

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DÜŞÜK İRTİFA İHA AERODİNAMİK ANALİZLERİ VE PROTOTİP İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE CAN

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. BURAK ÖZTÜRK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
ÖĞR. GÖR. DR. OSMAN ÖZDAMAR

BİLECİK, 2025

10764746

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DÜŞÜK İRTİFA İHA AERODİNAMİK ANALİZLERİ VE PROTOTİP İMALATI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EMRE CAN

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. BURAK ÖZTÜRK

İKİNCİ TEZ DANIŞMANI
ÖĞR. GÖR. DR. OSMAN ÖZDAMAR

BİLECİK, 2025

10764746

BEYAN

Düşük İrtifa İha Aerodinamik Analizleri ve Prototip İmalatı adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	x
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:		/.....	

Emre CAN

25.11.2025

İmza

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yazılmasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanlarım Sayın Doç. Dr. Burak ÖZTÜRK ve Öğr. Gör. Dr. Osman ÖZDAMAR değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca bu çalışmada Elektronik Hız Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesinde vermiş olduğu desteklerden dolayı Cengizhan ABAY'a teşekkür ederiz.

Son olarak bu günlere ulaşmamdaki emekleri adına değerli aileme de teşekkür ederim.

Emre CAN

2025

ÖZET

DÜŞÜK İRTİFA İHA AERODİNAMİK ANALİZLERİ VE PROTOTİP İMALATI

Bu tez çalışmasında, düşük irtifada görev yapan sabit kanatlı insansız hava araçlarının (İHA) aerodinamik tasarımı, yapısal analizi, malzeme seçimi ve prototip üretim süreci bütüncül bir yaklaşımla ele alınmıştır. Tez kapsamında, özellikle yerli savunma sanayiinde önemi giderek artan mikro ve mini sınıf İHA'lar için yerli üretim kabiliyetlerinin geliştirilmesine yönelik özgün bir İHA tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, düşük irtifa uçuş dinamikleri, aerodinamik kuvvetler ve kaldırma-sürüklenme dengesine dair teorik bilgiler sunulmuş; ardından kanat profili, gövde geometrisi ve motor konfigürasyonuna ilişkin tasarım parametreleri belirlenmiştir. Uçuş performansını doğrudan etkileyen kanat açıları ve yüzey alanları, ANSYS Fluent gibi CFD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği) yazılımları kullanılarak analiz edilmiştir. Aerodinamik optimizasyon sürecinde Taguchi ve RSM (Response Surface Methodology) gibi deney tasarımı yöntemlerinden faydalanılmış; ANOVA analizleri ile parametrelerin istatistiksel etkileri değerlendirilmiştir.

İHA'nın üretiminde, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım özellikleri nedeniyle karbon fiber takviyeli kompozit malzemeler tercih edilmiştir. Kalıp üretimi, vakum infüzyon yöntemi, mekanik montaj ve elektronik sistem entegrasyonu süreçleri detaylı biçimde yürütülmüş ve prototip üretimi tamamlanmıştır. Statik yük testleri, CG (ağırlık merkezi) ölçümleri ve uçuş öncesi sistem kontrolleri gerçekleştirilmiş; ardından uçuş testleri ile İHA'nın kalkış, düz uçuş, manevra ve iniş performansları gözlemlenmiştir.

Çalışmanın sonunda, tasarımın uçuşa uygunluğu doğrulanmış; elde edilen veriler doğrultusunda yerli İHA sistemlerinin tasarım, üretim ve test süreçlerine yönelik öneriler sunulmuştur. Bu tez, mühendislik disiplinlerinin bütünleşik bir yaklaşımla uygulanması sayesinde, düşük maliyetli, optimize edilmiş ve yerli bir İHA çözümü sunarak, literatüre ve sektöre önemli katkılar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Düşük İrtifa, İHA, Aerodinamik Tasarım, Kompozit Malzeme, CFD, Prototip Üretimi

ABSTRACT

LOW ALTITUDE UAV AERODYNAMIC ANALYSIS AND PROTOTYPE MANUFACTURING

In this thesis, the aerodynamic design, structural analysis, material selection, and prototype manufacturing process of fixed-wing unmanned aerial vehicles (UAVs) operating at low altitudes are addressed through an integrated engineering approach. The study focuses on the development of an original UAV design aimed at enhancing domestic production capabilities, particularly within the context of micro and mini-class UAVs, which are increasingly significant in the national defense industry.

In the initial phase of the research, theoretical fundamentals regarding low-altitude flight dynamics, aerodynamic forces, and lift-drag balance are discussed. Based on these principles, critical design parameters such as wing profiles, fuselage geometry, and motor configuration are defined. Flight performance parameters including wing angles and surface areas are analyzed using CFD (Computational Fluid Dynamics) software such as ANSYS Fluent. The aerodynamic optimization process employs experimental design methods including Taguchi and Response Surface Methodology (RSM), while ANOVA analyses are conducted to evaluate the statistical significance of these parameters.

In the manufacturing phase, carbon fiber-reinforced composite materials are selected due to their low density and high strength properties. The prototype is produced through a series of processes including mold fabrication, vacuum infusion, mechanical assembly, and electronic system integration. Static load tests, center of gravity (CG) measurements, and pre-flight system checks are conducted, followed by flight tests evaluating takeoff, cruising, maneuverability, and landing performance.

As a result, the design was validated as airworthy, and based on the findings, several recommendations are presented for the design, production, and testing of domestically developed UAV systems. This thesis offers a cost-effective, optimized, and locally produced UAV solution, making significant contributions to both the literature and the aerospace industry through the holistic application of engineering principles.

Keywords: Low Altitude, UAV, Aerodynamic Design, Composite Material, CFD, Prototype Manufacturing

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yerli Üretimin Önemi ve Savunma Sanayisinde Yerlilik	4
1.2. İnsansız Hava Araçlarının Avantaj ve Dezavantajları	7
2. DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	9
2.1. Hava Araçlarının Aerodinamik Prensipleri	12
2.2. İHA Üretiminde Ahşap ve Kompozit Malzemeler	21
2.2.1. Ahşap Malzemelerin İHA Üretiminde Kullanımı	22
2.2.1.1. Ahşap Malzeme Türleri ve Uygulamaları.....	23
2.2.2. Kompozit Malzemelerin İHA Üretiminde Kullanımı	25
2.2.2.1. Kompozitlerin Temel Özellikleri.....	26
2.2.2.2. Kompozitlerin Avantajları	27
2.2.2.3. Kompozitlerin Dezavantajları.....	28
2.2.2.4. Kompozit Malzeme Türleri (Cam Elyaf, Karbon Fiber, Aramid vb.)....	28
2.2.3. Ahşap ve Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması	29
2.2.3.1. Mekanik Özellikler	30
2.2.3.2. Dayanıklılık ve Ağırlık.....	31
2.2.3.3. Maliyet Analizi.....	32

2.2.3.4. Üretim ve Onarım Kolaylığı.....	33
2.2.4. Uygulama Alanları ve Seçim Kriterleri.....	34
2.2.4.1. Gövde Tasarımında Malzeme Seçimi.....	35
2.2.4.2. Kanat ve Kuyruk Yapısında Malzeme Seçimi	36
2.2.4.3. Performansa Etkisi	37
3. DENEY TASARIMI	40
3.1. Deney Tasarımı Yöntemlerinin İHA Tasarım Sürecine Entegrasyonu.....	41
3.1.1. Rsm Metodu	43
3.1.2 Taguchi Metodu	44
3.1.2.1. On-Line Kalite Kontrol Sistemi	46
3.1.2.2. Off-Line Kalite Kontrol Sistemi	47
3.1.2.3. Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı	48
3.1.3. ANOVA (Varyans) Analizi	48
3.1.4. Deney Tasarımının Sonlu Eleman Analizinde (FEA) Kullanımı.....	51
4. LİTERATÜR ÖZETİ	52
5. MATERYAL METOD	68
5.1. ANOVA, RSM, Taguchi ve CFD Tabanlı Optimizasyon	69
5.2. İHA Üretimi.....	74
5.3. Kalıp üretimi.....	75
5.3.1. İskelet Tabanlı Kompozit Kalıp Altyapısının Üretimi.....	76
5.4. Lazer Kesim ile Parça Üretimi.....	76
5.4.1. Kesilen Parçaların Ayrıştırılması ve Hazırlığı	77
5.4.2. Kanat İskeletinin Kademeli Montajı	77
5.4.4. Gövde İskeletinin Oluşturulması	77
5.5. Kalıp Yüzeylerinin CNC Router ile Üretimi	78
5.6. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi	78

5.6.1. Hazırlık Aşaması	78
5.6.2. Vakum Sistemi Kurulumu	79
5.6.3. Reçine Hazırlığı ve İnfüzyon.....	79
5.6.4. Kürleşme Süreci	79
5.7. Mekanik Montaj ve Sistem Entegrasyonu.....	80
5.8. Elektronik Hız Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesi	81
5.9. Yapısal Testler ve Uçuşa Hazırlık.....	83
5.9.1. Statik Yük Testi.....	83
5.9.2. Ağırlık Merkezi (CG) Tespiti.....	83
5.9.3. Elektronik Sistem Testleri	84
5.9.4. Hareketli Parça Testleri.....	84
5.9.5. Uçuş Öncesi Son Kontroller.....	84
5.10. Uçuş Testleri ve Gözlemler.....	84
5.10.1. Kalkış ve Tırmanış Performansı.....	85
5.10.2. Düz uçuş ve Stabilitate	85
5.10.3. Manevra Kabiliyeti	85
5.10.4. İniş Performansı	85
5.10.5. Genel Gözlemler ve Değerlendirme.....	85
6. BULGULAR	87
6.1. Tablo 6.3'te Yer Alan ANOVA Kısaltmalarının Açıklamaları.....	97
6.2. 5S ve 6S Bataryalarla Gerçekleştirilen Hız Testlerinin Değerlendirilmesi ..	98
7. SONUÇ.....	101
KAYNAKLAR.....	103

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 1.1. İnsansız Hava Araçlarının Avantajları ve Dezavantajları	7
Tablo 3.1. Varyans Analizi Faktörleri Kaynak:	50
Tablo 5.1. Parametrelerin Deney Tasarımı	70
Tablo 6.1. FEM Analiz Sonuçları.....	87
Tablo 6.2. Taguchi Tahmin ve Akış Sonuçları	90
Tablo 6.3. ANOVA Analiz Sonuçları.....	96
Tablo 6.4. 5S ve 6S Pil Hızlarının Karşılaştırılması.	99

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi'nin Üniversite-Sanayi İş Birliği ve Ar-Ge Faaliyetlerinden Bir Görünüm.....	3
Şekil 2.1. Düşük İrtifa İnsansız Hava Aracının Kırsal Alanda Uçuşu	10
Şekil 2.2. Alçak İrtifada Manevra Yapan Sabit Kanatlı İnsansız Hava Aracı.....	11
Şekil 2.3. Uçuş Sırasında Oluşan Kuvvetler.....	15
Şekil 2.4. Uçak Kanadında Oluşan Bileşke Kuvvet.....	16
Şekil 2.5. Kuvvetlerin Vektörel Gösterimi	17
Şekil 3.1. Taguchi Kalite Kontrol Sistemi.....	46
Şekil 5.1. Deney Organizasyon Şeması.....	68
Şekil 5.2. Kanat Uzunluk ve Açılı Parametreleri.....	69
Şekil 5.3. ANSYS Fluent'te Çözüm Başlatma Ekranı	72
Şekil 5.4. ANSYS Fluent Çözüm Ekranları	74
Şekil 5.5. Kanat ve Gövde İskelet Yapısının Lazer Kesim ve Montaj Aşamaları: a) Lazer Kesim İşlemi, b) Kesilen Parçaların Levha Üzerindeki Görünümü, c) Nervür ve Kılavuz Profillerle Oluşturulan Kanat İç Yapısı, d) Montajı Tamamlanmış Kanat İskeleti, e) Gövde İskeletine Ait Lazer Kesimli İç Yapı Elemanlarının Birleştirilmiş Hâli.	76
Şekil 5.6. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Kanat Üretim Süreci	79
Şekil 5.7. İHA'nın Mekanik Montaj ve Sistem Entegrasyonu Süreci: a) Kanat-Gövde Bağlantılarının Mekanik Sabitlemesi, b) Gövde ve Motor Sistem Entegrasyonu, c) Kuyruk Montajı Sonrası Dış Saha Değerlendirmesi, d) Nihai Boyama ve Uçuşa Hazır Hâle Getirilmiş Sistem Görünümü.	81
Şekil 5.8. Alıcı Devre Şeması.....	82
Şekil 5.9. Verici Devre Şeması	83
Şekil 6.1. Akış Analizi Basınç Değişimi (Üstte) ve Hava Akış Modeli (Altta)	89
Şekil 6.2. Olasılık Grafiği Sonuçları. a) CL Verileri için Normal Olasılık Grafiği (%95 Güven	

Aralığı). b) CL/CD Verileri için Normal Olasılık Grafiği (%95 Güven Aralığı).	91
Şekil 6.3. Yüzey Grafiği Sonuçları. a) B ve C'nin CL üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). b) B ve C'nin Z üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). c) B ve C'nin CD üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). d) B ve C'nin Z üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit). e) A ve B'nin CL üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit). f) A ve B'nin Z üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit).	92
Şekil 6.4. RSM Optimizer Tanımlama ve Sonuç Ekranı	95
Şekil 6.5. Hız Testi, a) 5S Pil Hız Testi Sonuçları b) 6S Pil Hız Testi Sonuçları.....	100



KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

ANOVA	: Analysis of Variance
CFD	: Computational Fluid Dynamics
Cl, Cd	: Lift/Drag Coefficient
CV	: Coefficient of Variation
D	: Drag
DOF	: Degree of Freedom
FSI	: Fluid-Structure Interaction
Fz, Fx, Fy	: Force in Z/X/Y Axis
GCS	: Ground Control Station
İHA	: İnsansız Hava Aracı
KM	: Moment Coefficient
KT	: Thrust Coefficient
L	: Lift
M	: Moment
PEMFC	: Proton Exchange Membrane Fuel Cell
ROC	: Receiver Operating Characteristic
RSM	: Response Surface Methodology
S/N	: Signal-to-Noise Ratio
SMC	: Sheet Molding Compound
Taguchi	: Taguchi Method
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle
η	: Efficiency

1. GİRİŞ

Yaygın olarak "drone" olarak adlandırılan İnsansız Hava Araçları (İHA), 20. yüzyılın başlarına kadar uzanan köklü bir geçmişe sahiptir. İlk olarak askeri amaçlarla geliştirilen bu teknolojiler, zaman içerisinde yaşanan teknolojik ilerlemelerin etkisiyle önemli ölçüde evrilmiş ve çok çeşitli sivil alanlarda da yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır (Akbar vd., 2021). İHA teknolojisinin tarihsel gelişimi, başlangıçta büyük ölçekli ve askeri odaklı platformlardan, günümüzde özellikle sivil uygulamalarda tercih edilen daha küçük, daha hafif ve manevra kabiliyeti yüksek sistemlere doğru bir dönüşümü yansıtmaktadır (Anderson ve Gaston, 2013). Bu yeni nesil hafif İHA'lar, ekolojik araştırmalar başta olmak üzere birçok disiplinde devrim niteliğinde katkılar sunmuş; aynı zamanda düşük maliyetleri sayesinde daha geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından erişilebilir hale gelmiştir (Anderson ve Gaston, 2013). Böylece İHA'lar, yalnızca askeri değil, çevresel gözlem, tarım, afet yönetimi ve kentsel planlama gibi çeşitli sivil uygulama alanlarında da etkin bir araç olarak kullanılmaya başlanmıştır (Demiryol ve Soyaltın-Colella, 2024).

İnsansız Hava Araçları, nano boyutlardan mega boyutlara kadar geniş bir ölçek aralığında tasarlanabilmektedir. Ancak, büyük boyutlu İHA'lar yüksek maliyetleri, küçük boyutlu İHA'lar ise kullanım zorlukları nedeniyle, özellikle yeni başlayan kullanıcılar için 350 mm ile 700 mm arasında değişen boyutlardaki sistemler önerilmektedir (Gökçe, 2018). Gövde tasarımına başlanmadan önce, kullanılacak şasi malzemesi ile birlikte elektronik donanımların türleri, boyutları ve ağırlıkları detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Bu ön araştırma, simetrik olarak tasarlanacak şasinin kütle merkezinin dengede tutulmasını ve alt sistem bileşenlerinin uygun konumlara yerleştirilmesini mümkün kılacaktır (Çetinkaya ve Koç, 2023).

Teknolojideki hızlı gelişmelere paralel olarak Mikro İnsansız Hava Araçları'nın (MİHA) tasarımı, üretimi ve kullanım alanlarında da belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Küçük ölçekli bu İHA'lar, yüksek manevra kabiliyetleri ve operasyonel esneklikleri sayesinde askeri keşif faaliyetleri, acil durum arama-kurtarma operasyonları, çevresel izleme çalışmaları ve benzeri birçok alanda etkin biçimde kullanılmaktadır (Liu, Qiao, Lu, ve Jiang, 2014). Mikro dronlar olarak da anılan MİHA'lar, özellikle erişilmesi güç veya riskli bölgelerde hızlı ve etkili bir şekilde görev icra edebilme yetenekleri nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir (Spurny vd., 2021).

MİHA'lar alanında öne çıkan yeniliklerden biri, Bütünleşik Kanat-Gövde (BWB-Blended Wing Body) konfigürasyonuna sahip Mikro İHA'ların geliştirilmesidir. Bu yapısal

düzenleme, aerodinamik performansı ve enerji verimliliğini artırmak üzere tasarlanmış olup, geleneksel gövde-kanat ayrımını ortadan kaldırarak bütüncül bir hava aracı yapısı sunmaktadır (Dimitriou vd., 2022). BWB konfigürasyonuna sahip İHA'lar üzerinde yürütülen tasarım ve hesaplamalı akış dinamiği (CFD) çalışmaları, özellikle otoyol trafiğinin izlenmesi ve izinsiz alanlara girişlerin tespiti gibi güvenlik ve izleme uygulamalarında umut vadeden sonuçlar ortaya koymuştur (Raja vd., 2023). Bu karma kanat-gövde tasarımı, geliştirilmiş aerodinamik stabilite ve kontrol yetenekleri sayesinde, söz konusu İHA'ları çeşitli gözetleme ve denetleme görevleri açısından son derece uygun hale getirmektedir (Dhan, 2025). İnsansız Hava Aracının tahmini toplam kütlesi belirlendikten sonra, sistemin uçuş performansını karşılayabilmesi amacıyla, itki/ağırlık oranının en az 2'nin üzerinde olacak şekilde uygun motor ve pervane (propel) seçimi gerçekleştirilmelidir (Ajakwe vd., 2023). Motor ve pervane kombinasyonunun belirlenmesini takiben, çapraz konumlandırılmış motor milleri (şaftları) arasındaki mesafe ölçülerek tasarımın ön boyutlandırması tamamlanmaktadır. Bu aşama, İHA'nın yapısal tasarımının genel hatlarının şekillenmesini sağlamaktadır (Öztürk, 2024a).

İHA üzerine entegre edilecek olan elektronik bileşenlerin ve yapısal parçaların konumları belirlenmiş, ardından üç boyutlu (3B) katı modellemeleri gerçekleştirilerek bütünlük bir yapı oluşturulmuştur (Bayraktar ve Özcan, 2018). Üst yüzeydeki kullanım alanını optimize etmek amacıyla, kolların üst plakanın alt yüzeyine monte edilmesi uygun bulunmuştur. Elektronik donanım ve güç sistemlerinin yerleştirileceği yüzeyin toplam alanı yaklaşık olarak $2 \times 20.100 \text{ mm}^2$ olarak hesaplanmıştır. İHA gövdesinin üretiminde, sistemin dayanıklılığı, titreşim düzeyinin asgari seviyede tutulması ve maliyet etkinliği gibi kriterler, malzeme seçiminde belirleyici unsurlar olarak değerlendirilmiştir. Literatürde ve sektörde yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleri arasında ahşap, plastik, köpük, alüminyum, G10, baskı devre levhası (PCB- Printed Circuit Board) ve karbon fiber yer almaktadır. Bu çalışma kapsamında, görev odaklı kullanım senaryosu, yüksek termal dayanım gereksinimi, düşük yoğunluk ve yapısal dayanıklılık kriterleri doğrultusunda karbon fiber malzeme tercih edilmiştir (Gökçe, 2018). Bu sayede, test uçuşları esnasında İHA'nın maruz kalabileceği fiziksel hasarların en aza indirilmesi ve minimum itki ile yeterli kaldırma kuvvetinin elde edilmesi hedeflenmiştir (Fatoba vd., 2017).

Günümüzde insansız hava araçları, farklı alanlarda hızla yaygınlaşan çok yönlü teknolojilerdir. Net ve sabit bir tanımları bulunmamakla birlikte, teknolojik gelişmeler ve kullanım alanları çeşitlendikçe İHA'ların tanımına da sürekli yenilikler eklenmektedir.

Temelde, üzerinde pilot bulunmayan, uzaktan kontrol edilebilen ya da önceden belirlenmiş rotalarda otonom şekilde görev yapabilen, hatta son yıllarda yapay zekâ ile donatılan sistemler olarak ifade edilebilirler. Yaygın olarak “drone” ya da “robot uçak” olarak da adlandırılan bu araçlar, sivil ve askeri birçok alanda önemli rol oynamaktadır (Harbi, 2023).



Şekil 1.1. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Teknoloji Transfer Ofisi’nin Üniversite-Sanayi İş Birliği ve Ar-Ge Faaliyetlerinden Bir Görünüm

Kaynak: (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, 2023)

Bir teknolojiyi gerçekten elde etmek, onu sadece satın almakla ya da dışarıdan temin etmekle mümkün değildir. Bir uçağı ya da arabayı almak, o alandaki bilgi, birikim ve yetkinliğe sahip olduğumuz anlamına gelmez. Asıl önemli olan; teknolojinin arkasındaki bilgiye, tecrübeye, yetişmiş insan gücüne ve güçlü bir ekonomik yapıya sahip olmaktır. Tüm bunların yanında, özellikle savunma sanayii gibi kritik alanlarda dış baskılara göğüs gerebilecek siyasi irade ve devlet kararlılığı da gereklidir. Geliştirilen her yeni teknolojinin ardında, çoğu zaman görünmeyen büyük bir mücadele, fedakârlık ve sayısız kahramanın emeği vardır. Türkiye’nin Cumhuriyet’in ilk yıllarından bu yana süregelen yerli savunma ve havacılık sanayiindeki yaklaşık bir asırlık mücadelesi, teknoloji üretmenin ne denli zorlu bir yolculuk olduğunu gözler önüne sermektedir (Yeh, 2024).

İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemleri ise son yılların en kritik ve dikkat çeken teknolojileri arasında yer almaktadır. Ülkemizde ilk dronelar, terörle mücadelede kullanılmak üzere Amerika Birleşik Devletleri’nden alınmıştır. Ancak zamanla İsrail’den kiralanan Heron İHA’lardan istenen performans alınamamış, beş adet Heron kaza sonucu kaybedilmiştir. Gözetleme ve takip amacıyla kullanılan bu sistemlerde, yedek parça ve bakım desteği gibi alanlarda yaşanan sıkıntılar, elde edilen verilerin güvenli şekilde iletilmemesi gibi sorunlarla

karşılaşmıştır. Aynı dönemde uygulanan uluslararası yaptırımlar da bu tür teknolojilere erişimi iyice güçleştirmiştir. Tüm bu deneyimler, Türkiye için yerli üretimin ve milli teknolojinin vazgeçilmez bir stratejik gereklilik olduğunu açıkça göstermiştir (Martin, 2017).

1.1. Yerli Üretimin Önemi ve Savunma Sanayisinde Yerlilik

Günümüz dünyasında ulusal güvenliğin ve bağımsızlığın en temel göstergelerinden biri, ülkelerin savunma sanayisinde kendi kendine yetebilmesidir. Yerli üretim, sadece ekonomik kalkınmanın bir unsuru olmanın ötesinde; devletlerin bağımsız politika izleyebilmesi, stratejik çıkarlarını koruyabilmesi ve olası tehditler karşısında caydırıcı bir güç oluşturabilmesi açısından vazgeçilmez bir unsur haline gelmiştir. Özellikle savunma sanayisinde dışa bağımlılık, ülkeleri uluslararası krizlerde zor durumda bırakabilmekte, karşılaşılan ambargo, yaptırım veya siyasi baskılar nedeniyle kritik teknolojilere erişimde büyük zorluklar yaşanabilmektedir (Chung Wang, Lin ve Hu, 2007).

Tarihe bakıldığında, savunma teknolojilerinde dışa bağımlı olan ülkelerin, savaş ve kriz anlarında büyük sıkıntılar yaşadıkları açıkça görülmektedir. Türkiye de bu gerçekliğin bilincinde olarak, özellikle Cumhuriyet'in ilk yıllarından bu yana yerli üretime büyük önem vermiş, ancak dönem dönem yaşanan dış baskılar, ambargolar ve ekonomik kısıtlamalar nedeniyle savunma sanayisinde istenilen noktaya ulaşmakta zorluk çekmiştir. Özellikle 1974 Kıbrıs Barış Harekâtı sonrasında uygulanan ambargolar, Türkiye için yerli ve milli savunma sanayisinin ne kadar önemli olduğunu bir kez daha gözler önüne sermiştir. Bu olay, ülkenin savunma ihtiyaçlarının dış kaynaklara bırakılmasının ne kadar büyük bir risk taşıdığını gösteren somut bir örnek olmuştur (Natarajan, 2001).

Yerli üretimin savunma sanayisindeki önemi, sadece silah veya askeri araç üretmekle sınırlı değildir. Yerli üretim, aynı zamanda teknolojik bilgi birikiminin ve nitelikli insan kaynağının oluşmasını da sağlar. Kendi teknolojisini geliştiren ülkeler, Ar-Ge faaliyetlerine daha fazla yatırım yapar, genç nesilleri bu alanda eğitir ve teknoloji transferi süreçlerinde sadece alıcı değil, aynı zamanda geliştirici ve üretici konuma gelirler. Bu süreç, üniversitelerden özel sektöre, kamudan sivil topluma kadar çok geniş bir ekosistemin güçlenmesini sağlar. Teknoloji geliştirme kapasitesi ise yalnızca savunma alanında değil, sivil sanayide de ülkeye büyük bir rekabet avantajı kazandırır. Savunma sanayisinde yerliliğin bir diğer önemli boyutu ise stratejik özerkliktir. Bir ülkenin sahip olduğu savunma teknolojilerinin ve altyapısının kendi kontrolünde olması, o ülkenin uluslararası ilişkilerde bağımsız hareket etmesini sağlar. Yabancı ülkelere bağımlı olunan bir ortamda, alınan her karar veya atılan her adımda dış baskılar ve

yaptırımlar riskiyle karşı karşıya kalınabilir. Ancak savunma teknolojilerinde yerlilik arttıkça, devletin manevra kabiliyeti de artar; ülke çıkarlarını daha güçlü şekilde koruma şansı doğar (Azizi vd., 2023).

Son yıllarda Türkiye, savunma sanayisinde yerliliği artırmaya yönelik kararlı politikalar geliştirmiştir. Yerli İHA ve SİHA'lar, milli tank projeleri, denizaltılar, savaş gemileri, radar ve elektronik harp sistemleri gibi birçok alanda kaydedilen ilerlemeler, Türkiye'yi bu alanda dünya çapında söz sahibi ülkeler arasına taşımıştır. Bu başarıların arkasında; güçlü bir vizyon, sürdürülebilir Ar-Ge yatırımları, teşvik edilen yerli girişimler ve genç mühendislerin yenilikçi çözümleri bulunmaktadır (Ahmed vd., 2022). Aynı zamanda savunma sanayisindeki bu atılımlar, ülkenin dışa bağımlılığını azaltırken, ekonomik kalkınmaya ve ihracata da önemli katkılar sağlamaktadır. Tüm bu gelişmeler ışığında; yerli üretim ve savunma sanayisinde yerlilik, Türkiye'nin hem güvenliğinin hem de uluslararası alandaki prestijinin temel taşlarından biri haline gelmiştir. Yerli üretim sayesinde ülke; teknolojik açıdan kendine yeten, stratejik sırlarını ve kritik altyapılarını koruyabilen, siyasi ve askeri anlamda bağımsız kararlar alabilen güçlü bir aktör olarak konumlanmaktadır. Gelecek nesillerin daha güvenli, daha bağımsız ve daha güçlü bir Türkiye'de yaşaması için yerli üretime ve savunma sanayisinde yerliliğe verilen önem, her geçen gün daha da artmaktadır (Kapsalis, Panagiotou ve Yakinthos, 2021).

İnsansız hava araçlarının tarihçesi, literatürde oldukça eskiye dayanmaktadır. İlk İHA'nın 1849 yılında Avusturya-Macaristan İmparatorluğu tarafından Venedik'i bombalamak amacıyla gönderilen 200 adet insansız sıcak hava balonuyla kullanıldığı kabul edilmektedir (Kılıçoğlu, 2021: 89). Uçağın icadından sonraki süreçte, insansız sistemler geliştirilse de, radyo kontrol teknolojilerindeki ilerlemeye kadar bu araçlar beklenen başarıya ulaşamamıştır. 1930'lu yıllarda "drone" adını alan bu araçlar, ilk olarak pilotların hedef ve atış eğitimlerinde kullanılarak İHA'nın askeri serüvenini başlatmıştır. İkinci Dünya Savaşı sırasında, Almanya ve İngiltere tarafından çeşitli amaçlarla kullanılmaya çalışılmış ancak, Almanlar dışında önemli bir başarı elde edilememiştir (Kılıçoğlu, 2021: 89).

Türkiye'de ise ilk kez 1989 yılında, Meggitt firmasına ait Banshee sistemi, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin envanterine giren ve aktif olarak kullanılan bir İHA olmuştur. Ülkemizde yerli İHA üretimine yönelik ilk ciddi adım ise 1990 yılında, TUSAŞ tarafından geliştirilen İHA-X1 Şahit sistemi ile atılmıştır. Sonraki yıllarda ABD'den alınan GNAT-750 modelleri 1994-1998 yılları arasında kullanılmış, ardından TUSAŞ tarafından Turna-Keklik, Pelikan-Martı ve Öncü

gibi çeşitli yerli İHA modelleri geliştirilmiş olsa da, bunlar operasyonel ihtiyaçları tam anlamıyla karşılayamamıştır. 2005 yılından sonra ise İsrail'den dört adet Heron İHA'sı kiralanmıştır (Ateş, 2021: 10).

2007 yılında Baykar tarafından üretilen Mini İHA, Türk Silahlı Kuvvetleri'nin envanterine girerek yerli insansız hava aracı teknolojisinin önemli bir dönüm noktası olmuştur. Aynı firmanın, 2012 yılında Katar'a gerçekleştirdiği ilk İHA ihracatı ise, Türkiye'nin bu alandaki teknolojik birikimini uluslararası alana taşımasının ilk örneklerinden biri olmuştur. Bu dönüm noktalarının ardından ülkemizde İHA teknolojisine olan ilgi ve yatırımlar büyük bir ivme kazanmış, hem kamu hem de özel sektör tarafından çok sayıda yeni firma ve girişim ortaya çıkmıştır. Farklı ihtiyaçlara yönelik çeşitli modeller geliştirilmiş, operasyonel kabiliyeti yüksek ve özgün teknolojiler üreten yerli markalar dünya çapında adından söz ettirmeye başlamıştır (Hou vd., 2019).

Bu gelişmeler neticesinde, ülkemizde İHA alanında üretim yapan başlıca firmalar arasında TUSAŞ, Baykar, Vestel, STM, Altınay ve Aselsan gibi önemli aktörler yer almaktadır. TUSAŞ'ın geliştirdiği Turna, Şimşek ve Anka modelleri; hem eğitim, hem de operasyonel amaçlarla kullanılmakta ve sürekli geliştirilmektedir. Baykar'ın Bayraktar Mini, Malazgirt ve dünya çapında bilinirlik kazanan Bayraktar TB2 modelleri, yerli mühendisliğin geldiği noktayı gözler önüne sermektedir. Vestel'in Karayel modeli, uzun menzilli ve yüksek irtifa görevlerinde öne çıkarken, STM'nin Alpague, Togan ve Kargu sistemleri ise özellikle küçük ve vurucu İHA konseptinde önemli başarılar elde etmiştir. Altınay ise X-4, Albatros, Sumru, Kartal ve Doğan modelleriyle sektörde kendine özgü bir yer edinmiş; Aselsan ise Serçe 1, Arı 1T ve Mius Mini gibi çeşitli insansız sistemlerle teknolojik çeşitliliğe katkı sağlamıştır (Ateş, 2021: 10).

Son yıllarda, özellikle terörle mücadele kapsamında yerli İHA'lar çok daha aktif ve kritik bir rol üstlenmiştir. Bayraktar TB2 başta olmak üzere, birçok yerli İHA modeli sınır ötesi askeri operasyonlarda (Fırat Kalkanı, Zeytin Dalı, Barış Pınarı, Pençe Kilit) başarıyla görev almış, operasyonel sahadaki etkinliği ile Türkiye'nin savunma kapasitesini güçlendirmiştir. İHA'ların sunduğu yüksek görüntüleme kabiliyeti, uzun havada kalış süresi, anlık veri iletimi ve hassas vuruş yetenekleri; askeri operasyonlarda riskleri minimize ederken, güvenlik güçlerimizin hareket kabiliyetini önemli ölçüde artırmıştır (Ateş, 2021: 10). İnsansız hava araçlarının kullanım alanları, başlangıçta askeri amaçlarla sınırlı gibi görünse de, zaman içinde çok daha geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Günümüzde İHA'lar; tarımda ürün takibi ve ilaçlama,

ormancılıkta arazi gözlemi, afet ve acil durum yönetiminde hızlı müdahale, enerji hatlarının izlenmesi, haberleşme altyapısının kurulması, sınır güvenliği, trafik kontrolü, çevre koruma, haritalama ve arama-kurtarma gibi pek çok sivil alanda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Kabadayı ve Uysal, 2019: 9).

İnsan ulaşımının zor olduğu dağlık, ormanlık ya da çetin coğrafyalarda, sel ve orman yangını gibi afetlerde hızlı müdahale imkânı sağlaması; iletişimin zayıf veya kesintiye uğradığı bölgelerde anlık bilgi aktarımı ve keşif yapabilmesi, İHA'ların günümüzde vazgeçilmez bir teknoloji olmasını sağlamıştır. Ayrıca, eğlence sektörü ve medya dünyasında da hava çekimleri, spor karşılaşmalarının kaydı ve etkinliklerin canlı yayınlanmasında İHA'lar aktif şekilde yer almaktadır. Tüm bu kullanım alanlarının giderek genişlemesi, İHA teknolojisinin toplumun hemen her kesimine dokunan, katma değeri yüksek ve yenilikçi bir alan haline gelmesini sağlamıştır (Kabadayı ve Uysal, 2019: 9).

1.2. İnsansız Hava Araçlarının Avantaj ve Dezavantajları

İnsansız hava araçları, son yıllarda hem askeri hem de sivil alanlarda kullanım alanları giderek genişleyen ve gelişen teknolojilerdendir. Sahip oldukları modern sensörler, görüntüleme sistemleri ve uzaktan kontrol kabiliyeti sayesinde, insanların ulaşmakta zorlandığı ya da riskli olan bölgelerde önemli görevler üstlenmektedirler. İHA'lar, özellikle askeri operasyonlarda insan kaybını en aza indirerek güvenlik güçlerine büyük bir avantaj sağlamakta; anlık bilgi paylaşımı, uzun süre havada kalabilme ve yüksek manevra kabiliyetiyle operasyonların başarısını artırmaktadır (Kapsalis, Panagiotou ve Yakinthos, 2021).

Tablo 1.1. İnsansız Hava Araçlarının Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
İnsan hayatını riske atmadan görev yapabilme	Siber saldırılara ve elektronik karıştırmaya açık olma riski
Zor ulaşılır, tehlikeli veya riskli bölgelerde kolayca görev yapabilme	Hava koşullarından kolayca etkilenebilme
Uzun süre havada kalabilme ve geniş alanları tarama	Veri güvenliği ve gizlilik endişeleri
Anlık görüntü ve veri aktarımı sağlayabilme	Yüksek ilk yatırım ve bakım maliyetleri
Askeri ve sivil birçok alanda esnek kullanım imkânı	Etik, hukuki ve toplumsal tartışmalara yol açabilme
Düşük operasyonel maliyet (insanlı uçuşlara göre)	Eğitilmiş personel ihtiyacı ve teknolojik altyapı gereksinimi
Hassas hedefleme ve gözetleme kabiliyeti	Kötü niyetli kişilerce yasa dışı veya zararlı amaçlarla kullanılabilme riski
Hızlı konuşlanma ve kolayca sevk edilebilme	Sınır ötesi veya uluslararası kullanımlarda diplomatik ve yasal sorunlar

Kaynak: Austin 2010; Valavanis & Vachtsevanos 2015; Finn & Wright 2012

Bununla birlikte, İHA'ların avantajları kadar dikkat edilmesi gereken bazı

dezavantajları da bulunmaktadır. Teknolojik altyapı ve veri güvenliği, siber saldırı riski, hava koşullarından etkilenme gibi unsurlar, bu sistemlerin kullanımında karşılaşılabilecek zorlukların başında gelmektedir. Ayrıca, etik ve hukuki boyutlar ile kişisel gizliliğe yönelik endişeler de giderek artmaktadır. Her geçen gün daha fazla gelişen İHA teknolojisi, sunduğu imkânlarla birlikte yeni sorumluluklar ve dikkat edilmesi gereken noktalar da getirmektedir. Bu nedenle, insansız hava araçlarının avantajları ve dezavantajları iyi analiz edilmeli, bu sistemlerin verimli ve güvenli bir şekilde kullanılmasına yönelik stratejiler geliştirilmelidir (Azizi vd., 2023).



2. DÜŞÜK İRTİFA İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

Düşük irtifa insansız hava araçları, havacılık literatüründe genellikle “bulut altı” kategorisinde değerlendirilir ve bu tanım, yaklaşık 500 ile 5000 feet (150–1500 metre) arasındaki irtifalarda faaliyet gösteren sistemleri kapsar. Bu irtifa aralığı, İHA’ların hem teknik olarak karmaşık hava koşullarından uzak, hem de insanlı hava araçlarıyla çakışma riskinin düşük olduğu bir bölgedir. Düşük irtifa İHA’ları, pratikte hem askeri hem de sivil uygulamalarda kritik görevler üstlenir; örneğin keşif, gözetleme, tarımsal analiz, yangın tespiti, afet yönetimi, haritalama ve çevre izleme gibi birçok alanda yoğun şekilde kullanılmaktadır (Öztürk, 2023).

Bu sınıftaki İHA’ların en önemli avantajlarından biri, görev sırasında bulut altı seviyelerde kalarak hem yüksek çözünürlüklü görüntü ve veri toplayabilmeleri, hem de sinyal kaybı ya da iletişim bozukluğu yaşama risklerinin minimize edilmesidir. Özellikle bulutun içine çıkmadan, yer istasyonlarıyla güçlü ve kesintisiz bir bağlantı sürdürülebilir; bu da gerçek zamanlı veri akışı ve hızlı müdahale imkânı sağlar. Ayrıca, bu irtifalarda uçan İHA’lar sivil havacılık otoritelerinin düzenlemelerine de daha kolay uyum gösterebilir, bu sayede operasyonel izin ve planlama süreçleri daha hızlı ve verimli yürütülebilir (Arslan ve Demirtaş, 2021).

Düşük irtifa İHA’larının yapısal olarak sabit kanatlı (fixed-wing) ve dikey kalkış-iniş (VTOL) olmak üzere iki ana tasarım tipi yaygındır. Sabit kanatlı modeller genellikle daha uzun menzillere, yüksek hızlara ve verimli enerji kullanımına sahip olurken, VTOL sistemler ise pist gereksinimi olmadan dar veya engebeli arazilerde bile rahatça kalkış ve iniş yapabilmektedir. Son yıllarda hibrit sistemler yaygınlaşmış; sabit kanat ile VTOL özellikleri birleştirilerek hem uzun menzil hem de esnek operasyon kabiliyeti bir arada sunulmuştur (Hutsul, Zhezhera ve Tkach, 2022).

Teknik olarak bu İHA’larda iki temel motor tipi tercih edilir: elektrikli (brushless DC motorlar) ve içten yanmalı (benzinli) motorlar. Elektrikli motorlar düşük gürültü, daha az bakım gereksinimi ve hassas uçuş kontrolü gibi avantajlara sahipken, benzinli motorlar daha uzun görev süresi ve ağır yük taşıma kapasitesi sunar. Bazı gelişmiş modellerde enerji verimliliğini ve havada kalış süresini maksimize etmek amacıyla lityum polimer bataryalar ile hibrit motor sistemleri birlikte kullanılabilir. Düşük irtifa İHA’larının tipik uçuş süreleri 60 ila 180 dakika arasında değişirken, yeni nesil modellerde bu süre 5-6 saate kadar çıkabilmektedir. Görev menzili olarak ise genellikle 25–100 kilometre arası yeterli kabul edilir; ancak modern

iletişim ve uydu sistemleriyle bu mesafe çok daha uzun menzillere çıkarılabilmektedir. Kanat açıklığı ise genellikle 1.5–3.5 metre aralığında tutulur. Bu büyüklük, hem taşıma ve depolamada pratiklik sağlar hem de uzun süre havada kalabilmek için termal akımlardan faydalanılmasına imkân verir (Zhang vd., 2024).

Görev profili açısından düşük irtifa İHA'ları çok yönlü kullanılabilir. Rota takibi, dairesel tarama, sabit nokta hover gibi farklı uçuş modlarında görev yapabilirler. Bu da, tarımsal ilaçlama ve hastalık tespiti gibi hassas uygulamalardan, yangın gözlemi ve arama-kurtarma operasyonlarına kadar çok çeşitli görevlerin güvenli ve etkin biçimde yerine getirilmesini sağlar. Ayrıca, bu irtifa seviyesi görüntü kalitesini koruyarak yüksek çözünürlükte veri toplamaya elverişlidir (Williams, 2013).

İletişim açısından düşük irtifa İHA'ları, GPS, radyo frekansı (RF), LTE/4G ve son teknoloji veri linkleriyle donatılarak hem manuel hem de otomatik görev profillerini destekler. Bu sayede hem insan operatörlerin kontrolünde hem de önceden programlanan görevlerle otonom uçuş imkânı sunar. Özellikle afet durumlarında, hızlı konuşlanma ve kısa sürede görev yerine ulaşma kabiliyeti bu sistemlerin değerini artırır. Düşük irtifa insansız hava araçları, maliyet-etkinliği, pratik kullanımı, esnek operasyonel kabiliyeti ve çeşitli uygulama alanları ile hem günümüzün hem de geleceğin vazgeçilmez hava platformları arasında yer almaktadır (Schmehl, Noom ve van der Vlugt, 2013).



şekil 2.1. Düşük İrtifa İnsansız Hava Aracının Kırsal Alanda Uçuşu

Bu görselde, düşük irtifada uçan bir insansız hava aracının kırsal bir yerleşim bölgesi

üzerinde gerçekleştirdiği uçuş görülmektedir. Uzun ve geniş kanat yapısı, bu tür İHA'ların yüksek kaldırma kuvveti ve havada uzun süre kalabilme özelliği kazanmasını sağlar. Kanatların orta bölümü, en yoğun aerodinamik yüklere karşı dayanıklı olacak şekilde güçlendirilir ve gövdeyle bağlantı noktası özel olarak sağlamlaştırılır. Ayrıca, motorun uçağın arka kısmında konumlanması, burun kısmında kamera ve sensör gibi ekipmanların rahatça yerleştirilebilmesini mümkün kılar. Bu tasarım sayesinde, görüntüleme sistemlerinin görüş alanı genişler ve görev etkinliği artar. Motorun arkada yer alması, hem uçuş verimliliği sağlar hem de İHA'nın farklı operasyonel görevlerde kullanılabilmesine olanak tanır (Zhang vd., 2024).



Şekil 2.2. Alçak İrtifada Manevra Yapan Sabit Kanatlı İnsansız Hava Aracı

Bu görsellerde, sabit kanatlı bir insansız hava aracının düşük irtifada gerçekleştirdiği kalkış ve manevra uçuşu görülmektedir. Geniş kanat açıklığı ve optimize edilmiş gövde yapısı, aracın yüksek kaldırma kuvveti ve stabiliteyle uçabilmesini sağlamaktadır. Kanat-gövde birleşim noktalarının sağlamlığı, uçuş sırasında oluşan aerodinamik yüklerin güvenli biçimde aktarılması açısından kritik öneme sahiptir. İHA'nın iniş takımlarının açık olarak uçuş yapması, kısa mesafede kalkış ve iniş yeteneğine işaret etmekte, dar veya engebeli arazilerde operasyonel kabiliyetin artırılmasını mümkün kılmaktadır. Düşük irtifada gerçekleştirilen bu tür görevler,

yer ile sürekli ve güvenli veri bağlantısı kurulmasına olanak tanırken, yüksek çözünürlüklü görüntü ve hassas veri toplama avantajı da sunmaktadır. Ayrıca, bu aerodinamik tasarım ve motor konfigürasyonu, İHA'nın hem gözetleme hem de keşif gibi çok amaçlı görevlerde etkili biçimde kullanılmasını sağlamaktadır. Görseller, düşük irtifa İHA'larının modern mühendislik anlayışıyla geliştirilen, çok yönlü ve fonksiyonel sistemler olduğunu göstermektedir (Nas ve Öztürk, 2018).

2.1. Hava Araçlarının Aerodinamik Prensipleri

Hava araçlarının uçuşunu mümkün kılan temel fiziksel kurallar, aerodinamik bilim dalı kapsamında incelenmektedir. Aerodinamik, hava veya gaz ortamında hareket eden cisimlerin davranışını ve bu hareket sırasında ortaya çıkan kuvvetleri analiz eder. Hava araçlarının, özellikle de uçak ve insansız hava araçlarının tasarımı, performansı ve verimliliği büyük ölçüde aerodinamik prensiplere bağlıdır. Bu prensiplerin iyi anlaşılması, emniyetli ve etkili uçuş için vazgeçilmezdir (Bayraktar ve Özcan, 2018).

Hava araçları üzerinde dört temel aerodinamik kuvvet etkilidir:

Kaldırma kuvveti (Lift), kanat profili etrafında oluşan basınç farkı sayesinde yukarıya doğru etki eden kuvvettir ve hava aracının havada kalmasını sağlar.

Ağırlık (Weight), yerçekimi nedeniyle aşağıya doğru uygulanan kuvvettir ve aracın toplam kütlesine bağlıdır.

İtki (Thrust), motorlardan elde edilen ve aracı ileri doğru hareket ettiren kuvvettir.

Sürüklenme kuvveti (Drag) ise hava aracının hareketi sırasında karşılaştığı dirençtir ve aerodinamik tasarıma, hızına ve hava yoğunluğuna bağlı olarak değişir.

Bu dört kuvvetin dengede olması, düz ve sabit hızlı bir uçuşun gerçekleşmesini sağlar. Eğer kaldırma kuvveti ağırlıktan büyükse, hava aracı yükselir; küçükse alçalır. Aynı şekilde, itki sürüklemeyi yenerse hız artar; aksi durumda hız azalır (Hamzaçebi vd., 2020).

Hava araçlarının uçuşundaki en kritik unsurlardan biri, kanatların şekli ve aerodinamik profilidir. Kanatlar genellikle üst yüzeyi bombeli, alt yüzeyi ise daha düz olacak şekilde tasarlanır. Bu sayede kanadın üst kısmından geçen hava, daha uzun bir yol kat eder ve hızı artar. Bernoulli prensibine göre, hızlanan hava basıncı düşürür; böylece kanadın üstünde düşük basınç, altında ise daha yüksek basınç oluşur ve bu da kaldırma kuvvetini meydana getirir. Kanatların hücum açısı (angle of attack), kaldırma kuvvetinin büyüklüğünü doğrudan etkiler.

Hücum açısı arttıkça kaldırma artar fakat belirli bir açıdan sonra hava akımı ayrılır ve kanat üzerinde “stall” (tutunma kaybı) oluşur; bu durumda kaldırma kuvveti keskin biçimde azalır. Sürüklenme kuvveti, hava araçlarının performansını doğrudan etkileyen önemli bir aerodinamik unsurdur ve temelde iki ana kategoriye ayrılır: parazit (parasite) sürüklenme ve indüklenmiş (induced) sürüklenme. Parazit sürüklenme, hava aracının gövdesi, kanatları ve üzerinde bulunan çıkıntılı tüm parçalar nedeniyle ortaya çıkar. Hız arttıkça, parazit sürüklenme de aynı oranda artış gösterir. Bu yüzden yüksek hızlı uçuşlarda, gövdenin ve diğer yüzeylerin aerodinamik açıdan olabildiğince pürüzsüz ve akıcı şekilde tasarlanması gereklidir (Focke, Kesel ve Baars, 2017).

İndüklenmiş sürüklenme ise, kanatlar tarafından üretilen kaldırma kuvvetinin doğal bir sonucudur. Özellikle düşük hızlarda daha belirgin hale gelen bu sürüklenme türü, kaldırma arttıkça büyür ve verimliliği olumsuz yönde etkiler. İndüklenmiş sürüklemenin azaltılması için, kanat uçlarına eklenen “winglet” adı verilen küçük kanatçıklar kullanılır. Bu tasarım, kanat uçlarında oluşan vortekslerin şiddetini azaltarak, sürüklemenin minimize edilmesine katkı sağlar. Aerodinamik tasarım sürecinde, hem parazit hem de indüklenmiş sürüklemeyi en aza indirmek için kanat ve gövde yüzeyleri dikkatlice şekillendirilir. Gereksiz çıkıntılar ve yüzey birleşimleri mümkün olduğunca azaltılır. Böylece hava akışının yüzeyler boyunca düzgün bir şekilde ilerlemesi sağlanır ve genel uçuş performansı artırılır. Farklı görevler ve operasyonlar için çeşitli kanat tipleri geliştirilmiştir. Uzun menzilli ve yüksek verimlilik gerektiren görevlerde ince, uzun ve dar (yüksek aspect ratio’lu) kanatlar tercih edilirken; çevik manevralar veya kısa pistte kalkış-iniş için daha kısa ve geniş kanatlar kullanılır. Sabit kanatlı hava araçlarında, kanat profili ve açıları, uçuş performansını doğrudan etkiler. VTOL (dikey kalkış-iniş) veya döner kanatlı araçlarda ise hem kaldırma hem de itki aynı sistemden elde edilir (Özkan ve Dahil, 2025).

İtki sağlamak için kullanılan motorlar, hava araçlarının görev profiline göre değişir. Pervaneli (propeller), jet veya turbojet motorlar; elektrikli veya içten yanmalı olabilir. Motorun konumlandırılması da aerodinamik performans için önemlidir. Burunda, gövdede veya arkada yer alan motorlar; aracın ağırlık dağılımını ve burun kısmındaki sensör, kamera veya faydalı yüklerin yerleşimini etkiler. Arkadan itişli sistemlerde, ön kısımda aerodinamik sürüklenme azalır ve görüntüleme sistemleri için engelsiz bir görüş alanı sağlanır. Hava araçlarının yönlendirilmesi, kanatçık (aileron), dümen (rudder) ve irtifa dümeni (elevator) gibi kontrol yüzeyleriyle sağlanır. Bu yüzeyler, uçuş sırasında araca yuvarlanma, sapma ve yükselme/alçalma hareketlerini kazandırır. Modern insansız hava araçlarında, uçuş kontrol

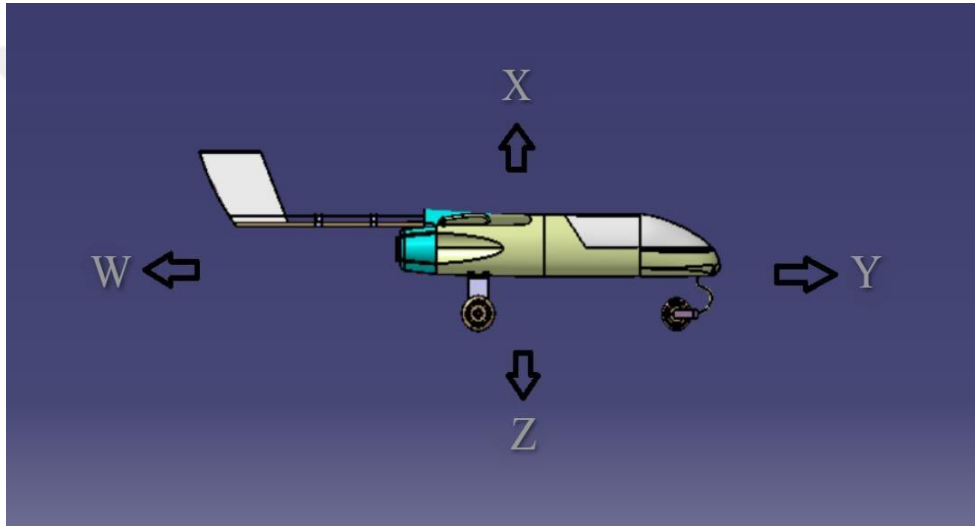
bilgisayarları ve otomatik pilot sistemleri sayesinde bu yüzeyler hassas şekilde yönetilir ve stabil bir uçuş elde edilir (Koç, 2024).

Aerodinamik prensipler, ortam şartlarına da doğrudan bağlıdır. Havanın sıcaklığı ve yoğunluğu, kaldırma kuvvetini ve itkiyi etkiler. Yüksek sıcaklık ve düşük hava yoğunluğu, kaldırma kuvvetini azaltırken; soğuk ve yoğun hava ise performansı artırır. Ayrıca rüzgar, türbülans ve yağış gibi faktörler de hava aracının uçuş karakteristiklerini değiştirebilir. Hava araçlarının aerodinamik prensipleri; kaldırma, sürüklenme, itki ve ağırlık kuvvetlerinin dengeli yönetimi, uygun kanat profili ve yüzey tasarımı, motor ve kontrol sistemlerinin entegrasyonu gibi çok sayıda karmaşık faktörü içermektedir. Bu prensiplerin doğru uygulanması, hava araçlarının güvenli, verimli ve görevine uygun şekilde uçmasını sağlar. Özellikle modern İHA’larda, gelişmiş aerodinamik tasarım ve otonom kontrol sistemlerinin bir araya gelmesiyle, yüksek performans ve operasyonel esneklik elde edilmiştir (Ismail, 2024).

Uçağın havada kalmasını sağlayan en önemli unsur, kanatlar tarafından üretilen kaldırma kuvvetidir. Kanatların özel şekli sayesinde, üzerlerinden geçen hava daha hızlı akarken, altında daha yavaş hareket eder. Bu hız farkı, kanat üstünde daha düşük, altında ise daha yüksek bir basınç yaratır ve ortaya yukarıya doğru bir kaldırma kuvveti çıkar. Kaldırma kuvvetinin miktarı, kanatların büyüklüğü, şekli, uçağın hızı ve havanın yoğunluğu gibi birçok etkene bağlı olarak değişir. Eğer bir uçak, kendi ağırlığını karşılayacak kadar kaldırma kuvveti üretemezse, havada tutunamaz ve yere düşer. Öte yandan, uçak sadece havada asılı kalmakla kalmaz, aynı zamanda hareket etmek, yani ileri doğru uçmak zorundadır. Uçağın ileri hareketi, motorların ürettiği itki kuvveti sayesinde gerçekleşir. Bu güç sistemi, pervaneli veya jet motorları aracılığıyla uçağı ileriye iter. Ancak hava içinde hareket eden her cisim, havanın direnciyle, yani sürüklenme kuvvetiyle karşılaşır. Sürüklenme kuvveti, uçağın gövdesine ve kanatlarına etki eden, hareketi yavaşlatmaya çalışan bir dirençtir. Uçağın motorları, bu sürüklemeyi yenebilecek kadar güçlü itki üretmelidir. İtki kuvveti yetersiz olursa, uçak hız kaybeder ve uçuşunu sürdüremez (Sezen, 2025).

Ağırlık ise uçağın kütlesiyle doğrudan ilişkilidir ve yerçekimi nedeniyle sürekli aşağıya doğru etki eder. Uçakların yük kapasitesi, yakıtı, yolcuları ve ekipmanları da bu ağırlık kuvvetine dâhildir. Uçuşun sürdürülebilmesi için, kaldırma kuvveti mutlaka ağırlığı dengelemeli ya da aşmalıdır. Uçuşun başarılı bir şekilde devam edebilmesi için bu dört kuvvetin dengesi sürekli olarak korunmalıdır. Kaldırma kuvveti ağırlıktan fazla olursa uçak yükselir; az olursa alçalır. Aynı şekilde, itki sürüklemeyi aşarsa uçak hızlanır; sürüklenme daha büyükse uçak

yavaşlar ya da durur. Pilotlar ve modern otomatik uçuş kontrol sistemleri, bu kuvvetlerin dengesini sürekli izleyerek gerekli ayarlamaları yapar. Kaldırma kuvvetinin oluşumu ve etkinliği, kanatların geometrisine ve hücum açısına (kanadın hava akımına göre yaptığı açı) bağlıdır. Kanadın hücum açısı arttıkça kaldırma da artar, ancak belirli bir sınırdan sonra hava akımı kanat üzerinde bozulur ve "stall" adı verilen durum ortaya çıkar. Bu nedenle kanat tasarımı, aerodinamik verimlilik ve güvenlik açısından son derece önemlidir. Bir uçağın uçabilmesi için kaldırma ve itki kuvvetlerinin, ağırlık ve sürüklenme kuvvetlerine karşı yeterli ve dengeli olması gerekir. Uçuşun her anında bu kuvvetlerin etkileşimi dikkatle yönetilmelidir. Tüm bu prensipler, havacılık mühendisliğinin temelini oluşturur ve uçakların güvenli, verimli ve kontrollü şekilde hareket edebilmesini sağlar (Molchanov vd., 2013).



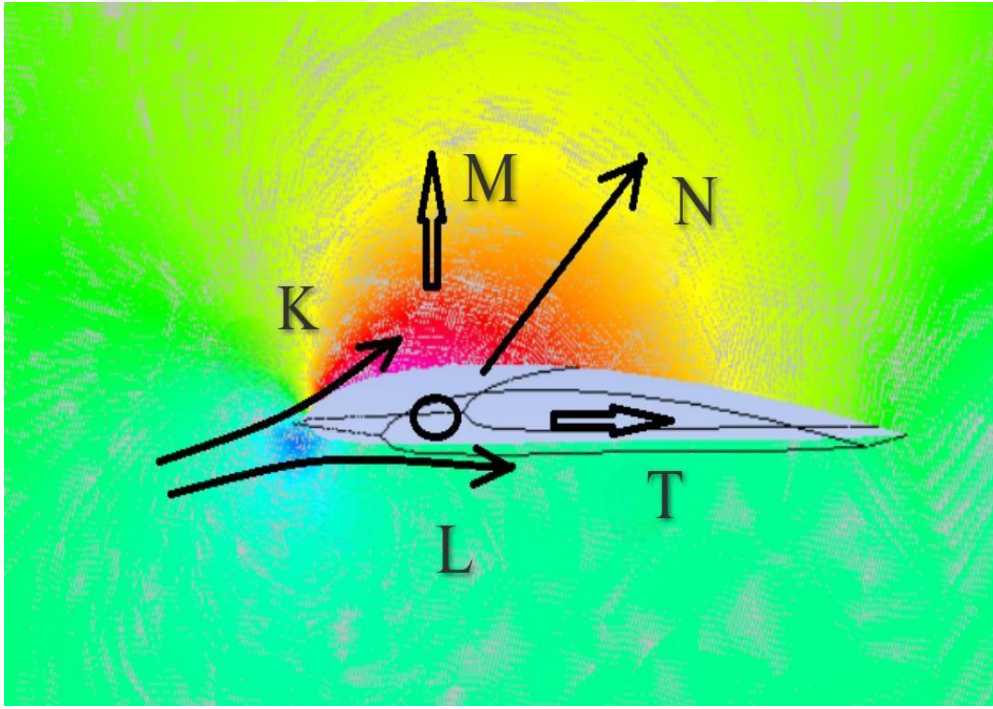
Şekil 2.3. Uçuş Sırasında Oluşan Kuvvetler

Kaynak: (Kim vd., 2023).

Yukarıdaki şekil, sabit kanatlı bir hava aracı üzerinde etkili olan temel aerodinamik kuvvetleri ve bu kuvvetlerin yönlerini şematik olarak göstermektedir. Hava araçlarının uçuşunu sağlayan ve uçuş sırasında sürekli olarak dengede tutulması gereken dört ana kuvvet, bu görselde X, Y, Z ve W harfleriyle işaretlenmiştir. Şekilde yukarıya doğru yönlendirilmiş olan X kuvveti, uçağın kanatları tarafından üretilen ve uçağın havada kalmasını sağlayan kaldırma kuvvetini (lift) temsil etmektedir. Kaldırma kuvveti, hava akımının kanat profili etrafında oluşturduğu basınç farkı sayesinde meydana gelir ve yerçekimine karşı etki ederek uçağın yükselmesini veya havada sabit kalmasını sağlar (Murphy, 2008).

Y harfiyle gösterilen ve uçağın burnu yönünde, yani ileriye doğru etki eden kuvvet, itki kuvvetidir (thrust). İtki, uçağın motorları tarafından üretilir ve hava aracı bu sayede ileri doğru

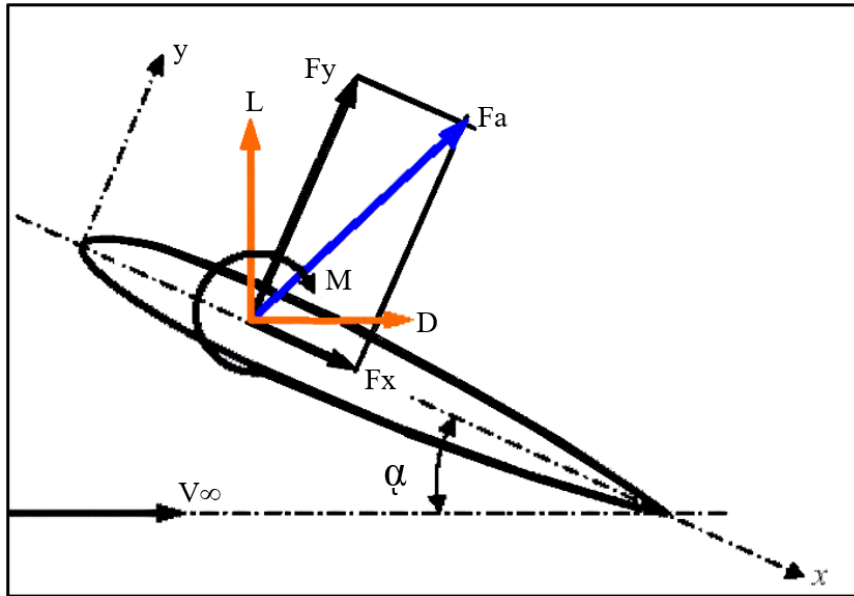
hareket edebilir. Motorlar tarafından sağlanan bu kuvvet, uçağın havada hızlanmasını ve istenen yöne doğru uçmasını mümkün kılar. Z harfiyle aşağıya doğru yönlendirilmiş olan kuvvet, uçağın ağırlığını (weight) temsil etmektedir. Bu kuvvet, yerçekiminin uçak üzerindeki etkisiyle ortaya çıkar ve uçağın toplam kütesine bağlı olarak aşağıya doğru uygulanır. Uçuşun sürdürülebilmesi için, kaldırma kuvveti mutlaka ağırlığı dengelemeli veya aşmalıdır. Son olarak, W harfiyle gösterilen ve uçağın hareket yönünün tersine, yani geriye doğru etki eden kuvvet ise sürüklenme kuvvetidir (drag). Sürüklenme, hava aracı gövdesinin, kanatlarının ve diğer çıkıntılı parçaların hava içinde hareket etmesinden kaynaklanan dirençtir. Sürüklenme kuvveti, uçağın hızını düşürmeye çalışır ve bu kuvvetin aşılması için yeterli itki üretilmelidir. Özetle, yukarıdaki şekil hava araçlarının uçuşunu mümkün kılan temel kuvvetleri ve bu kuvvetlerin etki yönlerini sade bir biçimde ortaya koymaktadır. Hava aracı tasarımında ve uçuşun her anında bu dört kuvvetin dengesi gözetilir; böylece emniyetli, verimli ve kontrollü bir uçuş sağlanır (Nergiz, 2008).



Şekil 2.4. Uçak Kanadında Oluşan Bileşke Kuvvet

Şekil 2.4.'de, bir uçak kanadı üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetlerin ve akış hatlarının temsili olarak gösterildiği bir diyagram yer almaktadır. Bu şekil, hava akışının kanat etrafında nasıl yönlendiğini, basınç dağılımını ve kanat üzerinde oluşan bileşke kuvvetlerin yönlerini anlamak açısından oldukça açıklayıcıdır. Şekilde kanadın ön kenarına (K noktası) çarpan hava akımı, üst yüzeyden ve alt yüzeyden olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. K ile

gösterilen ok, kanadın üst yüzeyine yönelen ve hızlanan hava akışını ifade etmektedir. Bu bölgede hava, kanadın bombeli şekli nedeniyle daha hızlı akar ve Bernoulli prensibine göre basınç azalır. L ile işaretlenen ok ise, kanadın alt yüzeyinden geçen hava akımını göstermektedir. Alt yüzeyde hava daha yavaş aktığı için basınç daha yüksek olur (Hou vd., 2019). Kanadın üzerinde oluşan basınç farkı neticesinde, M ile yukarı doğru gösterilen ok, kanat üzerinde oluşan kaldırma kuvvetini (Lift) temsil etmektedir. Bu kuvvet, hava akımının etkisiyle ortaya çıkan basınç farkından doğar ve uçağın havada kalmasını sağlar. N ile gösterilen ok ise, kaldırma kuvvetinin ve hava akımının oluşturduğu bileşke kuvvetin yönünü göstermektedir. Bileşke kuvvet, hem kaldırma kuvvetini hem de sürüklenme kuvvetini (Drag) içerir ve genellikle kaldırma ile sürüklenme arasındaki açılı bir doğrultuda bulunur. T ile belirtilen ok ise, kanadın hareket yönünü veya hava akımının kanat üzerindeki ilerleyişini temsil etmektedir. Kanadın profil şekli, üstte hızlanan hava akışı ve altta yavaşlayan hava ile birlikte, kaldırma kuvvetinin maksimum düzeyde oluşmasına imkan tanır. Bu şekil, kanat üzerindeki aerodinamik dengenin ve uçuşun temel prensiplerinin anlaşılması için son derece önemlidir. Özellikle üst yüzeydeki düşük basınç ve alt yüzeydeki yüksek basınç arasındaki fark, kaldırma kuvvetinin kaynağını açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda, kanat üzerindeki tüm kuvvetlerin vektörel bileşkesi uçağın uçuş performansını doğrudan etkiler. Kanat profilinin doğru tasarımı, hava akışının verimli bir şekilde yönlendirilmesi ve kaldırma-sürüklenme dengesinin sağlanması, modern havacılığın temel başarı kriterlerindendir (Sezen, 2025).



Şekil 2.5. Kuvvetlerin Vektörel Gösterimi

Yukarıdaki Şekil 2.5.'de bir hava aracı kanadı üzerine etki eden aerodinamik

kuvvetlerin vektörel gösterimini sunmaktadır. Bu tür diyagramlar, kanat profilinin etrafındaki hava akımına karşı nasıl reaksiyon verdiğini ve elde edilen kuvvetlerin nasıl bileşke oluşturduğunu anlamak için oldukça önemlidir. Şekilde, hava akımının geliş yönü (V_z) yatay eksen (x) doğrultusunda gösterilmiştir. Kanat profili ise bu akışa belirli bir α (alfa) hücum açısı ile yerleştirilmiştir.

Hücum açısı, kanat kordon çizgisi ile gelen hava akımı arasındaki açıdır ve kanat üzerinde oluşan kaldırma ile sürüklenme kuvvetlerinin büyüklüğünü doğrudan etkiler (Kim vd., 2023).

Kanat üzerinde hava akımının etkisiyle iki temel kuvvet oluşmaktadır: F_x ve F_y .

F_x kuvveti, hava akımının doğrultusuna paralel olan ve genellikle sürüklenme (drag) kuvvetiyle ilişkilendirilen yatay bileşendir.

F_y ise hava akımına dik olan ve esas olarak kaldırma (lift) kuvvetini temsil eden dikey bileşendir.

Bu iki kuvvetin vektörel bileşkesi, F_a olarak gösterilmiş ve bu kuvvet, kanat üzerinde o belirli hücum açısında elde edilen toplam aerodinamik kuvveti ifade etmektedir. F_a , kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin o anki açıya bağlı olarak birleşiminden doğan ve kanadın net hareketine etki eden kuvvettir. Diyagramda ayrıca, bu kuvvetlerin oluşturduğu momentin (M) kanat profili üzerinde bir etki noktasına göre işlediği gösterilmiştir. Bu moment, kanadın etrafında dönmeye neden olan kuvvet çifti olarak uçuş stabilitesi ve kontrolü açısından kritik öneme sahiptir. Ek olarak, kanat üzerindeki kuvvetlerin doğru analiz edilmesi, uçak performans hesaplamalarında ve yapısal tasarımda çok büyük bir rol oynar. Hücum açısının artırılması, genellikle kaldırma kuvvetini artırırken, belirli bir sınırdan sonra sürüklenme kuvveti de dramatik biçimde artar ve kanat üzerinde akış ayrılması (stall) riski doğar (Özkan, 2025).

Sonuç olarak, Şekil 2.5’de gösterilen vektörel analiz, bir hava aracının kanadı üzerindeki taşıma (lift) ve sürüklenme (drag) kuvvetlerinin nasıl oluştuğunu, bu kuvvetlerin bileşkesiyle elde edilen toplam aerodinamik kuvvetin yönünü ve büyüklüğünü açıklamaktadır. Bu tür analizler, hava aracı tasarımında, performans optimizasyonunda ve uçuşun emniyetli bir şekilde sürdürülebilmesinde temel rol oynar. Bir kanadın üst yüzeyinden akan havanın, alt yüzeyden akan havaya göre daha hızlı hareket etmesi, temel olarak Bernoulli prensibi ile açıklanır. Bu prensibe göre, bir akışkanın hızı arttıkça, o bölgede oluşan basınç azalır. Uçak kanadının üst yüzeyi genellikle bombeli ve daha uzun bir yol sunacak şekilde tasarlanır. Bu nedenle, üst

yüzeyden akan hava daha hızlı akar ve burada basınç düşer. Alt yüzeyden geçen hava ise, daha yavaş hareket ettiği için bu bölgede basınç daha yüksek olur (Kılıçoğlu, 2023).

İşte bu iki yüzey arasında oluşan basınç farkı, kanadı yukarıya doğru iten bir kuvvetin ortaya çıkmasına yol açar. Bu kuvvete kaldırma kuvveti adı verilir ve havacılıkta “L” sembolüyle gösterilir. Kaldırma kuvvetinin büyüklüğü yalnızca hava akışına bağlı değildir; aynı zamanda kanadın şekli, büyüklüğü, yüzey eğriliği (kamber), kanadın gövdeye oranla uzunluğu (açıklık oranı), kanadın uca doğru sivrilmesi ve kanadın havaya yaptığı açı (hücum açısı) gibi geometrik ve aerodinamik özelliklerle de yakından ilişkilidir. Kaldırma kuvveti, uçuşun gerçekleşebilmesi için zorunlu bir koşuldur. Uçağın veya herhangi bir hava aracının havada kalabilmesi için, oluşturulan kaldırma kuvveti en az aracın ağırlığı kadar olmalıdır. Kanat profili ve uçuş hızı, kaldırma kuvvetinin etkinliği üzerinde doğrudan etkilidir. Uçak tasarımında, maksimum kaldırma kuvveti elde edebilmek için genellikle kanadın üst yüzeyi daha bombeli ve hücum açısı uçuşun farklı safhalarında optimize edilir. Kaldırma kuvveti matematiksel olarak ifade edildiğinde, dinamik basınç, kanat alanı ve kanadın kaldırma katsayısı gibi parametrelerin çarpımıyla elde edilir. Sonuç olarak, havanın kanat üzerinde akışı ve ortaya çıkan basınç farkı, uçuşun temelini oluşturan kaldırma kuvvetinin kaynağıdır (Landell-Mills, 2019).

$$L = \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^2 (C_L) \quad (2.1)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^2 (C_D) \quad (2.2)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho A v_{\infty}^2 (C_M) \quad (2.3)$$

Yukarıda verilen formüller, bir hava aracı kanadı üzerine etki eden temel aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin matematiksel olarak hesaplanmasında kullanılan klasik denklemlerdir. Her üç formül de dinamik basınç esasına dayanmakta olup, hava aracı kanadının taşıma (kaldırma), sürüklenme ve moment davranışlarını niceliksel olarak değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. İlk formül, kanat üzerindeki kaldırma kuvvetinin (L) hesaplanmasını sağlar. Kaldırma kuvveti, uçağın havada kalmasını sağlayan ve kanadın üstünde oluşan düşük basınç ile altında oluşan yüksek basınç farkından kaynaklanan kuvvettir. Bu formülde ρ havanın yoğunluğunu, A kanadın alanını, v_{∞} serbest akış hızını ve C_L ise kaldırma katsayısını temsil eder. Kaldırma katsayısı, kanat profilinin şekline, hücum açısına ve akış koşullarına bağlı olarak değişen boyutsuz bir parametredir (Kılıçoğlu, 2023).

İkinci formül, kanat üzerinde oluşan toplam sürüklenme kuvvetini (D) ifade etmektedir. Sürüklenme kuvveti, hava aracının hava içinde hareketi sırasında karşılaştığı dirençtir ve verimli bir uçuşun sağlanabilmesi için minimum seviyede tutulması gereklidir. Bu denklemde C_D , sürüklenme katsayısını belirtir ve tıpkı kaldırma katsayısı gibi, kanadın geometrik ve aerodinamik özelliklerine bağlıdır. Sürüklenme kuvveti, uçağın motorları tarafından yenilmesi gereken bir dirençtir ve uçuşun enerji verimliliği üzerinde önemli bir rol oynar. Üçüncü formül ise kanat üzerinde oluşan momentin (M) matematiksel tanımını sunmaktadır. Moment, kanat etrafında döndürücü etki yaratan kuvvet çifti olarak tanımlanır ve uçuşun stabilitesi ile doğrudan ilişkilidir. Bu formülde C_M , moment katsayısıdır ve kanadın şekline, akış koşullarına ve hücum açısına bağlı olarak değişir. Moment hesabı, özellikle uçuş kontrolü ve hava aracının denge tasarımında kritik öneme sahiptir. Bu üç temel denklem, modern aerodinamik ve uçak mühendisliği çalışmalarında, kanat profili analizlerinden hava aracı performans tahminlerine kadar çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Formüllerde yer alan katsayılar (C_L , C_D , C_M) genellikle deneysel testler veya sayısal analizler sonucunda belirlenir ve bu değerler kullanılarak hava aracı tasarımında optimum performans hedeflenir (Khan vd., 2021).

Aerodinamik hesaplamalarda kullanılan formüllerde, ρ sembolü havanın yoğunluğunu (kg/m^3), A harfi kanadın ya da yüzeyin alanını (m^2), v ise hava akış hızını (m/s) ifade eder. Kaldırma katsayısı (C_L), sürüklenme katsayısı (C_D) ve moment katsayısı (C_M) ise birimden bağımsız, boyutsuz katsayılardır ve kanadın aerodinamik karakteristiklerini yansıtır. Uçak veya insansız hava aracı (İHA) uçuş halindeyken, serbest akış hızına paralel ve uçuş yönünün tam tersi doğrultusunda ortaya çıkan kuvvet, sürüklenme kuvveti olarak adlandırılır. Sürüklenme kuvveti, hava aracı üzerinde etkili olan ve genellikle istenmeyen bir dirençtir; artması uçuş menzilin azalmasına, yakıt tüketiminin artmasına ve kalkış mesafesinin uzamasına sebep olur. Uçuş performansı açısından, sürüklenme kuvvetinin en aza indirilmesi havacılık mühendisliğinin başlıca amaçlarından biridir (Ma, Huangfu ve Liu, 2020).

Sürüklenme kuvveti; uçağın hızına, kanat alanına, havanın yoğunluğuna ve özellikle de sürüklenme katsayısı olan C_D değerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Tasarım sırasında kanadın şekli, yüzey pürüzlülüğü, hücum açısı ve uçuş irtifası bu katsayı üzerinde belirleyici rol oynar. Ayrıca, uçuş esnasında kanadın yatay düzlemde rüzgâr direncine karşı oluşturduğu moment, havacılık literatüründe "yunuslama momenti" olarak adlandırılır. Yunuslama momenti, uçağın burun yukarı veya aşağı hareketine sebep olan dönme kuvvetidir ve uçuş stabilitesi ile kontrol kabiliyetini doğrudan etkiler. Bu moment de aynı şekilde dinamik basınç,

kanat alanı ve moment katsayısı kullanılarak hesaplanır. Bir diğer kritik kavram ise “hücum açısı”dır. Hücum açısı, rüzgârın akış yönü ile kanadın merkez çizgisi arasındaki açıdır. Bu açı, kanat üzerinde oluşan kaldırma kuvveti üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Hücum açısı arttıkça, genellikle kaldırma katsayısı (CL) ve sürüklenme katsayısı (CD) da doğru orantılı olarak artar. Düşük hücum açıları, hava akışının kanadın üst yüzeyinde düzgün ve laminar bir şekilde ilerlemesini sağlar. Ancak belirli bir açıdan sonra, yani kritik veya stall açısına ulaşıldığında, hava akışı kanadın üst yüzeyinden ayrılır ve burada girdaplı, türbülanslı bir yapı oluşur. Budurum, kanadın taşıma kabiliyetinin ani bir şekilde düşmesine neden olur ve “stall” olarak adlandırılır (Walter vd., 2004).

Günümüzde insansız hava araçları, sadece askeri operasyonlarda değil; sivil ve sosyal alanlarda da giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu araçların geliştirilmesinde en önemli hedeflerden biri, maksimum uçuş süresine ulaşmak ve mümkün olan en fazla faydalı yükü güvenle taşımaktır (Ünalır, 2025). Örneğin bir İHA’nın 100 kilometre menzil, saatte 180 kilometre hız ve 2 kilogram faydalı yük taşıma kapasitesi hedeflenebilir. Bu hedeflere ulaşabilmek için ise özellikle kanat tasarımı büyük önem taşır. Kanadın aerodinamik yapısı, hücum açısı, kanat alanı, sivrilik oranı ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler, hem kaldırma hem de sürüklenme performansını doğrudan etkiler (Luo vd., 2019).

İdeal bir İHA tasarımında, kanadın geometrisi ve aerodinamik özellikleri üzerinde yapılan Ar- Ge faaliyetleriyle optimum değerlere ulaşılması amaçlanır. Böylece, taşıma kapasitesi artırılırken, sürüklenme minimum seviyede tutulur ve uçuş süresi ile menzil maksimize edilir. Sonuç olarak, modern İHA’ların başarısında en kritik unsurlardan biri, kanat tasarımında elde edilen bu aerodinamik optimizasyondur. Kanadın şekli ve açısı doğru seçildiğinde, araç hem verimli hem de güvenli bir uçuş gerçekleştirebilir (Martian vd., 2024).

2.2. İHA Üretiminde Ahşap ve Kompozit Malzemeler

İnsansız hava araçları, günümüzde askeri, sivil ve ticari alanlarda hızlı bir yaygınlık kazanan, teknolojik gelişmelerin en çarpıcı örneklerinden biri haline gelmiştir (Bakır, 2019). İHA’ların tasarımı ve üretimi, yalnızca elektronik ve yazılım sistemlerinde değil, aynı zamanda yapısal malzeme seçimi ve üretim teknolojilerinde de önemli yenilikleri ve optimizasyonları gerektirir. Bir İHA’nın görev başarısı, menzili, taşıma kapasitesi, dayanıklılığı ve maliyeti doğrudan kullanılan yapı malzemeleriyle yakından ilişkilidir (Upasena vd., 2019).

İHA üretiminde tercih edilen malzemeler, uçağın performansını, ağırlık merkezini, dayanıklılığını ve bakım kolaylığını belirleyen en kritik unsurlardandır. Özellikle küçük ve orta

ölçekli İHA’larda, geçmişten günümüze ahşap malzemeler ve modern çağda gelişen kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılmaktadır. Ahşap malzemeler, hafiflikleri, işlenebilirlikleri ve doğal elastikiyetleri sayesinde uzun yıllar boyunca havacılık sektöründe önemli bir rol üstlenmişlerdir. Ancak, teknolojinin ilerlemesiyle birlikte kompozit malzemeler, sağladıkları yüksek mukavemet, düşük ağırlık ve şekillendirilebilirlik gibi avantajlarla İHA üretiminde öne çıkmaya başlamıştır (Natarajan, 2001). Her iki malzeme türünün de kendine özgü avantaj ve dezavantajları, farklı uygulamalarda tercih edilmesine yol açmaktadır. Uygun malzeme seçimi, İHA’nın görev profilinin yanı sıra, üretim maliyetleri, çevresel koşullara dayanıklılık ve bakım- onarım süreçleri göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Bu nedenle, günümüz İHA üretiminde ahşap ve kompozit malzemelerin kullanımı, mühendislik açısından sürekli karşılaştırılan ve optimize edilen bir konu olmuştur (Kaya, 2022).

2.2.1. Ahşap Malzemelerin İHA Üretiminde Kullanımı

Ahşap malzemeler, havacılığın ilk yıllarından itibaren hem insanlı hem de insansız hava aracı (İHA) üretiminde kritik bir rol oynamıştır. Özellikle havacılığın başlangıç dönemlerinde, metal ve sentetik malzemelerin yaygınlaşmasından önce, ahşap kolay bulunabilen, hafif, ekonomik ve işlenmesi pratik bir yapı malzemesi olarak tercih edilmiştir. Uçak ve İHA mühendisliğinde malzeme seçimi, uçağın performansı, dayanıklılığı, maliyeti ve bakım kolaylığı açısından büyük önem taşır. Ahşap bu yönüyle, özellikle küçük ve orta ölçekli insansız hava aracı projelerinde günümüzde dahi cazip bir alternatif olmaya devam etmektedir (Haque, Kormokar ve Zaman, 2017).

Ahşabın en büyük avantajı, doğal yapısı gereği yüksek bir dayanıklılık/ağırlık oranına sahip olmasıdır. Hafifliği sayesinde gövde ve kanatlarda ekstra ağırlık oluşturmada taşıma kapasitesini artırmak mümkündür. Bunun yanında, elastik yapısı ve esnekliği ile titreşimleri absorbe edebilmesi, uçuş sırasında yapının hasar görmesini önlemekte ve darbe anında enerjiyi dağıtabilmektedir. Özellikle balsa, ladin, huş ve çam gibi ağaç türleri, havacılık sektöründe sıklıkla kullanılmakta; balsa ise, çok düşük yoğunluğu ve yeterli mukavemetiyle model İHA’larda birincil tercih olarak öne çıkmaktadır. Ladin ve huş ise, genellikle ana taşıyıcı yapılar ve bağlantı elemanlarında kullanılır. Bu ağaçların farklı kombinasyonlarla lamine edilerek kullanılması, malzemenin genel mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini artırır (Kaya, 2022).

İHA üretiminde ahşap kullanmanın pratikliği, hem profesyonel hem de amatör kullanıcılar için büyük avantajlar sunar. Ahşap malzeme standart marangoz aletleriyle kolayca kesilip şekillendirilebilir, çeşitli tutkallar ve mekanik bağlantı elemanlarıyla sağlam bir şekilde

birleştirilebilir. Bu da, prototip geliştirme, hızlı deneme-yanılma ve sahada bakım-onarım işlemleri açısından ciddi bir esneklik sağlar. Özellikle üniversitelerin İHA toplulukları, yarışma takımları ve amatör model uçak üreticileri için ahşap, düşük maliyet ve erişilebilirlik açısından hala önemli bir alternatiftir. Ayrıca, hasar gören bir bölümün kolayca onarılabilmesi veya değiştirilebilmesi, operasyon sürekliliği için ek bir avantajdır (Furlas ve Karras, 2021).

Ancak ahşap malzemelerin dezavantajları da göz ardı edilmemelidir. Ahşap, doğal kökenli bir malzeme olduğu için çevresel faktörlere duyarlıdır. Özellikle nem, sıcaklık değişimi, böcek ve mantar gibi biyolojik etkiler, ahşabın zamanla dayanıklılığını azaltabilir. Ayrıca, uzun süreli uçuşlarda ve yüksek hız gerektiren görevlerde, modern kompozit ve metal malzemelerle karşılaştırıldığında, yapısal dayanımı sınırlı kalmaktadır. Yoğun yağış, sıcaklık farkları ve güneş ışığı gibi dış etkenler, malzemenin mukavemetini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, profesyonel askeri ve endüstriyel İHA uygulamalarında, ahşap genellikle yardımcı veya takviye edici malzeme olarak tercih edilmekte, ana taşıyıcı yapı olarak kullanılmamaktadır (Akbar vd., 2021).

Buna rağmen, modern teknolojiyle birlikte ahşap malzemenin performansını artırmaya yönelik çeşitli uygulamalar da geliştirilmektedir. Ahşabın özel reçineler ve emprenye teknikleriyle güçlendirilmesi, lamine ahşap teknolojileri ile kompozit yapılara dönüştürülmesi, hem dayanıklılığını artırmakta hem de çevresel etkilere karşı koruma sağlamaktadır. Ayrıca, ahşap ile karbon fiber veya cam elyaf gibi kompozitlerin birlikte kullanılması, hibrit yapılar oluşturarak hem maliyet hem de performans açısından optimal sonuçlar alınmasını mümkün kılmaktadır. Ahşap malzemeler İHA üretiminde halen belirli uygulama alanlarında avantaj sunan, tarihsel ve teknik açıdan önemli bir yapı malzemesidir. Ahşabın düşük maliyeti, kolay işlenebilirliği, hafifliği ve belirli görev profillerinde sağladığı dayanıklılık, onu amatör, eğitim ve prototip İHA projelerinde vazgeçilmez kılmaktadır. Fakat ileri teknolojinin ve uzun ömürlü, yüksek performanslı İHA'ların gereklilikleri karşısında, ahşap genellikle kompozit ve sentetik malzemelerle tamamlanmakta veya onların gerisinde kalmaktadır. Yinede, havacılık ve İHA tasarımında ahşabın sağladığı tecrübe ve pratiklik, mühendislikte değerini her zaman korumaktadır (Upasena vd., 2019).

2.2.1.1. Ahşap Malzeme Türleri ve Uygulamaları

İnsansız hava araçlarının üretiminde kullanılan ahşap malzeme türleri, hem mekanik özellikleri hem de işlenebilirlikleri açısından dikkatlice seçilmektedir. Ahşabın hafifliği, mukavemeti ve kolayca şekillendirilebilmesi, farklı ağaç türlerinin değişik yapısal görevlerde

kullanılmasına olanak tanır. Her bir ahşap türünün kendine özgü avantajları ve kullanım alanları bulunmaktadır. Balsa ağacı, havacılık ve modelcilikte en çok tercih edilen ahşap türlerinden biridir. Balsanın en büyük özelliği, son derece düşük yoğunluğa sahip olmasıdır; bu da İHA'nın toplam ağırlığını önemli ölçüde azaltır. Aynı zamanda yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Balsa, genellikle kanat, gövde ve kuyruk yüzeylerinde, hem kaplama hem de ana taşıyıcı parçalarda yaygın şekilde kullanılır. Özellikle küçük ve hafif İHA prototiplerinde, balsanın sağladığı hafiflik büyük bir avantajdır. Ladin ağacı ise, balsaya göre daha yüksek yoğunluk ve dayanıklılık sunar. Özellikle ana taşıyıcı kirişler, bağlantı noktaları ve stresin yoğun olduğu bölgelerde kullanılır. Ladin, doğal olarak uzun ve düz lif yapısına sahip olduğundan, yapısal yükleri verimli şekilde taşıyabilir. Hem gövde ana omurgasında hem de kanat kirişlerinde sıklıkla tercih edilir (Rossiter ve Cannon, 2022).

Huş ve çam ağacı, özellikle kontrplak formunda İHA üretiminde önemli bir yere sahiptir. Kontrplak, ince ahşap tabakalarının lifleri birbirine dik olacak şekilde preslenmesiyle elde edilen çok katmanlı bir malzemedir. Bu yöntemle üretilen kontrplaklar, hem yüksek yüzey dayanıklılığı hem de stabilite sağlar. Gövde kaplamalarında, kanat uçlarında, ara desteklerde ve bazı yapısal elemanlarda yaygın olarak kullanılır. Çam ise, özellikle düşük maliyeti ve kolay temini sayesinde model uçaklar ve eğitim amaçlı İHA'larda tercih edilmektedir. Ahşap lamine malzemeler de, birden fazla ahşap türünün ya da tabakasının özel reçinelerle birleştirilmesiyle elde edilir. Bu malzemeler, doğal ahşabın elastikiyetini korurken, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerini artırır. Özellikle uzun ömürlü ve darbelere karşı daha dirençli İHA gövdelerinde, lamine ahşap çözümleri sıklıkla kullanılır (Yalım vd., 2024).

Ahşabın bu farklı türlerinin kullanımı, İHA'nın görev profiline, tasarım gereksinimlerine ve bütçe kısıtlarına göre değişiklik gösterebilir. Hafiflik ve kolay işlenebilirlik gerektiren projelerde balsa ön plana çıkarken, daha fazla mukavemet istenen uygulamalarda ladin ve huş kontrplak gibi daha güçlü malzemeler tercih edilmektedir. Ayrıca, ahşap malzemeler çeşitli yüzey işlemlerinden geçirilerek nem, böcek ve mantara karşı korunabilir; böylece hem ömürleri uzar hem de dış koşullara daha dayanıklı hale gelirler. Ahşap malzeme türlerinin doğru seçimi ve uygun alanlarda kullanımı, hem maliyet hem de performans açısından İHA tasarım ve üretiminde büyük fark yaratmaktadır. Uygulama alanına göre ahşap; gövde, kanat, kuyruk, ara destek veya kaplama gibi çeşitli parçalarda etkin biçimde değerlendirilebilir. Böylece, tasarımda esneklik ve üretimde hız elde edilirken, ağırlık ve maliyet de optimum seviyede tutulmuş olur (Kılıçoğlu, 2023).

2.2.2. Kompozit Malzemelerin İHA Üretiminde Kullanımı

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen, yapısal ve işlevsel açıdan son derece gelişmiş mühendislik ürünleridir. Son yıllarda insansız hava aracı üretiminde kompozit malzemelerin ön plana çıkmasının başlıca sebebi; hafiflik, yüksek mukavemet ve tasarım esnekliği gibi avantajlar sunmalarıdır. Kompozitlerin temelinde, matris (genellikle bir reçine ya da polimer) ile takviye (elyaf) birleşerek, tek başına hiçbir malzemenin sunamayacağı özelliklere sahip, özgün bir yapı oluşturulur. Bu sayede kompozit malzemeler, geleneksel metal veya ahşap malzemelerle karşılaştırıldığında, çok daha yüksek performans ve dayanıklılık sunabilirler (Kara, 2017).

İHA üretiminde kompozitlerin kullanımı, özellikle uzun menzil, yüksek taşıma kapasitesi ve üstün aerodinamik performans gerektiren uygulamalarda kritik öneme sahiptir. Bu malzemeler, hem askeri hem de sivil amaçlı İHA’larda ana gövde, kanat, kuyruk ve diğer yapısal elemanlarda yaygın biçimde tercih edilmektedir. Kompozitlerin sunduğu hafiflik avantajı, yakıt tüketiminin ve enerji ihtiyacının azalmasına, böylece daha uzun uçuş süreleri ve daha fazla faydalı yük kapasitesi elde edilmesine olanak tanır. Ayrıca, kompozit malzemelerin şekillendirilebilme yeteneği, mühendislerin yenilikçi ve karmaşık tasarımlar gerçekleştirmesini mümkün kılar (Akbar vd., 2021).

Günümüzde İHA’larda kullanılan başlıca kompozit türleri arasında cam elyaf, karbon fiber, aramid (örneğin Kevlar), bazalt fiber ve hibrit kompozitler bulunmaktadır. Her bir kompozit türü, farklı mekanik özellikler, maliyetler ve uygulama alanları ile öne çıkar. Özellikle karbon fiber takviyeli polimerler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve dayanıklılık gerektiren modern İHA projelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Cam elyaf ise, nispeten daha düşük maliyetli olup, iyi bir mukavemet ve esneklik sunar. Aramid esaslı kompozitler, darbe dayanımı ve yüksek enerji sönmeme özellikleri ile özellikle askeri uygulamalarda tercih edilmektedir. Kompozit malzemelerin kullanımı, İHA üretiminde yalnızca performans avantajı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda bakım ve onarım süreçlerini de kolaylaştırır. Kompozit yapıların parçalı üretimi sayesinde, hasar gören bölge yerinde tamir edilebilir ya da hızlıca değiştirilebilir. Ayrıca, kompozitlerin korozyona ve çevresel etkilere karşı dirençli olması, İHA’ların zorlu hava koşullarında dahi uzun süre sorunsuz çalışmasını sağlar. Bu özellikler, özellikle görev sürekliliğinin ve operasyonel güvenilirliğin kritik olduğu askeri İHA’lar için büyük önem taşır (Kara, 2017).

Kompozit malzemeler günümüz İHA teknolojisinin merkezinde yer alan ve her geçen

gün daha fazla geliştirilen mühendislik ürünleridir. Gelişen malzeme bilimi ve üretim teknikleri sayesinde, kompozitlerin dayanıklılığı, hafifliği ve çok yönlülüğü daha da artırılmıştır. Bu malzemeler, modern İHA'ların yüksek performanslı, uzun ömürlü ve verimli bir şekilde tasarlanmasını mümkün kılarak, havacılık endüstrisinde devrim niteliğinde bir dönüşüm yaratmıştır (Çetinkaya ve Koç, 2023).

2.2.2.1. Kompozitlerin Temel Özellikleri

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla farklı fazın makro seviyede bir araya getirilmesiyle oluşturulan, yeni ve üstün özellikler kazandırılmış mühendislik ürünleridir. Bir kompozit yapının temel bileşenleri “matris” ve “takviye”dir. Matris, genellikle polimer, seramik veya metal esaslı bir malzeme olup, takviye ise cam, karbon, aramid gibi yüksek dayanımlı liflerden oluşur. Matris fazı, takviyeyi bir arada tutar, yükü takviyelere aktarır ve dış ortamdan gelecek etkilere karşı koruma sağlar. Takviye fazı ise kompozite yüksek mekanik mukavemet, dayanıklılık ve rijitlik kazandırır (Öztürk, 2023).

Kompozit malzemelerin öne çıkan temel özelliği, oldukça yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına sahip olmalarıdır. Yani çok düşük bir ağırlıkla, çok yüksek dayanıklılık sunabilirler. Bu özellik, havacılık ve uzay teknolojilerinde, özellikle İHA'larda, taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda enerji tüketimini düşürür. Kompozit malzemeler, istenen şekilde ve kalınlıkta üretilbildiği için, karmaşık ve yenilikçi yapısal tasarımların gerçekleştirilmesine olanak tanır. Bu esneklik, hem aerodinamik hem de fonksiyonel açıdan büyük avantaj sağlar. Bir diğer önemli özellik ise, kompozit malzemelerin korozyona ve kimyasal etkilere karşı yüksek direnç göstermesidir. Metal veya ahşap gibi klasik malzemelerin zamanla paslanması, çürümesi veya çevresel faktörlerden zarar görmesi kaçınılmazken, kompozitler bu etkilere karşı uzun süre dayanıklılığını koruyabilir. Ayrıca, kompozit malzemeler elektriksel olarak da yalıtkan veya iletken özellikler gösterebilir; bu da onları elektronik ekipmanlarla entegre edilen modern İHA sistemlerinde avantajlı kılar (Mohd Ghazali, Teoh ve Wan Rahiman, 2025).

Kompozit malzemelerin bir diğer dikkat çekici özelliği ise, titreşim sönümleme ve darbe enerjisini emme kapasitesidir. Aramid fiber gibi bazı kompozit türleri, yüksek enerji absorpsiyon yeteneğiyle darbelere karşı mükemmel koruma sağlar. Bu özellik, özellikle askeri ve zorlu görevler için tasarlanan İHA'larda güvenliğin artırılmasında kritik bir rol oynar. Aynı zamanda kompozitlerin düşük genleşme katsayısı, sıcaklık değişimlerine karşı boyutsal kararlılık ve yapısal bütünlük sunar. Kompozit malzemeler; hafiflik, yüksek mukavemet,

şekillendirilebilirlik, çevresel dayanıklılık ve işlevsel çeşitlilik gibi temel avantajlara sahiptir. Bu malzemelerin her biri, havacılıkta ve İHA üretiminde aranan nitelikleri sağlayarak, klasik malzemelerin ötesinde performans ve dayanıklılık imkânı sunar. Gelişen teknolojiyle birlikte, yeni nesil kompozitlerin bu özellikleri daha da artırılarak, havacılık sektöründe çok daha geniş uygulama alanları bulacağı öngörülmektedir (Kaya, 2022).

2.2.2.2. Kompozitlerin Avantajları

Kompozit malzemelerin en önemli avantajlarından biri, olağanüstü hafiflik ile yüksek mukavemetin aynı anda sağlanabilmesidir. Bu özellik, insansız hava araçlarında daha fazla faydalı yük taşınmasını ve uçuş menzilinin artırılmasını mümkün kılar. Geleneksel metal ve ahşap malzemelere göre, kompozitler çok daha düşük yoğunluğa sahip olup, aynı yapısal dayanıklılığı koruyarak toplam ağırlığı azaltırlar. Böylece, yakıt tüketimi azalır ve batarya ile çalışan sistemlerde enerji verimliliği önemli ölçüde artar. Bir diğer önemli avantaj ise, kompozitlerin şekillendirilebilirlik özelliğidir. Kompozit malzemeler, farklı formlarda ve çok çeşitli geometrilerde üretilebilir. Bu sayede, aerodinamik açıdan optimize edilmiş kanat ve gövde tasarımlarına kolayca ulaşılır. Mühendisler, belirli bir görev profiline en uygun şekli tasarlayabilir ve prototip üretimlerinde hızlıca test edebilirler. Bu esneklik, modern İHA’larda yenilikçi ve karmaşık yapıların ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Nas ve Öztürk, 2018).

Kompozit malzemeler, çevresel etkilere karşı da son derece dayanıklıdır. Korozyona uğramazlar, rutubet ve nemden etkilenmezler ve güneş ışığı gibi zararlı çevresel koşullara karşı uzun süre direnç gösterebilirler. Özellikle deniz üstü veya aşırı sıcak/soğuk ortamlarda görev yapan İHA’lar için, kompozitlerin bu özelliği operasyonel güvenlik ve uzun ömür açısından büyük avantaj sağlar. Ayrıca, kompozitlerin kimyasal olarak inert olması, agresif ortamlarda yapının bütünlüğünü korumasını sağlar. Kompozit malzemeler bakım ve onarım açısından da avantaj sunar. Parçalı üretim ve modüler tasarım imkânı, hasar gören bölümün yalnızca ilgili kısmının onarılmasını veya değiştirilmesini kolaylaştırır. Ayrıca, kompozitlerin üretim aşamasında farklı katkı maddeleri eklenerek özellikleri optimize edilebilir. Bu da, kullanım amacına göre dayanıklılık, elastikiyet veya iletkenlik gibi özelliklerin hedeflenen şekilde artırılmasını sağlar (Haque, Kormokar ve Zaman, 2017). Kompozit malzemeler sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim açısından da avantajlar sunmaktadır. Yeniden dönüştürülebilen veya çevreye duyarlı üretim süreçlerinde kullanılabilen kompozitler, havacılık ve İHA sektöründe yeşil teknolojilere geçişi destekler. Bu sayede, performans ve çevrecilik bir arada sağlanarak, modern mühendisliğin temel ilkeleri hayata geçirilmiş olur (Prisacariu vd., 2022).

2.2.2.3. Kompozitlerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin birçok avantajı olmasına rağmen, bazı önemli dezavantajları da göz önünde bulundurulmalıdır. En başta gelen sorunlardan biri, kompozit üretim süreçlerinin karmaşıklığı ve maliyetinin görece yüksek olmasıdır. Yüksek teknoloji gerektiren kalıplama, reçine infüzyonu, otoklav işlemleri gibi üretim adımları, hem ekipman hem de uzmanlık gerektirir. Bu durum, düşük adetli üretimlerde veya küçük ölçekli projelerde maliyetleri yükseltebilir. Bir diğer dezavantaj, kompozitlerin onarım süreçlerindeki zorluklardır. Kompozit yapıların bütünlüğü, hasar anında metal veya ahşap gibi klasik malzemelere göre daha karmaşık analiz ve tamir gerektirir. İçsel kırıklar, tabaka ayrılması (delaminasyon) gibi sorunların tespiti, özel ekipman ve teknik bilgi gerektirir. Ayrıca, bazı kompozitler tekrarlanan yükler veya darbeler altında mikroskobik hasarlar biriktirerek, ani ve beklenmedik arızalara yol açabilir (Kara, 2017).

Kompozitlerin çevresel duyarlılığı, özellikle yüksek sıcaklık ve UV ışınları gibi faktörler karşısında dikkatli bir mühendislik gerektirir. Bazı reçine türleri uzun süre güneş ışığına maruz kaldığında yapısal özelliklerinde bozulma yaşayabilir. Ayrıca, nemin kompozit yapıya sızması, özellikle fiber-matris arayüzünde zayıflamalara yol açabilir. Bu tür etkilerin önlenmesi için, koruyucu kaplamalar ve ileri üretim teknikleri uygulanmaktadır. Kompozit malzemelerin geri dönüşümü de klasik malzemelere kıyasla daha zor ve maliyetli olabilmektedir. Özellikle karbon fiber ve bazı termoset polimerler, geleneksel geri dönüşüm yöntemleriyle kolayca yeniden kullanılabilir değildir. Bu durum, sürdürülebilir üretim ve atık yönetimi açısından ileride çözülmesi gereken bir sorun olarak öne çıkmaktadır. Gelişen teknolojiyle birlikte, çevre dostu reçineler ve liflerin kullanımı artmakta olsada, bu alan halen araştırma ve geliştirmeye açıktır (Besenyő ve Málnássy, 2024).

Kompozit malzemelerle ilgili bilgi birikimi ve iş gücü ihtiyacı da önemli bir dezavantajdır. Kompozitlerle çalışmak, malzeme biliminden üretim tekniklerine, kalite kontrolünden montaja kadar özel eğitim ve deneyim gerektirir. Sektörde yetişmiş insan kaynağı eksikliği, üretim kalitesi ve süreçlerin sürekliliği açısından zorluk yaratabilir. Bu nedenle, kompozitlerin avantajlarından tam anlamıyla yararlanabilmek için, uzmanlaşmış ekiplerin ve teknolojik alt yapının varlığı kritik öneme sahiptir (Khan vd., 2021).

2.2.2.4. Kompozit Malzeme Türleri (Cam Elyaf, Karbon Fiber, Aramid vb.)

Kompozit malzemelerin İHA üretiminde kullanılmasında başlıca rol oynayan takviye türleri; cam elyaf, karbon fiber ve aramid (Kevlar gibi) elyaflardır. Her bir takviye türü, farklı

mekanik özellikler, maliyetler ve uygulama alanları ile ön plana çıkar. Kompozitlerin ana yapısı, bir matris (genellikle epoksi, polyester veya vinilester reçine) içerisinde dağılmış lifli takviyeden oluşur. Bu kombinasyon sayesinde, hem yüksek mukavemet hem de düşük ağırlık elde edilebilir (Sezen, 2025).

Cam elyaf kompozitler, havacılıkta en yaygın kullanılan ve maliyet açısından en uygun olan kompozit türüdür. Cam elyaflar, esneklikleri ve darbe dayanımı ile bilinir. Nispeten daha düşük maliyetli olduklarından, özellikle eğitim amaçlı İHA'lar ve hobi sınıfı hava araçlarında yaygın olarak tercih edilirler (Hasançebi, 2024). Ayrıca, cam elyaf kompozitler, elektriksel olarak yalıtkan olmaları sayesinde radar ve elektronik ekipmanlarla birlikte kullanılmak için de uygundur. Karbon fiber kompozitler ise, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, düşük yoğunluk ve olağanüstü rijitlik ile öne çıkar. Karbon fiber, askeri ve yüksek performans gerektiren İHA'larda vazgeçilmez bir takviye malzemesidir. Özellikle uzun menzilli, yüksek süratli veya ağır yük taşınması gereken İHA'larda karbon fiberin sunduğu mukavemet, enerji verimliliği ve aerodinamik avantajlar kritik rol oynar. Ancak, karbon fiberin maliyeti cam elyafa göre oldukça yüksektir (Koçyiğit, 2025).

Aramid elyaflar (örneğin Kevlar), darbe dayanımı, enerji absorpsiyonu ve esneklik özellikleriyle bilinir. Aramid esaslı kompozitler, özellikle darbe ve çarpışma riskinin yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilir. Askeri amaçlı İHA'larda, gövde ve kanatlarda ek koruma sağlamak için kullanılırlar. Ayrıca, aramid lifleri yanmaya ve yüksek sıcaklığa karşı dirençli olmaları nedeniyle, yangın riski olan ortamlarda da avantaj sunar. Bunların dışında bazalt fiber gibi yeni nesil kompozit takviyeler de havacılık sektöründe giderek daha fazla kullanılmaya başlanmıştır. Bazalt fiber, hem cam hem de karbon elyafa kıyasla daha yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal direnç sunar. Ayrıca, hibrit kompozitler ile farklı lif türlerinin bir arada kullanılması, yapıların çok yönlü mekanik özelliklerle donatılmasına imkân tanır. Böylece, İHA'nın görev profiline göre en ideal malzeme kombinasyonu seçilebilir. Kompozit malzeme türlerinin çeşitliliği ve sağladığı esneklik, İHA tasarımcılarının performans, maliyet, dayanıklılık ve özgül görevler için optimum çözümler üretmesini mümkün kılmaktadır. Uygulama alanına ve görev gereksinimine göre, cam elyaf, karbon fiber, aramid veya hibrit kombinasyonlar tercih edilerek hem verimli hem de güvenli insansız hava araçları üretilabilmektedir (Mohsan vd., 2022).

2.2.3. Ahşap ve Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması

İnsansız hava aracı (İHA) teknolojisinin gelişimi, kullanılan malzemelerin niteliği ve çeşitliliğiyle doğrudan bağlantılıdır. Malzeme seçimi, yalnızca uçağın ağırlığını ve taşıma kapasitesini değil; aynı zamanda dayanıklılığını, manevra kabiliyetini, uzun ömürlülüğünü ve

bakım maliyetlerini de etkiler. Geleneksel ahşap malzemeler, havacılığın ilk yıllarından bu yana, özellikle küçük ve orta ölçekli İHA’larda yaygın olarak tercih edilmiştir. Ahşabın kolay işlenebilirliği, ekonomikliği ve hafifliği, onu özellikle prototip geliştirme, eğitim ve hobi amaçlı uygulamalarda cazip bir seçenek haline getirmiştir (Demiryol ve Soyaltin-Colella, 2024). Bununla birlikte, teknolojinin ilerlemesi ve performans taleplerinin artmasıyla birlikte, kompozit malzemeler modern havacılığın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Karbon fiber, cam elyaf ve aramid gibi kompozit türleri, üstün mekanik özellikleri ve düşük ağırlıkları sayesinde hem askeri hem de ticari İHA’larda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Kompozitler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, çevresel dayanıklılık ve tasarım esnekliği gibi avantajlarıyla klasik ahşap malzemelere kıyasla çok daha üstün bir yapı alternatifi sunar (Tachinina, Lysenko ve Kutiepov, 2022).

Ahşap ve kompozit malzemelerin her birinin kendine özgü avantajları ve sınırlılıkları vardır. Bu iki malzemenin karşılaştırılması; sadece malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda üretim maliyeti, bakım-onarım süreçleri, kullanım ömrü, çevresel faktörlere dayanıklılığı ve uygulama alanlarını da kapsamaktadır. Doğru malzeme seçimi, İHA’nın görev profiline, uçuş koşullarına ve beklenen performans kriterlerine göre belirlenmelidir. Günümüzde birçok İHA projesinde, hem ahşap hem de kompozit malzemeler belirli alanlarda birlikte kullanılmakta veya hibrit çözümler geliştirilmektedir. Bu nedenle, malzeme seçiminde yalnızca mühendislik hesapları değil; uygulama kolaylığı, üretim kapasitesi, bütçe kısıtları ve projenin uzun vadeli hedefleri de dikkate alınmaktadır. Ahşap ve kompozit malzemeler arasındaki karşılaştırma, günümüz havacılık endüstrisinin gelişen ihtiyaçlarına en uygun ve dengeli çözümleri bulmak açısından büyük önem taşımaktadır (Dada vd., 2022).

2.2.3.1. Mekanik Özellikler

Ahşap ve kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, insansız hava aracı (İHA) üretiminde hangi görev ve uygulamalara uygun olduklarını belirleyen en temel kriterlerden biridir. Ahşap, doğal yapısı gereği belirli bir elastikiyet ve mukavemet sunar. Bu malzeme, liflerin boyuna paralel yerleşimi sayesinde, özellikle çekme kuvvetlerine karşı beklenenden daha fazla dayanıklılık gösterebilir. Fakat liflerin boyuna ya da enine dağılımına göre mekanik özellikler değişiklik gösterir ve homojen bir davranış sergilemez (Ejeh vd., 2019).

Kompozit malzemeler ise tasarımcıya, belirli bir yönde veya çok eksenli olarak, arzu edilen mekanik özellikleri “tasarlama” imkânı sunar. Karbon fiber, cam elyaf ya da aramid gibi

takviyelerle güçlendirilmiş matris yapılar, yüksek çekme, basma ve eğilme mukavemeti ile klasik malzemelerin çok daha ötesine geçebilirler. Ayrıca, kompozitlerin esnekliği ve rijitliği, malzemenin üretim sürecinde liflerin yönüne ve yoğunluğuna göre optimize edilebilir. Bu, özellikle aerodinamik yüklerin çok çeşitli ve değişken olduğu İHA kanat ve gövde tasarımlarında büyük avantaj sağlar (Özyıldırım vd., 2024). Ahşap, elastikiyet açısından avantajlıdır; darbe anında bir miktar enerji absorbe edebilir ve küçük çaplı deformasyonları tolere edebilir. Bu durum, uçuş sırasında ani yük değişimlerinde veya beklenmeyen darbelerde yapının bir bütün olarak korunmasına yardımcı olur. Fakat, ahşabın doğal yapısı gereği lifler arasında boşluklar ve düzensizlikler bulunabilir. Bu nedenle, özellikle büyük ölçekli ve uzun menzilli İHA'larda, ahşabın sunduğu mekanik dayanıklılık çoğu zaman yeterli olmaz (Bremnes vd., 2022).

Kompozit malzemelerin üstünlüğü, istenen bölgede maksimum mukavemet ve minimum ağırlık elde etmeye olanak tanıyan özelleştirilebilir yapısından gelir. Ayrıca, kompozitler yorgunluk dayanımı açısından ahşaptan çok daha üstündür; tekrar eden yükler altında uzun süre yapısal bütünlüklerini koruyabilirler. Bu, İHA'ların çoklu kalkış-iniş döngülerine ve sürekli titreşimlere maruz kaldığı durumlarda son derece önemlidir. Mekanik özellikler açısından ahşap pratiklik ve elastikiyet sunarken; kompozit malzemeler, yüksek mukavemet, rijitlik, uzun ömür ve özelleştirilebilirlik avantajlarıyla öne çıkar. Modern İHA mühendisliğinde, görev profili ve gereksinimlere göre bu iki malzemenin mekanik özellikleri dikkatle analiz edilerek optimum çözümler oluşturulur (Ali, 2025).

2.2.3.2. Dayanıklılık ve Ağırlık

Dayanıklılık ve ağırlık, İHA tasarımında malzeme seçimini doğrudan etkileyen en kritik iki parametredir. Ahşap malzemeler, hafiflikleri sayesinde küçük ve orta ölçekli İHA'larda uzun yıllar tercih edilmiştir. Özellikle balsanın düşük yoğunluğu, taşıma kapasitesi sınırlı olan hava araçlarında ağırlık avantajı sağlamaktadır. Ancak ahşap, zamanla çevresel etkilere ve yıpranmaya karşı duyarlıdır; nem, sıcaklık, güneş ışığı ve biyolojik etkenler malzemenin dayanıklılığını düşürebilir (Öztürk, 2024a).

Kompozit malzemeler ise, doğal malzemelerin sınırlarının ötesine geçerek yüksek dayanıklılık sunar. Karbon fiber veya aramid esaslı kompozitler, aynı hacimdeki ahşaba göre çok daha yüksek bir mukavemete ve çok daha düşük bir ağırlığa sahiptir. Kompozitlerin iç yapısı, mekanik zorlanmalara karşı dirençli olacak şekilde katman katman tasarlanabilir ve üretim sürecinde mikro çatlaklar ya da hatalar minimize edilebilir. Bu durum, hem uçuş

güvenliğini artırır hem de uzun vadede bakım ihtiyacını azaltır. Ahşabın zayıf yönlerinden biri, sürekli değişen çevre koşullarına adaptasyonunun sınırlı olmasıdır. Özellikle nem oranındaki dalgalanmalar, ahşabın boyutlarında değişikliklere neden olabilir ve bu da yapının zamanla deformasyonuna, çatlaklara veya kırılmalara yol açabilir. Buna karşılık kompozit malzemeler, çevresel faktörlerden minimum seviyede etkilenirler. Yüksek sıcaklık, nem ya da kimyasal maruziyet bile çoğu kompozitin performansını önemli ölçüde değiştirmez (Öztürk, 2024b).

Ağırlık açısından, kompozitler düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet kombinasyonu sayesinde İHA'ların menzilini, taşıma kapasitesini ve enerji verimliliğini artırır. Bu, modern askeri ve ticari İHA'larda uzun süreli uçuşlar, hızlı manevra yetenekleri ve yüksek irtifa görevleri için kritik bir avantajdır (Wei vd., 2020). Ahşap ise, ağırlık avantajına sahip olmasına rağmen dayanıklılık açısından üst düzeyde kalabilmesi için genellikle daha kalın ya da çok katmanlı kullanılır; bu da istenilen rijitliğe ulaşırken toplam ağırlığı artırabilir. Genel olarak, dayanıklılık ve ağırlık dengesinde kompozit malzemeler günümüzde açık ara öne çıkmaktadır. Özellikle görev sürekliliği, uzun ömür ve yüksek performans gerektiren uygulamalarda, kompozitlerin sağladığı avantajlar mühendislik açısından vazgeçilmezdir. Ancak, kısa süreli, düşük bütçeli ya da amatör uygulamalarda ahşap halen pratik bir seçenek olarak değerini korumaktadır (Khan, Gupta ve Gupta, 2022).

2.2.3.3. Maliyet Analizi

Maliyet faktörü, İHA üretiminde malzeme seçiminin en önemli belirleyicilerinden biridir. Ahşap malzemeler, hammaddenin kolay temin edilebilmesi, işlenme ve birleştirme süreçlerinin basitliği nedeniyle düşük maliyetli çözümler sunar. Marangozluk aletleriyle işlenebilen ahşap, üniversite projeleri, hobi amaçlı İHA'lar ve hızlı prototipleme süreçlerinde bütçe dostu bir alternatiftir. Ayrıca, tamir ve bakım işlemleri de genellikle ucuz ve hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir (Yalın vd., 2024).

Kompozit malzemelerin üretimi ise, genellikle daha yüksek maliyetli ve karmaşık süreçler gerektirir. Elyaf takviyeli reçinelerin temini, kalıp ve otoklav gereksinimleri, özel işçilik ve mühendislik bilgisi, üretim maliyetlerini artıran unsurlardır. Ayrıca, ilk yatırım maliyetleri yüksek olmakla birlikte, büyük ölçekli ve seri üretimlerde birim başına maliyet düşebilir. Özellikle askeri ve ticari İHA'larda, yüksek performans ve uzun ömür gereksinimi, kompozit kullanımını maliyet açısından rasyonel hale getirir (Mohd Ghazali, Teoh ve Wan Rahiman, 2025).

Ahşap malzemenin düşük maliyetine karşın, kullanım ömrü ve dayanıklılığı göz önünde

bulundurulduğunda uzun vadeli maliyet avantajı her zaman sağlanamayabilir. Özellikle yoğun operasyonlara ve çevresel faktörlere maruz kalan İHA'larda, ahşabın bakım ve onarım sıklığı maliyetleri artırabilir. Ayrıca, doğal kökenli bir malzeme olması sebebiyle standardizasyonu zor ve kalite kontrolü nispeten güçtür. Bu da, seri üretimde istikrarlı ürünler elde etmeyi kısıtlar (Ismail, 2024). Kompozit malzemelerde ise başlangıçta daha fazla yatırım gerektirse de, kullanım ömrünün uzunluğu ve yüksek performansı nedeniyle toplam maliyet avantajı sağlayabilir. Özellikle kritik görevlerde ve yüksek değerli uygulamalarda, dayanıklılık ve bakım aralıklarının uzun olması, işletme maliyetlerini azaltır. Ek olarak, modüler ve parçalı üretim imkanı, hasarlı bölgelerin hızlı ve yerinde onarılmasıyla ilave tasarruflar sunar. Maliyet analizi yapılırken sadece malzemenin ilk alım maliyeti değil, kullanım ömrü, bakım-onarım gereksinimi, üretim sürecindeki karmaşıklık ve uygulama alanı göz önünde bulundurulmalıdır. Amatör ve kısa ömürlü projelerde ahşap, düşük maliyet avantajıyla öne çıkarken; profesyonel, uzun vadeli ve yüksek performanslı İHA'larda kompozit malzemelerin toplam sahip olma maliyeti genellikle daha düşüktür (Kapsalis vd., 2023).

2.2.3.4. Üretim ve Onarım Kolaylığı

Üretim ve onarım süreçleri, bir malzemenin pratikte ne kadar avantaj sunduğunu belirleyen önemli faktörlerdendir. Ahşap malzemeler bu açıdan oldukça kullanıcı dostudur. Temel marangozluk ekipmanlarıyla işlenebilen ahşap, karmaşık bir altyapı veya pahalı makinelere ihtiyaç duymadan, hızlı ve pratik şekilde şekillendirilebilir. Kesme, delme, yapıştırma ve birleştirme işlemleri kolaydır. Bu nedenle prototip geliştirme, atölye çalışmaları, amatör veya düşük bütçeli projelerde ahşap vazgeçilmez bir üretim malzemesidir. Onarım açısından da ahşap çok avantajlıdır. Hasar gören bir parça kolayca yerinden çıkarılıp yenisiyle değiştirilebilir veya uygun bir tutkalla tamir edilebilir. Ayrıca, parçalı yapısı ve standart aletlerle çalışabilme özelliği, sahada ya da uçuş sırasında meydana gelen acil tamir ihtiyacında büyük kolaylık sağlar. Ahşabın bu hızlı onarım avantajı, sürekliliğin önemli olduğu projelerde zamandan ve maliyetten tasarruf sağlar (Hwang ve Song, 2022).

Kompozit malzemelerin üretimi ise, daha yüksek teknoloji, hassas mühendislik ve özel üretim altyapısı gerektirir. Kompozitlerin katmanlar halinde yerleştirilmesi, reçine ile doyurulması, vakumlama ve fırınlama gibi işlemler, daha uzun ve dikkat gerektiren üretim süreçleri doğurur. Ayrıca, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere ulaşmak için sıcaklık, basınç ve kürlleme sürelerinin hassas biçimde kontrol edilmesi gerekir. Seri üretimde kaliteyi korumak için kapsamlı kontrol süreçleri şarttır (Özkan, 2025).

Kompozitlerin onarımı ise, malzeme uzmanlığı ve ileri teknik bilgi gerektirir. Yüzeydeki küçük bir çatlak veya tabaka ayrılması, gövde bütünlüğünü ve uçuş güvenliğini olumsuz etkileyebilir. Onarım işlemleri genellikle özel malzemeler, epoksi ve reçineler ile yapılır ve belirli bir kürleme süresine ihtiyaç duyulur. Ayrıca, kompozit yapının iç kısmındaki hasarın tespiti için ultrasonik muayene gibi ileri teknoloji ekipmanlar gerekebilir (Schmehl, Noom ve van der Vlugt, 2013).

Kompozit malzemelerin modüler yapısı, parçalı üretim ve yenileme imkanı sayesinde toplam bakım sürelerini azaltabilir. Hasarlı bölgenin yalnızca ilgili kısmının değiştirilebilmesi, operasyonel süreklilik açısından avantaj sunar. Ancak, tüm bu avantajlardan tam anlamıyla yararlanmak için yetkin mühendis ve teknisyenlerin varlığı zorunludur. Kısacası, üretim ve onarım kolaylığı açısından ahşap, amatör ve düşük bütçeli uygulamalar için uygunken; kompozitler ise yüksek teknoloji, hassasiyet ve uzun ömür gerektiren profesyonel projelerde tercih edilir (Kim vd., 2023).

2.2.4. Uygulama Alanları ve Seçim Kriterleri

İnsansız hava araçlarının başarısı, sadece gelişmiş elektronik sistemlere ve ileri seviye uçuş kontrol yazılımlarına değil, aynı zamanda yapısal tasarımda kullanılan malzemelerin doğru seçimine de büyük ölçüde bağlıdır. Her İHA'nın görev profili, operasyonel ortamı, taşınması gereken yükler ve maruz kalacağı çevresel koşullar farklılık gösterdiğinden, uygulama alanına göre malzeme seçimi hayati öneme sahiptir. Özellikle gövde, kanat ve kuyruk gibi temel yapısal elemanların üretiminde hangi malzemenin kullanılacağı; uçuş menzili, dayanıklılık, enerji verimliliği ve bakım aralıkları üzerinde doğrudan etkili olur (Akbar vd., 2021).

Uygulama alanları açısından bakıldığında, askeri İHA'lardan sivil gözlem ve haritalama araçlarına, zirai ilaçlama platformlarından yangın ve afet izleme sistemlerine kadar çok geniş bir yelpaze mevcuttur. Her bir görev türü, farklı yapısal gereksinimleri ve performans önceliklerini beraberinde getirir. Örneğin, uzun süre havada kalması gereken ve ağır faydalı yük taşıyan bir askeri İHA'da, yüksek mukavemetli ve hafif kompozit malzemeler tercih edilirken; eğitim amaçlı, düşük bütçeli veya kısa menzilli projelerde ahşap gibi geleneksel malzemeler pratik ve ekonomik bir çözüm olabilir (Furlas ve Karras, 2021).

Seçim kriterleri arasında, malzemenin mekanik özellikleri kadar üretim kolaylığı, maliyet, bakım-onarım ihtiyacı, çevresel faktörlere dayanıklılık ve malzemenin işlenebilirliği de önemli rol oynar. Ayrıca, aerodinamik verimlilik, yüzey kalitesi ve istenen geometrik formların elde edilebilmesi de malzeme tercihinde belirleyicidir. Kompozit malzemeler,

karmaşık profiller ve ince gövde-duvar tasarımları için avantaj sunarken; ahşap malzemeler, standart formların hızlı ve ucuz şekilde üretilebilmesiyle öne çıkar. Malzeme seçiminde operasyonel koşullar da göz önünde bulundurulmalıdır. Yüksek nem, aşırı sıcaklık, yoğun güneş ışığı veya kimyasal etkilere maruz kalacak İHA'larda, uzun ömür ve çevresel dayanıklılık açısından kompozitler daha uygun olurken, kapalı ve kontrollü ortamlarda görev yapan, kısa süreli kullanım ömrü hedeflenen araçlarda ahşap hâlâ geçerli bir alternatiftir. Bunun yanında, onarım ve parça değişimi kolaylığı, yedek parça temini ve teknik insan kaynağı da seçim sürecini etkiler (Chung Wang, Lin ve Hu, 2007).

İHA üretiminde malzeme seçimi; sadece teknik ve ekonomik verilerle değil, aynı zamanda projenin uzun vadeli hedefleri, kullanıcı ihtiyaçları ve operasyonel riskler göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Uygulama alanına en uygun malzeme ve tasarım kombinasyonu, hava aracının görev başarısı, toplam sahip olma maliyeti ve operasyonel verimliliği üzerinde belirleyici rol oynar. Bu nedenle, modern İHA mühendisliğinde uygulama alanları ve seçim kriterleri, sürekli olarak yenilikçi malzeme teknolojileriyle birlikte değerlendirilmekte ve geliştirilmektedir (Yeh, 2024).

2.2.4.1. Gövde Tasarımında Malzeme Seçimi

İnsansız hava araçlarında gövde tasarımı hem yapısal bütünlüğü sağlamak hem de aerodinamik verimliliği maksimize etmek açısından büyük öneme sahiptir. Gövde, tüm elektronik sistemlerin, bataryaların, sensörlerin ve faydalı yüklerin taşındığı ana yapıdır. Dolayısıyla, malzeme seçimi gövdenin ağırlık, dayanıklılık ve işlevsellik gibi kritik parametrelerini doğrudan etkiler. Ahşap, tarihsel olarak gövde yapımında yaygın kullanılmış, kolay işlenebilirliği ve düşük maliyetiyle tercih edilmiştir. Ancak günümüzde, modern İHA projelerinde daha yüksek performans hedefleri nedeniyle gövdede kompozit malzemeler daha sık kullanılmaktadır (Martin, 2017).

Kompozit malzemeler, gövde tasarımında hafiflik ve mukavemet avantajları sunar. Özellikle karbon fiber takviyeli polimerler, son derece rijit ve hafif bir yapı elde edilmesini sağlar. Bu sayede gövde ağırlığı minimize edilirken, uçuş menzili ve faydalı yük kapasitesi artırılabilir. Ayrıca, kompozitlerin sunduğu korozyon direnci ve çevresel dayanıklılık, gövdenin zorlu atmosferik koşullarda bile uzun ömürlü olmasını mümkün kılar. Ahşap ise, küçük ve orta ölçekli İHA'larda, hızlı prototipleme ve maliyet avantajı için hâlâ pratik bir çözüm olmaya devam etmektedir (Erdoğan, 2022).

Malzeme seçimi yapılırken sadece ağırlık değil, darbe dayanımı ve yorulma ömrü de

dikkate alınmalıdır. Gövde, uçuş sırasında hem titreşimlere hem de ani darbelere maruz kalabilir. Kompozit malzemeler, yapısal liflerin yönlenme kabiliyeti sayesinde bu tür zorlanmalara karşı yüksek direnç gösterir. Ahşap ise, doğal elastikiyetiyle küçük darbeleri absorbe edebilse de uzun vadeli tekrarlı zorlanmalarda ve ağır darbelelerde kırılma ya da çatlama riski daha yüksektir. Gövde tasarımında, üretim ve montaj kolaylığı da önemli bir seçim kriteridir. Ahşap gövdeler, basit marangozluk teknikleriyle kolayca şekillendirilebilir ve birleştirilebilir. Kompozit gövdelerin üretimi ise daha karmaşıktır; ancak modern teknolojiler kullanılarak hassas toleranslarla ile seri üretim yapılabilir. Bu da profesyonel İHA’larda kalite ve performans standartlarının yüksek tutulmasını sağlar (Sezen, 2025).

Aerodinamik şekillendirme, malzeme seçiminde belirleyici başka bir unsurdur. Kompozit malzemeler, karmaşık ve organik gövde geometrilerinin üretiminde büyük esneklik sağlar. Bu, hava direncini azaltarak uçuş verimliliğini artırır. Ahşap ise, özellikle geleneksel dikdörtgen ya da basit eğimli gövde tasarımlarında daha kullanışlıdır; çok kompleks formların elde edilmesinde kısıtlayıcı olabilir. Gövde tasarımında malzeme seçimi; istenen uçuş menzili, yük kapasitesi, üretim adedi, maliyet, darbe dayanımı, bakım kolaylığı ve aerodinamik gereksinimlerin dengeli bir şekilde değerlendirilmesiyle yapılmalıdır. Günümüzde profesyonel ve uzun ömürlü İHA’ların gövdelerinde genellikle kompozitler tercih edilirken, düşük bütçeli veya eğitim amaçlı İHA’larda ahşap hala geçerli bir seçenektir (Özkan, 2025)..

2.2.4.2. Kanat ve Kuyruk Yapısında Malzeme Seçimi

Kanat ve kuyruk yapıları, İHA’ların uçuş karakteristiklerini ve performansını belirleyen en temel aerodinamik elemanlardır. Kanatlar, kaldırma kuvvetini oluşturarak hava aracının havada asılı kalmasını sağlar; kuyruk yüzeyleri ise, yönlendirme, denge ve kontrol görevlerini üstlenir. Malzeme seçimi, kanat ve kuyrukların hem ağırlığını hem de rijitliğini doğrudan etkiler. Geleneksel olarak, ahşap kanatlar model uçaklarda ve küçük İHA’larda yaygın kullanılmıştır. Balsa ve ladin gibi hafif ağaç türleri, kanatların iskelet ve kaplama elemanlarında uzun yıllar tercih edilmiştir (Öztürk, 2020).

Modern İHA’larda ise, kanat ve kuyruk yapılarında karbon fiber, cam elyaf veya hibrit kompozitler ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Kompozitlerin en önemli avantajı, istenen profilde ve incelikte üretilip hem düşük ağırlık hem de yüksek mukavemet sağlayabilmeleridir. Kompozit kanatlar, büyük açıklık ve ince profil istenen uzun menzilli İHA’larda performansın anahtarıdır. Aynı zamanda, kuyruk yapılarında kompozit malzeme kullanımı; titreşimleri azaltır, hızlı manevra ve stabilite için rijitlik kazandırır. Malzeme seçimi yapılırken,

aerodinamik verimliliğin yanı sıra, kanat ve kuyrukların uçuş sırasında maruz kaldığı yüklerle karşı dirençleri de dikkate alınır. Kompozit kanatlar, özellikle yüksek hız ve uzun süreli uçuşlarda yorgunluğa karşı çok daha dayanıklıdır. Liflerin yönüne göre üretilbildikleri için, yüklerin en yoğun olduğu bölgelerde ekstra güçlendirme yapılabilir. Ahşap ise, elastik yapısıyla beklenmeyen titreşimleri ve ani yük değişimlerini tolere edebilir, fakat uzun vadeli yorgunluk altında çatlama ve deformasyon riski taşır (Saad ve Tahar, 2019).

Kanat ve kuyruk yapısında malzeme seçiminde üretim kolaylığı ve bakım-onarım gereksinimleri de göz önünde bulundurulur. Ahşap kanatlar, darbe veya kırılma anında kolayca onarılabilir ya da yeniden yapılabilir. Kompozitlerde ise, hasar tespiti ve tamir işlemleri daha karmaşık ve profesyonel ekipman gerektirir; fakat dayanıklılıkları sayesinde onarım ihtiyacı genellikle daha seyrektir (Luo vd., 2019).

Hafiflik ve mukavemetin yanı sıra, kanat ve kuyruk elemanlarının aerodinamik şekillendirilmesi de önemlidir. Kompozitler, ince ve karmaşık profillerin üretiminde büyük esneklik sunar; bu sayede hava akışına karşı minimum direnç ve maksimum kaldırma elde edilir. Ahşap ise, daha geleneksel ve basit kanat/kuyruk geometrileri için uygundur; karmaşık yapılar elde etmek daha zordur. Kanat ve kuyruk yapısında malzeme seçimi uçuş emniyeti, verimlilik, üretim kapasitesi ve operasyonel maliyetler üzerinde belirleyici rol oynar. Yüksek performanslı ve uzun ömürlü İHA’larda kompozit malzemeler genellikle tercih edilirken, basit ve düşük maliyetli projelerde ahşap hala uygulanabilir bir alternatiftir (Khan, Gupta ve Gupta, 2022).

2.2.4.3. Performansa Etkisi

Malzeme seçimi, bir İHA’nın genel performansını, uçuş süresini, menzilini, taşıma kapasitesini ve görev başarısını doğrudan etkiler. Hafif, mukavemeti yüksek ve çevresel şartlara dirençli malzemeler, İHA’ların enerji verimliliğini artırır. Kompozit malzemeler, düşük yoğunlukları ve yüksek mukavemet/ağırlık oranları sayesinde modern İHA’larda performans optimizasyonunun temel taşlarından biri olmuştur. Gövdede ve aerodinamik yüzeylerde kompozitlerin kullanılması, daha az enerjiyle daha uzun süre uçuşu mümkün kılar (Demiryol ve Soyaltin-Colella, 2024).

Ahşap malzemeler, ağırlık açısından avantaj sağlasada, dayanıklılık ve uzun vadeli performans açısından bazı kısıtlamalara sahiptir. Özellikle yüksek hızlı ve uzun menzilli uçuşlarda, ahşabın mekanik özellikleri yetersiz kalabilir. Nem ve sıcaklık gibi çevresel etkenler, ahşabın ağırlığını ve yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilir. Kompozit malzemeler ise, hava

şartlarından minimum düzeyde etkilenir ve uçuş sırasında sabit bir performans sunar. Uçuş performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri de kaldırma/direnç oranıdır. Kompozit kanatlar, yüksek kaldırma kuvveti üretirken aynı zamanda düşük hava direnci ile verimliliği artırır. Bu da, İHA'nın daha az enerji harcayarak daha fazla yol kat etmesini sağlar. Ahşap ise, aerodinamik profillerde bazı sınırlamalara neden olabilir; çünkü ince ve karmaşık şekillerin üretimi ahşapla zordur. Bu nedenle, ileri seviye aerodinamik performans gerektiren projelerde kompozitler tercih edilmektedir (Soyaltin-Colella ve Demiryol, 2023).

Taşıma kapasitesi ve görev esnekliği açısından da malzeme seçimi kritik rol oynar. Kompozitler, yüksek yük taşıma kapasitesine sahip, hafif ve rijit yapılar oluşturarak daha fazla faydalı yük taşınmasını sağlar. Ahşap, genellikle küçük ve orta ölçekli İHA'larda yeterli kapasite sunar; fakat ağır görevlerde ya da çoklu ekipman taşınması gereken durumlarda yetersiz kalabilir. Kompozit malzemeler ise, istenen şekilde optimize edilerek görev gereksinimlerine özel çözümler üretmeyi kolaylaştırır (Murphy, 2008).

Malzeme seçiminin performansa etkisi sadece teknik parametrelerle sınırlı değildir; bakım- onarım, kullanım ömrü ve toplam maliyet gibi operasyonel faktörler de önemlidir. Kompozit malzemelerin uzun ömürlü ve bakım aralıklarının geniş olması, operasyonel sürekliliği artırır. Ahşap ise, sık bakım ve onarım gerektirdiğinden, operasyon süresince beklenmedik maliyetler doğurabilir. Malzeme seçimi İHA'ların görev başarısı, verimliliği ve maliyet etkinliği üzerinde belirleyici bir faktördür. Modern uygulamalarda kompozit malzemeler, üstün performans, uzun ömür ve yüksek operasyonel esneklik sunarak öne çıkmaktadır. Ancak, her proje özelinde, görev profili, bütçe ve teknik gereksinimler göz önünde bulundurularak en uygun malzeme kararı verilmelidir (Natarajan, 2001).

İnsansız hava araçlarının (İHA) üretiminde kullanılan malzemeler, hem teknolojik gelişimin hem de uygulama alanlarının çeşitliliğiyle birlikte sürekli bir dönüşüm içerisinde. Bu bölümde ayrıntılı olarak incelenen ahşap ve kompozit malzemeler, havacılık sektörünün farklı dönemlerindeki mühendislik yaklaşımlarını ve tasarım felsefelerini yansıtmaktadır. Ahşap, havacılığın ilk yıllarından bu yana sunduğu hafiflik, işlenebilirlik ve ekonomik avantajlar sayesinde özellikle küçük ölçekli ve düşük bütçeli projelerde önemli bir yer tutmuştur. Kompozit malzemeler ise, gelişen teknolojiyle birlikte, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, çevresel dayanıklılık, şekillendirilebilirlik ve uzun ömür gibi üstün nitelikleri sayesinde günümüzde modern İHA tasarımlarının vazgeçilmez bileşeni haline gelmiştir (Mohd Ghazali, Teoh ve Wan Rahiman, 2025).

Her iki malzemenin avantaj ve sınırlılıkları, mühendislerin uygulama alanı ve görev profiline en uygun seçimi yapmasını gerektirir. Ahşap malzemeler; kolay temin edilmesi, düşük maliyet ve prototipleme süreçlerindeki pratikliğiyle öne çıkarken, kompozitler ise üstün mekanik özellikleri, aerodinamik tasarım olanakları ve çevresel dirençleri ile profesyonel ve ileri seviye projelerin vazgeçilmez tercihi olmaktadır. Özellikle performans, menzil, taşıma kapasitesi ve uzun ömür gerektiren askeri ve ticari İHA’larda, kompozit malzeme teknolojileri geleceğin standardı olarak öne çıkmaktadır (Molchanov vd., 2013).

Gelecek perspektifi açısından bakıldığında, malzeme biliminin hızlı ilerlemesiyle birlikte, yeni nesil kompozitler, nanomalzemeler, hibrit çözümler ve biyokompozitler üzerinde yapılan Ar- Ge çalışmaları hız kazanmaktadır. Bu gelişmeler, İHA’ların daha hafif, daha dayanıklı, daha akıllı ve çevre dostu şekilde üretilmesini mümkün kılacaktır. Ayrıca, üretim süreçlerinde otomasyonun ve dijital teknolojilerin yaygınlaşması, seri üretimde kaliteyi ve verimliliği artırırken, tasarım sürecini de daha esnek ve yenilikçi hale getirecektir. Bununla birlikte, sürdürülebilirlik ve çevre duyarlılığı, gelecek dönemde malzeme seçimini ve üretim stratejilerini daha fazla şekillendirecek ana başlıklardan biri olacaktır. Geri dönüştürülebilir kompozitler, biyobozunur reçineler ve çevre dostu üretim teknikleri hem ekolojik sorumluluk hem de maliyet avantajı sağlayarak, İHA endüstrisinin küresel ölçekte büyümesine ivme kazandıracaktır (Nas ve Öztürk, 2018).

İHA üretiminde malzeme seçimi; mühendislik, ekonomi, sürdürülebilirlik ve inovasyonun kesişim noktasında yer almaktadır. Gelecekte de bu alanda yenilikçi malzeme teknolojilerinin ve üretim yöntemlerinin ortaya çıkmasıyla, İHA’ların hem performansı hem de görev yelpazesi daha da genişleyecektir. Mühendisler, malzeme biliminin sunduğu fırsatları en verimli şekilde kullanarak, gökyüzünde daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir İHA’ların hayata geçirilmesini sağlayacaktır (Khan, Gupta ve Gupta, 2022).

3. DENEY TASARIMI

Günümüzde insansız hava araçları teknolojisi, havacılığın en hızlı gelişen ve uygulama alanı hızla genişleyen mühendislik disiplinlerinden biri haline gelmiştir. İHA'ların hem askeri hem de sivil kullanım alanlarında gösterdiği yüksek performans, büyük ölçüde tasarım ve üretim aşamalarında izlenen bilimsel ve sistematik yaklaşımlara bağlıdır. Bu süreçte, deney tasarımı yöntemleri, İHA'nın yapısal, aerodinamik, elektronik ve yazılımsal tüm bileşenlerinin optimizasyonunda vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır. Deney tasarımı sayesinde, karmaşık mühendislik parametrelerinin birbiriyle etkileşimi anlaşılır, sistematik analizler yapılır ve minimum kaynakla maksimum bilgi elde edilebilmektedir (Yalın vd., 2024).

Deney tasarımının kökenleri, istatistiğin bilimsel araştırmalara sistematik biçimde entegre edildiği 20. yüzyılın başlarına uzanır. İngiltere'de Ronald A. Fisher'ın tarım alanında yürüttüğü çalışmalar, deneysel istatistiksel yöntemlerin başlangıç noktası olmuştur. Fisher'ın varyans analizi ve deney tasarımına getirdiği yenilikler, daha sonra Amerika Birleşik Devletleri'nde sanayi, ilaç ve mühendislik alanlarına hızla yayılmıştır. Endüstrideki ilk uygulamalar kalite kontrol, süreç optimizasyonu ve üretim verimliliği gibi kritik başlıklar yer alırken, havacılıkta da özellikle İkinci Dünya Savaşı sonrası deneysel tasarımın hem insanlı hem insansız hava araçlarında tasarım doğrulama ve geliştirme amacıyla kullanıldığı görülmektedir. Bugün, ABD, Almanya, Japonya gibi ülkelerde deney tasarımı yöntemleri savunma, havacılık, otomotiv ve ileri malzeme teknolojilerinde standart bir yaklaşıma dönüşmüştür (Shiau, Lau ve Chang, 2021).

İHA'ların geliştirilmesinde deney tasarımı yöntemleri; gövde ve kanat profilinin aerodinamik optimizasyonundan, kompozit malzeme ve yapısal analizlere, motor ve itki sistemlerinden elektronik donanımın entegrasyonuna kadar çok geniş bir uygulama alanı sunar. Tasarımcı, çok sayıda parametrenin ve faktörün bir arada optimize edilmesi gereken bu süreçte, deney tasarımı yöntemlerini kullanarak minimum prototip ve testle en doğru, en güvenilir ve ekonomik çözümlere ulaşabilir. Özellikle maliyetin ve zamanın kısıtlayıcı olduğu projelerde, az sayıda deneyle maksimum bilgiye ulaşma yeteneği, üretimde verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından büyük avantaj sağlar. Aynı zamanda, deney tasarımında elde edilen veriler, istatistiksel olarak da güvenilir sonuçlar sunduğu için kalite kontrol ve model doğrulama aşamalarında karar destek aracı olarak öne çıkar (Saad ve Tahar, 2019).

Deney tasarımı uygulamaları İHA mühendisliğinde yalnızca ürün geliştirme aşamasında değil, aynı zamanda üretim süreçlerinin optimizasyonunda, kalite iyileştirme programlarında,

hata azaltma çalışmalarında ve proses parametrelerinin belirlenmesinde de etkin şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, kanat profili geliştirme sürecinde, yüzlerce farklı kombinasyon yerine istatistiksel olarak seçilmiş deney dizileri sayesinde en iyi kaldırma/sürüklenme oranı kısa sürede tespit edilebilir. Malzeme optimizasyonunda, kompozit katman dizilimleri ve reçine oranlarının performansa etkisi en az sayıda prototiple analiz edilebilir. Ayrıca, üretim sırasında ortaya çıkan varyasyonların ve hata kaynaklarının belirlenmesinde de deneysel tasarım yöntemleri rehberlik eder. Günümüzde deney tasarımı; sürdürülebilirlik, kaynak kullanımı, enerji verimliliği ve çevreye duyarlılık gibi kriterlerin de önemli olduğu yeni nesil İHA projelerinde vazgeçilmez bir mühendislik aracıdır. Minimum sayıda testle azami sonuca ulaşmak; malzeme, enerji ve zaman tasarrufu sağlamak; hem çevresel hem de ekonomik maliyetleri azaltmak mümkündür. Böylece, İHA sektöründe hem rekabet gücü hem de yenilikçilik seviyesi artırılabilir (Ural Bayrak ve Celik, 2023).

Deney tasarımı İHA mühendisliğinde, sistematik ve bilimsel yaklaşımı sayesinde optimizasyonun, verimliliğin ve kalite güvence süreçlerinin merkezinde yer almaktadır. Bu bölümde, deney tasarımının tarihsel gelişimi, İHA uygulama alanları ve üretim-tasarım süreçlerindeki etkileri detaylı olarak ele alınacak; ardından en güncel deney tasarım yöntemleri olan RSM, Taguchi Metodu ve ANOVA analizine odaklanılacaktır. İlgili başlıklarda, güncel literatür ve uluslararası araştırmalardan örneklerle konu derinlemesine işlenecektir.

3.1. Deney Tasarımı Yöntemlerinin İHA Tasarım Sürecine Entegrasyonu

İnsansız hava araçlarının (İHA) tasarımında başarıya ulaşmak, yalnızca ileri mühendislik bilgi birikimine değil, aynı zamanda bilimsel ve sistematik yöntemlerin etkin şekilde kullanılmasına bağlıdır (Bohara vd., 2019). Bu noktada deney tasarımı (Design of Experiments – DoE), İHA geliştirme sürecinde vazgeçilmez bir araç olarak öne çıkmaktadır. Deney tasarımı, çok sayıda değişkenin ve bu değişkenler arasındaki etkileşimin karmaşık olduğu havacılık projelerinde, parametrelerin sonuç üzerindeki etkisini nicel olarak analiz etmeye ve optimum çözüme ulaşmaya olanak sağlar. İHA tasarımında DoE kullanımı sayesinde, mühendisler hem malzeme ve enerji israfını önler hem de geliştirme sürecini hızlandırır ve ürün kalitesini garanti altına alır (Chung Wang, Lin ve Hu, 2007).

Gövde şekli, kanat profili ve yüzey kaplaması gibi aerodinamik tasarım parametreleri, İHA'nın uçuş performansını doğrudan etkileyen temel unsurlardır. Aynı şekilde, malzeme seçimi örneğin, ahşap, alüminyum, karbon fiber veya hibrit kompozitlerin kullanılması yapının ağırlığı, dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü açısından belirleyicidir. Tasarımcılar, tüm bu

değişkenlerin en uygun kombinasyonunu bulmak için deney tasarımı tekniklerinden yararlanır. Örneğin, kanat profilinin kalınlığı, eğriliği (kamber), hücum açısı ve malzeme tipi gibi parametrelerin birlikte ve karşılıklı etkisi, klasik yöntemlerle değerlendirilmesi çok zor olan bir optimizasyon problemidir. Ancak DoE teknikleriyle, bu parametrelerin sonuç üzerindeki katkısı istatistiksel olarak modellenabilir ve en iyi kombinasyon bilimsel yöntemlerle belirlenebilir (Shokirov vd., 2020).

Deney tasarımı, İHA mühendisliğinde sadece aerodinamik yapı ve malzeme optimizasyonu ile sınırlı kalmaz; üretim süreçlerinin iyileştirilmesinde de önemli rol oynar. Üretim sırasında, farklı sıcaklık, basınç, reçine oranı, kürlenme süresi, katman dizilimi gibi parametreler ürünün kalitesi ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkilidir. Deney tasarımıyla, üretim sürecinde değiştirilebilen tüm faktörler sistematik olarak planlanır, minimum sayıda deneyle maksimum bilgi toplanır ve böylece hem maliyet hem de üretim zamanı büyük ölçüde azaltılır. Ayrıca, üretimdeki varyasyonların ve hata kaynaklarının belirlenmesi için de DoE yöntemleri uygulanır; böylece hata oranı düşürülerek kalite standartları garanti altına alınır (Çetinkaya ve Koç, 2023).

İHA tasarımında DoE uygulamaları, minimum sayıda prototip ya da deneme uçuşu ile optimum çözüme ulaşma avantajı sağlar. Örneğin, kanat profili seçimi için klasik yaklaşımda onlarca farklı prototip üretilip her biri ayrı ayrı test edilirken, DoE ile sistematik olarak belirlenen birkaç deneysel tasarımla parametrelerin etkisi istatistiksel olarak ortaya konabilir ve en iyi profil kısa sürede bulunabilir. Aynı şekilde, kompozit katman dizilimi ve malzeme oranlarının uçuş dayanıklılığı üzerindeki etkisi, deney tasarımı yaklaşımı ile güvenilir biçimde modellenir. Sonuçta, az sayıda deneme ile optimum değerler belirlenirken, üretim ve geliştirme süreci hızlanır ve maliyetler minimize edilir (Ma, Huangfu ve Liu, 2020). Bunun yanında, sürdürülebilirlik ve maliyet-etkinlik açısından da deney tasarımı yöntemlerinin önemi büyüktür. Sadece optimum uçuş performansı sağlamak değil, aynı zamanda kaynak, enerji ve malzeme kullanımını azaltmak; üretim sürecindeki atıkları en aza indirmek ve çevresel etkiyi azaltmak da modern İHA mühendisliğinde önemli hedeflerdendir. Deney tasarımı sayesinde gereksiz testler ve prototipler ortadan kaldırılır, kullanılan kaynaklardan maksimum verim elde edilir ve toplam sahip olma maliyeti düşürülür. Böylece, sürdürülebilir ve rekabetçi İHA üretim süreçleri için bilimsel bir temel sağlanmış olur (Ural Bayrak ve Celik, 2023).

Literatürde, deney tasarımının İHA mühendisliğinde etkin ve verimli bir biçimde kullanıldığı çok sayıda örnek çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Smith ve Brown (2020), farklı

kompozit katman dizilimlerinin ve üretim parametrelerinin İHA kanat mukavemetine etkisini DoE ile optimize etmiş; minimum testle maksimum yapısal dayanım ve hafiflik sağlamışlardır. Yine, Lee vd. (2019), kanat profil tasarımında deney tasarımı yöntemini kullanarak, en uygun kaldırma/direnç oranı ve üretim kolaylığı kombinasyonuna ulaşmışlardır. Bu tür örnekler, DoE'nin İHA tasarımındaki çoklu değişkenli karmaşık problemlerde nasıl vazgeçilmez bir analiz ve optimizasyon aracı olduğunu göstermektedir.

3.1.1. Rsm Metodu

Tasarım süreçlerinde, özellikle karmaşık sistemlerin geliştirilmesinde, deneyi yapan kişinin ihtiyaçlarına etkin şekilde cevap verebilmesi için tasarımın sınırlarının net olarak belirlenmesi, tasarım değişkenlerinin sistem üzerindeki etkilerinin anlaşılması ve tüm bu ilişkilerin analitik olarak incelenebilmesi büyük önem taşır. Ancak, çoğu durumda tasarımı tanımlayan değişkenler ile performans değerlendirme kriterleri arasında doğrudan bir analitik korelasyon kurmak mümkün olmayabilir. Böyle durumlarda, optimum çözüme ulaşabilmek için alternatif ve istatistiksel temelli yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, özellikle tasarım değişkenlerindeki değişikliklerin, değerlendirme kriterine duyarlılığının anlaşılması için Yanıt Yüzeyi Yöntemi (Response Surface Methodology – RSM) öne çıkan bir yöntemdir (Tekindal, 2009:2).

Yanıt yüzey yöntemi (RSM), istatistiksel tabanlı deneysel tasarım yaklaşımlarının en başında gelmektedir. 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilmeye başlanan bu yöntem, endüstriyel deneylerde ve karmaşık süreçlerin iyileştirilmesinde hızlı ve ardışık sonuçlar elde etmeye olanak tanımıştır (Özdamar ve Öztürk, 2025). RSM; farklı değişkenler ve bir ya da birden fazla yanıt değişkeni arasındaki etkileşimi inceleyerek, optimum sonuçları elde etmek amacıyla tasarlanmış sistematik bir dizi deneyler dizisi kullanır (Majidi Balanji, 2025). Diğer bir ifadeyle, RSM yöntemi matematiksel ve istatistiksel yöntemleri bir arada kullanarak, sistemin davranışını açıklayan bir polinom denklem oluşturur ve elde edilen veri kümesini modellemeye yardımcı olur (Ergül vd. 2018, 469). Böylece, tasarım değişkenlerinin sistem üzerindeki bireysel ve karşılıklı etkileri detaylı bir şekilde analiz edilebilir ve en uygun parametre kombinasyonlarına bilimsel bir yaklaşımla ulaşılabilir (Özkan ve Dahil, 2025).

Deney düzenlerinde temel amaç, elde edilmek istenen yanıt değişkenine etki edebilecek tüm faktörlerin, denemenin hata ile sonuçlanma riskini en aza indirecek biçimde belirlenmesidir. Bu süreçte, faktörlerin etkilerini ve aralarındaki olası etkileşimleri anlamak için regresyon analizinden yararlanılır. Regresyon katsayıları sayesinde, her bir faktörün ve

faktörler arasındaki etkileşimin yanıt değişkeni üzerinde ne derece etkili olduğu nicel olarak değerlendirilir. Yanıt Yüzeyi Yöntemi (RSM) uygulanırken, ilk adım olarak sistem üzerinde etkili olan faktörler ve bunların seviyeleri doğru şekilde tanımlanır (Tekindal, 2009, 2).

RSM yöntemi üç ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, istenen yanıtı elde etmek için yeterli sayıda ve güvenilir ölçümler sunacak şekilde deneylerin tasarlanmasıdır. Bu, deney tasarımı aşamasıdır. İkinci aşamada, tasarlanan deneylerden elde edilen veriler kullanılarak parametrelere uygun hipotez testleri oluşturulur ve bu verilere en iyi uyum sağlayacak cebirsel model belirlenir; bu da veri toplama ve modelleme aşamasıdır. Son aşamada modele eklenen faktörlerin optimum değerleri belirlenerek istenen yanıt değişkeninin en uygun şekilde elde edilmesi sağlanır. Bu aşamada, tahmin modelleri kullanılarak çalışma parametrelerine göre yanıt değişkenleri en uygun düzeyleri saptanır (Baray ve Sarı, 2006, 43).

Birinci dereceden model, değişkenlerin yanıt üzerindeki doğrusal etkisini tanımlarken, ikinci dereceden model ise hem değişkenlerin kendi içindeki karesel etkilerini hem de birbirleriyle olan etkileşimlerini ifade etmektedir. Bu sayede, sistemin yanıt yüzeyinde doğrusal olmayan karmaşık ilişkiler ve eğrilikler de modellemeye dahil edilebilir. İkinci dereceden model, özellikle tasarım değişkenlerinin yanıt değişkeni üzerindeki etkisinin sabit olmadığı, farklı seviyelerde farklı sonuçlar doğurduğu karmaşık süreçlerde büyük avantaj sağlar. Modeldeki katsayıların anlamlılığı ve büyüklüğü, hangi faktör veya faktörlerin ya da hangi etkileşimlerin sistem üzerinde baskın olduğunu belirlemekte kullanılır. Böylece, optimum tasarım parametreleri bilimsel olarak ve istatistiksel güvenceyle seçilebilir (Shokirov vd., 2020).

RSM yöntemiyle elde edilen bu modeller, mühendislerin karar alma süreçlerinde yol gösterici olur; sistemin nasıl davrandığını, hangi faktörlerin önemli olduğunu ve hangi parametre kombinasyonunda istenen sonuca ulaşılabileceğini net bir şekilde ortaya koyar. Sonuç olarak, yanıt yüzey yöntemi, İHA tasarımında karmaşık ve çoklu değişkenli optimizasyon problemlerinde hem analitik hem de pratik olarak etkili bir araç olarak kabul edilmektedir (Hutsul, Zhezhera ve Tkach, 2022).

3.1.2 Taguchi Metodu

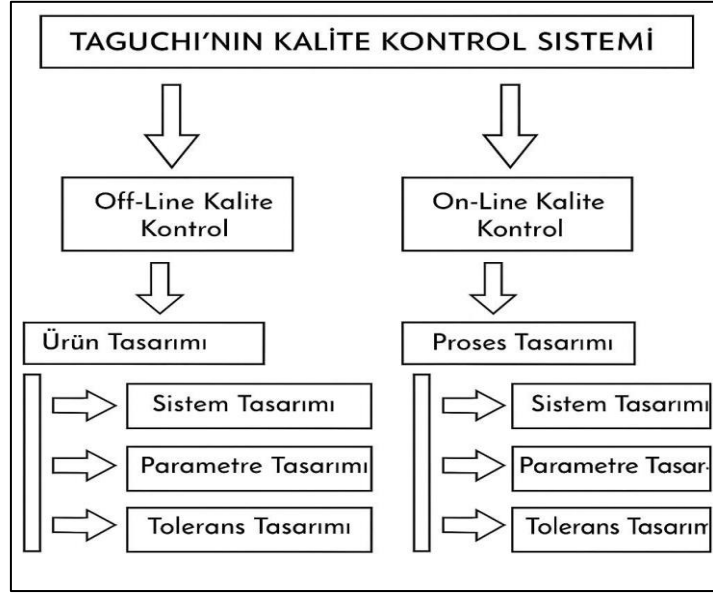
Taguchi metodu, endüstride kalite kontrol ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiş en önemli istatistiksel deney tasarımı yaklaşımlarından biridir. Bu yöntemin kökeni, 20. yüzyıl başlarında Sir Ronald Fisher'ın geliştirdiği varyans analizi (ANOVA) ve deneysel tasarım prensiplerine dayanmaktadır. Fisher, ilk olarak 1920'li yıllarda

İngiltere’de tarım alanında bilimsel çalışmalarında deneysel tasarımı uygulamış, ardından bu yöntem özellikle Amerika Birleşik Devletleri’nde tarım ve endüstri sektörlerinde yaygın olarak benimsenmiştir. Böylece, istatistiksel deney tasarımı; süreçlerin iyileştirilmesi, kalite kontrolü ve optimizasyonun temel taşı olmuştur (Bayraktar ve Özcan, 2018)

Japon mühendis Genichi Taguchi ise, bu temel yaklaşımları daha da ileri taşıyarak, sanayide istatistiksel modelleme ve üretim süreçlerinde test yöntemleri geliştirmiştir. Taguchi, özellikle 1950’li yıllarda büyük ölçekli endüstriyel projelerde klasik yöntemlerin yerine, daha sistematik ve kısa sürede sonuç verebilen deneysel tasarım tekniklerinin uygulanmasını sağlamıştır. Buna örnek olarak, uzun yıllar sürmesi beklenen büyük bir telefon projesinin, Taguchi’nin faktöriyel deney tasarımı ile yalnızca dört yılda tamamlanması gösterilebilir [56]. Taguchi Metodu, bu tür pratik uygulamalarla, üretim süreçlerinde hem zaman hem de maliyet açısından büyük kazançlar sağlamıştır (Harbi, 2023).

Taguchi Metodunun ana hedeflerinden biri, imalatı tamamlanan ürünün kalite düzeyindeki değişimleri ve performans sapmalarını en aza indirmektir. Kalite, yalnızca ürünün teknik başarısı değil, aynı zamanda toplum ve tüketici açısından da bir “kayıp” unsuru olarak değerlendirilir. Ürün kalitesinde ortaya çıkan her türlü sapmanın ekonomik ve toplumsal maliyetleri olacağı için, Taguchi Metodu sürekli kalite iyileştirme ve maliyet düşürme stratejilerini bir arada benimser. Özellikle, ürün performansındaki değişkenliğin azaltılması için, üretim sürecini ve ürün parametrelerini istatistiksel olarak kontrol altında tutmak gereklidir (Azizi vd., 2023).

Bu yaklaşımda deneysel tasarım, malzeme seçiminden proses parametrelerine kadar her türlü faktörün ürün performansına etkisini ortaya koymak ve bu sapmaları minimize etmek amacıyla kullanılır. Taguchi Metodu, çevrimiçi ve çevrimdışı olmak üzere ikiye ayrılır. Çevrimiçi kalite kontrol, üretim sırasında uygulanan kontrol ve iyileştirme süreçlerini kapsarken; çevrimdışı kalite kontrol ise ürünün tasarım ve geliştirme aşamalarında, yani üretim başlamadan önce gerçekleştirilen Ar-Ge faaliyetlerini ve parametre optimizasyonunu ifade eder. Bu sayede, ürünün maliyeti ve kalitesi üretim aşamasına geçmeden önce optimize edilebilir, süreç sırasında ise sürekli olarak izlenip iyileştirilebilir. Taguchi Metodu, süreç değişkenliğini ve kalite kayıplarını sistematik biçimde minimize etmeye odaklanarak, modern endüstride istatistiksel kalite kontrol ve süreç iyileştirme uygulamalarının temel taşlarından biri haline gelmiştir (Schmehl, Noom ve van der Vlugt, 2013).



Şekil 3.1. Taguchi Kalite Kontrol Sistemi.

3.1.2.1. On-Line Kalite Kontrol Sistemi

On-line kalite kontrol sistemi, bir ürünün üretim süreci boyunca ve üretim sonrasında uygulanan kalite izleme ve iyileştirme faaliyetlerini kapsar. Bu yaklaşımda, üretimin her aşamasında yapılan istatistiksel kontroller ve çeşitli deneysel uygulamalarla, hem ürün kalitesi sürekli olarak artırılır hem de üretim maliyetleri azaltılır. Üretim esnasında gerçekleştirilen bu denetimler sayesinde, olası hatalar veya sapmalar erken aşamada tespit edilir ve hızlıca müdahale edilerek süreçte süreklilik ve verimlilik sağlanır. Şekilde de görüldüğü gibi, On-Line Kalite Kontrol, ürünün üretimi ve üretim sonrası süreçlerinde kaliteyi sağlamak ve korumak amacıyla yürütülen faaliyetleri içerir. Bu sistemde üç temel aşama bulunur (Williams, 2013):

Sistem Tasarımı: Proses tasarımının en temel aşamasıdır. Burada, üretim sırasında kullanılacak tüm sistemlerin genel yapısı ve temel prensipleri belirlenir. Hangi üretim adımlarının, hangi ekipman ve süreçlerle yönetileceği planlanır. Amaç, prosesin tüm aşamalarında kalite gerekliliklerinin sağlanacağı bir temel kurmaktır.

Parametre Tasarımı: Sistem tasarımında belirlenen süreçlerin hangi parametrelerle en verimli ve istikrarlı biçimde yürütüleceği bu aşamada kararlaştırılır. Üretim sırasında kontrol altında tutulacak sıcaklık, basınç, süre, hız gibi önemli parametreler optimize edilir. Böylece hem istenen kalite elde edilir, hem de süreçteki değişkenlik en aza indirilir.

Tolerans Tasarımı: Proses sırasında oluşabilecek doğal varyasyonlar ve sapmalara karşı hangi toleransların kabul edilebilir olduğu bu aşamada belirlenir. Hangi ölçüde bir sapmanın ürün kalitesini etkilemeyeceği, nerede müdahale edilmesi gerektiği netleştirilir. Tolerans

tasarımı, kalite kontrolün sürdürülebilir ve güvenli şekilde uygulanmasını sağlar.

Bu üç aşama sayesinde, üretim sırasında ortaya çıkabilecek kalite problemleri erken aşamada tespit edilir, sürekli izleme ve hızlı müdahale ile nihai ürünün istenen standartlarda olması güvence altına alınır.

3.1.2.2. Off-Line Kalite Kontrol Sistemi

Off-line kalite kontrol sistemi ise, üretime başlamadan önce yürütülen tasarım ve araştırma- geliştirme faaliyetlerini içerir. Bu yöntemle, pazar analizleri ve ön değerlendirmeler yardımıyla ürünün üretim süreci optimize edilir. İmalata geçilmeden önce tasarım parametreleri ve üretim toleransları en uygun değerlere ulaştırılır; böylece üretim başladıktan sonra ortaya çıkabilecek kalite problemleri minimuma indirilmiş olur (Azizi vd., 2023).

Sistem Tasarımı: Taguchi metodunun ilk aşaması olan sistem tasarımı, ürünün sahip olması gereken özelliklerin sağlanabilmesi için gerekli olan süreçlerin ve üretim adımlarının planlanmasını kapsar. Bu aşamada, ürünün pazar beklentileri ve ihtiyaçları analiz edilir, eldeki bilimsel bulgular değerlendirilir ve literatürden faydalanılarak gerekli bilgiler toplanır. Ayrıca, kullanılacak malzeme ve ekipmanların araştırılması, doğru araç ve gereçlerin seçilmesi de bu aşamanın önemli bir parçasıdır. Böylece, üretime başlamadan önce ürünün temel fonksiyonları ve bu fonksiyonları sağlayacak sistemler en verimli biçimde kurgulanır (Arslan ve Demirtaş, 2021).

Parametre Tasarımı: Parametre tasarımı, Taguchi yaklaşımının kalite iyileştirmedeki en kritik aşaması olarak kabul edilir. Bu aşamada, üretim sürecinde yer alan parametreler ve malzeme değişkenleri, boyutsal değerler gibi unsurların hangi seviyelerde olacağı belirlenir. Temel amaç; üretim sırasında kontrol edilemeyen, dış etkilere (sıcaklık, nem, toz gibi) minimum düzeyde etkilenecek, kararlı ve optimum parametre değerlerini saptamaktır. Böylece hem ürünün hem de sürecin değişkenliği en aza indirilir. Dış etkilere karşı en dayanıklı ve stabil yapıların tasarlanmasına ise “katı tasarım” adı verilir (Martian vd., 2024).

Tolerans Tasarımı: Tolerans tasarımı ise, parametre tasarımı ile istenen kalite seviyesinin sağlanamadığı durumlarda devreye girer. Bu aşamada, maliyeti düşük ama değişkenliği yüksek faktörler için kalite artırıcı önlemler alınır. Yani, üretim sürecinde belirli bir özelliğin değişkenliği istenen sınırdan tutulamıyorsa, bu değişkenliğin telafi edilmesi için bileşen kalitesinin artırılması gerekir. Tolerans tasarımında, Taguchi metodu ile elde edilen deneysel sonuçlar sinyal/gürültü (S/N) oranları kullanılarak analiz edilir. Analizde, “en küçük

en iyi”, “en büyük en iyi” ve “hedef değer en iyi” yaklaşımlarıyla kaliteye dair uygun çıktıların seçilmesi sağlanır. Son aşamada ise varyans analizi (ANOVA) yapılarak hangi faktörlerin kalite üzerinde etkili olduğu bilimsel olarak ölçülür (Öztürk, 2023).

3.1.2.3. Sinyal/Gürültü (S/N) Oranı

Taguchi metodunda kalite özelliklerini değerlendirmek için temel kriterlerden biri, sinyal/gürültü (S/N) oranıdır. Buradaki "sinyal", istenen ve ölçülebilen gerçek kalite değerini, "gürültü" ise sistemde kontrol edilemeyen ve istenmeyen dış faktörleri temsil eder. Deney tasarımı sırasında elde edilen ölçümde, ne kadar çok istenmeyen değişken (gürültü) varsa, gerçek performansın doğru şekilde ortaya çıkması o kadar zorlaşır. Bu nedenle, Taguchi yöntemi kaliteyi artırmak için sinyalin, yani faydalı etkinin, gürültüye yani zararlı ve kontrol edilemeyen değişkenlere oranının maksimum olmasını hedefler. Sinyal/gürültü oranı yüksek olduğunda, sistem istenmeyen değişikliklere karşı daha az hassas olur ve kalite seviyesindeki dalgalanmalar minimize edilir. Bu oran, bir deneyin sonucunu değerlendirmede ve süreçlerin optimizasyonunda yol gösterici bir göstergedir. Uygulamada, istenen kalite değeri üç farklı kategoriyle analiz edilir (Nas ve Öztürk, 2018):

En küçük en iyi: Sonuç değerinin mümkün olduğunca küçük olması istenen durumlar için kullanılır. Örneğin hata oranı, atık miktarı veya enerji kaybı gibi değerlerin az olması kalite için avantajdır. Burada alt sınır yoktur; değer küçüldükçe kalite artar.

En büyük en iyi: Sonucun büyük olmasının tercih edildiği durumlarda kullanılır. Örneğin mukavemet, verim veya performans gibi çıktılarda, değer arttıkça kalite de artar. Burada da üst sınır yoktur; değer büyüdükçe tasarım iyileşmiş olur.

Hedef değer en iyi: Kalite özelliğinin önceden belirlenen bir nominal değere olabildiğince yakın olması istenir. Burada hem negatif hem de pozitif sapmalar kaliteyi düşürür, bu nedenle hedefe en yakın değerler en iyi olarak değerlendirilir.

Bu yaklaşımla Taguchi metodu, süreçlerin veya ürünlerin kalite değişkenliğini minimuma indirerek, daha istikrarlı ve güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar.

3.1.3. ANOVA (Varyans) Analizi

ANOVA (Analysis of Variance – Varyans Analizi), deneysel çalışmalarda elde edilen farklı örneklem grupları arasındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için kullanılan temel bir analiz yöntemidir. Bu istatistiksel teknik, özellikle çok sayıda faktör ve parametre içeren deney tasarımlarında, hangi değişkenlerin sonuca ne ölçüde

etki ettiğini sistematik olarak ortaya koyar. Deneyin tamamlanmasının ardından elde edilen veriler topluca değerlendirilir ve her bir faktörün yanıt değişkeni üzerindeki etkisi ANOVA yardımıyla matematiksel olarak analiz edilir (Natarajan, 2001).

Varyans analizi, toplam varyasyonu oluşturan bileşenleri alt parçalara ayırarak, deneyde yer alan her bir parametrenin sonuca olan katkı oranını hesaplar. Yani, gözlenen toplam değişkenliğin hangi kısmının hangi faktörden kaynaklandığını ayrıntılı biçimde ortaya koyar. Böylece, kaliteyle ilgili soruların bilimsel olarak irdelenmesi ve doğru kararların verilmesi mümkün olur. Özellikle, birden fazla faktörün veya seviyenin yer aldığı deneysel çalışmalarda, varyans analizi sayesinde en önemli ve anlamlı etkiye sahip parametreler kolayca tespit edilebilir (Martin, 2017).

ANOVA yöntemi, 1930'lu yıllarda İngiliz istatistikçi Ronald Fisher tarafından geliştirilmiş ve kısa sürede bilimsel araştırmalar ile endüstriyel uygulamalarda standart bir analiz aracı haline gelmiştir. Fisher'ın geliştirdiği bu yöntem, analizde kullanılan F testiyle de yakından ilişkilidir. F testi, varyans oranlarını karşılaştırarak gruplar arasında anlamlı farklılık olup olmadığını belirler. Eğer bir faktörün varyansa katkısı istatistiksel olarak anlamlı çıkarsa, o faktörün süreç ya da ürün üzerinde önemli bir etkisi olduğu anlaşılır (Bayraktar ve Özcan, 2018).

Taguchi metodunda kullanılan ortogonal dizilerle birlikte, ANOVA analizi deney tasarımı sonuçlarının daha güvenilir ve anlamlı biçimde yorumlanmasını sağlar. Özellikle karmaşık üretim süreçlerinde ve çoklu parametre içeren İHA tasarım projelerinde, ANOVA yöntemi hangi parametrelerin en önemli ve öncelikli olduğunu objektif biçimde gösterir. Böylece, süreç iyileştirme ve optimizasyon çalışmaları bilimsel bir temele oturtulur. ANOVA analizi deneysel verilerin istatistiksel değerlendirilmesinde vazgeçilmez bir araçtır. Deneyde gözlemlenen farklılıkların yalnızca rastlantıdan mı yoksa belirli faktörlerden mi kaynaklandığı güvenilir biçimde ortaya konur. Bu analiz ile mühendislik projelerinde en etkili parametreler seçilerek süreçlerin ve ürünlerin sürekli iyileştirilmesi sağlanır (Erdoğan, 2022).

Tablo 3.1. Varyans Analizi Faktörleri Kaynak:

Sembol	Açıklma
SS_T	Tüm değerlerin kareleri toplamı
SS_A	A faktörü için kareler toplamı
SS_O	Hata kareleri toplamı
V_T	Toplam serbestlik derecesi
V_A	A'nın serbestlik derecesi
V_{AxB}	A ve B interaksiyonunu serbestlik derecesi
V_0	Hata varyansı
N	Elde edilen toplam veri sayısı
n_A	A faktörü için veri sayısı
T	Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması
y_i	Gözlenmiş değer
k_A	A faktörünün kademe sayısı

Kaynak: Öztürk, 2018, 39

Varyans analizi, deney sonuçlarında gözlemlenen toplam değişkenliğin hangi bileşenlerden kaynaklandığını ayrıntılı olarak ortaya koymayı amaçlar. Bu süreçte, öncelikle sistemdeki rastgele ve açıklanamayan dalgalanmaların, yani hataların oluşturduğu değişkenlik hesaplanır. Modelde öngörülemeyen ve kontrol dışı kalan bu tür değişkenlik, hata varyansı olarak adlandırılır ve elde edilen ölçümlerin modelin güvenilirliği üzerindeki etkisini gösterir. Eğer hata varyansı düşükse, modelin genel olarak doğru bir yapıyı yansıttığı ve gözlemlenen sonuçları büyük oranda açıkladığı söylenebilir. Diğer yandan, sistemdeki tüm farklılıkların büyüklüğünü belirlemek için toplam varyans hesaplanır. Toplam varyansın yüksek olması, sistemdeki farklılıkların belirgin olduğunu; düşük olması ise sonuçların birbirine yakın ve homojen olduğunu ifade eder. Bu değerlendirme, modelin genel başarısını ve istatistiksel olarak ne kadar güçlü olduğunu analiz etmeye olanak tanır (Furlas ve Karras, 2021).

Analiz sırasında, deneyde yer alan her bir faktörün ve bu faktörlerin birlikte hareket ettiğinde oluşturduğu etkileşimlerin sonuçlara ne kadar katkı yaptığı da ayrı ayrı incelenir. Her faktörün, yanıt değişkeni üzerindeki etkisi ayrı bir varyans değeriyle temsil edilir. Böylece, örneğin bir malzeme türünün veya üretim sıcaklığının süreç üzerindeki etkisi nicel olarak belirlenmiş olur. Ayrıca, faktörlerin tek başına değil, bir arada bulunduklarında sistemde nasıl bir etki yarattıkları da analiz edilir. Örneğin iki parametrenin birlikte kullanılması sonucu sistemde oluşan değişkenliğin ne kadarının bu ikili etkileşimden kaynaklandığı ortaya konur (Dada vd., 2022). Bu analizler sonucunda, hangi faktörün ya da hangi etkileşimin sistemdeki değişkenliğe en fazla katkı yaptığı bilimsel olarak tespit edilebilir. Elde edilen bulgular sayesinde, İHA tasarımında veya üretim sürecinde hangi parametrelerin daha kritik olduğu, hangi alanlarda optimizasyona ve süreç iyileştirmeye öncelik verilmesi gerektiği objektif olarak

ortaya konur. Böylece, mühendisler sistemdeki verimliliği artırmak ve kaliteyi sürekli iyileştirmek için bilimsel temelli kararlar alabilir (Akbar vd., 2021).

3.1.4. Deney Tasarımının Sonlu Eleman Analizinde (FEA) Kullanımı

Ortogonal deney tasarımı kullanılırken, bazı parametreler ya da sütunlar, çalışmada doğrudan incelenmeyebilir ya da öncelikli olarak değerlendirilmez. Bu durumda, bu parametrelere ayrılan ve deneyde kullanılmayan sütunların kareler toplamı, yani bu sütunlardaki değişkenlik, doğrudan hata kareler toplamı olarak değerlendirilir. Hata varyansı, modelin açıklayamadığı, yani rastgeleliğe veya ölçüm hatasına bağlı olan değişkenliği temsil eder. Deney sonuçları analiz edilirken, her bir parametrenin sonuca etkisi beklenenden çok daha düşük çıkabilir (Saadoon, 2024). Bazı faktörler, sistemin genel davranışını neredeyse hiç değiştirmeyebilir. Bu durumda, küçük etkili parametrelerin oluşturduğu varyans da hata varyansı hesabında kullanılır. Analizde esas amaç, gerçekten önemli olan faktörleri, yani sonuç üzerinde büyük payı olan değişkenleri tespit etmek ve gereksiz, önemsiz parametreleri göz ardı etmektir (Demiryol ve Soyaltin-Colella, 2024).

Bu önemi belirlemek için F-testi adı verilen istatistiksel yöntem uygulanır. F-testi, her bir parametrenin varyansını hata varyansına oranlayarak, o faktörün sonuca anlamlı bir katkısı olup olmadığını belirler. Eğer hesaplanan F değeri düşükse, yani test edilen parametrenin varyansı hata varyansına yakınsa, bu parametrenin sistem üzerinde etkili olmadığı kabul edilir ve bir sonraki küçük parametre ile birleştirilir. Bu işlem, anlamlı bir F oranı (yani belirlenen güven seviyesini aşan bir değer) bulununcaya kadar devam eder. Böylece, yalnızca gerçekten etkili olan değişkenler modelde tutulur. F-testi uygulanırken, temel olarak hataların normal dağıldığı, bağımsız olduğu ve varyanslarının birbirine eşit olduğu varsayılır. Eğer bu varsayımlar ihlal edilirse, yapılan çıkarımlar yanıltıcı olabilir. Analiz sırasında, elde edilen F değerleri, istatistiksel tablolar yardımıyla belirlenen kritik F değerleriyle karşılaştırılır. Eğer hesaplanan F değeri, tablo değerinden büyükse, ilgili faktörün performans karakteristiği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olduğu sonucuna varılır. Bu oran, ilgili parametrenin toplam varyans içindeki önem derecesini gösterir. Kısacası, F-testi sayesinde hangi faktörlerin İHA tasarım ve üretim sürecinde öncelikli olarak kontrol edilmesi gerektiği, hangilerinin ise sistemdeki rastgele dalgalanmadan ibaret olduğu bilimsel olarak ortaya konmuş olur (Majidi Balanji, 2025).

4. LİTERATÜR ÖZETİ

İnsansız hava araçları ve ilgili teknolojiler üzerine yapılan çalışmalar, günümüzde hem bilimsel hem de endüstriyel alanda önemli bir bilgi birikimi ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan çok sayıda araştırma, İHA'ların tasarımı, performans optimizasyonu, malzeme seçimi, yapısal analizleri, kontrol stratejileri ve uygulama alanları gibi birçok farklı başlıkta derinlemesine bulgular sunmaktadır. Bu çalışmanın bu bölümünde, İHA'larla ilgili güncel literatürün sistematik bir özeti sunularak, alanda öne çıkan temel yaklaşımlar, yenilikçi yöntemler ve elde edilen önemli sonuçlar detaylı şekilde ele alınacaktır. Böylece, araştırmanın kavramsal çerçevesi sağlam bir zemine oturtulurken, mevcut literatürdeki boşlukların ve yeni araştırma fırsatlarının da belirlenmesi hedeflenmektedir.

Kapsalis, Panagiotou ve Yakinthos (2021) yaptıkları çalışmada, taktiksel bir sabit kanatlı insansız hava aracı platformunun ön tasarım aşamasında, aerodinamik performansın optimizasyonunu sağlamak amacıyla Taguchi deneysel tasarım metodunu uygulamışlardır. Araştırmanın merkezinde, Blended-Wing-Body (BWB) olarak adlandırılan, gövde ve kanatların bütünleşik olduğu özel bir İHA tasarımı bulunmaktadır. Bu platformun asıl görevi, hava yoluyla kargo ve yaşam destek malzemelerinin taşınmasıdır. Çalışmada ilk olarak, platformun performansını etkileyebilecek temel tasarım parametreleri olarak; kanat açıklık oranı (aspect ratio), taper oranı ve süpürme açısı (sweep angle) belirlenmiştir. Bu üç parametrenin, uçağın maksimum hızı, kalkış pisti uzunluğu ve toplam kalkış ağırlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Parametre kombinasyonlarının etkisini değerlendirmek amacıyla, Taguchi yöntemine uygun olarak L9 ortogonal dizi oluşturulmuş ve bu kombinasyonlar üzerinden deneysel sayısal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Her bir kombinasyonun aerodinamik performans üzerindeki etkisi, gelişmiş Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri ile hesaplanmıştır. Araştırmanın en önemli kısmı, bu parametrelerin hangi seviyelerde optimum performansı sağladığının belirlenmesidir. Sonuçlara göre; en uygun parametre kombinasyonu, İHA'nın maksimum hızı önceki referans modele göre yaklaşık %15 oranında artış göstermiştir. Ayrıca, kalkış pisti uzunluğunda %12'ye varan bir azalma elde edilmiştir. Bununla birlikte, toplam kalkış ağırlığında da %8 oranında bir iyileşme kaydedilmiştir. Tüm bu bulgular, optimize edilen tasarım parametrelerinin, İHA'nın hem operasyonel verimliliğini hem de görev kabiliyetini artırdığını ortaya koymuştur. Araştırmada elde edilen sayısal verilerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını belirlemek için, deney sonuçlarına ek olarak ANOVA (Varyans Analizi) yöntemi de uygulanmıştır. ANOVA

sonuçlarına göre, en yüksek katkı oranı %45 ile kanat açıklık oranına (aspect ratio) aitken, taper oranı %30 ve süpürme açısı ise %25 oranında performans üzerinde etkili olmuştur. Bu veriler, tasarım sürecinde hangi parametrelere öncelik verilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir. Taguchi yöntemi ile istatistiksel optimizasyonun bir arada kullanılması, en az deneysel sayıda maksimum bilgi elde edilmesini sağlamış ve mühendislik tasarımında önemli bir verimlilik artışı yaratmıştır. Kapsalis ve arkadaşlarının bu çalışması, insansız hava aracı tasarımında Taguchi ve ANOVA gibi istatistiksel yöntemlerin, gerçek sayısal verilerle ve mühendislik analizleriyle desteklendiğinde, İHA performansının iyileştirilmesinde ne kadar etkin bir rol oynayabileceğini açıkça göstermektedir

Adediran (2017) yaptıkları çalışmada, Taguchi yöntemi ve Response Surface Methodology (RSM) yaklaşımlarını, alaşımlı derinliğin ve sertliğin optimizasyonu amacıyla lazerle alaşımlama işlemi üzerinde uygulamışlardır. Çalışmanın temeli, üç ana lazer işleme parametresi olan lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızının, alaşımlı tabakanın kalitesi üzerindeki etkisinin araştırılmasına dayanmaktadır. Bu parametreler, her biri üç seviyede olacak şekilde, standart L9 Taguchi ortogonal dizisiyle deneysel olarak planlanmıştır. Yani, toplamda dokuz farklı deney kombinasyonu elde edilmiştir. Deneylerde, lazer gücü 1.0-1.4 kW arasında, tarama hızı 500-900 mm/dk ve toz besleme hızı ise 10-18 g/dk arasında değiştirilmiştir. Çalışmanın ana bulguları, özellikle alaşımlı tabakanın derinliği ve yüzey sertliği üzerinde hangi parametrelerin daha baskın etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Sonuçlara göre, lazer gücü ve tarama hızı parametreleri, alaşımlı tabakanın derinliği üzerinde en belirleyici faktörler olarak ön plana çıkmıştır. Özellikle, lazer gücü %55, tarama hızı ise %34 oranında etkili olmuştur. Buna karşın, toz besleme hızının etkisi %11 ile oldukça düşük kalmıştır. Yüzey sertliği açısından ise, benzer şekilde lazer gücü ana belirleyici olarak tespit edilmiştir. Elde edilen optimum kombinasyon ile, lazerle işlenmiş tabakanın derinliği 1.7 mm'ye kadar ve yüzey sertliği ise 725 HV'ye kadar çıkarılmıştır. Bu veriler, geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha verimli ve dayanıklı bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır. Araştırmada, elde edilen deneysel bulguların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek için, ortalama varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. ANOVA sonuçları, özellikle lazer gücü ve tarama hızının, toplam varyans üzerinde çok yüksek katkı sağladığını göstermiştir. Ayrıca, RSM kullanılarak geliştirilen matematiksel modelde de benzer şekilde, parametrelerin etkisi doğrulanmış ve modelin doğruluk oranı %97 olarak raporlanmıştır. Çalışma, deneysel optimizasyonun Taguchi ile, matematiksel modellemenin ise RSM ile başarıyla birleştirilebileceğini ve mühendislikte hızlı, ekonomik, güvenilir optimizasyon elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu çalışma,

özellikle yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında, yüzey özelliklerinin hassas şekilde kontrol edilmesi gerektiğinde, Taguchi ve RSM'nin birlikte kullanımının sağladığı avantajları net olarak göstermektedir. Yani, motor ve yüksek sıcaklık komponentlerinde, proses parametrelerinin hızlıca optimize edilmesi ve yüksek yüzey kalitesine ulaşılması için bu istatistiksel yöntemlerin mühendislikte etkin bir araç olduğu ortaya çıkmıştır.

Ural Bayrak ve Çelik (2023), Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) kullanan insansız hava araçlarında hücredeki akım yoğunluğunu etkileyen işletme parametrelerinin optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı ile ANOVA analizini bir arada kullanmışlardır. İHA'larda enerji yoğunluğunun ve verimliliğin kritik bir öneme sahip olması nedeniyle, çalışma kapsamında PEM yakıt hücrelerinin işletme sıcaklığı, yakıt besleme basıncı ve hava/yakıt akış debisi gibi temel parametreler optimize edilmiştir. Araştırmada, MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyonlarla hücre akım yoğunluğunun davranışı detaylı şekilde incelenmiştir. Taguchi yöntemi çerçevesinde L18 ortogonal dizi kullanılarak deneysel tasarım gerçekleştirilmiş, bu sayede farklı parametre kombinasyonlarının etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda, en uygun işletme koşulları olarak hücre sıcaklığı 313 K, yakıt akış debisi 50 lpm, hava akış debisi 300 lpm ve yakıt besleme basıncı 1.5 bar belirlenmiştir. Çalışmada, ANOVA yöntemiyle her bir parametrenin akım yoğunluğuna katkı oranı da ortaya konmuştur. Sonuçlara göre, hücre sıcaklığının %69.7 ile en yüksek etkiye sahip olduğu, ardından besleme basıncının %16.6, yakıt akış debisinin %6.7 ve hava akış debisinin %0.9 katkı oranına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, parametrelerin optimizasyonu ile İHA'larda daha yüksek akım yoğunluğu ve enerji verimliliğine ulaşılabileceğini göstermiştir. Genel olarak çalışma, küçük ve düşük irtifalı İHA'larda doğrudan uygulanabilecek, mühendislik uygulamalarına ve istatistiksel analize dayanan kapsamlı bir yöntem sunmaktadır. Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla, optimum yakıt hücresi performansının nasıl sağlanabileceği örnek bir uygulama olarak gösterilmiştir.

Kapsalis ve arkadaşları (2023), gerçekleştirdikleri bu çalışmada, hafif sınıf bir flying wing tipi insansız hava aracında, hem geleneksel hem de dikey kalkış-iniş yapabilen tasarımda, kanard (burun kanatçığı) geometrisinin performans üzerindeki etkilerini kapsamlı şekilde araştırmışlardır. Çalışmada altı farklı kanard tasarım parametresi, süpürme açısı, aspect ratio, taper ratio, kanadın dikey pozisyonu, açı (incidence angle) ve dihedral açısı ele alınmış ve her bir parametre üç seviyede değerlendirilmiştir. Bu parametrelerin etkilerini sistematik olarak

incelemek için Taguchi Deneysel Tasarım yöntemi kullanılmış ve L27 ortogonal dizi ile toplam 27 farklı test yapılmıştır. Tüm analizler yüksek doğrulukta Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları ile yürütülmüş, böylece her parametre kombinasyonunun aerodinamik performansa etkisi detaylı olarak belirlenmiştir. Performans değerlendirmelerinde, seyir irtifasında Lift-to-Drag (L/D) oranı ile pitching moment (Cm) esas alınmıştır. Taguchi analizi sonucunda, en yüksek L/D oranına ulaşmak için optimal kanat tasarım parametreleri belirlenmiştir: belirli bir sweep angle, aspect ratio, taper ratio, kanadın dikey pozisyonu, incidence ve dihedral açı kombinasyonları optimum sonuçları vermiştir. Pitching moment değerini minimize etmek için ise farklı bir optimum kombinasyon elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca ANOVA analizi uygulanmış ve hangi parametrelerin performansa en fazla etki ettiği ortaya konmuştur. L/D oranı için incidence angle en önemli faktör olurken, pitching moment açısından en büyük etkiye sahip parametre sweep angle olarak saptanmıştır. Bu araştırma, İHA tasarımında Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin birlikte etkin biçimde nasıl kullanılabileceğini, hangi tasarım parametrelerine öncelik verilmesi gerektiğini ve mühendislikte gerçek simülasyon verileriyle nasıl optimum sonuçlara ulaşılabileceğini göstermesi açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Dada ve arkadaşları (2022), düşük hızlı hibrit (hem elektrikli hem konvansiyonel motorlu) bir İHA'nın kanat yapısının optimizasyonunu, Taguchi deney tasarımı yöntemiyle iteratif olarak gerçekleştirmişlerdir. Araştırmanın temel hedefi, müşteri gereksinimleri ve hava aracı emniyet standartlarına uygun, minimum ağırlığa sahip, yüksek dayanımlı ve rijit bir kanat tasarlamaktır. Çalışmada üç ana kontrol parametresi belirlenmiştir: kanat kaplama kalınlığı, spar (kiriş) kalınlığı ve rib (kuşak) aralığı. Her biri üç seviyede incelenmiş ve L9 ortogonal Taguchi dizisiyle toplam dokuz farklı konfigürasyon oluşturulmuştur. Her kombinasyon için ABAQUS CAE yazılımında sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılmış; kanat kütlesi, maksimum sehim (deflection) ve Tsai-Hill failure index gibi performans ölçütleri detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlar, kanat kaplama kalınlığının hem kanat kütlesi hem de rijitlik üzerinde en yüksek etkiye sahip parametre olduğunu göstermiştir. Optimum tasarım kombinasyonu ile kanat kütlesi 2.5 kg'nin altında tutulmuş, maksimum sehim kanat açıklığının %10'u seviyesinde kalmış ve Tsai-Hill failure index'i 1'in altında sağlanmıştır. Bu değerler, hem güvenlik hem de performans açısından hedeflenen seviyelere ulaşılmış olduğunu ortaya koymuştur. Taguchi yöntemiyle yapılan bu iteratif optimizasyon sayesinde, çok daha az sayıda fiziksel prototip ve deney yapılarak, hızlı ve güvenilir bir şekilde en iyi tasarım parametreleri elde edilmiştir. Çalışma, İHA yapısal tasarımında Taguchi

yönteminin gerçek mühendislik simülasyonlarıyla birlikte etkin ve verimli biçimde kullanılabileceğini hem maliyet hem de zaman açısından önemli avantajlar sunduğunu net olarak ortaya koymaktadır.

Shiau ve arkadaşları (2021), mikro insansız hava araçlarında (MAV) yük taşıma optimizasyonunu sağlamak amacıyla Taguchi deney tasarımı ve ANOVA analizini birlikte uygulamışlardır. Mikro İHA’larda özellikle ağırlık ve dengesizlik gibi problemler yük taşıma performansını doğrudan etkilediğinden, bu çalışmada uçuş verileriyle parametrelerin optimize edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada gerçek uçuş verileri kullanılarak, taşıma kuvvetlerinin üretiminde etkili olan temel parametreler belirlenmiştir. Taguchi yöntemiyle, uçuş sırasında hız, ağırlık merkezi pozisyonu ve yük miktarı gibi kritik faktörlerin optimizasyonu yapılmıştır. Böylece, mikro İHA’nın yük taşıma kapasitesi üzerinde en fazla etkili olan değişkenler belirlenmiş ve optimum koşullar ortaya konulmuştur. Çalışmanın bir diğer aşamasında ANOVA analizi gerçekleştirilmiş ve kaldırma kuvveti üzerinde hangi parametrelerin en fazla etkili olduğu istatistiksel olarak ortaya konmuştur. Elde edilen sayısal bulgular, hava aracı hızının kaldırma kuvveti üzerinde %40 oranında, ağırlık merkezi pozisyonunun ise %35 oranında etkili olduğunu göstermiştir. Diğer parametreler ise daha düşük etki oranlarına sahip olmuştur. Optimum ayarlarda mikro İHA'nın hem kaldırma kapasitesinde hem de yük stabilitesinde anlamlı iyileşmeler sağlanmıştır. Çalışma, minimum enerjiyle maksimum yük taşıma başarısının, Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin entegrasyonu sayesinde pratikte uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Bu makale, mikro İHA’larda gerçek operasyonel verilerle mühendislik optimizasyonunun nasıl yapılabileceğini ve Taguchi ile ANOVA yöntemlerinin birlikte kullanımının ne kadar etkili sonuçlar verdiğini gösteren önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Ma ve arkadaşları (2020), bu çalışmalarında birden fazla insansız hava aracının (UAV) üç boyutlu yerleşiminin optimizasyonunu sağlamak için Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullanmışlardır. Araştırmada, İHA’lar acil durumlarda ya da geniş kapsama alanı gereksinimlerinde mobil hava üssü (base station) olarak işlev görmektedir. Temel amaç, en az sayıda İHA kullanılarak maksimum kapsama oranına ulaşmaktır. Simülasyonlarda, gerçekçi hava ve zemin kanal modellemeleri kullanılmış, böylece hava ortamındaki değişkenlikler ve zemin yansımaları da göz önünde bulundurulmuştur. Taguchi yöntemi kapsamında uçuş yüksekliği, yatay konum ve görev alanı gibi parametreler farklı seviyelerde test edilmiştir. L-ortogonal dizi yapısıyla, çok sayıda parametre kombinasyonu kısa sürede ve sistematik olarak

değerlendirilmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçları, üç boyutlu yerleşim optimizasyonu sayesinde kapsama oranında anlamlı bir artış sağlandığını göstermiştir. Taguchi optimizasyonu ile elde edilen kapsama oranı, klasik deneme-yanılma yöntemine kıyasla %12 daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca, optimum parametre kombinasyonları ile kapsamanın sürekliliği sağlanmış, sinyal kalitesi ve iletişimdeki güvenilirlik de belirgin şekilde artmıştır. Taguchi yönteminin mühendislik uygulamalarında, özellikle İHA tabanlı kapsama sistemlerinin optimizasyonunda hızlı ve etkin bir araç olduğunu göstermiştir. Çalışma, gerçekçi iletişim ortamında, mühendislikte Taguchi deneysel tasarımının pratik, somut ve hızlı fayda sağlayabileceğini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır.

Hou ve arkadaşları (2019), narenciye ağaçlarında damlacık yoğunluğunun optimizasyonunu sağlamak için İHA'lar ve Taguchi yöntemini birlikte kullanmışlardır. Araştırmada, insansız hava araçlarının narenciye bahçelerinde ilaçlama performansını artıracak en uygun kontrol parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, ağaç tepesi şekli, ilaçlama yüksekliği ve uçuş hızı gibi temel parametreler farklı seviyelerde test edilmiştir. Çalışmada, ters üçgen tepe şekline sahip ağaç, 1.40 m püskürtme yüksekliği ve 1.0 m/s uçuş hızıyla en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kontrol parametrelerinin etkisi, deneysel olarak elde edilen damlacık yoğunluğu ve S/N oranları (signal-to-noise ratio) ile değerlendirilmiştir. Taguchi analizi sonucunda optimum kombinasyon; ters üçgen ağaç formu, 1.4 m ilaçlama yüksekliği ve 1 m/s uçuş hızı olarak belirlenmiştir. Özellikle uçuş hızının damlacık yoğunluğu üzerinde %74.0 oranında en yüksek etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Püskürtme yüksekliği %16.2, ağaç şekli ise %8.8 katkı oranına sahiptir. En yüksek ortalama damlacık yoğunluğu 35.35 damlacık/cm² ile 9 numaralı deneyde ölçülürken, en düşük değer ise 15.78 damlacık/cm² ile 2 numaralı deneyde kaydedilmiştir. ANOVA analizi ile kontrol parametrelerinin istatistiksel önemi test edilmiştir. Sonuçlara göre, uçuş hızı, püskürtme yüksekliği ve ağaç şekli değişkenlerinin tamamı $p < 0.05$ düzeyinde anlamlı bulunmuştur. Özellikle uçuş hızının azaltılması, damlacık yoğunluğunu önemli ölçüde artırırken, en düşük yoğunluk daha yüksek uçuş hızlarında gözlenmiştir. Çoklu regresyon modeliyle, optimum püskürtme yüksekliğinin 1.27m ve maksimum damlacık yoğunluğunun 35.39 damlacık/cm² olabileceği tahmin edilmiştir. Ayrıca, damlacık yoğunluğunun narenciye ağaçlarının alt tabakalarında optimuma ulaşması için de incelemeler yapılmıştır. Özellikle ters üçgen ağaç formu, klasik üçgen forma kıyasla alt tabakalarda %82'ye varan damlacık yoğunluğu artışı sağlamıştır. 14 m püskürtme yüksekliğinde alt tabakada damlacık yoğunluğunda %59.6 artış gözlenmiştir. Farklı püskürtme yükseklikleri arasındaki varyasyonlar incelendiğinde, 1.4 m'de püskürtmenin, alt tabakada

belirgin iyileşme sağladığı saptanmıştır. CV (varyasyon katsayısı) analiziyle, ters üçgen şekilli ağaçlarda alt tabaka damlacık dağılımının daha homojen olduğu gösterilmiştir (CV %23.2–28.7 aralığında), klasik üçgen şekilli ağaçlarda ise bu değer daha yüksek çıkmıştır (CV %34.4–43.8 aralığında). Ayrıca, püskürtme yüksekliği ve uçuş hızı kombinasyonlarının damlacık yoğunluğunu önemli ölçüde etkilediği, daha yavaş uçuş hızlarının hem damlacık yoğunluğunu hem de dağılım homojenliğini artırdığı görülmüştür. Bu çalışma Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin birlikte kullanımıyla, İHA’larla yapılan tarımsal ilaçlamada damlacık yoğunluğunu ve dağılımını maksimuma çıkarmak için ideal kontrol parametrelerinin nasıl seçilebileceğini, gerçek deneysel verilerle açıkça ortaya koymaktadır.

Mohd Ghazali, Teoh ve Wan Rahiman (2025), İHA tabanlı LoRa (Long Range) haberleşme ağlarında farklı anten modellerinin ve iletim gücü parametrelerinin sistem performansı üzerindeki etkilerini Taguchi deney tasarımı ve ANOVA istatistiksel analizi ile optimize etmişlerdir. Çalışmada, uçuş ve veri iletim performansını etkileyen temel parametreler; anten kazancı (dBi), iletim gücü (dBm) ve ortam sıcaklığı (°C) olarak belirlenmiştir. Araştırmada Taguchi yöntemi kapsamında L9 ortogonal dizi kullanılarak, çeşitli anten tipleri ve güç değerleri farklı sıcaklık koşullarında test edilmiştir. Her parametre için üç farklı seviye değerlendirilmiş, optimum kombinasyonlar sistematik biçimde ortaya konmuştur. Testler, gerçek İHA uçuşları ve donanım üzerinde gerçekleştirilmiş olup, deneysel veriler doğrudan sistem performansı açısından analiz edilmiştir. ANOVA analizinde, veri iletim oranı (packet delivery rate) üzerindeki en önemli etkiye iletim gücünün sahip olduğu ve bu katkının %65.2 düzeyinde olduğu saptanmıştır. Takip eden parametreler arasında ise anten modeli ve ortam sıcaklığı daha düşük etki oranlarına sahiptir. Optimum koşul olarak, 15 dBm iletim gücü, 5 dBi anten ve 34°C ortam sıcaklığında, 1 kilometre doğrusal görüş mesafesinde maksimum veri iletim oranı ve minimum güç tüketimi sağlanmıştır. Çalışmanın en dikkat çekici sonuçlarından biri, bu optimizasyon sayesinde güç kaynağının küçültülerek İHA uçuş süresinin anlamlı düzeyde artırılabilmesi ve 3789 kat daha fazla veri iletiminin mümkün olmasıdır. Tüm bu bulgular, Taguchi ve ANOVA yöntemlerinin birlikte kullanılmasının, LoRa tabanlı insansız hava aracı sistemlerinde mühendislik optimizasyonu için hem hızlı hem de etkili çözümler sunduğunu göstermektedir.

Majidi Balanji (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, çoklu insansız hava araçları kullanılarak yürütülen arama ve kurtarma operasyonlarında etkili hedef tespiti, bağlantı sağlama ve görev ataması konularına odaklanmıştır. Çalışmada, felaket senaryolarında birden

fazla hedefin tespit edilmesi, izlenmesi ve iletişim bağlantısının sürdürülebilmesi için entegre bir çoklu İHA sistemi geliştirilmiştir. Tez kapsamında, iki farklı İHA türü kullanılmıştır hızlı alan taraması gerçekleştiren sensörlü arama İHA'ları ve görev süresince İHA'lar ile yer kontrol istasyonu arasındaki ağı kuran ve sürdüren röle İHA'ları. Araştırmada, üç temel hedef tespiti ve bağlantı stratejisi geliştirilmiştir: (i) Önceden belirlenen rotalar üzerinden gidilerek tespit edilen hedeflerin yer kontrol istasyonuna bildirilmesi; (ii) Arama operasyonu sırasında yeni hedefler için ek İHA'ların konuşlandırılması; (iii) Tespit edilen hedeflere arama İHA'larının atanıp yolların dinamik olarak yeniden planlanması. Elde edilen bulgular, daha az uyarlanabilir stratejilerin daha hızlı hedef tespiti sağladığını, ancak iletişim bağlantısının güvenilirliğini azalttığını göstermektedir. Buna karşılık, yüksek derecede uyarlanabilir stratejiler ağ performansını iyileştirirken, görev süresini uzatabilmektedir. Özellikle röle İHA'larının kullanılması, bağlantı kalitesini %60'a kadar artırabilmekte, fakat görev süresini bazı durumlarda %40'a kadar uzatabilmektedir. Ayrıca tezde, bağlantı tabanlı yeni bir hedef önceliklendirme yöntemi de geliştirilmiş ve bu yöntem, çeşitli senaryolarda bağlantı kalitesi açısından detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Dhan (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, insansız hava aracı kanatlarının hem yapısal hem de aerodinamik açıdan optimize edilmesini amaçlamıştır. Çalışma kapsamında, geleneksel alüminyum, %65 uzun cam elyafı ile güçlendirilmiş Epoksi Levha Kalıplama Bileşiği (SMC) ve Epoksi E-cam kompozitler olmak üzere üç farklı malzeme konfigürasyonu karşılaştırılmıştır. Araştırmanın temel hedefi, en uygun malzeme seçimiyle İHA kanatlarının hem aerodinamik verimliliğini hem de yapısal bütünlüğünü artırmaktır. Çalışmada, kanatlara etki eden kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerini değerlendirmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri gerçekleştirilmiş, böylece malzemelerin farklı uçuş koşullarındaki aerodinamik performansları karşılaştırılmıştır. CFD analizlerini takiben, kanat yapılarının operasyonel yükler altındaki yapısal tepkilerini incelemek için tek yönlü Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) analizi yapılmıştır. Ayrıca, kanatların doğal frekansları ve kritik titreşim modlarını belirlemek amacıyla modal analizler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan malzemelerin güvenlik faktörleri, deformasyon davranışları ve doğal frekans performansları açısından anlamlı farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle kompozit malzemeler, alüminyum ile kıyaslandığında hem daha düşük ağırlık hem de daha yüksek yapısal dayanıklılık sergilemiştir. Bu malzemeler arasında ise Epoksi E-cam kompozitler, gerilim dağılımı ve deformasyon kontrolü bakımından en iyi güvenlik faktörünü ve en dengeli yapısal performansı göstermiştir. Tezdeki bulgular, gelişmiş kompozit malzemelerin İHA kanat tasarımında yapısal

ağırlığı azaltırken aynı zamanda güvenliği ve operasyonel dayanıklılığı artırma potansiyelini güçlü bir şekilde vurgulamaktadır.

Ünalır (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, düşük radar kesit alanına (RKA) sahip bir insansız hava aracının hem simülasyon ortamında hem de gerçek ortamda modellenmesini ve ölçülmesini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Tezde, özellikle X-band frekansında düşük RKA değerlerine ulaşmak için model üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmış hem simülasyon hem de gerçek testlerle bu iyileştirmelerin etkinliği değerlendirilmiştir. Çalışmada, en yaygın kullanılan hesaplamalı RKA tahmin yazılımlarından biri olan CST programı kullanılarak, düşük RKA değerine sahip İHA'nın üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve simülasyon ortamında analizler yapılmıştır. Tasarım aşamasında, RKA'yı azaltmak için uygulanan teknikler, modelleme basamakları ve dikkat edilmesi gereken yapısal unsurlar detaylı olarak tanımlanmıştır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen ölçümler, 360 derece görünüme sahip olacak şekilde (1 derece hassasiyetle) ve hem dikey hem de yatay polarizasyonda, X-Band'da yapılmıştır. Bu sayede İHA'nın tüm açılardan radar izinin boyutu analiz edilmiştir. Simülasyon aşamasının ardından, 3D yazıcı kullanılarak tasarlanan İHA'nın fiziksel prototipi üretilmiş ve gerçek ortamda test edilmiştir. Gerçek ortamdaki ölçümler, Vektör Ağ Analizörü (VNA) ile yine 360 derece görünüş açısında (10 derece hassasiyetle) ve X-Band'da hem dikey hem de yatay polarizasyonda gerçekleştirilmiştir. Elde edilen saçılma alanı parametreleri üzerinden, özel formüller kullanılarak gerçek RKA değerleri hesaplanmıştır. Ölçülen ve simüle edilen veriler karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine yakın olduğu, önerilen modelleme ve RKA azaltma tekniklerinin başarıyla çalıştığı gösterilmiştir. Çalışma hem simülasyon hem de gerçek ortam analizlerinin entegrasyonu ile düşük radar izli İHA tasarımı konusunda kapsamlı bir yaklaşım sunmuş ve geliştirilen tekniklerle RKA değerlerinin ciddi şekilde azaltılabileceğini ortaya koymuştur. Bu da, savunma ve güvenlik uygulamalarında düşük görünürlüklü İHA'ların geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Ali (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, insansız hava aracı projelerinin yönetimi ve tasarım aşamalarını kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Tezde, İHA projelerini başarıyla yönetmek ve ortaya çıkan tasarım problemlerine yenilikçi çözümler geliştirmek amacıyla "Yaratıcı Problemleri Çözme Kuramı" (TRIZ) prensipleri temel alınmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde, İHA'ların boyut, menzil, ağırlık, motor tipi ve konfigürasyon gibi temel teknik özellikleri analiz edilmiş, bu özelliklerin İHA'ların işlevselliği ve teknoloji düzeyi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu değerlendirme ile İHA'ların geleneksel insanlı hava

araçlarından nasıl ayrıldığı ve çok çeşitli operasyonel senaryolarda neden tercih edildiği açıklanmıştır. Çalışmada İHA'ların operasyonel alanda kullanımı ile elde edilen maliyet tasarrufu ve performans artışı vurgulanmış, bu kapsamda İHA proje yönetimi süreçlerinin tüm aşamaları (proje fikrinden kabulüne ve üretim sonrası gözden geçirmeye kadar) adım adım ele alınmıştır. Sistem Gereksinimleri İncelemesi (SRR), Ön Tasarım İncelemesi (PDR) ve Kritik Tasarım İncelemesi (CDR) gibi projede kritik öneme sahip safhalar detaylı şekilde açıklanmıştır. Ayrıca, kazanılmış değer yönetimi ve kritik yol analizi gibi proje yönetimi araçlarının, gereksinimlerin etkin biçimde yönetilmesi ve geliştirme aşamalarının optimize edilmesi amacıyla entegre edildiği belirtilmiştir. Çalışmada, İHA projelerinde sıklıkla karşılaşılan zorluklar; kaynak yönetimi, teknolojik yenilikler, insan faktörleri ve mevzuat uyumu başlıkları altında ele alınmıştır. Risk yönetimi ise özel bir öneme sahip olup, İHA operasyonlarıyla ilgili operasyonel ve çevresel riskler için kapsamlı bir risk yönetimi planı önerilmiştir. Gerçek hayattan örnekler aracılığıyla risklerin nasıl azaltılabileceği ve operasyonel güvenliğin nasıl artırılabilirliği gösterilmiştir. TRIZ prensiplerinin uygulanması, tezde yenilikçi çözümlerin teşvik edilmesi ve karmaşık mühendislik sorunlarının çözümü için sistematik bir çerçeve sunmaktadır. Sonuç olarak, çalışma; İHA projelerinin risklerini azaltmak, proje yönetim süreçlerinde yenilikleri teşvik etmek ve hem askeri hem de sivil uygulamalarda İHA'ların teknolojik gelişimini desteklemek için uygun bir yönetim modeli geliştirmiştir. Tez, İHA alanında bilgi ve yetkinliğin artırılmasına önemli katkılar sunmayı amaçlamaktadır.

Sezen (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, elektrik motorlu insansız hava araçlarında kullanılan pervane profilinin hem hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi hem de deneysel yöntemlerle kapsamlı bir şekilde incelenmesini amaçlamıştır. Tezde, özellikle sabit kanatlı mini İHA'larda yaygın olarak kullanılan ve literatürde az çalışılmış olan APC firmasının 5x5E model küçük boyutlu, yüksek devirli pervanesi odak noktası olmuştur. Çalışmada, pervanenin farklı dönüş hızları ve serbest akış hızlarındaki performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir. İtme katsayısı (KT), moment katsayısı (KM) ve verim (η) gibi temel performans parametreleri ölçülmüş, elde edilen deneysel bulgular Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney düzeneği ayrıntılı şekilde açıklanmış, ölçüm sistemlerinin doğruluğu için belirsizlik analizi yapılmıştır. Elde edilen deneysel verilerde, 0 ila 20 m/s serbest akış hızları aralığında toplam belirsizliğin %10'dan daha düşük olduğu, daha yüksek akış hızlarında ise %24,75'e kadar çıkan belirsizliklerin nedenleri tartışılmıştır. HAD analizlerinde ise literatüre uygun şekilde kabul edilebilir hata paylarında sonuçlar elde edilmiştir; en fazla %5,57 farkla itme katsayısı, %6,44 farkla moment katsayısı ve %9,03 farkla verim değerleri

hesaplanmıştır. Tezin bölümlerinde, girişte literatür taramasına ve çalışmanın özgün katkısına, ikinci bölümde deneysel kurguya ve ekipmanlara, üçüncü bölümde ise deneylerin uygulanmasına odaklanılmıştır. Dördüncü bölümde belirsizlik analizi, beşinci bölümde sayısal hesaplama yöntemleri ve sonuçların karşılaştırılması, altıncı ve son bölümde ise elde edilen bulguların değerlendirilmesi ve ileriye dönük öneriler sunulmuştur. Çalışma, mini İHA'larda kullanılan elektrik motorlu pervanelerin performansına dair hem deneysel hem de sayısal analizlerle güvenilir sonuçlar sunmakta, literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Özkan (2025), yaptığı yüksek lisans tezinde, kapalı kanat yapısına sahip, kuyruk üstü dikey iniş kalkış yeteneğine sahip özgün bir insansız hava aracı tasarımı ve performans analizini ele almıştır. Tezde, havacılık tarihinde zaman zaman gündeme gelen kapalı kanat konfigürasyonunun, modern üretim teknikleri ve gelişmiş analiz yöntemleriyle günümüz koşullarında yeniden değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında, katmanlı üretim teknolojisinin avantajlarından yararlanılarak, karmaşık geometrili kapalı kanat yapısının üretimi planlanmıştır. Dört rotorlu, kuyruk üstü dikey iniş ve kalkış yeteneğine sahip, çok yönlü hareket kabiliyeti bulunan İHA'nın kavramsal ve detaylı tasarımı bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları ile oluşturulmuş; ardından fonksiyonel bir prototip imal edilmiştir. Tasarım sürecinde, kapalı kanat yapısının aerodinamik verimliliği ve uçuş dinamikleri açısından avantajları sayısal analizler ve simülasyonlar ile değerlendirilmiştir. İHA'nın performans analizlerinde hem teorik hesaplamalar hem de bilgisayar tabanlı simülasyonlar (örneğin, akış analizi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği-HAD) kullanılmıştır. Elde edilen prototip üzerinde gerçekleştirilen uçuş testleriyle de tasarımın pratikteki başarımı ve kontrol kabiliyeti ölçülmüştür. Ayrıca, uçuş testlerinde elde edilen verilerle sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır. Çalışmada, elde edilen bulgular kapalı kanat ve kuyruk üstü VTOL konseptlerinin bir araya getirilmesinin, özellikle manevra kabiliyeti, havada kalma süresi ve enerji verimliliği açısından gelecek vaat eden bir yaklaşım sunduğunu göstermiştir. Sonuçlar, hem özgün İHA tasarımlarının gelişimine hem de modern havacılık mühendisliğine önemli katkılar sunmaktadır.

Saadoon (2024), yaptığı yüksek lisans tezinde, sabit kanatlı insansız hava aracı tasarımında kompozit malzeme kullanımının aerodinamik ve yapısal performansa etkilerini Akışkan-Yapı Etkileşimi (FSI) ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizleri ile kapsamlı şekilde incelemiştir. Araştırmanın odağında, özellikle Boeing MQ-25 Stingray modelinin özgün bir versiyonunun bilgisayar ortamında tasarlanması ve bu tasarım üzerinde

çoklu simülasyonların gerçekleştirilmesi yer almıştır. Tez kapsamında, öncelikle SOLIDWORKS yazılımı kullanılarak sabit kanatlı İHA'nın üç boyutlu modeli oluşturulmuş, ardından ANSYS Fluent ve diğer mühendislik yazılımları ile hem aerodinamik analizler hem de yapısal analizler entegre bir şekilde yürütülmüştür. Araştırmanın en önemli yönlerinden biri, kanatlarda geleneksel malzemeler yerine kompozit malzemelerin tercih edilmesiyle ortaya çıkan avantajların değerlendirilmesidir. Kompozit ve geleneksel malzeme ile üretilmiş kanatların performansı; kaldırma kuvveti, sürüklenme, yapısal deformasyon ve dayanıklılık gibi kritik parametreler açısından karşılaştırılmıştır. Analizlerde, kompozit malzemelerle yapılan kanatların hem yapısal bütünlük hem de aerodinamik verimlilik bakımından belirgin şekilde daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Buda, modern İHA tasarımlarında malzeme seçiminin ne kadar kritik olduğunu ve kompozitlerin gelecekteki hava aracı uygulamalarında sağladığı avantajları açıkça ortaya koymuştur. Tezde kullanılan FSI ve CFD yöntemleri, tasarım ve analiz sürecinde karşılaşılan teknik zorlukların üstesinden gelmek ve sonuçları güvenilir şekilde değerlendirmek amacıyla tercih edilmiştir.

İsmail (2024), yaptığı yüksek lisans tezinde, kompozit malzeme kullanımının AAI Shadow 200 RQ-7 insansız hava aracının kanatlarının yapısal ve aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, kanat performansını çeşitli yükleme koşulları altında değerlendirmek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Akışkan- Yapı Etkileşimi ve modal analiz yöntemleri entegre bir sayısal analiz yaklaşımıyla kullanılmıştır. Çalışmada, İHA kanadı önce SolidWorks yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve modellenmiştir. Ardından, sayısal simülasyonlar ANSYS ortamında yürütülmüştür. Araştırmada, geleneksel alüminyumdan üretilen kanatlar ile Epoksi Karbon UD Prepreg ve Epoksi/cam elyaf UD prepreg QI kompozit malzemelerden üretilen kanatların performansları karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle kompozit malzeme kombinasyonlarının İHA kanadının yapısal dayanımını belirgin şekilde artırdığını ortaya koymuştur. Özellikle Epoksi/cam elyaf UD prepreg QI kompozit kanatların, daha yüksek güvenlik faktörü, daha düşük deformasyon ve taşıma yüklerinde daha iyi performans sağladığı saptanmıştır. Yapılan modal analizler, her iki kompozit malzemenin kanadın titreşim davranışı üzerindeki olumlu ve benzer etkilerini ortaya çıkarmıştır. Çalışma, modern İHA tasarımında kompozit malzemelerin önemli fırsatlar sunduğunu ve ileri sayısal analiz yöntemlerinin (CFD, FSI, modal analiz) bu süreçteki kritik rolünü vurgulamaktadır. Sonuçlar, kompozitlerin kullanılmasıyla kanat yapılarının optimize edilmesinin İHA'ların genel performansını, güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü artıracığını göstermektedir.

Özkan ve Dahil (2025) tarafından yapılan bu çalışma, yangınların söndürülmesinde kullanılmak üzere döner kanatlı insansız hava aracı tasarımı ve analizini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Çalışmada, geleneksel yangın söndürme araçlarının ve insan gücünün yetersiz kaldığı, erişilmesi zor veya tehlikeli bölgelerde kullanılabilecek, etkili ve verimli bir İHA platformu geliştirmek amaçlanmıştır. Araştırmada, döner kanatlı İHA'nın özellikle yangın sahasına hızlı ulaşabilmesi, yüksek manevra kabiliyetine sahip olması ve yangın söndürme operasyonlarında aktif rol oynayabilmesi için gerekli olan tüm teknik gereksinimler belirlenmiştir. Bu amaçla, tasarım sürecinde CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımlarından yararlanılmış, gövde yapısı, itki sistemi, yük taşıma kapasitesi ve yangın söndürme mekanizması üzerinde detaylı mühendislik analizleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca, üretilen İHA'nın prototipine ilişkin ağırlık, hacim, hız, taşıma kapasitesi ve operasyonel verimlilik gibi parametreler hesaplanmış ve sistemin yangınla mücadele etkinliği simülasyon ortamında test edilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen döner kanatlı İHA'nın yangın söndürme operasyonlarında etkili bir çözüm sunabileceğini ve özellikle ulaşılması güç alanlarda önemli avantajlar sağlayacağını göstermiştir.

Koçyiğit (2025), yaptığı çalışmada Türkiye'nin insansız hava aracı teknolojisindeki gelişimini 1980'li yıllardan günümüze kadar tarihsel bir bakış açısıyla incelemiştir. Çalışmada, Türkiye'de İHA teknolojilerinin evrimi, teknolojik atılımlar, savunma sanayisiyle entegrasyon süreçleri ve sektörde yaşanan önemli dönüm noktaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Yazar, ayrıca bu teknolojik gelişmelerin hem ulusal güvenliğe hem de Türkiye'nin uluslararası alandaki konumuna olan etkilerini analiz ederek, sektörel gelişimin dinamiklerini ve ülkenin İHA alanındaki güncel durumunu kapsamlı olarak ortaya koymuştur.

Akbar, Mahardika, Rizqi, Sulthoni ve Moelyadi (2021) yaptıkları çalışmada, yüksek irtifa uzun süre havada kalabilen insansız hava aracı (HALE UAV) ITB V4 modeli için aviyonik alt sistemlerin tasarımı ve geliştirilmesi sürecini ele almışlardır. Çalışma kapsamında, HALE sınıfı İHA'ların uzun süreli ve güvenli operasyonlar gerçekleştirebilmesi için gerekli olan elektronik sistemlerin, donanım mimarisinin ve iletişim altyapısının titizlikle planlanması ve entegre edilmesi üzerinde durulmuştur. Araştırmacılar, öncelikle ITB V4 platformunda kullanılacak temel aviyonik bileşenleri belirlemiş, bu bileşenlerin görev profiline uygunluğunu ve sistem içi entegrasyonunu sağlamaya yönelik adımlar atmışlardır. Elektriksel güç dağıtımı, uçuş veri kaydı, sensör entegrasyonu, otomatik pilot kontrol birimi, veri iletim ve yer istasyonu ile olan iletişim sistemleri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Tasarım sürecinde, dayanıklılık, hata

toleransı, veri güvenliği ve enerji verimliliği gibi kritik parametrelerin optimize edilmesine özel önem verilmiştir. Yazarlar ayrıca, geliştirdikleri aviyonik sistemlerin performansını gerçek uçuş simülasyonları ve zorlu çevresel koşullarda yapılan testlerle değerlendirmişlerdir. Bu testler sayesinde, sistemin uzun süreli uçuşlarda karşılaşılabileceği olası arızalara ve acil durumlara karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Sonuç olarak, ITB V4 HALE İHA için geliştirilen aviyonik altyapının, platformun operasyonel kabiliyetlerini artırdığı, görev güvenilirliğini ve uçuş süresini önemli ölçüde iyileştirdiği raporlanmıştır. Çalışma, benzer yüksek irtifa İHA projelerine aviyonik sistemlerin entegrasyonu konusunda yol gösterici nitelikte olup, hem mühendislik çözümlerinin hem de sahada karşılaşılan zorlukların ayrıntılı olarak paylaşılması açısından literatüre değerli katkılar sağlamaktadır.

Bayraktar ve Özcan (2018) yaptıkları çalışmada, Türkiye’de insansız hava araçlarının tarihsel gelişim sürecini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Makalede, İHA teknolojisinin Türkiye’deki ilk uygulamalarından başlayarak, teknolojik evrimi ve yerli savunma sanayisinin bu alandaki yatırımları detaylı şekilde ele alınmıştır. Yazarlar, askeri ve sivil amaçlarla geliştirilen İHA projelerinin teknik altyapılarını, üretim süreçlerini ve teknolojik ilerlemelerini değerlendirmiştir. Ayrıca, Türkiye’nin İHA alanında dışa bağımlılığını azaltmak için attığı adımlar, yerli üretim kapasitesinin artırılması ve milli projelerin teşvik edilmesi süreci üzerinde durulmuştur. Çalışmada, İHA’ların savunma sanayisindeki rolü, operasyonel başarıları, mevcut kapasitesi ve geleceğe dönük hedefleri analiz edilerek, Türkiye’nin küresel İHA piyasasındaki konumunun güçlendiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, yazarlar Türkiye’nin İHA teknolojisindeki ilerleyişinin sadece askeri alanda değil, sivil havacılık ve teknoloji ekosisteminde de önemli etkiler yarattığını belirtmişlerdir.

Besenyő ve Málnácssy (2024) ise çalışmalarında, Libya’daki insansız hava aracı savaşlarının jeopolitik boyutunu ve özellikle Türk yapımı İHA’ların Kuzey Afrika’daki çatışmalardaki rolünü derinlemesine incelemişlerdir. Makalede, Türk İHA’larının Libya’daki askeri operasyonlarda kullanılmasının, bölgedeki güç dengelerini nasıl değiştirdiği ve ülkeler arası stratejik ilişkileri nasıl etkilediği üzerinde durulmuştur. Yazarlar, Türk SİHA’larının (Silahlı İHA) sahadaki etkinliğini operasyonel başarılar, teknik üstünlükler ve askeri taktikler çerçevesinde değerlendirmiştir. Ayrıca, Libya’daki yerel güçler ile uluslararası aktörler arasındaki etkileşimin ve Türk İHA’larının bu dinamikler üzerindeki dönüştürücü etkisinin altı çizilmiştir. Çalışmada, Türk İHA’larının savaş alanındaki başarısının yalnızca askeri sonuçlar doğurmadığı, aynı zamanda Türkiye’nin bölgesel ve küresel düzeydeki stratejik pozisyonunu

güçlendirdiği sonucuna varılmıştır. Eser, Kuzey Afrika’da yaşanan İHA temelli çatışmaların günümüz jeopolitiği üzerindeki etkilerini anlamak için önemli bir kaynak niteliğindedir.

Bremnes, Moen, Yeduri, Yakkati ve Cenkeramaddi (2022) yaptıkları çalışmada, insansız hava araçlarının sınıflandırılmasında radyo frekansı (RF) parmak izlerinden elde edilen verileri ve derin öğrenme tabanlı yöntemleri bir arada kullanmışlardır. Araştırmanın temel amacı, farklı İHA türlerini tespit edebilmek ve sınıflandırmak için yenilikçi bir yaklaşım geliştirmektir. Çalışmada öncelikle, Empirical Wavelet Transform (EWT) yöntemi kullanılarak RF sinyalleri alt bantlara ayrılmış, bu sayede her bir İHA'ya özgü olan RF "parmak izi" öznelikleri belirlenmiştir. Elde edilen bu öznelıklar, daha sonra Derin Evrişimli Sinir Ağları (Deep Convolutional Neural Networks - DCNN) modeliyle işlenmiştir. DCNN, çok katmanlı yapısıyla karmaşık veri örüntülerini öğrenerek İHA'ları yüksek doğrulukla sınıflandırabilmektedir. Ek olarak, yazarlar modelin performansını değerlendirmek için çeşitli istatistiksel analiz yöntemlerinden yararlanmışlardır. Çalışmada özellikle doğruluk oranı (accuracy), karışıklık matrisi (confusion matrix) ve Receiver Operating Characteristic (ROC) eğrisi gibi metrikler kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada doğrudan ANOVA, Taguchi veya RSM gibi klasik parametrik optimizasyon ve varyans analiz yöntemlerine yer verilmemiştir. Analiz daha çok makine öğrenmesi doğrulukları ve model karşılaştırmalarına odaklanmıştır. Sonuç olarak, RF tabanlı öznelik çıkarımı ile derin öğrenme algoritmalarının entegrasyonu sayesinde, farklı İHA tiplerinin otomatik olarak ve yüksek başarımla tanımlanabileceği gösterilmiştir. Çalışma, güvenlik ve hava sahası yönetimi açısından önemli katkılar sunmakta olup, yeni nesil İHA tespit ve sınıflandırma sistemleri için yol gösterici olma niteliğindedir.

Demiryol ve Soyaltin-Colella (2024), çalışmalarında Türkiye'nin insansız hava araçları teknolojisindeki yükselişini uluslararası siyaset ve jeopolitik kapsamda analiz etmişlerdir. Yazarlar, özellikle Türkiye'nin askeri ve savunma sanayiinde İHA teknolojisindeki başarısının, ülkenin bölgesel ve küresel güç dengelerine olan etkilerini kapsamlı bir şekilde tartışmışlardır. Çalışmada, nitel araştırma yöntemleri kullanılmıştır. Özellikle literatür taraması, doküman analizi ve örnek olay incelemeleri (case study) gibi yöntemlerle Türkiye'nin insansız sistemlerdeki teknolojik ilerlemesinin dış politika stratejilerine ve jeopolitik hedeflerine yansımaları değerlendirilmiştir.

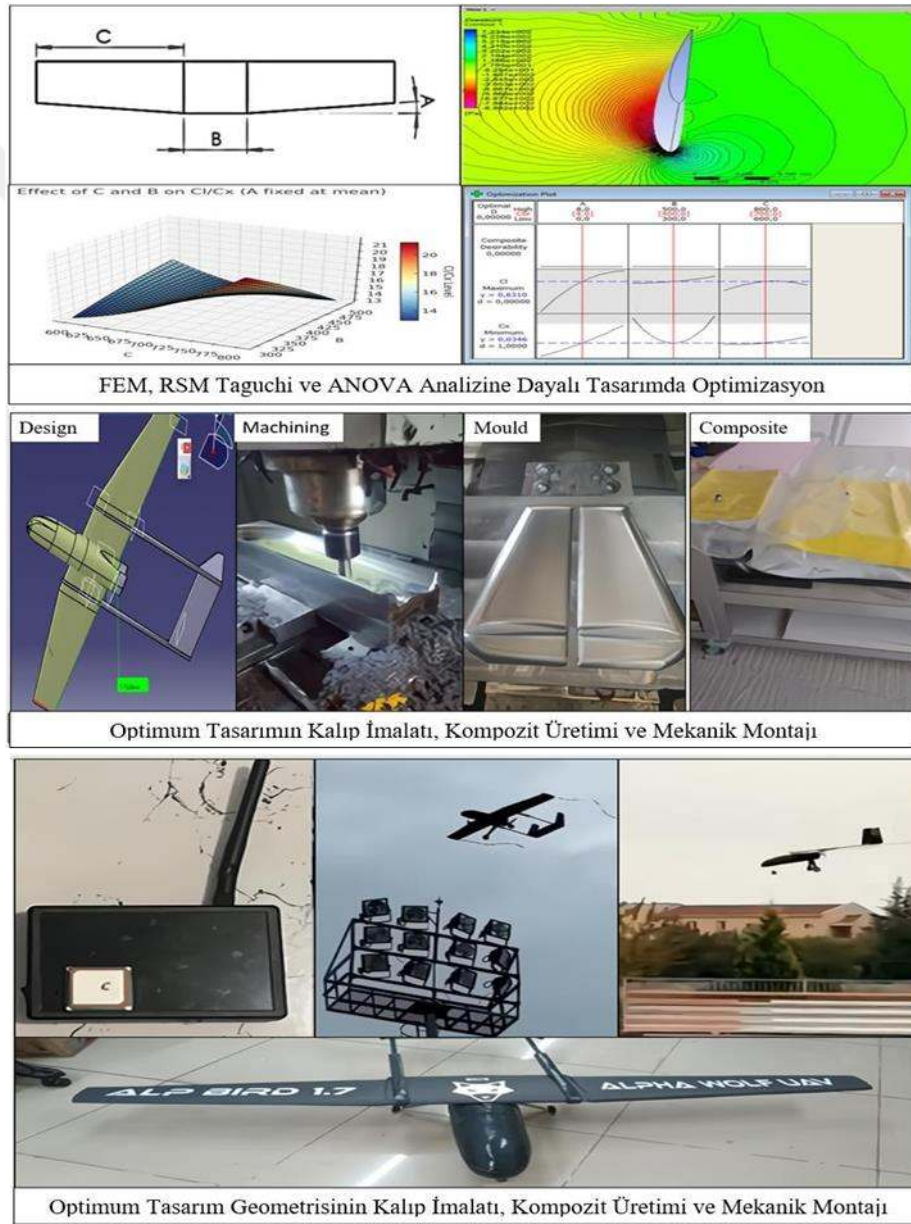
Erdoğan (2022) ise, makalesinde Bayraktar TB2 insansız hava aracının uluslararası operasyonlardaki başarılarını detaylı bir biçimde incelemiştir. Çalışmada, Bayraktar TB2'nin farklı coğrafyalarda (örneğin Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Doğu Avrupa gibi bölgelerde) elde

ettiği askeri ve operasyonel başarılar vaka analizleri (case analysis) ve karşılaştırmalı değeriendirme (comparative analysis) yöntemleri ile ele alınmıştır. Yazar, açık kaynaklardan elde edilen veri ve raporları analiz etmiş; operasyonel başarıların nedenlerini ve etkilerini derinlemesine tartışmıştır.

Literatürdeki mevcut çalışmaları, insansız hava araçlarının tasarımı, optimizasyonu ve performans analizine dair önemli katkıları sunmakla birlikte, bu araştırmada uygulanan özgün yöntemsel yaklaşım ve bütüncül analizler ile yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Farklı optimizasyon tekniklerinin (ANOVA, Taguchi, RSM, CFD vb.) karşılaştırmalı olarak entegre biçimde kullanılması ve elde edilen sonuçların hem teorik hem de deneysel olarak doğrulanması, çalışmamı alandaki benzer çalışmalardan ayırmaktadır. Ayrıca, projenin spesifik olarak belirlenmiş performans kriterleri doğrultusunda yapılan kapsamlı parametre analizleri ve uygulamaya dönük öneriler sunması, literatürdeki mevcut bilgi birikimine önemli bir katkı sağlamaktadır.

5. MATERYAL METOD

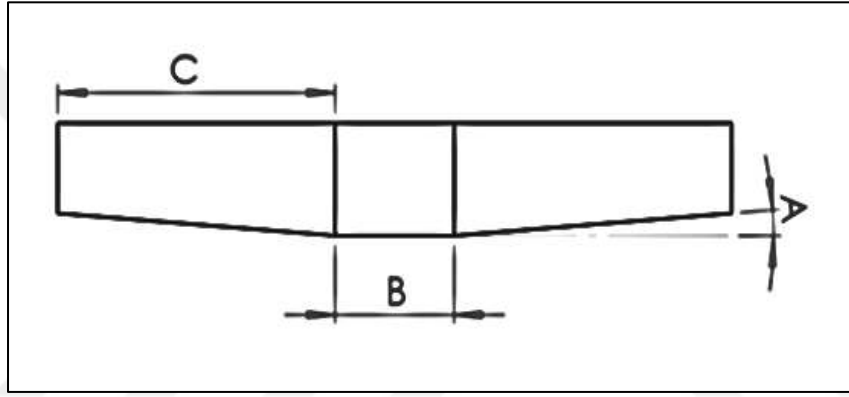
Optimum kanat tasarımını oluşturmak için geliştirilen bu araştırma, Şekil 5.1.'de gösterildiği gibi üç ana aşamada tamamlanmıştır. Bu aşamalar: tasarım optimizasyonu, kalıp ve uçak üretimi ve uçuş testleridir. İlk aşamada, tasarım süreci boyunca karşılaştırmalı istatistiksel analizler yapılmış ve sonuçlara göre optimum kanat geometrisi belirlenmiştir. İkinci aşamada, optimum kanat tasarımına sahip alçak irtifa insansız hava aracının kalıpları üretilmiş ve mekanik montajı gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise elektronik donanım montajı yapılmış ve 10 m/s hava akımı koşullarında maksimum hız testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Deney Organizasyon Şeması.

5.1. ANOVA, RSM, Taguchi ve CFD Tabanlı Optimizasyon

Bir insansız hava aracı kanadı, genellikle orta ve yan kanatlardan oluşan iki temel bölümden meydana gelir. Orta kanat çoğunlukla düz (açısız) bir yapıda tasarlanırken, yan kanatlar ise uçuş hızını artırmaya yönelik belirli bir açığa sahip şekilde oluşturulmaktadır (Şekil 5.2.). Eğer tasarımda taşıyıcılığın ön planda olduğu ve uçuş hızının daha az önemli olduğu durumlar söz konusuysa, yan kanatlar da açısız bir biçimde imal edilebilmektedir. Bu projede ise, hem yük taşıma kapasitesini en üst seviyeye çıkarmak hem de ideal hız değerlerine ulaşmak amacıyla, gerekli tasarım kriterleri çeşitli istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Bu amaçla, ANOVA, Taguchi ve RSM gibi yaygın olarak kullanılan istatistiksel teknikler karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve en uygun parametrik tasarım koşulları ortaya konulmuştur.



Şekil 5.2. Kanat Uzunluk ve Açık Parametreleri

Bu çalışma kapsamında, 20–35 cc hacminde içten yanmalı motorlar veya 4–5 kg itki üretebilen fırçasız elektrik motorları ile uçabilen bir İHA tasarımı geliştirilmiştir. Literatür taraması ve sektörel uygulamalara yönelik yapılan incelemeler neticesinde, bu kategorideki İHA’larda genellikle yaklaşık 1.8 metre kanat açıklığı tercih edildiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, projede üç temel tasarım kriterine ilişkin minimum ve maksimum boyut değerleri belirlenmiş ve söz konusu değerler Tablo 5.1.’de sunulmuştur. Elde edilen veriler ışığında, maksimum taşıma kapasitesine ulaşmayı ve en yüksek uçuş hızını etkileyen parametreler istatistiksel olarak değerlendirilmiş, bu parametrelerin performans üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.

Tablo 5.1. Parametrelerin Deney Tasarımı

Deney No	A	B	C	A	B	C
1	1	1	1	8	300	600
2	1	2	2	8	400	700
3	1	3	3	8	500	800
4	2	1	2	4	300	700
5	2	2	3	4	400	800
6	2	3	1	4	500	600
7	3	1	3	0	300	800
8	3	2	1	0	400	600
9	3	3	2	0	500	700

Tablo 5.1.'de görülen deney tasarımı, belirlenen üç ana parametrenin (A, B ve C) farklı seviyelerdeki kombinasyonlarını göstermektedir. Her bir deney satırı, kanat tasarımına ait parametrelerin (örneğin açı, uzunluk gibi) farklı değerlerini temsil ederek, bu parametrelerin sonuç üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak analiz edilmesine olanak tanır. Deneyler, faktörlerin minimum, orta ve maksimum seviyelerini kapsayacak şekilde ortogonal bir yapıdadır. Böylece, parametrelerin tek başına ve karşılıklı etkileşimlerinin sistem performansı üzerindeki etkisi kapsamlı biçimde değerlendirilebilmektedir. Buradaki ilk üç sütun, faktör seviyelerini (1, 2, 3) belirtirken, sonraki üç sütun ise ilgili parametrelerin gerçek değerlerini (örneğin, mm veya derece cinsinden ölçümleri) göstermektedir. Bu yaklaşım, hem istatistiksel modellemenin hem de pratik uygulamanın bir arada yürütülmesine olanak sağlar. Tabloya göre her bir parametre farklı seviyelerde denenmiş ve böylece değişkenlerin etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Bu tür bir deneysel tasarım sayesinde, ANOVA ve Taguchi gibi yöntemlerle en verimli parametre kombinasyonlarının tespiti mümkün olmaktadır. Sistemin performansını maksimize eden ve güvenilir sonuçlar sağlayan parametrelerin belirlenmesinde bu tür ortogonal deney düzenleri büyük avantaj sağlamaktadır (Çalışkan, 2014, 51).

Cl, Cd, Fz, Fy ve Cl/Cd gibi parametrelerin değerlendirilmesi, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne dayalı Fluent akış analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Tasarım optimizasyonu sürecinde, kontrol faktörlerinin etkisini değerlendirmek amacıyla S/N (Sinyal/Gürültü) oranları temel alınmıştır. Burada, düşük hacim ve minimum maksimum gerilme elde edilmesiyle birlikte yüksek emniyet katsayısı yakalanması; ürünün kalite, maliyet ve kullanım ömrü açısından kritik öneme sahiptir. S/N oranlarının hesaplanmasında ise karakteristik özelliğe göre “nominal en iyidir”, “en büyük en iyidir” ve “en küçük en iyidir” gibi çeşitli yöntemler tercih edilmiştir.

Yanıt Yüzey Yöntemi (RSM), istatistiksel tabanlı optimizasyon teknikleri arasında öncü bir yere sahiptir. 1951 yılında Box ve Wilson tarafından geliştirilen bu yöntem, özellikle endüstriyel deneylerde karmaşık süreçlerin iyileştirilmesi, optimize edilmesi ve modellenmesinde hızlı ve sistematik sonuçlar alınmasını sağlamıştır (Baray ve Sarı, 2006, 38). RSM, optimum çıktıları ulaşmak amacıyla belirli bir deneysel düzen dahilinde, birden fazla değişken ile bir veya daha fazla yanıt değişkeni arasındaki etkileşimleri inceleyerek en iyi çözümü bulmaya çalışır. Başka bir ifadeyle, Yanıt Yüzey Yöntemi; matematiksel ve istatistiksel araçlarla elde edilen verileri ve polinom denklemleri kullanarak analiz yapmaya olanak sunar. Modelleme aşamasında ise, yanıt ve giriş değişkenleri arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde temsil eden fonksiyonun seçilmesi gereklidir.

Değişken düzeyi üç olursa, deneme düzenleri değişir ve karesel yapıda olur. Karesel ilişkiler ve ikinci derece terimler içeren bu modellere, ikinci dereceden modeller denir (Tekindal, 2009,

Literatürde, hava araçlarında stall açısının ideal ortalama değerinin genellikle 5 derece civarında olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, çalışmada gerçekleştirilen 9 farklı kanat tasarımı da bu kriter dikkate alınarak oluşturulmuştur. 37 m/s seyir hızındaki insansız hava aracı kanadının analizleri ise ANSYS Workbench yazılımının Fluent modülünde, k-epsilon türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, ilgili geometriler üzerinde F_x ve F_z kuvvetleri hesaplanmıştır. Hazırlanan dokuz farklı tasarıma ait analiz sonuçları, daha sonra istatistiksel değerlendirme amacıyla Minitab 16 programına aktarılmıştır. Tüm parametrelerin sistem çıktısı üzerindeki etkisi ve hangi oranda değişim sağladığı bu istatistiksel yöntemler aracılığıyla ortaya konmuştur.

Solution Initialization

Initialization Methods

☐ Hybrid Initialization
☒ Standard Initialization

Compute from
 Cell Zone

Reference Frame

☒ Relative to Cell Zone
☐ Absolute

Initial Values

Gauge Pressure (pascal)
 0

X Velocity (m/s)
 -3.100686e-32

Y Velocity (m/s)
 37

Z Velocity (m/s)
 -2.003415e-27

Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)
 5.13375

Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)
 16238.3

Initialize Reset Patch...
 Reset DPM Sources Reset Statistics

Şekil 5.3. ANSYS Fluent'te Çözüm Başlatma Ekranı

Bu şekil, bir akış analiz yazılımı olan ANSYS Fluent'te çözüm başlatma ekranını göstermektedir. İlk olarak, Başlatma Yöntemleri (Initialization Methods) başlığı altında, kullanıcıya iki farklı seçenek sunulmaktadır: Hibrit Başlatma (Hybrid Initialization) ve Standart Başlatma (Standard Initialization). Hibrit başlatma yöntemi, karmaşık akış alanlarında daha hızlı ve dengeli bir başlangıç sağlar; standart başlatma ise daha geleneksel bir başlangıç yöntemidir. Başlangıç Değerlerinin Hesaplanacağı Konum (Compute from) bölümünde, başlatma değerlerinin hangi bölgeden alınacağı belirlenir. Bu seçenek, analiz edilen modelin farklı bölümleri için başlangıç koşullarını tanımlamaya imkân verir. Referans Sistemi (Reference Frame) kısmında ise, analizde kullanılacak referans noktasının belirlenmesi sağlanır. Burada iki seçenek yer alır: Hücre Bölgesine Göre (Relative to Cell Zone) ve Mutlak (Absolute). Bu, hızların ve diğer parametrelerin hangi referans sistemine göre tanımlanacağını gösterir. Başlangıç Değerleri (Initial Values) alanında, analizde kullanılacak temel fiziksel büyüklüklerin ilk değerleri girilir.

- Gösterge Basıncı (Pa) (Gauge Pressure (pascal)): Akışkanın başlangıç basıncıdır.
- X Yönündeki Hız (m/s) (X Velocity (m/s)): Akışkanın X eksenindeki ilk hız

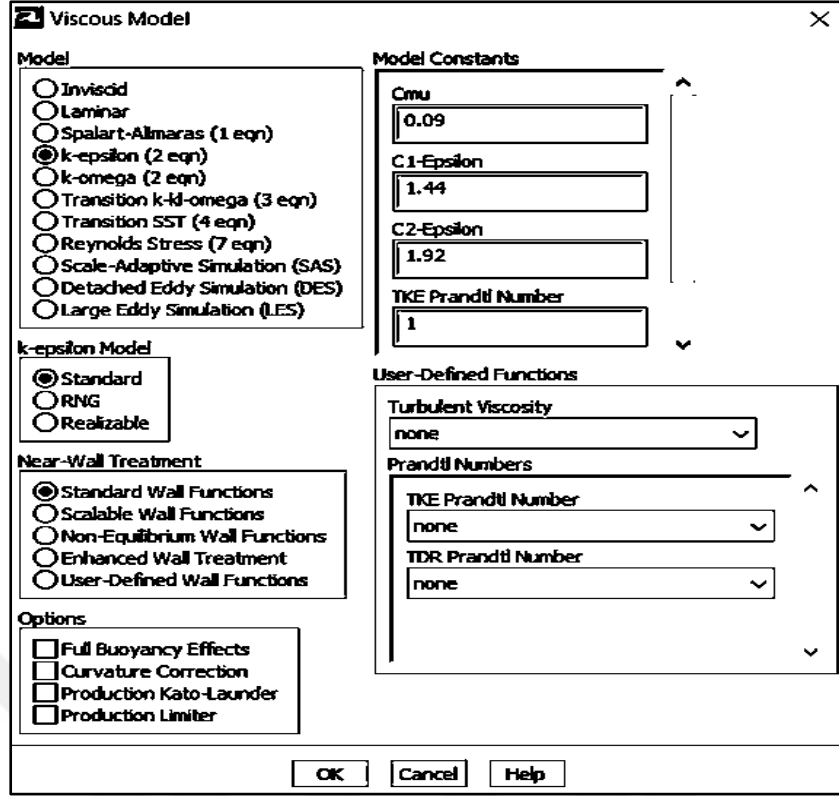
bileşeni.

- Y Yönündeki Hız (m/s) (Y Velocity (m/s)): Akışkanın Y eksenindeki ilk hız bileşeni.
- Z Yönündeki Hız (m/s) (Z Velocity (m/s)): Akışkanın Z eksenindeki ilk hız bileşeni.
- Türbülans Kinetik Enerjisi (m^2/s^2) (Turbulent Kinetic Energy (m^2/s^2)): Akıştaki türbülansın enerjisiyle ilgili başlangıç değeri.
- Türbülans Dağılım Oranı (m^2/s^3) (Turbulent Dissipation Rate (m^2/s^3)): Türbülans enerjisinin hangi hızda dağıldığını gösterir.

En altta ise, Başlat (Initialize), Sıfırla (Reset) ve Yama (Patch) gibi butonlar yer almakta olup, başlatma işlemini başlatmak veya ayarları sıfırlamak için kullanılır.

Analiz sürecinde yapılan kabuller aşağıda verilmiştir.

- Akış kararlı (steady-state) kabul edilmiştir.
- Akışkan hava olup, sıkıştırılamaz (incompressible) olarak modellenmiştir.
- Türbülans modeli olarak Realizable $k-\epsilon$ modeli kullanılmıştır.
- Duvar yüzeyleri “no-slip” sınır koşulu ile tanımlanmıştır.
- Giriş (velocity inlet) ve çıkış (pressure outlet) sınır koşulları sabit hız ve basınç değerlerinde alınmıştır.
- Yerçekimi ve radyasyon etkileri ihmal edilmiştir.



Şekil 5.4. ANSYS Fluent Çözüm Ekranları

5.2. İHA Üretimi

İHA'nın üretim sürecinde, tasarımdan imalata kadar her aşamada modern mühendislik yaklaşımları ve yüksek kalite standartları esas alınmıştır. Prototip geliştirme aşamasında kullanılan malzeme ve üretim yöntemleri titizlikle seçilmiş, dayanıklılık ve hafiflik ön planda tutulmuştur. Kanat ve gövde yapısında karbon fiber takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemeler tercih edilerek hem yapısal bütünlük hem de aerodinamik performans optimize edilmiştir.

Bu aşamada bazı kabuller yapılmıştır:

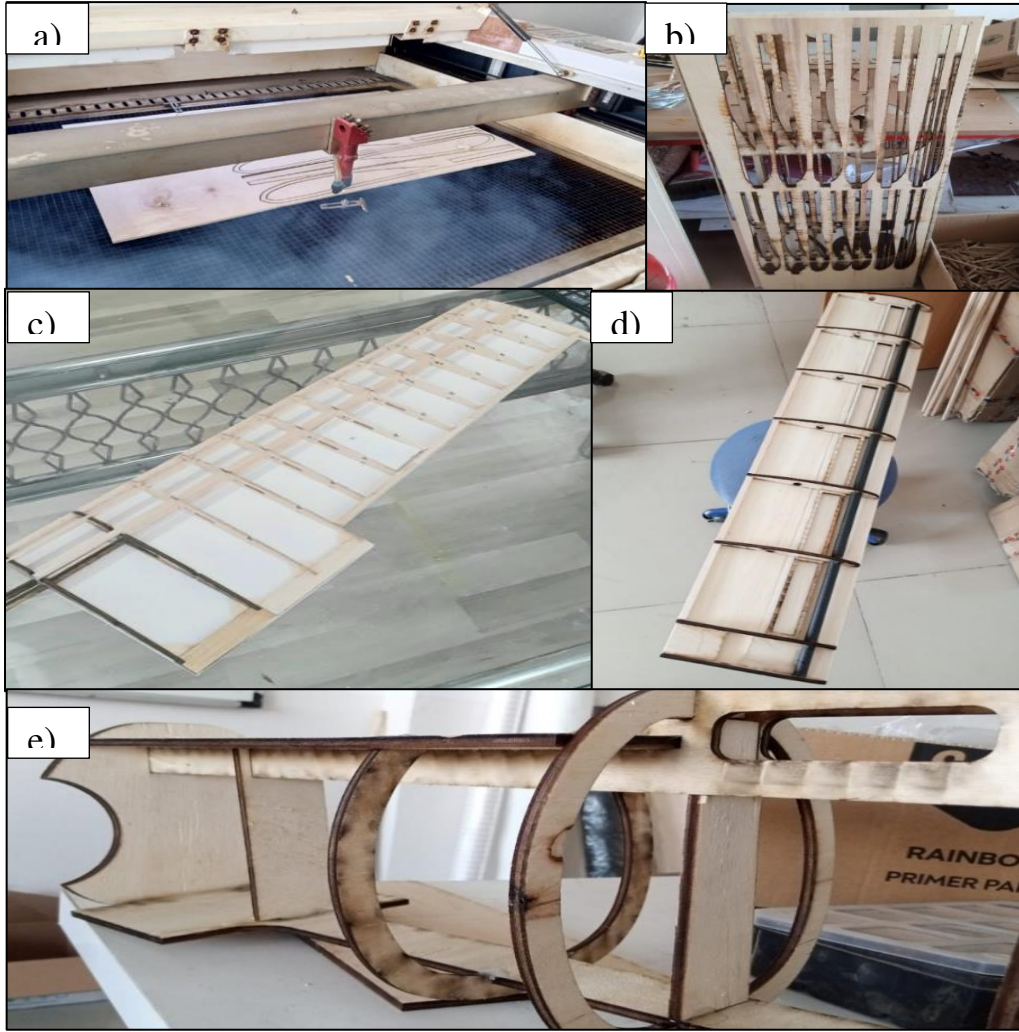
- Üretim ortamındaki çevresel koşullar (nem ve sıcaklık) sabit kabul edilmiştir.
- Montaj işlemleri sırasında sistem rijitliği tam (deformasyonsuz) kabul edilmiştir.
- Elektronik testlerde dış ortam koşulları laboratuvar ortamı referans alınmıştır.

Hassas ölçüm ekipmanları ve ileri üretim teknikleri kullanılarak tüm parçaların uyumu ve sistem bütünlüğü güvence altına alınmıştır. Elektronik bileşenler, uçuş kontrol ünitesi ve itki sistemi montajı, uzman ekipler tarafından dikkatle gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrasında, İHA üzerinde detaylı fonksiyon testleri ve kalite kontrolleri uygulanmıştır. Böylece, İHA'nın

operasyonel gereksinimleri karşılayacak şekilde güvenilir ve etkin bir platform olarak kullanıma hazır hale getirilmesi sağlanmıştır.

5.3. Kalıp üretimi

İHA'nın üretim aşaması, platformun tüm yapısal bileşenlerinin kompozit malzemeden imal edilmesini sağlamak amacıyla kalıp üretimiyle başlamıştır. Bu süreçte kalıp üretiminde Ç1040 kalite çelik malzemeler tercih edilmiştir. Özellikle karmaşık forma sahip parçaların hassas şekilde üretilmesi için CNC işleme teknolojilerinden yararlanılmış ve bu alanda Konaklı Rekor firmasıyla iş birliği yapılmıştır. Toplamda yaklaşık 300 kilogram ağırlığında çelik kalıplar üretilmiş, bu kalıplar, yüzey kalitesini yükseltmek adına zımparalama ve parlatma işlemlerinden geçirilmiştir. Söz konusu teknik işlemler, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren AHİ HVS firması tarafından desteklenmiştir. Ayrıca projede kullanılan CNC Router tezgâhı, AHİ Havacılık Kuruluşu tarafından sağlanarak üretim süreçlerine katkı sunmuştur.



Şekil 5.5. Kanat ve Gövde İskelet Yapısının Lazer Kesim ve Montaj Aşamaları: a) Lazer Kesim İşlemi, b) Kesilen Parçaların Levha Üzerindeki Görünümü, c) Nervür ve Kılavuz Profillerle Oluşturulan Kanat İç Yapısı, d) Montajı Tamamlanmış Kanat İskeleti, e) Gövde İskeletine Ait Lazer Kesimli İç Yapı Elemanlarının Birleştirilmiş Hâli.

5.3.1. İskelet Tabanlı Kompozit Kalıp Altyapısının Üretimi

Kompozit malzeme kullanılarak üretilen İHA kanatlarının üretim sürecinde, hem aerodinamik profilin doğru şekilde şekillendirilmesini hem de üretim sırasında yapının stabilitesini sağlayacak bir taşıyıcı iskelet yapısı gerekmektedir. Bu yapının oluşturulmasında CNC lazer kesim tezgahı kullanılmıştır. Kullanılan bu lazer yöntemi ile üretilen hassas iç yapı elemanlarından oluşturulmuştur. Üretim süreci aşağıda detaylandırıldığı şekilde ilerlemiştir:

5.4. Lazer Kesim ile Parça Üretimi

İlk aşamada, kanat ve gövde iskeletine ait parçalar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımlarında hazırlanmış olan 2B çizimleri temel alınarak, kontrplak levhalar üzerine lazer

kesim yöntemi ile (Şekil 5.5.a) kesilmiştir. Bu yöntemin tercih edilme nedeni; yüksek hassasiyet, seri üretime uygunluk ve kesim sonrası minimum işleme ihtiyacıdır. Kesim işlemi sırasında nervürler, kılavuz profiller ve ara bağlantı elemanları, önceden belirlenmiş standart ölçülerde elde edilmiştir.

5.4.1. Kesilen Parçaların Ayrıştırılması ve Hazırlığı

Kesim işleminin tamamlandıktan sonra, levha üzerinde bulunan tüm parçalar dikkatlice çıkarılmış ve kenar çapakları temizlenmiştir (Şekil 5.5.b). Bu işlem, ilerleyen montaj aşamalarında birleşim hatalarını önlemek açısından önem arz etmektedir. Her bir parçanın numaralandırılması ve pozisyonlandırılması, montaj sürecinin hızlı ve hatasız ilerlemesini sağlamıştır.

5.4.2. Kanat İskeletinin Kademeli Montajı

Hazırlanan nervürler, kılavuz profiller üzerine sırayla geçirilerek kanat formunun iç yapısı oluşturulmuştur (Şekil 5.5.c). Bu işlem sırasında hem yapısal simetri hem de aerodinamik profil doğruluğu sık sık kontrol edilmiştir. Nervürler arası mesafeler, daha önce aerodinamik analiz sonuçlarına göre belirlenmiş ve profile uygun şekilde uygulanmıştır. Montaj aşamasında ahşap esaslı yapıştırıcılar kullanılarak gerekli noktalarda mekanik sabitleme uygulanmıştır.

5.4.3. Tamamlanmış Kanat İskeleti

Tüm nervürlerin eksiksiz ve doğru konumlandırılmasıyla birlikte kanat iskeleti tamamlanmıştır (Şekil 5.5.d). Elde edilen yapı, hem yüzey laminasyon işlemleri için sağlam bir altlık oluşturmakta hem de üretim sırasında formun bozulmadan korunmasını sağlamaktadır. Kanat profilinin geometrik doğruluğu, CNC lazerle kesildiği için üretilen parçalar da yüksek hassasiyetle elde edilmiştir.

5.4.4. Gövde İskeletinin Oluşturulması

Benzer bir yöntemle, İHA'nın gövde yapısına ait iç destek elemanları da lazer kesim yöntemiyle üretilmiştir (Şekil 5.5.e). Gövde elemanlarının kesim ve montaj işlemleri de aynı hassasiyetle gerçekleştirilmiş olup, motor yatağı, kontrol sistemi yerleşimi ve elektronik donanımın monte edileceği alanlara yönelik yapısal boşluklar tasarım aşamasında dikkate alınmıştır. Gövde iskeleti, hem yapısal bütünlük hem de hafiflik ilkesi gözetilerek oluşturulmuştur.

Montajı tamamlanan bu iskelet yapılar, kompozit üretim sürecinin bir sonraki aşaması

olan laminasyon işlemi için kalıp görevi görmektedir. Üzerine yerleştirilecek cam elyaf kumaşların formunu koruması ve reçine emdirme sırasında deformasyona uğramaması açısından bu iskeletler son derece kritik bir rol oynamaktadır.

İskelet yapının yüzeyine, önce bir ayırıcı film uygulanmakta, ardından katmanlı olarak cam elyaf takviyeleri sıralanmaktadır. Elyaf, kanadın yük taşıma bölgelerine göre yönlendirilmekte ve gerektiğinde çift yönlü yerleştirilmektedir. Katman yerleşimi tamamlandıktan sonra, sistem vakum işlemine hazır hâle getirilir. Bu noktada üretim süreci, kompozit malzemenin elde edilmesi aşaması olan 5.3. Vakum Yöntemi ile Kompozit Üretimi başlığı altında detaylandırılmaktadır.

5.5. Kalıp Yüzeylerinin CNC Router ile Üretimi

Elde edilen aerodinamik analiz sonuçlarına göre belirlenen optimum kanat profilleri doğrultusunda, kompozit üretim sürecinde kullanılacak kalıpların geometrik doğruluğunu ve yüzey bütünlüğünü sağlamak amacıyla CNC router teknolojisinden yararlanılmıştır. CAD ortamında oluşturulan 3B yüzey modelleri, CAM yazılımları aracılığıyla takım yolu verisine dönüştürülmüş ve yüksek hassasiyetli CNC router tezgâhında işlenmiştir. Bu işlem sonucunda, kanat ve gövde kalıpları, kompozit serim işlemleri için gereken hassas geometriye sahip olacak şekilde üretilmiştir. CNC yöntemi, istenilen yüzey pürüzlülüğünü elde edilmesi bakımından tercih edilmiştir. Elde edilen bu kalıplar, vakum işleminin gerçekleştirileceği altlık olarak kullanılmış ve üretilecek kompozit parçaların formunun korunmasında kritik rol oynamıştır.

5.6. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Üretimi

İskelet yapıların hazırlanmasını takiben, kanat ve gövde yüzeylerinin kompozit malzeme ile kaplanması işlemi, vakum infüzyon (vacuum-assisted resin infusion) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, yüksek mekanik dayanım, düşük reçine tüketimi ve homojen lif-dolgu dağılımı gibi avantajlar sunması nedeniyle tercih edilmiştir. Vakum infüzyon, özellikle havacılık ve otomotiv gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir kompozit üretim tekniğidir.

5.6.1. Hazırlık Aşaması

İskelet yapıların dış yüzeylerine öncelikle ayırıcı film (release film) uygulanmış, bu film ile reçinenin kalıba yapışması engellenmiştir. Ardından, cam elyaf takviye kumaşları (örneğin 200–400 g/m² düz örgü) yüzeye katmanlı olarak yerleştirilmiştir. Katmanlar, yapısal ihtiyaçlara

göre tek yönlü veya çift yönlü olarak serilmiştir. Elyafların yönü, yük taşıma eksenleriyle uyumlu olacak şekilde düzenlenmiştir.

5.6.2. Vakum Sistemi Kurulumu

Elyaf yerleşimi tamamlandıktan sonra, yüzeyin üzerine peel ply, ayırıcı örgü (mesh) ve vakum torbası (vacuum bag) sırasıyla yerleştirilmiştir. Kenarlar sızdırmazlık bandı ile kapatılmış ve vakum hattı ile reçine giriş çıkış hatları sisteme bağlanmıştır. Vakum pompası aracılığıyla sistem içerisindeki hava tamamen tahliye edilerek negatif basınç sağlanmıştır. Bu işlem, sistemin sızdırmazlığını test etmek ve reçinenin lifler arasında hava kabarcığı bırakmadan yayılmasını sağlamak amacıyla yapılmıştır.

5.6.3. Reçine Hazırlığı ve İnfüzyon

Bu süreçte, epoksi esaslı reçine ile uygun oranlarda sertleştirici (hardener) karıştırılarak homojen hâle getirilmiştir. Hazırlanan reçine, reçine giriş hattı üzerinden sisteme verildiğinde, vakum etkisi ile tüm elyaf katmanlarının arasına nüfuz etmiştir. Reçine, lifler boyunca düzgün ve kontrollü bir şekilde yayılmış; sistem içinde boşluk bırakmadan lif-doğrultulu bir şekilde ilerlemiştir.

5.6.4. Kürleşme Süreci

Reçine infüzyonu tamamlandıktan sonra sistem, oda sıcaklığında 24 saat süreyle kürleşmeye bırakılmıştır. Bu süre sonunda sertleşen reçine, cam elyaf takviyeleri ile birlikte yüksek dayanımlı kompozit bir yapı oluşturmuştur. İsteğe bağlı olarak, ikinci bir post-cure (ilave pişirme) işlemi uygulanarak mekanik özellikler daha da iyileştirilebilmektedir.



Şekil 5.6. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Kanat Üretim Süreci

Şekil 5.6.'da, üretim süreci sırasında gerçekleştirilen katman yerleşimi ve infüzyon işlemlerine ilişkin uygulama aşamaları görülmektedir. Bu çalışmada, elde edilen optimum kanat geometrisinin fiziksel olarak üretilebilmesi amacıyla cam elyaf takviyeli polimer matrisli

kompozit malzeme tercih edilmiştir. Üretim sürecinde vakum infüzyon yöntemi kullanılmış olup, bu yöntem hem homojen reçine dağılımı hem de yüksek mekanik dayanım elde edilmesi açısından avantaj sağlamaktadır.

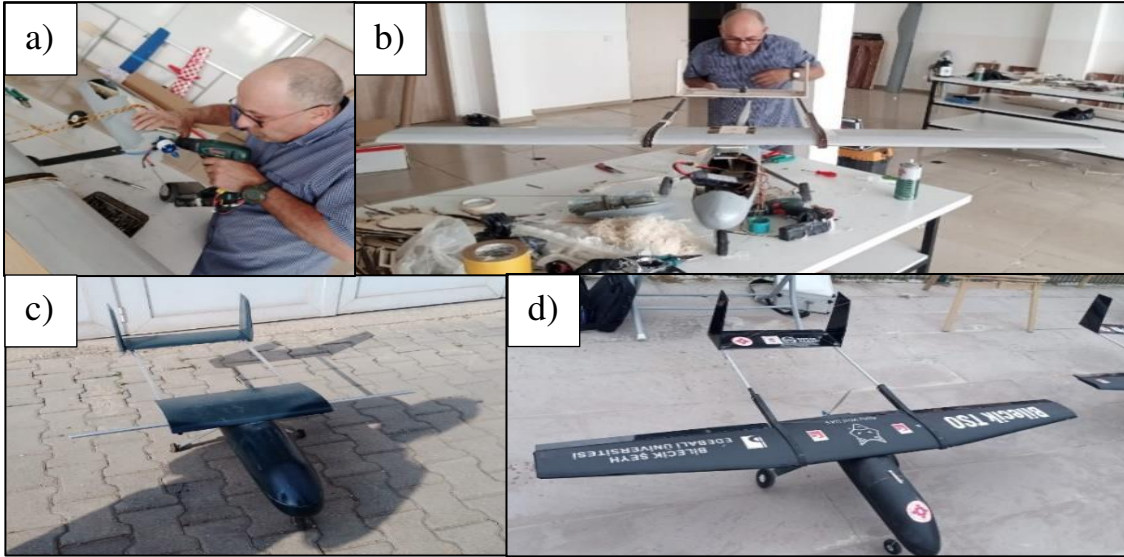
Kompozit üretim sürecinin uygulamalı olarak gerçekleştirildiği bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer matrisli yapının hazırlanması ve kürleme işlemi, vakum infüzyon yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yer alan görselde, üretimin iki temel aşaması uygulamalı eğitim ortamında gözlemlenmiştir.

Sol tarafta (a) yer alan görselde, cam elyafların iskelet yapı üzerine yerleştirilerek kompozit laminasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Elyaf yönlendirmesi, mekanik yük taşıma doğrultularına göre belirlenmiş; katmanlar arasında boşluk kalmamasına ve düzgün yayılmasına dikkat edilmiştir. Reçine infüzyonu öncesi bu hazırlık süreci, yapının nihai kalitesini doğrudan etkilemektedir.

Sağ taraftaki (b) görselde ise, infüzyon ve kürleşme süreci tamamlandıktan sonra kalıptan çıkarılan sertleşmiş kompozit yapı gözlemlenmektedir. Kürleme sonrası elde edilen ürünün yüzey kalitesi, şekil bütünlüğü ve mekanik sağlamlığı yerinde değerlendirilmiştir. Bu aşama, üretim sürecinin kalite kontrol ve prototip onay basamağını oluşturmaktadır.

5.7. Mekanik Montaj ve Sistem Entegrasyonu

Kompozit parçaların üretiminin ardından, insansız hava aracının gövde, kanat, kuyruk ve iniş takımlarının birleştirilmesine yönelik mekanik montaj ve sistem entegrasyonu işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşama, hava aracının uçuşa elverişli hâle gelmesini sağlayan kritik adımları kapsamaktadır. Uygulamada hem mekanik bağlantılar hem de elektriksel sistemler senkronize biçimde entegre edilmiştir.



Şekil 5.7. İHA'nın Mekanik Montaj ve Sistem Entegrasyonu Süreci: a) Kanat-Gövde Bağlantılarının Mekanik Sabitlenmesi, b) Gövde ve Motor Sistem Entegrasyonu, c) Kuyruk Montajı Sonrası Dış Saha Değerlendirmesi, d) Nihai Boyama ve Uçuşa Hazır Hâle Getirilmiş Sistem Görünümü.

a) Kompozit gövde üzerine kanat bağlantı noktaları mekanik bağlantı elemanları (civata, vida, bağlantı pimi vb.) ile sabitlenmektedir. Uçuş sırasında kanat yüklerinin güvenli aktarımı için bu noktalar dikkatle hizalanmış ve mukavemet testlerinden geçirilmiştir.

b) Tüm gövde bileşenleri, motor, itki pervanesi, iniş takımı ve kontrol yüzeyleri gibi alt sistemler ile birlikte bütünleştirilmiştir. Elektronik hız kontrol birimleri (ESC), servo motorlar ve güç aktarma sistemleri gövde içerisine yerleştirilmiş ve test edilmiştir.

c) İlk entegrasyonun ardından yapılan dış saha testlerinde, gövde ve kuyruk yapısı boyanmış ve montaj sonrası simetrik denge kontrolü yapılmıştır. Uçuş öncesi ön testlere hazırlık bu aşamada gerçekleştirilmiştir.

d) Son aşamada, tüm yüzeyler boyanmış, logolar ve yönlendirme işaretlemeleri uygulanmış, taşıma sistemleri (iniş takımı, kuyruk destekleri) tamamlanmıştır. Hava aracı uçuş testlerine hazır duruma getirilmiştir.

Bu bütünleşik süreç sonucunda, aerodinamik açıdan optimize edilmiş, mekanik olarak dayanıklı ve elektronik olarak entegre bir İHA platformu elde edilmiştir.

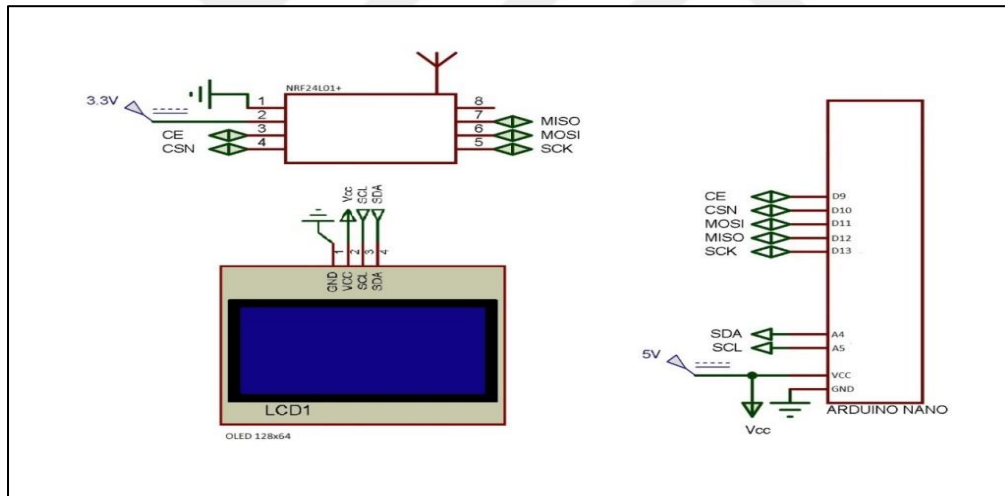
5.8. Elektronik Hız Ölçüm Sisteminin Geliştirilmesi

Uçuş testleri sırasında insansız hava aracının hız performansını doğru ve anlık olarak ölçebilmek amacıyla özel olarak tasarlanmış kablosuz bir elektronik hız ölçüm sistemi

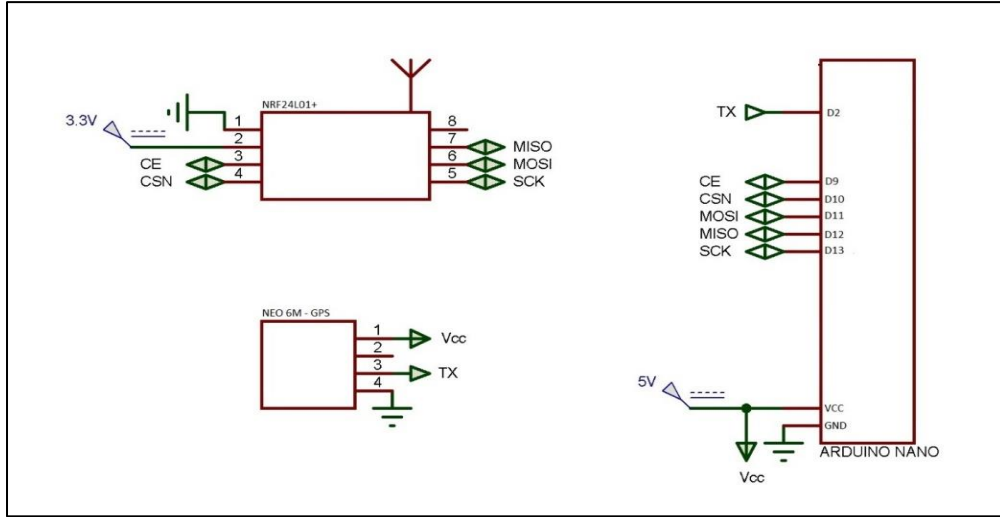
geliştirilmiştir. Bu sistem iki temel bileşenden oluşmaktadır: verici (transmitter) birimi ve alıcı (receiver) birimi. Hız verilerinin gerçek zamanlı olarak kaydedilmesi ve izlenmesi, uçuş sırasında aracın aerodinamik tepkilerinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Verici biriminde, GPS Neo 6M modülü kullanılarak hız verileri toplanmakta, bu veriler Arduino Nano mikrodenetleyicisi aracılığıyla işlenerek NRF24L01 kablosuz iletişim modülü üzerinden alıcı birime iletilmektedir. Alıcı birim ise, yine bir Arduino Nano platformu üzerine inşa edilmiş olup, iletilen verileri işleyerek OLED ekran üzerinden kullanıcıya anlık olarak göstermektedir. Her iki birim, güvenli ve kararlı veri iletimi sağlamak amacıyla özel adres ve kanal yapılandırmaları ile programlanmıştır.

Bu özgün sistem, kompakt yapısı ve taşınabilirliği sayesinde prototip uçuş testlerinde etkin biçimde kullanılmış; uçuş süresince elde edilen hız verileri tasarım doğrulama süreçlerinde referans olarak değerlendirilmiştir. 10 m/s rüzgâr hızına sahip saha koşullarında gerçekleştirilen testler sonucunda, optimize edilmiş İHA geometrisiyle maksimum 183 km/s uçuş hızı elde edilmiştir. Sistem şemaları aşağıda verilmiştir (Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.).



Şekil 5.8. Alıcı Devre Şeması.



Şekil 5.9. Verici Devre Şeması

5.9. Yapısal Testler ve Uçuşa Hazırlık

Kompozit malzeme ile İHA kanat ve gövde yapılarının uçuşa elverişli olup olmadığını belirlemek amacıyla bir dizi yapısal ve işlevsel test gerçekleştirilmiştir. Bu testler, hem statik yük altında mukavemetin değerlendirilmesi hem de sistemin tüm alt bileşenleriyle birlikte uçuş öncesi hazır hâle getirilmesini hedeflemektedir.

5.9.1. Statik Yük Testi

Kanat ve gövde yapılarına belirli büyüklükteki yükler uygulanarak, malzemenin elastik sınırlar içerisinde kalıp kalmadığı değerlendirilmiştir. Statik yük testleri, uçuş sırasında maruz kalınacak maksimum kaldırma kuvvetine karşılık gelecek şekilde planlanmıştır. Bu kapsamda kanat üzerine uçuşta meydana gelecek aerodinamik kuvvetlerin simülasyonu amacıyla uç kısımlara eşdeğer ağırlıklar uygulanmış ve deformasyonlar ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler sonucunda, yapının rijitliğini koruduğu ve elastik deformasyon sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür. Bu durum, tasarım doğruluğunu ve kompozit üretim yönteminin yeterliliğini ortaya koymaktadır.

5.9.2. Ağırlık Merkezi (CG) Tespiti

Uçuş stabilitesinin sağlanabilmesi için ağırlık merkezinin (center of gravity- CG), kanat hücum kenarına olan uzaklığı belirlenmiştir. Üretilen hava aracının toplam kütlesi ve bileşenlerin dağılımı esas alınarak yapılan bu hesaplamada, CG'nin yatay eksenindeki konumu hem teorik olarak hem de saha ölçümleri ile doğrulanmıştır. Gerekirse, pil yerleşimi gibi ayarlanabilir bileşenlerle ağırlık merkezi hassas şekilde optimize edilmiştir.

5.9.3. Elektronik Sistem Testleri

Servo motorlar, hız kontrol birimi (ESC), radyo alıcı-verici ve uçuş kontrol kartı gibi elektronik bileşenler, yerinde test edilerek sistem entegrasyonu gözden geçirilmiştir. Her bir kontrol yüzeyi (elevon, rudder vb.), kumanda sisteminden gelen sinyallere karşılık doğru yönde ve açıda tepki verip vermediği kontrol edilmiştir. Ayrıca, güç aktarım sisteminde ani voltaj düşümü veya tepki gecikmesi olup olmadığı değerlendirilmiştir.

5.9.4. Hareketli Parça Testleri

İniş takımı, kontrol yüzeyleri ve bağlantı elemanları gibi hareketli parçaların tümü, zemin testlerine tabi tutulmuştur. Açılma-kapanma mekanizmaları, kilitleme sistemleri ve kanat bağlantı noktalarının tekrar edilebilir şekilde sabitlenebilirliği doğrulanmıştır. Bu kontroller, özellikle montaj sonrası uçuş öncesi güvenlik açısından kritik önem taşımaktadır.

5.9.5. Uçuş Öncesi Son Kontroller

Uçuşa hazırlık aşamasında, tüm sistem entegre hâlde tekrar değerlendirilmiş, bağlantı noktaları sıkılmış, GPS ve veri kaydedici sistemler (varsa) aktif hâle getirilmiş ve hava aracı uçuş simülasyonuna hazır duruma getirilmiştir. Nihai kontrol listesi aşağıda özetlenmiştir:

- Kanat ve gövde bağlantı kontrolü
- Elektrik bağlantılarının testi
- Kumanda-alıcı iletişimi
- Ağırlık merkezi ölçümü
- Servo yön kontrolü
- Pil voltaj seviyesi
- Statik denge doğrulaması

Bu aşamaların başarıyla tamamlanmasının ardından, sistem uçuş testlerine hazır olarak değerlendirilmiştir.

5.10. Uçuş Testleri ve Gözlemler

Yapısal testler ve uçuşa hazırlık süreci başarıyla tamamlandıktan sonra, üretilen İHA prototipi, açık arazi koşullarında uçuş testlerine tabi tutulmuştur. Bu testlerin amacı, hem aerodinamik performansın hem de kontrol yüzeylerinin etkinliğinin gözlemlenmesi ve tasarımın işlevsel başarımının doğrulanmasıdır. Uçuş testleri kontrollü şartlar altında ve aşamalı

şekilde gerçekleştirilmiştir.

5.10.1. Kalkış ve Tırmanış Performansı

İlk test aşamasında, İHA'nın piste yönelimi, itki sistemi tepkisi ve kalkış esnasında denge durumu gözlemlenmiştir. Kalkış sırasında hava aracının burun kaldırma açısı, motor gücüyle uyumlu bir şekilde artış göstermiş ve burun-kuyruk salınımı minimum düzeyde kalmıştır. Tırmanış eğiminde, tasarlanan kanat profilinin yeterli kaldırma kuvveti ürettiği ve gövde ağırlığını dengeli biçimde taşıdığı tespit edilmiştir.

5.10.2. Düz uçuş ve Stabilite

Uçuşun seyir aşamasında, İHA sabit hızda ve düz hatta ilerleyebilmiş; dış etkenlere (rüzgâr, küçük türbülanslar) karşı yön kararlılığını korumuştur. Özellikle ağırlık merkezi (CG) ayarının doğru yapılması sayesinde uçuş esnasında ani burun düşmesi veya kalkış eğilimleri gözlemlenmemiştir. Bu, tasarlanan geometri ile uçuş karakteristiği arasında güçlü bir uyum olduğunu göstermektedir.

5.10.3. Manevra Kabiliyeti

Kontrol yüzeyleri aracılığıyla yapılan yönlendirme denemelerinde, İHA'nın yatış (roll), sapma (yaw) ve yükselme-alçalma (pitch) manevralarına dengeli ve hızlı tepki verdiği görülmüştür. Manevralar sırasında kanat yapısında gözle görülür bir titreşim veya yapısal deformasyon oluşmamıştır. Bu hem kompozit üretimin kalitesini hem de aerodinamik tasarımın etkinliğini destekleyen bir bulgudur.

5.10.4. İniş Performansı

İniş sırasında, itki kesilerek hava aracının süzülme oranı gözlemlenmiş ve hedeflenen bölgeye yakın bir noktaya başarılı iniş gerçekleştirilmiştir. İniş esnasında herhangi bir hasar oluşmamış; iniş takımı darbeyi güvenle sönümlenmiştir. Bu durum, yapısal mukavemetin sahada doğrulandığını ortaya koymaktadır.

5.10.5. Genel Gözlemler ve Değerlendirme

Uçuş testleri sonucunda aşağıdaki başarımlar tespit edilmiştir:

- İHA, tasarlandığı şekilde dengeli bir uçuş karakteristiği sergilemiştir.
- Kanat geometrisi, düşük hızlarda dahi yeterli kaldırma kuvveti sağlamıştır.
- Kompozit yapı, uçuş yükleri altında deformasyon göstermemiştir.

- Kalkış ve inişler, manuel kontrol altında güvenli şekilde gerçekleştirilmiştir.

Bu gözlemler doğrultusunda, elde edilen tasarımın hem aerodinamik hem de yapısal açıdan optimize edildiği sonucuna varılmıştır.



6. BULGULAR

ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak kanat üzerindeki basınç dağılımı ve hava akışı modellenmiştir (Şekil 6.1). Dokuz farklı tasarıma ait akış analizlerinin sonuçları Tablo 6.1'de özetlenmiştir. En yüksek kaldırma kuvveti (F_z) 253 Newton ile Test 5'te elde edilirken, en düşük sürüklenme kuvveti 10.2 Newton ile Test 1'de kaydedilmiştir. Ayrıca, maksimum kaldırma katsayısı (C_L) Test 3'te 0.66, en yüksek C_L/C_D oranı ise Test 5'te 17.6 olarak hesaplanmıştır.

A parametresi, yan kanat açısını ifade etmekte olup C_L ve C_D değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Grafiksel analizler, kaldırma etkisinin A parametresinin 1. ve 2. seviyelerinde daha yüksek olduğunu göstermiştir. Buna ek olarak, C_L/C_D oranında da belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. En yüksek F_z etkisi 2. seviyede ($A=8^\circ$) gözlenmiş ve bu doğrultuda, hem ideal C_L/C_D oranı hem de maksimum hızda yüksek taşıma kapasitesi sağlamak amacıyla 8° 'lik yan kanat açısı tercih edilmiştir.

Tablo 6.1. FEM Analiz Sonuçları

Experiment No	F_x	F_z	Area	C_L	C_D	C_L/C_D
1	10.24	168.75	0.331	0.6105	0.0369	16.5
2	12.62	215.213	0.399	0.6459	0.0377	17.1
3	19.04	260.84	0.467	0.6688	0.0486	13.8
4	13.45	215.77	0.411	0.6287	0.0390	16.1
5	14.48	253.14	0.484	0.6263	0.0357	17.6
6	13.66	217.37	0.416	0.6257	0.0392	16.0
7	14.86	251.05	0.5	0.6013	0.0354	17.0
8	12.68	203.55	0.4235	0.5756	0.0357	16.1
9	12.68	203.55	0.4235	0.5756	0.0357	16.1

Tablo 6.1'de yer alan kısaltmaların açıklamaları şu şekildedir: F_x , yatay ekseninde etki eden kuvvet bileşenidir ve genellikle uçağın ileri doğru hareketine karşı oluşan direnç (sürüklenme) veya itki kuvveti olarak değerlendirilir.

F_z , dikey ekseninde etki eden kuvvet bileşeni olup, kaldırma kuvveti olarak tanımlanır ve uçağın havada kalmasını sağlayan temel aerodinamik kuvvettir. Area, analiz edilen kanat yüzeyinin alanını metrekare (m^2) cinsinden ifade eder. C_L , kaldırma katsayısıdır; kanadın oluşturduğu kaldırma kuvvetinin büyüklüğünü tanımlayan boyutsuz bir değerdir. C_D , sürüklenme katsayısı olup, hava akışı nedeniyle kanat üzerinde oluşan direnç kuvvetinin büyüklüğünü tanımlar. C_L/C_D oranı, kaldırma ve sürüklenme arasındaki ilişkiyi gösteren aerodinamik verimlilik göstergesidir. Bu oran ne kadar yüksekse, uçağın performansı da o

ölçüde iyidir. Tablo 6.1’de sunulan analiz sonuçlarına ait kısaltmaların açıklamaları aşağıda detaylandırılmıştır:

FX, hava aracının yatay eksen boyunca maruz kaldığı kuvvet bileşenini temsil etmektedir. Bu kuvvet, çoğunlukla hava akışına karşı oluşan sürüklenme direnci veya motor kaynaklı itki kuvveti olarak değerlendirilir. Uçağın ileri doğru hareketi sırasında, bu kuvvetin büyüklüğü ve yönü uçuş performansı açısından kritik önem taşımaktadır.

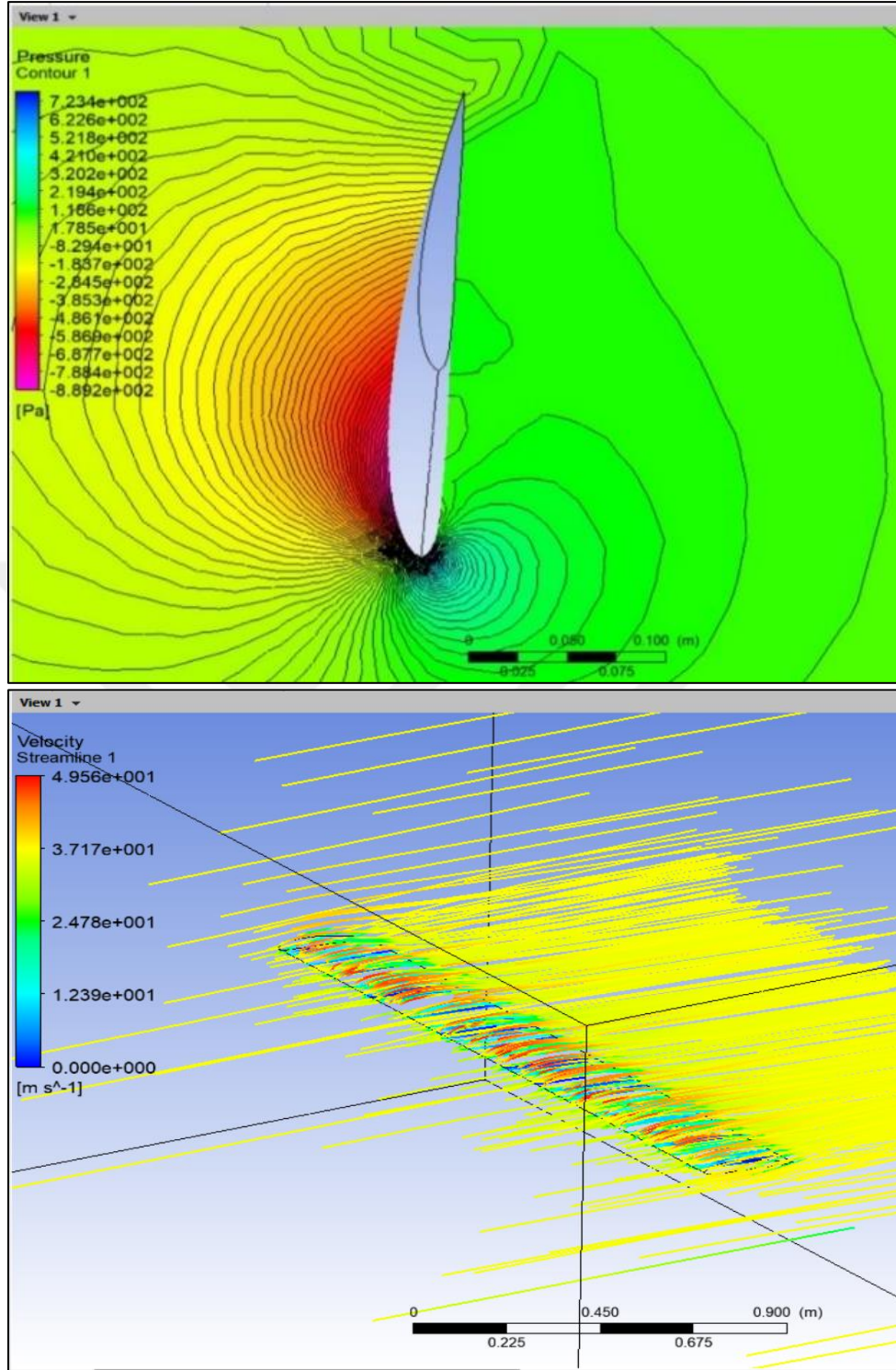
FZ ise dikey eksenindeki kuvvet bileşeni olup, kaldırma kuvveti olarak tanımlanır. Bu kuvvet, kanat üzerinde oluşan basınç farkından kaynaklanmakta ve hava aracının havada dengeli bir şekilde kalabilmesini sağlayan temel aerodinamik etkidir.

Area, analiz edilen kanat yüzeyinin toplam alanını belirtmekte olup, birimi metrekare (m^2) şeklindedir. Bu parametre, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin hesaplanmasında doğrudan rol oynamaktadır.

CL, yani kaldırma katsayısı, kanadın ürettiği kaldırma kuvvetinin büyüklüğünü temsil eden boyutsuz bir katsayıdır. Bu değer, kanat profilinin geometrisi, hücum açısı ve hava akımı koşulları gibi çeşitli parametrelerin bir fonksiyonu olarak hesaplanır.

CD, sürüklenme katsayısı olarak adlandırılır ve kanat yüzeyinde oluşan aerodinamik direncin büyüklüğünü ifade eder. Bu katsayı, uçuş esnasındaki enerji kayıplarının tahmin edilmesinde önemli bir göstergedir.

Son olarak, CL/CD oranı, hava aracının aerodinamik verimliliğini ortaya koyan temel göstergelerden biridir. Bu oran, birim sürüklemeye karşılık ne kadar kaldırma kuvveti üretilbildiğini yansıtır. Dolayısıyla, bu oranın yüksek olması, daha az enerji harcayarak daha fazla kaldırma kuvveti elde edilebildiğini ve böylece uçuş performansının optimize edildiğini göstermektedir.



Şekil 6.1. Akış Analizi Basınç Değişimi (Üstte) ve Hava Akış Modeli (Altta)

B parametresi, İHA'nın orta kanat uzunluğunu temsil etmekte olup, aynı zamanda kanadın gövdeyle bağlantısını sağlayan kritik bir yapısal elemandır. Bu bölümde açısız bir tasarım tercih edilmiştir; böylece gövde ile orta kanat arasında hem aerodinamik geçiş sağlanmış hem de yapısal bütünlük korunmuştur. Taguchi yöntemine dayalı analizlerde elde

edilen S/N (signal- to-noise) oranları incelendiğinde, B parametresinin 2. seviye değerinde seçilmesinin, sürüklenme kuvvetini (CD) azaltarak aerodinamik verimliliği artırdığı ve aynı zamanda CL/CD oranını ideal seviyeye taşıdığı tespit edilmiştir. Bu bulgu, orta kanat uzunluğunun, hem kaldırma performansı hem de direnç azaltımı açısından optimize edilmesi gereken önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur.

C parametresi, yan kanatların uzunluğunu ifade etmektedir. Bu parametrede yapılan analizlere göre, 3. seviye (uzun yan kanat) tercih edildiğinde kaldırma katsayısı (CL) ve buna bağlı olarak kaldırma kuvveti (Fz) artmakta, ancak 2. seviye (orta uzunluk) tercihinde daha düşük sürüklenme katsayısı (CD) ve daha yüksek CL/CD oranı elde edilmektedir. Bu durum, yan kanat uzunluğunun artırılmasının taşıma kapasitesini iyileştirmesine karşın, uçuş hızı üzerinde sınırlayıcı bir etki yaratabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, optimum performansın elde edilmesi amacıyla hem kaldırma hem de hız değerlerini dengeleyen bir ara seviye tercih edilmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak, 8° hücum açısına, 400 mm orta kanat uzunluğuna ve 700 mm yan kanat uzunluğuna sahip olan konfigürasyon, Taguchi yöntemine göre ideal tasarım olarak belirlenmiştir. Bu kombinasyon, S/N oranlarının optimize edildiği hem kaldırma hem de hız açısından dengeli bir çözüm sunmuştur. Ek olarak, Taguchi Predict özelliği kullanılarak gerçekleştirilen tahmin analizinde, bu tasarıma ilişkin öngörülerin yaklaşık %98 doğruluk payıyla gerçek verilerle örtüştüğü belirlenmiştir.

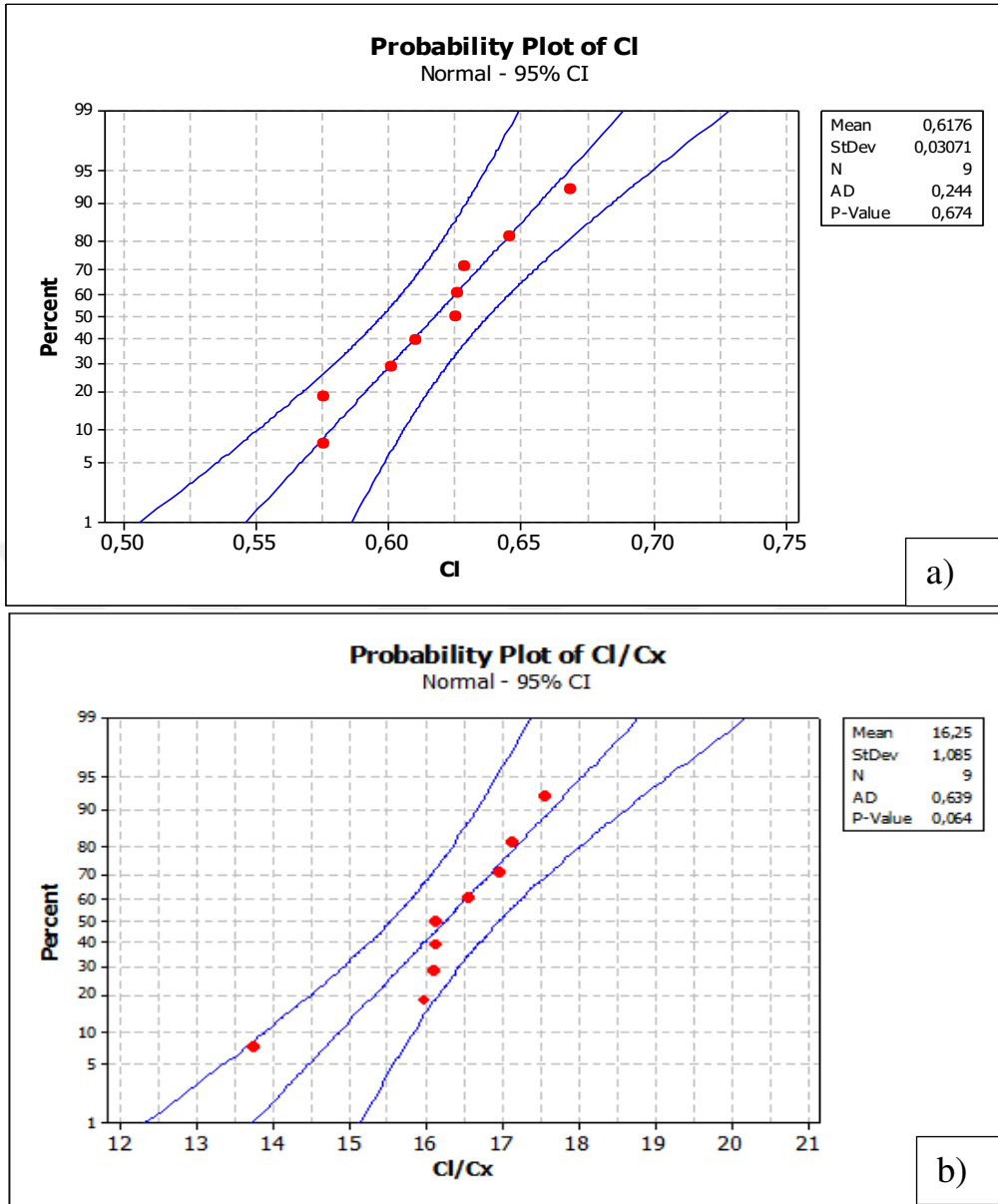
Bu bağlamda, yapılan hesaplamalar neticesinde söz konusu tasarımın 16.8 Newton sürüklenme kuvveti ve 208.3 Newton kaldırma kuvveti üretebileceği öngörülmüştür. Bu veriler, maksimum kaldırma kapasitesi ile yüksek hızın birlikte elde edilebildiğini göstermektedir. Ayrıca, elde edilen 0.64 CL değeri, kanat geometrisinin hem yapısal bütünlük hem de uçuş verimliliği açısından oldukça uygun olduğunu teyit etmektedir.

Tablo 6.2. Taguchi Tahmin ve Akış Sonuçları

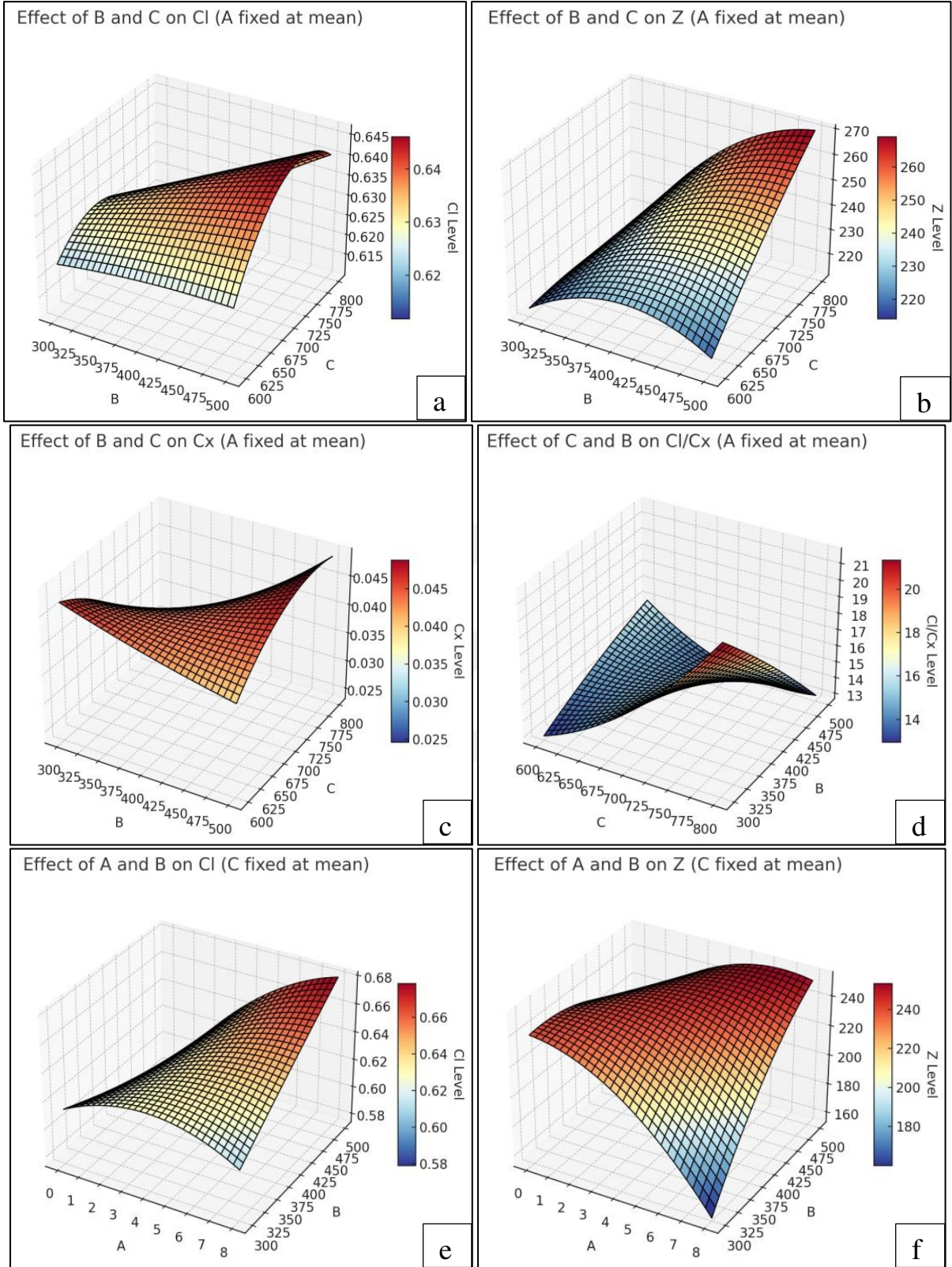
S/N Oranı	Ortalama	Analiz	Doğruluk%
46,3433	208,361	215,2	96,8
-3,89633	0,639	0,645	99,1
24,4273	16,88	17,1	98,7

RSM analizi Mintap programında yapılmıştır ve elde edilen sonuçların doğruluğu probabit plot özelliği kullanılarak teyit edilmiştir. Tüm sonuçlar istenilen güven aralığı arasında kalarak ideal tasarimsal özellikler belirlenebilmiştir. Şekil 6.3.'de probability plot grafikleri gösterilmiştir. Şekil 6.4.'da parametre seviyelerine bağlı olarak sonuç değişimlerini bizlere

gösteren surface plot sonuçları yer almaktadır.



Şekil 6.2. Olasılık Grafiği Sonuçları. a) CL Verileri için Normal Olasılık Grafiği (%95 Güven Aralığı). b) CL/CD Verileri için Normal Olasılık Grafiği (%95 Güven Aralığı).



Şekil 6.3. Yüzey Grafiği Sonuçları. a) B ve C'nin CL üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). b) B ve C'nin Z üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). c) B ve C'nin CD üzerindeki Etkisi (A Ortalamada Sabit). d) B ve C'nin Z üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit). e) A ve B'nin CL üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit). f) A ve B'nin Z üzerindeki Etkisi (C Ortalamada Sabit).

Bu çalışmada, giriş parametreleri olan A (yan kanat açısı), B (merkez kanat uzunluğu) ve C (yan kanat uzunluğu) ile çıkış parametreleri X, Z, yüzey alanı, kaldırma katsayısı (CL), sürüklenme katsayısı (CD) ve CL/CD oranı arasındaki ilişkiler, Yanıt Yüzeyi Metodolojisi (Response Surface Methodology- RSM) kullanılarak sistematik biçimde incelenmiştir. Elde edilen veri seti, tasarım girdilerinin sistem çıktıları üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak, önemli kontrol noktalarını tespit etmek ve genel süreç optimizasyonuna yön vermek amacıyla değerlendirilmiştir. Her bir giriş parametresinin farklı seviyelerdeki etkileri detaylı olarak analiz edilmiş ve maksimum ile minimum sınır değerleri açık biçimde ortaya konmuştur.

A parametresi olan yan kanat açısı, özellikle CL (kaldırma katsayısı) ve Z (kaldırma kuvveti) gibi çıktı parametreleri üzerinde önemli derecede etkili bir değişken olarak öne çıkmaktadır. A parametresi düşük seviyelerdeyken (örneğin $A = 0^\circ$), hem CL hem de Z değerlerinin minimum düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Ancak A değeri 8° seviyesine çıkarıldığında, her iki çıktıda da anlamlı artışlar kaydedilmiştir. Nitekim, $A=8^\circ$, $B=400$ mm ve $C=700$ mm konfigürasyonunda CL değeri 0.6459 olarak ölçülmüş, Z değeri ise 215.213 N ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum, A parametresinin özellikle kaldırma performansı açısından baskın bir kontrol faktörü olduğunu göstermektedir.

B parametresi (merkez kanat uzunluğu), Z çıktısı üzerinde yüksek etkili bir değişken olarak belirlenmiş; buna karşın CL/CD oranı üzerinde orta düzeyde bir etkisi olduğu saptanmıştır. B değeri artırıldıkça Z değerinde belirgin ve dik bir artış eğilimi gözlemlenmiştir. Örneğin, $B = 300$ mm iken $Z = 168.75$ N iken; $B = 500$ mm değerine ulaşıldığında $Z = 260.84$ N seviyesine çıkmıştır. Aynı parametre değişiminde CL/CD oranındaki artış ise daha istikrarlı ve düşük eğilimli seyretmiştir. Bu bulgular, kaldırma kuvvetini optimize etmek isteyen tasarımlar için B parametresinin dikkatli biçimde kontrol edilmesinin kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

C parametresi, yani yan kanat uzunluğu, özellikle CL katsayısı ve CL/CD oranı üzerinde belirleyici bir rol üstlenmektedir. Örneğin, $C = 600$ mm seviyesinde CL/CD oranı 16.5 olarak ölçülmüşken; bu değer $C = 800$ mm olduğunda 17.6'ya yükselmiştir. Benzer şekilde CL değeri de $C = 600$ mm için 0.6105 iken, $C = 800$ mm konfigürasyonunda 0.6688 seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, C parametresinin hem kaldırma kapasitesini hem de aerodinamik verimliliği doğrudan etkileyen önemli bir değişken olduğunu göstermektedir.

A ve B parametrelerine karşılık gelen Z (kaldırma kuvveti) çıktısının yüzey grafiği incelendiğinde, her iki parametrenin birlikte artırılmasıyla Z değerinde hızlı ve belirgin bir

yükseliş eğilimi saptanmıştır. Özellikle $A = 8^\circ$ ve $B = 500$ mm seviyelerinde Z çıktısı 260.84N ile en üst düzeye ulaşmıştır. Tersine, $A = 0^\circ$ ve $B = 300$ mm kombinasyonunda Z değeri 168.75 N'ye kadar gerilemiştir. Bu bulgu, Z değerini maksimize etmek isteyen mühendislik uygulamalarında A ve B parametrelerinin birlikte yönetilmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

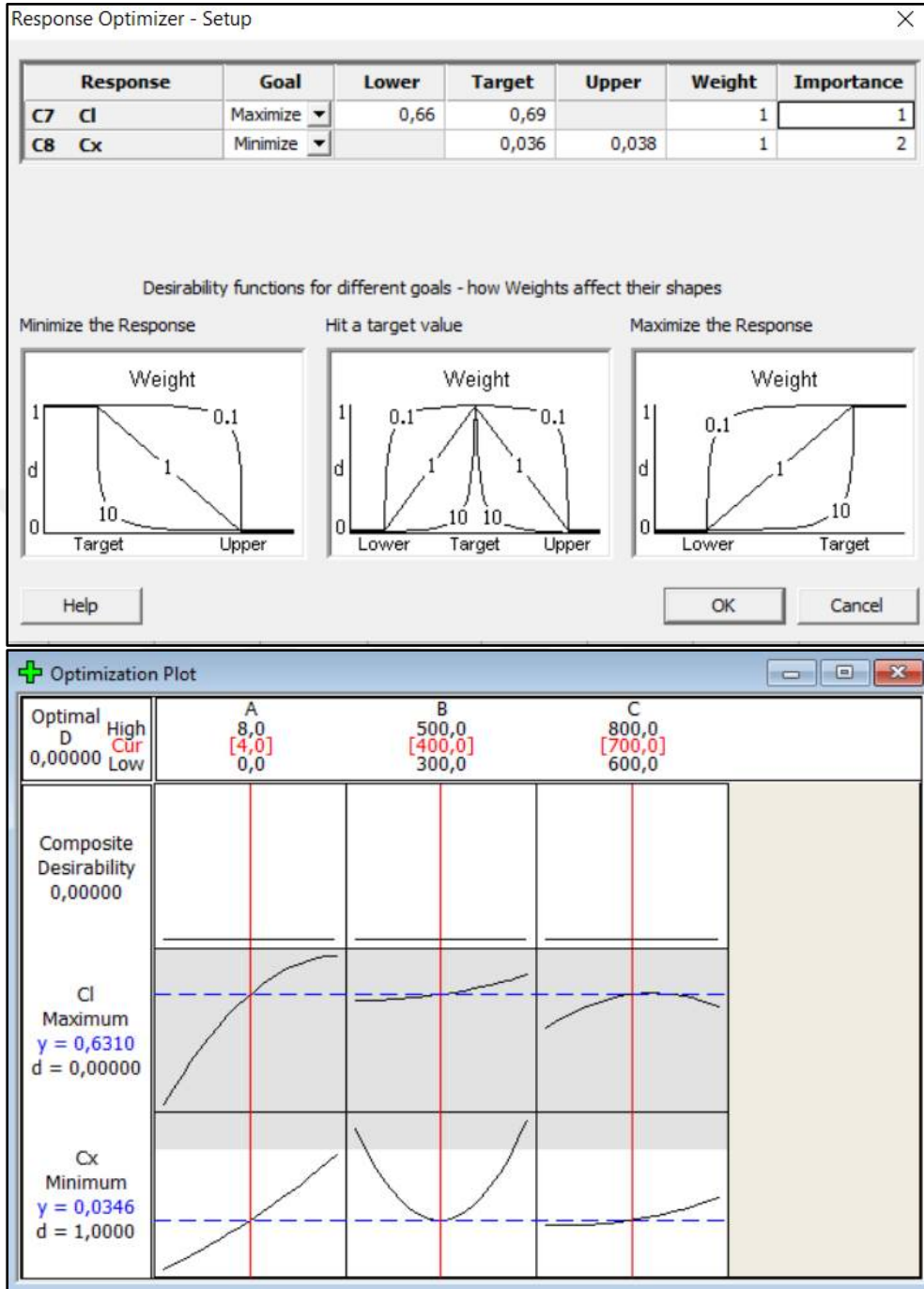
C ve B parametrelerinin CL/CD oranı üzerindeki etkisine ilişkin yapılan analizlerde ise C parametresinin oldukça dik bir artış eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Örneğin, $B = 400$ mm ve $C = 600$ mm olduğunda CL/CD oranı 16.1 iken; $C = 800$ mm seviyesinde bu oran 17.6'ya çıkmıştır. Bu durum, CL/CD oranı açısından C parametresinin baskın bir faktör olduğunu, B parametresinin ise görece daha yatay ve dengeli bir etki oluşturduğunu ortaya koymuştur.

A ve C parametrelerinin CL üzerindeki etkisi incelendiğinde, A parametresinin CL üzerinde daha çok doğrusal bir artış eğilimi yarattığı, C parametresinin ise daha çok nonlineer (eğrisel) bir yüzey davranışı sergilediği görülmüştür. $A = 8^\circ$ ve $C = 800$ mm seviyelerinde CL değeri 0.6688'e ulaşırken; $A = 0^\circ$ ve $C = 600$ mm kombinasyonunda bu değer 0.6105'e kadar gerilemiştir. Bu farklılıklar, süreç tasarımı aşamasında mühendislerin hedefe yönelik kararlar alabilmesi için yol gösterici niteliktedir. Örneğin, Z çıktısını maksimize etmek isteyen tasarımlarda A ve B parametreleri yüksek tutulmalı; CL ve CL/CD oranlarını artırmak isteyen uygulamalarda ise özellikle C parametresi dikkatle optimize edilmelidir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, tasarım parametrelerinin çıktılar üzerindeki etkileri Response Optimizer aracı yardımıyla da analiz edilmiştir. Bu analizlerde, birincil hedef olarak CL değeri maksimize edilmekte, ikincil hedef olarak ise CD değeri minimize edilmeye çalışılmaktadır. Bu çoklu optimizasyon sonucunda, en uygun parametre kombinasyonu olarak $A = 8^\circ$, $B = 400$ mm ve $C = 700$ mm değerleri belirlenmiş; bu sonuçların, Taguchi analizleri ile de tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, yaklaşık 100 metre menzilli düşük irtifa İHA'lar için ideal kanat geometrisi belirlenmiştir.

Sonuçlar ayrıca, RSM Optimizer arayüzü üzerinden elde edilen Şekil 6.4 ile görsel olarak desteklenmiştir. ANOVA analiz sonuçlarına göre, CL çıktısının %79.8 oranında A parametresinden etkilendiği belirlenmiş; CD çıktısı ise A ve B'nin ortak etkisiyle %43 oranında açıklanmıştır. CL/CD oranı açısından en etkili değişkenin %79.8 katkı oranıyla B parametresi (merkez kanat uzunluğu) olduğu saptanmıştır. Buna karşılık C parametresi, çıktılar üzerindeki en düşük etkiye sahip değişken olarak tanımlanmış; A parametresi ise genel anlamda kritik

öneme sahip bir kontrol faktörü olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.4. RSM Optimizer Tanımlama ve Sonuç Ekranı

Tablo 6.3. ANOVA Analiz Sonuçları

	Source	DF	SeqSS	Adj SS	Adj MS	F	P	% Effect
C _L	A	2	0.00537	0.00537	0.002685	6.58	0.132	79.8
	B	2	0.00016	0.00016	7.98E-05	0.2	0.837	2.4
	C	2	0.0012	0.0012	0.000599	1.47	0.405	17.8
	Error	2	0.00082	0.00082	0.000408			
	Total	8	0.00754					
C _D	A	2	4.5E-05	4.5E-05	2.25E-05	1.11	0.474	46.1
	B	2	4E-05	4E-05	1.99E-05	0.98	0.504	40.7
	C	2	1.3E-05	1.3E-05	6.5E-06	0.32	0.757	13.3
	Error	2	4.1E-05	4.1E-05	2.03E-05			
	Total	8	0.00014	0.00014	0.458	0.24	0.808	16.7
C _L / C _D	A	2	0.916	0.916	2.222	1.15	0.464	79.9
	B	2	4.445	4.445	0.1	0.05	0.951	3.5
	C	2	0.2	0.2	1.925			
	Error	2	3.849	3.849				
	Total	8	9.41					

Tablo 6.3.'te yer alan ANOVA Analizinde Kullanılan Kısaltmalar ve Açıklamaları:

Source (Kaynak): İncelenmekte olan faktörleri (örneğin A, B ve C parametreleri) ifade eder.

DF (Serbestlik Derecesi): Her bir faktörün varyansa katkısını değerlendirmek için kullanılan bağımsız karşılaştırma sayısını gösterir.

Seq SS (Sıralı Kareler Toplamı): Her bir faktörün, modele eklendiği sıraya göre eklediği toplam varyansı ifade eder.

Adj SS (Düzeltilmiş Kareler Toplamı): Diğer tüm faktörler dikkate alındıktan sonra, her bir faktörün modele katkı sağladığı varyans miktarını gösterir.

Adj MS (Düzeltilmiş Ortalama Kare): Düzeltilmiş Kareler Toplamı'nın serbestlik derecesine bölünmesiyle elde edilir ve her bir faktörün etki büyüklüğünü değerlendirmede kullanılır.

F (F-istatistiği): İlgili faktörün bağımlı değişken üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olup olmadığını test eder.

P (P-değeri): Anlamlılık düzeyini belirtir; genellikle 0.05'ten küçük bir değer, faktörün istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir. % Effect (Etki Yüzdesi): Her bir faktörün toplam varyans içindeki göreceli katkısını yüzde olarak ifade eder ve hangi parametrelerin daha baskın olduğunu ortaya koyar.

Bu çalışmada ayrıca, farklı voltaj kapasitelerine ve gaz kolu açıklık aralıklarına (%40–%100) sahip İHA’lar için maksimum hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testlerde:

- 5S batarya (18.5V) ile 4 kg,
- 6S batarya (22.2V) ile 5.2 kg taşıma yükü altında hız verileri değerlendirilmiştir.

Motorların ürettiği hızlar, %40, %60, %80 ve %100 gaz kolu açıklığı seviyelerinde ölçülmüştür. Maksimum hız testleri sırasında, taşıma yükü 2.7–3.2 kg aralığında sabitlenmiş ve İHA yaklaşık 30 metrelik bir mesafeden kalkış yapmıştır. Bu durum, hız optimizasyonu açısından düşük ağırlığın ne kadar kritik olduğunu ortaya koymuştur.

Öte yandan, maksimum taşıma kapasitesinin (7–8 kg) test edildiği durumlarda, İHA’nın kalkış için 70–75 metre gibi daha uzun bir mesafeye ihtiyaç duyduğu belirlenmiştir.

Test sonuçları, yalnızca 3.7V daha yüksek voltaj kapasitesine sahip olan 6S bataryanın, tüm gaz seviyelerinde 5S bataryaya göre anlamlı bir hız avantajı sağladığını göstermiştir. Örneğin:

- Tam gazda (%100), 6S batarya %12.96 oranında daha yüksek hız sağlamıştır.
- %40 gaz seviyesinde, 5S batarya 92 km/s, 6S batarya ise 101 km/s hıza ulaşmıştır.
- Bu fark, tam gaz seviyesinde hız, 5S bataryada 162 km/s iken 6S bataryada 183 km/s olmuştur.

Tablo 6.4. 5S ve 6S bataryalarla farklı gaz kolu seviyelerinde elde edilen hız değerlerini ve bu hızlardaki yüzde artışları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Tablodan da görüldüğü üzere, 6S batarya her seviyede belirgin biçimde daha yüksek hızlara ulaşmış ve özellikle tam gazda

%12.96’lık bir artış elde etmiştir.

6.1. Tablo 6.3’te Yer Alan ANOVA Kısaltmalarının Açıklamaları

Tablo 6.3’te kullanılan istatistiksel terimler, deneysel sonuçların analizinde kullanılan ANOVA (Varyans Analizi) yöntemine özgüdür ve aşağıda tanımlandığı şekilde yorumlanmalıdır:

Source (Kaynak): Analizde değerlendirilen faktörleri ifade eder. Bu çalışmada, örneğin A (yan kanat açısı), B (merkez kanat uzunluğu) ve C (yan kanat uzunluğu) gibi giriş

parametreleri bu başlık altında incelenmiştir.

DF (Degrees of Freedom- Serbestlik Derecesi): Her faktörün bağımsız olarak varyansa katkısını değerlendirmek amacıyla kullanılan karşılaştırma sayısını belirtir. Bu değer, istatistiksel gücü ve model karmaşıklığını tanımlar.

Seq SS (Sequential Sum of Squares- Sıralı Kareler Toplamı): Her bir faktörün, modele eklendiği sıraya göre sağladığı toplam varyansı gösterir. Bu değer, faktörlerin sıralı etkilerini anlamaya yardımcı olur.

Adj SS (Adjusted Sum of Squares- Düzeltilmiş Kareler Toplamı): Diğer faktörler sabit tutulduğunda, ilgili faktörün modele yaptığı katkıyı gösteren varyans miktarıdır. Gerçek etki büyüklüğünü daha doğru şekilde yansıtır.

Adj MS (Adjusted Mean Square- Düzeltilmiş Ortalama Kare): Adj SS değerinin ilgili faktörün serbestlik derecesine bölünmesiyle elde edilir. Bu metrik, her faktörün ortalama etki büyüklüğünü değerlendirmede kullanılır.

F (F-Statistic- F İstatistiği): İlgili faktörün bağımlı değişken üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test eder. Yüksek F değeri, faktörün güçlü bir etkiye sahip olabileceğine işaret eder.

P (P-value- P Değeri): Faktörün anlamlılık düzeyini ifade eder. Genellikle 0.05'ten küçük bir p-değeri, o faktörün istatistiksel olarak anlamlı olduğunu gösterir.

% Effect (Etki Yüzdesi): Her bir faktörün toplam varyans üzerindeki göreceli katkısını yüzde cinsinden ifade eder. Bu değer, hangi değişkenin çıktılar üzerinde daha baskın olduğunu belirlemede kullanılır.

6.2. 5S ve 6S Bataryalarla Gerçekleştirilen Hız Testlerinin Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında, farklı voltaj kapasitelerine (5S: 18.5V / 6S: 22.2V) sahip bataryalarla çalışan İHA'ların, çeşitli taşıma yükleri ve gaz kolu açıklığı seviyeleri (%40, %60, %80, %100) altında gösterdikleri hız performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Testler sırasında, sabit taşıma yükü aralığı olarak 2.7–3.2 kg belirlenmiş ve İHA yaklaşık 30 metrelik bir kalkış mesafesiyle uçuşa başlatılmıştır. Bu koşullarda elde edilen bulgular, düşük taşıma yükünün maksimum hız performansı açısından son derece kritik olduğunu göstermiştir.

Öte yandan, maksimum taşıma sınırı olarak belirlenen 7–8 kg yük altında yapılan

denemelerde, İHA'nın kalkış yapabilmesi için yaklaşık 70–75 metrelik daha uzun bir mesafeye gereksinim duyduğu tespit edilmiştir. Bu durum, artan taşıma yükünün kalkış dinamikleri üzerinde doğrudan sınırlayıcı bir etki yarattığını ortaya koymuştur.

Hız ölçümleri, hem 5S hem de 6S bataryalarla her gaz seviyesinde yapılmış ve 6S bataryanın, yalnızca 3.7V daha yüksek voltaj kapasitesine sahip olmasına rağmen tüm testlerde üstün performans sergilediği belirlenmiştir. Özellikle tam gaz seviyesinde (100% Tam gaz), 6S batarya ile elde edilen hız artışı %12.96 olarak hesaplanmıştır.

Örnek karşılaştırmalar:

%40 Gaz:

- 5S batarya ile 92 km/s
- 6S batarya ile 101 km/s

%100 Tam gaz:

- 5S batarya ile 162 km/s
- 6S batarya ile 183 km/s

Bu veriler, 6S bataryanın hem orta hem de yüksek gaz seviyelerinde daha yüksek itki sağladığını ve İHA'nın hız potansiyelini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

Tablo 6.4. 5S ve 6S bataryalarla elde edilen hız verilerini ve bu veriler arasındaki yüzdesel artışları karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Tablodan da görüleceği üzere, 6S batarya her gaz seviyesinde üstün performans göstermiştir. Özellikle tam gazda elde edilen %12.96'lık hız artışı, sistemin toplam uçuş verimliliğini doğrudan iyileştiren önemli bir avantaj olarak değerlendirilmiştir.

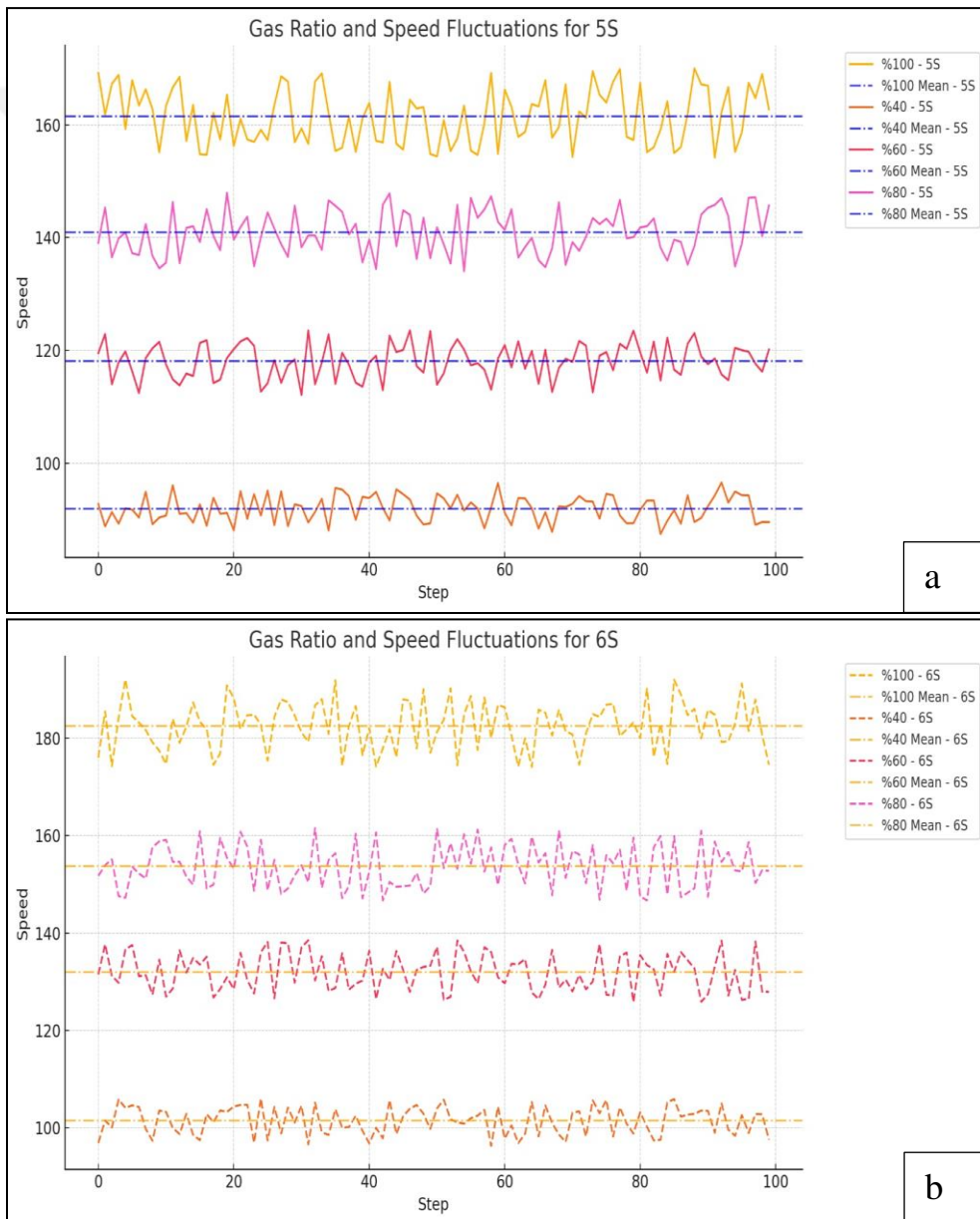
Tablo 6.4. 5S ve 6S Pil Hızlarının Karşılaştırılması.

Gaz Seviyesi (%)	(5S Pil) Hız (km/h)	(6S Pil) Hız (km/h)	Hız Artışı (%)
40%	92	101	9.78%
100%	162	183	12.96%

Literatürde, düşük irtifada görev yapacak şekilde optimize edilmiş insansız hava araçlarının ortalama 7–8 kg aralığında taşıma yükü kapasitesine sahip olduğu ve bu yük altında yaklaşık 115 km/s seviyelerinde seyir hızına ulaşabildiği bildirilmektedir [4, 48]. Mevcut çalışma, farklı gaz kolu açıklığı seviyeleri ile batarya konfigürasyonlarının İHA performansı üzerindeki etkilerini sistematik biçimde inceleyerek, ilgili alana karşılaştırmalı veriler

sunmaktadır (Bkz. Şekil 6.5).

Tartışma bölümünde elde edilen bulgular doğrultusunda, taşıma yükündeki artışın doğrudan kalkış mesafesini uzattığı ve bunun da maksimum yük kapasitesi üzerinde sınırlayıcı bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Örneğin, 7–8 kg yük taşıyan bir İHA'nın kalkış yapabilmesi için yaklaşık 70–75 metrelik bir piste ihtiyaç duyduğu gözlemlenmiştir. Ancak bu mesafenin 100 metre ve üzerine çıkarılması durumunda, İHA'nın 10 kg veya daha yüksek yükleri taşıma potansiyeline sahip olabileceği öngörülmektedir. Bu öngörü, taşıma kapasitesinin sadece motor gücüyle değil, aynı zamanda pist uzunluğu ve kalkış koşullarıyla da doğrudan ilişkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.5. Hız Testi, a) 5S Pil Hız Testi Sonuçları b) 6S Pil Hız Testi Sonuçları

7. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında, insansız hava araçlarının tarihsel gelişimi, yapısal tasarım ilkeleri ve sivil kullanım alanlarındaki dönüşümü kapsamlı şekilde incelenmiştir. Özellikle düşük irtifada görev yapabilen sabit kanatlı İHA sistemlerine odaklanılarak, bu platformların teknik özellikleri ve tasarım değişkenleri analiz edilmiştir. Tarihsel bağlamda, İHA'ların gelişimi başlangıçta büyük ve askeri amaçlı sistemlerle sınırlı kalmış, ancak teknolojik ilerlemeler doğrultusunda daha küçük boyutlu, hafif ve manevra kabiliyeti yüksek sistemlere doğru evrilmiştir. Günümüzde ise bu araçlar yalnızca askeri operasyonlarda değil, çevresel izleme, tarımsal faaliyetler, afet yönetimi ve ekolojik analizler gibi pek çok sivil alanda da yaygın şekilde kullanılmaktadır (Anderson & Gaston, 2013). Özellikle düşük maliyetli olmaları ve kolay erişilebilirlikleri, bu sistemlerin farklı kullanıcı profilleri tarafından tercih edilmesini sağlamaktadır.

Çalışmada incelenen sabit kanatlı İHA modelleri genellikle 2 ila 4 metre aralığında kanat açıklığına sahip olup, ortalama üç saate kadar havada kalabilecek şekilde tasarlanmaktadır. Tercih edilen üç parçalı kanat yapısı (orta gövde kanadı ile iki yanal kanat) hem yapısal dayanıklılığı artırmakta hem de uçuş performansına katkı sağlamaktadır. Orta kanat, gövde ile entegrasyonu sayesinde en büyük statik kuvveti taşıırken; yanal kanatlar uçuş menzili, hız ve stabilite açısından kritik rol oynamaktadır. Aerodinamik verimliliği artırmak amacıyla, yanal kanatların belirli açılarda konumlandırılması tercih edilmiştir. Bu tez kapsamında, bulut altı irtifalarda operasyon yapabilecek elektrikli bir İHA tasarımı geliştirilmiş ve söz konusu tasarım aerodinamik performans, hız kabiliyeti ve enerji verimliliği gibi ölçütler çerçevesinde deneysel olarak test edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda, söz konusu İHA'nın CL/CD oranının 17,6 değerine ulaşması, aerodinamik etkinliğin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. ANOVA analizine göre, kanat açısını temsil eden A parametresi, CL üzerinde %79,8 oranında etki sağlayarak en kritik tasarım değişkeni olarak belirlenmiştir. Bu durum, kanat geometrisinin ve açısal yapısının aerodinamik verimliliğin artırılmasındaki belirleyici rolünü vurgulamaktadır. Ayrıca, A ve B parametrelerinin CD üzerindeki %43'lük toplam etkisi, hız ve enerji tüketimi açısından önemli kontrol noktaları olduğunu göstermektedir.

Yanal kanat uzunluğunda yapılan artırımlar, kaldırma kuvvetinde gözle görülür bir yükselişe neden olurken, bunun küçük oranlı bir hız kaybıyla dengelendiği gözlemlenmiştir. Örneğin, 700 mm yanal kanat uzunluğu ve 8° kanat açısı ile gerçekleştirilen tasarım; düşük

irtifalı ve kısa menzilli görevlerde, %95 doğrulukla optimum performans sunmuştur. Bu yapı, operasyonel güvenliği artırmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji kullanımında da tasarruf sağlamıştır.

Enerji verimliliği açısından yapılan karşılaştırmalı batarya analizlerinde, 6S bataryanın tüm gaz seviyelerinde 5S bataryaya göre anlamlı ölçüde daha yüksek hız değerleri ürettiği belirlenmiştir. Örneğin, %40 gaz seviyesinde 6S batarya 101 km/s hıza ulaşırken, 5S batarya yalnızca 92 km/s değerine erişebilmiştir. Tam gazda ise 6S batarya yaklaşık %12,96 oranında hız avantajı sağlamış, bu durum enerji verimliliği açısından kritik bir avantaj olarak değerlendirilmiştir.

Taşıma kapasitesi testlerinde, 7–8 kg yük altındaki kalkış mesafesinin 70–75 metreye kadar çıktığı, buna karşın hafif yüklerde (yaklaşık 2,7–3,2 kg) kalkışın 30 metre gibi kısa bir mesafede gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, taşıma kapasitesinin sadece hız ve enerji tüketimi değil, aynı zamanda kalkış mesafesi üzerindeki belirleyici etkisini de gözler önüne sermektedir. Hafif yük taşıma senaryoları, hız ve enerji verimliliğinin optimize edilmesi açısından daha avantajlı bulunmuştur.

Aerodinamik testlerde, ikinci tasarım varyantında 253 N kaldırma kuvveti elde edilmiş ve bu, kanat yapısının başarılı bir şekilde optimize edildiğini ortaya koymuştur. Aynı testte ölçülen 10,2 N'lik minimum sürüklenme kuvveti, tasarımın aerodinamik etkinliğini açık biçimde yansıtmaktadır. Taguchi analiz sonuçlarına göre, optimum hız ve yük taşıma dengesi 208,3 N kaldırma ve 16,8 N sürüklenme kuvveti ile sağlanmış ve yüksek verimlilik elde edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tezde geliştirilen İHA tasarımı, aerodinamik verimlilik, hız performansı, enerji kullanımı ve taşıma kapasitesi gibi parametrelerin bütünsel optimizasyonu ile operasyonel başarıya ulaşılabilirliğini göstermiştir. Gelecekte, bu sistemlerin daha da geliştirilmesi amacıyla yapay zeka destekli uçuş kontrol algoritmalarının entegrasyonu, yeni nesil batarya sistemleri ve gelişmiş kompozit malzeme teknolojileri gibi alanlarda çalışmalar önerilmektedir. Bu tezde elde edilen bulgular, özellikle sivil amaçlı düşük irtifa İHA tasarımlarının mühendislik tabanlı yaklaşımlarla nasıl iyileştirilebileceğine dair önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, F., et al.** (2022). Recent advances in unmanned aerial vehicles: a review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47(7), 7963–7984.
- Ajakwe, S. O., et al.** (2023). ALIEN: Assisted learning invasive encroachment neutralization for secured drone transportation system. *Sensors*, 23(3), 1233.
- Akbar, M. F., Mahardika, D., Rizqi, M., Sulthoni, M. A., ve Moelyadi, M. A.** (2021, November 17). Avionics subsystems design and development for HALE UAV ITB V4. In *The 8th International Seminar on Aerospace Science and Technology – ISAST 2020* (AIP Conference Proceedings, Vol. 2366, pp. 020012). Bogor, Indonesia.
- Ali, A. K. S.** (2025). *UAV project management and design phases / İHA proje yönetimi ve tasarım aşamaları* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 205 s.
- Arslan, B., ve Demirtaş, F.** (2021). Türkiye’de İHA’ların askeri ve sivil kullanımı üzerine bir değerlendirme.
- Austin, R.** (2010). Unmanned aircraft systems: UAVs design, development and deployment. *Wiley Publishing*.
- Wiley.Azizi, S., Shakibi, H., Shokri, A., Chitsaz, A., ve Yari, M.** (2023). Multi-aspect analysis and RSM-based optimization of a novel dual-source electricity and cooling cogeneration system. *Applied Energy*, 332, 120487.
- Bakır, G.** (2019). İnsansız hava araçlarının savunma sanayi harcamasında yeri ve önemi. *Avrasya Sosyal ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 127–134.
- Baray, A. & Sarı, T. (2006). Kalite Geliştirmede Deney Tasarımı Yöntemi ve Otomotiv Sektöründe Bir Uygulama. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 35(2), 37–62
- Bayraktar, S., ve Özcan, T.** (2018). Türkiye’de insansız hava araçlarının gelişim süreci. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 10(2), 45–60.
- Besenyő, J., ve Málnácssy, A.** (2024). Geopolitical dimension of Libyan drone warfare: The use of Turkish drones on the North African battlefields. *Obrana a strategie*, 24(1), 3–17.
- Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.** (2023, 17 Temmuz). Firmaların problemlerine üniversitemizde çözüm bulunuyor. *Teknoloji Transfer Ofisi Koordinatörlüğü*.

https://www.bilecik.edu.tr/tto/Icerik/Firmalar%C4%B1n_Problemlerine_%C3%9Cniversitemizde_%C3%87%C3%B6z%C3%BCm_Bulunuyor_5164e

Bohara, K., Deepesh, D., Dhruba, A., ve Prajapati, K. (2019). Performance analysis of airfoil using biomimicry: Serrated trailing edge and denticles inspired surface. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/342706278_Performance_Analysis_of_Airfoil_Using_Biomimicry_Serrated_Trailing_Edge_And_Denticles_Inspired_Surface

Bremnes, K., Moen, R., Yeduri, S. R., Yakkati, R. R., ve Cenkeramaddi, L. (2022). Classification of UAVs utilizing fixed boundary empirical wavelet sub-bands of RF fingerprints and deep convolutional neural network. *IEEE Sensors Journal*, 22, 21248–21256.

Chung Wang, C., Lin, T. W., ve Hu, S. S. (2007). Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), 304–315.

Çetinkaya, S. G., ve Koç, M. (2023). Türkiye'nin insansız hava araçları serüveni. *Anadolu Strateji Dergisi*, 5(1), 1–27.

Dada, O. A., Makinde, O. M., Ubadike, O., ve Jemitola, P. (2022). A Taguchi based iterative wing structural design for a low speed, hybrid UAV. *Nigerian Journal of Technology*. <https://doi.org/10.4314/njt.v41i1.12>

Demiryol, T., ve Soyaltin-Colella, D. (2024). The geopolitics of Turkey's rise as a drone power. *Georgetown Journal of International Affairs*, 25(1), 12–20.

Dhan, E. S. A. (2025). *Aerodynamic optimization of UAV wing design using computational fluid dynamics (CFD) analysis / Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi kullanarak İHA kanat tasarımının aerodinamik optimizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Altınbaş Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 88 s.

Ejeh, C. J., Akhabue, G. P., Boah, E. A., ve Tandoh, K. K. (2019). Evaluating the influence of unsteady air density to the aerodynamic performance of a fixed wing aircraft at different angle of attack using computational fluid dynamics. *Results in Engineering*, 4, 100037.

Erdoğan, M. (2022). Bayraktar TB2'nin uluslararası operasyonel başarısı. *Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 11(3), 88–102.

Fatoba, O. S., Adesina, O. S., Farotade, G. A., ve Adediran, A. A. (2017). Modelling and Optimization of Laser Alloyed AISI 422 Stainless Steel Using Taguchi Approach and Response

Surface Model (RSM). *Current Journal of Applied Science and Technology*, 23(3), 1-16.
<https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/24512>

Focke, V., Kesel, A. B., ve Baars, A. (2017). Flying fish: Biomimetic potential for wing in ground effect, crafts? In *Bionik: Patente aus der Natur. Innovationspotenziale für Technologieanwendungen. 8. Bremer Bionik-Kongress* (A. B. Kesel ve D. Zehren, Eds.). ISBN: 978-3-00-055030-0

Finn, R. L., & Wright, D. (2012). Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications. *Computer Law & Security Review*, 28(2), 184–194.

Fourlas, G. K., ve Karras, G. C. (2021). A survey on fault diagnosis and fault-tolerant control methods for unmanned aerial vehicles. *Machines*, 9, 197. <https://doi.org/10.3390/machines9090197>

Hamzaçebi, C., Li, P., Pereira, P. A. R., ve Navas, H. (2020). Taguchi method as a robust design tool. In *Quality Control-Intelligent Manufacturing, Robust Design and Charts* (pp. 1–19).

Haque, S. R., Kormokar, R., ve Zaman, A. U. (2017, April). Drone ground control station with enhanced safety features. In *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)* (pp. 1207–1210). IEEE.

Harbi, İ. (2023). İnsansız hava araçlarında kullanılan pistonların malzeme ve kaplama özelliklerinin aşınma performansına etkisinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Hasaıçebi, B. (2024). İnsansız hava araçlarının savunma sanayisindeki yeri ve Türk dış politikası açısından önemi (Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Türkiye).

Hou C J, Tang Y, Luo S M, Lin J T, He Y, Zhuang J J, et al. Optimization of control parameters of droplet density in citrus trees using UAVs and the Taguchi method. *Int J Agric ve Biol Eng*, 2019; 12(4): 1–9.

Hutsul, T., Zhezhera, I., ve Tkach, V. (2022). Features of UAV classification and selection methods. *Technical Sciences and Technologies*, 4(30), 201–212.

Hwang, W., ve Song, S. (2022). The extension of Turkish influence and the use of drones. *Comparative Strategy*, 41, 439–458.

Ismail, A. W. I. (2024). *Advanced structural analysis of UAV performance using composite materials / Kompozit malzemeler kullanılarak İHA performansının ileri yapısal analizi* (Yüksek

lisans tezi, Altınbaş Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 88 s.

Kapsalis, S., Bliamis, C., Kaparos, P., Panagiotou, P., ve Yakinthos, K. (2023). Parametric Investigation of Canards on a Flying Wing UAV Using the Taguchi Method. *Aerospace*. <https://doi.org/10.3390/aerospace10030264>

Kapsalis, S., Panagiotou, P., ve Yakinthos, K. (2021). CFD-aided optimization of a tactical Blended-Wing-Body UAV platform using the Taguchi method. *Aerospace Science and Technology*, 108, 106395. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2020.106395>

Kara, A. O. (2017). Kuruluşundan Birinci Dünya Savaşı'na kadar Türk askeri havacılığı. *Türk Dünyası Araştırmaları*, 117(231), 193–206.

Kaya, H. (2022). Türkiye'de İHA teknolojilerinin gelişimi ve savunma sanayine etkileri.

Khan, A., Gupta, S., ve Gupta, S. K. (2022). Emerging UAV technology for disaster detection, mitigation, response, and preparedness. *Journal of Field Robotics*, 39(6), 905–955.

Khan, M. T. R., et al. (2021). Aspects of unmanned aerial vehicles path planning: Overview and applications. *International Journal of Communication Systems*, 34(10), e4.

Kılınçoğlu, M. E. (2023). İnsansız hava araçları (İHA) ve Türkiye. *Türk Savaş Çalışmaları Dergisi*, 4(2), 114–134.

Kim, S. Y., et al. (2023). A review of UAV integration in forensic civil engineering: From sensor technologies to geotechnical, structural and water infrastructure applications. *Measurement*, 113886.

Koç, T. (2024). Türk İHA'larının Rönesansı: Türkiye'nin güvenlik anlayışı nasıl değişti? *Turcology Research*, (80), 339–351.

Koçyiğit, K. (2025). Türkiye'nin insansız hava aracı (İHA) teknolojisindeki gelişimi: 1980 sonrasında günümüze tarihsel bir inceleme. *Journal of Aerospace Science and Management*, 3(1), 42–63.

Landell-Mills, N. (2019). Newton explains lift; Buoyancy explains flight. *Pre-Print*. <https://doi.org/10.> (Eğer tam DOI'niz varsa lütfen ekleyin.)

Luo, Y., Pan, G., Huang, Q., Shi, Y., ve Lai, H. (2019). Parametric geometric model and shape optimization of airfoils of a biomimetic manta ray underwater vehicle. *Journal of Shanghai*

Jiaotong University, 24(3), 402–408.

Ma, Z., Huangfu, W., ve Liu, Y. (2020). Optimizing 3-D Placement of Multiple UAVs Based on Taguchi's Method. *2020 IEEE Intl Conf on Parallel ve Distributed Processing with Applications, Big Data ve Cloud Computing, Sustainable Computing ve Communications, Social Computing ve Networking (ISPA/BDCloud/SocialCom/SustainCom)*, 578-585. <https://doi.org/10.1109/ISPA-BDCloud-SocialCom-SustainCom51426.2020.00098>

Majidi Balanji, H. (2025). *Search and rescue with multiple UAVs: Target detection and connectivity / Çoklu İHA'larla arama ve kurtarma: Hedef tespiti ve bağlantılılık* (Yüksek lisans tezi, Özyeğin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 102 s.

Martian, A., et al. (2024). Direction-finding for unmanned aerial vehicles using radio frequency methods. *Measurement*, 235, 114883.

Martin, D. S. (2017). *An investigation of avian wing tip vortex generation using a biomimetic approach* (Yüksek Lisans Tezi, California State Polytechnic University, San Luis Obispo).

Mohd Ghazali, M. H., Teoh, K., ve Wan Rahiman, W. A. (2025). A Study of Different Antenna Models on the Performance of UAV-Based LoRa Communication Network Using Taguchi and ANOVA Methods. *Pertanika Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.47836/pjst.33.2.01>

Mohsan, S. A. H., et al. (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review. *Drones*, 6(6), 147.

Molchanov, P. O., Harmanny, R., de Wit, J. J., Egiazarian, K., ve Astola, J. (2013, October). Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures. In *2013 European Radar Conference* (pp. 172–175). IEEE.

Murphy, J. T. (2008). Experimental investigation of biomimetic wing configurations for micro air vehicle applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(3), 423–431.

Nas, E., ve Öztürk, B. (2018). Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Materials Testing*, 60(5), 519–525.

Natarajan, G. (2001). Ground control stations for unmanned air vehicles (Review Paper). *Defence Science Journal*, 51, 229–237.

Nergiz, A. (2008). *Türkiye’de sivil havacılığın gelişimi ve THY* (Yüksek lisans tezi, Marmara

Üniversitesi, Türkiye).

Özdamar O., Öztürk B., “A New Specific Carbon Footprint (SCF) Theory of Flow Rate and Energy Consumption Variations of an Industrial Internal Gear Pump” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 8(3): 428-436, (2024).

Özkan, H. M. (2025). *Kapalı kanat yapısına sahip kuyruk üstü dikey iniş kalkışlı özgün İHA tasarım ve performans analizi / Design and performance analysis of a tail-sitter VTOL UAV with a closed-wing configuration* (Yüksek lisans tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Havacılık Elektrik ve Elektronik Ana Bilim Dalı). 96 s.

Özkan, M. F., ve Dahil, L. (2025). Yangınların söndürülmesinde kullanılacak döner kanat İHA tasarımı ve analizi. *Journal of Aerospace Science and Management*, 3(1), 1–19. <https://jasam.erciyes.edu.tr/>

Öztürk, B. (2020). Investigation of effects of inverter frequency changes on the specific energy consumption of pipe threading using response surface methodology. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 152. (Makale numarası yoksa sadece cilt yeterlidir.)

Öztürk, O. (2024). Havacılıkta kullanılan ısı (termal) pillerin risk analizi. *Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(2), 105–115.

Öztürk, O. (2024). Uydular ve Türkiye’nin uydu çalışmalarının SWOT analizi. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 97–112. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.1>

Öztürk, Y. (2023). Bayraktar TB2 ve Akıncı İHA’larının operasyonel başarıları. *Savunma Teknolojileri Dergisi*, 12(2), 57–72.

Özyıldırım, E., Ertaş, S., Karataş, S., Şahin, S., ve Okur, Ö. (2024). Türkiye’de 1960 ve 2000 yılları arasında roket ve füze teknolojilerinin tarihi ve gelişimi.

Prisacariu, V., Mircea, Pop, S., Luige, Victor, ve Travediu, A. (2022). Considerations about construction of UAV ground control stations. In *Scientific Research and Education in the Air Force – AFASES 2021* (pp. 129–138).

Rossiter, A., ve Cannon, B. J. (2022). Turkey's rise as a drone power: Trial by fire. *Defense ve Security Analysis*, 38, 210–229.

Saad, A. M., ve Tahar, K. N. (2019). Identification of rut and pothole by using multirotor unmanned aerial vehicle (UAV). *Measurement*, 137, 647–654.

Saadoon, A. A. S. (2024). *FSI analysis and simulation of a fixed-wing UAV using composite*

materials / Kompozit malzemeler kullanılarak sabit kanatlı İHA'nın FSI analizi ve simülasyonu (Yüksek lisans tezi, Altınbaş Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 78 s.

Schmehl, R., Noom, M., ve van der Vlugt, R. (2013). Traction power generation with tethered wings. In *Airborne Wind Energy* (pp. 23–45).

Sezen, O. (2025). *Elektrik motorlu İHA pervanesi profilinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile incelenmesi ve deneysel analizi / Investigation of electric motor UAV propeller profile with computational fluid dynamics and experimental analysis* (Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 56 s.

Shiau, Y., Lau, E., ve Chang, W.-C. (2021). Optimal Control Management for Aerial Vehicle Payload by Taguchi Method. *2021 IEEE International Conference on Social Sciences and Intelligent Management (SSIM)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SSIM49526.2021.9555192>

Shokirov, R., et al. (2020). Prospects of the development of unmanned aerial vehicles (UAVs). *Technical Science and Innovation*, 2020(3), 4–8.

Soyaltin-Colella, D., ve Demiryol, T. (2023). Unusual middle power activism and regime survival: Turkey's drone warfare and its regime-boosting effects. *Third World Quarterly*, 44(4), 724–743.

Tachinina, O. M., Lysenko, A. I., ve Kutieпов, V. O. (2022). Classification of modern unmanned aerial vehicles. *Aviation Transport*, 4(74), 79–86.

Tekindal, M. A. (2009). *Yanıt Yüzeyi Metodu ve Bir Uygulama* (Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Upasena, K. K. S. P., Weerathunga, U. I., Abeygoonewardena, J. I., ve Bandara, R. M. P. S. (2019). Design of a new aircraft wing inspired by the magnificent frigate bird. In *Kotelawala Defence University International Research Conference*. Ratmalana.

Ural Bayrak, Z., ve Celik, N. (2023). Determining the Effects of Operating Conditions on Current Density of a PEMFC by Using Taguchi Method and ANOVA. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08470-9>

Ünalır, D. (2025). *Modeling low radar cross section UAV at simulation and real environment in X-band / Simülasyon ve gerçek ortamda X-band'da düşük radar kesitli İHA'nın modellenmesi* (Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı). 125 s.

- Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J.** (2015). Handbook of unmanned aerial vehicles. *Springer*.
- Walter, B., Knutzon, J., Sannier, A. V., ve Oliver, J. H.** (2004, September 20–23). Virtual UAV ground control station. In *AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference, Workshop and Exhibit* (pp. 1–10). Chicago, Illinois.
- Wei, Y., Xu, F., Bian, S., ve Kong, D.** (2020). Noise reduction of UAV using biomimetic propellers with varied morphologies leading-edge serration. *Journal of Bionic Engineering*, 17(4), 767–779.
- Williams, B. G.** (2013). *Predators: The CIA's drone war on al Qaeda*. Potomac Books, Inc.
- Yalım, İ., Şahin, M., İskender, B. B., İşgör, I., ve Fırat, M. M.** (2024). 1990–2000 yılları arasında TAI'nin Türk havacılık ve savunma sektörüne katkıları.
- Yeh, K.-H.** (2024). The implementation mechanism, application, and development prospects of Turkey's drone strategy. *Contemporary Eurasia*, 12(2), 63–82.
- Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., ve Qian, B.** (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. *Electronics*, 13, 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13030393>