ana istasyon, kapsama alanı üzerinden iyonosfer için bir düzeltmeler ızgarası oluşturur.

2.4.7.3. Atalet Ölçüm Birimi (IMU)

IMU, ivmeölçerler ve jiroskoplar genellikle manyetometreler kullanarak yönelimi, hızı ve yerçekimi kuvvetlerini ölçen ve raporlayan elektronik cihazdır. IMU'lar, uçaklarda, İHA'larda ve diğer insansız sistemlerde, füzelerde ve hatta uydularda kullanılan ataletsel navigasyon sistemlerinin ana bileşenleridir (Hazry vd., 2009).

Boyutları ve görevleri ne olursa olsun, tüm İHA'ların tam yörüngelerini tahmin etmek için sensörlere ihtiyacı vardır. Kontrol ve yönlendirme sistemi, İHA'ların

görevlerine göre manevra yapmak için bu kritik parametreleri kullanmaktadır. Yönlendirme sistemi, İHA'nın önceden belirlenmiş yolunu izlemesi için talimatlar üretmekte ve navigasyon bloğu aracın konumunu, hızını ve tutumunu belirlemektedir. Aynı zamanda, kontrol sistemi, araç dengesini korurken rehberlik komutlarını izlemek için gereken direksiyon kontrolleri, iticiler vb. ile kuvvetleri manipüle etmektedir (Patrizi vd., 2022).

Kontrolörler, örneğin doğru bir iniş gerçekleştirmek amacıyla İHA'yı kontrol etmek için çok yüksek çözünürlüklü ve kesin verilere ihtiyaç duymaktadır. Sensör füzyonu, GNC'ye (Guidance, Navigation, and Control) ulaşmak için yerleşik bilgisayarları kullanan bir metodolojidir. Daha az belirsizlikle daha güvenilir veriler üretmek için birden fazla sensörden gelen verileri toplayıp birleştirilerek tek tek sensörlerin sınırlamalarının üstesinden gelmektedir. İHA'larda herhangi bir elektronik bileşenin boyutu, ağırlığı ve gücü kritik öneme sahiptir. Bu nedenle minimum sayıda sensörle, sensör füzyon verilerine ulaşmak hayati önem taşımaktadır (Ariante vd., 2020).

Bir İHA'nın tam yörüngesini tanımlamak için en kritik parametrelerden bazıları konum, hız, tutum ve dönüş (eğim, yuvarlanma ve sapma) oranlarıdır. Konum, hız ve tutum, navigasyon durumu olarak da bilinmektedir. Bu miktarları ölçmek için kullanılan sensörlere navigasyon sensörleri denilmektedir. En yaygın iki navigasyon sensörü, atalet ölçüm birimi (IMU) ve küresel navigasyon uydu sistemidir (GNSS) (Ariante vd., 2020).

Bir İHA'nın başarısı, zorlu ortamlarda doğru pozisyon ve hareket tahminine bağlıdır. IMU verileri, bilinen ve bilinmeyen arazide gezinmek için görüş ve diğer menzil sistemlerinin yanı sıra genellikle GNSS ile birleştirilir. Ancak İHA'lar, GNSS sinyali olmadığında bile nerede olduklarını ve nereye gittiklerini doğru bir şekilde tahmin etmesi gerekmektedir. IMU, İHA yörüngesini yönlendirmek ve kontrol etmede en kritik sensördür. IMU, hareket halindeki İHA'nın ivmesini ve dönüş hızını ölçmektedir (Hatamleh vd., 2011).

IMU, en güvenilir sensör setidir, çünkü ne sıkışabilir ne de herhangi birinden etkilenebilir. Tipik bir IMU blok şeması bir jiroskop, bir ivmeölçer, bir sıcaklık sensörü ve destekleyici algoritmaları içermektedir. Bir IMU, tipik olarak, ölçümleri çıkarmak için Analog/Dijital dönüşümünü, sıcaklık telafisini ve çıktıyı iyileştirmek için filtrelemeyi kapsamaktadır. Sensör füzyonu, dönüş açısı ($\Delta\theta$) ve doğrusal hız (ΔV) için verileri sayısal olarak bütünleştirir ve çözer. Kalibrasyon ve kompanzasyon, herhangi bir yanlış hizalamayı veya sensör hesaplamasını düzeltir. Kullanıcı, son verileri iletmeden önce

IMU modülünün iç ekseninden monte edilen gövdeye (araç) referans çerçevesine ($d\theta$) ve (dV) döndürme seçeneğine sahiptir (Shen vd., 2022).

Bazıları manyetik alan gücünü ölçmek için manyetometreler içeren birçok IMU türü vardır, ancak İHA uygulamaları için dört ana teknolojik kategori şunlardır:

- Silikon MEMS (Mikro-Elektro-Mekanik Sistemler)
- Kuvars MEMS
- FOG (Fiber Optik Gyro)
- RLG (Halka Lazer Gyro)

Silikon MEMS IMU'lar boyutları, ağırlıkları, güçleri ve en düşük üretim maliyetleri nedeniyle küçük İHA'lar için idealdir. Silikon MEMS, herhangi bir platform hareketi sırasında bir kütlenin sapmasını ölçmek için tasarlanmıştır. Yapıları gereği daha yüksek gürültü çıkışına sahiptirler ve titreşime duyarlıdırlar ve ayrıca daha pahalı FOG IMU'lardan daha yüksek kararsızlık parametrelerine sahiptirler. Ancak son zamanlarda, teknoloji gelişmeye devam ettikçe bu kritik parametrelerde iyileşmeler sağlanmaktadır (Wu vd., 2019).

FOG IMU, katı hal teknolojisi tasarımıdır. Optik fiber döngüler kullanır ve her eksenindeki dönüşü algılamak için karşıt döngülerdeki ışık huzmelerindeki paraziti ölçmektedir. Şok ve titreşime karşı daha az hassastır ve mükemmel termal stabilite sunmaktadır. Manyetik parazite karşı hassastır ve daha fazla güç tüketmektedir (Wu vd., 2019).

Rastgele yürüyüş açısı, sapma kararsızlığı ve sapma ofset hatası gibi kritik parametrelerde MEMS IMU'lardan daha iyi performans göstererek, onu kritik görev İHA uygulamaları için ideal hale getirmektedir. Bir RLG IMU, katı hal teknolojisini kullanmakta ve sızdırmaz bir halka boşluğuna sahip bir FOG gibi çalışmaktadır. Ayrıca en kararlı ve doğru IMU'dur, ancak aynı zamanda diğer IMU teknolojilerine kıyasla büyük ve pahalıdır (Song vd., 2019).

Kuvars MEMS IMU'lar, hassas bir genlikte titreşmek için bir osilatör tarafından tahrik edilen, kuvarstan mikro-işlenmiş tek parça bir atalet algılama elemanı kullanmaktadır. Performans açısından FOG ve RLG IMU'lara çok benzerdir ve bu nedenle daha büyük boyutlu İHA'lar için idealdir (Song vd., 2019).

2.4.7.4. Elektro-Optik Sensörler

Elektro-optik sensörler, birçok hava aracında navigasyon veya gözetleme için standart bir bileşendir. Elektro-optik (EO) bileşenler, sensörlerle optik spektrumdaki radyasyonu oluşturmak, tespit etmek ve/veya ölçmek için elektronik ve optiklerin bir kombinasyonunu kullanmaktadır. Bu sistemler İHA'larda hem hedefleme hem de görüntüleme için kullanılmaktadır. Termal görüntüleme, gece görüşlü görüntüleme ve görüntü yoğunlaştırma teknolojileri, elektro-optik ilkelerle çalışmaktadır (Jara vd., 2018).

EO/IR sensör sistemi genellikle iki ana sensör, Daylight (Gün ışığı) CCD (Uzaktan Teşhis TV Kamerası) kamerası ve IR (InfraRed) sensörü ve ilave seçenekler olarak diğer birçok sensörü içermektedir. IR sensörü, bir nesneyi sıcaklık farkıyla algılayan ve diğerinden ayıran kızılötesi menzilli bir ışık görüntüleme sistemidir. Böylece hem gündüz hem de gece kullanılabilir. Bilindiği gibi hareket eden her şey ısı üretir, bu nedenle IR sensörü çeşitli görevlerde kullanılabilir (Jara vd., 2018).

Daylight CCD kamera, yalnızca gündüz kullanılabilen, görünür menzilli bir ışık görüntüleme sistemidir. Daylight CCD kamerası, nesne tanımlamaya yardımcı olmak için genellikle yüksek büyütme ve çözünürlük taşımaktadır. Bu sensörlerin yanı sıra, birçok EO/IR üreticisi, gece gözcü, gündüz gözcü, lazer aydınlatıcı, lazer mesafe bulucu ve lazer işaretçi vb. gibi ek seçenekler sunmaktadır. Bu seçeneklerden bazıları, EO/IR'nin genel performansını büyük ölçüde artırabilmektedir (Fiorio vd., 2021).

Sistem entegrasyonunda faydalı yükün boyut ve ağırlığındaki azalma arzu edilen bir durumdur. Ağırlık tarafından kritik olarak kısıtlanan uçan araçların bir yükü olarak, faydalı yükün ağırlığının en aza indirilmesi verimliliği artırır, gizliliği artırır ve ağırlık merkezindeki kaymadan kaynaklanan yapısal zorluğu en aza indirmektedir. Bu minyatürleştirmenin zorluğu, EO/IR'nin yeteneklerini misyona göre optimize etmede saklıdır. Her üreticinin en çok hangi özelliğe değer verdiğine bağlı olarak, her EO/IR, farklı parçalardaki farklı derecelerde uzlaşma nedeniyle farklı fiziksel ve yetenek özellikleri sunmaktadır (Fiorio vd., 2021).

Bir ürünü değerlendirmenin bir yolu veri sayfasıdır; başka bir deyişle, her veri sayfası ürünü temsil etmelidir. Ancak EO/IR veri sayfası, ürünün performansını tam olarak yansıtmaz. EO/IR'nin performansı, yüklenen uçağa, görev ortamına ve görevin kendisine yüksek düzeyde bağımlılık göstermektedir. Veri sayfası tarafından sağlanan nicel değerler de özelleştirilebilir seçeneklerle değişebilmektedir. İsteğe bağlı aygıtların

eklenmesi performansı artırabilmekte; bununla birlikte, veri sayfasında sunulanların ötesinde ek fiziksel kısıtlamalar da beraberinde ortaya çıkmaktadır.

2.4.7.5. Hiperspektral Görüntü Sensörler

Hiperspektral görüntü sensörleri, elektromanyetik spektrum boyunca bir dizi görüntü olarak bilgi toplamaktadır. Her görüntü, spektral bant olarak da bilinen elektromanyetik spektrumun dar bir dalga boyu aralığını temsil etmektedir. Bu görüntüler, işleme ve analiz için üç boyutlu (x, y, λ) bir hiperspektral veri küpü oluşturmak üzere birleştirilir; burada x ve y sahnenin iki uzamsal boyutunu temsil etmekte, λ ise spektral boyutu temsil etmektedir (bir dizi dalga boyunu içerir) (Khan vd., 2018).

Hiperspektral görüntüleme uygulamaları, kaynak yönetimi için belirli arazi özelliklerinin ve bitki örtüsünün, mineral veya toprak türlerinin tespiti, doğal arka planlarda insan yapımı malzemelerin tespiti, savunma ve istihbarat amacıyla araçların tespitini içermektedir.

Bu sensörler genellikle tarımsal izleme gibi havadaki nesne algılama uygulamaları için İHA'lara monte edilmektedir. Şehirleşmiş bir ortamda, radarlar gibi ana akım sensörlerin etkili alanlarından kaçınmak için İHA'lar, arka planı olarak binalar veya zemin (örneğin, bir tepenin önü) olan normalden daha alçaktan şekilde uçabilmektedirler. Radarlar, diğer bina yansımalarından kaynaklanan dağınıklığı önlemek ve ayrıca radar anteninden yayılan radyasyonun insanların yaşadığı yere maruz kalmasını en aza indirmek için genellikle şehirleşmiş bir ortamda binaların tepesine yerleştirilmektedir. Bu nedenle, sağlam bir İHA sisteminin, diğer sensörleri ile düşük uçuş senaryosunu ele alabilmesi gerekir. Bu, geleneksel bir RGB (Kırmızı Yeşil Mavi) veya hatta bir termal kamera için zorlu bir durumdur. Bununla birlikte, bir hiperspektral görüntü sensörü, olumsuz olayın hemen tespiti için bir RGB kamerada eksik olan herhangi bir dalga boyunda görünüm ipuçları sağlayabilmektedir (Khan vd., 2018).

İHA tespiti ve sınıflandırması için hiperspektral görüntülerde genel nesne tespit algoritmaları kullanılabilir. Bu, mevcut yöntemlerde ince ayar yapmak için İHA uçuşlarını yakalayan bir hiperspektral görüntü kamerasından yeterli veri gerektirmektedir. Derin öğrenme çağından önce araştırmacılar, klasik algılama teorisi ve fizik tabanlı sinyal modelleri kullanarak hiperspektral görüntü verileri üzerinde hedef tespiti için algoritmalar geliştirmeye odaklanmışlardır (Shippert, 2003).

2.4.7.6. Kızılötesi Tutum Sensörleri

Kızılötesi tutum sensörleri, Dünya'nın ufkunu belirlemek için Dünya'nın kızılötesi emisyonunun termopil ölçümlerini kullanarak düşük Dünya yörüngesindeki uydular için konum bilgilerini tespit etmektedir. Hem gündüz hem de gece çalışan küçük ile orta büyüklükteki sabit kanatlı İHA'lar için görsel meteorolojik koşullar kızılötesi ufuk algılama tutum sabitleyici başka bir etkili ve düşük maliyetli çözümdür (Cao vd., 2022).

2.4.7.7. Barometrik Basınç Sensör

Yaygın olarak BAP (barometrik hava basıncı) sensörü olarak da bilinen barometrik sensör, bir İHA'nın çalıştığı ortamın atmosfer basıncını ölçmekte kullanılmaktadır. Dijital BAP sensörleri, İHA'larda irtifa stabilizasyonu için kullanılan kompakt cihazlardır (Larin vd., 2019). Basınç sensörleri genellikle piezoelektrik malzemelerden yapılmaktadır. Piezoelektrik malzemeler, bir elektrik alanı altında deforme olma veya deforme olduğunda bir elektrik alanı oluşturma özelliğine sahiptir. Bu sensörlerin birçok uygulama alanları vardır. Bunlar şöyledir:

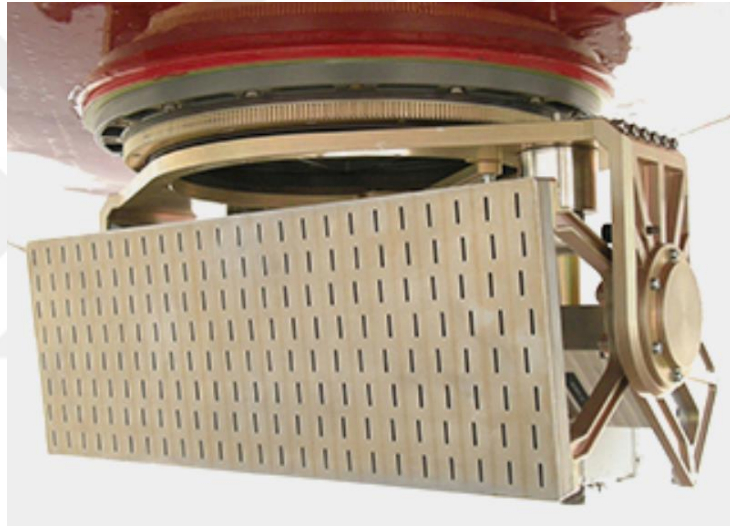
- Hava değişikliklerini tahmin etmek için kullanılırlar
- Araçlarda, aracın içinde bulunduğu ortamın atmosfer basıncını ölçmek için kullanılırlar
- Basınç değişimlerine duyarlı sensörlerin çıkışlarını düzeltmek için kullanılırlar
- Dağ tırmanışında sıklıkla kullanılan portatif barometrik basınç ölçüm cihazları sadece basıncı değil aynı zamanda irtifa da aynı anda ölçebilmektedir. Bu tür basınç sensörleri, hava basıncını ölçen BAP sensörü olarak da bilinmektedir.

İHA'ların yüksekliği hava basıncından ölçülebilmektedir. Hemen hemen her İHA, yüksekliğini stabilize etmede çok önemli bir rol oynadığı için BAP sensörünü kullanmaktadır. Bu sürecin arkasındaki ilke ve teknoloji oldukça basittir. Ancak hava basıncı okumaları rüzgarlar veya İHA'ların hareketlerindeki herhangi bir hızlı değişiklik nedeniyle sürüklenmeye eğilimli olmaktadır (Larin vd., 2019). İrtifa değişikliklerinin gerekli olduğu otonom İHA misyonları da yerleşik barometreden alınan değerleri kullanmaktadır. Barometreler, GPS'e kıyasla yükseklik hakkında daha doğru veriler üretebilmekte ve doğru şekilde kalibre edildikleri sürece daha hızlı geri bildirim sağlayabilmektedir (Liu, 2022). 3 boyutlu x , y ve z eksenli koordinat sistemine göre BAP sensörü kullanılarak ölçülen İHA'ların yüksekliği z eksenli koordinatı olarak kabul edilmektedir. Uçağın yüksekliği dikey olarak aşağı veya yukarı doğru yönlendirildiği için

bu yükseklik faktörü sağ el kuralına göre İHA'ların z eksenini olarak kabul edilmektedir. Yani İHA'ların yüksekliğine bağlı olarak, z eksenini boyunca yukarı ve aşağı uçulabilmektedir.

2.4.7.8. Radar Sensörü

Radar, görülemeyen nesnelerin konumunu bulmak için radyo dalgalarını kullanan bir sistemdir. Hava araçlarında radar ve dost düşman tanıma cihazları, dünya genelinde ortaya çıkan karmaşık sistemlerin ileri unsurlarını tespit edebilmektedir. Daha küçük boyutlu yapay açıklıklı radar (SAR) (Şekil 2.12.) sistemleri, İHA'lar, özellikle askeri veya sivil uygulamalar için tasarlanmış küçük veya orta İHA'lar tarafından taşınacak mikro-SAR sistemleri için daha uygundur (Hu vd., 2022).



Şekil 2.12. ASELSAN Şirketi Tarafından İHA'lar İçin Tasarlanan SAR (ASELSAN, 2022d)

İHA'ların insanlı muadillerine göre çeşitli avantajları vardır. Bariz güvenlik avantajına ek olarak, İHA'lar nispeten küçüktür ve bu nedenle görsel olarak veya radarlarla tespit edilmesi zordur. Pervaneli İHA'ların, motorları jet motorlarından çok daha düşük sıcaklıklarda çalıştığı için kızılötesi (IR) sensörle tespit edilmesi de zordur. Bu faktörlerin kombinasyonu, İHA'ları insanlı uçaklardan daha düşmanca bir ortamda hayatta kalabilmeyi sağlamaktadır.

İHA'lar ayrıca insanlı muadillerine göre daha ucuzdur. Mevcut İHA'lar, radarlar gibi aktif cihazlara göre algılamaya daha az duyarlı olan TV kameraları ve ileriye dönük kızılötesi sensörler gibi optik sensör yükleri taşımaktadırlar. Uygun koşullar altında, optik sensörler, insan yorumu için zeminin yüksek kaliteli görüntülerini sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte optik sensörler; sınırlı bir görüş alanı, olumsuz hava koşulları ve savaş alanındaki duman ve toz koşullarından dolayı düşük performans gösterebilmektedir. Radarlar ise geniş alanları hızlı bir şekilde tarayabilecek şekilde tasarlanabilir ve havadan, dumandan daha az etkilenmektedirler (Wellig vd., 2018).

2.4.7.9. Termopil Sensörü

Termopil, kızılötesi termometrelerde kullanıldığı gibi sıcaklığı ölçen bir sıcaklık veya radyasyon sensörüdür. Düşük maliyetli termopil IR sensörleri, termografi uygulamaları için İHA'larda kullanılmaktadır. Bilindiği gibi radyometri, termal radyasyonu ölçme bilimidir. Gerçek malzemeleri oluşturan atomlar ve moleküller hareket halindedir ve aralarındaki etkileşimler (çarpışmalar ve bağlanma kuvvetleri) içlerindeki temel yüklerin yer değiştirmesiyle oluşmaktadır.

Ortaya çıkan hızlanan yükler ve değişen elektrik dipol momentleri termal radyasyon üretmektedir. Termoelektrik etkiye dayalı olarak, termopil, termal radyasyonu ölçmek için bir ısı sensörü olarak kullanılmaktadır. Termopil, seri olarak elektriksel olarak bağlanmış termokupl bağlantı çiftlerinden yapılmaktadır. Aktif bağlantı adı verilen termokupl bağlantılarından biri tarafından termal radyasyonun emilmesi sıcaklığını arttırmaktadır. Aktif bağlantı ile sabit bir sıcaklıkta tutulan referans bağlantı arasındaki fark sıcaklığı, oluşturulan fark sıcaklığı ile doğru orantılı bir elektromotor kuvveti üretmektedir. Bu etkiye termoelektrik etki denilmektedir (Valente vd., 2019).

Termopil, temassız sıcaklık ölçüm uygulamalarında ve sıcaklık izleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Termopiller, nesnenin yüzeyinden yayılan kızılötesi (IR) radyasyonu emerek bir nesnenin sıcaklığını algılamaktadır. Cihazın dedektörlerinin çoğu, IR radyasyonunu etkin bir şekilde emmek için siyah gövde yüzeyi ile donatılmıştır. Termopil, gerilim çıkışını daha kolay ölçülebilen seviyelere yükseltmek için seri olarak birbirine bağlanan bir dizi termokupldan oluşmaktadır. Bir termokupl oluşturan termokupllar, bir uçta kaynaklanmış iki farklı metal şeridinden oluşur. Her termokupl, seebeck etkisi olarak bilinen sıcak ve soğuk uçlar arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı bir voltaj üretmektedir (Valente vd., 2019).

Termopil IR Sensör, bir nesnenin kızılötesi enerjisini algılayarak sıcaklığı temassız olarak ölçülebilir. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa, o kadar fazla kızılötesi enerji üretilir. Termopil algılama elemanları, enerjiiyi emen ve çıkış sinyalleri üreten silikon çipler üzerindeki küçük termokupllardan oluşmaktadır (Chaglla vd., 2018).

2.4.7.10. Ultrasonik Sensör

İHA teknolojisinin tasarımı ve geliştirilmesi yeni ve hızla büyüyen bir endüstridir. Bu hem şirketlerden hem de medyadan aldığı popülerlik ile de görülebilmektedir. İHA pazarı her geçen yıl hızla büyümektedir. Askeri kullanım, hobi meraklıları ve tarım endüstrisi gibi çok sayıda sektörde endüstride sürekli olarak yeni uygulamalar ve yenilikler uygulanmaktadır. İHA'ların uygulamaları ve gereksinimleri teknolojik olarak daha gelişmiş ve operasyonel olarak talepkâr hale geldikçe, İHA'ları oluşturan sistemlerin de bu gereksinimleri karşılama görevine adım atmak için aynı şekilde gelişmesi gerekmektedir. Hem mühendisler hem de araştırmacılar, sürekli olarak bu sistemler için iyileştirmeler tasarlamaya çalışmaktadırlar. İHA'lar açısından sürekli geliştirilen sistem tasarımı alanının en öne çıkan birleşeni, uçuş enstrümantasyonudur (Davies vd., 2018).

Uçuş enstrümantasyonu, uçuş sistemi içinde son kullanıcıya hız, sıcaklık ve nem gibi önemli verileri sağlayan çok önemli bir alandır. Bu aynı zamanda bir İHA'nın kontrolde otomasyon sağlama yeteneğine önemli bir katkıda bulunmaktadır. Mevcut uçuş enstrümantasyon sistemleri, tasarımcılara ve mühendislere, bazıları mevcut yöntemlerle çözülemeyen birçok sınırlama sunmaktadır. Bu sınırlamalar, GPS'in olmadığı alanlarda hız ve konum verilerinin alınamaması gibi işlevleri içermektedir (Davies vd., 2018).

Geleneksel sensörlerdeki artış toplam ağırlığı arttırdığından, taşıma kapasitesi mevcut enstrümantasyonla ilgili bir sorun olabilmektedir. İHA uçuş enstrümantasyonunda ultrason kullanma yeteneği, bu sınırlamaların çoğuna yenilikçi ve heyecan verici bir çözüm sunmaktadır. Enstrümantasyonda ultrason kullanımını yeni bir kavram değildir. Mevcut uygulamalar, tıbbi kullanımları ve sonar şeklinde su altı navigasyonunu içermektedir. Bir diğer önemli uygulama ise gaz debimetreleri şeklindedir. Bu uygulama, sıvı alımının bir ses dalgasının ölçülen hızını etkileme yeteneğini içermektedir (Kramer ve Kuhnert, 2018).

Gaz debimetrelerinde ultrason, endüstriyel uzmanların doğal gaz uygulamalarında, ultrasonik debimetreler genellikle mekanik tip sayaçlardan daha iyi performans, daha fazla güvenilirlik ve daha düşük sermaye ve sahip olma maliyetleri sunduğunu" iddia etmesiyle büyük bir başarı elde etmiştir. Aynı prensibi İHA enstrümantasyonuna uygulayarak, İHA uçuş enstrümantasyonu alanında bir dizi potansiyel fırsat oluşturmaktadır (Kramer ve Kuhnert, 2018).

İHA uçuş kontrolü ve enstrümantasyonu için en yaygın yöntem, atalet ölçüm birimleri (IMU) şeklindeki atalet sensörleridir. IMU'lar bir mikro elektromekanik sistem (MEMS) biçimidir ve en temel biçimleriyle 1970'lere kadar geriye doğru izlenebilir. En temel biçimleriyle, IMU'lar genellikle bir ivmeölçer ve bir hız jiroskopundan oluşmaktadır. İvmeölçer, doğrusal ivmeyi üç ekseninde (a_x, a_y, a_z) ölçmek için kullanılır. Hız jiroskopu, gövde çerçevesine göre açısal hızı ölçmek için kullanılmaktadır. IMU'nun bu temel biçimi nadiren bağımsız bir birim olarak kullanılmaktadır. Gerçekte, IMU'lar genellikle daha fazla ölçüm doğruluğu oluşturmak ve kullanıcı için daha fazla veri sağlamak için bir dizi ek sensör içermektedir (Davies vd., 2018).

Bunlardan biri olan ultrasonik sensör, ses dalgalarını kullanarak bir nesneye olan mesafeyi ölçebilen bir cihazdır. Belirli bir frekansta bir ses dalgası göndererek ve bu ses dalgasının geri dönmesini dinleyerek mesafeyi ölçmektedir. Üretilen ses dalgası ile geri dönen ses dalgası arasında geçen süre kaydedilerek, ultrasonik sensörü ile nesne arasındaki mesafeyi hesaplamak mümkün olabilmektedir. Ultrasonik sensörler, sonar dedektörler gibi, insan işitme aralığının dışında bir ses darbesi ileterek çalışır. Bu darbe, telemetreden ses hızında (340 m/sn) konik bir şekilde uzaklaşır. Ses bir nesneden yansır ve telemetreye geri döner. Sensör bunu bir yankı olarak yorumlar ve sinyalin gönderilmesi ile yankının alınması arasındaki zaman aralığını hesaplar. Bu aralık daha sonra nesnenin mesafesini belirlemek için bir kontrolör tarafından hesaplanır (Kramer ve Kuhnert, 2018).

Ultrasonik sensör, elektrik sinyalini mekanik titreşimlere ve mekanik titreşimleri elektrik sinyaline dönüştürebilen bir piezoelektrik dönüştürücüdür. Bu nedenle, mono statik bir yaklaşımda, ultrasonik sensör, tek bir frekansta hem hoparlör hem de mikrofon olarak çalışan bir alıcı-vericidir. Ultrasonik sensörler şekil, şeffaflık veya renkten bağımsız olarak çeşitli malzemeleri algılayabilmektedir. Ultrasonik algılama için tek gereklilik, hedef malzemenin katı veya sıvı olmasıdır. Bu, aşağıdakilerin temassız algılanmasını sağlamaktadır:

- Metal
- Plastik
- Bardak
- Odun
- Kayalar
- Kum

- Sıvı yağ
- Su
- Diğer sert ve ses emici olmayan malzemeler

Bu malzemeler sesi hava yoluyla sensöre geri yansıtabilir. Yankıyı sensörden uzaklaştıran açılı yüzeyler veya yumuşak geçirgen hedefler gibi belirli nesnelere algılanması daha zor olabilmektedir.

2.4.7.11. Termal Sensör

Optik sensörlerin aksine, termal sensörler görünmez elektromanyetik spektrumda çalışmaktadır. Termal kameralar, tüm nesnelere yaydığı kızılötesi radyasyonu ısı şeklinde yakalayabilmektedirler. Elektromanyetik spektrumun uzun kızılötesi aralığına duyarlıdır ve dalga boyu 9 ile 14 μm arasındadır. Güvenlikle ilgili bir uygulamada termal kamera kullanmanın ana avantajı, dış aydınlatma veya hava koşullarından bağımsız olarak ve hatta zifirî karanlıkta bile çevredeki ortamı görselleştirme yeteneğidir (Awais vd., 2022).

Ayrıca, geleneksel RGB kameralara kıyasla termal kameralar, aydınlatma değişikliklerine karşı daha fazla sağlamlık sunmaktadır. Tersine, termal kameralar genellikle daha düşük çözünürlüklü görüntüler üretirken daha pahalıdır. Böylece başlangıçta sadece askeri uygulamalarda kullanılırken, teknolojiye son gelişmeler maliyetlerini düşürerek sanayi ve araştırma sektörlerinde kullanımlarına olanak sağlamıştır.

Bu tip sensörün avantajları, yeni bir uygulamayı yönlendiren yüzey sıcaklığını ölçmek için kullanılacak iyi bir sensör olması, kameranın perspektifinin normal olması ve bu da işlenmesini kolaylaştırması, ancak diğer yandan doku bilgisi eksikliği, 3D modelin yeniden yapılandırılmasındaki zorluklar, doğrudan sıcaklık ölçümü için dikkatli kalibrasyon gerekli olması, nispeten yüksek maliyet, RGB'ye kıyasla düşük çözünürlüğe sahip olmasıdır. Bu nedenle sınırlı tipte İHA platformları için kullanılabilirler (Awais vd., 2022).

2.4.7.12. İHA'larda Lazerler ve Kritik Roller

Lazer, uyarılmış radyasyon emisyonu ile ışık amplifikasyonu olarak tanımlanır. Gaz veya katı hal lazerleri gibi çeşitli lazer türleri mevcuttur. Çıkış dalga boyu, spektrumun mikrodalga, IR, görünür, ultraviyole veya x-ışını bölgesinde olabilmektedir.

Lazerler, kimyasal lazerler, gaz lazerleri, yarı iletken lazerler (katı hal lazerleri olarak da bilinir) ve nadir toprak bazlı lazerler, yani lityum-itriyum-florür (LYF) lazerler, lamba lazerleri vb. olarak sınıflandırılabilir.

Kimyasal lazerler, aşırı ağırlık, boyut ve kimyasal depolama sorunları nedeniyle göz ardı edilmekte ve bu nedenle İHA uygulamaları için uygun görülmemektedir. Lazer türünden bağımsız olarak, tüm EO sinyalleri atmosferde seyahat ederken absorpsiyon, saçılma, yansıma ve yayılma yaşamaktadır. Yarı iletken lazerler ve nadir toprak kristali tabanlı lazerler, verimlilikleri ve güç çıkış seviyeleri IR dalga boylarında lazer sistemi gereksinimlerini karşılıyorsa, İHA uygulamaları için daha ideal olabilmektedir. Atmosferin çeşitli bölgelerinde iletim sırasında yüksek güçlü lazer ışınları ciddi şekilde etkilenmektedir (Steinvall, 2021).

IR radyasyonunun atmosferde iletimi, saçılma ve absorpsiyon etkilerine bağlı olması nedeniyle çok karmaşıktır. Berrak troposferde bile, atmosferik gazlar ve aerosol parçacıkları tarafından absorpsiyon ve saçılma nedeniyle IR radyasyonu zayıflar. Atmosferik absorpsiyonun öncelikle moleküler absorpsiyon bağlarının varlığından kaynaklandığını ve kesinlikle IR radyasyon dalga boyunun bir fonksiyonudur. Atmosferik absorpsiyon ve saçılma tarafından sağlanan zayıflama miktarı, İHA uygulamaları için en uygun lazerlerin tasarımında ve seçiminde önemli bir faktördür (Steinvall, 2021).

Atmosferik zayıflama, özellikle düşük irtifalarda lazer sistem performansını düşürür. Ancak hedef izleme ve edinme görevlerinde, moleküller lazer sisteminin performansını ciddi şekilde düşürerek görevin başarısız olmasına neden olabilmektedir. Toz, duman, sis veya yağmur gibi asılı parçacıkların olmadığı açık atmosferde bile lazer sinyallerinin iletimi etkilenmektedir. Özetle, atmosferdeki lazer ışını iletimi, IR lazer dalga boyuna, yayılma yoluna, çalışma yüksekliğine, mevsimsel koşullara ve atmosferik sıcaklık ve hava yoğunluğundaki değişikliklere bağlıdır. Yüksek güç seviyelerinde, lazer ışını yayılımı, türbülansa bağlı ışın yayılması ve dolaşmasına daha belirgin etkilere maruz kalmaktadır. Çeşitli lazer türleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- DF ve HF lazerler gibi kimyasal lazerler
- Karbondioksit (CO₂) gibi gaz lazerleri
- GaAs enjeksiyon lazerleri gibi yarı iletken lazerler
- LYF lazerleri gibi nadir toprak kristali bazlı lazerler
- Diyot pompalı katı hal (DPSS) lazerler

- Boya lazerleri
- Flaş pompalı katı hal lazerleri
- Excimer lazerler
- Kimyasal oksijen iyot lazerleri (COIL'ler)

İHA uygulamaları için potansiyel lazerler üzerine yapılan araştırma çalışmaları, hedef aydınlatma için lazer gereksinimlerinin hedef tespiti, takibi ve tanımlama amaçları için gereken lazerden farklı olduğunu göstermektedir (Glade, 2000).

2.4.7.12.1. İHA Uygulamaları için Lazer Arayıcı

Bir lazer arayıcı, bir hedef tanımlayıcı tarafından aydınlatılan bir hedeften yansıyan lazer enerjisini tespit edebilen pasif bir EO sensörüdür. Bu sensör, İHA platformunun altına veya burun bölümüne monte edilebilir. Bir İHA, hem lazer arayıcı hem de lazer aydınlatıcı ile donatıldığında, uygun hava koşullarında hedef belirleme, hassas silah teslimatı ve doğru saldırı kabiliyetinde etkili yakın destek sağlayabilmektedir (Ji vd., 2020).

Lazer güdümlü silahlar, 15-20 fiti geçmeyen düşük dairesel hata olasılığına sahiptir. IR arayıcı, lazer güdümlü bomba (LGB) veya IR füzesindeki en kritik unsurdur. Optimum performans için lazer arayıcının 3,2 ila 4,3 μm arasında değişen uygun bir IR dalga boyunda çalışması gerekmektedir. Bu özel IR penceresi, bulutlardan ve karasal nesnelere gelen yanlış hedefleri en aza indirmek için tercih edilmektedir (Ji vd., 2020). Lazer arayıcı aşağıdaki son teknoloji ürünü bileşenleri ve gelişmiş özellikleri kullanmaktadır:

- Geniş görüş alanı (FOV)
- Küçük anlık FOV (IFOV)
- Yüksek çözünürlüklü odak düzlem dizisi (FPA)
- Kullanılabilir piksel sayısı: 256×256 veya 640×256
- Lazer arayıcı performansının görünürlüğü ve hedef yansıtıcılığa bağlı olması

2.4.7.12.2. Lazer Aydınlatıcı

Hedef tespiti ve tanımlaması ile LGB'lerin performansı lazer aydınlatıcının performansına bağlıdır. Nitekim, lazer aydınlatıcının hassasiyeti, hedeften gelen optik yansımalara, atmosfer koşullarına, hedefe olan mesafeye ve tipik olarak 50 ila 300 W arasında değişen lazer aydınlatıcı CW (centiwatt) çıkış gücüne, hedef yüzey

malzemesinin hedef boyutuna, yansımaya ve emisyonuna bağlıdır. Çalışma aralığı kapasitesi ise, sis, bulut veya duman gibi atmosferik koşullara ve aerosollerden saçılma ve türbülanslı koşullara bağlıdır (Ji vd., 2020).

Lazer aydınlatıcı veya tanımlayıcı maliyet, ağırlık, boyut, güç tüketimi ve soğutma gereksinimlerine bağlı olarak CW modunda veya yüksek görev darbeleri modda çalışacak şekilde tasarlanabilir. Lazer tanımlayıcının veya aydınlatıcının çalışma dalga boyu, kritik faktörlere bağlıdır (Miller vd., 2013).

2.4.7.13. İnsansız Sistemler için Ölçüm Sistemleri

İnsansız sistemler için ölçümler önemlidir. Navigasyon yetenekleri ve çevrelerindeki çeşitli fiziksel niceliklere göre izleme yetenekleri, sensörlere ve ölçüm sistemlerine ve ayrıca veri işleme algoritmalarına bağlıdır. Otonom sürüşün gelişimi, farklı optimal çalışma aralıklarından yararlanmak ve çevrelerinin farklı boyutlarıyla ilgili bilgileri toplamak için sensörler veya çok farklı tipteki sensör kombinasyonları tarafından sağlanan ölçümlerden gelen bilgileri yorumlama ve analiz etme kapasitesiyle de yakından bağlantılıdır (Gupta vd., 2013).

İHA'ların ortamı havadır. Konum ve durum algılama, yer ve hava hızı, hücum açısı, barometrik basınç gerektirirler ve bazen konum verilerini algılamaları veya bunu diğer uçaklara iletmeleri gerekmektedir. İHA'ların uçuş konumu ve yönü, eğim sensörleri ve jiroskoplarla birlikte ivmeölçerler kullanılarak belirlenmektedir. Konum ve oryantasyon bilgileri daha sonra düz uçuşu sürdürmek için uçuş kontrol sistemine sağlanmaktadır (Gupta vd., 2013).

Uçuş yolları ve yönleri, küresel konumlandırma sistemi (GPS), küresel navigasyon uydu sistemi (GNSS) ile birlikte atalet ölçüm birimleri (IMU) kullanılarak yönetilmektedir. Seyrüsefer ile ilgili ölçümlerin hassasiyeti, özellikle iniş gibi karmaşık uçuş aşamaları için İHA'lar için oldukça kritik bir konu olmaktadır. İrtifa hataları iniş noktasında yanlışlığa yol açabileceğinden, metre seviyesindeki navigasyon hataları da çevredeki nesnelere çarpışmalara yol açabileceğinden, iniş büyük hassasiyet gerektirmektedir. Ayrıca, IMU ölçümleri gürültü ve yanlışlık nedeniyle bozulabilmekte, bu da uzun vadeli navigasyon için güvenilir olmayan poz tahminlerine yol açarak İHA'ların konum tahmininin zaman içinde sapmaya ve kaymaya yol açmasına neden olabilmektedir.

GPS/GNSS sinyali ile ilgili olarak başka gözlemler yapılabilmektedir. Çünkü yoğun ormanlarda veya kentsel kanyonlarda güvenilirmez olabilir ve kapalı ortamlarda, binalar, duvarlar veya diğer birkaç nedenden dolayı sinyal çok zayıf olabilir ya da sinyaller kaybolabilmektedir. İHA'ların kapalı ortamlarda konumlandırılması sorunu, araştırmacıların artan ilgisini çekmektedir. Birçok iç mekân İHA çözümü, genellikle örneğin ultrasonik teknolojisi gibi diğer teknolojilerle birlikte bir optik kamera kullanmaktadır (Jacob vd., 2018).

Ultra geniş bant (UWB), 3D (3 boyutlu) iç mekân konumlandırmada yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir ve bu durumda santimetre doğruluğu sağlayabilen diğer teknolojilerle birlikte hız ve sapma için optik akış IMU sensörleri gibi sensörleri entegre eden, UWB alıcı düğümleri ve varış zaman farkı UWB'sine dayalı bir sistem tarafından elde edilen sonuçlar geribildirim olarak kullanılmaktadır. Bu çözüm aynı zamanda iyi bir doğruluk sunmakta, ancak yüksek maliyetler gerektirmektedir (Jacob vd., 2018).

Özellikle, UWB sensör bilgileri, İHA'ların pozunu tahmin etmek için bir RGB-D kamera üzerinde görsel odometri ile bir Monte Carlo Lokalizasyon algoritması aracılığıyla birleştirilmektedir. Bu iyi bir doğruluk sunmasına rağmen, yüksek maliyet dezavantajına sahiptir. Kızılötesi işaretler, bilgisayar görüşü ve IMU sensör veri füzyonu, gerçek zamanlı kısıtlamalar altında hassas araç lokalizasyonu gerektiren otonom İHA inişi sorununu ele almak için önerilmektedir. İniş noktası mesafesine bağlı olarak, bu çözümün doğruluğu on santimetreden birkaç metreye kadar değişmektedir (Hugenholtz vd., 2012).

İHA performansı ve katedilen mesafe güç tüketimine bağlıdır. Bu nedenle, sensörler, şarj ve deşarj işlemi sırasında pil kapasitesinin belirlenmesi ve uçuş sırasında meydana gelen sistem hataları için bir uyarı sağlanması için akım algılama yeteneğinin yanı sıra onu izlemek ve optimize etmek için kullanılabilir (Hugenholtz vd., 2012). Hata tespiti için İHA güvenliğini ve güvenilirliğini garanti etmek için ölçümler önemlidir. Cayrolar, ivmeölçerler, GPS ve rüzgâr kanatları gibi yaygın olarak uygulanan İHA sensörlerinden alınan ölçümleri kullanarak, örneğin hava hızı sinyalinin ölçümlerinde ilave adım hatalarını tespit etmek mümkündür. Ölçümler ayrıca İHA testinde önemli bir rol oynamaktadır. Örneğin İHA'lar açık havada uçarken, yağmur veya rüzgârlı hava gibi hava koşullarına karşı savunmasızdır. Bu nedenle İHA'lar için rüzgâra dayanıklı test ekipmanlarının geliştirilmesi de önemlidir.

Tarımda mahsullerin izlenmesi ve yönetimi için kullanılanlar da dahil olmak üzere, arkeolojide alanın görsel bir görünümünü sağlamak, arkeolojik kazıları belgelemek ve keşif araştırmaları ve hava keşifleri yapmak için kullanılanlar da dahil olmak üzere birçok alanda İHA'larda sensörler kullanılmaktadır. RGB dijital kameralar kırmızı, yeşil ve mavi spektral bantlarda yüksek uzaysal çözünürlüklü radyasyon değerleri sağlamaktadır. RGB sensörünün uzamsal çözünürlüğü, elde edilen görüntülerin kalitesini belirlemektedir. Tarımda bu tür bir sensör kullanılarak, kamera ile elde edilen hava görüntüleri işlenerek bitki örtüsü, bitki boyu ve renk indeksleri ile ilgili ölçümler çıkarılabilmektedir (Hugenholtz vd., 2012).

Spektral sensörler, spektrum bantlarının sayısına ve her bir spektrum bandının genişliğine bağlı olarak multispektral veya hiperspektral sensörler olarak kategorize edilebilir ve bilgi elde etmek için hedeften yansıyan, yayılan ve iletilen ışığı ölçmektedirler. Bu tür sensörler, görünür spektrumdaki ve görünmeyen yakın kızılötesi spektrumdaki dalga boylarını algılayabilmektedirler ve tarım uygulamalarında bitkinin fizyolojik durumu ve bitki örtüsü indeksi ile ilgili ölçümler sağlamak için kullanılmaktadırlar (Prudden vd., 2018).

Termal sensörler, hedef tarafından yayılan IR dalga boyu aralığındaki elektromanyetik enerjiyi algılayarak bir görüntüye dönüştürmektedirler. Bitki yüzey sıcaklığı ve bitki su stres indeksi ile ilgili ölçümler sağlama yetenekleri nedeniyle tarımda kullanılmaktadırlar. RGB kameralar diğer sensör türlerine göre daha iyi bir uzaysal çözünürlük sağlayabilir. Bununla birlikte, tarım alanında multispektral kameralar, bitkinin görünmez fizyolojik durumunu tespit etme yeteneği gibi ekstrapolasyonlu bilgiler açısından RGB kameralara göre büyük avantajlara sahiptir. Hiperspektral kameralar, İHA platformlarında uygun şekilde çalışabilmeleri için pil, çerçeve yakalayıcı ve veri depolama cihazı dahil olmak üzere daha fazla sayıda başka cihazla entegrasyon gerektirdiği için yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Bununla birlikte, hiperspektral sensörler giderek daha fazla minyatürleştirme konusu haline gelmekte ve bu da kullanımlarından faydalanabilecek uygulamaların sayısını artırmaktadır. Havadaki dalgalı çevresel koşullar ve termal kızılötesi radyasyon yayan veya yansıtan farklı nesnelere varlığı, termal kamera ölçümlerinin güvenilirliğini düşürebilir. Bu da periyodik kalibrasyon gerektirmektedir. Işık algılama ve mesafe (LIDAR) sensörleri, bir hedef noktaya olan mesafeyi aydınlatarak ve yansıyan ışığı analiz ederek ölçmektedir. Bu tür bir sensör, FOV, yani sensörün kapsadığı açı ve yüksek

doğruluk sağlama yeteneğine sahiptir. Ancak boyut ve ağırlık, İHA taşıma yükü gereksinimleri açısından bir sorun teşkil edebilir (Prudden vd., 2018).

LIDAR sensörleri, arkeoloji uygulamalarında yüzeye yakın gömülü arkeolojik kalıntıların bir peyzajın topografyası üzerindeki etkileriyle ilgili ölçümler sağlamak için kullanılmaktadır. Geniş manzaraları kapsayan ayrıntılı dijital arazi ve yüzey modelleri sağlayabilirler. Spektral sensörler arazinin önemini yorumlanmasını sağlamak için yararlı olan peyzaj matris kontrastının saptanmasına izin veren ölçümler sağlamaktadır (Yin ve Wang, 2019). Özellikle alçak irtifalarda uçan İHA'lar için statik ve/veya dinamik engeller, aracın bütünlüğünü de riske atan kritik bir sorun teşkil edebilmektedir. Bu hususlar İHA kullanan her türlü uygulama için geçerlidir. İHA'ların engellerin varlığı ve çevredeki ortam hakkında bilgi edinmesine yardımcı olabilecek bazı sensörler, algılama menzillerine göre sınıflandırılmaktadırlar.

Radalar, ışık hızında hareket eden sürekli elektromanyetik dalgalar yayarak engelleri algılamaktadır. Bir engelin varlığı, yayılan dalgalar ona doğru geri yansıdığı anda belirlenmektedir. Engel mesafesi, yayılan dalga ile yansıyan dalga arasındaki ölçülen zaman farkı temelinde belirlenmektedir. Radar, geniş bir algılama aralığına sahiptir ve bir hedef alanı hızlı bir şekilde tarayabilmektedir. LIDAR, radardan daha küçük bir algılama aralığına sahiptir, ancak sadece engel mesafesini değil, aynı zamanda engelin menzili ile ilgili bilgileri de belirleme avantajına sahiptir (Yin ve Wang, 2019).

Elektro-optik sensörler, bir kamera vasıtasıyla rakımı ve azimutu belirleyerek engelin nispi konumunu sağlayabilmektedir, ancak mesafe veya hız bilgisi sağlamamaktadır. Radar ve LIDAR'dan farklı olarak, elektro-optik sensör performansı, hava ve bulutlu ortamlardan güçlü bir şekilde etkilenmektedir.

2.5. Askeri Uygulamalar için İnsansız Hava Araçları

İHA, insanlı bir pilotu olmayan bir uçak olarak kabul edilmektedir (Jha, 2016). Tüm aerodinamik işlevler, yerleşik sensörler, yer kontrol konumundaki bir insan operatör veya otonom elektronik ve elektro-optik (EO) sistemlerin konuşlandırılmasıyla kontrol edilmektedir. Askeri bir İHA'nın en temel işlevleri arasında istihbarat, keşif ve gözetleme (ISR) bulunmaktadır.

Bununla birlikte, silahlı insansız bir muharebe hava aracının (SİHA), hedef takibi ve hedeflere karşı savunma ve saldırı silah sistemlerinin konuşlandırılması gibi ISR yeteneklerine ek olarak savaşla ilgili işlevleri yerine getirmesi beklenmektedir. Bir sivil

İHA, barometre, GPS alıcısı ve altimetre cihazı gibi basit elektronik ve fiziksel sensörlerle donatılmaktadır. Gelişmiş İHA'lar, kritik görevleri yerine getirmek ve ilgili parametreleri ölçmek için fotoğraf, televizyon, IR ve akustik ekipman, kompakt sentetik açıklıklı radar (SAR), LIDAR lazer ve radyasyon, kimyasal ve diğer özel sensörlerle donatılmaktadır (Borg, 2020).

Navigasyon ve kontrol sensörleri kritik öneme sahiptir. Ayrıca, yerleşik sensörler, yer tabanlı operatör, önceden programlanmış sensörler veya otomatik uzaktan çalıştırma modu tarafından kontrol edilebilmektedir. SİHA modu durumunda, görev gereksinimleri yer operatörü tarafından değiştirilebilmektedir. İHA'lar istihbarat toplama, gözetleme, keşif, hava haritalama, terörle mücadele faaliyetleri ve acil durum operasyonları gibi çok çeşitli görevleri olağanüstü bir hızla gerçekleştirebilmektedir (Kumar, 2020). İhtiyaç duyulması halinde kritik bölgelerdeki nehirlerin, kıyıların, limanların ve yerleşim yerlerinin yüksek doğrulukta görüntülerini oluşturmak için İHA'lar kullanılabilir (Yun vd., 2020).

2.5.1. Muharebe Faaliyetleri için Çeşitli İnsansız Araç Kategorileri

Halihazırda kullanımda olan çeşitli insansız araç türleri bulunmaktadır. İnsansız araçları, aerodinamik konfigürasyonu ve operasyonel işlevleri ile karakterize edilmektedir. Bazı İHA'lar, gözetleme veya keşif işlevleri sağlamak üzere tasarlanmıştır ve genellikle düşük irtifalarda çalışmaktadır. Özel olarak tasarlanmış ve geliştirilmiş insansız araçlar, muharebe kabiliyeti sağlamak için EO ve elektromanyetik sensörler ve silah sistemleri ile donatılabilmektedir. Askeri İHA'lar genellikle orta ve yüksek irtifalarda çalışmakta, diğer İHA'lar veya drone'lar ise genellikle 300 ila 600 fit arasında değişen düşük irtifalarda uçmaktadır (Panahi vd., 2022).

2.5.2. Savaş Operasyonları için İHA'lar

Askeri veya muharebe operasyonları için İHA'lar, belirli mekanik ve yapısal gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanmakta ve yapılandırılmaktadır. Sıkı yapısal, güvenilirlik ve gizli özellikler, savaş tabanlı İHA'ların tasarımında en yüksek hususları oluşturmaktadır. Konvansiyonel özelliklere sahip İHA'lar, ISR görevlerini üstlenmeye uygundur, döner kanatlı araç konfigürasyonlarına sahip İHA'lar savaş alanı muharebe operasyonları için en uygun olanlardır (Al-Jarrah vd., 2021).

“MQ-1 Predator” veya “MQ-9 Reaper” gibi İHA’lar avcı-katil İHA’lar olarak kabul edilmektedir. Bu İHA’lar, belirtilen muharebe görevi gereksinimlerini karşılamak için gelişmiş navigasyon ve iletişim sistemleri, EO ve elektromanyetik sensörler ve minyatür saldırı silahları ile donatılmıştır. Bu muharebe araçlarının kontrolü, yetkin bir yer istasyonu operatörü veya son derece gelişmiş hızlı bilgisayarlar, uydu iletişim sistemi ve EO sensörleri kullanan otonom bir sistem tarafından gerçekleştirilebilmektedir (Werner vd., 2020).



Şekil 2.13. “MQ-9 Reaper” İnsansız Hava Aracı (General Atomics, 2022)

2.5.3. Yer Kontrol İstasyonu (GCS) ve İşlevi

Kokpitin yerde bulunması, istasyon operatörüne günümüzün en gelişmiş insansız uçaklarının manevra yapması için gerekli yardımı sağlamaktadır. Genel olarak, tek bir operatör bir İHA’yı idare edebilmektedir. Ancak, karmaşık bir askeri araç olması durumunda, araçtaki karmaşık donanıma bağlı olarak iki kontrol operatörü de kullanılabilir. Örneğin, ABD Donanması “MQ-88 Fire Scout” insansız helikopteri, ana gemide bulunan bir odada iki operatör tarafından kontrol edilmektedir (Chriki, 2019).

GCS’ler genellikle yalnızca savaş alanının içinde veya yakınında değil, aynı zamanda kontrollü üslerde de bulunmaktadır. Yer kontrol operatörü ve İHA pilotu için

görevlerini yerine getirirken EO, elektromanyetik sensörler ve ekranlar veya monitörler kullanılmaktadır (Yu vd., 2018):

- Biri faydalı yük operatörü, diğeri pilot veya İHA operatörü için olmak üzere iki adet konsol

- GCS'deki operatörlerin ihtiyaç duyduğu gelişmiş yerleşik bilgisayarlar için fare ve klavye

- Her operatör için iki hareketli harita ekranı

- İHA pilotu ve faydalı yük operatörü için iki görev ekranı

- Pilot ve faydalı yük operatörü için iki yönlü güvenli telefon hatları

- GCS operatörlerine yardımcı olabilecek çeşitli cihazlar veya sensörler

- İki yüksek çözünürlüklü ekran

- Sohbet odası için iki monitör

Askeri uzmanlara göre, GCS İHA'ların kontrolünde merkezi bir rol oynamaktadır. Nitekim GCS, ilgilenilen bölgeler üzerinde faaliyet gösterirken İHA'lar tarafından toplanan ISR verileri için bir merkez görevi görmektedir. Örneğin, SAR ve EO sensörleri gibi çeşitli sensörler tarafından üretilen video ve diğer veriler, GCS'ye güvenli veri bağlantıları aracılığıyla indirilmekte ve sonrasında bu bilgiler savaş alanındaki birlikler ve diğer ilgili kurumlar için gerçek zamanlı olarak paylaşılmaktadır. "TB-2" İHA'sına ait GCS'ti Şekil 2.14.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 2.14. “TB-2” İHA’sına Ait GCS (Baykar, 2022)

Benzer şekilde yer birimleri tarafından elde edilen bilgiler İHA'lara yüklemek için GCS'ye gönderilmekte ve İHA'nın belirli koordinatlara uçuşunu ya da belirli hedeflere vuruş yapması sağlanmaktadır. Gözetleme programına göre bir İHA GCS'de, biri uçak operatörü ve diğeri faydalı yük operatörü için olmak üzere iki konsol bulunabilmektedir (DiVita vd., 2013). Ayrıca GCS'de yer alan pilot veya operatör, İHA uçuşunu joystick olmadan sadece bir fare ve bilgisayar klavyesi kullanarak uçuş değişikliklerini yönetebilmektedir. Ayrıca özerklik veya pilot etkileşim düzeyi, görev bazında belirlenmektedir. GCS'deki İHA operatörleri çoğunlukla eski savaş pilotları veya mevcut pilotlardan oluşmaktadır. Ayrıca çeşitli iklim koşullarında hava trafik kontrol operasyonları ve uçuş dinamikleri konusunda eğitilmektedirler (Khan vd., 2020).

Bir pilot genellikle iki görev ekranı, normal bir pilot kokpit ekranı ve bir döner veya harita ekranı kullanmaktadır. Ayrıca, pilotun birden fazla sohbet odası için çalışan iki ekranı veya monitörü daha bulunmaktadır. Sensör operatörünün ayrıca biri sensör durumunu gösteren ve diğeri İHA uçuşunun rotasını gösteren iki ekranı vardır. Sensör operatörü, tıpkı pilot gibi sohbet odaları için iki monitöre sahiptir (Khan vd., 2020).

2.6. Türkiye’de İHA Sektörü ve Kullanım Alanları

Türkiye’de özellikle son on yılda oldukça revaçta olan İHA’lar temel olarak savunma sanayisinde ve askeri alanlarda kullanılmaktadır. Türkiye, ilk olarak 1980’li yıllarda İHA üretimi ve teminine başlamıştır. “Canadair CL-89”, “Gnat 750”, “I Gnat” ve “Heron” gibi yabancı menşeli İHA’lar dönemsel olarak kullanılmıştır (Düz 2020). Uzun yıllar yurtdışından temin edilen İHA’lar yüksek ücretleri ve çeşitli politik sorunlar nedeniyle ağır maliyetlere neden olmuştur. 2004 yılında Türk Havacılık ve Uzay Sanayii AŞ’nin (TUSAŞ) gözetiminde başlayan “ANKA” çok rollü istihbarat, gözetleme ve keşif sistemi, Türkiye’nin İHA serüveninde önemli bir adım olmuştur (Düz 2020). 2005 yılında üretilen Bayraktar mini İHA sistemi ise bugün İHA alanında hala adını sıkça duyduğumuz “TB-2”nin önünü açmıştır. “TB-2”, 2019 senesinden beri TSK, Jandarma ve Emniyet Genel Müdürlüğü tarafından aktif olarak kullanılmakta olup bugüne dek 110.000’in üstünde operasyon uçuş süresine sahiptir (Düz, 2020).



Şekil 2.15. Baykar Şirketinin Ürettiği “TB-2” İHA (Baykar, 2022)

Türkiye’nin üretimi olan İHA’ların bölgesel operasyonlarda gösterdiği başarısı sayesinde bu İHA’lar, bugün dünyanın çeşitli ülkelerine ihraç edilmeye başlamıştır. Önemli bir örnek olarak “TB-2”ler 2022 Rusya-Ukrayna savaşında Ukrayna ordusu tarafından tercih edilmekte ve etkin olarak kullanılmaktadır. Türkiye’de savunmadan gözetlemeye geniş bir askeri kullanımı olan İHA’lar, bugün Türk ordusunun önemli bir yapı taşı haline gelmiştir. İHA’lar, askeri dışa bağımlılığın azaltılması, ordunun teknolojik gelişmelere ayak uydurması ve milli bir savunma envanteri oluşturma sürecinde bir dönüm noktası olmuştur.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Teknolojinin hayatın her alanına dahil olduğu modern dünyada İHA'lar çok çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Elektro-optik sistem, MALE sınıfı bir İHA için son derece önemli bir faydalı yüküdür. İHA'lara ve İHA sistemlerine olan ilgi nedeniyle her geçen gün artan model çeşitliliği nedeniyle ihtiyaçlar doğrultusunda elektro-optik sistemin seçimi önem arz eden bir problem ve araştırma haline gelmektedir.

Bu tez kapsamında MALE sınıfı İHA'larda elektro-optik sistem seçimi ele alınmıştır. Tez kapsamında incelenen elektro-optik sistem seçimi problemi entegre bir BWM-COPRAS ÇKKV metodu ile çözülmüştür. Literatür taraması sonucu havacılık alanında ÇKKV yöntemlerinin büyük oranda ana platform seçimi için uygulandığı tespit edilmiştir. BWM-COPRAS metotları ise aşağıda örneklendirildiği gibi farklı sektör ve alanlardaki muhtelif seçimler için kullanılmış olsalar da literatürde özellikle İHA'ların elektro-optik sistem seçiminde kullanımları mevcut değildir.

3.1. Kaba Küme Tabanlı Çalışmalar

Son yıllarda aralıklı kaba kümelerin ÇKKV alanında kullanımı artmaktadır. Literatürdeki bazı araştırmalar şunlardır.

Zhu, Hu ve Ren (2020) çalışmalarında entegre bir bulanık kaba sayı tabanlı AHP ile bulanık kaba sayı tabanlı TOPSIS kullanmışlardır. Bu entegre yaklaşım, belirsizlik ve öznellik içeren erken ürün tasarım sürecinin değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

Stević vd. (2019), çalışmaları için yeni aralıklı kaba SAW (Simple Additive Weighting) metodu tasarlamışlar ve kullanmışlardır. Bu yeni yöntem, sürdürülebilir tedarikçi seçiminde kullanılmıştır.

Deveci vd. (2021), araştırmalarında aralıklı kaba sayı tabanlı BWM ve MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to Compromise Solution) yöntemini Akdeniz'de kurulacak açık deniz rüzgâr santrali alanının seçiminde kullanmışlardır.

Pamucar, Chattarjee ve Zavadskas (2019) çalışmalarında kaba sayı tabanlı ÇKKV kullanarak üçüncü parti lojistik sağlayıcılarının değerlendirilmesini amaçlamışlardır. Bu seçimin en etkin şekilde gerçekleştirilmesi için BWM, WASPAS ve MABAC tabanlı yeni entegre bir aralıklı kaba sayı yaklaşımı kullanılmıştır.

3.2. BWM-COPRAS Yöntemini Kullanan Çalışmalar

AmoozadMahdiraji vd. (2018) çalışmaları kapsamında bulanık BWM ve COPRAS metotlarını sürdürülebilir mimarinin ana faktörlerini analiz etmekte kullanmışlardır. Üç parçaya ayırdıkları çalışmaları için ilk olarak alandaki uzmanlardan görüş alınmış, bu data üçgen bulanık sayılara çevrilmiştir. İkinci olarak karşılaştırılmış kriterler BWM yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış ve önceliklendirilmiştir. Son olarak belirlenmiş ana faktörler, COPRAS kullanılarak önceliklendirilmiştir.

Masoomi vd. (2022), araştırmaları için bulanık BWM, WASPAS ve COPRAS yöntemlerini yeşil kapasiteli yenilenebilir enerji zincir için stratejik tedarikçi seçiminde kullanmışlardır. Literatür taraması ve gerçek hayattaki vaka analizleri doğrultusunda dokuz adet stratejik tedarikçi seçim kriteri belirlenmiş ve bu kriterler bulanık BWM, COPRAS ve WASPAS ile değerlendirilmiştir.

Pamuçar ve Savin (2020), makalelerinde BMW ve COPRAS metotları ile Sırp Silahlı Kuvvetleri'nin ulaşımı daha etkin yapabilmesi ve kullanıcı güvenliğinin sağlanabilmesi için en uygun arazi aracı seçimini incelemişlerdir. Bu metotlara ek olarak MABAC (Multi Attribute Border Approximation Area Comprison) (Çok Nitelikli Sınır Yaklaşım Alanı Kıyaslaması) ve MAIRCA (Multi Atributive Ideal-Real Comparative Analysis) (Çok Nitelikli İdeal-Gerçek Karşılaştırması Analizi) metotları ile elde edilen sonuçlar onaylanmıştır.

Raj ve Sah (2019), araştırmalarında lojistik sektöründe kullanılan drone'ların uygulamalarının kritik başarı faktörlerini gri temelli DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) ile analiz etmişlerdir. Literatür taraması ve uzman görüşleri ile karar verilen 12 kriterin arasındaki ilişki, DEMATEL ve gri temelli yaklaşım ile incelenmiştir.

Deveci vd. (2022), IT2HFS (Ara Tip-2 Çekinik Bulanık Set) temelli WASPAS metodunu hava aracı seçiminde kullanmışlardır. Çalışmaları kapsamında yeni bir ÇKKV olan WASPAS ve IT2HFS yöntemlerinin birleşimi, Türkiye'deki bir tam hizmet sunan bir havayolundan alınmış bir vaka çalışması ile test edilmiştir.

Das, Bhattacharya ve Sarkar (2019), araştırmaları kapsamında MADM (Multi Attribute Decision Making) (Çok Nitelikli Karar Verme) çerçevesinde koşullu karar ile risk ve belirsizlik altında ürün tasarımında materyal seçimini incelemişlerdir. Bu araştırma sonuçları diğer ÇKKV metotları ile karşılaştırılmıştır.

3.3. İHA'lar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Cengiz ve Çelik (2021), araştırmaları kapsamında önemli bir faydalı yük olan elektro-optik kameranın İHA üzerinde yerleşimini ele almışlardır. Elektro-optik kamera yerleşiminin diğer faydalı yüklerden bağımsız olarak yapılmasının önemini yaptıkları araştırma ile vurgulamışlardır.

Aslan (2017), sınıfı küçük İHA'larda elektro-optik ve kızılötesi sensör seçiminde çok kriterli karar verme tekniklerinin uygulanmasını incelemiştir. Araştırma kapsamında belirlenen İHA modellerinin sensörlerinin teknik özellikleri ve uzman görüşleri kapsamında kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler AHP metodu ile karşılaştırılmış, sonuçlandırmak için ise çok kriterli karar verme yöntemi olarak AHP ve TOPSIS ve gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılmıştır.

Pamuçar vd. (2022), araştırmalarında orman yangınlarıyla mücadelede İHA seçimi için LNN (Linguistic Neutrosophic Numbers) (Linguistik Nötrosifik Sayılar) ile MABAC ve OS (Objective-Subjective) (Objektif-Subjektif) modellerini kullanmışlardır. Bu çalışma ile yeni bir hibrid LNN-OS-MABAC yöntemi geliştirilmiştir. 54 farklı senaryoda test edilen yöntem, stabil sonuçlar vermiştir.

Karaşan ve Kaya (2019), makalelerinde İHA'larda teknoloji değerlendirmesi için nötrosifik TOPSIS metodunu kullanmışlardır. Bu metot İHA alternatiflerinin ağ denetleyicileri ve rölelerinin değerlendirilmesinde tercih edilmiştir.

Petkovics vd. (2017), hassas tarımda kullanılacak İHA seçimi için ÇKKV algoritmasının kullanılması çalışmasını yapmışlardır. Çiftçilerin gereksinimleri göz önünde bulundurularak spesifik özellikler düşünülmüş, bu doğrultuda ÇNKV yazılımı kullanılarak en uygun İHA seçilmiştir.

Çizelge 3.1. İHA'lar ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yazar (lar)	Yöntem	Uygulama
Cengiz ve Çelik, 2021	-	Elektro-optik sistemin İHA üzerinde yerleşimi
Aslan, 2017	AHP ve TOPSIS ve gri ilişkisel analiz yöntemi	Sınıfı küçük İHA'larda elektro-optik ve kızılötesi sensör seçimi
Pamuçar vd., 2022	LNN-OS-MABAC	Orman yangınlarıyla mücadelede İHA seçimi
Karaşan ve Kaya, 2019	Nötrosifik TOPSIS	İHA teknoloji değerlendirmesi
Petkovics vd., 2017	AHP	Hassas tarımda kullanılacak İHA seçimi

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

Yapılan bu tez çalışmasında MALE sınıfı İHA'lara elektro-optik sistem seçim problemi çözülmüştür. Elektro-optik sistemi seçerken kullanılacak kriterler literatür taraması ve uzman görüşleri yardımıyla belirlenmiştir. Belirlenen altı tane kriterin anket çalışması, alanında uzman beş kişiye yapılmıştır. Problemden yararlanılmak üzere dört adet alternatif seçilmiştir. Seçilen bu alternatiflerin özellikle askeri alanlarda kullanımı ve firma yetkilileri tarafından verilen fiyat bilgilerin gizliliği nedeniyle modellerin isimleri açıklanmamıştır. Alternatiflere ait kriter bilgilerinin bir kısmı teknik dokümanlardan, yoruma dayalı bilgiler ise uzman görüşlerine başvurularak sağlanmıştır.

4.2. Yöntem

Seçilen kriterlerin ağırlıklandırılması için bulanık En İyi En Kötü Yöntemi (BWM) kullanılmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılması için uzman görüşleri alınırken anketlerde üçgen bulanık sayılardan yararlanılmıştır. Bulanık BWM ile ağırlıklandırılmış kriterler, kaba küme tabanlı COPRAS yönteminde alternatiflerin önceliklendirilmesi için kullanılmıştır. Bu bölümde BWM, COPRAS, bulanık kümeler, kaba kümeler ve önerilen çözüm adımları açıklanmıştır.

4.2.1. Bulanık Kümeler

Gerçek hayatta karar verme süreci her zaman mutlak değerlere tabii değildir, belirsizlik önemli bir yere sahiptir. Bulanık kümeler, klasik matematiğin gerçekliği temsil etmesindeki yetersizliği sebebiyle 1965 yılında Lotfi Asker Zadeh tarafından ortaya atılmıştır (Kahraman vd., 2004). Klasik düşüncenin aksine bulanık kümeler, iki mutlak uç (örneğin evet/hayır, doğru/yanlış) arasında değişen farklı değerlerin de olduğunu öne sürmektedir (Ecer ve Küçük., 2007). Belirsizlikler ile ilgilendiği için tartışma konusu olan bulanıklık kavramı ve teorisinin pek çok farklı kullanım alanı mevcuttur. Örneğin 1988 yılında Japonya'daki Sendai metro hattında bulanık kontrolör kullanılmıştır (Kahraman vd., 2004). Bulanık kümelerde mutlak sınırlar yerine üyelik derecesi mevcuttur ve bu derece, elemanın kümeye ve kümenin özelliklerine ne kadar sahip olduğu ile hesaplanır (Ecer ve Küçük, 2007).

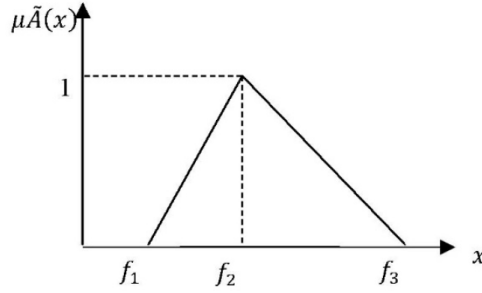
4.2.1.1. Bulanık Sayılar

Bulanık kümeler kavramında mutlak sayılar yerine karar vericiler tarafından dilsel değişkenler kullanılır. Dilsel değişkenler bulanık sayılara çevrilerek çözüme katılır. Bulanık sayılar, bulanık kümelerin içerisinde bulunan özel bir kümedir. Evrensel alt küme (X) 'in bulanık bir alt kümesi olan (\tilde{A}) 'nın üyelik fonksiyonu $(\mu_{\tilde{A}}(x))$ 'tir ve formülü aşağıdaki gibidir (Tzeng ve Huang, 2011).

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X\} \quad (4.1)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1] \quad (4.2)$$

Bulanık sayılar, bulanık kümelerin temel bileşenleridir ve üçgensel, çan eğrisi gibi farklı çeşitleri bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında üçgen bulanık sayılar kullanılmıştır. Üçgen bulanık sayılar $\tilde{A} = (f_1, f_2, f_3)$ şeklinde tanımlanabilir. f_1, f_2 ve f_3 arasındaki ilişki $f_3 > f_2 > f_1$ şeklindedir ve bu parametreler sırası ile en küçük değer, en olası değer ve en büyük değeri ifade etmektedir. Üçgen bulanık sayılar Şekil 4.1.'deki gibi gösterilir (Uygurtürk, 2015).



Şekil 4.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu

\tilde{A} Üçgen sayıya ait üyelik fonksiyonu $(\mu_{\tilde{A}}(x))$ Eşitlik (4.3)'teki gibi hesaplanır (Zimmermann, 2010).

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < f_1 \\ \frac{x-f_1}{f_2-f_1}, & f_1 \leq x \leq f_2 \\ \frac{x-f_3}{f_2-f_3}, & f_2 \leq x < f_3 \\ 0, & x > f_3 \end{cases} \quad (4.3)$$

Üçgen bulanık sayılarda basit matematiksel işlemler aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\tilde{f} + \tilde{f} = (f_1 + f_1, f_2 + f_2, f_3 + f_3) \quad (4.4)$$

$$\tilde{f} \times \tilde{f} = (f_1 \times f_1, f_2 \times f_2, f_3 \times f_3) \quad (4.5)$$

$$\tilde{f} \div \tilde{f} = (f_1 \div f_3, f_2 \div f_2, f_3 \div f_1) \quad (4.6)$$

$$1/\tilde{f} = (1/f_1, 1/f_2, 1/f_3) \quad (4.7)$$

4.2.1.2. Dilsel Değişkenler

Geleneksel nicelendirmenin kullanılması için fazla komplike olan durumlarda dilsel değişkenlere başvurulabilmektedir. Bu doğrultuda dilsel değişkenler, bulanık sayıları ifade etmek için kullanılabilir (AmoozadMahdiraji vd., 2018). Bu tez çalışmasında üçgen bulanık sayıların dilsel değişken olarak ifade edilmesi için Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2. kullanılmıştır. Kriterlerin değerlendirilmesi için Çizelge 4.1., alternatiflerin değerlendirilmesi için ise Çizelge 4.2.'deki dilsel değişkenlerden yararlanılmıştır.

Çizelge 4.1. Dilsel Değişkenlerin Üçgen Bulanık Sayılarla İfadesi

Dilsel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı
Eşit (E)	(1, 1, 1)
Biraz daha iyi (BDİ)	(1/2, 1, 3/2)
Çoğunlukla iyi (Çİ)	(1, 3/2, 2)
Daha iyi (Dİ)	(3/2, 2, 5/2)
Çok daha iyi (ÇDİ)	(2, 5/2, 3)
En iyi (Eİ)	(5/2, 3, 7/2)

Çizelge 4.2. Dilsel Değişkenlerin Üçgen Bulanık Sayılarla İfadesi

Dilsel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı
Çok zayıf (ÇZ)	(0, 1, 2)
Zayıf (Z)	(1, 2, 3)
Genelde zayıf (GZ)	(2, 3.5, 5)
Orta (O)	(4, 5, 6)
Genelde iyi (Gİ)	(5, 6.5, 8)
İyi (İ)	(7, 8, 9)
Çok iyi (Çİ)	(8, 9, 10)

4.2.1.3. Durulaştırma (Defuzzification)

Bulanık karar vermenin sonuçları bulanık sayılardan oluşmaktadır. Bu nedenle çok kriterli karar vermekte bulanık sayıların sıralanması problemi ortaya çıkabilir (AmoozadMahdiraji vd., 2018). Bu sorunun çözümü olarak durulaştırma (defuzzification) işlemi gerçekleştirilmelidir. Bulanık bir sayı Eşitlik (4.8)'deki merkezi alan yöntemi kullanılarak durulaştırılabilir (Tsaur vd., 2002).

$$Q_i = f_1 + \frac{[(f_3-f_1)+(f_2-f_1)]}{3} \quad (4.8)$$

4.2.2. Kaba Kümeler (Rough Set)

Belirsizlik durumları için bulanık küme teorisinin yanısıra kaba kümeler de kullanılmaktadır. Kaba kümeler ve sayılar, uzmanların görüşlerini daha doğru ifade eder ve bu nedenle gerçek verilerin objektifliğini yükseltirler (Song vd., 2012). Kaba kümeler belirsiz bilgilerin modelleme ve analizi için kullanılmaktadır. Kaba küme, hedef kümenin alt ve üst yaklaşımlarından oluşmaktadır (Pawlak 2012).

Zhai vd. (2009), kaba sayıların kurallarını aşağıdaki gibi belirtmiştir:

P , bilgi kümesinde kayıtlı tüm nesnelerin bulunduğu bir evrendir. Tüm bu nesnelere k sınıfına aittir, örneğin $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$. Eğer tüm bu sınıflar $q < q_2 < \dots < q_3$ şeklinde ilerliyor ise her sınıf için $q_z \in Q$, $1 \leq z \leq k$

q_z 'nin alt yaklaşımı şu şekilde tanımlanabilir: $\underline{L}(q_z) = \cup \{X \in P \mid Q(X) \leq q_z\}$

q_z 'nin üst yaklaşımı şu şekilde tanımlanabilir: $\bar{L}(q_z) = \cup \{X \in P \mid Q(X) \geq q_z\}$

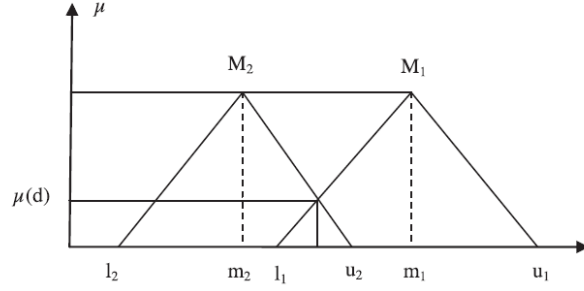
Sınır bölgesi q_z şu şekilde belirlenir: $B(q_z) = \underline{L}(q_z) \cup \bar{L}(q_z)$

Sonuç olarak, P evrenindeki herhangi bir belirsiz sınıf q_z onun kaba sayısı ile temsil edilebilir.

Sonuç olarak, P evrenindeki herhangi bir belirsiz sınıf q_z , aşağıdaki şekilde tanımlanan kabaca ($RN(q_z) = [LB(q_z), UB(q_z)]$) sayısı ile temsil edilebilir:

$$LB(q_z) = \frac{1}{N} \sum Q(X) \mid X \in \underline{L}(q_z) \quad (4.9)$$

$$UB(q_z) = \frac{1}{M} \sum Q(X) \mid X \in \bar{L}(q_z) \quad (4.10)$$



Şekil 4.2. M_1 ve M_2 arasındaki Kesişme Grafiği

N ve M sırasıyla q_z 'nin alt ve üst yaklaşımlarındaki nesnelere sayısıdır. Alt ve üst sınırlar arasındaki fark, bir sınıfın belirsizliğini tanımlar.

4.2.2.1. Kaba Sayının Pürüzsüzleştirilmesi

Kaba sayılar, aşağıdaki prosedür kullanılarak net bir değere dönüştürülür (Song vd. 2017). Bir kaba sayılar kümesi varsayalım,

$$S = \{[RN^L(G_1), RN^U(G_1)], [RN^L(G_2), RN^U(G_2)], \dots, [RN^L(G_n), RN^U(G_n)]\} \quad (4.11)$$

1. Normalleştirme:

$$RN^L(G_j) = \frac{(RN^L(G_j) - \min_j RN^L(G_j))}{\Delta_{min}^{max}} ; \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (4.12)$$

$$RN^U(G_j) = \frac{(RN^U(G_j) - \min_j RN^L(G_j))}{\Delta_{min}^{max}}$$

$$\Delta_{min}^{max} = \max_j RN^U(G_j) - \min_j RN^L(G_j) \quad (4.13)$$

2. Toplam normalize net değerin belirlenmesi:

$$\sigma_j = \frac{RN^L(G_j) \times (1 - RN^L(G_j)) + RN^U(G_j) \times RN^U(G_j)}{1 - RN^L(G_j) + RN^U(G_j)} \quad (4.14)$$

3. Nihai net formun hesaplanması:

$$RN(G_j)^{der} = \min_j RN^L(G_j) + \sigma_j \cdot \Delta_{min}^{max} \quad (4.15)$$

4.2.3. En İyi En Kötü Yöntemi (Best Worst Method)

2015 yılında Rezaei tarafından geliştirilen en iyi en kötü yöntemi (BWM), çok kriterli karar verme yöntemlerinin en yenilerindedir. Bu yöntemde öncelikle karar verici tarafından kriterlerin en iyisi (en çok istenilen veya en önemlisi) ve en kötüsü (en az istenilen veya en az önemli olanı) belirlenir. BWM için yapılan anketlerin ardından, belirlenmiş iki kriter (en iyi ve en kötü) ve diğer kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yapılır. Bu karşılaştırmalar sayesinde karar verme aralığının daha iyi anlaşılması sağlanır. BWM, sürecin kısalığı ve daha az karşılaştırmayla inceleme olanağı sağlaması ile ön plana çıkmaktadır (Aşan ve Ayçin, 2020). Belirtilenlere ek olarak en iyi en kötü yöntemi ile daha istikrarlı karşılaştırmalar yapılmakta ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. BWM, kaynak planlamacılığında tedarik zincirlerine, mesleki seçim süreçlerinden İHA'lara kadar pek çok kullanım alanına sahiptir.

BWM uygulama adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir (Rezaei, 2015).

ADIM 1: Problemden kullanılmak üzere n tane kriter $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ belirlenir.

ADIM 2: En iyi kriter (C_B) ve en kötü kriter (C_W) karar vericiler tarafından belirlenir.

ADIM 3: En iyi kriterin tespiti için 1-9 sayıları arasında Çizelge 4.3.'teki sözlü karşılaştırma ölçütüne göre en iyi kriterin diğer kriterlere oranla ne kadar önemli olduğu karar vericiler tarafından değerlendirilir. Karar vericilerin değerlendirmesi sonunda en iyi kriterin diğer kriterlere göre tercih vektörü (A_B) Eşitlik (4.16)'daki gibi oluşturulur.

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (4.16)$$

A_B vektöründeki a_{Bj} , en iyi kriterin j kriterine göre ne kadar öncelikli olduğunu gösterir. İlaveten $a_{BB} = 1$ kriterin kendisiyle kıyaslandığını gösterir.

ADIM 4: Aynı şekilde, en kötü kriter için de Çizelge 4.3.'teki sözlü karşılaştırma ölçütüne göre tüm kriterlerin en kötü kritere göre önceliği karar vericiler tarafından değerlendirilir. Karar vericilerin değerlendirmesi sonucunda en kötü kriterin diğer kriterlere göre tercih vektörü (A_W) Eşitlik (4.17)'deki gibi oluşturulur.

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}) \quad (4.17)$$

A_W vektöründeki a_{jW} , j kriterinin en kötü kritere göre önem tercihini gösterir. Ayrıca $a_{WW} = 1$ kriterin kendisiyle kıyaslandığını gösterir.

Çizelge 4.3. BWM Karşılaştırma Ölçeği

Önem Derecesi	Kriterlerin Karşılaştırılması için Sözlü Anlatım
1	Eşit derecede önemli
2	Eşit olarak orta derecede önemli
3	Orta derecede daha önemli
4	Orta derecede çok daha önemli
5	Güçlü olarak önemli
6	Güçlü olarak çok önemli
7	Çok güçlü olarak önemli
8	Çok güçlü olarak daha önemli
9	Oldukça çok önemli

ADIM 5: Bu adımda Eşitlik (4.18)'deki doğrusal programlama modelinin çözülmesiyle kriter ağırlıkları $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ hesaplanır. Tutarlılık oranının hesaplanmasına yardımcı olan ε değeri de bu çözüm aşamasında bulunur.

$$\begin{aligned}
 & \text{mine} \\
 & \left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \sum_j w_j = 1 \\
 & w_j \geq 0, \forall j
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

ADIM 6: Çözümün son adımında, bulunan ε değeri ve Çizelge 4.4.'teki tutarlılık endeks değeri Eşitlik (4.19)'da yerine yazılarak tutarlılık oranı hesaplanır. Tutarlılık oranının sıfıra doğru yaklaşması çözümün tutarlı olduğunu, bir değerine doğru yaklaşması ise çözüm tutarlılığının azaldığını göstermektedir.

$$\text{Tutarlılık Oranı (TO)} = \frac{\varepsilon}{\text{Tutarlılık Endeksi (TE)}} \tag{4.19}$$

Çizelge 4.4. Tutarlılık Endeksi Değerleri

a_{Bw}	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tutarlılık Endeksi	0	0,44	1	1,63	2,3	3	3,73	4,47	5,23

Kriterlerin alt ve üst sınırlarını hesaplamak için Eşitlik (4.20) ve Eşitlik (4.21)'deki iki modelin çözülmesi gerekmektedir. Bu iki modelin çözümü tüm kriterlere uygulanarak optimal ağırlıkları belirlenir. Optimal ağırlıklar belirlendikten sonra kriterlerin ağırlık merkezleri hesaplanabilir. Ağırlık merkezlerine göre kriterler sıralanır (Rezaei, 2016).

$$\begin{aligned}
 & \min W_j \\
 & \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \sum_j W_j = 1 \\
 & W_j \geq 0, \forall j
 \end{aligned} \tag{4.20}$$

$$\begin{aligned}
 & \max W_j \\
 & \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \varepsilon, \forall j \\
 & \sum_j W_j = 1 \\
 & W_j \geq 0, \forall j
 \end{aligned} \tag{4.21}$$

4.2.4. Klasik COPRAS Yöntemi

“Karmaşık Oransal Değerlendirme” olarak Türkçeleştirilmiş olan COPRAS (Complex Proportional Assessment) yöntemi, 1996 senesinde Zavadskas ve Kaklauskas tarafından ileri sürülmüştür. Şeffaflığı, kullanım kolaylığı ve diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha kısa olan hesaplama süresi nedeniyle oldukça tercih edilen bir yöntemdir (Mulliner vd. 2013). Bunlara ek olarak COPRAS, tek değerlendirme ile hem nicel hem de nitel kriterlerin incelenmesine olanak sağlamaktadır (Mulliner vd. 2013). COPRAS, kriter değerlerinin maksimize ve minimize edilmelerinin çok kriterli değerlendirmesi için kullanılmaktadır (Podvezko, 2011).

COPRAS metodundaki adımlar aşağıdaki gibi sıralanır (Zavadskas vd, 2008).

ADIM 1: İlk adımda Eşitlik (4.22)'deki gibi karar matrisi hazırlanır.

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdot & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdot & x_{2n} \\ A_{m1} & x_{32} & x_{33} & \cdot & x_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdot & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

ADIM 2: Eşitlik (4.23) kullanılarak normalize edilmiş karar matrisi hesaplanır.

$$x_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (4.23)$$

ADIM 3: Normalize edilmiş karar matrisi ile kriterlere ait ağırlık değerinin (W_j) çarpılmasıyla ağırlıklandırılmış karar matrisi (D') hazırlanır. Buradaki W_j değerleri diğer yöntemlerden gelen hazır verilerdir. Eşitlik (4.24) kullanılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi (D') oluşturulur.

$$D' = d_{ij} = x_{ij} \cdot w_j \quad (4.24)$$

ADIM 4: Faydalı ve faydasız kriterler belirlenir. Faydalı kriterlerinin değerlerin artması sonucu olumlu yönde etkilerken, faydasız kriterlerin değerlerinin artması sonucu olumsuz yönde etkilemektedir. Faydalı kriterlerin normalize edilmiş karar matrisindeki değerlerinin toplamı (s_{i+}) ve faydasız kriterlerin değerlerinin toplamı (s_{i-}) Eşitlik (4.25)'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned} S_{i+} &= \sum_{j=1}^k d_{ij} & j &= 1, 2, \dots, k \text{ faydalı ölçekler} \\ S_{i-} &= \sum_{j=k+1}^n d_{ij} & j &= k + 1, k + 2, \dots, n \text{ faydasız ölçekler} \end{aligned} \quad (4.25)$$

ADIM 5: Tüm alternatifler için göreceli önem değeri (Q_i) Eşitlik (4.26)'da gösterildiği gibi hesaplanır. Hesaplanan değerler arasındaki en yüksek göreceli önem değerine (Q_i) sahip alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

$$Q_i = S_{i+} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{i-}}{S_{i-} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_{i-}}} \quad (4.26)$$

ADIM 6: Her alternatif için Eşitlik (4.27) kullanılarak Performans indeksleri (P_i) hesaplanır. Performans indeks (P_i) değeri 100 olan alternatif ilk sırada yer alır. Performans indekslerine göre diğer alternatifler sıralanır.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \cdot \%100 \quad (4.27)$$

4.2.5. Önerilen Kaba Küme Tabanlı Çok Kriterli Grup Karar Verme Yöntemi

Bu çalışmada önerilen kaba küme temelli entegre BWM-COPRAS çözüm yönteminin adımları aşağıdaki gibidir.

ADIM 1: ÇKKV yöntemlerine uygun şekilde uzmanlarla görüşülerek ve literatürdeki bilgiler kapsamında kriterler belirlenir.

ADIM 2: Kriterler belirlendikten sonra BWM yöntemine göre uzmanlar en iyi ve en kötü kriteri belirler. Ardından uzmanlar Çizelge 4.1.'de verilen bulanık ölçeği kullanarak en iyi ve en kötü olarak belirledikleri kriterlere göre diğer kriterlerinin önem seviyelerini belirler.

ADIM 3: Uzmanlardan toplanan bulanık üçgen sayıların matematiksel işlemler kullanılarak ortalaması alınır.

ADIM 4: BWM deterministik doğrusal olmayan bir çözüm yöntemi olduğundan bulanık üçgen sayılar, Eşitlik (4.28)'deki formülle alfa (α) kesme tekniği kullanılarak gri sayılara çevrilir.

$$(l(\alpha), u(\alpha)) = (f_1 + \alpha(f_2 - f_1), f_3 + \alpha(f_2 - f_3)) \quad (4.28)$$

ADIM 5: Üçgen bulanık sayılar α kesme tekniği kullanılarak gri sayılara çevrilir. En iyi kriter ve en kötü kriterler 1 ile 0 arasında farklı α değerlerine sahip olurlar. Bu

adım ile Eşitlik (4.18)'deki matematiksel model oluşturularak çözülür. Çözüm sonucunda çıkan ε değeri ile Eşitlik (4.19) kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanır.

ADIM 6: Kriterlerin alt ve üst sınırlarını bulmak için Eşitlik (4.20) ve Eşitlik (4.21) kullanılır. Bulunan alt ve üst sınırlar çözümün optimal ağırlık aralığını gösterir.

ADIM 7: Heterojen grup karar matrisinin oluşturulması (\hat{X})

Bireysel karar matrisi \hat{X}_k , her uzman tarafından subjektif (kalitatif) kriterler ($j = 1, \dots, z$) için aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$\hat{X}_k = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11}^k & \hat{x}_{12}^k & \dots & \hat{x}_{1z}^k \\ \hat{x}_{21}^k & \hat{x}_{22}^k & \dots & \hat{x}_{2z}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{x}_{m1}^k & \hat{x}_{m2}^k & \dots & \hat{x}_{mz}^k \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Tüm uzmanlardan alınan görüşler birleştirilerek subjektif kriterler için \bar{X} matris oluşturulur.

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \{\hat{x}_{11}, \hat{x}_{12}, \dots, \hat{x}_{1z}\} \\ \{\hat{x}_{21}, \hat{x}_{22}, \dots, \hat{x}_{2z}\} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \{\hat{x}_{m1}, \hat{x}_{m1}, \dots, \hat{x}_{mz}\} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Alternatiflerin subjektif ($j = 1, \dots, z$) ve objektif kriterler ($j = z + 1, \dots, n$) üzerindeki performansı değerlendirilerek, heterojen grup karar matrisi (\tilde{X}) oluşturulur:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \{\hat{x}_{11}, \hat{x}_{12}, \dots, \hat{x}_{1z}, \hat{x}_{1(z+1)}, \dots, \hat{x}_{1n}\} \\ \{\hat{x}_{21}, \hat{x}_{22}, \dots, \hat{x}_{2z}, \hat{x}_{2(z+1)}, \dots, \hat{x}_{2n}\} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \{\hat{x}_{m1}, \hat{x}_{m1}, \dots, \hat{x}_{mz}, \hat{x}_{m(z+1)}, \dots, \hat{x}_{mn}\} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

ADIM 8: Homojen kaba karar matrisinin oluşturulması

Heterojen karar matrisindeki tüm bulanık sayılar aralıklara dönüştürülerek homojen aralık değerli kaba karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} [x_{11}^L, x_{11}^U] & [x_{12}^L, x_{12}^U] & \dots & [x_{1n}^L, x_{1n}^U] \\ [x_{21}^L, x_{21}^U] & [x_{22}^L, x_{22}^U] & \dots & [x_{2n}^L, x_{2n}^U] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [x_{m1}^L, x_{m1}^U] & [x_{m1}^L, x_{m1}^U] & \dots & [x_{mn}^L, x_{mn}^U] \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Burada x_{ij}^L ve x_{ij}^U grup karar tercihlerinin alt ve üst aralık aralıklarını temsil eden kaba sayılar olarak gösterilir.

Üçgen bulanık sayı (a, b, c) aralıklı değere $[L, U]$ aşağıda verilen Eşitlik (4.33) kullanılarak dönüştürülür:

$$[L, U] = [(b - a)\alpha + a, -(c - b)\alpha + c] \quad \alpha \in [0,1] \quad (4.33)$$

Burada α karar vericinin güven düzeyi olarak tanımlanır.

ADIM 9: Ağırlıklı normalize karar matrisinin elde edilmesi.

Normalize edilmiş matris $\tilde{Y} = ([y_{ij}^L, y_{ij}^U])_{m \times n}$ 'nin öğeleri şu şekilde belirlenir:

$$y_{ij}^L = \frac{2 x_{ij}^L w_j^L}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^L + \sum_{i=1}^m x_{ij}^U} \quad (4.34)$$

$$y_{ij}^U = \frac{2 x_{ij}^U w_j^U}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^L + \sum_{i=1}^m x_{ij}^U} \quad (4.35)$$

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} [y_{11}^L, y_{11}^U] & [y_{12}^L, y_{12}^U] & \dots & [y_{1n}^L, y_{1n}^U] \\ [y_{21}^L, y_{21}^U] & [y_{22}^L, y_{22}^U] & \dots & [y_{2n}^L, y_{2n}^U] \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ [y_{m1}^L, y_{m1}^U] & [y_{m2}^L, y_{m2}^U] & \dots & [y_{mn}^L, y_{mn}^U] \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Burada $\hat{w}_j = [w_j^L, w_j^U]$ kriterlerin alt ve üst ağırlık değerleridir.

ADIM 10: İdeal ve ideal olmayan çözüm indekslerinin hesaplanması

Her alternatif için daha büyük değerleri daha çok tercih edilen pozitif kriter değerlerinin \hat{P}_j toplamalarının hesaplanması Eşitlik (4.37)'deki gibi elde edilir:

$$\hat{P} = (\hat{P}_i = [\sum_{j=1}^r y_{ij}^L, \sum_{j=1}^r y_{ij}^U])^T \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.37)$$

r fayda kriterlerinin sayısıdır. Ardından bu değerler Bölüm 4.2.2.1’de verilen kabalığın kaldırılması prosedürü ile aşağıdaki forma getirilir:

$$P^{der} = (\hat{P}_1^{der}, \hat{P}_2^{der}, \dots, \hat{P}_m^{der})^T \quad (4.38)$$

Her alternatif için daha küçük değerleri tercih edilen maliyet kriter değerlerinin \hat{R}_j toplamalarının hesaplanması aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\hat{R} = (\hat{R}_i = [\sum_{j=r+1}^n y_{ij}^L, \sum_{j=r+1}^n y_{ij}^U])^T \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4.39)$$

$(n - r)$, maliyet tabanlı kriterlerin sayısıdır. Ardından bu değerler Bölüm 4.2.2.1’de verilen kabalığın kaldırılması prosedürü ile aşağıdaki forma getirilir:

$$R^{der} = (\hat{R}_1^{der}, \hat{R}_2^{der}, \dots, \hat{R}_m^{der})^T \quad (4.40)$$

ADIM 11: Fayda derecesinin belirlenmesi

Her alternatifin göreceli önemi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\hat{Q}_i = \hat{P}_i^{der} + \frac{\sum_{i=1}^m \hat{R}_i^{der}}{\hat{R}_i^{der} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{\hat{R}_i^{der}}} \quad (4.41)$$

Alternatiflerin önceliği belirlenirken, \hat{Q}_i (göreceli ağırlığı) önemi ne kadar büyükse, alternatifin önceliği (veya sıralaması) o kadar yüksek olur. Göreceli önem \hat{Q}_i , diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında i alternatifinin öncelik derecesini gösterir.

Her alternatif için fayda derecesi, diğer alternatif ile en iyi alternatif karşılaştırılarak belirlenir. Fayda derecesi değerleri %0 ile %100 arasında değişir. Her i alternatifi için fayda derecesi N_i aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\hat{N}_i = \frac{\hat{Q}_i}{\hat{Q}_{max}} \times 100\% \quad (4.42)$$

5. UYGULAMA

5.1. Problemin Tanımlanması

Elektro-optik sistem, bir İHA'nın en kritik faydalı yüklerinden biridir. MALE sınıfı İHA'larda kullanılan elektro-optik sistemler temel olarak gözetleme ve hedefleme yapılmasında kullanıldığı için kızılötesi kameralar, lazerleme birimleri gibi sensörleri içinde barındırmaktadır. Bu sebeple kullanılacak olan elektro-optik sistemin seçimi ihtiyaçlar doğrultusunda çeşitli kriterler kullanılarak yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında MALE sınıfı İHA'lara takılabilecek en uygun elektro-optik sistemin belirlenmesi amaçlanmıştır. Karar verilirken göz önünde bulundurulmuş kriterler literatür taraması, elektro-optik sistemlerin teknik özelliklerindeki en önemli noktalar ve uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda oluşturulmuştur. Bu tez çalışmasında kriterler ağırlıklandırılırken ve alternatiflere ait kriterler değerlendirilirken 5 uzmandan görüş alınmıştır. Bu uzmanların unvanları ve deneyim yılları Çizelge 5.1.'de gösterildiği gibidir. Anonimlik sebebiyle uzmanların çizelgede isimleri açıklanmamıştır. Bu doğrultuda MALE sınıfı İHA'lara uygun olan dört adet alternatif seçilmiştir. Alternatiflere ait kriter bilgileri, teknik dokümanlar ve uzman görüşleri kullanılarak oluşturulmuştur. Tez kapsamında hangi alternatifin MALE sınıfı İHA'larda en iyi performansı göstereceği ve en faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Çizelge 5.1. Uzmanların Deneyim Yılları

UZMANLAR	Unvan	Deneyim (Yıl)
Uzman 1	İHA Pilotu	12
Uzman 2	İHA Pilotu	10,5
Uzman 3	İHA Pilotu	11
Uzman 4	İHA Pilotu	12
Uzman 5	İHA Pilotu	8,5

5.2. Kriterlerin Belirlenmesi

Ağırlık(c_1): İHA'ların taşıdığı faydalı yüklerin ağırlığı ile havada kalış süresi arasında ters bir orantı mevcuttur. Bu nedenle faydalı yükün ağırlığı, İHA'ların etkin kullanımını doğrudan etkilemektedir. İHA'nın taşıyabileceği faydalı yükün sınırı çerçevesinde olabildiğince hafif fakat uygun yüklerin kullanımı, taşınabilecek faydalı yük çeşitliliğinin (mühimmat, E/H gereçleri, vb.) artmasını sağlayacaktır. Bunlara ek olarak faydalı yükün hafifliği, sistem entegrasyonunda aranan bir özelliktir.

Optik Çözünürlük(c_2): Optik çözünürlüğün yüksekliği bakılan noktanın daha detaylı olarak görüntülenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle optik çözünürlüğün yüksek olması, incelenilen alandaki nesnelere tespitini ve sınıflandırılmasını olumlu yönde etkilemektedir. Ayrıca optik çözünürlüğün artışıyla kamera ile incelenen uzak mesafelerde görüntü kaybı en aza indirgenir. Bu sayede İHA, mesafesini koruyabilme ve daha gizli hareket edebilme kabiliyetlerine sahip olmaktadır. Tüm bu özellikler optik çözünürlüğün yüksekliğinin önemini vurgulamakla birlikte İHA'nın daha etkin biçimde kullanılmasını sağlamaktadır.

IR Çözünürlük(c_3): IR (Kızılötesi) sensörler, nesnelere sıcaklık farklarından yararlanarak görüntü elde etiminde kullanılmaktadırlar. IR görüntüler nesnelere sıcaklık farkından oluştuğu için IR sensörler karanlık veya ışığın yetersiz olduğu ortamlarda dahi görüntü elde etme imkânını sunmaktadır. IR sensörler sayesinde bir İHA gece ve gündüz fark etmeksizin kullanılabilir. Bu sebeple IR çözünürlüğün yüksekliği, tıpkı optik çözünürlükte olduğu gibi, İHA'nın her koşulda net görüntü alabilmesi için oldukça önemlidir.

Arıza Verme Süresi(c_4): Bir sistemin sık aralıklarla arıza vermesi hiçbir koşulda istenilen bir durum değildir. Özellikle sistemin çalıştığı ve hemen müdahale etmenin mümkün olmadığı anlarda ortaya çıkan arızalar, vakit, para ve hammadde gibi kayıplara neden olabilir. İHA sistemleri görevlerini icra ederken oluşacak muhtemel bir aksaklık, geri dönülemez sorunlara yol açabileceği gibi görevin başarısını da olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle arıza verme süresinin olabildiğince uzun olması, İHA'lara entegre edilecek sensörlerde aranılan ve tercih edilen bir kriterdir.

Fiyat(c_5): İthalatın yüksek ücreti, Türkiye'de yerli İHA sistemlerinin üretimini teşvik etmiştir. Günümüzde giderek artan hammadde maliyetleri ve bu elementlerin dış politika ile olan kompleks bağlantıları, fiyatı problemdeki en önemli kriterlerden biri yapmaktadır. Savunma ve savaş sanayisinin hızla teknolojikleşmesi, İHA'ları askeri envanterlerin kritik birer parçası yaptığı için İHA'nın ve satın alınacak ürünlerin fiyatının düşük tutulması arzu edilen bir durumdur.

Lazerleme Mesafesi(c_6): Lazerleme, askeri alanlarda kullanılan güdümlü mühimmatların yönlendirilerek istenilen noktaya atış yapmasını sağlayan bir sistemdir. İHA'ların uzak mesafelerden lazerleme yapabilmesi, gizliliğin korumasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu nedenle lazerleme mesafesi, bir İHA için son derece kritiktir.

5.3. Önerilen Yaklaşım ile Alternatiflerin Sıralanması

Aşama 1- Kriterlerin Ağırlıklandırılması

ADIM 1: Uzmanlar tarafından problemin çözümü için önemli olduğu düşünülen kriterler belirlenir. Bunlar; Ağırlık(c_1), Optik Çözünürlük(c_2), IR Çözünürlük(c_3), Arıza Verme Süresi(c_4), Fiyat(c_5), Lazerleme Mesafesi(c_6).

ADIM 2: Uzmanlar kendi en iyi ve en kötü kriterleri belirler. Bu çalışmada tüm uzmanlar en iyi kriter olarak ağırlık (c_1) ve en kötü kriter fiyat (c_5) olarak belirlemiştir. Ardından alanında uzman 5 kişiye en iyi kriter ve en kötü kriterin diğer kriterlere göre değerlendirilmesi için anket çalışması yapılmıştır. Anket sonuçları Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.2. En İyi Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma Çizelgesi

UZMANLAR	EN İYİ KRİTER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
1	c_1	E	E	Çİ	Dİ	Eİ	ÇDİ
2	c_1	E	Çİ	Çİ	BDİ	Eİ	Dİ
3	c_1	E	BDİ	Çİ	Dİ	ÇDİ	Çİ
4	c_1	E	BDİ	BDİ	Dİ	ÇDİ	ÇDİ
5	c_1	E	Çİ	BDİ	ÇDİ	Eİ	Dİ

Çizelge 5.3. En Kötü Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma Çizelgesi

UZMANLAR	EN KÖTÜ KRİTER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
1	c_5	Eİ	Eİ	ÇDİ	Çİ	E	BDİ
2	c_5	Eİ	Çİ	Dİ	Çİ	E	BDİ
3	c_5	ÇDİ	ÇDİ	Dİ	E	E	BDİ
4	c_5	Eİ	ÇDİ	Dİ	Çİ	E	BDİ
5	c_5	ÇDİ	Çİ	Dİ	Dİ	E	Çİ

ADIM 3: Uzmanlara yapılan anket sonuçlarının ortalaması alınır.

Çizelge 5.4. En İyi Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma ve Ortalama Çizelgesi

UZMANLAR	EN İYİ KRİTER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
1	c_1	(1,1,1)	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)
2	c_1	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 1, 3/2)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)
3	c_1	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)
4	c_1	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)	(1/2, 1, 3/2)	(3/2, 2, 5/2)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
5	c_1	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 1, 3/2)	(2, 5/2, 3)	(5/2, 3, 7/2)	(3/2, 2, 5/2)
	Ortalama	(1, 1, 1)	(0,8, 1,2, 1,8)	(0,8, 1,3, 2)	(1,4, 1,9, 2,5)	(2,3, 2,8, 3,3)	(1,6, 2,1, 2,6)

Çizelge 5.5. En Kötü Kriterin Diğer Kriterlerle Karşılaştırma ve Ortalama Çizelgesi

UZMANLAR	EN KÖTÜ KRİTER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
1	c_5	(5/2, 3, 7/2)	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)
2	c_5	(5/2, 3, 7/2)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)
3	c_5	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1,1,1)	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)
4	c_5	(5/2, 3, 7/2)	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(1,1,1)	(1/2, 1, 3/2)
5	c_5	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)	(3/2, 2, 5/2)	(1,1,1)	(1, 3/2, 2)
	Ortalama	(2,3, 2,8, 3,3)	(1,7, 2,2, 2,7)	(1,6, 2,1, 2,6)	(1,1, 1,5, 1,9)	(1, 1, 1)	(0,6, 1,1, 2)

ADIM 4: Üçgen bulanık sayıların ortalaması Eşitlik (4.28)'deki formül kullanılarak Çizelge 5.6. ve Çizelge 5.7.'de gösterildiği gibi gri sayılara çevrilir. (A_B) ve (A_W) sıfırla bir arasında değişen alfa (α) değerlerine göre hesaplanır.

Çizelge 5.6. En İyi Kriter İçin Gri Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Vektörü

α	c_1c_1	c_1c_2	c_1c_3	c_1c_4	c_1c_5	c_1c_6
0	[1, 1]	[0,8, 1,8]	[0,8, 2]	[1,4, 2,5]	[2,3, 3,3]	[1,6, 2,6]
0,1	[1, 1]	[0,84, 1,74]	[0,85, 1,93]	[1,45, 2,44]	[2,35, 3,25]	[1,65, 2,55]
0,2	[1, 1]	[0,88, 1,68]	[0,9, 1,86]	[1,5, 2,38]	[2,4, 3,2]	[1,7, 2,5]
0,3	[1, 1]	[0,92, 1,62]	[0,95, 1,79]	[1,55, 2,32]	[2,45, 3,15]	[1,75, 2,45]
0,4	[1, 1]	[0,96, 1,56]	[1, 1,72]	[1,6, 2,26]	[2,5, 3,1]	[1,8, 2,4]
0,5	[1, 1]	[1, 1,5]	[1,05, 1,65]	[1,65, 2,2]	[2,55, 3,05]	[1,85, 2,35]
0,6	[1, 1]	[1,04, 1,44]	[1,1, 1,58]	[1,7, 2,14]	[2,6, 3]	[1,9, 2,3]
0,7	[1, 1]	[1,08, 1,38]	[1,15, 1,51]	[1,75, 2,08]	[2,65, 2,95]	[1,95, 2,25]
0,8	[1, 1]	[1,12, 1,32]	[1,2, 1,44]	[1,8, 2,02]	[2,7, 2,9]	[2, 2,2]
0,9	[1, 1]	[1,16, 1,26]	[1,25, 1,37]	[1,85, 1,96]	[2,75, 2,85]	[2,05, 2,15]
1	[1, 1]	[1,2, 1,2]	[1,3, 1,3]	[1,9, 1,9]	[2,8, 2,8]	[2,1, 2,1]

Çizelge 5.7. En Kötü Kriter İçin Gri Sayılarla Oluşturulan İkili Karşılaştırma Vektörü

α	c_1c_5	c_2c_5	c_3c_5	c_4c_5	c_5c_5	c_6c_5
0	[2,3, 3,3]	[1,7, 2,7]	[1,6, 2,6]	[1,1, 1,9]	[1, 1]	[0,6, 2]
0,1	[2,35, 3,25]	[1,75, 2,65]	[1,65, 2,55]	[1,14, 1,86]	[1, 1]	[0,65, 1,91]
0,2	[2,4, 3,2]	[1,8, 2,6]	[1,7, 2,5]	[1,18, 1,82]	[1, 1]	[0,7, 1,82]
0,3	[2,45, 3,15]	[1,85, 2,55]	[1,75, 2,45]	[1,22, 1,78]	[1, 1]	[0,75, 1,73]
0,4	[2,5, 3,1]	[1,9, 2,5]	[1,8, 2,4]	[1,26, 1,74]	[1, 1]	[0,8, 1,64]
0,5	[2,55, 3,05]	[1,95, 2,45]	[1,85, 2,35]	[1,3, 1,7]	[1, 1]	[0,85, 1,55]
0,6	[2,6, 3]	[2, 2,4]	[1,9, 2,3]	[1,34, 1,66]	[1, 1]	[0,9, 1,46]
0,7	[2,65, 2,95]	[2,05, 2,35]	[1,95, 2,25]	[1,38, 1,62]	[1, 1]	[0,95, 1,37]
0,8	[2,7, 2,9]	[2,1, 2,3]	[2, 2,2]	[1,42, 1,58]	[1, 1]	[1, 1,28]
0,9	[2,75, 2,85]	[2,15, 2,25]	[2,05, 2,15]	[1,46, 1,54]	[1, 1]	[1,05, 1,19]
1	[2,8, 2,8]	[2,2, 2,2]	[2,1, 2,1]	[1,5, 1,5]	[1, 1]	[1,1, 1,1]

ADIM 5: Gri sayıların merkezi farklı alfa miktarları için aynı olduğunda, Eşitlik (4.18)'deki problem tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}
& \text{Min } \varepsilon \\
& \left| \frac{W_1}{W_2} - 1,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_1}{W_3} - 1,30 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_1}{W_4} - 1,90 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_1}{W_5} - 2,80 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_1}{W_6} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_2}{W_5} - 2,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_3}{W_5} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_4}{W_5} - 1,50 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{W_6}{W_5} - 1,10 \right| \leq \varepsilon \\
& W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 1 \\
& W_j \geq 0, \forall j \in n
\end{aligned}$$

Yukarıdaki modelin çözümü için Lingo programından yararlanılmıştır. Çözüm sonucunda $\varepsilon = 0,1135944 \cong 0,114$ bulunmuştur. Eşitlik (4.19) ve Çizelge 4.4.'ten yararlanılarak tutarlılık oranı (TO) 0,038 olarak hesaplanmıştır. Tutarlılık oranının sıfıra yakın olması çözümün tutarlı olduğu göstermektedir.

$$TO = \frac{0,114}{3} = 0,038$$

ADIM 6: Farklı alfa (α) değerleri için Eşitlik (4.20) ve Eşitlik (4.21)'deki denklemler kullanılarak tüm kriterler için alt ve üst sınır değerleri hesaplanmıştır.

w_j kriteri için alt sınır

$$\begin{aligned}
& \text{Min } w_j \\
& \left| \frac{w_1}{w_2} - 1,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_3} - 1,30 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_4} - 1,90 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_5} - 2,80 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_6} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_2}{w_5} - 2,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_3}{w_5} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_4}{w_5} - 1,50 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_6}{w_5} - 1,10 \right| \leq \varepsilon
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 1 \\
& W_j \geq 0, \forall j \in n
\end{aligned}$$

w_j kriteri için üst sınır

$$\begin{aligned}
& \text{Max } w_j \\
& \left| \frac{w_1}{w_2} - 1,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_3} - 1,30 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_4} - 1,90 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_5} - 2,80 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_1}{w_6} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_2}{w_5} - 2,20 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_3}{w_5} - 2,10 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_4}{w_5} - 1,50 \right| \leq \varepsilon \\
& \left| \frac{w_6}{w_5} - 1,10 \right| \leq \varepsilon
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 = 1 \\
& W_j \geq 0, \forall j \in n
\end{aligned}$$

Yukarıdaki iki model Lingo programında çözümlenerek tüm kriterler için alt ve üst sınır değerleri hesaplanmıştır. Alt ve üst sınır değerlerin ağırlık merkezi, kriterleri sıralamak için kullanılır. Hesaplanan değerlerin optimal ağırlık değerleri Çizelge 5.8.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8. Optimum Ağırlık Değerleri

Kriterler	Alt Sınır	Üst Sınır	Merkezi Değer	Aralık
w_1	0,2457025	0,2594449	0,2525737	0,0137424
w_2	0,1948309	0,2186073	0,2067191	0,0237764
w_3	0,185491	0,2091602	0,1973256	0,0236692
w_4	0,1281459	0,1436172	0,13588155	0,0154713
w_5	0,0914518	0,0965513	0,09400155	0,0050995
w_6	0,110985	0,1172041	0,11409455	0,0062191

Kriterler Çizelge 5.8.'deki merkezi değerlere göre sıralanır ve kriter ağırlıkları bulunur.

$$w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_6 > w_5$$

Aşama 2- Alternatiflerin Sıralanması

ADIM 7: Alternatiflere ait kriterlerin c_1 ve c_5 değerleri teknik özelliklerinde değişmez değer olmasından sabit değerlerle oluşturulurken c_2 ve c_3 kriterleri uzmanlar tarafından değerlendirilmesi gereken kriterler olduğundan Çizelge 4.2.'de üçgen bulanık sayılarla ifade edilen dilsel değişkenler kullanılarak değerlendirilmiştir. c_4 ve c_6 kriterlerin değerlendirmesinde aralıklı değerler kullanılmıştır.

Öncelikle subjektif kriterler için uzman görüşleri toplanarak Çizelge 5.9. elde edilmiştir.

Çizelge 5.9. Subjektif Kriterlerin Anket Çizelgesi

UZMANLAR	SUBJEKTİF KRİTERLER	A_1	A_2	A_3	A_4
1	C_2	Gİ	İ	GZ	İ
	C_3	GZ	O	İ	Gİ
2	C_2	Gİ	Gİ	Z	İ
	C_3	O	İ	İ	Çİ
3	C_2	İ	O	GZ	Gİ
	C_3	Z	Gİ	Gİ	İ
4	C_2	O	Gİ	GZ	Gİ
	C_3	GZ	O	İ	Çİ
5	C_2	Gİ	İ	O	Çİ
	C_3	GZ	İ	Çİ	İ

Çizelge 5.10.'daki farklı değerlendirme türleri olan karar matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 5.10. Farklı Değerlendirme Türleriyle Oluşturulan Karar Matrisi

KRİTERLER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
ALTERNATİFLER						
A_1	49	(5,2, 6,5, 7,8)	(2,2, 3,5, 4,8)	[200-220]	1,2	[23-26]
A_2	51	(5,2, 6,5, 7,8)	(5, 6,2, 7,4)	[215-250]	1	[18-22]
A_3	55	(3,2, 4,4, 5,6)	(6,8, 7,9, 9)	[200-240]	0,8	[19-23]
A_4	96	(6,4, 7,6, 8,8)	(7, 8,1, 9,2)	[170-190]	1,8	[25-35]

ADIM 8: Homojen karar matrisinin elde edilmesi.

c_2 ve c_3 kriterlerin aralıklı sayılara çevirmesi için Eşitlik (4.33)'teki formülle alfa (α) kesme tekniği kullanılmıştır. Bu dönüşüm yapılırken α değeri 0,5 olarak alınmıştır. Çizelge 5.11.'deki aralıklı karar matrisi elde edilmiştir.

Çizelge 5.11. Aralıklı Sayılarla Oluşturulan Karar Matrisi

KRİTERLER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
ALTERNATİFLER						
A_1	[49-49]	[5,85-7,15]	[2,85-4,15]	[200-220]	[1,2-1,2]	[23-26]
A_2	[51-51]	[5,85-7,15]	[5,60-6,80]	[215-250]	[1-1]	[18-22]
A_3	[55-55]	[3,80-5,00]	[7,35-8,45]	[200-240]	[0,8-0,8]	[19-23]
A_4	[96-96]	[7,00-8,20]	[7,55-8,65]	[170-190]	[1,8-1,8]	[25-35]

ADIM 9: Eşitlik (4.34) ve Eşitlik (4.36) kullanılarak normalize edilmiş karar matrisi Çizelge 5.12.'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.12. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

KRİTERLER	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
ALTERNATİFLER	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)
A_1	[0,195, 0,195]	[0,234, 0,281]	[0,111, 0,161]	[0,237, 0,261]	[0,250, 0,250]	[0,241, 0,272]
A_2	[0,203, 0,203]	[0,234, 0,281]	[0,218, 0,265]	[0,255, 0,297]	[0,208, 0,208]	[0,188, 0,230]
A_3	[0,219, 0,219]	[0,152, 0,197]	[0,286, 0,329]	[0,237, 0,285]	[0,167, 0,167]	[0,199, 0,241]
A_4	[0,382, 0,382]	[0,280, 0,323]	[0,294, 0,337]	[0,202, 0,226]	[0,375, 0,375]	[0,262, 0,366]
w_j	[0,246, 0,259]	[0,195, 0,219]	[0,185, 0,209]	[0,128, 0,144]	[0,091, 0,097]	[0,111, 0,117]

Ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi Eşitlik (4.34) ve Eşitlik (4.36)'daki gibi hesaplanır. Buradaki kriter ağırlıkları (w_j) BWM hesaplanan kriter ağırlıklarıdır.

Çizelge 5.13. Ağırlıklı Normalize Edilmiş Karar Matrisi

KRİTERLER ALTERNATİFLER	c_1 (-)	c_2 (+)	c_3 (+)	c_4 (+)	c_5 (-)	c_6 (+)
A_1	[0,048, 0,051]	[0,046, 0,063]	[0,021, 0,034]	[0,030, 0,038]	[0,023, 0,024]	[0,027, 0,032]
A_2	[0,050, 0,053]	[0,046, 0,063]	[0,040, 0,055]	[0,033, 0,043]	[0,019, 0,020]	[0,021, 0,027]
A_3	[0,054, 0,057]	[0,030, 0,044]	[0,053, 0,069]	[0,030, 0,041]	[0,015, 0,016]	[0,022, 0,028]
A_4	[0,094, 0,099]	[0,055, 0,072]	[0,054, 0,070]	[0,026, 0,032]	[0,034, 0,036]	[0,029, 0,043]

ADIM 10: İdeal ve ideal olmayan çözüm indekslerinin bulunması için fayda ve maliyet kriterlerin toplamı Çizelge 5.14.'te gösterildiği hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14. Fayda ve Maliyet Kriterlerin Toplamı

	\hat{P}	\hat{R}
A_1	[0,123, 0,166]	[0,071, 0,075]
A_2	[0,140, 0,187]	[0,069, 0,073]
A_3	[0,135, 0,182]	[0,069, 0,073]
A_4	[0,164, 0,217]	[0,128, 0,135]

Bu adımda fayda ve maliyet kriterlerin toplamı kaba sayılardan Eşitlik (4.11) ve Eşitlik (4.15) kullanılarak net sayılara çevrilir.

1. Kaba sayıların normalize edilmiş matrisi

Çizelge 5.15. Kaba Sayılar Normalize Matrisi

	\hat{P}	\hat{R}
A_1	[0,000, 0,450]	[0,028, 0,087]
A_2	[0,173, 0,682]	[0,000, 0,058]
A_3	[0,126, 0,620]	[0,002, 0,060]
A_4	[0,432, 1,000]	[0,892, 1,000]

2. Toplam normalize net değeri (σ_j) Çizelge 5.16.'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16. σ_j Matrisi

	\hat{P}	\hat{R}
A_1	0,140	0,033
A_2	0,403	0,003
A_3	0,331	0,005
A_4	0,794	0,989

3. Nihai net form Çizelge 5.17.'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.17. Nihai Net Form

	\hat{P}	\hat{R}
A_1	0,136	0,071
A_2	0,161	0,069
A_3	0,154	0,069
A_4	0,198	0,135

ADIM 11: \hat{Q}_i ve \hat{N}_i değerlerinin hesaplanarak alternatifler Çizelge 5.18.'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.18. \hat{Q}_i ve \hat{N}_i Matrisi

	\hat{Q}_i	\hat{N}_i
A_1	0,233	89,42%
A_2	0,260	100,00%
A_3	0,253	97,32%
A_4	0,249	95,66%

Problemin çözüm işlemi tamamlandıktan sonra alternatiflerin sıralaması aşağıdaki şekilde gerçekleşmiştir.

$$A_2 > A_3 > A_4 > A_1$$

Yapılan işlem sonucunda 2 numaralı alternatif en iyi alternatif olarak seçilmiştir.

5.4. Sonuçların Karşılaştırılması

MALE sınıfı İHA'lara elektro-optik sistem seçimi problemi kapsamında değerlendirilen dört alternatif, önerilen yaklaşımın yanısıra klasik COPRAS ve klasik TOPSIS yöntemleri ile çözülmüştür. Her iki yöntemi uygulayabilmek amacıyla bulanık uzman görüşleri Eşitlik (4.8)'de verilen durulaştırma formülü kullanılarak aralık değerli değerlendirmeler ise ortalamaları alınarak gerçek sayılara dönüştürülmüştür. Klasik COPRAS ve TOPSIS yönteminde kriter ağırlıkları olarak ise Çizelge 5.8.'de verilen merkezi değerler kullanılmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında üç çözüm yönteminin sıralama sonuçlarında benzer sıralamalara ulaşılmıştır. Sonuçları Çizelge 5.19.'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.19. Önerilen Yaklaşım, Klasik COPRAS ve Klasik TOPSIS

	Önerilen Yaklaşım			Klasik COPRAS			TOPSIS	
	Q_i	P_i	Sıra	Q_i	P_i	Sıra	Skor	Sıra
A_1	0,233	89,42%	4	0,240	93,58%	3	0,58	3
A_2	0,260	100,00%	1	0,262	100,0%	1	0,72	1
A_3	0,253	97,32%	2	0,256	95,09%	2	0,66	2
A_4	0,249	95,66%	3	0,243	90,18%	4	0,47	4

Üç çözüm yöntemine de baktığımızda A_2 alternatifinin ilk sırada bulunduğu görülmektedir. Önerilen yaklaşımda A_2 alternatifini sırasıyla A_3 , A_4 ve A_1 alternatifleri izlemiştir. Klasik COPRAS ve TOPSIS yönteminde ise A_2 , A_3 , A_1 ve A_4 alternatiflerin sıralaması oluşmuştur.

Özetlemek gerekirse, üç yöntemde birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bu durum önerilen çözüm yönteminin tutarlı olduğunu göstermektedir.

5.5. Duyarlılık Analizi

Önerilen çözümün kararlılığını ve nihai sıralamayı test etmek için duyarlılık analizleri yapmak faydalıdır. Bu çalışmada, kriter ağırlıklarının aşağıda verilen formül kullanılarak artırılması ya da azaltılması sonucunda yeni ağırlık kümeleri elde edilmektedir:

$$w_i^{yeni} = w_i^{eski} \pm \alpha w_i^{eski}$$

α eski kriter ağırlığının yüzdesel olarak değişimidir. Bu tez çalışmasında senaryoları oluştururken her bir kriterin mevcut ağırlığı %10 artırılmış ve %10 azaltılmıştır. Bu artırma ve azaltma işlemi yapılırken diğer kriterlerin de mevcut büyüklükleri ile doğru oranda artırma veya azaltma işlemi yapılmıştır.

Çizelge 5.20. Farklı Ağırlık Senaryoları

Senaryolar	Açıklama	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
Senaryo0	Eşit	[0,167, 0,167]	[0,167, 0,167]	[0,167, 0,167]	[0,167, 0,167]	[0,167, 0,167]	[0,167, 0,167]
Senaryo1	w_1 0,1 azaltıldı	[0,146, 0,159]	[0,222, 0,246]	[0,212, 0,236]	[0,146, 0,162]	[0,104, 0,109]	[0,127, 0,132]
Senaryo2	w_1 0,1 artırıldı	[0,346, 0,359]	[0,167, 0,191]	[0,159, 0,183]	[0,110, 0,125]	[0,079, 0,084]	[0,095, 0,102]
Senaryo3	w_2 0,1 azaltıldı	[0,278, 0,291]	[0,095, 0,119]	[0,21, 0,234]	[0,145, 0,161]	[0,103, 0,108]	[0,126, 0,131]
Senaryo4	w_2 0,1 artırıldı	[0,213, 0,228]	[0,295, 0,319]	[0,161, 0,184]	[0,111, 0,126]	[0,079, 0,085]	[0,096, 0,103]
Senaryo5	w_3 0,1 azaltıldı	[0,278, 0,291]	[0,22, 0,245]	[0,085, 0,109]	[0,145, 0,161]	[0,103, 0,108]	[0,125, 0,131]
Senaryo6	w_3 0,1 artırıldı	[0,214, 0,228]	[0,17, 0,192]	[0,285, 0,309]	[0,112, 0,126]	[0,08, 0,085]	[0,097, 0,103]
Senaryo7	w_4 0,1 azaltıldı	[0,275, 0,288]	[0,218, 0,243]	[0,208, 0,232]	[0,028, 0,044]	[0,102, 0,107]	[0,124, 0,13]
Senaryo8	w_4 0,1 artırıldı	[0,216, 0,231]	[0,171, 0,194]	[0,163, 0,186]	[0,228, 0,244]	[0,08, 0,086]	[0,098, 0,104]
Senaryo9	w_5 0,1 azaltıldı	[0,272, 0,286]	[0,215, 0,241]	[0,205, 0,23]	[0,142, 0,158]	[0,00, 0,00]	[0,123, 0,129]
Senaryo10	w_5 0,1 artırıldı	[0,217, 0,232]	[0,172, 0,196]	[0,164, 0,187]	[0,113, 0,128]	[0,191, 0,197]	[0,098, 0,105]
Senaryo11	w_6 0,1 azaltıldı	[0,275, 0,287]	[0,218, 0,242]	[0,207, 0,232]	[0,143, 0,159]	[0,102, 0,107]	[0,011, 0,017]
Senaryo12	w_6 0,1 artırıldı	[0,217, 0,231]	[0,172, 0,195]	[0,164, 0,187]	[0,113, 0,128]	[0,081, 0,086]	[0,211, 0,217]

Alternatiflerin seçilmesi için kriterlerin ağırlıkları değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu aynı zamanda sonucun güvenilirliğini çapraz kontrol etmeye imkân sağlamıştır. Çizelge 5.21.'de gösterildiği gibi kriter ağırlıklarındaki küçük değişikliklerin alternatiflerin sıralaması üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.21. Farklı Senaryolara Ait Alternatif Sıralaması

Kriterler	A_1	A_2	A_3	A_4
Mevcut durum	4	1	2	3
Senaryo0	4	2	1	3
Senaryo1	4	2	3	1
Senaryo2	3	1	2	4
Senaryo3	4	2	1	3
Senaryo4	4	1	3	2
Senaryo5	2	1	3	4
Senaryo6	4	3	1	2
Senaryo7	4	1	3	2
Senaryo8	4	1	2	3
Senaryo9	4	2	3	1
Senaryo10	4	2	1	3
Senaryo11	4	1	2	3
Senaryo12	4	2	3	1

Özetle, kriterlerin ağırlıklarında ciddi değişiklikler yapılmadığı sürece, sıralama tutarlı kalır. Bu nedenle, duyarlılık analizi, bu çalışmada 4 alternatif sıralamasında tutarlılık göstermektedir. A_2 alternatifi bir senaryo hariç (Senaryo6) kalan tüm senaryolarda ilk iki sırada yer almaktadır ve bu nedenle karar vericiler tarafından en iyi alternatif olarak seçilebilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında MALE sınıfı İHA'larda kullanılacak olan elektro-optik sistem seçimi ele alınmıştır. Bu problemin çözümü için bütünleşik kaba küme tabanlı BWM-COPRAS ÇKKV yöntemini kullanmıştır. Literatürde havacılık alanında ÇKKV ile yapılan çalışmalar incelendiğinde bu çalışmaların büyük bir bölümünün ana platform seçimine yönelik olduğu görülmektedir. BWM-COPRAS ÇKKV metotları çeşitli alanlardaki seçimler için daha önce kullanılmış olsa da bütünleşik kaba küme tabanlı BWM-COPRAS literatürde spesifik olarak İHA'larda elektro-optik sistem seçiminde ilk defa kullanılmıştır.

Elektro-optik sistemler, IR ve lazerleme sensörleri gibi stratejik seviyedeki bir İHA'nın görevini efektif ve başarılı olarak gerçekleştirebilmesi için gerekli unsurlardan oluştuğu için en uygun elektro-optik sistem seçimi oldukça kritiktir. Ek olarak, yapılacak olan yanlış bir seçim, maddi zaiyat ve görev başarısızlığı gibi olumsuz sonuçları beraberinde getirebilir. Bu nedenle elektro-optik sistem seçiminin kolaylaştırılması önemlidir.

MALE sınıfı İHA'larda elektro-optik sistem seçimi problemi için BWM ve COPRAS yöntemlerinden oluşan entegre bir yaklaşım kullanılmıştır. Öncelikle uzman görüşleri ve literatür taraması ışığında ağırlık, arıza verme süresi, fiyat, IR çözünürlük, lazerleme mesafesi ve optik çözünürlük olmak üzere altı adet kriter belirlenmiştir. Belirlenmiş bu altı kriter, hazırlanmış bir anket ile uzmanlara sunulmuş ve bulanık BWM ile kriterler ağırlıklandırılmıştır. Bu anket sonuçlarına göre en önemli kriter ağırlık olarak tespit edilmiştir. Ağırlık, İHA'nın havada kalma süresi ve diğer faydalı yüklerin taşınmasını doğrudan etkilediği için elektro-optik sistem seçiminde en önemli kriterdir. Ağırlık kriterini sırası ile optik çözünürlük, IR çözünürlük, arıza verme süresi, lazerleme mesafesi ve fiyat takip etmektedir. Fakat not edilmelidir ki bu kriter ağırlıkları uzmanlara bağlı olduğu için farklı iklimsel ve bölgesel şartlarda farklı alanlarda görevlerini icra eden uzmanların görüşleri değerlendirildiğinde bu kriter ağırlıklarında farklılıklar gözlemlenebilir.

Ardından uzman görüşleri ve teknik özellikler göz önünde bulundurularak dört adet elektro-optik sistem seçilmiştir. Teknik özellikler her ne kadar önemli olsalar da kendi başlarına yetersiz olabildikleri için bu aşamada alanında tecrübesi olan uzmanların görüşlerine de başvurulmuştur. Seçilmiş olan bu dört elektro-optik sistem, kaba küme

tabanlı COPRAS metodu ile önceliklendirilmiştir. Sonuç olarak A_2 alternatifinin, MALE sınıfı İHA’larda kullanılmak için en uygun seçenek olduğuna karar verilmiştir. Firma yetkililerinden alınan fiyat bilgilerinin gizli kalmasını istemeleri nedeniyle bu elektro-optik sistemlerin adları verilmemiştir.

Bu tez MALE sınıfı İHA’larda elektro-optik sistem seçimi ile ilgilenmiş olsa da elektro-optik sistemler farklı platformlar için de oldukça kritik bir elementtir. Örneğin gemilerde kullanılan elektro-optik sistemlerin seçiminde sistemin nem faktöründen etkilenmemesi veya farklı İHA sınıflarında farklı faktörler göz önünde bulundurulacağı için çeşitli ÇKKV yöntemleri ile kriter ağırlıklandırmaları ve seçim sonuçları gözlemlenebilir. Bu nedenle gelecekte bu çalışmaların farklı platformlarda farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak yapılması literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Aleksander, K. C. (2018). Military use of unmanned aerial vehicles-a historical study. *Safety & Defense*, 4, 17-21.
- Al-Jarrah, M., Alsusa, E., Al-Dweik, A., ve So, D. K. (2021). Capacity analysis of IRS-based UAV communications with imperfect phase compensation. *IEEE Wireless Communications Letters*, 10(7), 1479-1483.
- AmoozadMahdiraji, H., Arzaghi, S., Stauskis, G., ve Zavadskas, E. (2018). A Hybrid Fuzzy BWM-COPRAS Method for Analyzing Key Factors of Sustainable Architecture. *Sustainability*, 10(5), 1-26.
- Ariante, G., Papa, U., Ponte, S., & Del Core, G. (2020). Velocity and attitude estimation of a small unmanned aircraft with micro Pitot tube and Inertial Measurement Unit (IMU). *2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 314-318
- Arjomandi, M., Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., ve Zhou, T. (2006). Classification of unmanned aerial vehicles. Report for Mechanical Engineering class, University of Adelaide, Adelaide, Australia, 1-48.
- ASELSAN (2022a). Erişim adresi: <https://www.ASELSAN.com.tr/tr/cozumlerimiz/elektro-optik-sistemler>
- ASELSAN (2022b). ASELSAN Şirketinin Ürettiği "Saka-1" Dört Rotorlu İHA [Fotoğraf]. <https://www.ASELSAN.com.tr/tr/inovasyon/haber-detay/ASELSAN-insansiz-hava-araclari-ailesi-7442>
- ASELSAN (2022c). ASELSAN Şirketinin Ürettiği "ASELFLIR-300T" Elektro-optik Sistemi [Fotoğraf]. <https://www.ASELSAN.com.tr/en/capabilities/avionics-and-navigation-systems/electrooptical-systems/aselflir300t-electrooptical-reconnaissance-surveillance-and-targeting-system>
- ASELSAN (2022d). ASELSAN Şirketi Tarafından İHA'lar İçin Tasarlanan SAR [Fotoğraf]. <https://www.ASELSAN.com.tr/en/capabilities/radar-systems/reconnaissance-surveillance-radars/sar-synthetic-aperture-radar>
- ASELSAN (2022a). Erişim adresi: <https://www.ASELSAN.com.tr/tr/cozumlerimiz/elektro-optik-sistemler>
- Aslan, M. (2017). *Sınıf-I Küçük İnsansız Hava Araçlarında Elektro-Optik ve Kızılötesi Sensör Tercihinde Çok Ölçütlü Karar Verme Tekniklerinin Uygulanması*. (Yayımlanmamış yüksek lisans), Erciyes Üniversitesi FEN Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Aşan, H. ve Ayçin, E. (2020). Kurumsal Kaynak Planlama Sistemlerinin Seçimindeki Kriterlerin Best-Worst Metodu ile Değerlendirilmesi. *Bitlis Eren Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Akademik İzdüşüm Dergisi*, 5(2), 114-124.
- Aviationmuseum (2022). DH82B Queen Bee [Fotoğraf]. Aviationmuseum. <http://www.aviationmuseum.eu/Blogvorn/de-havilland-aircraft-museum/dh82b-queen-bee-1f789r2-k-raf/>
- Awais, M., Li, W., Cheema, M. J. M., Zaman, Q. U., Shaheen, A., Aslam, B., ... ve Liu, C. (2022). UAV-based remote sensing in plant stress imagine using high-resolution thermal sensor for digital agriculture practices: a meta-review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Banik, D., Hossain, N. U. I., Govindan, K., Nur, F., ve Babski-Reeves, K. (2022). A decision support model for selecting unmanned aerial vehicle for medical supplies:

- context of COVID-19 pandemic. *The International Journal of Logistics Management*.
- Barnhart, R. K., Marshall, D. M., ve Shappee, E. (Der.). (2021). *Introduction to Unmanned Aircraft Systems*. CRC Press.
- Baykar (2022). TB-2 İHA'sına Ait GCS [Fotoğraf]. <https://baykartech.com/tr/uav/bayraktar-tb2/>
- Beard, R., Kingston, D., Quigley, M., Snyder, D., Christiansen, R., Johnson, W., ... ve Goodrich, M. (2005). Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2(1), 92-108.
- Bento M. (2008). Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Inside GNSS*, 1, 54-61.
- Borg, S. (2020). Below the radar. Examining a Small State's Usage of Tactical Unmanned Aerial Vehicles. *Defence Studies*, 20(3), 185-201.
- Cao, Y., Bu, X., Yang, H., ve Song, Y. (2022). Design and comparison of fault monitoring methods in attitude measurement based on uniaxial infrared focal plane array. *Measurement*, 202, 1-19.
- Carholt, O., Fresk, E., Andrikopoulos, G., & Nikolakopoulos, G. (2016). Design modelling and control of a Single Rotor UAV. 2016 *24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 840-845
- Cengiz, Ç., ve Çelik, B. (2021). İnsansız Hava Araçlarında Elektro-Optik Kamera Yerleşim Tasarımı. *Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 3(1), 53-62.
- Chaglla E, J. S., Celik, N., ve Balachandran, W. (2018). Measurement of core body temperature using graphene-inked infrared thermopile sensor. *Sensors*, 18(10).
- Chen, C., Tian, Y., Lin, L., Chen, S., Li, H., Wang, Y., ve Su, K. (2020). Obtaining world coordinate information of UAV in GNSS denied environments. *Sensors*, 20(8).
- Chiaraviglio, L., Amorosi, L., Blefari-Melazzi, N., Dell'Olmo, P., Natalino, C., & Monti, P. (2018). Optimal Design of 5G Networks in Rural Zones with UAVs Optical Rings Solar Panels and Batteries. *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1-4.
- Chriki, A., Touati, H., Snoussi, H., & Kamoun, F. (2019). UAV-GCS Centralized Data-Oriented Communication Architecture for Crowd Surveillance Applications. *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2064-2069.
- Cirigliano, D. (2017). *Engine-type and propulsion-configuration selections for long-duration UAV flights*. (Yüksek lisans tezi), Journal of Propulsion.
- Coban, S., ve Oktay, T. (2017). A Review Of Tactical Unmanned Aerial Vehicle Design Studies. *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 1, 30-35.
- Das, D., Bhattacharya, S., ve Sarkar, B. (2019). Material selection in product design under risk and uncertainty introducing the conditional logit in the madm framework. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 36(7), 440-450.
- Davies, D., CameronBolam, R., Vagapov, Y., & Excell, P. (2018). Ultrasonic sensor for UAV flight navigation. *2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, 1-7.
- Debnath, A., Roy, J., Kar, S., Zavadskas, E. K., & Antucheviciene, J. (2017). A Hybrid MCDM Approach for Strategic Project Portfolio Selection of Agro By-Products. *Sustainability*, 9(8).

- Deveci, M., CerenÖner, S., EnisCiftci, M., Özcan, E., ve Pamucar, D. (2022). Interval type-2 hesitant fuzzy Entropy-based WASPAS approach for aircraft type selection. *Applied Soft Computing*, 114.
- Deveci, M., Özcan, E., John, R., Pamucar, D., & Karaman, H. (2021). Offshore wind farm site selection using interval rough numbers based Best-Worst Method and MARCOS. *Applied Soft Computing*, 109, 107532.
- DiVita, J., Morris, R. L., ve Rodas, M. O. (2013). A Queueing Model for Supervisory Control of Unmanned Autonomous Vehicles. Space and Naval Warfare Systems Center Pacific (SSC Pacific)
- Dudek, M., Tomczyk, P., Wygonik, P., Korkosz, M., Bogusz, P., ve Lis, B. (2013). Hybrid fuel cell-battery system as a main power unit for small unmanned aerial vehicles (UAV). *International Journal of Electrochemical Science*, 8(6), 8442-8463.
- Düz, S. (2020, Ekim). Türkiye'nin gökyüzündeki yeni gücü İHA'lar. *SETA*, 7-25
- Ebeid, E., Skriver, M., & Jin, J. (2017). A Survey on Open-Source Flight Control Platforms of Unmanned Aerial Vehicle. *2017 Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*, 396-402.
- Ecer, F., ve Küçük, O. (2007). Bulanık TOPSIS kullanılarak tedarikçilerin değerlendirilmesi ve Erzurum'da bir uygulama. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 45-65.
- El-Faham, M. M., Mostafa, A. M., ve Nasr, G. M. (2020). Unmanned aerial vehicle (UAV) manufacturing materials: Synthesis, spectroscopic characterization and dynamic mechanical analysis (DMA). *Journal of Molecular Structure*, 1201.
- Ervural, B., & Kabak, Ö. (2019). A cumulative belief degree approach for group decision-making problems with heterogeneous information. *Expert Systems*, 1-28.
- Fahlstrom, P. G., Gleason, T. J., ve Sadraey, M. H. (2022). *Introduction to UAV Systems*. John Wiley & Sons.
- Fiorio, M., Galatolo, R., Di Rito, G., Giuseppe, M., ve Armando, C. (2021). Sense and avoid system for a mini UAV based on data fusion between electro-optical and radar sensors. *XXVI International Congress of the Italian Association of Aeronautics and Astronautics*, 595-604.
- General Atomics (2022). MQ-9 Reaper İnsansız Hava Aracı [Fotoğraf]. <https://www.gasi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a#images-1>
- Glade, D. (2000). *Unmanned aerial vehicles: Implications for military operations* (No. 16). Center for Strategy and Technology, Air War College.
- Gmkas. (2022). Erişim adresi: <https://gmkas.com/elektro-optik-sistemler/>
- Gupta, S. G., Ghonge, D., ve Jawandhiya, P. M. (2013). Review of unmanned aircraft system (UAS). *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering ve Technology (IJARCET)*, 2.
- Hatamleh, K. S., Flores-Abad, A., Xie, P., Martinez, G., Herrera, B., ve Ma, O. (2011). *Development of an inertial measurement unit for unmanned aerial vehicles*. New Mexico State University Las Cruces Department of Mechanical and Aerospace Engineering.
- Hazry, D., Sofian, M., ve Rosbi, M. (2009). *Study of inertial measurement unit sensor*. 2009 International Conference on Man-Machine Systems, 1-4.
- Hodgkinson, D., ve Johnston, R. (2018). *Aviation Law and Drones: Unmanned Aircraft and the Future of Aviation*. Routledge.

- Hu, S., Yuan, X., Ni, W., ve Wang, X. (2022). Trajectory Planning of Cellular-Connected UAV for Communication-Assisted Radar Sensing. *Transactions on Communications*, 70(9), 6385-6396.
- Hughenoltz, C. H., Moorman, B. J., Riddell, K., ve Whitehead, K. (2012). Small unmanned aircraft systems for remote sensing and earth science research. *Transactions American Geophysical Union*, 93(25), 236-236.
- Jacob, J. D., Chilson, P. B., Houston, A. L., ve Smith, S. W. (2018). Considerations for atmospheric measurements with small unmanned aircraft systems. *Atmosphere*, 9(7), 252.
- JAPCC (Joint Air Power Competence Centre), 2010. *Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO*.
- Jara-Olmedo, A., Medina-Pazmiño, W., Mesías, R., Araujo-Villaroel, B., Aguilar, W. G., ve Pardo, J. A. (2018). *2018 Interface of optimal electro-optical/infrared for unmanned aerial vehicles*. International Conference of Research Applied to Defense and Security, 372-380.
- Jha, A. R. (2016). *Theory, Design, and Applications of Unmanned Aerial Vehicles*. CRC Press.
- Ji, Q., Zong, S., ve Yang, J. (2020). Application and development trend of laser technology in military field. *ICOSM 2020: Optoelectronic Science and Materials*, 32-40.
- Jung, S., ve Kim, H. (2017). Autoland mission planning of the IT convergence hoverable UAV. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(6), 9-16.
- Kahraman, C., Cebeci, U., ve 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.
- Karaağaç, C. (2012). *İnsansız hava aracı sistemleri: Gökyüzünün yeni yırtıcı kuşları*
- Karaağaç, C. (2014). Geleceğin Harekât Ortamında İHA Sistemleri: Askeri Uygulamalar ve Teknoloji Gereksinimleri. III. Ulusal Havacılıkta İleri Teknolojiler Konferansı, İstanbul.
- Karaşan, A., ve Kaya, İ. (2019). Neutrosophic TOPSIS Method for Technology Evaluation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 665-673.
- Keane, J. F., ve Carr, S. S. (2013). A brief history of early unmanned aircraft. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 32(3), 558-571.
- Khan, M. J., Khan, H. S., Yousaf, A., Khurshid, K., ve Abbas, A. (2018). Modern trends in hyperspectral image analysis: A review. *IEEE access*, 6, 14118-14129.
- Khan, N. A., Brohi, S. N., ve Jhanjhi, N. Z. (2020). UAV's applications, architecture, security issues and attack scenarios: a survey. *Intelligent Computing and Innovation on Data Science*, 753-760. Springer, Singapore.
- Kramer, M. S., ve Kuhnert, K. D. (2018). Multi-sensor fusion for UAV collision avoidance. *Proceedings of the 2018 2nd International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering*, 5-12.
- Krasuski, K., ve Wierzbicki, D. (2021). Application the SBAS/EGNOS Corrections in UAV Positioning. *Energies*, 14(3), 739.
- Kumar, S. (2020). A brief review on Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV).
- Larin, V., Chichikalo, N., Larina, K., ve Rozorinov, H. (2019). Investigation of the Accuracy of Barometric Pressure Sensors to Assessment of Their Possibility for UAVs Landing. *2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 71-74.

- Lee, B., Kwon, S., Park, P., ve Kim, K. (2014). Active power management system for an unmanned aerial vehicle powered by solar cells, a fuel cell, and batteries. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 50(4), 3167-3177.
- Lee, B., Park, P., Kim, C., Yang, S., ve Ahn, S. (2012). Power managements of a hybrid electric propulsion system for UAVs. *Journal of mechanical science and technology*, 26(8), 2291-2299.
- Li, B., Fei, Z., ve Zhang, Y. (2018). UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends. *Internet of Things Journal*, 6(2), 2241-2263.
- Liu, Z. (2022). Introduction to The Implementation Principle of A UAV Inspection Method Based on ADRC Control Mode. *Academic Journal of Science and Technology*, 2(1), 70-73.
- Martins, B. H., Suzuki, M., Yastika, P. E., ve Shimizu, N. (2020). Ground surface deformation detection in complex landslide area-bobonaro, Timor-Leste-using SBAS DinSAR, UAV photogrammetry, and field observations. *Geosciences*, 10(6), 245.
- Masoomi, B., GhasemianSahebi, I., Fathi, M., Yıldırım, F., ve Ghorbani, S. (2022). Strategic supplier selection for renewable energy supply chain under green capabilities (fuzzy BWM-WASPAS-COPRAS approach). *Energy Strategy Reviews*, 40.
- Miller, R., Mooty, G., ve Hilkert, J. M. (2013). Gimbal system configurations and line-of-sight control techniques for small UAV applications. *Airborne intelligence, surveillance, reconnaissance (ISR) systems and applications X*, 8713, 39-53.
- Mulliner, E., Smallbone, K., ve Maliene, V. (2013). An Assessment of Sustainable Housing Affordability Using a Multiple Criteria Decision Making Method. *Omega*, 41(2), 270-279.
- Nair, B. T. (2021). Will Drones Revolutionize Health Care and Create Landmark Moments in History?. *Journal of Medical Academics*, 4(1), 5-6.
- NASA (2022). Helios İnsansız Hava Aracı [Fotoğraf]. <https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/ResearchUpdate/Helios/Previews/index.html>
- Newcome, L. R. (2004). *Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles*. Aiaa.
- Northropgrumman (2022a). "Hunter" İnsansız Hava Aracı [Fotoğraf]. <https://news.northropgrumman.com/multimedia/photo/autonomous-systems/mq-5b-hunter>
- Northropgrumman (2022b). Global Hawk [Fotoğraf]. <https://www.northropgrumman.com/what-we-do/air/global-hawk/>
- Northropgrumman (2022c). Avidrone Aerospace Şirketinin Ürettiği "210 TL" İkiz Rotorlu İHA [Fotoğraf]. <https://avdesodrone.com/avidrone-aerospacein-benzersiz-tasarimiyla-cift-rotorlu-kargo-ihasi-210tl/>
- Okpaleke, F. N. (2021). *The role of Unmanned Aerial Vehicles (drones) in US grand strategy*. (Doktora tezi). The University of Waikato.
- Pamucar, D., Chatterjee, K., & Kazimieras Zavadskas, E. (2018). Assessment of third-party logistics provider using multi-criteria decision-making approach based on interval rough numbers. *Computers & Industrial Engineering*.
- Pamučar, D., ve Savin, L. (2020). Multiple-criteria model for optimal off-road vehicle selection for passenger transportation: BWM-COPRAS model. *Vojnotehnicki glasnik*, 68(1), 28-64

- Pamucar, D., Petrovic, I., Ćirović, G. ve Stević, Z. (2022). An extension of the MABAC and OS model using linguistic neutrosophic numbers: selection of unmanned aircraft for fighting forest fires. *Transport*, 37, 73-97.
- Panahi, A., Zanjani, M. V., Yousefi, S., Fazli, N., ve Aarabi, J. (2022). Derivation of structural weight estimation for Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV). *The Aeronautical Journal*, 126(1299), 813-829.
- Patrizi, G., Catelani, M., Ciani, L., Carratù, M., Pietrosanto, A., Sommella, P., ... ve Capriglione, D. (2022). Investigation of the effects of temperature variations on Inertial Measurement Units for UAV. *2022 9th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, 54-58.
- Pawlak, Z. (2012). *Rough sets: Theoretical aspects of reasoning about data: Vol. 9*. Springer Science & Business Media.
- Petkovic, I., Simon, J., Petkovic, A., ve Covic, Z. (2017). Selection of unmanned aerial vehicle for precision agriculture with multi-criteria decision making algorithm. *2017 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*.
- Phang, S. K., Li, K., Chen, B. M., Lee, T. H., Valavanis, K. P., ve Vachtsevanos, G. J. (2014). Systematic design methodology and construction of micro aerial quadrotor vehicles. In *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles* içinde 181-206. Springer.
- Pimaair (2022). AQM-34L FIREBEE İnsansız Keşif Uçağı [Fotoğraf]. Pimaair <https://pimaair.org/museum-aircraft/teledyne-ryan-aqm-34l-firebee/>
- Podvezko, V. (2011). The Comparative Analysis of MCDA Methods SAW and COPRAS. *Inzinerine Ekonomika-Engineering Economics*, 22(2), 134-146.
- Prudden, S., Fisher, A., Marino, M., Mohamed, A., Watkins, S., ve Wild, G. (2018). Measuring wind with small unmanned aircraft systems. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 176, 197-210.
- PS, R., ve Jeyan, M. L. (2020). Mini Unmanned Aerial Systems (UAV)-A Review of the Parameters for Classification of a Mini UAV. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 7(3), 5.
- Qin, Y., Kishk, M. A., ve Alouini, M. S. (2020). Performance evaluation of UAV-enabled cellular networks with battery-limited drones. *Communications Letters*, 24(12), 2664-2668.
- Raj, A., ve Sah, B. (2019). Analyzing critical success factors for implementation of drones in the logistics sector using grey-DEMATEL based approach. *Computers & Industrial Engineering*, 138.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49-57.
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126-130.
- Sanders, R. (2003). An israeli military innovation: Uavs, 1-6.
- Shen, H., Lin, D., ve Song, T. (2022). Object Detection Deployed on UAVs for Oblique Images by Fusing IMU Information. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, 1-5.
- Shippert, P. (2003). Introduction to hyperspectral image analysis. *Online Journal of Space Communication*, 2(3), 8.
- Song, W., Ming, X., & Liu, H. C. (2017). Identifying critical risk factors of sustainable supply chain management: A rough strength-relation analysis method. *Journal of Cleaner Production*, 143, 100–115.
- Song, W., Ming, X., & Wu, Z. (2012). An integrated rough number-based approach to design concept evaluation under subjective environments. *Journal of Engineering Design*, 24 (5), 320–341.

- Song, X., Liao, S., Wang, X., Lu, C., Wang, M., ve Miao, C. (2019). A high precision autonomous navigation algorithm of UAV based on MEMS sensor. *2019 International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*, 904-908.
- Steinvall, O. (2021). The potential role of lasers in combating UAVs, part 1: detection, tracking, and recognition of UAVs. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVIII and Electro-Optical Remote Sensing XV*, 11866,174-185.
- Stević, Ž., Durmić, E., Gajić, M., Pamučar, D., & Puška, A. (2019). A Novel Multi-Criteria Decision-Making Model: Interval Rough SAW Method for Sustainable Supplier Selection. *Information*, 10(10), 292.
- Stewart, M., Martin, S., ve Barrera, N. (2021). Unmanned aerial vehicles: fundamentals, components, mechanics, and regulations. *Unmanned Aerial Vehicles*, 1-70.
- Şen, O., ve Akarslan, H. (2020). Terrorist Use of Unmanned Aerial Vehicles: Turkey's Example. *Defence Against Terrorism Review*, 13.
- Tledyneflir (2022). Teledyne Flir Şirketine Ait "Black Honer" Mikro İHA [Fotoğraf]. <https://www.flir.com/products/black-hornet-prs/>
- Toro, F. G., ve Tsourdos, A. (Der.). (2018). UAV sensors for environmental monitoring. MDPI.
- Tsaur, S.-H., Chang, T.-Y., ve Yen, C.-H. (2002). The evaluation of airline service quality by fuzzy. *MCDM*, 23, 107-115
- Tzeng, G. H. Ve Huang, J. J.. (2011). *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. Chapman and Hall/CRC : New York.
- Uygurtürk, H. (2015). BANKALARIN İNTERNET ŞUBELERİNİN BULANIK MOORA YÖNTEMİ İLE DEĞERLENDİRİLMESİ. *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, 11(25), 115-128.
- Valente, J., Roldán, J. J., Garzón, M., ve Barrientos, A. (2019). Towards Airborne Thermography via Low-Cost Thermopile Infrared Sensors. *Drones*, 3(1), 30.
- Wellig, P., Speirs, P., Schuepbach, C., Oechslin, R., Renker, M., Boeniger, U., ve Pratisto, H. (2018). Radar systems and challenges for C-UAV. *2018 19th International Radar Symposium (IRS)*, 1-8.
- Werner, A., Kreutzmann, L., Stephanie, G., ve Cynthia, S. (2020). The New Quality of Aviation Unmanned Aerial Vehicles (Uav) Prevent Psychological Stress of Military Drone Operators. *Clinical Medicine Research*, 9(1), 25.
- Wikimedia (2022). "ANKA" İnsansız Hava Aracı [Fotoğraf]. Wikimedia <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TAI-ANKA-UAV-FAR14-3659.JPG#/media/Dosya:TAI-ANKA-UAV-FAR14-3659.JPG>
- Wordpress (2022). İlk Hava Torpidosu "Bug" [Fotoğraf]. Wordpress. <https://travelforaircraft.wordpress.com/2011/04/01/first-cruise-missile-%E2%80%94-the-kettering-bug/>
- Wu, Y., Niu, X., Du, J., Chang, L., Tang, H., ve Zhang, H. (2019). Artificial marker and MEMS IMU-based pose estimation method to meet multirotor UAV landing requirements. *Sensors*, 19(24), 5428.
- Xian-Zhong, G., Zhong-Xi, H., Zheng, G., Xiong-Feng, Z., Jian-Xia, L., ve Xiao-Qian, C. (2013). Parameters determination for concept design of solar?powered, high?altitude long?endurance UAV. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.
- Yang, X., Dong, L., Liaoni, W., ve Yangyang, S. (2015). Design and implementation of twin-rotor tail-sitter UAV. *2015 IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 406-410.

- Yasin, J. N., Mohamed, S. A., Haghbayan, M. H., Heikkonen, J., Tenhunen, H., ve Plosila, J. (2020). Unmanned aerial vehicles (uavs): Collision avoidance systems and approaches. *IEEE access*, 8, 105139-105155.
- Yin, D., ve Wang, L. (2019). Individual mangrove tree measurement using UAV-based LIDAR data: Possibilities and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 223, 34-49.
- Yu, J., Cho, B. M., Park, K. J., ve Kim, H. (2018). Simultaneous attack on drone and GCS in UAV systems. *2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 5-7.
- Yu, X., Li, C., ve Yen, G. G. (2021). A knee-guided differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle path planning in disaster management. *Applied Soft Computing*, 98.
- Yun, Q., Song, B., ve Pei, Y. (2020). Modeling the impact of high energy laser weapon on the mission effectiveness of unmanned combat aerial vehicles. *IEEE Access*, 8, 32246-32257.
- Zaloga, S. J. (2011). *Unmanned aerial vehicles: robotic air warfare 1917-2007*. Bloomsbury Publishing.
- Zavadskas E.K., Kaklauskas A., Turskis A. ve Tamosaitiene J. (2008). Contractor Selection Multi-Attribute Model Applying COPRAS Method With Grey IntervalNumbers, *20th EURO Mini Conference Continuous Optimization and Knowledge BasedTechnologies*, 241-247.
- Zeng, Y., Xu, J., ve Zhang, R. (2019). Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV. *Transactions on Wireless Communications*, 18(4), 2329-2345.
- Zhai, L.-Y., Khoo, L.-P., & Zhong, Z.-W. (2009). Design concept evaluation in product development using rough sets and grey relation analysis. *Expert Systems with Applications*, 36 (3), 7072–7079.
- Zhang, G., ve Hsu, L. T. (2018). Intelligent GNSS/INS integrated navigation system for a commercial UAV flight control system. *Aerospace science and technology*, 80, 368-380.
- Zhang, J., Cui, J., Zhong, H., Bolodurina, I., ve Liu, L. (2020). Intelligent drone-assisted anonymous authentication and key agreement for 5G/B5G vehicular ad-hoc networks. *Transactions on Network Science and Engineering*, 8(4), 2982-2994.
- Zhu, G.-N., Hu, J., & Ren, H. (2020). A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments. *Applied Soft Computing*, 106228.
- Zimmermann, H.-J. (2010). Fuzzy set theory. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(3), 317-332.

EKLER

Klasik COPRAS çözüm adımları,

EK-1: Karar Matrisi

ALTERNATİFLER	KRİTERLER					
	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
A_1	49	6,5	3,5	210	1,20	24,5
A_2	51	6,5	6,2	232,5	1,00	20
A_3	55	4,4	7,9	220	0,80	21
A_4	96	7,6	8,1	180	1,80	30

EK-2: Normalize Edilmiş Karar Matrisi

ALTERNATİFLER		A_1	A_2	A_3	A_4	w_j
KRİTERLER						
c_1	(-)	0,1952	0,2032	0,2191	0,3825	0,2525
c_2	(+)	0,2600	0,2600	0,1760	0,3040	0,2067
c_3	(+)	0,1362	0,2412	0,3074	0,3152	0,1973
c_4	(+)	0,2493	0,2760	0,2611	0,2136	0,1358
c_5	(-)	0,2500	0,2083	0,1667	0,3750	0,0940
c_6	(+)	0,2565	0,2094	0,2199	0,3141	0,1140

EK-3: Ağırlıklandırılmış Karar Matrisi

ALTERNATİFLER		A_1	A_2	A_3	A_4
KRİTERLER					
c_1	(-)	0,0861	0,0896	0,0966	0,1686
c_2	(+)	0,0427	0,0480	0,0338	0,0533
c_3	(+)	0,0330	0,0361	0,0375	0,0388
c_4	(+)	0,0269	0,0308	0,0282	0,0231
c_5	(-)	0,0093	0,0077	0,0062	0,0139
c_6	(+)	0,0236	0,0189	0,0189	0,0284

EK-4: s_{i+} ve s_{i-} Matrisi

	S_{i+}	S_{i-}
A_1	0,1438	0,0729
A_2	0,1628	0,0710
A_3	0,1576	0,0711
A_4	0,1899	0,1320

EK-5: Q_i ve P_i Matrisi

	Q_i	P_i	Sıralama
A_1	0,240	93,581	3
A_2	0,262	100,000	1
A_3	0,256	95,090	2
A_4	0,243	90,184	4