ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN İNSANSIZ HAVA ARACININ HAREKETLİ PLATFORMLARA OTONOM İNİŞİ

Gökhan GÜLMEZ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2023

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DİKEY İNİŞ KALKIŞ YAPABİLEN İNSANSIZ HAVA ARACININ HAREKETLİ PLATFORMLARA OTONOM İNİŞİ

Gökhan GÜLMEZ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ökkeş Tolga ALTINÖZ

Bu tez kapsamında, dikey iniş kalkış yapabilen bir İHA'nın hareketli platformlara otonom inişi için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu çözüm takip, hassas takip ve iniş aşamalarından oluşmaktadır. Bu çalışma, randevu alanına varmış bir İHA ve randevu alanında olduğu bilinen bir hareketli platform ile başlamaktadır. İniş platformunun tespitiyle takip aşamasına geçilmektedir. Hedef koordinat bilgileri kullanılarak İHA'nın iniş platformuna yönelimi sağlanmaktadır. Hareketli iniş platformuna ulaşılması sonucunda ise hassas takip aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada ise sabit bir irtifada belirli bir süre platformun takibi sağlanmaktadır. İniş aşamasına geçildiğinde ise *x* ve *y* ekseni pozisyon kontrolleri devam ederken, irtifa sabit bir hız ile güvenli serbest düşme noktasına kadar düşürülmektedir. Güvenli serbest düşme irtifasına ulaşıldığında tüm İHA rotorları durdurularak otonom inişin başarıyla tamamlanması sağlanmaktadır. Bu çalışma ile önce benzetim ortamında İHA'nın hareketli bir platforma iniş yapması sağlanmış; daha sonra ise gerçek bir İHA ve hareketli platform kullanılarak uygulama çalışmasında otonom inişin tamamlanması sağlanmıştır. Geliştirilen çözüm; çeşitli hareketli platform yörüngeleri (doğrusal veya dairesel), hızları (25 *cm/s* ya da 50 *cm/s*) ve rüzgâr etkileri altında test edilmiştir. İHA kontrolü için *PD* denetleyiciler kullanılmıştır. Bir diğer taraftan uygulama çalışmasında konum bilgilerinin elde edilebilmesi için ArUco işaretçiler kullanılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmayla dikey iniş kalkış yapabilen İHA'ların otonomi kabiliyetini arttıran, görev ve menzil kapasitelerini yükselten bir hareketli platforma otonom iniş mimarisi ortaya konulmuştur. Hem benzetim hem de uygulama çalışmalarında elde edilen bulgular doğrultusunda hareketli bir iniş platformuna otonom inişin önerilen çözüm ile mümkün olduğu ortaya konulmuştur.

Ocak 2023, 117 sayfa
Anahtar Kelimeler: Otonom İniş, İHA, ArUco Tespit, PD Kontrol, Uçuş Kontrol

ABSTRACT

Master Thesis

AUTONOMOUS LANDING OF A VTOL UAV ON A MOVING PLATFORM

Gökhan GÜLMEZ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Associate Professor Ökkeş Tolga ALTINÖZ

In this study, a control strategy has been developed for autonomous landing of an UAV that is capable of vertical landing and take-off on a moving platform. This study consists of tracking, precise tracking and landing stages. This study starts with a UAV that has arrived at the rendezvous area and a moving platform known to be in the rendezvous area. After landing platform detection, tracking stage is started. Thus the movement of the UAV to the landing platform is provided by using target coordinate information's. After reducing the distance between the landing platform and the UAV sufficiently, the precise tracking phase is started. At this stage, the platform is followed at a fixed altitude for a certain period of time. When the landing stage is started, the altitude is lowered to the safe free fall point while the *x* and *y* axis position controls continue. When the safe free fall altitude is reached, all UAV rotors are stopped and the autonomous landing is completed successfully. With this study, firstly, the UAV is landed on a moving platform in the simulation environment. Then, the application of the study was carried out in a real test environment using a real UAV and a moving platform. The developed solution is tested under various moving platform trajectories (linear or circular), velocities (25 *cm/s* or 50 *cm/s*) and wind effects. *PD* controllers are used for UAV control. On the other hand, ArUco tags were used to obtain position information in the application study. With the study carried out in this context, an autonomous landing architecture on a mobile platform that increases the autonomy capability of vertical landing and take-off UAVs and increases their mission and range capacities has been revealed. In line with the results obtained in both simulation and application studies, it has been revealed that autonomous landing on a mobile landing platform is possible with the proposed solution.

January 2023, 117 pages

Key Words: Autonomous Landing, UAV, ArUco Detection, *PD* Control, Flight Control

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca her zaman bana yol gösteren, verdiği tavsiyeler ve kıymetli yönlendirmeleri doğrultusunda hem akademik hem de mesleki anlamda gelişmemi sağlayan çok değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Ökkeş Tolga ALTINÖZ'e, hayatımın her anında desteklerini her zaman sağlayan ve yüksek lisans eğitimimdeki yoğun dönemleri aşmamda büyük etkileri olan çok kıymetli annem Naciye GÜLMEZ'e, babam Ahmet GÜLMEZ'e ve kardeşim Hakan GÜLMEZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Gökhan GÜLMEZ
Ankara, Ocak 2023

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER DİZİNİ ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçlar **1**
1.2 Literatür Araştırmaları **2**
1.3 Tezin Amacı ve Önemi **4**
2. MATERYAL VE YÖNTEM **7**
2.1 Dört Rotorlu İHA'nın Matematiksel Modeli **7**
2.1.1 Referans çerçeveler **7**
2.1.2 Euler açıları **8**
2.1.3 Dört rotorlu İHA'nın temel hareketleri **9**
2.1.4 Dört rotorlu İHA kinematiği **13**
2.1.5 Dört rotorlu İHA dinamikleri **15**
2.1.6 Dört rotorlu İHA'nın durum uzay modeli **19**
2.2 Dört Rotorlu İHA Kontrolü **21**
2.2.1 PD kontrol **21**
2.2.2 Dört rotorlu İHA durum ve pozisyon kontrolü **22**
2.3 Kamera Modeli ve Poz Kestirimi **27**
2.3.1 İğne deliği kamera modeli **28**
2.3.2 Diğer kamera içsel parametreleri **30**
2.3.3 Kamera dışsal parametreleri **31**
2.3.4 İğne deliği kamera modeli genel eşitliği **32**
2.3.5 ArUco işaretçiler ile kamera poz kestirimi **33**
3. ARAŞTIRMA BULGULARI **38**
3.1 Benzetim Çalışması **38**
3.1.1 Benzetim çalışması sistem mimarisi **38**
3.1.2 Benzetim çalışmasına rüzgâr modelinin dahil edilmesi **45**
3.1.3 Benzetim çalışması senaryoları **50**
3.1.3.1 25 cm/s hızla doğrusal yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş **50**
3.1.3.2 50 cm/s hızla doğrusal yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş **55**
3.1.3.3 25 cm/s hızla dairesel yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş **59**
3.1.3.4 50 cm/s hızla dairesel yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş **63**
3.1.3.5 Benzetim çalışmasındaki diğer senaryolar (oransal seyir güdümü) **67**

3.2 Uygulama 68
3.2.1 DJI Ryze Tello 69
3.2.2 Hareketli iniş platformu 71
3.2.3 Uygulama sistem mimarisi 75
3.2.4 İHA ve hareketli iniş platformu konum bilgilerinin dünyaya sabit ataletsel çerçeveye göre elde edilmesi 88
3.2.5 Uygulama senaryoları 90
4. TARTIŞMA VE SONUÇ 102
4.1 Benzetim Çalışmasında Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi 103
4.1.1 Benzetim çalışmasındaki senaryo 1.a, senaryo 1.b ve senaryo 1.c test sonuçlarının değerlendirilmesi 103
4.1.2 Benzetim çalışmasındaki senaryo 2.a, senaryo 2.b ve senaryo 2.c test sonuçlarının değerlendirilmesi 105
4.1.3 Benzetim çalışmasındaki senaryo 3.a, senaryo 3.b ve senaryo 3.c test sonuçlarının değerlendirilmesi 106
4.1.4 Benzetim çalışmasındaki senaryo 4.a, senaryo 4.b ve senaryo 4.c test sonuçlarının değerlendirilmesi 107
4.2 Uygulamada Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi 108
4.2.1 Uygulama bölümündeki senaryo 1.a ve senaryo 1.b test sonuçlarının değerlendirilmesi 108
4.2.2 Uygulama bölümündeki senaryo 2.a ve senaryo 2.b test sonuçlarının değerlendirilmesi 109
4.3 Benzetim Çalışması ve Uygulamada Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılm .. 110
KAYNAKLAR 114
ÖZGEÇMİŞ 117

SİMGELER DİZİNİ

W_F	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeve
x_w	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeve *x* Ekseni
y_w	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeve *y* Ekseni
z_w	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeve *z* Ekseni
D_F	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi
x_D	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *x* Ekseni
y_D	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *y* Ekseni
z_D	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *z* Ekseni
ϕ	Yatma Açısı
θ	Yunuslama Açısı
ψ	Sapma Açısı
U_1	İtki Denetim Sinyali
U_2	Yatma Denetim Sinyali
U_3	Yunuslama Denetim Sinyali
U_4	Sapma Denetim Sinyali
Γ	Doğrusal Konum Vektörü
x	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeveye Göre İHA *x* Ekseni Konumu
y	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeveye Göre İHA *y* Ekseni Konumu
z	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeveye Göre İHA *z* Ekseni Konumu
Θ	Açısal Pozisyon Vektörü
V	Doğrusal Hız Vektörü
Ω	Açısal Hız Vektörü
u	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *x* Ekseni Doğrusal Hızı
v	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *y* Ekseni Doğrusal Hızı
w	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi *z* Ekseni Doğrusal Hızı
p	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi Yatma Açısal Hızı
q	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi Yunuslamma Açısal Hızı
r	Dört Rotorlu İHA Gövde Çerçevesi Sapma Açısal Hızı

$R(\Theta)$	Rotasyon Matrisi
$T(\Theta)$	Translasyonel Matris
k	İtme Faktörü
F_i	i. motor tarafından üretilen itme kuvveti
Ω_i	i. motor dönüş hızı
T_B	Toplam İtki Vektörü
T_x	*x* Ekseni Toplam İtki
T_y	*y* Ekseni Toplam İtki
T_z	*z* Ekseni Toplam İtki
τ_B	Toplam Tork Vektörü
τ_ϕ	Yatma Torku
τ_θ	Yunuslama Torku
τ_ψ	Sapma Torku
d	Sürüklenme Faktörü
L	Dört Rotorlu İHA Kol Uzunluğu
g	Yerçekimi
τ_G	Jiroskopik Tork
I	Ataletsel Moment Vektörü
I_{xx}	*x* Ekseni Ataletsel Momenti
I_{yy}	*y* Ekseni Ataletsel Momenti
I_{zz}	*z* Ekseni Ataletsel Momenti
$\ddot{x}$	İHA *x* Ekseni Doğrusal İvmesi
$\ddot{y}$	İHA *y* Ekseni Doğrusal İvmesi
$\ddot{z}$	İHA *z* Ekseni Doğrusal İvmesi
$\ddot{\phi}$	İHA Yatma Açısal İvmesi
$\ddot{\theta}$	İHA Yunuslama Açısal İvmesi
$\ddot{\psi}$	İHA Sapma Açısal İvmesi
u_x	*x* Ekseni Konum Denetim Sinyali
u_y	*y* Ekseni Konum Denetim Sinyali
u_z	*z* Ekseni Konum Denetim Sinyali
x_t	*x* Ekseni Hedef Konum İsteri

y_t	*y* Ekseni Hedef Konum İsteri
z_t	*z* Ekseni Hedef Konum İsteri
ϕ_t	Hedef Yatma Açı İsteri
θ_t	Hedef Yunuslama Açı İsteri
ψ_t	Hedef Sapma Açı İsteri
e_x	*x* Ekseni Konum Hatası
e_y	*y* Ekseni Konum Hatası
e_z	*z* Ekseni Konum Hatası
e_ϕ	Yatma Açı Hatası
e_θ	Yunuslama Açı Hatası
e_ψ	Sapma Açı Hatası
K_{Px}	*x* ekseni Oransal Kontrol Katsayısı
K_{Py}	*y* ekseni Oransal Kontrol Katsayısı
K_{Pz}	*z* ekseni Oransal Kontrol Katsayısı
$K_{P\phi}$	Yatma Açısı Oransal Kontrol Katsayısı
$K_{P\theta}$	Yunuslama Açısı Oransal Kontrol Katsayısı
$K_{P\psi}$	Sapma Açısı Oransal Kontrol Katsayısı
K_{Dx}	*x* ekseni Türevsel Kontrol Katsayısı
K_{Dy}	*y* ekseni Türevsel Kontrol Katsayısı
K_{Dz}	*z* ekseni Türevsel Kontrol Katsayısı
$K_{D\phi}$	Yatma Açısı Türevsel Kontrol Katsayısı
$K_{D\theta}$	Yunuslama Açısı Türevsel Kontrol Katsayısı
$K_{D\psi}$	Sapma Açısı Türevsel Kontrol Katsayısı
x	Nesnenin Görüntü Düzlemindeki Görüntüsü (x Ekseni)
X	Nesne Uzunluğu (x Ekseni)
y	Nesnenin Görüntü Düzlemindeki Görüntüsü (y Ekseni)
Y	Nesne Uzunluğu (y Ekseni)
f	Odak Uzunluğu
Z	Kamera – Nesne Arası Mesafe
c_x	Kamera Merkezi x ekseni Offseti
c_y	Kamera Merkezi y ekseni Offseti

$\vec{p}$	Piksel Kordinatları
M	Kamera İçsel Parametre Matrisi
$\vec{P}$	Nesne Kordinatları
C_F	Kamera Referans Çerçevesi
$P_{0_{C_F}}$	Kamera Referans Çerçevesine Göre Nesne Koordinatları
P_0	Dünyaya Sabit Ataletsel Çerçeveye Göre Nesne Koordinatları
R	Rotasyon Matrisi
$\vec{t}$	Ötelenme Vektörü
F_D	İHA Gövdesinde Oluşan Rüzgâr Kuvveti
ρ	Hava yoğunluğu
A	İHA yüzey alanı
C_d	Direnç Katsayısı
v_R	Rüzgâr Hızı
R_v	İniş Platformunun İzlediği Yörüngenin Yarıçapı
d_v	İki Tahrik Tekeri Arası Mesafe
V_l	Sol Tahrik Tekerinin Hızı
V_r	Sağ Tahrik Tekerinin Hızı
ω_v	İniş Platformunun Açısal Hızı
M_v	İniş Platformunun İzlediği R_v Yarıçaplı Yörüngenin Merkezi
x_v	İniş Platformunun *x* Eksenindeki Pozisyonu
y_v	İniş Platformunun *y* Eksenindeki Pozisyonu
ψ_v	İniş Platformunun Sapma Açısı
M_F	ArUco Board Referans Çerçevesi
P_F	Hareketli İniş Platformu Referans Çerçevesi
x_p	Hareketli İniş Platformu Referans Çerçevesi *x* Ekseni
y_p	Hareketli İniş Platformu Referans Çerçevesi *y* Ekseni
$\lvert e_{xy} \rvert$	*xy* Düzlemindeki Mutlak Konum Hatası

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Dünyaya sabit ataletsel çerçeve ve dört rotorlu iha gövde çerçevesi..... 7
Şekil 2.2 a) Euler açıları b) Dört rotorlu İHA euler açıları 8
Şekil 2.3 İtki 10
Şekil 2.4 Yatma 11
Şekil 2.5 Yunuslama 12
Şekil 2.6 Sapma..... 13
Şekil 2.7 PD denetleyici 21
Şekil 2.8 Dört rotorlu İHA'nın durum ve pozisyon kontrolü 23
Şekil 2.9 İğne deliği kamera modeli 28
Şekil 2.10 Yeniden düzenlenmiş iğne deliği kamera modeli 29
Şekil 2.11 Radyal bozulmalar 31
Şekil 2.12 Teğetsel bozulma 31
Şekil 2.13 Dünyaya sabit ataletsel çerçeve (W_F), kamera referans çerçevesi (C_F), görüntü düzlemi ve P_0 koordinatındaki nesne 32
Şekil 2.14 ArUco işaretçi ile kamera poz kestirimi……..……..34
Şekil 2.15 Perspektif dönüşümü sonrası ArUco işaretleyici (a) ve bit görünümü (b) 34
Şekil 2.16 Aruco Board ile kamera poz kestirimi – 1 37
Şekil 2.17 Aruco Board ile kamera poz kestirimi – 2 37
Şekil 3.1 Dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişi: benzetim çalışması (matlab/simulink) 38
Şekil 3.2 Otonom iniş modülü 41
Şekil 3.3 Benzetim çalışması: otonom iniş takip aşaması..... 42
Şekil 3.4 Benzetim çalışması: otonom iniş hassas takip aşaması 43
Şekil 3.5 Benzetim çalışması: iniş aşaması..... 44
Şekil 3.6 Matlab/simulink ortamındaki 3 eksenli rüzgâr hız modeli 45
Şekil 3.7 Rüzgâr gürültüsü 1 46
Şekil 3.8 Rüzgâr gürültüsü 2 47
Şekil 3.9 Rüzgâr gürültüsü 3 47
Şekil 3.10 Benzetim ortamındaki dört rotorlu İHA modeline etkiyen kuvvetler..... 49
Şekil 3.11 Benzetim çalışması senaryo 1.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 51

Şekil 3.12 Benzetim ç. senaryo 1.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri 52
Şekil 3.13 Benzetim çalışması senaryo 1.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 53
Şekil 3.14 Benzetim çalışması senaryo 1.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 53
Şekil 3.15 Benzetim çalışması senaryo 1.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 54
Şekil 3.16 Benzetim çalışması senaryo 2.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 55
Şekil 3.17 Benzetim ç. senaryo 2.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri 56
Şekil 3.18 Benzetim çalışması senaryo 2.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 57
Şekil 3.19 Benzetim çalışması senaryo 2.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 57
Şekil 3.20 Benzetim çalışması senaryo 2.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 58
Şekil 3.21 Benzetim çalışması senaryo 3.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 59
Şekil 3.22 Benzetim ç. senaryo 3.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri 60
Şekil 3.23 Benzetim çalışması senaryo 3.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 61
Şekil 3.24 Benzetim çalışması senaryo 3.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 61
Şekil 3.25 Benzetim çalışması senaryo 3.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 62
Şekil 3.26 Benzetim çalışması senaryo 4.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 63
Şekil 3.27 Benzetim ç. senaryo 4.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikler 64
Şekil 3.28 Benzetim çalışması senaryo 4.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 64
Şekil 3.29 Benzetim çalışması senaryo 4.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği ..... .65
Şekil 3.30 Benzetim Çalışması Senaryo 4.c Test 1: İki Boyutlu Otonom İniş Grafiği... 66
Şekil 3.31 Oransal seyir güdümü kullanılarak İHA'nın hareketli platforma otonom inişinin benzetim ortamında test edilmesi 67
Şekil 3.32 DJI Ryze Tello 69
Şekil 3.33 Uygulamada kullanılan hareketli iniş platformu ve İHA..... 71
Şekil 3.34 Diferansiyel sürüş tekniği ile hareket eden iniş platformunun Kinematiği ... 72
Şekil 3.35 Uygulama bölümü: sistem mimarisi şablonu..... 75
Şekil 3.36 İşaretçi bit hücresi örneği..... 77

Şekil 3.37 İHA ön kamerası referans çerçevesi (C_F) ve iniş platformu üzerinde bulunan aruco board referans çerçevesi (M_F)..... 78
Şekil 3.38 Hareketli iniş platformu referans çerçevesi (P_F), orijini ve iniş platformu orijinine göre elde edilmiş iha kordinatı (pozisyonu)..... 79
Şekil 3.39 Uygulama takip aşaması 80
Şekil 3.40 Uygulama iniş aşaması 82
Şekil 3.41 İniş platformu referans çerçevesi (P_F), İHA referans çerçevesi (D_F) ve hedef pozisyon (T)..... 83
Şekil 3.42 İki eksenli referans çerçeveler arasında dönüşüm ..... .83
Şekil 3.43 Kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisi..... 85
Şekil 3.44 Hareketli iniş platformu refererans çerçevesine (P_F) göre elde edilen sapma açısı hatası (e_ψ)..... .87
Şekil 3.45 Hareketli iniş platformu referans çerçevesine (P_F) göre elde edilmiş İHA koordinatının dünyaya sabit ataletsel çerçeveye göre (W_F) göre dönüşümü 89
Şekil 3.46 Rüzgâr etkisi oluşturmak için uygulamada kullanılan fan ve anemometre ile ölçülen rüzgâr hızı 92
Şekil 3.47 Uygulama çalışması senaryo 1.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 93
Şekil 3.48 Uygulama ç. senaryo 1.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası – .zaman grafikleri..... 93
Şekil 3.49 Uygulama çalışması senaryo 1.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği…..94
Şekil 3.50 Uygulama çalışması senaryo 1.b Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği..... 95
Şekil 3.51 İşaretçi bit hücresi örneği uygulama ç. senaryo 1.b Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri 95
Şekil 3.52 Uygulama çalışması senaryo 1.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 96
Şekil 3.53 Uygulama çalışması senaryo 2.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği 97
Şekil 3.54 Uygulama ç. senaryo 2.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası –zaman grafikleri 97
Şekil 3.55 Uygulama çalışması senaryo 2.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği..... 98
Şekil 3.56 Uygulama çalışması senaryo 2.b Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği..... 99

Şekil 3.57 Uygulama ç. senaryo 2.b Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri 99
Şekil 3.58 Uygulama çalışması senaryo 2.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği 100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Benzetim ortamındaki İHA'nın PD kontrol katsayılar 39
Çizelge 3.2 Rüzgâr gürültülerinin (hızlarının) ortalama ve varyans değerleri..... 46
Çizelge 3.3 Benzetim çalışması hareketli platforma otonom iniş senaryo planı 48
Çizelge 3.4 DJI Ryze Tello teknik özellikleri..... 69
Çizelge 3.5 DJI Ryze Tello kontrol komutları..... 70
Çizelge 3.6 DJI Ryze Tello irtifa bilgisi ve video akışı alma komutları..... 71
Çizelge 3.7 Hareketli iniş platformunun teknik özellikleri..... 74
Çizelge 3.8 İHA'nın otonom iniş testleri için oluşturulan hareketli iniş platformu yörüngeleri. 75
Çizelge 3.9 Uygulama bölümü: İHA pozisyon kontrolcülerin kontrol katsayıları 86
Çizelge 3.10 Uygulama bölümü: İHA sapma açısı kontrolcüsünün PD kontrol katsayıları 86
Çizelge 3.11 Uygulama çalışması hareketli platforma otonom iniş senaryo planı 91
Çizelge 3.12 Uygulama çalışması senaryo 1.a test sonuçları..... .94
Çizelge 3.13 Uygulama çalışması senaryo 1.b test sonuçları 96
Çizelge 3.14 Uygulama çalışması senaryo 2.a test sonuçları..... 98
Çizelge 3.15 Uygulama çalışması senaryo 2.b test sonuçları 100
Çizelge 4.1 Benzetim çalışması senaryo 1.a, senaryo 1.b ve senaryo 1.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri..... 103
Çizelge 4.2 Benzetim çalışması senaryo 2.a, senaryo 2.b ve senaryo 2.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma veriler..... 105
Çizelge 4.3 Benzetim çalışması senaryo 3.a, senaryo 3.b ve senaryo 3.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri..... 106
Çizelge 4.4 Benzetim çalışması senaryo 4.a, senaryo 4.b ve senaryo 4.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri..... 107
Çizelge 4.5 Uygulama çalışması senaryo 1.a ve senaryo 1.b'de elde edilen test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri..... 108
Çizelge 4.6 Uygulama çalışması senaryo 2.a ve senaryo 2.b'de elde edilen test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri..... 109

Çizelge 4.7 Benzetim çalışması senaryo 1.a ile uygulama çalışması senaryo 1.a'da elde edilen xy düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri ..... .111
Çizelge 4.8 Benzetim çalışması senaryo 1.b ile uygulama çalışması senaryo 1.b'de elde edilen xy düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri 111
Çizelge 4.9 Benzetim çalışması senaryo 3.a ile uygulama çalışması senaryo 2.a'da elde edilen xy düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri 112
Çizelge 4.10 Benzetim çalışması senaryo 3.b ile uygulama çalışması senaryo 2.b'de elde edilen xy düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma veriler 112

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları pilot taşımayan ve amaca uygun faydalı yük taşıyan hava araçları olarak tanımlanabilir. Genellikle İHA'lar bir operatör ile yer kontrol istasyonundan uzaktan kontrol edilebilir ya da birçok görevde otonom olarak kullanılabilirler. Özellikle son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarla birlikte İHA ve İHA teknolojilerinde büyük gelişmeler yaşanmıştır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak da İHA'lar birçok uygulama alanında görev ve faaliyet icra etmektedirler. En büyük avantajlarından biri olan pilot taşımadan uçuş yapabilme kabiliyetleri sayesinde insan hayatı tehlikeye atılmadan birçok zorlu görev tamamlanabilmektedir.

1.1 Dört Rotorlu İnsansız Hava Araçları

Dört rotorlu İHA'lar, dört rotorunun sağladığı itki kuvveti sayesinde uçuşunu gerçekleştiren, dikey iniş ve kalkış yapabilen hava araçlarıdır. Dikey iniş – kalkış özellikleri sayesinde herhangi bir iniş pistine ihtiyaç duymadan kısıtlı ve dar alanlara dahi iniş yapabilmektedirler. Dört rotorunun sağladığı bir diğer avantaj ise manevra kabiliyetidir. Diğer hava araçlarına göre daha keskin yörüngeler izleyebilirler. Birçok faaliyet alanında kullanılmalarının en önemli sebeplerinden biri de işte bu dinamik manevra kabiliyetleridir.

Bir diğer taraftan dört rotorlu İHA'ların uçuş süreleri açısından ciddi kısıtları bulunmaktadır. Kullanılabilecek batarya kapasitesi sınırlı olduğu için (bir diğer ifadeyle faydalı yük kapasitesi sınırlı olduğu için) süreklilik gerektiren görevlerde çok sık ikmal yapılması gerekmektedir. Günümüzde dört rotorlu İHA'ların uçuş sürelerinin arttırılabilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır.

Bu tip İHA'ları diğer hava araçlarından ayıran en önemli özelliklerinden biri de üretim maliyetleridir. Üretim maliyetleri ve kullanım alanı genişliği diğer hava araçları ile kıyaslanamaz seviyelerdedir. Kullanım alanları göz önüne alındığında çok daha geniş bir kullanıcı kitlesine hitap etmektedirler.

Ayrıca bu tip hava araçları ile insan hayatını riske atmaksızın birçok görev icra edilebilmektedir. Bu ve bunun gibi özellikleri sayesinde dört rotorlu İHA'ların özellikle askeri uygulamalarda aktif olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu hava araçları kritik görevlerde uzaktan kontrolle veya otonom olarak gerekli görevi icra edebilmektedir. Maliyetleri diğer insansız hava araçlarına göre düşük olduğundan dolayı imha görevlerinde de aktif bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Bu bağlamda dört rotorlu İHA'lar;

- Tarım,
- Lojistik,
- Keşif ve gözlem,
- Fotoğrafçılık ve sinema,
- Bilimsel araştırmalar için örnek toplama,
- Hava kirliliği ölçümleri,
- Bitki örtüsü yapısının incelenmesi,
- Ülke sınırlarında ve sahil şeritlerinde devriye görevleri,
- Orman yangınlarında gözetleme ve hasar tespit çalışmalarının yapılması,
- Doğal ortamlarındaki vahşi hayvanların takibi ve incelenmesi

gibi bir çok faaliyet alanında kullanılmakta ve bu faaliyet alanlarına her geçen gün yenileri eklenmektedir.

1.2 Literatür Araştırmaları

Dikey iniş ve kalkış yapabilen İHA'ların hareketli platformlara otonom inişi problemi üzerine yapılan çalışmalar araştırılmış ve incelenmiştir. Bu bağlamda incelenen çalışmalarda; GPS veya görüntü işleme tabanlı yöntemlerin geliştirildiği, otonom inişin tamamlanabilmesi için genellikle tespit, takip, yaklaşma, alçalma ve iniş gibi aşamalar kullanıldığı görülmüştür.

Bir diğer taraftan literatürdeki otonom iniş çalışmalarının kontrol sistemi genellikle üç farklı yapıdan meydana gelmektedir. Bu yapılar seyrüsefer sistemi (konum ve yönün tespiti), güdüm kontrolü (hızın, ivmenin ve dönüşün istenilen yörüngeyi – rotayı takip etmesini sağlayan kontrol sistemi) ve uçuş kontrolüdür (güdüm bilgisini alır ve harekete dönüştürür).

Ayrıca literatürde birçok doğrusal ve doğrusal olmayan kontrol sistemi kullanılmakla birlikte görüntü işleme tabanlı iniş algoritmalarının konum ve hız kontrollerinde genellikle *PID* ve *PD* kontrolcüler tercih edilmektedir (Borowczyk vd. 2017). Görüntü işleme tabanlı otonom iniş sistemlerinin özellikle iniş yapılacak platformun konumunun bilinmediği, GPS bilgilerinin alınamadığı ortam şartlarında tercih edildiği; GPS tabanlı otonom iniş sistemlerinin ise GPS bilgileriyle beraber İHA ve hareketli iniş platformunun anlık hızının bilindiği şartlarda tercih edildiği görülmüştür.

Bu kapsamda Paris vd. (2020), bir İHA'nın hareketli platforma otonom inişi için önerdikleri çözümü zorlayıcı çevresel faktörler altında inceleyerek geliştirdikleri sistemin performans sonuçlarını yayınlamışlardır. Qi vd. (2019) ise bu problemin çözümü için düşük maliyetli görüntü işleme tabanlı bir İHA sistemi önermiştir. Xing vd. (2019) otonom iniş için sadece İHA üzerindeki kamera ve ataletsel sensörleri kullanmışlardır ve bu kapsamda hareketli iniş platformunun tespiti için kendi geliştirdikleri kompozit işareti kullanarak İHA'nın platforma inişi üzerine bir çözüm önermişlerdir. Feng vd. (2018) hareketli platformlara otonom iniş problemi çözümü kapsamında geliştirdikleri görüntü işleme tabanlı model öngörülü kontrolcüye sahip İHA sisteminin rüzgâr etkileri ve ölçüm gürültüleri altında performansını incelemişlerdir. Falanga vd. (2017) ise bu problemin çözümü için sınırlı bir alanda olduğu bilinen iniş platformunun aranması, tespit edilmesi ve inişin gerçekleştirilmesi için sadece İHA üzerinde bulunan kamera ve sensörlerin kullanıldığı ve bunlar dışında harici bir bilginin kullanılmadığı bir çözüm önerisi sunmuştur. Bir diğer taraftan Borowczyk vd. (2017) ise iniş platformunun yüksek hızlarda hareket etmesi durumunu incelemek için geliştirdikleri otonom iniş çözümünü bir İHA üzerinde uygulamış, 50 *km/s* hızla hareket eden bir arabayı iniş platformu olarak kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuç ve bulguları yayınlayarak çözüm önerisi performansını incelemişlerdir. Vlantis

vd. (2015) ise hareketli platformun iniş alanının eğimli olması durumunu inceleyerek otonom iniş için geliştirdikleri model öngörülü kontrolcüye sahip sistemin performans sonuçlarını değerlendirmişlerdir.

1.3 Tezin Amacı ve Önemi

Bu tez kapsamında, dikey iniş ve kalkış yapabilen bir insansız hava aracının hareketli platformlara otonom inişi için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir.

Dikey iniş ve kalkış yapabilen insansız hava araçları radarda görünmeyecek kadar küçük, kritik malzeme taşıyabilecek kapasiteye sahip ve kolay vazgeçilebilecek seviyede ucuz olmaları sebebiyle her geçen gün daha da yaygın hale gelmektedirler. Bu derece çok yönlülük, dört rotorlu İHA'ların birçok faaliyet alanında kullanılmasını da sağlamıştır. Ancak buna karşın bu uygulamalardaki görevlerin birçoğu hala uzman insan pilotlar tarafından yürütülmektedir.

Gerçekleştirilen bu çalışma, aslında dört rotorlu İHA'ların otonom olarak yürüttüğü görevlerin kapsamını genişletmeye odaklanmıştır. Bir insansız hava aracının hareketli platforma otonom inişine yönelik yöntemler geliştirmek; İHA ya da İHA filosunun hızlı konuşlandırılması, süreklilik gerektiren uçuş görevleri, operasyonel menzillerin genişletilmesi, mobil şarj istasyonları gibi konular için çekici çözümler sunduğundan dolayı son on yılda aktif bir araştırma alanı oluşmuştur.

Bir diğer taraftan çok rotorlu dikey iniş ve kalkış yapabilen İHA'ların hemen hemen tüm uygulamalarındaki ana kısıtlamalarından biri, taşıyabilecekleri sınırlı yüktür. Bu durum, bir görev sırasında taşınan pil miktarını sınırlar ve bu da sonuç olarak uçuş süresini kısıtlamaktadır. Bu sınırlamadan dolayı, İHA'lar kısa bir çalışma süresinden sonra şarj istasyonuna dönmek zorunda kalırlar. Bu bağlamda, hareketli platformlara otonom iniş, havada beklemenin zorunlu olmadığı görevlerde enerji tasarrufu için gerekli hale gelmektedir.

Öte yandan, uzun süreli ya da yüksek menzile sahip uçuşların gerekli olduğu görevler gerçekleştirilirken ana iniş istasyonuna geri dönmek pratik değildir. Bu gibi senaryolarda, İHA'nın yeniden şarj olabilmesini (ya da batarya değişimini) sağlayan mobil iniş istasyonlarının kullanılması çok daha uygun ve verimli olacaktır. Böylece hem uçuş süresi hem de İHA'nın kapsam alanı (menzili) arttırılabilecektir.

Ayrıca hareketli platformlara otonom iniş, bu tip İHA'ların güvenlik açısından belirsiz ortamlarda çalışırken çok daha hızlı konuşlandırılmasını ve kurtarılmasını sağlayabilen bir uygulamadır. Özellikle savaş alanlarında veya tehlikeli bölgelerde, İHA'ların insan pilot kontrolüne ihtiyaç duymaksızın hareketli platformlara iniş yapabilmesi bu anlamda kritiktir.

Bu tip İHA'lar, açık ya da kapalı alanlarda daha birçok görev yerine getirebilirler. Örneğin; bir orman yangını sırasında söndürme çalışmalarına yardımcı olabilirler, afet bölgelerine ulaşarak yardım malzemeleri iletebilirler ya da bir fabrikada üretim hattında ürünlerin taşınması için kullanılabilirler. Hareketli platformlara otonom iniş yapabilme kabiliyetinin kazanılması, bu ve buna benzer daha birçok faaliyet alanında İHA'ların etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.

Sonuç olarak, dikey iniş ve kalkış yapabilen insansız hava araçlarının hareketli platformlara otonom iniş yapabilmesi tüm bu nedenler doğrultusunda çok kritik bir önem taşımaktadır.

Bu tez kapsamında, dikey iniş kalkış yapabilen bir İHA'nın hareketli platformlara otonom inişi için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Bu çalışma, randevu alanına varmış bir İHA ve randevu alanında olduğu bilinen bir hareketli platform ile başlamaktadır. Örneğin burada randevu alanı olarak ifade edilen alan, iniş platformunun düşük tutarlılıktaki GPS verileri kullanılarak oluşturulan platformun bulunduğu alan olarak ifade edilebilir. Yani özetle iniş platformu hakkındaki bu bilgi sadece belirli bir alanı gösterebilmektedir ve İHA'nın platforma iniş yapabilmesi için yeterli tutarlılığa ve hassasiyete sahip değildir. Tez kapsamında önerilen çalışmaya da işte tam olarak bu

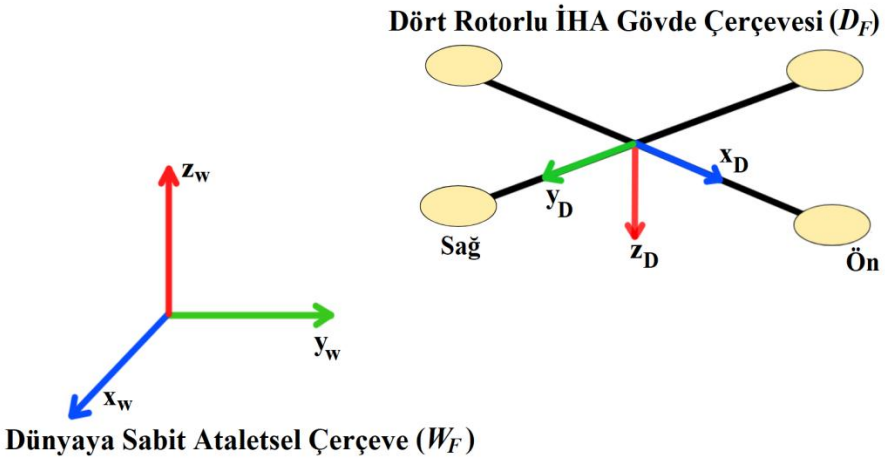
aşamada ihtiyaç duyulmakta ve dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişi amaçlanmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Dört Rotorlu İHA'nın Matematiksel Modeli

2.1.1 Referans çerçeveler

Referans çerçeveler birbirlerine ortogonal (dikey) üç birim vektörden oluşmaktadır. Bu birim vektörler, referans çerçeve merkezi olarak da adlandırılabilecek bir orijin üzerinde kesişirler. Referans çerçeve bir cismin hareketlerini tanımlayabilmek için büyük önem arz etmektedir. Örneğin bir nesnenin nerede olduğu (koordinat/konum), hızı ya da yönünün ne olduğu ile ilgili sorulara cevap verebilmek için referans çerçevelere ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 2.1 Dünyaya sabit ataletsel çerçeve (W_F) ve dört rotorlu İHA gövde çerçevesi (D_F)

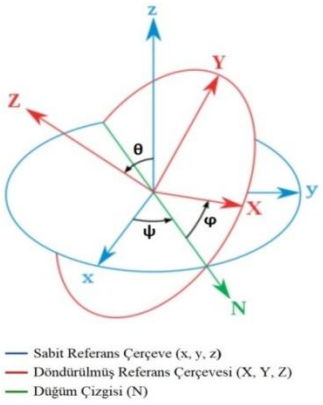
Bu nedenle tez kapsamında İHA hareketlerinin tanımlanabilmesi için Şekil 2.1'de görülen dünyaya sabit ataletsel çerçeve (W_F) ve dört rotorlu İHA gövde çerçevesi (D_F) kullanılmaktadır.

Dünyaya sabit ataletsel çerçeve (W_F): Dünyaya sabit ataletsel çerçeve eylemsizdir ve ihmal edilebilir bir ivmeye sahiptir. "Çünkü İHA'nın menzili ve dünyanın yarıçapı karşılaştırıldığında dünyanın hareketinin hava aracını etkileyemeyeceği görülecektir" (Demiryürek 2018). Bu referans sisteminin x ve y eksenleri (x_W ve y_W) dünya yüzeyindedir. z ekseni (z_W) ise yüzeye dik bir şekilde yukarı yönlüdür.

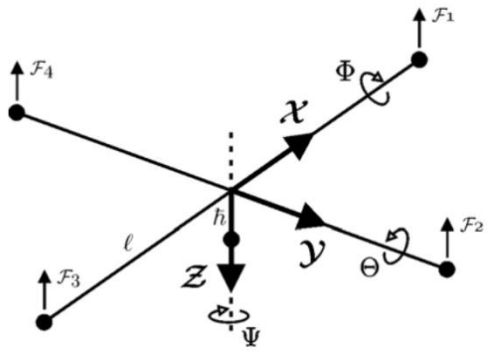
Dört rotorlu İHA gövde çerçevesi (D_F): Dört rotorlu İHA gövde çerçevesi, orijini İHA'nın ağırlık merkezinde bulunan ve İHA gövdesine sabitlenmiş bir çerçeve olarak ifade edilebilir. Bu nedenle gövde çerçevesi, İHA ile birlikte hareket eden bir çerçevedir. Bu çerçeve Şekil 2.1'de görüldüğü gibi sağ el kuralına göre oluşturulmuş birbirine dik (ortogonal) 3 birim vektörden oluşmaktadır. Bunlar x_D, y_D ve z_D eksenleri olarak adlandırılmaktadır. x_D ve y_D sırasıyla İHA'nın önünü ve sağını, z_D ise İHA'nın altını işaret etmektedir.

2.1.2 Euler açıları

Euler açıları bir nesnenin uzayda yönelimlerini ifade etmek için kullanılan açılardır. İlgili nesnenin, herhangi bir referans çerçevesi ekseni etrafında döndürülmesiyle bu yönelimler elde edilmektedir. Bu yönelimleri ifade eden açılar; yatma (*roll*, ϕ), yunuslama (*pitch*, θ) ve sapma (*yaw*, ψ) açılarıdır.



Şekil 2.2 a) Euler açıları (Rezaee vd. 2015)



Şekil 2.2 b) Dört rotorlu İHA Euler açıları (Bouabdallah 2007)

Şekil 2.2.a'da görüldüğü üzere *x, y* ve *z* eksenlerinin olduğu mavi renkli düzlem dönme öncesi durumu ifade ediyorken; *X, Y* ve *Z* eksenlerinin bulunduğu kırmızı renkli düzlem dönme sonrası durumu ifade etmektedir. Burada *xy* ve *XY* düzlemlerinin kesişimi düğüm çizgisi (*line of nodes - N*) olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 2.2.a üzerinden Euler açılarını tanımlarsak;

● Yatma (ϕ), düğüm çizgisi ile *X* ekseni arasındaki açı,

● Yunuslama (θ), z ekseni ile *Z* ekseni arasındaki açı,

● Sapma (ψ), *x* ekseni ile düğüm çizgisi arasındaki açı olarak ifade edilebilir.

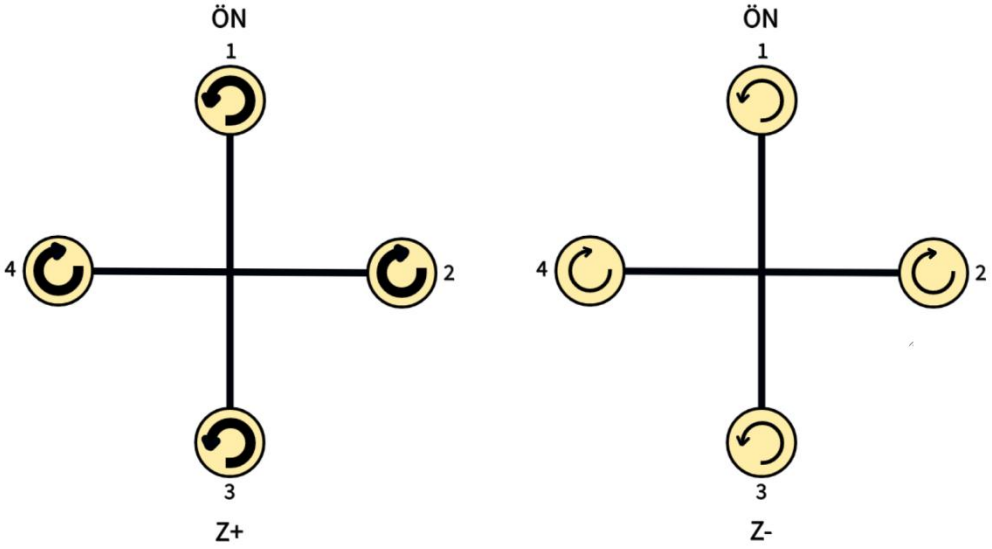
Bir diğer taraftan bu açılar tez kapsamında yeniden tanımlanacak olursa; dört rotorlu İHA gövde çerçevesinin *x* ekseni etrafında döndürülmesiyle yatma (ϕ), *y* ekseni etrafında döndürülmesiyle yunuslama (θ) ve *z* ekseni etrafında döndürülmesiyle sapma (ψ) açısı elde edilmektedir (Şekil 2.2.b).

2.1.3 Dört rotorlu İHA'nın temel hareketleri

Dört rotorlu İHA'lar, 4 adet rotor ile tahrik edilen bir çok rotorlu türüdür. Rotorlarda bulundurduğu pervaneler ile itki ve tork üretmektedir. Bu rotorların iki tanesi saat yönünde dönerken, diğer ikisi ise saat yönünün tersine dönmektedir. Saat yönü ve saat yönü tersine dönen bu rotor çiftlerinin kullanılmasının amacı İHA üzerine etkiyen net torkun sıfırlanmak istenmesidir. Böylece dört rotorlu İHA'nın kendi ekseni etrafında dönmesi engellenmektedir. Bir diğer taraftan aslında İHA üzerine etkiyen net tork ve itki (*thrust*) kontrol edilerek temel İHA hareketleri elde edilebilmektedir. Bu temel hareketler; itki (U_1), yatma (U_2), yunuslama (U_3) ve sapma (U_4) olarak tanımlanmaktadır.

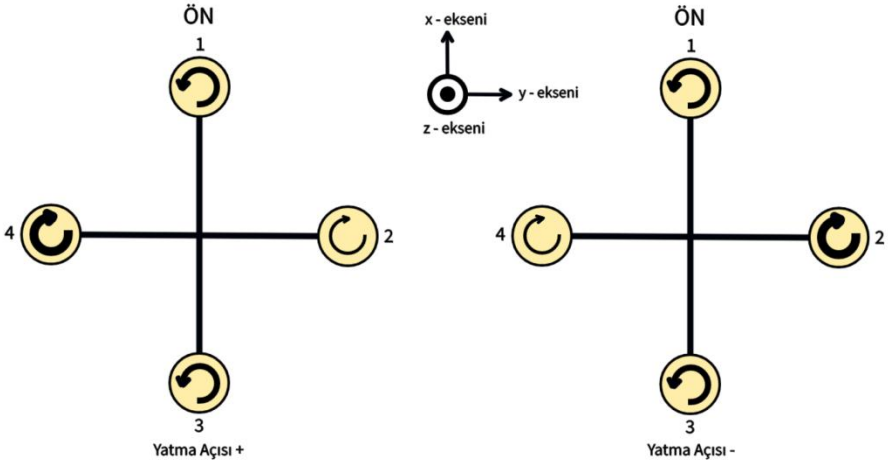
İtki (U_1): Bu hareket, Şekil 2.3'te görüldüğü üzere tüm rotor hızlarının aynı oranda artması ya da azalması sonucunda elde edilmektedir.

Tüm rotor hızlarının aynı oranda artması sonucunda irtifa artışı gerçekleşirken, aynı oranda azalması sonucu irtifa düşürülebilmektedir. Ayrıca burada rotor hızlarının aynı oranda arttırılmasındaki amaç İHA üzerine etkiyen net torkun değişmesini engellemektedir. Böylece bu hareket ile İHA'nın herhangi bir Euler açısı değişmeden sadece irtifa kontrolü sağlanabilmektedir.



Şekil 2.3 İtki

Yatma (U_2): Yatma hareketi, ön ve arka rotor hızları değiştirilmeden sağ ve sol rotorlar arasında hız farkı oluşturularak elde edilmektedir.

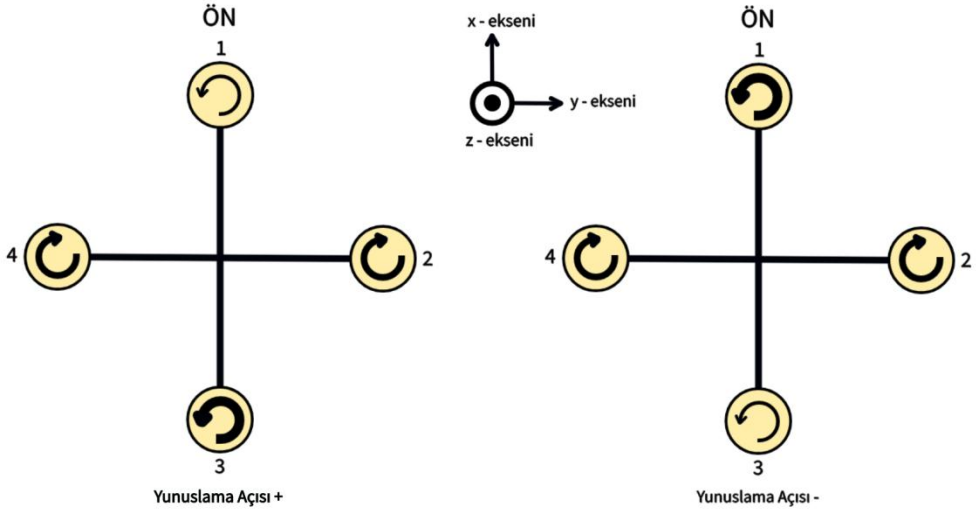


Şekil 2.4 Yatma

Şekil 2.4 incelendiğinde sağ rotorun (2 nolu rotorun) hızı azaltılırken, sol rotor (4 nolu rotor) hızının aynı oranda arttırıldığı görülmektedir. Böylece *x* ekseni etrafında bir tork değişimi elde edilmekte, pozitif bir yatma açısı oluşmakta ve bu yönelimin sonucunda ise dört rotorlu İHA'nın $+y$ yönünde hareketi sağlanmaktadır. Bu hareketin tam tersi ise aynı rotorlar (sağ ve sol rotorlar) için zıt yönde bir hız farkı oluşturulması ve negatif bir yatma açısının elde edilmesiyle sağlanmaktadır.

Yunuslama (U_3): Bu hareket ise sağ ve sol rotor hızları değiştirilmeden, ön ve arka rotorlar arasında bir hız farkı oluşturulması sonucunda elde edilmektedir.

Şekil 2.5 incelendiğinde arka rotorun (3 nolu rotorun) hızı arttırılırken, ön rotor (1 nolu rotor) hızının aynı oranda azaltıldığı görülmektedir. Bunun sonucunda *y* ekseni etrafında bir tork değişimi elde edilmekte, pozitif bir yunuslama açısı oluşturulmakta ve İHA'nın $+x$ yönünde hareketi sağlanmaktadır.

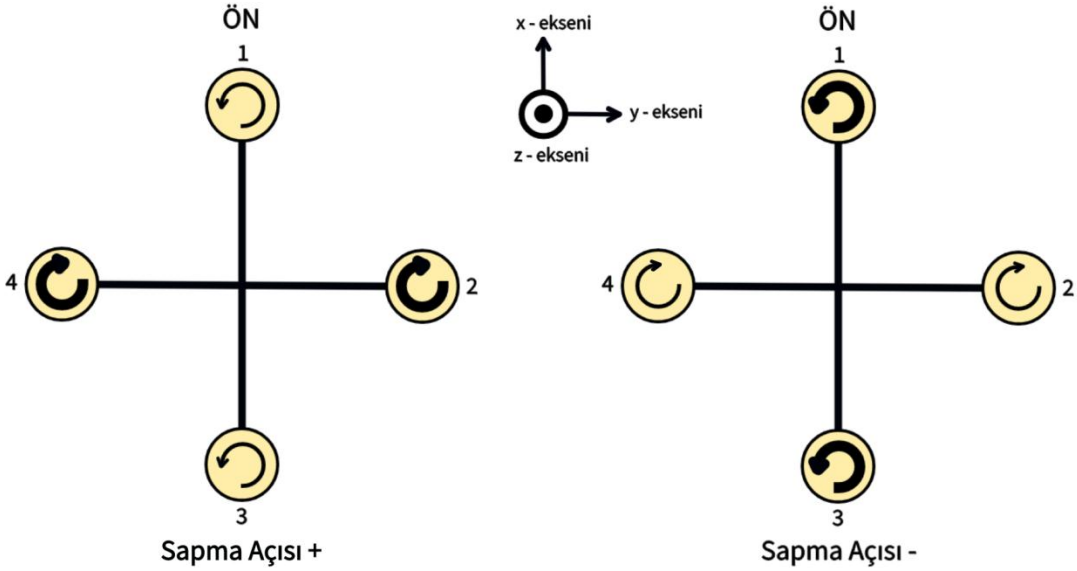


Şekil 2.5 Yunuslama

Bu hareketin tam tersi ise aynı rotorlar (ön ve arka rotorlar) için zıt yönde bir hız farkı oluşturulması ve negatif bir yatma açısının elde edilmesiyle sağlanmaktadır.

Sapma (U_4): Sapma hareketinin elde edilebilmesi için saat yönünde dönen rotor çifti ile saat yönü tersine dönen rotor çifti arasında hız farkı oluşturulmaktadır.

Şekil 2.6 incelendiğinde saat yönünde dönen sağ ve sol rotor hızlarının arttırıldığı, saat yönü tersine dönen ön ve arka rotor hızlarının aynı oranda azaltıldığı görülmektedir. Bunun sonucunda ise *z* ekseni etrafında bir tork değişimi elde edilerek İHA üzerinde pozitif bir sapma açısı oluşturulmaktadır. Böylece İHA'nın *z* ekseni etrafında dönme hareketi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.6 Sapma

Benzer şekilde saat yönünde dönen sağ ve sol rotor hızlarının azaltılması ve saat yönü tersine dönen ön ve arka rotor hızlarının aynı oranda arttırılması ile negatif bir sapma açısı oluşturulmaktadır.

2.1.4 Dört rotorlu İHA kinematiği

Bu bölümde dört rotorlu İHA'nın kinematiğini ifade eden eşitlikler açıklanmaktadır (Bouabdallah 2007, Dam 2014).

Dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre İHA'nın doğrusal (Γ) ve açısal (Θ) konum vektörleri Eşitlik 2.1 ile ifade edilebilir:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \qquad \Theta = \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \tag{2.1}$$

Ayrıca, İHA gövde çerçevesindeki (D_F) doğrusal (V) ve açısal (Ω) hız vektörleri ise Eşitlik 2.2 ile ifade edilmektedir:

$$V = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}, \qquad \Omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Bu bağlamda Eşitlik 2.3 – 2.6 kullanılarak D_F'ye göre tanımlanan İHA hız vektörleri ve W_F'ye göre tanımlanan İHA konum vektörleri arasındaki ilişkiler tanımlanmaktadır.

$$\dot{\Gamma} = R(\Theta)V, \tag{2.3}$$

$$V = R^{-1}(\Theta)\dot{\Gamma}, \tag{2.4}$$

$$\dot{\Theta} = T(\Theta)\Omega, \tag{2.5}$$

$$\Omega = T^{-1}(\Theta) \tag{2.6}$$

Burada $R(\Theta)$ dönme matrisi , $T(\Theta)$ ise translasyonel matristir.

$$R(\Theta) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi \\ s_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

$$R^{-1}(\Theta) = R^T(\Theta) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & s_\psi c_\theta & -s_\theta \\ c_\psi s_\theta s_\phi - s_\psi c_\phi & s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\phi & c_\theta s_\phi \\ c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\phi & s_\psi s_\theta c_\phi - c_\psi s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix}, \tag{2.8}$$

$$T(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{s_\phi s_\theta}{c_\theta} & \frac{c_\phi s_\theta}{c_\theta} \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & \frac{s_\phi}{c_\theta} & \frac{c_\phi}{c_\theta} \end{bmatrix}, \tag{2.9}$$

$$T^{-1}(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s_\theta \\ 0 & c_\phi & s_\phi c_\theta \\ 0 & -s_\phi & c_\phi c_\theta \end{bmatrix}, \tag{2.10}$$

$c_x = cos(x), s_x = sin(x)$ olarak ifade edilmiştir. $R(\Theta)$ ortogonal olduğu için $R^{-1}(\Theta) = R^T(\Theta)$ şeklindedir.

2.1.5 Dört rotorlu İHA dinamikleri

Bu bölümde ise dört rotorlu İHA dinamiklerini ifade eden eşitlikler açıklanmaktadır (Bouabdallah 2007, Dam 2014).

"Dört rotorlu İHA katı bir cisim olduğu için dinamiklerini tanımlamak için Newton-Euler denklemleri uygulanabilir" (Podharadsky 2012). Ayrıca her rotor tarafından üretilen itme kuvveti (*thrust*), motorun dönüş hızının karesiyle orantılır. Bu durum Eşitlik 2.11 ile ifade edilir.

$$F_i = k\Omega_i^2, \; i = 1,2,3,4, \tag{2.11}$$

Burada k, itme faktörü (Ns^2) ve Ω_i, i no'lu rotorun (*rad/s*) dönüş hızıdır. Dört rotor ile İHA'ya uygulanan toplam itki kuvveti Eşitlik 2.12 ile ifade edilmektedir.

$$T_B = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k\sum \Omega_i^2 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Dört rotorlu İHA gövdesine uygulanan tork ise Eşitlik 2.13 ile ifade edilmektedir.

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lk(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ Lk(-\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

Burada d sürükleme faktörüdür (Nms^2) ve L, her pervaneden İHA merkezine (m) olan mesafedir. Bir diğer taraftan çarpı (X) konfigürasyonlu dört rotorlu İHA'ların gövdesine uygulanan tork, Eşitlik 2.14 ile tanımlanabilir.

$$\tau_B = \begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} Lk(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} Lk(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Önceki bölümlerde de açıklandığı üzere, İHA tüm hareketlerini dört temel hareket aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bunlar itki (U_1), yatma (U_2), yunuslama (U_3) ve sapma (U_4) hareketleridir. Bu temel hareketler Eşitlik 2.15 ile ifade edilmektedir.

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ Lk(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ Lk(-\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ d(-\Omega_1^2 + \Omega_2^2 - \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

U_1: İtki Girişi (N), U_2: Yatma Girişi (Nm), U_3: Yunuslama Girişi (Nm), U_4: Sapma Girişi (Nm)
$\Omega_1,\ \Omega_2,\ \Omega_3,\ \Omega_4$: sırasıyla ön, sağ, arka ve sol pervanelerin dönüş hızlarıdır (rad/s).

Bu bağlamda Eşitlik 2.15 kullanılarak rotor dönüş hızlarını ifade eden Eşitlik 2.16 elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4k} u_1 - \frac{1}{2kL} u_3 - \frac{1}{4d} u_4 \\ \frac{1}{4k} u_1 - \frac{1}{2kL} u_2 + \frac{1}{4d} u_4 \\ \frac{1}{4k} u_1 + \frac{1}{2kL} u_3 - \frac{1}{4d} u_4 \\ \frac{1}{4k} u_1 + \frac{1}{2kL} u_2 + \frac{1}{4d} u_4 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

İHA gövdesine uygulanan toplam itki Eşitlik 2.17 ile; tork ise Eşitlik 2.18 ile ifade edilmektedir.

$$T_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_1 \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$T_B = \begin{bmatrix} U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

Ötelenme hareketinin de dahil edilmesiyle birlikte dört rotorlu İHA'nın Newton katı cisim eşitliği Eşitlik 2.19 ile tanımlanmaktadır.

$$m\ddot{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + R(\Theta)T_B \tag{2.19}$$

Eşitlik 2.19'a Eşitlik 2.1 ve 2.7'nin de dahil edilmesi sonucunda Eşitlik 2.20 elde edilmektedir.

$$m\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -mg \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (cos\phi cos\theta)U_1 \\ (cos\phi sin\theta cos\psi + sin\phi sin\psi)U_1 \\ (cos\phi sin\theta sin\psi - sin\phi cos\psi)U_1 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

Bir diğer taraftan jiroskopik tork (τ_G), rotorların dönüşünün etkisiyle üretilmektedir ve Eşitlik 2.21 ile ifade edilebilir.

$$\tau_G = \begin{bmatrix} J_r\Omega_r\dot{\theta} \\ -J_r\Omega_r\dot{\phi} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

$$\Omega_r = -\Omega_1 + \Omega_2 - \Omega_3 + \Omega_4 \tag{2.22}$$

Jiroskopik torkun (τ_G) da dahil olmasıyla birlikte İHA'nın Euler eşitliği daha genel bir formda yeniden tanımlanabilir (Eşitlik 2.23).

$$\tau_B + \tau_G = I\ddot{\Theta} + \dot{\Theta}x(I\Theta) \tag{2.23}$$

Burada I;

$$I = \begin{pmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \tag{2.24}$$

olarak ifade edilmektedir. I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} ifadeleri sırasıyla *x*, *y* ve *z* eksenleri etrafındaki ataletsel momentlerdir.

Dönme hareketleri (bir diğer ifadeyle İHA Euler açı hareketleri); Eşitlik 2.18, 2.21 ve 2.23'ün kullanılması sonucunda Eşitlik 2.25 ile ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} I_{xx}\ddot{\phi} &= \dot{\theta}\dot{\psi}\left(I_{yy} - I_{zz}\right) + \dot{\theta}J_r\Omega_r + u_2 \\ I_{yy}\ddot{\theta} &= \dot{\phi}\dot{\psi}(I_{zz} - I_{xx}) - \dot{\theta}J_r\Omega_r + u_3 \\ I_{zz}\ddot{\psi} &= \dot{\phi}\dot{\theta}\left(I_{xx} - I_{yy}\right) + u_4 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Bu kapsamda 2.20 ve 2.25 eşitliklerinin bir arada yazılması sonucunda dört rotorlu İHA'nın 6 serbestlik dereceli matematiksel modeli, 2.26 – 2.31 ile elde edilmiştir.

$$\ddot{\phi} = \frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}}\dot{\theta}\dot{\psi} + \frac{J_r}{I_{xx}}\dot{\theta}\Omega_r + \frac{1}{I_{xx}}u_2 \tag{2.26}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}}\dot{\phi}\dot{\psi} - \frac{J_r}{I_{yy}}\dot{\phi}\Omega_r + \frac{1}{I_{yy}}u_3 \tag{2.27}$$

$$\ddot{\psi} = \frac{(I_{xx} - I_{yy})}{I_{zz}}\dot{\phi}\dot{\theta} + \frac{1}{I_{zz}}u_4 \tag{2.28}$$

$$\ddot{x} = \frac{u_1}{m}(cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \tag{2.29}$$

$$\ddot{y} = \frac{u_1}{m}(cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi) \tag{2.30}$$

$$\ddot{z} = \frac{u_1}{m}(cos\phi\cos\theta) - g \tag{2.31}$$

2.1.6 Dört rotorlu İHA'nın durum uzay modeli

Daha önceki bölümlerde elde edilen eşitlikler neticesinde dört rotorlu İHA'nın durum vektörü Eşitlik 2.32 ile ifade edilebilir:

$$\begin{gathered} X = [\phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi} \quad z \quad \dot{z} \quad x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y}]^T \\ X = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6 \quad x_7 \quad x_8 \quad x_9 \quad x_{10} \quad x_{11} \quad x_{12}]^T \end{gathered} \tag{2.32}$$

Durum-uzay modeli ise şu şekildedir:

$$\dot{X} = f(X) + g(X)U \tag{2.33}$$

Bu bölümde ise daha önceki bölümlerde açıklanan U girdi vektörü eşitliği (2.15) ve 6 serbestlik dereceli İHA modeli eşitlikleri (2.26 – 2.31) kullanılarak durum-uzay modeli ($\dot{X}$); girdi vektörü (U) ve durum vektörü (X) cinsinden elde edilmiştir (Eşitlik 2.34).

$$\dot{X} = f(X,U) = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}a_1 + \dot{\theta}\Omega_r a_2 + u_2 b_1 \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}\dot{\psi}a_3 - \dot{\phi}\Omega_r a_4 + u_3 b_2 \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta}\dot{\phi}a_5 + u_4 b_3 \\ \dot{z} \\ \frac{u_t}{m}u_1 - g \\ \dot{x} \\ \frac{u_x}{m}u_1 \\ \dot{y} \\ \frac{u_y}{m}u_1 \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Bu kapsamda $f(X)$ ve $g(X)$ ise Eşitlik 2.35 ile ifade edilebilir.

$$f(X) = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta}\dot{\psi}a_1 + \dot{\theta}\Omega_r a_2 \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi}\dot{\psi}a_3 - \dot{\phi}\Omega_r a_4 \\ \dot{\psi} \\ \dot{\theta}\dot{\phi}a_5 \\ \dot{z} \\ -g \\ \dot{x} \\ 0 \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix}, \; g(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_t}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_x}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{u_y}{m} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

$$\mathrm{a}_1 = \frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \tag{2.36}$$

$$\mathrm{a}_2 = \frac{J_r}{I_{xx}} \tag{2.37}$$

$$\mathrm{a}_3 = \frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \tag{2.38}$$

$$\mathrm{a}_4 = \frac{J_r}{I_{yy}} \tag{2.39}$$

$$\mathrm{a}_5 = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \tag{2.40}$$

$$b_1 = \frac{1}{I_{xx}} \tag{2.41}$$

$$b_2 = \frac{1}{I_{yy}} \tag{2.42}$$

$$b_3 = \frac{1}{I_{zz}} \tag{2.43}$$

$$u_t = c_\phi c_\theta \tag{2.44}$$

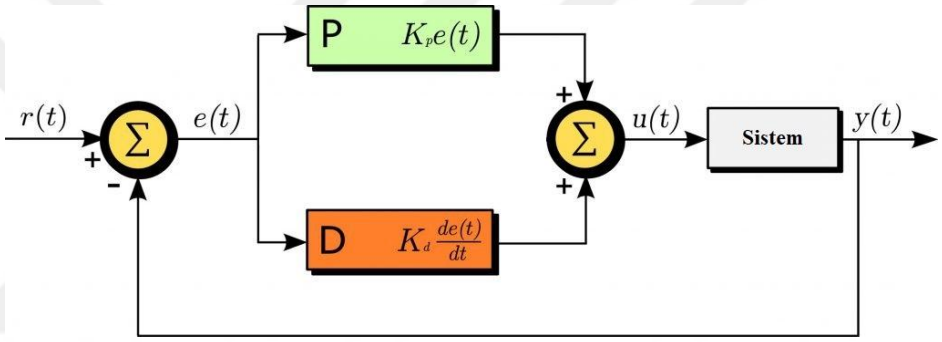
$$u_x = c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi \tag{2.45}$$

$$u_y = c_\phi s_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi \tag{2.46}$$

2.2 Dört Rotorlu İHA Kontrolü

2.2.1 PD kontrol

PD (oransal – türev) denetleyiciler birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir kapalı çevrim (geri beslemeli) kontrol sistemidir. Çok çeşitli çalışma koşullarındaki kararlılıkları ve yüksek performanslarının yanısıra, algoritmalarının kolay ve hızlı bir şekilde uygulanabilmesi günümüz endüstrisinde kullanılan en yaygın kontrolcü olmalarındaki en önemli sebeplerdendir.



Şekil 2.7 PD denetleyici (Onion 2019)

PD denetleyici ölçülen sinyal (geri besleme) ile hedef değer arasındaki farkı hesaplayarak bir hata sinyali üretir ve bunu algoritmasında kullanır. Amacı ise bu hata sinyalini minimize etmek ve bunun sonucunda ölçülen sinyali hedef değere (*setpoint*) ulaştırmaktır. Bu kontrolcüler 2 farklı denetleyicinin birleşimi olarak ifade edilebilir.

Bunlar;

● oransal (proportional - *P*)

● türev (derivative - *D*)

denetleyicileridir.

Oransal kontrolcü, mevcut hata ile doğru orantılı olan bir kontrol sinyali üretmektedir. Yani bir diğer ifadeyle o anki hata sinyali ne kadar büyükse üretilecek olan kontrol sinyali de bu hatayla orantılı olarak o kadar büyük olur. Oransal kontrolcü ile üretilen kontrolcü sinyalinin büyüklüğü K_p kazancı ile ayarlanmaktadır. Oransal kontrolcü kazancının (K_p) çok yüksek olması durumunda sistem kararsız hale gelebilmektedir. Bir diğer taraftan bu kazancın çok düşük olması durumunda ise yeterli kontrol sinyali üretilemeyeceği için kontrolcü hata sinyalini gidermek için gereken duyarlılığı gösteremeyecektir.

PD kontrolcüdeki türev bölümü ise hata sinyalinin değişim hızı ile ilgilenmektedir. Elde edilen hata değişim hızını K_d gibi bir kazanç ile çarparak bir kontrol sinyali üretmektedir. Türev bölümü aslında gelecekte oluşabilecek sistem davranışlarını tahmin ederek hedef noktaya hızlı bir şekilde ulaşmak için gereken en uygun kontrol sinyallerinin üretilmesini amaçlamaktadır. Bir diğer taraftan ise türev bölümü çok hassastır ve en ufak bir gürültü sonucunda dahi aniden değişebilen kontrol sinyalleri üretebilirler. Genellikle bu gibi durumların engellenebilmesi için ek olarak alçak geçiren bir filtre de kullanılabilmektedir.

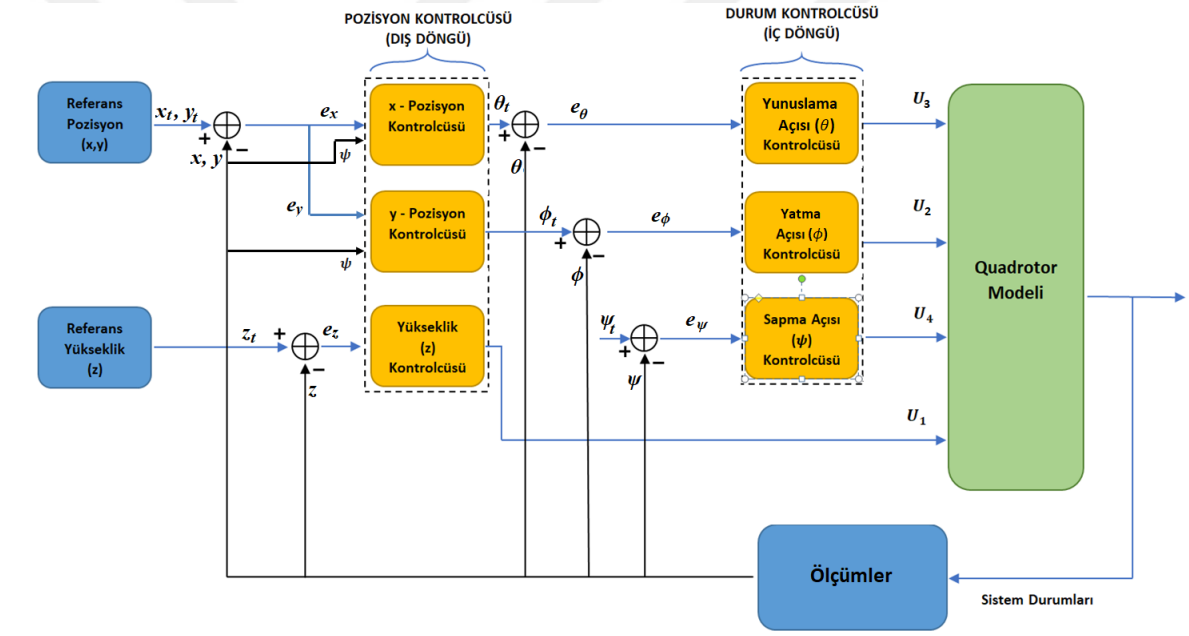
Tüm bu birimlerin kontrolcüye dahil olmasıyla birlikte *PD* denetleyici Eşitlik 2.47 ile ifade edilebilir.

$$u = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \tag{2.47}$$

2.2.2 Dört rotorlu İHA durum ve pozisyon kontrolü

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere İHA hareketleri rotor hızlarının değiştirilmesi sonucunda 4 adet girdi olan itki (*thrust* - U_1), yatma (U_2), yunuslama (U_3) ve sapma (U_4) yönelimleri aracılığıyla elde edilmektedir. İtki aracılığıyla *z* pozisyon değişikliği gerçekleştirilirken; yunuslama ve yatma yönelimleri sonucunda sırasıyla *x* ve *y* pozisyon değişiklikleri elde edilebilmektedir. Bu hareketlerin kararlı ve dinamik bir

şekilde sağlanabilmesi için geri beslemeli kontrol sistemlerine (bu tez kapsamında PD kontrolcülere) ihtiyaç vardır. Bu kapsamda dört rotorlu İHA modelinde (2.15) eşitlikleri incelendiğinde 4 adet girdi olduğu görülmektedir (U_1, U_2, U_3, U_4). Ancak bir diğer taraftan 6 serbestlik dereceli İHA modeli eşitlikleri incelendiğinde ise kontrol edilmesi gereken 6 farklı alt sistem bulunmaktır. Bunlar doğrusal ve açısal ivmelerdir. Bu 6 farklı durumun denetlenmesi sonucunda ise İHA'nın *x*, *y*, *z* pozisyon kontrolleri ve yatma (ϕ), yunuslama (θ), sapma (ψ) Euler açıları durum kontrolleri gerçekleştirilmektedir. Ancak bahsedilen bu 6 alt sistemin (3 pozisyon, 3 durum) kontrolü için elimizde sadece 4 girdi (U_1, U_2, U_3, U_4) bulunmaktadır. Bu sebeple Şekil 2.8'de görülen kontrol mimarisi geliştirilmiştir.



Şekil 2.8 Dört rotorlu İHA'nın durum ve pozisyon kontrolü

Böylece 4 adet girdi üzerinden *x*, *y*, *z* eksenlerinde pozisyon ve yatma (ϕ), yunuslama (θ), sapma (ψ) Euler açıları durum kontrolleri sağlanabilmektedir. Şekil 2.8'de de görüldüğü gibi İHA'nın durum (θ, ϕ ve ψ) ve *z* ekseni pozisyon kontrolleri doğrudan gerçekleştirilebiliyorken, *x* ve *y* eksenlerindeki pozisyon kontrolleri *cascade* bir yaklaşım ile dolaylı olarak gerçekleştirilmektedir. Böylece 4 adet girdi (U_1, U_2, U_3, U_4) ve 6 adet (*PD*) denetleyici kullanılarak İHA'nın pozisyon ve durum kontrolleri sağlanmaktadır.

Dört rotorlu İHA'nın *x* ve *y* eksenlerindeki pozisyon kontrolü: Dört rotorlu İHA'nın *x* ve *y* eksenlerinde hareketinin sağlanabilmesi için sırasıyla yunuslama (θ) ve yatma (ϕ) Euler açılarının 0°'den farklı olması gerekmektedir. Bu kapsamda Şekil 2.8'de de görüldüğü üzere *x* ve *y* pozisyon denetleyicileri aracılığıyla hedef pozisyona (x_t, y_t) hareketin gerçekleştirilebilmesi için sırasıyla yunuslama ve yatma açı isterleri (θ_t, ϕ_t) üretilmektedir. Bu isterler yunuslama ve yatma durum kontrolcüleri tarafından girdi (*setpoint*) olarak kullanılmakta ve bu girdiler neticesinde İHA'nın Euler açıları (İHA yönelimi) durum kontrolcüler tarafından değiştirilmektedir. Bu durum değişimi sonucunda ise İHA'nın *x* ve *y* eksenlerinde hareketi gerçekleşmekte ve (*x*, *y* eksenlerinde) hedef pozisyona ulaşımı sağlanmaktadır.

"İHA'yı hedef pozisyona götürecek girdiler, Eşitlik 2.20'ye Euler açı isterlerinin dahil edilmesiyle birlikte Eşitlik 2.48 ve 2.49'daki gibi ifade edilebilir" (Demiryürek 2018).

$$u_x = m\ddot{x} = (cos\phi_t cos\psi_t sin\theta_t + sin\phi_t sin\psi_t)U_1 \quad (2.48)$$

$$u_y = m\ddot{y} = (cos\phi_t sin\psi_t sin\theta_t - sin\phi_t cos\psi_t)U_1 \quad (2.49)$$

"Eşitlik 2.48 $\sin\psi_t$, Eşitlik 2.49 ise $-cos\psi_t$ ile çarpılıp toplanırsa yatma açısı isteri, ϕ_t, eşitlik 2.50'de verildiği gibi bulunur" (Demiryürek 2018).

$$\phi_t = sin^{-1}\left(\frac{1}{U_1}(u_x sin\psi_t - u_y cos\psi_t)\right) \quad (2.50)$$

"Aynı şekilde Eşitlik 2.48 $cos\psi_t$, Eşitlik 2.49 ise $\sin\psi_t$ ile çarpılıp toplanırsa yunuslama açısı isteri, θ_t, Eşitlik 2.51'de verildiği gibi bulunur" (Demiryürek 2018).

$$\theta_t = sin^{-1}\left(\frac{1}{U_1}\left(\frac{u_x \cos\psi_t + u_y \sin\psi_t}{cos\phi_t}\right)\right) \quad (2.51)$$

Dört rotorlu İHA'nın yükseklik kontrolü: Dört rotorlu İHA'nın yükseklik kontrolü (*z* eksenindeki pozisyon kontrolü), Eşitlik 2.15'te tanımlanan U_1 (itki - *thrust*) üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu doğrultuda hedef *z* pozisyonuna (z_t) ulaşılması için gereken itkiyi u_z olarak tanımlarsak altı serbestlik dereceli İHA modelindeki 2.31 eşitliğini kullanarak Eşitlik 2.52'yi elde ederiz.

$$u_z = mg - (cos\phi cos\theta)U_1 \tag{2.52}$$

Böylece hedef yüksekliğe ulaşmak için gereken U_1 kuvveti Eşitlik 2.53 ile ifade edilebilir.

$$U_1 = (u_z + mg)\frac{1}{(cos\phi cos\theta)} \tag{2.53}$$

Dört rotorlu İHA'nın durum kontrolü: İHA üzerine etkiyen net tork aracılığıyla İHA yönelimlerinin değiştirilebilmesi için U_2, U_3 ve U_4 girdileri kullanılmaktadır. Bu bağlamda İHA'nın yatma açısı durum kontrolü için U_2, yunuslama açısı durum kontrolü için U_3 ve sapma açısı durum kontrolü için ise U_4 girdikleri kullanılmaktadır. Bu kapsamda durum açı isterlerinin (θ_t, ϕ_t, ψ_t) elde edilebilmesi için durum kontrolcüler tarafından gerekli kontrol sinyallerini üretilmekte ve bu sinyaller İHA modelindeki U_2, U_3 ve U_4 girdilerine iletilmektedir.

Dört rotorlu İHA'nın *PD* kontrolcüler ile denetlenmesi: Dört rotorlu İHA'nın durum ve pozisyon denetimlerinin *PD* kontrolcüler tarafından gerçekleştirilebilmesi için Şekil 2.8'de de görülen hata sinyallerinin üretilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda *x*, *y*, *z* pozisyonları ve yatma, yunuslama, sapma durum açıları için elde edilecek hata sinyalleri aşağıdaki Eşitlik 2.54 – 2.59 ile ifade edilebilir.

$$e_x(t) = x_t - x \tag{2.54}$$

$$e_y(t) = y_t - y \tag{2.55}$$

$$e_z(t) = z_t - z \tag{2.56}$$

$$e_\theta(t) = \theta_t - \theta \tag{2.57}$$

$$e_\phi(t) = \phi_t - \phi \tag{2.58}$$

$$e_\psi(t) = \psi_t - \psi \tag{2.59}$$

Hata sinyallerinin elde edilmesi sonucunda ise İHA pozisyon kontrolü için 2.60 – 2.62'deki *PD* kontrol eşitlikleri elde edilmektedir.

$$u_x = K_{Px} e_x(t) + K_{Dx} \frac{de_x(t)}{dt} \tag{2.60}$$

$$u_y = K_{Py} e_y(t) + K_{Dy} \frac{de_y(t)}{dt} \tag{2.61}$$

$$u_z = K_{Pz} e_z(t) + K_{Dz} \frac{de_z(t)}{dt} \tag{2.62}$$

İHA'nın durum denetimi için elde edilen *PD* kontrol eşitlikleri ise şu şekildedir.

$$U_2 = K_{P\phi} e_\phi(t) + K_{D\phi} \frac{de_\phi(t)}{dt} \tag{2.63}$$

$$U_3 = K_{P\theta} e_\theta(t) + K_{D\theta} \frac{de_\theta(t)}{dt} \tag{2.64}$$

$$U_4 = K_{P\psi} e_\psi(t) + K_{D\psi} \frac{de_\psi(t)}{dt} \tag{2.65}$$

İHA pozisyon ve durum (Euler açı) denetleyicilerinin *PD* kontrol katsayıları hem benzetim çalışması (Çizelge 3.1) hem de uygulama (Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10) bölümlerinde ayrı ayrı paylaşılmıştır.

2.3 Kamera Modeli ve Poz Kestirimi

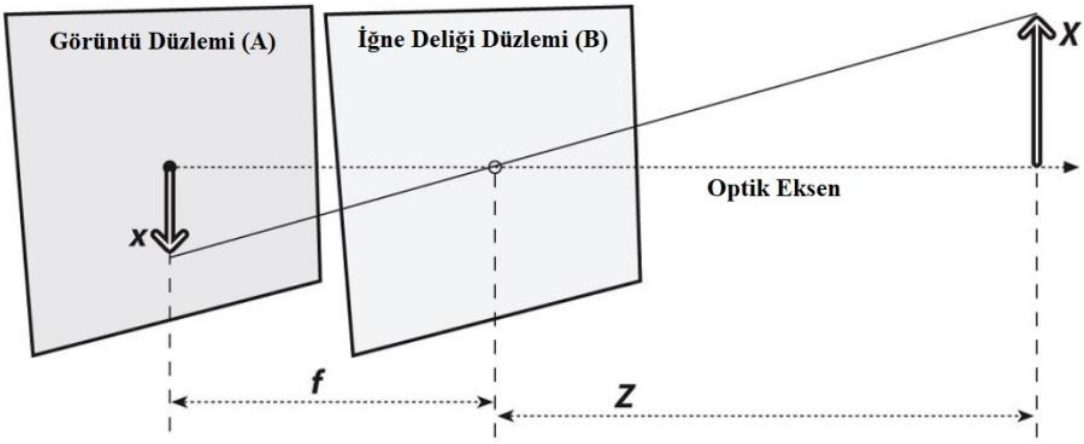
Hareketli bir platforma otonom iniş çalışmasının başarıyla gerçekleştirilebilmesi için platform ve İHA konumlarının biliniyor olması gerekmektedir. Bu kapsamda otonom iniş çalışmasındaki bu bilgiler (İHA ve platform konumu) benzetim ortamında mükemmel bir şekilde (gürültüsüz bir şekilde) biliniyorken, uygulama bölümünde bu bilgilerin elde edilebilmesi için İHA ön kamerasının kullanılması gerekmektedir. İşte bu kapsamda gerçekleştirilen uygulamada hareketli iniş platformu üzerindeki ArUco Board kullanılarak İHA ön kamerasının poz kestirimi gerçekleştirilmektedir. Böylece bu kestirim sonucunda İHA ön kamerasına göre ArUco Board işaretçinin nerede olduğu yani kameraya göre işaretçinin konum bilgileri elde edilmektedir. Ayrıca kestirim işlemi sonucunda kameraya göre işaretçinin durum (Euler) açıları da elde edilmektedir.

Gerçekleştirilen poz kestirim işlemi sonucunda elde edilen bu bilgiler otonom iniş çalışmasında doğrudan kullanılamamaktadır çünkü bu işlem sonucunda biraz önce de belirtildiği gibi kameraya göre işaretçinin nerede olduğu tespit edilmektedir. Ancak tez kapsamında Aruco Board referans çerçevesine (iniş platformuna) göre İHA kamerasının nerede olduğu yani İHA'nın nerede olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda referans çerçevesi dönüşümü ve iniş platformuna göre İHA koordinat bilgileri elde edilmesi gibi çalışmalar bu bölümün kapsamı dışındadır. Kamera poz kestirimi sonrasındaki çalışmalar Uygulama Sistem Mimarisi bölümünde (bölüm 3.2.3'te) detaylı bir şekilde sırayla açıklanmaktadır.

Özetle bu bölümde İHA konum ve durum (Euler) açı bilgilerinin elde edilmesindeki en kritik yapı olan, (ArUco Board kullanılarak) kamera poz kestirimi çalışması açıklanmaktadır.

2.3.1 İğne deliği kamera modeli

Bu modelde ışık, Şekil 2.9'da görüldüğü üzere *B* düzlemindeki iğne deliğinden geçerek *A* düzlemi üzerine yansıtılır. Böylece herhangi bir nesnenin *A* düzlemi üzerinde ters görüntüsü oluşturulabilir.

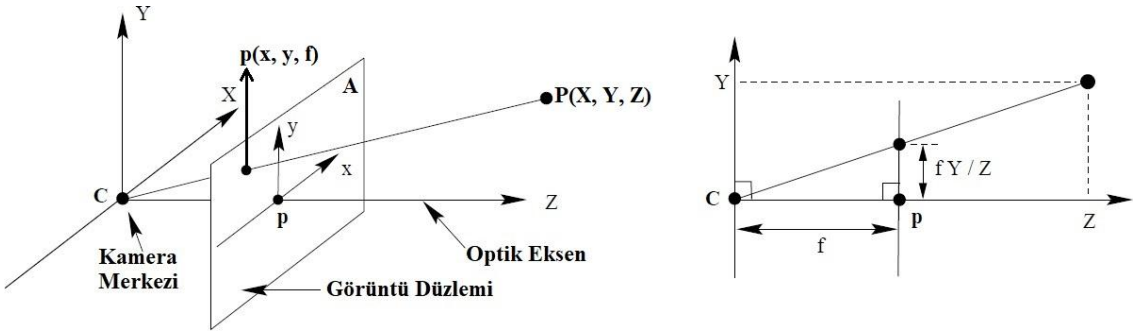


Şekil 2.9 İğne deliği kamera modeli (Patrioli 2020)

Bu modelde f iğne deliğinin kamera açıklığı ile görüntü düzlemi arasındaki mesafe olan odak uzaklığını, Z kameradan nesneye olan mesafeyi, X nesnenin uzunluğu, x ise görüntü düzlemindeki nesne görüntüsünü ifade etmektedir. Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi X ile x arasındaki üçgen benzerliği Eşitlik 2.66 ile ifade edilebilir.

$$x = -f\frac{X}{Z} \tag{2.66}$$

Eksi işareti iğne deliğinin arkasındaki *A* düzlemi görüntüsünün baş aşağı olduğunu ifade etmektedir. Tanımlanan modeli daha basit bir yapıyla ifade edebilmek için *A* düzlemini ve nesne görüntüsünü Şekil 2.10'daki gibi iğne deliğinin sağına alabiliriz.



Şekil 2.10 Yeniden düzenlenmiş iğne deliği kamera modeli (Forsman 2010)

Böylece eksi işaretinden kurtularak düz bir görüntü elde etmiş oluruz. Elde edilen bu yeni model ile birlikte nesne ve görüntü arasındaki ilişki Eşitlik 2.67 ve 2.68 ile ifade edilebilir:

$$x = f\frac{X}{Z} \tag{2.67}$$

$$y = f\frac{Y}{Z} \tag{2.68}$$

Bir diğer taraftan elde edilen kamara modeli biraz daha iyileştirilebilir. Hem sonraki bölümlerde aktarılacak olan kamera içsel parametreleri kaynaklı hem de kamera üretiminden kaynaklı olarak kameranın merkezi tam olarak, iğne deliği olarak adlandırılan orijin üzerinde değildir. Bu nedenle modele *x* ve *y* ekseni ofsetleri dahil edilmelidir. Bu ofsetlerin de dahil edilmesiyle Eşitlik 2.69 ve 2.70 elde edilir:

$$x = f_x\frac{X}{Z} + c_x \tag{2.69}$$

$$y = f_y\frac{Y}{Z} + c_y \tag{2.70}$$

Aslında bu model ile birlikte; 3 boyutlu bir vektörün (nesne), 2 boyutlu bir düzlem (görüntü düzlemi) üzerinde projeksiyonunun (nesne görüntüsü) nasıl elde edildiği gösterilmektedir. Bu bağlamda elde edilen modeli biraz daha genelleştirmek için n boyutlu koordinatları (n+1) boyutlu koordinatlar ile ifade etmemizi sağlayan homojen

koordinatlar kullanılabilir. Böylece Eşitlik 2.69 ve 2.70 kullanılarak Eşitlik 2.71 ve 2.72 elde edilir (Patrioli 2020):

$$\vec{p} = M.\vec{P} \tag{2.71}$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{2.72}$$

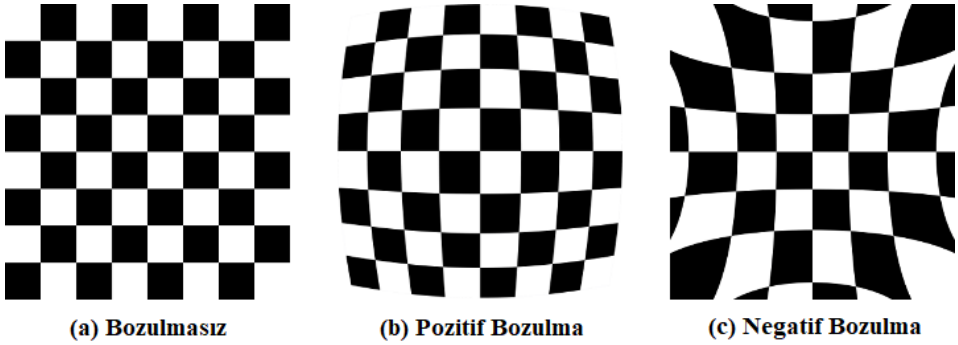
$$\vec{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \vec{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

Eşitlik 2.71 ve 2.72'de ifade edilen M matrisi kamera içsel parametrelerini (özelliklerini) içeren bir matristir.

2.3.2 Diğer kamera içsel parametreleri

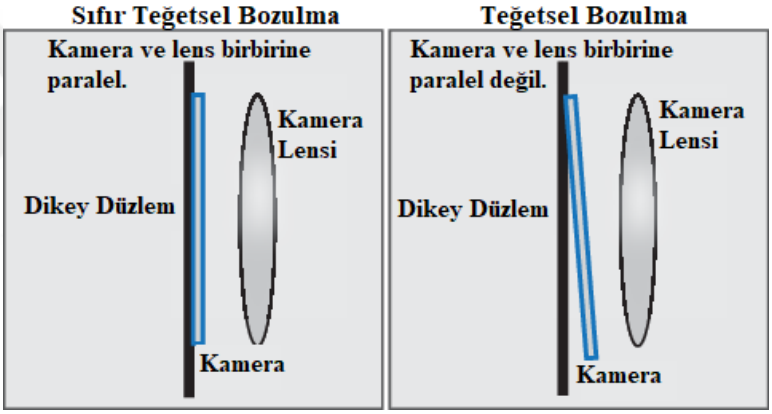
Önceki bölümlerde bahsedilen odak uzunluğu ve kamera merkezi offsetlerine ek olarak radyal bozulma ve teğetsel bozulma gibi durumlar da kamera içsel parametrelerine dahil edilebilir.

Radyal bozulma, ışığın eşit olmayan bir şekilde kırılması sonucu oluşur. Işık, mercek kenarlarında daha fazla kırlırken, mercek merkezinde çok daha az kırılmaktadır. Bunun sonucunda ise Şekil 2.11'de de gösterilen bozulmuş görüntüler elde edilmektedir. Genellikle görüntü üzerinde 2 çeşit radyal bozulma etkisi bulunmaktadır. Bunlar; negatif (barrel, Şekil 2.11c) bozulma ve pozitif (pincushion, Şekil 2.11b) bozulmalardır.



Şekil 2.11 Radyal bozulmalar

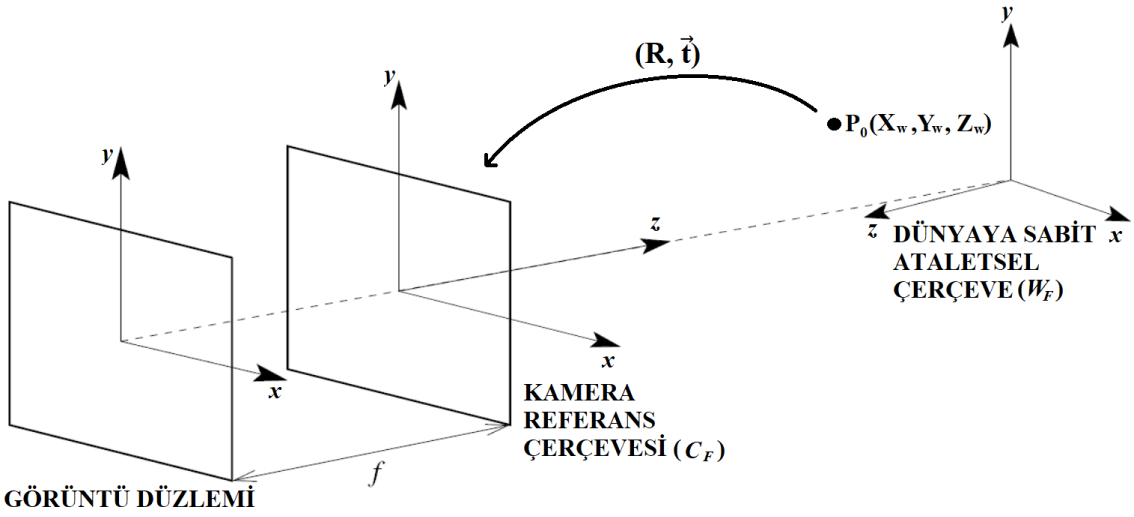
Bir diğer içsel bozulma türü ise teğetsel bozulmadır. Bu bozulma türü, görüntü düzlemi (kamera) ile kamera lensinin birbirine tam olarak paralel olmaması durumunda oluşmaktadır (Şekil 2.12). Bu nedenle de eğimli bir görüntü elde edilmektedir.



Şekil 2.12 Teğetsel bozulma (Mathworks 2022)

2.3.3 Kamera dışsal parametreleri

Dünyaya sabit ataletsel çerçevedeki herhangi bir nesne kamera perspektifinden görüldüğünde; dünyaya sabit ataletsel çerçeveden kamera referans çerçevesine bir dönüşüm gerçekleşir. İşte bu dönüşüm kamera dışsal parametreleri olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer ifadeyle kamera dışsal parametreleri, bir kameranın fiziksel olarak nasıl yerleştirildiğini tanımlayan değişkenlerdir. Yani bu parametreler bir kameranın pozisyonunu (x, y, z) ve rotasyonunu (roll, pitch, yaw) ifade eder.



Şekil 2.13 Dünyaya sabit ataletsel çerçeve (W_F), kamera referans çerçevesi (C_F), görüntü düzlemi ve P_0 koordinatındaki nesne

Burada R, rotasyonu; $\vec{t}$ ise ötelenmeyi (pozisyonu) ifade eden kamera dışsal parametreleridir. Bu bağlamda P_0 koordinatının kamera referans çerçevesine göre dönüşümü Eşitlik 2.73, 2.74 ya da 2.75 ile ifade edilebilir.

$$P_{0_{C_F}} = R.(P_0) + \vec{t} \tag{2.73}$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \tag{2.74}$$

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] . \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.75}$$

2.3.4 İğne deliği kamera modeli genel eşitliği

Bir diğer taraftan Şekil 2.13'te görülen dünyaya sabit ataletsel çerçevedeki bir koordinat (P_0) ve bu kordinatın görüntü düzlemindeki izdüşümü de birbirleriyle ilişkilendirilebilir. Bu bağlamda kameranın içsel ve dışsal parametrelerinin beraber kullanımıyla birlikte çok daha genel bir eşitlik olan Eşitlik 2.76 elde edilmektedir (Patrioli 2020). Böylece bu eşitlik kullanılarak P_0'ın görüntü düzlemindeki koordinatları hesaplanabilmektedir.

$$s\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} . \left(\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \right) \quad (2.76)$$

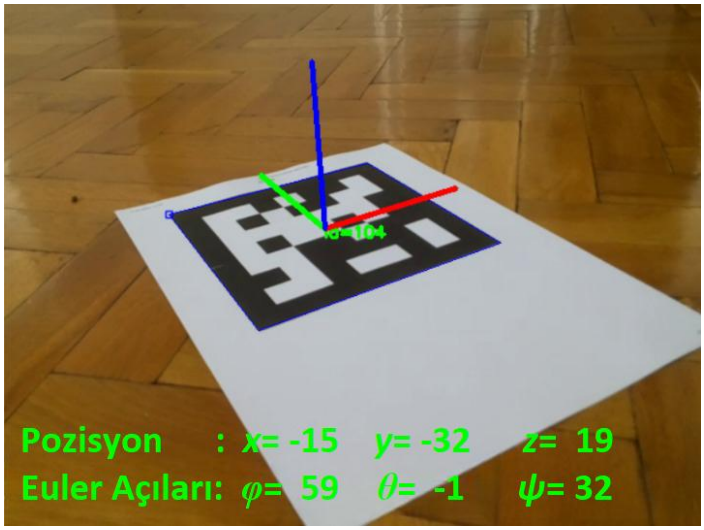
Burada s, (Kaehler ve Bradski 2016)'da da belirtildiği gibi sadece rastgele bir ölçek faktörünü temsil etmektedir.

Bir diğer taraftan tez kapsamında kamera pozunun elde edilmesi gerekmektedir. Bu durumun sağlanabilmesi için kamera dışsal parametrelerinin (R ve $\vec{t}$) elde edilmesi yeterlidir. Yani bir diğer ifadeyle kamera pozunun elde edilmesi sadece kamera dışsal parametreleriyle ilişkilidir. Kamera içsel parametreleri ile ilgili değildir. Bu kapsamda Eşitlik 2.75'teki kamera dışsal parametrelerinin (rotasyon (R) ve ötelenme ($\vec{t}$) bilgilerin) yani kamera pozunun elde edilebilmesi için ArUco işaretçi(ler) kullanılmıştır. Poz kestirim doğruluğunun arttırılması içinse tek bir ArUco işaretçi yerine ArUco Board kullanılmıştır.

2.3.5 ArUco işaretçiler ile kamera poz kestirimi

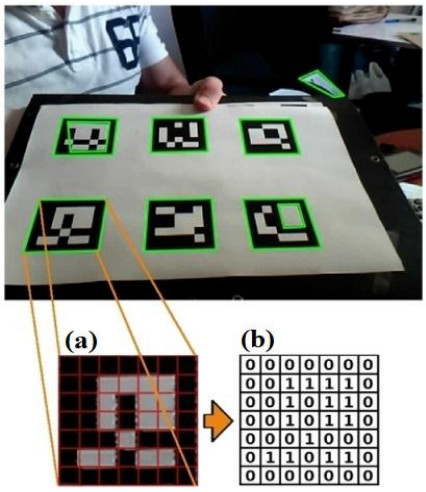
ArUco işaretçiler S. Garrido vd. (2014) tarafından geliştirilmiştir. "ArUco, İspanya'da geliştirildiği yer olan Augmented Reality University of Cordoba'nın kısaltmasıdır (LearnOpenCV 2020)."

Referans (fiducial) binary işaretçilerden biri olan ArUco işaretçiler, genellikle kamera poz kestirimleri için kullanılmaktadır. Yapıları sebebiyle diğer nesnelere göre çok daha hızlı bir şekilde tespit edilebilirler.



Şekil 2.14 ArUco işaretçi ile kamera poz kestirimi

ArUco işaretçi(ler) ile kamera poz kestirimi gerçekleştirebilmek için elde edilen görüntü ilk olarak gri görüntüye dönüştürülmekte ve görüntü üzerindeki işaretçi olabilecek tüm kare şeklindeki adaylar tespit edilmektedir. Daha sonra ise bu adayların (kare şeklindeki konturların) gerçekten bir ArUco işaretçi olup olmadığına bakılmaktadır. Bunun için önce ilgili adaya perspektif dönüşümü uygulanmakta ve adayın kanonik formu elde edilmektedir (Şekil 2.15.a). Kanonik formdaki bu adaylara Otsu'nun eşikleme yöntemi (Otsu 1979) uygulanarak adaylarda Şekil 2.15.b'de görülen ArUco bit hücrelerinin olup olmadığı test edilmektedir.



Şekil 2.15 Perspektif dönüşümü sonrası ArUco işaretçi (a) ve bit görünümü (b) (Garrido-Jurado vd. 2014)

Otsu eşikleme yöntemi, bir görüntüyü iki farklı gruba ayırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, bir görüntüdeki piksel değerlerinin dağılımını analiz ederek, en uygun eşik değerini belirler. Bu eşik değerine göre, piksel değerleri eşik değerinden düşük olan pikseller birinci gruba; eşik değerinden yüksek olan pikseller ise ikinci gruba atanır. Otsu eşikleme yönteminde, eşik değerini belirlemek için iki grubun ortalama değerleri kullanılır. Bunlar, birinci grubun piksel değerlerinin ortalaması ve ikinci grubun piksel değerlerinin ortalaması olarak da adlandırılabilir. Otsu eşikleme yönteminde amaç, iki grubun ortama değerleri arasındaki farkı (*intra-class variance*) en az seviyede tutmaktır. Bu sayede, eşikleme sonucu oluşan iki grubun ayrımı en iyi şekilde yapılmış olur.

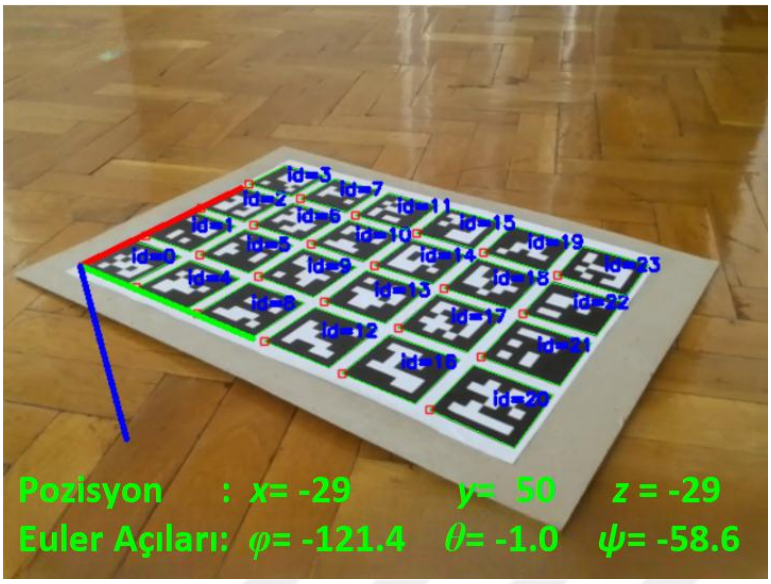
Otsu eşikleme yöntemi ile ArUco işaretçi tespiti sonrasında kameranın poz kestirimi (pozisyon ve oryantasyon bilgilerinin elde edilmesi) gerçekleştirmek mümkündür. Bu çalışmada kamera poz kestirimleri için OpenCV kütüphanesinden *solvePnP* fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon, Levenberg-Marquardt algoritmasını (Levenberg 1944) içermektedir.

Sönümlü en küçük kareler yöntemi olarak da bilinen Levenberg-Marquardt algoritması (Levenberg 1944), doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerinin çözümünde kullanılır. Bu algoritma, doğrusal olmayan bir optimizasyon problemine çözüm bulmak için iteratif bir yöntem kullanır. İteratif yöntem, bir başlangıç tahmini kullanarak bu tahmini iteratif olarak günceller ve bu sayede en küçük hata kareleri çözümünü bulmaya çalışır.

solvePnP fonksiyonu, bir görüntüdeki noktaların 3D koordinatlarını tahmin etmek için bu algoritmayı (Levenberg-Marquardt algoritmasını) kullanmaktadır. *solvePnP* fonksiyonu, kameranın içsel ve dışsal parametrelerinin bulunduğu bir denklem sistemi oluşturur (Eşitlik 2.76) ve bu denklem sistemini çözerek, görüntüdeki noktaların 3D koordinatlarını tahmin eder. Bu işlemin sonucunda ise Eşitlik 2.73 – 2.75'teki Euler açı bilgilerini içeren R (rotasyon) matrisi ve koordinat bilgilerini içeren $\vec{t}$ (ötelenme) vektörü elde edilir. Böylece kamera poz kestirimi gerçekleştirilmiş olur.

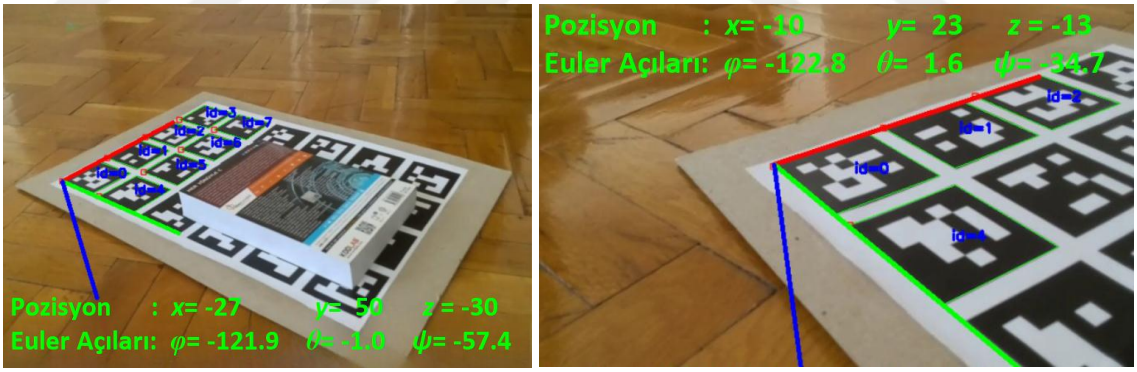
Tek bir ArUco işaretçi ile kamera poz kestirimi gerçekleştirildiğinde ise *solvePnP* fonksiyonunda ArUco'nun köşe koordinatları kullanılmaktadır. Yani bir diğer ifadeyle en küçük kareler probleminin çözümünde sadece 4 nokta kullanılmaktadır. Ancak kamera ile ArUco işaretçi arasındaki mesafe arttıkça işaretçi küçülür ve bir aşamadan sonra tek bir ArUco işaretçi üzerinde bulunan bu 4 nokta kamera poz kestirim problemi çözümünde yetersiz kalır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak ise elde edilen kamera poz kestirimleri tutarsızlaşmaya başlar. Bu problemin çözümü için ArUco Board kullanılmıştır.

ArUco board ile kamera poz kestirimi: ArUco board, içerisinde birden fazla ArUco işaretçi bulunduran bir referans olarak ifade edilebilir. ArUco Board üzerindeki tüm işaretçiler, bu işaretçilerin büyüklükleri ve birbirleri arasındaki mesafeler OpenCV ArUco kütüphanesi kapsamında önceden bilinmektedir. Bu yapı, tek bir ArUco işaretçi ile kamera poz kestirimi yaklaşımına göre çok daha avantajlıdır. Çünkü tek bir ArUco işaretçi ile kamera poz kestirimi senaryosunda en küçük kareler problemi çözümünde sadece 4 nokta (ArUco köşeleri) kullanılırken; ArUco Board ile kamera poz kestirimi senaryosunda yapı üzerinde birden fazla işaretçi olduğu için en küçük kareler problemi çözümünde 4 noktadan çok daha fazla nokta kullanılmaktadır. Bu durumun doğal bir sonucu olarak ise çok daha tutarlı kamera poz kestirimleri elde edilmektedir. Özellikle bu durumun önemi ArUco Board ile kamera arasındaki mesafe arttıkça daha da ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.16 Aruco Board ile kamera poz kestirimi - 1

Bir diğer taraftan bu yapının en önemli özelliklerinden biri ise ArUco Board üzerindeki tüm işaretçilerin tespit edilememesi durumunda dahi Şekil 2.17'de görüldüğü gibi kamera poz kestirimlerinin gerçekleştirilebilmesidir.



Şekil 2.17 Aruco Board ile kamera poz kestirimi – 2

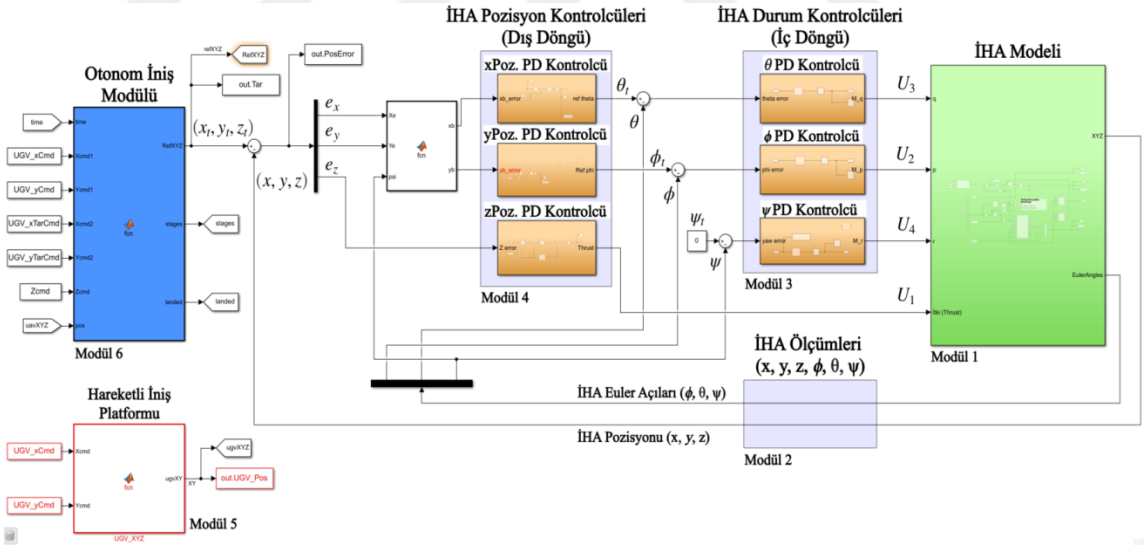
3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1 Benzetim Çalışması

Bu tez kapsamında matlab/simulink ortamında modellenen dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişi gerçekleştirilmiştir.

3.1.1 Benzetim çalışması sistem mimarisi

Matlab/simulink ortamında gerçekleştirilen çalışma Şekil 3.1'de görülmektedir. Bu kapsamda benzetim ortamında randevu alanına varmış İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişinin nasıl gerçekleştirildiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.1'de görülen her bir modül (Modül 1 – 6) sırasıyla açıklanmıştır.



Şekil 3.1 Dört rotorlu İHA'nın hareketli bir platforma otonom inişi: benzetim çalışması (Matlab/Simulink)

- İHA modeli (Şekil 3.1 Modül 1): Benzetim ortamında otonom inişin gerçekleştirilebilmesi için önce Şekil 3.1'de görülen İHA modeli oluşturulmuştur. İHA modelinin oluşturulabilmesi için, Dört Rotorlu İHA Dinamikleri bölümünde (bölüm 2.1.5'de) açıklanan 6 serbestlik dereceli İHA matematiksel modeli eşitlikleri (Eşitlik 2.26 – 2.31) kullanılmıştır.

- İHA ölçümleri (Şekil 3.1 Modül 2): Tez kapsamında matlab/simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmasında İHA'nın konum (x, y, z) ve durum açı bilgileri (ϕ, θ, ψ) gürültüsüz bir şekilde elde edilmektedir. Yani bu bilgilerde herhangi bir ölçüm gürültüsü bulunmamaktadır. Benzetim ortamındaki İHA modelinin pozisyon kontrolü bu bilgiler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

- İHA pozisyon ve durum kontrolcüleri (Şekil 3.1 Modül 3 ve 4): Dört rotorlu İHA'nın pozisyon ve durum açı kontrollerinin gerçekleştirilebilmesi için bölüm 2.2.2'de önerilen ve açıklanan İHA kontrol mimarisi (Şekil 2.8) matlab/simulink ortamında bire bir uygulanmıştır. Şekil 3.1'de de görüldüğü üzere bu mimaride 3 adet *PD* pozisyon (x, y, z) kontrolcü, 3 adet *PD* durum/Euler (ϕ, θ, ψ) açı kontrolcü bulunmaktadır. Bu kontrolcülerde kullanılan *P* ve *D* kontrol katsayıları Çizelge 3.1'de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.1 Benzetim ortamındaki İHA'nın *PD* kontrol katsayıları

	K_P		K_D	
x Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü	K_{Px}	1.0	K_{Dx}	0.2
y Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü	K_{Py}	1.0	K_{Dy}	0.2
z Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü	K_{Pz}	2.48	K_{Dz}	1.52
Yunuslama (θ) Açısı Kontrolcüsü	$K_{P\phi}$	1.1	$K_{D\phi}$	1.2
Yatma (ϕ) Açısı Kontrolcüsü	$K_{P\theta}$	1.1	$K_{D\theta}$	0.45
Sapma (ψ) Açısı Kontrolcüsü	$K_{P\psi}$	0.6	$K_{D\psi}$	0.4

- Hareketli iniş platformu modülü (Şekil 3.1 Modül 5): Benzetim çalışmasında ayrıca iniş platformunun hareketini sağlayan bir modül de bulunmaktadır. Bu modül sayesinde hareketli iniş platformunun;

- 25 *cm/s* hızda doğrusal,
- 50 *cm/s* hızda doğrusal,
- 25 *cm/s* hızda 1 metre yarıçaplı dairesel,
- 50 *cm/*s hızda 1 metre yarıçaplı dairesel

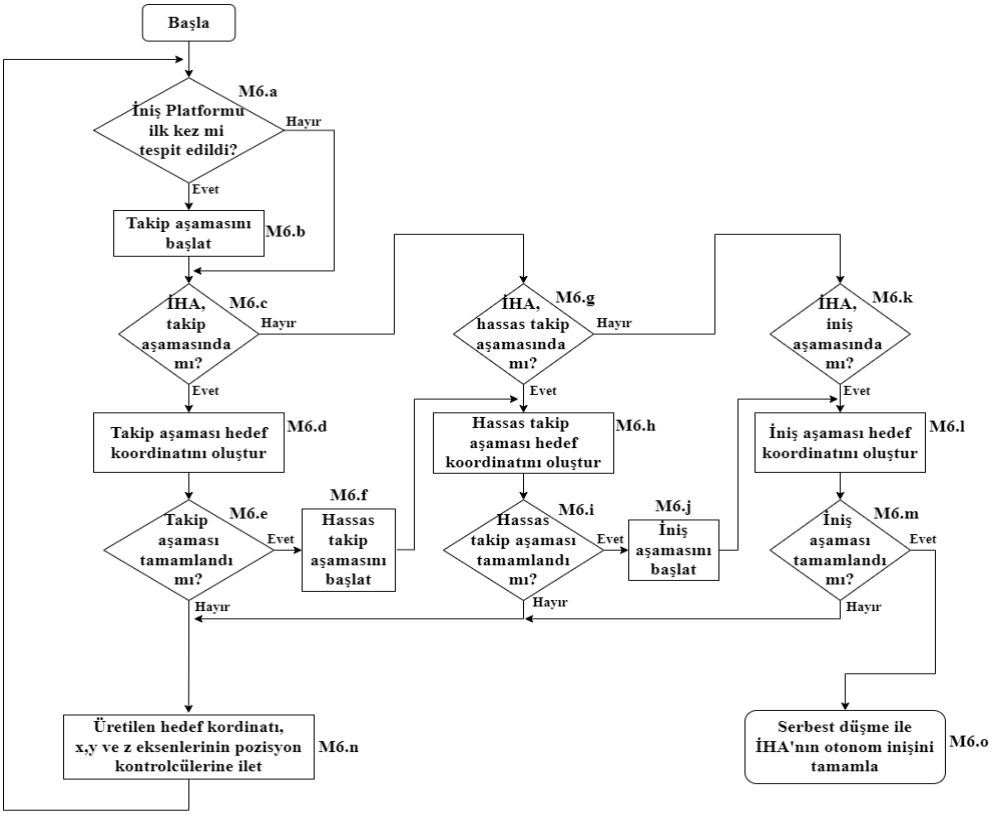
yörüngeler izleyebilmesi sağlanmıştır. Çünkü (sonraki bölümlerde daha detaylı açıklanacak olsa da) benzetim ortamındaki İHA'nın bu yörüngeleri izleyen platformlara otonom inişi gerçekleştirilmiş ve bu yörüngeler altında üretilen rüzgârlı/rüzgârsız birçok senaryo altında geliştirilen sistemin başarımı incelenmiştir.

Bir diğer taraftan hareketli iniş platformunun konum bilgileri de gürültüsüz bir şekilde elde edilmekte ve benzetim ortamındaki otonom iniş çalışmasında kullanılmaktadır.

- Otonom iniş modülü (Şekil 3.1 Modül 6): Bölüm 2.2.2'de önerilen ve açıklanan dört rotorlu İHA kontrol mimarisinin (Şekil 2.8) matlab/simulink modeline dahil edilmesiyle birlikte artık elimizde istenilen pozisyona/koordinata gidebilecek bir hava aracı bulunmaktadır. Yani bir diğer ifadeyle İHA, bu mimari sayesinde herhangi bir hedef konuma (x_t, y_t, z_t) hareket edebilmekte ve ulaşabilmektedir. Bu durum tez kapsamında randevu alanına varmış bir İHA'nın iniş platformuna ulaşması için kullanılmıştır.

İşte bu kapsamda İHA'nın hareketli iniş platformuna ulaşmasını ve platforma inmesini sağlayacak hedef konum isterlerini (x_t, y_t, z_t) üretebilen ve bu isterleri pozisyon kontrolcülere ileten bir modül (Otonom İniş Modülü) geliştirilmiştir. Aslında bu modül;

İHA'nın takip, hassas takip ve iniş aşamalarını sırasıyla tamamlamasını amaçlamaktadır.

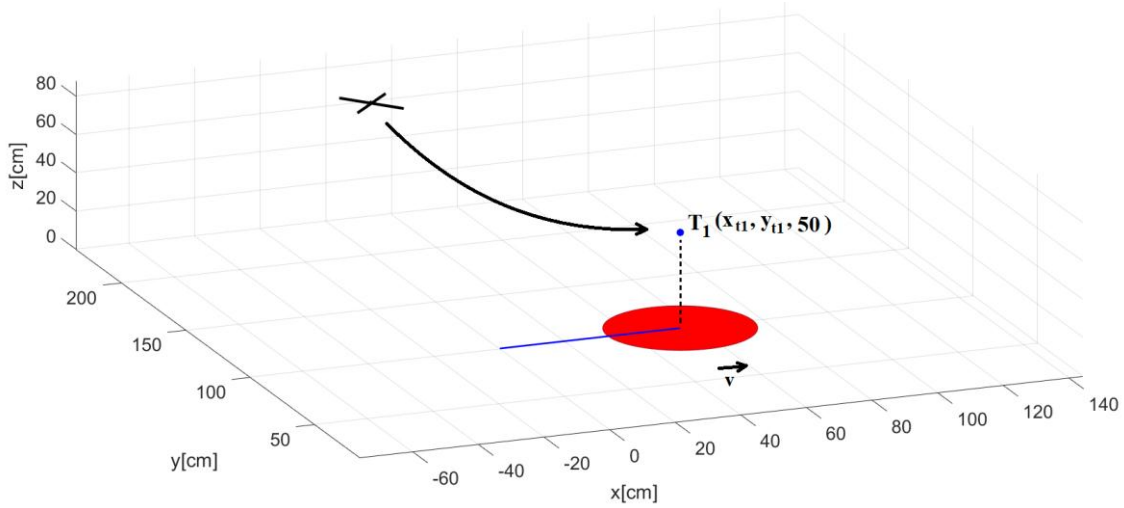


Şekil 3.2 Otonom iniş modülü

Şekil 3.2'de Otonom İniş Modülü'nün nasıl çalıştığını ve inişin nasıl tamamlandığını özetleyen bir şablon bulunmaktadır.

Bu bağlamda benzetim ortamındaki iniş platformunun konumu ilgili senaryonun 2. saniyesinde tespit edilmekte ve otonom iniş modülü ile paylaşılmaktadır. Bir diğer ifadeyle platformun tespit süreci sadece simüle edilmekte ve takip aşaması başlatılmaktadır (Şekil 3.2 M6.b).

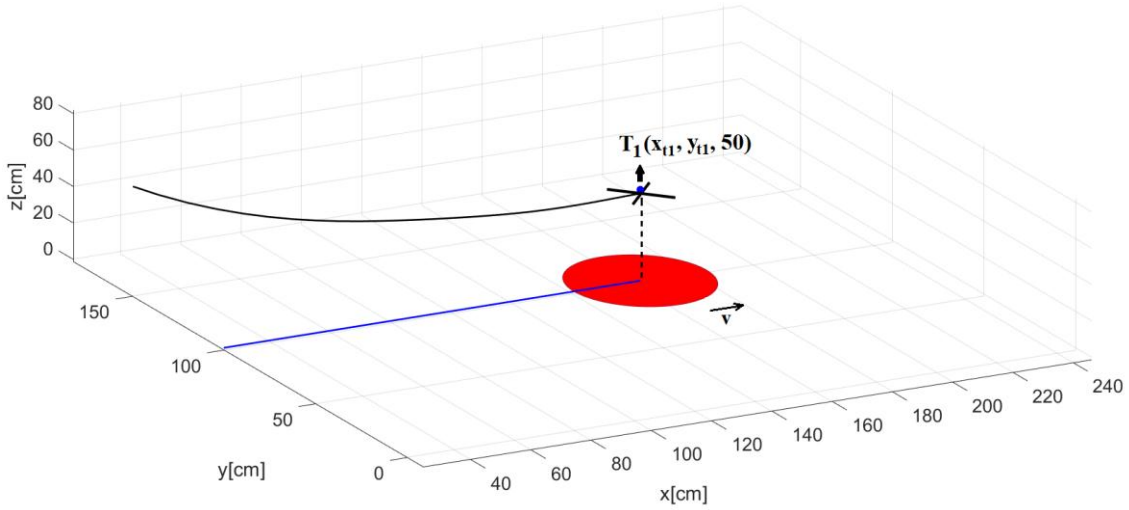
Takip aşamasına geçildiğinde artık iniş platformu konumu bilinmektedir. Böylece takip aşamasında Şekil 3.3'te görülen T_1 hedef koordinatı $(x_{t1}, y_{t1}, 50)$ üretilmekte (Şekil 3.2 M6.d) ve pozisyon kontrolcülere ister olarak iletilmektedir (Şekil 3.2 M6.n). T_1 hedef koordinatının birimi *cm*'dir.



Şekil 3.3 Benzetim çalışması: otonom iniş takip aşaması

Burada T_1 olarak ifade hedef koordinat Şekil 3.3'te de görüldüğü üzere x ve y eksenlerine göre iniş platformunun tam merkezinde olan, 50 cm irtifada, iniş platformu ile birlikte hareket eden bir koordinattır (x_{t1}, y_{t1}, 50) ve birimi cm'dir. Aslında artık bu aşamada İHA'nın ulaşması gereken x ve y ekseni hedef koordinatları hareketli platform merkezinin x ve y ekseni kordinatlarına dönüşmüştür. İşte bu hedef koordinatların pozisyon kontrolcülere (Şekil 3.1 Modül 4) iletilmesiyle birlikte İHA'nın dinamik ve hızlı bir şekilde hareketli iniş platformuna yönelimi sağlanmış, hareketli hedef koordinat (T_1) ile İHA kordinatı arasındaki büyük x ve y ekseni konum hataları (e_x, e_y) giderilmiş ve 50 cm irtifadaki İHA'nın platforma ulaşması sağlanmıştır. Platform ile birlikte hareket eden T_1 hedef koordinatına x ekseninde 20 cm, y ekseninde 20 cm toleranslar dahilinde ulaşılmasıyla birlikte (Şekil 3.2 M6.e) takip aşaması tamamlanmış ve hassas takip aşaması başlatılmıştır (Şekil 3.2 M6.f).

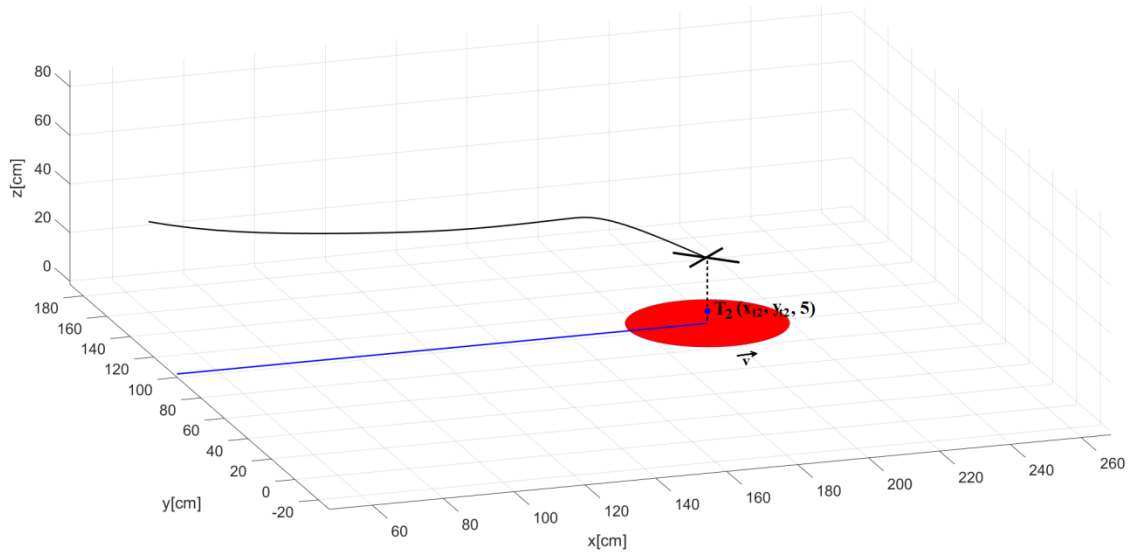
Hassas takip aşaması başladığında ise aslında takip aşamasında kullanılan hedef koordinat (T_1) kullanılmaya devam edilmektedir. Bu aşamadaki temel amaç, yüksek bir hızla takip aşaması hedef koordinatına ulaşan İHA'nın kararsızlığının giderilmesini sağlamaktır.



Şekil 3.4 Benzetim çalışması: otonom iniş hassas takip aşaması

Çünkü kontrollü bir şekilde düşük bir hızda (ya da bir diğer ifadeyle platform hızına yakın *x* ve *y* ekseni hızları ile) iniş tamamlanmalıdır. Bu nedenle hedefe yüksek hızla varılmasından sonra kararlılık durumu (İHA hızının platform hızına yakınsaması durumu) oluşabilmesi için İHA'nın 50 cm irtifada 2 saniye boyunca hedef kordinatı (T_1) *x* ve *y* eksenlerinde 20 cm toleranslar ile takip etmeyi başarabilmesi gerekmektedir. Bu şart sağlandığında ise aslında İHA ve hareketli iniş platformunun *x* ve *y* ekseni hızları birbirine yakınsamakta ve hassas takip aşaması tamamlanmaktadır.

İniş aşamasına geçildiğinde ise İHA'nın ulaşması gereken yeni bir hedef koordinat (Şekil 3.5) üretilmektedir (T_2). Burada T_2 olarak ifade hedef koordinat Şekil 3.5'te de görüldüğü üzere *x* ve *y* eksenlerine göre iniş platformunun tam merkezinde olan, iniş platformu ile birlikte hareket eden bir koordinattır (x_{t2}, y_{t2}, 5) ve birimi cm'dir.

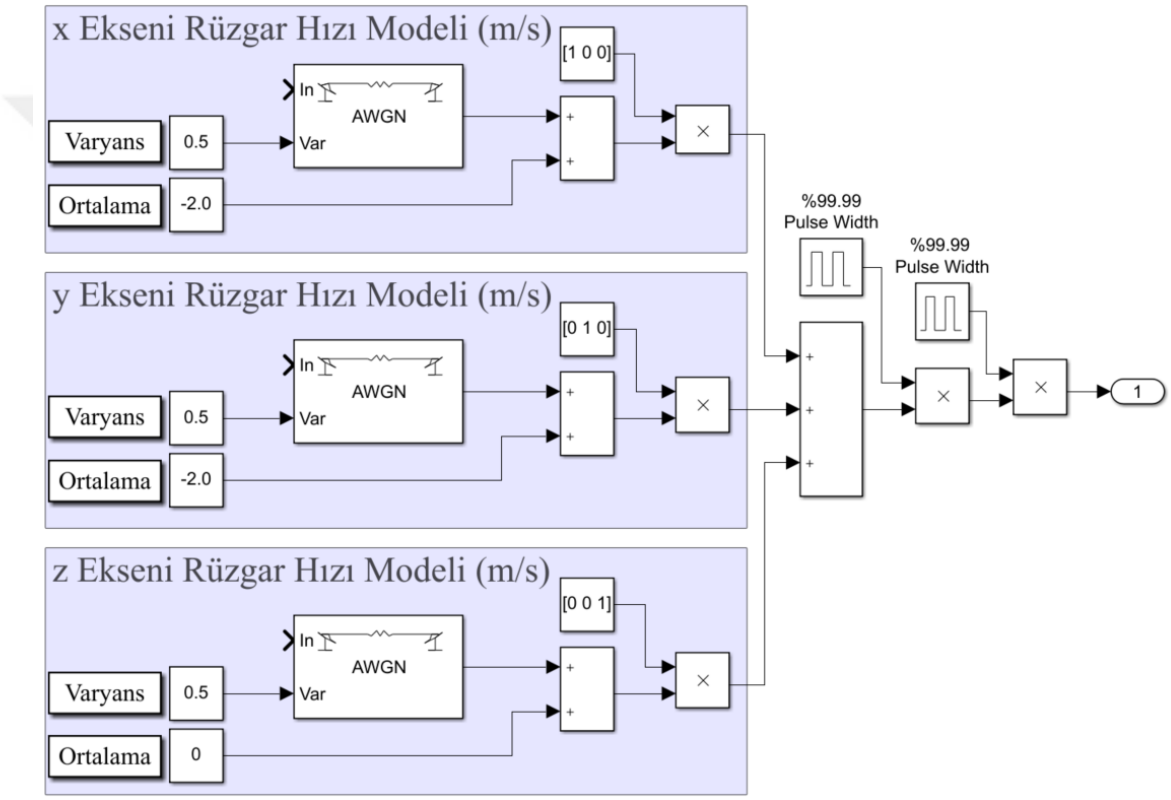


Şekil 3.5 Benzetim çalışması: iniş aşaması

Aslında T_2'nin T_1'den tek farkı z ekseni hedef koordinatının (irtifa isterinin) 50 cm'den 5 cm'ye düşürülmesidir. Ancak bu durum doğrudan uygulanmamıştır. Çünkü z ekseni hedef koordinatının bu şekilde değiştirilmesi ve pozisyon kontrolcüye (z) iletilmesi durumunda bu hata, ilgili kontrolcü (z) tarafından hızlı bir şekilde giderilecek ve z ekseni hedef koordinatına yüksek bir z ekseni hızıyla ulaşılacaktır. Yani bir diğer ifadeyle iniş yerine çarpışma gerçekleşecektir. İşte bu problemi gidermek için İHA irtifası, sabit bir düşük hız ile azaltılmalıdır. Bu kapsamda z ekseni hedef koordinatını 50 cm'den 5 cm'ye doğrudan düşürmek yerine otonom iniş modülü tarafından ara yol noktaları (*waypoint*) üretilmektedir. Yani z ekseni hedef konum isteri yavaşça 55 cm'den 5 cm'ye doğru düşürülmekte ve z ekseni pozisyon kontrolcüsüne iletilmektedir. Böylece İHA, bir taraftan x ve y eksenlerinde kendini iniş platformuna göre merkezlemeye devam ederken bir diğer taraftan 20 cm/s'lik sabit bir z ekseni hızı ile irtifasını düşürmektedir. T_2 hedef koordinatina x ekseninde 15 cm, y ekseninde 15 cm toleranslar dahilinde ulaşılmasıyla birlikte serbest düşme gerçekleştirilmekte ve iniş aşaması (otonom iniş) tamamlanmaktadır.

3.1.2 Benzetim çalışmasına rüzgâr modelinin dahil edilmesi

Bu tez kapsamında geliştirilen sistemin rüzgâr gürültüsü altındaki performansını incelemek ve limitlerini tespit etmek için Şekil 3.6'daki 3 eksenli rüzgar hız modeli (toplanır beyaz gauss gürültüsü kullanılarak) tasarlanmış ve dört rotorlu İHA modeline (Şekil 3.1 Modül 1) gürültü olarak dahil edilmiştir. Rüzgâr gürültüsünün İHA modeline nasıl eklendiği bu bölümün ilerleyen aşamalarında açıklanmaktadır.



Şekil 3.6 Matlab/simulink ortamındaki 3 eksenli rüzgâr hız modeli

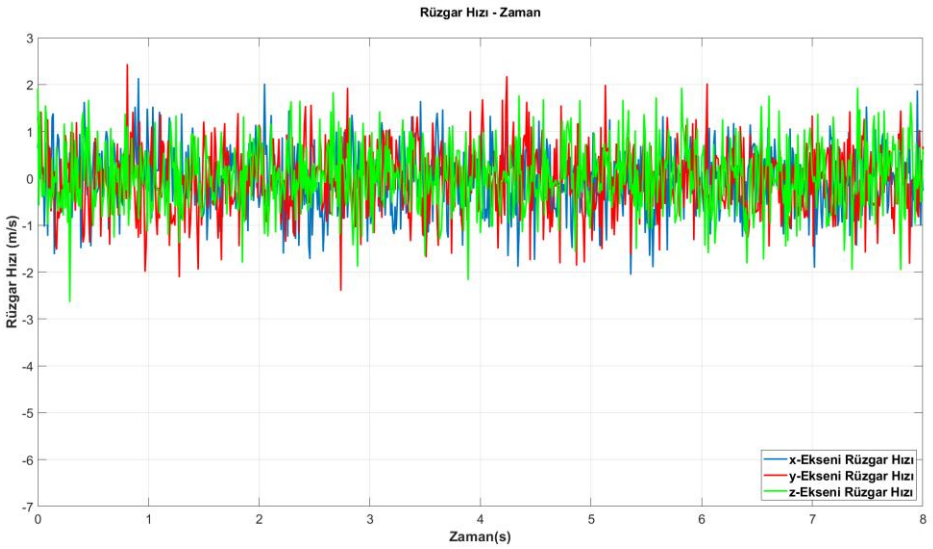
Oluşturulan bu model kapsamında farklı varyans (σ^2) ve ortalama (μ) değerlerinde eksenel hızlara (m/s) sahip rüzgârlar (gürültüler) üretilebilmektedir. Bu bağlamda ilgili model kullanılarak Çizelge 3.2'de görülen 3 farklı rüzgâr gürültüsü oluşturulmuştur.

Çizelge 3.2 Rüzgâr gürültülerinin (hızlarının) ortalama ve varyans değerleri

	x Eks. Rüzgâr Hızı $N_{Rx}(\mu_{Rx}, \sigma_{Rx}^2)$		y Eks. Rüzgâr Hızı $N_{Rx}(\mu_{Ry}, \sigma_{Ry}^2)$		z Eks. Rüzgâr Hızı $\mathrm{N}_{Rz}(\mu_{Rz}, \sigma_{Rz}^2)$	
	μ_{Rx} (m/s)	σ_{Rx}^2 (m^2/s^2)	μ_{Ry} (m/s)	σ_{Ry}^2 (m^2/s^2)	μ_{Rz} (m/s)	σ_{Rz}^2 (m^2/s^2)
Rüzgâr Gürültüsü 1	0	0.5	0	0.5	0	0.5
Rüzgâr Gürültüsü 2	-2	0.5	-2	0.5	0	0.5
Rüzgâr Gürültüsü 3	-3	0.5	-3	0.5	0	0.5

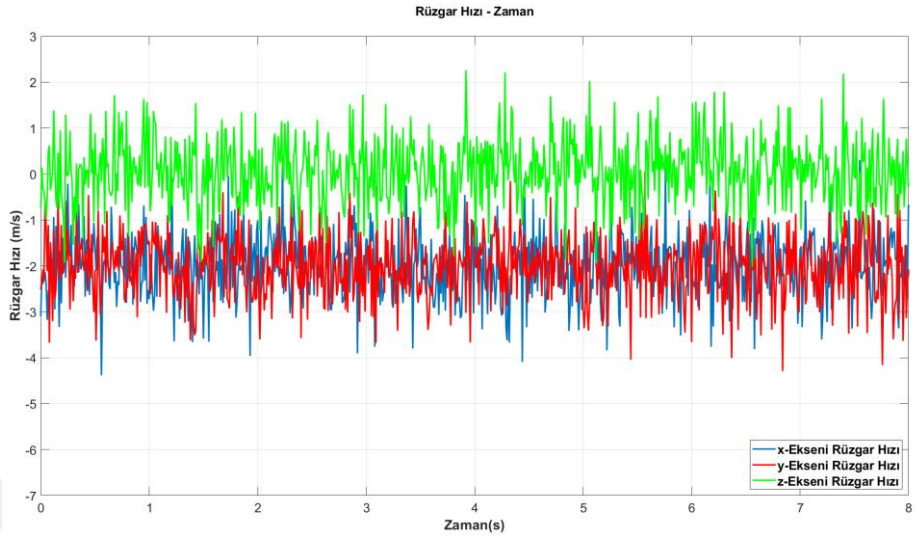
Böylece geliştirilen sistemin rüzgâr etkileri (gürültüleri) altındaki performansı sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur. Bir diğer ifadeyle sistemin başarım limitlerinin tespit edilebilmesi için hareketli platforma otonom iniş testleri sırasıyla düşük hızdaki rüzgârın bulunduğu ortamdan yüksek hızdaki rüzgârın bulunduğu ortama doğru (rüzgâr gürültüsü 1'den rüzgâr gürültüsü 3'e doğru) gerçekleştirilmiştir.

Yani benzetim ortamında hareketli platforma otonom inişini gerçekleştiren İHA, önce Şekil 3.7'de görülen x, y ve z eksenlerinde 0 m/s ortalama hıza sahip **rüzgâr gürültüsü 1**'e ($N_{Rx}(0,\ 0.5)$, $N_{Ry}(0,\ 0.5)$, $N_{Rz}(0,\ 0.5)$),



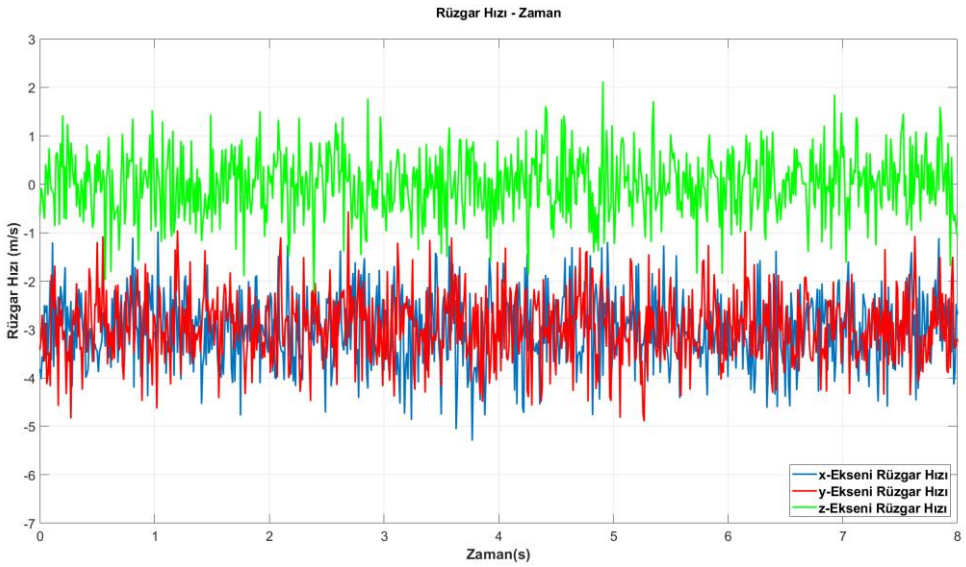
Şekil 3.7 Rüzgâr gürültüsü 1

Daha sonra ise x ve y eksenlerinde $-2\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip **rüzgâr gürültüsü 2**'ye ($N_{Rx}(-2,\ 0.5)$, $N_{Ry}(-2,\ 0.5)$, $N_{Rz}(-2,\ 0.5)$),



Şekil 3.8 Rüzgâr gürültüsü 2

Son olarak ise x ve y eksenlerinde $-3\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâr gürültüsü 3'e ($N_{Rx}(-3,\ 0.5)$, $N_{Ry}(-3,\ 0.5)$, $N_{Rz}(0,\ 0.5)$) maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.9 Rüzgâr gürültüsü 3

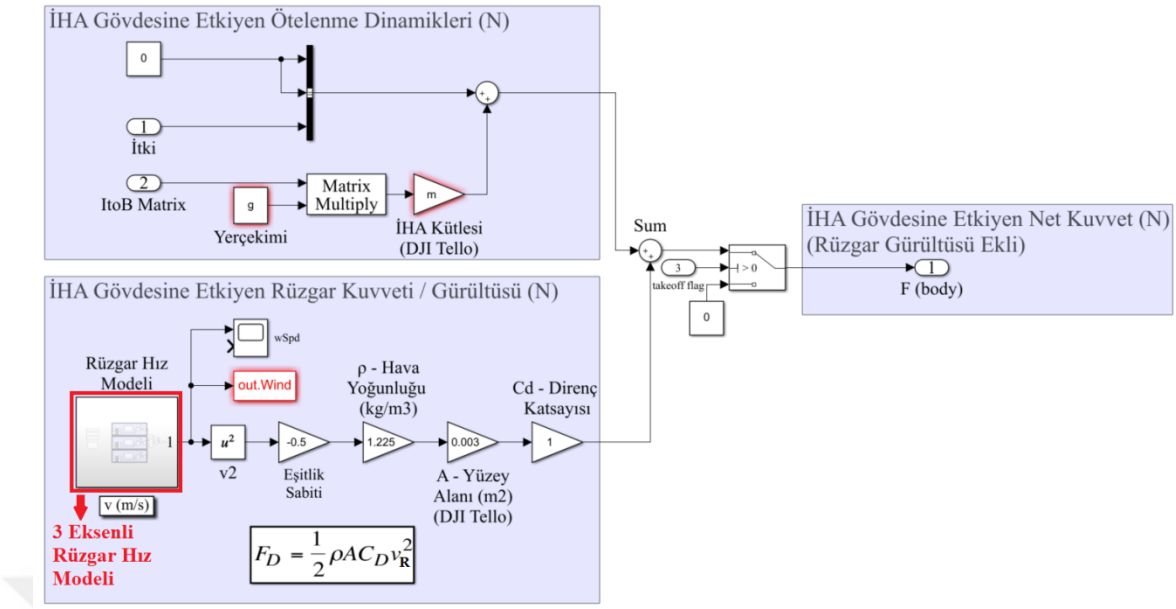
Böylece geliştirilen sistemin rüzgâr etkilerine karşı dayanımı ve gösterdiği performans sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur.

Bu sistematik kapsamında benzetim ortamında gerçekleştirilen tüm hareketli platforma otonom iniş senaryoları Çizelge 3.3'teki gibi kurgulanmış ve sonraki bölümlerde de aktarılacağı üzere senaryoların başarım sonuçları sırasıyla incelenmiştir.

Çizelge 3.3 Benzetim çalışması hareketli platforma otonom iniş senaryo planı

SENARYOLAR	Rüzgâr Etkileri	İniş Platformu Hareketi	İniş Platformu Hızı
Senaryo 1.a	Rüzgâr Gürültüsü 1	Doğrusal	25 cm/s
Senaryo 1.b	Rüzgâr Gürültüsü 2		
Senaryo 1.c	Rüzgâr Gürültüsü 3		
Senaryo 2.a	Rüzgâr Gürültüsü 1	Doğrusal	50 cm/s
Senaryo 2.b	Rüzgâr Gürültüsü 2		
Senaryo 2.c	Rüzgâr Gürültüsü 3		
Senaryo 3.a	Rüzgâr Gürültüsü 1	Dairesel	25 cm/s
Senaryo 3.b	Rüzgâr Gürültüsü 2		
Senaryo 3.c	Rüzgâr Gürültüsü 3		
Senaryo 4.a	Rüzgâr Gürültüsü 1	Dairesel	50 cm/s
Senaryo 4.b	Rüzgâr Gürültüsü 2		
Senaryo 4.c	Rüzgâr Gürültüsü 3		

- Rüzgâr modelinin İHA gövdesi üzerinde oluşturduğu kuvvet: Çizelge 3.3'te listelenen benzetim senaryolarında elde edilen bulguları incelemeye başlamadan önce rüzgâr hızının İHA üzerinde oluşturduğu bozucu kuvvetin nasıl oluştuğunu incelemek gerekmektedir. Daha önce açıklanan **3 eksenli rüzgar hız modeli** (Şekil 3.6) ya da bir diğer ifadeyle rüzgar gürültüsü, matlab/simulink ortamında Şekil 3.10'daki gibi kullanılarak **İHA modeline etkiyen rüzgar kuvveti** elde edilmiştir.



Şekil 3.10 Benzetim ortamındaki dört rotorlu İHA modeline etkiyen kuvvetler

Bu bağlamda benzetim ortamındaki dört rotorlu İHA modeli üzerinde gürültü oluşturmak için; **rüzgâr etkisinin İHA gövdesinde oluşturduğu kuvvet** (N) ile Dört Rotorlu İHA dinamikleri bölümünde (bölüm 2.1.5'te) Eşitlik 2.20'de ifade edilen **ötelenme dinamiklerinin İHA gövdesinde oluşturduğu kuvvet** (N) toplanmaktadır (Şekil 3.10).

Rüzgâr hızının İHA gövdesinde oluşturduğu kuvvet (N) Eşitlik 3.1 ile ifade edilebilir.

$$F_D = \frac{1}{2}\rho A C_d v_R^2 \tag{3.1}$$

Burada;

- F_D : İHA gövdesinde/modelinde oluşan rüzgâr kuvveti (N),
- ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)
- A : İHA yüzey alanı (m^2)

- C_d : Direnç Katsayısı

- v_R : Rüzgâr Hızı (m/s)

olarak tanımlanabilir. Şekil 3.10'da da görüldüğü üzere benzetim ortamındaki hava yoğunluğu (ρ), 1.225 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Bu değer deniz seviyesindeki hava yoğunluğudur. Bir diğer taraftan benzetim ortamındaki İHA'nın yüzey alanı 0.003 m^2 olarak belirlenmiştir. Bunun sebebi ise benzetim ortamındaki İHA modelinin mümkün olduğunca uygulama bölümünde kullanılan DJI Tello İHA'ya benzetilmek istenmesidir. Ayrıca DJI Tello İHA'nın ağırlığı 80 g olduğu için benzetim ortamındaki İHA'nın da ağırlığı 80 g olarak seçilmiştir.

3.1.3 Benzetim çalışması senaryoları

Geliştirilen sistem, bölüm 3.1.2'de paylaşılan Çizelge 3.3'teki senaryo planına göre sistematik bir şekilde test edilmiştir. Bu bağlamada Çizelge 3.3'teki her bir senaryo Monte Carlo metodu ile 100 kez tekrar edilmiştir. Senaryolarda elde edilen test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde paylaşılmıştır.

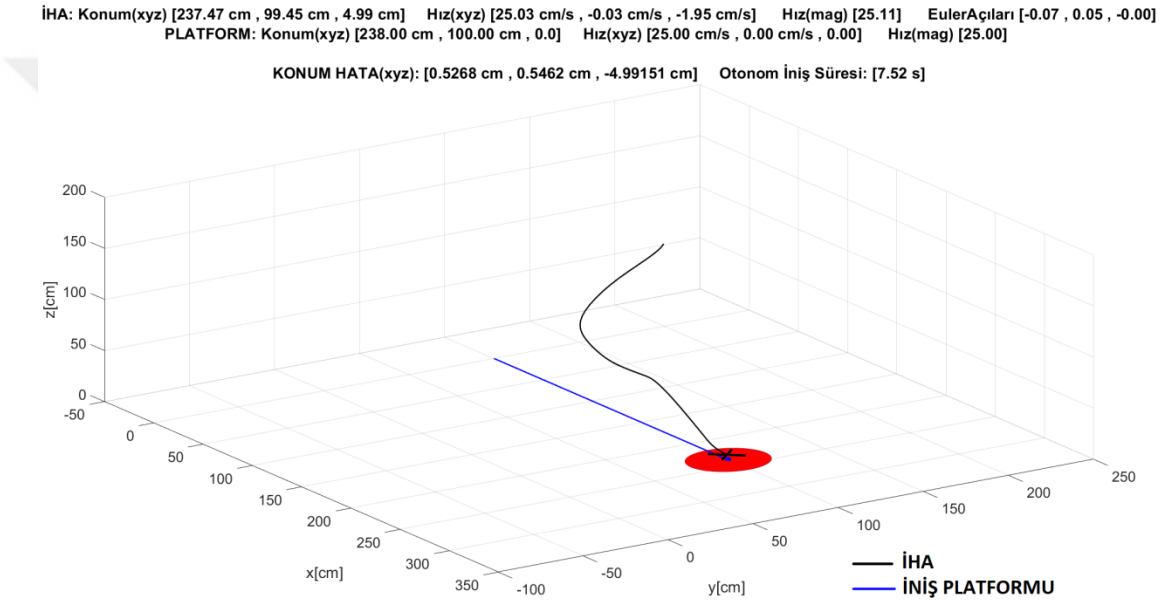
Bir diğer taraftan İHA'nın hareketli platforma otonom inişini görsel olarak ifade etmek için kullanılan üç boyutlu otonom iniş, iki boyutlu otonom iniş, konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri ise her bir ilgili senaryonun ilk testinden (Test 1'den) elde edilmiştir.

3.1.3.1 25 *cm/s* hızla doğrusal yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş

Bu bölümde 25 *cm/s* hızla doğrusal yörünge izleyen platforma otonom iniş testleri gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.3'teki senaryo 1.a, senaryo 1.b ve senaryo 1.c uygulanmıştır. Yani bir diğer ifadeyle hareketli platformun yörüngesi ve hızı değiştirilmeden İHA'ya etki eden rüzgâr gürültüleri (senaryo 1.a'dan senaryo 1.c'ye

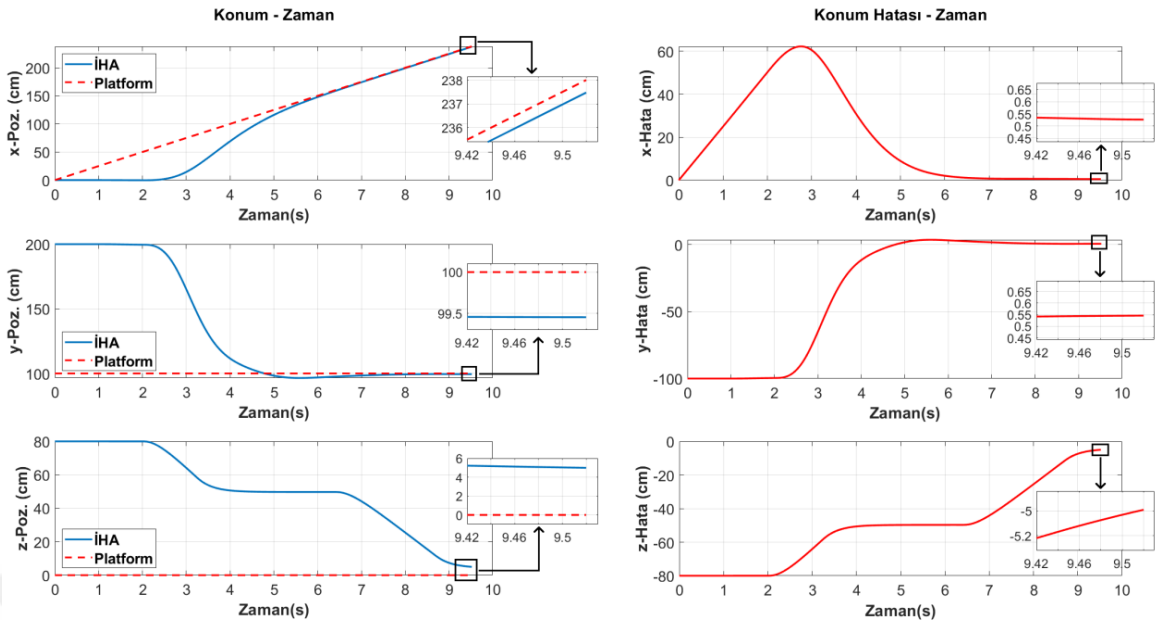
doğru) arttırılmış ve her bir senaryo için otonom iniş sonuçları elde edilmiştir. Böylece geliştirilen sistemin rüzgâr etkileri altındaki limitleri ve bu etkilere karşı dayanımı sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur.

- Senaryo 1.a (rüzgâr gürültüsü 1): Bu senaryoda hareketli iniş platformu 25 c*m/s* hızla doğrusal yörüngesini izlerken, otonom inişini gerçekleştiren İHA Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 1**'e (($N_{Rx}(0,\ 0.5)$, $N_{Ry}(0,\ 0.5)$, $N_{Rz}(0,\ 0.5)$)) maruz bırakılmıştır.



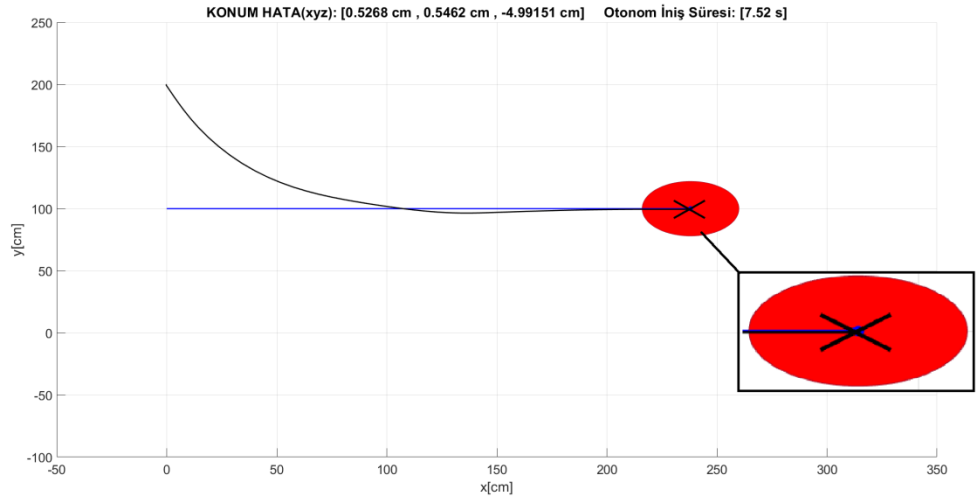
Şekil 3.11 Benzetim Çalışması Senaryo 1.a Test 1: Üç Boyutlu Otonom İniş Grafiği

Bölüm 3.1.1'de açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13).



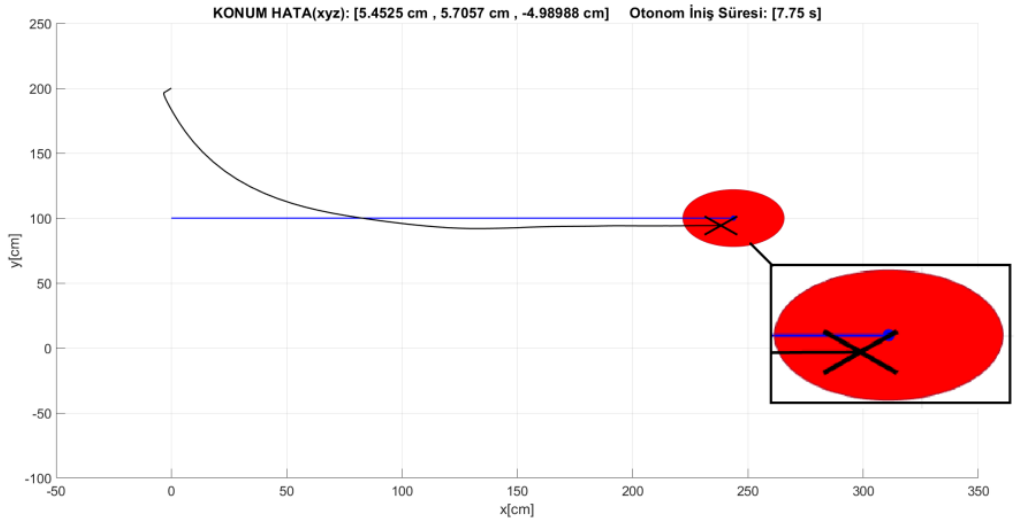
Şekil 3.12 Benzetim ç. senaryo 1.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri

Bir diğer taraftan Şekil 3.13'te otonom inişi tamamlanan İHA'nın ve hareketli iniş platformunun tepeden görünüşü gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde İHA'nın iniş platformunun merkezine çok küçük konum hatalarıyla ulaşabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 1.a Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası 0.526796 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 0.546217 *cm*, *z* ekseni konum hatası 0.008488 *cm*). Çünkü geliştirilen otonom iniş çözümü (bölüm 3.1.1); *x*, *y* ve *z* eksenlerinde 0 *m/s* ortalama hıza sahip rüzgâr şartları altında test edilmiştir. Yani bir diğer ifadeyle sistem, zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmamıştır.



Şekil 3.13 Benzetim çalışması senaryo 1.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

- Senaryo 1.b (rüzgâr gürültüsü 2): Bu senaryoda ise hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hızı değiştirilmeden ortam şartları biraz daha zorlaştırılmıştır. Bu bağlamda otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer x ve y eksenlerinde $-2\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 2**'ye) maruz bırakılmıştır.

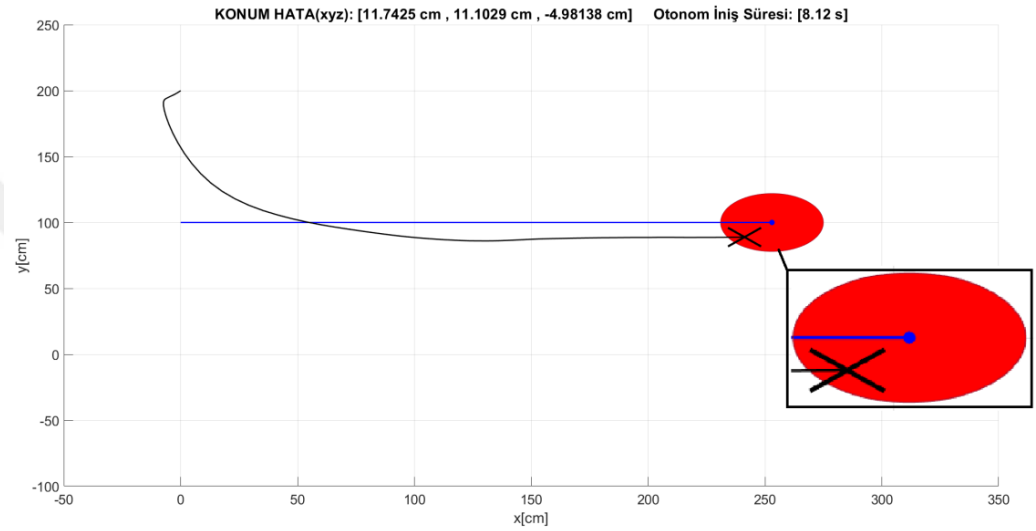


Şekil 3.14 Benzetim çalışması senaryo 1.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Şekil 3.14 incelendiğinde, önceki senaryoya (senaryo 1.a'ya) kıyasla İHA'nın iniş platformunu merkezinden biraz daha uzakta kalarak otonom inişini tamamlayabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 1.b Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum

hatası 5.452471 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 5.705662 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.010121 *cm*).

- Senaryo 1.c (rüzgâr gürültüsü 3): Bu senaryoda da yine hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hız değiştirilmeden (doğrusal ve 25 c*m/s* hızla hareket eden platform) ortam şartları bir kez daha zorlaştırılmıştır.



Şekil 3.15 Benzetim çalışması senaryo 1.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Böylece otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer x ve y eksenlerinde -3 m/s, z ekseninde 0 m/s ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki rüzgar gürültüsü 3'e) maruz bırakılmıştır.

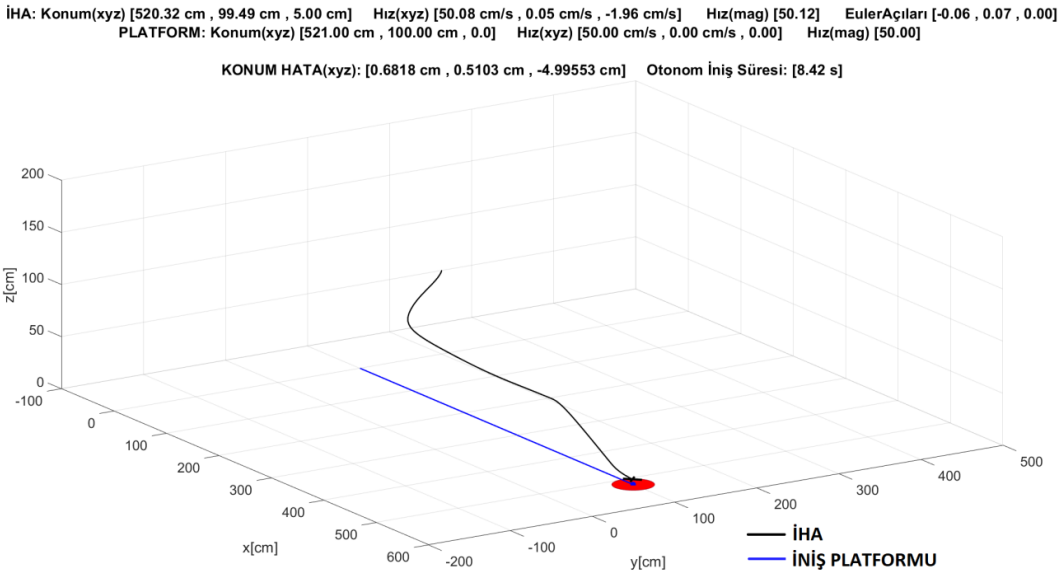
Şekil 3.15 incelendiğinde İHA'nın, önceki senaryolara (senaryo 1.a ve senaryo 1.b'ye) kıyasla iniş platformunun merkezinden çok daha uzakta kalarak inişini tamamlayabildiği görülmektedir. (Benzetim Ç. Senaryo 1.c Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası 11.74247 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 11.10291 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası: 0.018619 *cm*). Çünkü otonom inişini geçekleştiren İHA çok daha zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmıştır. Ancak bu en zor ortam şartına (rüzgâr gürültüsü 3'e) rağmen İHA, iniş alanı içerisinde (Şekil 3.15'teki kırmızı alanda) büyük ölçüde kalmayı başarmış ve otonom inişini tamamlamıştır.

Senaryo 1.a, 1.b ve 1.c'deki Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

3.1.3.2 50 *cm/s* hızla doğrusal yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş

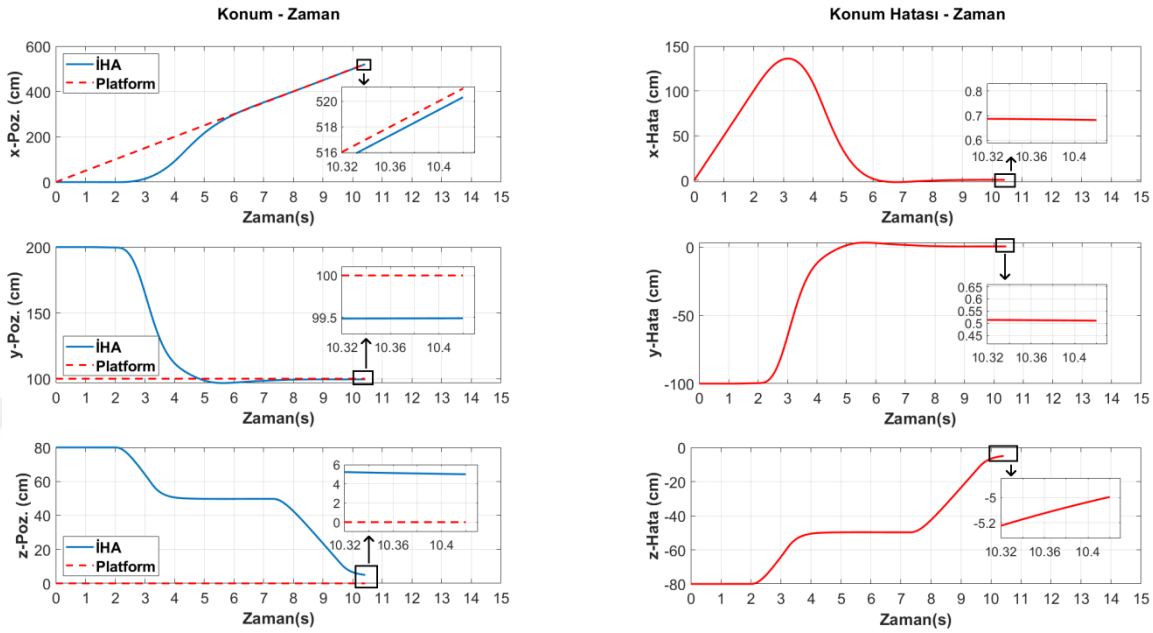
Bu bölümde platform hızı iki katına çıkarılmıştır. 50 cm/s hızla doğrusal yörünge izleyen platforma otonom iniş testleri gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.3'teki senaryo 2.a, senaryo 2.b ve senaryo 2.c uygulanmıştır. Yani bir diğer ifadeyle hareketli platformun yörüngesi ve hızı değiştirilmeden İHA'ya etki eden rüzgâr gürültüleri (senaryo 2.a'dan senaryo 2.c'ye doğru) arttırılmış ve her bir senaryo için otonom iniş sonuçları elde edilmiştir. Böylece geliştirilen sistemin rüzgâr etkileri altındaki limitleri ve bu etkilerle karşı dayanımı sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur.

- **Senaryo 2.a (rüzgâr gürültüsü 1):** Bu senaryoda hareketli iniş plaformu 50 *cm/s* hızla doğrusal yörüngesini izlerken, otonom inişini gerçekleştiren İHA Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 1**'e ($(N_{Rx}(0,\ 0.5), N_{Ry}(0,\ 0.5), N_{Rz}(0,\ 0.5)$)) maruz bırakılmıştır.



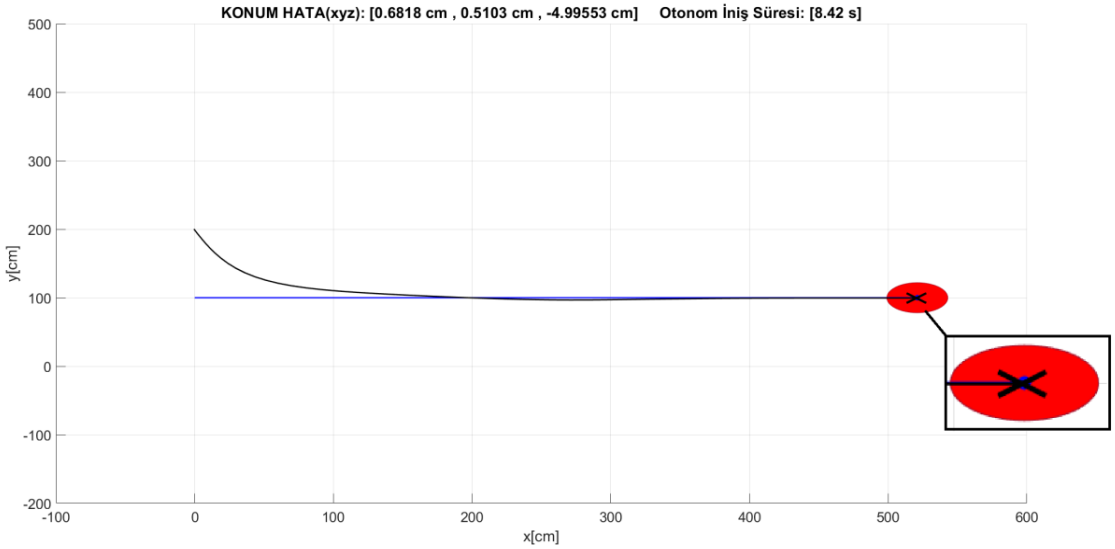
Şekil 3.16 Benzetim çalışması senaryo 2.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.1.1'de açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.16, Şekil 3.17 ve Şekil 3.18).



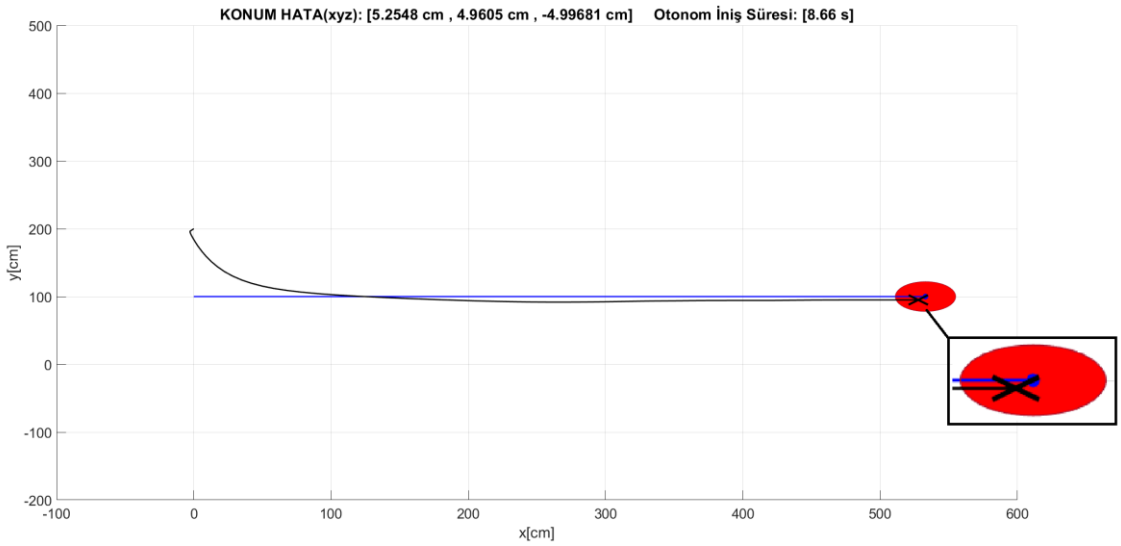
Şekil 3.17 Benzetim ç. senaryo 2.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri

Bir diğer taraftan Şekil 3.18'de otonom inişi tamamlanan İHA'nın ve hareketli iniş platformunun tepeden görünüşü gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde İHA'nın iniş platformunun merkezine çok küçük konum hatalarıyla ulaşabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 2.a Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası 0.681793 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 0.510342 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.004474 *cm*). Çünkü geliştirilen otonom iniş çözümü (bölüm 3.1.1); *x*, *y* ve *z* eksenlerinde 0 m/s ortalama hıza sahip rüzgâr şartları altında test edilmiştir. Yani bir diğer ifadeyle sistem, zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmamıştır.



Şekil 3.18 Benzetim çalışması senaryo 2.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

- Senaryo 2.b (rüzgâr gürültüsü 2): Bu senaryoda ise hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hızı değiştirilmeden (doğrusal ve 50 *cm/s*) ortam şartları biraz daha zorlaştırılmıştır.

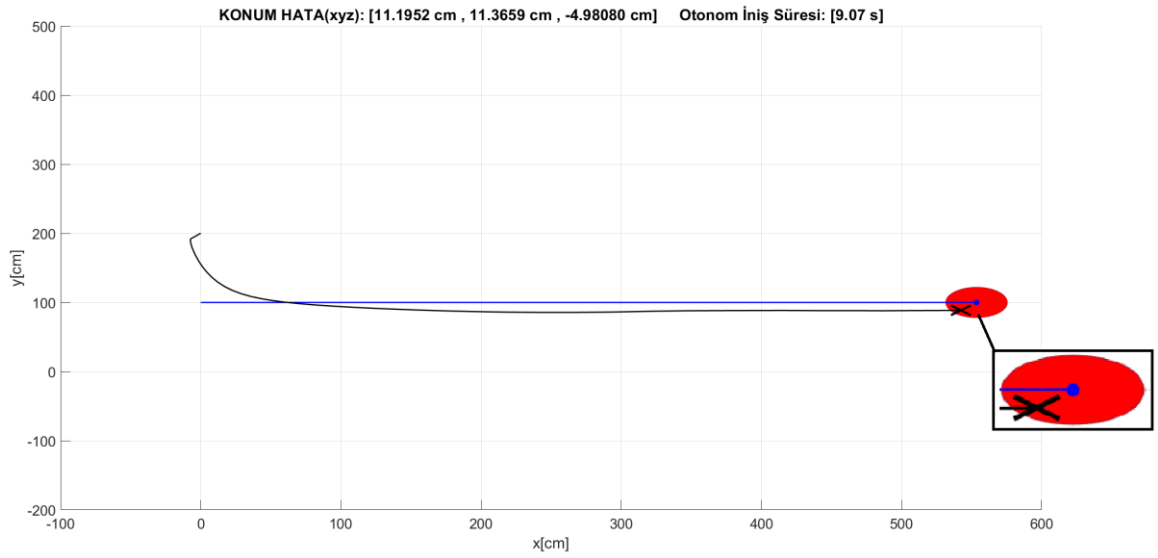


Şekil 3.19 Benzetim çalışması senaryo 2.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Bu bağlamda otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer *x* ve *y* eksenlerinde $-2\ m/s$, *z* ekseninde 0 m/s ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 2**'ye) maruz bırakılmıştır.

Şekil 3.19 incelendiğinde, önceki senaryoya (senaryo 2.a'ya) kıyasla İHA'nın iniş platformunu merkezinden biraz daha uzakta kalarak otonom inişini tamamlayabildiği görülmektedir. (Benzetim Ç. Senaryo 2.b Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum hatası 5.254765 cm, y eksenindeki konum hatası: 4.960462 cm, z eksenindeki konum hatası: 0.003187 cm).

- Senaryo 2.c (rüzgâr gürültüsü 3): Hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hız değiştirilmeden (doğrusal ve 50 cm/s hızla hareket eden platform), ortam şartları son bir kez daha zorlaştırılmıştır. Bu bağlamda otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer x ve y eksenlerinde $-3\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 3**'e) maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.20 Benzetim çalışması senaryo 2.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Şekil 3.20 incelendiğinde İHA'nın, önceki senaryolara (senaryo 2.a ve senaryo 2.b'ye) kıyasla iniş platformunun merkezinden çok daha uzakta kalarak inişini tamamlayabildiği görülmektedir. (Benzetim Ç. Senaryo 2.c Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum hatası 11.19521 cm, y eksenindeki konum hatası 11.36593 cm, z eksenindeki konum hatası 0.019199 cm). Çünkü otonom inişini geçekleştiren İHA çok daha zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmıştır. Ancak bu en zor ortam şartına

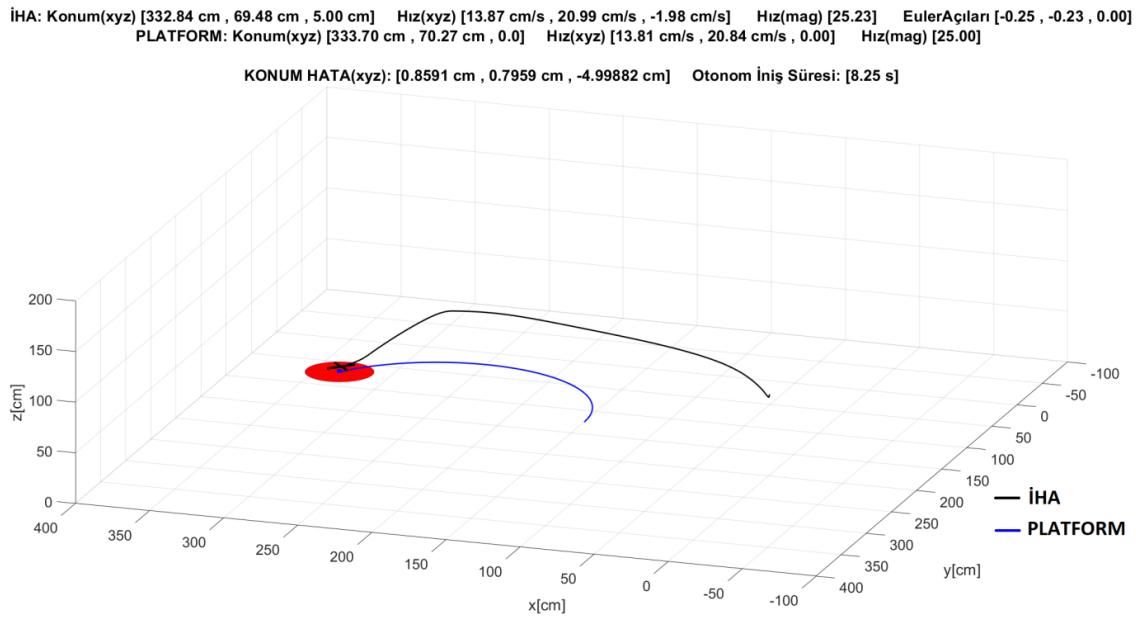
rağmen İHA, iniş alanı içerisinde (Şekil 3.20'deki kırmızı alanda) büyük ölçüde kalmayı başarmış ve otonom inişini tamamlamıştır.

Senaryo 2.a, 2.b ve 2.c'deki Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

3.1.3.3 25 cm/s hızla dairesel yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş

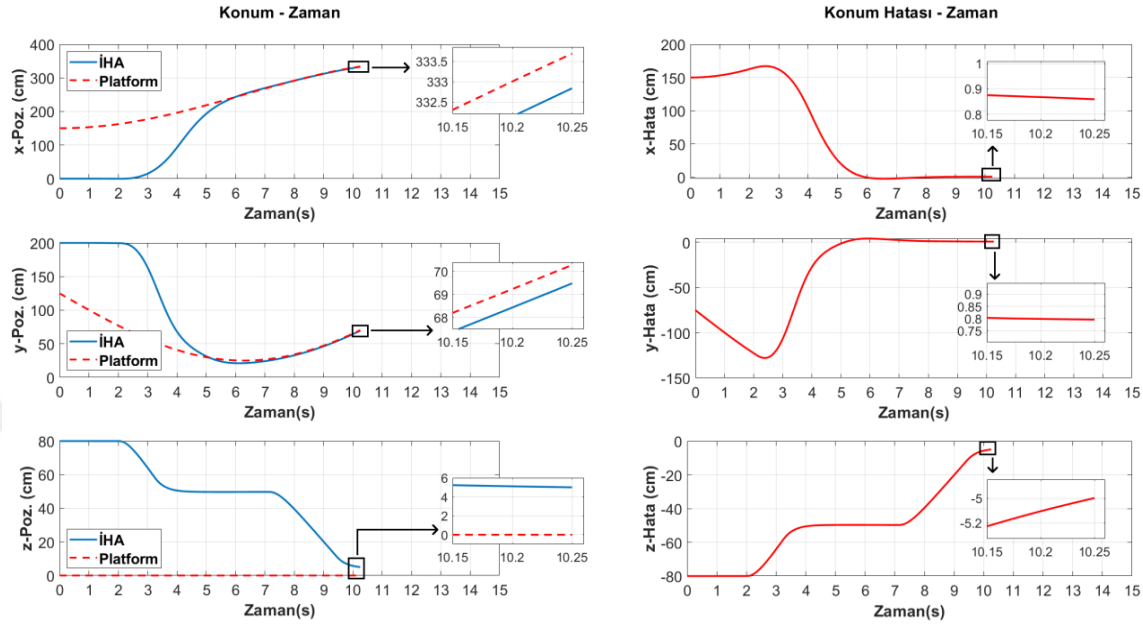
Bu bölümde ise 25 *cm/s* hızla dairesel yörünge izleyen platforma otonom iniş testleri gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.3'teki senaryo 3.a, senaryo 3.b ve senaryo 3.c uygulanmıştır. Yani bir diğer ifadeyle hareketli platformun yörüngesi ve hızı değiştirilmeden İHA'ya etki eden rüzgâr gürültüleri (senaryo 3.a'dan senaryo 3.c'ye doğru) arttırılmış ve her bir senaryo için otonom iniş sonuçları elde edilmiştir.

- **Senaryo 3.a (rüzgâr gürültüsü 1):** Bu senaryoda hareketli iniş plaformu 25 *cm/s* hızla dairesel yörüngesini izlerken, otonom inişini gerçekleştiren İHA Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 1**'e ($(N_{Rx}(0,\ 0.5), N_{Ry}(0,\ 0.5), N_{Rz}(0,\ 0.5)$)) maruz bırakılmıştır.



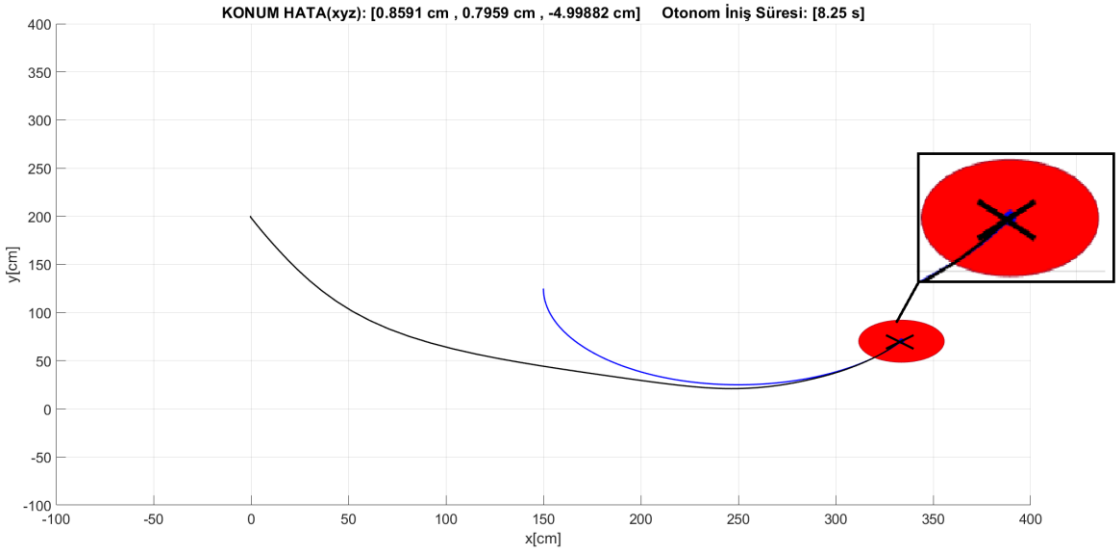
Şekil 3.21 Benzetim çalışması senaryo 3.a test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.1.1'de açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.21, Şekil 3.22 ve Şekil 3.23).



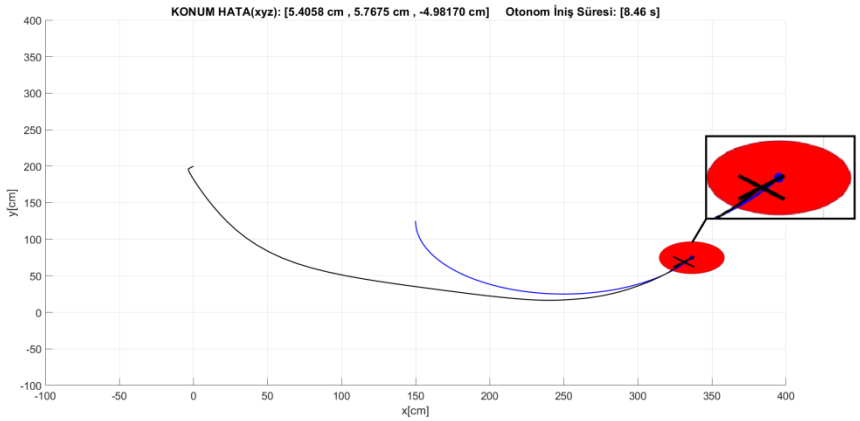
Şekil 3.22 Benzetim ç. senaryo 3.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri

Bir diğer taraftan otonom inişi tamamlanan İHA'nın ve hareketli iniş platformunun tepeden görünüşü gösteren Şekil 3.23 incelendiğinde İHA'nın iniş platformu merkezine çok küçük konum hatalarıyla ulaşabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 3.a Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum hatası 0.85908 cm, y eksenindeki konum hatası 0.795936 cm, z eksenindeki konum hatası 0.001177 cm).



Şekil 3.23 Benzetim çalışması senaryo 3.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

- Senaryo 3.b (rüzgâr gürültüsü 2): Bu senaryoda ise hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hızı değiştirilmeden ortam şartları biraz daha zorlaştırılmıştır. Bu bağlamda otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer x ve y eksenlerinde $-2\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 2**'ye) maruz bırakılmıştır.

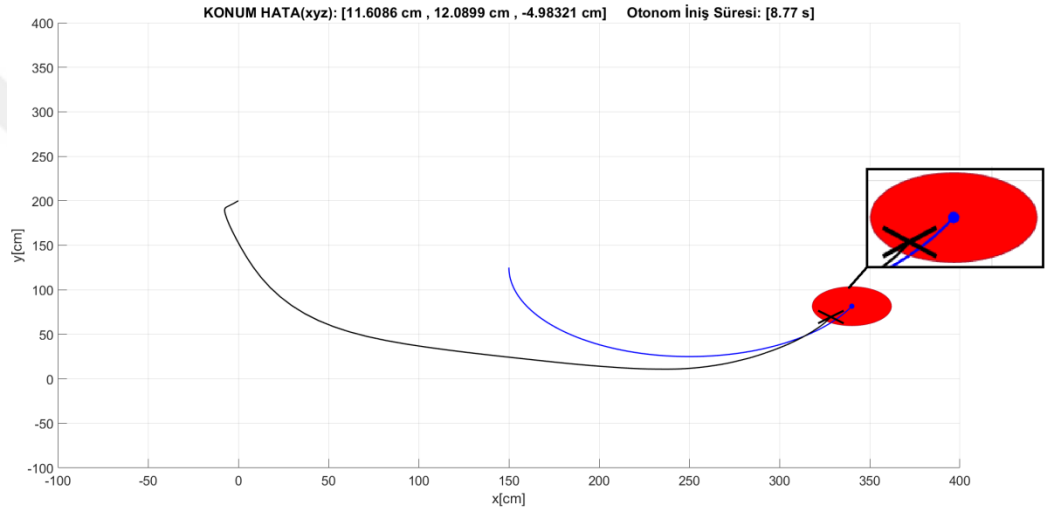


Şekil 3.24 Benzetim çalışması senaryo 3.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Şekil 3.24 incelendiğinde, önceki senaryoya (senaryo 3.a'ya) kıyasla İHA'nın iniş platformunu merkezinden biraz daha uzakta kalarak otonom inişini tamamlayabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 3.b Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum

hatası 5.405832 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 5.76746 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.018296 *cm*).

- Senaryo 3.c (rüzgâr gürültüsü 3): Bu senaryoda da yine hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hız değiştirilmeden (dairesel ve 25 *cm/s* hızla hareket eden platform) ortam şartları son bir kez daha zorlaştırılmıştır. Bu bağlamda otonom inişini gerçekleştiren İHA, *x* ve *y* eksenlerinde $-3\ m/s$, *z* ekseninde 0 m/s ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 3**'e) maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.25 Benzetim çalışması senaryo 3.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

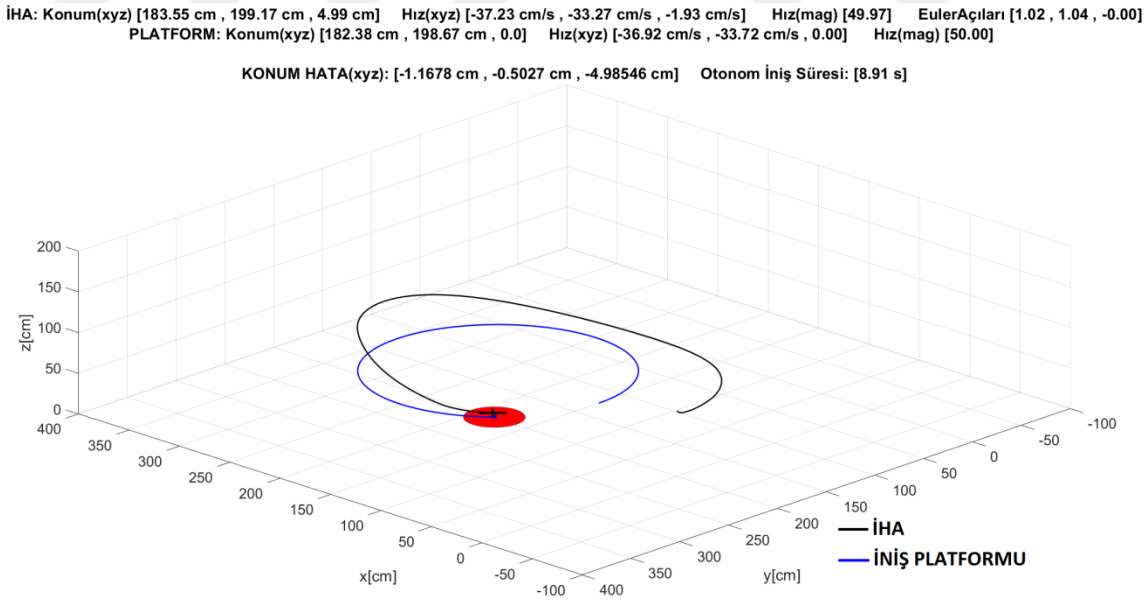
Şekil 3.25 incelendiğinde İHA'nın, önceki senaryolara (senaryo 3.a ve senaryo 3.b'ye) kıyasla iniş platformunun merkezinden çok daha uzakta kalarak inişini tamamlayabildiği görülmektedir. (Benzetim Ç. Senaryo 3.c Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası 11.60864 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 12.08991 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.016788 *cm*). Çünkü otonom inişini geçekleştiren İHA çok daha zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmıştır. Ancak bu en zor ortam şartına rağmen İHA, iniş alanı içerisinde (Şekil 3.25'teki kırmızı alanda) büyük ölçüde kalmayı başarmış ve otonom inişini tamamlamıştır.

Senaryo 3.a, 3.b ve 3.c'deki Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

3.1.3.4 50 cm/s hızla dairesel yörünge izleyen hareketli platforma otonom iniş

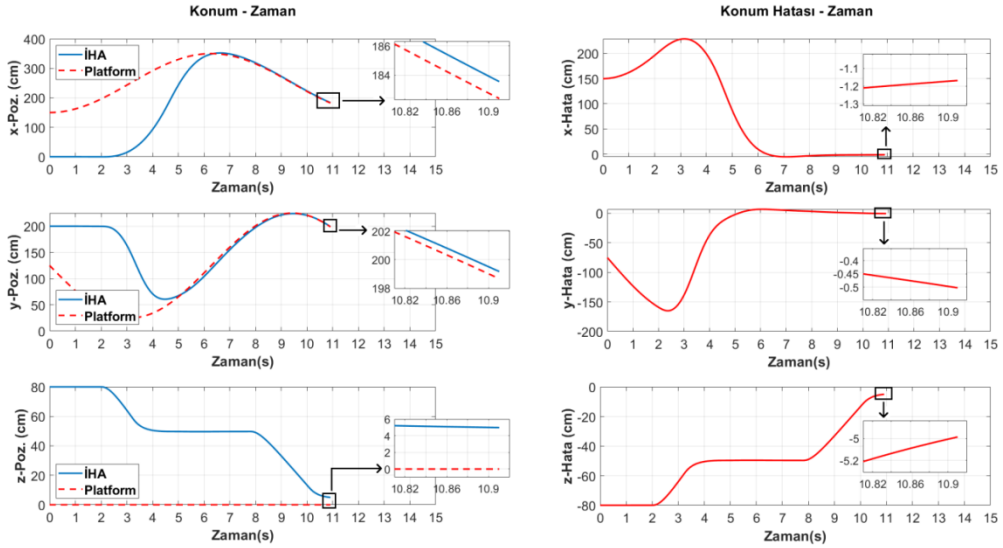
Senaryolardaki son bölümde ise platform hızı bir kez daha iki katına çıkarılmıştır. 50 *cm/s* hızla dairesel yörünge izleyen platforma otonom iniş testleri gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.3'teki senaryo 4.a, senaryo 4.b ve senaryo 4.c sırasıyla uygulanmıştır. Böylece geliştirilen sistemin rüzgâr etkileri altındaki limitleri ve bu etkilerle karşı dayanımı sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur.

- Senaryo 4.a (Rüzgâr Gürültüsü 1): Bu senaryoda hareketli iniş plaformu 50 *cm/s* hızla dairesel yörüngesini izlerken, otonom inişini gerçekleştiren İHA Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 1**'e ($(N_{Rx}(0,\ 0.5), N_{Ry}(0,\ 0.5), N_{Rz}(0,\ 0.5)$)) maruz bırakılmıştır.



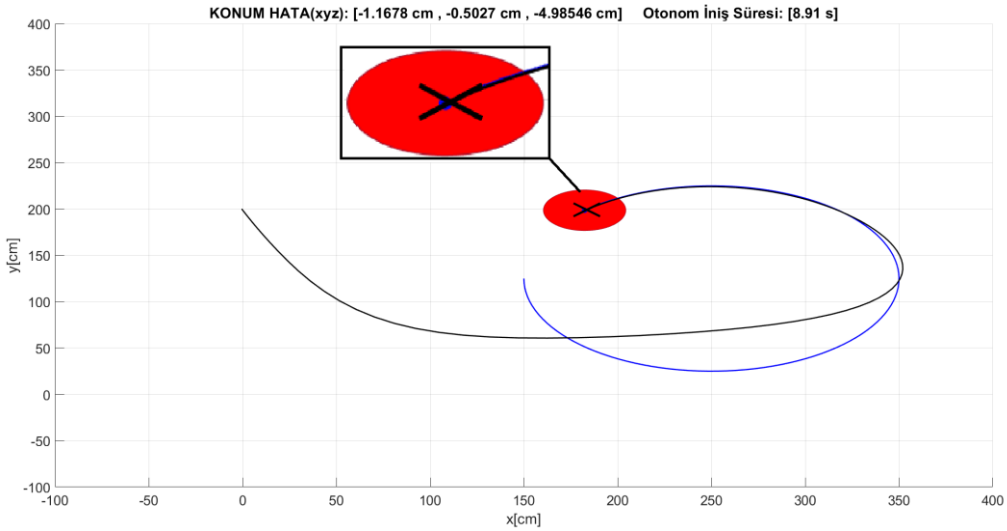
Şekil 3.26 Benzetim çalışması senaryo 4.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.1.1'de açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş bu senaryoda da başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.26, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28).



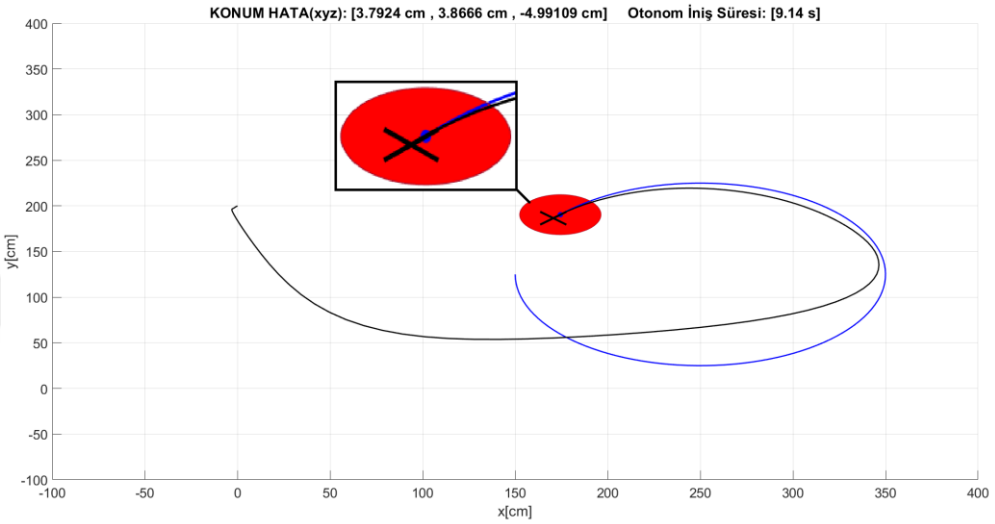
Şekil 3.27 Benzetim ç. senaryo 4.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası zaman grafikleri

Şekil 3.28 incelendiğinde İHA'nın iniş platformunun merkezine çok küçük konum hatalarıyla ulaşabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 4.a Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası -1.16782 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası -0.50265 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.014541 *cm*). Çünkü geliştirilen sistem zorlayıcı bir rüzgâr gürültüsüne maruz bırakılmamıştır (*x*, *y* ve *z* eksenlerinde 0 *m/s* ortalama hıza sahip rüzgâr etkisi).



Şekil 3.28 Benzetim çalışması senaryo 4.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

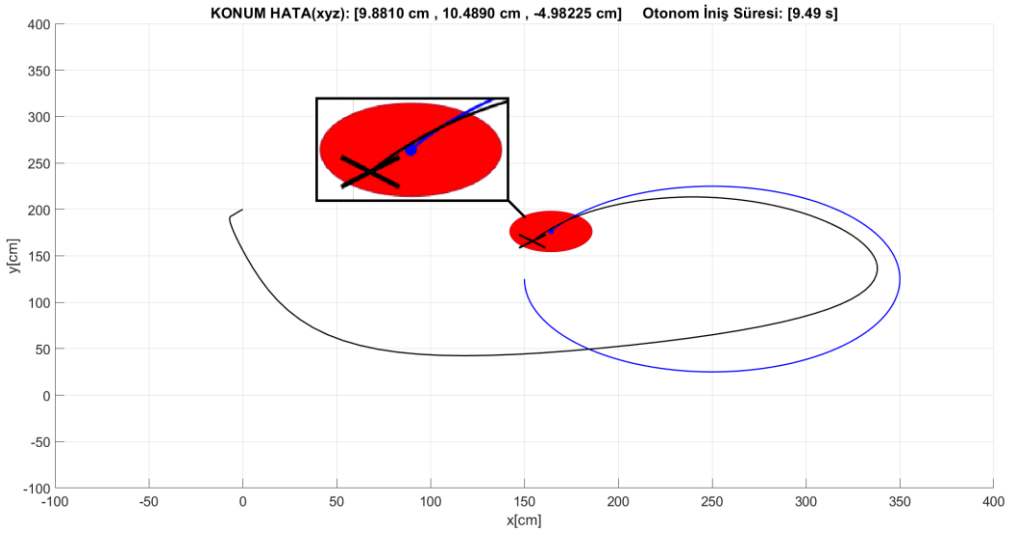
- Senaryo 4.b (rüzgâr gürültüsü 2): Bu senaryoda ise hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hız değiştirilmeden (50 *cm/s* hızla dairesel) ortam şartları biraz daha zorlaştırılmıştır. Otonom inişini gerçekleştiren İHA bu sefer x ve y eksenlerinde $-2\,m/s$, z ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki **rüzgar gürültüsü 2**'ye) maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.29 Benzetim çalışması senaryo 4.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Şekil 3.29 incelendiğinde, önceki senaryoya (senaryo 4.a'ya) kıyasla İHA'nın iniş platformunu merkezinden biraz daha uzakta kalarak otonom inişini tamamlayabildiği görülmektedir (Benzetim Ç. Senaryo 4.b Monte Carlo Test 1: x eksenindeki konum hatası 3.792445 *cm*, y eksenindeki konum hatası 3.866623 *cm*, z eksenindeki konum hatası 0.00891 *cm*).

- Senaryo 4.c (rüzgâr gürültüsü 3): Son senaryoda ise yine hareketli iniş platformunun izlediği yörünge ve hız değiştirilmeden (dairesel ve 50 *cm/s* hızla hareket eden platform), ortam şartları bir kez daha zorlaştırılmıştır.



Şekil 3.30 Benzetim çalışması senaryo 4.c Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

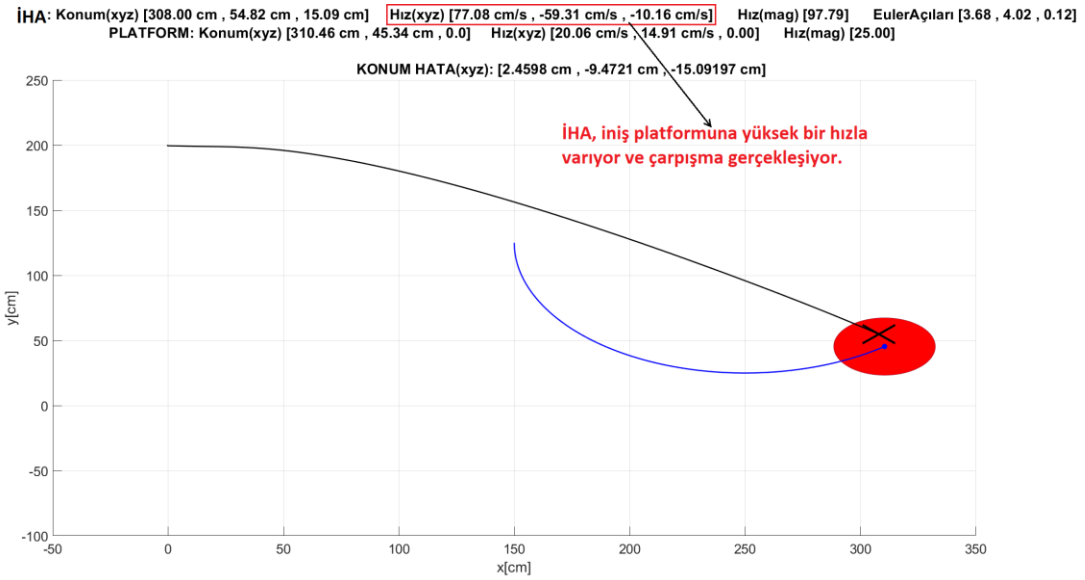
İHA bu senaryoda *x* ve *y* eksenlerinde -3 *m/s*, z ekseninde 0 *m/s* ortalama hıza sahip rüzgâra (Çizelge 3.2'deki rüzgar gürültüsü 3'e) maruz bırakılmıştır.

Şekil 3.30 incelendiğinde İHA'nın, önceki senaryolara (senaryo 4.a ve senaryo 4.b'ye) kıyasla iniş platformunun merkezinden çok daha uzakta kalarak inişini tamamlayabildiği görülmektedir. (Benzetim Ç. Senaryo 4.c Monte Carlo Test 1: *x* eksenindeki konum hatası 9.881002 *cm*, *y* eksenindeki konum hatası 10.48901 *cm*, *z* eksenindeki konum hatası 0.01775 *cm*). Benzetim çalışmasındaki bu en zor en zor ortam şartına (rüzgâr gürültüsü 3'e) rağmen İHA, iniş alanı içerisinde (Şekil 3.30'daki kırmızı alanda) büyük ölçüde kalmayı başarmış ve otonom inişini tamamlamıştır.

Senaryo 4.a, 4.b ve 4.c'deki Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

3.1.3.5 Benzetim çalışmasındaki diğer senaryolar (oransal seyir güdümü)

Bu bölümde ise oransal seyir güdümü (*proportional navigation guidance*) kullanılarak hedef koordinatlar üretilmiş ve İHA'nın hareketli platforma ulaşması sağlanmıştır. Yani bir diğer ifadeyle önerilen çözüm yerine (takip, hassas takip ve iniş aşamaları ile otonom inişin tamamlanması yerine) hareketli platforma otonom iniş için oransal seyir güdümünün uygun olup olmadığı test edilmiştir.



Şekil 3.31 Oransal seyir güdümü kullanılarak İHA'nın hareketli platforma otonom inişinin benzetim ortamında test edilmesi

Ancak Şekil 3.31'de görüldüğü üzere İHA, iniş platformuna *x* ekseninde 77.08 *cm/s*, *y* ekseninde ise -59.31 *cm/s* hızla ulaşmaktadır. Yani bir diğer ifadeyle İHA iniş platformuna ulaştığında iniş yerine çarpışma gerçekleşmektedir. Bir diğer taraftan bu kapsamda oransal seyir güdümü (*proportional navigation guidance*) kullanılarak İHA'nın hareketli platforma otonom iniş yapabilmesi üzerine bir literatür araştırması yapıldığında ise Cheng vd.'nin (2022) çalışmasına ulaşılmıştır. Bu çalışma incelendiğinde otonom iniş için oransal seyir güdümünü doğrudan kullanamadıkları ve otonom inişi tamamlayabilmek için İHA hızını sınırladıkları '*inverse proportional saturation navigation*' adlı bir algoritma geliştirdikleri görülmüştür. Tüm bu bulgular neticesinde bir İHA'nın hareketli ya da sabit bir platforma otonom inişinde oransal seyir güdümünün doğrudan kullanılamayacağı tespit edilmiştir. Çünkü aslında bu yapının

amacı seyir halindeki hava aracı için ivme komutları üretmek ve hava aracının yüksek bir hız ile hedefe ulaşmasını sağlamaktır. Yani bir diğer ifadeyle seyir halindeki hava aracı ile hedefin çarpışmasını sağlamak bu yapının temel motivasyonudur.

3.2 Uygulama

Bu bölümde ise gerçek bir İHA (DJI Ryze Tello) ve hareketli iniş platformu kullanılarak önerilen çözümün 4 farklı senaryo altında başarımı incelenmiştir. Benzetim ortamındaki senaryolarda olduğu gibi bu bölümde de randevu alanına varmış bir İHA'nın hareketli platforma otonom iniş süreci incelenmiştir. Örneğin burada randevu alanı olarak ifade edilen alan, iniş platformunun düşük tutarlılıktaki GPS verileri kullanılarak oluşturulan platformun bulunduğu alan olarak ifade edilebilir. Yani özetle iniş platformu hakkındaki bu bilgi sadece belirli bir alanı gösterebilmektedir ve İHA'nın platforma iniş yapabilmesi için yeterli tutarlılığa ve hassasiyete sahip değildir. Tez kapsamında önerilen çözüm de işte tam olarak bu aşamada (randevu alanına ulaşmış bir İHA ile) başlatılmaktadır.

Bu anlamda randevu alanına ulaşmış bir İHA'nın hareketli platforma otonom inişi için tespit, takip, hassas takip ve iniş aşamaları uygulanmaktadır. İlgili aşamalar ve hareketli platforma otonom iniş süreci Uygulama Sistem Mimarisi (3.2.3) bölümünde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Uygulama bölümündeki tüm alt başlıkları özetlemek gerekirse; önce tez kapsamında kullanılan İHA (DJI Ryze Tello) ve hareketli iniş platformu hakkında bilgi verilmiş, daha sonra ise geliştirilen sitem mimarisi tüm ayrıntılarıyla açıklanmıştır. Son olarak ise önerilen otonom iniş çözümü 4 farklı senaryo altında test edilmiş ve başarımı incelenmiştir.

3.2.1 DJI Ryze Tello

DJI Ryze Tello, öne bakan bir kamerası bulunan dört rotorlu bir insansız hava aracıdır.



Şekil 3.32 DJI Ryze Tello

Çizelge 3.4 DJI Ryze Tello teknik özellikleri

Batarya	3.8V, 1100mAh
Maksimum Uçuş Süresi	13 Dakika
Bağlantı	2.4 GHz 802.11n Wi-Fi
Ağırlık	80g
Kamera	720p 30 FPS
Sensörler	İvmeölçer, Jiroskop, Barometre, Ön Kamera, Mesafe Sensörü (Rangefinder)

Bu İHA çalıştırıldığında ‘TELLO-XXXXX’ adında bir kablosuz ağ erişim noktası oluşturmaktadır. Bu erişim noktasına, herhangi bir kablosuz ağa bağlanır gibi bağlantı sağlanabilmektedir. Bağlantı sağlandıktan sonra ise İHA’nın varsayılan IP adresi 192.168.10.1'dir. 8889 UDP portu üzerinden kontrol komutları gönderebilmektedir. İHA’nın durum bilgileri (sensör, hata bilgileri vs.) ve ön kamera video akışı ise 0.0.0.0 adresli bir UDP sunucusundan alınabilmektedir. Durum bilgileri için kullanılan UDP portu 8890, ön kamera video akışı için kullanılan UDP portu ise 11111’dir.

Kontrol komutlarının ilgili UDP portu üzerinden gönderilebilmesi, İHA durum bilgilerinin ve ön kamera video akışının ilgili UDP portları üzerinden alınabilmesi için

resmi olarak yayınlanmış Tello SDK kullanılmıştır ve Python ortamına dahil edilmiştir. Yani kablosuz bağlantı sağlandıktan sonra İHA'ya komut gönderme ve İHA üzerinden veri alma gibi işlemler Tello SDK ve Python ile gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 3.5 incelendiğinde İHA'nın Tello SDK ve Python üzerinden kontrol edilebilmesi için kullanılan komutlar görülmektedir.

Çizelge 3.5 DJI Ryze Tello kontrol komutları

Komutlar	
İHA Hız Kontrol	uav.send_rc_control (y_Hız, x_Hız, z_Hız, sapma_Hız)
İHA Serbest Düşme	uav.emergency()
İHA Video Akışı Başlatma	uav.streamon()

DJI Ryze Tello üzerinde 4 adet denetleyici (kontrolcü) bulundurmaktadır. Bunlar *x*, *y*, *z* eksenleri hız denetleyicileri ve sapma açısı hız denetleyicisidir. Burada *x* ve *y* ekseni hız denetleyicileri aslında İHA'nın yatma ve yunuslama Euler açılarını kontrol eden yapılar olarak da düşünülebilir. İHA Hız Kontrol komutundaki ilk 3 parametre (*y_Hız*, *x_Hız*, *z_Hız*); İHA üzerinde bulunan *y*, *x* ve *z* hız denetleyicilerinin hedef hız isterleri olarak tanımlanmaktadır. Birimleri ise cm/s'dir. 4. parametre ise sapma açısı hız isteri olarak tanımlanmaktadır. Bu isterin birimi ise deg/s'dir. Yani özetle bu çalışmada DJI Ryze Tello İHA'nın herhangi bir hedef pozisyona (hedef konuma) ulaşabilmesi için bu komut kullanılmıştır.

Bir diğer taraftan hareketli iniş platformu üzerindeki hedef konuma ulaşıldığında serbest düşmenin gerçekleştirilebilmesi için İHA Serbest Düşme komutu kulllanılmış, otonom uçuş boyunca İHA ön kamerası üzerinden video akışının sürdürülebilmesi için ise İHA Video Akışı Başlatma komutu kullanılmıştır.

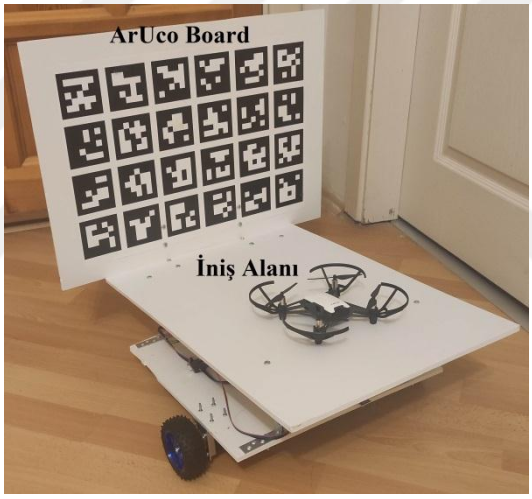
Ayrıca İHA'nın ön kamerasından 30 FPS hızda video akışı almak ve İHA'nın altındaki mesafe sensörü (rangefinder) ile elde edilen irtifa bilgisine ulaşmak için Çizelge 3.6'daki komutlar kullanılmıştır.

Çizelge 3.6 DJI Ryze Tello irtifa bilgisi ve video akışı alma komutları

Komutlar	
İHA Ön Kamerasından Video Akışı Alma	uav.get_frame_read().frame
İHA İrtifa Bilgisi Alma	uav.get_distance_tof()

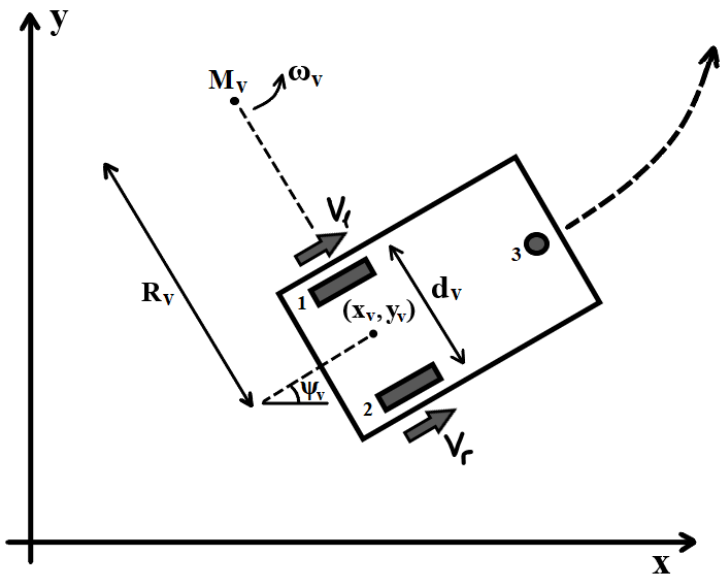
3.2.2 Hareketli iniş platformu

Bu çalışma kapsamında önerilen sistemin gerçek bir uygulama ile test edilebilmesi amacıyla hareketli bir iniş platformu da geliştirilmiştir.



Şekil 3.33 Uygulamada kullanılan hareketli iniş platformu ve İHA

Geliştirilen bu iniş platformu Şekil 3.34'te de görüldüğü üzere diferansiyel sürüş tekniği ile hareket eden bir mobil robottur.



Şekil 3.34 Diferansiyel sürüş tekniği ile hareket eden iniş platformunun kinematiği

Hareketli iniş platformunda 2 adet tahrik tekerleği (Şekil 3.34'te 1 ve 2 nolu tekerlekler) ve bir adet serbest (sarhoş) tekerlek (Şekil 3.34'te 3 nolu tekerlek) bulunmaktadır. Tahrik tekerlekleri ile iniş platformunun sürüşü gerçekleştirilirken, serbest tekerlek platformun sadece dengesini korumaktadır. Aslında bu sürüş tekniği kapsamında, iki tahrik tekerleği arasındaki hız farkına göre platformun hareket yönelimleri gerçekleştirilmektedir. Diferansiyel sürüş tekniği ile hareket eden iniş platformunun kinematiğini tanımlarsak;

$$R_v = \frac{d_v}{2}\frac{V_l + V_r}{V_r - V_l} \tag{3.2}$$

$$\omega_v = \frac{V_r - V_l}{d_v} \tag{3.3}$$

olarak ifade edilebilir. Burada;

- R_v : İniş Platformunun İzlediği Yörüngenin Yarıçapı (cm),
- d_v : İki Tahrik Tekeri Arası Mesafe (cm),
- V_l : Sol Tahrik Tekerinin (1 no'lu tekerlek) Hızı (cm/s),

- V_r : Sağ Tahrik Tekerinin (2 no'lu tekerlek) Hızı (cm/s),
- ω_v : İniş Platformunun Açısal Hızı (deg/s)

olarak tanımlanır. Eşitlik 3.2 ve 3.3 incelenirse sağ ve sol tahrik tekerlerinin hızları (V_r ve V_l) birbirine eşit olduğunda iniş platformunun izlediği yörüngenin yarıçapı (R_v) sonsuz olmakta ve açısal hız (ω_v) sıfır olmaktadır. Yani bu sayede iniş platformunun **sabit bir hızda doğrusal bir yörünge** izleyerek hareket etmesi sağlanmaktadır. Bir diğer taraftan sağ ve sol tekerlekler arasında hız farkı oluşturulduğunda ise açısal hız elde edilmekte ve iniş platformunun **sabit bir hızda dairesel bir yörünge** izleyerek hareket etmesi sağlanmaktadır.

Bir diğer taraftan hareketli iniş platformunun dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre pozisyon bilgilerinin elde edilebilmesi için Eşitlik 3.4 ve 3.5 kullanılmıştır.

$$M_v = [x_v - R_v \sin\psi_v \quad , \quad y_v + R_v \cos\psi_v] \tag{3.4}$$

$$\begin{bmatrix} x_{v_yeni} \\ y_{v_yeni} \\ \psi_{v_yeni} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega_v\Delta t_v & -\sin\omega_v\Delta t_v & 0 \\ \sin\omega_v\Delta t_v & \cos\omega_v\Delta t_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_v - M_{vx} \\ y_v - M_{vy} \\ \psi_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{vx} \\ M_{vy} \\ \omega_v\Delta t_v \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

Burada ise;

- M_v : İniş Platformunun İzlediği R_v Yarıçaplı Yörüngenin Merkezi,
- x_v : İniş Platformunun x Eksenindeki Pozisyonu (cm),
- y_v : İniş Platformunun y Eksenindeki Pozisyonu (cm),
- ψ_v : İniş Platformunun Sapma Açısı (deg),
- x_{v_yeni} : İniş Platformunun x Eksenindeki Yeni Pozisyonu (cm),
- y_{v_yeni} : İniş Platformunun y Eksenindeki Yeni Pozisyonu (cm),
- ψ_{v_yeni} : İniş Platformunun Yeni Sapma Açısı (deg),
- Δt_v : Birim Zaman (s)

olarak tanımlanmaktadır.

İşte bu eşitlikler (Eşitlik 3.4 ve 3.5) kullanılarak (ya da bir diğer ifadeyle sağ ve sol tahrik tekerleklerinin birim zamanda katettiği mesafeler kullanılarak) hareketli iniş platformunun yeni pozisyonu (x_{v_yeni} , y_{v_yeni}) ve yeni sapma açısı (ψ_{v_yeni}) her birim zaman aralığında (Δt_v) yeniden hesaplanmaktadır. Böylece hareketli iniş platformunun konum bilgileri elde edilmektedir. Elde edilen bu konum bilgileri ise bluetooth bağlantısı üzerinden PC'de toplanmaktadır. **Ancak şunu da belirtmek gerekir ki; hareketli iniş platformunun bu konum bilgileri hiçbir şekilde geliştirilen otonom iniş çözümünde kullanılmamıştır. Elde edilen bu bilgiler sadece otonom iniş sürecindeki İHA ile iniş platformunu aynı konum - zaman grafikleri üzerinde göstermek amacıyla kullanılmıştır. Yani bir diğer ifadeyle hareketli platforma otonom iniş çözüm önerisi sadece <u>İHA ön kamerası ve mesafe sensörü bilgileri</u> kullanılarak gerçekleştirilmiştir.**

Ayrıca hareketli iniş platformunun teknik özellikleri Çizelge 3.7'deki gibidir.

Çizelge 3.7 Hareketli iniş platformunun teknik özellikleri

Platformun Hızı	25 cm/s
Platform İniş Alanı Ölçüleri (En, Boy)	40 cm, 50 cm
İniş Alanının Yerden Yüksekliği	20 cm
Tahrik Tekerlekleri Arasındaki Mesafe (d_v)	40 cm
Tahrik Motorları	Nema 17 0.4 Ncm Step Motor

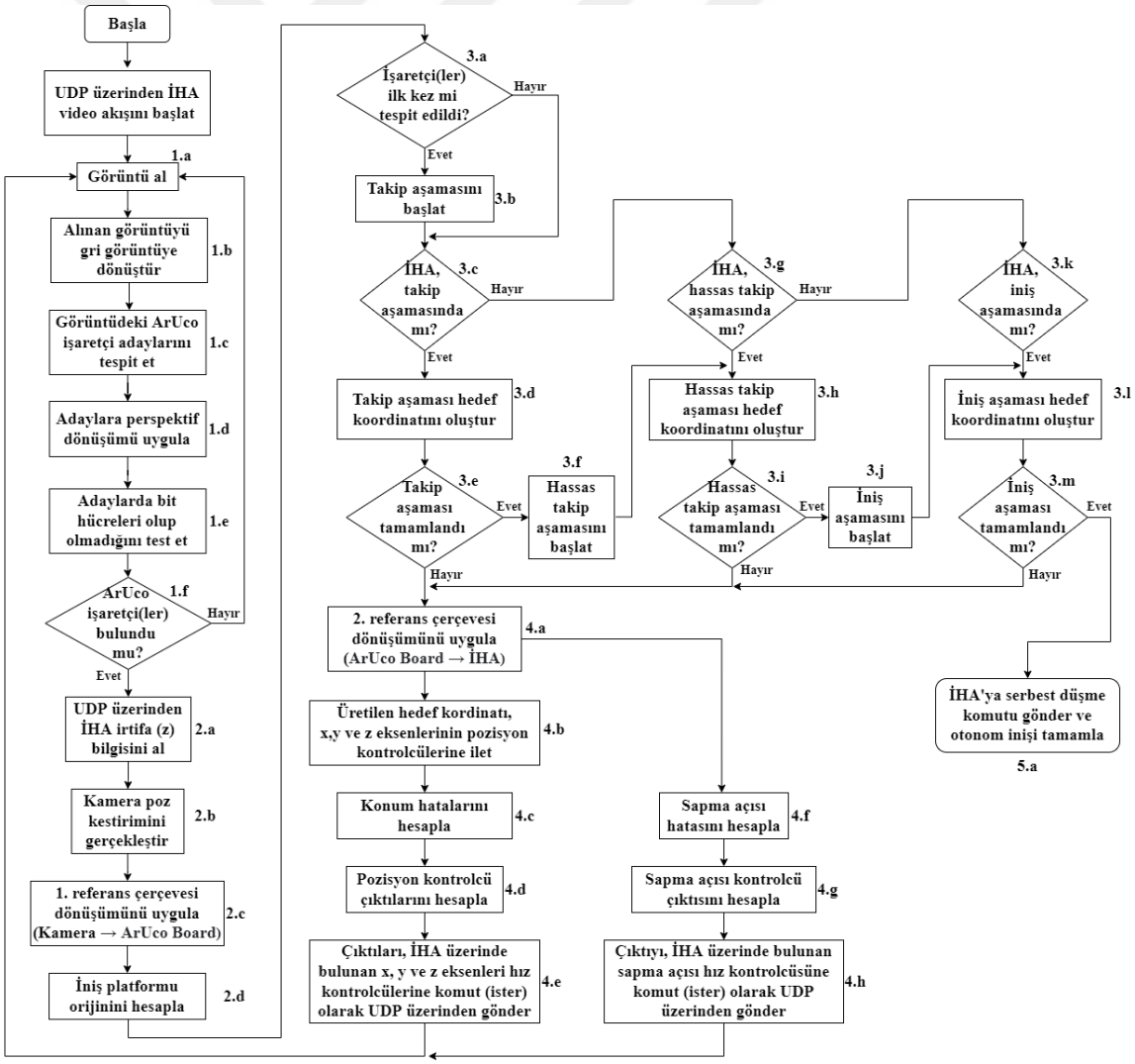
Son olarak ise önerilen/geliştirilen çözümün gerçek bir uygulamadaki başarımının test edilebilmesi için Çizelge 3.8'deki iniş platformu yörüngeleri oluşturulmuştur. Bu yörüngeleri izleyen platforma İHA'nın otonom iniş testleri yapılmıştır. Tüm bu testler, senaryo planları ve önerilen çözümün bu senaryolar altındaki başarımları bölüm 3.2.5'te (Uygulama Senaryoları'nda) sistematik bir şekilde detaylarıyla açıklanmaktadır. Bu bölümün (Hareketli İniş Platformu bölümünün) kapsamı dışındadır.

Çizelge 3.8 İHA'nın otonom iniş testleri için oluşturulan hareketli iniş platformu yörüngeleri

	İniş Platformu Hareketi	**İniş Platformu Hızı**	**Yörünge Yarıçapı (R_v)**
Yörünge 1	Doğrusal	25 cm/s	-
Yörünge 2	Dairesel	25 cm/s	100 cm

3.2.3 Uygulama sistem mimarisi

Tez kapsamında uygulama için geliştirilen sistem mimarisinin şablonu Şekil 3.35'te gösterilmektedir.



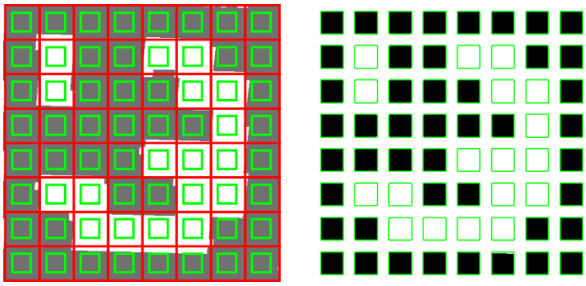
Şekil 3.35 Uygulama bölümü: sistem mimarisi şablonu

Şekil 3.35'teki şablon sembolleri incelendiğinde bu sembollerin her birinin numaralandırıldığı görülmektedir. Bunlar, sistem mimarisinin 5 ana bölümünü açıklamak için kullanılmaktadır. Tezin bu bölümünde, şablonda görülen (Şekil 3.35) tüm yapılar bu 5 ana bölüm altında sırayla detaylı bir şekilde açıklanmaktadır.

- Sistem mimarisi bölüm 1: ArUco işaretçilerin tespiti (Şekil 3.35'te 1.a – 1.f): Bu bölüm; randevu alanına ulaştığı bilinen (varsayılan), otonom iniş çözümünde kullanılan PC ile kablosuz bağlantısı olan ve bu PC'ye video akışını başlatmış bir İHA (DJI Ryze Tello) ile başlamaktadır. PC ve İHA arasındaki bu kablosuz (UDP) bağlantı üzerinden İHA'yı kontrol edebilecek komutlar gönderilebileceği ve İHA üzerinden birçok bilgi (ortam görüntüsü, durum, hata vs.) alınabileceği bölüm 3.2.1'de (DJI Ryze Tello bölümünde) açıklanmıştı.

Mimaride bölüm 1'in temel amacı ArUco işaretçi(ler)in tespit edilmesi yani iniş platformunun tespit edilmesidir. İşte bu kapsamda ilk olarak ~30 FPS hızda İHA ön kamerası üzerinden alınan ortam görüntüleri kablosuz UDP bağlantısı üzerinden PC'ye aktarılmaktadır. Daha sonra ise bu görüntüler işlenmek üzere PC'de gri görüntüye dönüştürülmektedir (Şekil 3.35'te 1.b). Bu işlem, sonraki aşamalardaki görüntü işleme algoritmalarının işlem yükünü azaltmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çünkü ilgili görüntüde sadece siyah ve beyaz renklerden oluştuğu bilinen ArUco işaretçiler aranmaktadır. Bu nedenle RGB görüntüye ihtiyaç duyulmamaktadır.

Bu bölümün bir sonraki aşamasında ise (Şekil 3.35'te 1.c) elde edilen gri görüntü analiz edilmekte ve görüntü üzerindeki tüm kare şeklindeki konturlar (ArUco işaretçi adayları) tespit edilmektedir. Daha sonra ise tespit edilen bu konturlara perspektif dönüşümü uygulanmakta ve adayların (kare şeklindeki konturların) kanonik formu elde edilmektedir (Şekil 3.35'te 1.d). Kanonik formdaki bu adaylara Otsu'nun eşikleme yöntemi (Otsu 1979) uygulanarak Şekil 3.36'daki bit hücrelerinin olup olmadığı test edilmektedir (Şekil 3.35'te 1.e).



Şekil 3.36 İşaretçi bit hücresi örneği (OpenCV 2022)

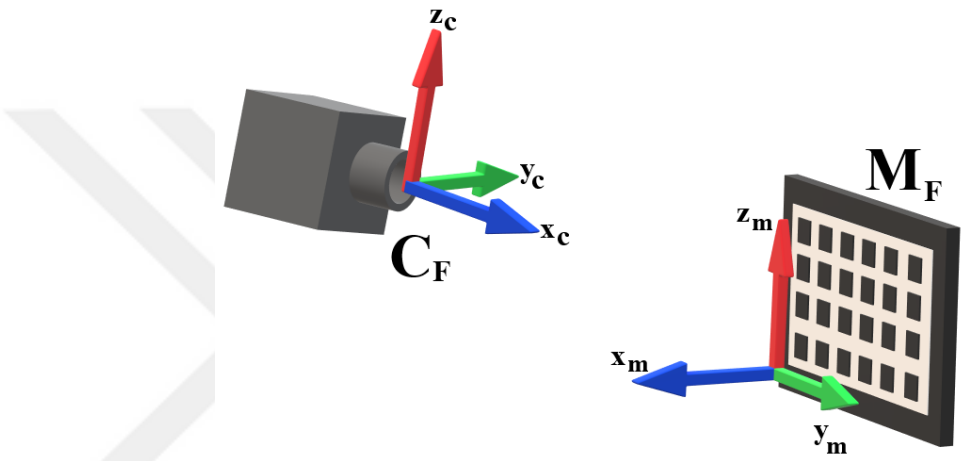
Bu test sonucunda ArUco işaretçi adaylarında (kare konturlarda) bit hücreleri tespit edilmişse ilgili görüntüde ArUco işaretçi(ler) bulunmuş demektir. Yani iniş platformu tespit edilmiş ve bölüm 1 (ArUco İşaretçilerin Tespiti) başarıyla tamamlanmıştır. Böylece bölüm 2 başlatılmıştır.

- Sistem mimarisi bölüm 2: İHA'nın, hareketli iniş platformu orijinine göre pozisyon ve euler açı bilgilerinin elde edilmesi (Şekil 3.35'te 2.a – 2.d): Bu bölümün temel amacı ise İniş Platformu Orijini (Şekil 3.38) olarak adlandırılan orijine göre İHA'nın *x*, *y* ve *z* eksenlerindeki pozisyon bilgilerinin elde edilmesidir.

Bu kapsamda ilk olarak İHA'nın irtifa bilgisi (*z* ekseni pozisyonu) kablosuz bağlantı üzerinden PC'ye alınmaktadır (Şekil 3.35'te 2.a). Bu irtifa bilgisi İHA üzerinde bulunan ve yere doğru bakan mesafe sensörü (rangefinder) ile elde edilmektedir.

İniş platformu orijinine göre İHA'nın *x* ve *y* eksenlerindeki konum/pozisyon bilgisi ise platform üzerindeki ArUco board kullanılarak elde edilmektedir. Bu nedenle kablosuz bağlantı üzerinden İHA ön kamerası görüntüsünün PC ortamında elde edilmesi sonrası, kamera poz kestirimi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.35'te 2.b). Kamera poz kestirimi (yani kameraya göre işaretçi matrisinin pozisyonu ve oryantasyonunun elde edilmesi) tezin ArUco İşaretçiler ile Kamera Poz Kestirimi (2.3.5) bölümünde açıklanmaktadır. Bu bölümün yani **'Kamera poz kestirimini gerçekleştir'** aşamasının (Şekil 3.35'te 2.b) tüm detayları tezin 2.3.5 bölümünde incelenebilir.

Gerçekleştirilen bu poz kestirim işlemi sonucunda elde edilen bilgi yeterli değildir çünkü bu işlem sonucunda kamera koordinat sistemine (C_F) göre ArUco board işaretçisinin koordinat bilgileri elde edilmiştir. Yani bu aşamada kameraya göre işaretçinin nerede olduğu tespit edilmiştir. Ancak tez kapsamında Aruco Board referans çerçevesine (M_F) (koordinat sistemine) göre İHA kamerasının nerede olduğu yani İHA'nın nerede olduğunun bilinmesi gerekmektedir. Bu bağlamda ArUco board referans çerçevesine göre İHA'nın koordinat bilgileri hesaplanmalıdır.



Şekil 3.37 İHA ön kamerası referans çerçevesi (C_F) ve iniş platformu üzerinde bulunan aruco board referans çerçevesi (M_F)

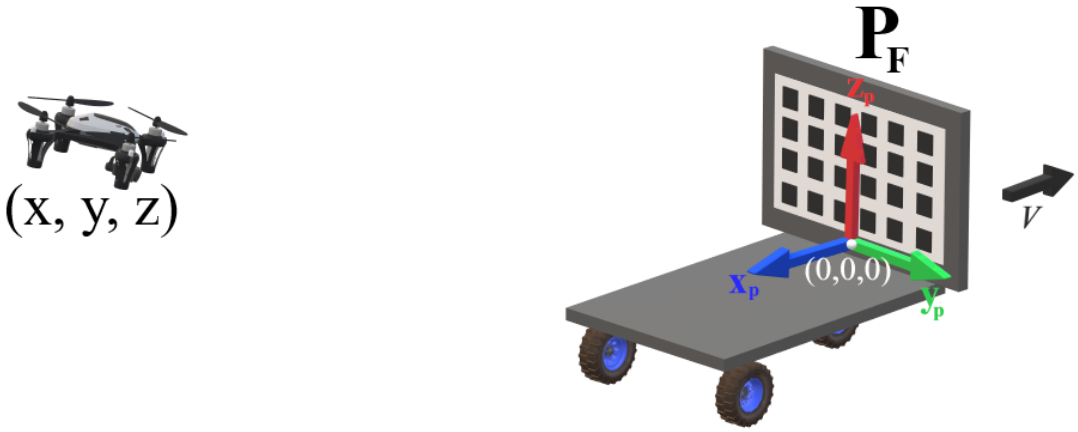
Şekil 3.37'de İHA ön kamerası referans çerçevesi (C_F) ve iniş platformu üzerindeki aruco board işaretçisinin referans çerçevesi (M_F) görülmektedir. ArUco board referans çerçevesine göre İHA'nın koordinat bilgilerinin elde edilmesi için Eşitlik 3.7'deki referans çerçevesi dönüşümü uygulanmıştır. Böylece bu bölümün '**1. referans çerçevesi dönüşümünü uygula**' (Şekil 3.35'te 2.c) aşaması tamamlanarak ArUco board orijinine (referans çerçevesine ya da koordinat sistemine) göre İHA'nın koordinat ve oryantasyon (Euler açı) bilgileri elde edilmiştir.

Eşitlik 3.7, Kamera Dışsal Parametreleri (2.3.3) bölümündeki Eşitlik 2.75 kullanılarak elde edilmiştir. Bu sayede PC ortamında gerçekleşen referans çerçevesi (koordinat sistemi) dönüşüm aşaması (Şekil 3.35'te 2.c), Eşitlik 3.7 kullanılarak tamamlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Sistem mimarisinin bu bölümünde gerçekleşen '**İniş platformu orijinini hesapla**' (Şekil 3.35'te 2.d) aşamasında ise sadece ArUco Board orijinine *y* ekseninde 20 *cm* offset eklenmiştir. Böylece Şekil 3.38'de görülen ve iniş platformunu simetrik bir şekilde ikiye bölen yeni bir orijin elde edilmiştir.



Şekil 3.38 Hareketli iniş platformu referans çerçevesi (P_F), orijini ve iniş platformu orijinine göre elde edilmiş iha kordinatı (pozisyonu)

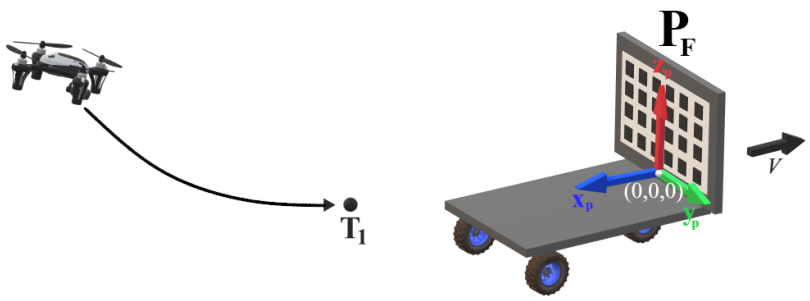
İHA'nın *y* ekseni koordinat bilgisi de bu yeni orijine göre (20 *cm* offset eklenerek) güncellenmiştir. Sonuç olarak artık elimizde **iniş platformu orijini** olarak adlandırılan yapıya göre elde edilmiş İHA koordinat bilgileri bulunmaktadır. Yani iniş platformuna göre İHA'nın nerede olduğu artık bilinmektedir. Bu bağlamda sistem mimarisinin sonraki bölümlerinde İHA pozisyonu olarak bu bilgi kullanılmıştır.

- Sistem mimarisi bölüm 3: ilgili otonom iniş aşamasına karar verilmesi ve hedef koordinatın üretilmesi (Şekil 3.35'te 3.a – 3.m): Bu bölümün temel amacı ise takip,

hassas takip ve iniş aşamaları arasında geçişi sağlamaktadır. Bu kapsamda PC ortamında ilgili otonom iniş aşaması şartlarının sağlanıp sağlanmadığını kontrol edilmekte ve buna bağlı olarak ilgili aşama (takip, hassas takip ya da iniş) için İHA'nın gitmesi gereken hedef koordinatlar üretilmektedir.

İniş platformu orijinine göre İHA konum bilgisinin elde edilmesi (sistem mimarisi bölüm 2) ile birlikte önce iniş platformunun ilk kez mi tespit edildiği kontrol edilmektedir (Şekil 3.35'te 3.a). Bu kapsamda eğer hareketli iniş platformu ilk kez tespit edilmişse takip aşaması başlatılmaktadır (Şekil 3.35'te 3.b).

Daha sonra ise Şekil 3.39'da gösterilen, platform ile birlikte hareket eden takip aşaması hedef koordinatı T_1 (70, 0, 40) üretilmektedir (Şekil 3.35'te 3.d). Birimi *cm*'dir.



Şekil 3.39 Uygulama takip aşaması

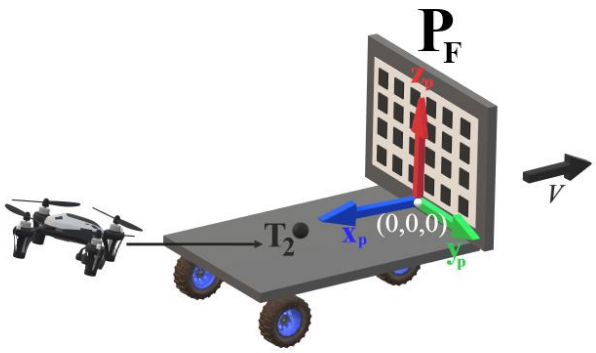
Böylece PC tarafında çalışan ve sistem mimarisinin bir sonraki bölümünde açıklanacak olan pozisyon kontrolcüler kullanılarak üretilen bu hedef konuma İHA'nın ulaşması sağlanmaktadır. Eğer takip aşaması hedef koordinatına *x* ekseninde 25 *cm* ve *y* ekseninde 25 *cm* toleranslar dahilinde ulaşılmışsa (Şekil 3.35'te 3.e), hassas takip aşaması başlatılmaktadır (Şekil 3.35'te 3.f).

Hassas takip aşamasına gelindiğinde ise aslında takip aşamasında kullanılan hedef koordinat T_1 (70, 0, 40) kullanılmaya devam edilmektedir (Şekil 3.35'te 3.h). Bu aşamadaki temel amaç, yüksek bir hızla takip aşaması hedef koordinatına ulaşan İHA'daki kararsızlığın giderilmek istenmesidir. Çünkü kontrollü bir şekilde düşük bir

hızda inişin gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu nedenle hedefe yüksek hızla varıldıktan sonra kararlılık durumu oluşabilmesi (İHA hızının iniş platformu hızına yakınsaması) için iki saniye boyunca x ve y eksenlerinde 25 cm toleranslar dahilinde ilgili hedef kordinatın takibi sağlanmalıdır. 2 saniye boyunca İHA'nın bu toleranslar dahilinde kalması sağlanarak iniş platfomunun takibi gerçekleştirilebilmişse hassas takip aşaması da başarıyla tamamlanmış demektir.

Peki biz aslında hassas takip aşamasında İHA'nın hep aynı koordinat üzerinde kalmasını istiyorsak bu süreç neden **hassas bir takip** süreci olsun? Yani bir diğer ifadeyle İHA'nın aynı kordinatta (pozisyonda) kalması isteniyorsa neden bir şeyleri takip ediyoruz? Bu durum şöyle açıklanabilir: Üretilen hedef koordinat aslında daha önce de belirtildiği gibi iniş platformu orijinine göre elde edilmektedir. Ancak bu orijin (referans) hareketli bir platform üzerinde olduğu için hareket halindedir. Yani bu bağlamda orijine göre üretilmiş hedef koordinat da platform ile beraber hareket etmektedir. İşte bundan dolayı hem orijin hem de ilgili hedef koordinat sürekli olarak İHA'dan uzaklaşmaktadır (kaçmaktadır). Özetle hareket halinde bir referans sistemimiz (koordinat sistemimiz) bulunmaktadır. İHA pozisyon kontrolcüleri ise İHA'yı hep aynı hedef koordinat üzerinde tutmaya çalışmaktadır. Yani bir diğer ifadeyle İHA, hareket halindeki bu hedef kordinatın peşinden sürüklenmektedir. İşte bu bağlamda bu sürüklenme (hassas takip), İHA hızı ile hareketli iniş platformu hızının birbirine yakınsamasını sağlayacak kararlılık durumun oluşması için kullanılmaktadır. Bu şart sağlandığında ise aslında biraz önce bahsedilen hassas takip aşaması toleransları dahilinde hareket halindeki hedef koordinatta kalmayı başarabilen bir İHA karşımıza çıkmaktadır. Böylece hassas takip aşaması tamamlanmakta ve iniş aşaması başlatılmaktadır (Şekil 3.35'te 3.j).

İniş aşamasına geçildiğinde ise İHA'nın ulaşması gereken yeni bir hedef koordinat olan T_2 (20, 0, 0) üretilmektedir. Birimi cm'dir.



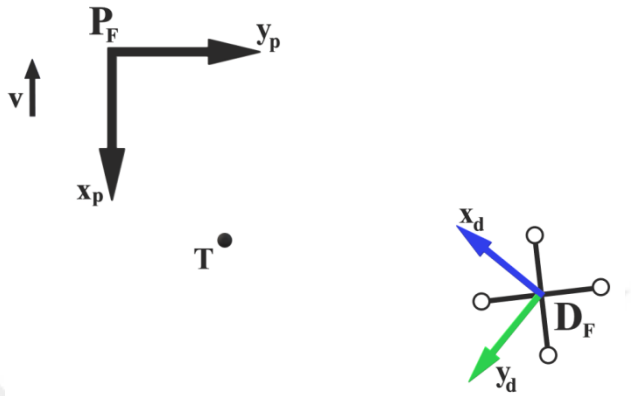
Şekil 3.40 Uygulama iniş aşaması

İniş platformu (orijini) hareket halinde olduğu için iniş aşamasında üretilen hedef koordinat da diğer tüm hedef koordinatlar gibi hareket halindedir ve İHA'dan uzaklaşmaktadır. Bu kapsamda **sistem mimarisi bölüm 4**'te açıklanacak pozisyon kontrolcüler ile İHA'nın bu hedef konuma ulaşması sağlanmaktadır. Bu aşamanın da tamamlamasıyla hareketli platforma otonom iniş çözüm önerisi başarıyla tamamlanmaktadır. Ancak iniş aşamasının hangi şartlar altında tamamlandığı ve otonom inişin nasıl sonlandırıldığı **sistem mimarisi bölüm 5**'te açıklanmaktadır. Bu bölümün kapsamı dışındadır.

- Sistem Mimarisi Bölüm 4: İHA Kontrolü (Şekil 3.35'te 4.a – 4.h): Bundan önceki bölümlerde İHA'nın otonom iniş aşamalarını sırasıyla tamamlayabilmesi için ulaşması gereken hedef koordinatlar (hedef pozisyon bilgileri) üretildiği açıklanmıştı. Bu kapsamda İHA'nın ilgili hedef koordinatlara ulaşabilmesi için kapalı döngü bir pozisyon kontrol mimarisi geliştirilmiştir ve genel sistem mimarisi içinde uygulanmıştır (Şekil 3.35'te 4.a – 4.h).

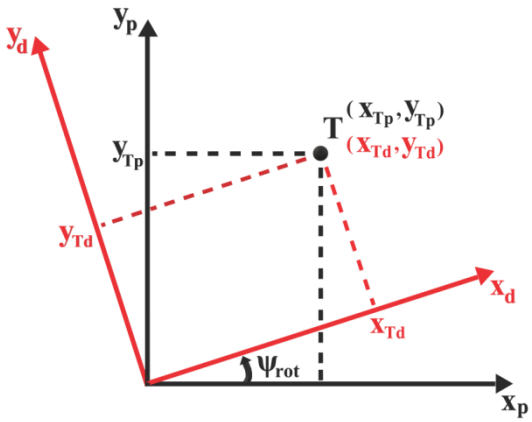
Ancak ilgili hedef koordinat/pozisyon bilgileri kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisine girdi olarak iletilmeden önce x ve y eksenlerindeki hedef pozisyon bilgilerine yeni bir referans çerçevesi (koordinat istemi) dönüşüm işlemi uygulanmalıdır. Çünkü x ve y ekseni hedef pozisyon bilgileri, bundan önceki bölümlerde de açıklandığı üzere hareketli iniş platformu referans çerçevesine göre üretilmiştir. Fakat ulaşılması gereken hedef noktanın (pozisyonun) İHA'ya yani İHA

referans çerçevesine göre nerede olduğu bilinmelidir. Yani bir diğer ifadeyle hedefin İHA koordinat sistemine göre nerede olduğu hesaplanmalıdır. İHA referans çerçevesi (koordinat sistemi) Referans Çerçeveler bölümünde (bölüm 2.1.1'de) İHA'nın ağırlık merkezinde bulunan ve İHA ile birlikte hareket eden bir çerçeve olarak tanımlanmıştı.



Şekil 3.41 İniş platformu referans çerçevesi (P_F), İHA referans çerçevesi (D_F) ve hedef pozisyon (T)

Bu bağlamda Şekil 3.41'de iniş platformunun referans çerçevesi (P_F), İHA referans çerçevesi (D_F) ve İHA'nın ulaşması gereken örnek bir hedef pozisyon (T) görülmektedir. Burada x_p ve y_p iniş platformunun referans çerçevesi eksenlerini ifade etmektedir. x_d ve y_d ise İHA referans çerçevesinin eksenlerini ifade etmektedir. İHA'nın örnek hedef pozisyona (T) ulaşabilmesi için önce bu hedef pozisyonun İHA koordinat sistemine (referans çerçevesine) göre nerede olduğu hesaplanmalıdır. Bu nedenle ilgili problemi daha basit bir şekilde ifade etmek için Şekil 3.42 kullanılabilir.



Şekil 3.42 İki eksenli referans çerçeveler arasında dönüşüm

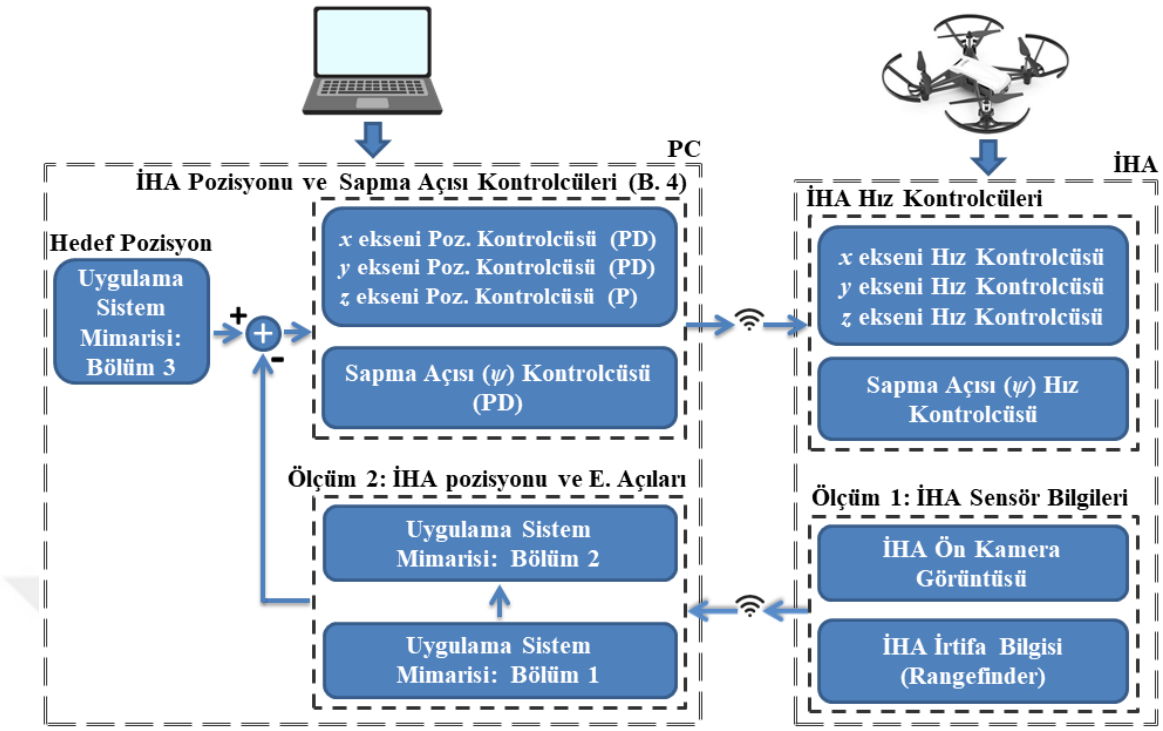
Şekil 3.42 incelendiğinde örnek T noktasının iki farklı referans çerçevesine göre koordinatları görülmektedir. Burada x_{Tp} ve y_{Tp} iniş platformu referans çerçevesine göre elde edilen koordinatları ifade ederken, x_{Td} ve y_{Td} İHA referans çerçevesine göre elde edilen koordinatları ifade etmektedir. ψ_{rot} ise iki referans çerçevesi arasındaki sapma açısıdır. İHA referans çerçevesine göre *x* ve *y* ekseni hedef koordinat bilgilerini elde etmek için Eşitlik 3.8 kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} x_{Td} \\ y_{Td} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\,\psi_{rot} & sin\,\psi_{rot} & 0 \\ -sin\,\psi_{rot} & cos\,\psi_{rot} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{Tp} \\ y_{Tp} \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

Bir diğer taraftan z ekseni hedef pozisyon bilgisi ise herhangi bir dönüşüme gerek kalmadan doğrudan kullanılabilmektedir. Çünkü *z* eksenindeki pozisyon ölçüm bilgileri için İHA'nın altında bulunan mesafe sensörü (rangefinder) kullanılmaktadır. Bu bağlamda İHA ve hareketli iniş platformu referans çerçevelerinin *z* eksenleri örtüşmektedir ve herhangi bir koordinat sistemi dönüşümüne ihtiyaç duyulmamaktadır.

Eşitlik 3.8'in de uygulanmasıyla birlikte ulaşılması gereken hedef pozisyonun artık İHA koordinat sistemine göre nerede olduğu bilinmektedir. Böylece elde edilen bu bilgiler kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisine girdi (ister) olarak iletilmeye hazırdır.

Şekil 3.43 incelendiğinde sistem mimarisinde kullanılan kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisi görülmektedir.



Şekil 3.43 Kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisi

Bu yapıda, sistem mimarisi bölüm 3'te üretilen hedef koordinat bilgileri *x*, *y* ve *z* eksenlerindeki pozisyon kontrollerinden sorumlu denetleyicilere girdi olarak iletilmektedir. Burada *x* ve *y* eksenlerindeki pozisyon kontrolü için *PD*, *z* eksenindeki pozisyon kontrolü içinse *P* denetleyici kullanılmaktadır (Şekil 3.43). Bu kontrolcüler PC tarafında çalıştırılmaktadır. Hedef koordinatın bu kontrolcülere iletilmesiyle önce her eksen için pozisyon hataları hesaplanmaktadır (e_x, e_y ve e_z). Daha sonra ise bu hatalar pozisyon denetleyicilerde kullanılarak her eksen için pozisyon kontrol çıktıları üretilmektedir. Tez kapsamında uygulama için geliştirilen ve İHA'nın *x*, *y*, *z* eksenlerindeki pozisyon kontrollerini sağlayan *PD* ve *P* kontrolcülerin kontrol katsayıları (K_P ve K_D) Çizelge 3.9'da paylaşılmıştır.

Çizelge 3.9 Uygulama bölümü: İHA pozisyon kontrolcülerin kontrol katsayıları

	K_P		K_D	
***x* Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü (*PD*)**	K_{Px}	0.9	K_{Dx}	1.6
***y* Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü (*PD*)**	K_{Py}	1.1	K_{Dy}	1.4
***z* Ekseni Pozisyon Kontrolcüsü (*P*)**	K_{Pz}	2.0	K_{Dz}	-

Bu bağlamda PC ortamındaki pozisyon kontrolcüler ile elde edilen çıktılar, kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisindeki hız denetleyicilerine girdi olarak iletilmelidir. Bölüm 3.2.1'de (DJI Ryze Tello bölümünde) de açıklandığı üzere uygulamada kullanılan İHA, üzerinde *x,y* ve *z* eksenleri hız kontrolcüleri bulundurmaktadır. Bu durum Şekil 3.43'te de görülmektedir. Pozisyon kontrolcüler ile elde edilen çıktılar, kablosuz UDP bağlantısı üzerinden PC'den İHA'ya komut (ister) olarak gönderilmektedir. Yani hız kontrolcülere girdi olarak iletilmektedir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için Çizelge 3.5'te paylaşılan **İHA Hız Kontrol** komutu kullanılmaktadır. Böylece İHA üzerindeki hız kontrolcüler, pozisyon kontrolcülerin ürettiği hız isterlerini sağlayarak İHA'nın hedef pozisyona hareketini gerçekleştirmektedir.

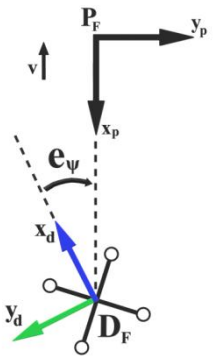
Ayrıca bu kontrol mimarisinde İHA'nın sapma açısını (ψ) kontrol eden bir *PD* denetleyici de bulunmaktadır. Bu denetleyici için Çizelge 3.10'daki *PD* kontrol katsayıları kullanılmaktadır.

Çizelge 3.10 Uygulama bölümü: İHA sapma açısı kontrolcüsünün *pd* kontrol katsayıları

	$K_{P\psi}$	$K_{D\psi}$
Sapma Açısı (ψ) Kontrolcüsü (*PD*)	1.2	1.2

Sapma açısını kontrol eden *PD* denetleyicinin amacı, iniş platformu üzerindeki ArUco işaretçinin kamera görüş alanında kalmasını sağlayacak kontrol çıktılarını üretmektir. Bu bağlamda İHA ve iniş platformu referans çerçevesine yukarıdan bakan Şekil 3.44

incelendiğinde iniş platformu referans çerçevesine göre elde edilmiş İHA sapma açısı hatası (e_ψ) görülmektedir.



Şekil 3.44 Hareketli iniş platformu refererans çerçevesine (P_F) göre elde edilen sapma açısı hatası (e_ψ)

Burada amaç tam olarak bu hatanın (e_ψ) giderilmesini sağlayacak kontrol çıktılarını üretmektir. Şekil 3.44 örneğinde olduğu gibi hareketli platformun arkasından takip, hassas takip ya da iniş aşamalarını devam ettiren İHA'nın ön kamerası, ancak sapma açısı hatasının (e_ψ) giderilmesiyle platform üzerindeki ArUco Board'a tam olarak dönebilmektedir. Böylece platform üzerindeki ArUco Board, otonom iniş boyunca İHA ön kamerasının görüş alanında kalmaya devam etmektedir.

Peki neden iniş platformu üzerindeki ArUco Board'un İHA ön kamerası görüş alanında kalmasını istiyoruz? Çünkü ancak bu işaretçi (ArUco Board) tespit edilebildiği (kamera ile görülebildiği) sürece İHA'nın iniş platformuna göre pozisyonu elde edilebilmekte ve bu bağlamda otonom iniş aşamaları (takip, hassas takip ve iniş) işletilebilmektedir. Yani bir diğer ifadeyle otonom inişin tamamlanabilmesi için ArUco Board'u görmeye devam etmeliyiz.

Şekil 3.43'te de görülen sapma açısı kontrolcüsü PC tarafında çalıştırılmaktadır. Sapma açısı hatası (e_ψ) bu denetleyicide kullanılarak açı kontrol çıktısı üretilmektedir. Daha sonra ise elde edilen bu çıktı, kapalı döngü pozisyon kontrol mimarisindeki İHA üzerinde bulunan sapma açısı hız denetleyicisine girdi (ister) olarak kablosuz UDP bağlantısı üzerinden iletilmektedir. Böylece İHA üzerindeki sapma açısı hız

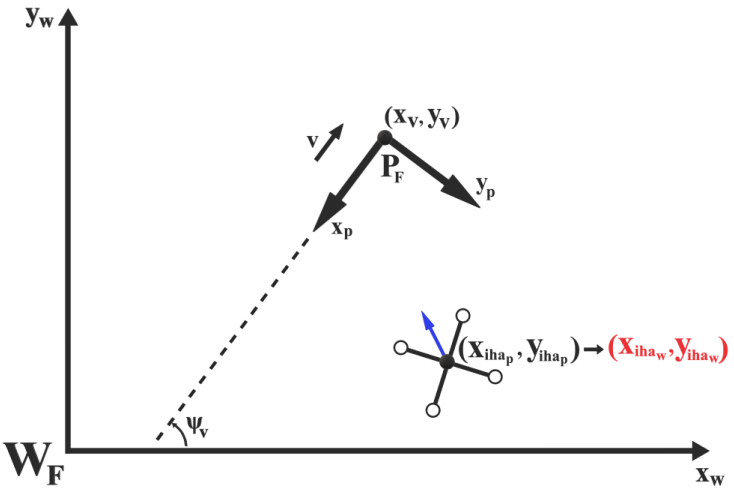
kontrolcüsü, PC tarafındaki sapma açısı kontrolcüsünün ürettiği hız isterini sağlamakta ve İHA'nın hedef sapma açısı hareketi gerçekleştirilmektedir.

Sonuç olarak Şekil 3.43'te görülen İHA sapma açısı kontrolcüsü en az pozisyon kontrolcüler kadar kritik önem taşımaktadır. Bir taraftan bu kontrolcü sayesinde İHA ön kamerasının işaretçiye (ArUco Board'a) dönük olması sağlanırken, bir diğer taraftan platform üzerindeki işaretçinin tespit edilmesi devam ettiği için İHA'nın pozisyon bilgileri elde edilmekte, iniş platformuna ve otonom iniş aşamasına göre (uygulama sistem mimarisi bölüm 3' göre) İHA'nın pozisyon kontrolleri sağlanmaktadır.

- Sistem mimarisi bölüm 5: otonom inişin tamamlanması (Şekil 3.35'te 5.a): İniş aşamasındaki İHA'nın Şekil 3.40'ta da görülen hareket halindeki hedef iniş koordinatı T_2'ye (20, 0, 0) ulaşması gerektiği **sistem mimarisi bölüm 3**'te açıklanmıştı. Bu kapsamda **sistem mimarisi bölüm 4**'teki pozisyon kontrolcüler kullanılarak İHA'nın bu hareketli hedefe ulaşması sağlanmaktadır. Hedef iniş koordinatı T_2'ye (20, 0, 0); *x* ekseninde 21 *cm*, *y* ekseninde 10.5 *cm* ve *z* ekseninde 30 *cm* toleranslar dahilinde ulaşılmasıyla tüm İHA rotorları durdurulmakta ve otonom iniş serbest düşme ile tamamlanmaktadır. Serbest düşmenin gerçekleştirilebilmesi için Çizelge 3.5'te paylaşılan **İHA Serbest Düşme** komutu kullanılmıştır.

3.2.4 İHA ve hareketli iniş platformu konum bilgilerinin dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre elde edilmesi

Tez kapsamında geliştirilen otonom iniş çözüm önerisinin başarımını üç boyutlu otonom iniş, iki boyutlu otonom iniş, konum - zaman ve konum hatası - zaman grafikleri ile göstermek için hem iniş platformunun hem de İHA'nın dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre nerede olduklarının bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.45 Hareketli iniş platformu referans çerçevesine (P_F) göre elde edilmiş İHA koordinatının dünyaya sabit ataletsel çerçeveye göre (W_F) dönüşümü

İHA'nın konum bilgilerinin sadece hareketli iniş platformu referans çerçevesine (P_F) göre elde edildiği uygulama sistem mimarisinin ikinci bölümünde daha önce açıklanmıştı. Bu nedenle ilgili İHA konum bilgileri dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre yeniden hesaplanmalıdır. Bunun içinse ilk olarak W_F orijinin nerede olduğu bilinmelidir.

Bu bağlamda dünyaya sabit ataletsel çerçevenin (W_F) orijini hareketli platformun tespit edildiği ilk anda elde edilmektedir. Yani iniş platformunun ilk tespit edildiği pozisyon W_F üzerinde x ve y eksenlerinde $(0, 0)$ noktası olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde iniş platformunun başlangıç sapma açısı da 0° olarak kabul edilmektedir. Böylece aslında iniş platformunun İHA kamerası ile ilk kez tespit edildiği anda (bir diğer ifadeyle otonom inişin başladığı anda), platformun $(0, 0)$ noktasından 0° sapma açısıyla başlayan (doğrusal ya da dairesel yörünge izleyen) hareketi otonom iniş süresince kaydedilmektedir.

Dünyaya sabit ataletsel çerçeveye göre hareketli platform konum bilgilerinin nasıl hesaplandığı (Eşitlik 3.4 ve 3.5) ve bluetooth bağlantısı üzerinden PC'de nasıl toplandığı bölüm 3.2.2'de (Hareketli İniş Platformu bölümünde) açıklanmıştı. Yani özetle hareketli iniş platformunun W_F'ye göre nerede olduğu bilinmekte ve sürekli olarak kaydedilmektedir. Bu kapsamda hareketli iniş platformu orijinine (P_F) göre elde edilmiş

İHA konum bilgileri ve W_F'ye göre elde edilmiş hareketli platform konum bilgileri kullanılarak İHA'nın dünyaya sabit ataletsel çerçeveye (W_F) göre nerede olduğu hesaplanabilir. Bunun için Eşitlik 3.9 kullanılmıştır. Böylece W_F'ye göre elde edilen İHA konum bilgileri her bir birim zaman aralığında iniş platformu konum bilgileriyle beraber güncellenmiş ve kaydedilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x_{iha_w} \\ y_{iha_w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -cos\,\psi_v & sin\,\psi_v & 0 \\ sin\,\psi_v & cos\,\psi_v & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{iha_p} \\ y_{iha_p} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Bir diğer taraftan İHA'nın dünyaya sabit ataletsel çerçevedeki *z* ekseni konum bilgisi için İHA'nın altında bulunan mesafe sensörünün (rangefinder) bilgileri doğrudan kullanılmıştır.

Sonuç olarak hem hareketli iniş platformunun hem de İHA'nın dünyaya sabit ataletsel çerçeveye göre elde edilen konum bilgileri otonom iniş çözüm önerisinin başladığı andan bittiği ana kadar kaydedilmiştir. Otonom iniş başarıyla tamamlandığında W_F'ye göre elde edilmiş bu konum bilgileri kullanılarak üç boyutlu otonom iniş, iki boyutlu otonom iniş, konum - zaman ve konum hatası - zaman grafikleri elde edilmiştir.

3.2.5 Uygulama senaryoları

Bu bölümde 4 farklı uygulama senaryosu altında geliştirilen çözümün başarımları incelenmiştir. Çizelge 3.8'de paylaşılan her bir iniş platformu yörüngesi (doğrusal veya dairesel yörünge) için rüzgârlı ve rüzgârsız ortam senaryoları üretilmiş ve Çizelge 3.11'deki senaryo planı elde edilmiştir.

Çizelge 3.11 Uygulama çalışması hareketli platforma otonom iniş senaryo planı

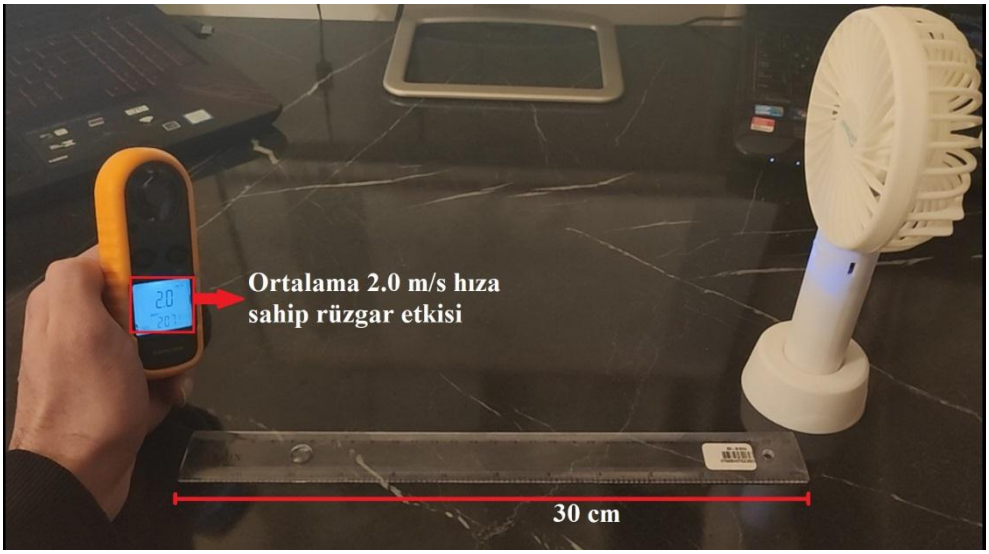
SENARYOLAR	Rüzgâr Etkileri	İniş Platformu Hareketi	İniş Platformu Hızı
Senaryo 1.a	Rüzgârsız Ortam	Doğrusal	25 *cm/s*
Senaryo 1.b	Rüzgârlı Ortam (2 *m/s*)		
Senaryo 2.a	Rüzgârsız Ortam	Dairesel	25 *cm/s*
Senaryo 2.b	Rüzgârlı Ortam (2 *m/s*)		

Bu bağlamda otonom iniş önce rüzgârsız ortamda doğrusal yörünge izleyen platform için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı yörüngeyi izleyen platform için rüzgârlı ortam oluşturulmuş ve otonom iniş bu şartlar altında yeniden test edilmiştir. Sonraki senaryolarda ise hareketli platformun yörüngesi değiştirilmiş ve otonom iniş testleri (100 *cm* yarıçaplı) dairesel yörünge izleyen platform için gerçekleştirilmiştir. Bu yörünge için de rüzgârlı ve rüzgârsız ortam senaryoları oluşturulmuş ve geliştirilen çözümün başarımı incelenmiştir.

Çizelgede 3.23'teki tüm senaryolar 10 kez tekrar edilmiş ve her bir senaryo tekrarı (testi) için ayrı ayrı başarım sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ilgili senaryonun sonunda (çizelge olarak) paylaşılmıştır.

Ayrıca İHA'nın hareketli platforma otonom inişini görsel olarak ifade etmek için kullanılan üç boyutlu otonom iniş, iki boyutlu otonom iniş, konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri ise her bir ilgili senaryonun ilk testinden (Test 1'den) elde edilmiştir.

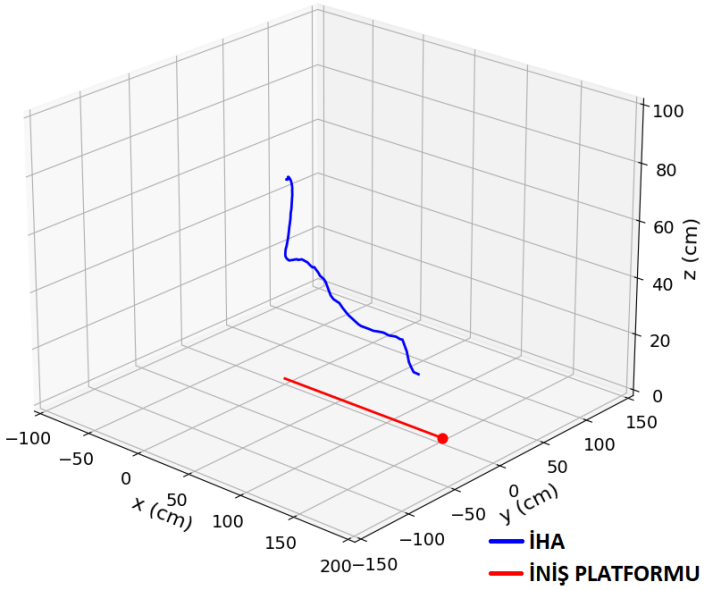
Bir diğer taraftan rüzgârlı ortam şartının sağlanabilmesi için Şekil 3.46'daki fan ile ~30cm mesafeden hareket halindeki İHA'ya otonom iniş boyunca rüzgâr uygulanmıştır.



Şekil 3.46 Rüzgâr etkisi oluşturmak için uygulamada kullanılan fan ve anemometre ile ölçülen rüzgâr hızı

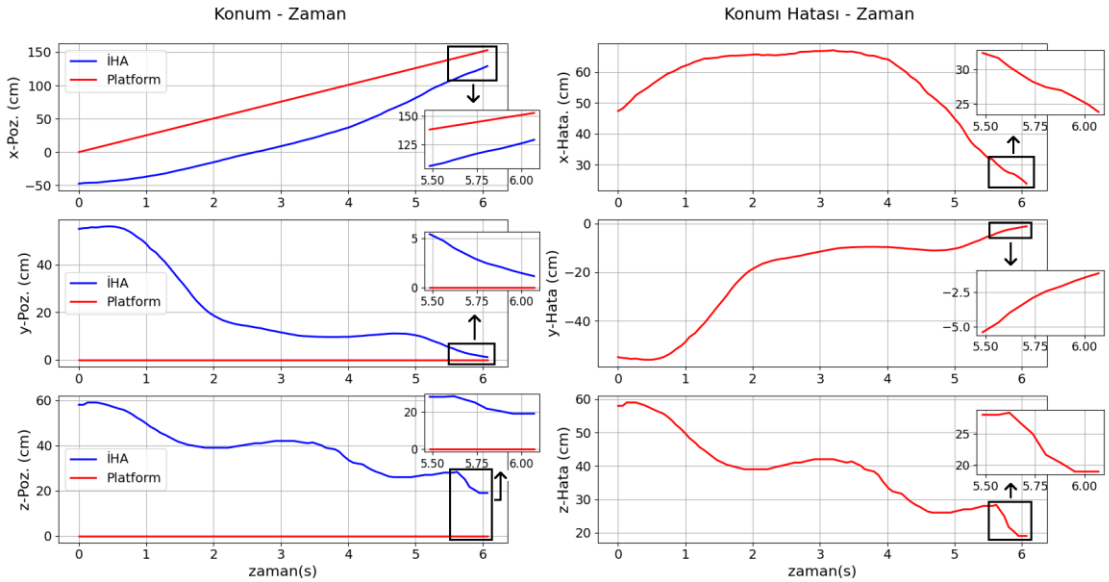
Böylece uygulamadaki İHA üzerinde; Çizelge 3.2'de paylaşılan benzetim ortamındaki rüzgar gürültüsü 2'ye benzer, ~2 m/s ortalama hıza sahip bir rüzgâr etkisi oluşturulmuştur. Rüzgar hızının İHA üzerinde oluşturduğu kuvvet, bölüm 3.1.2.a'da Eşitlik 3.1 ile açıklanmış ve benzetim ortamında kullanılmıştı. Rüzgâr hızının İHA üzerinde nasıl bir (bozucu) kuvvet oluşturduğunun daha iyi anlaşılabilmesi için ilgili bölüm (3.2.1.a) tekrar incelenebilir.

- Senaryo 1.a: rüzgârsız ortamda doğrusal yörünge izleyen platforma otonom iniş: Senaryo 1.a'da hareketli iniş platformu 25 cm/s sabit hızla doğrusal bir yörünge izlemektedir. İHA bu senaryoda rüzgârsız bir ortamda otonom inişini gerçekleştirmektedir.

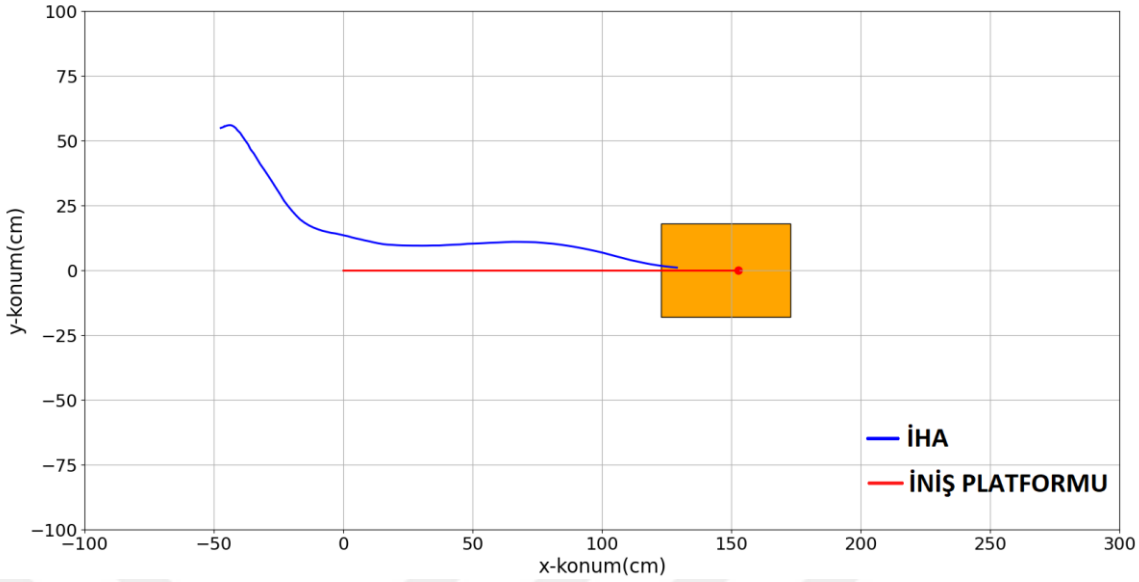


Şekil 3.47 Uygulama çalışması senaryo 1.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.2.3'te açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.47, Şekil 3.48 ve Şekil 3.49).



Şekil 3.48 Uygulama ç. senaryo 1.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri



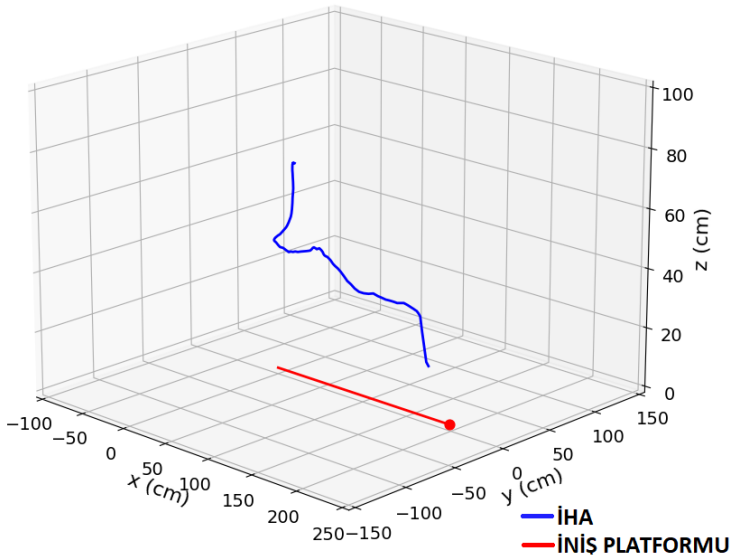
Şekil 3.49 Uygulama çalışması senaryo 1.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Bu bağlamda ilgili senaryo (senaryo 1.a) 10 kez tekrar edilmiş, Çizelge 3.12'deki otonom iniş sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.12 Uygulama çalışması senaryo 1.a test sonuçları

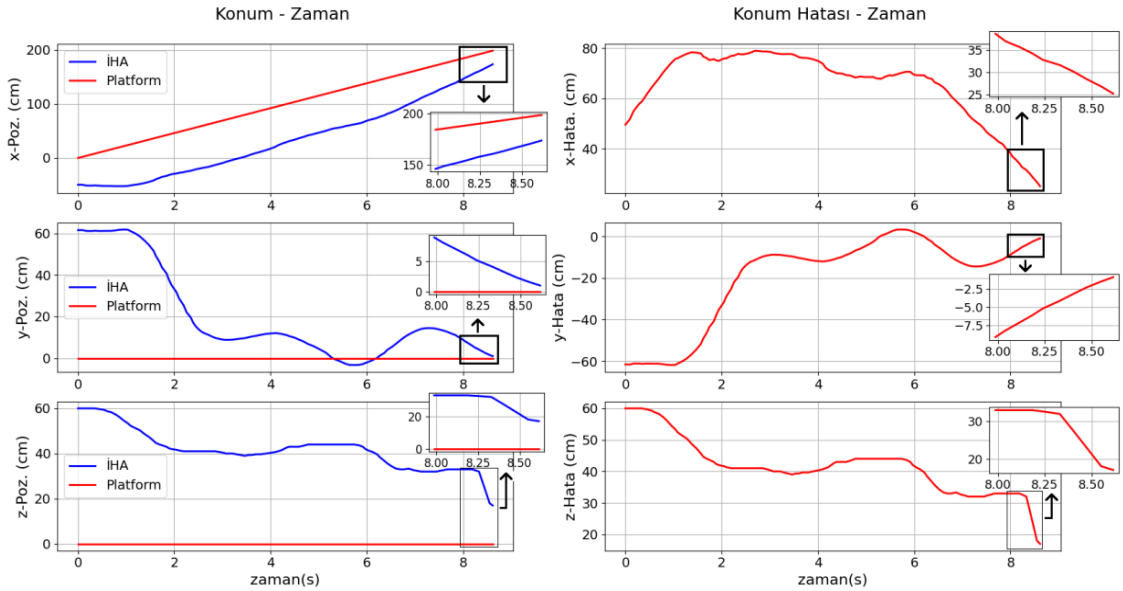
	Konum Hatası (*cm*)			**Otonom İniş Süreleri (*s*)**			
	x	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas**	**İniş**	**Toplam**
Test 1	20.792	0.929	19	1.34	2.015	2.715	6.07
Test 2	20.434	1.239	11	1.564	2.009	3.686	7.259
Test 3	20.121	1.586	11	1.52	2.01	2.609	6.139
Test 4	20.22	6.035	14	1.506	2.014	2.193	5.713
Test 5	20.46	8.736	16	1.485	2.022	2.335	5.842
Test 6	20.662	5.345	11	1.652	2.024	2.191	5.867
Test 7	20.175	3.358	17	1.838	2.03	3.465	7.333
Test 8	20.091	3.679	10	1.47	2.004	3.215	6.689
Test 9	20.075	3.157	12	1.65	2.002	2.388	6.04
Test 10	20.592	2.259	11	1.503	2.028	3.034	6.565

- Senaryo 1.b: rüzgârlı ortamda doğrusal yörünge izleyen platforma otonom iniş: Senaryo 1.b'de ise hareketli iniş platformu 25 cm/s sabit hızla doğrusal bir yörünge izlerken İHA'ya Şekil 3.46'da açıklanan rüzgâr etkisi uygulanmıştır.

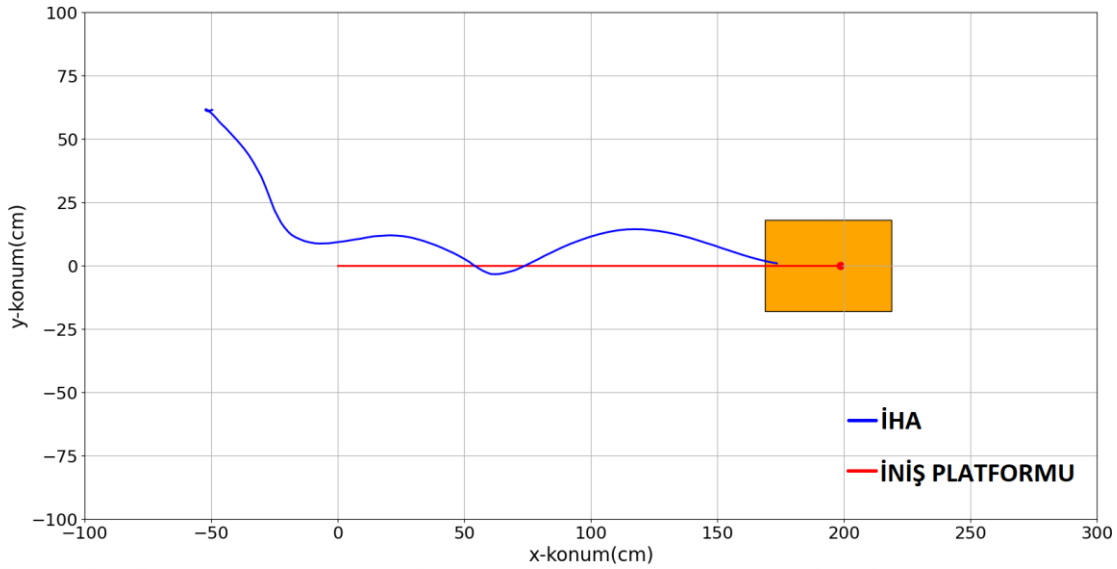


Şekil 3.50 Uygulama çalışması senaryo 1.b Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.2.3'te açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.50, Şekil 3.51 ve Şekil 3.52).



Şekil 3.51 Uygulama ç. senaryo 1.b Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri



Şekil 3.52 Uygulama çalışması senaryo 1.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

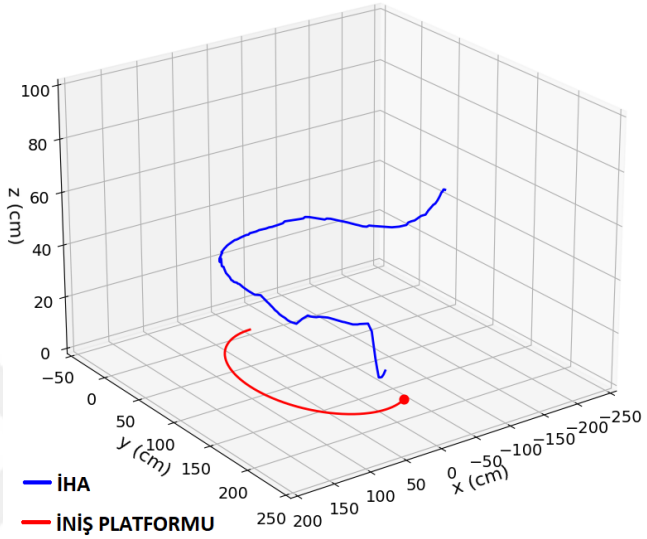
İlgili senaryo (senaryo 1.b) 10 kez tekrar edilmiş ve Çizelge 3.13'teki otonom iniş test sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.13 Uygulama çalışması senaryo 1.b test sonuçları

	Konum Hatası (*cm*)			**Otonom İniş Süreleri (*s*)**			
	x	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas**	**İniş**	**Toplam**
Test 1	20.864	0.48	16	3.375	2.032	3.208	8.615
Test 2	20.742	1.527	10	1.773	2.005	3.817	7.595
Test 3	20.217	0.624	12	2.165	2.04	4.674	8.879
Test 4	20.026	-9.287	10	1.31	2.12	7.757	11.187
Test 5	20.027	-1.17	10	3.308	2.02	5.07	10.398
Test 6	21.187	-3.231	12	0.905	2.133	4.494	7.532
Test 7	20.041	0.069	10	1.787	2.002	4.577	8.366
Test 8	20.637	-0.35	21	1.339	2	6.721	10.06
Test 9	20.53	1.763	11	2.328	2.007	3.531	7.866
Test 10	20.774	-4.143	12	1.668	2.016	3.382	7.066

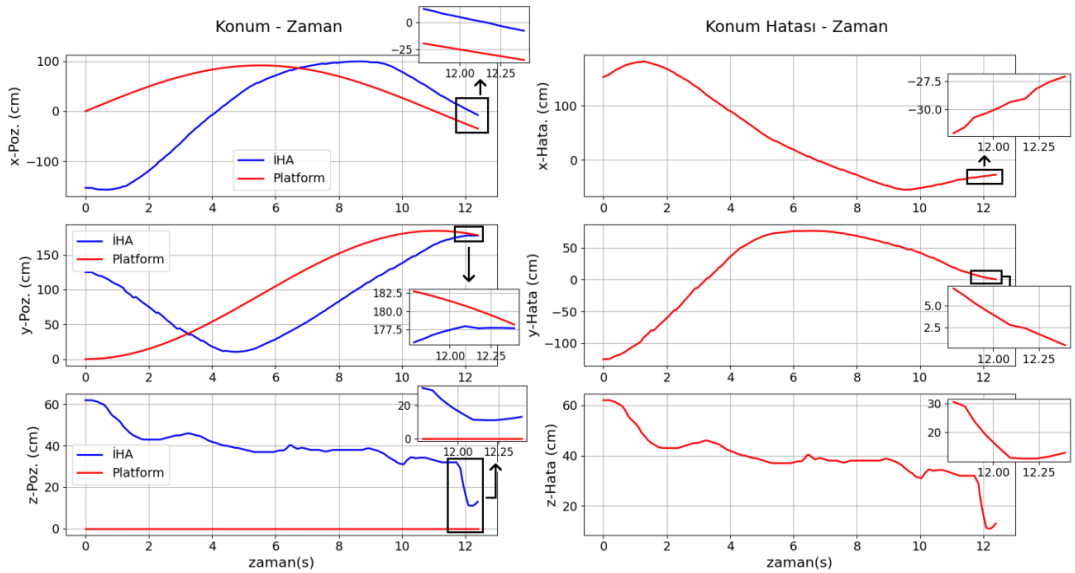
Senaryo 1.a ve 1.b test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

- Senaryo 2.a: rüzgârsız ortamda dairesel yörünge izleyen platforma otonom iniş: Senaryo 2.a'da ise hareketli iniş platformu 25 cm/s sabit hızla doğrusal bir yörünge izlemektedir. İHA bu senaryoda rüzgârsız bir ortamda otonom inişini gerçekleştirmektedir.

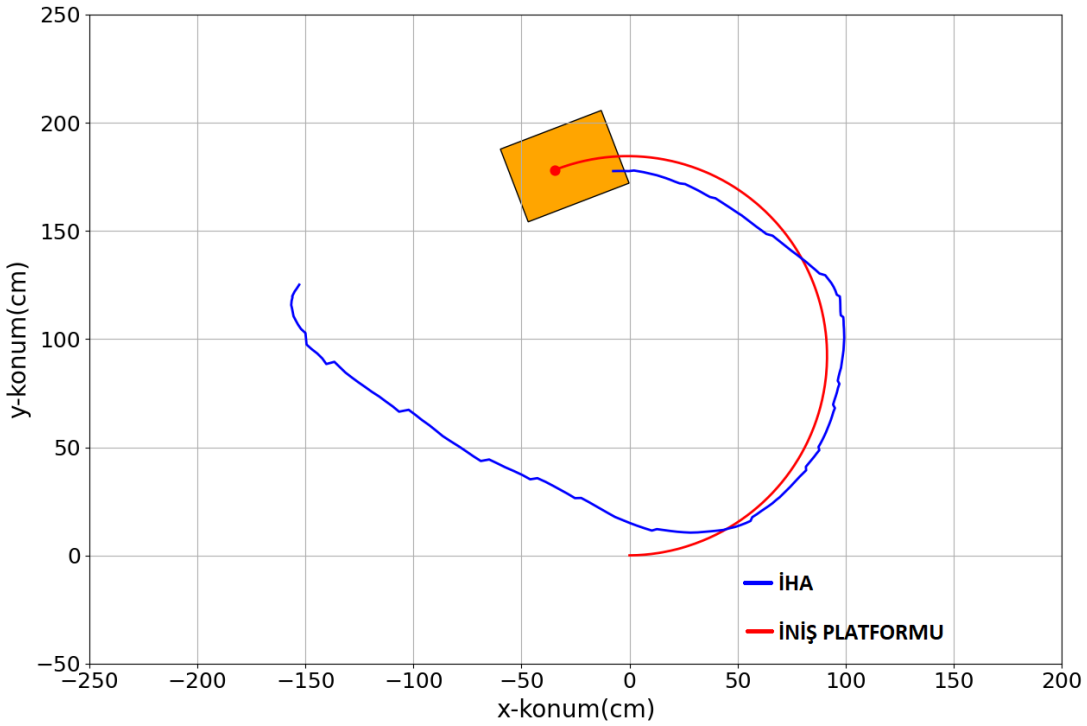


Şekil 3.53 Uygulama çalışması senaryo 2.a Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.2.3'te açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş bu senaryoda da başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.53, Şekil 3.54 ve Şekil 3.55).



Şekil 3.54 Uygulama ç. senaryo 2.a Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri



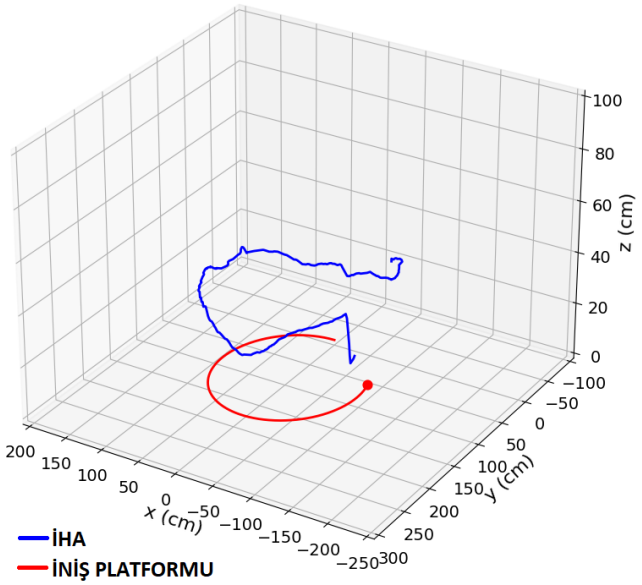
Şekil 3.55 Uygulama çalışması senaryo 2.a Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Bu bağlamda Senaryo 2.a 10 kez tekrar edilmiş ve Çizelge 3.14'teki otonom iniş sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.14 Uygulama çalışması senaryo 2.a test sonuçları

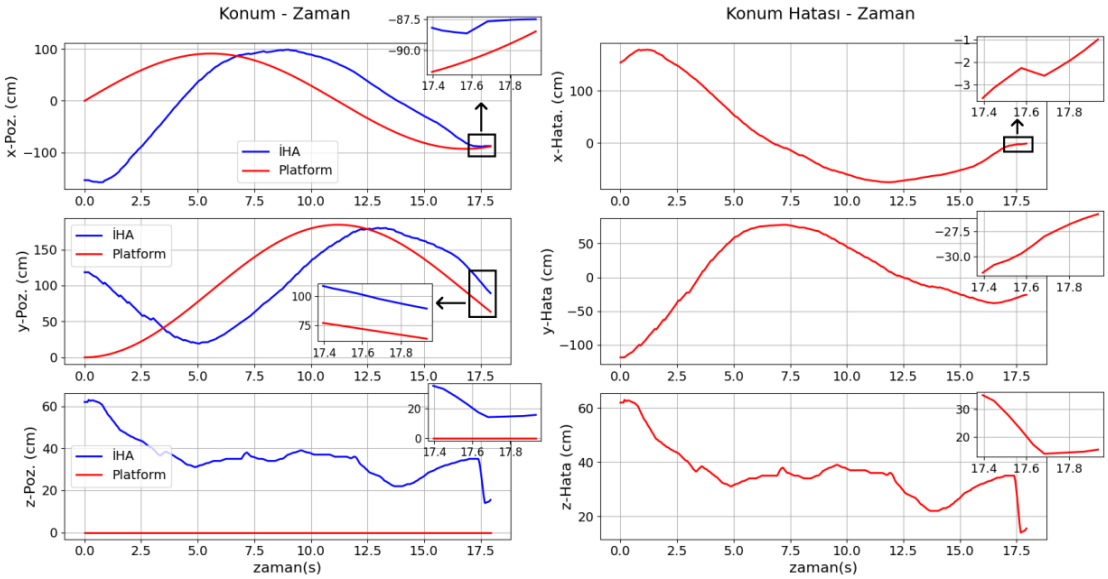
	Konum Hatası (*cm*)			**Otonom İniş Süreleri (*s*)**			
	x	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas**	**İniş**	**Toplam**
Test 1	20.403	8.481	16	6.233	2.498	3.661	12.392
Test 2	20.281	4.856	16	5.7	1.816	2.953	10.469
Test 3	20.194	3.641	17	6.124	8.581	3.835	18.54
Test 4	20.536	8.994	13	6.56	1.802	3.993	12.355
Test 5	20.136	5.422	17	9.383	1.828	6.692	17.903
Test 6	20.628	2.132	10	10.537	3.873	2.872	17.282
Test 7	20.025	5	10	6.626	3.539	3.764	13.929
Test 8	20.085	2.331	19	6.056	4.215	3.644	13.915
Test 9	20.415	5.031	10	9.324	1.864	3.977	15.165
Test 10	20.329	4.712	10	12.226	1.818	3.994	18.038

- Senaryo 2.b: rüzgârlı ortamda dairesel yörünge izleyen platforma otonom iniş: Senaryo 2.b'de ise hareketli iniş platformu 25 cm/s sabit hızla dairesel bir yörünge izlerken İHA'ya Şekil 3.46'da açıklanan rüzgâr etkisi (gürültüsü) uygulanmıştır.

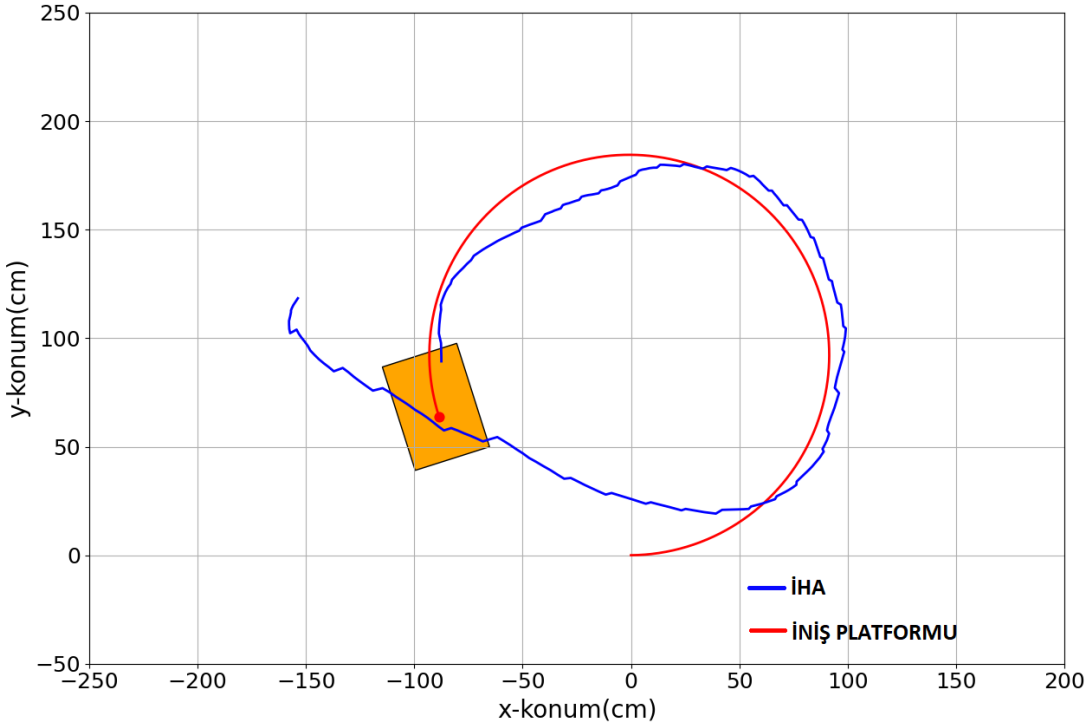


Şekil 3.56 Uygulama çalışması senaryo 2.b Test 1: üç boyutlu otonom iniş grafiği

Bölüm 3.2.3'te açıklanan sistem mimarisinin uygulanmasıyla otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır (Şekil 3.56, Şekil 3.57 ve Şekil 3.58).



Şekil 3.57 Uygulama ç. senaryo 2.b Test 1: konum – zaman ve konum hatası – zaman grafikleri



Şekil 3.58 Uygulama çalışması senaryo 2.b Test 1: iki boyutlu otonom iniş grafiği (tepeden görünüş)

Senaryo 2.b 10 kez tekrar edilmiş ve Çizelge 3.15'teki otonom iniş sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.15 Uygulama çalışması senaryo 2.b test sonuçları

	Konum Hatası (*cm*)			**Otonom İniş Süreleri (*s*)**			
	x	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas**	**İniş**	**Toplam**
Test 1	20.233	7.518	17	5.72	5.605	6.609	17.934
Test 2	20.006	7.549	16	11.347	4.823	5.284	21.454
Test 3	20.162	4.685	12	13.859	3.048	5.204	22.111
Test 4	15.139	10.035	28	6.731	2.809	11.797	21.337
Test 5	20.086	7.022	25	6.443	2.815	11.128	20.386
Test 6	13.403	10.09	21	5.815	2.809	8.825	17.449
Test 7	4.444	0.911	30	11.612	5.278	7.05	23.94
Test 8	20.379	5.959	19	10.627	5.858	3.48	19.965
Test 9	20.248	5.053	13	6.436	7.577	10.715	24.728
Test 10	20.284	9.253	26	4.376	2.218	8.485	15.079

Senaryo 2.a ve 2.b test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri Tartışma ve Sonuç bölümünde (bölüm 4'te) paylaşılmış, geliştirilen sistemin başarımı değerlendirilmiştir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Dört rotorlu İHA'lar, gelişen teknolojinin doğal bir sonucu olarak çeşitli uygulama alanlarında her geçen gün daha aktif bir rol oynamaktadırlar. Özellikle otonomi potansiyelleri ve düşük maliyetli olmaları bu hava araçlarını birçok problemin çözümünde daha da önemli hale getirmiştir. Bu bağlamda bu tip hava araçlarının otonom olarak sürdürebileceği görevlerin kapsamının genişletilmesine odaklanılmış ve bu tez kapsamında, dikey iniş ve kalkış yapabilen bir insansız hava aracının hareketli platformlara otonom inişi için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir.

Tez kapsamında önce matlab/simulink ortamında (benzetim çalışmasında) Çizelge 3.3'te paylaşılan hareketli platforma otonom iniş senaryo planına göre İHA'nın otonom iniş testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece çeşitli platform hızı (25 *cm/s* ya da 50 *cm/s*) ve yörüngeleri (doğrusal ya da dairesel) altında geliştirilen sistemin rüzgâr etkilerine karşı dayanımı ve gösterdiği performans 12 farklı senaryo ile sistematik bir şekilde ortaya konulmuştur.

Daha sonra ise bu kez gerçek bir İHA (DJI Ryze Tello) ve hareketli iniş platformu kullanılmıştır. Bu kapsamda Çizelge 3.11'de paylaşılan uygulama bölümündeki hareketli platforma otonom iniş senaryo planına göre İHA'nın otonom iniş testleri gerçekleştirilmiştir. Böylece uygulama çalışmasında 25 *cm/s* sabit hızla doğrusal ya da dairesel yörünge izleyen platform seçenekleri için rüzgârlı ve rüzgârsız çevre şartları oluşturulmuş, geliştirilen sistemin gösterdiği performans 4 farklı senaryo ile ortaya konulmuştur. (doğrusal yörünge ve rüzgârsız ortam, doğrusal yörünge ve rüzgârlı ortam, dairesel yörünge ve rüzgârsız ortam, dairesel yörünge ve rüzgârlı ortam)

Bu kapsamda önce benzetim çalışması bölümünde elde edilen araştırma bulguları (test sonuçları), daha sonra ise uygulama bölümünde elde edilen araştırma bulguları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Son olarak ise benzetim çalışması ve uygulama bölümlerinde elde edilen bu bulgular (sonuçlar) birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

4.1 Benzetim Çalışmasında Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi

4.1.1 Benzetim çalışmasındaki senaryo 1.a, senaryo 1.b ve senaryo 1.c test sonuçlarının değerlendirilmesi

Senaryo 1.a, 1.b ve 1.c'de iniş platformunun 25 *cm/s* sabit hızla doğrusal bir yörünge izlediği daha önce açıklanmıştı (Bölüm 3.1.3.1). Bu kapsamda İHA; önce $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâr gürültüsü 1'e (senaryo 1.a), daha sonra *x* ve *y* eksenlerinde $-2\,m/s$, *z* ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâr gürültüsü 2'ye (senaryo 1.b), son olarak ise *x* ve *y* eksenlerinde $-3\,m/s$, *z* ekseninde $0\,m/s$ ortalama hıza sahip rüzgâr gürültüsü 3'e (senaryo 1.c) maruz bırakılmıştı. Oluşturulan her bir senaryonun Monte Carlo metodu ile 100 kez tekrarı gerçekleştirilmişti. Bu bölümde; Senaryo 1.a, 1.b ve 1.c'deki Monte Carlo testleri sonucunda elde edilen ortalama ve standart sapma verileri kullanılmış, geliştirilen çözümün başarımı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.1 Benzetim çalışması senaryo 1.a, senaryo 1.b ve senaryo 1.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (cm)			**Otonom İniş Süreleri (s)**			
		x	***y***	***Z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 1.a	**Ortalama (μ)**	0.6785	0.553015	0.007367	2.3931	2	3.1302	7.5201
	Std. Sapma (σ)	0.0611	0.059997	0.004071	0.0049	0	0.0014	0.00174
Senaryo 1.b	**Ortalama (μ)**	5.4735	5.3525	0.00641	2.6122	2	3.1313	7.7435
	Std. Sapma (σ)	0.2555	0.24249	0.0052	0.0143	0	0.0033	0.01438
Senaryo 1.c	**Ortalama (μ)**	11.430	11.34274	0.012145	2.9553	2	3.1382	8.0932
	Std. Sapma (σ)	0.3344	0.350888	0.00501	0.0322	0	0.0038	0.03329

Çizelge 4.1 incelendiğinde Senaryo 1.a'daki otonom inişin *x* ekseninde 0. 67852 *cm*, *y* ekseninde 0.553015 *cm* ve *z* ekseninde 0.007367 *cm* ortalama konum hatalarıyla tamamlandığı görülmektedir. Çünkü bu senaryoda İHA'ya etki eden rüzgâr etkilerinin ortalama hızı 0 *m/s*'dir. Bu nedenle geliştirilen çözüm önerisinin bu senaryoda çok yüksek bir başarım gösterdiği ve İHA'nın iniş platformunun neredeyse tam merkezine

(bir diğer ifadeyle bölüm 3.1.1 Şekil 3.5'te gösterilen T_2 hedef koordinatına neredeyse sıfır hata ile) ulaşabildiği görülmektedir.

Senaryo 1.b incelendiğinde ise otonom inişin *x* ekseninde 5.47352 *cm*, *y* ekseninde 5.3525 *cm* ve *z* ekseninde 0.00641 *cm* ortalama konum hatalarıyla tamamlandığı görülmektedir (Çizelge 4.1). İHA, önceki senaryoya kıyasla daha zor bir ortam şartına maruz bırakıldığı için otonom iniş daha büyük pozisyon hatalarıyla tamamlanmıştır. Görece daha büyük pozisyon hataları oluşsa bile benzetim çalışması sistem mimarisi bölüm 3.1.1.e'de açıklanan iniş aşaması şartları sağlandığı için İHA 20 *cm* yarıçaplı iniş platformu içerisinde kalmış ve otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır.

Senaryo 1.c'de ise önerilen çözümün limitlerine ulaşıldığı görülmektedir. Çizelge 4.1'e göre bu senaryodaki otonom iniş *x* ekseninde 11.4301 *cm*, *y* ekseninde 11.34274 *cm* ve *z* ekseninde 0.012145 *cm* ortalama konum hatalarıyla tamamlanmıştır. Bu senaryoda önceki iki senaryoya (Senaryo 1.a ve Senaryo 1.b) kıyasla rüzgâr etkilerinden kaynaklı olarak çok daha büyük konum hataları oluşsa da, İHA'nın 20 cm yarıçaplı iniş platformu içerisinde kalması sağlanmıştır ve otonom iniş başarıyla tamamlanmıştır.

Ayrıca bozucu rüzgâr etkisinin şiddeti arttıkça otonom iniş süresinin uzaması elde edilen bir başka bulgudur. Otonom iniş; Senaryo 1.a'da ortalama 7.5201 *s* ile tamamlanırken, Senaryo 1.b'ye geçildiğinde bu süre 7.7435 *s*'ye çıkmıştır. Senaryo 1.c'ye geçildiğinde ise otonom inişin ortalama 8.0932 *s* ile tamamlanabildiği görülmüştür.

Yani özetle (Senaryo 1.a'dan Senaryo 1.c'ye doğru) bozucu rüzgâr etkisinin şiddeti arttıkça hem otonom inişin tamamlandığı andaki pozisyon hatası artmış hem de otonom inişin tamamlanma süresi uzamıştır.

4.1.2 Benzetim çalışmasındaki senaryo 2.a, senaryo 2.b ve senaryo 2.c test sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu senaryolarda ise platformun izlediği yörünge (doğrusal) değiştirilmeden hızı 50 *cm/s*'ye çıkarılmış ve rüzgâr etkisinin düşük olduğu senaryodan (Senaryo 2.a) yüksek olduğu senaryoya (Senaryo 2.c) doğru testler gerçekleştirilmişti. Bu kapsamda Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma değerleri Çizelge 4.2'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.2 Benzetim çalışması senaryo 2.a, senaryo 2.b ve senaryo 2.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (cm)			**Otonom İniş Süreleri (s)**			
		X	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 2.a	**Ortalama**	0.66	0.563637	0.006638	3.2861	2	3.13	8.4161
	Std. Sapma	0.050044	0.052387	0.003584	0.0049	0	0	0.0049
Senaryo 2.b	**Ortalama**	5.450802	5.378172	0.006996	3.5296	2	3.131	8.6606
	Std. Sapma	0.267821	0.265175	0.005156	0.01734	0	0.003015	0.01734
Senaryo 2.c	**Ortalama**	11.4131	11.3565	0.01224	3.8964	2	3.138	9.0324
	Std. Sapma	0.34521	0.35036	0.00565	0.03	0	0.00402	0.03079

Çizelge 4.2 incelendiğinde burada da bir önceki bölüme (bölüm 4.1.1) benzer şekilde (Senaryo 2.a'dan Senaryo 2.c'ye doğru) bozucu rüzgâr etkisinin şiddeti arttıkça otonom iniş konum hatalarının (*x*, *y* eksenlerinde) arttığı tespit edilmiştir. Bu durum otonom iniş süresi için de geçerlidir. Otonom iniş; Senaryo 2.a'da ortalama 8.4161 *s* ile tamamlanırken, Senaryo 2.b'ye geçildiğinde bu süre 8.6606 *s*'ye çıkmıştır. Senaryo 2.c'ye geçildiğinde ise otonom inişin ortalama 9.0324 *s* ile tamamlanabildiği görülmüştür.

Bir diğer taraftan rüzgâr etkileri ve iniş platformunun yörüngesi değiştirilmeden sadece platform hızının 2 katına çıkarılması bu bölümde test sonuçlarına da yansımıştır. Bu kapsamda aynı rüzgâr etkilerine sahip Senaryo 1.a ile 2.a, Senaryo 1.b ile 2.b, Senaryo 1.c ile 2.c karşılaştırılmıştır. Bu bölümdeki otonom iniş senaryolarının

karşılaştırıldıkları senaryolara kıyasla daha uzun sürede tamamlanabildiği görülmüştür. (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 kıyaslanmıştır.)

4.1.3 Benzetim çalışmasındaki senaryo 3.a, senaryo 3.b ve senaryo 3.c test sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümdeki senaryolarda ise daha önce de açıklandığı üzere iniş platformu 25 *cm/s* sabit hızla dairesel bir yörünge izlemiş, rüzgâr etkilerinin düşük olduğu senaryodan (Senaryo 3.a) yüksek olduğu senaryoya (Senaryo 3.c) doğru testler gerçekleştirilmişti (Bölüm 3.1.3.3). Bu kapsamda Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Çizelge 4.3'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.3 Benzetim çalışması senaryo 3.a, senaryo 3.b ve senaryo 3.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (cm)			**Otonom İniş Süreleri (s)**			
		X	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 3.a	**Ortalama**	0.76376	0.81338	0.00713	3.1293	2	3.13	8.2593
	Std. Sapma	0.06264	0.0615	0.00447	0.00256	0	0	0.00256
Senaryo 3.b	**Ortalama**	5.5697	5.65309	0.00768	3.3324	2	3.1315	8.4639
	Std. Sapma	0.26329	0.26159	0.00543	0.01319	0	0.00359	0.01413
Senaryo 3.c	**Ortalama**	11.51784	11.6467	0.012449	3.6492	2	3.1382	8.7855
	Std. Sapma	0.378086	0.36896	0.005431	0.0242	0	0.00386	0.02455

Çizelge 4.3 incelendiğinde burada da yine önceki bölümlere (bölüm 4.1.1 ve bölüm 4.1.2'ye) benzer şekilde (Senaryo 3.a'dan Senaryo 3.c'ye doğru) bozucu rüzgâr etkisinin şiddeti arttıkça hem ortalama konum hatasının arttığı hem de ortalama otonom iniş tamamlanma süresinin uzadığı görülmüştür.

Bir diğer taraftan bu bölümdeki senaryolar (iniş platformunun 25 *cm/s* hızla dairesel yörünge izlediği senaryolar) ile bölüm 4.1.1'deki senaryolar (iniş platformunun 25 *cm/s* hızla doğrusal yörünge izlediği senaryolar) karşılaştırılmıştır. Bir diğer ifadeyle Senaryo 3.a ile 1.a, Senaryo 3.b ile 1.b, Senaryo 3.c ile 1.c kıyaslanmıştır. Yani rüzgâr etkileri ve

iniş platformu hızı değiştirilmeden sadece platform yörüngesinin değiştirilmesinin ne gibi sonuçlar ürettiği incelenmiştir. Bu kapsamda platformun dairesel yörünge izlediği otonom iniş senaryolarının doğrusal yörünge izlediği senaryolara kıyasla daha uzun sürede tamamlanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca bu yörünge değişiminin konum hataları üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı da elde edilen bir başka bulgudur. (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3 kıyaslanmıştır.)

4.1.4 Benzetim çalışmasındaki senaryo 4.a, senaryo 4.b ve senaryo 4.c test sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu senaryolarda ise platformun izlediği yörünge (dairesel) değiştirilmeden hızı 50 *cm/s*'ye çıkarılmış ve rüzgâr etkisinin düşük olduğu senaryodan (Senaryo 4.a) yüksek olduğu senaryoya (Senaryo 4.c) doğru testler gerçekleştirilmişti. Bu kapsamda Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri Çizelge 4.4'te paylaşılmıştır.

Çizelge 4.4 Benzetim çalışması senaryo 4.a, senaryo 4.b ve senaryo 4.c Monte Carlo testlerinin ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (cm)			**Otonom İniş Süreleri (s)**			
		X	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 4.a	**Ortalama**	-1.16564	-0.41828	0.012264	3.7816	2	3.1295	8.9111
	Std. Sapma	0.055492	0.056134	0.004035	0.00443	0	0.00219	0.0049
Senaryo 4.b	**Ortalama**	3.72368	4.15795	0.01064	4.0026	2	3.1297	9.1323
	Std. Sapma	0.22025	0.21777	0.00368	0.01307	0	0.00171	0.01362
Senaryo 4.c	**Ortalama**	10.0207	9.969288	0.008441	4.3293	2	3.1329	9.4601
	Std. Sapma	0.336656	0.328881	0.006605	0.0248	0	0.00456	0.02611

Çizelge 4.4 incelendiğinde burada da önceki tüm bölümlere benzer şekilde (Senaryo 4.a'dan Senaryo 4.c'ye doğru) bozucu rüzgâr etkisinin şiddeti arttıkça otonom iniş konum hatasının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum otonom iniş süresi için de geçerlidir. Otonom iniş; Senaryo 4.a'da ortalama 8.9111 *s* ile tamamlanırken, Senaryo 4.b'ye geçildiğinde bu süre 9.1323 *s*'ye çıkmıştır. Senaryo 4.c'ye geçildiğinde ise otonom inişin ortalama 9.4601 *s* ile tamamlanabildiği görülmüştür.

Bir diğer taraftan rüzgâr etkileri ve iniş platformunun yörüngesi değiştirilmeden sadece platform hızının 2 katına çıkarılması bu bölümde test sonuçlarına da yansımıştır. Bu kapsamda aynı rüzgâr etkilerine sahip Senaryo 3.a ile 4.a, Senaryo 3.b ile 4.b, Senaryo 3.c ile 4.c karşılaştırılmıştır. Bu bölümdeki otonom iniş senaryolarının karşılaştırıldıkları senaryolara kıyasla daha uzun sürede tamamlanabildiği görülmüştür. (Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 kıyaslanmıştır.)

4.2 Uygulamada Elde Edilen Bulguların Değerlendirilmesi

4.2.1 Uygulama bölümündeki senaryo 1.a ve senaryo 1.b test sonuçlarının değerlendirilmesi

Uygulama bölümü Senaryo 1.a ve 1.b'de iniş platformunun 25 *cm/s* sabit hızla doğrusal bir yörünge izlediği daha önce açıklanmıştı (Bölüm 3.2.5). İHA; önce rüzgârsız bir ortamda (Senaryo 1.a), daha sonra ise $\sim 2\ m/s$ ortalamalı rüzgâr etkilerinin olduğu bir ortamda otonom inişini gerçekleştirmişti. Bu kapsamda senaryoların 10 kez tekrarıyla elde edilen test sonuçları (Uygulama Senaryoları bölümünde Çizelge 3.12 ve Çizelge 3.13) kullanılarak Çizelge 4.5'teki ortalama ve standart sapma verilerine ulaşılmıştır.

Çizelge 4.5 Uygulama çalışması senaryo 1.a ve senaryo 1.b'de elde edilen test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (*cm*)			**Otonom İniş Süreleri (*s*)**			
		X	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 1.a	**Ortalama (μ)**	20.3622	3.6323	13.2	1.5528	2.0158	2.7831	6.3517
	Std. Sapma (σ)	0.260685	2.453261	3.119829	0.13467	0.00983	0.53958	0.58403
Senaryo 1.b	**Ortalama (μ)**	20.5045	-1.3718	12.4	1.9958	2.0375	4.7231	8.7564
	Std. Sapma (σ)	0.4078053	3.37622	3.53396	0.82025	0.04874	1.48058	1.37387

Çizelge 4.5 incelendiğinde Senaryo 1.a'daki otonom inişin *x* ekseninde 20.3622 *cm*, *y* ekseninde 3.6323 *cm* ve *z* ekseninde 13.2 *cm* ortalama konum hatalarıyla, Senaryo 1.b'deki otonom inişin ise *x* ekseninde 20.5045 *cm*, *y* ekseninde -1.3718 *cm* ve *z* ekseninde 3.119829 *cm* ortalama konum hatalarıyla tamamlandığı görülmektedir.

Bir diğer taraftan rüzgâr etkisinin ortama dahil edilmesiyle birlikte otonom inişin tamamlanma süresinin de uzadığı tespit edilmiştir. Otonom iniş; Senaryo 1.a'da ortalama 6.3517 *s* ile tamamlanırken, Senaryo 1.b'ye geçildiğinde bu süre 8.7564 *s*'ye çıkmıştır. Yani özetle rüzgâr etkisinin dahil edilmesiyle birlikte otonom inişin tamamlandığı andaki konum hatalarında çok büyük değişiklikler olamasa da otonom inişin tamamlanma süresi uzamıştır. Ayrıca rüzgar etkilerinin dahil olmasıyla birlikte (Senaryo 1.b) konum hatası ve iniş süresi standart sapmalarının da arttığı görülmüştür.

4.2.2 Uygulama bölümündeki senaryo 2.a ve senaryo 2.b test sonuçlarının değerlendirilmesi

Uygulama bölümü Senaryo 2.a ve 2.b'de iniş platformunun 25 *cm/s* sabit hızla doğrusal bir yörünge izlediği daha önce açıklanmıştı (Bölüm 3.2.5). Bu kapsamda İHA önce rüzgârsız bir ortamda (Senaryo 2.a), daha sonra ise $\sim 2\ m/s$ ortalamalı rüzgâr etkilerinin olduğu bir ortamda otonom inişini gerçekleştirmişti. Bu kapsamda senaryoların 10 kez tekrarıyla elde edilen test sonuçları (Uygulama Senaryoları bölümünde Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15) kullanılarak Çizelge 4.6'daki ortalama ve standart sapma verilerine ulaşılmıştır.

Çizelge 4.6 Uygulama çalışması senaryo 2.a ve senaryo 2.b'de elde edilen test sonuçlarının ortalama ve standart sapma verileri

		Konum Hatası (cm)			**Otonom İniş Süreleri (s)**			
		X	***y***	***z***	**Takip**	**Hassas Takip**	**İniş**	**Toplam**
Senaryo 2.a	**Ortalama**	20.3032	5.06	13.8	7.8769	3.1834	3.9385	14.9988
	Std. Sapma	0.196694	2.248752	3.583915	2.2969	2.12107	1.04896	2.8299
Senaryo 2.b	**Ortalama**	17.4384	6.8075	20.7	8.2966	4.284	7.8577	20.4383
	Std. Sapma	5.20570933	2.81552	6.32543	3.235	1.7842	2.80373	2.97129

Çizelge 4.6 incelendiğinde Senaryo 2.a'daki otonom inişin *x* ekseninde 20.3032 *cm*, *y* ekseninde 5.06 *cm* ve *z* ekseninde 13.8 *cm* ortalama konum hatalarıyla, Senaryo 2.b'deki otonom inişin ise *x* ekseninde 17.4384 cm, *y* ekseninde 6.8075 *cm* ve *z* ekseninde 20.7 *cm* ortalama konum hatalarıyla tamamlandığı görülmektedir.

Bir diğer taraftan rüzgâr etkisinin ortama dahil edilmesiyle birlikte otonom inişin tamamlanma süresinin de uzadığı tespit edilmiştir. Otonom iniş; Senaryo 2.a'da ortalama 14.9988 *s* ile tamamlanırken, Senaryo 2.b'ye geçildiğinde bu süre 20.4383 *s*'ye çıkmıştır.

Ayrıca rüzgar etkilerinin dahil olmasıyla birlikte (Senaryo 2.b) konum hatası ve otonom iniş süresi standart sapmalarının da arttığı görülmüştür. Yani bir diğer ifadeyle uygulama çalışmasındaki bozucu rüzgar etkisinin dahil edilmesiyle birlikte test sonuçlarının ortalaması etrafındaki saçılımların arttığını görülmüştür.

4.3 Benzetim Çalışması ve Uygulamada Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması

Bu bölümde ise ilk olarak iniş platformunun 25 *cm/s* sabit hızla doğrusal yörünge izlediği benzetim çalışması ve uygulama senaryoları karşılaştırılmıştır. Önce benzetim çalışmasındaki 0 *m/s* ortalama rüzgâr hızına sahip Senaryo 1.a ile uygulama çalışmasındaki rüzgârsız ortam şartlarının oluşturulduğu Senayo 1.a kıyaslanmıştır. Daha sonra ise benzetim çalışmasındaki *x* ve *y* eksenlerinde 2 *m/s* ortalama rüzgâr hızına sahip Senaryo 1.b ile uygulama çalışmasındaki ~2 m/s ortalama hıza sahip rüzgârlı ortam şartlarının oluşturulduğu Senaryo 1.b kıyaslanmıştır.

Bu kapsamda benzetim çalışması senaryo 1.a Monte Carlo test sonuçları ve Çizelge 3.12'deki *x* ve *y* eksenleri konum hatası test sonuçları kullanılarak Çizelge 4.7'deki *xy* düzlemi mutlak konum hatası $|\boldsymbol{e_{xy}}|$ (ortalama ve standart sapma) verileri elde edilmiştir. Benzer şekilde benzetim çalışması senaryo 1.b Monte Carlo test sonuçları ve Çizelge 3.13'teki *x* ve *y* eksenleri konum hatası test sonuçları kullanılarak Çizelge 4.8'deki *xy* düzlemi mutlak konum hatası $|\boldsymbol{e_{xy}}|$ (ortalama ve standart sapma) verileri elde edilmiştir. Böylece uygulama çalışmasındaki İHA ile benzetim çalışmasındaki İHA'nın otonom inişini hedef T_2 noktasından (iniş aşaması hedef koordinatından) ne kadar uzakta tamamladığı ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.7 Benzetim çalışması senaryo 1.a ile uygulama çalışması senaryo 1.a'da elde edilen *xy* düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri

		Mutlak Konum Hatası - *xy* (*cm*) $\lvert e_{xy} \rvert = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$
Benzetim Ç. Senaryo 1.a	**Ortalama (μ)**	0.87752
	Std. Sapma (σ)	0.05882
Uygulama Ç. Senaryo 1.a	**Ortalama (μ)**	20.80731
	Std. Sapma (σ)	0.620348

Çizelge 4.8 Benzetim çalışması senaryo 1.b ile uygulama çalışması senaryo 1.b'de elde edilen *xy* düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri

		Mutlak Konum Hatası - *xy* (*cm*) $\lvert e_{xy} \rvert = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$
Benzetim Ç. Senaryo 1.b	**Ortalama (μ)**	7.66015
	Std. Sapma (σ)	0.23265
Uygulama Ç. Senaryo 1.b	**Ortalama (μ)**	20.793
	Std. Sapma (σ)	0.6402

Hem Çizelge 4.7 hem de Çizelge 4.8 incelendiğinde uygulamada gerçekleştirilen otonom iniş çalışmalarının çok daha yüksek konum hatalarıyla tamamlandığı görülmüştür. Benzetim çalışması senaryo 1.a'daki İHA, otonom inişini T_2 hedef koordinatından ortalama 0.87752 *cm* uzakta tamamlarken; uygulama çalışması senaryo 1.a'daki İHA, otonom inişini T_2 hedef koordinatından ortalama 20.80731 *cm* uzakta tamamlamıştır. Benzer şekilde benzetim çalışması senaryo 1.b'deki İHA, otonom inişini T_2 hedef koordinatından ortalama 7.66015 *cm* uzakta tamamlarken; uygulama çalışması senaryo 1.b'deki İHA, otonom inişini T_2 hedef koordinatından ortalama 20.793 *cm* uzakta tamamlamıştır.

İniş platformunun 25 *cm/s* sabit hızla dairesel yörünge izlediği benzetim çalışması ve uygulama çalışması senaryoları karşılaştırıldığında ise; önce benzetim çalışmasındaki 0 *m/s* ortalama rüzgâr hızına sahip Senaryo 3.a ile uygulama çalışmasındaki rüzgârsız ortam şartlarının oluşturulduğu Senaryo 2.a kıyaslanmıştır. Daha sonra ise benzetim

çalışmasındaki *x* ve *y* eksenlerinde 2 *m/s* ortalama rüzgâr hızına sahip Senaryo 3.b ile uygulama çalışmasındaki ~2 *m/s* ortalama hıza sahip rüzgârlı ortam şartlarının oluşturulduğu Senaryo 2.b kıyaslanmıştır.

Bu kapsamda benzetim çalışması senaryo 3.a Monte Carlo test sonuçları ve Çizelge 3.14'teki *x* ve *y* eksenleri konum hatası test sonuçları kullanılarak Çizelge 4.9'daki *xy* düzlemi mutlak konum hatası $|e_{xy}|$ (ortalama ve standart sapma) verileri elde edilmiştir. Benzer şekilde benzetim çalışması senaryo 3.b Monte Carlo test sonuçları ve Çizelge 3.15'teki *x* ve *y* eksenleri konum hatası test sonuçları kullanılarak Çizelge 4.10'daki *xy* düzlemi mutlak konum hatası $|e_{xy}|$ (ortalama ve standart sapma) verileri elde edilmiştir. Böylece uygulama çalışmasındaki İHA ile benzetim çalışmasındaki İHA'nın otonom inişini hedef T_2 noktasından (iniş aşaması hedef koordinatından) ne kadar uzakta tamamladığı ortaya konulmuştur.

Çizelge 4.9 Benzetim çalışması senaryo 3.a ile uygulama çalışması senaryo 2.a'da elde edilen *xy* düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri

		Mutlak Konum Hatası - *xy* (*cm*) $\|e_{xy}\| = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$
Benzetim Ç. Senaryo 3.a	**Ortalama (μ)**	1.11818
	Std. Sapma (σ)	0.06167
Uygulama Ç. Senaryo 2.a	**Ortalama (μ)**	21.02329
	Std. Sapma (σ)	0.691817

Çizelge 4.10 Benzetim çalışması senaryo 3.b ile uygulama çalışması senaryo 2.b'de elde edilen *xy* düzlemi mutlak konum hatalarının ortalama ve standart sapma verileri

		Mutlak Konum Hatası - *xy* (*cm*) $\|e_{xy}\| = \sqrt{e_x^2 + e_y^2}$
Benzetim Ç. Senaryo 3.b	**Ortalama (μ)**	7.93979
	Std. Sapma (σ)	0.25442
Uygulama Ç. Senaryo 2.b	**Ortalama (μ)**	18.88166
	Std. Sapma (σ)	5.317346

Hem Çizelge 4.9 hem de Çizelge 4.10 incelendiğinde yine uygulama çalışmasındaki İHA'nın çok daha yüksek konum hatalarıyla (bir diğer ifadeyle hedef iniş koordinatından (T_2) çok daha uzakta kalarak) otonom inişini tamamladığı görülmüştür. Ayrıca uygulama çalışmasındaki test sonuçlarının benzetim çalışmasındaki test sonuçlarına göre daha yüksek standart sapmalara sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10).

Bu kapsamda benzetim çalışmasında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bir diğer taraftan benzetim çalışması senaryolarındaki otonom inişin tamamlanabilmesi için 20 *cm* yarıçaplı bir iniş platformu yeterliyken; uygulama çalışmasında İHA'nın otonom inişini tamamlayabilmesi için 40 *cm* (en) x 50 *cm* (boy) boyutlarında iniş platformu kullanılmıştır. (Uygulama çalışmasında kullanılan iniş platformu ölçüleri Çizelge 3.7'de de paylaşılmaktadır.) Yani uygulamadaki otonom iniş çalışmalarının başarıyla tamamlanabilmesi için biraz daha büyük bir iniş platformu kullanılmıştır.

Elde edilen tüm bu sonuçlar ve bulgular neticesinde dört rotorlu İHA'ların otonomi kabiliyetini arttıran, görev ve menzil kapasitelerini yükselten, tamamen veya kısmen otonomi içeren çok çeşitli uygulamalarda kullanılabilecek bir hareketli platforma otonom iniş mimarisi ortaya konulmuştur. Bu tez kapsamında ortaya konulan bulgular doğrultusunda hareketli bir iniş platformuna otonom inişin önerilen çözüm ile mümkün olduğu hem benzetim çalışmasında hem de uygulama çalışmasında görülmüştür. Bir diğer taraftan uygulama çalışmasında pozisyon bilgilerinin elde edilmesi için ArUco Board işaretçi kullanılmasının literatürdeki çalışmalara kıyasla çok daha uygun maliyetli (*cost effective*) bir çözüm olduğu da görülmüştür.

KAYNAKLAR

Ajmera, J., PR, S., M, R. K., Vasan, G., Balaji, N., Sankaranarayanan, V. 2015. Autonomous visual tracking and landing of a quadrotor on a moving platform. Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP), 342-347.

Borowczyk, A., Nguyen, D. T., Nguyen, A. P. V., Nguyen, D. Q., Saussié, D., Ny, J. L. 2017. Autonomous Landing of a Multirotor Micro Air Vehicle on a High Velocity Ground Vehicle. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 10488-10494.

Borowczyk, A., Nguyen, D. T., Nguyen, A. P. V., Nguyen, D. Q., Saussié, D., Ny, J. L. 2017. Autonomous Landing of a Quadcopter on a High-Speed Ground Vehicle. Journal of Guidance Control and Dynamics, 40(9), 2373-2381.

Bouabdallah, S. 2007. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. Doktora Tezi. École Polytechnıque Fédérale De Lausanne, Fen ve Teknoloji Fakültesi, Lozan.

Cheng, C., Li, X., Xie, L., Li, L. 2022. Autonomous dynamic docking of UAV based on UWB-vision in GPS-denied environment. Journal of the Franklin Institute, 359 (7), 2788 - 2809.

Dam, D. 2014. Analysıs and Control of a Non-Linear Flıght Vehıcle. Yüksek Lisans Tezi. University of Houston, Faculty of the Department of Electrical and Computer Engineering, Houston.

Demiryürek, A. 2018. Bir Dört Pervanelinin Modellenmesi ve Denetimi. Yüksek Lisans Tezi. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Falanga, D., Zanchettin, A., Simovic, A., Delmerico, J., Scaramuzza, D. 2017. Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform. 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), 200-207.

Feng, Y., Zhang, C., Baek, S., Rawashdeh, S., Mohammadi, A. 2018. Autonomous landing of a UAV on a Moving Platform Using Model Predictive Control. Drones, 2(4), 34.

Forsman, M. 2010. Point cloud densification. Yüksek Lisans Tezi. Umeå University, Bilim ve Teknoloji Fakültesi, Fizik Departmanı, Umeå.

Garrido-Jurado, S., Muñoz-Salinas, R., Madrid-Cuevas, F. J., Marín-Jiménez, M. J. 2014. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. Pattern Recognition, 47(6), 2280–2292.

Ghamry, K. A., Dong, Y., Kamel, M. A., Zhang, Y. 2016. Real-time autonomous take-off, tracking and landing of UAV on a moving UGV platform. 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 1236-1241.

Ghommam, J., Saad, M. 2017. Autonomous Landing of a Quadrotor on a Moving Platform. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 53(3), 1504-1519.

Hu, B., Lu, L., Mishra, S. 2015. A control architecture for fast and precise autonomous landing of a VTOL UAV onto an oscillating platform. Proceedings of the 71st American Helicopter Society Annual Forum.

Kaehler, A., Bradski, G. 2016. Learning OpenCV 3: computer vision in C++ with the OpenCV library. O'Reilly Media, Inc.

LearnOpenCV. 2020. Web Sitesi: https://learnopencv.com/augmented-reality-using-aruco-markers-in-opencv-c-python/, Erişim Tarihi: 29.07.2022

Lee, D., Ryan, T., Kim, H. J. 2012. Autonomous landing of a VTOL UAV on a moving platform using image-based visual servoing. 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 971-976.

Lee, J. S., Baek, J. Y., Jung, D., Shim, J. S., Lim, H. S., Jo, Y. H. 2019. Estimate of Coastal Water Depth Based on Aerial Photographs Using a Low-Altitude Remote Sensing System. Ocean Sci. J., 54, 349–362.

Levenberg, K. 1944. A Method for the Solution of Certain Non-linear Problems in Least Squares. Quarterly of Applied Mathematics, 2 (2), 164-168.

Macés-Hernández, J. A., Defaÿ, F., Chauffault, C. 2017. Autonomous landing of an UAV on a moving platform using model predictive control. 2017 11th Asian Control Conference (ASCC), 2298-2303.

Mathworks. 2022. Web Sitesi: https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html, Erişim Tarihi: 13.07.2022

Merchant, F., Vatwani, T., Chattopadhyay, A., Raha, S., Nandy, S. K., Narayan, R. 2018. Efficient Realization of Householder Transform Through Algorithm-Architecture Co-Design for Acceleration of QR Factorization. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 29 (8), 1707-1720.

Nakamura, T., Haviland, S., Bershadsky, D., Johnson, E. N. 2016. Vision-Based Optimal Landing On a Moving Platform. 72nd American Helicopter Society International Annual Forum 2016: Leveraging Emerging Technologies for Future Capabilities, 3331-3341.

Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9(1), 62-66.

Onion. 2019. Web Sitesi: https://onion.io/2bt-pid-control-python/, Erişim Tarihi: 19.07.2022

Palik, M., Nagy, M. 2019. Brief history of UAV development. Repüléstudományi Közlemények, 31(1) 155-166.

Paris A., Lopez, B.T., How, J. P. 2020. Dynamic Landing of an Autonomous Quadrotor on a Moving Platform in Turbulent Wind Conditions. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2020, 9577-9583.

Patrioli, L. 2020. Development of a localization system based on ArUco markers for a small space platforms test bench. Yüksek Lisans Tezi. Politecnico di Torino, Uzay ve Havacılık Mühendisliği, Torino.

Podharadsky, M. 2012. Visual Servoing for a Quadcopter Flight Control. Yüksek Lisans Tezi. Lulea University of Technology, Uzay Mühendisliği, Lulea.

Qi, Y., Jiang, J., Wu, J., Wang, J., Wang, C., Shan, J. 2019. Autonomous landing solution of low-cost quadrotor on a moving platform. Robotics and Autonomous Systems, 119, 64-76.

OpenCV. 2022. Web Sitesi: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html, Erişim Tarihi: 23.11.2022

Rezaee, K., Haddadnia, J., Delbari, A. 2015. Modeling abnormal walking of the elderly to predict risk of the falls using Kalman filter and motion estimation approach. Computers & Electrical Engineering, 46, 471-486.

Serra, P., Cunha, R., Hamel, T., Cabecinhas, D., Silvestre, C. 2016. Landing of a Quadrotor on a Moving Target Using Dynamic Image-Based Visual Servo Control. IEEE Transactions on Robotics, 32(6), 1524-1535.

Tosun, D. C. 2015. Dört Motorlu Bir İnsansız Hava Aracı için Adaptif Kontrol Sistem Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Havacılık Elektrik ve Elektroniği Anabilim Dalı, Eskişehir.

Vlantis, P., Marantos, P., Bechlioulis, C. P., Kyriakopoulos, K. J. 2015. Quadrotor landing on an inclined platform of a moving ground vehicle. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2202-2207.

Wang, L., Bai, X. 2018. Quadrotor Autonomous Approaching and Landing on a Vessel Deck. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 92, 125–143.

Wenzel, K. E., Masselli, A., Zell, A. 2011. Automatic Take Off, Tracking and Landing of a Miniature UAV on a Moving Carrier Vehicle. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 61, 221–238.

Xing, B. Y., Pan, F., Feng, X. X., Li, W. X., Gao, Q. 2019. Autonomous Landing of a Micro Aerial Vehicle on a Moving Platform Using a Composite Landmark. International Journal of Aerospace Engineering.

Xuan-Mung, N., Hong, S. K., Nguyen, N. P., Ha, L. N. N. T., Le, T. L. 2020. Autonomous Quadcopter Precision Landing Onto a Heaving Platform: New Method and Experiment. IEEE Access, 8, 167192–167202.