İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN SABİT KANATLI İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIM, ÜRETİMİ VE UÇUŞ TESTLERİ

DOKTORA TEZİ

Uğur ÖZDEMİR

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN SABİT KANATLI İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIM, ÜRETİMİ VE UÇUŞ TESTLERİ

DOKTORA TEZİ

Uğur ÖZDEMİR
(511092112)

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Gökhan İNALHAN

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511092112 numaralı Doktora Öğrencisi **Uğur ÖZDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN SABİT KANATLI İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIM, ÜRETİMİ VE UÇUŞ TESTLERİ"** başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Gökhan İNALHAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Yrd. Doç. Dr. Hayri ACAR İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Levent GÜVENÇ The Ohio State University	.....
	Yrd.Doç.Dr. Arif KARABEYOĞLU Koç Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **30 Nisan 2015**
Savunma Tarihi : **01 Haziran 2015**

Babama ve oğluma,

ÖNSÖZ

Doktora çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve destekleyen tez danışmanım Doç. Dr. Gökhan İNALHAN başta olmak üzere sayın hocalarım Prof. Dr. Adil YÜKSELEN, Prof. Dr. İbrahim ÖZKOL ve Prof. Dr. Metin Orhan KAYA'ya şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim. Ayrıca Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'na SAN-TEZ projesi kapsamında tezimi desteklediği için minnetarım. Bu proje kapsamında çalışma fırsatı bulduğum Orkut AKTAŞ, Ahmed Farabi TARHAN, Yasin DERELİ, Aslıhan VURUŞKAN, Aykut ÇETİN, Burak YÜKSEK ve Mehmet HASANZADE'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca beni destekleyen aileme ve doktora tezimin sonuna yetişen oğlum İsmet Cemal'e teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2015

Uğur ÖZDEMİR
(Uçak Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Motivasyon 1
1.2 Literatür Araştırması 7
1.3 Teknik ve Bilimsel Katkı 9
1.4 Tezin Düzeni 11
2. DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN HAVA ARACI TASARIMI **13**
2.1 TURAÇ DİKY İHA Konsepti 14
2.2 Hedef Performans ve Rakip Analizi 18
2.3 Tasarım Süreci 24
2.4 İtki Konfigurasyonu 28
2.5 Kanat Profili ve Kanat Seçimi 30
2.6 Ağırlık Tahmini 42
2.7 Detaylı Boyutlandırma 47
2.8 Performans Hesaplamaları 49
3. SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ: YAPI VE AERODİNAMİK **55**
3.1 Sistemin Yapısal Analizi 55
3.1.1 Sandviç Yapıların Analizi 63
3.2 Aerodinamik Analizler 69
3.2.1 Yazılım geliştirme 69
3.2.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları 71
4. İTKİ SİSTEMLERİ VE MEKANİZMALARI GELİŞTİRİLMESİ **75**
4.1 İtki Hesaplamaları ve Motor - Pervane - ESC Seçimleri 75
4.2 İtki Test Düzeneği Geliştirilmesi ve Üretimi 80
4.3 Tilt Mekanizması Geliştirilmesi 86
5. DİNAMİK MODELLEME, SİMULASYON VE KONTROL ALGORİTMALARI **89**
5.1 Genel Hareket Denklemleri 89
5.2 Havada askı durumundan ileri uçuşa (ve tersi) geçişin modellenmesi 92
5.3 Pervane Kaynaklı Hava Akışı Etkileri 94
5.4 Serbest Hava Akışı Etkileri 96

5.5 Toplam hava akışı etkileri 98
5.6 Tilt Rotorlu Pervaneye için İtki-Uçuş Hızı İlişkisinin Modellenmesi 100
5.7 2D Kanat Profili Analizi 100
5.8 3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi 101
5.9 Geçiş Senaryosu 108
5.10 Matematiksel Modelin Tamamı ve Simulasyonlar 110
5.11 Geçiş ve Geri Geçiş Algoritmaları 111
5.12 Simulasyon Sonuçları 113
6. AVİYONİK, YER İSTASYONU VE FAYDALI YÜK SİSTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ 119
6.1 Aviyonik Sistem 119
6.2 Güç Yönetim Sistemi 127
6.3 Uçuş Kontrol Sistemi Testleri 127
6.4 Yer İstasyonu Modulleri 129
6.4.1 2 ve 3 Boyutlu GIS (Coğrafi Bilgi Sistemi) Modülü 130
6.4.2 Görev Planlama Modülü 130
6.4.3 Canlı Kontrol Modülü 131
6.4.4 Telemetri Verileri Alma ve Kaydetme Modülü 131
6.4.5 Telemetri Verilerini Analiz Edebilme ve Yeniden Oynatma Modülü 134
6.5 Mavlink 134
6.6 Multispektral Görüntü Analizi Araştırması 139
6.6.1 Multispektral Kamera Test Sonucu 140
6.7 Gaz Sensörlerinin Entegrasyonu 140
7. TURAÇ ÜRETİMİ 145
7.1 Düşük Maliyetli Bir Yaklaşım 145
7.2 İmalat Süreci 147
7.3 Alt Sistem Tasarım ve Üretimi 151
7.3.1 Ön İniş Takımı Ana Yatak 153
7.3.2 Ön İniş Takımı Tekerlek Bağlantısı 153
7.3.3 Arka İniş Takımı Bağlantı Parçası 153
7.3.4 Motor Yatağı 154
8. YER VE UÇUŞ TESTLERİ 157
8.1 Yer Testleri 159
8.2 Uçuş Testleri 161
9. SONUÇLAR 167
9.1 Gelecek Çalışmaları 169
KAYNAKLAR 171
ÖZGEÇMİŞ 176

KISALTMALAR

İHA	**:** İnsansız Hava Aracı
DİKY İHA	**:** Dikey İniş Kalkış Yapabilen İnsansız Hava Aracı
GİKY İHA	**:** Geleneksel İniş Kalkış Yapabilen İnsansız Hava Aracı
HAD	**:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
SEM	**:** Sonlu Elemanlar Metodu
VLM	**:** Vortex Lattice Method (Girdap Kafes Yöntemi)
HALE	**:** High-Altitude Long-Endurance (Yüksek İrtifa Uzun Takat)
MALE	**:** Medium-Altitude Long-Endurance (Orta İrtifa Uzun Takat)
CAD	**:** Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Çizim)
DoF	**:** Degree of Freedom (Serbestlik Derecesi)
GKY	**:** Girdap Kafes Yöntemi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : TURAÇ'ın diğer DİKY İHA'lar ile karşılaştırılması. 19
Çizelge 2.2 : TURAÇ'ın diğer GİKY İHA'lar ile karşılaştırılması. 19
Çizelge 2.3 : Türkiye'deki mini İHA platformlarının TURAÇ ön tasarımı ile karşılaştırması. 22
Çizelge 2.4 : TURAÇ DİKY İHA sistemi teknik gereksinimleri. 25
Çizelge 2.5 : Tasarım sürecinde geliştirilen TURAÇ DİKY İHA versiyonları. 26
Çizelge 2.6 : Farklı ölçeklerdeki prototipler için Reynold sayısı hesapları. 31
Çizelge 2.7 : Tekrarlamalı ağırlık tahmin algoritmasi için ilk ağırlık tahmini. 44
Çizelge 2.8 : Uçuş görevleri için gerekli enerjiler. 45
Çizelge 2.9 : Mevcut batarya teknolojisi. 45
Çizelge 2.10: TURAÇ DİKY İHA ağırlık dağılımı. 46
Çizelge 2.11: Farklı faydalı yük ağırlıkları için azami kalkış ağırlığı hesaplamaları. 47
Çizelge 2.12: Optimum pervane alanları oranı. 49
Çizelge 2.13: TURAÇ DİKY İHA Boyutlandırma sonuçları. 50
Çizelge 2.14: TURAÇ DİKY İHA performans sonuçları. 54
Çizelge 3.1 : TURAÇ DİKY İHA yapısal analiz sonuçları. 57
Çizelge 3.2 : Mekanik özellikler. 57
Çizelge 3.3 : Kullanılan sonlu eleman tipleri ve sayıları 59
Çizelge 3.4 : Fan bölümü açık ve kapalı HAD analiz sonuçları. 74
Çizelge 4.1 : Tam ölçekli TURAÇ DİKY İHA itki hesapları. 76
Çizelge 4.2 : Turnigy CA120-70 brushless outrunner özellikleri. 77
Çizelge 4.3 : 1/2-Ölçekli TURAÇ DİKY İHA itki hesapları. 79
Çizelge 4.4 : 1/2-ölçekli TURAÇ DİKY İHA motor, pervane ve ESC seçimleri. 79
Çizelge 4.5 : 1/3-ölçekli model itki hesapları. 80
Çizelge 4.6 : 1/3-ölçekli model motor, pervane ve ESC seçimleri. 80
Çizelge 4.7 : İtki test düzeneği parçaları. 85
Çizelge 5.1 : Askı uçuşundan ileri uçuşa geçiş senaryosu için kuvvet ve moment katsayıları. 104
Çizelge 5.2 : Üçüncü senaryo için kuvvet ve moment katsayıları. 109
Çizelge 5.3 : Askı durumuna geçiş senaryosu için kuvvet ve moment katsayıları. 110
Çizelge 6.1 : Gaz sensörleri ve hassasiyetleri. 142
Çizelge 7.1 : Üretim yöntemleri karşılaştırması 150
Çizelge 8.1 : Prototip ve test uçuş sayıları. 158
Çizelge 8.2 : TURAÇ DİKY İHA test uçuşları kayıt şablonu 163

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : ABD Sivil ve Ticari İHA pazarı gelir tahmini (2008-2017) [1]. 5
Şekil 1.2 : Avrupa sivil ve ticari İHA pazarı (2008-2020) [1]. 5
Şekil 1.3 : Avrupa sivil ve ticari İHA pazar dağılımı (2008-2017) [1]. 6
Şekil 2.1 : Dikey iniş kalkış yapabilen (DİKY) İHA konsepti..... 16
Şekil 2.2 : TURAÇ DİKY İHA görev profili. 16
Şekil 2.3 : TURAÇ DİKY İHA'nın tasarım konsepti: (a) Seyir uçuşunda. (b) Havada askı durumunda. 17
Şekil 2.4 : TURAÇ DİKY İHA değişebilen portatip kanat konsepti. 18
Şekil 2.5 : Dünyadaki DİKY İHA'ların azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük karşılaştırması. 20
Şekil 2.6 : Dünyadaki DİKY İHA'ların uçuş süresi ve menzil karşılaştırması. ... 20
Şekil 2.7 : Dünyadaki DİKY İHA'ların ortalama hız karşılaştırması..... 20
Şekil 2.8 : Büyük sistemler için azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük karşılaştırması. 21
Şekil 2.9 : Büyük sistem İHA platformları ortalama hız ve tavan irtifası karşılaştırması. 22
Şekil 2.10 : Türkiye'deki mini İHA'lar azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük ağırlıkları. 22
Şekil 2.11 : Türkiye'deki mini İHA'lar menzil ve uçuş süreleri. 23
Şekil 2.12 : Türkiye'deki mini İHA'lar ortalama hızları. 23
Şekil 2.13 : TURAÇ DİKY İHA tasarım süreci. 24
Şekil 2.14 : TURAÇ DİKY İHA konfigurasyon seçimleri. 27
Şekil 2.15 : TURAÇ DİKY İHA iniş takımı ve faydalı yük bölmesi..... 27
Şekil 2.16 : TURAÇ DİKY itki konfigurasyonu. 28
Şekil 2.17 : TURAÇ DİKY İHA gerekli itkinin rotarlar arasında paylaşımı. 29
Şekil 2.18 : TURAÇ DİKY itki ve yönlendirme mekanizması. 29
Şekil 2.19 : Farklı ölçeklerdeki prototipler için Reynold sayısı grafiği. 31
Şekil 2.20 : Kanat kısmı için kullanılan NACA 34112 profilinin analizleri. 32
Şekil 2.21 : Gövde kısmı için kullanılan NACA 54115 profilinin analizleri. 32
Şekil 2.22 : Gövde merkez profili için karşılaştırılan EPPLER 340 ve MH92 profilleri..... 33
Şekil 2.23 : EPPLER 340 ve MH92 profillerinin 1.000.000 Reynold sayısındaki karşılaştırması. 34
Şekil 2.24 : Gövde merkez profili için EPPLER 340 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi. 34
Şekil 2.25 : Gövde merkez profili için MH 92 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi. 35

Şekil 2.26 : Tak-çıkar kanat kısmı için karşılaştırılan FAUVEL 14 ve MH 78 profilleri..... 36
Şekil 2.27 : FAUVEL 14 ve MH78 profillerinin 1.000.000 Reynold sayısındaki karşılaştırması. 36
Şekil 2.28 : Tak-çıkar kanat kısmı profili için FAUVEL 14 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi. 37
Şekil 2.29 : Tak-çıkar kanat kısmı profili için MH 78 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi. 37
Şekil 2.30 : MH 92 kanat profili için farklı Reynold sayılarında 2D analiz sonuçları. 38
Şekil 2.31 : MH 78 kanat profili için farklı Reynold sayılarında 2D analiz sonuçları. 38
Şekil 2.32 : TURAÇ V5 versiyonu için XFLR5 ortamında oluşturulan 3D modeli. 39
Şekil 2.33 : TURAÇ V5 versiyonu XFLR5 ortamında elde edilen 3D analiz sonuçları. 40
Şekil 2.34 : TURAÇ V5'in 20 m/s uçuş hızı ve 5,5 derece hücum açısı için 3D aerodinamik analiz sonuçları. 40
Şekil 2.35 : TURAÇ V5'in uçuş denge koşulları için gerçekleştirilen 3D aerodinamik analiz sonuçları. 41
Şekil 2.36 : TURAÇ DİKY İHA tekrarlamalı ağırlık tahmin algoritması. 42
Şekil 2.37 : DİKY uçaklar için tarihsel olarak W_e/W_0 verisi. 43
Şekil 2.38 : Ağırlıklar için tekrarlama hatası. 46
Şekil 2.39 : W_e/W_o oranının W_o ile değişimi. 47
Şekil 2.40 : TURAÇ DİKY İHA iç yerleşimi. 49
Şekil 2.41 : HAD sonuçları ve itki testlerine göre performans hesaplamaları. 51
Şekil 2.42 : Geleneksel uçuş için gerekli ve ulaşılabilir itki. 52
Şekil 2.43 : Geleneksel uçuşta gerekli ve ulaşılabilir güç. 53
Şekil 2.44 : Fazla itki ve güç 53
Şekil 3.1 : Yapısal analiz akış şeması. 56
Şekil 3.2 : TURAÇ DİKY İHA kanat gövde bağlantısı. 56
Şekil 3.3 : TURAÇ DİKY İHA sonlu elemanlar ağı. 57
Şekil 3.4 : TURAÇ DİKY İHA 1. eğilme modu. 58
Şekil 3.5 : TURAÇ DİKY İHA 1. dönme modu. 58
Şekil 3.6 : TURAÇ DİKY İHA 2. eğilme modu. 58
Şekil 3.7 : Maksimum asal gerilme. 59
Şekil 3.8 : TURAÇ DİKY İHA katı modeli. 60
Şekil 3.9 : Yapısal olmayan kütleler. 60
Şekil 3.10 : HAD analizi - basınç dağılımı. 60
Şekil 3.11 : Yapısal modele entegre edilen aerodinamik yükler. 61
Şekil 3.12 : Uçak üzerinde yer değiştirme dağılımı. 61
Şekil 3.13 : Ana kiriş boyunca düşey doğrultuda yer değiştirme dağılımı. 62
Şekil 3.14 : Maksimum asal gerilmeler. 62
Şekil 3.15 : Minimum asal gerilmeler. 62
Şekil 3.16 : Sandviç kompozit yapıların analizleri için C # dilinde geliştirilen programın arayüzü. 64

Şekil 3.17 : Yüzey kırışması problemi. 65
Şekil 3.18 : Hücre içi burkulma problemi. 66
Şekil 3.19 : Uçak üzerinde yer değiştirme dağılımı (mm). 67
Şekil 3.20 : Tsai Wu kırılma indisi dağılımı. 67
Şekil 3.21 : Sandviç kompozit bölge kırılma indisi dağılımı (üstten). 68
Şekil 3.22 : Sandviç kompozit bölge kırılma indisi dağılımı (alttan). 68
Şekil 3.23 : Program veri girişi arayüzü. 70
Şekil 3.24 : Program arayüzü – uçak geometrisi. 70
Şekil 3.25 : Program çıktıları. 70
Şekil 3.26 : TURAÇ DİKY İHA modelleri. 71
Şekil 3.27 : Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$ akım çizgileri. 71
Şekil 3.28 : Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$ akım çizgileri. 72
Şekil 3.29 : Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ uçak yüzeyi statik basınç dağılımı. 72
Şekil 3.30 : Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız vektörleri. 72
Şekil 3.31 : Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız kontörleri. 73
Şekil 3.32 : Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız kontörleri. 73
Şekil 3.33 : Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız vektörleri... 73
Şekil 3.34 : Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$, hız vektörü dağılımı. 74
Şekil 4.1 : Ana taşıyıcı motor: TURNIGY CA120-70 brushless outrunner. 76
Şekil 4.2 : Ana taşıyıcı pervanesi: Tmotor 26x8.5 inch karbon fiber pervane. 77
Şekil 4.3 : Ana itki sistemi ESC: TURNIGY FATBOY 300A. 78
Şekil 4.4 : Ön taşıyıcı motoru: Tmotor U11. 78
Şekil 4.5 : Ön taşıyıcı pervane: Tmotor 18 inch pervane. 78
Şekil 4.6 : Ön taşıyıcı ESC: Tmotor 70A. 79
Şekil 4.7 : İtki-test düzeneği. 81
Şekil 4.8 : İtki testi değerlendirme şeması. 82
Şekil 4.9 : İtki testi ve simülasyon sonuçları. 82
Şekil 4.10 : İtki test sistemi sensör okuyucu ve dijital bilgiye çeviren ana kart yapısı. 83
Şekil 4.11 : Geliştirilen ana test elektronik devresi. 83
Şekil 4.12 : Üzerine entegre edilmiş fırçasız elektrik motoru ve pervanesi ile komple sistem. 83
Şekil 4.13 : Motor ve pervane grubu ile yapılan test sonuçları. 84
Şekil 4.14 : İtki test düzeneği sistem arayüzü. 84
Şekil 4.15 : Sistem CAD tasarımı ve detay parçaları. 85
Şekil 4.16 : 3D basım tasarımı felsefesiyle tilt mekanizması tasarımı. 86
Şekil 4.17 : 1/3-ölçekli model için tasarlanan tilt mekanizması. 87
Şekil 4.18 : TURAÇ DİKY İHA üzerinde tilt mekanizması -1. 88
Şekil 4.19 : TURAÇ DİKY İHA üzerinde tilt mekanizması -2. 88
Şekil 5.1 : Dünya ve gövde eksen takımı. 91
Şekil 5.2 : Rotorların oluşturduğu kuvvet, moment ve bazı geometrik boyutları. 93
Şekil 5.3 : Havada askı durumundan ileri uçuşa geçişte TURAÇ üzerinde oluşan kuvvet ve momentler. 93

Şekil 5.4 : TURAÇ DİKY İHA üzerinde pervane etkisi. 95
Şekil 5.5 : Tilt açısıyla etkinlik katsayısının değişimi..... 96
Şekil 5.6 : Tilt açısı değişiminin uçağa etkisi..... 99
Şekil 5.7 : 12x6 sabit hatveli pervane için hava hızı - itki grafiği. 101
Şekil 5.8 : Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin taşıma katsayısı C_{L_s}. 102
Şekil 5.9 : Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin sürükleme katsayısı C_{D_s}. 102
Şekil 5.10 : Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin taşıma katsayısı C_{m_s}. 103
Şekil 5.11 : İleri uçuş rejimde HAD analizi için yarı TURAÇ DİKY İHA modeli. 103
Şekil 5.12 : TURAÇ DİKY İHA üzerinde oluşan statik basınç dağılımı..... 104
Şekil 5.13 : TURAÇ DİKY İHA C_L - α grafiği. 105
Şekil 5.14 : TURAÇ DİKY İHA C_D - α grafiği..... 106
Şekil 5.15 : TURAÇ DİKY İHA C_m - α grafiği..... 106
Şekil 5.16 : TURAÇ DİKY İHA geçiş rejiminde akış çizgileri. 107
Şekil 5.17 : Geçiş rejiminde TURAÇ DİKY İHA üzerinde oluşan statik basınç dağılımı. 107
Şekil 5.18 : Tüm uçuş rejimlerini içeren doğrusal olmayan dinamik modelin genel blok diagramı..... 111
Şekil 5.19 : Havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) algoritması. 112
Şekil 5.20 : Uçuş benzetimi sürecinde hava süratındeki değişimi. 114
Şekil 5.21 : Uçuş benzetimi sürecinde irtifadaki değişim. 115
Şekil 5.22 : Uçuş benzetimi sürecinde tilt açısındaki değişim. 116
Şekil 5.23 : Uçuş benzetimi sürecinde yunuslama açısındaki değişim. 117
Şekil 5.24 : Geçiş manevrasının test edilmesi. 118
Şekil 6.1 : TURAÇ DİKY İHA uçuş kontrol sistemi genel sistem diagramı. 120
Şekil 6.2 : TURAÇ DİKY İHA uçuş kontrol bilgisayarı. 121
Şekil 6.3 : Çevre bağlantı portlarıyla uçuş kontrol bilgisayarı. 121
Şekil 6.4 : TURAÇ DİKY İHA görev yönetim bilgisayarı. 122
Şekil 6.5 : INS/IMU modülü. 123
Şekil 6.6 : Uçağı manuel olarak kontrol etmek için uzaktan komuta birimi. 123
Şekil 6.7 : TURAÇ DİKY aviyonik sistemi. 124
Şekil 6.8 : TURAÇ DİKY İHA genel kontrol diyagramı. 125
Şekil 6.9 : Genel kontrol diyagramı ve frame geometri 126
Şekil 6.10 : Güç yönetim sistemi kart çizimi 127
Şekil 6.11 : Yer istasyonu ve waypoint testine başlama. 128
Şekil 6.12 : 2 numaralı waypoint. 128
Şekil 6.13 : Eve dönüş testi. 128
Şekil 6.14 : Uçuş sırası alınan veriler. 129
Şekil 6.15 : Örnek TDF ekran görüntüsü. 130
Şekil 6.16 : Görev planlama penceresi. 131
Şekil 6.17 : Yer kontrol istasyonu ekran görüntüsü. 132
Şekil 6.18 : 5.8 Ghz. video alıcı verici sistemi. 133
Şekil 6.19 : Canlı video görüntüleme ekranı. 133
Şekil 6.20 : Video yakalama cihazı. 133

Şekil 6.21 : Görev sonrası analiz ekranı. 134
Şekil 6.22 : Parametre yollama protokolü. 136
Şekil 6.23 : Rotanın araç üstünden yer istasyonuna iletilmesi. 137
Şekil 6.24 : Yeni rotanın yer istasyonundan araca gönderimi. 137
Şekil 6.25 : Rota değerini sıfırlama. 138
Şekil 6.26 : Multispektal uydu görüntüsü - 01. 141
Şekil 6.27 : Multispektal uydu görüntüsü - 02. 141
Şekil 6.28 : Multispektal uydu görüntüsü - 03. 142
Şekil 6.29 : Faydalı yük iletişim şeması. 143
Şekil 7.1 : TURAÇ 1/3-ölçekli prototip genişletilmiş görünüm ve malzemeler. . 146
Şekil 7.2 : Prototipler: a) İleri uçuş için 1/3-ölçek. b) İleri uçuş için 1/2-ölçek. c) DİKY için 1/2-ölçekli. d) İleri uçuş için 1/2-ölçek. e) İleri uçuş için 1/3-ölçek. 147
Şekil 7.3 : 1/2-ölçek TURAÇ prototip imalat süreci. 148
Şekil 7.4 : Üretim adımları: a)Alüminyum güçlendirme üretimi. b) CNC'de köpük işleme. c) Alüminyum yapı ve köpük yapıştırma işlemi. d) Kompozit kaplama ve yüzey düzeltme. e) Kontrol yüzeylerinin kesilmesi. f) Boyama işlemi. g) Alt sistem entegrasyonu. h) Sistem kontrolleri. 149
Şekil 7.5 : FDM teknolojisi kullanılarak yapılan 1/3-ölçekli prototip tilt mekanizması 3D basımı. 152
Şekil 7.6 : Ön iniş takımı ana yatak elemanı. 153
Şekil 7.7 : Ön iniş takımı tekerlek bağlantısı. 154
Şekil 7.8 : Arka iniş takımı bağlantı parçası. 154
Şekil 7.9 : 1/3 ölçekli model için tasarlanan motor yatağı. 155
Şekil 8.1 : 1/3-ölçekli TURAÇ DİKY İHA prototipi. 159
Şekil 8.2 : Yer testleri şeması. 160
Şekil 8.3 : İtki test düzeneği. 160
Şekil 8.4 : 1/2-ölçek prototip hava aracı için test sonuçları. 161
Şekil 8.5 : Trikopter test aracı. 162
Şekil 8.6 : Trikopter test aracı ile yapılan uçuşlar. 162
Şekil 8.7 : 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı ileri uçuş testi. 164
Şekil 8.8 : 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı dikey iniş ve kalkış testi. 164
Şekil 8.9 : 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı askı uçuşundan ileri uçuşa (ve tersi) geçiş testi. 165

DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN SABİT KANATLI İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIM, ÜRETİMİ VE UÇUŞ TESTLERİ

ÖZET

Son 40 yıldır yüksek kapasiteli insansız hava araçları, günümüzde daha çok askeri alanda takip, gözetleme, aktif silahlı angajman veya en basit manada veri toplama amacıyla kullanılmaktadır. İnsanlı sistemlere göre düşük üretim ve işletme maliyeti, müşteri ihtiyaçlarına göre uçağın düzenlenebilme esnekliği, zor görevlerde pilotu kaybet riskinin olmaması ticari anlamda da insansız hava araçlarını talep doğurmakla beraber halen insanlı uçuş hava sahasına entegrasyonu, güvenilirliği ve uçuş güvenliği anlamında açık noktalar vardır.

Sivil amaçlı insansız hava araçları toplam araç pazarının %3'ünü oluşturmasına rağmen, önümüzdeki 5 yıl içinde bunun %10 seviyesine geleceği tahmin edilmektedir. İHA sistemleri üzerlerine takılan faydalı yükler (kamera, hiperspektral görüntüleyici, hava ölçüm sensörleri ve bunun gibi cihazlar) ile beraber

- Tarım/orman/deniz kirliliği/atık takip ve izleme
- Afet durumlarında takip ve izleme
- Tapu ve kadastro amaçlı haritalama
- Yaban hayatı ve ekolojik izleme
- Yerbilim ve Maden Çalışmalar
- Trafik İzleme

gibi birçok sivil uygulamada gün geçtikçe daha fazla yer bulmakta, ve daha önce insanlı hava araçları kullanımının riskli ve maliyetli olduğu birçok sivil uygulamada, minimal risk faktörü ve maliyet ile hava aracının getirdiği avantajları sunabilmektedir.

Askeri amaçlı tasarlanan ve üretilen insansız hava araçlarının maliyetlerinin yüksekliği göz alındığında, sivil kullanım marketi kendi tip uygulamalarına yönelik, daha düşük maliyetli ve özgün ürünleri istemektedir. Özellikle yukarıda not edilen uygulamaların çoğu limitli kalkış iniş pisti barındıran, mobil uygulamalara yönelik, operasyon bölgesi içinde hızlı hareket edebilen ama gereken durumlarda havada askıda kalarak kısa da olsa durağan ölçüm ve takip yapabilecek bir araç gerektirmektedir. Aynı zamanda böyle bir sistemin bir çok farklı sivil uygulama için uygulanabilirliği/çevrilebilirliği manasında maliyet etkin bir çözüm olması gerekmektedir. Bu da uygulama konseptine bağlı olarak faydalı yük sistemlerinin rahat bir şekilde takılıp çıkartılabildiği ve operasyon ayağının (düz uçuş ve havada askıda kalma sürelerinin) uygulamaya özel programlanabildiği bir hava aracı anlamına gelmektedir.

Bu tez kapsamında yukarıda belirtilen hususlar göz önünde tutularak, doğada dikey olarak uçuşlar yapan TURAÇ kuşundan esinlenerek TURAÇ DİKY İHA sistemi adını verdiğimiz insansız hava aracının tasarım, üretim ve uçuş testleri Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Sanayi Tezleri (San-Tez) programı desteğiyle ele alınmıştır.

Önerilen İHA sisteminde, gövdede koaksiyel ana taşıyıcı ve önde tilt edebilen 2 rotor bulunmaktadır. Bu konfigurasyon yapısıyla helikopter gibi dikey iniş kalkış yapabilme, havada askıda kalma görevlerini yerine getirebildiği gibi aynı zamanda sabit-kanatlı bir İHA sisteminin yüksek ileri hız kapasitesine sahiptir. Tak-çıkart kanat yapısının sunduğu farklı büyüklüklerdeki kanatlar ile kullanılabilme özelliği sayesinde farklı uçuş görevleri tek bir gövde ile yerine getirilebilmektedir. Tak-çıkart özelliği aynı zamanda hava aracına kolay paketlenebilme ve taşınabilme özelliğini kazandırmaktadır. Uçan kanat konfigurasyonu ile aerodinamik verimlilik ve faydalı yük için daha fazla hacim sağlanmıştır.

Tez kapsamında, TURAÇ DİKY İHA'nin tasarım süreci, yapısal ve aerodimik analizleri içeren sistem mühendisliği, itki sistemlerinin geliştirilmesi ve test edilmesi, simulasyon ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, uçuş kontrol sistemi, uçuş yönetim bilgisayarı, faydalı yük sistemleri yazılım ve donanım geliştirmeleri,ucuz maliyetli bir hızlı prototiplendirme yöntemi, ve uçuş testleri konuları ele alınmıştır.

Tasarım çalışmalarında tekrarlamalı bir yöntem takip edilmiştir. Analiz ve test sonuçlarına göre tasarım iyileştirmeleri yapılmıştır. Detay parçaların tasarımı ve analizi gerçekleştirilirken tüm sistemin verimliği göz önünde bulundurularak yapısal ve aerodinamiksel analizler gerçekleştirilmiştir. TURAÇ DİKY İHA'nın özgün itki konfigurasyonu sayesinde hem enerji en etkin bir şekilde kullanılmış hem de üçlü rotor sisteminde bir dengeleme problemi yaşanmamıştır. Geliştirilen ve üretilen itki-test düzeneğiyle motor-pervane-ESC kombinasyonlarının testleri ve simulasyonları gerçekleştirilmiştir. TURAÇ DİKY İHA'nın doğrusal ve doğrusal olmayan dinamik modellleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ve girdap kafes yöntemi (GKY) kullanılarak elde edilen aerodinamik katsayılar ile oluşturulmuştur. TURAÇ DİKY İHA'nın havada askıda kalma uçuşundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) senaryoları oluşturulup analiz edilmiştir. Bu senaryolar doğrultusunda uçuş kontrol sistemleri geliştirilmiştir ve havada askıda durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) için uçuş simulasyonları başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Havada askıda kalma uçuşu, havada askıda kalma durumundan ileri uçuşa geçişi otonom olarak sağlayacak kontrol sistem tasarımları ve bunların gömülü yazılımları geliştirilmiştir. Aviyonik sistemler yazılım ve donanım seviyesinde geliştirilmiştir. Geliştirilen yer istasyonu sistemi görev planlama modülü, canlı kontrol modülü, telemetri veri alma ve kaydetme modülü, yeniden oynatma modülü bulundurmaktadır. Yer istasyonuna gerçek zamanlı olarak video görüntüsü aktarılabilmektedir. Multi-spektral kamera görüntülerinin analizi gerçekleştirilmiştir.

Ucuz maliyetli ve hızlı bir prototipleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak üretilen farklı TURAÇ İHA versiyonları uçuş testlerinde kullanılmıştır. Her bir versiyonun uçuş performansı tekrarlamalı tasarım sürecinin bir girdisi olmuş ve bir sonraki versiyonu belirlemiştir. Trikopter modundaki kanatsız TURAÇ DİKY İHA ile otonom iniş kalkış, rota takibi gibi otonom uçuşlar yapılırkan, 1/2 ve 1/3-ölçekli TURAÇ DİKY İHA'lar ile ileri uçuş, hava askıda kalma uçuşu, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş testleri manuel ve otonom olarak başarı ile gerçekleştirilmiştir.

DESIGN, MANUFACTURING AND FLIGHT TESTS OF A FIXED-WING VERTICAL TAKE-OFF AND LANDING UNMANNED AIR VEHICLE

SUMMARY

For the last 40 years, high capacity unmanned air vehicles have been used mostly for the purpose of tracking, observation, active engagement with weapons or simply for data collection in the military field. Although unmanned air vehicles commercially receive demands due to their low production and operational costs compared to manned systems, flexibility to modify the aircraft for the customer needs and non-presence of the risk to lose the pilot in difficult missions, there are still missing points in terms of integration into the manned flight air space, reliability and flight safety.

Even though civil unmanned air vehicles constitute 3 % of the total vehicle market, it is predicted that this rate will reach up to 10% within the coming 5 years. Together with the useful loads that are attached on the UAV systems (camera, hyper spectral imager, air measurement sensors and with similar instruments), many implementations such as

- Tracking and monitoring agriculture / forest / marine pollution / waste
- Tracking and monitoring in case of disasters
- Mapping for land registry and cadastre
- Wildlife and ecologic monitoring
- Geology and Mine Researches
- Traffic Monitoring

are performed more often day by day and the advantages brought by the air vehicle can be presented with the minimal risk factor and costs in many civil implementations, during which the usage of manned air vehicles was risky and costly.

When the costs of unmanned air vehicles designed and produced for military service are taken into account, civil market demands lower cost and original products which are suitable for civil implementations. Most of the implementations which are mentioned above require vehicles that are able to take off and land on limited runway, and moreover, move quickly in the operation region for mobile implementations but hover for immobile measurement and tracking when necessary. Meanwhile, a cost-effective solution is needed in respect of the applicability / convertibility of such a system for many different civil and commercial implementations. It means an air vehicle which has easily detachable useful loads depending on the implementation concept and programmability of the operational area (their forward flight and hovering time) according to the implementation.

Considering the abovementioned issues within the scope of this thesis, the design, production and flight tests of the unmanned air vehicle, which we call TURAÇ VTOL UAV through the inspiration for FRANCOLIN (TURAÇ) that vertically flies in the

nature, were handled with the industrial theses support program (San-Tez) of the Ministry of Science, Industry and Technology.

The suggested UAV system has the co-axial main rotor in the body and 2 tilt rotors at the front. Together with this configuration structure, it can complete its vertical take-off and landing and hovering missions like a helicopter and it has the same capacity of high forward velocity as that of a fixed-wing UAV system. Thanks to its usability with different sized wings presented by the detachable wing structure, different flight missions can be accomplished with a single body. The detachability characteristic also provides the air vehicle with the easy packaging and mobility feature. More volume is provided for the aerodynamic efficiency and useful load with the blended wing configuration.

Within the scope of the thesis, the design process of the TURAC VTOL UAV, system engineering including structural and aerodynamic analyses, development and testing of propulsion systems, development of simulation and control algorithms, flight control system, flight management computer, useful load systems, software and hardware developments, low-cost rapid prototyping method and flight tests subjects were discussed.

Firstly the motivation that drive us to design such an UAV was presented. For a competitive UAV design, similar designs were investigated. Possible problems that we can face were determined. The features and advantages of the concept of the TURAC VTOL UAV were explained. Especially the unique propulsion concept that differs from other UAVs was presented. An iterative method was followed in designing studies. Design modifications were conducted according to the analysis and test results.

While designing and analyzing the detailed parts, structural and aerodynamic analyses were performed considering the efficiency of the whole system. Thanks to the original propulsion configuration of the TURAC VTOL UAV, both the energy was used in the most efficient way and no balance problems occurred in the triple rotor system. Engine-propeller-ESC combinations were tested and simulated with the developed and produced thrust test bench. Linear and non-linear dynamic models of TURAC VTOL UAV were created with the aerodynamic coefficients obtained by means of the computational fluid dynamic (CFD) and vortex lattice method (VLM). Scenarios for the TURAC VTOL UAV's transition from the hover to the forward flight (and reverse) were formed and analyzed. In line with these scenarios, flight control systems were developed and the flight simulations were successfully accomplished for the transition from the hover to the forward flight (and reverse).

Control system designs and their embedded softwares were developed to enable hovering and autonomous transition from the hover to the forward flight. Avionic systems were developed as software and hardware. The developed ground station system includes the mission planning module, live control module, telemetrical data reception and recording module and playback module. Real-time video images can be transmitted to the ground station. Multispectral camera images were analyzed.

A cost-effective and quick prototyping method was explained step by step. Different TURAC versions produced by means of this method were used in flight tests. Flight performance of each version became an input of the iterative design process and determined the next version. While autonomous flights such as autonomous landing

and take-off and route tracking were performed with the wingless TURAC VTOL UAV in the tricopter mode, the forward flight, hovering tests and transition from the hover to the forward flight were successfully completed on manual and autonomous basis with 1/2 and 1/3 scaled TURAC VTOL UAVs.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının konusu TURAÇ DİKY İHA adını verdiğimiz dikey iniş kalkış yapabilen insansız hava aracı (DİKY İHA) sistemidir. Bu bölümde bizi böyle bir çalışmaya yapmaya sevk eden etmenler, bu alanda şimdiye kadar yapılmış çalışmalar, karşılaşılan genel zorluklar ve çözüm önerimiz özetle sunulmuştur. Son olarak çalışmanın tertibinden bahsedilmiştir.

1.1 Motivasyon

İnsansız hava araçları (İHA) kullanım amacı olarak geniş bir alana sahiptir. En yaygın olarak savunma alanında kullanılırlar. Askeri kullanım olarak, takip, gözetleme, havadan veri toplama ve havadan silahlı saldırı gibi örnekler verilebilir. İHA'lar insanlı hava araçlarına göre avantajlarından dolayı ticari olarak da talep edilmektedir. Bu avantajların bir kaçı, düşük üretim ve operasyon maliyeti, müşteri isterlerine bağlı olarak konfigürasyon değişikliği yapabilme esnekliğive görevlerde pilotun hayatını riske atmamak olarak sıralanabilir [2]. Bütün bu avantajlara rağmen İHA sistemlerinin sivil alanda insanlı uçuş hava sahasına entegrasyonu, sertifikasyon, güvenilirlik ve uçuş emniyeti gibi kriktik konular çözüm beklemektedir.
Sivil amaçlı İHA'lar toplam İHA pazarının %3'unu oluştursa da, önümüzdeki 5 yıl içinde toplam pazarın %10'unu oluşturacağı öngörülmektedir [3].

Hiperspektral görüntüleyici, hava bileşimi sensörleri ve benzer çevresel teçhizat ile donatılan İHA'lar sivil alanda kendilerine yeni uygulama alanları bulmuştur:

- Tarım/orman/deniz kirliliği/atık takip ve izleme [4],
- Afet durumlarında takip ve izleme [4],
- Tapu ve kadastro amaçlı haritalama [5],
- Yaban hayatı ve ekolojik izleme [6],
- Trafik İzleme [7],
- Yerbilim ve Maden Çalışmaları

- Gaz kaçağı izleme [8],
- Bitki örtüsü izleme [9–11] ,
- Bitki ve orman türlerinin belirlenmesi [12, 13],
- İklim değişikiliği çalışmaları [14],
- Çevreye verilen zararların takip edilmesi [15]

Bunun yanı sıra, bilimsel araştırmalar, taşıma, uzaktan algılama, arama ve kurtarma vb. pek çok alanda kullanılmaktadırlar. İHA'lar sivil uygulama alanlarında görece daha riskli ve maliyetli olan insanlı uçuşlara düşük risk ve maliyet avantajına sahiptir. Kullanım alanlarına ve gövde tiplerine göre çeşitili İHA çeşitleri vardır:

- Sabit kanatlı İHA'lar [4]
- Havadan hafif İHA'lar [4]
- Geleneksel olmayan İHA'lar (Quadrotor ve diğerleri) [4]
- Dikey iniş kalkış İHA'lar [4, 16]
- Döner kanat İHA'lar [4, 16]
- Tilt-rotor / Tilt-kanat [16]
- Kuyruğa oturan (Tail-sitter) [16]
- İtki yönlendiren İHA'lar [16]

İnsansız Hava Aracı (İHA) pazarı 2008 yılından beri dünya havacılık sektörünün en hızlı büyüyen parçası olmuş, 50'ye yakın ülke İHA üretimlerinde yer almıştır. Dünyada en önemli İHA üreticisi firmalar Northrop Grumman Corporation, BAE Systems, General Atomics Aeronautical Systems, Honeywell Aerospace, Qinetiq, ve Israel Aerospace Industries (IAI) olarak sıralanabilir. Savunma, güvenlik, acil durum, trafik kontrol, tarım alanları, deniz kirliliği gibi yer gözlem ihtiyaçları için İHA'ların kullanımı giderek artmaktadır.

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Irak ve Afganistan savaşlarında 1000'den fazla İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanmış, bu bölgelerde 2010 yılında aylık ortalama 25.000 saat uçuş gerçekleştirmiştir. ABD'nin askeri kullanımda başı çektiği İHA'ların sivil ve ticari pazarının askeri pazara göre daha hızlı büyüyeceği yapılan araştırmaların ortak sonucudur. İHA sistemleri artık sadece askeri havacılığın değil tüm havacılığın ilgilendiği bir alan durumundadır. Gelecek dönem için

sivil İHA kullanımının askeri kullanımdan daha fazla öneme sahip olacağı tahmin edilmektedir. Sivil kullanımda alçaktan uçması gereken uçakların, uçuş operatörlerinin can güvenliğini sağlamak ve uçuşa hazırlık süresini azaltmak için gelecekte İHA'larla yer değiştirmesi beklenmektedir. Hükümetlerin savunma bütçelerinde kesintiler yapmaları da firmaların sivil İHA sektörüne yönelmesini ve potansiyelini arttırmasını sağlamaktadır.

Sivil İHA sektörü yavaş yavaş gelişmektedir, 2015 yılı itibariyla hava sahası entegrasyonu için düzenleyici kuralların koyulacağı, güvenliği ve uçuşa elverişliliği sağlayacak olan "hisset ve kaçın" çarpışma önleme sistemi gibi yeni teknolojilerin gelişeceği ve hızla büyüyen bir sektör durumuna geleceği tahmin edilmektedir. Özellikle ABD'de ve Avrupa'da sivil İHA kullanımının yaygınlaştırılmasına yönelik bilimsel çalışmalar devam etmektedir. 23 Ocak - 17 Şubat 2012 tarihlerinde İsviçre'nin Cenevre kentinde gerçekleştirilen Dünya Radyokomünikasyon Konferansı'nda (WRC) alınan İHA'lara tahsis edilen frekans bandının genişletilmesi kararı, İHA'ların sivil ve ticari alanda kullanımını hızla arttıracağını göstermektedir. European Defence Agency (EDA) da İHA'lara ayrılacak olan RF spektrum alanlarını belirlemek için çalışmaktadır. ABD Başkanı Barack Obama'nın 14 Şubat 2012 tarihinde onayladığı 658 numaralı kanun da İHA'ların ABD havasahasına entegrasyonu ve sivil - ticari kullanımın genişlemesi yolunda önemli bir adım olacaktır, bu kanun ile ABD Kongresi Federal Aviation Administration'a (FAA) 30 Eylül 2015'e kadar İHA'ların ABD hava sahasına tam entegrasyonunu sağlama görevi vermiştir. AB Komisyonu 2007 yılında INOUI (Innovative Operational UAS Integration) projesini hayata geçirerek, Single European Sky ATM Research (SESAR) projelerinde İHA'ların Avrupa havasahasında nasıl güvenle kullanılabileceğini araştırmaya başlamıştır. Komisyona göre İHA'ların kullanım potansiyelinin artırılması için 5 madde sıralanmıştır:

1. İHA pazarının iyi anlaşılması ve muhtemel kullanım alanlarının araştırılması
2. Ülkelerin havacılık alanındaki mevzuatlarından kaynaklanan karmaşık durumların aşılması
3. Sivil-asker sinerjisinin yaratılması ve yenilikçi çözümler bulunması
4. Havasahası kullanıcılarının tümünün güvenliğinin garanti altına alınması

5. ICAO ve Eurocontrol gibi sivil havacılık otoritelerinin yol haritası hazırlaması

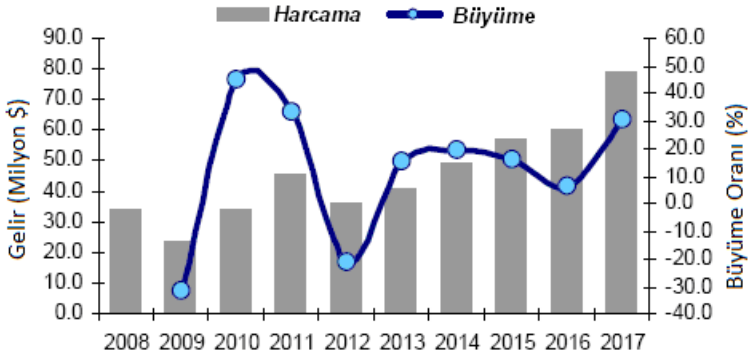
6. Uçuş emniyet kriterlerinin sağlanması için teknolojik çalışmaların devam etmesi

İHA'ların askeri ve sivil kullanım payı arasındaki dengesizlik hükümetlerin düzenleyici havacılık kuralları koymasıyla değişecektir, mevcut durum uçuşa elverişlilik sertifkasına gerek duymayan küçük boyutlu İHA'lar için avantaj yaratmaktadır. Northrop Grumman gibi büyük oyuncular hava tahminleri için kullanılmak üzere İHA'lar geliştirmektedir. Sivil İHA alanında birçok fırsat olmasına karşın uygulamalar hala çok erken bir aşamadadır, yeterli olgunluk seviyesine ulaşmamıştır. Bunun en önemli sebepleri İHA'ların sivil hava sahalarına entegre edilememiş yani insanlı hava araçlarıyla aynı hava sahasını paylaşması konusundaki düzenlemelerin geliştirilememiş olmasındandır. İHA'ların meskun mahaller üzerinde kullanımı ile ilgili sertifikasyonlar ve kuralların uluslararası havacılık otoriteleri ve Sivil Havacılık tarafından düzenlenmesi beklenmektedir, düzenlemelerden sonra sektörün artan bir ivmeyle gelişmesi beklenmektedir. Avrupa için Eurpean Agency Aviation Safety Agency (EASA), Amerika için FAA mevzuat düzenlemeleri için mevcut otoritelerdir.

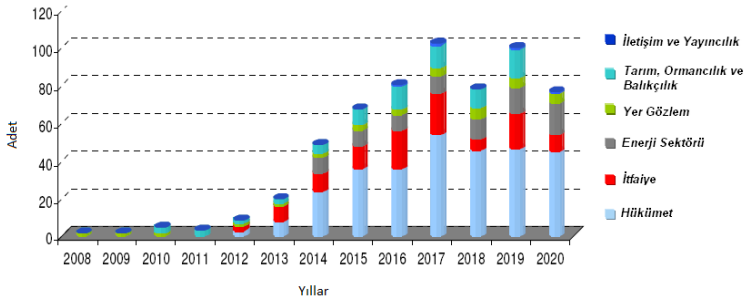
ABD, sivil İHA alanında da askeri alanda olduğu gibi en büyük tüketici durumundadır; anayurt güvenliği, Kanada ve Meksika sınırlarının izlenmesi (Örn. Meksika sınırında 2007 yılında CBP-104 kullanılmıştır), orman yangınları (Örn. 2007 sonlarında yaşanan Kuzey Kaliforniya yangınlarda Ikhana isimli İHA kullanılmıştır, araç elde ettiği duman görüntülerini ve sıcaklık değerlerini yerdeki itfaiye personeline ileterek yangının kontrol altına alınmasını kolaylaştırmıştır), arama-kurtarma (Örn. Katrina Kasırgası'nda Silver Fox kullanılmıştır) alanlarında İHA'lar kullanılmaktadır.

Frost & Sullivan'ın 2008-2017 yılları için ABD pazarına yönelik yaptığı sivil İHA pazar tahmini Şekil 1.1'de verilmiştir.

Avrupa'da ise kaçakçılıkla mücadele, yasadışı göçmenlik ve terörizm alanlarında sivil İHA'lar kullanılmaktadır. Örneğin İngiltere'de, Londra 2012 Olimpiyatları'nda BAE Systems'ın Herti isimli İHA sistemleri modifiye edilerek yer gözetleme amacıyla kullanılacaktır, Fransa ve Yunanistan yangınla mücadelede, İspanya tarımda İHA kullanma konusunda isteklidir. Avrupa İHA pazarında 100'den fazla firma faaliyet göstermektedir, Frost & Sullivan'a göre 2015 yılından sonra yürürlüğe girecek olan yasal mevzuatlardan sonra şirket birleşmeleri ve satınalmaları gerçekleşecektir.



Şekil 1.1: ABD Sivil ve Ticari İHA pazarı gelir tahmini (2008-2017) [1].

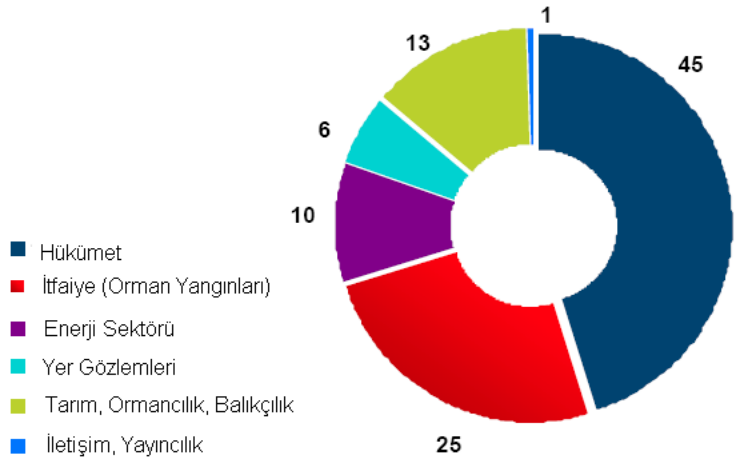


Şekil 1.2: Avrupa sivil ve ticari İHA pazarı (2008-2020) [1].

Asya'ya bakıldığında ise elektrik hatlarının güvenliği ve kaçak balıkçılığın izlenmesi alanları öne çıkmaktadır, Japonya'da tarım sektöründe çeltik tarlalarının zirai ilaçlaması Yamaha RMAX isimli insansız helikopterler ile yapılmaktadır. Avustralya'da deniz memelilerinin göç yolları İHA'lar kullanılarak yapılmaktadır.

Bu kısımda sivil İHA kullanımı hakkında farklı kıtalardan birkaç örnek sıralanmasına rağmen farklı konfigürasyona ve boyuta sahip İHA'lar sayesinde sivil alanda sayısız uygulama geliştirilebileceği ve askeri kullanımın İHA pazarının % 90'ını oluşturmasına rağmen önümüzdeki yıllarda sivil payın büyük bir ivmeyle artacağı gözardı edilmemelidir. Şekil 1.2 ve Şekil 1.3 'te Avrupa sivil-ticari İHA pazarıyla ilgili tahminler görülebilir.

Ülkemiz üç tarafı denizlerle çevrili, dağlık, ormanlık ve sarp arazilerin büyük yer kapladığı, tarım ve hayvanclığın önemli bir geçim sektörü olduğu bir konumdadır. Emniyet, Jandarma, İtfaiye, Sahil Güvenlik, Gıda, Tarım ve Hayvancılık Bakanlığı, Çevre ve Orman Bakanlığı, vb. kurumların sivil İHA'ların başlıca müşterisi olacağı, gelecek dönemde yoğun bir talep yaratacakları tahmin edilmektedir. Ülkemizde yapılabilecek sayısız uygulamalardan bazılarına örnek vermek gerekirse yüksek değere sahip tarım mahsullerinin (üzüm, fındık, kivi, muz vb.) olgunlaşma ve hasat



Şekil 1.3: Avrupa sivil ve ticari İHA pazar dağılımı (2008-2017) [1].

zamanlarının izlenmesi, erezyon ve kuraklık takibi, su baskınları, hastalık teşhisleri, gübreleme gibi tarımsal faaliyetler alçaktan uçan, küçük platformlar kullanılarak yapılabilecek, çiftçilik alanında çok önemli bir maliyet düşüşü ve verim artışı sağlayacaktır. Ülkemizde yaz aylarında sıkça orman yangınları yaşanmaktadır, sarp ve engebeli arazilerde yangına müdahale etmesi gereken yer ekiplerinin insan hayatı riske atılmadan İHA kullanımı sayesinde daha verimli yönlendirilmesi ve yangına müdahale etmesi mümkün olacaktır. Benzer şekilde ülkemiz uluslararası enerji hatları için geçiş sağlayan kilit bir coğrafik konumdadır. Petrol boru hatlarının izlenmesi, kısaca kritik altyapıların güvenliğinin tesis edilmesi, hava, su, toprak kirliliğinin rutin olarak izlenmesi de İHA'lar sayesinde mümkün olacaktır. Örnek verilen ve daha başka birçok alanda ülkemizde sivil İHA pazarının büyük bir potansiyele sahip olduğu açıktır.

Askeri amaçlı tasarlanan ve üretilen insansız hava araçlarının maliyetlerinin yüksekliği göz alındığında, sivil kullanım pazarı kendi tip uygulamalarına yönelik, daha düşük maliyetli ve özgün ürünleri istemektedir. Özellikle yukarıda not edilen uygulamaların çoğu limitli kalkış iniş pisti barındıran, mobil uygulamalara yönelik, operasyon bölgesi içinde hızlı hareket edebilen ama gereken durumlarda havada askıda kalarak kısa da olsa durağan ölçüm ve takip yapabilecek bir araç gerektirmektedir. Bu en ideal manada hibrid bir insansız hava aracı konsepti, yani DİKY İHA anlamına gelmektedir. Aynı zamanda böyle bir sistemin bir çok farklı sivil uygulama için uygulanabilirliği/çevrilebilirliği manasında maliyet etkin bir çözüm gerektirmektedir. Bu da uygulama konseptine bağlı olarak faydalı yük sistemlerinin rahat bir şekilde

takılıp çıkartılabildiği ve operasyon ayağının (düz uçuş ve havada askı sürelerinin) uygulamaya özel programlanabildiği bir hava aracı ihtiyacı anlamına gelmektedir.

Yukarıda belirtilen gelecek öngörüleri ve sivil amaçlı İHA uygulamalarının gereksinimleri göz önünde bulundurularak bu tez kapsamında ana olarak; dikine iniş ve kalkış yapabilen, helikopter benzeri havada asılı kalabilen ancak yüksek düz uçuş hızına sahip sabit kanatlı bir DİKY İHA tasarım, üretim ve testleri amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Yüksek-disk-yüklemesine sahip DİKY uçaklarda geçiş rejiminde aerodinamik karakteristiklerin tahmini oldukça zordur. Bu problemle baş edebilmek için bazı tahmin metotları geliştirilmiştir [17]. Geçiş uçuşu ile ilgili yapılan çalışmalar genelde deneysel nitelikte olup, dinamik/aerodinamik yüklerin tespiti ancak yapılan deneyler neticesinde gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra özellikle askı durumu için aerodinamik karakteristikler hesaplamalı akışkanlar mekaniği de kullanılarak hesaplanabilmektedir. Fakat askı durumundan ileri uçuşa geçişi inceleyen çalışmalar deneysel özelliklidir.

DİKY uçağın geçiş rejimi, askı ve ileri uçuş arasındaki etkin hız aralığını kapsar. Geçiş rejiminde bulunan yüksek-disk-yüklemesine sahip DİKY uçaklarda jet çıkışı etkisi serbest akım aerodinamik karakteristiklerinden daha baskın olmaktadır. Hem serbest akım ve basınç kaynaklı aerodinamik karakteristiklerinin hem de jet çıkışıyla indüklenen hız alanlarının tahmini oldukça zordur [17].

Geçiş rejimi uçuş kontrol ve kararlığı açısından ele alındığında, yapısal karmaşıklığa ve ağırlık ile ilgili kısıtlamalara ek olarak çoğu DİKY tasarımları askı durumda ve ileri uçuşta doğal bir karasızlığa sahiptir. Bu anlamda, geçiş uçuşuyla ortaya çıkan araç konfigürasyonu ve dinamiğindeki önemli ve büyük değişimler neticesinde, kararlılık ve kontrol asıl zorlayıcı kısımlar olmaktadır. Bu sebeple, geleneksel kontrol tasarım yöntemleri, bütün muhtemel senaryoları kapsayan model tanımlaması (model identification) ve kazanım zamanlaması (gain scheduling) zahmeti ile dolu olacaktır. Son zamanlarda sinir ağı adaptif kontrol yöntemi, uçuş kontrolünde önde gelen tekniklerden biri olmuştur. Bu yöntemin sinir ağlarının kendi kendine öğrenme

özelliğine dayanan performansı, konfigürasyon ve dinamikteki boyutlandırabilir belirsizliklere sahip DİKY tasarımları için son derece uygundur [18, 19].

Literatürde, geçiş rejimi dinamiği ve aerodinamiğini konu alan çalışmalar çok azdır. Bununla birlikte dünyadaki önemli örneklerden IAI (Israel Aerospace Industries) Panther Tiltrotor İHA ve Bell Eagle Eye Tiltrotor İHA için geçiş uçuşu ancak deneysel sonuçlar ile nihayetlendirilebilmiştir. Türkiye'de ise çalışmalar, ürüne dönüşmemiş, akademik yayınlar ile sınırlı kalmıştır. Bunlara verilebilecek en önemli örnek "Bir tilt-rotor İHA'nın uçuş mekaniği analizi" ile ilgili bir çalışmadır [20]. Burada, geçiş uçuşunun modellenmesi, başka bir deyişle, bu rejimde aerodinamik karakteristiklerin tahmini için bir araç ve yöntem olmadığından dolayı, sürükleme kuvveti tahmini component build-up ve interpolasyon tekniği yardımı yapılmış, tilt-rotorların taşımaya ve momente etkisi ihmal edilmiştir.

İnsansız hava araçları, dünya üzerinde birçok ülke tarafından tasarlanmakta ve üretilmektedir. Ancak günümüzde kullanılan geleneksel insansız hava araçları pek çok dezavantaja sahiptir. Bu dezavantajlar aşağıda ele alınacaktır.

Kompleks yapıdaki insansız hava araçlarının yapısal ağırlıkları fazla, tasarım ve üretim maliyetleri yüksektir. Bu hava araçları kalkış ve iniş için belli menzilde koşu pistine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, kalkış ve iniş misyonları zemin şartlarından bağımsız değildir. Mevcut teknikte kullanılan insansız hava araçlarından dikine iniş-kalkış yapabilen (DİKY) hava araçları, belli bir hava pistine gerek duymamakta, zorlu zemin şartlarına adapte edilmektedir. Ancak bahsedilen DİKY araçlar aynı anda hem havada asılı kalabilme ve bu safhada yön değiştirme yeteneği hem de düz uçuşunda uzun menzil ve optimum uçuş hızını birlikte sağlayamaz. Ayrıca geniş yelpazeli uçuş görev talimatları için manevra kabiliyeti kısıtlıdır.

Benzer uygulamalarda sabit ana motor(lar) kullanılırken; menzil, hız, gerekli aviyonik sistem değişikliğine olanak sağlanmaz. Her uçuş misyonu için maksimum güç ve verime ulaşılamaz. İnsansız DİKY hava araçları için tasarlanılmış koaksiyel fan sistemi çoğu uygulama için ampirik olarak kalmıştır.

Mevcut teknikte kullanılan insansız hava araçları başka bir hava aracına dönüştürülemez. Örneğin, geleneksel hava aracı keşif-gözetleme görevi için multikopterler gibi havada askıda kalamaz. Bu nedenle kullanım alanı kısıtlıdır. Bahsedilen hava

araçlarının yapı, tasarım sistem ve elemanları değiştirilemez, demonte edilemez. Dolayısıyla, transfer veya taşıma zorluklarıyla karşılaşılır ve ek maliyet oluşur.

Bahsedilen problemlerin varlığı ve mevcut çözümlerin yetersizliği ilgili teknik alanda bir geliştirme yapmayı zorunlu kılmıştır. Bu tez kapsamında, bahsedilen dezavantajları ortadan kaldıracak ve ilgili teknik alana yeni avantajlar getirecek bir insansız hava aracı sistemi geliştirmek hedeflenmiştir.

1.3 Teknik ve Bilimsel Katkı

Önerdiğimiz ve TURAÇ DİKY İHA adını verdiğimiz hava aracının ana amacı, sahip olduğu hareket ekseni değiştirilebilir ön çift itki elemanı sayesinde, aynı anda hem havada askıda kalabilme ve bu safhada yön değiştirme yeteneği hem de düz uçuşunda uzun menzil ve optimum uçuş hızını birlikte sağlamaktır. Böylece uçuş kararlılığı, enerji verimliliği, hareket kabiliyeti ve kontrol edilebilirlik açısından avantaj sağlanmaktadır.

Demonte edilebilir kanat sistemi sayesinde kanatsız durumda aracın, multikopter gibi başka bir işlevli hava aracı olarak kullanılabilmesini sağlanmaktır. Ayrıca, tak-çıkart kanat yapısı sayesinde, mevcut kanatlar farklı yetenekli ve açıklık oranlı olarak üretilmiş kanat tasarımlarıyla değiştirilebilir. Böylece istenilen uçuş misyonunun avantajlı bir şekilde yerine getirilmesi sağlanır. Daha uzun görev uçuşları için daha büyük kanatlar, daha kısa ama hızlı uçuşlar için ise daha küçük kanatlar takılabilmektedir. Motor ve diğer hiçbir sisteme dokunmadan sadece kanatların değiştirilmesi sağlanmaktadır. Böylece görev talimatına bağlı olarak akıcı bir şekilde operasyon yapılabilmektedir.

Hava aracının nakliyesi sırasında hava aracının kapladığı hacimden avantaj sağlamak amacıyla demonte edilebilir kanat sistemi önerilmektedir.

TURAÇ DİKY İHA'nın küçük ve kompakt yapısı, yapısal hatalarla karşılaşılma olasılığını aza indirmekte ve dolayısıyla aracın yüksek manevralara dayanabilmesini sağlamaktır. Uçak ıslak alanı ve boyutu küçük olması sayesinde, kompleks uçak sistemlerine nazaran üretim ve tasarım maliyeti düşüktür.

TURAÇ DİKY İHA'nın diğer bir özelliği, gövde içinde konumlandırılmış koaksiyel ana rotor sayesinde, iniş kalkış manevraları sırasında veya havada askıda kalma durumunda ihtiyaç duyulan kuvvetin büyük bir çoğunluğunu karşılanmasıdır.

Ayrıca, koaksiyel rotor ve dönme ekseni hareket ettirilebilir itki elemanlarının oluşturacağı kuvvet yüzdelerinin bir kontrolcü tarafından değiştirilerek kuvvet merkezinin sürekli olarak ağırlık merkezinde oluşması hedeflenmiştir.

Önerilen tasarımda, arka kısımda yer alan, dikey iniş ve kalkış ve askıda kalma durumlarında aktif olan ana motorda kullanılan koaksiyel fan yapısı sayesinde aracın düşey ekseninde herhangi bir tork momenti oluşmamasını sağlamaktır. Fazladan bir anti-tork sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

TURAÇ DİKY İHA'nın bir başka avantajı ise, geniş yelpazede kullanım alanı sağlamaktır. Bir havaalanı gerektirmemesi ve havada askıda kalabilmesi sayesinde, askeri alan, keşif, gözetleme, hedef tespit ve izleme, harp sahası, hasar tespit, elektronik harp, haberleşme rölesi, fiziksel saldırı ve tahrip, mayın tespit ve imha gibi görev profillerini uygulama alanlarına sahiptir. Aynı zamanda NBC (nükleer, biyolojik ve kimyasal) kirlilik tespiti, yangın tespit ve izleme, atmosferik gözlem, arama-kurtarma, sivil ve sınır güvenlik, tarımsal ilaçlama ve bilimsel araştırmalar ve amaçlarına yönelik olarak da kullanıma hizmet edebilir.

Bahsedilen avantajlar en genel haliyle,

- dikey iniş-kalkış veya askıda kalma modunda aktif olan ve bu esnada bahsedilen insansız hava aracının ihtiyaç duyduğu kuvvetin çoğunluğunu karşılayan, bahsedilen gövdede konumlandırılmış en az bir koaksiyel rotor
- dikey iniş-kalkış veya askıda kalma modunda ihtiyaç duyulan geri kalan kuvveti karşılayan, bu esnada dönme eksenleri yer düzlemine dik konuma getirilen, seyir uçuşu veya piste iniş-kalkış modlarında ise dönme eksenleri uçuş doğrultusuna paralel konuma getirilen, dönme ekseni değiştirilebilir rotorlar ve bahsedilen rotorların uç kısımlarına irtibatlı pervane kanatlarından meydana gelen, gövde ile bağlantılı en az iki itki elemanı

ile ulaşılmaktadır.

Bu tez ve SAN-TEZ projesi kapsamında özgün bir DİKY İHA tasarım metodolojisi ve böyle bir İHA sistemi hızlı ve etki bir üretim yaklaşımı geliştirilmiştir. Proje ekibiyle yapısal ve aerodinamiksel sistem mühendisliği analizleri gerçekleştirilmiştir. Teorik manada, özellikle kritik olan havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) fazı için özgün bir modelleme ve bu faz için geçiş senaryosu çıkartma metodolojisi geliştirilmiştir. Öngörülen senaryo doğrultusunda benzetim ve kontrol algoritmaları başarı ile uygulanmıştır. Bunların dışında deneysel manada, üretilen ölçekli prototipler ile yer ve uçuş testleri başarı ile gösterilterilmiştir.

1.4 Tezin Düzeni

Tez kapsamında, TURAÇ DİKY İHA'nin tasarım süreci, yapısal ve aerodimik analizleri içeren sistem mühendisliği, itki sistemlerinin geliştirilmesi ve test edilmesi, simulasyon ve kontrol algoritmalarının geliştirilmesi, uçuş kontrol sistemi, uçuş yönetim bilgisayarı, faydalı yük sistemleri yazılım ve donanım geliştirmeleri,ucuz maliyetli bir hızlı prototiplendirme yöntemi, ve uçuş testleri konuları ele alınmıştır.

Tezin giriş bölümü olan 1. bölümde böyle bir çalışmaya yapmaya sevk eden etmenler ortaya konmuş, bu alanda şimdiye kadar yapılmış çalışmalara değinilmiş, karşılaşılan genel zorluklar ve bizim çözüm önerimiz sunulmuştur. Tezin en önemli kısmını teşkil eden 2. bölüm önerdiğimiz dikey iniş kalkış yapabilen hava aracı konseptinin tasarımını ele almaktadır. Bu bölümde öncelikle TURAÇ DİKY tasarım konseptinin özellikleri ve getirdiği avantajlar anlatılmıştır. Rakip analiziyle TURAÇ DİKY İHA'nın öngörülen hedef performansları kıyaslanmıştır. Sonrasında tekrarlamalı tasarım süreci açıklanmış ve bu süreçte tasarlanan TURAÇ DİKY İHA versiyonları gösterilmiştir. TURAÇ DİKY İHA'yı diğer DİKY İHA'lardan daha ön plana çıkaran özgün itki konfigurasyon yapısı ve getirdiği avantajlar anlatılmıştır. Kanat profili ve geometrisinin belirlenmesi anlatılmıştır. Tasarım sürecinin en önemli aşamalarından olan ağırlık tahmininde kullanılan tekrarlamalı yöntem ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonrasında ise detaylı boyutlandırma ve performans analizleri gelmektedir. Bu bölüm diğer bölümlerle en çok etkileşimde olan bölümdür. Çünkü bu bölümün sonucu olan TURAÇ DİKY İHA geometrisi diğer bölümlerin girdisini oluşturmaktadır. Benzer şekilde diğer bölümlerin analiz sonuçları, tasarım bölümünün girdisi olmakta ve tasarımda

iyileştirmelere gidilmektedir. Bölüm 3'te sistem mühendisliği ve detay tasarım çalışmaları yapılmaktadır. Bu bölümde yapısal ve aerodinamik analizler birbirinin sonuçlarını kullanarak tüm sistemin verimliliği optimize edilmektedir. Bu bölümde analizlerin sonuçları tasarım bölümünün girdileri olmakta ve tasarımda kararları belirlemektedir. Ayrıca bu bölümde tilt mekanizması, iniş takımı gibi parçaların tasarımları gerçekleştirilmiştir. Bölüm 4'te tasarım kısmında anlatılan özgün TURAÇ DİKY İHA sisteminin itki konfigurasyonu için gerekli itki ve güç hesaplamaları ve bu hesaplamalar sonucunda motor, pervane ve ESC seçimleri anlatılmaktadır. Motor, pervane ve ESC kombinasyonlarının performansını değerlendirmek için tasarlayıp ürettiğimiz itki-test düzeneği bu bölümde anlatılmaktadır. Ayrıca TURAÇ DİKY İHA sisteminin özel bir bileşeni olan tilt mekanizmasının geliştirilmesi bu bölümün konusudur. Bölüm 5'te TURAÇ DİKY İHA sistemine özgü 6 serbestlik dereceli dinamik-olmayan dinamik modeli oluşturulmuştur. Dinamik modelde GKY ve HAD yöntemleriyle yapılan analizler sonucu elde edilen aerodinamik katsayılar kullanılmıştır. Havada askı durumundan ileri uçuş rejimine geçiş uçuşu olası durumlar teker teker analiz edilerek senaryolar oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolara göre uçuş kontrol algoritmaları oluşturulmuştur. 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan dinamik model kullanılarak havada askı durumundan ileri uçuşun (ve tersi) simulasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bölüm 6'da aviyonik, uçuş kontrol, yer istasyonu ve faydalı yük sistemleri yazılımı ve donanımının geliştirilip üretilmesi konuları ele alınmıştır. Bölüm 7'de TURAÇ DİKY İHA sistemi için geliştirilen düşük maliyetli ve hızlı protipleme yöntemi adım adım açıklanmıştır. Bölüm 8'de yer ve uçuş testleri açıklanmıştır. Test uçuşlarının görselleriyle yapılan testler açıklanmıştır. Bölüm 9'da tezin sonuçları değerlendirilmiş ve gelecek çalışmaları ortaya konmuştur.

2. DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN HAVA ARACI TASARIMI

Bu bölümde Dikey İniş Kalkış Yapabilen (DİKY) bir İnsansız Hava Aracının tasarım çalışmaları ele alınacaktır. Öncelikle sivil amaçlı ihtiyaçlar göz önünde tutularak tasarımını ve üretimini hedeflediğimiz TURAÇ DİKY İHA adını verdiğimiz sisteminin konsepti anlatılmıştır. Daha sonra rakip analizi yapılarak tasarlağımız dikey iniş kalkı yapabilen tilt rotor konseptine sahip tasarımızın öngördüğümüz hedef performans değerleri oluşturulmuştur. Bunların mukayasesi verilmiştir. Tasarım süreci açıklanmış ve sonrasında TURAÇ DİKY İHA'nın özgün itki konfugürasyonu açıklanmıştır. Kanat profili ve geometrisi seçimi ayrıca sunulmuştur. Tasarım sürecinin en önemli aşamalarından olan tekrarlamalı ağırlık tahmini yöntemiyle ağırlık tahmini yapılmış ve sonrasında boyutlandırma ve performans hesaplamaları verilmiştir.

DİKY insansız hava araçları, insansız helikopter ile geleneksel sabit kanatlı hava araçlarının avantajlarını birleştirmeyi hedeflemiştir (Şekil 2.1). DİKY İHA'lar insansız helikopterler gibi dikey iniş kalış yapma yeteniğine sahip, geleneksel İHA'lar gibi yüksek seyir hızlarına sahip olabilmektedir. Böylelikle iniş ve kalkış için uygun olmayan çetin arazi şartlarında dahi iniş kalkış operasyonlarını gerçekleştirebilmekte ve aynı zamanda hedef operasyon noktasına hızla varabilmektedir. Ayrıca seyir halinde uçuş yapan bir DİKY İHA uçuş modunu değiştirerek askı moduna geçebilmektedir. Bu özellik sayesinde bir çok görevi hem insansız helikopterlere hem de geleneksel İHA'lara göre daha başarı ile yapmasını sağlamaktadır [21, 22].

Helikopterler yüksek hızdan askı durumuna geçme gibi çeşitli uçuş modları gerektiren uygulamalarda avantajlıdır. DİKY İHA'lar da bu uygulamaları bir helikopter gibi yapabilmektedir. Helikopterler dikey uçuşlarda hem DİKY hem de sabit kanatlı uçaklara avantaj sağlamalarına rağmen, geri hareket eden rotor palindeki tutunma kaybından dolayı ileri uçuşlarda performans sıkıntıları vardır. DİKY İHA'lar, düz uçuşta helikopterdeki bu performans sıkıntılarına sahip değildir, buna ek olarak büyük rotor sistemleri kullanılmadığı sürece mekaniksel tasarımı daha basittir. DİKY İHA'ların helikoperler gibi askıda durabilmesi ve düşük irtifalardan uçabilmesi en

önemli avantajlarından biridir. DİKY uçakların askı uçuşundaki verim efektif rotor alanı daha küçük olmasından dolayı helikopterden daha düşüktür ama düz uçuşta geçirilen süre askıda geçirelen süre ile benzer oranlarda olması durumunda DİKY uçaklar ileri uçuştaki üstün verimleriyle karma verimi daha yüksek olmaktadır. Geleneksel İHA'lar pist gerektirir, her yerden havalanamaz ve her yere inemez. Ancak yatay uçuş performansı helikopter sistemlerine göre daha iyidir. DİKY araçlar en az geleneksel İHAları kadar hızlı uçabilmesine rağmen, dikey iniş kalkış sistemleri için bulunan ek ağırlık taşınabilir faydalı yük miktarını geleneksel bir sisteme göre azaltmaktadır. Bununla beraber, DİKY İHA'ların yüksek itki / ağırlık oranı geleneksel İHA'ya göre daha fazla manevra edebilme yeteneği sağlar. Ancak bu yanında kontrol zorluğunu da beraberinde getirir. Kontrol problemleri otopilot sistemleri ile üstesinden gelinebilmektedir. DİKY İHA'lar, her alana dikey iniş-kalkış kabiliyetine sahip olması, yüksek manevra kabiliyeti, yüksek hızı ve tüm yönlü kontrol edilebilmesi gibi özellikleri ile helikopter ve sabit kanatlı uçakların yararlarını birleştirir. DİKY İHA en az bir sabit kanatlı İHA kadar hızlı uçabilirken, bir helikopter gibi askı uçuşunu da yapabilmektedir. Verim olarak sadece düz uçuş veya sadece askı için uçuş rejimi için tasarlanmış sisteme göre daha verimsizdir ama her iki uçuş rejiminin bulunması durumda karma verimi en yüksek olarak ortaya çıkmaktadır [21, 22].

DİKY sistemlerin gelişiminin tarihçesi [22], gelişmiş DİKY İHA tasarım teknolojisi [21], halihazırdaki kıstaslar [22], konvansiyel ve helikopter sistemleri ile karşılaştırması [21, 22] ve gelecek öngörüsü [21] not edilen kaynaklardan ulaşılabilir.

2.1 TURAÇ DİKY İHA Konsepti

Yukarıda bahsedildiği üzere DİKY İHA sistemleri insansız helikopterlere ve insansız sabit kanatlı geleneksel İHA sistemlerine göre bir takım avantajlar barındırmaktadır. Bu nedenle özellikle sivil amaçlı ihtiyaçlara cevap verecek bir DİKY İHA sistemi tarafımızca önerilmektedir. Doğada dikey doğrultuda uçuş yapan TURAÇ isimli kuştan esinlendiğimiz ve bu adı verdiğimiz DİKY İHA sisteminin konspeti bu bölümde anlatılmıştır. Konseptin ayrıntıları ise ilerki kısımlarda ele alınacaktır.

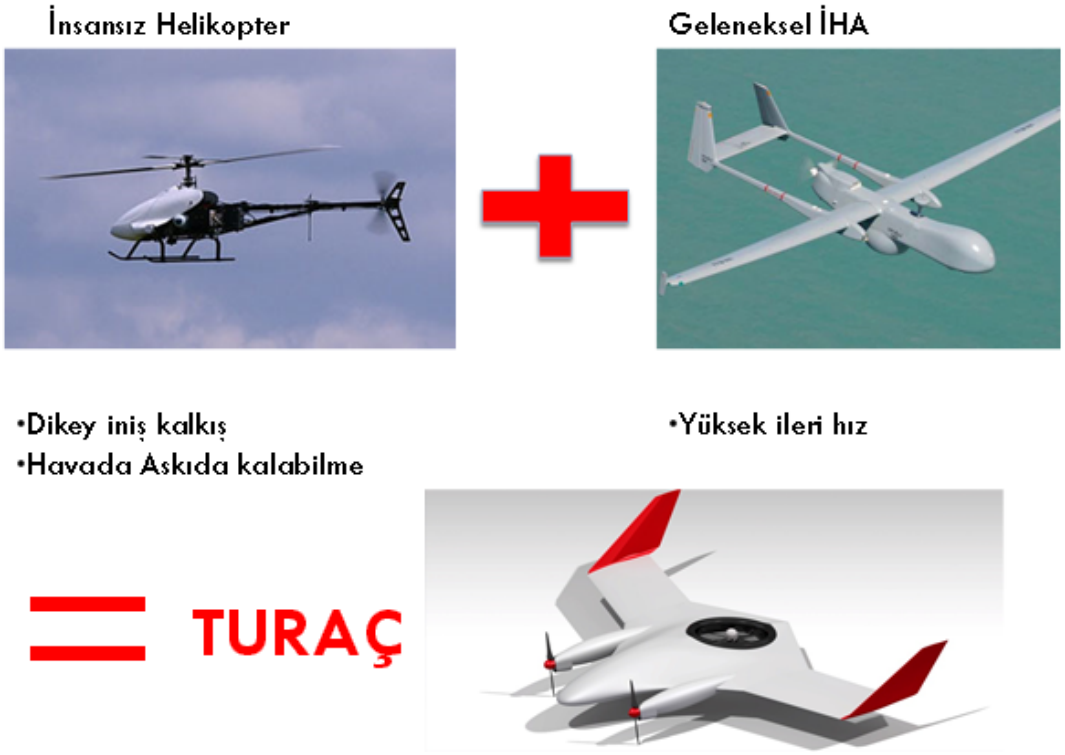
TURAÇ DİKY İHA sistemi hem dikey iniş kalış hem de geleneksel iniş kalkış yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan ve üretilen İHA'da aşağıdaki özellikler göz önünde bulundurulmuştur:

- DİKY kabiliyeti (Tüm arazi koşullarında iniş-kalkış)
- GİKY kabiliyeti
- Havada askıda kalabilme kabilliyeti
- Tak-çıkart farklı kanat büyüklükleri ile çalışabilme
- Askeri İHA'lardan daha düşük maliyete sahip olma
- Kolay taşınabilme ve paketlenebilme
- Çevre dostu ve düşük gürültü düzeyinde elektrikli motor yapısı
- Mobil yer istasyonu

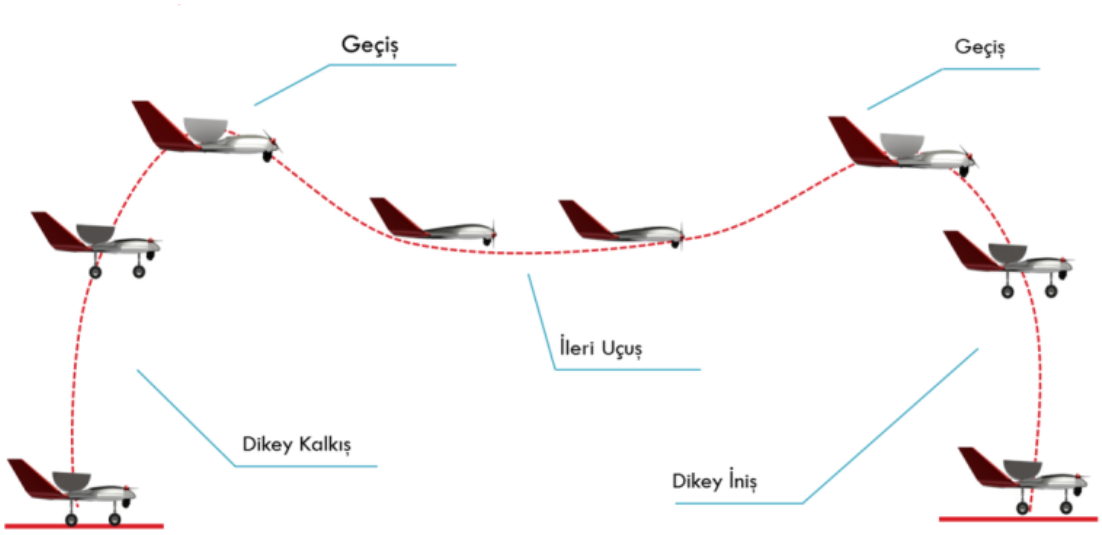
Buna ek olarak, TURAÇ DİKY İHA'nın asgari hedef performans kriterleri olarak; 1 saat seyir, 15 dakika askıda kalma, 15 dakika iniş/kalkış süresi, 35 km operasyon yarı çapı (70 km menzil), 45 kg civarı azami kalkış ağırlığı (MTOW), 8 kg civarı faydalı yük (hiperspektral görüntüleyici veya potansiyel olarak RGB Kamera, Termal Kamera, Emisyon Ölçüm Cihazları gibi ek cihazlar), 25 m/s seyir hızı, otonom iniş kalkış yapabilme ve girilen bir rotayı otomatik olarak takip edebilme belirlenmiştir.

Dikey iniş kalkış yapabilme, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş, ileri uçuş, ileri uçuştan havada askı durumun geçiş ve dikey iniş görevlerini içeren TURAÇ DİKY İHA'nın tipik görev profili Şekil 2.2'de verilmiştir.

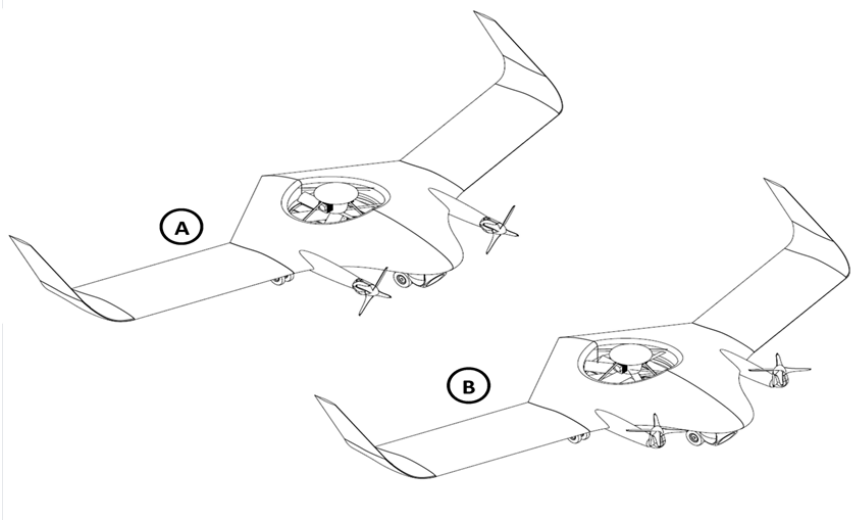
Bahsedilen gereksinimler gözönünde bulundurularak yapılan TURAÇ DİKY İHA'nın kavramsal tasarımı Şekil 2.3'te sunulmuştur. Bu konsepte önde tilt edebilen 2 rotor ve gövdede ise ana taşıyıcı bir koaksiyel itki sistemi bulunmaktadır. Önde bulunan tilt edebilen rotor sistemi tüm uçuş fazlarında aktif iken, gövde bulunan ana taşıyıcı koaksiyel itki sistemi sadece dikey iniş kalkış ve havada askıda kalma modlarında aktiftir. Dikey kalkış modunda, gövdede bulunan ana itki sistemi ve 90^o tilt açısıyla öndeki tilt edebilen rotorlar aktifdir. Dikey iniş kalkış ve havada askıda kalma durumlarında gerekli olan itkinin büyük kısmı (%70'ı) gövdedeki ana itki sistemi tarafından sağlanırken, geriye kalan gerekli itkinin sağlanması öndeki tilt edilen rotorlar arasında paylaşılmaktadır. Havada askı kalma modundan ileri uçuş moduna tilt rotorların ileri uçuş yönüne indirilmesiyle (tilt açısı = 0^o) geçer. İleri uçuşa geçen



Şekil 2.1: Dikey iniş kalkış yapabilen (DİKY) İHA konsepti.



Şekil 2.2: TURAÇ DİKY İHA görev profili.



Şekil 2.3: TURAÇ DİKY İHA'nın tasarım konsepti: (a) Seyir uçuşunda. (b) Havada askı durumunda.

uçağın hızlanmasıyla beraber kanatlar taşıma oluşturur, dolayısıyla gövdede bulunan ana itki sisteminin oluşturduğu taşıma kuvvetine gerek kalmaz. Bu aşamada taşıma ile ters orantılı olarak ana itki sistemi de azaltılarak kapatılır. İleri uçuştan havada askıda kalma durumuna geçiş ise tam ters şekilde gerçekleşir.

İtki sisteminin çalışma prensibi ilerki kısımda detaylı olarak açıklanacaktır. İleri uçuştan havada askı durumuna geçiş (ve tersi) teorik benzetim ve test uçuşları ileriki bölümlerde ele alınmıştır.

Taşınabilirlik TURAÇ DİKY İHA sistemi için önde gelen tasarım konseptlerinden biridir. Tasarım süreci tak-çıkar kanat yapısı temel alınarak yapılmıştır. Bu özellik bize Şekil 2.4'te görülebileceği üzere TURAÇ DİKY İHA sistemini farklı büyüklerde kanatlar ile kullanabilme imkanı sunmuştur. Dolayısıyla farklı kanat büyüklükleri ile farklı uçuş görevleri yerine getirilebilmektedir. TURAÇ DİKY İHA sistemi kanatsız olarak ise bir trikopter gibi hizmet verebilmektedir. Böylelikle tek bir hava aracı ile bir çok çözüm sunulmuştur.

TURAÇ DİKY İHA sistemi gövde ve kanatlar olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar kolaylıkla ayrılabilir ve monte edilebilir şekilde tasarlanmıştır. Uçak kolayça parçalara ayrılıp, paketlenip SUV benzeri bir araçla rahatlıkla taşınabilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.4: TURAÇ DİKY İHA değişebilen portatip kanat konsepti.

TURAÇ DİKY İHA yukarıda belirtilen özellikleri sayesinde farklı görev koşullarına kolayça uyarlanabilir. Limitli ve kötü koşullardaki pistlere veya gemi gibi platformlara iniş-kalkış yapabilir.

Tüm TURAÇ sistemi iki parçadan oluşur: yer istasyonu ve hava aracı. Yer istasyonu, faydalı yükü aktif olarak kontrol edecek, hava aracının durumunu izleyen ve uçuş görevleri yüklenebilen rugged bir lattop bulundurur. Ayrıca faydalı yük ve hava aracı ile iletişimi sağlayan veri bağlantılarını içerir. Bu konu ilgili bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

Hava aracında, uçuşun bütün fazlarını kontrol eden bir uçuş kontrol bilgisayarı bulunur. Bu bilgisayara bağlı sensörler, filtreler, actuatörler ve radyo haberleşmesi vardır. Uçuş kontrol bilgisayarı, görev yönetim bilgisayarına ve kendi ayrı bilgisayarını ve sensörlerini bulunduran faydalı yük sistemine bağlanır. Bu konu ilgili bölümde detaylı olarak ele alınmıştır.

2.2 Hedef Performans ve Rakip Analizi

TURAÇ DİKY İHA'nın hedef performans değerlerinin sınıfının en iyisi DİKY İHA'lar ile karşılaştırmasını Çizelge 2.1'de görülebilir.

TURAÇ DİKY İHA'nın geleneksel iniş kalkış misyonu hedef performans değerlerinin sınıfının en iyisi geleneksel iniş kalkış yapan (GİKY) İHA ile karşılaştırmasını Çizelge 2.2'te görülebilir.

Organic Air Vehicles 1 - 2 [23] de içinde bulunduran DİKY İHA sistemleri karşılaştırıldığında TURAÇ DİKY İHA en iyisidir. Özellikle TURAÇ DİKY İHA sistemi yüksek hızlı mini İHA olarak göze çarparken aynı zamanda önemli büyüklükte

Çizelge 2.1: TURAÇ'ın diğer DİKY İHA'lar ile karşılaştırılması.

Özellik			
	IAI Panther	IAI Mini Panther	TURAÇ DİKY
MTOW (kg)	65	12	47
$W_{payload}$	8,5	2	8
$W_{payload}/W_{MTOW}$	0,13	0,16	0,17
Takat (saat)	4	1,5	1,42
Askı Süresi (saat)	3	3	10
Prodüktivite (kg*h)	34	3	16
Enerji Kaynağı	Elektrik	Elektrik	Elektrik

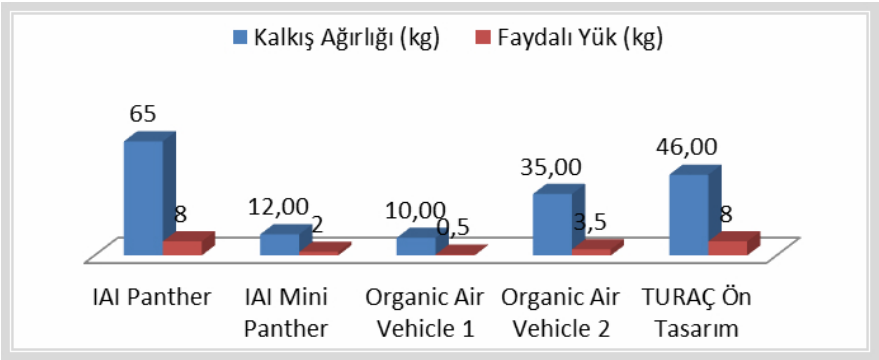
Çizelge 2.2: TURAÇ'ın diğer GİKY İHA'lar ile karşılaştırılması.

Özellik		
	Northrop Grumman Bat	TURAÇ GİKY
MTOW (kg)	34	47
$W_{payload}$	12	8
$W_{payload}/W_{MTOW}$	0,35	0,17
Takat (saat)	8	3,25
Askı Süresi (saat)	0	0
Prodüktivite (kg*h)	96	40
Enerji Kaynağı	ICE	Elektrik

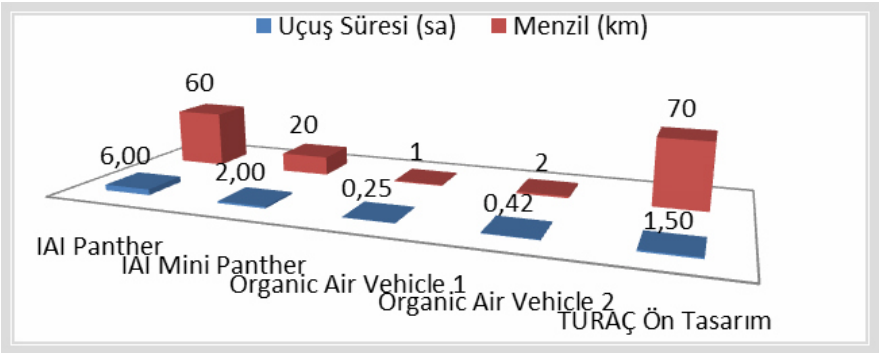
faydalı yük kapasitesi sunmaktadır. Geliştirilmeye açık bir tasarım yapısının olması nedeniyle ek batarya sistemleri ile havada daha fazla kalabilir.

Prodüktivite doğrudan havdan kalış süresi ve faydalı yük kapasitesi ile ilgilidir [24]. TURAÇ DİKY İHA sınıfındaki en iyi *Prodüktivite* değerine sahiptir. Bununla beraber temel performans parametrelerinin karşılaştırması Şekil 2.5 - Şekil 2.7'de verilmiştir.

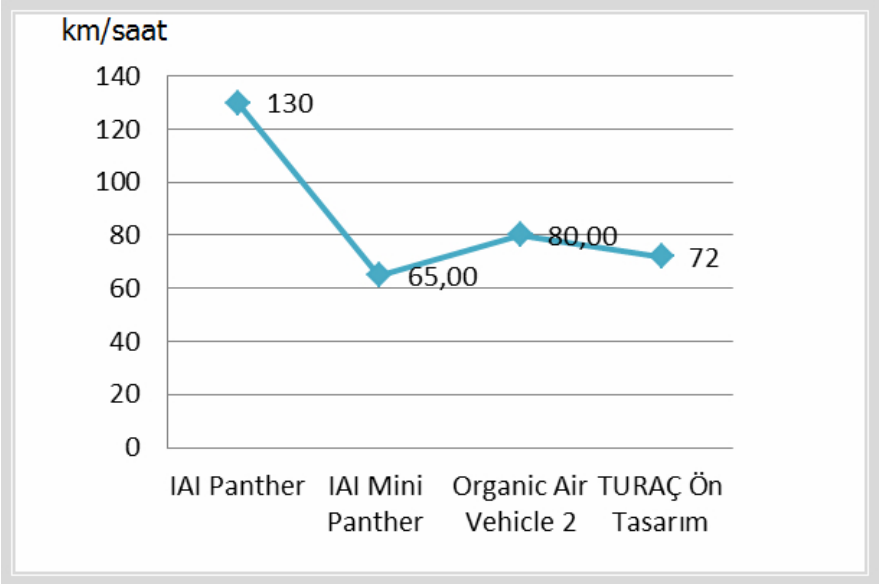
Şekil 2.5 - Şekil 2.7'de görüleceği üzere, *Organic Air Vehicle* ile mukayese edildiğinde TURAÇ DİKY İHA'nın çok daha büyük boyutlarından ötürü havada kalış süresi ve faydalı yük kapasitesi çok daha fazladır. Ayrıca TURAÇ DİKY İHA, pazarda sınıfının en iyilerinden biri olan IAI Panther ile kıyaslandığında daha az kalkış ağırlığı olmasına rağmen aynı faydalı yük taşıma kapasitesine sahiptir.



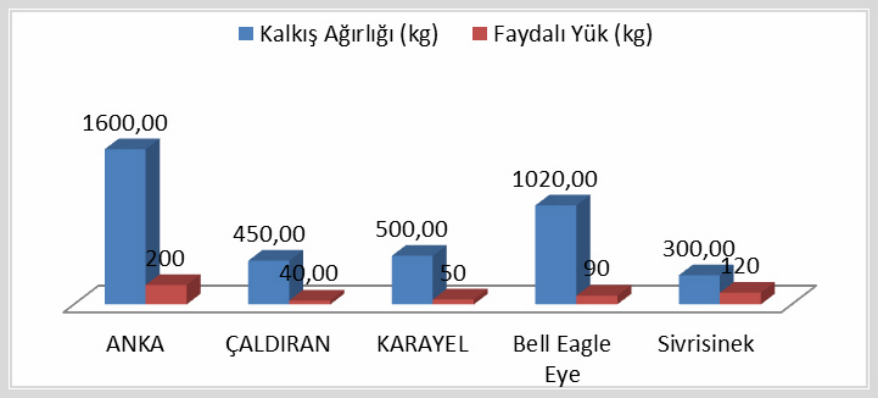
Şekil 2.5: Dünyadaki DİKY İHA'ların azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük karşılaştırması.



Şekil 2.6: Dünyadaki DİKY İHA'ların uçuş süresi ve menzil karşılaştırması.



Şekil 2.7: Dünyadaki DİKY İHA'ların ortalama hız karşılaştırması.

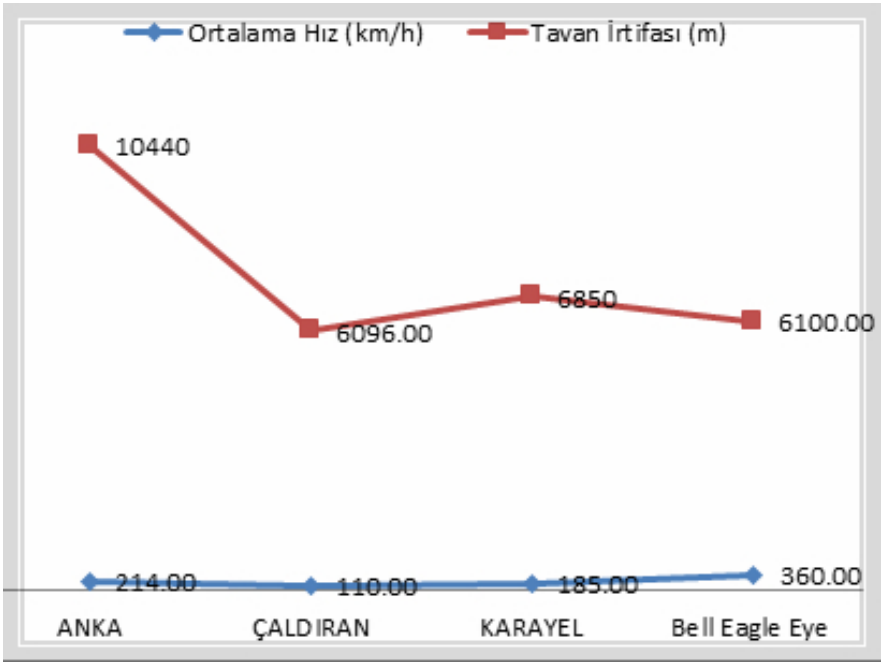


Şekil 2.8: Büyük sistemler için azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük karşılaştırması.

Çizelge 2.2'ye baktığımızda, içten yanmalı motorlu bir sisteme sahip uçan kanatlı bir İHA sisteminin havada kalış ve faydalı yük kapasitesi bakımından tamamen elektrik motorlu TURAÇ DİKY İHA'ya göre daha üstün olduğu görülmektedir. Ancak TURAÇ DİKY İHA, havada askıda kalabilme, dikey iniş kalkış yapabilme gibi rakibinin sahip olmadığı avantajlara sahiptir.

TURAÇ DİKY İHA sınıf olarak HALE/MALE ve Taktik İHA'larımız ile aynı sınıfta olmaması ve operasyon konseptleri farklı olmasından dolayı karşılaştırılması mantıklı değildir. Bununla beraber HALE/MALE ve Taktik İHA'larımız en büyük DİKY İHA örneklerinden Bell Eagle Eye ile karşılaştırılması (Şekil 2.8 - Şekil 2.9) enteresan bir sonuç çıkarmaktadır. Eagle Eye, ülkemizde geliştirilmekte olan büyük İHA sistemlerinden performans açısından hiç te farklı olmamakla beraber neredeyse fiziksel olarak 1:2 oranındadır ve hız olarak neredeyse 2 kat daha hızlıdır. Bunun dışında yerli üretimiz İHA'ların özelliklerinin çoğu tasarım seviyesinde olup, hala 1-1 o performans değerleri demonstre edilmemiştir.

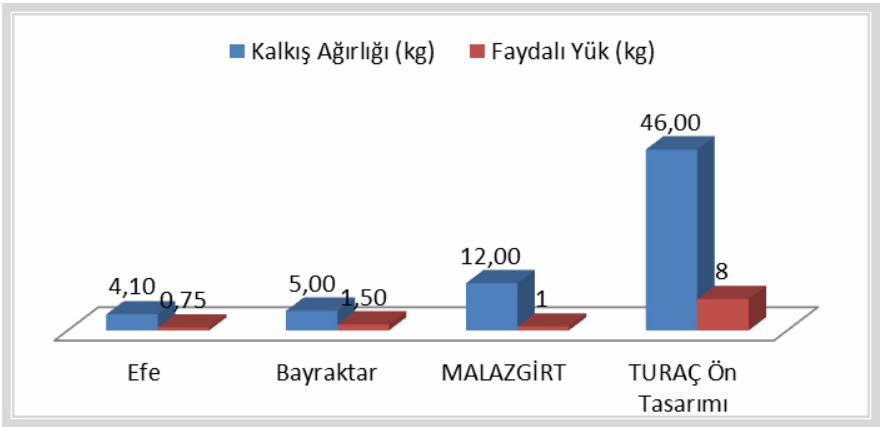
TURAÇ DİKY İHA konsepti taktik ve daha büyük sınıflardan çok, ülkemizdeki mini İHA kategorisindeki İHA'lara yakındır. Türkiye'deki markete bakıldığında tamamı ile sivil kullanıma yönelik olması ve tasarım öğelerine bağlı olarak kendi sınıfının ilk örneği olacaktır. TURAÇ ile mini İHA'lar ve mini/mikro helikopter sistemlerinden daha yüksek kapasiteye sahip bir sivil İHA hedeflenmektedir. TURAÇ DİKY İHA mini İHAlar ile karşılaştırıldığında (Çizelge 2.3, Şekil 2.10 - Şekil 2.12) hem performans hem de faydalı yük açısından tam olarak doldurulamayan portatif ama 5 kg üstü faydalı yük taşıyabilen bir boşluğu doldurmaktadır.



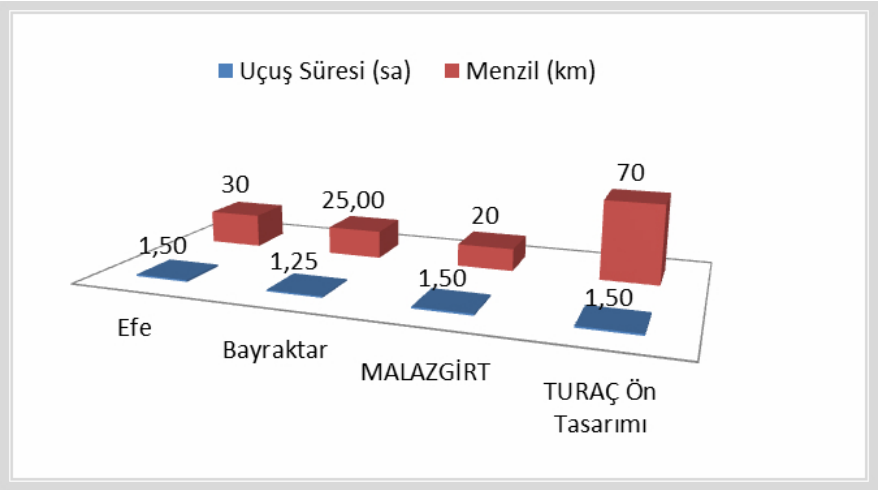
Şekil 2.9: Büyük sistem İHA platformları ortalama hız ve tavan irtifası karşılaştırması.

Çizelge 2.3: Türkiye'deki mini İHA platformlarının TURAÇ ön tasarımı ile karşılaştırması.

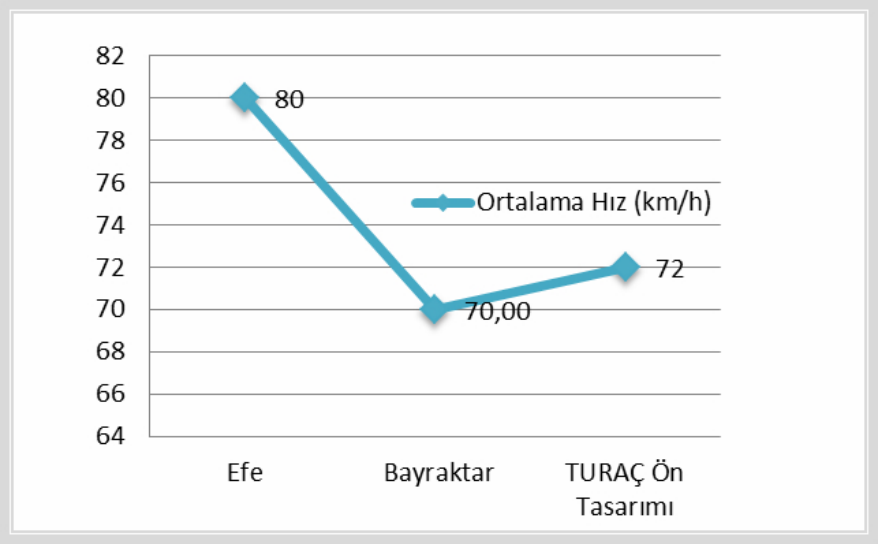
Özellik	Efe	Bayraktar	Malazgirt	TURAÇ Ön Tas.
MTOW (kg)	4,10	0,00	12,0	46,00
$W_{payload}$	0,75	1,5	1	8
Uçuş Süresi (sa)	1,50	1,25	1,50	1,50
Menzil (km)	-	25,00	20	70
Tavan İrtifası (m)	450	4000	3660	4000
Ortalama hızı (km/sa)	80	70	-	72
Kanat Açıklığı	2,6	2,00	-	3,00



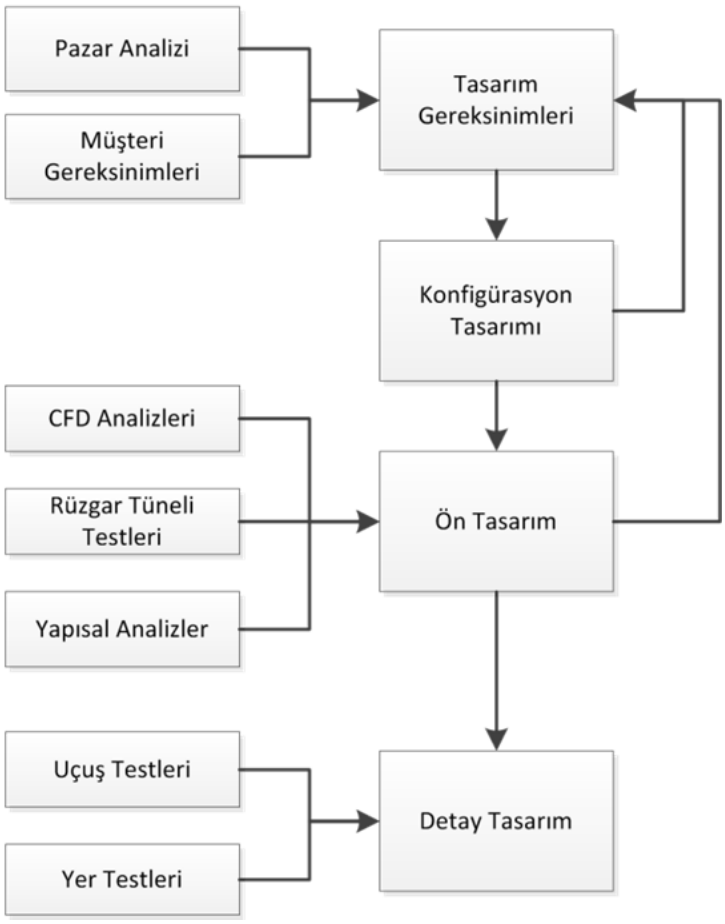
Şekil 2.10: Türkiye'deki mini İHA'lar azami kalkış ağırlığı ve faydalı yük ağırlıkları.



Şekil 2.11: Türkiye'deki mini İHA'lar menzil ve uçuş süreleri.



Şekil 2.12: Türkiye'deki mini İHA'lar ortalama hızları.



Şekil 2.13: TURAÇ DİKY İHA tasarım süreci.

2.3 Tasarım Süreci

Konsepti anlatılan TURAÇ DİKY İHA platformu yüksek performans için özgün bir uçan kanat- multikopter hibrit tasarımına sahiptir. Bu özgün tasarım normalden farklı bir yaklaşım gerektirmektedir. Tasarım süreci teorik analiz ve deneysel çalışmaları içeren tekrarlamalı bir süreçtir (Şekil 2.13).

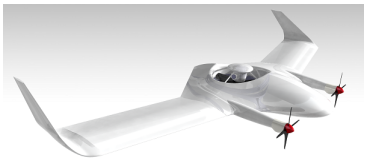
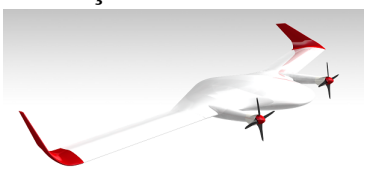
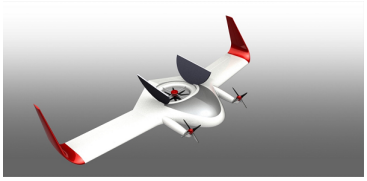
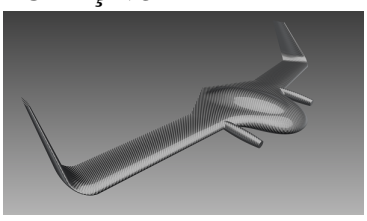
Tasarım çalışmaları, Şekil 2.13'te gösterildiği gibi, müşteri ihtiyaçları ile tasarım gereksinimlerinin (Çizelge 2.4) anlaşılmasıyla başlar. Daha sonra konfigürasyon tasarımları yapılır. Aerodinamik ve yapısal analizler, tasarımın ayrıntılandırılması ve iyileştirilmesi için temel girdileri teşkil eder. Rüzgar tüneli testleri ve uçuş testleri, hava aracı tasarımı sürecine yönelik en önemli iki girdiyi oluşturur. Ancak rüzgar tüneli testleri ölçüm sistemlerindeki teknik arızalardan dolayı gerçekleştirilememiştir.

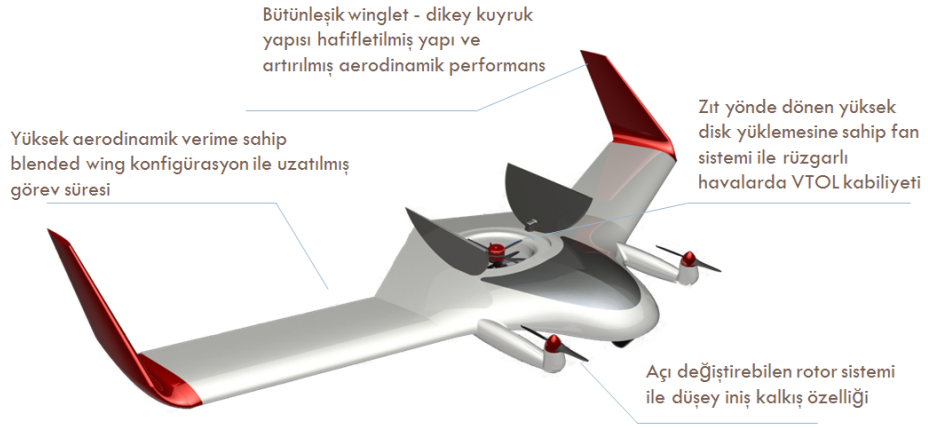
Çizelge 2.4: TURAÇ DİKY İHA sistemi teknik gereksinimleri.

Özellik	**Tasarım Gereksinimleri**
Dikey İniş Kalkış Yapabilen (DİKY)	Yüksek itki yüklemesi Hassas uçuş kontrol sistemi Seyirden askı durumuna geçiş (ve tersi) Yüksek darbe emici iniş takımları (yaklaşık 4g)
Kısa (piste) İniş Kalkış Yapabilen (KİKY)	Düşük kanat yüklemesi (W/S) Yüksek itki yüklemesi T/W > 0,80
Konvansiyonel İniş Kalkış Yapabilen	Pist ihtiyacı Yuvarlanma direnci düşük iniş takımları
Uzun havada kalma	Yüksek aerodinamik verim (yüksek L/D oranı) Yüksek itki verimi
Sessiz	Pervaneli itki sistemi ve özel tasarım pervaneler Elektrikli itki sistemi
Güvenilirlik	Kritik sistemlerin tümünün yedeklenmesi
Modüler yapı	Farklı görev yüklerine uygun paralı yük bölmesi tasarımı Modüler iç yapı ve bağlantılar

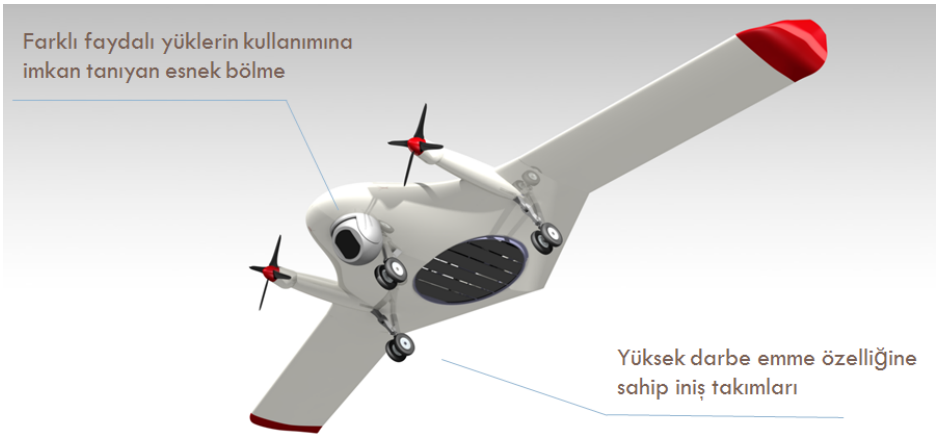
Tasarım süreci her tekrarda bir önceki adıma göre iyileşme hedeflenen tekrarlamalı bir süreçtir. Çizelge 2.5'te gösterilne geliştirilen 5 farklı versiyon prototiplendirilmiştir. Her bir versiyon, öngörülen TURAÇ performans hedeflerini yerine getirmek için performans gerekleri açısından test edilmiştir. İlk versiyon (TURAÇ V1) TURAÇ ekibinin uçan kanat tasarımı ve yetkinliklerinin gösterilmesi için basit el hesaplamaları ve tasarım döngüleri ile tasarlanmıştır. TURAÇ DİKY İHA'nın ikinci versiyonuna (TURAÇ V2) kadar Girdap Kafes Yöntemi (GKY) kullanılarak geliştirilen yazılımın hesaplamaları tasarım döngülerine entegre edilmiştir. TURAÇ V3 (üçüncü versiyon) için kararlılık en önemli unsurdu ve çalışmaların çoğu kararlılık aerodinamik verimliliğini arttırmak için yapılmıştır. Tasarımı sonuçlandırmak için yüksek seviye aerodinamik ve yapısal analizler uygulanmıştır. Sistemi ve TURAÇ V4'ün (dördüncü versiyon) davranışlarını anlamak için uçuş testleri kullanılmıştır. TURAÇ V4 platformu için alt sistemlerin çoğu geliştirilip test edilmiş ve tilt mekanizması ve ana taşıma fanı gibi alt sistemler sonuçlandırılmıştır. TURAÇ V5 (beşinci versiyon) son versiyondur ve aerodinamik, yapısal ve tahrik optimizasyon çalışmalarına ek olarak test uçuşlarının çoğu bununla gerçekleştirilmiştir. Başarılı ileri uçuş testlerinden sonra

Çizelge 2.5: Tasarım sürecinde geliştirilen TURAÇ DİKY İHA versiyonları.

Hava Araçları	Geliştirmeler
TURAÇ V1 	• Temel tasarım • İlk boyutlandırma ve temel hesapların kontolü • Depron ve köpük malzeme ile prototip üretimi ve ilk uçuş testi • Konvansiyonel uçuş testi • Tilt mekanizması ilk tasarım çalışmaları
TURAÇ V2 	• Temel tasarım • Elektrikli yapıya ek olarak hibrit yapı için tasarım güncellemesi • Aerodinamik yapı iyileştirilmesi • Mekanizma tasarıma giriş • Detaylı ve optimize tasarım çalışmalarının başlangıcı
TURAÇ V3 	• Temel tasarım • Elektrikli yapı için optimizasyon • Kararlılık iyileştirme için tasarım güncellemesi • Köpük üzeri kompozıt tasarım prototiplendirme yönteminin iyileştirilmesi • Elektrikli itki sistemi test alt yapısı geliştirmesi ve itki testleri
TURAÇ V4 	• Temel tasarım • DİKY yapı için mekanizma tasarımları • Kararlılık iyileştirme için tasarım güncellemesi • Bilgisayar ortamında detaylı HAD, yapısal ve kararlılık analizleri • 1/2 ve 1/3 ölçeklerde kompozit prototiplerle test uçuşları
TURAÇ V5 	• Aerodinamik optimizasyon • İç hacim büyütülmesi • Analiz sonuçlarına göre yapısal ve aerodninamik • Alt sistemlerinin son versiyonlarının detay tasarım ve prototiplendirilmesi • Konvansiyonel ve DİKY uçuş testleri



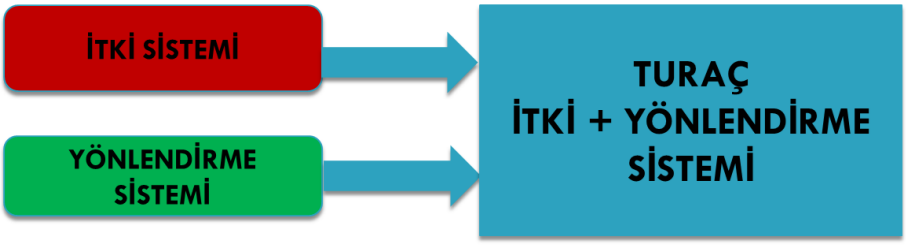
Şekil 2.14: TURAÇ DİKY İHA konfigurasyon seçimleri.



Şekil 2.15: TURAÇ DİKY İHA iniş takımı ve faydalı yük bölmesi.

kararlılık arttırma çalışmaları TURAÇ V5 ile sonuçlandırılmıştır. Geçiş uçuşu testleri sürdürülmüş ve 1/3 ölçekli prototiple başarılı geçiş manevraları yapılmıştır.

Şekil 2.14'de görülebileceği üzere TURAÇ DİKY İHA sisteminin gövde-kanat tümleşik uçan kanat yapısının ve kanat uçlarında kullanılan wingletlerin sağladığı yüksek aerodinamik verim sayesinde daha uzun bir uçuş süresi sağlanır. Gövdede bulunan yüksek disk yüklemesine sahip rotorlar, hava aracının özellikle dikey iniş kalkış ve havada askıda kalma durumlarında rol oynar. Şekil 2.15'te TURAÇ DİKY İHA sistemi için kullanılan iniş takımı sistemi ve farklı faydalı yüklerin kullanımına imkan tanıyan faydalı yük bölmesi görülmektedir.



Şekil 2.16: TURAÇ DİKY itki konfigurasyonu.

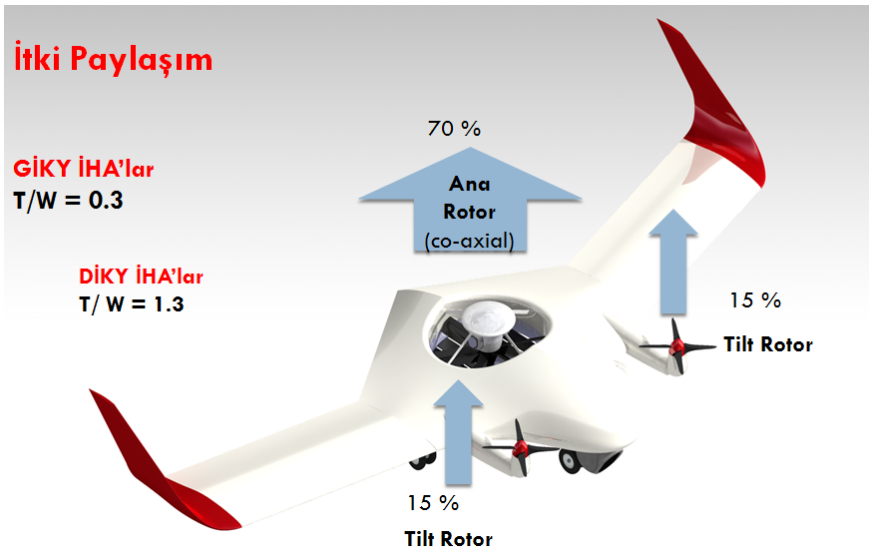
2.4 İtki Konfigurasyonu

TURAÇ DİKY İHA sisteminin itk sistemi yüksek verimlilik, güvenilirlik, kontrol hassasiyeti ve hızlı çözüm sunması dolayısıyla tamamen elektrikli olarak düşünülmüştür. TURAÇ DİKY İHA itki konfigürasyonu aynı zamanda hava aracındaki yönlendirme görevini de yerine getirmektedir (Şekil 2.16).

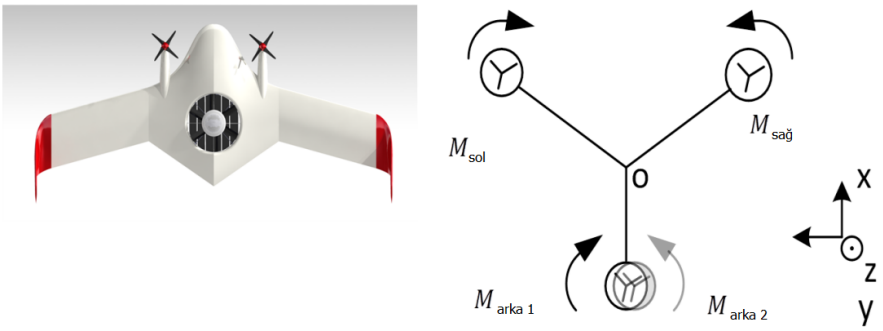
Dikine iniş kalkış ve havada askıda kalma durumlarında İHA gövdesindeki eş-eksenel (koaksiyel) fan sistemi ile beraber öndeki tilt edebilen rotorlar senkronize olarak çalışmaktadır. Böylece tek eş-eksenel fan sistemi ile çalışan uçaklardaki dönme/kuvvet ekseni ve ağırlık merkezinin aynı olmamasından oluşacak dengesizlik problemi çözülmektedir. Önde bulunan döndürülebilen (tilt edebilen) motor sistemleri döndürülerek askı durumundan ileri uçuşa veya düşük hızlı arkaya uçuşa geçilebilmektedir. Askı konumunda herhangibir anda gerekli olacak taşıma kuvvetinin %70-%90 miktarını eş-eksenel fanlar karşılarken, öndeki döndürülebilen motor sistemi ise %10-%30 civarını karşılamaktadır (Şekil 2.17). Bu serbestlik, özellikle ağırlık merkezinin üzerine konulan ekipman, kullanılan yakıt, görev ve uçuşa bağlı değişmesi durumunda bile dengeyi sürekli sağlamaya izin vermektedir. Böylece bu tasarım eş-eksenel sistemler için asli denge problemi çözmektedir.

Geliştirilen eş-eksenel fan ve ön iki dönebilen motor ve pervane sistemi denge dışında, özel bir yerleşim açısı ihtiyacı olmadan direk uçağa yerleştirilebilmektedir. Böylece eş-eksenel fan taşımayan sistemlerin, yani tek fandan oluşan sistemlerin anti-tork üretmesi için gerekli özel yerleşim açısı ile fan ve pervane yerleşimine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Uçağın askı durumunda sağa sola dönmesi arkadaki eş-eksenel fanlardan birinin hızlandırılması, diğerinin yavaşlatılması ile oluşan tork ile olmaktadır. Senkronize



Şekil 2.17: TURAÇ DİKY İHA gerekli itkinin rotarlar arasında paylaşımı.



Şekil 2.18: TURAÇ DİKY itki ve yönlendirme mekanizması.

hızlanma ve yavaşlama, dönme sağlarken toplam itki seviyesinin düşmemesinden dolayı denge bozulmamaktadır (Şekil 2.18). İHA'nın askı durumunda sağa veya sola yatarak dönme durumunda ön dönebilir motor pervanelerinden birinin hızı azaltılmakta diğerinin artırılmakta, ve böylece sağa ve sola yatma momenti oluşturulmaktadır. Senkronize hızlanma ve yavaşlama, yatma sağlarken toplam itki seviyesinin düşmemesinden dolayı denge bozulmamaktadır.

İHA'nın askı durumunda öne veya arkaya yatma durumunda ise ön pervaneler ve arka eş-eksenel fanlardan bir set hızlanırken diğeri yavaşlamakta ve böylece öne ve arkaya yatma momenti oluşturulmaktadır. Senkronize hızlanma ve yavaşlama, yatma sağlarken toplam itki seviyesinin düşmemesinden dolayı denge bozulmamaktadır.

2.5 Kanat Profili ve Kanat Seçimi

TURAÇ DİKY İHA, hem gövdenin hem de kanatların taşıma ürettiği gövde ve kanatın tümleşik olduğu uçan kanat konseptine sahiptir. Profildeki momenti dengeleyecek bir kuyruk yapısı yoktur. Bu nedenle taşımadan kaynaklana momenti dengeleyecek refleks kanat profilleri kullanılmıştır. Farklı refleks kanat profilleri, TURAÇ DİKY İHA'nın sürüklemesini kabul edilebilir bir seviyede tutmak ve taşıma kapasitesini en üst düzeyde tutmak için analiz edilmiştir.

TURAÇ DİKY İHA'yı daha kararlı yapabilmek için kanat şeklinde olan gövde yapısı ve tak-çıkart kanatlarda 10 derece ok açısı kullanılmıştır. Aerodinamik verimliliği artırmak amacıyla wingletler kullanılmıştır. Buna ek olarak, wingletler, sapma ve koordineli sapma-yalpa manevralarını kontrol eden rudder kontrol yüzeylerine ev sahipliği yapar.

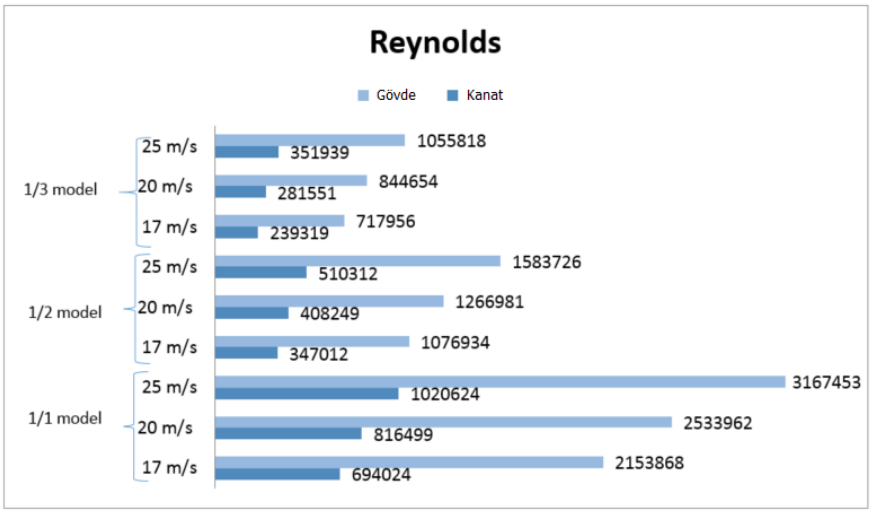
TURAÇ DİKY İHA'nın tümleşik gövde kanat yapısı, geleneksel gövde-kanat yapısına göre daha fazla kullanılabilir bir iç hacim sağlar ve ayrıca farklı büyüklüklerdeki faydalı yük sistemlerine müsade eder. TURAÇ DİKY İHA'nın uçan kanat tasarım, hava aracı platformunun tamamından taşıma sağladığı için benzer büyüklüklerdeki İHA'lara göre daha fazla faydalı yük taşıyabilir. Farklı büyüklüklerdeki kanatlar farklı performans kriterlerini ve görevlerini sağlayabilmek için TURAÇ DİKY İHA gövdesine takıp çıkarılabilir. Ayrıca, TURAÇ DİKY İHA'nın kanatsız formu bir trikopter vazifesi görmektedir.

Kanat büyüklüğü, TURAÇ DİKY İHA'nın azami kalkış ağırlığı tahmini tamamlandıktan sonra yapılmıştır. TURAÇ DİKY İHA boyutlandırma hesapları yapılırken dikkat edilen esas nokta tutunma kaybı hızı olmuştur. Çünkü TURAÇ DİKY İHA dikey iniş kalkış ve ileri uçuş gerçekleştirirken geçişte tutunma kaybı hızının kritik önemi olacaktır. Tilt eden rotorlar ve gövdedeki ana taşıyıcı fan dikey uçuş için etkin olana kadar uçağın yavaşlaması gerekmektedir. Bu noktada tutunma kaybı hızı belirlendi ve hesaplamalar buna göre yapıldı.

TURAÇ DİKY İHA modeli için Reynold sayısı, tutunma kaybı hızı ve seyir hızı için merkez kanat veter boyu 1,80 m ve tak-çıkar kanat veter boyu ise 0,58 m alınarak hesaplanmış ve Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6: Farklı ölçeklerdeki prototipler için Reynold sayısı hesapları.

Hız	Gövde Kısmı	Kanat Kısmı
Tutunma Hızı (17 m/s)	2.153.868	694.024
Seyir Hızı (25 m/s)	3.167.453	1.020.624

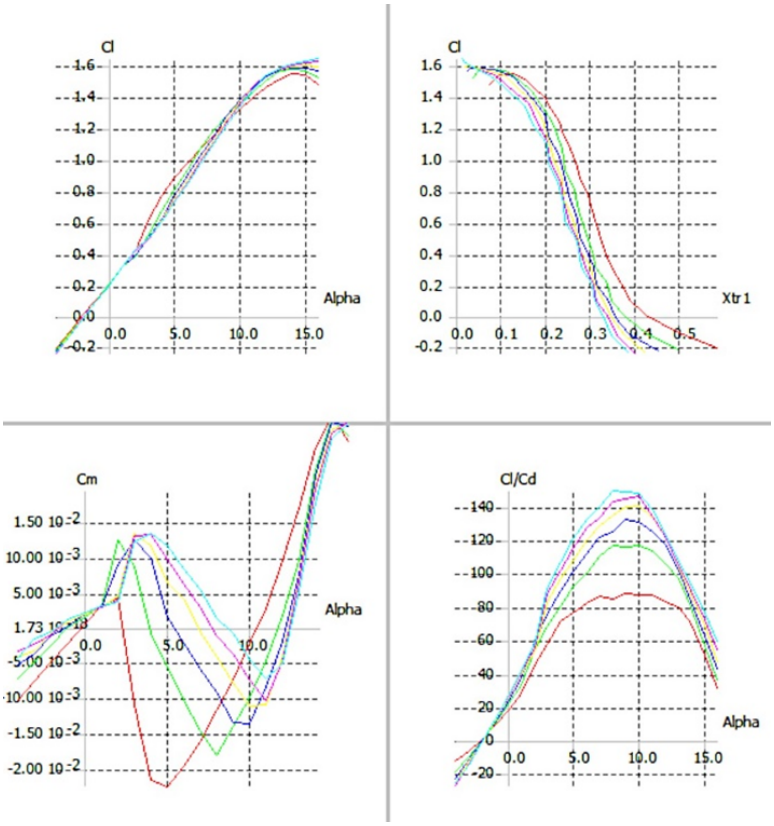


Şekil 2.19: Farklı ölçeklerdeki prototipler için Reynold sayısı grafiği.

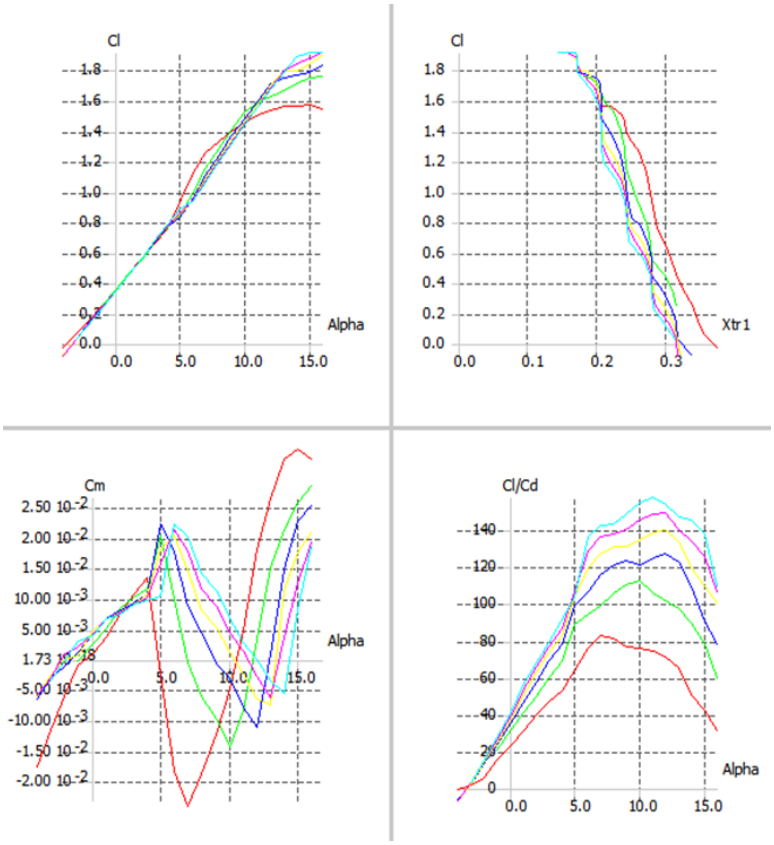
Çizelge 2.6'da görüleceği üzere merkezi gövde profil 2.000.000-3.000.000 civarında, tak çıkar kanatlar ise 700.000 – 1.000.000 civarı Reynold sayısında çalışmaktadır. Farklı ölçeklerde yapılan tasarımlar için uçuş hızı – Reynold sayısı değişimleri Şekil 2.19'de gösterilmiştir.

İlk prototipte tak-çıkar kanatta kullanılan NACA 34112 ve ana gövdede kullanılan NACA 54115 profillerinin farklı Reynold sayılarında yapılan iki boyutlu analiz sonuçları sırasıyla Şekil 2.20 ve Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Şekil 2.20'ye bakıldığında 3^o ve 8^o hücum açıları arasında Reynold sayısı değişimi ile kanat profili C_m pozitif ve negatif değerler arasında büyük oranda yer değiştiriyor. Bu nedenle 1/3 ölçekte modelde yoğun olarak C_m negatif moment oluşmaktadır. Şekil 2.21'e bakıldığında 34112 profiline benzer olarak C_m değerinde pozitif ve negatif yönde değişiklikler gözlemlenmektedir. Ancak Reynold değerlerinin daha yüksek olması nedeniyle bu değer 5^o ve 10^o arasında olmaktadır. Bu nedenle 1/3 ölçekte modelde yoğun olarak C_m negatif moment oluşmaktadır.

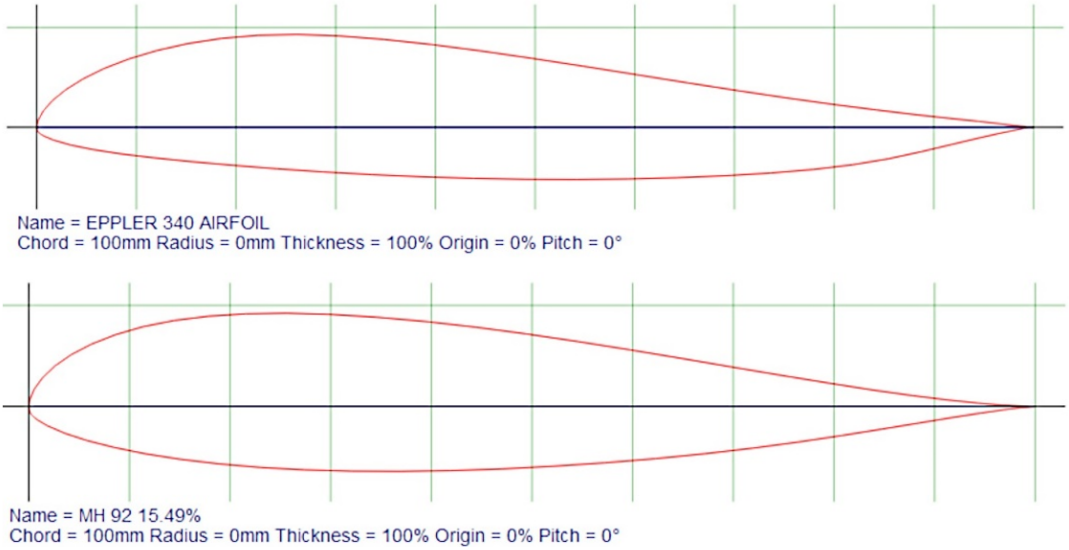
NACA 34112 ve NACA 54115 profilleri kullanılarak üretilen ilk prototipin uçuş testlerinde kalkış sırasında burun aşağı moment dolayısıyla problemler gözlenmiştir. Sonrasında farklı kanat profilleri üzerinde analizler yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2.20: Kanat kısmı için kullanılan NACA 34112 profilinin analizleri.



Şekil 2.21: Gövde kısmı için kullanılan NACA 54115 profilinin analizleri.



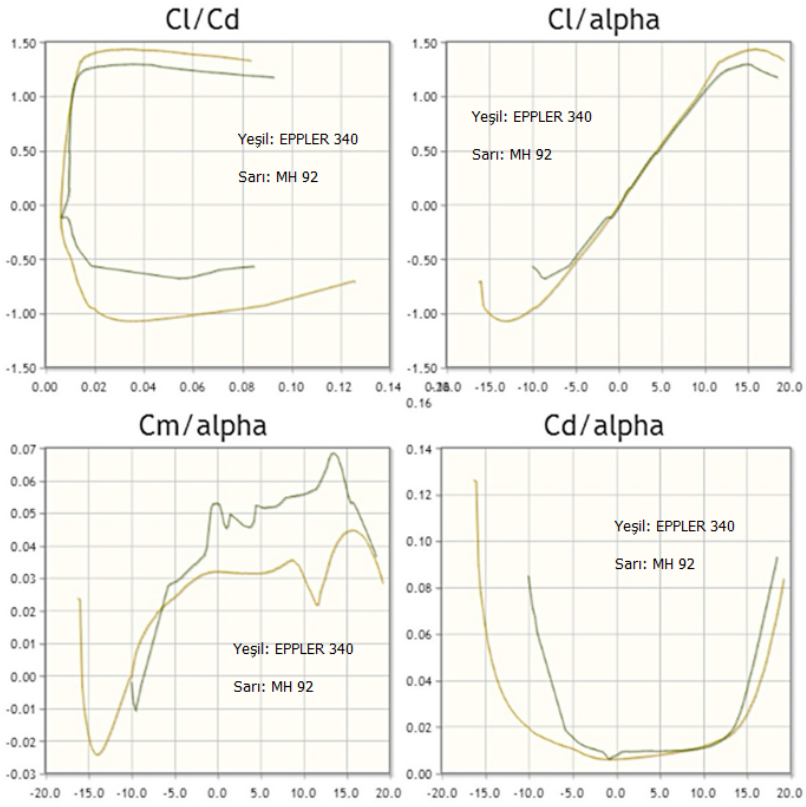
Şekil 2.22: Gövde merkez profili için karşılaştırılan EPPLER 340 ve MH92 profilleri.

Kanat profilinin Reynold sayısı değişimlerinden oldukça fazla etkilenmesi ve C_m pozitif ve C_m negatif ortamlarına geçişi uçuş yapılmasını ve küçük ölçeklerde testler yapılmasına engel olmaktadır. Bu nedenle seçilen kanat profillerinden öncelikle aşağıdaki parametreler göz önüne alınmıştır: 1) Tüm uçuş şartlarında C_m pozitif olmalıdır. 2) Reynold sayısı değişimlerinden en az etkilenmelidir. 3) Türbülanstan en az etkilenmelidir. Bu şartlar göz önünde tutulduğunda ana gövde için Eppler 340 ve MH 92 (Şekil 2.22); kanat kısmı için ise Fauvel 14 ve MH 78 kanat profilleri değerlendirilmiştir.

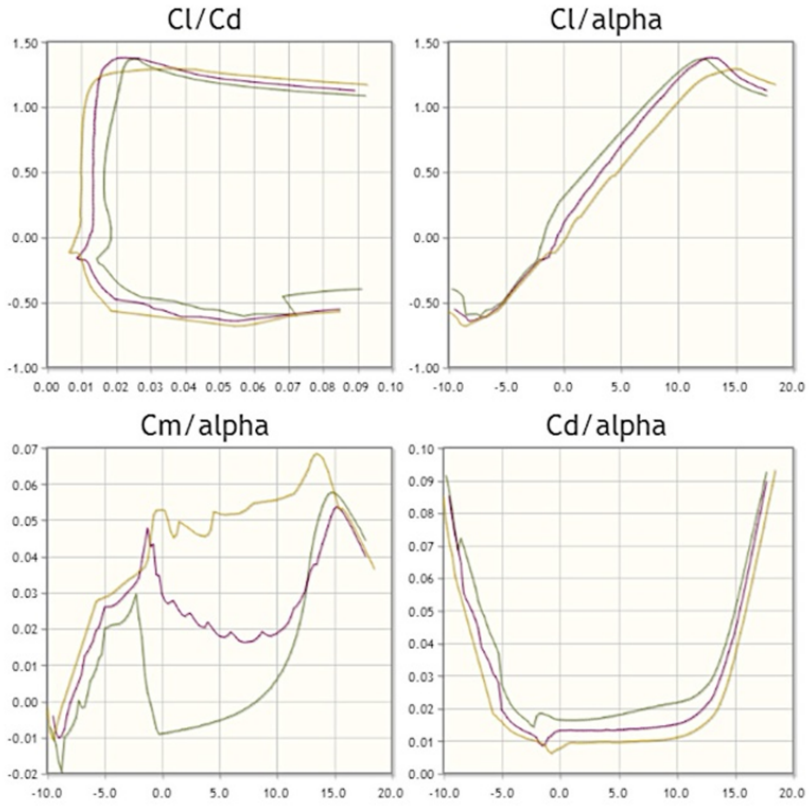
Ana gövde merkezi profili 1.000.000 ile 3.000.000 Reynold sayısı aralığında çalışmaktadır. Bu aşamada 1.000.000 Reynold sayısı değerindeki karşılaştırma Şekil 2.23'te gösterildiği gibidir.

EPPLER 340 profilinin 200.000 ila 1.000.000 Reynold sayıları arasındaki analizleri Şekil 2.24'deki gibidir. 1/1 ve 1/2 ölçekli prototip için Reynold sayısı değerlerinde profil C_m pozitifde kalmaktadır. Ancak 1/3 ve daha küçük ölçeklerde 5^o hücum açısında kanadın bazı bölgelerinde C_m negatif olabilmektedir. Reynold sayısı değişimlerinden MH 92'ye göre daha fazla etkilenmektedir (Şekil 2.25).

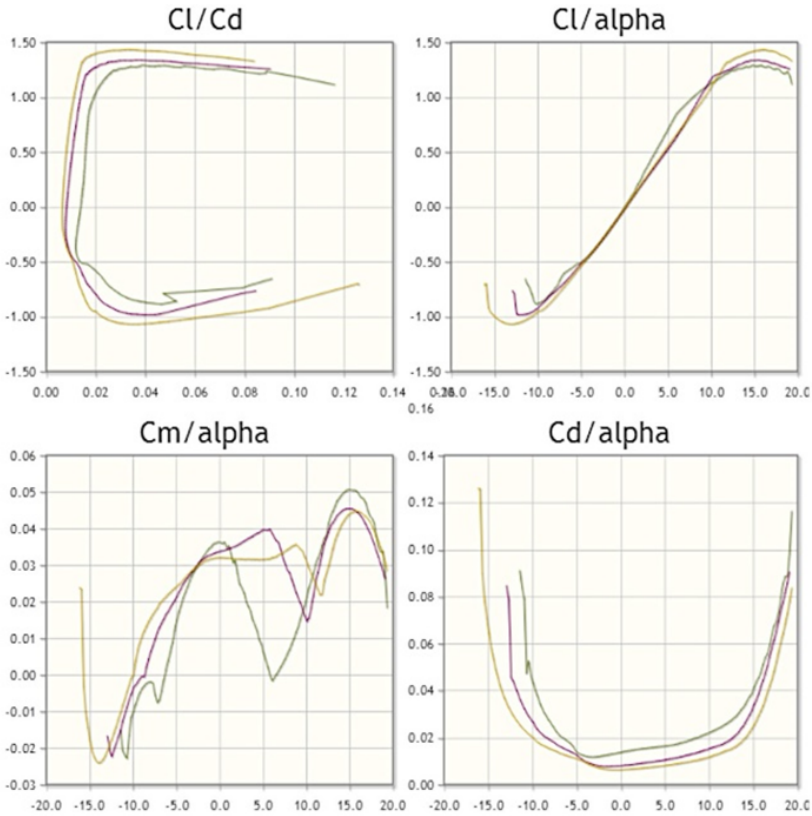
MH 92 profilinin 200.000 ila 1.000.000 Reynold sayıları arasındaki analizleri Şekil 2.25'teki gibidir. 1/1 ve 1/2 ölçekli prototip için oluşan Reynold değerlerinde profil C_m pozitifte kalmaktadır. Ancak 1/3 ölçekli ve daha küçük ölçekli prototipler için 5^o



Şekil 2.23: EPPLER 340 ve MH92 profillerinin 1.000.000 Reynold sayısındaki karşılaştırması.



Şekil 2.24: Gövde merkez profili için EPPLER 340 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi.

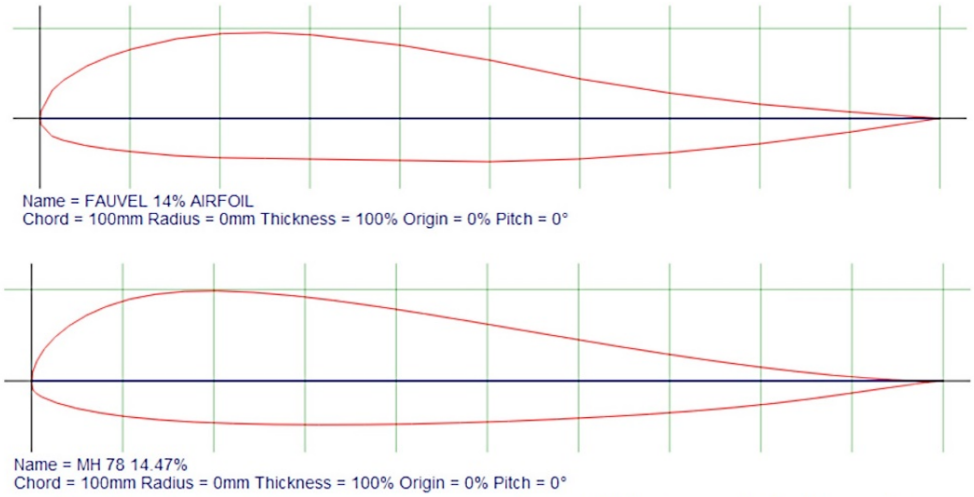


Şekil 2.25: Gövde merkez profili için MH 92 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi.

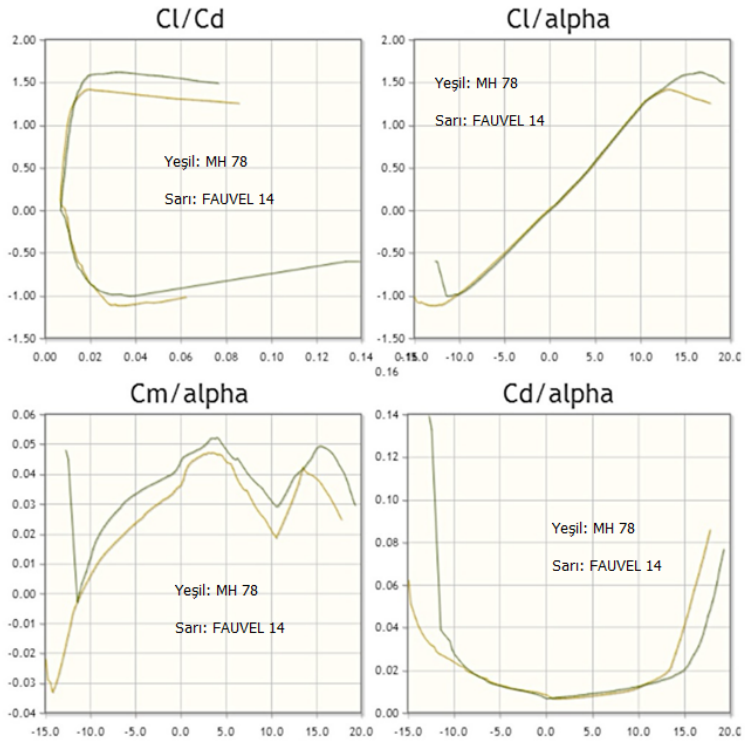
hücum açısında kanadın bazı bölümlerinde $C_m = 0$ olabilmektedir. Reynold sayısı değişimlerinden EPPLER 340'a göre daha az etkilenmektedir. Gövde için MH92 uygun bir profil olarak görünmektedir.

Tak çıkar kanat kısmının profili için FAUVEL 14 ve MH 78 reflex kanat profilleri incelenmiştir ve bu profiller Şekil 2.26'da gösterilmiştir.

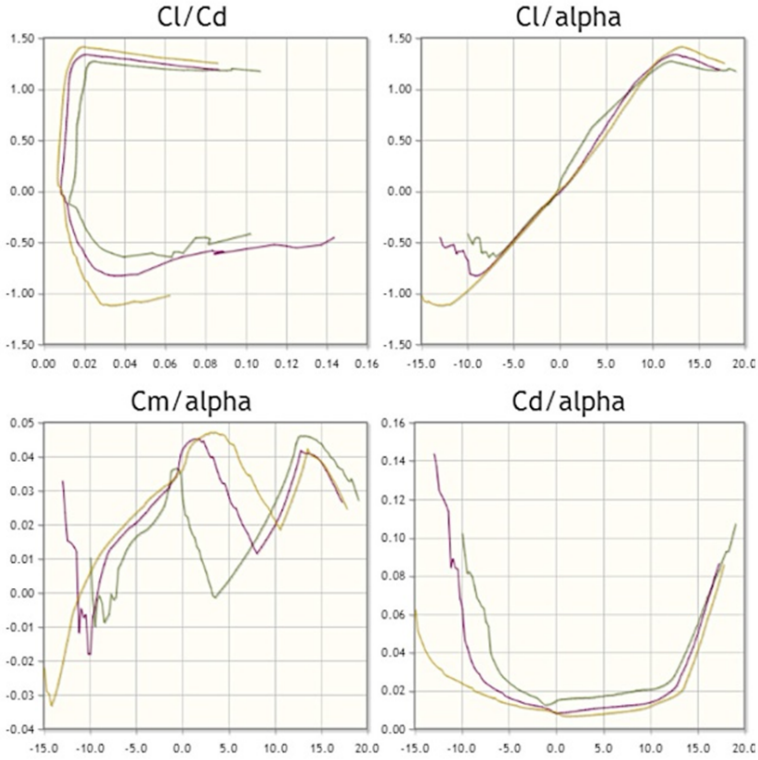
MH 78 ve FAUVEL 14 kanat profillerinin 1.000.000 Reynold sayısındaki karşılaştırması Şekil 2.27'de görüldüğü gibidir. FAUVEL 14 profilinin 200.000 ila 1.000.000 Reynold sayıları arasındaki analizleri Şekil 2.28'daki gibidir. MH 78 profilinin 200.000 ila 1.000.000 Reynold sayıları arasındaki analizleri Şekil 2.29'deki gibidir. FAUVEL 14 profili 1/1 ve1/2 ölçekli prototip için gerçekleşen Reynold sayılarında C_m pozitifte kalmaktadır. Ancak 1/3 ölçekli prototip için 5^o hücum açısında C_m negatif olabilmektedir. MH 78 profili 1/1, 1/2 ve 1/3 ölçekli prototip için gerçekleşen Reynold sayılarında C_m pozitifte kalmaktadır. MH 78 uygun bir profil olarak görünmektedir.



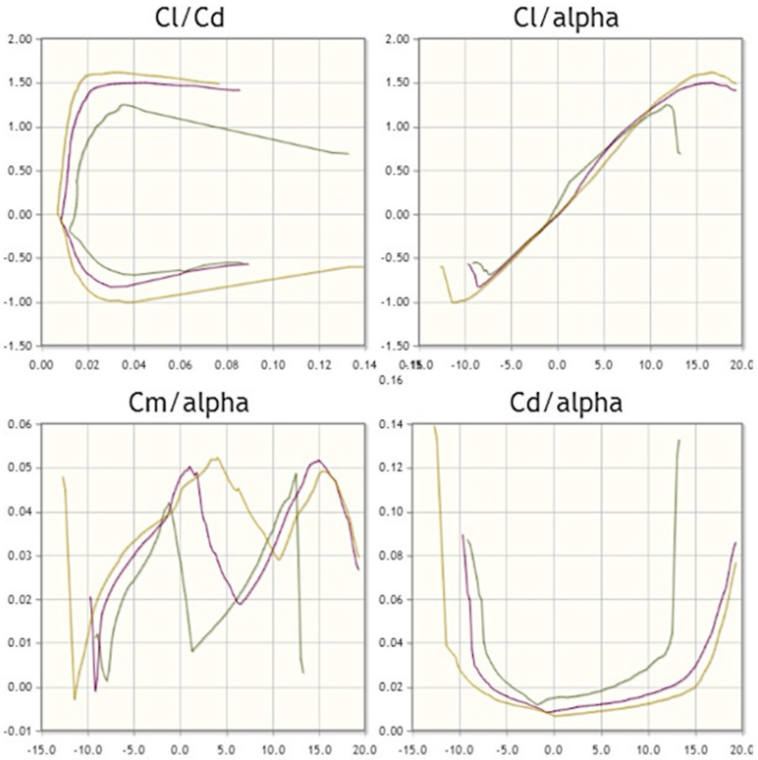
Şekil 2.26: Tak-çıkar kanat kısmı için karşılaştırılan FAUVEL 14 ve MH 78 profilleri.



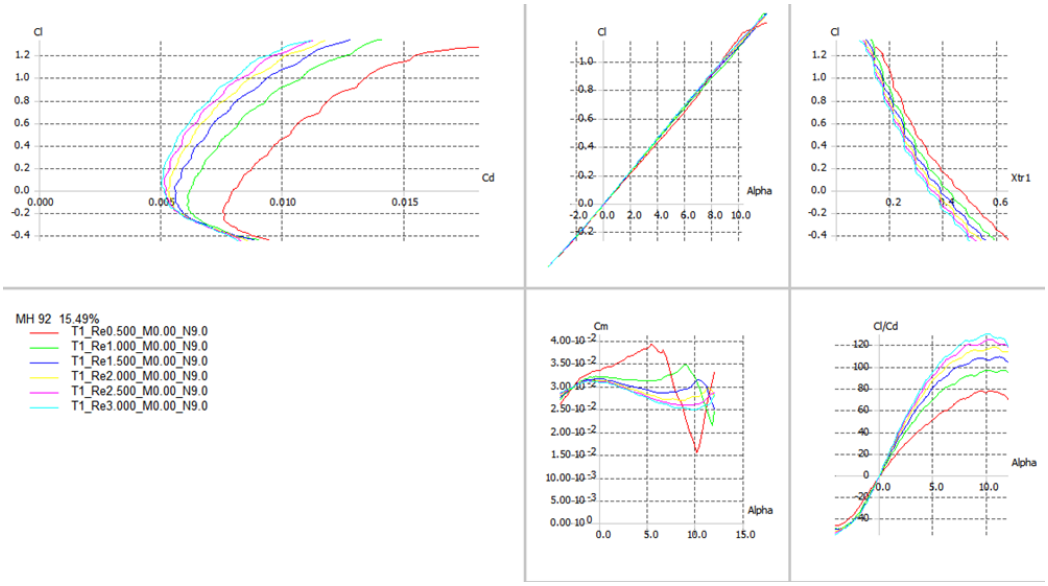
Şekil 2.27: FAUVEL 14 ve MH78 profillerinin 1.000.000 Reynold sayısındaki karşılaştırması.



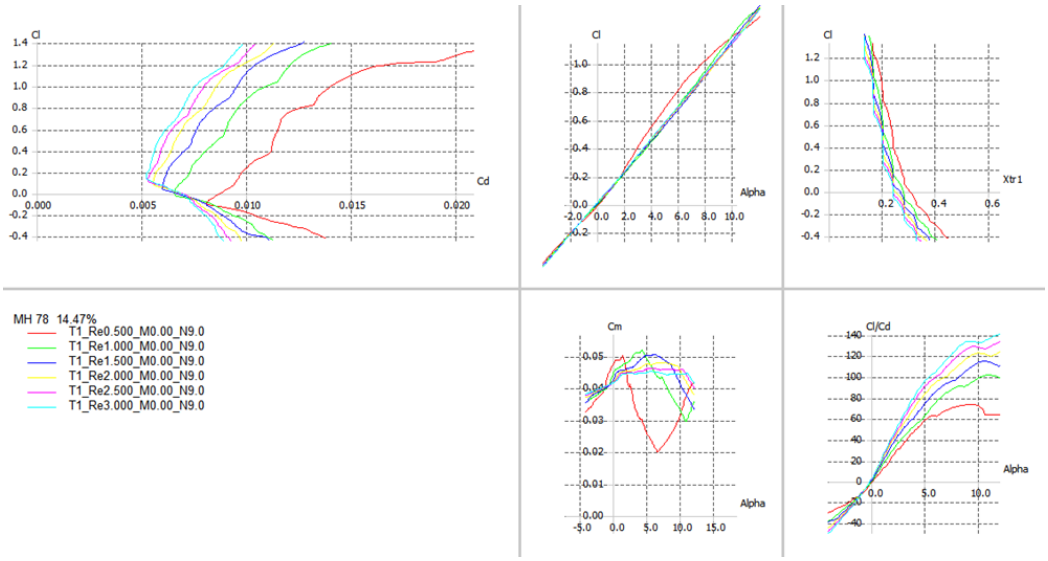
Şekil 2.28: Tak-çıkar kanat kısmı profili için FAUVEL 14 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi.



Şekil 2.29: Tak-çıkar kanat kısmı profili için MH 78 profilinin farklı Reynold sayılarında analizi.



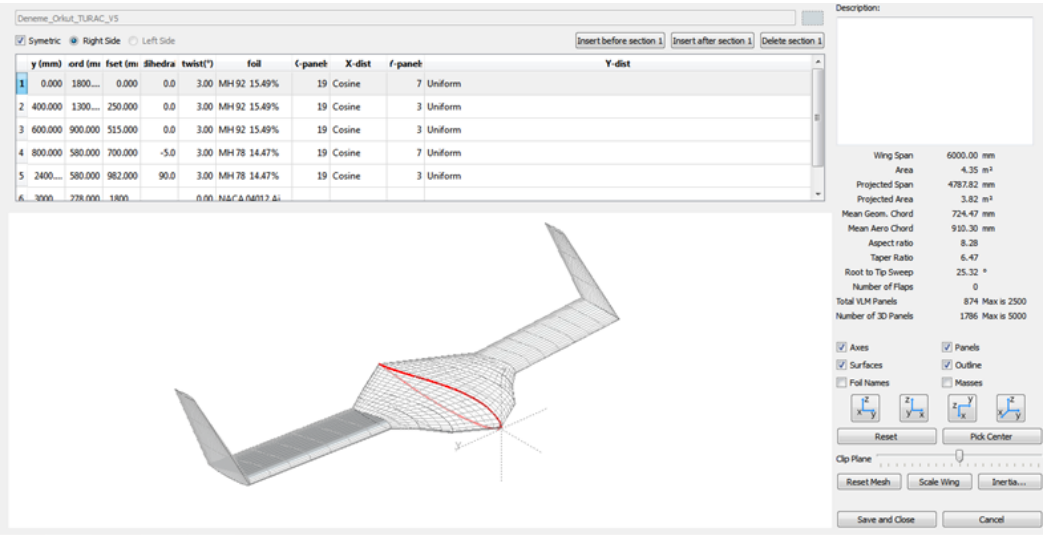
Şekil 2.30: MH 92 kanat profili için farklı Reynold sayılarında 2D analiz sonuçları.



Şekil 2.31: MH 78 kanat profili için farklı Reynold sayılarında 2D analiz sonuçları.

TURAÇ V5 için öncelikle kanat profilleri seçilmiş ve bu profiller uçağın çalışma şartları olan 500.000 - 3.000.000 Reynold sayıları aralığında 2D olarak analizler yapılmış, sonuçlar Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'de gösterilmiştir. Merkezi profil için MH92 tak çıkar kanatlar içinse MH78 kanat profilleri seçilmiştir. Yapılan analizlerde farklı Reynold sayılarındaki değişimin çok büyük olmadığı görülmüştür.

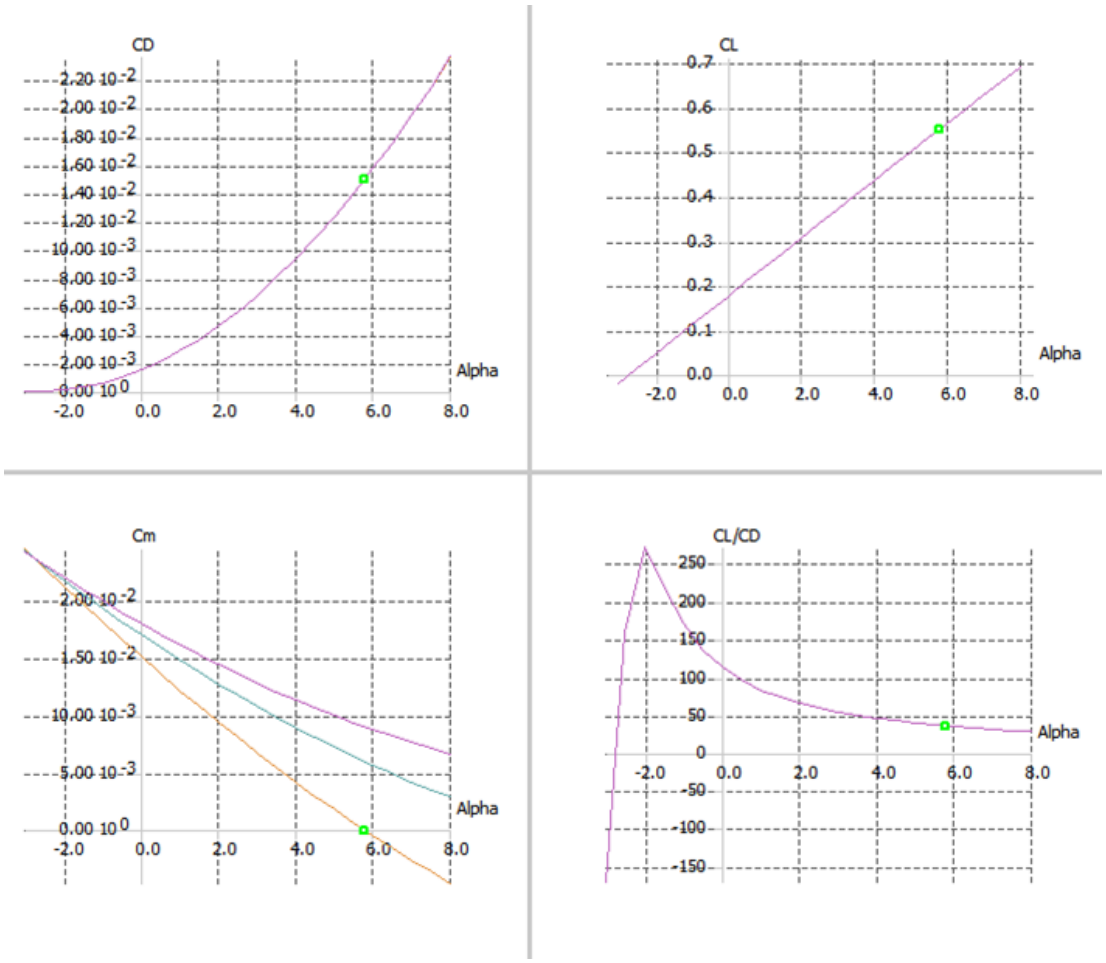
TURAÇ V5 için XFLR5 programında Şekil 2.32'de görüldüğü gibi model oluşturulmuş ve farklı girdiler için yapılan analizler sonuçları Şekil 2.33'te gösterilmiştir. Böylelikle XFLR5 programı kullanılarak farklı koşullardaki aerodinamik katsayılar elde edilmiştir (Şekil 2.34 ve 2.35). Örnek bir analiz için girdiler aşağıdaki gibidir:



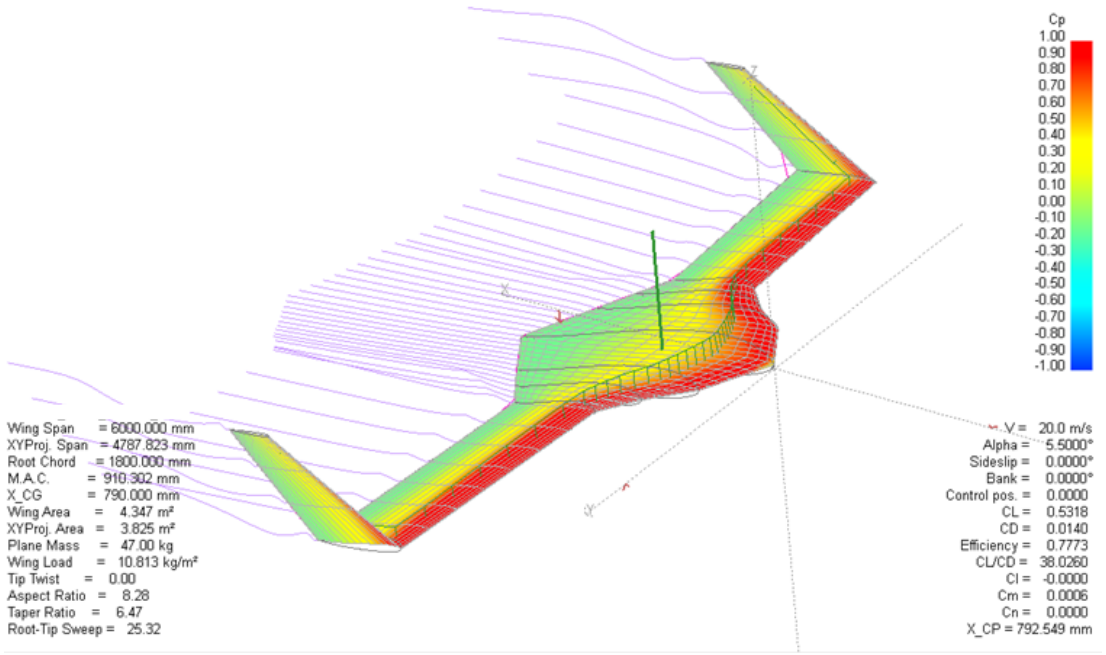
Şekil 2.32: TURAÇ V5 versiyonu için XFLR5 ortamında oluşturulan 3D modeli.

- Type 1: Fixed speed
- VInf = 20 m/s
- 3D-Panels/VLM2
- Mass = 47.000 kg
- CoG.x = 790 mm
- CoG.z = 21.51 mm
- B.C. = Dirichlet
- Analysis type = Inviscid
- Ref. Area = Planform area
- Density = 1.225 kg/m^3
- Viscosity = 1.5e-05 m^2/s

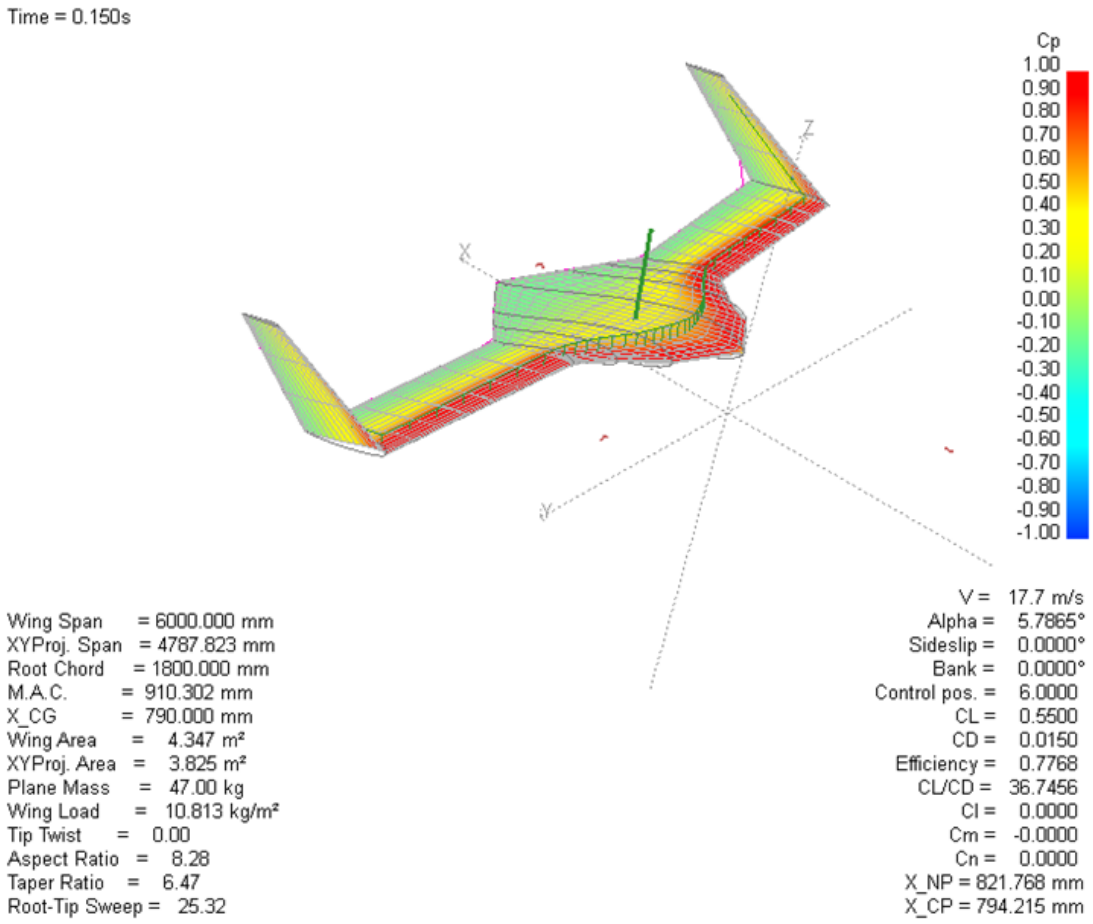
TURAÇ V5'in 20 m/s uçuş hızı ve 5,5 derece hücum açısı için XFLR5 programında gerçekleştirilen 3D aerodinamik analiz sonuçları Şekil 2.34'te, uçuş denge koşulları için gerçekleştirilen 3D aerodinamik analiz sonuçları Şekil 2.35'te gösterilmiştir. XFLR5 programı ile kullanılarak elde edilen sonuçlar tasarım, benzetim ve kontrol çalışmaların girdisi olmuştur.



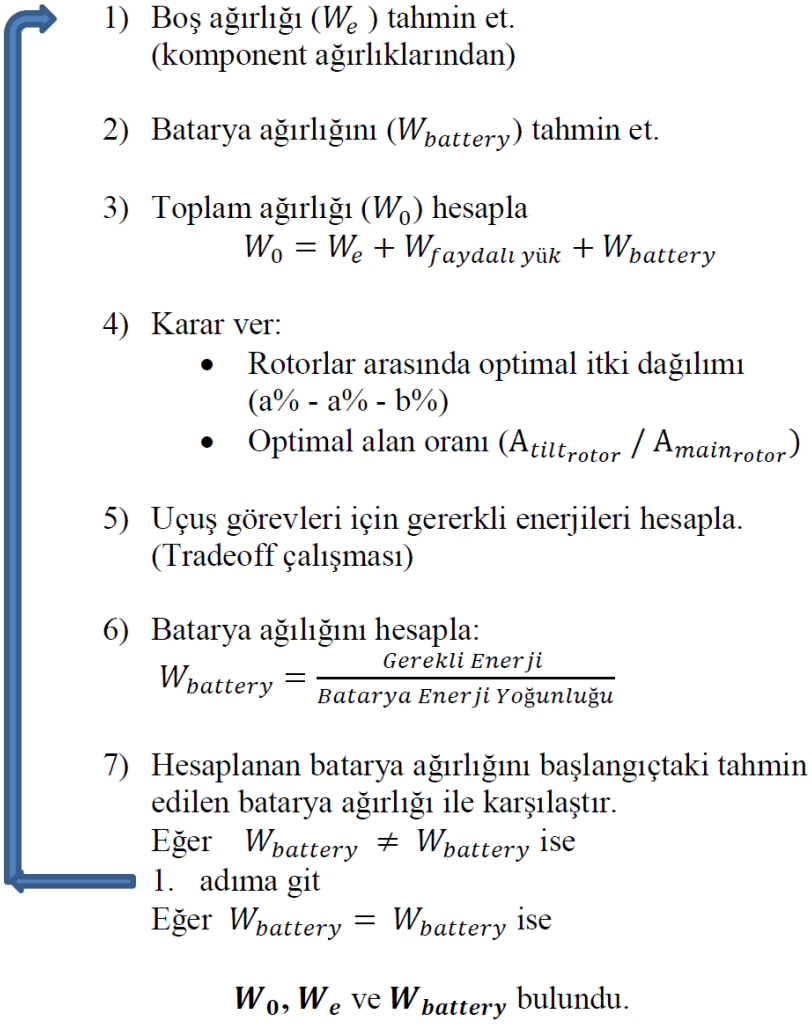
Şekil 2.33: TURAÇ V5 versiyonu XFLR5 ortamında elde edilen 3D analiz sonuçları.



Şekil 2.34: TURAÇ V5'in 20 m/s uçuş hızı ve 5,5 derece hücum açısı için 3D aerodinamik analiz sonuçları.



Şekil 2.35: TURAÇ V5'in uçuş denge koşulları için gerçekleştirilen 3D aerodinamik analiz sonuçları.

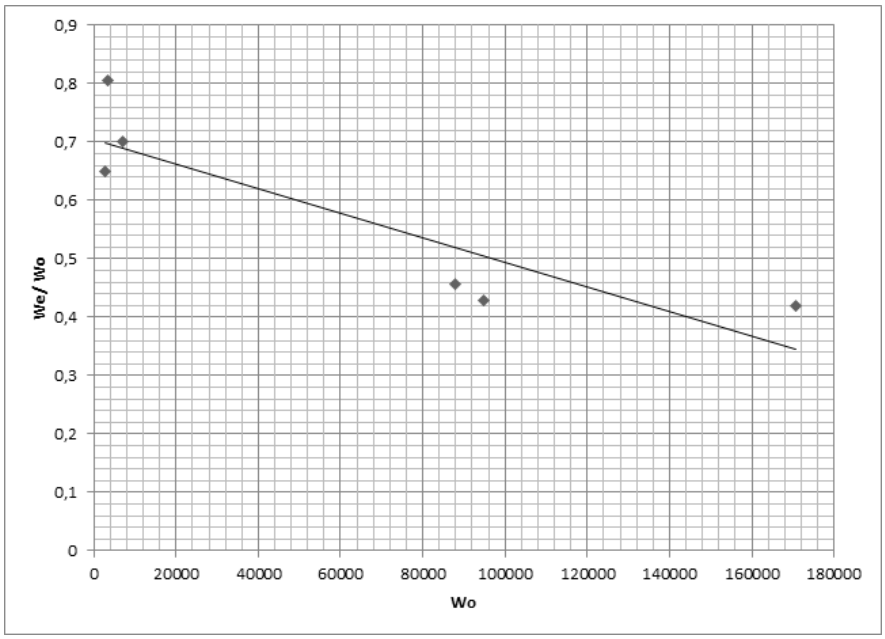


Şekil 2.36: TURAÇ DİKY İHA tekrarlamalı ağırlık tahmin algoritması.

2.6 Ağırlık Tahmini

Uçağın azami kalkış ağırlığı, uçak tasarım sürecinde boyutlandırmadan performansa uçak için bir çok parametreyi etkileyen en önemli noktalarından biridir. Tasarımda azami uçak ağırlığı doğru olarak tahmin edilemez ise birçok analizin sonucu yanlış olacaktır. Dolayısıyla uçağın azami kalkış ağırlığının tahmini çok önemlidir. Bu çalışmada TURAÇ DİKY İHA için geliştirilen ve uygulana tekrarlamalı ağırlık tahmin algoritması anlatılmıştır (Şekil 2.36).

Şekil 2.36'da gösterilen ağırlık tahmin algoritması aşağıda adım adım anlatılmıştır: Uçağın azami kalkış ağırlığını tahmin etmedeki birinci adım boş ağırlığın (W_e) tahmin edilmesidir. Boş ağırlığı tahmin etmek için boş ağırlığın azami kalkış ağırlığına



Şekil 2.37: DİKY uçaklar için tarihsel olarak W_e/W_0 verisi.

oranına (W_e/W_o) ilişkin uçan kanat sistemlerinin geçmiş verilerinden elde edilen Şekil 2.37'den yararlanabiliriz. Geçmiş verilere baktığımızda, W_e/W_o oranı 100 kilogramdan az ağırlığa sahip uçaklar için 0,6 ve 0,8 arasındadır. Boş ağırlığın azami kalkış ağırlığına oranının 0,8 olmasını bekleriz, çünkü güç tamamen elektrik ve akü destekli bir sistemle sağlanacaktır; bu da iç yakımlı motor sistemlerine kıyasla (şu anki teknolojiyle 15-20 kilogramdan daha fazla azami kalkış ağırlığı için) oldukça düşük enerji yoğunluğuna sahip bir sistemdir.

TURAÇ DİKY İHA sisteminin tasarım gereksinimlerinden birisi de 8 kg'lik faydalı yük taşımaktır. W_e/W_0 oranı Denklem 2.1'de yaklaşık 0,8 olduğundan, aşağıdaki formülü kullanarak W_0 40 kg bulunabilir:

$$\frac{W_0 - 8}{W_0} = 0.8 \tag{2.1}$$

Ancak tekrarlı süreci başlatmak için gereken ilk ağırlık tahmini için fazladan sistem ağırlığı (5 kg) eklemek zorundayız, çünkü sistemimiz bir DİKY konseptidir ve gövdede fazladan bir taşıyıcı fan sistemi ve ek mekanizmalardan dolayı geleneksel iniş kalkış yapan hava araçlarından daha fazla ağırlığa sahiptir. Bu noktada başlangıç ağırlık tahminimiz $W_0 = 45\ kg$ olacaktır. Bu ilk ağırlık tahminimiz Çizelge 2.7'de belirtilen TURAÇ DİKY İHA bileşenlerinin kompanent bazında oluşacak ağırlık tahminizle de uyumludur.

Çizelge 2.7: Tekrarlamalı ağırlık tahmin algoritması için ilk ağırlık tahmini.

Yapısal	7 kg
Avionik	5 kg
Payload	8 kg
Batarya	20 kg
Motor + ESC	5 kg
MTOW	45 kg

TURAÇ DİKY İHA sisteminin azami kalkış ağırlığı tahminde ikinci ve kritik faktör bataryanın ağırlığıdır. Batarya ağırlığı, doğrudan beklenen görevler ve süreleriyle ilişkilidir. Hava platformunun görev süresi için gereken güç, hızlı ve kabul edilebilir çözümlerin arandığı bir yöntem olan momentum teorisiyle hesaplanır. Tek pervaneler için güç hesaplaması Denklem 2.2 ile yapılır.

$$P = \frac{1}{FM} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}} \tag{2.2}$$

burada

P: güç

FM: Figure of Merit

T: itki

ρ: hava yoğunluğu

A: alan

FM ideal durum için 1 iken genellikle 0,80 olarak alınır.

TURAÇ DİKY İHA'nın gövdesinde kullanılan kanallı fan (ducted fan) için güç hesaplaması Denklem 2.3 ile yapılmaktadır.

$$P = \frac{1}{FM} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{4\rho A}} \tag{2.3}$$

İlk tahmin edilen ağırlık için Çizelge 2.8'de belirtilen görevler süreleri için gerekli enerji Denklem 2.4 ile hesaplanmıştır.

$$E_{toplam} = E_{toplam_DIKY} + E_{toplam_tirmanma} + E_{toplam_seyir} + E_{toplam_alcalma} \tag{2.4}$$

Çizelge 2.8: Uçuş görevleri için gerekli enerjiler.

	Süre (dak.)	Enerji (Wh)
DİKY	10	2040,80
Tırmanma	7,5	362,73
Seyir	60	1025,96
Alçalma	7,5	69,81
Toplam	85	3499,30

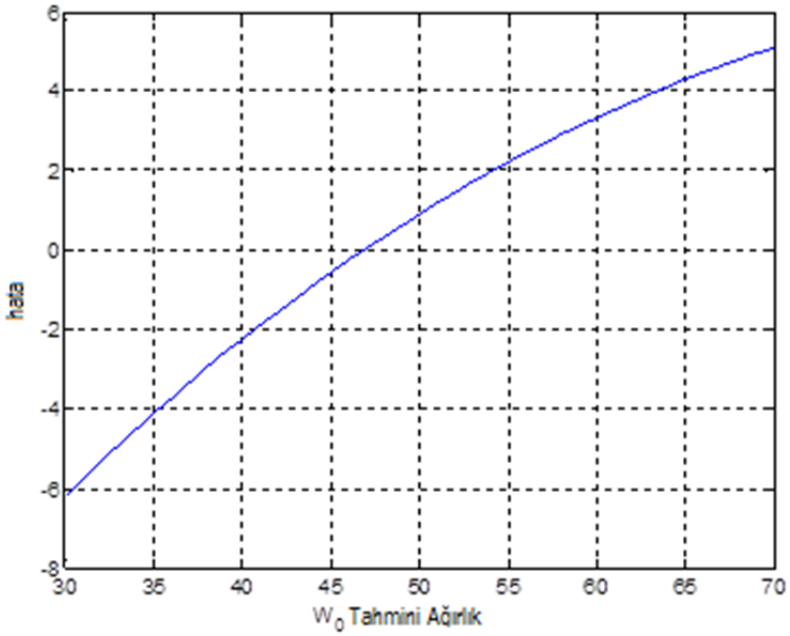
Çizelge 2.9: Mevcut batarya teknolojisi.

Batarya Markası	Maks. amps.	ZIPPY flightmax 8400 mAh 3S2P 30C	Turnigy nano-tech 8000 mAh 6s 25 50C
Hücre Sayısı	6	3 x 2	6
Birim Ağırlığı (kg)	1,22	0,772	1,111
Kapasite (mAh)	11000	8400	8000
Voltaj	22,2	9,9	22,2
Güç (Wh)	244,2	83,16	177,6
Güç Yoğunluğu (Wh/kg)	200,16	107,72	159,85

Çizelge 2.9'da farklı markaların günümüzde sunduğu bataryaların özellikleri verilmiştir. Günümüz teknolojisinde en fazla 200,16 Wh/kg güç yoğunluğu sunulmaktadır. Seçilen batarya sistemi MaxAmps Company şirketine ait 11000 mAh, 22.2 V kapasiteli, 6 pilli LiPo batarya sistemidir; bu şirket profesyonel model uçaklar ve insansız hava araçları için batarya sistemleri üretir. Bu bataryanın değerleri TURAÇ DİKY İHA tasarımında kullanılmıştır. Sistemin gerektirdiği enerjiyi sağlayacak bataryanın ağırlığı Denklem 2.5 ile hesaplanabilir. LiPo bataryaların batarya ömrünü korumak için yeniden dolum öncesindeki akü tüketimi tam kapasitenin % 85'inden daha az olmamalıdır. Denklem 2.5'te paydada bulunan 0,85'in sebebi budur.

$$W_{batarya} = \frac{Gerekli\ toplam\ enerji\ (Wh)}{Batarya\ Guc\ Yogunlugu\ \times\ 0,85} \tag{2.5}$$

Böylelikle başlangıçta tahmin ettiğimiz batarya ağırlığıyla oluşan uçağın azami kalkış ağırlığı ve gerekli uçuş görevleri için bir gerekli batarya ağırlığını hesaplanmıştır. Başlangıçta tahmin edilen batarya ağırlığı ile hesaplanan batarya ağırlığı birbirine eşit değilse algoritmanın birinci adımına gidilir ve tekrardan ağırlık tahminleri ile algoritma tekrarlanır. Bu süreç, hesaplanan $W_{batarya}$ değeri tahmin edilen $W_{batarya}$ değerine eşitlenene kadar tekrar edilir. Tekrarların sonunda uçağın azami kalkış ağırlığı (W_{MTOW}) 47 kilograma eşitlendiği noktada tekrarlama hatası neredeyse sıfırdır



Şekil 2.38: Ağırlıklar için tekrarlama hatası.

Çizelge 2.10: TURAÇ DİKY İHA ağırlık dağılımı.

Yapısal	7 kg
Aviyonik	5 kg
Payload	8 kg
Batarya	22 kg
Motor + ESC	5 kg
MTOW	47 kg

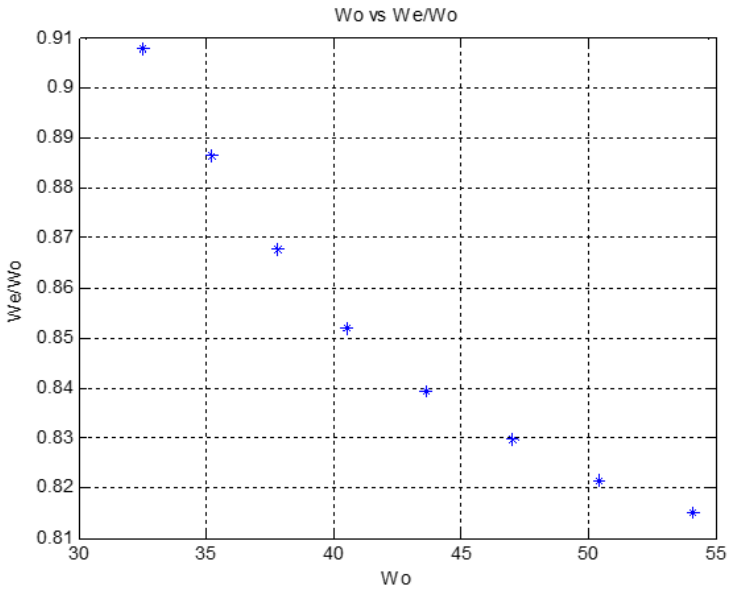
(Şekil 2.38). Bu tekrarların sonucunda uçağın azami kalkış ağırlığı 47 kg olarak bulunmuştur. Ağırlıkların dağılımı Çizelge 2.10'da verilmektedir.

TURAÇ DİKY İHA sistemi için uyguladığımız bu algoritma farklı faydalı yük kapasiteleri için uygulanabilir. Bu durumda farklı faydalı yük kapasiteleri için oluşan azami kalkış ağırlığı değerleri Çizelge 2.11'de görülmektedir. Bu çizelgeden görüleceği üzere bir faydalı yük- azami kalkış ağırlığı değiş tokuşu vardır. Farklı faydalı yük değerlerini taşımak için gerekecek toplam uçak ağırlıkları bu çizelgeden görülebilir.

TURAÇ DİKY İHA'nın taşıyabileceği farklı faydalı yük değerleri için gereken azami kalkış değerlerinden boş ağırlığın toplam ağırlığa oranları Şekil 2.39'daki gibi gösterilebilir. Uçak ağırlığı arttıkça W_e/W_o oranı azalmaktadır. Başka bir değişle uçağın azami kalkış ağırlığı arttıkça taşıyabileceği faydalı yük ağırlığının yüzdesi artmaktadır. Ancak elektrikli motor sistemi belli bir motor ağırlığına kadar müsade

Çizelge 2.11: Farklı faydalı yük ağırlıkları için azami kalkış ağırlığı hesaplamaları.

$W_{payload}$	W_0 (kg)
3	32,5
4	35,2
5	37,8
6	40,5
7	43,6
8	47,0
9	50,4
10	54,1



Şekil 2.39: W_e/W_o oranının W_o ile değişimi.

etmektedir. 50 kg aşan durumlarda elektrikli ve içten yanmalı motorların hibrit olarak kullanıldığı sistemler veya yakıt pili düşünülebilinir.

2.7 Detaylı Boyutlandırma

Ağırlık tahmini gerçekleştikten sonra, uçağın aerodinamik özellikleri de göz önünde bulundurularak boyutlandırma süreci gerçekleştirilebilir. Ancak boyutlandırma sadece hesaplamalara bağlı kalınmayıp aynı zamanda uçuş tecrübelerinden de yararlanılmıştır. Örneğin yapılan uçuşlarda kontrol yüzeyinin etkisi istenilen seviyede değilse ebatları büyütülmüştür. Kalkış ve inişte, hava aracının uçuş hızı tutunma kaybı hızına yakındır. Bu noktada hesaplamalar azami yükte uçuş hızının tutunma kaybı hızına yakın olduğu düşünülerek yapılmalıdır. Seyir anında taşımanın uçağın azami ağırlığına (47 kg) eşit olduğu düşünüldüğünde, Denklem 2.6'dan (S) kanat alanı 3,825 m^2 olarak hesaplanır.

$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_L \quad \textbf{(2.6)}$$

burada

L: taşıma

ρ: hava yoğunluğu

V: uçuş hızı

S: kanat alanı

C_L: taşıma katsayısı

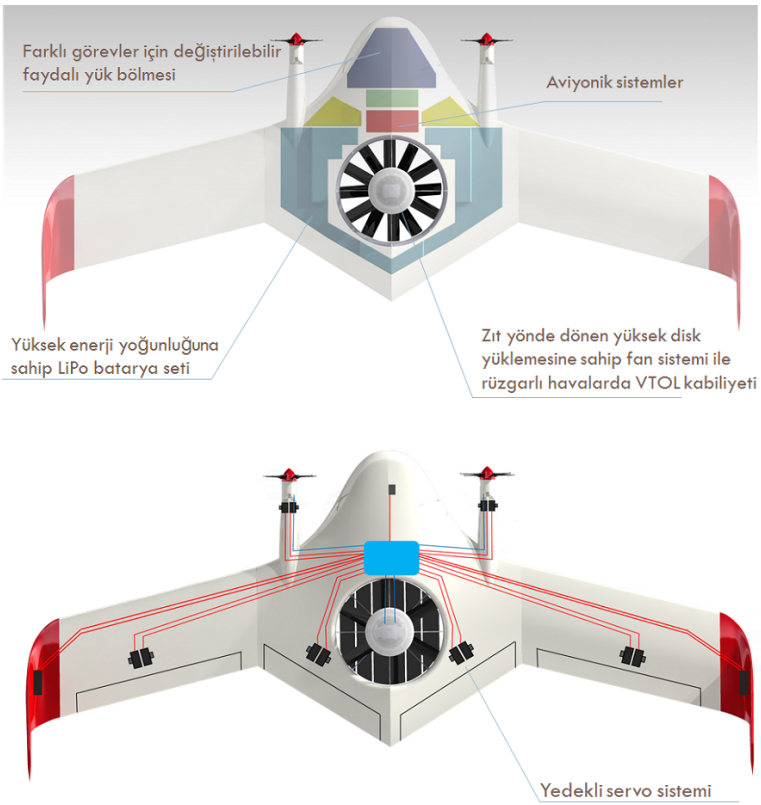
Kanat yüklemesi (W/S) ise 12,28 kg/m^2 olarak hesaplanır; bu durum bu tür İHA sistemleri için oldukça düşük bir kanat yüklemesi teşkil etmektedir.

Gövdenin sivrilik oranı (taper ratio) 0,32 iken değişebilir kanatta sivrilik oranı 1'dir. Kararlılığı artırmak için kanatlarda 10 derece ok açısı vardır. Ok açısı sebebiyle oluşan taşıma kaybı kanat ucunda bulunan wingletler ile telafi edilir.

Uçuş görevlerinin yerine getirilmesi için gerekli enerjiler pervanelerin farklı disk alanı oranları için hesaplanmıştır. Buna göre farklı itki dağılımları için en düşük enerji tüketimi farklı disk alanı oranlarında gerçekleşmiştir (Çizelge 2.12). Geleneksel iniş kalkış yapan İHA'lar için (T/W) optimal olarak 0,30, dikey iniş kalkış yapan uçaklar için ise 1,30 oranını sağlaması beklenir. TURAÇ DİKY İHA hem helikopter gibi dikey iniş kalkış yapacağı için T/W oranını 1,30 ve hem de sabit kanatlı bir uçak gibi ileri uçuş yapacağı için 0,30 oranını sağlaması gerekir. T/W oranının dikey uçuşta 1,30 değerini sağlaması ancak itki paylaşımının öndeki rotorların %15 - %15 arkadaki ana rotorun ise %70 oranında çalışması ile sağlanır. Öteki taraftan ileri uçuş fazında ana rotor çalıştırılmadığı ve gerekli itkinin %50 - % 50 şeklinde paylaşımı ile T/W oranını 0,30 değerini sağlar. Dolayısıyla dikey iniş kalkış fazında gerekli itkinin %15 - %15 - %70 oranında karşılanmasıyla sağlanır. Bu itki paylaşımı ile gerekli uçuş görevlerinin enerji harcamaları hesaplanırsa en düşük enerji gereksinimi rotor disk alan oranlarının 2,3 olduğu durumda gerçekleşir. Hesaplamalar ve uçuş testleri sonucunda karar verilen boyutlar özetle Çizelge 2.13'te verilmiştir.

Çizelge 2.12: Optimum pervane alanları oranı.

$\frac{Alan_{anarotor}}{Alan_{tiltrotor}}$	**İtki dağılımı**		
1,0	% 25	% 25	% 50
1,5	% 20	% 20	% 60
2,0	% 16,5	% 16,5	% 67
2,3	% 15	% 15	% 70
3,0	% 12,5	% 12,5	% 75



Şekil 2.40: TURAÇ DİKY İHA iç yerleşimi.

TURAÇ DİKY İHA'nın iç yerleşimi Şekil 2.40'da gösterilmiştir. İç yerleşimde ana taşıma fanı aracın orta bölüme yakındır. Ana rotor sistemi etrafında batarya sistemleri yerleştirilmiştir. Ana rotor sisteminin ön tarafta aviyonik sistemi bulunmaktadır. En önde ise farklı görevler için değiştirilebilir faydalı yük bölmesi bulunmaktadır. Kontrol yüzeyleri yedekli servo sistemi ile kontrol edilmektedir.

2.8 Performans Hesaplamaları

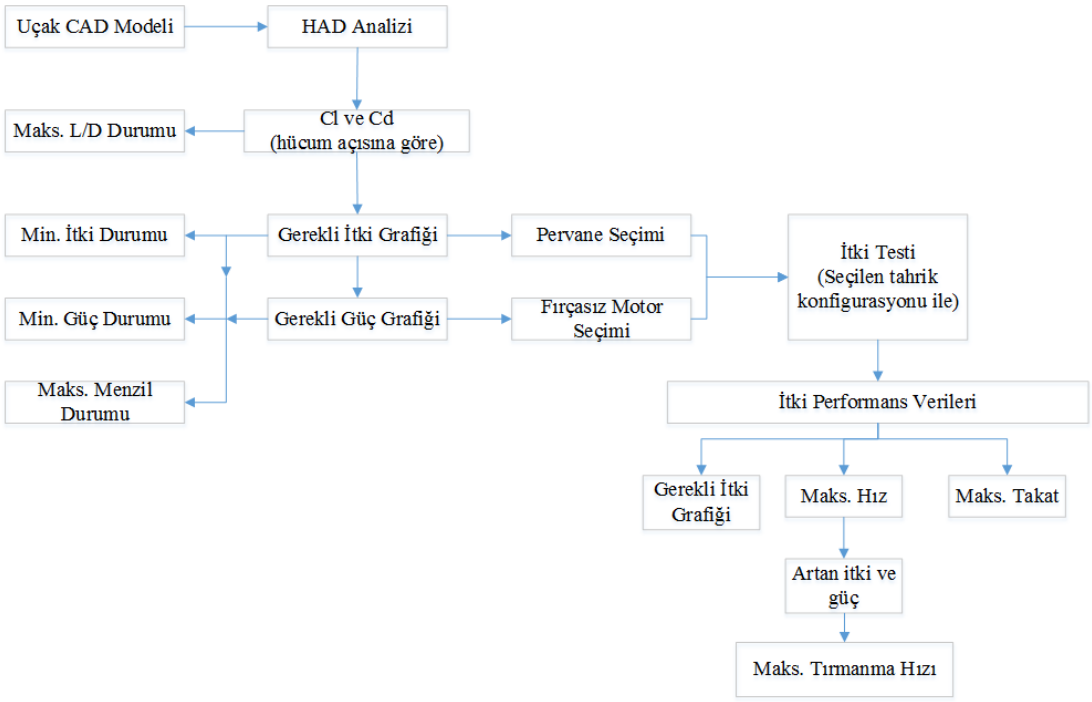
Bu bölümde nihai TURAÇ DİKY İHA tasarımının performans hesaplamaları sunulmaktadır. Tahrik sistemi, % 60'tan yüksek etkinliğe sahip LiPo temelli elektrikli tahrik sistemidir [25]. Buna ek olarak, koaksiyel rotorları bulunan askıda kalma uçuşu

Çizelge 2.13: TURAÇ DİKY İHA Boyutlandırma sonuçları.

Genel Boyutlandırma	Uzunluk	1,8 m
	Wingspan	5,2 m
	Yükseklik	1,25 m
	Kanat Alanı	3,825 m^2
	Açıklık Oranı	8,28
	Ortalama Veter	0,91 m
	Pervane Çapı	0,43 m
	Aerodinamik Merkez*	0,8355 m
	Ağırlık Merkezi	0,790 m
Gövde	Merkez Kanat profili	MH92
	Kanat ucu profili	MH78
	Gövde Uzunluğu	1,8 m
	GövdeAçıklığı	1,6 m
	Merkez Veter	1,8 m
	Uç Veter	0,58 m
	Sivrilik Oranı	0,322
Kanat**	Kök kanat profili	MH78
	Kanat ucu profili	MH92
	Veter	0,58 m
	Span	1,6 m
	Ok açısı	10^o
	Anhedral	5^o
	Elevon uzunluğu	1,6 m
	Elevon genişliği	0,145 m
Winglet	Kök kanat profili	NACA 04012
	Uzunluk	0,634 m
	Alan	0,313 m^2
	Ok Açısı (Hücum Kenarı)	38^o
	Kök veteri	0,6m
	Uç veteri	0,278 m
	Açıklık oranı	1,5
	Sivrilik oranı	0,397
	Rudder uzunluğu	0,5 m
	Rudder ucu genişliği	0,07 m
	Rudder kök genişliği	0,15 m
İniş takımı*	Yükseklik	0,421 m
	Ön iniş takımı mesafesi	0,4 m
	Ana iniş takımı mesafesi	0,897 m

*Merkez veterin hücüm kenarından olan mesafe

** Kanat ayrılabilir 2 parçadan oluşmuştur. Her parça için sonuçlar verilmiştir.



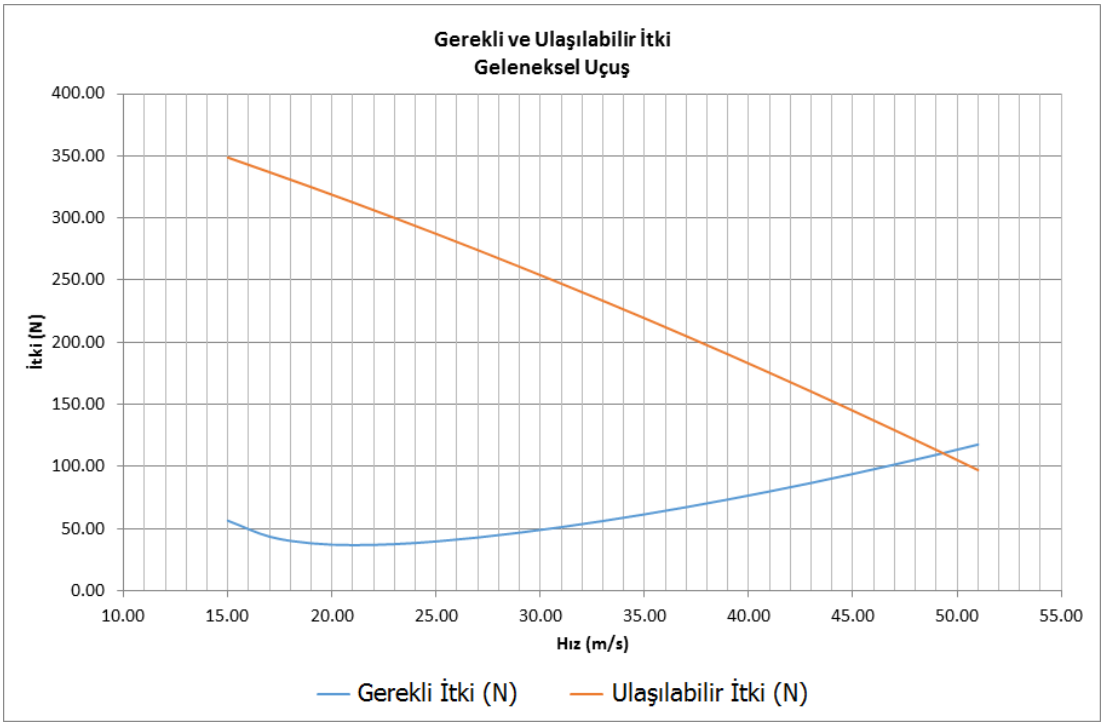
Şekil 2.41: HAD sonuçları ve itki testlerine göre performans hesaplamaları.

optimizasyonlu ana taşıma fanı ve duct içinde bulunması geleneksel rotor sistemleri ile kıyaslandığında havada askıda kalma süresini önemli ölçüde arttırır [23].

TURAÇ DİKY İHA'nın öncelikli olarak hava uzun süre kalmasını gerektiren sivil gözlem ve haritalama görevleri için kullanılması planlanmıştır. Bu nedenle, minimum güç uçuş hızları, uzun havada kalma süresi ve menzilleri için hesaplanmıştır. Maksimum tırmanma hızı, görev planlaması ve güç yönetimi için önemli bir parametre görevi görmüştür. Tahrik sistemi arızası gibi acil durumlar için maksimum süzülme hızı hesaplanmıştır.

Şekil 2.41'de performans hesaplama yöntemi gösterilmektedir. Tasarımı iyileştirmek için HAD sonuçları ilk tasarım aşamasında kullanılmıştır. TURAÇ DİKY İHA platformu farklı hız ve hücum açısı koşulları için Fluent CFD yazılımı ile modellenmiş ve analiz edilmiştir. Maksimum L/D oranı, uçağın aerodinamik olarak en etkili uçuş rejiminde uçmasına imkan tanıyan, yaklaşık 5 derecelik hücum açısıdır. Bu koşul aynı zamanda denge durumu uçuş için de kullanılmaktadır. İtki test düzeneği sayesinde elde edilen veriler, performans hesaplamaları için önemli başka bir girdi sağlamıştır.

Geleneksel uçuşta TURAÇ DİKY İHA'nın tutunma kaybı hızı 17 m/s'dir. Gerekli itki, doğrudan HAD analizinden gelen C_D değerlerinden hesaplanmıştır. Sabit



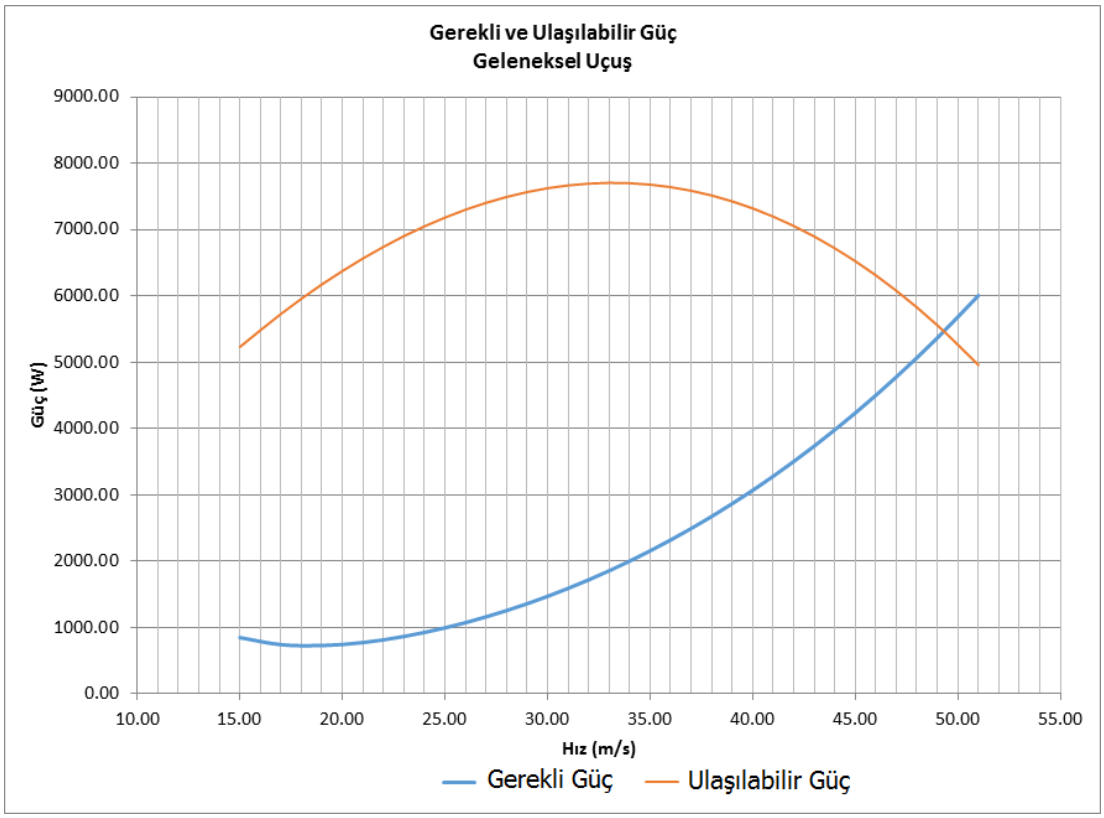
Şekil 2.42: Geleneksel uçuş için gerekli ve ulaşılabilir itki.

hızda sürükleme itkiye eşittir, dolayısıyla tahrik sisteminin tasarımı için gereken itki seviyelerinin belirlenmesi kolaylaydır. Şekil 2.42'de, mavi çizgiler gerekli itki seviyelerini gösterirken kırmızı çizgi tahrik sisteminin itki kapasitesinin tasarımında kullanılan ulaşılabilen itkisini göstermektedir. Gerekli ve ulaşılabilen itki seviyelerinin kesişimi bize 49 m/s'lik maksimum hızı vermektedir.

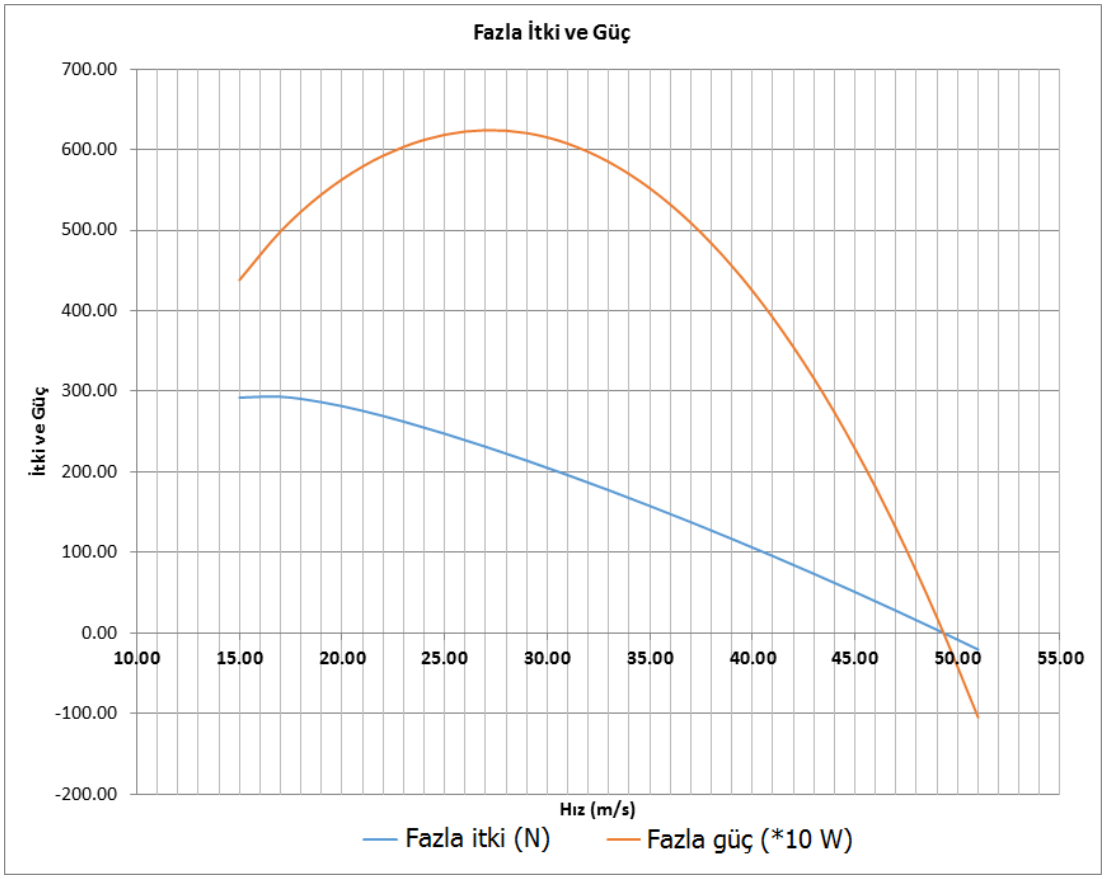
Şekil 2.43'te itkisi aynı şekilde hesaplanan, TURAÇ DİKY İHA'nın gereken ve ulaşılabilen güç seviyeleri gösterilmektedir. Gerekli güç için, uçmak için gereken minimum gücü gösterdiğinden tutunma kaybı hızından sonraki minimum hız İHA'lar için önemlisidir. Bu aynı zamanda, sınırlı bir batarya kapasitesinden minimum güç tüketimini ve maksimum uçuş süresini de ifade etmektedir. 20 m/s'de gereken minimum güç, maksimum uçuş süresine imkan tanımaktadır.

Tırmanma ve manevra performansını değerlendirmek için uçuş hızına karşı fazla itki ve güç hesaplanmıştır (Şekil 2.44). Bu değerler maksimum tırmanma açısını, tırmanma hızını ve dönüş çapını hesaplamak için kullanılmıştır. TURAÇ DİKY İHA sisteminin temel performans parametreleri Çizelge 2.14'te özetlenmiştir.

Özetle bu bölümde TURAÇ DİKY İHA tasarım çalışmaları anlatılmıştır. Öncelikle sivil havacılık uygulamaları göz önünde bulundurularak uçuş gereksimleri ve hedef



Şekil 2.43: Geleneksel uçuşta gerekli ve ulaşılabilir güç.



Şekil 2.44: Fazla itki ve güç .

Çizelge 2.14: TURAÇ DİKY İHA performans sonuçları.

Görev Profili		**İtki Dağılımı**	
Başlangıç irtifası	0 m	1. Tilt İtki Elemanı	% 15
Görev irtifası	1000 m	2. Tilt İtki Elemanı	%15
Maksimum irtifa	4500 m	Ana İtki elemanı	% 70

DİKY		**GİKY**	
Uçuş Modu	Zaman (dk.)	Uçuş Modu	Zaman (dk.)
DİKY	10	DİKY	-
Tırmanma	7,5	Tırmanma	7,5
Seyir	60	Seyir	180
Alçalma	7,5	Alçalma	7,5
Toplam	85	**Toplam**	195

Hız (m/s)			
Menzil (V_{seyir})	25	Maks. L/D	12,47
Takat ($V_{dolanma}$)	20	Maks. Tırmanma Açısı	32^o
Maks. (V_{maks})	49	Maks. Tırmanma Hızı	13.55 m/s
Tutunma kaybı (V_{stall})	17	Min. Dalış Hızı	1.68 m/s

performans kriterleri ortaya konmuştur. TURAÇ DİKY İHA'nın bu alanda doldurduğu yer rakipleri ile kıyaslanarak ortaya konmuştur. TURAÇ DİKY İHA'nın özgün tasarım ve özgün itki konfigurasyon sistemi anlatılmış ve üstünlükleri ortaya konmuştur. Tasarım sürecinin en önemli adımlarından biri olan uçağın azami kalkış ağırlığını tahmin etmek için bir algoritma gerçekleştirilmiştir. Sonraki bölümde anlatılacak olan yapısal ve aerodinamiksel sistem mühendisliği analizleri ve uçuş testlerinden elde edilen veriler tekrarlamalı tasarım sürecinin girdileri olmuştur. Uçağın boyutlandırmaları ve performans hesaplamaları yapılmıştır.

Bir sonraki bölümde (3. bölüm) tasarım sürecini yakından ilgilendirilen yapısal ve aerodinamiksel analizlerin yapıldığı sistem mühendisliği çalışmaları sunulmuştur. 4. bölümde ise bu bölümde konfigurasyon yapısı anlatılan itki sisteminin hesaplamaları ve itki elemanlarının seçimleri yapılmıştır. 5. bölümde, bu bölümde oluşan uçak geometrisi ve özellikleri göz önünde bulundurularak dinamik modelleme, simulasyon ve uçuş senaryosu oluşturma ve kontrol çalışmaları verilmiştir. 7. bölümde bu bölümde anlatılan TURAÇ DİKY İHA tasarımının üretime aktarılması anlatılmıştır. 8. bölümde bu bölümde anlatılan tekrarlamalı tasarım sürecinde değerlendirme çalışmalarından olan uçuş testleri anlatılmıştır.

3. SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ: YAPI VE AERODİNAMİK

Bu bölümde TURAÇ DİKY İHA tasarımının yapısal ve aerodinamiksel sistem mühendisliği çalışmaları yürütülmüştür. Yapısal ve aerodinamiksel çalışlamalar tasarım sürecinin girdilerini oluşturmuştur. Analiz sonuçları göz önünde bulundurularak 2. bölümde anlatılan tekrarlamalı tasarım sürecinde iyileştirmelere gidilmiştir. Yapısal analizlerde aerodimiksel analizlerden gelen veriler kullanılmıştır. Bu bölüm haricinde 5. bölümde modelleme çalışmalarında kullanmak için diğer aerodinamik analizler de gerçekleştirilmiştir.

3.1 Sistemin Yapısal Analizi

Bu kısımda; TURAÇ DİKY İHA'nın yapısal analiz modeli hazırlanmış ve modal analizleri yapılmıştır. Detaylı sonlu eleman ağı oluşturularak gerçek uçuş sırasında uçağa gelebilecek maksimum yüklemelere dayanabilecek yapısal anlamda yeterli bir uçak elde etmek hedeflenmiştir.

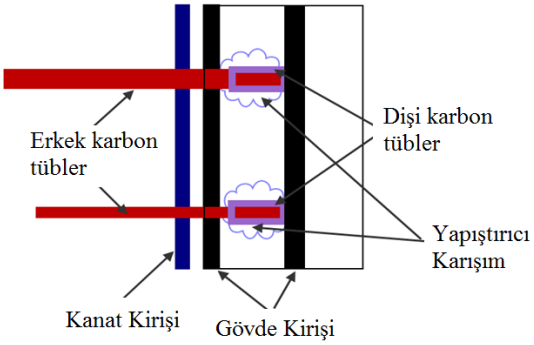
Uçakta yapısal olarak önemli tüm parçalar modellenmiş, yapısal dayanım açısından önemli olmayan, üzerinde yük taşımayan parçaların modellemesi yapılmamıştır. Kirişler, kaburgalar ve dış kabuklar modellemesi yapılan temel kısımlardır. Bunların yanında titreşim frekansını önemli ölçüde değiştiren fakat yapısal katkısı olmayan motor, pil ve elektronik parçaların kütlesi yoğunlaştırılmış kütle olarak modellenerek uçağın dinamik davranışları üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Takip edilen akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir. Sırasıyla çözüm ağının oluşturulması, modellerin birleştirilmesi, yüklerin tanımlanması, malzemelerin atanması, SEM analizleri ve son olarak değerlendirme yapılmıştır. Yapısal analiz aşamaları belirlenmiş, hangi analizlerin ne şekilde yapılacağı saptanmıştır.

Tasarım döngüsü sonucunda elde edilen geometri uçuş sırasında üzerine gelen zorlanmaya karşı koymalıdır. Aksi takdirde uçuş esnasında uçakta yapısal hasar



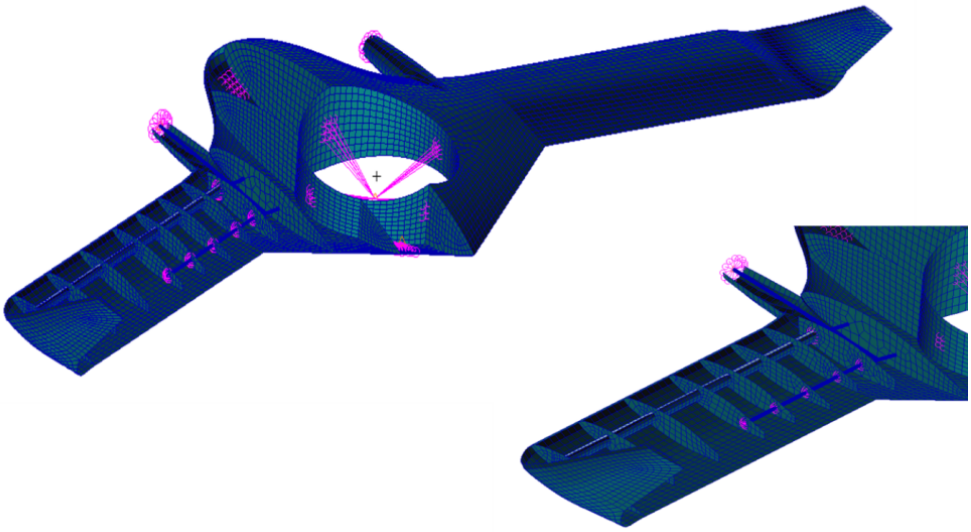
Şekil 3.1: Yapısal analiz akış şeması.



Şekil 3.2: TURAÇ DİKY İHA kanat gövde bağlantısı.

oluşabilir. Oluşan hasar emniyetsiz uçuşa sebep olarak can ve mal kaybına neden olur. Uçak uçuş görevini başarılı şekilde tamamlayamaz.

TURAÇ DİKY İHA için gösterdiği yüksek mukavemet ve düşük ağırlığı sebebiyle büyük oranda kompozit tercih edilmiştir. Uçağın kanat ve gövdesinin dış kabuklarında çift yönlü elyaf arasına bal peteği yapı kullanılarak oluşturulmuş sandviç yapıdan oluşmaktadır. Uçak destek kirişleri karbon elyaftan elde edilen borulardan oluşmaktadır. Kanattan çıkan ana kiriş ve yardımcı kiriş gövde içindeki yataklarına geçmektedir (Şekil 3.2). Bu yapı kanatların kolayca sökülüp takılmasına olanak sağlamaktadır. Kütlelerin büyük bölümü gövde içinde toplanmış durumdadır. Bu yükler gövde içindeki frameler üzerinden gövde dış kabuğuna akmaktadır.



Şekil 3.3: TURAÇ DİKY İHA sonlu elemanlar ağı.

Çizelge 3.1: TURAÇ DİKY İHA yapısal analiz sonuçları.

	Benzer boyuttaki kanat için doğal frekans değerleri (Hz)	Tasarlanan uçak kanadı için doğal frekanslar (Hz)	Doğal frekanslardaki Değişim
1. Eğilme Modu	13	11.82	% 9.07
1. Burulma Modu	46.3	45.58	% 1.55
2. Eğilme Modu	87.69	81.63	% 6.91

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi uçak modeli üzerinde sonlu elmanlar ağı oluşturulmuştur.

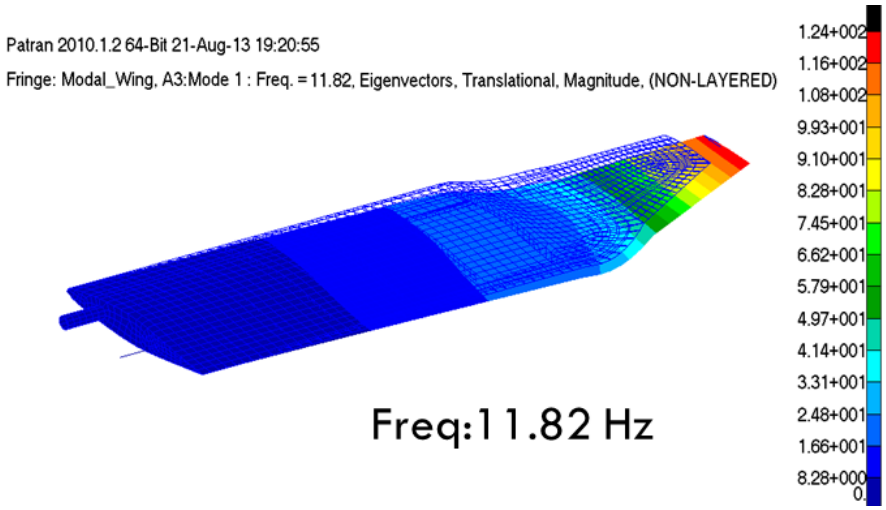
Yapılan sonlu elemanlar analizleri sonucunda Çizelge 3.1'deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Modlar ile ilgili analizler Şekil 3.4- Şekil 3.6 arasında verilmiştir. Şekil 3.7'de görüldüğü üzere, maksimum asal gerilme kanat kökü alt kabuğunda 127 MPa ve minimum asal gerilme kanat kökü üst kabuğunda 137 MPa çıkmıştır. Gerilme değerleri Çizelge 3.2'de gösterilen dayanım değerlerinin altında kalmıştır.

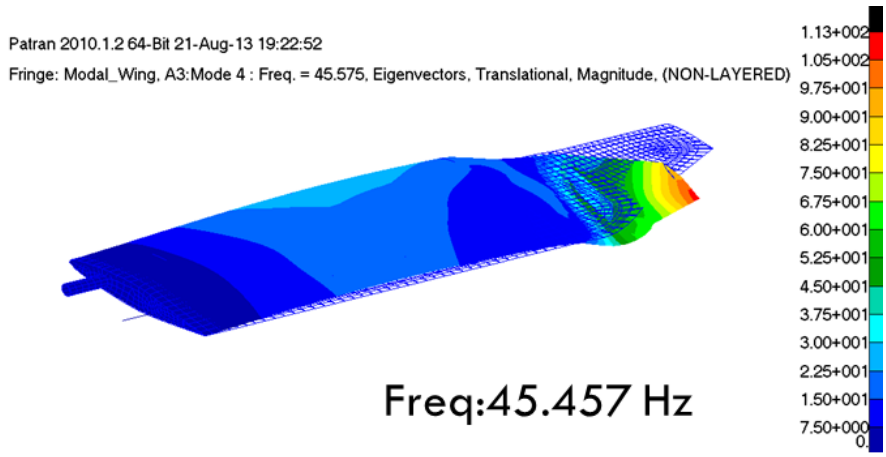
Yapılan yapısal analiz sonuçlarına göre tekrarlamalı tasarım sürecinde ana tasarım üzerinde iyileştirmelere gidilmiştir. Bu yapılan değişiklikler göz önüne alınarak uçağın yeni sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Model yoğun (fine mesh) çözüm ağı için

Çizelge 3.2: Mekanik özellikler.

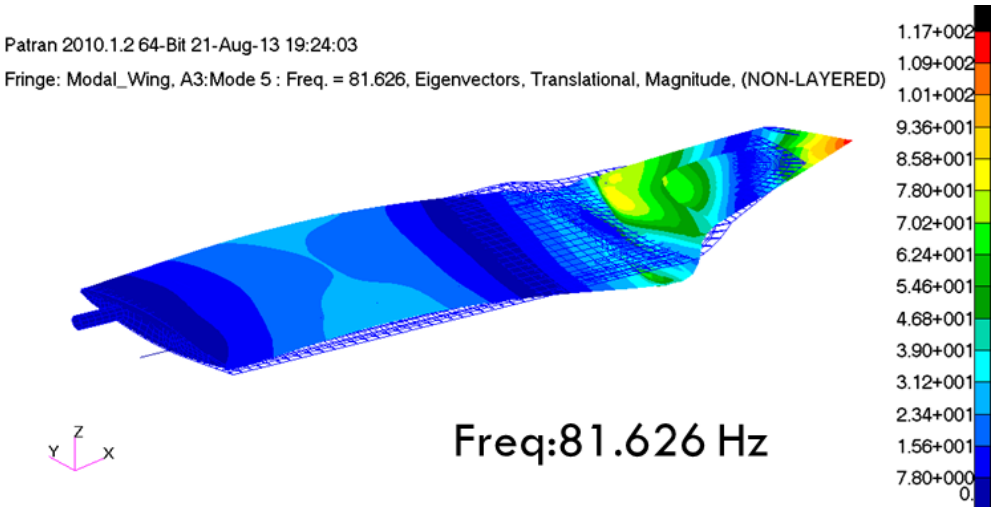
Mekanik Özellik	Ortalama Değer
Çekme Dayanımı (S_1)	431.5 MPa
Basma Dayanımı (S_{c1})	165.5 MPa
Kayma Dayanımı (S_{12})	31.20 MPa



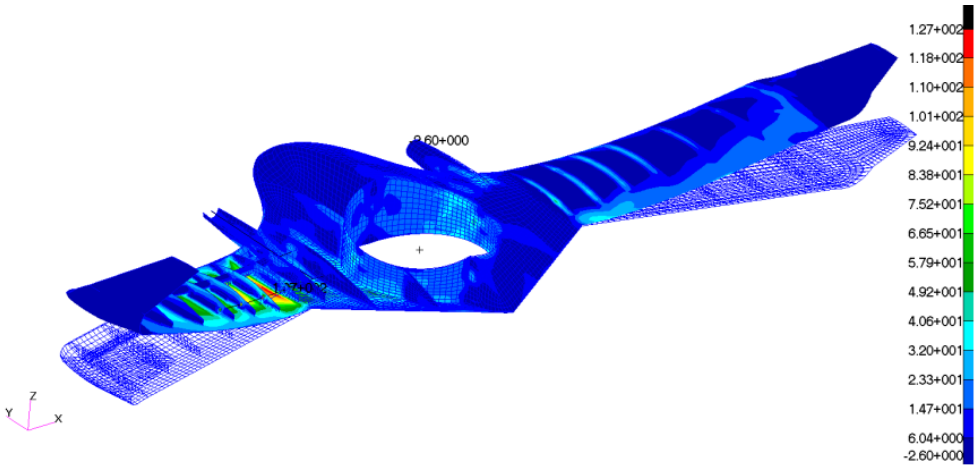
Şekil 3.4: TURAÇ DİKY İHA 1. eğilme modu.



Şekil 3.5: TURAÇ DİKY İHA 1. dönme modu.



Şekil 3.6: TURAÇ DİKY İHA 2. eğilme modu.



Şekil 3.7: Maksimum asal gerilme.

Çizelge 3.3: Kullanılan sonlu eleman tipleri ve sayıları

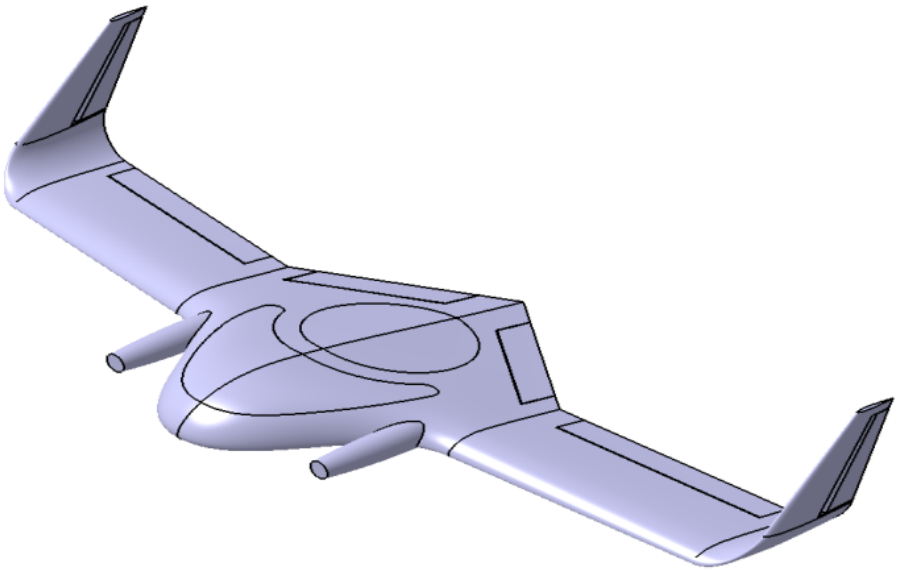
Sonlu Eleman Tipleri	Nastran Eleman Adı	Adet
Dörtgen eleman	CQUAD4	16822
Üçgen Elememan	TRIA3	98
Çubuk Eleman	CBAR	502
Noktasal Eleman	CONM2	16
Bağlantı Elemanı	RBE2	76
Çözüm Noktası	GRID	167417

10 mm eleman boyu kullanılarak hazırlanmıştır. Kullanılan sonlu eleman tipleri ve sayıları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

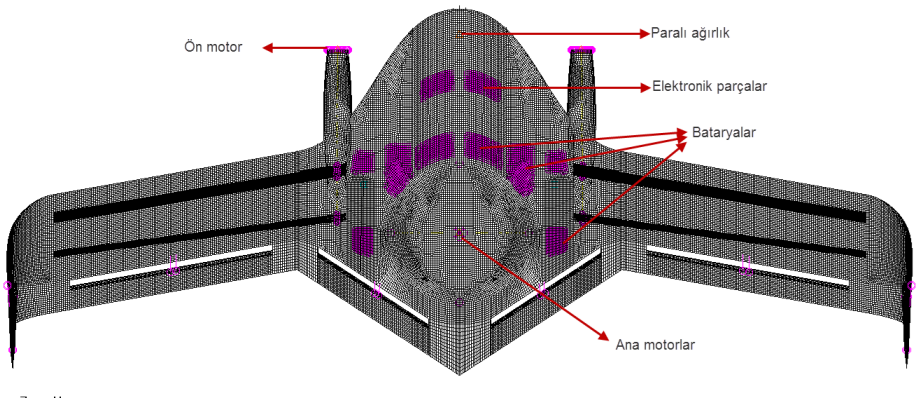
Sonlu eleman modeli tasarımın son hali üzerinden CAD katı modeli referans alınarak oluşturulmuştur. Katı model, Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Oluşturulan sonlu eleman modeli ve üzerindeki yapısal olmayan harici kütleler Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

Daha önce hazırlanan modelde yükler teorik hesaplara dayanılarak uygulanmaktaydı. Yeni hazırlanan modelde aerodinamik yükler HAD analizleri ile elde edilmiştir. HAD paket programından elde edilen basınç yükleri yapısal modele entegre edilerek daha gerçekçi senaryo hazırlanmıştır. Şekil 3.10'da uçağın sıfır derece hücum açısında 20 m/s seyir hızındaki basınç dağılımı görülmektedir. Basınç yükünün yanında yükleme durumuna uygun g yükü ve motor itkisine karşılık kuvvet uygulanmaktadır.

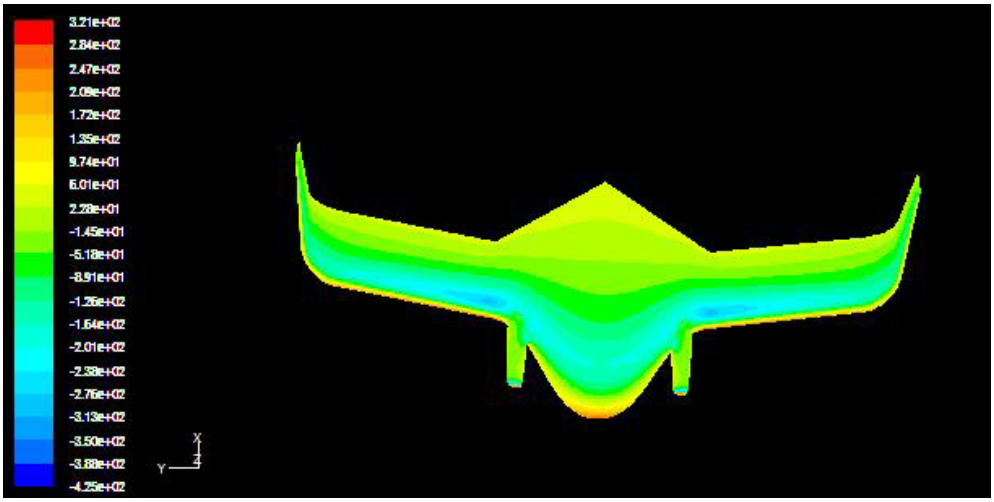
Aerodinamikten kaynaklanan basınç yükü dağılımı yapısal model üzerinde Şekil 3.11' de gösterilmiştir. Uçak havada modellendiği için hiç sınır şartı bulunmamaktadır. Bu tür yapıların çözülebilmesi için "inertia relief" metodu kullanılmıştır. Bu metot serbest yapıların analizinde sıkça kullanılmaktadır.



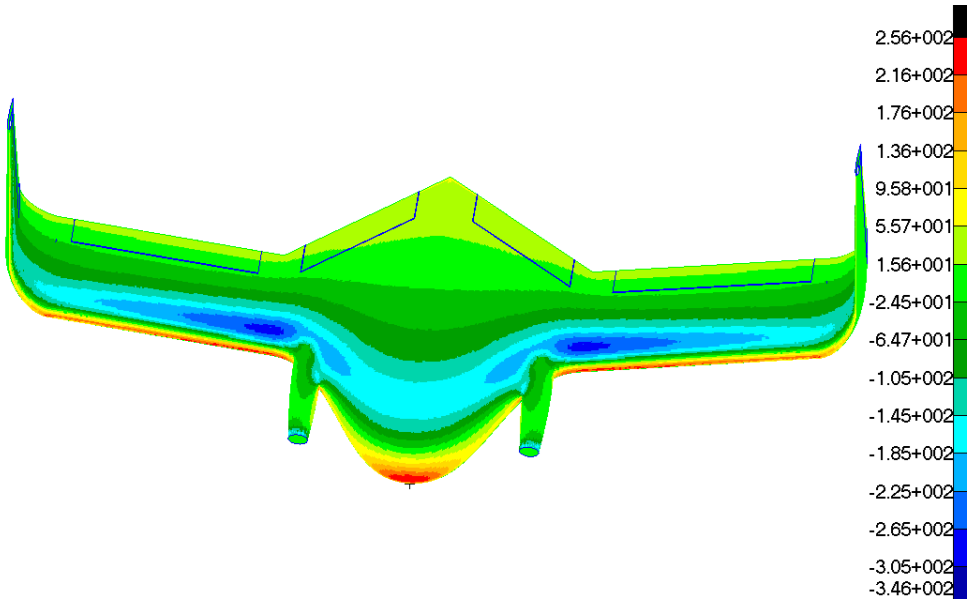
Şekil 3.8: TURAÇ DİKY İHA katı modeli.



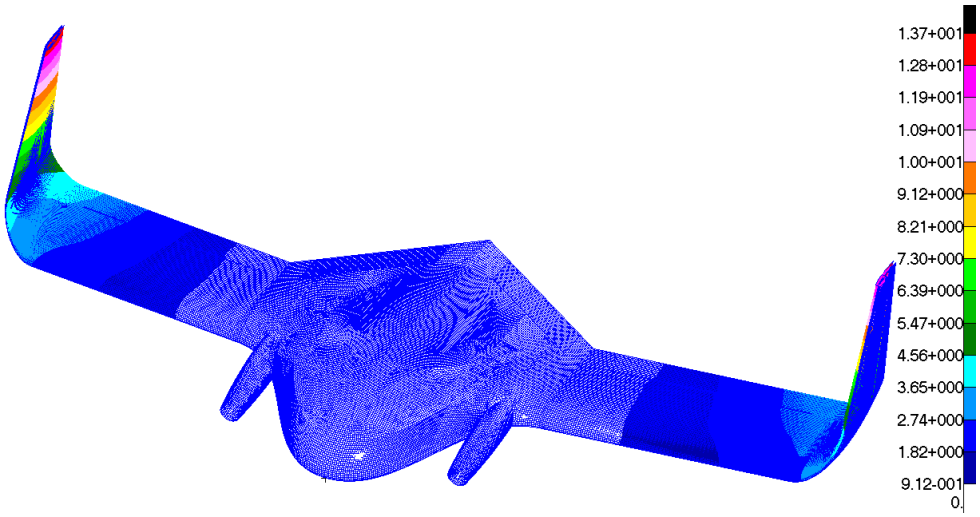
Şekil 3.9: Yapısal olmayan kütleler.



Şekil 3.10: HAD analizi - basınç dağılımı.



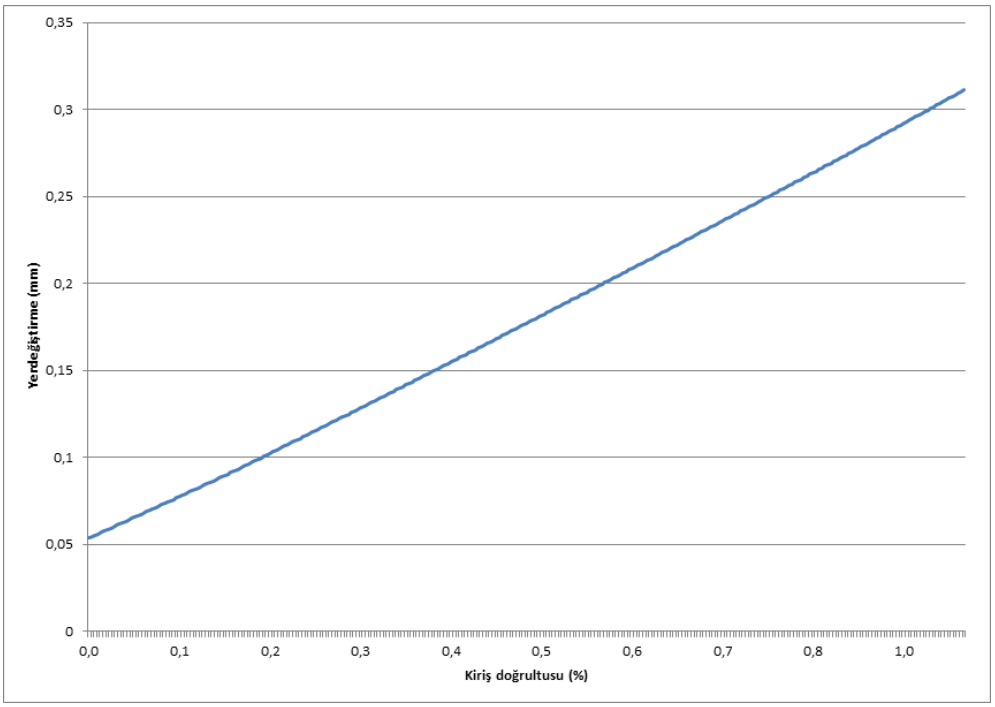
Şekil 3.11: Yapısal modele entegre edilen aerodinamik yükler.



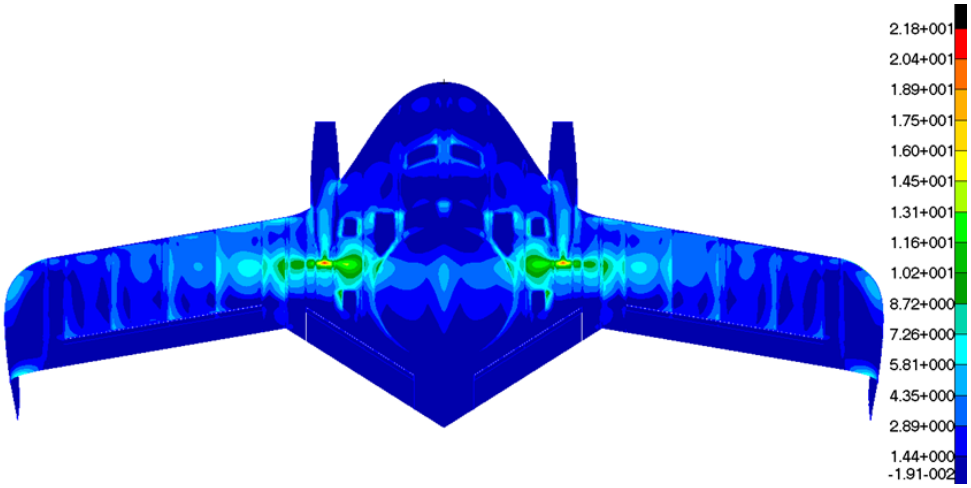
Şekil 3.12: Uçak üzerinde yer değiştirme dağılımı.

Sonlu eleman modeli hazırlandıktan sonra analizlere verilmiştir. Burada uçağın sıfır derece hücum açısında 20 m/s seyir uçuşu sırasındaki yapısal durumu ele alınmıştır. Analiz sonucunda uçak üzerindeki yer değiştirme dağılımı Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Kanat ana kirişi üzerindeki düşey yer değiştirme kiriş boyunca doğrusal olarak değişmiştir. Ana kiriş boyunca deplasman miktarı Şekil 3.13'te görülmektedir. En büyük yer değiştirme kanat uçlarında görülmüştür ve 13,7 mm'dir.

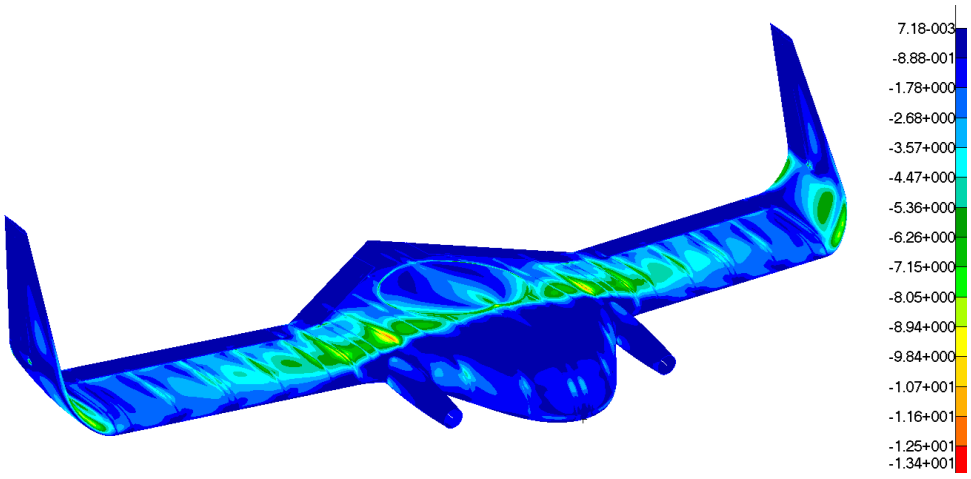
20 m/s seyir uçuşu sırasında uçak üzerinde oluşan maksimum asal gerilmeler Şekil 3.14 'te, minimum asal gerilmeler Şekil 3.15 'te gösterilmiştir. TURAÇ DİKY İHA üzerinde gözlenen en büyük gerilme değeri 21.8 MPa'dır. Bu gerilme değerleri akma mukavemetinin çok altında kaldığından yapıda herhangi kırım gözlenmez.



Şekil 3.13: Ana kiriş boyunca düşey doğrultuda yer değiştirme dağılımı.



Şekil 3.14: Maksimum asal gerilmeler.



Şekil 3.15: Minimum asal gerilmeler.

3.1.1 Sandviç Yapıların Analizi

Paket programların çoğunda sandviç yapıların değerlendirilmesi (Post processing) yapılamamaktadır. Visual C# dilinde geliştirilen program ile sandviç kompozit yapıların analizleri yapılmıştır. Program Nastran giriş dosyası olan .bdf dosyasından model bilgilerini, Nasran çıkış dosyası olan .f06 dosyasından sonuçları almaktadır. Her iki dosyadan aldığı verileri kullanarak her eleman için kırılma indisleri hesaplamaktadır.

Kırılma indisinin (FI) ifadesi Denklem 3.1'de gösterilmiştir.

$$FI = \frac{mevcut\ gerilme}{izin\ verilen\ en\ buyuk\ gerilme} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{maks}} \tag{3.1}$$

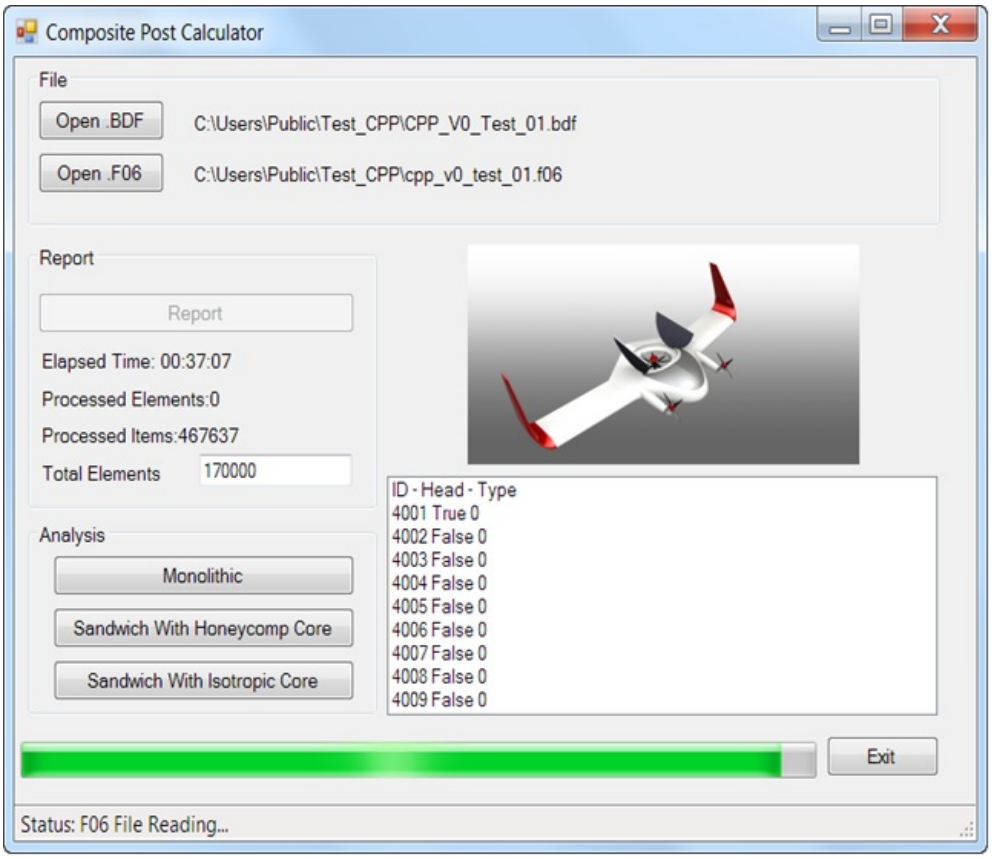
Denklem 3.1'den de anlaşılacağı üzere kırılma indisi 1'den büyük olduğu durumlarda yapıda kırım görülmesi beklenir.

Program çıktı olarak model raporu ve Patran programında sonuçları görselleştirmek için .csv uzantılı dosyalar vermektedir. Bu dosyalar "çekirdek altı yüzey kırışması, çekirdek altı hücre içi burkulması, çekirdek üstü yüzey kırışması, çekirdek üstü hücre içi burkulması" göçme teorileri için hesaplanmış kırılma indislerini içermektedir. Program ara yüzü Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

Monolitik kompozitten oluşan lamine ve sandviç kompozitten oluşan yapılar için ayrı göçme teorileri mevcuttur. Lamine göçme kriteri, temel olarak klasik lamine teorisine dayanmaktadır. Göçme teorisi her katman için ayrı ayrı bakılır. Etkileşimli göçme kriteri olan Tsai Wu göçme kriteri kompozit yapılarda sıkça kullanılan metotlardan biridir. Bu kritere göre kırılma indisi Denklem 3.2'de gösterildiği gibi ifade edilir.

$$FI = F1 * \sigma_1 + F2 * \sigma_2 + F11 * \sigma_1^2 + F22 * \sigma_2^2 + F66 * \tau_{12}^2 + 2 * F12 * \sigma_1 * \sigma_2 \tag{3.2}$$

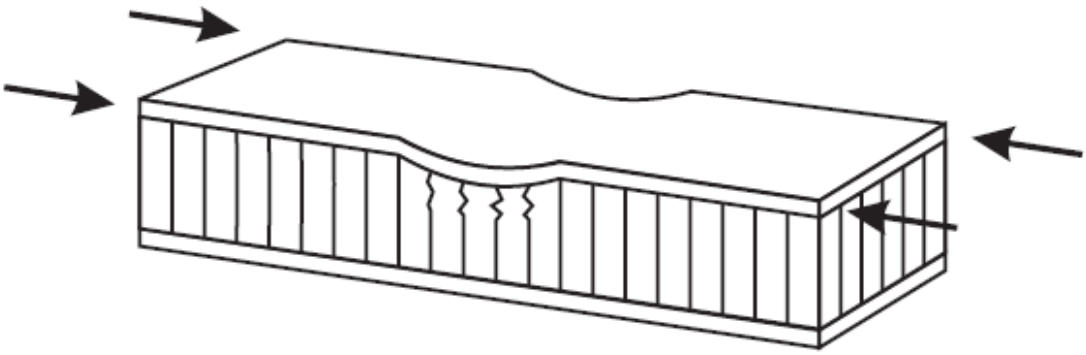
Burada kullanılan katsayılar aşağıda belirtilmiştir:



Şekil 3.16: Sandviç kompozit yapıların analizleri için C # dilinde geliştirilen programın arayüzü.

$$F1 = \frac{1}{X_C} + \frac{1}{X_T}$$
$$F2 = \frac{1}{Y_C} + \frac{1}{Y_T}$$
$$F11 = \frac{1}{X_C * X_T}$$
$$F22 = \frac{1}{Y_C * Y_T}$$
$$F66 = \frac{1}{S_{12}^2}$$
$$F12 = \frac{1}{2 * X_C * X_T}$$

Burada σ_1 elyaf yönündeki gerilmeyi, σ_2 elyaf yönünde dik gerilmeyi, τ_{12} kayma gerilmesini, X_C elyaf yönündeki basma gerilme dayanımını, X_T elyaf yönündeki çekme gerilme dayanımını, Y_C elyaf yönündeki dik basma gerilme dayanımını, Y_T elyaf yönünde dik çekme gerilme dayanımını, S_{12} kayma dayanımını ifade eder.



Şekil 3.17: Yüzey kırışması problemi.

Sandviç kompozit yapılar için kullanılan iki farklı göçme kriteri anlatılmıştır. Bunlar Yüzey kırışması ve hücre içi burkulmasıdır. Her iki teoride sandviç yapının alt ve üst tarafları için ayrı ayrı kontrol edilir.

Şekil 3.17'de yüzey kırışması problemi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kırışma bal peteği yapıya doğru olabileceği gibi dışarı doğruda olabilir. Yüzey kırışması meydana gelen yapı mukavemetini kaybeder ve kolay şekilde kırıma sebep olur.

Yüzey kırışması için kırılma indisi ifadesi aşağıda belirtilmiştir [26];

Şerit doğrultusundaki gerilme sınırı:

$$\sigma_{xw} = k_2 E_{fx} \sqrt{\frac{E_c * t_f}{E_{fx} * t_c}} \tag{3.3}$$

Şerit doğrultusuna dik yönde gerilme sınırı:

$$\sigma_{yw} = k_2 E_{fy} \sqrt{\frac{E_c * t_f}{E_{fy} * t_c}} \tag{3.4}$$

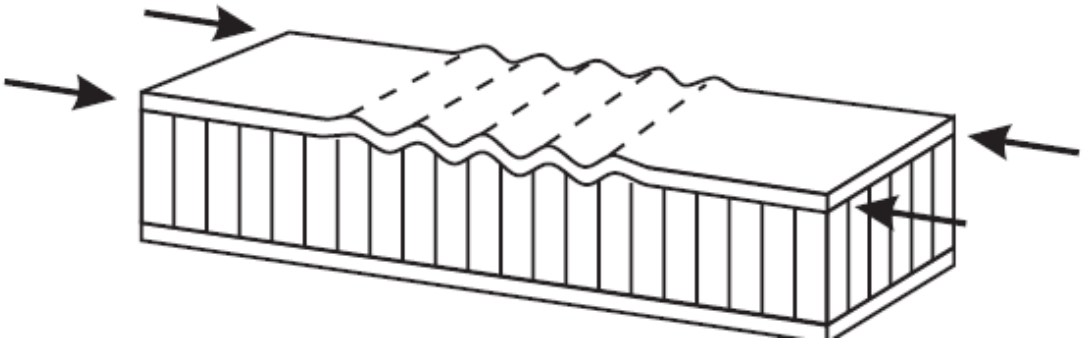
Burada k_2 yüzey kırışma sabiti, E_f asal yönlerdeki eğilme modülü, t_f yüzey levhası kalınlığını, t_c çekirdek malzemenin kalınlığını göstermektedir.

Her iki gerilme limiti birleştirilirse;

$$\sigma_{wr} = \frac{\sigma_x * \sigma_{xw} + \sigma_y * \sigma_{yw}}{\sigma_x + \sigma_y} \tag{3.5}$$

Minimum asal gerilme basma gerilmesi ise göçme indisi,

$$FI = \frac{(\sigma_x^3 + \sigma_y^3)^{\frac{1}{3}}}{K * \sigma_{wr}} + \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{wr}}\right)^2 \tag{3.6}$$



Şekil 3.18: Hücre içi burkulma problemi.

Minimum asal gerilme çekme gerilmesi ise göçme indisi formüle edilir.

$$FI = \frac{\sigma_x}{K * \sigma_{wr}} + \left(\frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{wr}}\right)^2 \tag{3.7}$$

Hücre içi burkulması/çukurlaşması yüzey tabakasındaki yerel kararsızlık sorunudur. Yüzey tabakası çekirdek hücreleri arasına burkulmasından kaynaklanır. Şekil 3.18'de hücre içi burkulma problemi gösterilmiştir. Yüzey tabakadaki bu burkulma yapının dayanımını düşürerek kırıma sebep olur.

Hücre içi burkulması için kırılma indisi ifadesi aşağıda belirtilmiştir [26].

Şerit doğrultusundaki gerilme sınırının ifadesi,

$$\sigma_{xd} = \frac{2E_{fx}}{1-\mu_{12}^2}\left(\frac{t_f}{c_s}\right)^2 \tag{3.8}$$

Şerit doğrultusuna dik yöndeki gerilme sınırının ifadesi,

$$\sigma_{yd} = \frac{2E_{fy}}{1-\mu_{12}^2}\left(\frac{t_f}{c_s}\right)^2 \tag{3.9}$$

Burada c_s bal peteği malzemenin hücre boyudur.

Gerilmeler birleştirilirse

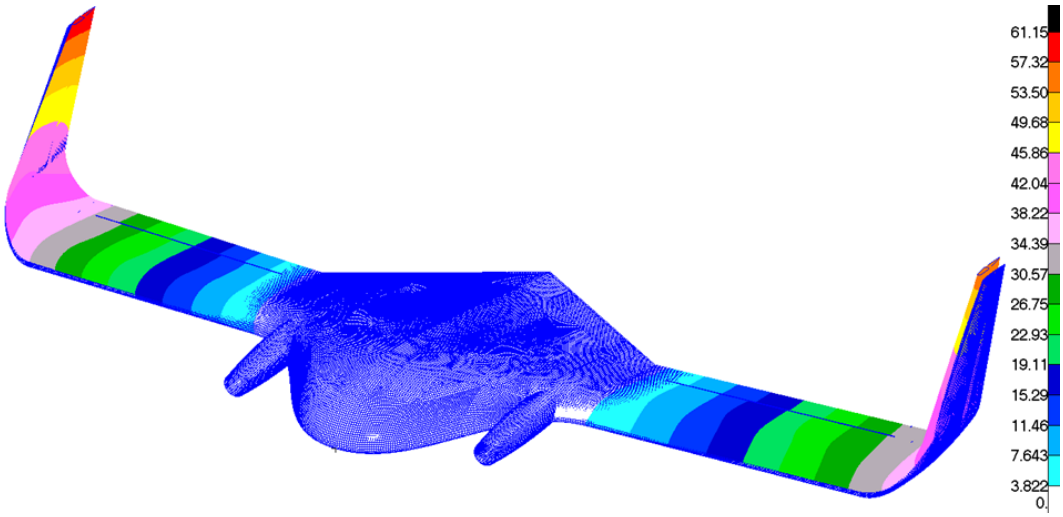
$$\sigma_{db} = \frac{\sigma_x * \sigma_{dp} + \sigma_y * \sigma_{yd}}{\sigma_x + \sigma_y} \tag{3.10}$$

Göçme indisi, Denklem 3.11 şeklinde ifade edilir.

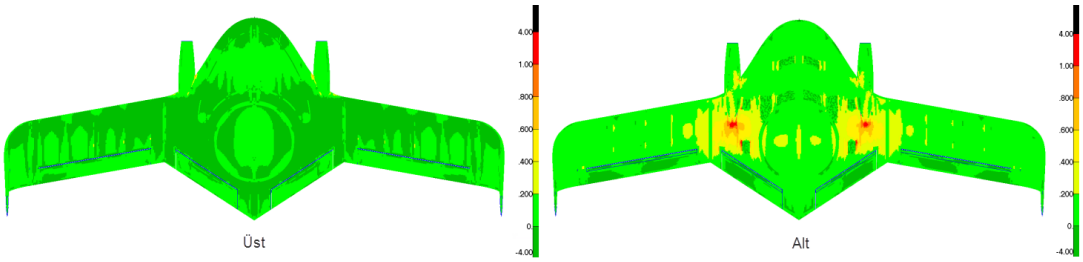
$$FI = \frac{\left(\sigma_x^n + \sigma_y^n\right)^{\frac{1}{n}}}{K * \sigma_{dp}} + \left(\frac{\sigma_{xy}}{0.8 * \sigma_{dp}}\right)^2 \tag{3.11}$$

Burada "n" hücre boyuna ve yüzey tabakanın kalınlığına bağlıdır.

$$\begin{aligned} &\frac{C_s}{t_f} \geq 15.63 \Rightarrow n = 3 \\ &\frac{C_s}{t_f} < 15.63 \Rightarrow n = 2 + \left(\frac{15.63}{C_s/t_f}\right)^2 \end{aligned} \tag{3.12}$$



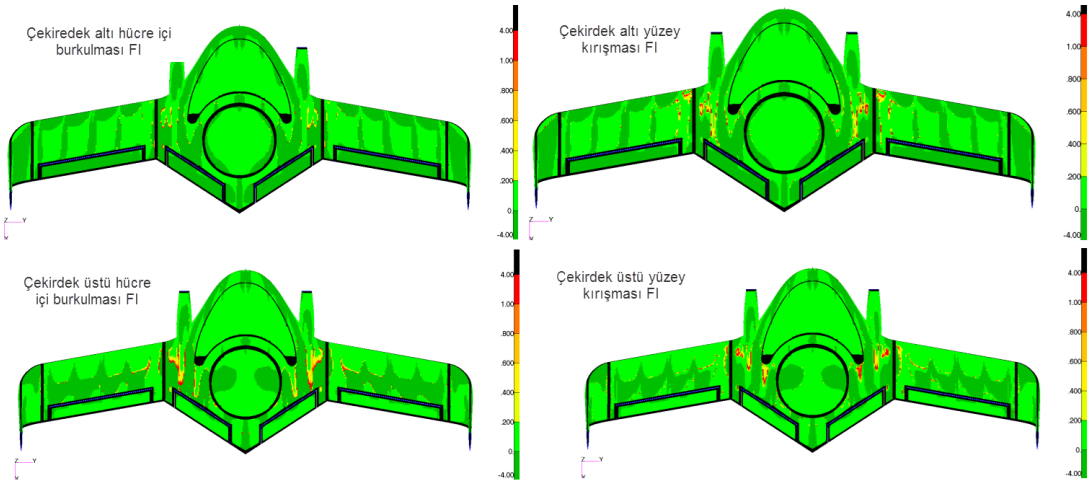
Şekil 3.19: Uçak üzerinde yer değiştirme dağılımı (mm).



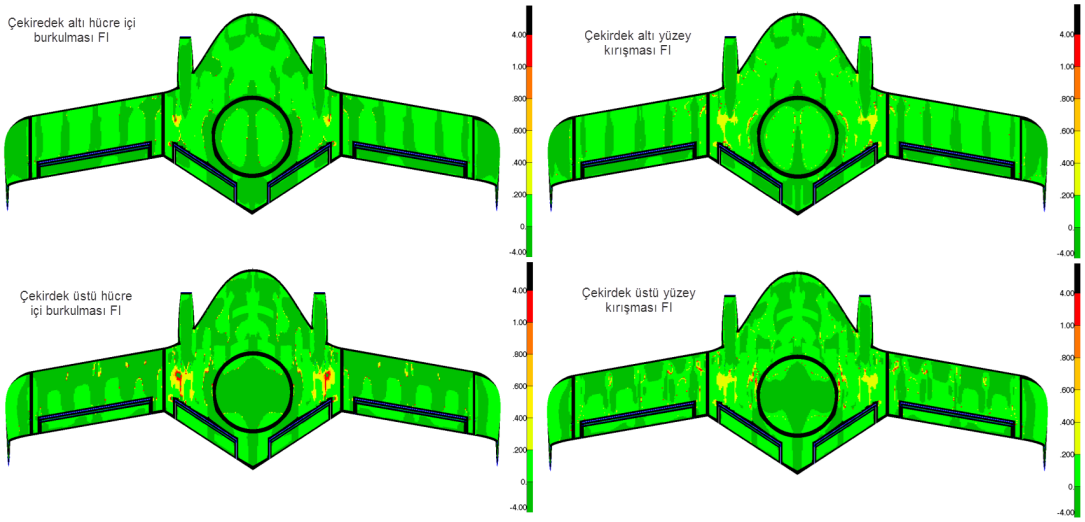
Şekil 3.20: Tsai Wu kırılma indisi dağılımı.

Sonlu eleman modeli hazırlandıktan sonra uçak yapısının statik analizleri yapılmıştır. Burada sunulan sonuçlar 3,8 *g* yükleme altındaki sonuçları içermektedir. Analiz sonucunda uçak üzerindeki yer değiştirme dağılımı ve kırılma indisi dağılımları elde edilmiştir. Yer değiştirme dağılımı Şekil 3.19'da görülmektedir. En büyük yer değiştirme kanat uçlarında görülmüştür ve 61,15 *mm*'dir. Uçak yapısı üzerinde Tsai Wu kırılma indisi dağılımı Şekil 3.20'de gösterilmiştir.

Geliştirilen program çıktısı sonuçlarına göre sandviç kompozit bölgelerin kırılma indisi dağılımları Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de gösterilmiştir. Şekil 3.21'de uçağa üstten bakıldığında yapı üzerindeki kırılma indisi dağılımı görülmektedir. Şekil 3.22'de ise uçağa alttan bakıldığın sandviç kompozit kırılma indisi dağılımı görülmektedir. Siyah bölgeler monolitik kısımları göstermektedir. Sandviç yapılar için kullanılan bu göçme modları monolitik yapılarda kullanılmadığı için bu bölgeler için veri yoktur. Bu bölgelerin değerlendirilmesi Tsai-Wu ve Tsai Hill gibi laminate göçme teorileri kullanılmaktadır.



Şekil 3.21: Sandviç kompozit bölge kırılma indisi dağılımı (üstten).



Şekil 3.22: Sandviç kompozit bölge kırılma indisi dağılımı (alttan).

Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapısal model hazırlanmıştır. Hazırlanan sonlu elemanlar ağının statik analizleri yapılmıştır. Sandviç kompozit yapıların analizlerini yapmak için program geliştirilmiştir. Statik analizler sonucunda elde edilen gerilme değerleri geliştirilen programda girdi olarak kullanılmıştır. Tsai Wu kırılma indislerinde yüksek değerler görülmemesine rağmen yüzey kırışması ve hücre içi burkulması kırılma indisleri yüksek çıkmıştır. Tasarımda bu doğrultuda değişikliğe gidilerek kırım engellenmiştir.

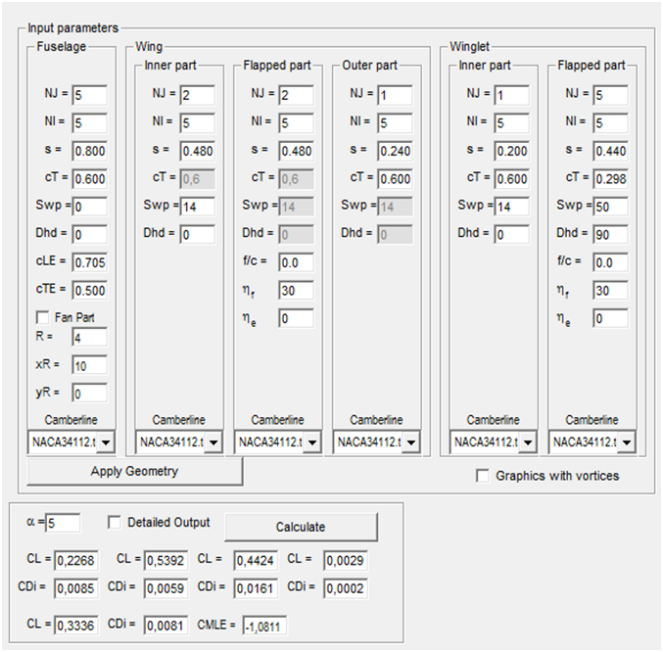
3.2 Aerodinamik Analizler

Aerodinamik çalışmalar altında 2 farklı çalışma yapılmıştır: a) Yazılım geliştirme. b) HAD çalışmaları. Kullanıcı dostu arayüzü olan geliştirilen yazılım ile TURAÇ DİKY İHA geometrisinin parametrik olarak kolayca girilmesi, profilin seçiminin yazılım arayüzü üzerinden yapılması gerçekleştirilmiştir. TURAÇ DİKY İHA'nın her taşıyıcı yüzeyinin aerodinamik katsayılarının hesaplanmıştır. HAD çalışmaları kapsamında TURAÇ DİKY İHA gövde kısmı fan bölümünün açık ve kapalı olması durumları için farklı hücum açılarında HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

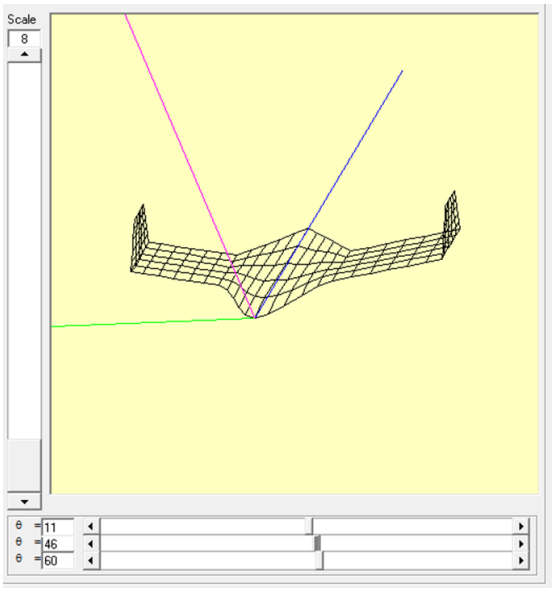
3.2.1 Yazılım geliştirme

TURAÇ DİKY İHA'nın aerodinamik katsayılarını hesaplamak için piyasada Girdap Kafes Yöntemini (GKY) kullanan birçok yazılım bulunmaktadır. Ancak tekrarlamalı tasarım sürecinde TURAÇ DİKY İHA'nın analizler farklı boyutlar ve koşullar için sıklıkla tekrarlanmaktadır. TURAÇ DİKY İHA'nın geometrisinin birbirine bağlı parametreler şeklinde kolaylıkla modellenebildiği ve farklı uçuş koşullarında hesaplamaları hızlıca yapılabildiği kullanıcı dostu bir arayüze sahip bir yazılım geliştirilmiştir. TURAÇ DİKY'nın farklı boyutları için hesap yapılabilmekte, kamburluk etkisi gözönüne alınmakta, panel sayısı kullanıcı isteğine göre program arayüzünde değiştirilebilmekte, farklı hücum açılarına göre hesap hızlı bir şekilde yapılmakta, her taşıyıcı yüzeyin ve TURAÇ DİKY İHA'nın farklı hücum açıları için C_L ve C_D değerleri hesaplanmakta olan bir yazılım geliştirmesi gerçekleşmiştir. Geliştirilen programın ara yüzleri aşağıdaki gibidir (Şekil 3.23, Şekil 3.24).

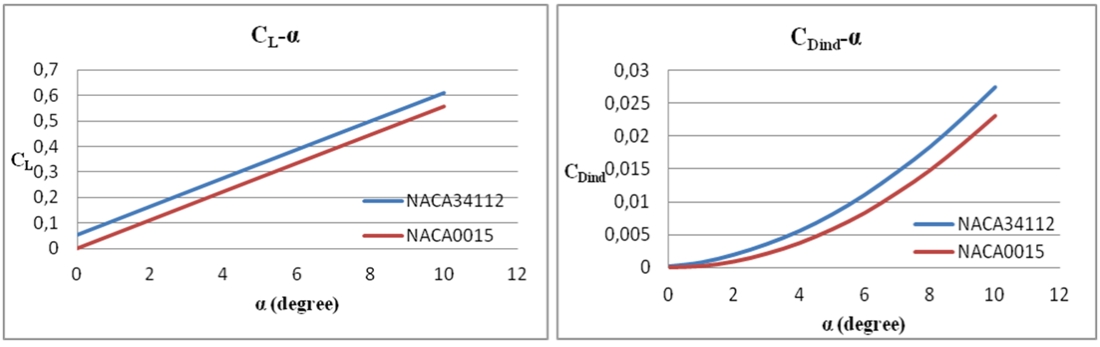
Geliştirlen yazılımla Kafes Girdap Yöntemi kullanılarak TURAÇ DİKY İHA geometrisi için taşıma ve sürükleme katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 3.25).



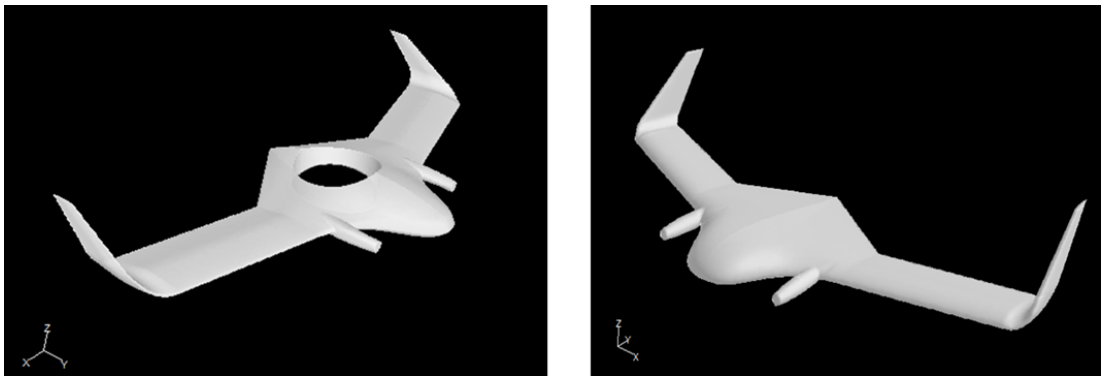
Şekil 3.23: Program veri girişi arayüzü.



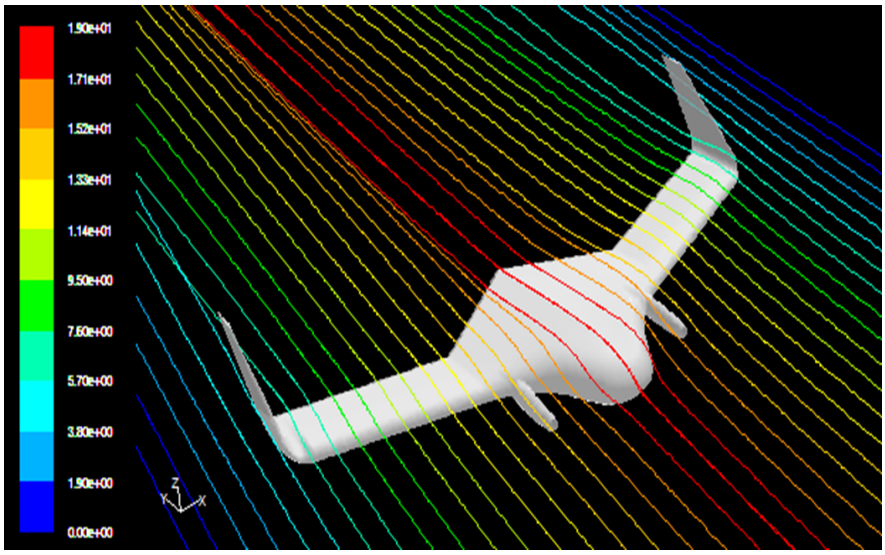
Şekil 3.24: Program arayüzü – uçak geometrisi.



Şekil 3.25: Program çıktıları.



Şekil 3.26: TURAÇ DİKY İHA modelleri.



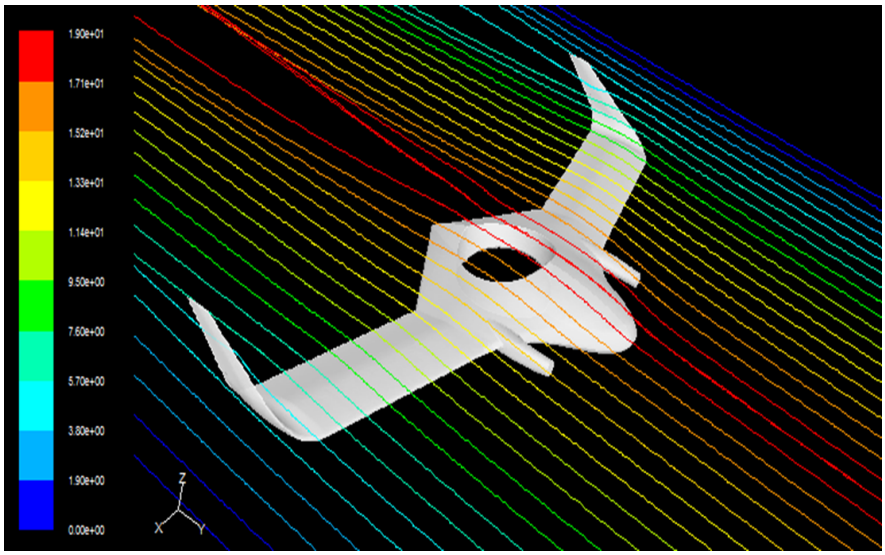
Şekil 3.27: Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$ akım çizgileri.

3.2.2 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmaları

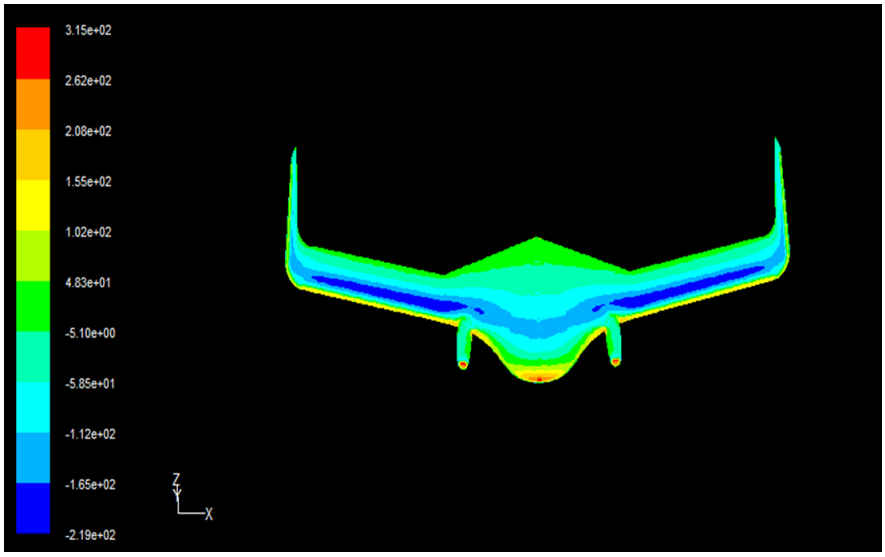
TURAÇ DİKY İHA'nın aerodinamik analizleri için HAD analizleri yapılmıştır. Şekil 3.26'da da görüldüğü gibi HAD analizi, fan açık ve kapalı olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmiştir. Analizler 0^o ve 5^o hücum açıları için gerçekleştirilmiştir. Serbest akım hızı 20 m/s'dir. Reynolds sayısı yaklaşık $1,24x10^6$'dır.

HAD analizleri farklı hucüm açılarında fan açık ve fan kapalı olmak üzere gerçekleştirilmiştir. HAD analiz sonuçları Şekil 3.27 - Şekil 3.34'de verilmiştir.

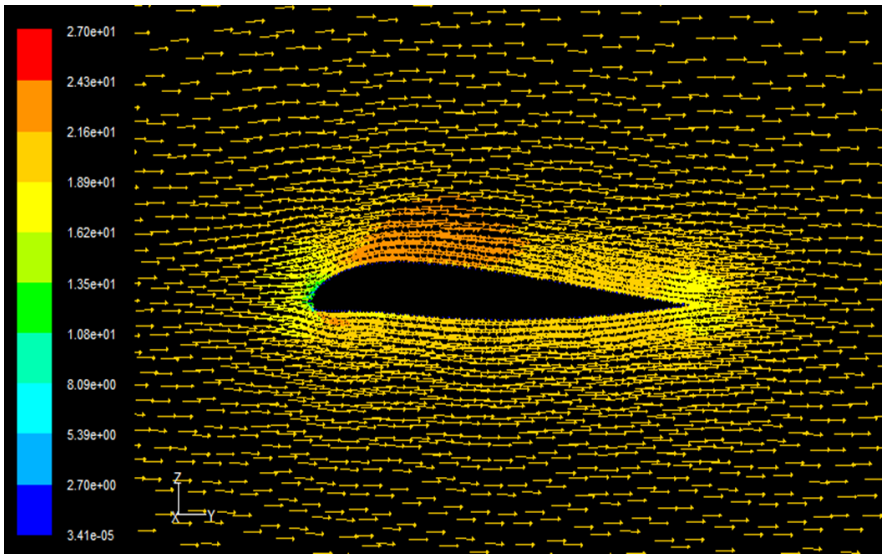
HAD Analizleri sonucunda Şekil 3.34'de ve Çizelge 3.4'de görüldüğü üzere, fannın açık olaması ileri uçuş modunda uçakta taşıma kaybına ve aynı zamanda sürüklemenin artmasına sebep olmaktadır. Fan açık olduğundaki aerodinamik etkiler analiz



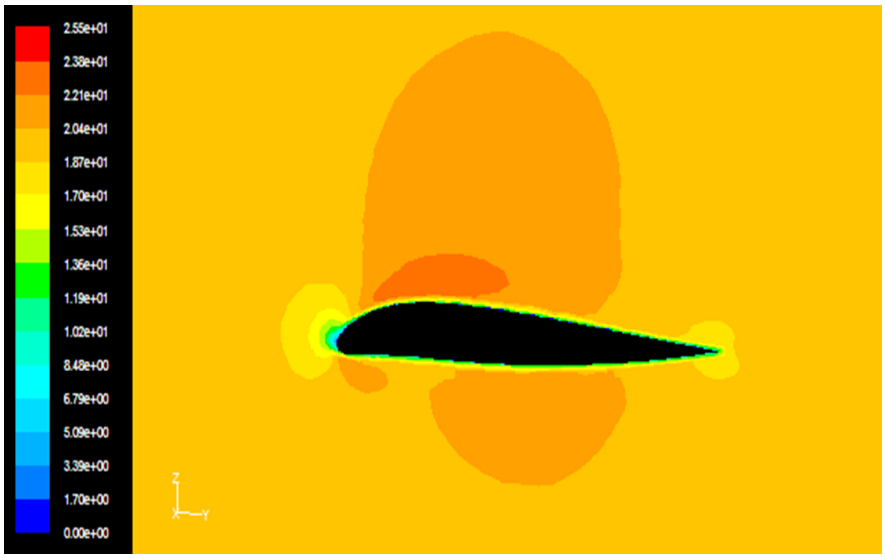
Şekil 3.28: Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$ akım çizgileri.



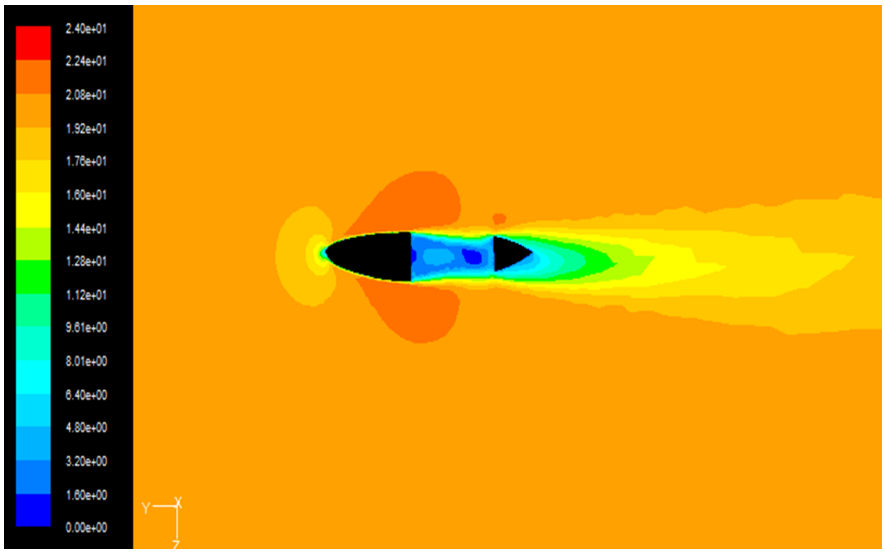
Şekil 3.29: Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ uçak yüzeyi statik basınç dağılımı.



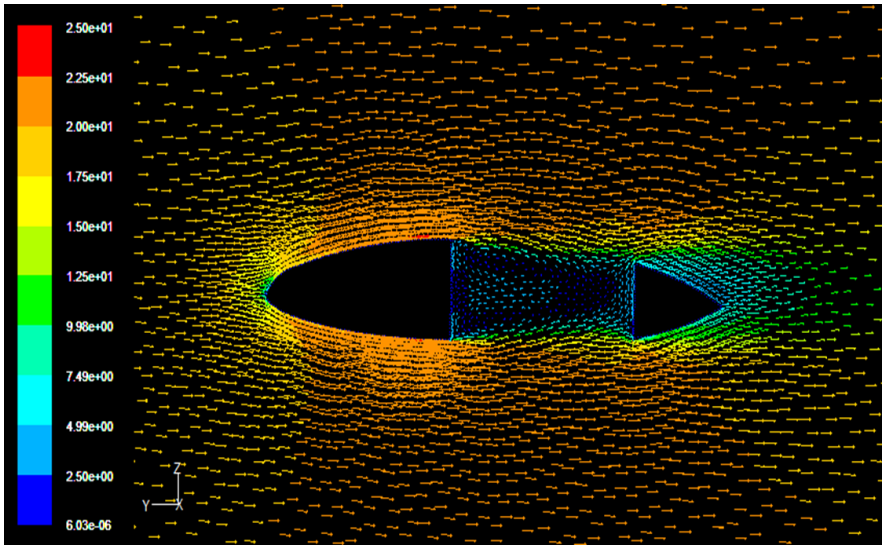
Şekil 3.30: Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız vektörleri.



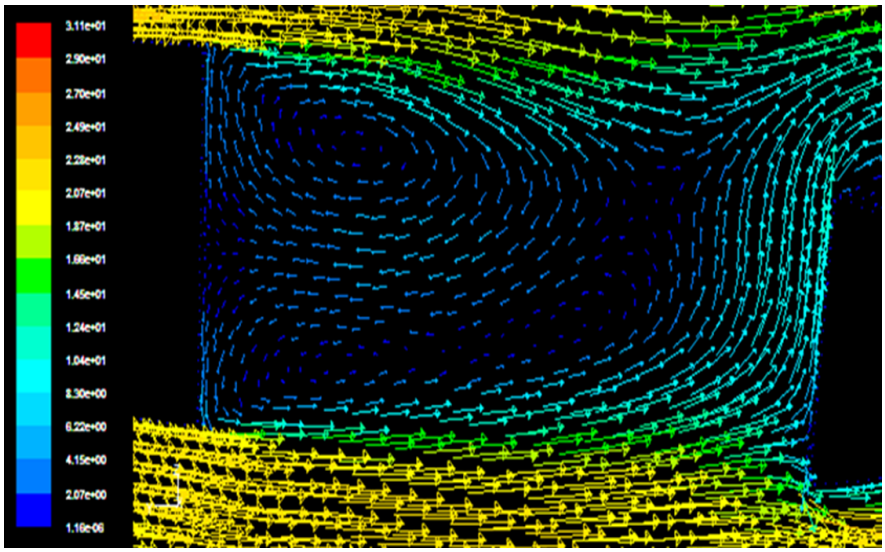
Şekil 3.31: Fan kapalı TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız kontörleri.



Şekil 3.32: Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız kontörleri.



Şekil 3.33: Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 0^o$ simetri yüzeyi hız vektörleri.



Şekil 3.34: Fan açık TURAÇ DİKY İHA $\alpha = 5^o$, hız vektörü dağılımı.

Çizelge 3.4: Fan bölümü açık ve kapalı HAD analiz sonuçları.

		Fan Bölümü Açık	Fan Bölümü Kapalı
$\alpha = 0^o$	C_L	0.0125	0.142
	C_D	0.0467	0.0266
	C_M	-0.0046	-0.0259
$\alpha = 5^o$	C_L	0.3352	0.539
	C_D	0.065	0.0429
	C_M	0.0576	-0.079

sonucunda ortaya konmuştur. Yapılan analizler sonucunda, ileri uçularda aerodinamik açıdan verimli bir uçuş için fan kapağının gerekliliği görülmüştür.

Bu bölümde sistem mühendisliği çalışmaları kapsamında uçağın yapısal ve aerodinaksel analizleri tekrarlamalı bir şekilde karşılıklı olarak gerçekleştirilmiştir. TURAÇ DİKY İHA'nın yapısal olarak güvenilir bölgede olduğu gösterilmiştir. Aerodinamiksel olarak fan kapağı kullanılmasının aerodinamik verimi önemli ölçüde artırdığı ortaya konmuştur. Ayrıca havada askıda kalma uçuşundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) uçuşları için çeşitli HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler 5. bölümde gösterilmiştir.

Sistem mühendisliği konusunu ilgilendiren TURAÇ DİKY İHA'nın tilt mekanizması, iniş takımı, motor yatağı gibi alt sistemlerin tasarım ve üretim çalışmaları ilerideki ilgili bölümlerde verilmiştir.

4. İTKİ SİSTEMLERİ VE MEKANİZMALARI GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, 2. bölümde ele alınan TURAÇ DİKY İHA platformunun itki konfigurasyonu göz önünde bulundurularak farklı ölçeklerdeki prototipleri için gerekli itki hesaplamaları yapılmıştır. Motor, pervane ve ESC kombinasyonlarının gerçekte sağladığı itki değerlerini test etmek için bir itki test düzeneği geliştirilmiş ve üretilmiştir. Piyasada hazır olarak satılan uygun fiyatlı motor, pervaneler ve ESC'ler arasından bu yapılan hesaplamalara ve testlere göre seçimler yapılmıştır. Yine bu bölümde DİKY İHA'lara özgü tilt mekanizması tasarım ve üretim konuları ele alınmıştır.

4.1 İtki Hesaplamaları ve Motor - Pervane - ESC Seçimleri

Bu kısımda TURAÇ DİKY İHA Sistemi için gerekli olan itki sistemi ile ilgili hesaplamalamalar gerçekleştirilmiştir.

Motor seçimlerimde tasarımda kullanılan itki hesaplamaları ve geçiş uçuşu için gereken itki hesaplamaları da göz önüne alınarak yapılmıştır. Yapılan seçimlerde en yüksek itki gereksiniminin dikey kalkış uçuşu olduğu görülmüştür. Hesaplamalarda elektrikli sistemlerin çalıştığı en düşük verimler göz önüne alınarak sistemlerin sağlıklı çalışma aralıkları içerisinde seçimler gerçekleştirilmiştir. Gerek laboratuvar tecrübelerine ve testlerine; gerekse üreticilerin ve bağımsız kişiler tarafından yapılan testler göstermektedir ki sistem verimleri (motor, ESC, batarya ve kablolamadan oluşan sistem) %40 -%60 civarında olmaktadır.

Güç hesabı Denklem 4.1, itki hesabı ise Denklem 4.2 kullanılarak yapılır.

$$P = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}} \frac{1}{\mu_{total}} \tag{4.1}$$

$$T = (\mu_{total} P \sqrt{2\rho A})^{\frac{2}{3}} \tag{4.2}$$

Çizelge 4.1: Tam ölçekli TURAÇ DİKY İHA itki hesapları.

MTOW	47 kg
T/W	1.3
Gerekli Olan Toplam İtki	61.1 kg
Ana Taşıyıcı Gereken Toplam İtki (% 70)	42.77 kg
Ana Taşıyıcı Tek Motor İtkisi Gereken	21.235 kg
Ön Taşıyıcı Gereken Toplam İtki (% 15)	9.165 kg
Ana Taşıyıcı Toplam İtki Kapasitesi (% 80 güçte)	12000 Watt 25.00 kg (21.235 kg yeterli)
Ön Taşıyıcı Toplam İtki Kapasitesi	4000 Watt 10.65 kg (9.165 kg yeterli)



Şekil 4.1: Ana taşıyıcı motor: TURNIGY CA120-70 brushless outrunner.

Burada, P gücü, T itki kuvvetini, ρ hava yoğunluğunu, μ_{total} toplam verimi, ve A pervane disk alanını ifade etmektedir.

1/1-ölçekli model için hesaplamalar:

Denklem 4.1 ve 4.2 kullanılarak tam ölçekli TURAÇ DİKY İHA için yapılan sistem hesaplamaları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Bu çizelgede belirtilen gerekli itkiler ve piyasada hazır olarak satılan motor, pervane ve ESC'ler göz önünde bulundurularak seçimler yapılmıştır.

1/1-ölçekli model ana itki sistemi için seçilen motor:

TURAÇ DİKY İHA 1/1-ölçekli modeli için oldukça yoğun güç gerektiren ve yüksek akımlara dayanabilen bir motor seti gerekmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda kendisini kalitesiyle de kanıtlamış bir modelcilik firması olan TURNIGY firması tarafından üretilen TURNIGY CA 120 modeli fırçasız motor TURAÇ ana taşıyıcılar için seçilmiştir (Şekil 4.1). Şeçilen motorun teknik özellikleri Çizelge 4.2'de görülebilir. Bu teknik özellikler gerekli itki ve gücü sağlamaktadır.

Çizelge 4.2: Turnigy CA120-70 brushless outrunner özellikleri.

İç direnç	0.004 ohm
Gerekli ESC	250A
Çalışma Aralığı	30-70 V
Kv	150 rpm/V
Ağırlık	2730g
Yüksüz Akım	13 A @ 20V
Boyutlar	150x120x118mm



Şekil 4.2: Ana taşıyıcı pervanesi: Tmotor 26x8.5 inch karbon fiber pervane.

1/1-ölçekli model ana itki sistemi için seçilen pervane:

Tam ölçekli TURAÇ DİKY İHA sistemi için kullanılacak ana taşıyıcı fan pervanesi Tmotor firması tarafından üretilen 26 inç çapında ve 8.5 inç adıma sahip pervanesidir (Şekil 4.2). Bu pervane tasarımı dolayısıyla fan olarak da kullanıma uygundur. Dolayısıyla TURAÇ DİKY İHA sistemi için en iyi opsiyonlardan birini sunmaktadır.

1/1-ölçekli model ana itki sistemi için seçilen ESC:

Ana taşıyıcı motoru en fazla 250 amper akım çekerek çalışmaktadır. Dolayısıyla sistemin sağlıklı çalışabilmesi için 250 amper ya da daha daha fazla akıma dayanan bir ESC seçmek gereklidir. Bu nedenle motorun üreticisi olan TURNIGY firması tarafından üretilen ve 300 Ampere kadar çalışabilen FATBOY 300A ESC ana taşıyıcı fan motorlarını sürmek için seçilmiştir (Şekil 4.3).

1/1-ölçekli model ön itki sistemi için seçilen motor:

Ön taşıyıcılar toplam yükün % 30'unu taşımaktadır ve seyir uçuşu esnasında da kullanılmaktadır. Dolayısıyla en fazla çalışan ve güç tüketen kısımlardan biridir. Dolayısıyla yüksek verimli motorların kullanımını gerektirmektedir. Bu parametreler



Şekil 4.3: Ana itki sistemi ESC: TURNIGY FATBOY 300A.



Şekil 4.4: Ön taşıyıcı motoru: Tmotor U11.

göz önüne alınarak seçilen motor Tmotor firması tarafından üretilen U11 serisi motorlardır (Şekil 4.4).

1/1-ölçekli model ön itki sistemi için seçilen pervane: Ön taşıyıcılar toplam yükün yaklaşık %30'unu paylaşmaktadır ve seyir uçuşunda da kullanılmaktadır. Seçilen pervane ise Tmotor firmasının 18inch çap ve 6.1 inch adıma sahip pervaneleridir (Şekil 4.5).

1/1-ölçekli model ön itki sistemi için seçilen ESC:



Şekil 4.5: Ön taşıyıcı pervane: Tmotor 18 inch pervane.



Şekil 4.6: Ön taşıyıcı ESC: Tmotor 70A.

Çizelge 4.3: 1/2-Ölçekli TURAÇ DİKY İHA itki hesapları.

MTOW	10 kg
T/W	1.3
Gerekli olan Toplam İtki	13 kg
Ana Taşıyıcı Gereken Toplam İtki (% 70)	9.10 kg
Ana Taşıyıcı Tek Motor İtkisi Gereken	4.55 kg
Ön Taşıyıcı Gereken Toplam İtki (% 15)	1.95 kg

Ön motorlar hem askı uçuşunda hem de seyir uçuşunda kullanılmaktadır. Dolayısıyla hem güvenilir hem de yüksek güçte olmaları gerekmektedir. Bu nedenle ön taşıyıcı motorlar için seçilen ESC Tmotor 70A Pro olarak seçilmiştir (Şekil 4.6).

1/2-ölçekli model hesaplamaları ve seçimleri:

Uçuş testleri, üretim kolaylığı ve maliyet koşulları göz önünde bulundurularak 1/2 ve 1/3 ölçekli modellerle yapılmıştır. 1/2-ölçekli model için hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.3'te görülebilir. Seçilen motor, pervaneler ve ESC'ler Çizelge 4.4'de gösterilmektedir.

1/3-ölçekli model hesaplamaları ve seçimleri:

Çizelge 4.4: 1/2-ölçekli TURAÇ DİKY İHA motor, pervane ve ESC seçimleri.

Ana Taşıyıcı Motor	Tiger Motor U11
Ön Taşıyıcı Motor	Tmotor 3530 700Kv
Ana Taşıyıcı ESC	Tmotor 80A ESC kg
Ön Taşıyıcı ESC	Tmotor 80A ESC
Pervane	14x 7 inch
Ön Taşıyıcı Motor - Pervane - ESC Toplam İtki Kapasitesi	**4.93 kg**

Çizelge 4.5: 1/3-ölçekli model itki hesapları.

MTOW	3 kg
T/W	1.3
Gerekli olan Toplam İtki	3.9 kg
Ana Taşıyıcı Gereken Toplam İtki (% 70)	2.70 kg
Ana Taşıyıcı Tek Motor İtkisi Gereken	1.35 kg

Çizelge 4.6: 1/3-ölçekli model motor, pervane ve ESC seçimleri.

Motor	Tmotor MT2814 KV770
Pervane	11x 4.7 inch
ESC	Tmotor 40A
Toplam İtki Kapasitesi	**1.66 kg**

Bu modelde okul içerisinde düz uçuş yapabilmek ve geçiş uçuş testlerini okul içerisinde eldeki motor ve ESC ile yapılabilmesi için üretilmesi planlanmaktadır. Model üzerine herhangi bir kompozit uygulama yapılmayacaktır. 1/3-ölçekli model için hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.5'te görülebilir.

Seçilen motor, pervaneler ve ESC'ler Çizelge 4.6'da gösterilmektedir.

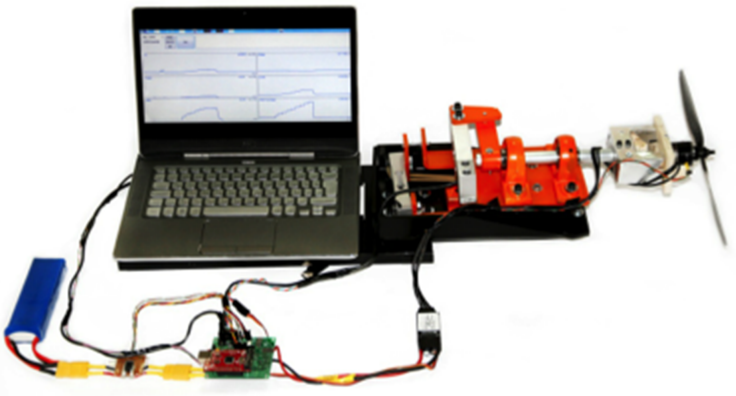
4.2 İtki Test Düzeneği Geliştirilmesi ve Üretimi

TURAÇ DİKY İHA platformu üzerinde 2 adet tilt edebilen pervane sistemi 1 adet de ana taşıyıcı fan sistemi barındırmaktadır. DİKY bir platform olan TURAÇ sistemi standart sabit kanatlı bir insansız hava aracına oranla yaklaşık 4 kat daha fazla itki kapasitesine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle itki sistemleri ve itki testleri projede önemli yer tutmaktadır.

Tasarımda kullanılması planlanan sistemlerin öncelikle test edilmesi ve performanslarının değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde sistemdeki değişkenler ve performansa etkileri etkin olarak gözlemlenebilmekte ve sistem performansı doğru bir şekilde değerlendirilebilmektedir.

Testler için geliştirilen sistemden 2 prototip üretilmiştir. Bu sistemler genel olarak aşağıdaki sistemleri bünyesinde barındırmaktadır.

- **Mekanik Yapı:** İtki kuvveti ve tork momentini birbirinden ayıran ve sistemleri üzerinden barındıran sistem.



Şekil 4.7: İtki-test düzeneği.

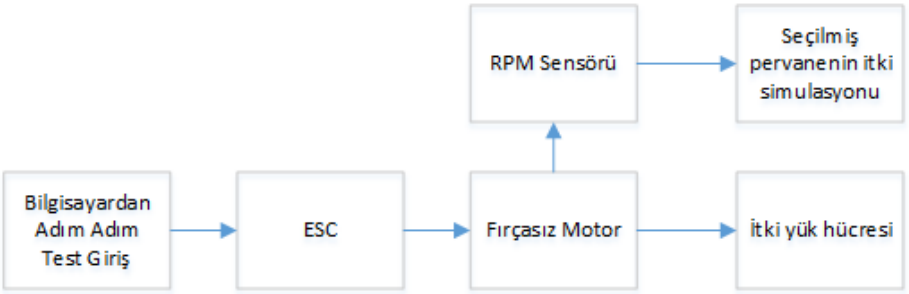
- **Sensörler:** Sistem içerisinde voltaj, yük, akım, devir ve sıcaklık sensörleri barındırmaktadır.
- **Ana Devre ve PC Bağlantı Sistemi:** Sensörlerden gelen verileri belirtilen seviyelerde gücünü artırarak ve dijital verilere dönüştürerek Windowstabanlı bilgisayara USB aracılığı ile ileten elektronik karttır.
- **Test Sistemi Arayüzü:** Gelen verileri kaydederek ve görselleştirerek test sonuçlarının değerlendirilmesini sağlayan yazılımdır.

Şekil 4.7'de görülen test sistemi, bilgisayar kontrollü olarak tam otomatik şekilde çalışmaktadır. Bilgisayardan verilen itki girdisi motor kontrol sistemi olan ESC'ye gitmekte ve motor belirtilen güç seviyesinden çalışmasına başlamış ve 10 adımda en yüksek itki seviyesine gelmektedir. Bu esnada anlık olarak itki ve tork kuvvetleri tasarlanan mekanik yapı ile birbirlerinden ayrılmakta ve farklı yük hücreleri ile ölçümler alınmaktadır.

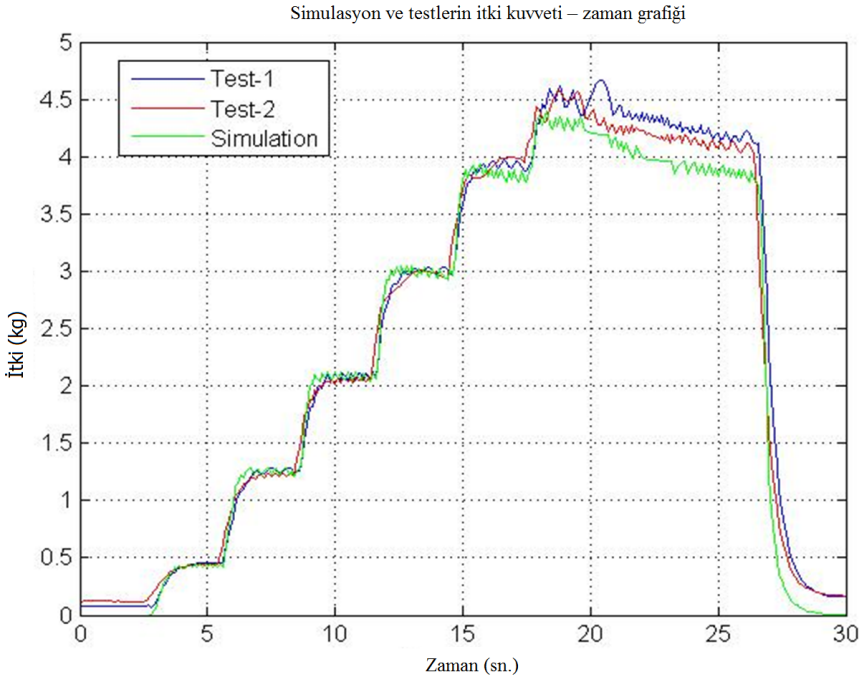
İtki test sistemi de yaptığı ölçümler, hassasiyeti ve tekrar edilebilirliği açısından sistematik olarak test edilmiştir. Bu testler statik ağırlıklarla olduğu gibi performans değerleri bilinen sistemlerin kullanılarak yapılan ölçümlerlele de desteklenmiştir.

Sistem bünyesinden yapılan son test ise Şekil 4.7'de yer alan diyagramda görüldüğü üzere bilgisayar simülasyonu üzerinden yapılmış ve sistemin beklenen hassasiyet değerleri arasında ölçüm yaptığı görülmüştür.

Bilgisayar tarafından verilen girdi performans değerleri Şekil 4.8'de görüldüğü gibi bilinen sistemin bilgisayar simülasyonu üzerinden gerçekte yapılan test ile eş zamanlı



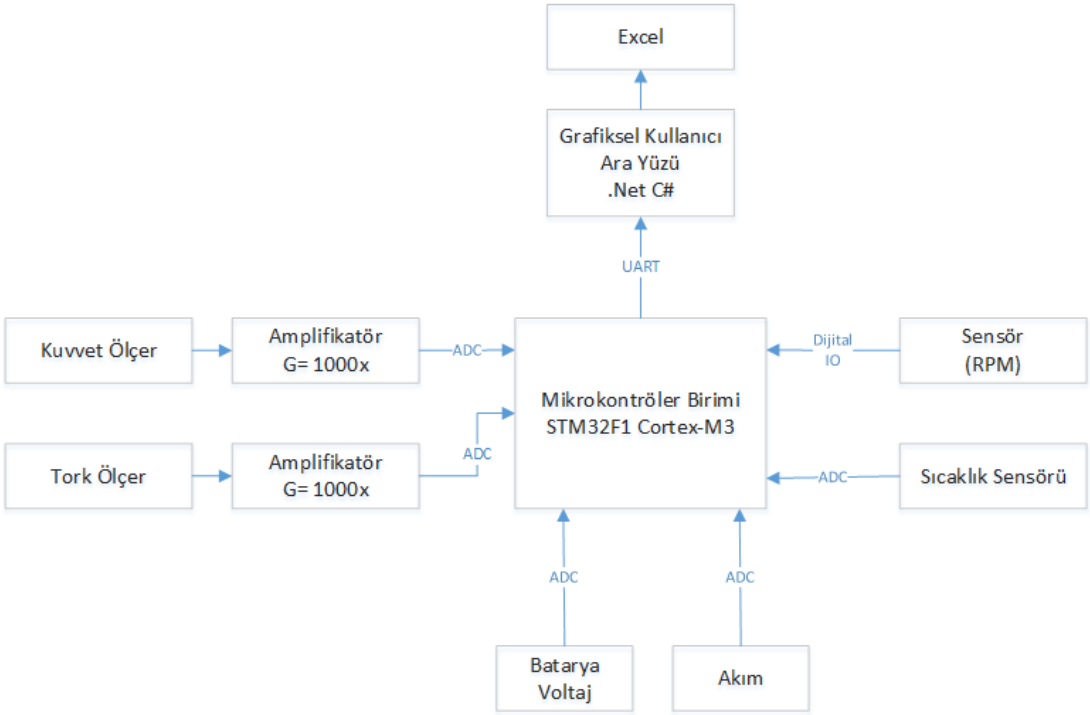
Şekil 4.8: İtki testi değerlendirme şeması.



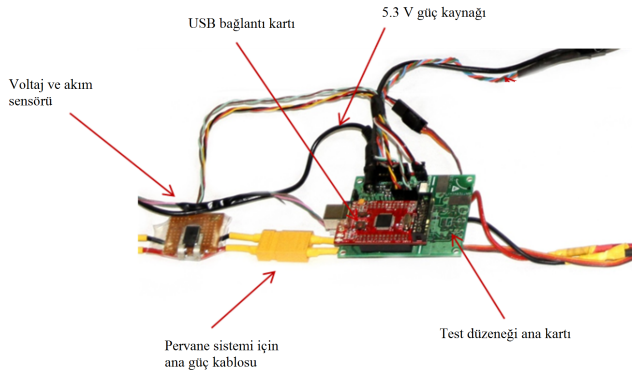
Şekil 4.9: İtki testi ve simülasyon sonuçları.

olarak yapılmasına ve alınan sonuçlarının karşılaştırılmasına bağlı olarak yapılmıştır (Şekil 4.9).

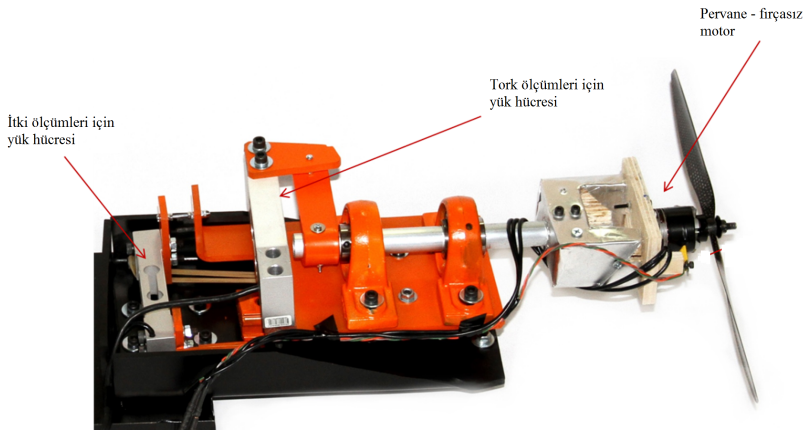
İtki test sistemi sensör okuyucu ve dijital bilgiye çeviren ana kart yapısı Şekil 4.10'da görüldüğü gibidir. Sistem yeni sensörlerin kullanımına açıktır. Bu şekilde ileride herhangi yeni bir ölçüm ihtiyacı hissedildiğinden sistem sadece bir güncelleme ile kullanılabilecektir. Geliştirilen ana test elektronik devresi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bu devre üzerinden RPM, itki, tork, voltaj ve akım değerleri alınabilmektedir. Üzerine entegre edilmiş fırçasız elektrik motoru ve pervanesi ile sistem Şekil 4.12'deki gibi görünmektedir. Turuncu renkli kısımlar hareketli parçaları göstermektedir. Bu parçaların herhangi bir güncellemede başka bir parça ile temasına dikkat çekmek amacıyla bu şekilde boyanmıştır.



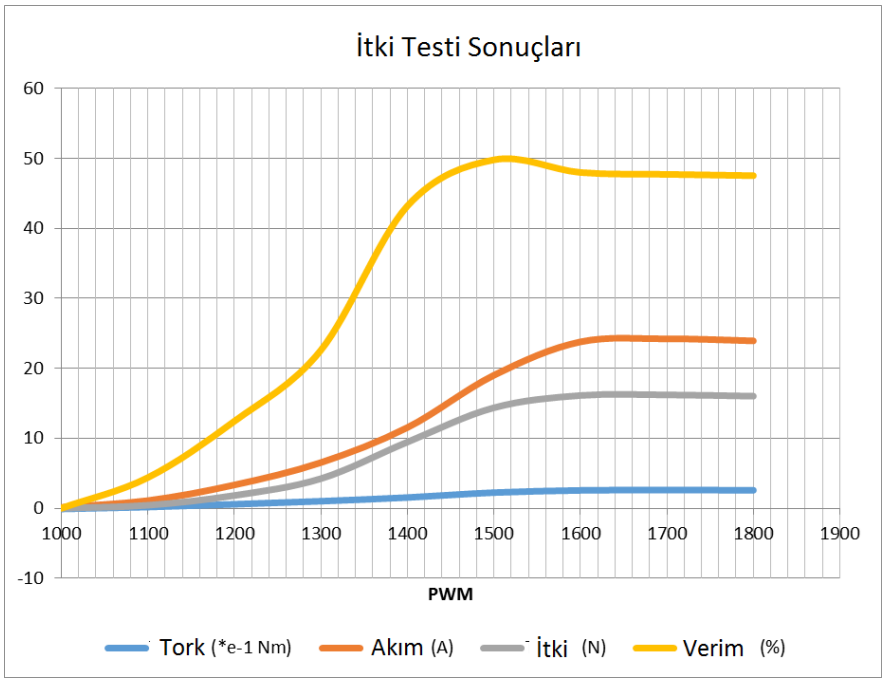
Şekil 4.10: İtki test sistemi sensör okuyucu ve dijital bilgiye çeviren ana kart yapısı.



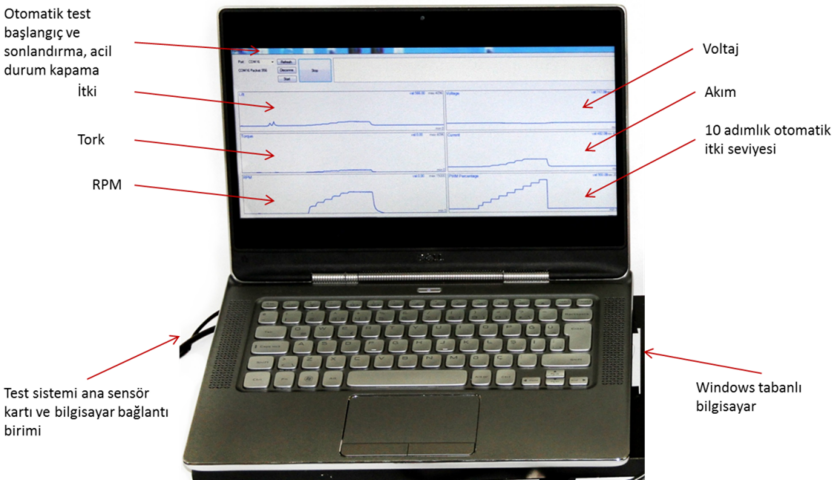
Şekil 4.11: Geliştirilen ana test elektronik devresi.



Şekil 4.12: Üzerine entegre edilmiş fırçasız elektrik motoru ve pervanesi ile komple sistem.



Şekil 4.13: Motor ve pervane grubu ile yapılan test sonuçları.



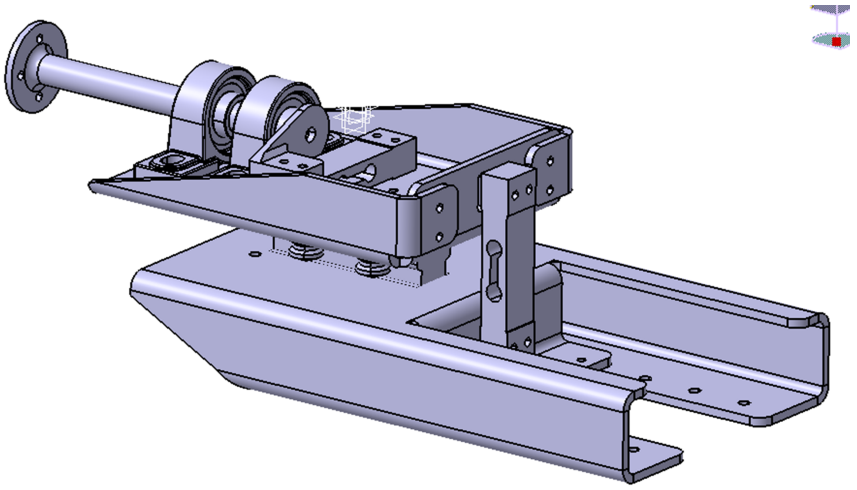
Şekil 4.14: İtki test düzeneği sistem arayüzü.

Yukarıda belirtilen motor ve pervane grubu ile yapılan test sonuçları MS Excel programına aktarılmış ve değerler Şekil 4.13'deki gibi görselleştirilmiştir.

Sistem arayüzü ise Şekil 4.14'de görüldüğü gibi hazırlanmıştır. Veriler anlık olarak okunmakta ve grafik haline getirilmektedir. İstenilmesi haline belirli hassasiyet seviyelerinden titreşimden kaynaklanan gürültüler de kaldırılabilmektedir.

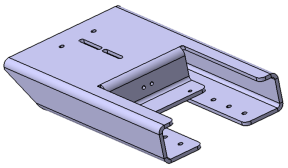
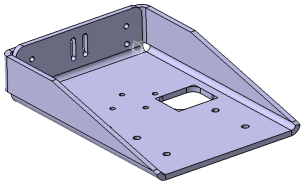
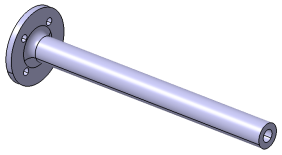
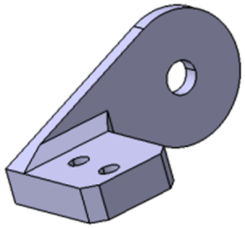
Sistem CAD tasarımı ve detay parçaları Şekil 4.15'de gösterildiği gibidir. İlerleyen çalışmalara faydalı olması amacıyla uzun süre aktif halde görev yapabilecek şekilde tasarlanmış ve paslanmaz çelik sac malzemelerle üretilmiştir.

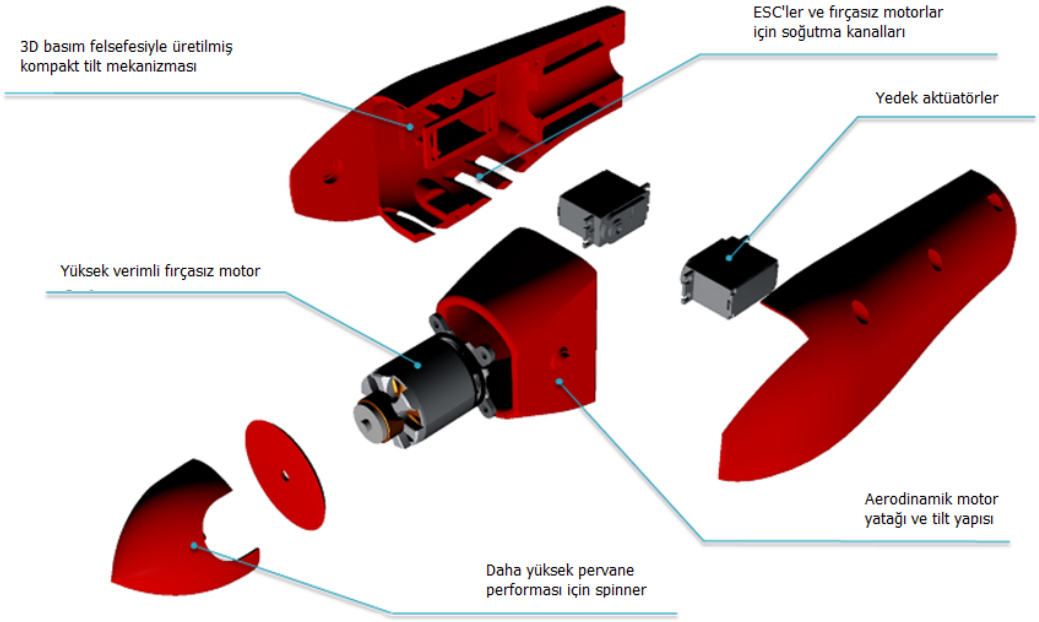
İtki-test düzeneğinin parçalarının detayları Çizelge 4.7'de görülebilir.



Şekil 4.15: Sistem CAD tasarımı ve detay parçaları.

Çizelge 4.7: İtki test düzeneği parçaları.

	Ana Taşıyıcı Parça Parça 6mm paslanmaz çelikten yapılmıştır. Lazer kesimde iç Radius 5.45mm olarak belirlenmiştir.
	İtki ve Tork Ölçüm Arabası Parça 6mm paslanmaz çelikten yapılmıştır. Lazer kesimde iç Radius 5.45mm olarak belirlenmiştir.
	İtki ve Tork Tüpü Parça tamamen çelikten tornada imal edilmiştir. Yapı üzerinde 1 adet merkezde 10mm çaplı vida için diş açılmıştır.
	Tork Momenti Bağlantı Parçası Parça tamamen çelikten CNC kullanılarak imal edilmiştir. Min Radius 6 mm'dir.



Şekil 4.16: 3D basım tasarımı felsefesiyle tilt mekanizması tasarımı.

4.3 Tilt Mekanizması Geliştirilmesi

TURAÇ modeli ile geliştirilen tilt mekanizması yüksek titreşim ve gyro etkisi altında sorunsuz bir şekilde çalışacak bir yapı olarak tasarlanmıştır. Hızlı prototip üretim teknolojilerin gelişmesi ile birlikte standart tasarım ve üretim mantığının dışında olarak tasarlanan parça hem yapı hem de aerodinamik yüzey olarak tasarlanmış ve 3D yazıcılar ile üretilerek kullanıma alınmıştır. Şekil 4.16'da tilt mekanizmalarının imal edilmesine yönelik yeni tasarım felsefesi gösterilmektedir.

1/3 modelde de servo gibi standart parçalar kullanılması nedeniyle sistem 1/1 dekine göre uygun olarak ölçeklendirilemeketedir. Bu nedenle yeni bir tasarım yapılmış ve tasarımda sistem güvenilirliği ön planda tutulmuştur. Bu nedenle servodan motor yatağına gelen mekanik bir bağlantı parçası kullanmak yerine servo ile direkt olarak motar yatağı bağlanmış ve 1 adet rulmanla servo desteklenmiştir. Motor yüksek devirde çalışırken ortaya çıkan titreşim ve tilt açısı değiştirilirken oraya çıkan gyro etkisi nedeniyle ortaya çıkan kuvvet ve momentleri dengeleyebilmek için rulman kullanımı gerekmiştir. 1/3 model için tasarlanan tilt mekanizması Şekil 4.17'de gösterilmiştir. PLA malzeme kullanılarak hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir.



Şekil 4.17: 1/3-ölçekli model için tasarlanan tilt mekanizması.

Tilt mekanizmasını prototip üzerinde görünümü Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'daki gibidir.

Bu bölümde 2. bölümde ele alanan TURAÇ DİKY İHA platformunun özgün itki konfigurasyon için farklı ölçeklerdeki prototipleri için motor, pervane ve ESC seçimleri gerçekleştirilmiştir. Farklı ölçekli prototipler için gerekli itkiler hesaplanmıştır. Piyasada uygun fiyatlar ile bulunabilecek motor, pervane ve ESC kombinasyonlarının sağlayabileceği gerçek itkileri ölçmek için bir itki test düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. Yapılan hesaplar ve testler sonucunda motor, pervane ve ESC'lere karar verilmiştir. Ayrıca DİKY İHA konseptindeki hava araçları için özel bir parça olan tilt mekanizması 7. bölümde bahsedilen 3D baskı sistemi ile üretilmiş ve hava platformunun farklı ölçeklerindeki prototipinde başarı ile test edilmiştir.



Şekil 4.18: TURAÇ DİKY İHA üzerinde tilt mekanizması -1.



Şekil 4.19: TURAÇ DİKY İHA üzerinde tilt mekanizması -2.

5. DİNAMİK MODELLEME, SİMULASYON VE KONTROL ALGORİTMALARI

Bu bölümde TURAÇ DİKY İHA'nın altı serbestlik dereceli doğrusal olmayan tam matematiksel modeli tanımlanmaktadır. Model, düz uçuş, havada askıda kalma, havadan askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) için özel olarak hazırlanmıştır. Bu açıdan model, seyir hızı, tilt açısı ve hücum açısının bir işlevi olan pervane kaynaklı hava akışının aerodinamik etkisi de modele dahildir. Enine kesit alanı ve pervane kaynaklı hava akışı momentum teorisi ile hesaplanmıştır. Pervane kaynaklı hava akışından etkilenen İHA gövdesindeki alan belirlenmiştir ve bu alanın kanat profili için 2D aerodinamik analizler yapılmıştır. Pervaneden etkilenen bu alan için modelde look-up tabloları oluşturulmuş ve modele eklenmiştir. Diğer taraftan, uçak gövdesinin aerodinamik katsayıları HAD yöntemiyle hesaplanmış ve bu veriler bir look-up tablosu formunda doğrusal olmayan modele gömülmüştür. Havada askı durumunundan ileri uçuş (ve tersi) rejiminde, hem aerodinamik hem de itki kuvvetleri TURAÇ DİKY İHA platformu üzerinde çalışmakta ve üst üste binen dinamikler oldukça karmaşık bir hal almaktadır. Bu nedenle, bu rejim için bir yöntemin belirlenmesi önemlidir. Bu amaçla, her iki geçiş senaryosu da hazırlanmış ve itkiyi sağlayan pervanelerinin her biri için uçuş hızı, hücum açısı ve itiş seviyelerine yönelik bir durum çizelgesi geliştirilmiştir. Bu geçiş durumu senaryosu uçuş kontrol sistemi için bir ön besleme durumu olarak kullanılmıştır. Geçiş kontrol sisteminin simülasyon sonuçları ortaya koymuştur. 8. bölümde bu simulasyonlar ayrıca uçuş testleriyle gerçek dünyada doğrulanmıştır.

5.1 Genel Hareket Denklemleri

Bu bölümde, düz uçuş, havada askıda kalma, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) rejimlerini içeren TURAC DİKY İHA'nın 6 serbestlik dereceli (DoF) doğrusal olmayan matematiksel modelinin elde edilmesini ele alacağız.

İHA'nın genel hareket denklemleri Newton'un ikinci yasası temelinde elde edilmektedir. Hareket yasasına göre, bir gövde üzerindeki bütün dış kuvvetlerin toplamı

Denklem 5.1'de matematiksel olarak gösterildiği momentumunun zaman türevine eşittir [27].

$$\sum \overrightarrow{F} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(m\overrightarrow{V}) \tag{5.1}$$

Denklemde F, m, V kuvvet, kütle ve toplam hızı temsil eder.

Bir gövde üzerindeki toplam moment, Newton'un ikinci hareket yasasına göre açısal momentumun zaman türevi olarak tanımlanmaktadır. Toplam momentin matematiksel ifadesi Denklem 5.2'de gösterilmektedir [27].

$$\sum \overrightarrow{M} = \frac{\mathrm{d}\overrightarrow{H}}{\mathrm{d}t} \tag{5.2}$$

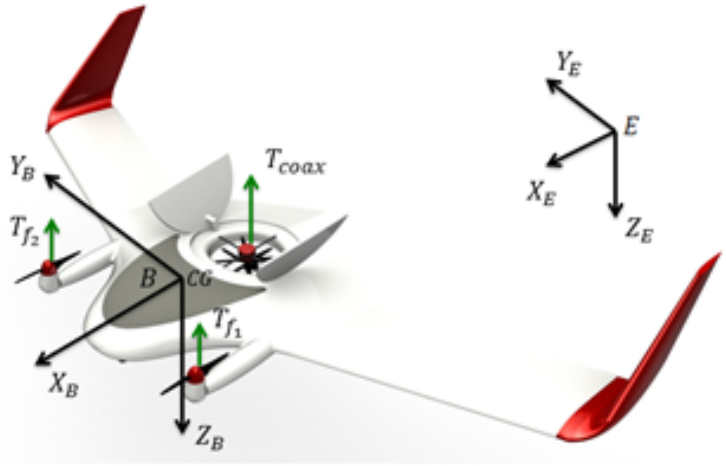
Denklemde M *ve* H momenti ve açısal momentum temsil eder.

Doğrusal olmayan hareket denklemleri elde edilmeden önce aşağıdaki varsayımlarda bulunulması gereklidir [28]:

- İHA gövde ekseni sisteminin XZ düzlemi simetri düzlemidir.
- İHA'nın kütlesi sabit kalır.
- İHA, rijit bir cisimdir.
- Dünya atıl referanstır.

Şekil 5.1'te gösterildiği gibi eksen sistemi tanımlanırken, *gövde ekseni sistemi* (B) uçağa sabitlenmekte ve *dünya ekseni sistemi* (E) dünyaya sabitlenmektedir.

Denklem 5.3 ve Denklem 5.4'te gösterildiği gibi kuvvet ve moment denklemleri Newton'un ikinci hareket yasası ve yukarıda belirtilen varsayımlar kullanılarak kuvvet ve moment denklemleri türetilmiştir. Denklemin sağ tarafında yerleştirilen dış kuvvetler, yer çekimi, aerodinamik ve itki kuvvetlerinden oluşur. Benzer şekilde, dış momentler de aerodinamik ve itki momentleridir [29].



Şekil 5.1: Dünya ve gövde eksen takımı.

$$\begin{aligned} m(\dot{U}+QW-RV) &= F_{G_x}+F_{A_x}+F_{T_x} \\ m(\dot{V}+RU-PW) &= F_{G_y}+F_{A_y}+F_{T_y} \\ m(\dot{W}+PV-QU) &= F_{G_z}+F_{A_z}+F_{T_z} \end{aligned} \tag{5.3}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}I_{xx}+QR(I_{zz}-I_{yy})-(\dot{R}+PQ)I_{xz} &= L_A+L_T \\ \dot{Q}I_{yy}+PR(I_{zz}-I_{xx})-(P^2-R^2)I_{xz} &= M_A+M_T \\ \dot{R}I_{zz}+PQ(I_{yy}-I_{xx})-(QR-\dot{P})I_{xz} &= N_A+N_T \end{aligned} \tag{5.4}$$

Denklemde U, V, W, P, Q *ve* R TURAÇ DİKY İHA gövde eksen sistemi üzerinde tanımlanan doğrusal ve açısal hızlardır. Yer çekimsel, aeorodinamik ve itki etkileri G, A, ve T alt indileri ile gösterilmiştir. F, L, M, *ve* N sırasıyla kuvveti, yuvarlanma (rolling) momentini, yunuslama momentini ve yalpalama (yawing) momentini ifade eder. Atalet momentleri I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} *ve* I_{xz} ile ifade edilmektedir. Açısal hız vektörleri Denklem 5.5'te verildiği gibi R matrisinin dönüşümü kullanılarak dünya eksen sisteminden uçak gövdesi ekseni sistemine dönüştürülmektedir. Gövde açısal hızları, Denklem 5.6'da gösterildiği gibi R matrisi kullanılarak elde edilmektedir.

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

Burada ϕ, θ, ψ *Euler* açılarıdır.

Dünya eksen takımınıa göre uçuş koordinatları Denklem 5.7'de gösterildiği gibi elde edilmektedir [29].

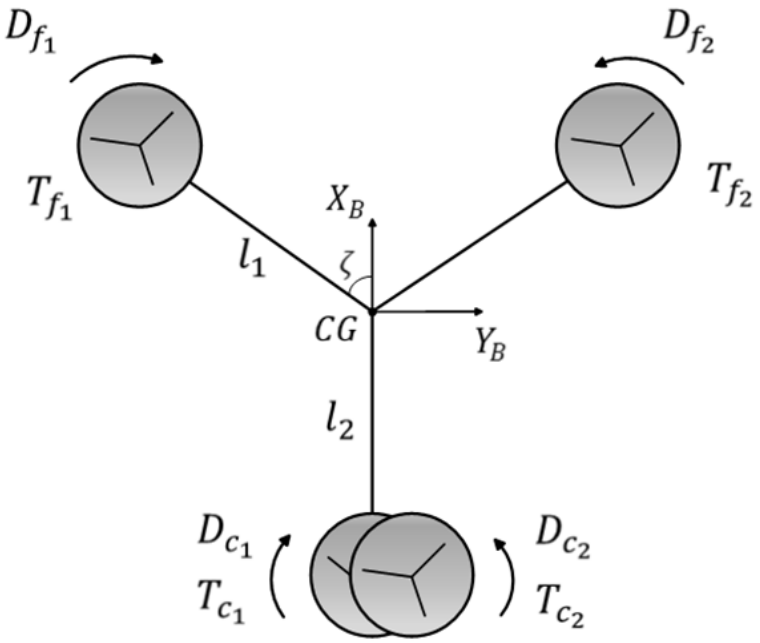
$$\begin{aligned} \dot{x}_E =& U\cos\theta\cos\psi + V(\sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi) \\ &+ W(\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \\ \dot{y}_E =& U\cos\theta\sin\psi + V(\sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi) \\ &+ W(\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\sin\psi) \\ \dot{z}_E =& -U\sin\theta + V\sin\phi\cos\theta + W\cos\phi\cos\theta \end{aligned} \tag{5.7}$$

5.2 Havada askı durumundan ileri uçuşa (ve tersi) geçişin modellenmesi

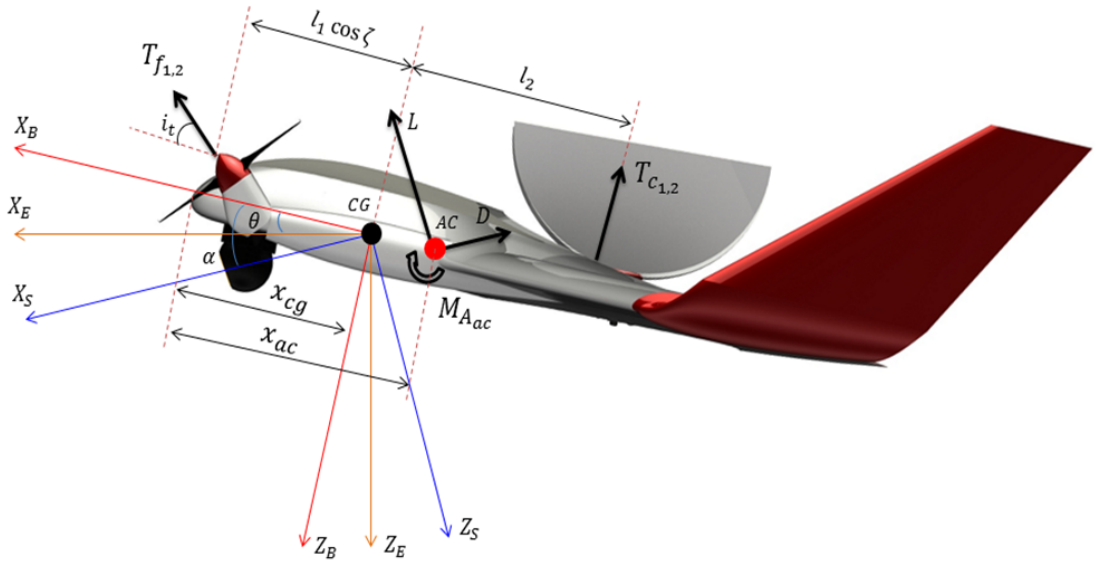
Geçiş uçuşu, havada askıda kalma ile ileri uçuş arasındaki karmaşık bir rejimdir. İHA gövdesi üzerindeki kuvvetler ve momentler ön rotorların tilt açısına göre sürekli olarak değişir. Geçiş uçuşunun dinamik denklemleri türetilmeden önce, uçak gövdesini etkileyen bazı geometrik boyutların, itki ve sürüklenme kuvvetlerinin tanımlanması faydalıdır.

Şekil 5.2'te T_{f_1}, T_{f_2}, $D_{f_1} ve\ D_{f_2}$ tilt rotor grubunun itki kuvvetleri ve sürüklenme momentleridir. T_{c_1}, T_{c_2}, $D_{c_1}\ ve\ D_{c_2}$, koaksiyel fan grububub itiş güçleri ve sürüklenme momentleridir. $l_1\ vel_2$ moment kollarıdır; ζ ise l_1 ile X_B arasındaki açıdır. Referans [30, 31]'de motor-pervane konfigürasyonunun ayrıntılı bir tanımı ve performans testi sonuçları verilmektedir.

Havada askıda kalma rejiminde, ileri hava hızı olmadığından İHA gövdesi üzerinde herhangi bir aerodinamik kuvvet veya moment oluşmaz. Ön motorlar tilt ekseni etrafında dönmeye başladığında tilt açısına orantılı olarak yatay kuvvet oluşturulmaktadır. Bu nedenle, Şekil 5.3'te gösterildiği gibi aerodinamik taşıma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve yunuslama momenti uçağın gövdesini etkilemektedir.



Şekil 5.2: Rotorların oluşturduğu kuvvet, moment ve bazı geometrik boyutları.



Şekil 5.3: Havada askı durumundan ileri uçuşa geçişte TURAÇ üzerinde oluşan kuvvet ve momentler.

Altı serbestlik dereceli hareket denklemleri Denklem 5.8 ve Denklem 5.9'da gösterildiği gibi yazılabilmektedir.

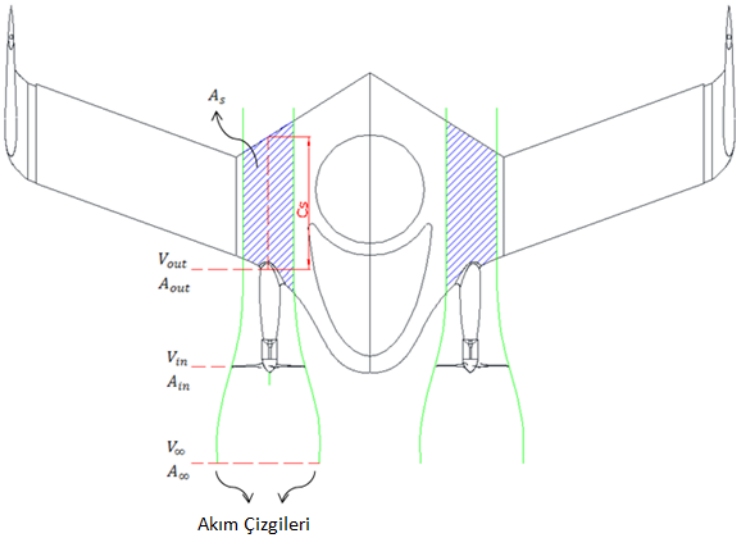
$$\begin{aligned} m(\dot{U}+QW-RV) =& -mg\sin\theta+(-D\cos\alpha+L\sin\alpha) \\ & +(T_{f_1}+T_{f_2})ci_t \\ m(\dot{V}+RU-PW) =& F_{G_y}+F_{A_y}+F_{T_y} \\ m(\dot{W}+PV-QU) =& mg\cos\phi\cos\theta+(-D\sin\alpha-L\cos\alpha) \\ & -((T_{f_1}+T_{f_2})si_t+T_c) \end{aligned} \tag{5.8}$$

$$\begin{aligned} &\dot{P}I_{xx}+QR(I_{zz}-I_{yy})-(\dot{R}+PQ)I_{xz}= \\ &\qquad L_A+(T_{f_1}+T_{f_2})l_1s\zeta \\ &\dot{Q}I_{yy}-PR(I_{zz}-I_{xx})+(P^2-R^2)I_{xz}= \\ &\qquad (M_{A_{fs}}+M_{a_p})-(L\cos\alpha+D\sin\alpha)(x_{ac}-x_{cg}) \\ &\qquad +((T_{f_1}+T_{f_2})l_1si_t\cos\zeta-T_cl_2) \\ &\dot{R}I_{zz}+PQ(I_{yy}-I_{xx})+(QR-\dot{P})I_{xz}= \\ &\qquad N_A+(D_{f_1}+D_{f_2}+D_{c_1}+D_{c_2}) \end{aligned} \tag{5.9}$$

5.3 Pervane Kaynaklı Hava Akışı Etkileri

Bir önceki kısımda, TURAÇ DİKY İHA üzerindeki kuvvetlerin ve momentlerin itki sistemi tarafından ve gövdeden geçen hava akışı tarafından kaynaklandığı açıklanmıştır. İHA üzerindeki aerodinamik kuvvetler ve momentler toplam hava akışı vektörünün (V_T) fonksiyonlarıdır. Bu nedenle, toplam hava akışının büyüklüğünün ve yönünün belirlenmesi önemlidir.

Şekil 5.4'de gösterildiği gibi, TURAÇ DİKY İHA üzerinde iki ayrı hava akışı vektörü bulunmaktadır. Bunlardan ilki, serbest hava akışı olarak tanımlanan ve geçiş hareketinin oluşturduğu V_∞'dir. V_∞ bileşenleri gövde ekseni hız vektörleri $U ve W$'dir. Gövde üzerindeki ikinci hava akışı vektörü, pervane kaynaklı hava akışı V_{out}'tır. Ön pervane itkisi $T_{f_{1,2}}$, hava yoğunluğu ρ, pervane disk alanı A ve pervane girdi hava akışı hızı V_{in}'in bir fonksiyonudur.



Şekil 5.4: TURAÇ DİKY İHA üzerinde pervane etkisi.

Pervanenin girdi ve çıktı hızları Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Bu hızlar, Denklem 5.10 ve Denklem 5.11'de gösterildiği gibi momentum teorisi kullanılarak hesaplanmıştır:

$$V_{in} = \frac{V_\infty \cos\alpha \cos i_T + V_{out}}{2} \tag{5.10}$$

$$V_{out} = \sqrt{\frac{2T_f}{\rho \pi R_p^2} + (V_\infty \cos\alpha \cos i_T)^2} \tag{5.11}$$

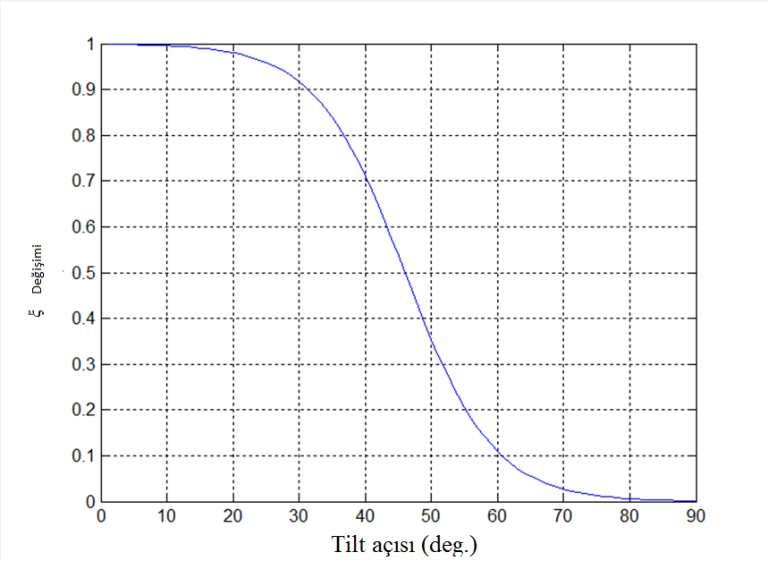
Denklem 5.10'da, girdi hava akışı hızı V_{in}, geçiş senaryosu hesaplamaları için önemli bir ayrıntı olan tilt açısı ve hücum açısı bakımından tanımlanmaktadır. Denklem 5.10 ve Denklem 5.11 momentum teorisindeki halinden farklıdır. Bu hücum açısı ve tilt açısından kaynaklanmaktadır.

Süreklilik denklemine göre, pervane kaynaklı hava akışı alanının çıkış yatay kesiti, V_{in} *ve* V_{out}'un bir fonksiyonu olarak değişmektedir (Denklem 5.12).

$$A_{out} = \frac{\pi R_p^2 V_{in}}{V_{out}} \tag{5.12}$$

Geçiş ve yatay uçuşta, toplam hava akışı vektörü Şekil 5.4'te gösterildiği gibi İHA'nın üzerinde belirli bir alanda (A_s) akar ve Denklem 5.13'te gösterildiği gibi geometrik olarak hesaplanmıştır.

$$A_s = 2R_s c_s \tag{5.13}$$



Şekil 5.5: Tilt açısıyla etkinlik katsayısının değişimi.

Denklemde c_s, Şekil 5.4'te gösterilen alanın ortalama aerodinamik veteridir.

TURAÇ DİKY İHA'nın havada askıda kalma durumunda, tilt rotoların itki ekseni X_B eksenine diktir, böylece gövdede herhangi bir pervane kaynaklı aerodinamik etki görülmez. Tilt açısı azalmaya başladığında pervane hava akışı nedeniyle oluşan ek kuvvetler ve momentler oluşur. Bununla birlikte, bu etki bir anda oluşmaz. Tilt açısının bir fonksiyonu olarak adım adım değişir. Bu tür bir değişim için bir etkinlik katsayısı (ξ) TURAÇ DİKY İHA gövdesi üzerindeki tilt rotorlu bir aerodinamik etkinin modellenmesinde bir varsayım olarak tanımlanmaktadır. Bunu Denklem 5.14'te gösterilen bir sigmoid fonksiyonu olarak modelliyoruz. Şekil 5.5'de tilt açısının bir fonksiyonu olarak etkinlik katsayısının değişimi gösterilmektedir.

$$\xi = 1 - \frac{1}{1 + e^{-0.15(i_t - 45)}}, \xi \in [0,1] \tag{5.14}$$

Denklem 5.14'deki etkinlik katsayısı ξ tilt açısı değeri 0 ile 90 derece arasındayken gövde profili üzerindeki toplam etkili hızı hesaplamak için kullanılmaktadır.

5.4 Serbest Hava Akışı Etkileri

Serbest hava akışı, pervane kaynaklı hava akışından etkilenmeyen alandan geçer. Geçiş uçuşu rejiminin başında, serbest hava akışı etkisi, neredeyse dikey olan tilt rotorlar nedeniyle İHA üzerinde hakimdir. Bu nedenle, bu hava akışı vektörünün aerodinamik etkisinin temsil edilmesi önemlidir.

TURAÇ DİKY İHA üzerinde pervane etkisi olmayan kısımlar için aerodinamik kuvvetleri (L_w, D_w, Y_w) ve momentleri (m_w, l_w, n_w) Denklem 5.15 ile hesaplanmaktadır. Aşağıdaki denklemlerde pervane kaynaklı hava akışından etkilenmeyen bölge ($A-2A_s$) olarak belirtilmektedir.

$$
\begin{aligned}
L_w &= \overline{q}(A-A_s)C_{L_w} \\
D_w &= \overline{q}(A-A_s)C_{D_w} \\
Y_w &= \overline{q}(A-A_s)C_{Y_w} \\
m_w &= \overline{q}(A-A_s)\overline{c}C_{m_w} \\
l_w &= \overline{q}(A-A_s)bC_{l_w} \\
n_w &= \overline{q}(A-A_s)bC_{n_w}
\end{aligned}
\tag{5.15}
$$

Denklemde A, TURAÇ DİKY İHA'nın planform alan,ı $\overline{q}$ ise dinamik basınçtır. Burada, w alt indisi serbest hava akışı kuvvetlerini ve momentlerini temsil etmek için kullanılmaktadır. Denklem 5.15'teki aerodinamik katsayılar Denklem 5.16'da gösterilmektedir.

$$
\begin{aligned}
C_{L_w} &= C_{L_{w_b}} + C_{L_{w_{\delta e}}}\delta e + C_{L_{\dot{\alpha}}}\frac{\dot{\alpha}\overline{c}}{2U_1} + C_{L_q}\frac{q\overline{c}}{2U_1} \\
C_{D_w} &= C_{D_{w_b}} + C_{D_{w_{\delta e}}}\delta e + C_{D_{\dot{\alpha}}}\frac{\dot{\alpha}\overline{c}}{2U_1} + C_{D_q}\frac{q\overline{c}}{2U_1} \\
C_{m_w} &= C_{m_{w_b}} + C_{m_{w_{\delta e}}}\delta e + C_{m_{\dot{\alpha}}}\frac{\dot{\alpha}\overline{c}}{2U_1} + C_{m_q}\frac{q\overline{c}}{2U_1} \\
C_l &= C_{l_{w_b}} + C_{l_{\delta a}}\delta a + C_{l_{\delta r}}\delta r + C_{l_p}\frac{pb}{2U_1} + C_{l_r}\frac{rb}{2U_1} \\
C_Y &= C_{Y_{w_b}} + C_{Y_{\delta a}}\delta a + C_{Y_{\delta r}}\delta r + C_{Y_p}\frac{pb}{2U_1} + C_{Y_r}\frac{rb}{2U_1} \\
C_n &= C_{n_{w_b}} + C_{n_{\delta a}}\delta a + C_{n_{\delta r}}\delta r + C_{n_p}\frac{pb}{2U_1} + C_{n_r}\frac{rb}{2U_1}
\end{aligned}
\tag{5.16}
$$

Denklem 5.16'da:

$$C_{L_{w_b}} = C_{L_0} + C_{L_\alpha}\alpha$$
$$C_{D_{w_b}} = C_{D_0} + C_{D_\alpha}\alpha$$
$$C_{m_{w_b}} = C_{m_0} + C_{m_\alpha}\alpha$$
$$C_{Y_{w_b}} = C_{Y_0} + C_{L_\beta}\beta$$
$$C_{l_{w_b}} = C_{l_0} + C_{l_\beta}\beta$$
$$C_{n_{w_b}} = C_{n_0} + C_{n_\beta}\beta$$

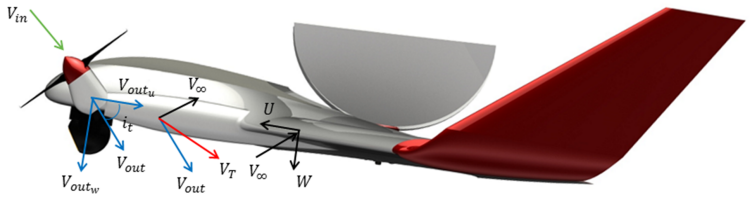
Burada, (w,b) alt indili aerodinamik katsayılar her bir katsayı üstündeki kanat (wing)-gövde (body) geometrisi etkilerini temsil etmektedir.

Geçiş uçuşunda, kanat-gövde geometrisinin boylamsal aerodinamik katsayıları İHA'nın dinamik özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu nedenle $C_{L_{w,b}}$, $C_{D_{w,b}}$ *ve* $C_{m_{w,b}}$ 3D HAD analiziyle elde edilmiştir. Bunlar, doğrusal olmayan matematiksel modele gömülen arabul (look-up) tabloları oluşturmak için kullanılmaktadır. Yanal yönlü katsayılar dahil kalan aerodinamik katsayılar, Advanced Aircraft Analysis (AAA) yazılımı kullanılarak elde edilmiştir. Analizimiz sırasında TURAÇ DİKY İHA gövdesinin (diğer bir deyişle, yükü ve aviyoniği taşıyan parçanın) aerodinamik katsayılarının koaksiyel fan hava akışından etkilenmediğini kabul ettik. Bu nedenle, bu hususta taşıma ve sürüklenme katsayılarının gövde kısmı için sabit olduğunu kabul ediyoruz. Kanat, birincil kuvvet oluşturucu mekanizma olduğu için bu gerçekten de geçerli bir yaklaşımdır. HAD analizi ile daha ileri seviyede gösterilmekte ve doğrulanmaktadır.

5.5 Toplam hava akışı etkileri

Havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) durumda, TURAÇ DİKY İHA üzerinde serbest ve pervane kaynaklı hava akışları tarafından oluşturulan oldukça karmaşık ve doğrusal olmayan aerodinamik etkiler bulunmaktadır. Bu nedenle, herhangi bir varsayımda bulunmadan bu doğrusal olmayan aerodinamik etkilerin matematiksel olarak temsil edilmesi oldukça zordur.

Bu çalışmada, serbest ve pervane kaynaklı hava akışı etkileri süperpozisyon kuralı kullanılarak doğrusal olarak modellenmiştir. Bu nedenle, bu iki aerodinamik etki ayrı ayrı incelenmiştir. Bu varsayım, esas olarak matematiksel temsillerin türetilmesini



Şekil 5.6: Tilt açısı değişiminin uçağa etkisi.

basitleştirmektedir. Bu amaçla, taşıma kuvveti, sürüklenme kuvveti ve yunuslama momenti pervane etkisi altında (L_s, D_s, M_s) ve pervane etkisi olmadan (L_w, D_w, M_w) her iki durum için de hesaplanmıştır. Daha sonra, TURAÇ DİKY İHA gövdesi üzerindeki toplam aerodinamik etkileri elde etmek için pervane etkisi altında ve pervane etki olmadan aerodinamik kuvvetlerin ve momentlerin değerleri toplanmıştır. Hem serbest hava akışı hem de pervane kaynaklı hava akışı A_s alanı üzerinde etkilidir. Bu nedenle, Denklem 5.17'de gösterildiği gibi A_s üzerinde oluşan taşıma kuvveti, sürükleme kuvveti ve yunuslama momentinin hesaplanması için toplam hava akışı (V_T) kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{1}{2}\rho V_T^2 A_s C_{L_s} \\ D_s &= \frac{1}{2}\rho V_T^2 A_s C_{D_s} \\ M_s &= \frac{1}{2}\rho V_T^2 A_s c_s C_{M_s} \end{aligned} \tag{5.17}$$

Şekil 5.4'de gösterildiği gibi pervane kaynaklı hava akışının geçtiği bölüm üzerinde hiçbir aşağı sapma etkisi bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu bölge sonsuz kanat olarak kabul edilebilir. Bu şekilde Denklem 5.17'deki aerodinamik katsayılar kanat profilinin 2D analiziyle elde edilmiş ve look-up tabloları oluşturulmuştur. Bu konuyla ilgili ayrıntılı bilgi, HAD analizinde verilmektedir.

Yukarıda belirtilen A_s alanını etkileyen toplam hava hızı Şekil 5.6'da gösterildiği gibi vektör formunda tanımlanmış ve Denklem 5.18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V_T = \sqrt{(V_{out}\zeta \sin(\alpha + i_t))^2 + (V_{out}\zeta \cos(\alpha + i_t) + V_\infty)^2} \tag{5.18}$$

Kanadın üzerindeki hava akışı pervanenin serbest akış hızından ve çıkış hızından etkilenmektedir. Serbest akış hızının Denklem 5.18'de gösterildiği gibi yerleştir-

ilmesinden dolayı pervane kaynaklı hava akışı hızı x ve y bileşenlerine ayrılmıştır. Tilt etkisi de, bu denklemde tilt açısı (i_t) olarak hesapta gösterilmektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi toplam hava akışı vektörü V_T TURAÇ DİKY İHA gövdesinin üzerinde belirtilen A_s alanına etkir. V_T'nin büyüklüğü, serbest akış hava akışı hızının, hücum açısının ve hava akışı vektörünün bir fonksiyonudur. Toplam hava akışı vektörünün aerodinamik etkilerinin modellenmesi için pervane kaynaklı hava akışı ve serbest hava akışı vektörlerinin oluşturduğu A_s üzerindeki etkili hücum açısının α_{eff} tanımlanması önemlidir. Geometrik olarak α_{eff}, Denklem 5.19 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\alpha_{eff} = \arctan\left(\frac{V_\infty \sin\alpha - V_{out}\sin i_T}{V_\infty \cos\alpha + V_{out}\cos i_T}\right) \tag{5.19}$$

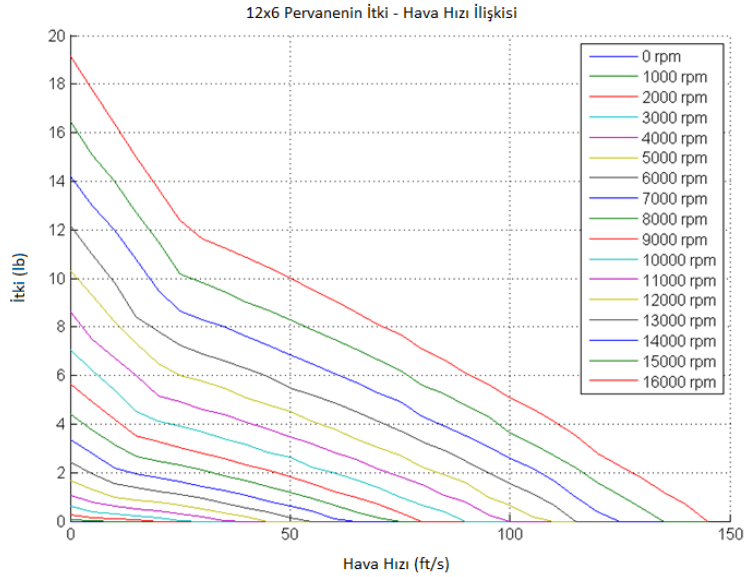
Geleneksel bir uçak kanadı üzerindeki pervane etkisinin aksine, DİKY konseptindeki etkili hücum açısının tilt rotor hesaplarına tilt açısı yerleştirilir.

5.6 Tilt Rotorlu Pervaneye için İtki-Uçuş Hızı İlişkisinin Modellenmesi

Pervane girdisi hava akışı hızı (V_{in}) pervane rotasyon ekseni ile aynı yönde olan serbest akış hızıdır. V_{in} ve itki değeri hücum açısı ve tilt açısı ile bağlantılıdır. Diğer bir deyişle, pervane palleri üzerindeki hücum açısı, giren hava akış hızı arttıkça azalır. Bu nedenle, pallerin üstündeki düşük açı nedeniyle itki azalır. Şekil 5.7'de, $12x6$ inçlik sabit hatveli pervanenin pervane giren hava akışı hızının oluşturduğu itki değerleri RPM'ler için gösterilmektedir. Farklı hava hızları ve RPM'lere yönelik test verileri üreticinin veri tabanında bulunmaktadır. Her bir RPM'e yönelik hava hızı ile ilgili itki fonksiyonları ve look-up tabloları oluşturmak için bu veriler kullanılmaktadır. Test verilerinde mevcut olmayan farklı bir hava akışındaki itki kuvvetlerini bulmak için bir yüzey fonksiyonu kullanılmıştır.

5.7 2D Kanat Profili Analizi

Daha önce belirtildiği gibi, pervane kaynaklı hava akışı kanat profilinden geçmekte ve sonlu kanat etkisi bulunmamaktadır (Şekil 5.4). Bu nedenle, bu bölge bir sonsuz kanat olarak kabul edilmektedir ve bu bölgenin aerodinamik katsayılarını hesaplamak için 2D aerodinamik analizi kullanılabilmektedir. TURAÇ DİKY İHA'nın kanat profili MH-78 için aerodinamik katsayıları Girdap Kafes Yöntemi (VLM) kullanan XFLR5



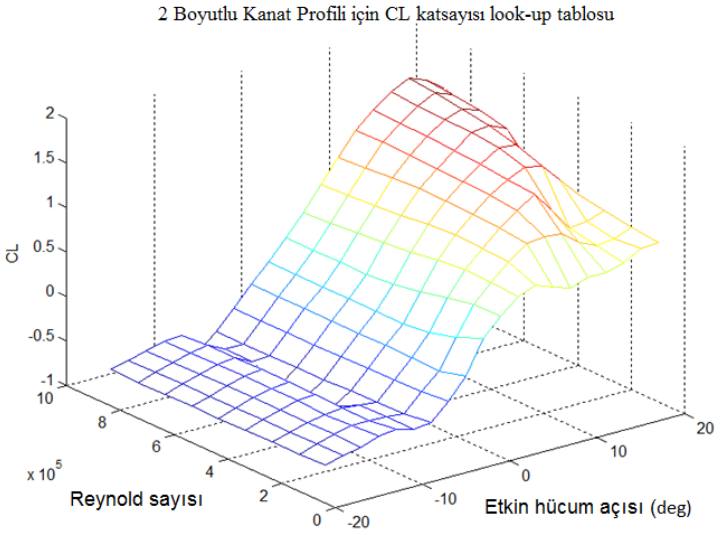
Şekil 5.7: 12x6 sabit hatveli pervane için hava hızı - itki grafiği.

yazılımında farklı Reynold sayılarına yönelik 2D analizi kullanılarak hesaplanmıştır. 2D analizindeki farklı Reynolds sayı ve irtifa dümeni açıları için kanat profilinin taşıma katsayısı C_{L_s} Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Benzer şekilde, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da da kanat profilinin sürüklenme katsayısı C_{D_s} ve yunuslama moment katsayısı C_{M_s} değerleri farklı Reynolds sayısı ve irtifa dümeni açıları için gösterilmektedir.

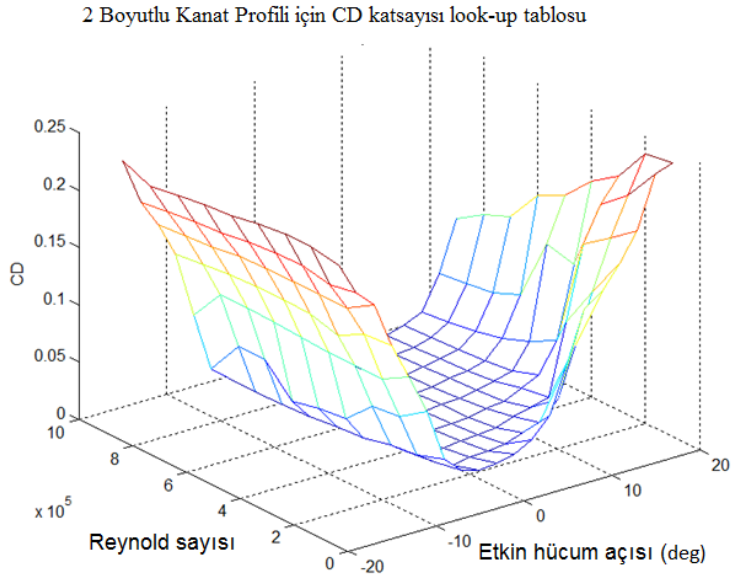
5.8 3D Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi

İleri ve geçiş uçuşlarına yönelik HAD analizi dört adımda gerçekleştirilmektedir: model ve kontrol hacmini oluşturmak, bütün geometriyi birleştirmek, sınır tabakası oluşturmak ve analizi oluşturmak. Bu çalışmada, sorunu doğru bir şekilde çözmek için ileri ve geçiş uçuşu için adım adım durumlar oluşturulmuştur. Analizdeki önemli hususlardan biri, sınır tabakasının ilk hücre büyüklüğü için 1 olan $y+$ değeriyle ilgili sınır tabakaları oluşturmaktadır. $y+$ değeri viskoz, geçiş ve türbülans rejimine göre değişmektedir.

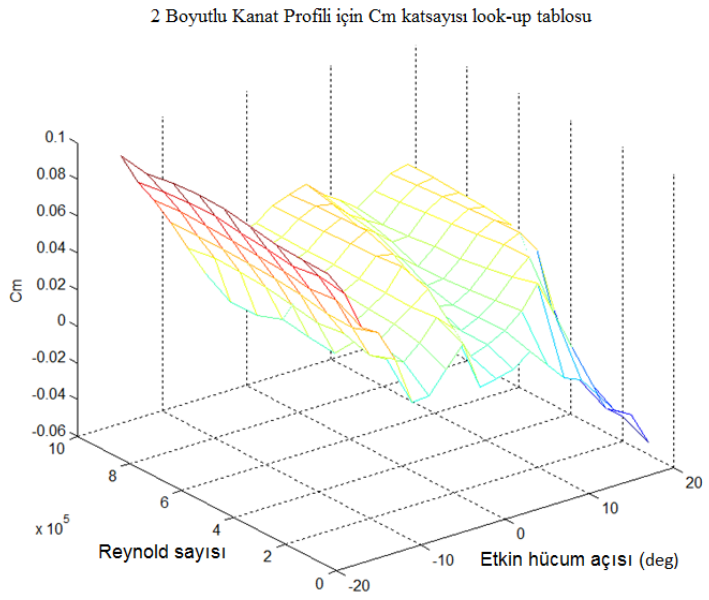
Analizde, çözücü program olarak Fluent kullanılmıştır. Bütün HAD durumları için *K-epsilon Realizable Enhanced Wall Treatment türbülans modeli* elde edilmiştir. Tasarım sürecinde gövdede bulunan ana motor yuvasının aerodinamiksel etkilerini göstermek için 2. bölümde TURAÇ DİKY İHA için fan kapağı bulunan ve bulunmayan durumlar için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan HAD analizleri sonuçunda gövdede bulunan fan boşluğunun ileri uçuş fazında önemli aerodinamiksel



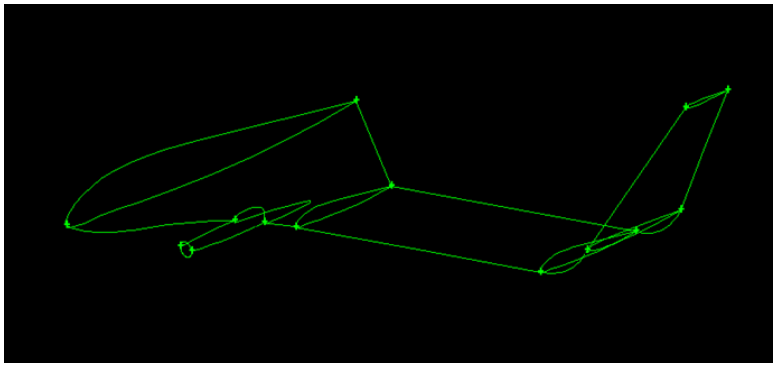
Şekil 5.8: Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin taşıma katsayısı C_{L_s}.



Şekil 5.9: Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin sürükleme katsayısı C_{D_s}.



Şekil 5.10: Farklı Reynold sayıları için 2-boyutlu kanat profilinin taşıma katsayısı C_{m_s}.



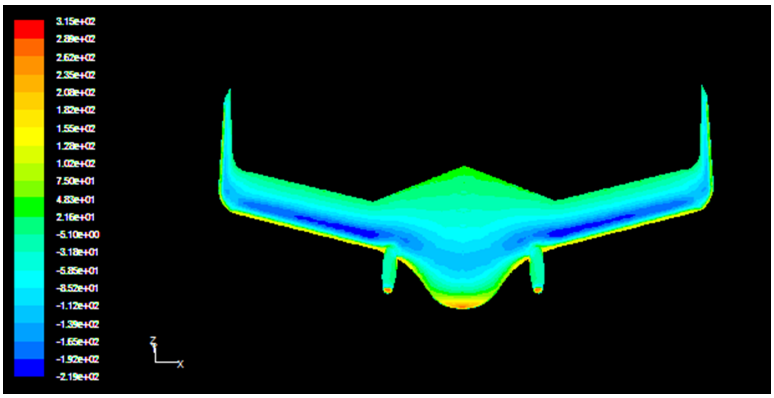
Şekil 5.11: İleri uçuş rejimde HAD analizi için yarı TURAÇ DİKY İHA modeli.

verim kayıplarına sebep olduğu tespit edilmiş ve tasarımda fan kapağının gerekliliği vurgulanmıştır. Bu bölümde ise havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) senaryolarının geliştirme bölümünde HAD analizinden aerodinamik katsayıları sağlanmıştır. Bu analizlerde, çözme süresi bellek kullanımını azaltmak için TURAÇ DİKY İHA'nın yarısı modellenmiştir. Analiz için, ileri uçuşta olduğu gibi koaksiyel fan kapağı kapatılmıştır. TURAÇ DİKY İHA'nın yarım modeli Şekil 5.12'de görülebilir.

İleri uçuş konseptindeki yarım TURAÇ DİKY İHA geometrisi, farklı ileri uçuş hızlarında ve 0^o ila 15^o arasında değişen hücum açılarında analiz edilmiştir. Aerodinamik katsayılar belirtilen analizle hesaplanmıştır. Ayrıca, aerodinamik katsayıların değişimini araştırmak için sabit hücum açısında farklı ileri uçuş hızları için aynı analiz tekrarlanmıştır. Analiz, $5m/s$, $10m/s$, $15m/s$ ve $20m/s$'lik ileri uçuş

Çizelge 5.1: Askı uçuşundan ileri uçuşa geçiş senaryosu için kuvvet ve moment katsayıları.

α ($^\circ$)	V (m/s)	C_L	C_D	C_M
-3	15	-0.08601	0.04092	0.01516
	20	-0.08699	0.033964	0.01589
0	5	0.12406	0.03836	-0.09538
	10	0.12376	0.03489	-0.09486
	15	0.12496	0.03321	-0.09521
	20	0.12494	0.03209	-0.09499
3	5	0.34476	0.04104	-0.20825
	10	0.3468	0.03745	-0.20864
	15	0.34844	0.03567	-0.20921
	20	0.34927	0.0345	-0.20926

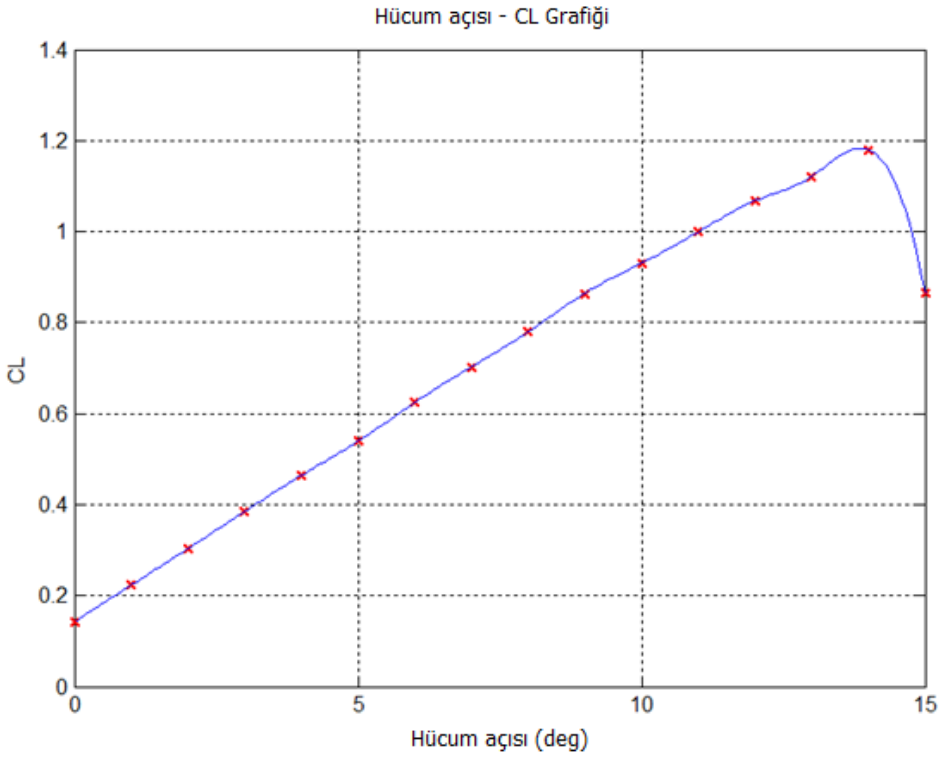


Şekil 5.12: TURAÇ DİKY İHA üzerinde oluşan statik basınç dağılımı.

hızlarında -3^o, 0^o ve 3^o'lik hücum açısı değerlerine uygulanmıştır. Çizelge 5.1'de, sabit hücum açısında farklı ileri uçuş hızlarından kaynaklanan TURAÇ DİKY İHA aerodinamik katsayıları gösterilmektedir. Bu açıdan, TURAÇ DİKY İHA aerodinamik katsayılarının hava hızı ile değişmediğini varsayıyoruz.

Çizelge 5.1'de, hücum açısı artarken kaldırma ve sürüklenme katsayıları artmakta ve yunuslama moment katsayısı azalmaktadır. Çizelgede, aerodinamik katsayıların sabit hücum açısında Reynolds sayısıyla değişmediği açık bir şekilde görülebilir. Şekil 5.12'de, TURAÇ DİKY İHA üzerindeki basınç değişikliği görülebilir. Renk çubuğunun üzerindeki statik basınç değerleri Pascaldır. En yüksek basınç değeri burun ve tilt bileşeni üzerindedir. TURAÇ İHA üzerindeki en düşük basınçsa kanatların çeyrek veterindedir.

TURAÇ DİKY İHA'nın doğrusal olmayan matematiksel modelinde, kanat-gövde geometrisinin aerodinamik etkilerini temsil eden look-up tablolarının oluşturulması gerekmektedir. Bu amaçla, Şekil 5.13 - Şekil 5.15'de gösterildiği gibi tutunma kaybı

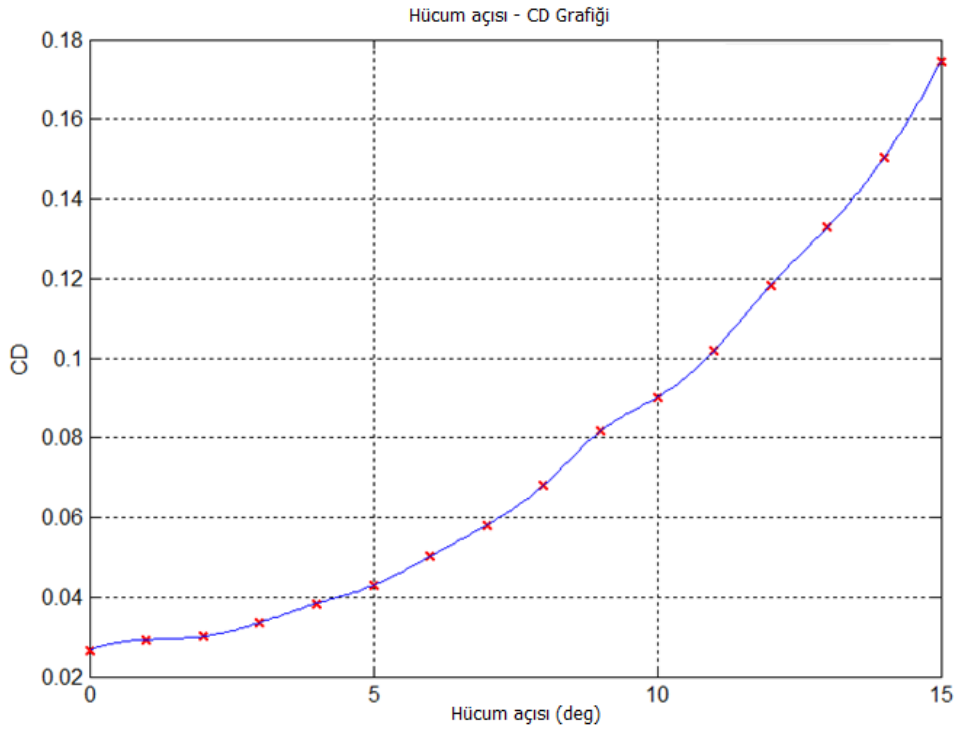


Şekil 5.13: TURAÇ DİKY İHA C_L - α grafiği.

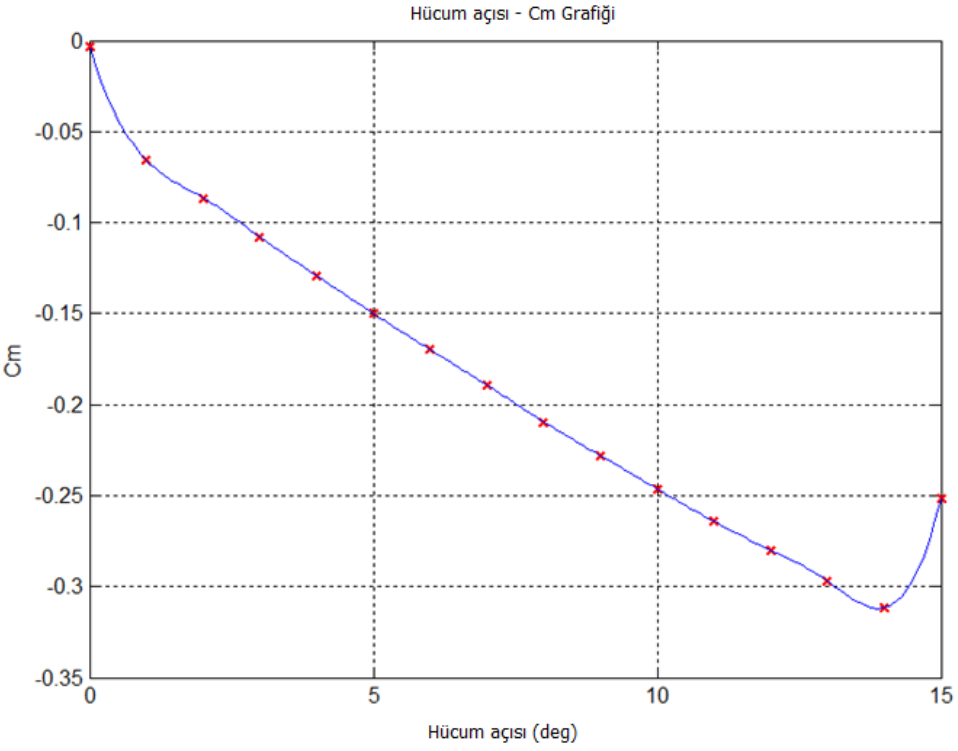
(stall) etkilerini içeren 0^o - 15^o hücum açılarında ileri uçuş için 3D HAD veri seti elde edilmiştir.

Havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) uçuşu senaryolarının hesaplamaları için farklı ileri uçuş hızlarında aynı aerodinamik katsayıları kullanılmıştır. Geçiş senaryosunun bir bölümü de HAD yöntemi kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Geçiş uçuşu analizine ilişkin daha detaylı bilgi [16]'de bulunabilir. Bu modelde, TURAÇ DİKY İHA'nın tam modeli kullanılmış ve fan sınır koşulu olarak iki tiltli pervaneler ve koaksiyel pervaneler modellenmiştir. Bu analizde, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş konsepti nedeniyle TURAÇ DİKY İHA'nın koaksiyel fan bölümü açıktır. Pervaneye yönelik sınır koşulları olarak her bir pervanenin oluşturduğu itki doğru bir şekilde tanımlamak için ani bir basınç yükselmesi eklenmiştir. Pervanenin ani basınç yükselmesi momentum teorisinden hesaplanmıştır Şekil 5.16'da $10m/s$'lik ileri uçuş hızında TURAC'ın 70^o tilt açısı ve -1^o hücum açısındaki akış çizgileri gösterilmektedir.

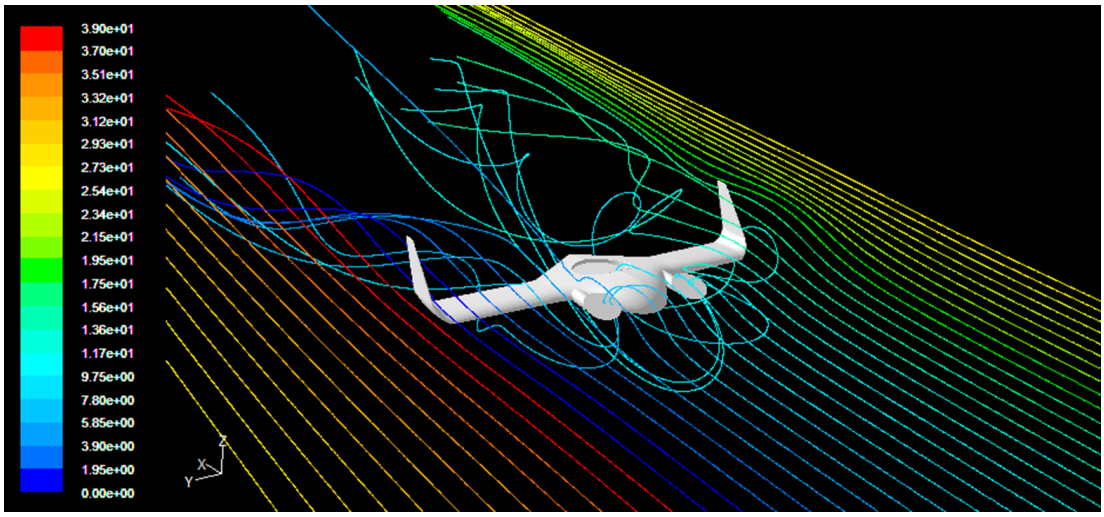
Şekil 5.16'da, tilt ve koaksiyel rotorlar için pervane diskine akış eklenmiştir. Akış girdabı da pervanelerin arkasındaki şekilde görülebilir. Gövdedekilerle



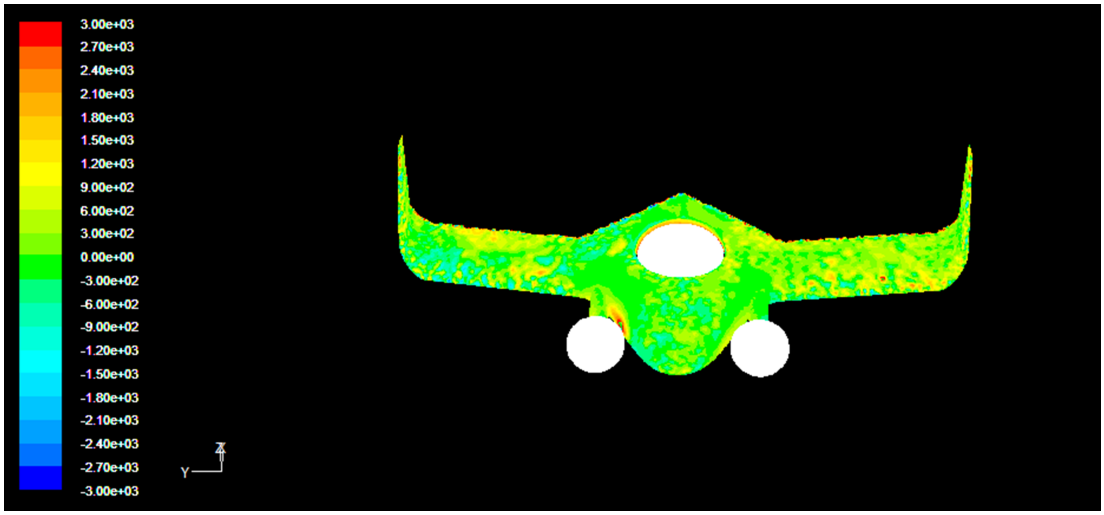
Şekil 5.14: TURAÇ DİKY İHA C_D - α grafiği.



Şekil 5.15: TURAÇ DİKY İHA C_m - α grafiği.



Şekil 5.16: TURAÇ DİKY İHA geçiş rejiminde akış çizgileri.



Şekil 5.17: Geçiş rejiminde TURAÇ DİKY İHA üzerinde oluşan statik basınç dağılımı.

kıyaslandığında kanatlardaki akış çizgileri pürüzsüzdür. TURAÇ DİKY İHA'nın gövdesinde, ileri uçuşta taşıma sağlayan bir kanat profili bulunmaktadır. Bununla birlikte, geçiş uçuşunda, gövde üzerindeki karmaşık akış ve açılan fan kapıları nedeniyle gövdenin kaldırma oluşturmaya olan katkısı oldukça azdır. Bu nedenle, gövdenin kaldırma ve sürüklenme katkısının süzülme ve geçişte koaksiyel fan operasyonundan bağımsız olduğunu kabul ediyoruz.

Şekil 5.17'de TURAÇ DİKY İHA'nın gövdesi üzerindeki statik dağılım görülebilir. Bu sonuçlara göre, havada askı durumundan ileri uçuşa (ve tersi) geçiş rejiminin aerodinamiği son derece karmaşıktır. Bununla birlikte, tilt ve koaksiyel pervanelerin oluşturduğu kuvvetler ve momentler ile net kuvvet etkileri geçiş rejiminin ve

manevranın tanımlanmasında son derece önemlidir. Bir sonraki kısımda dengeli bir geçişe ulaşmak için gereken itki bileşenlerini (hem kuvvet hem de moment) tasarlayan bir geçiş senaryosuna aktaracağız.

5.9 Geçiş Senaryosu

Havada askı durumundan ileri uçuşa (ve tam tersi) dengeli bir geçişe ulaşmak için hem tilt rotorlar hem de ana taşıma fanı için gerekli kuvvetlerin sağlanması gerekecektir. Geçiş sırasında bu kuvvetlerin uygulanması yoluyla, ileri uçuşa (veya havada askı durumuna) dengeli bir geçiş sağlanacaktır. x ve z yönlerindeki toplam kuvvet ve aerodinamik merkezin etrafındaki moment Denklem 5.20 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} F_z &= L_w \cos\alpha + 2T \sin i_T \cos\alpha + L_s \cos\alpha_w - D_s \sin\alpha_w + T_{coax} \cos\alpha - W \\ F_x &= 2T \cos i_T \cos\alpha - D_w - L_s \sin\alpha_w - D_s \cos\alpha_w - T_{coax} \sin\alpha \\ M_{ac} &= 2T \sin i_T (x_{ac} - x_T) + T_{coax}(x_{ac} - x_{T_{coax}}) + W(x_{ac} - x_w)\cos\alpha \end{aligned} \tag{5.20}$$

Burada, pozitif yön z-ekseninde taşıma yönü ve x-ekseninde itki yönüdür [32]. Yunuslama moment katsayısı Denklem 5.21 kullanılarak elde edilmektedir:

$$C_M = \frac{M_{ac}}{\frac{1}{2}\rho V^2 c S} + C_{M_{\delta_e}} \delta_e \tag{5.21}$$

Kuvvet tanımları kullanılarak 1/3 ölçekli TURAC prototipi için bir geçiş senaryosu geliştirilmiştir. Çizelge 5.2'de tasarlanan geçiş senaryosunda TURAÇ DİKY İHA platformunu hızlandırmak için her bir geçiş aşamasında ek itkiler üretilmiştir. Bu senaryoda, TURAÇ DİKY İHA'nın hızı geçiş uçuşu rejiminde düzgün olarak artmıştır. Geçişin son aşamasında ileri uçuş trim noktasına ulaşmak için bütün aerodinamik kuvvetler ve momentler sıfıra eşittir. Geçiş uçuşu rejiminde ilk olarak 29 m/s ileri uçuş hızına ulaşılana kadar ön tilt rotorlu pervane açısı 70^o hücum açısıysa -1^o olarak ayarlanmıştır. Geçiş uçuşu rejiminden sonra sabit hızda bir ileri uçuşa ulaşmak için bu senaryo 40 m/s'ye kadar devam eder. Denklem 5.20, her bir uçuş hızı için aerodinamik kuvvetler ve yunuslama momenti için kullanılmıştır.

Burada, z kuvveti yönünde ve y momenti yönünde neredeyse mükemmel dengeli uçuşa ulaşmak için koaksiyel fan kuvveti ve tilt rotor kuvvetleri hesaplanmaktadır.

Çizelge 5.2: Üçüncü senaryo için kuvvet ve moment katsayıları.

V	$\mathbf{i_T}$	$\alpha(^\circ)$	$\mathbf{T_f(N)}$	$\mathbf{T_{coax}(N)}$	$\sum F_x$	$\sum F_z$	C_M
2	70	-1	8.58	39.29	7.44	-0.086	-0.0015
5	70	-1	8.59	39.38	7.5	-0.005	-0.002
10	70	-1	8.55	39.2	7.44	0.066	-0.001
15	70	-1	8.55	38.68	7.28	-0.001	0.002
20	70	-1	8.7	37.76	7.13	0	0.006
25	70	-1	10.2	29.86	7.82	0.006	-0.001
29	70	-1	19.8	0	14.9	0.002	0.049
32	0	0	24.9	0	44.5	0	-0.005
35	0	0	3	0	-0.005	0.005	0.021
40	0	0	3.9	0	-0.043	-0.061	0.075

Buna ek olarak, geçiş rejiminin tamamı boyunca dengelenmiş ve kararlı bir uçuş için irtifa dümeni açısı (δ_e) da kullanılmıştır. İrtifa dümeni açısı (δ_e) 20 m/s'ye kadar 0^o'ye ayarlanmış daha sonra 25 m/s'de 6.45^o , 29 m/s'de 17^o, 32 m/s'de -6.4517^o, 35 m/s'de -5.548^o ve 40 m/s'de -15^o'ye karşılık gelmiştir. Senaryoda ek itki TURAÇ İHA'yı x yönünde 32 m/s'ye kadar hızlandırmakta ve sonrasında bu hızdan sonra ise denge durumu sağlanmaktadır. Gövdede bulunan koaksiyel motor tarafından üretilen itki yüksek bir değerden başlayıp neredeyse sıfıra kadar düşmektedir. Tam senaryoda, moment katsayısı ve z-yönündeki toplam kuvvet neredeyse sıfıra karşılık gelmekte ve böylece mükemmel bir z kuvveti ve y momenti dengesi elde edilmektedir. Aynı zamanda senaryonun son iki adımında bütün aerodinamik kuvvetler ve yunuslama momenti sıfırdır; bu da TURAÇ DİKY İHA'nın seyir hızında dengede olduğu anlamına gelir.

Çizelge 5.3'te gösterildiği gibi ileri uçuş rejiminden havada askıda kalma durumuna geçiş senaryosu da geliştirilmiştir. Geri geçiş rejiminde, ileri uçuş hızı azaldıkça tilt ve koaksiyel motorların itkisi artırılmaktadır. Son aşamada, sıfıra karşılık gelen sürüklenme kuvvetleri ve yunuslama momenti İHA'yı dengeye getirmektedir.

Bu senaryoda, tüm senaryo boyunca tilt açısı 90^o'ye ayarlanmıştır. İleri uçuştan havada askı durumuna geri geçiş senaryosu, havada askı konumundan ileri uçuşa geçiş senaryosunun tam tersidir. 90^o'lik tilt açısıyla 40 m/s'lik ileri hızla senaryo başlar ve TURAÇ DİKY İHA önlerdeki tilt rotorların itkisini, koaksiyel rotor itkisini, hücum açısını ve irtifa dümeni sapmasını (δ_e) değiştirerek yavaşlar.

Çizelge 5.3: Askı durumuna geçiş senaryosu için kuvvet ve moment katsayıları.

V	$\mathbf{i_T}$	$\alpha(^\circ)$	$\mathbf{T_f(N)}$	$\mathbf{T_{coax}(N)}$	$\sum F_x$	$\sum F_z$	C_M
40	90	0.5	0.8	0.47	-10.1	-0.019	0.0377
35	90	0.5	1.2	1.5	-7.84	-0.009	-0.0044
32	90	0.5	3.21	5.85	-6.9	0.006	0.0012
29	90	0.5	4.2	11.5	-5.88	0.019	0.0004
25	90	0	7	22	-3.56	-0.01	0.0071
20	90	0	7.44	28	-2.26	-0.002	0
15	90	0	8.1	32	-1.16	-0.006	-0.0034
10	90	0	8.6	35	-0.55	0.002	-0.0048
5	90	0	9	36.5	-0.12	0.059	0.003
2	90	0	9.15	36.7	0.003	-0.004	-0.0037

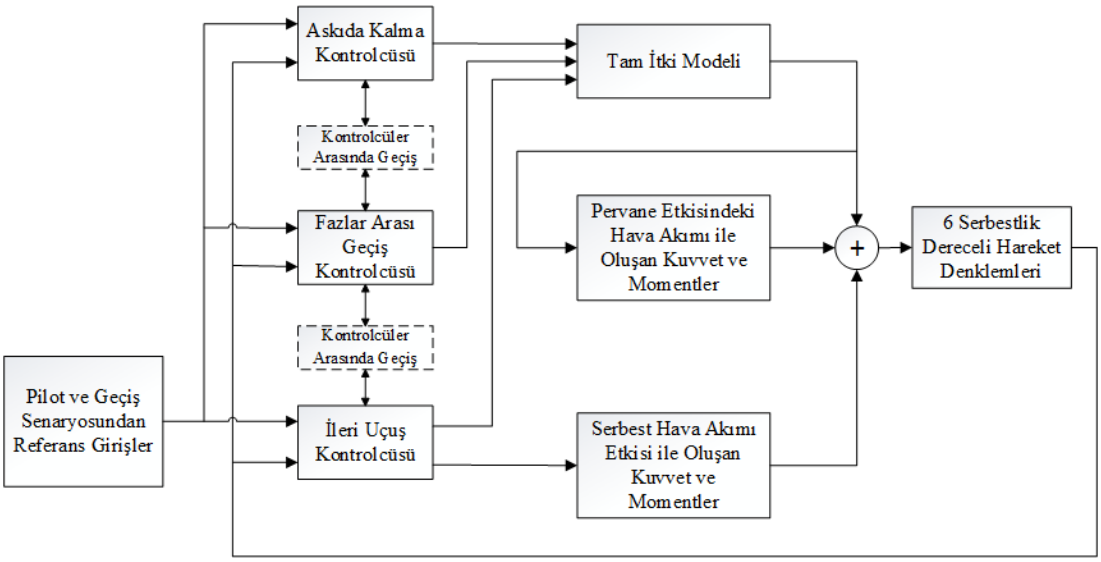
Bu senaryoda, irtifa dümeni açısı (δ_e) başlangıçta 0^o'ye ayarlanmamıştır. 40 m/s'de -7.42^o'ye, 10 m/s'de -1.6^oye, 5 m/s'de -6^o'ye ve 2 m/s'de -2.8^o'ye ayarlanmıştır. Tilt ve koaksiyel motorların itkisi neredeyse sıfırdan başlayıp havada askıda kalma durumu itki değerlerine ulaşana kadar artmaktadır. 2 m/s'lik hava hızında aerodinamik kuvvetler ve moment sıfırdır; bu da TURAÇ DİKY İHA'nın dengede ve tam askı rejiminde olduğunu göstermektedir.

Bir sonraki bölümde, ileri besleme sinyali olarak belirtilen havada askı durumundan ileri uçuşa ve ileri uçuştan havada askıda kalma durumuna geçiş senaryolarını kullanan *geçiş kontrol sistemi* tasarımını göstermekteyiz. Ayrıca tamamen kontrol edilen uçuş zarfını göstererek havada askıda kalma- ileri uçuş- havada askıda kalma rejimlerini kapsayan tam bir uçuşun ayrıntılarını vermekteyiz.

5.10 Matematiksel Modelin Tamamı ve Simulasyonlar

Bir önceki kısımda , itki ve aerodinamik etkileri sunmuş ve yalnızca havada askıda kalma durumunu değil aynı zamanda geçiş uçuşu rejimini de yöneten büyük ölçüde doğrusal olmayan ilişkileri göstermiştik. Şekil 5.18'deki havada askıda kalma durumu, askı durumundan ileri uçuşa (ve tersi) geçiş ve ileri uçuşları ile bağlantılı dinamikleri birleştirerek tam uçuş zarfı doğrusal olmayan matematiksel modelinin genel blok diyagramını elde ettik. Burada, bu rejimlerin her biri arasında değişen fonksiyonlarla her bir rejime yönelik uçuş kontrolleri de verilmektedir.

Geçiş kontrol şemasının deneydeki uygulanabilirliğini göstermek için hemen (ve kolayca) uygulanabilen PID yapılandırılmış ve ardışık (cascade) bir kontrol sistemi



Şekil 5.18: Tüm uçuş rejimlerini içeren doğrusal olmayan dinamik modelin genel blok diagramı.

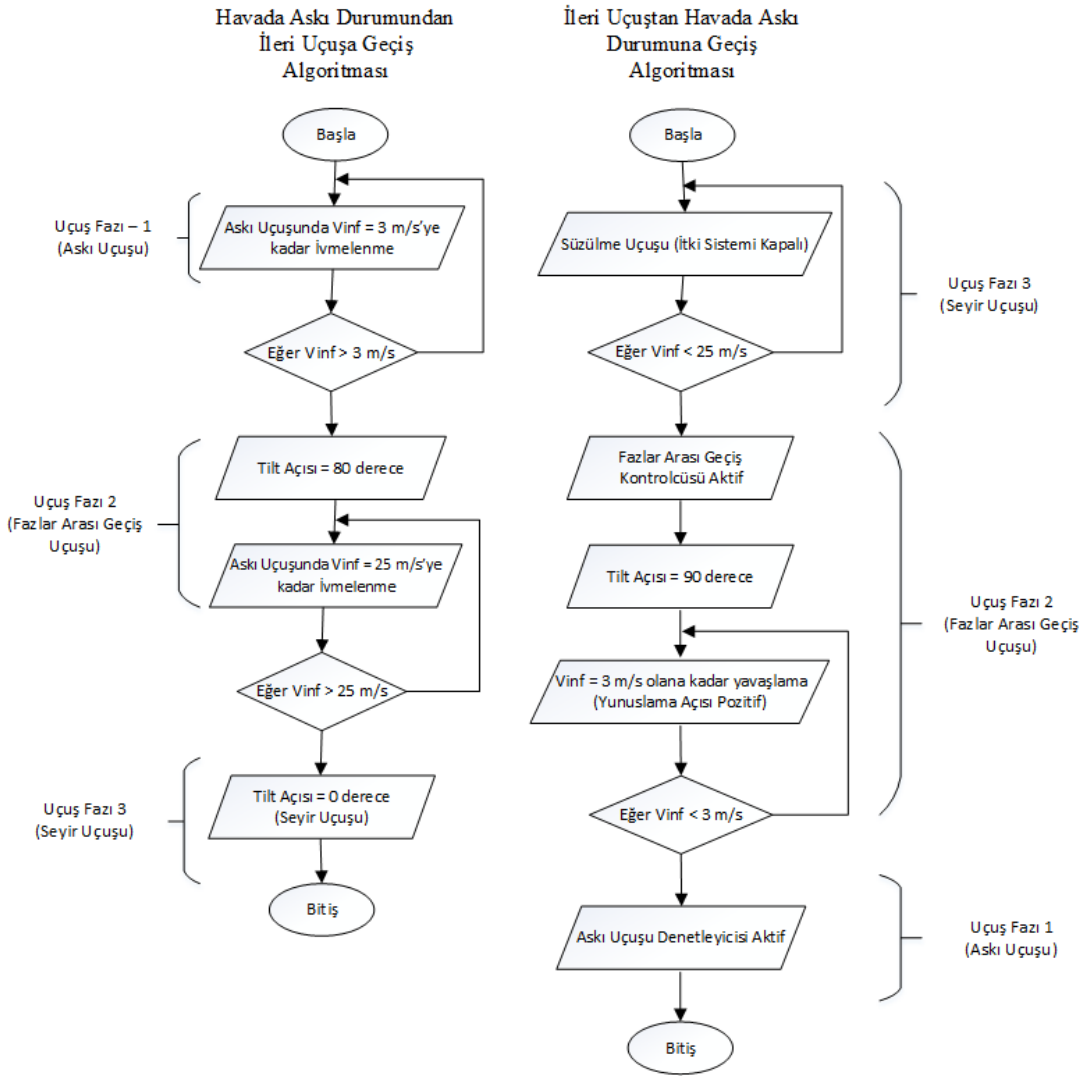
tasarladık. Ardışık kontrol sistemi üç geri beslemeli bir PID kontrolöründen oluşur. Bu kontrol sistemlerinde, kararlılığı arttırmak için hız geri beslemesi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra, referans durum komutları oluşturmak için ikinci geri beslemede durum verileri geri beslenmektedir. Üçüncü geri beslemede, doğrusal hız geri beslenmektedir. Havada askıda kalma ve geçiş kontrol sistemlerinin yanı sıra, ileri uçuş hız kontrol sisteminde yine PID kontrolü temelinde tasarlanan yuvarlanma, yunuslama ve sapma kontrol sistemleri gibi klasik durum kontrolörleri bulunmaktadır.

5.11 Geçiş ve Geri Geçiş Algoritmaları

Daha önce, temel kuvvet ve moment denklemleri kullanılarak ayrıntılı geçiş ve geri geçiş senaryoları elde edilmişti. Bir referans sinyali olarak bu senaryo veri seti doğrusal olmayan matematiksel modele uygulanmadan önce düşük seviyeli kontrolörler arasında geçiş algoritmanın sıralanması önemlidir. Şekil 5.19'da geçiş ve geri geçiş algoritmaları gösterilmektedir. Yüksek seviyeli uçuş kontrol sistemi bu algoritmalara göre programlanmaktadır.

Şekil 5.19'da, adım adım geçiş algoritması aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

1. TURAC havada askıda kalma rejimindedir. Tilt rotorlar dikey olarak konumlandırılır ve üç geri beslemeli askıda kalma kontrolörü askı uçuşundaki doğrusal hız komutlarını ($V_{ref_{hover}} < 3\ m/s$) takip etmek için çalıştırılır.



Şekil 5.19: Havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) algoritması.

2. 3 m/s'lik uçuş hızına kadar askı rejiminde hızlanma. Adım 1 ve Adım 2, Faz 1 olarak kodlanmaktadır.

3. Uçuş hızı V_∞ 2 m/s'ye ulaşırsa, geçiş kontrolörü aktive edilir ve tilt rotorları 80^o'de konumlandırılır.

4. 25 m/s'lik uçuş hızına kadar geçiş rejiminde hızlanma. Adım 3 ve Adım 4 Faz 2 olarak kodlanmaktadır.

5. Uçuş hızı V_∞ 25 m/s'ye ulaşırsa, yatay uçuş kontrolörleri aktive edilir ve tilt rotorları 0^o'de konumlandırılır. Yatay uçuş rejimi Faz 3 olarak konumlandırılır.

Adım adım geri geçiş algoritması aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

1. Geçiş rejiminden önce uçuş hızının azaltılması önemlidir. Bunun için ön pervaneler durdurulur ve uçak süzülmeye başlar.

2. Uçuş hızı 25 m/s'den düşükse, geçiş kontrolörü aktive edilir.

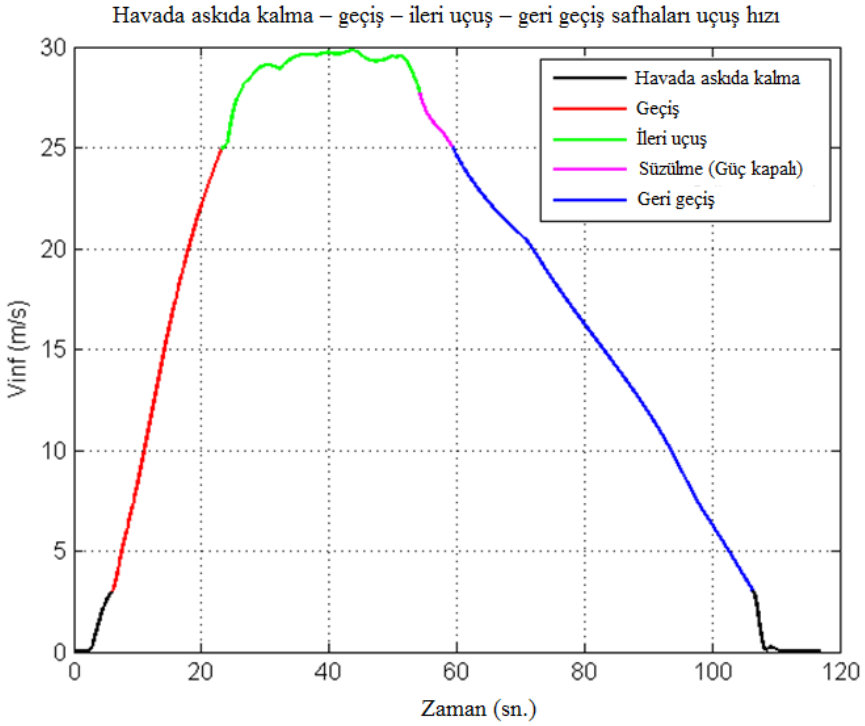
3. Tilt açısı 90^o'de konumlandırılır.

4. 3 m/s uçuş hızına kadar hızı azaltmak için sisteme yukarı yunuslama komutu gönderilir.

5. Havada askıda kalma kontrolörü aktive edilir ve TURAÇ DİKY hava askıda kalma rejimine geçer.

5.12 Simulasyon Sonuçları

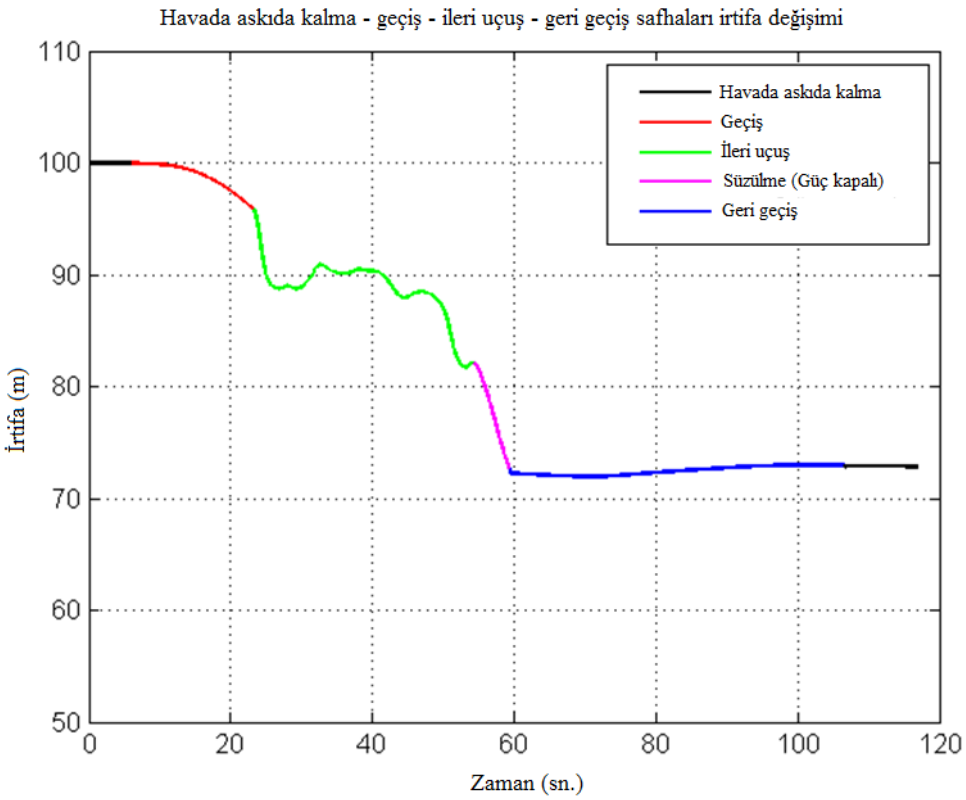
Çalışmanın bu bölümünde 6-DoF doğrusal olmayan matematiksel modelde simülasyonlar gerçekleştirilmekte ve TURAÇ DİKY İHA'nın tam bir uçuşu (askıda kalma - geçiş - seyir-geri geçiş- askıda kalma) yaklaşık 120 saniye boyunca simüle edilmektedir. Uçuş fazı geçiş sisteminde yukarıda belirtilen algoritmalar kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçları Şekil 5.20 - Şekil 5.22'de gösterilmektedir. Her bir uçuş rejimi farklı renklerle temsil edilmekte ve grafiklerde gösterilmektedir. Şekil 5.20'de, uçuş hızı 3 m/s'ye ulaşana kadar havada askıda kalma uçuşu gerçekleşmektedir (siyah bölge). Daha sonra geçiş uçuşu rejimi başlamakta, tilt rotorları 90^oye ayarlanmakta ve TURAÇ DİKY İHA 25 m/s'ye kadar hızlanmaktadır



Şekil 5.20: Uçuş benzetimi sürecinde hava süratındeki değişimi.

(kırmızı bölge). Bundan sonra, yatay uçuş kontrolörleri aktive edilmekte ve İHA $29 - 30\ m/s$ kadar ileri uçuş gerçekleştirmektedir (yeşil bölge). Geri geçiş rejiminden önce tilt rotor grubunun gücü kesilmekte, İHA süzülmeye başlamakta ve uçuş hızı 25 m/s'ye düşmektedir (magenta bölge). Geri geçiş uçuş rejimi, uçuş hızı 25 m/s'nin altına düşünce başlar ve süzülme uçuşu hızı 3 m/s olana kadar devam eder (mavi bölge). Son olarak, algoritma tarafından havada askıda kalma uçuşu kontrolörleri aktive edilir ve uçuş hızı askıda kalma uçuşunda 0 m/s'ye düşer (uçuşun sonundaki siyah bölge).

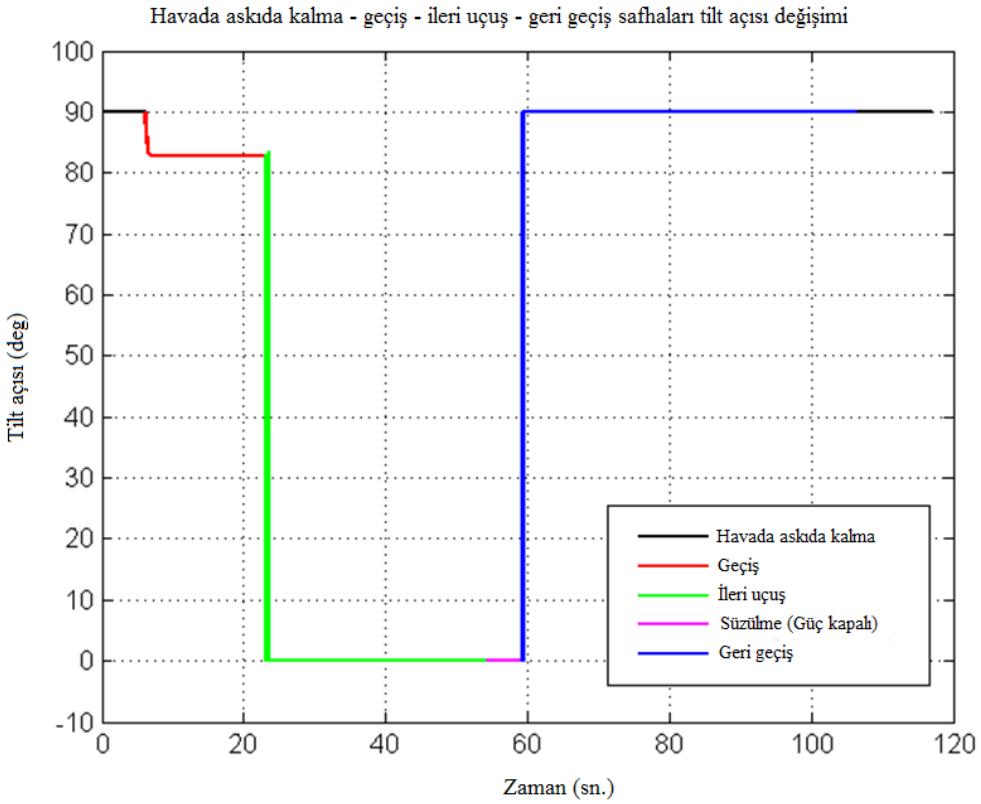
İrtifa değişikliği Şekil 'te gösterilmektedir. Havada askıda kalma uçuşunda, irtifa birkaç saniye boyunca $100m$'de sabit kalır. Daha sonra geçiş uçuşu başlar ve irtifa geçiş manevrası nedeniyle $5m$ kadar azalır. Geçiş rejiminden sonra, ileri uçuş başlar ve yaklaşık $90m$ irtifada gerçekleştirilir. Geri geçişten önce yaklaşık $82 - 72m$'lik bir irtifada süzülme uçuşu gerçekleştirilir ve yaklaşık 72 m'de geçiş kontrolörü aktive edilir. Tilt açısı 90^o'ye ayarlanır ve TURAÇ DİKY İHA'nın uçuş hızı yukarı yunuslama hareketiyle neredeyse sabit bir irtifaya düşürülür. Son olarak, uçuş hızı 3 m/s'nin altına düşünce algoritma tarafından havada askıda kalma kontrol sistemi aktive edilir ve TURAÇ DİKY İHA geri geçiş manevrasını tamamlar.



Şekil 5.21: Uçuş benzetimi sürecinde irtifadaki değişim.

Ön pervanenin tilt açısı Şekil 5.22'de gösterilmektedir. Süzülme uçuşunda tilt rotorları 90^o'de konumlandırılmaktadır. Geçişte ise 82^o'de konumlandırılmakta ve TURAÇ DİKY İHA hızlanmaya başlamaktadır. Daha sonra tilt açısı 0^o'ye getirilmekte ve TURAÇ DİKY İHA seyir uçuşunu gerçekleştirmektedir. Süzülme uçuşundan sonra, tilt açısı geri geçiş algoritması tarafından 90^o'ye ayarlanmaktadır.

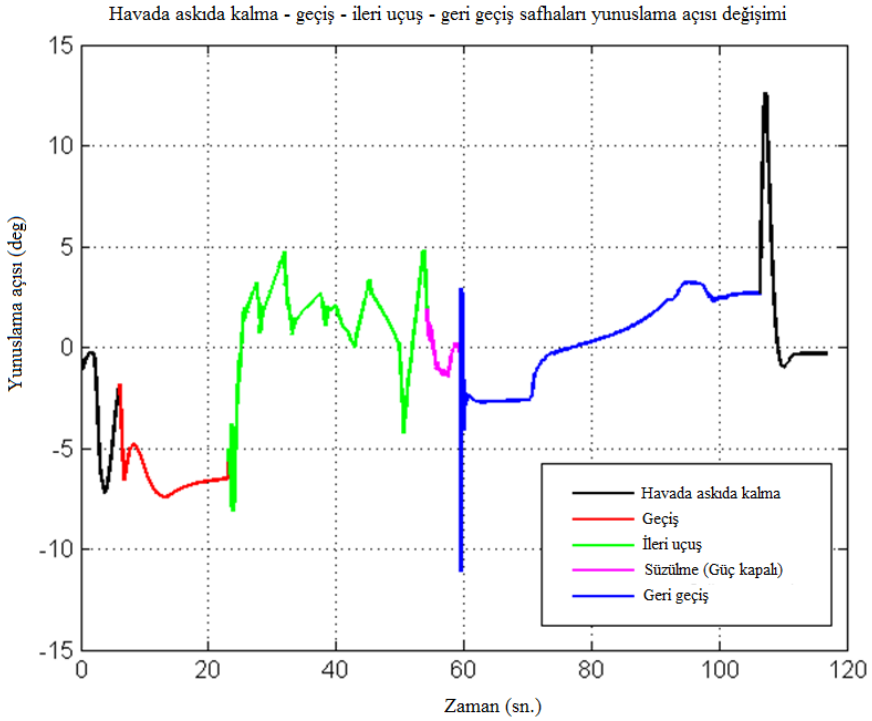
İHA'nın uçuş sırasındaki yunuslama açısı Şekil 5.23'da gösterilmektedir. Yunuslama açısı, havada askıda kalma ve geri geçiş uçuşu rejimlerinde hızlanma ve hızını azaltma için kullanılmaktadır. Havada askıda kalma uçuşunda, TURAÇ DİKY İHA'nın uçuş hızı aşağı yunuslama hareketi ile azaltılmaktadır (siyah aralık). Uçuş sonunda, geri geçiş ve havada askıda kalma uçuşlarında, TURAÇ DİKY İHA'nın hızı yukarı yunuslama komutu verilerek azaltılmaktadır. Açıklanan kontrol sistemi metodolojisini kullanarak TURAÇ DİKY İHA sistemi için askı durumundan ileri uçuşa geçiş manevrasını gösterdik.



Şekil 5.22: Uçuş benzetimi sürecinde tilt açısındaki değişim.

Şekil 5.24'te görüleceği üzere geliştirilen bu kontrol algoritması 1/3 ölçekli TURAÇ DİKY İHA prototipi üzerinde başarı ile test edilmiştir. Testler ile ilgili detaylı bilgi ilgili bölümde anlatılmıştır.

Bu çalışmada, havada askıda kalma, ileri uçuş ve geçiş rejimleri dahil TURAÇ DİKY İHA 6-serbestlik dereceli doğrusal olmayan tam matematiksel modelini sunulmaktadır. Bu modelde pervane kaynaklı hava akışı, uçak gövdesinin aerodinamik katsayıları ve itki pervanelerinin hava hızına bağlı özellikleri bulunmaktadır. TURAÇ DİKY İHA için geçiş (askı durumundan ileri uçuşa) ve geri geçiş (ileri uçuştan askı durumuna) senaryoları incelenmiş ve tasarlanmıştır. Tasarlanan geçiş senaryoları, uçuş kontrolü sistemine yönelik bir ileri besleme veri seti olarak kullanılmaktadır. Askı durumundan ileri uçuşa ve ileri uçuşdan havada askı durumu uçuşları arasındaki geçiş algoritmaları adım adım tanımlanmıştır. Geçiş senaryosu veri setleri kullanılarak gerçek zamanlı 6-DoF simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Geçiş kontrol sisteminin simülasyon sonuçları 8. bölümde anlatılan uçuş testleri ile başarılı bir şekilde doğrulanmıştır.



Şekil 5.23: Uçuş benzetimi sürecinde yunuslama açısındaki değişim.



Şekil 5.24: Geçiş manevrasının test edilmesi.

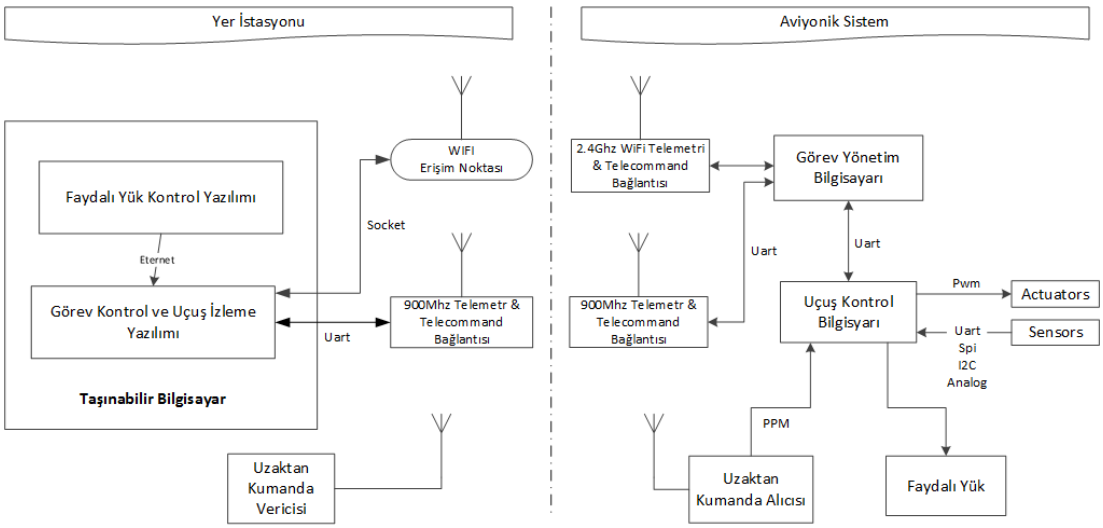
6. AVİYONİK, YER İSTASYONU VE FAYDALI YÜK SİSTEMLERİ GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde TURAÇ DİKY İHA platformunda kullanılan uçuş kontrol bilgisayarı, uçuş yönetim bilgisayarı, uçuş yönetim bilgisayarı, çevre birimleri donanımsal yapısı ve mimarisi ele alınmıştır. TURAÇ DİKY İHA platformu için geliştirlen kontrol algoritmlarının gömülerek test edilmesi, görev yönetim bilgisayarında uçuşun manuel ve otonom olarak kontrol edilmesi bu bölümün konuları arasındadır. TURAÇ DİKY İHA için 2 ve 3 boyutlu coğrafi bilgi sistemi modülü, görev planlama modülü, canlı kontrol modülü, telemetri verileri alma ve kaydetme modülü, yeniden oynatma modülünü içeren bir yer istasyonu tasarlanmıştır. Multispektral görüntü analiz araştırmaları ve testleri yapılmıştır.

6.1 Aviyonik Sistem

Aviyonik ve yer istasyonu siteminin genel yapısı Şekil 6.1'de görüldüğü üzere yer istasyonu ve aviyonik sistem olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Yer istasyonu operatörün kontrol ettiği radyo kumanda, kısa mesafelerde ama yüksek veri aktarım hızı için Wi-Fi noktası, uzun menzilde ama daha düşük veri aktarım hızı için 900 Mhz bir telemetri bağlantısı, uçuş görevi yüklemek ve aracın durumunu izlemek amacıyla kullandığı taşınabilir bilgisayar ve bu bilgisayara bağlı radyo alıcı-vericilerinden (transciever) oluşmaktadır. Hava aracı üzerinde ise tüm uçuşu kontrol eden uçuş kontrol bilgisayarı, sıcaklık kompanzasyonlu ve filtreli sensörler, aktüatörler, radyo alıcı ve vericileri, görev yönetim bilgisayarı ve faydalı yük vardır. Tüm çevresel birimler uçuş kontrol bilgisayarı ile alt seviye haberleşme yöntemleri ile haberleşmektedir.

Uçuş yönetim sisteminin genel mimarisi Şekil 6.2'de verilmiştir. Uçuş yönetim sistemi, uçuş kontrol bilgisayarını (FCC), uçuş yönetim bilgisayarını (FMC) ve sensör paketlerini içerir. Uçuş kontrol bilgisayarı, hava aracının oryantasyonu, pozisyonu, haberleşmesi, verilerin kaydedilmesi, batarya kontrolü ve aktüatörlerin

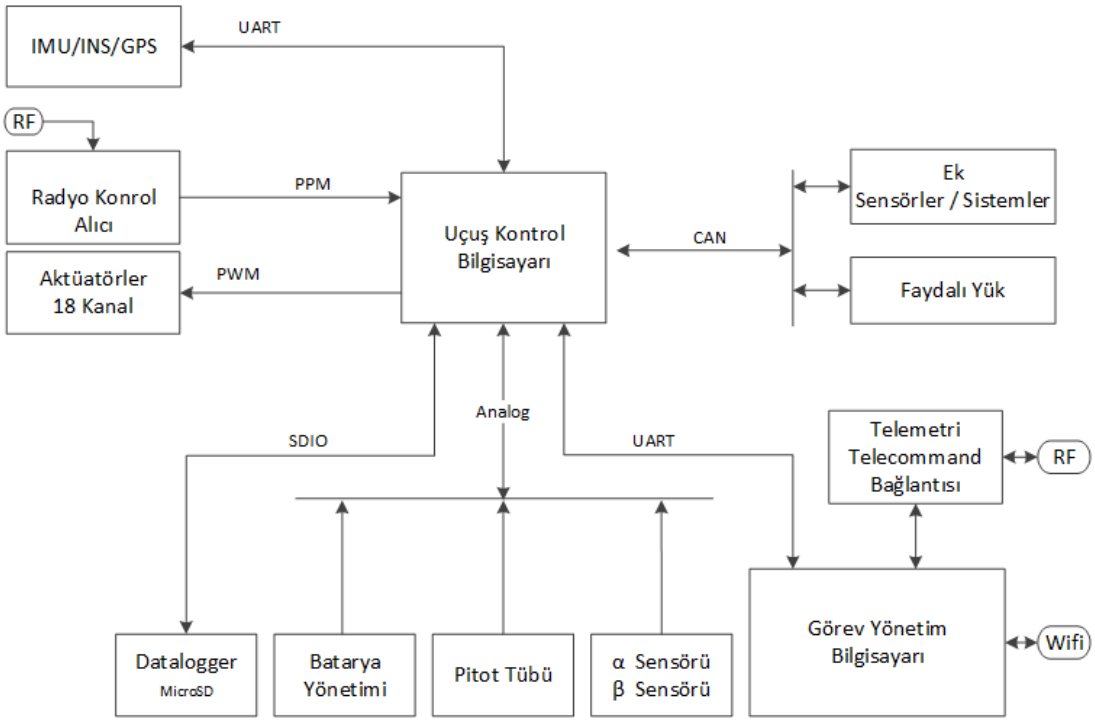


Şekil 6.1: TURAÇ DİKY İHA uçuş kontrol sistemi genel sistem diagramı.

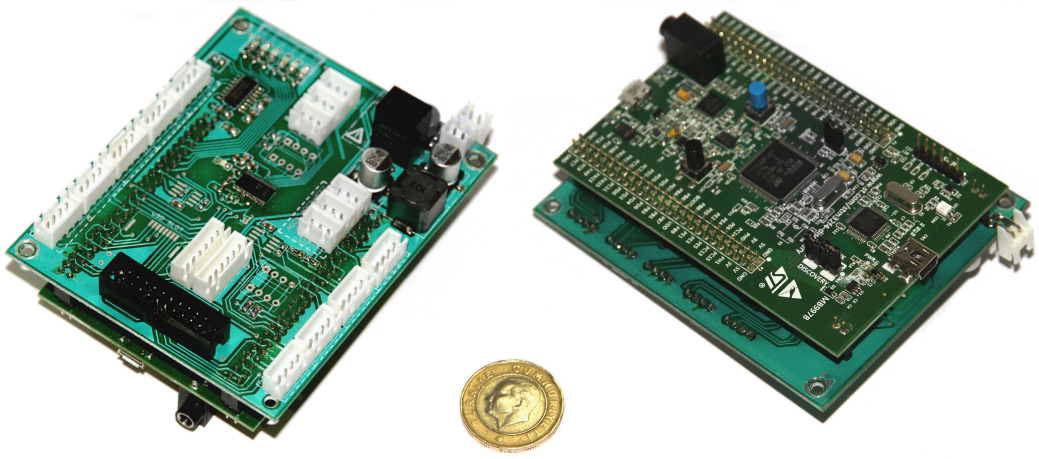
kontrol edilmesi gibi tüm alt seviye işleri yürüten bilgisayardır. Uçuş yönetim bilgisayarı ise yükesek seviye seyrüsefer işlemlerini gerçekleştirir.

Mikrodenetleyici olarak STM32F4 ailesinden bir denetleyici seçilmiş olup, çevresel bağlantıları yapılmıştır. 18 kanallı optik izolasyonlu PWM üreteci, sesli uyarı sistemi, CA, UART, RS232, I2C, SPI gibi çevresel bağlantılar kullanılarak birçok ek cihazı destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. STM32F4 (168 MHz clock rate, 192 kB RAM) mikroişlemcili uçuş kontrol bilgisayarı Şekil 6.3'de görülebilir. Uçuş kontrol bilgisayarı farklı analog ve dijital arayüzler bulundurur: seri girişler/çıkışlar, PWM çıkışlar, PPM encoders, CAN ve ADC girişler/ çıkışlar. RS232, UART, SPI ve SDIO gibi seri arayüzler IMU/INS/GPS, data logger ve görev yönetim bilgisayarı (MMC) ile iletişim kurar. Fazla sayıda PWM çıkışı generik autopilot kullanımına olanak sağlar. 2 kanal PPM encoder geleneksel RC kontrölerden giriş almak için ayrılmıştır. Ayrıca uçuş kontrol bilgisayarı ana kartı pitot tübü basınç sensörü ve alfa - beta (hücum açısı ve yana kayış açısı) gibi analog sensörler ile bir çok ADC kanalını içerir. Yüksek elektrik ve elektromagnetik gürültü bağışıklığını garanti eden standart otomotive iletişim protokolüne temel alan CAN arayüzü ek sensörler veya faydalı yük ihtiyaçları için ayrılmıştır.

Görev yönetim bilgisayarı (FMC) yüksek seviye seyrüsefer ve navigasyon algoritmalarını yürütür ve yüksek seviye iletişim paketlerini ele alır. Bu bilgisayar (720 MHz clock speed, 512 MB RAM) Linux tabanlı Raspberry Pi'dir (Şekil 6.4).



Şekil 6.2: TURAÇ DİKY İHA uçuş kontrol bilgisayarı.



Şekil 6.3: Çevre bağlantı portlarıyla uçuş kontrol bilgisayarı.



Şekil 6.4: TURAÇ DİKY İHA görev yönetim bilgisayarı.

Uçuş yönetim bilgisayarının referans posizyonu uçuş kontrol bilgisayarına bir seri arayüz ile iletilir. Telemetri ve telecommand iletişim modulü uçuş yönetim bilgisayarına bağlıdır. RF bağlantısına ek olarak daha hızlı süratte veri transferi yapan ancak daha sınırlı bir menzilde çalışan bir kablosuz network uçuş yönetim bilgisayarının chip ile tümleşik hata ayıklama yeteneği sayesinde uçuş kontrol bilgisayarının uzaktan hata ayıklaması (debugging) için kullanılmıştır.

Uçuştaki ataletsel ölçümler için Xsens Mti-G-700 IMU (Ataletsel Ölçüm Ünitesi) ve INS (Ataletsel Seyrüsefer Sistemi) kullanıldı (Şekil 6.5). Bu IMU uçuş kontrol amacıyla gömülü akselerometre , jiroskop, magnetometeer ölçümlerini (100 Hz hıza kadar) birleştirir. Uçuş kontrol bilgisayarı bu pakate ek olarak pitot tübü, alfa-beta sensörleri gibi konsepte özgü sensörlerle donatılmıştır.

Şekil 6.6'da TURAÇ DİKY İHA'yı manuel olarak kontrol etmek için 9 kanllı bir uzaktan komuta görülmektedir. JR uzaktan komuta FRSky radyo alıcı ve vericisini kullanır. Alıcı uçuş kontrol bilgisayarı ile 60 Hz.'de iletişim kurar.

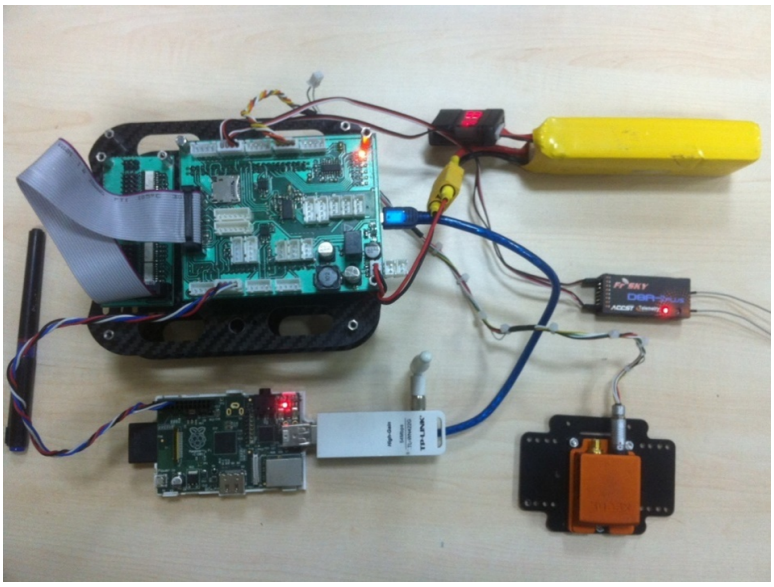
Geliştirilen otopilot sisteminin masaüstü testi Şekil 6.7'de görülmektedir. Bir TPlink WN422G WIFI modulü görev yönetim bilgisayarına yer istasyonu ile yüksek veri hızında yer istasyonu ile iletişim kurmak için bağlanmıştır. Tüm aviyonik verilerinin uçuş sırasında detaylı olarak incelenebilmesi için gerekli yüksek veri



Şekil 6.5: INS/IMU modülü.



Şekil 6.6: Uçağı manuel olarak kontrol etmek için uzaktan komuta birimi.



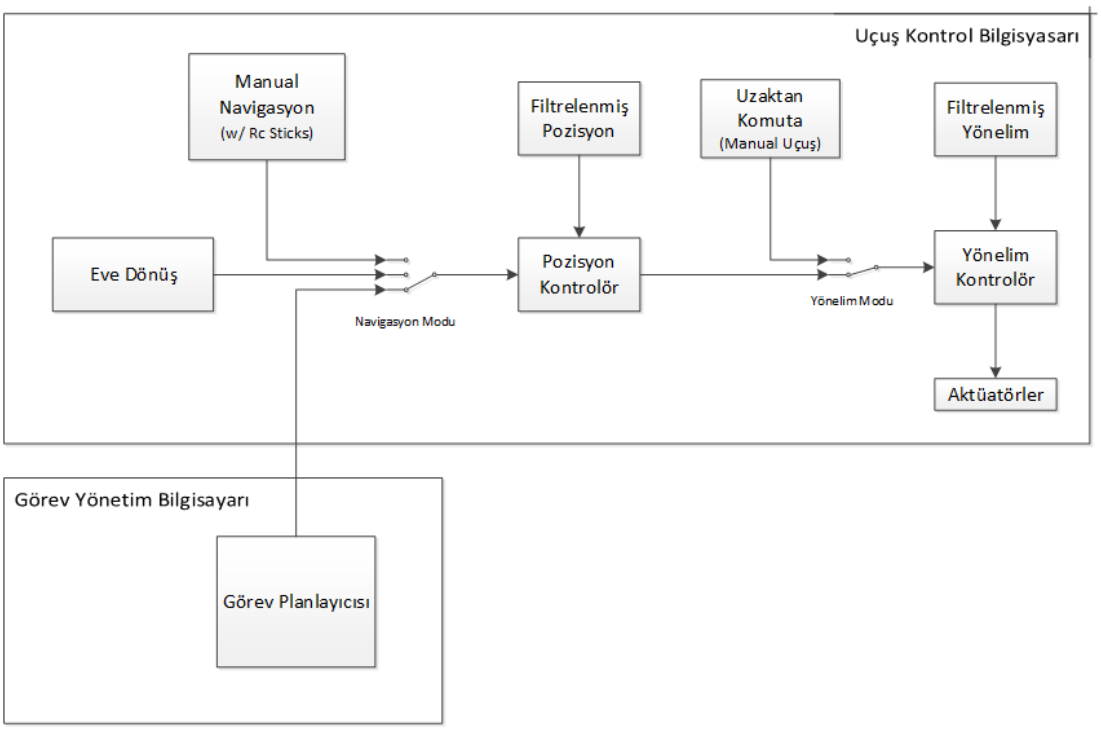
Şekil 6.7: TURAÇ DİKY aviyonik sistemi.

linkini sağlayabilmek amacıyla, hem yer istasyonu yazılımına hemde uçuş yönetim bilgisayarına soket iletişim fonksiyonelliği kazandırılmıştır. Gelecekte yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyacak sensör sistemlerinin entegrasyonuna karşın, otopilot verilerinden sürekli gelmesi gereken telemetry verileri UDP ile yollanırken, onay gerektiren telecommand verileri ise TCP paketleri ile yollanmaktadır.

TURAÇ DİKY İHA'nın ileri uçuş, havada askıda kalma, askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi), ve iniş-kalkış uçuşlarını otonom olarak sağlayacak kontrol sistem tasarımları ve bunların gömülü yazılımları anlatılmıştır. Buna ek olarak donanımsal seviyede tüm bu kontrol sistemi için gerekli sensör setleri, bilgisayar sistemi sunulmuştur. Gömülü yazılımlar otopilot sistemine gömülerek test edilmiştir. Uçuş kontrol sistemini yürütecek yazılım ve donanım çalışmaları tamamlanmıştır. Geliştirilen donanımda çeşitli kontrol algoritmaları test edilmiştir.

Otonom olan aracı yönetebilmek için bilgisayar üzerinde faydalı yük kontrol yazılımı, görev yönetim yazılımı ve uçuş durumu izleme yazılımı çalışmaktadır. Ayrıca operatör; yer istasyonundaki uzaktan kontrol vericisi ile aracı manual olarak yönetebilmektedir.

Şekil 6.8'de görüldüğü üzere kontrol sistemi görev yönetim bilgisayarı ve uçuş kontrol bilgisayarından oluşmaktadır. Uçuş bilgisayarı, üzerinde çalışan pozisyon ve oryantasyon kontrolcüsü ile görevlerin gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Şekilde görüldüğü gibi her bir kontrolcünün hedef işareti bir anahtarlama mekanizması ile

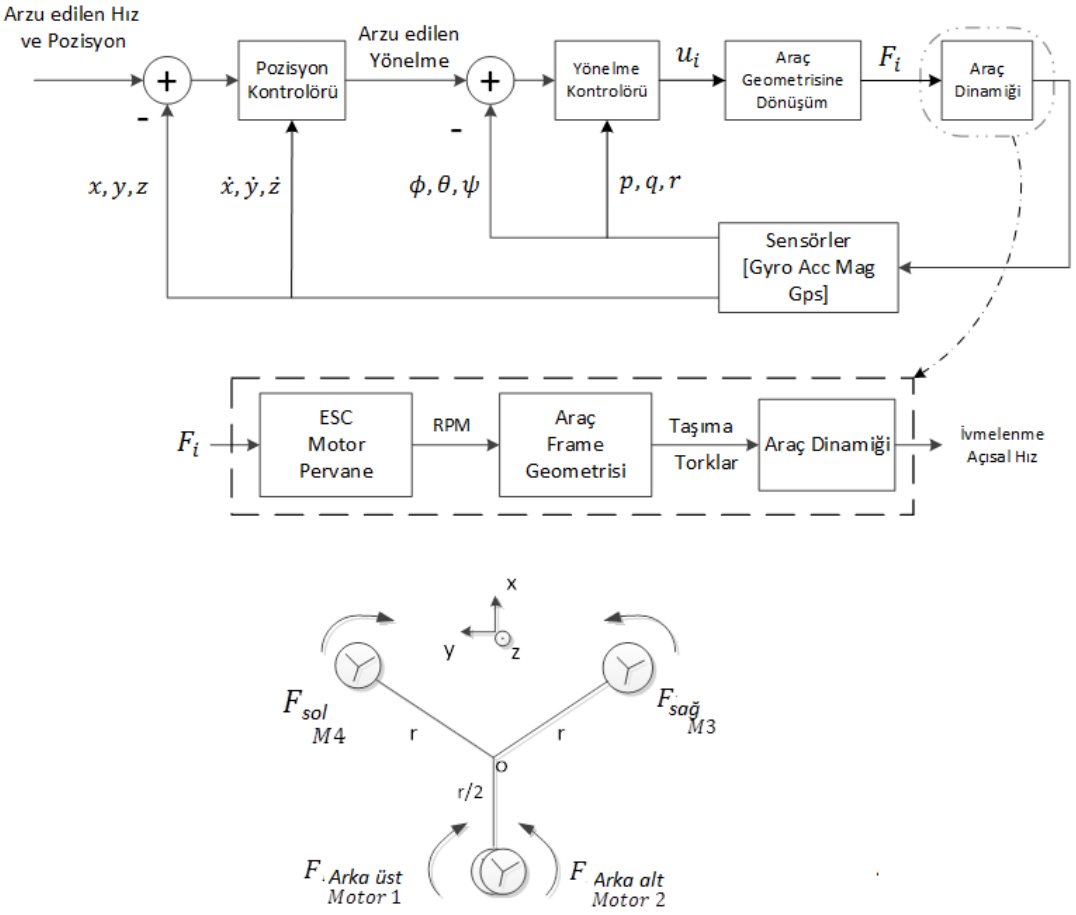


Şekil 6.8: TURAÇ DİKY İHA genel kontrol diyagramı.

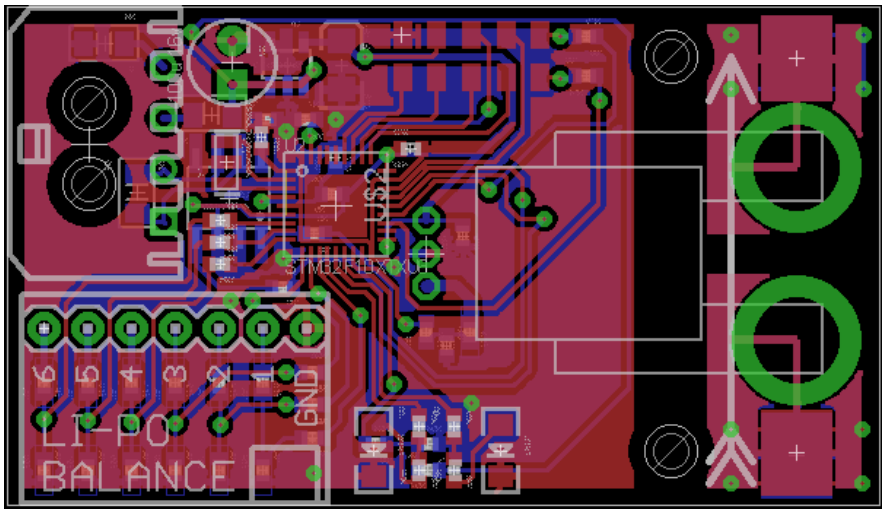
değiştirilebilmektedir. Bu mekanizmalar radyo sinyalleri yeterli güçte olduğu zaman operatörün kontrolünde iken, radyo sinyallerinin yetersiz olduğu durumda görev yönetim bilgisayarının kontrolündedir.

Görev yönetim bilgisayarı ise üzerinde çalışan görev planlayıcı yazılımı ile aracı otonom olarak; önceden veya anlık olarak yüklenmiş görevleri yerine getirmesini sağlamayı amaçlar. Araç tamamen otonom modda iken konum, hız, yükseklik ve kafa açısı bu bilgisayara tarafından ayarlanır.

Uçuş kontrol bilgisayarındaki kontrol şeması Şekil 6.9'da görülmektedir. Kontrol yapısı kaskat kontrolcülerden oluşmaktadır. Operatörün manual olarak belirlediği yada görev yönetim bilgisayarının belirlediği pozisyon bilgisi pozisyon kontrolcüsü tarafından işlenerek hava aracının alması gereken oryantasyon bilgisine çevrilir. Aracın alması gereken pozisyon bilgisi oryantasyon kontrolcü yardımıyla kontrol işaretine çevrilir. Kontrol işaretleri daha sonra hava aracının geometrisine göre aktüatörleri kontrol edecek PWM sinyallerine çevrilir. Bu döngü devam ederek hava aracının istenilen pozisyonlara ulaşması sağlanmaktadır. Aracın oryantasyon ve pozisyon bilgisi, IMU ve GPS'in fusion edilmesi ile ortaya çıkan INS yapısı yardımıyla hassasiyetle tahmin edilerek kontrolcülere geri besleme sağlamaktadır.



Şekil 6.9: Genel kontrol diyagramı ve frame geometri



Şekil 6.10: Güç yönetim sistemi kart çizimi

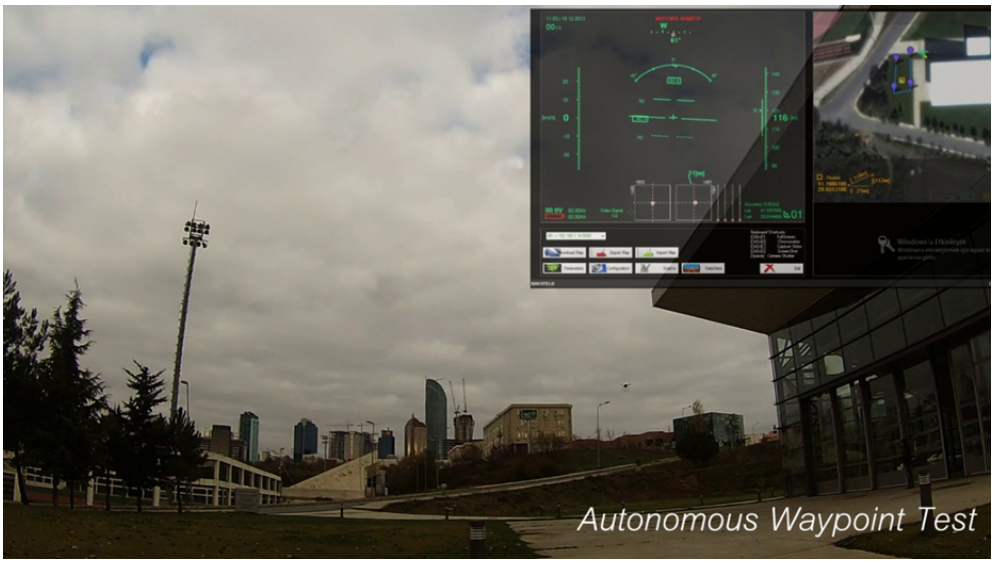
6.2 Güç Yönetim Sistemi

Uçuş sırasında hava aracındaki lityum polimer batarya sistemini denetleyebilmek için güç yönetim sistemi tasarlanmıştır. Şekil 6.10'da kart çizimleri görülmektedir. Güç yönetim sistemi CAN Bus ile haberleşmektedir. Bu sayede birden fazla lityum polimer batarya sistem üzerinde denetlenebilmektedir. Her bir güç yönetim sistemi, üzerinden geçen toplam akım, anlık akım ve hücrelerin ayrı ayrı gerilimini görüntüleyebilmektedir. Bu sayede kalan uçuş süresi tahmin edilebilmektedir.

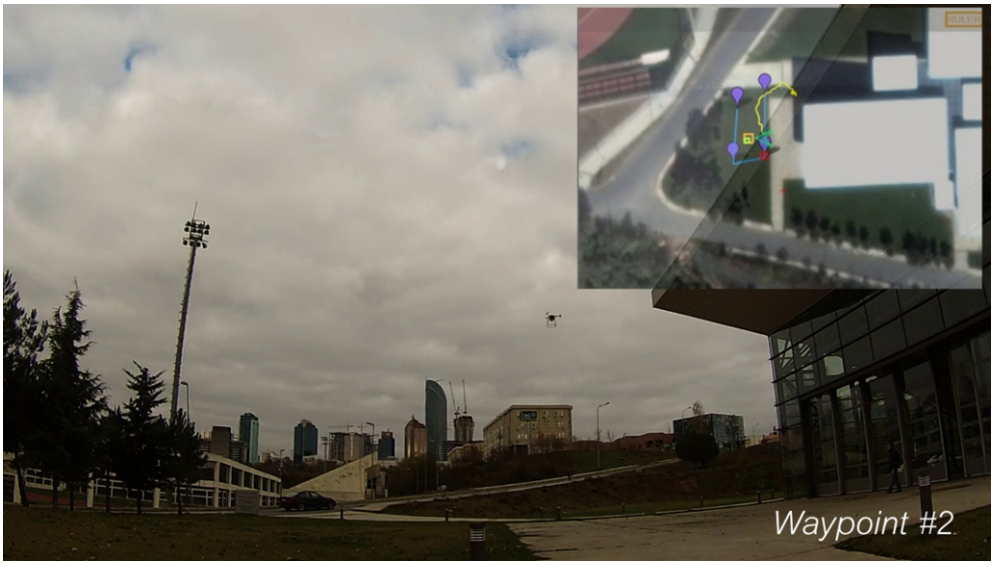
6.3 Uçuş Kontrol Sistemi Testleri

Yardımcı otopilot sisteminin geliştirilmesinin tamamlanmasından sonra tam otonom sistemin geliştirilmesi için tricopter platformu üzerinde çalışmalar yürütülmüştür. Tam otonom sistem için DİKY konseptinde otonom iniş kalkış ve waypoint testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11'de waypoint testine başlamak üzereyken elde edilen yer istasyonu ekran görüntüsü ve hemen altında da test aracı görülmektedir.

Şekil 6.12'de aracın 1 numaralı waypointi geçtikten sonra 2 numaralı waypointe yönelimi görülmektedir. Bu şekilde 1-2-3 ve 4 numaralı waypointler sırasıyla erişilerek, daha önceden yer istasyonu tarafından tanımlanan "Ev Koordinatları"'na geri dönüş yapılarak başarılı bir şekilde iniş gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.13). Şekil 6.14'te ise yer istasyonunun uçuş yönetim bilgisayarından aldığı detaylı uçuş ve



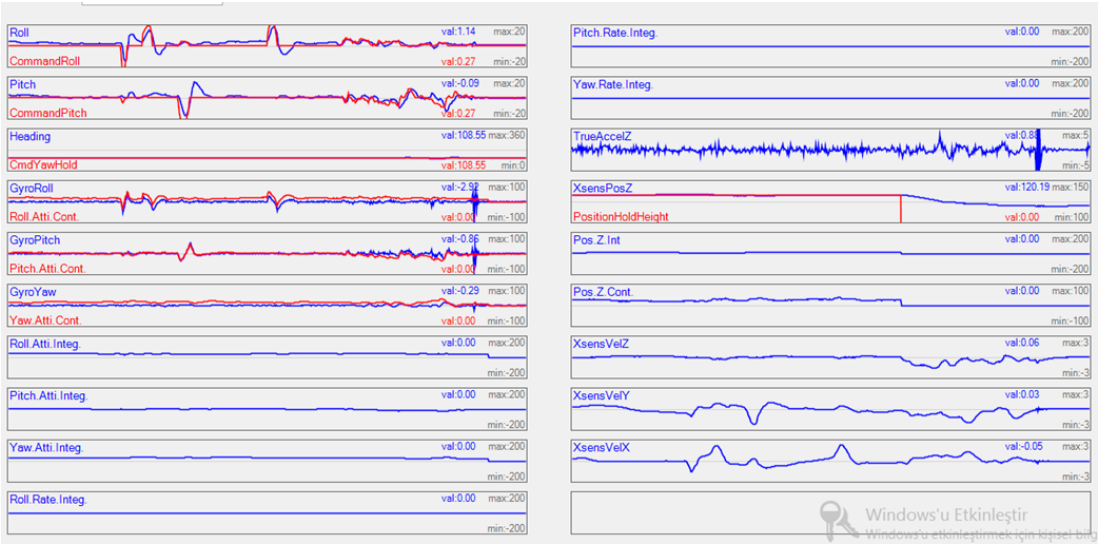
Şekil 6.11: Yer istasyonu ve waypoint testine başlama.



Şekil 6.12: 2 numaralı waypoint.



Şekil 6.13: Eve dönüş testi.



Şekil 6.14: Uçuş sırası alınan veriler.

kontrolcü bilgilerinin anlık olarak çizdirilmesi sonucu oluşan grafikler görülmektedir. Bu sayede kontrolcü performansları kayıt altına alınabilmektedir.

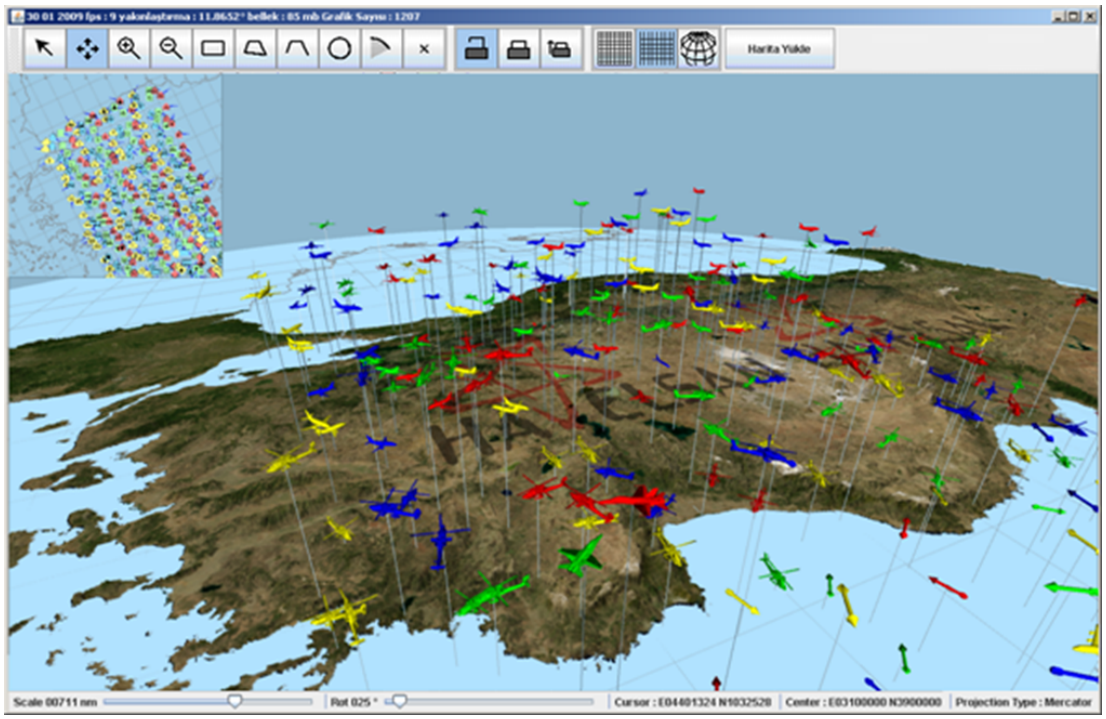
6.4 Yer İstasyonu Modulleri

Bu bölümde TURAÇ DİKY İHA sistemi'nin önemli bir parçası olan yer istasyonu yazılım ve donanım geliştirme faaliyetleri ele alınmıştır. Yapılan planlamalara göre yer istasyonu;

- CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) harita arayüzü ile doğrudan kullanıcıdan ya da dış sistem arayüzleri ile başka sistemlerden alacağı görev bilgilerini (hedef koordinat, yükseklik, aksiyon, vb.) görsel bir kullanıcı arayüzü ile sunacak,
- TURAÇ İHA'dan gelen telemetri bilgilerini (koordinat, yükseklik, eğilim, basınç, hız, vb.) görüntüleyecek ve kayıt altına alacak,
- TURAÇ İHA'da kaydedilen faydalı yük verilerini (Hiperspektral görüntüler) alıp uçuş ile ilişkilendirecektir.

Yer istasyonu kendi içinde aşağıdaki modülleri barındırmaktadır:

1. 2/3 Boyutlu GIS (Geographical Information System, Coğrafi Bilgi Sistemi) Modülü
2. Görev Planlama Modülü



Şekil 6.15: Örnek TDF ekran görüntüsü.

3. Canlı Kontrol Modülü

4. Telemetri Verileri Alma ve Kaydetme Modülü

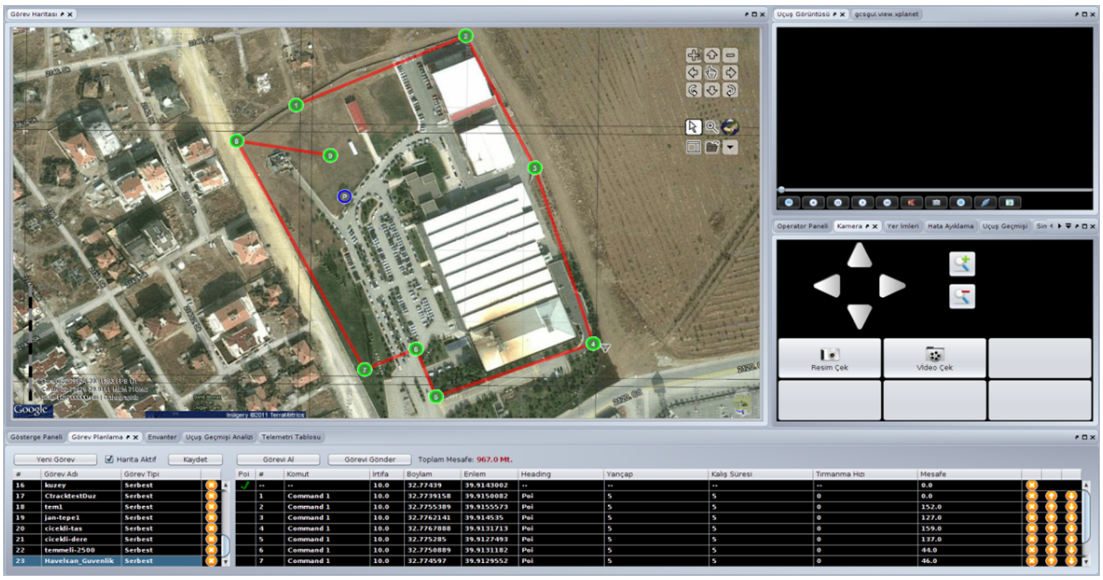
5. Telemetri Verilerini Analiz Edebilme ve Yeniden Oynatma Modülü

6.4.1 2 ve 3 Boyutlu GIS (Coğrafi Bilgi Sistemi) Modülü

Tamamen HAVELSAN tarafından geliştirilmiş ve diğer HAVELSAN projelerinde de kullanılarak kendini kanıtlayan TDF (Tactical Display Framework) altyapısı kullanılmaktadır. Görev planlama, görev icrası, görev sonrası analiz gibi tüm safhalarda ihtiyaç duyulan harita işlevlerini içeren modüldür.

6.4.2 Görev Planlama Modülü

İcra edilecek görevin uçuş bacağı (waypoints), irtifa, hız, faydalı yük (Hiperspektral/multispektral kamera) açılıp/kapanması gibi planlamaların yapıldığı modüldür.



Şekil 6.16: Görev planlama penceresi.

6.4.3 Canlı Kontrol Modülü

Telemetri kanalından gelen verileri kullanarak, harita üzerinde TURAÇ İHA'nın pozisyonunu ve uçuş verilerini gösteren; aynı zamanda yine telemetri üzerinden TURAÇ İHA'yı uzaktan kontrol etme olanağı sağlayan modüldür.

TURAÇ DİKY İHA'nın anlık görüntü nakli için Şekil 6.18'de görülen 5.8Ghz video alıcı verici sistemi kurulmuştur. 900Mhz ve 2.4Ghz frekans bantları sırasıyla telemetry ve uzaktan kontrol sistemleri tarafından kullanıldığından dolayı, 5.8Ghz frekans bandı seçilmiştir. Uzak mesafelerde görüntü naklinin alınabilmesi için 600mW gücündeki verici modülü seçilmiştir. Gerçek zamanlı videonun izlenebilmesi için Şekil 6.19'da görülen composite video girişi olan bir LCD yer istasyonuna yerleştirilmiştir. Bunu haricinde Şekil 6.20'de görünen yakalama cihazı ile yer istasyonu yazılımı üzerinde gerçek zamanlı video gösterilebilmektedir.

6.4.4 Telemetri Verileri Alma ve Kaydetme Modülü

Hava araçları için geliştirilmiş ve veri kayıplarından minimum etkilenen (hata ayıklaması barındıran) iletişim protokollerini kullanarak TURAÇ İHA ile radyo dalgaları aracılığıyla haberleşmeyi sağlayan sistemdir. Telemetri bilgileri, faydalı yük



Şekil 6.17: Yer kontrol istasyonu ekran görüntüsü.



Şekil 6.18: 5.8 Ghz. video alıcı verici sistemi.



Şekil 6.19: Canlı video görüntüleme ekranı.



Şekil 6.20: Video yakalama cihazı.



Şekil 6.21: Görev sonrası analiz ekranı.

verileri ve uzaktan komuta verileri TURAÇ İHA ile yer arasında bu iletişim bileşeni ile ihtiyaç doğrultusunda iki yönlü olarak aktarılmaktadır.

6.4.5 Telemetri Verilerini Analiz Edebilme ve Yeniden Oynatma Modülü

Uçuş sırasında radyofrekans yardımı ile gönderilen telemetri zaman damgası vurularak Yer Kontrol İstasyonu bilgisayarında saklanacaktır. Görev bilgisayarı uçuş sonrası analiz özellikleri kullanılarak göreve ait telemetri verileri yeniden oynatılarak coğrafi koordinatlar ve TURAÇ İHA'nın pozisyonu canlandırılacaktır. İstenilen verilerin grafiksel gösterimi sağlanarak yapılacak analizlere kolaylık sağlanacağı değerlendirilmektedir. Hiperspektral görüntüler ise TURAÇ İHA sistemi üzerinde bulunan kayıt ünitesinde kayıt edilecek ve uçuş sonrasında kontrol bilgisayarına aktarılacaktır.

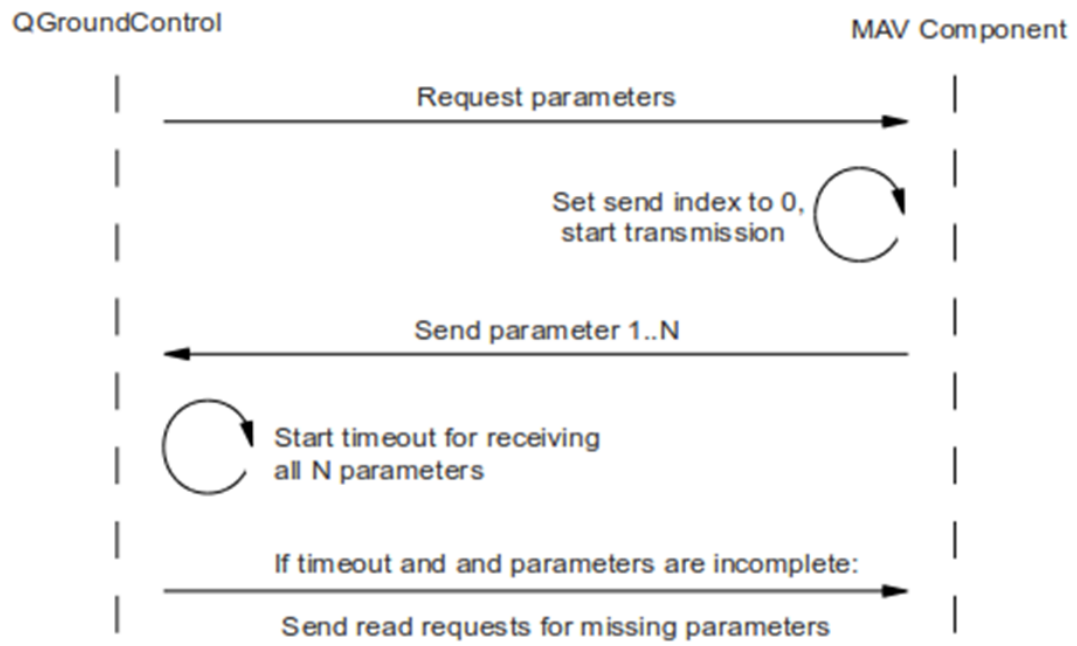
6.5 Mavlink

TURAÇ'ın yer istasyonu ile haberleşmesinde Mavlink protokolünün kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu protokol, hazır yazılmış mesaj tiplerine bağlı olarak kullanılan ve mikro boyuttaki hava araçların yer istasyonu ile haberleşmesi için tasarlanmıştır. Mavlink protokolü ile şu ana kadar yaptığımız çalışmalar içerisinde konum, hız, açı, açısal hız ve parametre değerlerinin haberleşmesi sağlanmıştır. Bu haberleşmelerin gerçekleştirilebilmesi için Mavlink protokolünün bize sunduğu mesaj tiplerinden

yararlanılmıştır. Haberleşmede kullanılan paketler, haberleşme şekli ve hangi verilere tekabül ettiği ifade edilecektir. Öncelikle Mavlink protokolünde haberleşme durumunda olup olmadığını, elektronik aksamın uyanık olduğunun anlaşılabilmesi için "Heartbeat" mesajı denilen mesajın saniyede bir kere gönderilmesi gerekmektedir. Bunun için de "mavlink_msg_hearbeat_pack" mesajı kullanılmaktadır. Mesaj içerisinde sistemimizin kodu, komponent olarak kod, hangi araç ve hangi otopilot sisteminin kullanıldığına dair bilgiler bulunmaktadır. Bu sayede sistemler birbirleri ile karışmamış olup, her biri için farklı parametreler veya farklı rotalar belirlenebilmekte ve haberleşebilmektedir. Mesajın ID değeri "0"'dır.

En temelde aracımızın konumunu belirtmemiz için yolladığımız mesajın adı "mavlink_msg_global_position_int_pack"'dir. Bu mesajın içerisinde ise koordinat olarak aracımızın konumunu vermekle beraber, eksenel olarak hız değerlerimizi ve yönümüzü de bu mesajın altında gönderebilmekteyiz. Bu sayede yer istasyonunda sistemimizin konum, hız ve yönünü görebilmekteyiz. Mesajın ID değeri "33"'dür. Konum, hız ve yön gibi değerleri göndermekle beraber aracın yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları ve bu açılardaki değişim hızlarının yer istasyonuna bildirilmesi gerekmektedir. Bu değerleri bildirmek için Mavlink protokolünde "mavlink_msg_attitude_pack" mesajı gönderilmektedir. Mesajın ID değeri "30"'dur. "Heartbeat" mesajı ile aracımızın yer istasyonu ile haberleştiğini belirtikten sonra yer istasyonu araca has parametre değerleri istemektedir. Bu parametre değerleri istenildiği gibi bir isme bağlı olarak istenilen değerler gönderilebilmektedir. Fakat bu değerleri gönderebilmek için Mavlink protokolünün kendi parametre göndermek protokolü mevcuttur.

Şekil 6.22'de görünen iletişim şekline bağlı olarak aracımız yer istasyonuna parametre değerlerini gönderebilmektedir. Bu gönderim öncelikle yer istasyonunun parametre değerlerini istemesi ile başlamaktadır. Bu isteği de mesaj ID'si "21" olan "param_request_list" ile yapmaktadır. Daha sonra araç bu isteğin geldiğini algıladıktan sonra teker teker yollamak istediği parametreleri yollamaktadır. Bu parametreler yollanırken öncelikle kaç tane parametre yollanacağı, her parametre pakedinde söylenmektedir. Bununla beraber yollanan parametrenin kaçıncı parametre olduğu da aynı paket içerisinde belirtilmektedir. Bu sayede yer istasyonu kaç tane parametre alacağını ve buna bağlı olarak kaçırdığı parametre değerleri mevcut ise

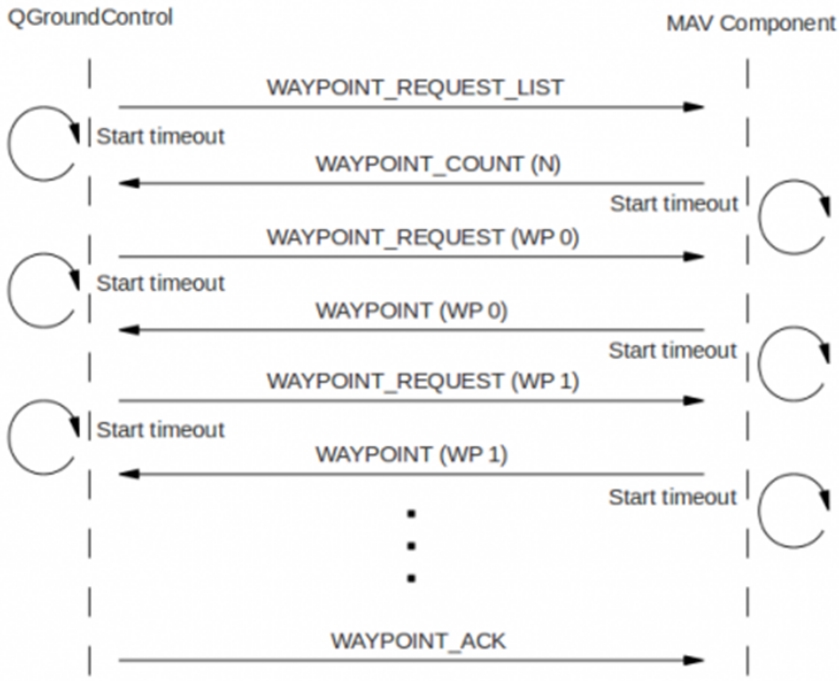


Şekil 6.22: Parametre yollama protokolü.

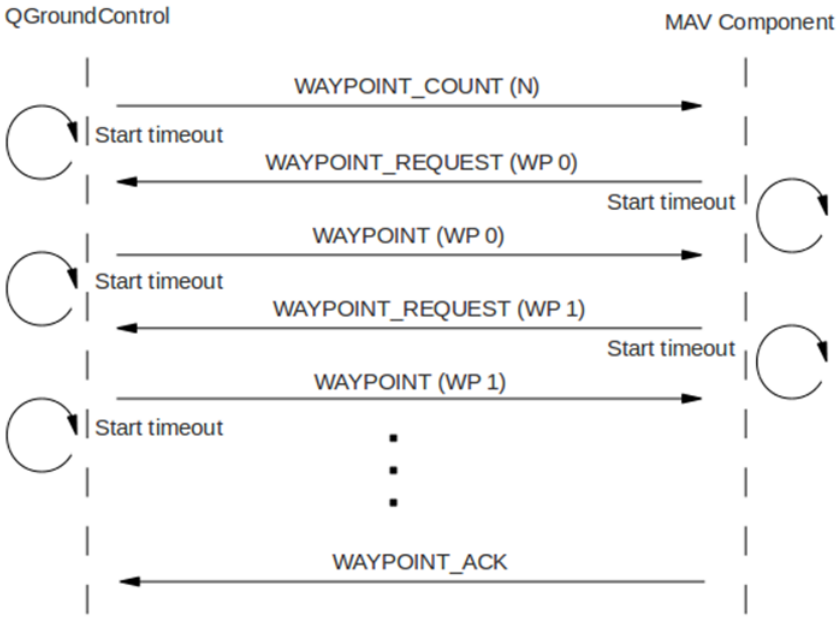
tekrar bu isteği yapabilmektedir. Sonuç olarak parametre istendiğini algıladıktan sonra aracımız yer istasyonuna parametreleri yollamaya başlamaktadır. Parametre yollamak için ise Mavlink protokolünün "param_value" adlı, mesaj ID'si "22" olan mesajı yollamaktadır.

Rotanın belirlenmesi için ise Mavlink'in kendi içerisinde "Waypoint protocol" şeklinde adlandırdığı bir protokol mevcuttur. Bu protokol sayesinde yeni bir rota belirlenmesi gerçekleştirilebildiği gibi araç üzerinde hazırda bir rota bilgisi var ise bu bilginin yer istasyonu tarafından alınabilmesini de sağlamaktadır. Güncel olarak bu protokolün aracımıza entegrasyonu ve yer istasyonu ile haberleşmesi üzerine çalışmaktayız.

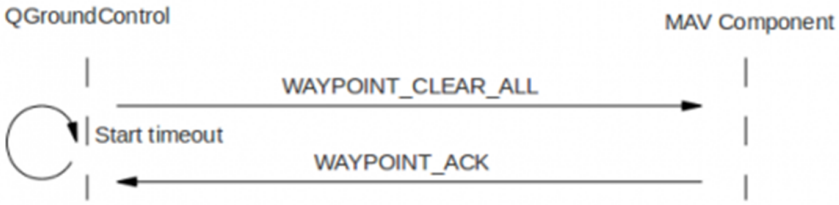
Şekil 6.23'te görülen protokol, yer istasyonunun hazırda araç içerisinde var olan rotanın iletilmesini sağlamaktadır. Bu değeri isterken "waypoint_request_list" mesajı kullanılmaktadır. Bu mesaja bağlı olarak araç kendisinde kaç tane rota değeri var ise bu değeri gönderir. Bu değeri göndermek için "wayppint_count" mesajı ile bildirimi sağlar. Daha sonra rota sayısını bilen yer istasyonu, teker teker rota sayısını göndererek, kaçıncı rota isteniyorsa, araç tarafından gönderimi sağlanır. En sonunda tüm rota değerleri gönderilince yer istasyonu "waypoint_ack" mesajı gönderir ve bu iletim tamamlanmış olur.



Şekil 6.23: Rotanın araç üstünden yer istasyonuna iletilmesi.



Şekil 6.24: Yeni rotanın yer istasyonundan araca gönderimi.



Şekil 6.25: Rota değerini sıfırlama.

Bir diğer senaryo ki en çok kullanılan, yer istasyonundan rotanın belirlenmesi ve bu rota değerlerinin araca gönderilmesidir. Bu protokol için ise Şekil 6.24'te belirtilen protokol kullanılmaktadır. Rota değerlerinin iletimi için protokol direk olarak yer istasyonunun araca kaç tane rota değeri olduğunu belirterek başlar. Bu haberleşmenin başlaması için gerekli rota sayısının belirtilmesi için "waypoint_count" mesajı iletilir. Daha sonra rota sayısını bilen araç, teker teker rota değerlerini "waypoint_request" mesajı ile istemeye başlar. Yer istasyonu da istenilen rota değerini kaçıncı rota olduğunu belirterek araca gönderimi sağlar. Bu sistemde kaçıncı olduğunu belirtilmesindeki en büyük yarar ise haberleşmede bir problem yaşandığı takdirde veya mesajın yanlış gelmesinin sistem tarafından farkedilmesi durumunda, araç yer istasyonundan tekrar rota değerini isteyebilmektedir. En sonunda yollanılan tüm rota bilgilerine bağlı olarak araç "waypoint_ack" mesajı göndererek protokolü sonlandırmış olur.

Şekil 6.25'te görünen protokol ise araç üzerinde önceden bildirilmiş rota bilgisinin silinmesine yöneliktir. Yeni bir rota girilmesi veya araç üzerindeki rotanın silinmesi gerektiği bir durum oluştuğunda bu protokol sayesinde istenilen yerine getirilmiş olmaktadır. Yer istasyonunun gönderdiği "waypoint_clear_all" mesajı ile bu istek gönderilir. "waypoint_ack" mesajı ile geri bildirim yapıldığı takdirde rota bilgisi silinmiş olur.

TURAÇ platformu için geliştirilen yer istasyonu yazılımının ana özelliklerini oluşturan "Platform yapılandırma", "Görev planlama" ve "Görev izleme" bileşenleri gerçeklenmiştir. Platformun uçuşu sırasında ihtiyaç duyacağı kullanıcı tarafından ayarlanabilen parametreleri yer istasyonu tarafından ayarlanabilmektedir. Harita üzerinden veya tablosal olarak görev planı oluşturulabilmektedir.

Platformla iletişimin sağlandığı MAVLink protokolü gerçeklenmiş ve detaylı testler gerçekleştirilmiştir. Platform ile Yer İstasyonu arasında veri bağlantısı COM, TCP

veya UDP üstünden sağlanabilmektedir. Görevin izleme bileşeni platformdan aktarılan gerçek zamanlı görüntünün ve tüm telemetry verisinin detaylı gösterimi sağlanmıştır. Görev sırasında kaydı gerçekleştirilen telemetry verisinden faydalanılarak görevin simule edilerek tekrar oynatılması mümkün kılınmıştır. Yer istasyonu yazılımı yetenekleri sayesinde TURAÇ platformu ihtiyaçları sağlanmıştır.

Bu bölüm altında teknoloji demonstrasyonu ve ilk uygulama olarak düşünülen hiperspektral kamera, atmosferik algılayıcı (ek bir faydalı yük paketi olarak) faydalı yük bilgisayar ve iletişim sistemi sistem entegrasyon, yazılım geliştirme, donanım geliştirme ve yer istasyonu ile entegrasyon faaliyetleri açıklanmıştır. Geliştirilen faydalı yük sistemi yerde çeşitli bitki örtüsü üzerinde statik ve araba üzerinden dinamik ölçümler ile uçuş plaformuna takılmadan test edilmesi hedeflenmiştir.

6.6 Multispektral Görüntü Analizi Araştırması

İnsansız hava aracına eklenecek kamera ile elde edilen hiperspektral görüntüler kullanılarak bitki örtüsü analizi yapılması planlanmaktadır. Bu amaçla aşağıdaki faaliyetler yapılabilecektir:

- Bitki deseninin belirlenmesi
- Arazi kullanımının haritalanması,
- Ürün rekolte tahminleri,
- Bitki hastalık ve zararlılarının tespit edilmesi,
- Mera ve orman alanlarının hesaplanması

Bitki gelişiminin belirlenmesinde klorofil varlığı önemli bir göstergedir. Klorofil hücresi kırmızı bantta göreceli olarak düşük, ancak yakın kırmızı-ötesi bantta göreceli yüksek yansıma gösterir (parlak bir yansıma değeri) ve diğer arazi örtülerinden kolaylıkla ayrılabilir. Bu nedenle bu iki bant arasındaki farklı kombinasyonlar bitki gelişimini belirlemek amacıyla çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Herhangi bir bitkiye ilişkin toplam bitkisel üretim tahminleri iki bölümden oluşmaktadır. Bunlardan birinci aşamada bitkinin ekim alanının tahmin edilmesi, ikinci aşamada ise bu alandan elde edilen ortalama üretim miktarının (verim değeri) bulunmasıdır. Bu

iki değerden yararlanılarak üretim tahmini yapılabilmektedir. Bitki ekim alanlarının belirlenmesi, uzaktan algılama sınıflandırma teknikleri ile yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında bitki örtüsü ise boş alanların ayrımı hedeflenmiştir.

Proje bütçesi hiperspektral kamera alımını karşılayamadığından, multispektral kamera için piyasa araştırması yapılmıştır. Araştırma sonucunda Tetracam ADC Micro multispektral kamerasının alınmasına karar verilmiştir. TURAÇ projesi kapsamında multispektral kameralar kullanılarak, bitkilerin gübreleme haritalarını çıkartma üzerine literatür araştırması yapılmıştır. İncelenen yayınlar ışığında, NDVI indeksi ile bitkilerin sağlığı ve gübreleme ihtiyacı hakkında yorum yapılabileceği öğrenilmiştir. MATLAB ortamında kodlanan gübre yeterlilik algoritması, multispektral uydu görüntüleri üzerinde denenmiştir.

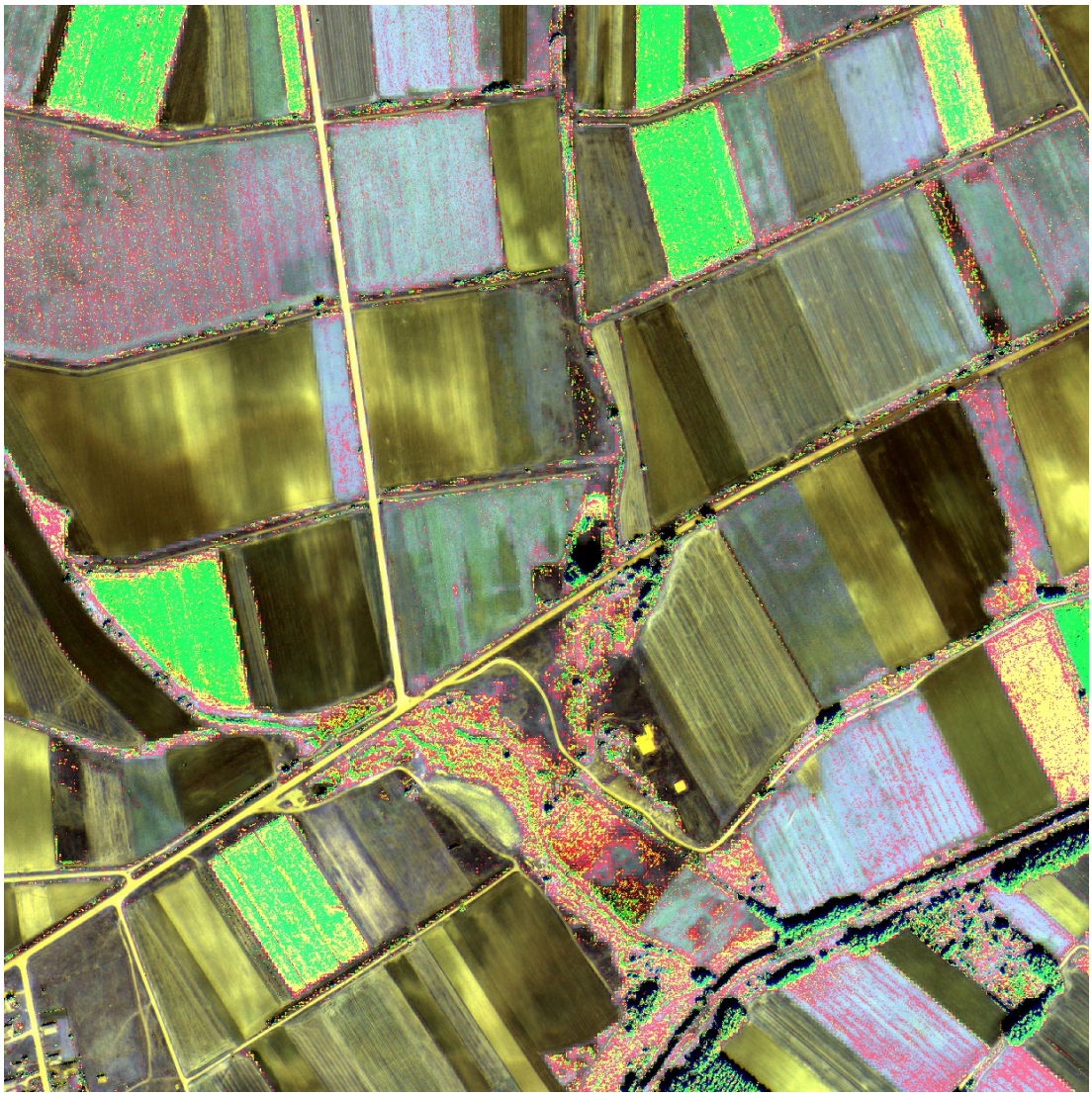
6.6.1 Multispektral Kamera Test Sonucu

Algoritma multispektal uydu görüntüleri üstünde test edilmiştir. Şekil 6.26 - Şekil 6.28'de bitkiler üç gruba ayrılmıştır. Yüksek gübre ihtiyacı olan yerler kırmızı, az gübre ihtiyacı olan yerler sarı, hiç gübre ihtiyacı olmayan sağlıklı bitkiler ise yeşil renklerle gösterilmiştir.

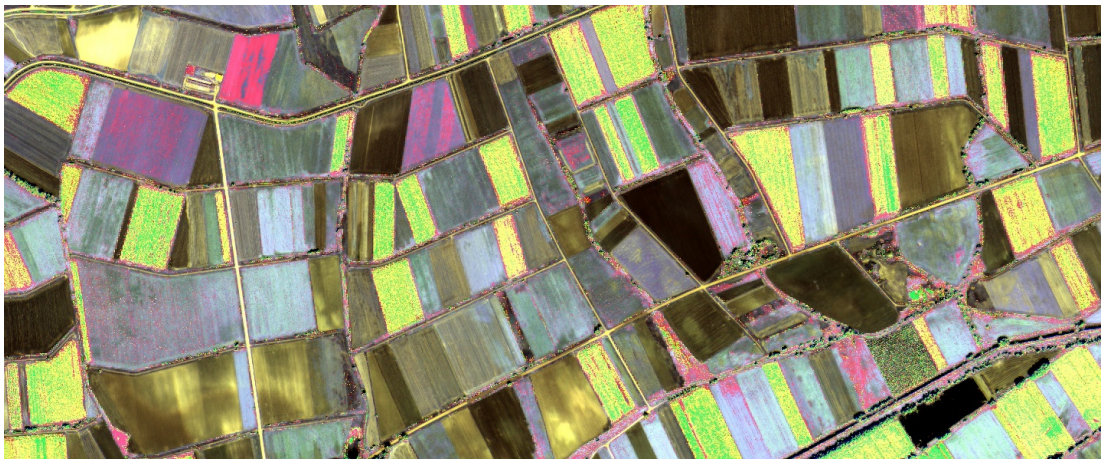
6.7 Gaz Sensörlerinin Entegrasyonu

Faydalı yük olarak aracın üzerinde oluşabilecek durumlara bağlı olarak üç adet gaz sensörü kullanılmıştır. Bu sensörler MQ-2, MQ-5 ve MQ-6'dır. Sensör çıkışını analog değer olarak verdiğinden mikrokontrolörün analog dijital çeviricisi sayesinde değer okunur. Alınan bu değer faydalı yük bilgilerinin iletimi için belirlenmiş mesaj paketine aktarılır ve paket oluşturulduktan sonra RF üzerinden kablosuz olarak haberleştirilir (Şekil 6.29) Sensörler, kullanıcı dostu, uzun süre dayanımlı ve herhangi bir durum değişimine hızlı cevap verebilmektedirler. Bu özellikleri nedeni ile bu sensörlerin kullanımı tercih edilmiştir. Sensörlerin hangi dumanlara ne kadar hassasiyet gösterdiği Çizelge 6.1'de gösterilmiştir.

TURAÇ DİKY İHA platform için geliştirlen aviyonik sistemler, yer istasyonları uçuş testlerinde başarıyla test edilmiştir (Bölüm 8). Bu sistem için geliştirilen sistemler bir çok hava sistemine entegre edilerek kullanılacak şekildedir. Tasarım ve geliştirme



Şekil 6.26: Multispektal uydu görüntüsü - 01.



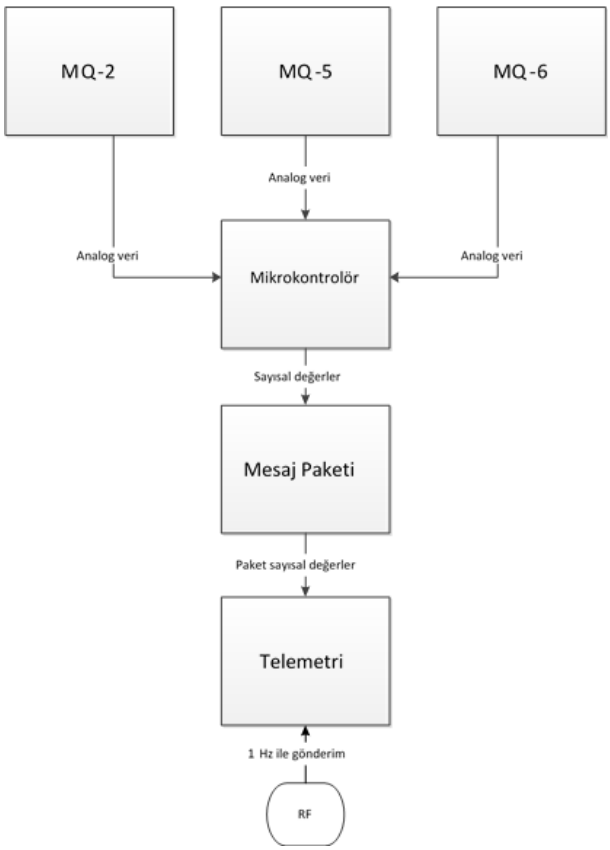
Şekil 6.27: Multispektal uydu görüntüsü - 02.



Şekil 6.28: Multispektal uydu görüntüsü - 03.

Çizelge 6.1: Gaz sensörleri ve hassasiyetleri.

MQ-2	
Yüksek hassasiyet:	LPG, Propan ve Hidrojen
Düşük hassasiyet:	Methan ve diğer yanıcı gazlar
MQ-5	
Yüksek hassasiyet:	LPG, doğal gaz ve hava gazı
Düşük hassasiyet:	Alkol ve Duman
MQ-6	
Yüksek hassasiyet:	LPG, izobütan, propan
Düşük hassasiyet:	Alkol ve Duman



Şekil 6.29: Faydalı yük iletişim şeması.

tamamen proje ekibi tarafından yapılması, sistemin geliştirilmesi, değiştirilmesi ve kullanımında esneklik tanımaktadır.

7. TURAÇ ÜRETİMİ

Bu bölümde tasarlanan TURAÇ DİKY İHA ana ve alt sistemlerinin üretim çalışmaları ele alınmıştır. Tekrarlanan bir tasarım sürecinde her bir tasarıma yönelik farklı kalıplar dahil, imalat sürecinin masrafı oldukça yüksek olabilir. Ayrıca, tasarımda bir kusurla karşılaşıldığında gerçek hayatta İHA üzerinde önemli değişiklikler yapmak zor ve pahalıdır. Bu nedenle, ucuz, hızlı ve kolayca tekrarlanabilir bir prototip metodolojisi son derece önemlidir. Bu bölümde düşük masraflı bir prototip metodolojisi geliştirilmekte ve uygulanması ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir.

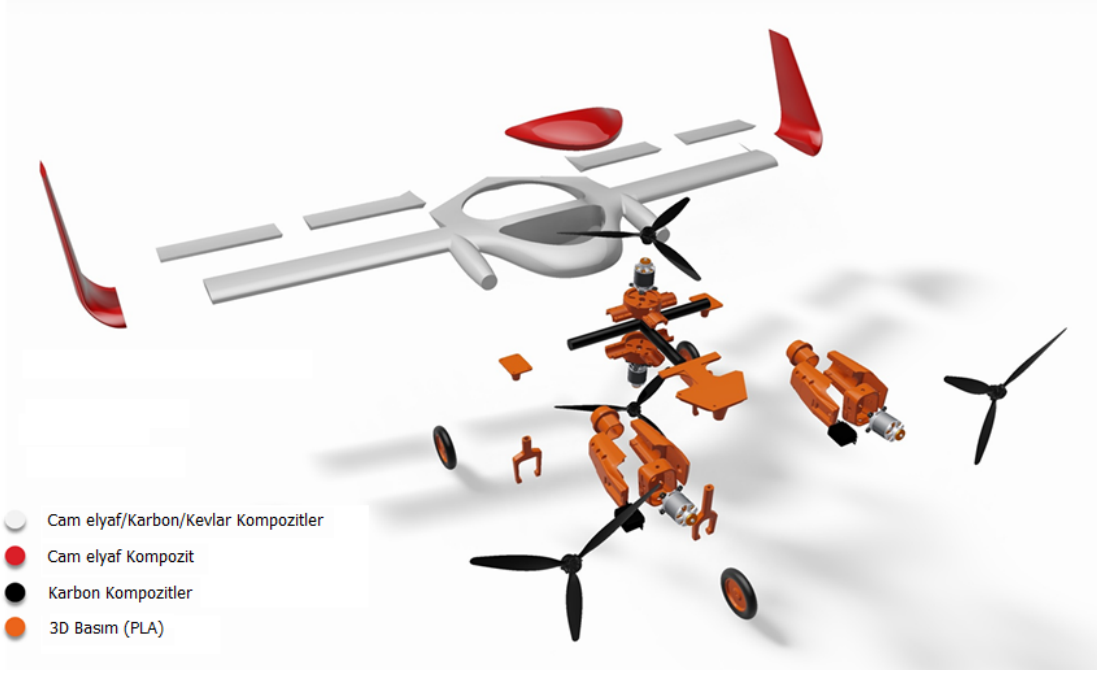
Tasarım süreci sırasında uçuş testleri, çeşitli tasarım özelliklerinin TURAÇ DİKY İHA platformunun performans ve kararlılığının belirlenmesi üzerindeki etkisinin anlaşılmasında kilit rol oynamıştır. Bu nedenle, prototiplendirme TURAÇ DİKY İHA'nın tekrarlamalı tasarım sürecinin en önemli unsurlardan biri haline gelmiştir. Bütün aerodinamik, yapısal ve sistemsel testler yarı veya tam fonksiyonel prototipler üzerinde uygulanmıştır. Prototiplendirme sürecinin hızlı ve düşük maliyetli olması gerekmektedir. Aynı zamanda her bir prototipin tasarıma uyması ve pek çok test yapmak için dayanıklı olması gereklidir. Bu nedenle mevcut yöntemler, 3D baskı gibi yeni yöntemlerle iyileştirilmiştir.

Tasarım sürecinde CAD kullanılmıştır. Bütün teknik çizimler CAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve imalat süreci CAD çıktıları temelinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.1'de TURAC 1/3-ölçekli prototip genişletilmiş görünümü ve malzemeleri gösterilmektedir. Burada, ana yapı olarak kompozit parçaları kullanılmıştır ve mekanizmalar ve bağlantılar gibi hassas parçaların çoğu 3D baskıda üretilmiştir.

7.1 Düşük Maliyetli Bir Yaklaşım

TURAÇ geliştirme için düşük maliyetli, hızlı ve tekrarlanabilir bir imalat yaklaşımı kullanılmıştır. 1/2 ve 1/3 ölçekli modeller tam ölçek sisteme yeterli dinamik benzerliği sağladığı ve tam ölçekli modele göre yönetilmesi daha kolay olduğu için tercih edildi.

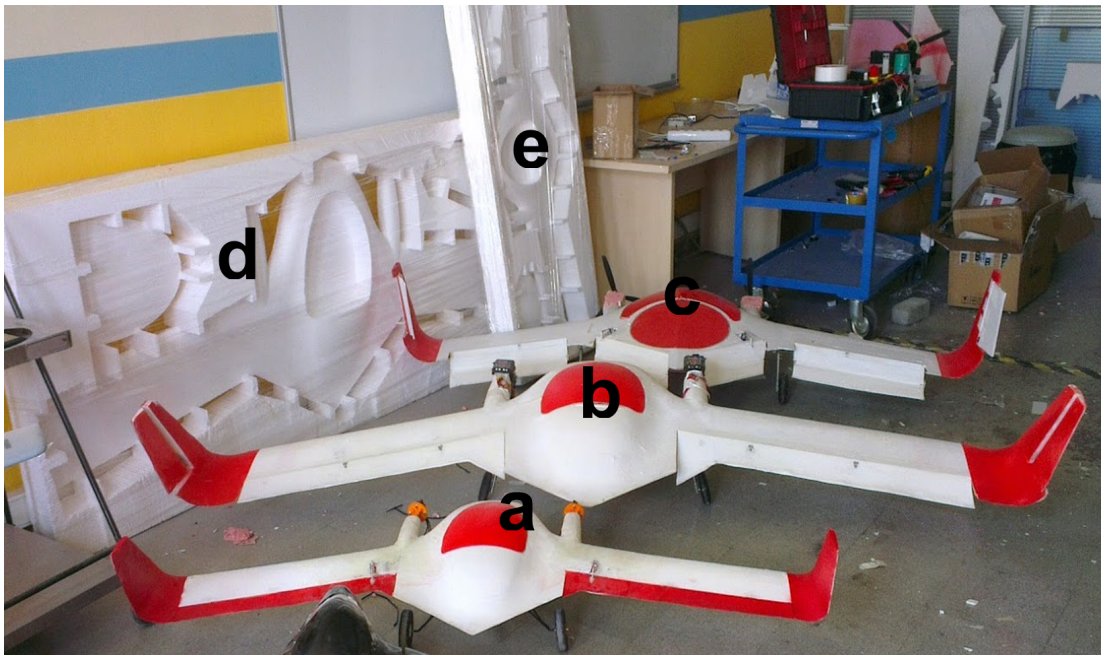


Şekil 7.1: TURAÇ 1/3-ölçekli prototip genişletilmiş görünüm ve malzemeler.

Buna ek olarak, ölçekli modeller proje ekibinin yerel hobi dükkanlarında kolayca bulunabilen pervane, ESC ve fırçasız motor gibi standart parçaları kullanmasına imkan tanımaktadır. Prototip üretiminde zamandan, enerjiden ve maliyetten tasarruf etmek için piyasadan hazır bulunabilen parçalar kullanılmıştır. Ancak TURAÇ DİKY İHA, kalkış takımı ve tilt mekanizmaları gibi sayısız özel parça da içerir. Uçuş testi için toplamda on beş prototip üretilmiştir. Bunlardan ikisi askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) testleri için yapılmıştır.

Şekil 7.2'de üç adet bitirilip kullanılmış prototip ve iki köpük gövde yapısı örneği gösterilmektedir.

Üretim aşamasında, TURAÇ DİKY İHA prototipleri için farklı üretim yöntemleri değerlendirilmiştir (Çizelge 7.1). Özellikle, kompozitler oldukça hafiftir ve hassasiyetle üretilebilir ancak tasarım esnasında, prototiplerin test uçuşlarından sonra değiştirilmesi gerekir, böylece çok fazla kalıba ihtiyaç duyulur. Önceden emprenye yöntemi kompozit bir yapı oluşturma konusunda oldukça etkili bir yöntem olsa da otoklav, yüksek kalite ve ısıya dayanıklı kalıplar gibi ek üretim altyapısı unsurlarına ihtiyaç duyar. Yüksek maliyetleri göz önünde bulundurularak prototiplendirmede hiçbir kalıp kullanılmamıştır. Düşük maliyeti ve kolay imalatı nedeniyle TURAC prototiplendirmesi için CNC işlemeli köpük gövdeyle el yatırması kompozitler



Şekil 7.2: Prototipler: a) İleri uçuş için 1/3-ölçek. b) İleri uçuş için 1/2-ölçek. c) DİKY için 1/2-ölçekli. d) İleri uçuş için 1/2-ölçek. e) İleri uçuş için 1/3-ölçek.

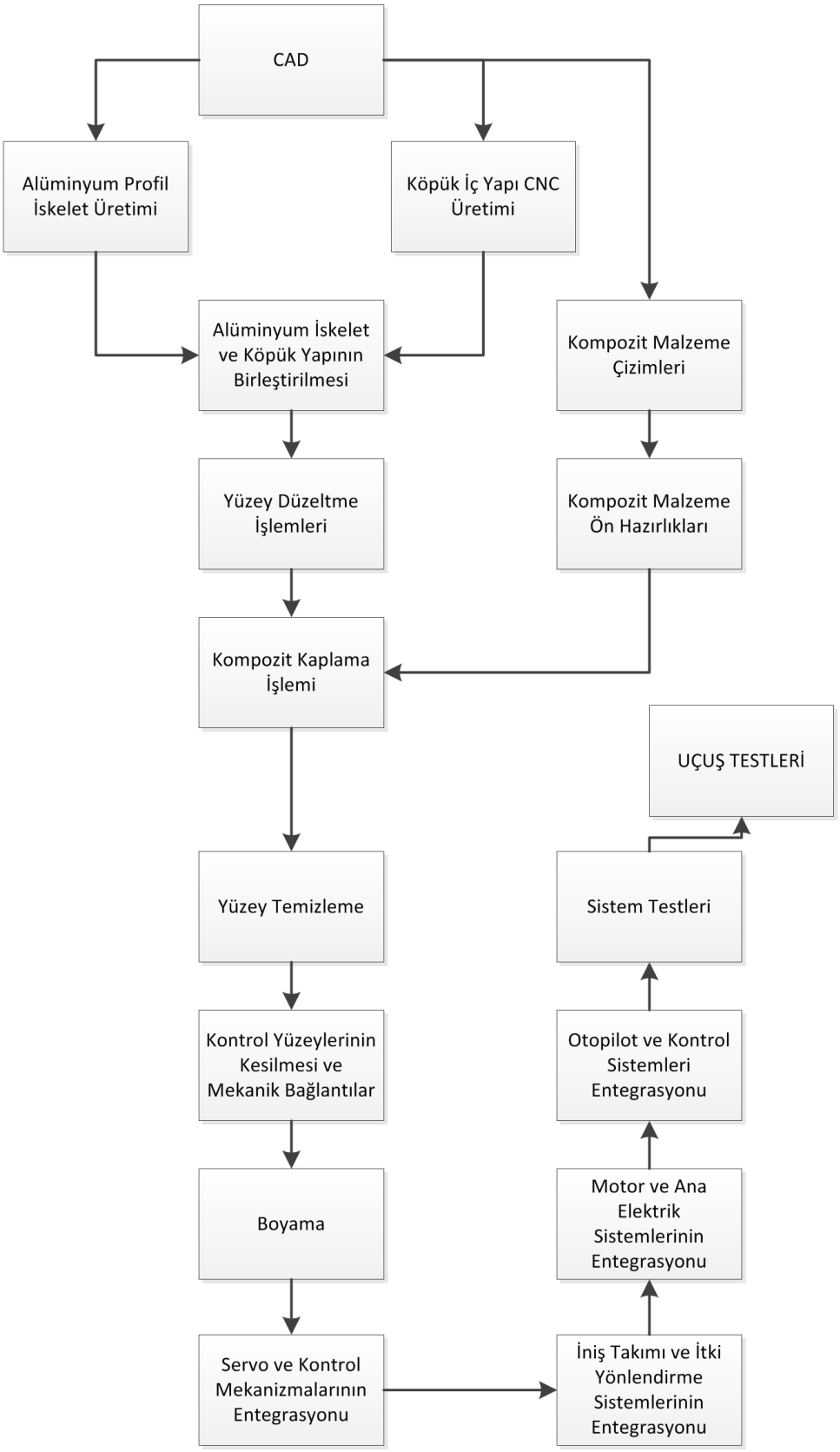
kullanılmıştır. Üniversite tesislerindeki makine atölyesi ve CNC üretimi tercih edilmiştir. Üretim süresini azaltmak için basit iç tasarım kullanılmıştır.

Tek bir prototipte birden fazla test yapmak için dayanıklı bir prototip tasarımı ve imalat sürecine ihtiyaç duyulmuştur. Köpük gövdeli bir fiberglas kompozit yöntemi de test uçuşlarında yeterli dayanıklılık sağlamıştır.

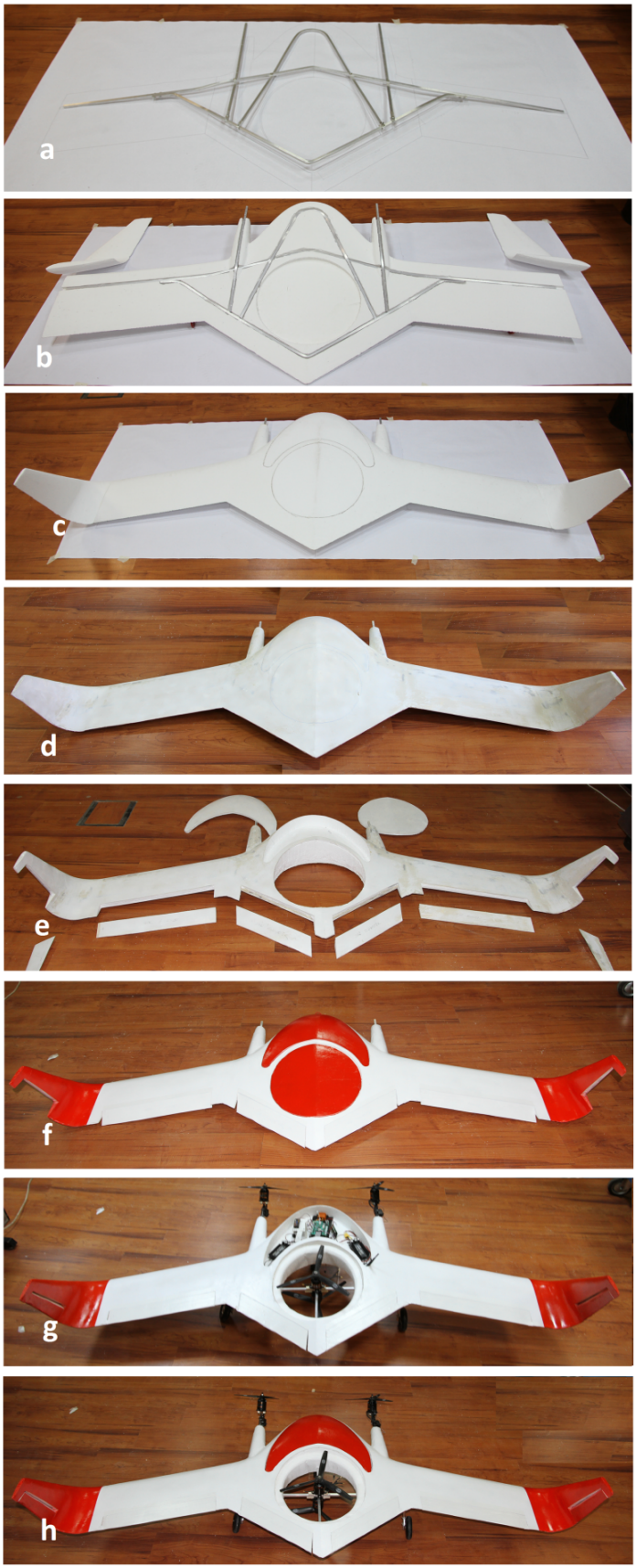
7.2 İmalat Süreci

Tasarım sürecinde CAD kullanılmıştır. Bütün teknik çizimler CAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır ve imalat süreci CAD çıktıları temelinde gerçekleştirilmiştir. 1/2-ölçekli bir prototipin imalat süreci Şekil 7.3'te gösterilmiştir ve Şekil 7.4'te prototiplendirme sırası aşağıda adım adım fotoğraflanmıştır.

Alüminyum profiller CAD çizimlerine göre oluşturulmuş ve el araçlarıyla kesilmiştir. Alüminyum yapı imal edilirken, üretim süresini kısaltmak için köpük gövde bir CNC makinesiyle oluşturulmuştur. Daha sonra iki bileşen köpük yapıştırıcısı ile birbirine yapıştırılır ve yapı, civatalarda tutturulanlardan daha sıkı hale gelir. Sonrasında ise yüzeyler kompozit kaplaması öncesi zımparalanıp temizlenmiştir. Kompozit malzemeler, CAD çizimleri sonrası makasla kesilmiştir. Köpük gövdenin alüminyum



Şekil 7.3: 1/2-ölçek TURAÇ prototip imalat süreci.



Şekil 7.4: Üretim adımları: a)Alüminyum güçlendirme üretimi. b) CNC'de köpük işleme. c) Alüminyum yapı ve köpük yapıştırma işlemi. d) Kompozit kaplama ve yüzey düzeltme. e) Kontrol yüzeylerinin kesilmesi. f) Boyama işlemi. g) Alt sistem entegrasyonu. h) Sistem kontrolleri.

Çizelge 7.1: Üretim yöntemleri karşılaştırması.

	Maliyet	İmalat Kolaylığı	Hassasiyet	Dayanıklılık	**Toplam Puan**
Parametre Ağırlığı	**40**	**30**	**10**	**20**	**100**
CNC İşlenmiş Kalıp, El Yatırması Kompozitler	2	4	4	4	320
CNC İşlenmiş Kalıp, Önceden Emprenye Kompozitler	1	3	5	5	280
Dişi - Erkek Kompozit Kalıp, El Yatırması Kompozitler	4	2	3	3	310
CNC İşlenmiş Köpük Gövde, El Yatırmasıyla Kompozit Kaplama	**5**	**3**	**1**	**2**	**340**
*1 (en kötü) ile 5 (en iyi) arasında puanlama yapılmıştır.					

ile kaplanması için epoksi reçinesi ve fiberglas kompozit malzemeleri kullanılmıştır. Yüksek hızlı bir metal diskle kontrol yüzeyleri kesilmiştir. Daha sonra ise mafsallar ve kumanda yekeleri kontrol yüzeylerine entegre edilmiştir. Yüzey, basınçlı hava ve ıslak bir bezle temizlenmiştir. Yüzeyi daha pürüzsüz hale getirmek için birkaç tabaka boya uygulanmıştır. Son olarak da sistem kontrolü öncesi iniş takımı, mekanizmalar, itki birimleri ve kontrol sistemi entegre edilmiştir.

Sonrasında imalat süreci iyileştirilmiştir. Birkaç sert iniş sonrasında alüminyum yapıda eğilme ve köpük gövdede ayrılma gibi bazı problemler yaşanmıştır. Daha sonra, daha hafif ve güvenilir bir yapı imal etmek için karbon tüpler kullanılsa da karbon tüp bağlantıları, ayrılma ve çatlamaya neden olmuştur. Son olarak ekip köpük gövdeler, fiberglas, karbon fiber ve daha esnek olan epoksi reçinesi kullanmıştır. Pek çok test ve sert iniş sonrası yapı, önceki versiyonlara göre daha güvenilir ve etki sonrası çatlamayı önleyecek kadar esnek bulunmuştur. Alüminyum yapının prototipten çıkarılması yapıyı daha güvenilir hale getirmekte, ağırlığı azaltmakta ve imalat süresini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Geleneksel imalat yöntemleri ve malzemeleri Çizelge 7.1'de karşılaştırılmaktadır. Spesifik olarak, kompozitler oldukça hafiftir ve hassasiyetle üretilebilir ancak tasarım esnasında, prototiplerin test uçuşlarından sonra değiştirilmesi gerekir, böylece çok fazla kalıba ihtiyaç duyulur. Önceden emprenye yöntemi kompozit bir yapı oluşturma konusunda oldukça etkili bir yöntem olsa da otoklav, yüksek kalite ve ısıya dayanıklı

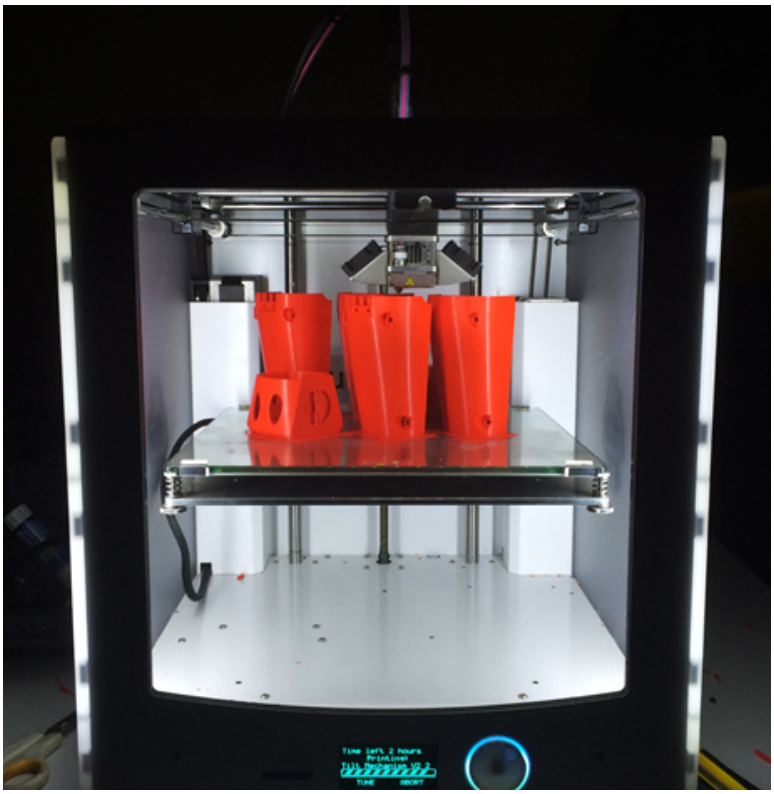
kalıplar gibi ek üretim altyapısı unsurlarına ihtiyaç duyar. Yüksek maliyetleri göz önünde bulundurularak prototiplendirmede hiçbir kalıp kullanılmamıştır. Düşük maliyeti ve kolay imalatı nedeniyle TURAÇ DİKY İHA prototiplendirmesi için CNC işlemeli köpük gövdeyle el yatırması kompozitler kullanılmıştır. Üniversite tesislerindeki makine atölyesi ve CNC üretimi tercih edilmiştir. Üretim süresini azaltmak için basit iç tasarım kullanılmıştır. Tek bir prototipte birden fazla test yapmak için dayanıklı bir prototip tasarımı ve imalat sürecine ihtiyaç duyulmuştur. Köpük gövdeli bir fiberglas kompozit yöntemi de test uçuşlarında yeterli dayanıklılık sağlamıştır.

7.3 Alt Sistem Tasarım ve Üretimi

TURAÇ DİKY İHA sistemi sabit kanatlı bir hava aracı olması gereğiyle iniş takımı, iniş takımı kapakları ve eleron, elevatör gibi birçok hareketli, yüzeye sahiptir. Bununla birlikte DİKY bir hava aracı olması nedeniyle tilt mekanizması, ana taşıyıcı fan kapakları ve kilit mekanizmaları gibi dikey kalkış ve geçiş uçuşu için kritik seviyede hareketli parçalara ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle TURAÇ DİKY İHA detay tasarım konusunda normal bir uçaktan yaklaşık 3 kat daha fazla tasarımsal iş gücü gerektirmektedir.

TURAÇ DİKY İHA detay sistem tasarımı öncelikle sistem gereksinimlerinin belirlenmesi ile başlamaktadır. Yapılmak istenilen hakerete uygun olarak piyasada bulunabilen standart parçaların kullanılması sistem güvenirliliği ve süreçlerin kısaltılması için oldukça önemlidir. Standart parçaların kullanımının mümkün olmadığı durumlarda ise minimum değişiklikle parçalar kullanıma uygun hale getirilmeye çalışılmıştır. Bunun da mümkün olmadığı durumlarda ya da standart parçaların beklenen performansı ve güvenirliliği gösteremediği durumlarda parçalar özel olarak tasarlanmaktadır.

Tasarımı yapılan parçalar öncelikle 3D olarak CATIA programı üzerinde modellenmekte ve kinematik açıdan değerlendirilmektedir. Değerlendirmeleri geçen parçalar ise bir sonraki aşama olan prototiplendirme sürecine girmektedir. Parçalar laboratuar bünyesinde bulunan 3D yazıcıda basılmakta ve kullanılacağı yere takılarak işlevi değerlendirilmektedir. Prototip parçalardan beklentiler parçanın tolerans değerlerinin tam olması, parçanın yerine beklenen şekilde oturması ve istenilen mekanik bağlantıyı



Şekil 7.5: FDM teknolojisi kullanılarak yapılan 1/3-ölçekli prototip tilt mekanizması 3D basımı.

ve hareketleri sorunsuz şekilde yerine getirebilmesidir. Birçok durumda hızlı prototip parçaların mekanik özellikleri de yeterli gelmekte, uçak üzerinde 3D yazıcıdan çıkmış ürünler kullanılmaktadır.

3D yazıcı kullanılmasının projede en büyük avantajı üretim hızı ve kolaylağı sağlaması nedeniyle TURAÇ sistemine en uygun tasarımların yapılabilmesidir. Bu şekilde testler esnasında herhangi bir parça kırıma uğradığında çok hızlı bir şekilde tasarım iyileştirmesi yapılabilmekte ve parça yeniden üretilip sistem optimize edilebilmektedir. Ayrıca sistem sadece hammaddeye ihtiyaç duyması nedeniyle tedarik süreçlerini de oldukça kısalmakta, hatta bazı parçalarda bu süreçleri ortadan kaldırmaktadır.

3D basım sistemleri, servo bağlantılar ve motor montajları gibi mekanizmaların ve hassasiyet yapılarının hızlı bir şekilde üretilmesini mümkün kılmaktadır. Şekil 7.5'te FDM (*Fused Depostion Modeling*) teknolojisi kullanılarak 1/3-ölçekli prototipin tilt mekanizmasını basan 3D basım sistemi gösterilmektedir. Sistemde biyobozunur bir plastik malzeme olan PLA (Polilaktik Asit) filamenti kullanılmakta ve bir sıkmaç filamenti eritip CNC G kodlarıyla basım tablosu üzerinde hareket etmektedir.



Şekil 7.6: Ön iniş takımı ana yatak elemanı.

Daha önce karmaşık geometriler bu teknolojiyle kolayca imal edilemiyordu. Son yıllarda bu teknolojiyle tasarım sınırları ve zaman limitleri değiştirilmiştir. 3D basım sistemi sayesinde tasarım özgürlüğüne sahip olunmuştur ve çözümler hızlı bir şekilde geliştirilebilmiştir.

7.3.1 Ön İniş Takımı Ana Yatak

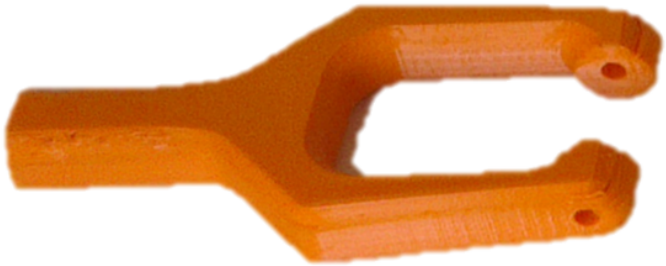
Piyasada bulunan ön iniş takımı yatak sistemlerinin ölçekli TURAÇ modeli için yetersiz kalmasıyla ön iniş takımı ana yatağı tasarımı yapılmıştır. Tasarım yapılırken piyasa yer alan iniş takımı yataklarına ek olarak sistem 2 adet rulmanla desteklenmiş; esneme ve istenmeyen harekelerin önüne geçmek için servo yatağı ile bütünleşik olarak tasarlanmıştır. Bununla birlikte servo ve strut bağlantısı tek servo bağlantısı yerine çift servo bağlantısı destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Yüksek hızlarda kontol kaybını önlemek için sistem metal dişli yüksek torklu servo ile desteklenmiştir. Ön iniş takımı ana yatak elemanı Şekil 7.6'da gösterilmiştir. PLA malzeme kullanılarak hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir.

7.3.2 Ön İniş Takımı Tekerlek Bağlantısı

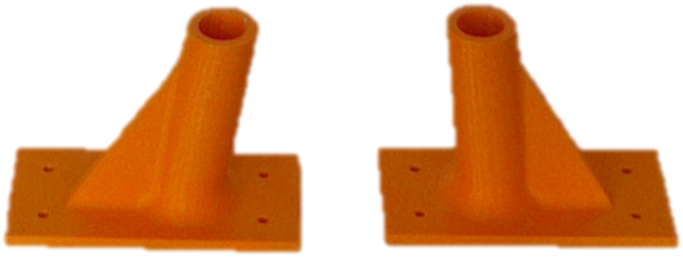
Piyasada yer alan üreticilerden iniş takımı tekerlek bağlantısı tedariğinde sıkıntı yaşanması nedeniyle tasarlanmıştır. Yapı farklı boyutlardaki tekerleklerin kullanılmasına imkan sağlayacak ve gerekiğinde arka iniş takımı tekerlek bağlantısı için de kullanılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ön iniş takımı tekerlek bağlantısı Şekil 7.7'de gösterilmiştir. PLA malzeme kullanılarak hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir.

7.3.3 Arka İniş Takımı Bağlantı Parçası

TURAÇ iniş takımları ölçekli modelde açık olacak şekilde statik olarak monte edilebilmektedir; ancak uçak yüzeyi ile iniş takımı arasındaki açının 85 derece olması



Şekil 7.7: Ön iniş takımı tekerlek bağlantısı.



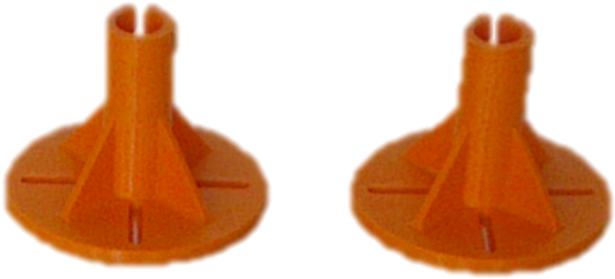
Şekil 7.8: Arka iniş takımı bağlantı parçası.

nedeniyle standart bağlantı parçaları ile iniş takımı bağlantısı yapılamamaktadır. Bu nedenle iniş takımı bağlantısı için bir parça tasarımı yapılmıştır. Arka iniş takımı bağlantı parçası Şekil 7.8'de gösterilmiştir. PLA malzeme kullanılarak hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir.

7.3.4 Motor Yatağı

1/3 ölçeğinde kullanılan motorların el üretimi motor yatakları ile birlikte kullanıldığında motor itki çizgilerinin ağılık merkezi üzerinde farklı momentler yaratması ve uçağın testlerde kırıma uğraması nedeniyle açı kontrolü ve hızlı üretim sağlamak üzere yapılan tasarımdır. Bu tasarım açı kontrolü ve hızlı entegrasyon sağlarken farklı tipte ve boyutta motorların kullanımına da olanak sağlamaktadır. 1/3 ölçekli model için tasarlanan motor yatağı Şekil 7.9'de gösterilmiştir. PLA malzeme kullanılarak hızlı prototipleme yöntemiyle üretilmiştir.

Sayısal analiz ve modelleme analizi kavramsal tasarımda son derece önemli bir rol oynasa da, gerçek prototipleme ve uçuş testleri başarılı bütün tasarımlarda kilit öneme sahiptir. Tekrarlanan bir tasarım sürecinde, her bir tasarım için farklı kalıp yüksek



Şekil 7.9: 1/3 ölçekli model için tasarlanan motor yatağı.

bir maliyet tutmaktadır. Ayrıca, tasarımda bir kusurla karşılaşıldığında gerçek hayatta İHA üzerinde önemli değişiklikler yapmak zor ve pahalıdır. Bu nedenle, ucuz, hızlı ve kolayca tekrarlanabilir bir prototip metodolojisi son derece önemlidir. Bu amaçla, bu bölümde düşük maliyeti prototip yöntemi sunulmuştur.

Özetle bu metodoloji, Bilgisayar Sayısal Kontrol (CNC) tezgahında köpük gövde merkezi imalatı süreci ile başlamaktadır. Daha sonra, aracın iskeleti alüminyum profiller yoluyla köpükten gövdeye yerleştirilir. Yüzey zımparalama ve temizleme işlemlerinden sonra alüminyum araç iskeleti bulunan gövde köpüğü epoksi reçinesi ve fiberglas kompozit malzemeler ile kaplanır. Buna ek olarak, 3D bir yazıcı ile iniş takımı ve yükseklik ayar mekanizmaları gibi çeşitli özel tasarım bileşenleri yazdırılmıştır. Ölçek prototipleri orijinal sistemin dinamik davranışını temsil etme konusunda yeterli olması ve aynı zamanda bize güç alt sisteminde ticari kullanıma hazır (COTS) ürünleri kullanma esnekliği tanıdığından bu metodoloji yoluyla sayısız 1/2 ve 1/3 ölçekli TURAÇ DİKY prototipi oluşturulmuştur. Bu prototipler yalnızca uçuş testi yoluyla tasarımın düzeltilmesi için değil, aynı zamanda da süzülme, ileri uçuş ve geçiş uçuşu için uçuş kumanda sistemlerinin düzeltilmesinde de kullanılmaktadır. Yer testleri olarak tahrik, yapısal, mekanizma ve komut kontrol testleri yapılmıştır. Uçuş testleri olarak da Geleneksel kalkış ve iniş, dikey kalkış ve iniş ve otonom ve geçiş uçuşları yapılmıştır.

8. YER VE UÇUŞ TESTLERİ

TURAÇ DİKY İHA platformunun tekrarlamalı tasarım sürecinin en önemli girdilerinden birini uçuş ve yer testleri oluşturmuştur. Testler ana ve alt sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk olarak 4. bölümde tasarım ve imalat aşamaları gösterilen itki-test düzeneğiyle yer testleri gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek bize uçuş testlerini yapmayı planladığımız farklı prototiplerdeki TURAÇ DİKY İHA prototipleri için düşünülen motor, pervane ve ESC kombinasyonlarını itki değerlerini test etme imkanı sağlamıştır. Farklı ölçeklerdeki TURAÇ DİKY İHA prototiplerin üretimi 7. bölümde anlatılmıştı. Bu bölümde se farklı ölçeklerde üretilen bu protoplerin uçuş testleri anlatılmıştır. Uçuş testleri başlangıçta ikiye ayrılmıştır. Bunlardan ilki DİKY konseptinin test eden havada askıda kalma, havada askıda kalma durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi), uçuş görevi olarak verilen noktalar uğrayıp kalkış noktasına geri dönme gibi testleri içerir. Diğeri ise daha çok geneleksel sabit kanatlı uçakların geleneksel iniş kalkış, seyir uçuşu gibi testlerini içerir. Bu doğrultuda TURAÇ DİKY İHA platformunun çalışmanın başında hazır olmaması sebebiyle, TURAÇ DİKY İHA itki konfigurasyon (önde tilt edebilen 2 rotor ve gövdede koaksiyel fan) yapısına sahip bir trikopter üretildi. Böylelike çalışmanın daha ilk başlarında uçuş testlerine başlanabilmiş oldu. Bir taraftan havada askıda kalma ve görev bilgisayarından verilen nokların takip edilmesi gibi testler yapılırken, diğer taraftan TURAÇ DİKY İHA prototiplerinin üzerinde çalışılmıştır. Üretilen TURAÇ DİKY İHA'nın 1/2 ölçekli prototpleri ile geleneksel iniş kalkış ve seyir uçuşları test edilmiştir. Gereksinimlerin yerine getirilip getirilmediği ve performans hedeflerini tutturulup tutturulmadığı gözlenmiştir. Gözlemlenen eksiklikler doğrultusunda ana tasarım üzerinde iyileştirmelere gidilmiştir. Geleneksel iniş kalkış denemelerinde ve seyir uçuşu testlerinde çeşitli problemler ile karşılaşılmış ve tasarımda farklılığa gidilerek yeni prototipler denenmiştir. Bu tekrarlamalı süreçte TURAÇ DİKY İHA için 5 farklı tasarım versiyonu ortaya çıkmıştır. Nihayetin gelinen TURAÇ DİKY İHA V5 versiyonu iniş, kalkış ve havada kararlı seyir uçuşunu başarıyla tamamlamıştır. Bu uçuş görevlerinin TURAÇ DİKY İHA V5 1/2 ölçekli prototipleri ile başarılı bir şekilde

Çizelge 8.1: Prototip ve test uçuş sayıları.

Ölçek	Üretilen Prototip Sayısı	Test Uçuşu Tipi	Test Uçuş Sayısı
1/2	4	Konvansiyonel İniş Kalkış	21
1/2	2	Dikey İniş Kalkış	11
1/3	5	Konvansiyonel İniş Kalkış	28
1/3	2	Dikey İniş Kalkış	13
1/3	2	Seyir- Askı Geçiş Uçuşu	5

tamamlanmasının ardından, havada askıda kalma, havada askıda kalma durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi), görev bilgisayarından girilen noktaları takip etme ve diğer geleneksel uçuş görevlerini yerine getirecek testler için TURAÇ DİKY İHA 1/3 ölçekli prototipi hazırlanmıştır. 5. bölümde teorik olarak ele alınan ve senaryosu oluşturulan havada askıda kalma durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) uçuşşarı bu prototip ile başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda bahsilen süreçte Çizelge 8.1'de görüleceği üzere üretilen 15 adet 1/2 ve 1/3 ölçekli prototipin 9 adeti konvansiyonel uçuş testleri, 4 tanesi dikey iniş kalkış testleri, 2 tanesi ise havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) için üretilmiştir.

Şekil 8.1'de TURAÇ DİKY İHA V5 versiyonunun1/3 ölçekli bir prototipini gösterilmektedir. Burada iniş kalkış sırasında aktif olan ana taşıma fanı ve dikey iniş kalkış ve askı durumundan ileri uçuşa geçiş modlarında kullanılan tilt mekanizmaları görünmektedir. Tilt mekanizmaları doğrudan monte edilmiş yüksek-tork dijital servoları ile kontrol edilmektedir. Motor kontrol sistemlerinin otopilotlar tarafından bağımsız olarak sürülmektedir.

Sonuç olarak TURAÇ DİKY İHA'nın dünyadaki performansını test etmek amacıyla,

- Geleneksel İniş Kalkış
- Dikey İniş Kalkış
- Havada askı durumundan seyir uçuşuna geçiş
- Seyir uçuşundan havada askı durumuna geçiş
- Oto pilotlu uçuşlar

başarıyla gerçekleştirilmiştir.



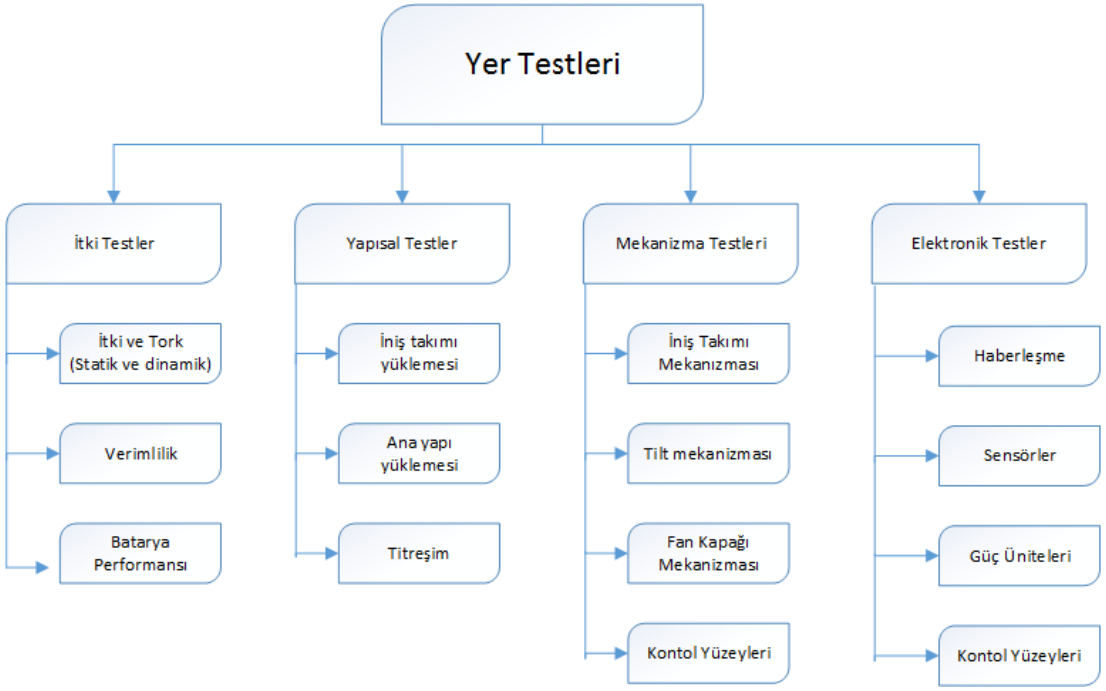
Şekil 8.1: 1/3-ölçekli TURAÇ DİKY İHA prototipi.

8.1 Yer Testleri

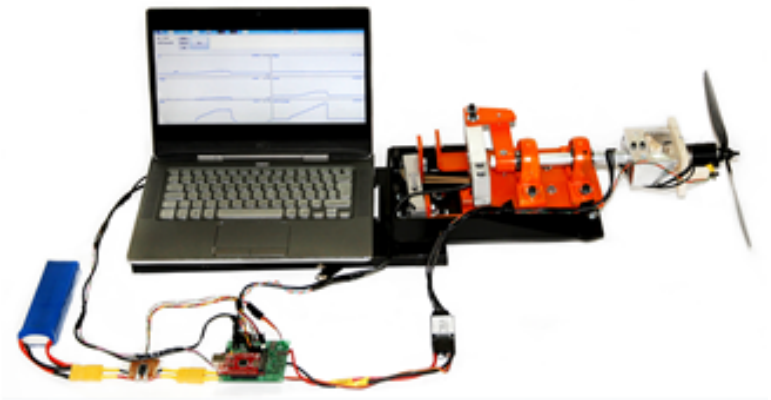
Yer testleri Şekil 8.2'de görüleceği üzere, TURAÇ DİKY İHA'nın mekanik ve aviyonik gibi birçok alt sistemi üzerinde uygulanması hedeflenmiştir. Testler, hem mekanik olarak hem de *hardware in the loop* olarak adlandırılan benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar tasarım ve iyileştirme çalışmarında istenmeyen sistem etkileşimlerini minimize etmek ve sistemin toplam performansını artırmak için kullanılmıştır.

Bilgisayar kontrollü bir itki test düzeniği (Şekil 8.3) itki, tork, RPM, akım, voltaj ve sistemi verimi gibi verileri hassas ve otomatik olarak ölçmek amacıyla tasarlamış ve üretilmiştir. İtki test düzeneğinin tasarım ve üretim aşamaları 4. bölümde ele alınmıştır.

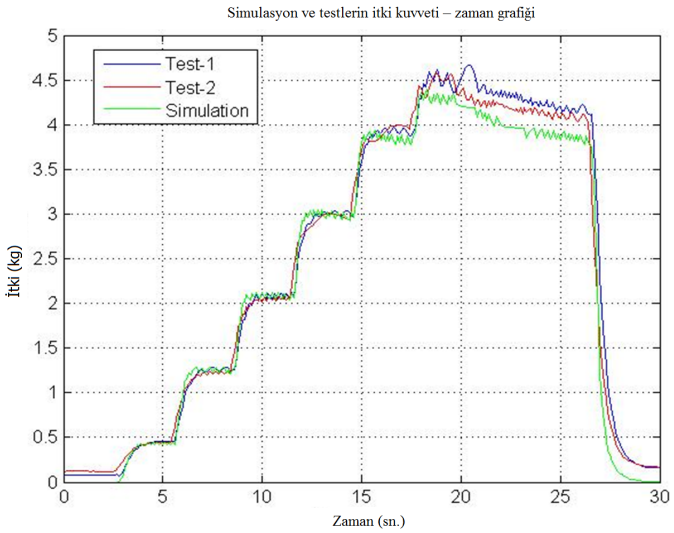
İtki test düzeniğinde otomatik olarak kademe kademe değişen itki değerleri için tork, RPM, PWM, akım, ve voltaj bilgileri kaydedilir. Elde edilen test verileri performans hesaplarında kullanılır. Test verileri Bir Excel dosyasında toplanır ve Şekil 8.4 görüleceği üzere itki test düzeneği yazılımında grafik haline getirilir. Örneğin Şekil 8.4'de T-motor MT3530 fırçasız motoru ve 16x5" karbon pervane için yapılan tekrarlanan itki testleri ve benzetim gösterilmektedir. Simulasyon itki test düzeneği çıktıları kullanılarak modellenmiştir. Tekrarlanan testler, benzetimler ve testlerden farklılık göstermektedir. Testlerin ve benzetimlerin itki verileri, motor en üst kapasitesine çıkarılana kadar birbirine çok yakındır. 20 saniyeden sonra fırçasız



Şekil 8.2: Yer testleri şeması.



Şekil 8.3: İtki test düzeneği.



Şekil 8.4: 1/2-ölçek prototip hava aracı için test sonuçları.

motor ısınır ve bataryanın maksimum boşalma hızı azalır. Bu durumda benzetim ve testler arasındaki fark artar.

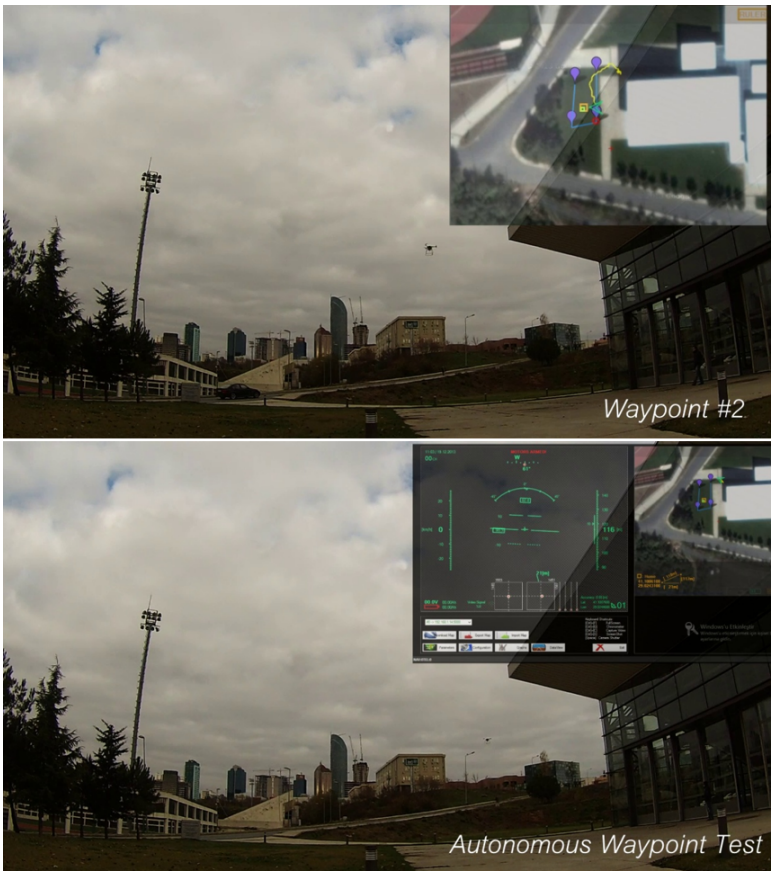
Motor, pervane ve ESC sistemleri için genellikle üretici firmalardan bazı veriler sağlanabilmektedir. Ancak gerçek dünya şartlarında bu verilere ulaşmak mümkün olamamaktadır. 4. bölümde TURAÇ DİKY İHA platformunun farklı ölçekleri için gerekli itki değerleri hesaplanmış ve buna göre piyasadan hazır bulunabilen motor, pervane ve ESC kombinasyonları oluşturulmuştur. İtki test düzeneği ise bu kombinasyonları test edip en doğru kombinasyonu seçerek tekrarlamalı tasarım sürecinin önemli bir parçası olmuştur. İtki sistemlerinin test edilmesinin dışında uçuştan önce TURAÇ DİKY İHA'nın bütün elektronik sistemleri de test edilmiştir.

8.2 Uçuş Testleri

TURAÇ DİKY İHA sisteminin uçuş testleri için iki ana yapı kullanılmıştır. Çalışmanın başlarında havada kalma, havada kalma durumunda ileri uçuşa geçiş, görev bilgisayarından girilen noktarı takip etme, ve aviyonik sistemi test etmek amacıyla TURAÇ DİKY İHA itki konfigurasyonuna sahip bir trikopter üretilmiştir (Şekil 8.5). Bu trikopter de TURAÇ DİKY İHA itki konfigurasyonundaki gibi 2 adet tekli pervane ve 1 adet koaksiyel tersinir dönen çiftli pervane yapısına sahiptir. Böylelikle bu itki konfigurasyonu ve TURAÇ DİKY İHA aviyonik sistemi test edilmiş oldu (Şekil 8.6). Yapılan uçuşlar ile dikey iniş kalkış yapma, verilen notkaları takip etme gibi uçuşlar otonom ve manuel olarak başarıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.5: Trikopter test aracı.



Şekil 8.6: Trikopter test aracı ile yapılan uçuşlar.

Çizelge 8.2: TURAÇ DİKY İHA test uçuşları kayıt şablonu

Tarih/Zaman	Testin gerçekleştiği tarih ve zaman bilgisi
Yer	Testin gerçekleştiği yer bilgisi
Prototip	Testte kullanılan prototipin numarası
Ölçek	Testte kullanılan prototipin ölçeği
Kalkış Ağırlığı	Prototipin toplam kalkış ağırlığı
Ağrılık Merkezi Konumu	Ağırlık merkezinin kontrolü ve kararlılık açısından değerlendirilmesi
Uçuş Öncesi Notlar	Kullanılan sistem, batarya kapasitesi, modifikasyonlar, prototipte yapılmış değişiklikler...
Kontrol Mekanizmaları	Aileron-elevator konfigurasyonu veya elevon konfigurasyonu
Hasar Raporu	Uçuş sonrası oluşan hasarın açıklanması
Tamirat Raporu	Hasar sonrası yapılan tamirat işleminin açıklanması
Test Sonuçu	Test amamçları ve prototipin uçuş karakteristiğinin açıklaması
Görüş ve tavsiyeler	Uçuş alanındaki ilk değerlendirmeler
Uçuş test videosu	Numaralandırılmış ve düzenlenmiş uçuş videoları
Fotoğraflar	Uçuş öncesi fotoğraflar (sistem yerleşimi, uçuş, hasar, vb.)

Diğer taraftan çalışmanın başlangıç aşamasında TURAÇ DİKY İHA sisteminin gövdedeki ana rotor kısmı olmayan versiyonunun (sabit kanatlı geleneksel İHA) 1/2 ölçekli prototipi geleneksel iniş kalkış ve seyir uçuşu testleri için hazırlandı. Çizelge 8.2'de her uçuş testi için kullandığımız test uçuşları kayıt şablonu gösterilmektedir. Test öncesi, sistem ölçeği, uçakta kullanılan teçhizat, itki konfigurasyonu, ağırlık merkezi konumu kaydedilirken, uçuş sonrası uçuş ile ilgili genel düşünce ve bir sonraki uçuş için tavsiyeler not edildi.

Uçuş testleri alt sistemlerde iyileştirmeler / değişiklikler yaptıktan sonra tüm sistemin performansını analiz etmek için kullanılmıştır. Ayrıca TURAÇ performans hesaplamalarının uçuş testleri ile doğrulanması gerekmektedir. Uçuş testleri kapsamında kısa mesafa iniş kalkış testleri, dikey iniş kalkış testleri, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş testleri (ve tersi) gerçekleştirilmiştir. Bütün uçuş testleri, test bütçesinden tasarruf etmek için 1/2 ve 1/3 ölçekli prototipler ile gerçekleştirilmiştir. Prototipler, özellikle TURAÇ platformu için geliştirilmiş aviyonik



Şekil 8.7: 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı ileri uçuş testi.



Şekil 8.8: 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı dikey iniş ve kalkış testi.

sistemle donatılmıştır. Prototipler için T-Motor 3530 motorları, Master Air Screw'in 12x7" 3- Blade pervaneleri ve T-motor 40A ESC'leri kullanılmıştır.

Hezarfen Havaalanında başarıyla gerçekleştirilen bir ileri uçuş testi Şekil 8.7'de görülmektedir. Ayrıca tilt mekanizmaları içeren bir prototip başarı ile gerçekleştirilen dikey iniş kalkış testi Şekil 8.8'de sunulmaktadır. Dikey iniş kalkış testleri için kullanılan 1/3 ölçekli prototipte özel tilt mekanizmaları ve ayrıca gövdedeki ana taşıyıcı fan için 12x7" 3-blade tersinir dönen pervaneler ve bağımsız ESC'ler kullanıldı. Dikey iniş kalkış testleri, İstanbul Teknik Üniversitesi yerleşkesinde gerçekleştirildi.

Havada askı durumunda ileri uçuşa geçiş (ve tersi) uçuşu, sabit kanatlı bir DİKY İHA için en önemli ve en zor uçuştur. Bu geçiş uçuşu çok dinamik olarak çok karmaşıktır ve uçuş rejimi açısından kontrol edilebilmesi için otopilot gerektirmektedir. Geçiş uçuşu kontrol sistemi kullanarak çeşitli askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) testleri Şekil 8.9'de görüleceği üzere başarıyla test edildi.



Şekil 8.9: 1/3-ölçek TURAÇ prototipi başarılı askı uçuşundan ileri uçuşa (ve tersi) geçiş testi.

Geleneksel iniş kalkış ve seyir uçuşu için gerçekleştirdiğimiz testlerde öncelikli olarak kalkış aşamalarında problem ile karşılaşıldı. Uçak piste bir miktar koştuktan sonra havalanıyor ancak hemen ardından burun aşağı vererek çakılıyordu. Bu tarz çarpmalarda hasar bazen kolayça onarılabilecek türde olurken bazen uçakta çok büyük hasarlara sebebiyet veriyordu. 2. bölümde ele alınan kanat profilleri üzerinde yapılan analizler neticesinde uçuşun büyük bir kısmında burun aşağı moment oluşturmayacak kanat profillerine geçildi. Ayrıca itki vektörünün ağırlık merkezinin altında kalmasına özen gösterildi. Bu hususlar göz önünde bulundurularak yapılan değişiklikler ile bu sorun çözüldü. Bu uçuşlarda gözlenen dğer bir problem ise ağırlık problemidir. Üretilen ilk prototiplerde ağırlık öngörülenden daha fazla çıkmıştır. 7. bölümde anlatılan ve geliştirilen üretim yöntemi farkı strafor malzemeleri denenerek ve bu yöntemin her yeni uygulanışında daha fazla tecrübeye sahip olunarak bu sorun da aşılmıştır. Uçuş testlerinde karşılaşılan diğer bir sorun ise iniş takımı problemidir. Piyasada hazır olarak alınan iniş takımları 1/2 ölçekli uçağın ağırlığını taşımak için yeterli gelmemiştir. Uçak pistte koşu yaparken defalarca iniş takımında kırım yaşanmıştır. Bu problem ise 7. bölümde anlatılan TURAÇ DİKY İHA platformu için tasarlanan iniş takımını 3D basım yöntemiyle hızlı bir şekilde üretimiyle aşılmıştır. Uçuş testlerinde ayrıca motorlar ile ilgili problemler yaşanmıştır. Motor üreticilerinin vermiş olduğu verilere göre yeterli olması gereken motorlar uçuş esnasında yanmıştır. Bu problemi aşmak için 4. bölümde tasarımı ve üretimi anlatılan itki test düzeneğinde motor, pervane ve ESC sistemleri TURAÇ DİKY İHA platformuna entegre edilmeden önce test edilmiştir.

Uçuş testlerinin sonuçları bu tezde ele alınan bütün bölümler için önemli bir veri olmuştur. 7. bölümde anlatılan ucuz maliyetli üretim yöntemi sayesinde uçuş testleri yapısal ve aerodinamiksel analizlerle beraber tekrarlamalı tasarım sürecinde tasarımın geliştirilmesinin bir parçası olmuştur.

9. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında, sivil ihtiyaçlar göz önünde bulundurularak önerilen dikey iniş kalkış yapabilen, havada askıda kalabilen, sabit kanatlı insansız hava aracı için hem aerodinamik ve yapısal analizleri içeren teorik hem de yer ve uçuş testlerini içeren deneysel çalışmaları kapsayan bir tasarım metodolojisi geliştirilmiştir. Uçuş süresini en iyilemek için aerodimik verimliği yüksek tümleşik gövde-kanat yapısında uçan kanat konsepti kullanılmıştır. Uçan kanat konseptiyle beraber önerilen itki konfigurasyonu ile TURAÇ DİKY İHA platformu tamamen özgün ve rakiplerine göre önemli avantajlara sahip bir tasarıma ulaşmıştır. Önerilen konsepte gövdede eş-eksel çalışan çift motorlu bir fan sistemi ve önlerde tilt eden iki motor sistemi bulunmaktadır. Bu itki sistemi sayesinde trikopter konseptindeki hava araçlarında karşılaşılan ortaya çıkan ek momentin dengelenmesi problemi bizim itki konfigurasyon sisteminde karşımıza çıkmamıştır. Dikey iniş kalkış yapma ve havada askıda kalma uçuşlarında gövdede bulunan ana rotor sitemi gereli taşımanın % 70'ini önlerde bulunan tilt edebilen rotorlar ise %15 - % 15 toplamda % 30'luk kısmı karşılamıştır. İleri uçuş safhasında ise ana motor tamamen kapatılmış ve gerekli itki %50 - %50 oranında öndeki rotor sistemleri ile sağlanmıştır. Gerekli itkinin sağlanmasında uygulanan bu itki dağılım oranları itkinin ağırlığa oranını (T/W) her uçuş fazı için istenilen oranda olmasını sağlamıştır. Bu enerjinin etkin kullanımı anlamında önemli bir avantaj sağlamıştır. Yukarıda bahsedilen avantajları barındıran TURAÇ DİKY tasarımın performans sonuçları bu alandaki rakiplerine göre avantajlı bir yer sağlamıştır.

Geliştirelen sistemin proje ekibiyle beraber yapısal ve aerodinamiksel sistem mühendiliği çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aerodinamiksel analizler tasarım ve dinamiksel modellemelerde kullanıldığı gibi yapısal analizlerinde giriş verisini oluşturmuştur. Yapısal analizler yapısal olarak güvenli bölgede olduğumuzu ortaya koymuştur. Aerodinamiksel analizlerin sonuçları tekrarlamalı tasarım sürecinde kullanılmıştır. Bütçe kısıtları göz önünde bulundurulduğunda üretim yönteminin ve motor- pervane- ESC seçimlerinin uygun maliyetli olması tasarım kriteri

olarak karşımıza çıkmıştır. Yukarıda bahsedilen itki konfigurasyonunun elemanları piyasadan uygun fiyata hazır olarak satın alınabilecek ürünler içerisinden seçilmiştir. Motor-pervane-ESC kombinasyonlarının performans değerlendirmeleri tasarlanıp üretilen itki düzeneğinde test edilmiştir. Böylelikle gerçek şartlar altındaki performans verilerine daha gerçekçi olarak bir yaklaşım sağlanmıştır.

TURAÇ DİKY İHA sistemi için özgün bir hızlı ve ekin protopleme yönetemi geliştirilmiştir. 1/2 ve 1/3 ölçeklerinde farklı prototipler üretilmiştir. Bu prototipler ile yapılan uçuşların performansına bağlı olarak tasarım sürecinin bir sonraki adımında iyileştirilmeler yapılmış ve farklı TURAÇ versiyonları üretilmiştir. En son tasarım olan TURAÇ V5 ile en başarılı sonuçlar elde edilmiştir. TURAÇ DİKY İHA platformunun alt sistemlerinin oluşturan parçalar 3 Boyutlu baskı sistemi ile üretilmiştir.

TURAÇ DİKY İHA için özgün bir yaklaşımla 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan model oluşturulmuştur. Havada askıda kalma durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) durumu için senaryolar oluşturulmuştur ve uçağın bu fazda yapacağı manevra çıkartılmıştır. Bu manevra senaryosu öncüllüğünde uçuş kontrol algoritması oluşturulmuş ve öngörülen manevranın simulasyonu başarıyla gerçekleştrilmiştir.

TURAÇ DİKY İHA proje ekibi tarafından tasarlanıp üretilen aviyonik, uçuş kontrol, yer istasyonu ve faydalı yük sistemleri bu platform üzerinde başarıyla test edilmiştir.

TURAÇ DİKY İHA sisteminin test uçuşları İTÜ Stadyumu ve Hazerfan Hava Alanında gerçekleştirilmiştir. Dikey iniş kalkış ve havada askıda kalma testleri ilk olarak TURAÇ DİKY İHA'nın itki konfigurasyonuna sahip trikopter üzerinde başarıyla test edilmiştir. Sonrasında gövde ve kanatları da bulunan 1/3 ölçekli prototip ile dikey iniş kalkış, havada askıda kalma, havada askı durumundan ileri uçuşa geçiş (ve tersi) testleri başarı ile gerçekleştirilmiştir. Öteki taraftan daha büyük bir platform olan 1/2 ölçekli TURAÇ prototipi ile ileri uçuş testleri güvenlik gerekçesi ile Hazerfan Havaalanı'nda gerçekleştirilmiştir. İlk TURAÇ versiyonlarının uçuşlarında görülen burun aşağı moment problemi yeni kanat profile seçimi ve itki vektörünün ağırlık merkezinin aşağısında kalması sağlanarak çözülmüştür ve başarılı uçuşlar gerçekleşmiştir.

9.1 Gelecek Çalışmaları

Bu tez kapsamında nihai olarak ulaşılan TURAÇ DİKY İHA platformu ile hedeflenen uçuş görevleri başarı ile gerçekleştirilmiştir. Bu proje kapsamında gerek üretim yöntemi gerekse motor- pervane seçimlerinde uygun fiyat belirleyici olmuştur. Ancak DİKY konseptinde hava aracının ağırlığı, motor performansı ve enerji kullanımı kilit noktalardır. Üretim yönteminde daha maliyetli olmasına rağmen daha profesyonel yöntemlerin çalışılması platformun ağırlığını azaltacak ve dolayısıyla daha uzun havada kalma süresi elde edilecektir. Benzer şekilde tasarımın ihtiyaç duyduğu motor, pervane ve ESC'nın sistem için özel olarak çalışılması enerji verimliğini ve uçuş performansını artıracaktır.

Maliyet odaklı mevcut kullanılan üretim yöntemi ve piyasadan hazır olarak satın alınan motor, pervane ve ESC'ler ile ancak 1/2 ölçekli prototip ile çalışmak mümkün iken, performans odaklı üretim yöntemi ve özel üretim motor, pervane ve ESC'ler ile tam ölçü modelin üretilip test edilmesi mümkün olacaktır.

DİKY İHA sistemleri özellikle havada askıda kalma, dikey iniş kalkış yapma fazlarında çok fazla enerji gerektirmektedir. Dolayısıyla sunulan enerji yoğunluğunun ve bunun yönetiminin DİKY İHA sistemleri için kritik bir yeri vardır. Her geçen gün güncel batarya teknolojisinin enerji yoğunluğu daha yüksek ürünler sunması, havada kalma süresi anlamında daha olumlu veriler sunacaktır. Ancak platform büyüdükçe batarya teknolojisinin olanakkarının sınırlarına yaklaşılmaktadır. Böyle bir durumda yakıt pili teknolojisinin uygun çözümlerin sunacağı öngörülmektedir.

Ayrıca platformun rüzgar tüneli testlerin gerçekleştirilmesi tasarım ve analiz açısından önemli veriler sağlayacaktır. Benzer şekilde uçan platform üzerinden toplanacak detaylı bilgiler tasarımın iyileştirilmesine yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR

[1] **Frost ve Sullivan** (2007). Study Analysing the Current Activities in the Field of UAV.

[2] **Sarris, Z.** (2001). Survey of UAV applications in civil markets, *Proceedings of the IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation*.

[3] **Quick, D.** (2010). Isreal Aerospace Industries Unveils Tilt-rotor Panther UAV Platform, *AERO GIZMO*.

[4] **Dhaliwal, S.**, (2009). Control of an Unconventional Double-Ducted Fan VTOL UAV for Obstructed Environments using the MARC System, *Yüksek Lisans Tezi*, University of Calgary, Canada.

[5] **Zongjian, L.** (2008). UAV for mapping - low altitude photorammetric survey, the international archives of the photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XXXVII Part B1*.

[6] **Watts, A.C., v.d.** (2010). Small unmanned aircraft systems for low-altitude aerial surveys, *The Journal of Wildlife Management*, *74*(4), 1614–1619.

[7] **Puri, A.** (2005). Survey of Unmanned Aerial Vehicles for Traffic Surveillance, University of South Florida.

[8] **Charlie, J.K., v.d.** (2009). Monitoring effects of a controlled subsurface carbon dioxide release on vegetation using a hyperspectral imager, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, ***3***(5), 626–632.

[9] **Mitchell, J.v.d.** (2012). Unmanned aerial vehicle (UAV) hyperspectral remote sensing for dryland vegetation monitoring, *Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2012 4th Workshop on*, Shangai.

[10] **Jay, S., v.d.** (2009). Invasive species mapping using low cost hyprspectral imagery, *ASPRS 2009 Annual Conference*, Baltimore, Maryland.

[11] **Nansen, C., v.d.** (2010). Variogram analysis of hyperspectral data to characterize the impact of biotic and abiotic stress of maize plants and to estimate biofuel potential, *Applied Spectroscopy*, *64*(6), 627–636.

[12] **Tindall, J.** (2006). Deconvolution of plant types for homeland security enforcement using remote sensing on a UAV collection platform, *Geological Survey Denver Co.*

[13] **Dervishsefat, A.A., v.d.** (2002). Application of hyperspectral data for forest stand mapping, *Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications*, Ottowa.

[14] **Tuominen, J., v.d.** (2011). Detection of environmental change using hyperspectral remote sensing at Olkiluoto repository site, *Working Report*, Finland.

[15] **Salem, F., v.d.** (2001). Hyperspectral image analysis for oil spill mitigation, *22nd Asian Conference on Remote Sensing*, Singapore.

[16] **Foy, B.**, (2005). Hover Controls for a Unique Small Scale Thrust Reversing UAV, *Yüksek Lisans Tezi*, Univeristy of Colorado, USA.

[17] **Mineck, R.E., v.d.** (1973). Aerodynamic Characteristics of a Vectored-Thrust V/STOL Fighter in the Transition-Speed Range, *NASA TN D-7191*.

[18] **Kottapalli, S.** (1998). Neural Network Research on Validating Experimental Tilt-Rotor Performance, *AIAA Journal*, 137–160.

[19] **Kottapalli, S., v.d.** (2000). Neural Network Representation of Experimental Tilt-Rotor Noise, *AIAA Journal*, 1–12.

[20] **Okan A., v.d.** (1999). Flight Mechanics Analysis of a Tilt Rotor UAV, *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, Portland, OR, USA.

[21] **Ahn, O., v.d.** (2010). Smart UAV Research Program Status Update: Achievement of Tilt-Rotor Technology Development and Vision Ahead, *ICAS 2010, 27th International Congress of the Aeronautical Sciences*.

[22] **Smith, K.R., v.d.** (1974). Small V/STOL Aircraft Analysis, *NASA Report CR-2425*, *1*.

[23] **Zhao, H.**, (2009). Development of a Dynamic Model of a Ducted Fan VTOL UAV, *Yüksek Lisans Tezi*, RMIT University, Australia.

[24] **Johnson, W.** (2010). NDARC - NASA design and analysis of rotorcraft theoritical basis and architechture, *NASA Ames Research Center, American Helicopter Society Aeromechanics Specialist's Conference*, San Francisco, CA.

[25] **Gur, O., v.d.** (2009). Optimizing Electric Propulsion Systems for Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Aircraft*, *46*(4), 1340–1353.

[26] **Bitzer, T.** (1997). *Honeycomb Technology Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing*, Chapman & Hall.

[27] **Nelson, R.C.** (1998). *Flight Stability and Automatic Control*, McGraw-Hill.

[28] **Blakelock, J.H.** (1991). *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, John Wiley & Sons.

[29] **Yechout, T.R.** (2003). *Introduction to Aircraft Flight Mechanics*, AIAA Education Series.

[30] **Ozdemir, U., v.d.** (2014). Design of a commercial hybrid VTOL UAV system, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, *74*, 371–393.

[31] **Aktas, Y. O., v.d.** (2014). A low cost prototyping, analyzing and flight testing for the TURAC VTOL UAV, *ICUAS 2014*.

[32] **AGARD** (1968). The Aerodynamics of V/STOL Aircraft, *AGARDogrph*.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Uğur ÖZDEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi: Sivas, 1981

E-Posta: ugur.ozdemir@itu.edu.tr

Lisans: Uçak Müh. (İTÜ)

Y. Lisans: Uçak ve Uzay Müh. (İTÜ)

Yayın ve Patent Listesi:

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ **Ugur Ozdemir**, Yucel Orkut Aktas, Aslihan Vuruskan, Yasin Dereli, Ahmed Farabi Tarhan, Karaca Demirbag, Ahmet Erdem, Ganime Duygu Kalaycioglu, Ibrahim Ozkol, Gokhan Inalhan,"Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System", Journal of Intelligent & Robotic Systems, 10.1007/s10846-013-9900-0, (2013).

▪**Ugur Ozdemir**, Yucel Orkut Aktas, Karaca Demirbag, Ahmet Erdem, Ganime Duygu Kalaycioglu, Ibrahim Ozkol, Gokhan Inalhan, "Design of a Commercial Hybrid VTOL UAV System", ICUAS'13 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Atlanta, Georgia, USA, 28-31 May 2013.

▪ Yucel Orkut Aktas, **Ugur Ozdemir**, Yasin Dereli, Ahmet Farabi Tarhan, Aykut Cetin, Aslihan Vuruskan, Burak Yuksek, Hande Cengiz, Serkan Basdemir, Mesut Ucar, Murat Genctav, Adil Yukselen, Ibrahim Ozkol, Metin Orhan Kaya, Gokhan Inalhan, "A low cost prototyping approach for design analysis and flight testing of the TURAC VTOL UAV", Journal of Intelligent & Robotic Systems (değerlendirme aşamasında.)

▪ Aslihan Vuruskan, Burak Yuksek, **Ugur Ozdemir**, Adil Yukselen, Gokhan Inalhan, "Dynamic Modeling of a Fixed-Wing VTOL UAV", Journal of Intelligent & Robotic Systems (değerlendirme aşamasında.)

▪Yucel Orkut Aktas, **Ugur Ozdemir**, Yasin Dereli, Ahmet Farabi Tarhan, Aykut Cetin, Aslihan Vuruskan, Burak Yuksek, Hande Cengiz, Serkan Basdemir, Mesut Ucar, Murat Genctav, Adil Yukselen, Ibrahim Ozkol, Metin Orhan Kaya, Gokhan Inalhan, "A low cost prototyping approach for design analysis and flight testing of the TURAC VTOL UAV", International Conference on Unmanned Aircraft System (ICUAS 2014), May 2014

▪ Aslihan Vuruskan, Burak Yuksek, **Ugur Ozdemir**, Adil Yukselen, Gokhan Inalhan, "Dynamic Modeling of a Fixed-Wing VTOL UAV", International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), May 2014

▪ Burak Yüksek, **Uğur Özdemir**, Gökhan İnalhan, "TURAÇ İnsansız Hava Aracının Yuvarlanma Hareketi için Oransal ve Uyarlamalı Denetleyici Tasarımı", Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK), Eylül 2014.

▪ Aslıhan Vuruşkan, **Uğur Özdemir**, M. Adil Yükselen, Gökhan İnalhan, "Dikey İniş Kalkış Yapabilen bir İnsansız Hava Aracının (TURAÇ) Aerodinamik Analizi", V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK), Eylül 2014

▪ Dereli, Y., Vuruskan, A., **Özdemir, U.**, Kaya, M. O., İnalhan, G., "Uçan Kanat Hava Aracı Turaç' ın Yapısal Analizleri", V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı (UHUK 2014), Eylül 2014

▪ Y. Dereli, **U. Özdemir**, M. O. Kaya, G. İnalhan, "Turaç İnsansız Hava Aracının Serbest Titreşim Analizi", UHAT 2013-II. Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi, 29-30 Kasım 2013.

▪Vuruşkan, A., **Özdemir, U.**, Yükselen, M. A., İnalhan, G.,"Dikey İniş Kalkış Yapabilen İnsansız Hava Aracı'nın (TURAÇ*) ,Girdap Kafes Yöntemi ile Aerodinamik Analizinin Yapılması", II. Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi (UHAT 2013), İzmir, 29-30 Kasım, 2013.