

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ROTA TAKİBİ İÇİN
UYARLAMALI DENETLEYİCİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ



ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞEGÜL SUNAY

EKİM 2019

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ROTA TAKİBİ İÇİN
UYARLAMALI DENETLEYİCİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül SUNAY

DANIŞMAN: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

ZONGULDAK

Ekim 2019

KABUL:

Ayşegül SUNAY tarafından hazırlanan “Çok Rotorlu İnsansız Hava Araçlarında Rota Takibi İçin Uyarlamalı Denetleyici Performansının İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 31/10/2019

Danışman: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Üye: Prof. Dr. Raif BAYIR

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Seda KARTAL

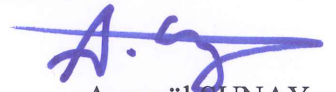
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./....../2019


Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”


Ayşegül SUNAY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK ROTORLU İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINDA ROTA TAKİBİ İÇİN UYARLAMALI DENETLEYİCİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Ayşegül SUNAY

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Ekim 2019, 65 sayfa

İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın ya takip edeceği güzergâhı kendi başına hesaplayabilmesi ya da daha önceden belirlenen güzergâha sadık kalabilmesi gerekmektedir. Buna ek olarak, zorlu koşullar (yer altı ocakları, insanların giremeyeceği alanlar vb.) altında, rota takibinin yapılması, maliyetinin azalması ve optimum zamanda rotayı, en doğru şekilde takip edebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, çok rotorlu İHA (ÇR İHA)'nın sistem modeli elde edilerek, sistemin pozisyon ve rota takip denetim yaklaşımları, PID (oransal, integral ve türev kazancı) ve uyarlamalı PID denetleyicisi ile MATLAB benzetim ortamında test edip, rota takip performanslarını karşılaştırılması ve hangi performansın daha iyi sonuç verdiğinin tespit edilmesidir.

ÖZET (devam ediyor)

Öncelikle İHA'nın, sistem modellemesi ve matematiksel denklemleri oluşturulmuş ve ÇR İHA'nın hareket prensibi incelenmiştir. Sistem modellemesi yardımıyla konum, yönelme açıları değişimlerine göre denetleyici performansları değerlendirilmiş ve birim basamak cevabı incelenmiştir. Sonrasında rota takibi, sonsuz ∞ , daire, dikdörtgen ve spiral olmak üzere dört farklı geometri üzerinde yapılarak rotalar üzerindeki İHA'nın rotayı takip etme oranı ve hata miktarı belirlenmektedir.

Benzetim ortamında bu geometrik şekillerle kıyaslama yapıldığında ani manevraların olduğu durumlarda, uyarlamalı PID yaklaşımların gerekliliği ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çok rotorlu İHA, Sistem modelleme, Rota takibi, uyarlamalı denetleyici, PID denetleyici.

Bilim Kodu: 608.05.04

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF ADAPTABLE CONTROLLER PERFORMANCE FOR ROUTE TRACKING IN MULTI-ROTOR UNMANNED AIR VEHICLES

Ayşegül SUNAY

Zonguldak Bulent Ecevit University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronics Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Rifat HACIOGLU

October 2019, 65 pages

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) need to be able to calculate their own preference or remain loyal as planned. In addition, in challenging circumstances (underground quarries, inaccessible areas, etc.) under route tracking, cost reduction and optimum time route, the most accurate way to follow.

The aim of this thesis is to evaluate and compare the target position and route tracking control concept, PID (proportional, integral and derivative gain) and adaptive PID controller testing with MATLAB simulation system which are present better results in the system model of multi-rotor UAV.

First of all, system modeling and mathematical equations of UAV have been established and motion principle of MR UAV has been analyzed. Supervisor performances classified by system modeling positioning, orientation angles are evaluated and unit step response is examined. The

ABSTRACT (continued)

route follow-up, infinite ∞ , circle, circular and spiral are made on four different geometries, where the UAV's follow-up rate and error target are determined.

The comparison of these geometric shapes in the simulation environment demonstrates the necessity of adapted PID approaches where sudden maneuvers occur.

Keywords: Multi-rotor unmanned air vehicles, System modelling, Trajectory tracking, Adaptive controller, PID controller.

Science Code: 608.05.04



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardım ve desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU'na, tezimin değerlendirilme aşamasında katkıda bulunan jüri üyesi hocalarım Prof. Dr. Raif BAYIR ve Dr. Öğr. Üyesi Seda Kartal'a, maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen annem Nesrin SUNAY, babam Hikmet SUNAY ve Esra GÜNER HACIOĞLU'na, eleştirileri ve önerileri ile her zaman yanımda olan Dr. Öğr. Üyesi Aytaç ALTAN'a, emeği geçen tüm bölüm hocalarıma ve her daim yanımda olan değerli dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI	5
2.1 İHA'LARIN GELİŞİMİ VE KULLANIM ALANLARI.....	5
2.2 ÇOK ROTORLU İHA YAPISI VE HAREKETLERİ.....	8
BÖLÜM 3 ÇOK ROTORLU İHA'NIN SİSTEM MODELİ.....	13
3.1 ÇOK ROTORLU İHA'NIN MODELLENMESİ	13
3.1.1 Çevirim Kinematığı.....	14
3.1.2 Dönüşüm Kinematığı	15
3.1.3 ÇR İHA Hareket Denklemleri.....	15

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2 İHA KONTROL STRATEJİSİ	17
3.3 ROTA TAKİBİ	18
BÖLÜM 4 İHA DENETİM SİSTEMLERİ	21
4.1 PID DENETİM	21
4.2 UYARLAMALI PID DENETİM.....	23
4.3 PID VE UYARLAMALI PID DENETLEYİCİ PERFORMANSI.....	26
BÖLÜM 5 İHA'NIN BENZETİM UYGULAMALARI	35
5.1 ROTA TAKİP UYGULAMASI	35
5.2 PID VE UYARLAMALI PID İLE İHA'NIN ROTA TAKİP BENZETİMİ.....	38
BÖLÜM 6 SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR.....	53
EK AÇIKLAMALAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Döner kanatlı İHA.....	2
Şekil 1.2 Sabit Kanatlı İHA (Bayraktar Dikey İniş Kalkışlı İnsansız Hava Aracı).	2
Şekil 2.1 İlk insansız uçak, Ruston Proctor Aerial Target.	6
Şekil 2.2 İHA kullanım alanları	7
Şekil 2.3 Dört pervaneli ÇR İHA motorlarının dönme hareketi.	8
Şekil 2.4 ÇR İHA hareketleri	9
Şekil 2.5 ÇR İHA'nın sapma hareketi.....	10
Şekil 2.6 ÇR İHA'nın havalanma-alçalma hareketi.....	11
Şekil 2.7 ÇR İHA'nın sağa-sola yalpalama hareketi.....	11
Şekil 2.8 ÇR İHA'nın ileri-geri yunuslama hareketi.....	11
Şekil 3.1 ÇR İHA'nın aerodinamik yapısı	13
Şekil 3.2 ÇR İHA'daki her bir motorun itki ve kuvvetleri.....	15
Şekil 3.3 ÇR İHA'nın rota takip akış şeması.	19
Şekil 4.1 ÇR İHA'nın PID blok şeması	22
Şekil 4.2 ÇR İHA'nın uyarlamalı PID blok şeması	24
Şekil 4.3 ÇR İHA'nın x, y ve z koordinatlarındaki hareketleri.....	28
Şekil 4.4 ÇR İHA'nın x koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.	28
Şekil 4.5 ÇR İHA'nın y koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.	29
Şekil 4.6 ÇR İHA'nın z koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.	30
Şekil 4.7 ÇR İHA x, y ve sapma değişimleri ile karesel hata değişimleri.	31
Şekil 4.8 ÇR İHA x, y, z ve sapma değişimleri ve karesel hata değişimlerinin PID ve Mref PID ile kıyaslanması.	32
Şekil 4.9 ÇR İHA x, y, z ve sapma hareketlerinde K_p , K_i , K_d değişimi.....	33
Şekil 5.1 ÇR İHA'nın MATLAB blok şeması modeli.....	36
Şekil 5.2 Dairesel (a), dikdörtgen (b), sonsuz ∞ (c) ve spiral (d) yörünge... ..	37
Şekil 5.3 ÇR İHA'nın MATLAB ortamındaki benzetimi.....	39
Şekil 5.4 Dairesel geometriye sahip yörünge.....	40
Şekil 5.5 Dairesel rota x, y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.	41
Şekil 5.6 Dikdörtgen geometriye sahip yörünge.	43
Şekil 5.7 Dikdörtgen rota x, y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.	44
Şekil 5.8 Sonsuz ∞ geometriye sahip yörünge.	45
Şekil 5.9 Sonsuz ∞ rota x, y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.	46
Şekil 5.10 Spiral geometriye sahip yörünge.....	47
Şekil 5.11 Spiral rota x, y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.....	48
Şekil A.1 ÇR İHA'nın blok şeması.....	57

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil B.1 Bir arducopterin şasesi	58
Şekil B.2 ArduPilot APM 2.6 kontrol kartı.....	59
Şekil B.3 Pervane Motoru	59
Şekil B.4 Motor sürücü	60
Şekil C.1 RC.....	61
Şekil C.2 Batarya ve güç modülü a) 4 hücreli batarya b) 3A BEC güç modülü.....	61
Şekil C.3 Yalpa modeli	62
Şekil C.4 GPS ve sonar modülleri. a) GPS, b) Sonar.....	63



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 PID denetimde yükseltlen parametrelerin etkisi.....	22
Çizelge 4.2 PID denetleyici katsayıları.....	27
Çizelge 4.3 PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.....	27
Çizelge 5.1 ÇR İHA’da kullanılan parametreler.....	35
Çizelge 5.2 PID denetleyici katsayıları.....	38
Çizelge 5.3 Dairesel rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.....	42
Çizelge 5.4 Dikdörtgen rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.....	43
Çizelge 5.5 Sonsuz ∞ rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.....	47
Çizelge 5.6 Spiral rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.....	49



EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
EK A: Dört Pervaneli İHA'nın Donanım Parçaları.	57
EK B: Temel Parçalar.	58
EK C: Yardımcı Parçalar.....	61





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

X : ÇR İHA'nın genel (kuzey-güney) konumu (m)

Y : ÇR İHA'nın genel (sağ-sol) konumu (m)

Z : ÇR İHA'nın genel (aşağı-yukarı) konumu (m)

x : ÇR İHA'nın gövde üzerindeki (kuzey-güney) konumu (m)

y : ÇR İHA'nın gövde üzerindeki konumu (sağ-sol)

z : ÇR İHA'nın gövde üzerindeki konumu (aşağı-yukarı)

ϕ : Yalpalama açısı (radyan)

θ : Yunuslama açısı (radyan)

Ψ : Sapma açısı (radyan)

p : Yalpalama oranı (radyan/saniye)

q : Yunuslama oranı (radyan/saniye)

r : Sapma oranı (radyan/saniye)

τ : Motor torku (N-m)

K_t : Tork orantılı sabit

I : Giriş akımı (A)

I_0 : Yüklemezsiz akım (A)

V : Motorlar arasındaki gerilim değişimi (V)

R_m : Motor direnci (ohm)

K_θ : Zıt EMF katsayısı

ω : Motor açısal hızı (radyan/saniye)

P_m : Motor gücü,

P_h : Süzülme gücü (W)

T : Süzülme itkisi (N)

ϑ_h : Süzülmedeki indüklenen hız (m/s)

ρ : Hava yoğunluğu (kg/m^3)

A : Rotor kanatlarıyla taranan alan

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

K_T	: İtme katsayısı
K_d	: Sürükleme torku orantı sabiti ($k - m^2$)
K_T	: İtke sabiti (kg-m)
u_1	: Motorların toplam itkisi
u_2	: Yalpalama açısı girişi
u_3	: Yunuslama açısı girişi
u_4	: Sapma açısı girişi
u	: Kontrol girişi
P	: Oransal kontrol katsayısı
I	: İntegral kontrol katsayısı
D	: Türevsel kontrol katsayısı
K_p	: Oransal kontrol kazancı
K_I	: İntegral kontrol kazancı
K_D	: Türevsel kontrol kazancı
t	: Anlık zaman değişkeni
$x_d(t)$: t zamanı ve x durumundaki istenen değer
$x(t)$: t zamanı ve x durumundaki ölçülen değer
$y_d(t)$: t zamanı ve x durumundaki istenen değer
$y(t)$: t zamanı ve x durumundaki ölçülen değer
$z_d(t)$: t zamanı ve x durumundaki istenen değer
$z(t)$: t zamanı ve x durumundaki ölçülen değer
$e(t)$: t zamanındaki hata değeri
$\dot{e}(t)$: t zamanındaki türevsel hata değeri
K_d	: Oransal sabit sürükleme torku
ω_{max}	: Maksimum motor hızı (rad/s)
ω_{min}	: Minimum motor hızı (rad/s)
ℓ	: Kol uzunluğu (m)
ω_1	: Ön motorun açısal hızı (rad/s)
ω_2	: Sağ motorun açısal hızı (rad/s)
ω_3	: Arka motorun açısal hızı (rad/s)
ω_4	: Sol motorun açısal hızı (rad/s)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ÇR İHA	: Çok Rotorlu İnsansız Hava Aracı
İHA	: İnsansız Hava Aracı
Mref PID	: Model Referans PID
PID	: Oransal kazanç, İntegral kazancı ve Türev kazancı





BÖLÜM 1

GİRİŞ

İHA'lar, isminden de anlaşılacağı üzere, uçuşu için üzerinde taşıyacağı bir pilota ihtiyaç duymayan, uzaktan denetlenebilen ve belli amaçlar için geliştirilmiş, son teknolojinin kullanıldığı sistemlerdir [1]. İnsansız hava araçları kısaca, küçük ve taşınabilir mikro İHA'lar, düşük irtifa yüksek dayanıklılık için kullanılan insansız hava araçları ve yüksek irtifa uzun dayanıklılık için kullanılan insansız hava araçları olarak sınıflandırılabilir [2].

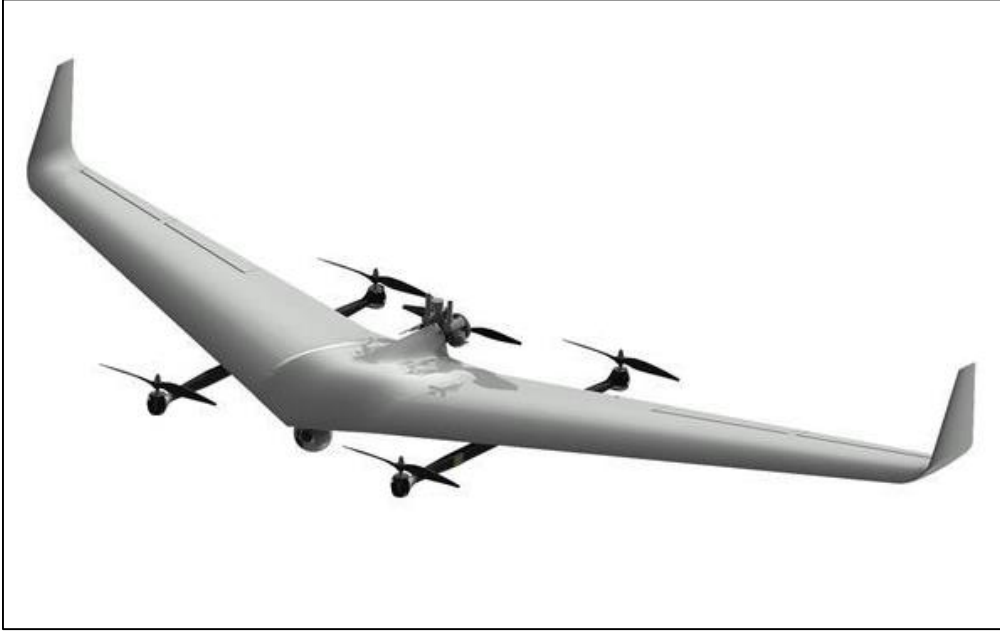
İHA'lar gerçekleştirecekleri görevlere göre değişik boyut ve yapıda üretilmektedir. Belirlenen görevleri yerine getirmede aerodinamik yapıları önemli rol oynamaktadır [3]. Günümüzde gerek sivil gerekse askeri alanlarda, insan hayatı için tehlike arz eden durumlarda, insanların erişemeyeceği noktalarda kullanılmaya başlayan İHA'ların, son yıllarda birçok sahada etkinliği fark edilmiştir. Bu yüzden, İHA sistemlerinin denetimi akademik çalışmalarda incelenmiş ve İHA'ların hareketi ve denetimi ile ilgili pek çok yöntem geliştirilmiştir. İHA'lar milli istihbarat ve savunma sanayisinde, arama ve kurtarma faaliyetlerinde, coğrafi yapının ulaşılamaz ve zor olduğu yerlerin güvenliğinde ve günlük hayattaki sivil amaçlı projelerde (zorlu parkurlardaki sporun takip edilmesinde, trafik akış ve denetiminde, kaçak yapılanmanın tespit edilmesinde vb.) sıklıkla kullanılmaktadır. Son 10 yıldır İHA'lar, otonom veya manuel olarak hareket edebilme, üzerindeki faydalı yükleri belirlenen hedeflere bırakabilme ve otonom iniş-kalkış yapabilme kabiliyetleri ile askeri ve sivil uygulamalarda tercih edilmektedir [4].

İHA'ların belirlenen görevleri yerine getirmek için izleyecekleri yörüngelerin planlanması ve İHA'nın bu yörüngeyi takip ederek görevini tamamlaması, stratejik veya askeri bölgelerdeki İHA faaliyetleri için hayati önem taşımaktadır.

İHA'lar, içerdikleri ekipmanlar ve çalışma şekline göre farklı kategorilerde bulunmaktadır. İHA'lar en temel olarak döner kanatlı ve sabit kanatlı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Döner kanatlı ve sabit kanatlı İHA'ların yapısı Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 Döner Kanatlı İHA.



Şekil 1.2 Sabit Kanatlı İHA (Bayraktar Dikey İniş Kalkışlı İnsansız Hava Aracı).

Bu çalışmada, dört pervaneye sahip çok rotorlu (ÇR) İHA kullanılmıştır. Diğer İHA çeşitleriyle kıyaslandığında, daha iyi manevra kabiliyetine sahip olan dört pervaneye sahip ÇR İHA'lar, sabit pervaneler içerdiklerinden mekanik tasarımları, bakımları ve üretimi daha basittir.

En az iki adet özdeş motor ile hareket ettirilmektedirler. Normal İHA sistemlerinde olduğu gibi, pervane dönüş kuvveti, helikopterin gövdesinde sapmaya yol açan momentler oluşturup,

İHA'yı dengeli duruma getirmek, sağa-sola veya ileri-geri süzülmesini düzenlemek için karmaşık kontrol sistemleri kullanılmaktadır. ÇR İHA'lar, içerdikleri motor sayısına göre Tricopter, Quadcopter, Hexacopter gibi farklı isimlerle de tercih edilmektedir [5,6].

ÇR İHA'lar, en temel yapısıyla, mikro denetleyici, sensor, fırçasız doğru akım motoru, hız kontrol birimi ve besleme kaynağı içermektedir [7]. Her bir motorun hız değişimi ile İHA, aşağı-yukarı, sağa-sola (yalpalama), kendi etrafında (sapma) hareket edebilmektedir.

ÇR İHA'ların konum, irtifa ve açılma kontrolleri üzerine pek çok akademik çalışma yapılmıştır. Bu tezin amacı, dört pervaneye sahip ÇR İHA'ların, MATLAB benzetim ortamında doğrusal olmayan modelinin oluşturulması ve oluşturulan modelin farklı senaryolar üzerindeki rota takip performansının incelenerek PID ve uyarlamalı PID üzerindeki etkisinin karşılaştırılmasıdır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde ÇR İHA'ların gelişimi ve kullanım alanlarından bahsedilmektedir. Üçüncü bölümde, çalışmada kullanılan ÇR İHA'nın sistem modellenmesinden ve kontrol stratejisinden bahsedilmektedir. Dördüncü bölümde, PID ve uyarlamalı PID özellikleri anlatılmaktadır. Uyarlamalı PID'nin avantajlarından ve İHA'lardaki kullanımından bahsedilmektedir. Ayrıca, x,y ve z koordinatlarında ÇR İHA'nın basamak tepkisi incelenmektedir. Beşinci bölümde, PID ve uyarlamalı PID yöntemleri ile farklı geometriler üzerindeki uygulamaları incelenmekte ve son kısımda da yapılan testler sonrası varılan sonuçlar paylaşarak gelecek çalışmalarla ilgili önerilerde bulunmaktadır. Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, ÇR İHA'nın farklı geometrilere sahip yörüngeleri takip etme performansı, PID ve uyarlamalı PID denetleyiciler ile incelenmekte ve ani manevraların olduğu durumda uyarlamalı PID denetleyicilerin gerekliliği ortaya konulmaktadır.



BÖLÜM 2

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI

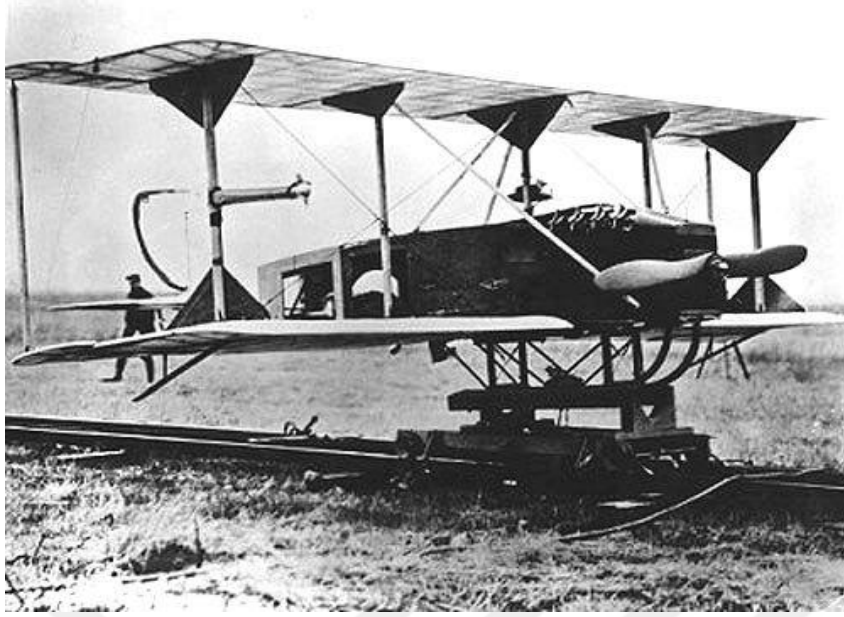
Bu bölümde İHA'ların tarihsel gelişimi ve kullanım alanlarından bahsedilmektedir. Ayrıca, dört pervaneli ÇR İHA'nın çalışma prensibinden ve dinamik yapısı açıklanmaktadır.

2.1 İHA'LARIN GELİŞİMİ VE KULLANIM ALANLARI

İnsansız hava araçlarının tarihsel geçmişi oldukça eskiye uzanmaktadır. Daha önce 1849 yılında Avusturyalıların, içinde zaman ayarlı bombalar bulunan 200 pilotsuz balonu İtalya'ya göndermesi, hava saldırısı için kullanılan ilk insansız hava aracı olarak kabul edilmektedir. Diğer taraftan, insansız balonların askeri amaçlı kullanımı Amerika'da 1793 yılına dayanmakta olup, bu balonlar iç savaşta sadece keşif amaçlı olarak kullanılmışlardır [8].

1908 yılında Nisan ve Kasım ayları arasında en az yarısı Alman olan 25'ten fazla havacıyı taşıyan yaklaşık 10 Alman balonunun Fransa sınırını geçtiği ve Fransa'ya iniş yaptığı kaydedilmiştir. Bütün bu olayların etkisiyle 1910 yılında Paris Konferansı'nın düzenlenmesi yoluna gidilmiştir. Konferans somut adımların atılamamasına karşın hava hukukunun uluslararası platformda düzenlenmesine yönelik olarak ilk diplomatik çaba olması dolayısıyla tarihe geçmiştir [9].

İnsansız ilk uçak (Ruston Proctor Aerial Target), Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Birinci Dünya Savaşı'nın sonlarında (1916) tasarlanmış olup, ilk insansız kullanımı ise “uçan bombalar” olarak bilinen “Hewitt-Sperry” jiroskop kontrollü otomatik uçak ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Kasım 1917 tarihinde “otomatik uçan uçak” ABD Silahlı Kuvvetleri'nin resmi uçağı olmuş, ilk uçuşunu 1918 yılında gerçekleştirmiş ancak Birinci Dünya Savaşı'nda kullanımı olanaklı olmamıştır [10].



Şekil 2.1 İlk insansız uçak, Ruston Proctor Aerial Target.

İHA'larla ilgili çalışmalar İkinci Dünya Savaşı ve sonrasında da devam etmiş, Vietnam, Irak ve Afganistan savaşları dâhil günümüze kadar birçok askeri operasyonda kullanılmış ve halen de kullanılmaya devam etmektedirler. Özellikle İkinci Dünya Savaşı'ndan sonraki yoğun çalışmalar, "Harpoon", "Tomahawk" ve "Cruise" gibi füzelerin geliştirilmesinde önemli rol oynamıştır [10].

İHA kullanımı yıllar içinde gelişmiş ve başarılı sonuçlar vermiştir. Bunun yanı sıra sivil amaçlı çalışmalar için de İHA günlük yaşantımıza girmiştir ve bu alandaki gelişmeler gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmalarda, İHA'ların doğru rotayı takip ederek hedeflerine ulaşmaları temel amaçlarıdır.

Günümüzde İHA'ların kullanımı ve üretimi için yapılan yatırımların büyük bir çoğunluğu askeri faaliyetler içindir. Bu askeri faaliyetler daha çok denetim, gözetim ve istihbarat faaliyetleri şeklindedir. Bunlara ek olarak askeri alandaki bir diğer kullanım alanı da kimyasal, biyolojik, nükleer ve radyolojik faaliyetler gibi tehlikeli gruptaki çalışmalardır. Kara, Deniz ve Hava Kuvvetleri'nin hepsi İHA teknolojisinden farklı faaliyetlerde faydalanmaktadır. İHA'lar; tarama, anlık-genel hedef belirleme, anlık hava durumu tahmini, kapalı hava koşullarında rota belirleme, yön tayini belirtme, radyo sinyallerinin iletimi ve aktarımı, uçuş pistlerinin güvenliği, doğal afetler, savaş gibi durumlarda hasar belirleme çalışmaları, gerekli durumlarda radar / jammer olarak kullanım ve daha birçok alanda İHA'lar kullanılmaktadır [11].

İHA'lar bilinen durumun aksine sadece askeri uygulamalarda kullanılmamaktadır. İHA'nın genel kullanım alanları Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

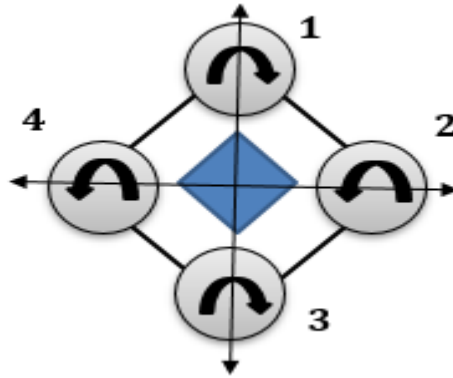


Şekil 2.2 İHA genel kullanım alanları.

ABD hükümetinin askeri alanlar dışında sivil havacılıkta da İHA kullanımına izin vermesiyle birlikte, İHA endüstrisi hızlı bir gelişim göstermiştir [12]. Askeri alanlar dışında İHA, ticari amaçlı kullanımlarda, bilimsel çalışmalarda, üniversitede laboratuvar çalışmalarında, arama-kurtarma çalışmalarında, kamu güvenliği ve düzenini ilgilendiren uygulamalarda, meteoroloji çalışmalarında, film endüstrisinde, Çevre-doğa çalışmalarında, havacılık fotoğrafçılığında, madencilik-jeoloji faaliyetlerinde, tarım alanlarındaki kullanımlarda vb. alanlarda İHA kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle tehlikeli ve risk barındıran uygulamalar ile uzun soluklu çok vakit alan (örn. 40-50 saat) ve insan kullanımının verimsiz olduğu alanlarda İHA kullanımını sağladığı kolaylıklar nedeniyle tercih edilmektedir [13]. Nükleer faaliyetler gibi kirli sayılabilecek, insan kullanımının riskli olduğu faaliyetlerde de sıklıkla tercih edilebilmektedir. Hayatımızın her alanında kullandığımız internet hizmetleri ve sosyal medya uygulamalarında da İHA teknolojisinden faydalanmaktadır [14].

2.2 ÇOK ROTORLU İHA YAPISI VE HAREKETLERİ

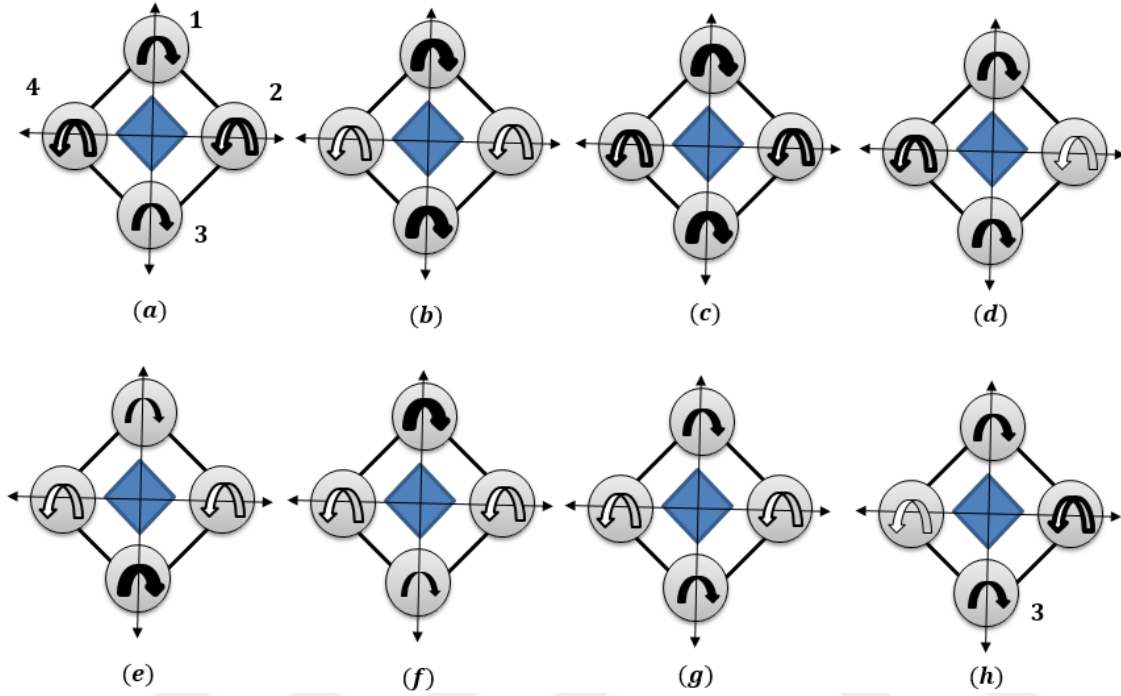
Dört pervaneli ÇR İHA, dört rotor aracılığıyla uçuşa geçip, hareket manevrasını sağlayabilen multikopter olarak tanımlanmaktadır. Bir ana rotor ve kuyruk rotoru kullanan klasik helikopterlerle kıyaslandığında, dört rotor kullanılan ÇR İHA'ların kurulumlarının kolay olması ve denetimlerinin karmaşık olmaması nedeniyle tercih edilmektedir. Klasik helikopterlerde pek çok hareketli parçadan oluşan karmaşık mekanik sistemler, rotora iletilen komutlarla kontrol edilmektedirler. Öte yandan, dört pervaneye sahip ÇR İHA'lar genel olarak sistem kontrolünün kolaylığı açısından avantajlıdır. ÇR İHA motorlarının sabit hatveli oluşu, basit ve hareketli parçası bulunmayan şaselerin kullanılması ayrıca yüksek itki gücüne bağlı ileri manevra kabiliyetine sahip olması ÇR İHA'ların öne çıkan özelliklerindedir. İHA'lar bu hareketini, çeşitli tork ve itki kuvvetleriyle sağlamaktadır. Her rotor, bir adet fırçasız DC motor içermektedir. Dört pervaneli ÇR İHA'ların, rotorları simetriktir ve karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Rotorların dönme yönleri ve hızları değiştirilerek, ÇR İHA'ların üç boyutlu uzaydaki (x, y ve z düzlemi üzerindeki) hareketi sağlanmaktadır [15].



Şekil 2.3 Dört pervaneli ÇR İHA motorlarının dönme hareketi.

Yatay ve dikey eksen etrafında simetrik olarak yerleştirilen Dört pervaneli İHA üzerindeki motorların dönme yönleri Şekil 2.3'te gösterilmektedir. 1 ve 3 numaralı motorlar saat yönünün tersine dönerken, 2 ve 4 numaralı motorlar saat yönünde dönmektedir. Bu durum tüm multikopterler için geçerlidir. Amaç, İHA'nın kendi eksenleri etrafında denetimsiz hareket etmesinin engellenmesidir. Pervanelerin farklı yönde hareket etmesiyle, tork dengelenmekte, pervanelerin hızına ve yönüne bağlı olarak İHA'nın hareketi sağlanmaktadır [16]. Rotorlar aynı hızda hareket ettiğinde, jiroskopik etkiler ihmal edilirse hava aracı havalanır. Kararlı bir havalanma sağlanabilmesi için her bir motor tarafından üretilen itki kuvveti aynı olmalıdır.

Motorlardan herhangi birinin itkisindeki ufak bir değişim (rüzgâr, yağmur gibi dış bozucu etkileri) hava aracının denetiminde hata miktarının artmasına neden olabilmektedir. Tek bir motorun hızı değiştirilerek taşıma kuvveti değiştirilebilmekte; yatay ve dikey eksenlerdeki hareketler bu şekilde sağlanabilmektedir [17].



Şekil 2.4 ÇR İHA hareketleri.

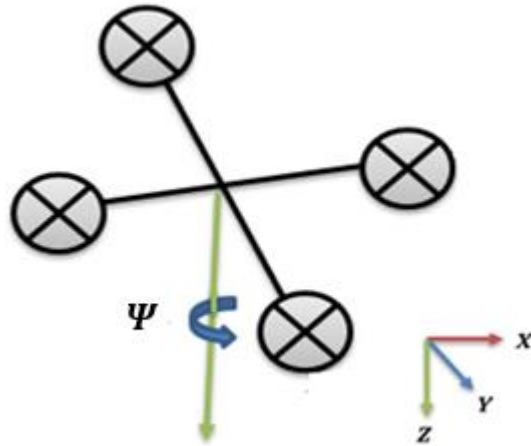
ÇR İHA üç çevrim (X,Y,Z) ve üç dönme (sapma, yalpalama, yunuslama) olmak üzere altı serbestlik derecesinde hareket etmektedir. Bu hareketler, motorların dönüş yönleri ve hızları değiştirerek sağlanmaktadır. ÇR İHA motorlarının dönme yönlerine göre hareketi Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

Burada sapma hareketi, ÇR İHA'nın z eksenindeki dönüşünü ifade etmekte ve karşılıklı yerleştirilen rotor çiftlerinden birinde meydana gelen hız değişimi sonucunda oluşmaktadır. Diğer bir tabirle, 1-3 numaralı rotor çifti ile 2-4 numaralı rotor çifti arasındaki hız farkından sapma açısı meydana gelmektedir. Yalpa hareketi, x ekseninde etrafında yaptığı açıdır. 1-3 numaralı rotorların hızlarının sabit kalması ve 2-4 numaralı rotorların zıt hız değişimiyle, sağa-sola hareketi sağlanmaktadır. Yunuslama hareketi, İHA'nın y ekseninde etrafında yaptığı açıdır. 2-4 numaralı rotor çiftinin hızlarının sabit kalması ve 1-3 numaralı rotorların zıt hızlarının değişimiyle, dört pervaneli İHA'nın ileri ve geri hareket etmesi sağlanmaktadır.

Kalın oklar hızlı, ince oklar yavaş dönüşü göstermektedir. Buna göre;

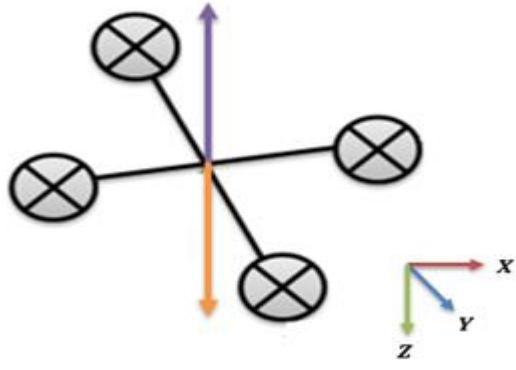
- (a) saat yönünün tersine sapma hareketini,
- (b) saat yönünde sapma hareketini,
- (c) havalanma hareketini,
- (d) saat yönünde yalpalama hareketini,
- (e) saat yönünün tersine yunuslama hareketini,
- (f) saat yönünde yunuslama hareketini,
- (g) Alçalma hareketini,
- (h) Saat yönünün tersine yalpa hareketini ifade etmektedir [18].

Burada, (a) ve (b) ile bahsedilen hareketler ÇR İHA'nın kendi etrafındaki dönüşünü göstermektedir. Bu da sapma hareketini ifade etmektedir. Sapma hareketi şekil 2.5'te gösterilmektedir.



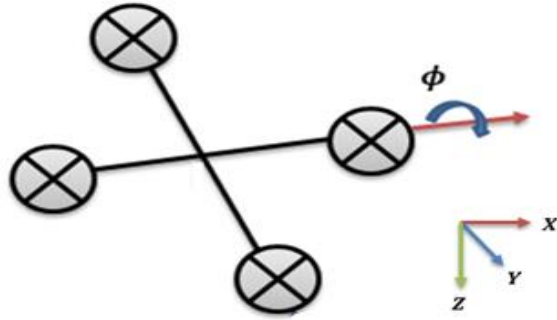
Şekil 2.5 ÇR İHA'nın sapma hareketi.

Karşılıklı rotor çiftlerinden birinin hızı arttırıldığında (c) ile gösterilen havalanma hareketi, azaltıldığında da (g) ile gösterilen alçalma hareketi oluşmaktadır. Havalanma hareketi Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



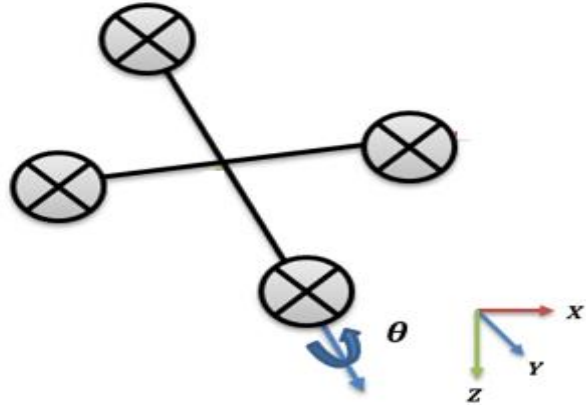
Şekil 2.6 ÇR İHA'nın havalanma-alışma hareketi.

(d) ve (h) ile bahsedilen hareket, ÇR İHA'nın sağı-sola yalpalama hareketini ifade etmektedir. Yalpalama hareketi şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7 ÇR İHA'nın sağı-sola yalpalama hareketi.

(e) ve (f) ile bahsedilen hareket, ÇR İHA'nın ileri-geri yunuslama hareketini ifade etmektedir. Yunuslama hareketi şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 ÇR İHA'nın ileri-geri yunuslama hareketi.



BÖLÜM 3

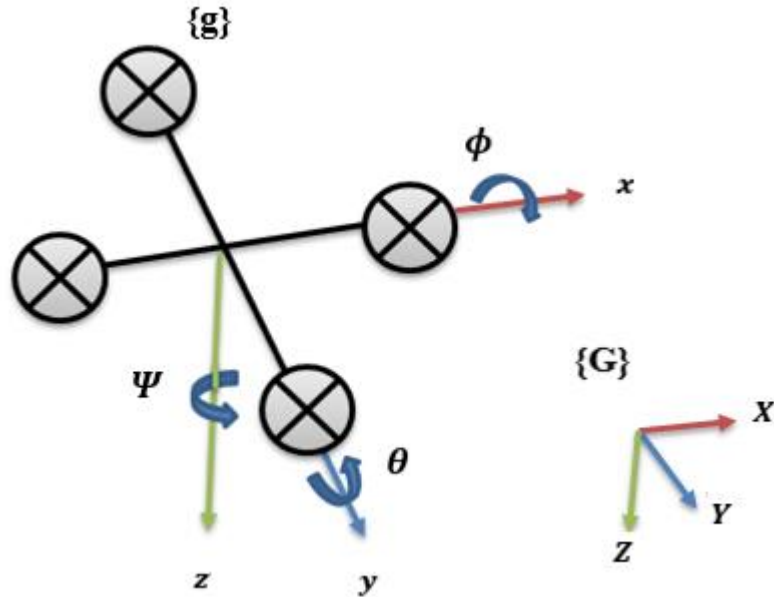
ÇOK ROTORLU İHA'NIN SİSTEM MODELİ

Bu bölümde, ÇR İHA'nın modellenmesi ve dinamik denklemlerinin elde edilmesi incelenmektedir. Bahsedilen bu özellikler, rotayı takip etme durumunda İHA'nın yönelme ve hareket prensibini açıklamaktadır.

3.1 ÇOK ROTORLU İHA'NIN MODELLENMESİ

Çalışmada kullanılan ÇR İHA yapısı, Şekil 3.1'de verilmektedir. ÇR İHA; Euler yalpalama, yunuslama ve sapma açıları gövde üzerindeki koordinatı $\{g\}$ ve genel koordinat çerçevesi $\{G\}$ ile gösterilmektedir.

Burada, referans koordinat $\{G\}$ ile gösterilirken, İHA $\{x, y, z\}$ koordinatında, aşağı-yukarı, z 'de, sağa-sola (yalpa) ϕ 'de, ileri-geri (yunuslama) θ 'da ve kendi etrafında (sapma) Ψ 'de hareket etmektedir.



Şekil 3.1 ÇR İHA'nın aerodinamik yapısı.

Genel koordinat çerçevesi; X: ÇR İHA'nın genel (kuzey-güney) konumu, Y: ÇR İHA'nın genel (sağ-sol) konumu, Z: ÇR İHA'nın genel (aşağı-yukarı) konumu ile belirlenirken durum değişkenleri; x: ÇR İHA'nın gövde üzerindeki (kuzey-güney) konumu, y: ÇR İHA'nın gövde üzerindeki konumu (sağ-sol), z: ÇR İHA'nın gövde üzerindeki konumu (aşağı-yukarı), ϕ : yalpalama açısı (rad), θ : yunuslama açısı (rad), Ψ : sapma açısı (rad), p: yalpalama oranı (rad/s), q: yunuslama oranı (rad/s), r: sapma oranı (rad/s) olarak tanımlanmaktadır [19].

Konum değişkenleri ile birlikte yalpalama, yunuslama ve sapma oranlarının p, q, r denetimi de rota takibinde görev süresi değerlendirildiğinde önemlidir.

3.1.1 Çevirim Kinematığı

ÇR İHA'nın hızı için durum değişkenleri, gövde üzerindeki {g} koordinat çerçevesi üzerinden oluşturulmuştur; ancak konum için belirtilen durum değişkenleri genel koordinat {G} çerçevesi üzerindedir. Dolayısıyla, değişkenleri koordinat çerçevesi üzerinde dönüştürmek için bir dönüşüm matrisi oluşturulması gerekmektedir. Genel koordinat {G} çerçevesi ve gövde koordinat çerçevesi {g} üzerindeki dönüşüm aşağıdaki denklemlerde gösterilmektedir.

$$x=R_G^g X = R(\phi)R(\theta)R(\Psi)X \quad (3.1)$$

$$y=R_G^g Y = R(\phi)R(\theta)R(\Psi)Y \quad (3.2)$$

$$z=R_G^g Z = R(\phi)R(\theta)R(\Psi)Z \quad (3.3)$$

$$R(x, \phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\phi) & s(\phi) \\ 0 & -s(\phi) & c(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$R(y, \theta) = \begin{bmatrix} c(\theta) & 0 & -s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$R(z, \Psi) = \begin{bmatrix} c(\Psi) & s(\Psi) & 0 \\ -s(\Psi) & c(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ile ifade edilmektedir [20].

3.1.2 Dönüşüm Kinematığı

Açısal hızlar gövde koordinat çerçevesinde $\{g\}$ ve Euler açıları ara koordinat çerçevelerinde tanımlandığından, Euler açılarının açısal hızları ve zaman türevleri arasındaki ilişkiyi belirlemek için dönüşüm matrisi kullanılmaktadır.

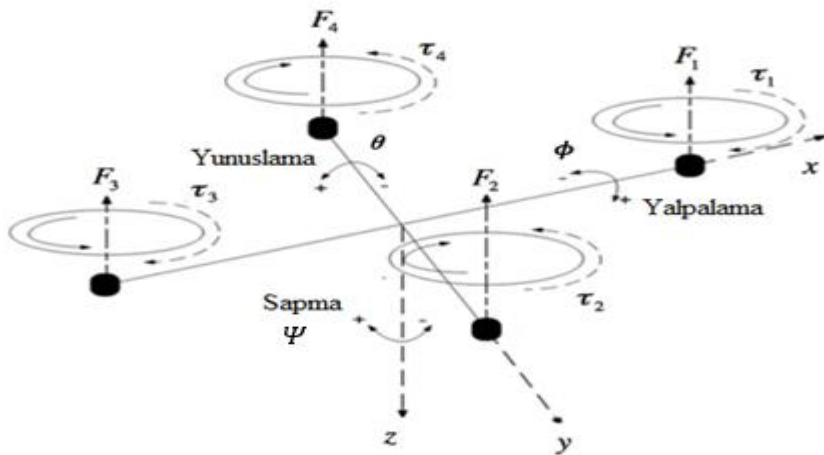
$$\omega = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = R(\phi) R(\theta) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + R(\phi) \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s(\phi) t(\theta) & c(\phi) t(\theta) \\ 0 & c(\phi) & -s(\phi) \\ 0 & \frac{s(\phi)}{c(\theta)} & \frac{s(\phi)}{c(\theta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ayrıca bahsedilen denklemlerde, $\cos(\Psi) = c(\Psi)$, $\cos(\theta) = c(\theta)$, $\cos(\phi) = c(\phi)$, $\sin(\Psi) = s(\Psi)$, $\sin(\theta) = s(\theta)$, $\sin(\phi) = s(\phi)$ ve $t(\theta) = \tan(\theta)$ ile temsil edilmektedir.

3.1.3 ÇR İHA Hareket Denklemleri

ÇR İHA'larda, gerekli olan itki ve torkları üretmek için sıklıkla fırçasız motor tipleri kullanılmaktadır. Her bir motor, elektrikli batarya tarafından enerjilendirilmekte ve elektronik hız kontrol ünitesi (ESC) istenen motor hızları çıkışını alarak, bu komutları her bir motora göndermektedir. Şekil 3.2'de ÇR İHA'daki her bir motorun itki ve kuvvetleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2 ÇR İHA'daki her bir motorun itki ve kuvvetleri.

ÇR İHA'da kullanılan fırçasız doğru akım motorunun tork ve güç denklemleri:

$$\tau = K_t(I - I_0) \quad (3.9)$$

$$V = IR_m + K_g\omega \quad (3.10)$$

$$P_m = IV = \frac{(\tau + K_t I_0)(R_t I_0 R_m + \tau R_m + K_t K_v \omega)}{K_t^2} \quad (3.11)$$

$$R_m \approx I_0 \approx 0 \text{ olduğu varsayıldığında;} \quad (3.12)$$

$$P_m = \frac{K_g \tau \omega}{K_t} \quad (3.13)$$

$$P_h = T \vartheta_h \quad (3.14)$$

$$T = 2\rho A \vartheta_h^2 \quad (3.15)$$

$$\tau = K_\tau T \quad (3.16)$$

$$P_m = \frac{K_v \tau \omega}{K_t} = \frac{K_g K_\tau T}{K_t} \quad (3.17)$$

$$P_h = \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A}} \quad (3.18)$$

$$T = \left[\left(\frac{K_g K_\tau \sqrt{2\rho A}}{K_t} \right) \omega \right]^2 \quad (3.19)$$

$$T = K_T \omega^2 \quad (3.20)$$

ile ifade edilmektedir. Eşitlik 3.11'de bahsedilen denklemde; V: motorlar arasındaki gerilim değişimi (V), I: giriş akımı (A), τ : motor torku (N-m), T: süzülme itkisi (N), ω : motor açısal hızı (rad/s) olarak tanımlanan İHA'nın hareketini belirleyen değişkenleri ifade ederken, K_t : tork orantılı sabit, I_0 : yüklemesiz akım (A), R_m : motor direnci (ohm), K_g : zıt EMF katsayısı, P_m : motor gücü, P_h : süzülme gücü (W), ϑ_h : süzülmedeki indüklenen hız (m/s), ρ : hava yoğunluğu (kg/m^3), A: rotor kanatlarıyla taranan alan, K_v : zıt EMF katsayısı, K_τ : tork orantılı sabit, K_T : itme katsayısı olarak ifade edilmektedir.

Motor direncinin ve yüksüz akımın 0 olduğu varsayılmıştır. Tüm motorlar ÇR İHA sisteminde aynı olduğundan, her motor için tek bir model uygulanmaktadır.

ÇR İHA'nın denetiminde kullanılan hareket denklemleri eşitlik (3.8) ile birlikte:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = \frac{-1}{m} \begin{bmatrix} K_{dx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{dy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{dz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} - \frac{1}{m} \begin{bmatrix} (c(\phi)s(\theta)c(\Psi) + s(\phi)s(\Psi)) \\ (c(\phi)s(\theta)s(\Psi) - s(\phi)c(\Psi)) \\ c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(I_z - I_y)}{I_x} qr \\ \frac{(I_x - I_z)}{I_y} rp \\ \frac{(I_y - I_x)}{I_z} pq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{J_{TP}}{I_x} q \\ \frac{J_{TP}}{I_y} p \\ 0 \end{bmatrix} \Omega + \begin{bmatrix} \frac{l}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

ile gösterilmektedir. Eşitlik 22'de I_x , I_y ve I_z , her bir eksen etrafındaki eylemsizlik momentine; J_{TP} , motorun dönmesinden kaynaklanan eylemsizlik momentine; u_2 , yalpalama açısı girdisine; u_3 , yunuslama açısı girdisine; u_4 , sapma açısı girdisine karşılık gelmektedir. $\Omega = -\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4$ olacak şekilde tanımlı olup, burada ω_i , her bir rotora ait devir sayısını ifade etmektedir [21].

3.2 İHA KONTROL STRATEJİSİ

ÇR İHA'nın kontrol girişlerini tanımlamak için net itki ve moment denklemleri kullanılmaktadır.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T & K_T & K_T & K_T \\ 0 & -\ell K_T & 0 & \ell K_T \\ \ell K_T & 0 & -\ell K_T & 0 \\ K_d & -K_d & K_d & -K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Eşitlik 3.23'de bahsedilen denklemden, u_1 : motorların toplam itkisi, $u_1^{\min} \leq u_1 \leq u_1^{\max}$,
 u_2 : yalpalama açısı girişi, $u_2^{\min} \leq u_2 \leq u_2^{\max}$, u_3 : yunuslama açısı girişi, $u_3^{\min} \leq u_3 \leq u_3^{\max}$,
 u_4 : sapma açısı girişi, $u_4^{\min} \leq u_4 \leq u_4^{\max}$, ω_i : motor açısal hızı (rad/s), $\omega_i^{\min} \leq \omega_i \leq \omega_i^{\max}$ $i = 1 \dots 4$, ω_1 : ön motorun açısal hızı (rad/s), ω_2 : sağ motorun açısal hızı (rad/s), ω_3 : arka motorun açısal hızı (rad/s), ω_4 : sol motorun açısal hızı (rad/s) olarak verilirken, K_d : sürüklenme torku orantı sabiti ($1.39 \times 10^{-6} \text{ k-m}^2$), K_T : itki sabiti ($1.33 \times 10^{-5} \text{ (kg-m)}$), ℓ : kol uzunluğu (0.56 m) sabitleri olarak ifade edilmektedir.

Bu durumda motor hızlarının değişimi motorlardaki itki değişkenlerine göre,

$$\begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \\ \omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4K_T} & 0 & \frac{-1}{2K_T\ell} & \frac{1}{4K_d} \\ \frac{1}{4K_T} & \frac{-1}{2K_T\ell} & 0 & \frac{-1}{4K_d} \\ \frac{1}{4K_T} & 0 & \frac{1}{2K_T\ell} & \frac{1}{4K_d} \\ \frac{1}{4K_T} & \frac{1}{2K_T\ell} & 0 & \frac{1}{4K_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

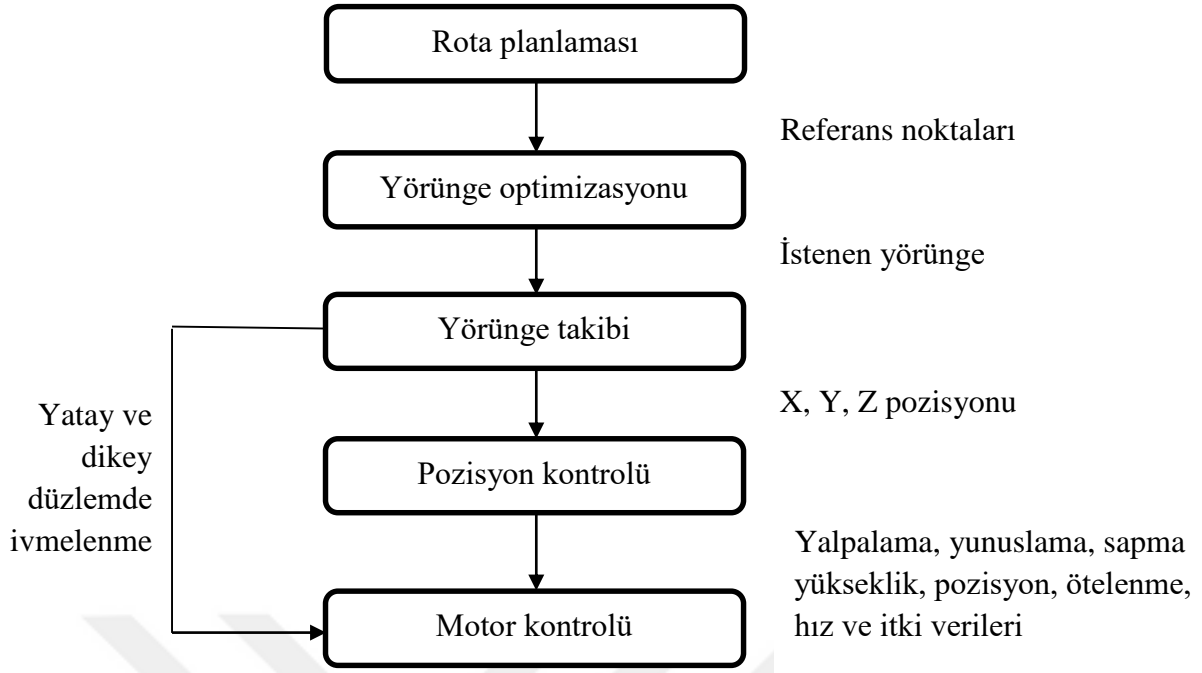
elde edilmektedir. Denetim sistemi tarafından hesaplanabilecek kontrol girişlerine sınır koymak önem arz etmektedir. Bahsedilen kontrol girişleri ESC'lere aktarılır ve motor hızlarına dönüştürülür.

Denkliklerde bahsedilen ÇR İHA'nın girişlerinin kontrolü Ek açıklamalar kısmında bahsedilen ArduPilot APM 2.6 kontrol kartı ile sağlanabilmektedir. Ayrıca, modellenen sistemin gerçekleşmesi durumunda, Ek açıklamalar Şekil A.1'de bahsedilen dört pervaneli İHA'nın blok şemasındaki temel parçalar ve yardımcı parçalar kullanılacaktır.

3.3 ROTA TAKİBİ

ÇR İHA'ların, insansız olarak hareketini sağlamak, istenen rotaya en kısa sürede gitmesini ve minimal düzeyde enerji kullanımını amaçlamak açısından, rota takibi yapması ve istenen rota üzerinde hareketini sağlaması büyük önem teşkil etmektedir.

Rota takibinin yapılması için ya ÇR İHA'nın önceden belirtilen güzergâhta ilerlemesi ya da kendi rotasını belirli algoritmalarla ve yöntemlerle oluşturması gerekmektedir. ÇR İHA'nın rotayı takip etmesi ile ilgili literatürde pek çok çalışma bulunmaktadır [23-25].



Şekil 3.3 ÇR İHA'nın rota takip akış şeması.

ÇR İHA'nın rota takibiyle ilgili akış şeması Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Buna göre, ilk olarak İHA'nın önce gideceği rota belirlenmelidir. Bahsedilen rota üzerinden referans noktaları belirlenir. Belirlenen noktalar üzerinden yörünge optimizasyonu yapılır ve yörünge takibinin yapılması için X, Y, Z pozisyonu belirlenerek, gövde koordinatı üzerinden x,y,z pozisyonuna çevrilir. Bu da, yalpalama, yunuslama, sapma açılarını oluşturarak yükseklik, pozisyon, ötelenme ve hız değerlerinin ayarlandığı motor kontrolü sağlanır ve yatay- dikey düzlemde ivmelenme sağlanır.

Tüm rota takip sistemlerinde referans noktaları belirlenmekte ve İHA'nın referansı takip etme oranı incelenmektedir. Buna göre rota takibinde x_d, y_d, z_d referans rotayı belirleyecek olursa x, y, z İHA'nın rotasını göstermektedir. Bu durumda hata,

$$e = \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2 + (z_d - z)^2} \quad (3.25)$$

ile elde edilecektir. Ayrıca İHA hızı ve görevi tamamlama süreleri önemlidir.



BÖLÜM 4

İHA DENETİM SİSTEMLERİ

Bu bölümde, PID denetim ve uyarlanabilir PID denetimden genel hatlarıyla bahsedilmekte ve uyarlanabilir PID kestirim yöntemine değinilmektedir. Ayrıca ÇR İHA'nın birim basamak tepkisi incelenerek, uyarlamalı PID ve PID parametrelerinin rota takibindeki etkisi incelenmektedir.

4.1 PID DENETİM

En yaygın denetim sistemi tipi Oransal-İntegral-Türev (PID) kontrol sistemidir [26]. PID denetleyicisi kapalı döngü geri bildirim sistemi olarak bilinmektedir. Kontrol sistemi, gerçek ve istenen durum arasındaki farkı hesaplar ve bir hata değeri üretir. ÇR İHA üzerinde bulunan sensörden çıkan ölçüm değeri, bu hata sinyalini hesaplamak için geri beslenerek istenen değeri ile ölçülen değeri arasındaki dengeyi sağlar [27]. PID kontrol sisteminin çıkışı, sistemi istenen duruma yaklaştıracak bir kontrol değeridir.

PID denetleyicisi kullanarak, ÇR İHA'nın havada süzülme, yükseklik ve istenen yöne hareketini sağlamak mümkündür [28]. PID denetleyicisi, parametre kazançlarının kolay ayarlanması, tasarımı ve dayanımı açısından avantajlıdır; ancak, matematiksel model ile ilişkilendirilen doğrusal olmayan ve kesin durumlar içermeyen ÇR İHA modellerinde, İHA'nın hareketini ve performansını sınırlandırmaktadır.

PID denetleyicisiyle denetlenen İHA modellemesi Şekil 4.1'de görülmekte ve denetlenen işaret Eşitlik 4.1'deki denklikle edilmektedir. Burada, u : kontrol girişi, K_P : oransal kontrol kazancı, K_I : integral kontrol kazancı, K_D : türevsel kontrol kazancı ve t : anlık zaman değişkeni olarak ifade edilmektedir.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \dot{e}(t) \quad (4.1)$$

Şekil 4.1’de görülen blok diyagramında,

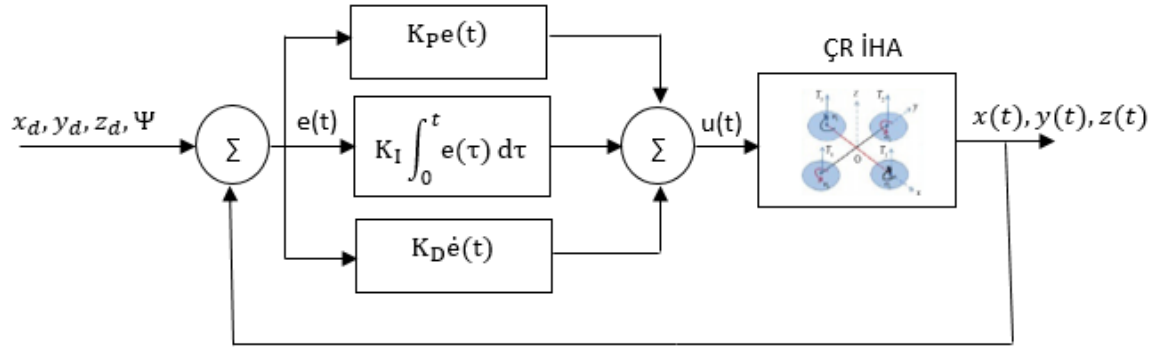
$x_d(t), x(t)$: t zamanı ve x durumundaki istenen değer ve elde edilen değer,

$y_d(t), y(t)$: t zamanı ve y durumundaki istenen değer ve elde edilen değer,

$z_d(t), z(t)$: t zamanı ve z durumundaki istenen değer ve elde edilen değer,

$e(t)$: t zamanındaki konum istenen değer ile elde edilen değer arasındaki fark hata değeri,

$\dot{e}(t)$: t zamanındaki türevsel hata değeri ile ifade edilmektedir.



Şekil 4.1 CR İHA’nın PID blok şeması.

Çizelge 4.1 PID denetimde yükseltelen parametrelerin etkisi.

Kapalı Devre Cevabı	Yükselme Zamanı	En Yüksek Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Kararlılık
Yükselen K_P	Azalma	Yükselme	Biraz yükselme	Azalma	Düşüş
Yükselen K_I	Biraz azalma	Yükselme	Yükselme	Çok azalma	Düşüş
Yükselen K_D	Biraz azalma	Azalma	Azalma	Çok az değişiklik	İyileşme

Şekil 4.1 ve 4.2’de CR İHA’nın PID denetleyici blok şeması gösterilmektedir. PID denetleyici ile başarılı sonuç elde etmek için uygun parametrelerinin seçilmesi önem arz etmektedir. Çizelge 4.1’de PID denetleyicide K_P , K_I ve K_D durum değişken parametrelerinin kapalı devre cevabına etkisi gösterilmektedir. Seçilen parametreler, sistemin kalıcı duruma geçme hızını ve kalıcı duruma geçerken yaşanan aşım miktarının büyüklüğünü etkilemektedir. Seçilen parametrelerin devre cevabına etkisi Çizelge 4.1’de görülmektedir.

Bu tez çalışmasında referans olarak belirlenen rotanın takibini sağlayabilmek için sistem kararlılığını dikkate alarak uygun PID parametreleri elde edilmekte, özellikle kalıcı durum

hatasını azaltacak PID denetimi yapılmaktadır. PID parametreleri ÇR İHA'nın motor sürücü devrelerinde gömülü olarak bulunmaktadır.

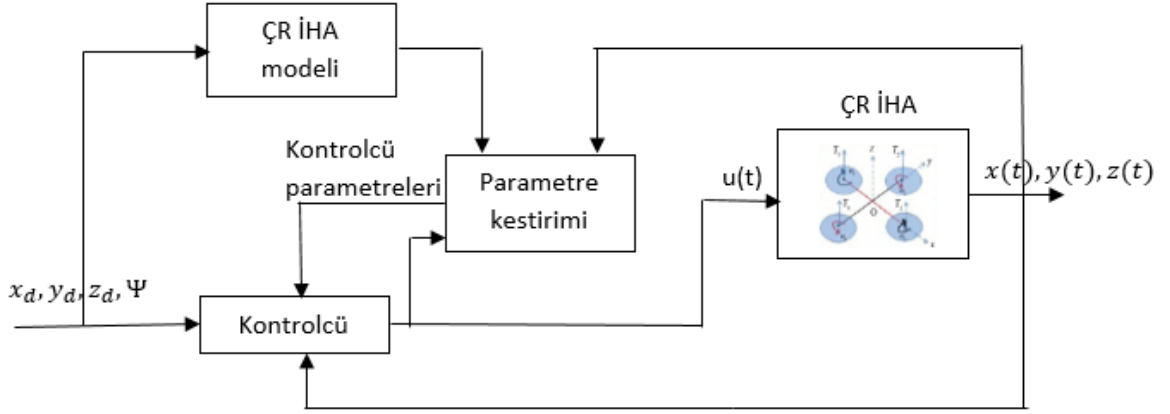
4.2 UYARLAMALI PID DENETİM

Uyarlamalı PID denetimi, adından da anlaşılacağı üzere yeni durumlara uyum sağlamak için sistem davranışının değiştirilmesini öngören bir kontrol yöntemidir. Uyarlamalı PID denetimi, yeni durumlara uyum sağlayacağı için, doğası gereği doğrusal olmayan bir yapı bulundurmaktadır.

Klasik kontrol tasarımının yapılabilmesi için kontrol edilecek sistemin karakteristik ve davranışlarının bilinmesi gerekmektedir. Sabit kontrol parametrelerinin de tüm çevresel ve işletme şartları için uygun olması gerekmektedir. Buna rağmen birçok sistem, değişen çevresel ve işletme şartlarında karakteristiklerinin çıkarılabilmesi için, sistemde bulunan tespit edilemeyen kısımlar yüzünden uygun değildir. Bu sebepten dolayı bir ayarlama ve kalibrasyon mekanizmasına ihtiyaç duymaktadırlar [29].

Uyarlamalı PID denetim K_P , K_I ve K_D parametrelerinin değişikliklerini amaçlamaktadır. ÇR İHA'nın uyarlamalı PID denetleyici blok şeması Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Sistem modeline dayalı İHA'nın konum hareketleri ile birlikte yönelme ve sapma performansının ve hızının denetleyici katsayılarını düzenleyerek belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Uyarlamalı PID denetim, genel olarak üç temel aşama içermektedir. Bunlar; sistem modelleme, kontrolcü tasarımı ve kontrolcünün sisteme uyarlanmasıdır [28]. Sistem modelleme kısmı, matematiksel gösterim kısmıdır. ÇR İHA'nın matematiksel modellemesinin sisteme uyarlanmasıyla oluşturulmaktadır. Daha sonrasında, sistem gözlemlenerek davranışlarına bakılır. Gözlemlenen sistemin giriş ve çıkış sinyal parametrelerinden bir model elde edilmektedir. Bahsedilen işleme 'parametre kestirimi' denilmektedir [29].



Şekil 4.2 ÇR İHA'nın uyarlamalı PID blok şeması.

Bu tez çalışmasında, ÇR İHA incelenmekte olup, hareket denetimi gerekli itme denetim işaretlerinin elde edilmesi ile pervane hızları denetlenmektedir. ÇR İHA'nın dinamik modeli Eşitlik 3.21 ve 3.22'de bahsedilen sürtünme kuvvetleri, yerçekimi etkilerinin ihmal edilmesi durumunda;

$$\ddot{\mathcal{X}} = \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \\ \ddot{Z} \end{bmatrix} = -\frac{1}{m} \begin{bmatrix} c(\phi)s(\theta)c(\Psi) + s(\phi)s(\Psi) \\ c(\phi)s(\theta)c(\Psi) - s(\phi)s(\Psi) \\ c(\phi)c(\theta) \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\ddot{\Phi} = \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\Psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

olarak yazılır. Burada, $\mathcal{X}=[x, y, z]^T$ pozisyon vektörü, $\Phi=[\phi \ \theta \ \Psi]^T$ İHA'nın yalpalama, yunuslama ve sapma açılarını içeren davranış vektörüdür. Euler açılarının yavaş değişimi Eşitlik (4.2) ve (4.3) ile doğrusallaştırılırsa, elde edilen referans model, X_m , Φ_m durum değişkenleri, \mathcal{X}_d , Φ_d hedef değişkenler olacak şekilde,

$$\dot{\mathcal{X}}_m = \dot{\mathcal{X}}_d + K_{x2}(\mathcal{X}_d - \dot{\mathcal{X}}_m) + K_{x1}(\mathcal{X}_d - \mathcal{X}_m) \quad (4.4)$$

$$\ddot{\Phi}_m = \ddot{\Phi}_d + K_{\phi2}(\Phi_d - \dot{\Phi}_m) + K_{\phi1}(\Phi_d - \Phi_m) \quad (4.5)$$

Dinamik denklemleri yazılır [30]. Burada; K_{x2} , K_{x1} , $K_{\phi2}$ ve $K_{\phi1}$ kazanç matrisleridir. Buna göre, pozisyon hata ve davranış hata vektörleri;

$$e_x = X - X_m, \quad e_\phi = \Phi - \Phi_m \quad (4.6)$$

olur. Adaptasyon kuralları Lyapunov tabanlı kararlı denetim işaretlerini elde edecek şekilde,

$$\dot{Y}_x = K_x(\dot{e}_x + K_{x1}e_x) \quad (4.7)$$

$$\dot{Y}_\phi = K_\phi(\dot{e}_\phi + K_{\phi1}e_\phi) \quad (4.8)$$

olarak verilirse,

$$\vartheta = -[e_x + \varphi_x^T Y_x + K_{\phi2} + K_{x2}(\dot{e}_x + K_{x1}e_x)] \quad (4.9)$$

$$u = -[e_\phi + \varphi_\phi^T Y_\phi + K_{\phi2}(\dot{e}_\phi + K_{\phi1}e_\phi)] \quad (4.10)$$

olarak elde edilir. Burada, ϑ denetim işareti, u_1 ile birlikte ϕ_d , θ_d yalpa ve yunuslama hedef işaretlerini sağlarken, u denetim işareti, u_2 , u_3 , u_4 işaretlerini verir [31].

Ayrıca,

$$K_x = \alpha_x \varphi_x, \quad K_\phi = -\alpha_\phi \varphi_\phi \quad (4.11)$$

için α_x , φ_ϕ adaptasyon hızını belirleyen pozitif tanımlı matrisler ve

$$\varphi_x = \begin{bmatrix} 0 \\ K_{x1}\dot{e}_x - \ddot{X}_m \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

$$\varphi_\phi = \text{diag} (K_{\phi1}\dot{e}_\phi - \ddot{\Phi}_m) \quad (4.13)$$

olarak tanımlanmaktadır. (4.9) ve (4.10) eşitliklerindeki denetim işaretleri uyarlamalı PID katsayılarını içermektedir.

4.3 PID VE UYARLAMALI PID DENETLEYİCİ PERFORMANSI

PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansını değerlendirmek amacı ile öncelikle x,y ve z koordinatlarında ÇR İHA'nın basamak tepkisi incelenmektedir. Ek olarak sapma performansı yavaş ve keskin dönüşler düşünülerek değerlendirilmektedir. Burada PID katsayıları belirli aralıklar ile değiştirilerek en iyi katsayıların bulunması ile birlikte farklı adımlarda en iyi katsayılarının elde edilmesi de incelenmektedir.

Rota takibi amaçlı PID katsayıları belirlenirken özellikle x, y koordinatlarında hareket için

$$0.25 \leq K_P \leq 0.45, 0.1 \leq K_I \leq 0.3, 0.2 \leq K_D \leq 0.4$$

aralığında, z-koordinatlarında hareket için

$$K_P = 5.882, 0 \leq K_I \leq 8, K_D = 5.0505$$

aralığında, sapma (Ψ) için

$$6 \leq K_P \leq 14, K_I = 0, K_D = 0,$$

aralığında ve p, q, r yönelme hızları için de

$$2.1 \leq K_P \leq 3.3, 0.2 \leq K_I \leq 1.8, 0.002 \leq K_D \leq 0.018$$

aralığında değiştirilmiştir. İHA'nın uçuş süresi 60 s olarak belirlenmiş olup bu benzetim için örnekleme aralığı $T = 0.01$ s seçilmektedir.

Öncelikle tüm rotayı en az hata ile takip eden PID denetleyici katsayıları (PID1) ile x, y ve z koordinatlarında az hata veren (PID2 – PID4) ve dar açı sapma (PID5), geniş açı sapma (PID6) durumunda az hata veren PID katsayıları elde edilerek Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Uyarlamalı PID için farklı durumlara göre bu katsayılar (PID1 – PID6) kullanılmaktadır.

PID ve uyarlamalı PID denetleyici yaklaşımlarında referans yol 3.4142 m iken her bir farklı denetleyici yaklaşımı için gidilen yol Çizelge 4.3'de toplam karesel hata değerleri ile verilmektedir. Çizelgede görüldüğü üzere, yol ve karesel hata değerlerinin en aza indirildiği PID varyasyonunun uyarlamalı PID katsayıları olduğu görülmektedir.

Şekil 4.5 basamak olarak değişen referans rotayı takip eden PID1 ve Uyarlamalı PID denetleyici kullanımında ÇR İHA x, y, z ve sapma değişimleri ile karesel hata değişimlerini göstermektedir. Çok az fark olsa da uyarlamalı PID performansının iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte her bir x,y ve z değişimleri için PID2 (z doğrultusunda), PID3

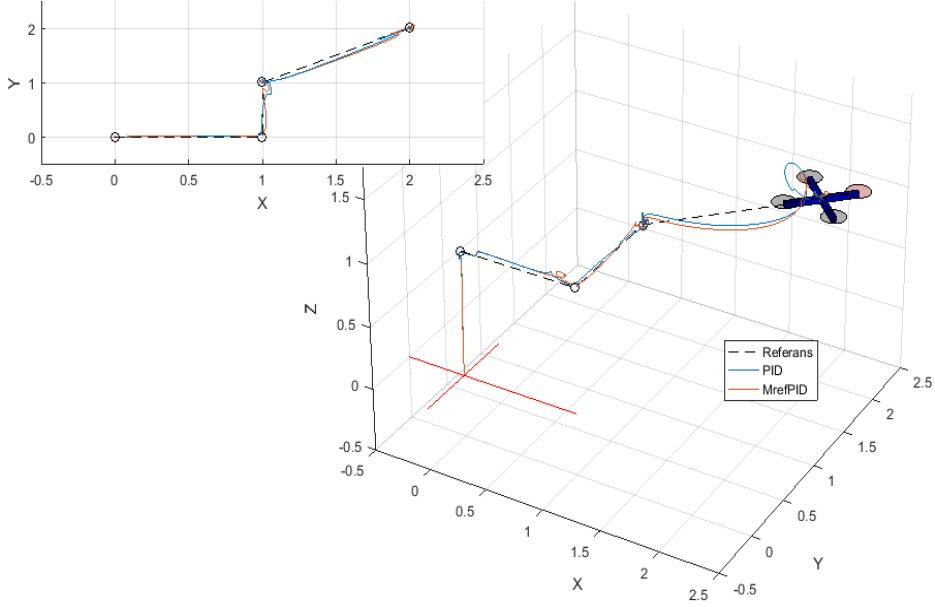
(x doğrultusunda), PID4 (y doğrultusunda) ve uyarlamalı PID denetleyici performansları sırasıyla Şekil 4.6 – Şekil 4.8 de görülmektedir. Şekil 4.9 – Şekil 4.10 ise dar sapma açısı PID5 ve geniş sapma açısı PID6 değişimlerini uyarlamalı PID ile kıyaslamaktadır.

Çizelge 4.2 PID denetleyici katsayıları.

PID no	x, y; K_P, K_I, K_D	z; K_I	p, q, r; K_P, K_I, K_D	Ψ, K_P
PID1	0.30 0.10 0.20	0	3.3 0.2 0.002	6
PID2	0.35 0.20 0.40	0	3.3 1.8 0.002	14
PID3	0.30 0.25 0.20	0	3.3 0.2 0.010	10
PID4	0.25 0.30 0.20	8	3.3 1.8 0.010	10
PID5	0.25 0.10 0.20	0	3.3 1.8 0.002	6
PID6	0.25 0.25 0.30	4	2.1 1.8 0.018	14

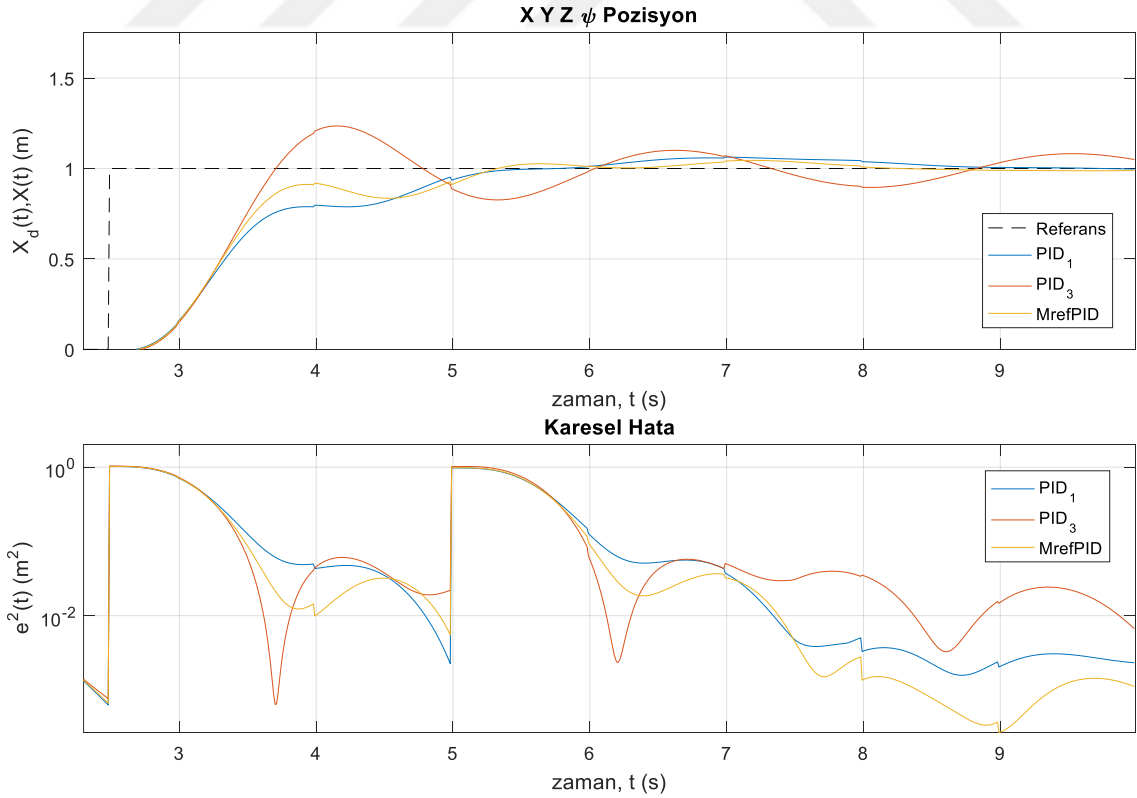
Çizelge 4.3 PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.

PID no	Yol	Karesel Hata
PID1	8.5797	366.7162
PID2	8.5004	381.2126
PID3	11.7593	412.1873
PID4	8.7274	368.7863
PID5	9.0063	369.7497
PID6	8.8154	369.3555
Uyarlamalı PID	8.3566	365.8978



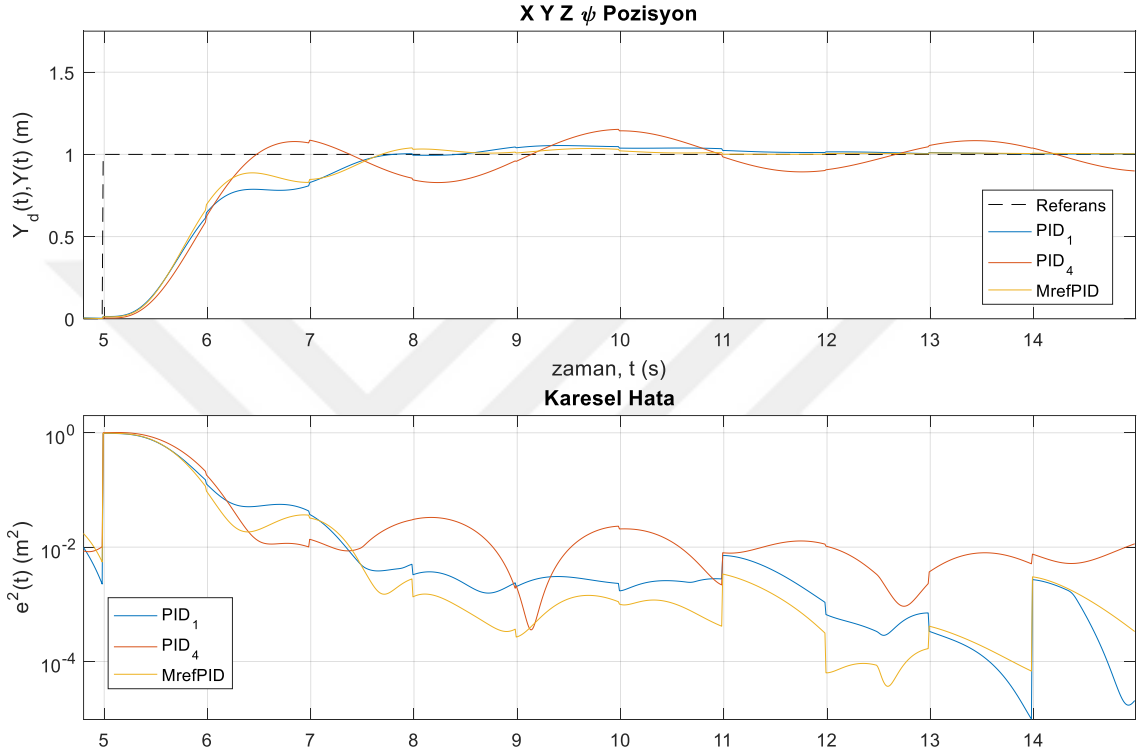
Şekil 4.3 ÇR İHA'nın x,y ve z koordinatlarındaki hareketleri.

Şekil 4.3'te ÇR İHA'nın x,y ve z koordinatlarındaki hareketleri 3 boyutlu olarak gösterilmekte ve izlenen yörünge üzerindeki rota takip oranı incelenmektedir. Kesik çizgiler referansı, turuncu çizgiler MrefPID'yi ve mavi çizgiler PID'yi göstermektedir.



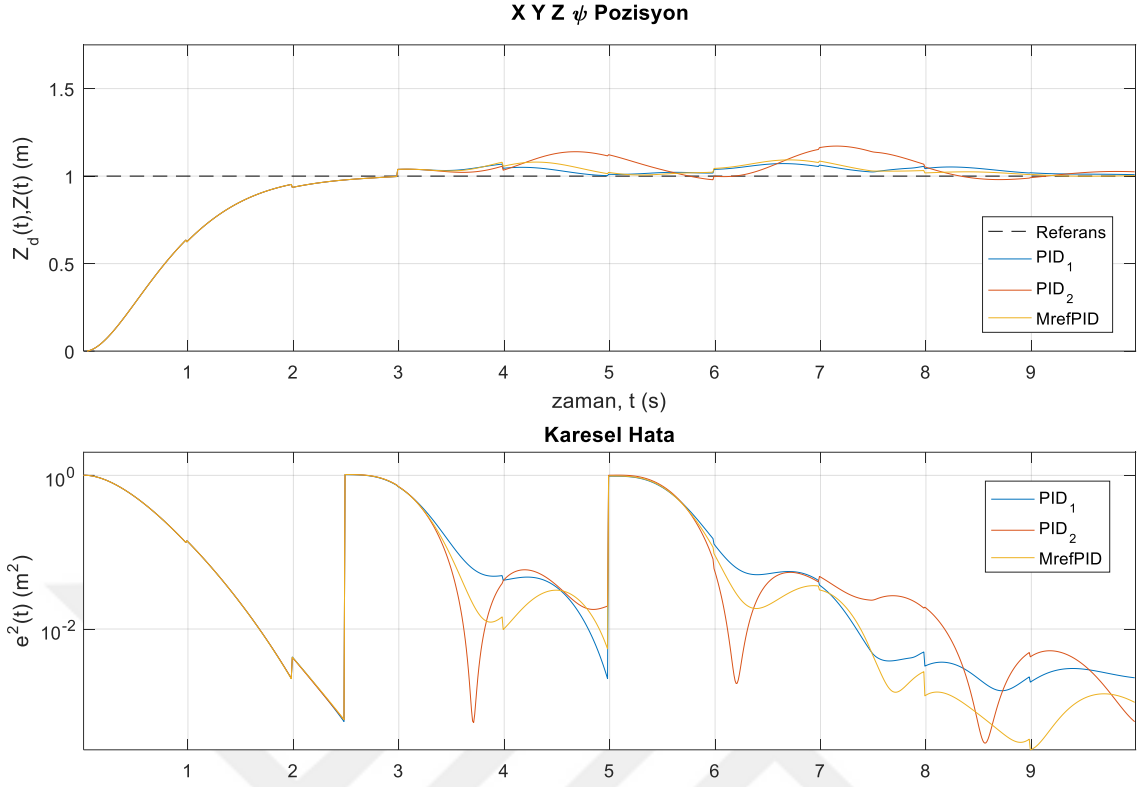
Şekil 4.4 ÇR İHA'nın x koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.

Şekil 4.4'te ÇR İHA'nın PID1, PID3 ve Mref PID katsayılarının, z koordinatındaki değişimi 0-10 saniye aralığında gösterilmektedir. Buna göre, PID3 yerleşme zamanı ve aşım miktarı açısından en kötü performansı sergilerken, aynı kriterler üzerinde en iyi performansı sergileyen MrefPID olarak gözükmektedir. Aynı zamanda MrefPID istenen rotaya en yakın takibi yapmakta ve en az hataya sahip olan parametre olarak görünmektedir.



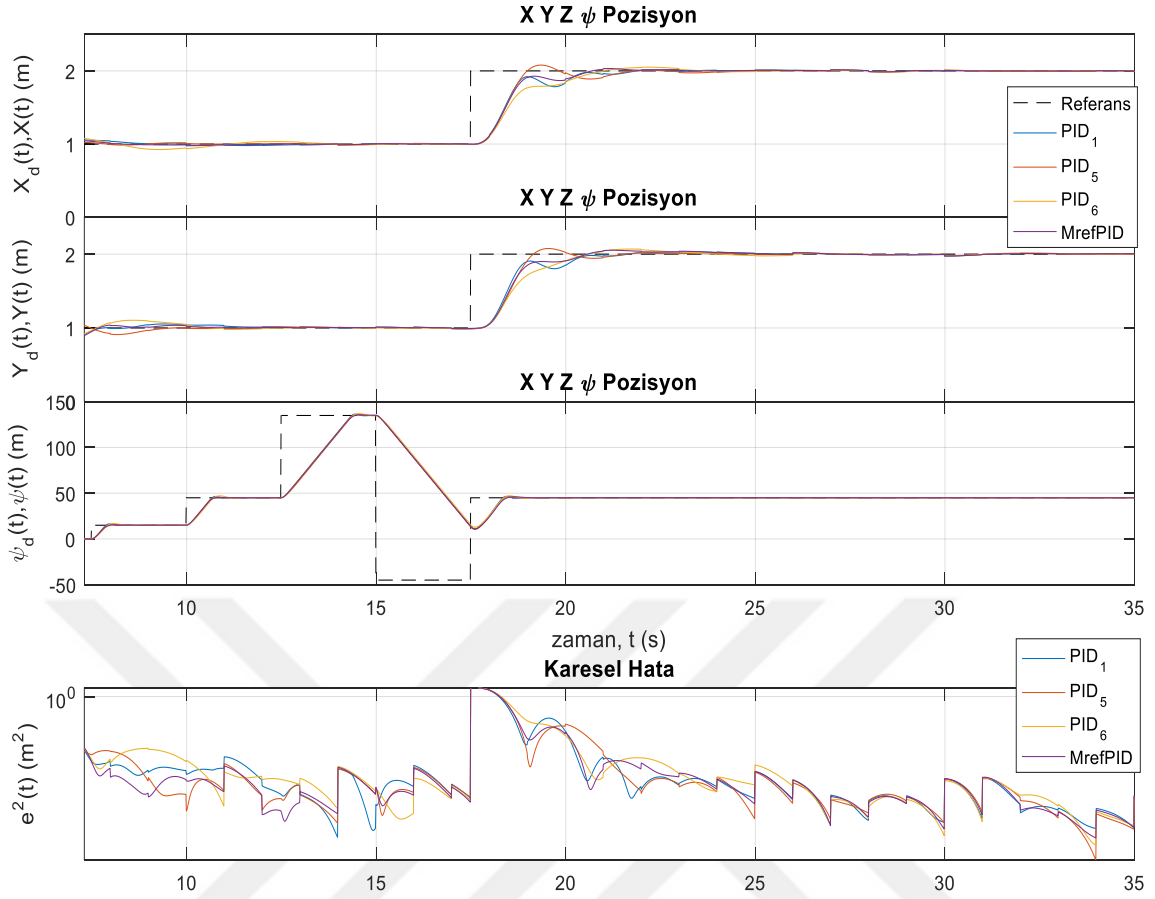
Şekil 4.5 ÇR İHA'nın y koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.

Şekil 4.5'te ÇR İHA'nın PID1, PID4 ve Mref PID katsayılarının, y koordinatındaki değişimi 0-15 saniye aralığında gösterilmektedir. Buna göre, PID4 yerleşme zamanı ve aşım miktarı açısından en kötü performansı sergilerken, aynı kriterler üzerinde en iyi performansı sergileyen MrefPID olarak gözükmektedir. Aynı zamanda MrefPID istenen rotaya en yakın takibi yapmakta ve en az hataya sahip olan parametre olarak görünmektedir.



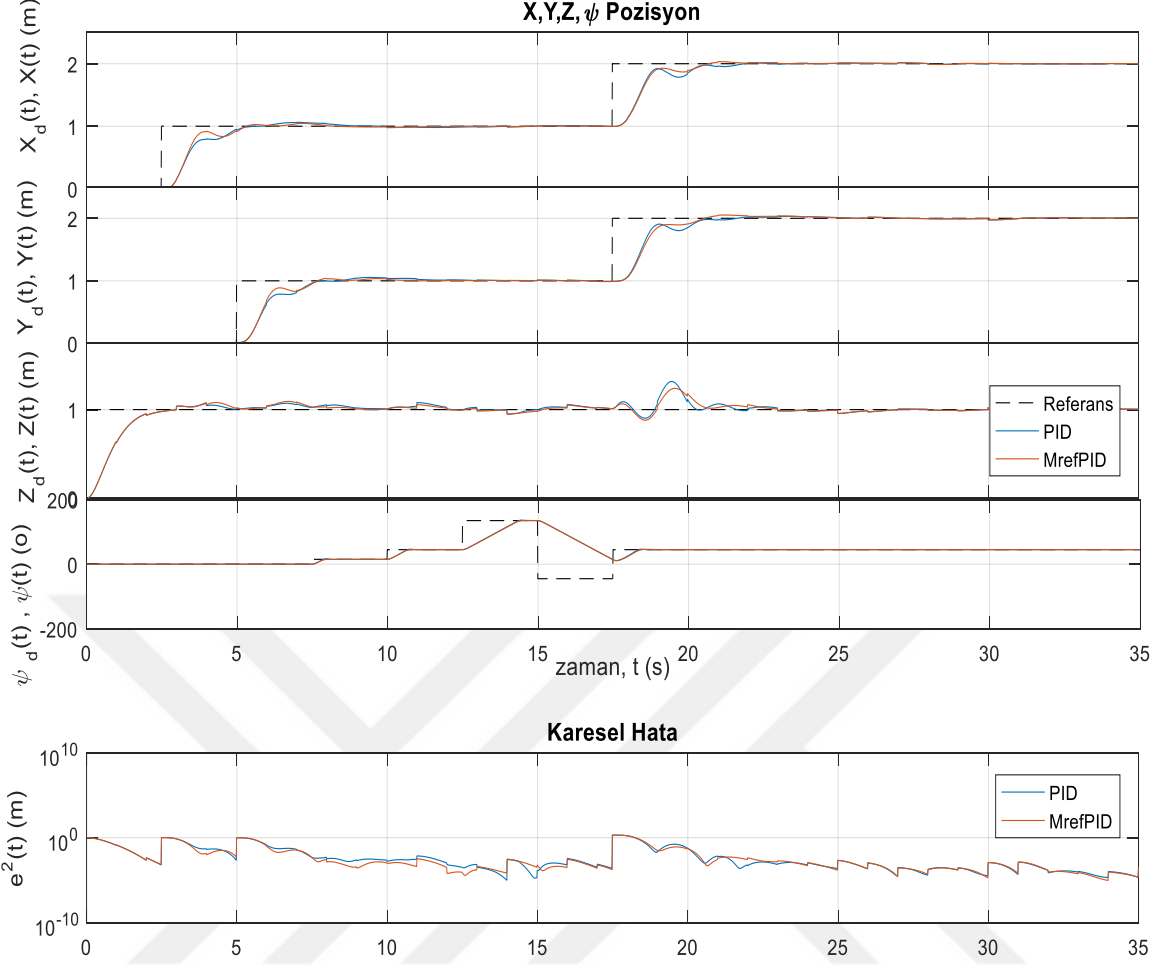
Şekil 4.6 ÇR İHA'nın z koordinatı değişimleri ile karesel hata değişimleri.

Şekil 4.6'da ÇR İHA'nın PID1, PID2 ve Mref PID katsayılarının, z koordinatındaki değişimi 0-10 saniye aralığında gösterilmektedir. Buna göre, PID2 yerleşme zamanı ve aşım miktarı açısından en kötü performansı sergilerken, aynı kriterler üzerinde en iyi performansı sergileyen MrefPID olarak gözükmemektedir. Aynı zamanda MrefPID istenen rotaya en yakın takibi yapmakta ve en az hataya sahip olan parametre olarak görünmektedir.



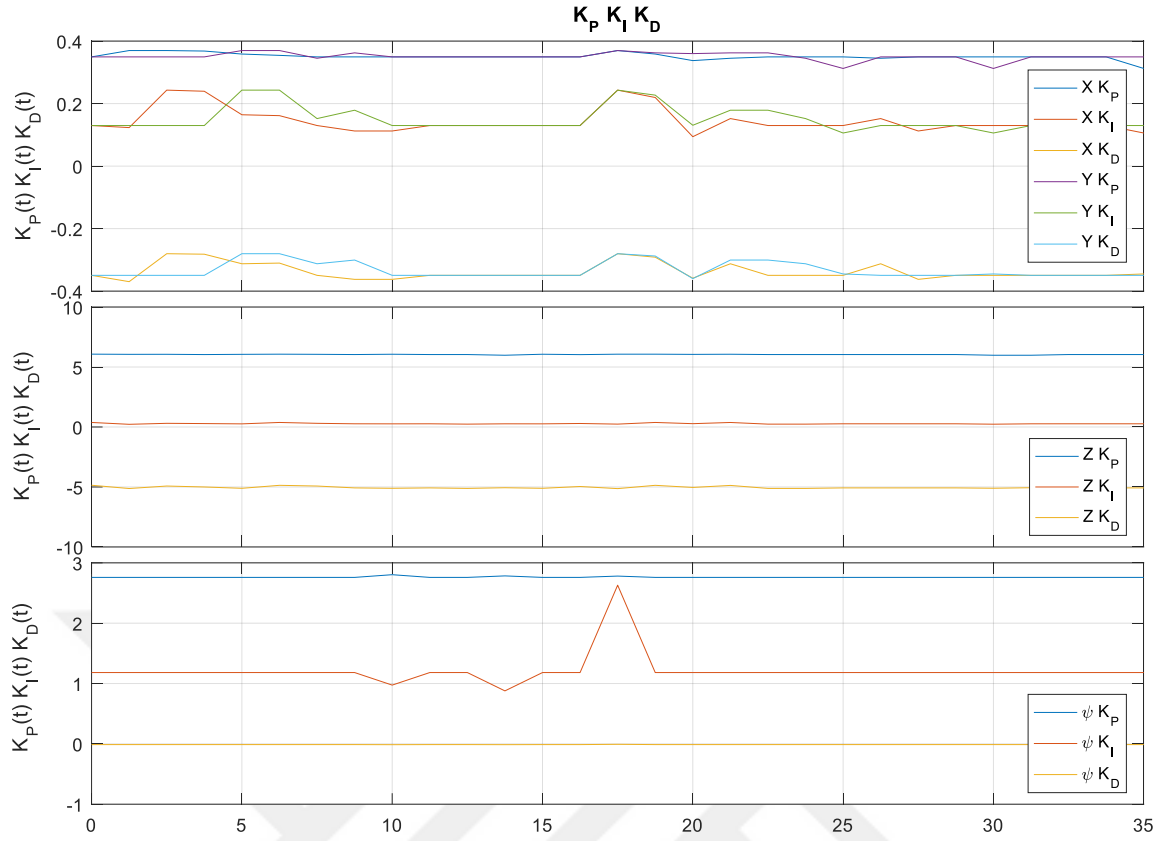
Şekil 4.7 ÇR İHA x, y ve sapma değişimleri ile karesel hata değişimleri.

Şekil 4.7’de ÇR İHA’nın PID1, PID5, PID6 ve Mref PID katsayılarının, x, y ve sapma değişimleri 0-35 saniye aralığında gösterilmektedir. ÇR İHA, 15-20 sn aralığında X ve Y koordinatları üzerinde hareket etmektedir. Sapmayı da 13-18 sn. aralıklarında gerçekleştirmiştir. Yerleşme zamanı en kısa olan PID5’ tir; ancak aşım oranı ve hata oranı en az Mref PID olarak görünmektedir.



Şekil 4.8 ÇR İHA x, y, z ve sapma değişimleri ve karesel hata değişimlerinin PID ve Mref PID ile kıyaslanması.

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, mavi çizgi PID denetimini gösterirken turuncu çizgi Mref PID’yi göstermektedir. X ekseninde 0-5 saniye arasında ve 15-20 saniye arasında, Y ekseninde, 5-10 saniye ve 15-20 saniye arasında, Z ekseninde 0-5 ve 20 Saniye arasında hareket etmekte ve 10-20 saniye arasında sapma hareketi yaptığı gözlemlenmektedir. Mref PID, PID ile karşılaştırıldığında, Mref PID’nın aşım oranı daha azdır. Bu oran Z eksenindeki hareketinde daha belirgin olarak görülmektedir.



Şekil 4.9 ÇR İHA x, y, z ve sapma hareketlerinde K_p, K_i, K_d değişimi.

Şekil 4.9'da ÇR İHA x, y, z ve sapma hareketlerinde K_p, K_i, K_d değişimi gösterilmektedir. Değişimler, Çizelge 4.1'de bahsedilen parametrelere paralellik göstermektedir.



BÖLÜM 5

İHA'NIN BENZETİM UYGULAMALARI

Bu bölümde, ÇR İHA'nın MATLAB programı üzerinden rota takip benzetimi yapılmaktadır. Bu benzetim, yapılırken PID ve uyarlamalı PID olmak üzere iki farklı denetim yaklaşımı uygulanmakta ve birbirleriyle olan performansları karşılaştırılmaktadır.

5.1 ROTA TAKİP UYGULAMASI

Bu benzetimde, düzenlenen denetim sistemleri ve rota takip modellemesi geliştirilmiştir. Modellemede kullanılan parametreler Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

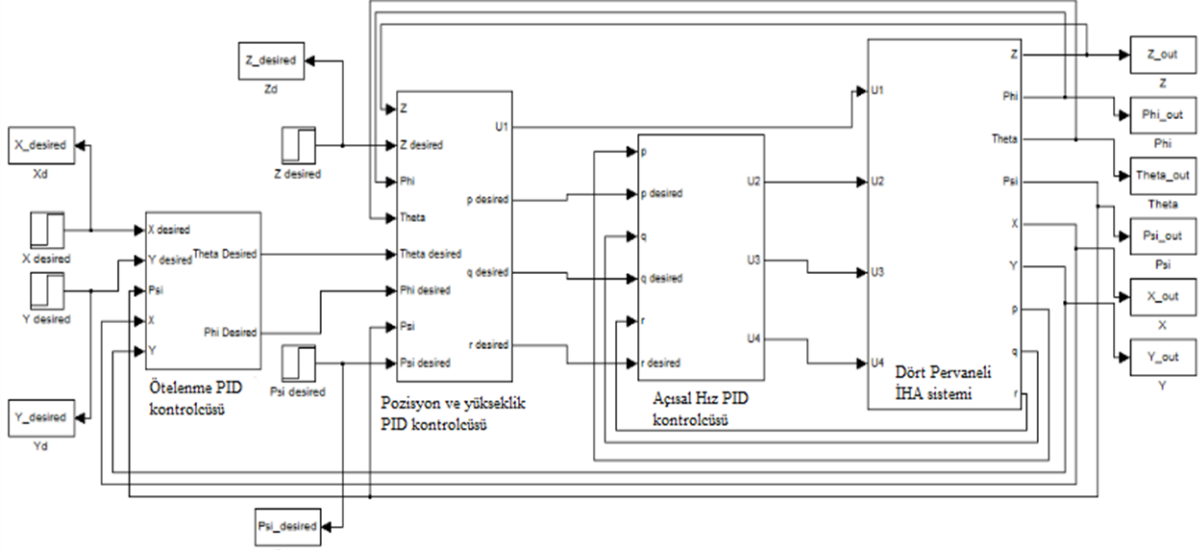
Çizelge 5.1 ÇR İHA'da kullanılan parametreler.

Parametreler	
Yer çekimi ivmesi	$9.81 \frac{m}{s^2}$
ÇR İHA ağırlığı	1.4 kg
Her bir motorun merkeze uzaklığı	0.56 m
Pervanenin yarıçapı	0.1 m
İHA uçuş süresi	60 sn
Örnekleme aralığı (T)	0.01 sn

Bölüm 3.2'de bahsedildiği üzere; u_1 : motorların toplam itkisi (N-m), u_2 : yalpalama açısı girişi (N-m), u_3 : yunuslama açısı girişi (N-m), u_4 : sapma açısı girişi (N-m) 'dir.

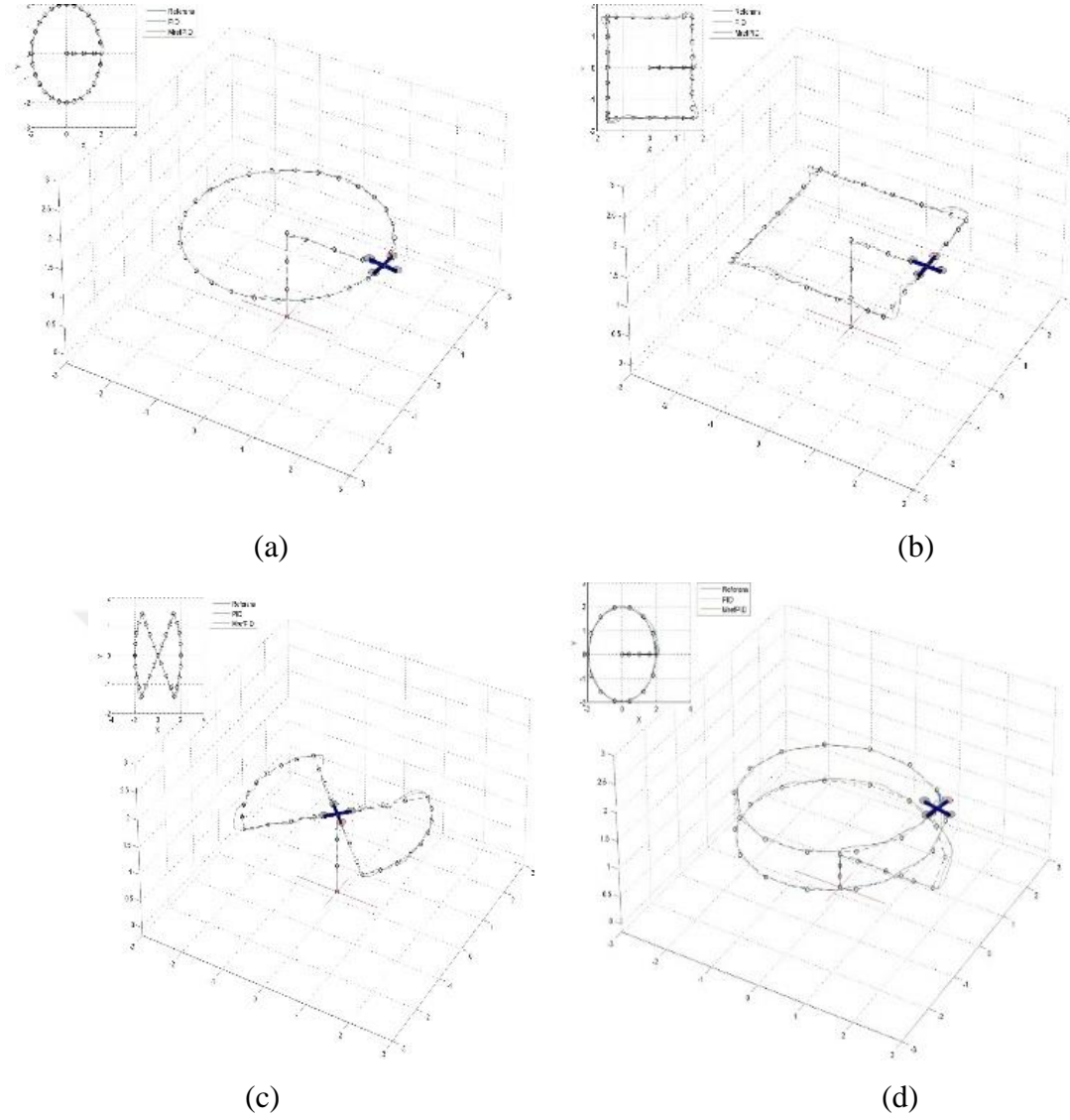
Şekil 5.1'de ÇR İHA'nın MATLAB blok şeması modeli gösterilmektedir. Bahsedilen model, üç ana PID bloğu içermektedir. Bunlar; ötelenme PID denetleyicisi, pozisyon ve yükseklik PID denetleyicisi ve açısal hız PID denetleyicisidir.

- x ve y değişkenleri ve sapma (Ψ) açısı, ÇR İHA'nın ötelenme hareketi üzerindeki denetimini,
- z, yalpalama (ϕ)-yunuslama (θ)-sapma (Ψ) açıları pozisyon ve yükseklik hareketi üzerindeki denetimini,
- p, q ve r değerleri de ÇR İHA'nın açısal hız denetimini sağlamaktadır.



Şekil 5.1 ÇR İHA'nın MATLAB blok şeması modeli.

Burada üç PID denetleyiciden çıkan veriler Bölüm 3.2'de bahsedilen u_1, u_2, u_3 ve u_4 değerlerini diğer bir tabirle kontrol girişlerini düzenlemektedir. PID denetim algoritmasına sahip ÇR İHA'nın x, y ve z koordinatları üzerindeki hareketleri, daire, dikdörtgen, sonsuz ∞ ve spiral bir yörünge üzerinde incelenmiş olup, yörüngeleri takip etme performansları sırasıyla Şekil 5.2'de gösterilen, (a), (b), (c) ve (d) olmak üzere, 4 farklı senaryo üzerinde incelenmiştir.



Şekil 5.2 Dairesel (a), dikdörtgen (b), sonsuz ∞ (c) ve spiral (d) yörünge.

Bahsedilen yörüngeler üzerinde takip performansını incelenmesinin sebebi; senaryo 1 için yumuşak dönüşlerdeki, senaryo 2 için sert dönüşlerdeki, senaryo 3 için ters dönüşlerdeki ve senaryo 4 için de rampa çıkarken ve yumuşak dönüş verirkenki takip oranını incelemek ve hata miktarını tespit etmektir.

Hata miktarı, belirlenen rota ile ÇR İHA'nın rotayı takip etme performansı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Rota takibinde $x_d(t)$, $y_d(t)$, $z_d(t)$ referans rotayı belirleyecek olursa $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ İHA'nın konumuna göre toplam hata;

$$E_T = \sum_{t=1}^N \sqrt{(x_d(t) - x(t))^2 + (y_d(t) - y(t))^2 + (z_d(t) - z(t))^2} \quad (5.1)$$

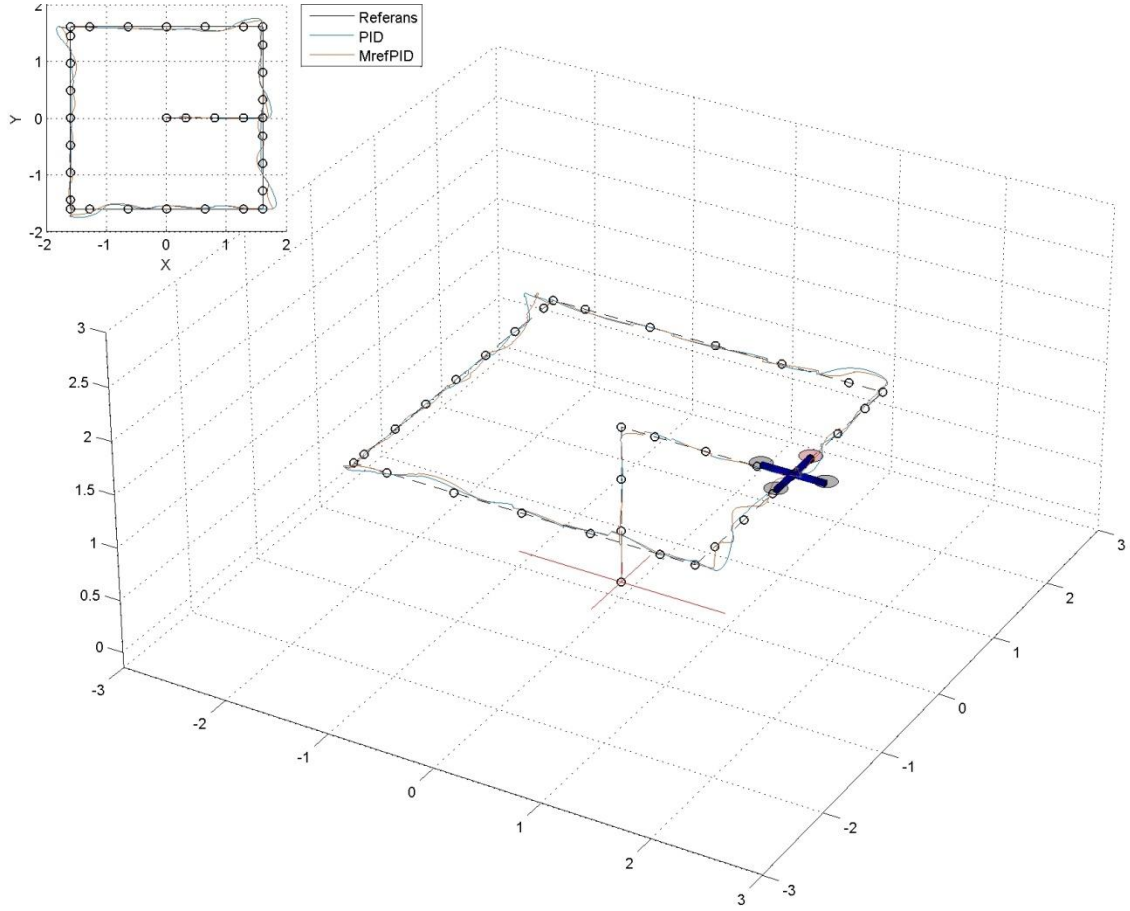
ile elde edilecektir. Ayrıca toplam rota referans yol İHA'nın izlediği toplam yol da konum bilgisine dayalı hesaplanmaktadır.

5.2 PID VE UYARLAMALI PID İLE İHA'NIN ROTA TAKİP BENZETİMİ

Bu çalışmada, PID ve uyarlamalı PID denetleyici ile ÇR İHA'nın rota takip performansı incelenmiştir. ÇR İHA'nın x, y ve z düzlemleri ve yalpalama (ϕ)-yunuslama (θ)-sapma (Ψ) açıları ve p, q ve r için P, I ve D denetleyici katsayıları sırasıyla Çizelge 5.2 'de tekrar sunulmaktadır.

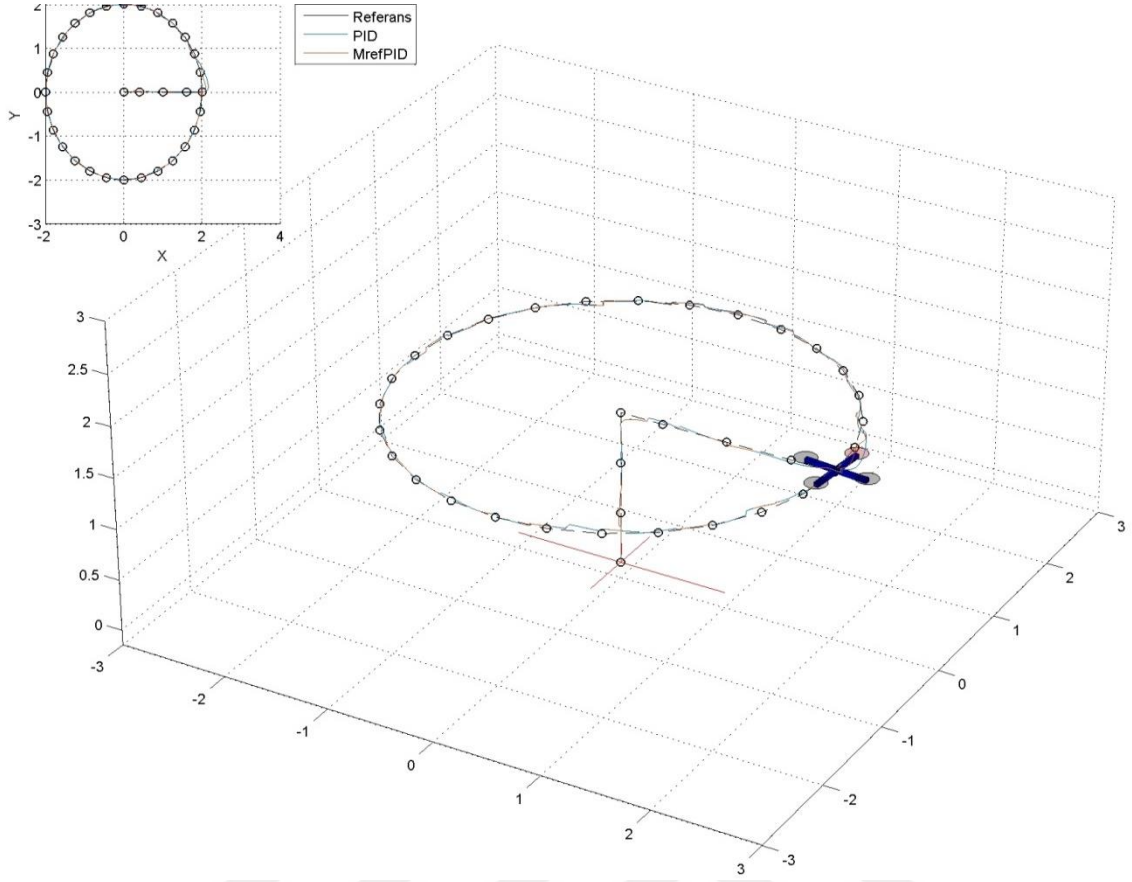
Çizelge 5.2 PID denetleyici katsayıları.

PID no	x, y; K_P, K_I, K_D	z; K_I	p, q, r; K_P, K_I, K_D	Ψ, K_P
PID1	0.30 0.10 0.20	0	3.3 0.2 0.002	6
PID2	0.35 0.20 0.40	0	3.3 1.8 0.002	14
PID3	0.30 0.25 0.20	0	3.3 0.2 0.010	10
PID4	0.25 0.30 0.20	8	3.3 1.8 0.010	10
PID5	0.25 0.10 0.20	0	3.3 1.8 0.002	6
PID6	0.25 0.25 0.30	4	2.1 1.8 0.018	14



Şekil 5.3 ÇR İHA'nın MATLAB ortamındaki benzetimi.

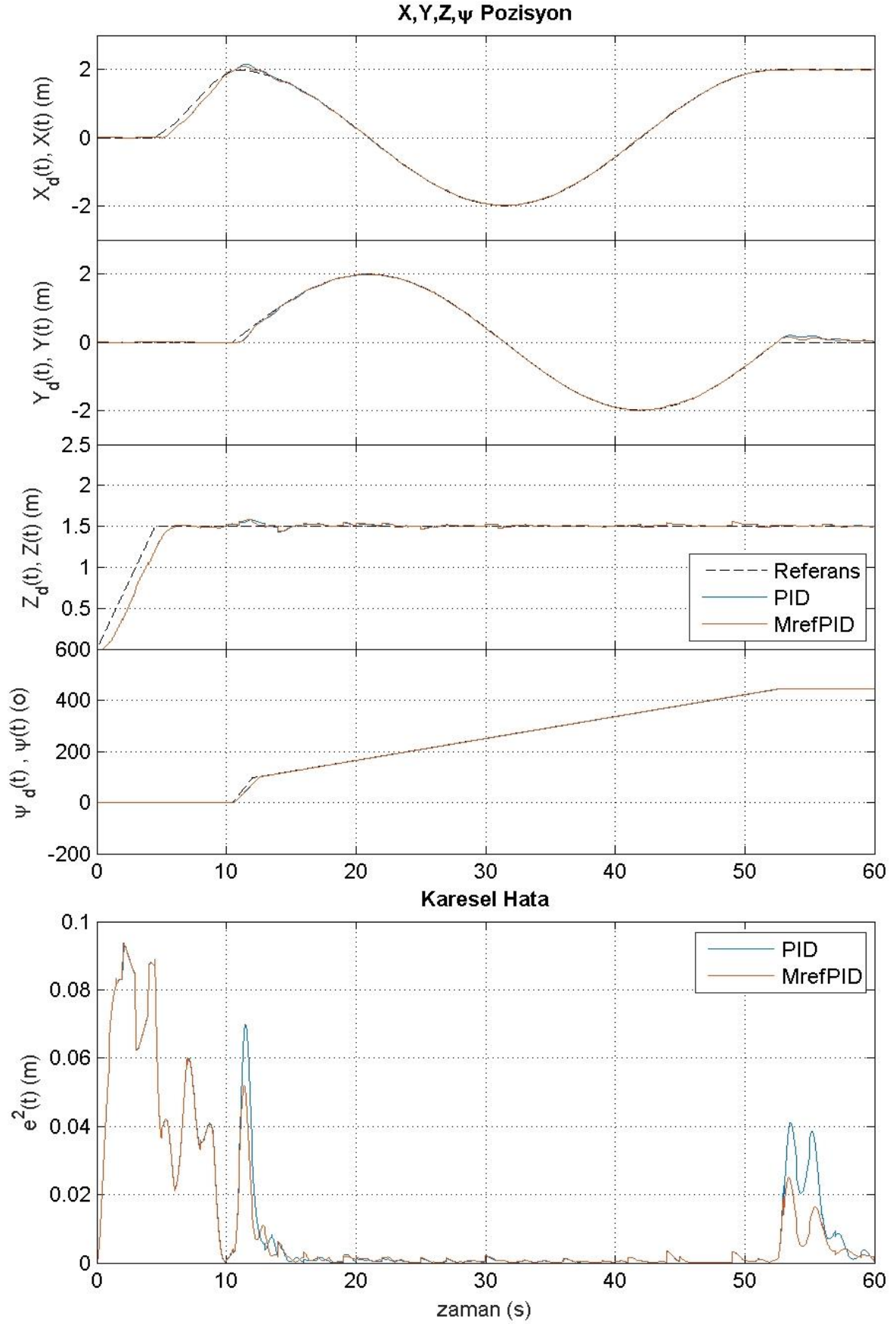
ÇR İHA'nın MATLAB ortamındaki benzetimi Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, 0'a 0 noktası başlangıç noktası olarak kabul edilmiş ve ÇR İHA'nın üç boyutlu rota takibi gösterilmiştir. ÇR İHA'nın hareket denklemleri kullanılarak Çizelge 5.2'de verilen PID denetleyici parametrelerinden oluşturulan modeli, MATLAB ortamına aktarılmış ve benzetimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.4 Dairesel geometriye sahip yörünge.

Dairesel geometriye sahip rota takibinde İHA'nın PID1 ve Uyarlamalı PID yörünge takibi Şekil 5.4'de görülmektedir. Burada Uyarlamalı PID için kalkış durumunda PID2 kullanılırken düz yol için PID3, keskin dönüş de PID6 ve dar açı harekisinde PID5 kullanılmaktadır. Dairesel geometride ÇR İHA kalkışı yapmakta ve sonrasında x düzleminde 0 noktasından 2 noktasına hareket etmektedir. 2 noktasından yumuşak dönüşü yapıp, rotayı 360° dönerek tamamlamaktadır.

Şekilde 5.5'te x, y ve z pozisyon takibi ile birlikte Ψ sapma açısındaki pozisyon değişimi gösterilmektedir. Karesel hata değişimi hem PID1 denetleyici hem de Uyarlamalı PID denetleyici için görülmektedir. Buna ek olarak, Çizelge 5.3 dairesel yörünge için tüm PID denetleyiciler ile uyarlamalı PID denetleyici için toplam rota uzunluğu 16,1834 m için izlenen yolu ve toplam ortalama karesel hata E_T değerini sıralamaktadır.



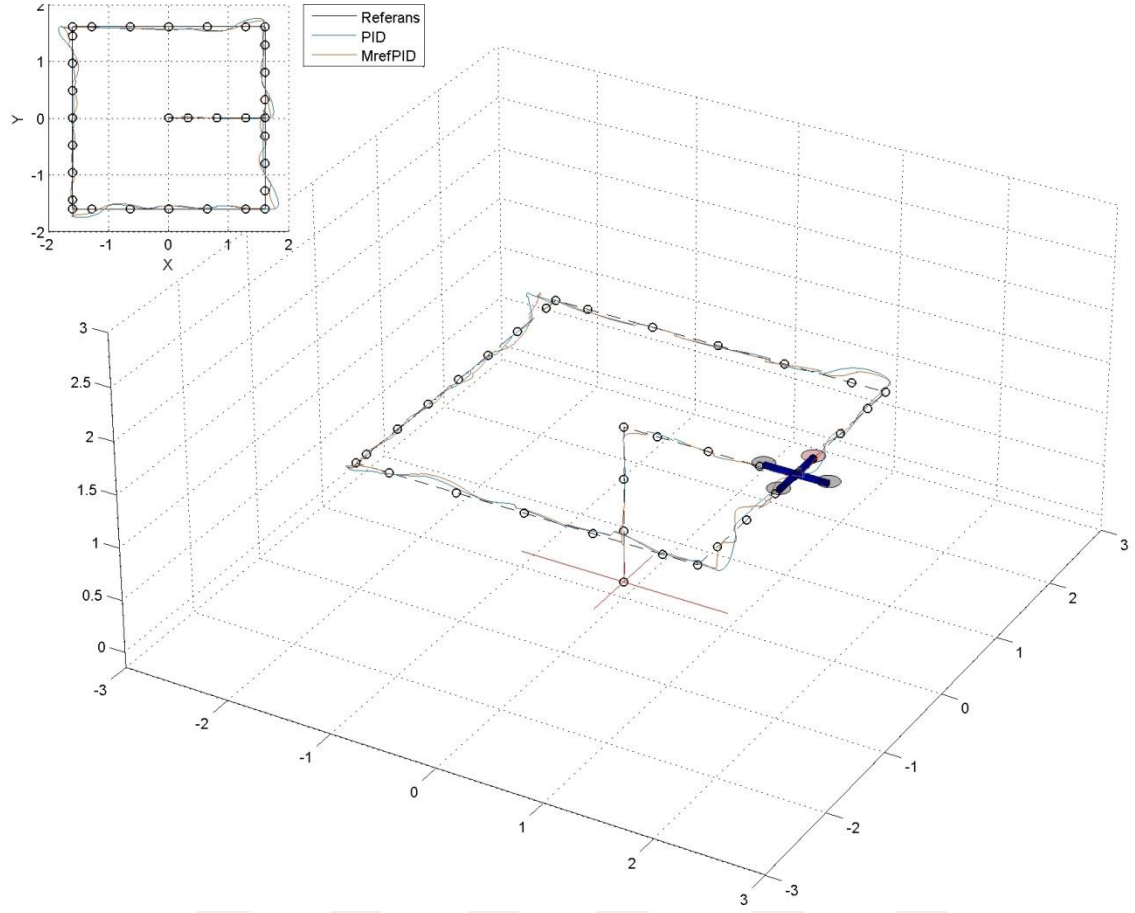
Şekil 5.5 Dairesel rota x, y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.

Çizelge 5.3 Dairesel rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.

PID no	Yol(m)	Hata E_T (m)
PID1	17.9704	72.2806
PID2	17.7347	94.7201
PID3	21.2646	112.6983
PID4	21.6301	142.1024
PID5	17.9362	82.9535
PID6	18.1635	98.9933
Uyarlamalı PID	17.7799	65.0385

Dikdörtgen geometriye sahip rota takibinde İHA'nın PID1 ve Uyarlamalı PID yörünge takibi Şekil 5.6'da görülmektedir. Burada Uyarlamalı PID için kalkış durumunda PID2 kullanılırken düz yol için PID3, keskin dönüşte PID6 kullanılmaktadır. ÇR İHA öncelikle kalkış yapmakta ve x düzleminde 0'dan 1.5 noktasına hareket etmektedir. Daha sonrasında y düzleminde 1.5 noktasına hareket edip, x düzleminde keskin dönüş yapmaktadır.

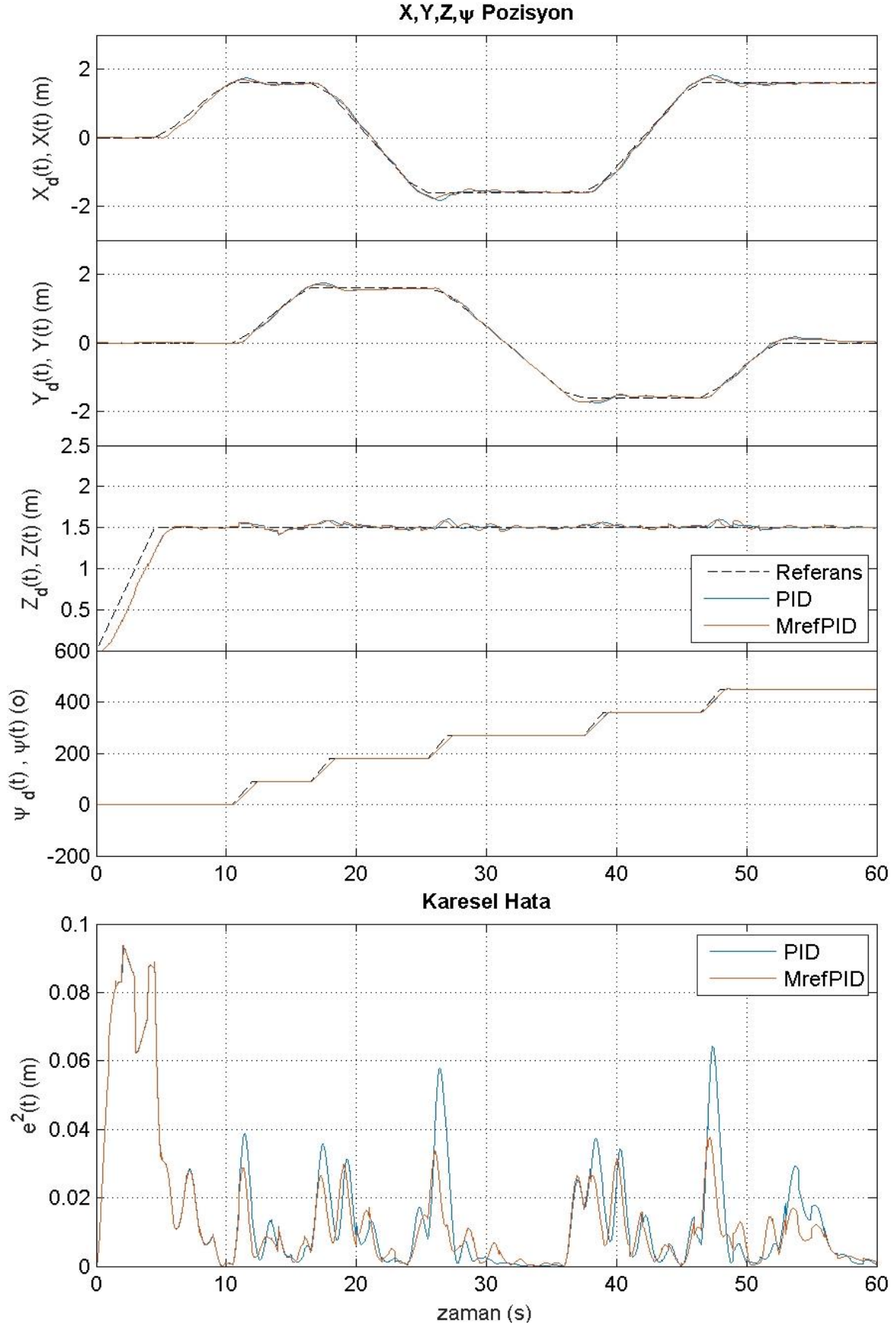
Şekil 5.7 ise x, y ve z pozisyon takibi ile birlikte Ψ sapma açısındaki pozisyon değişimini göstermektedir. Ayrıca karesel hata değişimi de hem PID1 denetleyici hem de Uyarlamalı PID denetleyici için görülmektedir. Ayrıca Çizelge 5.3 dairesel yörünge için tüm PID denetleyiciler ile uyarlamalı PID denetleyici için toplam rota uzunluğu 15,9 m için izlenen yolu ve toplam ortalama karesel hata E_T değerini sıralamaktadır.



Şekil 5.6 Dikdörtgen geometriye sahip yörünge.

Çizelge 5.4 Dikdörtgen rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.

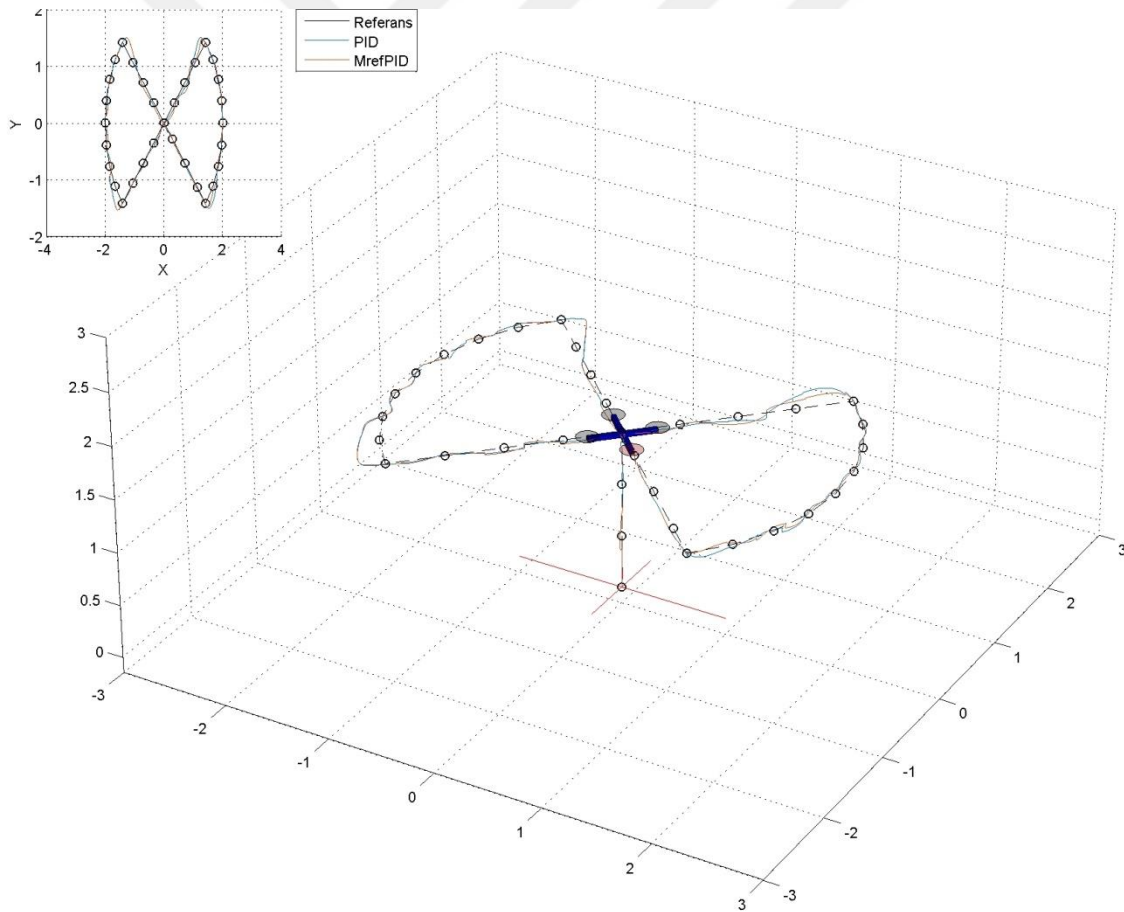
PID no	Yol(m)	Hata E_T (m)
PID1	18.7360	95.5086
PID2	19.2344	140.5272
PID3	20.6301	109.4833
PID4	21.0036	157.6915
PID5	18.8765	111.4963
PID6	19.1577	156.2513
Uyarlamalı PID	18.7357	85.7571



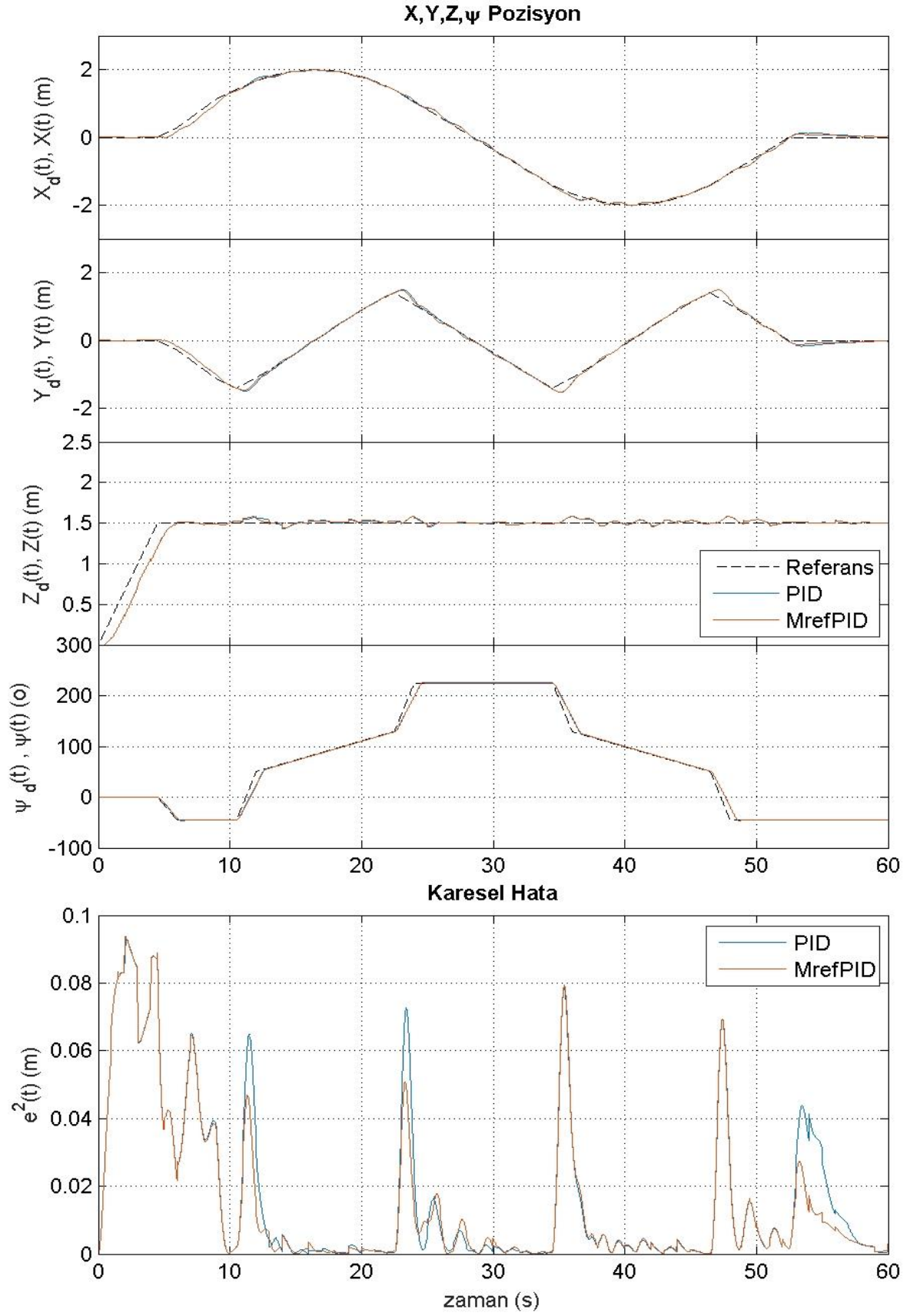
Şekil 5.7 Dikdörtgen rota x , y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.

Sonsuz ∞ geometriye sahip rota takibinde İHA'nın PID1 ve Uyarlamalı PID yörünge takibi Şekil 5.8'de görülmektedir. Burada uyarlamalı PID için kalkış durumunda PID2 kullanılırken düz yol için PID3, keskin dönüş de PID6 ve dar açı dönüş için PID5 kullanılmaktadır. ÇR İHA kalkışı sağlamaktadır, daha sonrasında x ve y düzleminde hareketi sağlanarak düz rotada hareketi sağlanmaktadır. ÇR İHA'nın keskin dönüşü sağlanmakta ve dairesel rotadaki hareketi incelenmektedir.

Şekil 5.9'da ise x, y ve z pozisyon takibi ile birlikte Ψ sapma açısındaki pozisyon değişimi gösterilmektedir. Ayrıca karesel hata değişimi de hem PID1 denetleyici hem de Uyarlamalı PID denetleyici için görülmektedir. Ayrıca Çizelge 5.5'te sonsuz ∞ yörünge için tüm PID denetleyiciler ile uyarlamalı PID denetleyici için toplam rota uzunluğu 15.9164 m için izlenen yolu ve toplam ortalama karesel hata E_T değerini sıralamaktadır.



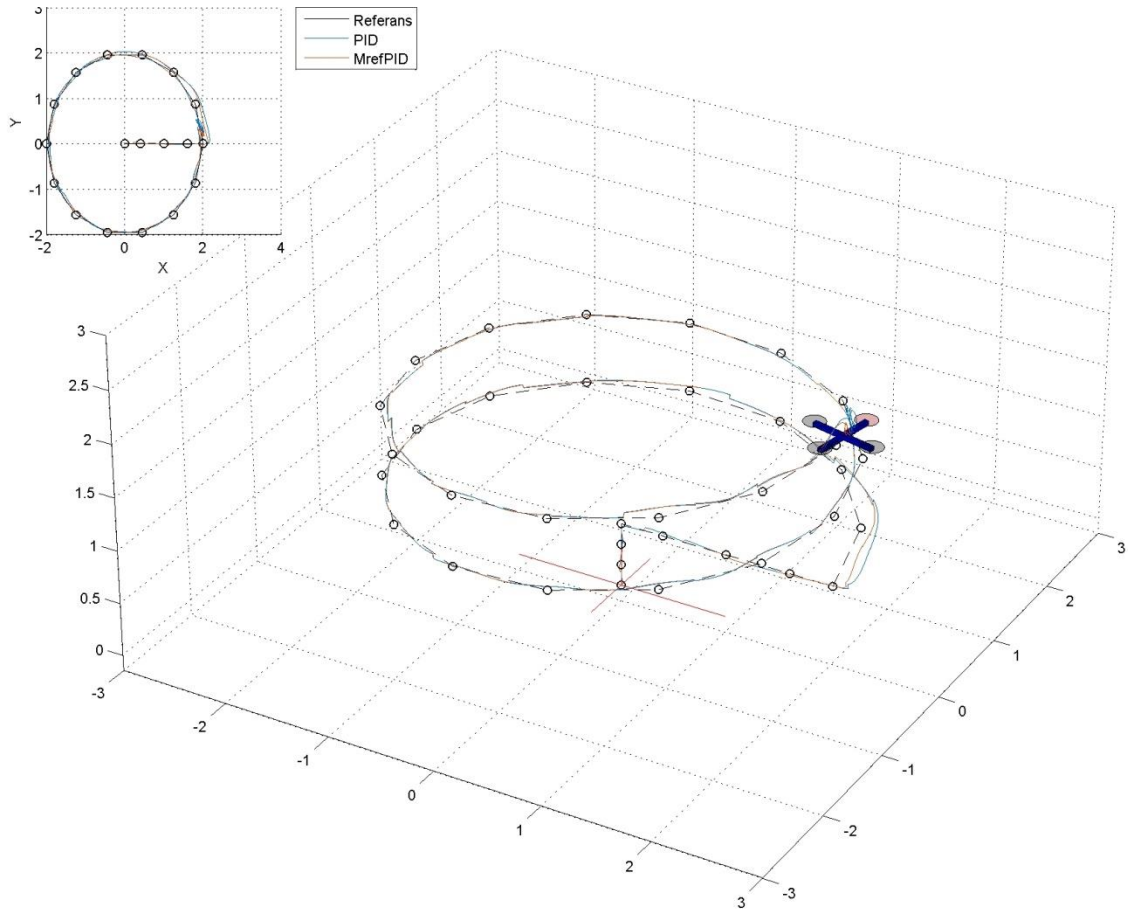
Şekil 5.8 Sonsuz ∞ geometriye sahip yörünge.



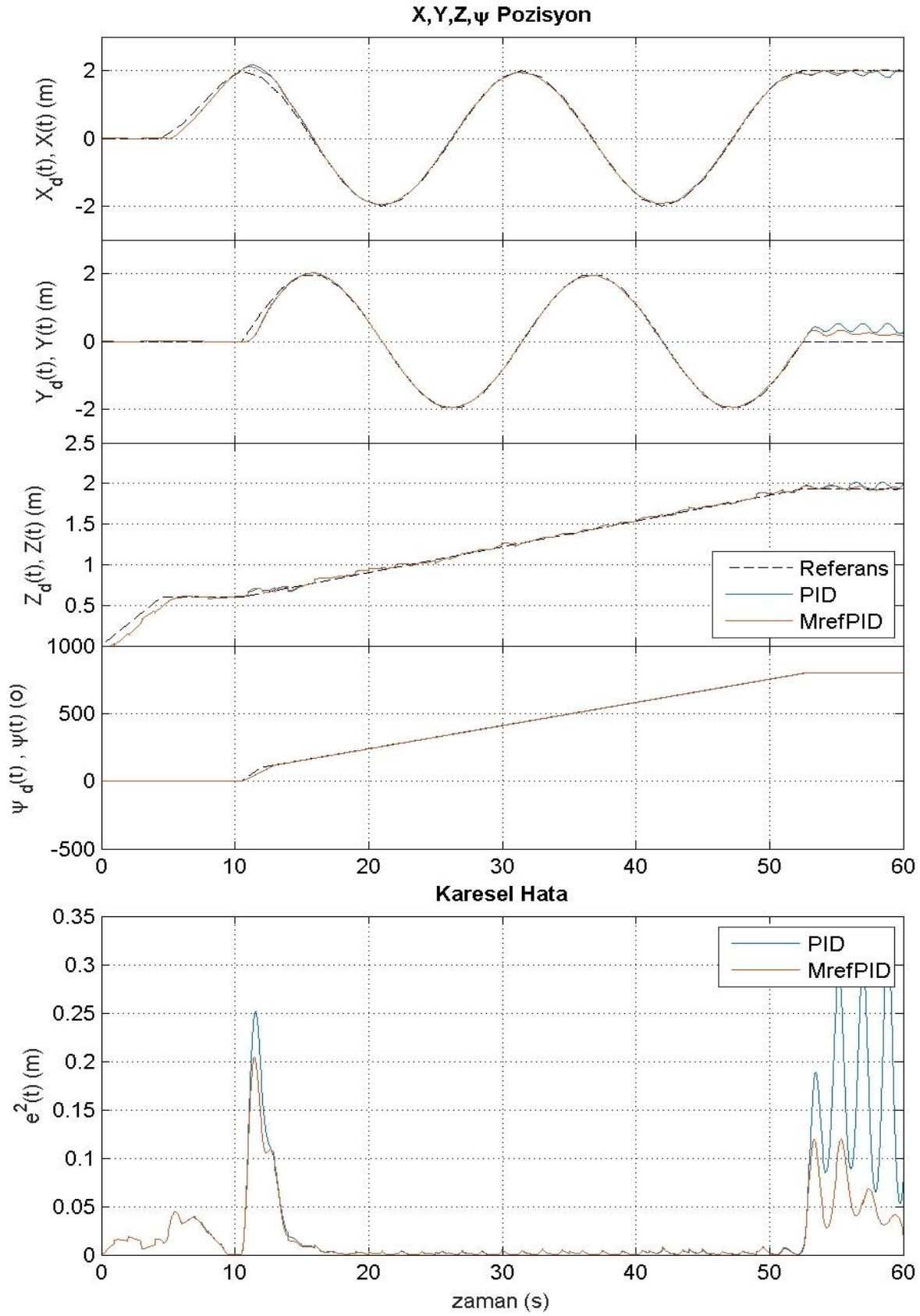
Şekil 5.9 Sonsuz ∞ rota x , y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.

Çizelge 5.5 Sonsuz ∞ rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.

PID no	Yol(m)	Hata E_T (m)
PID1	18.4795	100.4461
PID2	19.3062	212.3199
PID3	21.9077	146.8236
PID4	21.0057	152.012
PID5	18.4934	133.1479
PID6	19.6254	218.2241
Uyarlamalı PID	18.4053	91.4581



Şekil 5.10 Spiral geometriye sahip yörünge.



Şekil 5.11 Spiral rota x , y ve z pozisyonu, sapma açısı ve karesel hata değişimi.

Spiral geometriye sahip rota takibinde İHA'nın PID1 ve Uyarlamalı PID yörünge takibi Şekil 5.10'da görülmektedir. Burada Uyarlamalı PID için kalkış durumunda PID2 kullanılırken düz yol için PID3, keskin dönüş de PID6 ve dar açı harekide PID5 kullanılmaktadır. ÇR İHA kalkışı sağlamaktadır, daha sonrasında x, y ve z düzleminde hareketini sağlayarak, rampa çıkışı yapılmakta ve ÇR İHA'nın 360° dönüşü sağlanmaktadır.

Şekil 5.11'de ise x, y ve z pozisyon takibi ile birlikte sapma açısındaki pozisyon değişimi gösterilmektedir. Karesel hata değişimi de hem PID1 denetleyici hem de uyarlamalı PID denetleyici için görülmektedir. Ayrıca Çizelge 5.6'te gösterilen spiral yörünge için tüm PID denetleyiciler ile uyarlamalı PID denetleyici için toplam rota uzunluğu 27.7053 m için izlenen yolu ve toplam ortalama karesel hata E_T değerini sıralamaktadır.

Çizelge 5.6 Spiral rota PID ve uyarlamalı PID denetleyici performansları.

PID no	Yol	Hata E_T (m)
PID1	31.4297	189.6199
PID2	30.1838	504.5796
PID3	31.1916	200.4295
PID4	30.9629	320.6254
PID5	29.1018	352.6954
PID6	29.5485	404.3839
Uyarlamalı PID	29.9434	106.8730

Uyarlamalı PID yaklaşımında, hata oranının azaltılması amaçlanmıştır. Buna göre; PID1 denetleyicisi için karesel hatalar dairesel geometriye sahip yörünge için; 75.7269 m dikdörtgen geometriye sahip yörünge için; 95.5086 m sonsuz ∞ geometriye sahip yörünge için; 100.4461 m ve spiral geometriye sahip yörünge için 189.6199 m olarak bulunmuştur. Uyarlamalı PID denetleyici durumunda ise dairesel geometriye sahip yörünge için; 65.0385 m, dikdörtgen geometriye sahip yörünge için; 85.7571 m sonsuz ∞ geometriye sahip yörünge için; 91.4581m ve spiral geometriye sahip yörünge için 106.8730 m olarak bulunmuştur.



BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, ÇR İHA için sistem tanılaması ve modellenmesi gerçekçi bir şekilde yapılmıştır.

İlk aşamada, ÇR İHA'nın belirli koşullar altında doğrusal olmayan model benzetiminin temelini oluşturan hareket denklemleri elde edilmiştir. İkinci aşamada PID ve uyarlamalı PID denetimleri açıklanmış ve uyarlamalı PID için kestirim yöntemine değinilmiştir. ÇR İHA'nın hareketi incelenerek birim basamak tepkileri çizdirilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Üçüncü aşamada, daire, dikdörtgen, sonsuz ∞ ve spiral geometrik şekiller üzerinden rota takibi yapılmış ve PID ve uyarlamalı PID etkileri grafikler ve hata miktarları karşılaştırılarak, hangisinin daha iyi sonuç verdiği incelenmiştir.

Referans noktalarını takip etme performansı ölçülmüş ve x, y ve z düzlemindeki ve sapma açısındaki karesel hataları MATLAB benzetim ortamı üzerinden kıyaslanmıştır. Aşımın yüksek, sistemin yerleşme zamanının uzun veya sürekli hal hatasının bulunduğu durumlarda uyarlamalı yaklaşımlar denenerek K_P , K_I ve K_D parametreleri x, y, z değerleri üzerinden değiştirilerek en uygun PID katsayıları bulunmuştur.

PID denetleyicisi, parametre kazançlarının kolay ayarlanması, tasarımı açısından avantajlı olmasına rağmen, matematiksel model ile ilişkilendirilen doğrusal olmayan ve kesin durumlar içermeyen ÇR İHA modellerinde, İHA'nın hareketini ve performansını sınırlandırmaktadır.

Sonuç olarak, ani manevraların olduğu (gürültü, sarsıntı gibi) durumlarda, uyarlamalı PID yaklaşımların gerekliliği ortaya konulmuştur. Buna ek olarak, sistem için uygun PID kazanç değerleri elde edilince, kararlı ve dengeli bir uçuş gözlemlenmiştir. Ayrıca PID yaklaşımıyla kıyaslandığında, referans takip etme hatası daha düşüktür. Bu yüzden, uyarlamalı PID denetleyiciler, diğer geleneksel PID denetleyiciler için ciddi bir alternatif olarak düşünülebilir.

Gelecekte bu çalışma bahsedilen benzetim çalışmalarının deneysel uygulanması, görüntü işleme ile rota belirleme, optimizasyon ve bulanık mantık ile PID gibi çalışmalara yön verebilecektir. Tez çalışmasındaki benzetim, ek açıklamada bahsedilen modellemeler ile gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Demiryürek A** (2018) Bir Dörtpervanelinin Modellenmesi ve Denetimi. *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 132 s.
- [2] **Ercan C, Gencer C** (2013) İnsansız Hava Sistemleri Rota Planlaması Dinamik Çözüm Metodları ve Literatür Araştırması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1 (2): 51-72.
- [3] **Demir B E, Bayır R and Duran F** (2016) Real-time Trajectory Tracking of an Unmanned Aerial Vehicle Using a Self-tuning Fuzzy Proportional İntegral Derivative Controller, *International Journal of Micro Air Vehicles*, 8 (4): 252-268.
- [4] **Altan A, Köksal K ve Hacıoğlu R** (2017) Vektör Alan Kılavuzu Yöntemi ile Görsel Çizgi Takibi için İnsansız Hava Aracı Üzerindeki Yalpanın Model Öngörülü Denetimi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7 (1): 218-227.
- [5] **Köksal K, Sürücü D, Sürücü M and Hacıoğlu R** (2014) Visual Line Tracking with Vector Field Guidance for UAV. *22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 22nd, ISBN: 978-1-4799-4874-1, IEEE, e-book, 646-649.
- [6] **Sürücü D, Sürücü M, Köksal K and Hacıoğlu R** (2015) Visual Tracking and Control of Unmanned Aerial Vehicle. *23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Malatya, 2015 23th, ISBN: 978-1-4673-7386-9 IEEE, e-book, 1849-1852.
- [7] **Mete M** (2018) Vision Based Automated Landing of Quadrotors, *Master Thesis*, Bogazici University, Graduate Program in Electrical and Electronics Engineering, İstanbul, 61 pp.
- [8] **Bingöl Ö** (2019) Askıda Yük Taşıyan Dört Rotorlu İHA için Kontrolcü Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Erzurum, 55 s.
- [9] **Torun A** (2017) İnsansız Hava Aracı (İHA) Sektöründe Trend: İHA Fotogrametrisi Bakışıyla, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17: 35-52.
- [10] **Kahveci C ve Can N** (2017) İnsansız Hava Araçları: Tarihçesi, Tanımı, Dünyada ve Türkiye'deki yasal durumu, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, ISBN: 2147-9364, 5 (4): 511-535.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [11] **Gupta S G, Ghonge M M and Jawandhiya Dr P M** (2013) Review of Unmanned Aircraft System (UAS), *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2 (4): 1646-1658.
- [12] **Yiğit E, Yazar I ve Karakoç T H** (2018) İnsansız Hava Araçları İHA'nın Kapsamlı Sınıflandırılması ve Gelecek Perspektifi, *Sürdürülebilir Havacılık Araştırmaları Dergisi*, 3 (1): 10-19.
- [13] **Hildmann H and Kovacs E** (2019) Review: Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as Mobile Sensing Platforms (MSPs) for Disaster Response, Civil Security and Public Safety, *Drones 2019*, 3 (59): 1-26.
- [14] **Çömert R, Avdan U ve Şenkal E** (2012) İnsansız Hava Araçlarının Kullanım Alanları ve Gelecekteki Beklentiler, *IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu*, 1-9.
- [15] **Tosun D C, Işık Y ve Korul H** (2015) Comparison of PID and LQR Controllers on a Quadrotor Helicopter, *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 9: 136.143.
- [16] **Sulficar A, Suresh H, Varma A and Radhakrishnan A** (2017) Modelling, Simulation and Complete Control of a Quadcopter, *Department of Mechanical Engineering National Institute of Technology Karnataka Surathkal, Mangalore-575025*, 76 pp.
- [17] **Gümüşboğa İ** (2013) İnsansız Hava Araçları için Rota Planlaması, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, TOK2013*, Malatya, 547-616.
- [18] **Selim E, Uyar E ve Avcı M** (2013) Quadrocopterin Matematiksel Modeli ve Kontrolü, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı TOK2013*, 26-28 Eylül 2013, Malatya, 547-553.
- [19] **Sarioğlu A** (2015) Modelling, Identification and Simulation of a Quadrotor Using Real-Time Flight Data, *Master Thesis*, İstanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, Department of Mechanical Engineering System Dynamics and Control programme, İstanbul, 109 pp.
- [20] **Akyüz S** (2013) Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı (Quadrotor)'nın PD ve Bulanık Kontrolcü Tasarımı ve Benzetim Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, 74 s.
- [21] **Sabatino F** (2015) Quadrotor Control: Modeling, Nonlinear Control Design and Simulation, *Master Thesis*, KTH Vetenskap Och Konst, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 61 pp.
- [22] **Clemente S D C** (2015) Quadrotor Control: Implementation, Cooperation and Human-Vehicle Interaction, *Master Thesis*, KTH Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, 58 pp.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

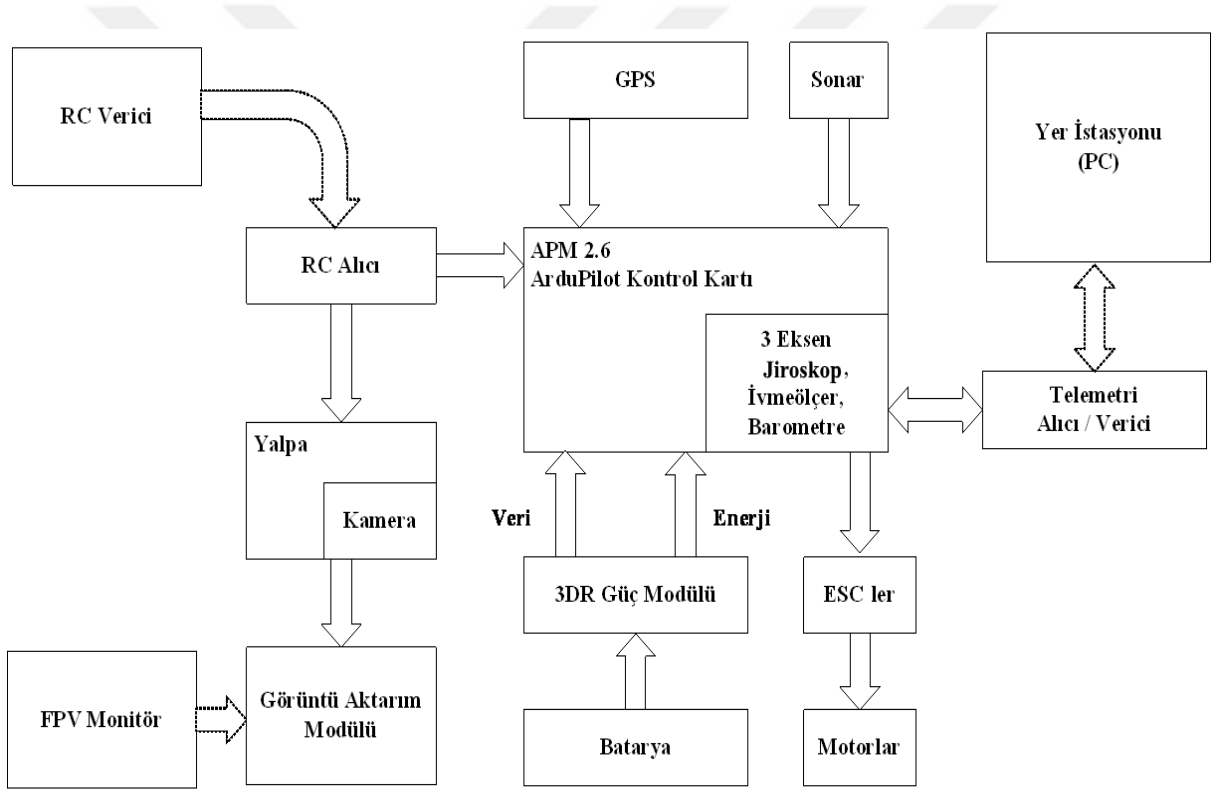
- [23] **Hernandez A, Murcia H, Copot C and Keyser R D** (2014) Model Predictive Path-Following Control of an AR. Drone Quadrotor, *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático*, México, 618-623.
- [24] **Can K ve Başçı A** (2016) Dört Rotorlu bir İHA'nın Geri Adımlamalı Kontrolcü ile Gerçek Zamanlı Yörünge Kontrolü, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6 (3): 77-85.
- [25] **Köksal K** (2017) İnsansız Hava Araçlarında Görüntü İşleme ile Rota Tespiti ve Otonom Takibi, *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 45 s.
- [26] **John S** (2013) Artificial Intelligent-Based Feedforward Optimized PID Wheel Slip Controller. *AFRICON*, 12 September 2013, Pointe-Aux-Piments, 1-6.
- [27] **Li J and Li Y** (2011) Dynamic Analysis and PID Control for a Quadrotor, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 7-10 August 2011, 573-578.
- [28] **Yurdakul S S ve Eker İ** (2013) Kendinden Ayarlamalı PID Kontrol ve Deneysel Uygulamaları, *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, Çukurova Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü Balcalı*, Adana, 1-11.
- [29] **Zulu A and John S** (2014) A Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors, *Open Journal of Applied Sciences*, 547-556.
- [30] **Tanyer A, Tatlıcıoğlu E and Zergeroğlu E** (2017) Model Reference Tracking Control of An Aircraft: A Robust Adaptive Approach, *International Journal Of Systems Science*, 48 (7): 1428-1437.
- [31] **Akgun O, Subasi E and Turker T** (2017) A Lyapunov Based Model Reference Adaptive Control of A Quadrotor, *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1-5.
- [32] **Kılıç B** (2014) Quadcopterin Dinamik Analizi ve Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 55 s.
- [33] **Sunay A, Altan A, Belge E ve Hacıoğlu R** (baskıda) Uyarlamalı PID Kontrolcüsü ile Dört Pervaneli İHA'nın Rota Takip Performansının İncelenmesi, *3rd International Engineering Research Symposium INERS'19*, Eylül 5-7, Düzce, 1-4.



EK AÇIKLAMALAR

Ek A: Dört Pervaneli İHA'nın Donanım Parçaları

Bu bölümde, çalışmada kullanılan İHA'ların donanımları parçaları ve temel kontrolünü sağlayan gömülü yazılımlardan bahsedilmektedir. Bu çalışmada kullanılan dört pervaneli helikopterin donanım parçaları, Şekil A.1'de gösterilmektedir.



Şekil A.1 ÇR İHA'nın blok şeması.

Ek B: Temel Parçalar

Şase

Şase, çok pervaneli İHA'nın iskeletidir, genellikle alüminyum veya karbon fiber malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Şase tercihinde dikkat edilmesi gereken hususlar, devre koruması içerip içermemesi, iniş takımının yerden yüksekliği ve yeri kavraması, kolların titreşmemesini sağlaması, eksenlerin eğri olmaması, batarya sabitlenecek kısmının belirli olması ve bataryanın kaymayacak biçimde sabit durmasıdır. Şekil B.1'de şasenin yandan iki boyutlu gösterimi verilmektedir.

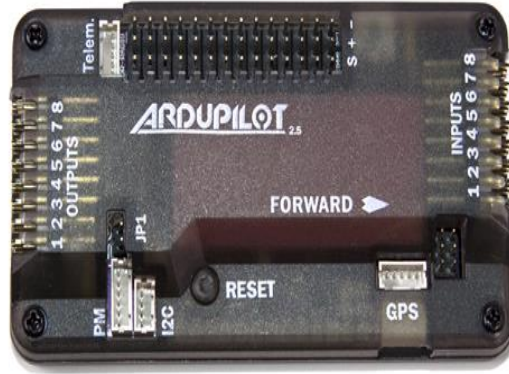


Şekil B.1 Bir arducopterin şasesi.

Kontrol Kartı

Kontrol kartı, tüm İHA sisteminin beynidir ve yerden yüksekliği ayarlama, otomatik iniş-kalkış yapabilme, kumanda verisi okuma, içerisinde bulunan güç modülü aracılığıyla, batarya doluluk-boşluk oranını değerlendirme, bataryanın boş olduğu durumda acil inişi sağlama gibi kritik işlemler bu birim sayesinde gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda sistem üzerindeki en kritik parçadır ve profesyonel sistemlerde Çin üretimi olan düşük kaliteli uçuş kontrolcülerin kullanılması önerilmez. Bu çalışmada, Şekil B.2'de bahsedilen, ArduPilot APM 2.6 kontrol kartı kullanılmıştır. Kontrol kartının üzerinde ayrıca 3 eksenli jiroskop, barometre ve ivmeölçer bulunmaktadır. Üzerlerinde bulunan GPS modülleri ile konum tespiti de yapabilmekte; fakat 3 metreye kadar hata payı olduğundan otomatik inişlerde sorun yaşayabilmektedirler [32].

APM 2.6 ArduPilot kontrol kartı ile oluşturulan kontrol yazılımı sistemi ArduCopter'dir. Mission Planner adlı bilgisayar programı telemetri kartları aracılığıyla helikoptere bağlantı sağlayabilmektedir. ArduCopter programı, açık kaynaklı olup, eklenen yeni kodlar ile tekrar İHA'ya yüklenebileceği gibi, Mission Planner üzerinde değişiklik yaparak değişiklik sağlanabilmektedir.



Şekil B.2 ArduPilot APM 2.6 kontrol kartı.

Motor ve Pervane

Motorlar, İHA'ların hareketini sağlayan en temel parçalardır. İHA sistemlerin itki yapısını oluşturan motorlar önerilen çapta ve yapıda pervaneler ile kullanılmalıdır. İHA'larda motor sayısı kadar pervane kullanılmaktadır. Şekil B.3'te dört pervaneli İHA'larda kullanılan motor sistemi gösterilmektedir.



Şekil B.3 Pervane motoru.

Motor Sürücü

İHA'larda kullanılan motorların, kullanıldıkları multikopter sistemine göre hızlarının kontrol edilmesi gerekir. ESC (Elektronik Hız Kontrol), motorların hızlarını kontrol etmek için

kullanılan devre sistemleridir. Şekil B.4'te İHA'larda kullanılan motor sürücünün görünümü verilmiştir.

ESC devrelerinin çalışma prensibi motorların sargılarına sırayla PWM dalgası göndermektir. Fırçalı motorlar DC motorlar olup ESC ile 2 uçtan sürülürler. Fırçasız motorlar trifaze motorlardır ve 3 uçtan sürülürler. Bu motorlarda kullanılan ESC'ler, DC motorlarda kullanılan ESC'lere göre daha karmaşık bir yapıya sahiptirler. Pilin 2 ucundan almış oldukları DC gerilimi, 3 kablo ile AC olarak motora gönderirler. Fırçasız motorlar için kullanılan ESC'ler bir frekans konvertörü gibi çalışmaktadırlar. Gerilime bağlı olarak değil, frekansa bağlı olarak devir sayısını değiştirmektedirler [7].



Şekil B.4 Motor sürücü.

EK C: Yardımcı Parçalar

Kumanda ve Alıcı

İHA birimine komutların gönderilmesini sağlayan birimdir, Kumanda üzerinden batarya durumu, irtifa bilgisi gibi telemetrik veriler okunabilmektedir. Şekil C.1’de kumanda mekanizması gösterilmektedir. Bu sistemde kumanda, RC verici olarak görev yapmakta ve RC alıcı sistemiyle haberleşerek, aralarında veri alış-verişi yapmaktadır.



Şekil C.1 RC.

Batarya ve Şarj Aleti

Sistemin uçuşmasını sağlayan en önemli parçalardan biri bataryadır. Helikopterin enerji kaynağı olarak genellikle Şekil C.2 a’da görülen olan 4 hücreli Lityum Polimer pil kullanılır. Şekil C.2 b’de görülmekte olan güç modülü de helikopterin beslenmesi için bataryanın regülasyonunu ve bataryanın seviyesini de ölçerek kontrol kartına iletimini sağlar. Bu çalışmada 4000mAh Lipo bataryası kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil C.2 Batarya ve güç modülü a) 4 hücreli batarya b) 3A BEC güç modülü.

Telemetri Alıcı-Verici

İHA sistemlerinde, sistemin batarya durumu, pozisyonu, irtifası, hızı vb. gibi verilere telemetri verileri denir. Bu verilerin bilgisayar üzerine aktarılmasını ve bilgisayar yazılımı üzerindeki harita uçuşu gibi komutları hava aracına aktarılmasını sağlayan birimdir.

Kablosuz Görüntü Aktarımı

İHA sistemleri, görevi veya kullanım amacı gereği görüntü çekebilmektedir. Çekilen görüntünün yere aktarılmasını, kablosuz görüntü aktarımı birimi sağlamaktadır. Kumanda sinyali ve telemetri sinyali aracılığı ile bu aktarımın yer istasyonuna veya bilgisayara aktarılması sağlanmaktadır.

Yalpa

Yalpa diğer bir adıyla, kamera sabitleme sistemi kameranın bağlandığı ve hava aracının hareket ve sallantılarından görüntünün etkilenmemesini sağlayan parçadır. Yalpa, kullanılacak şase ve kameranın ebatına göre seçilmelidir. Şekil C.3’de yalpa modeli gösterilmektedir.



Şekil C.3 Yalpa modeli

GPS ve Sonar

GPS, helikopterin konum bilgisini anlık olarak kontrol kartına ileten parçadır. GPS mekanizmasının üzerinde yön tayinin sağlanması için bir elektronik pusula modülü de bulunmaktadır.

Sonar, helikopterin alt kısmına monte edilen, helikopterin yerden yüksekliğini, gönderdiği frekans dalgalarıyla tespit eden parçadır. Barometre ile yapılan yükseklik ölçümü yeterli

derecede hassas olmadığından sonar kullanımı, helikopterin yere otomatik inişini daha rahat bir şekilde yapmasını sağlamaktadır. Şekil C.4’de GPS ve sonar modülleri gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil C.4 GPS ve sonar modülleri. GPS (a), Sonar (b).

Diğer Aksesuarlar

İHA sistemlerinde ek sen hassasiyeti ve parça kalitesi önemlidir, bu anlamda uçuşu destekleyecek birçok aksesuar mevcuttur. Uçuş uygunluğunu ölçebilmek için rüzgâr ölçer, sistemin taşınması için taşıma çantaları, motor temizliğinde kullanılan temizleyici spreyle, bilgisayar için güneşlik gibi birçok aksesuar mevcuttur [33].



ÖZGEÇMİŞ

Ayşegül SUNAY 1990 yılında İSTANBUL’da doğdu. Ortaokul ve lise öğretimini TED Zonguldak Koleji’nde tamamladı. 2014 yılında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi elektrik-elektronik mühendisliğinden mezun oldu. Filyos Ateş Tuğla fabrikasında bakım mühendisi olarak çalışmaktadır. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesinde yüksek lisans programına devam etmektedir.

İLETİŞİM BİLGİLERİ:

E-posta: aysegulsunay90@gmail.com