

BİR DÖRTPERVANELİNİN MODELLENMESİ VE DENETİMİ

MODELING AND CONTROL OF A QUADROTOR

AHMET DEMİRYÜREK

PROF. DR. HÜSEYİN DEMİRCİOĞLU

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

AHMET DEMİRYÜREK' in hazırladığı "**Bir Dörtpervanelinin Modellenmesi ve Denetimi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU
Başkan



Prof. Dr. Hüseyin DEMİRCİOĞLU
Danışman



Prof. Dr. Atila YILMAZ
Üye



Yrd. Doç. Dr. Derya ALTUNAY
Üye



Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☐ Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☒ Tezimin/Raporumun 13/02/2018 tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- ☐ Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

01 / 02 / 2018



(İmza)

Ahmet Demiryürek

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

07. / 02 / 2018

Ahmet Demiryürek



ÖZET

BİR DÖRTPERVANELİNİN MODELLENMESİ VE DENETİMİ

Ahmet DEMİRYÜREK

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: PROF. DR. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

Şubat 2018, 132 sayfa

Bu tez çalışmasında ‘Dörtlervaneli’ olarak isimlendirilen, İnsansız Hava Aracı’nın modellenmesi ve denetimi konuları ele alınmıştır. Dikey iniş kalkış yapabilen dörtlervaneli temel hareketlerini, çapraz ya da artı yapıda bütünleştirilmiş kollarına yerleştirilen dört adet rotor ve bu rotora bağlı pervanelerin dönme hızlarını ayarlayarak gerçekleştirir. Dörtlervanelinin temel hareketleri askıda kalma, yükselme, yunuslama, yuvarlanma ve sapma açısı oluşturmaktır. Pervane çiftlerinin farklı hızlarda dönmesiyle ağırlık merkezinde oluşan momentler ile dörtlervaneli ileri, geri, sağa veya sola gidebilmektedir. Bu çalışmada dörtlervanelinin hareketlerini açıklayacak matematiksel modeller elde edilmiştir. Newton-Euler denklem takımı kullanılarak gövde çerçevesinde elde edilen altı serbestlik dereceli model, vektör dönüşümleri ile Dünya’ya sabit ataletsel çerçevede ifade edilmiştir.

Türetilen model kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler tasarlanmıştır ve dörtlervanelinin konum ve yönelim denetimi gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan bir modele sahip olan dörtlervanelinin denetimi için doğrusal denetim yöntemlerinden PID ve Doğrusal Karesel Denetleyici; doğrusal olmayan

denetim yöntemlerinden ise geriadımlamalı ve kayan kipli denetim tercih edilmiştir. Denetim için bazı ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütlere uyan tasarımlar yapılmıştır. Tasarımlanan denetleyicilerin başarımları basamak tepkilerinden ve farklı senaryolarda verilen yörüngeleri takip etme yeteneklerinden gözlenmiştir. Gürbüz bir denetleyici, belirsizliklerden etkilenmeden sistem kararlılığını sürdürebilmelidir. Bu çalışmada tasarımılanan denetleyicilerin gürbüzlüğü bozucu bir etkiyi geri çevirme ve gürültü altındaki davranışları üzerinden gözlemlenmiştir.

Benzetim sonuçları, dörtpervanelinin PI denetim yöntemi hariç diğer yöntemler ile denetlenebildiğini göstermiştir. Yörünge takibinde en başarılı denetim yöntemi tek model üzerinden tasarımılanan Doğrusal Karesel Denetleyici olurken en gürbüz yöntem olarak da karşımıza çıkmaktadır. Ancak, diğer yöntemlerden daha çok denetim çabası harcadığı görülmüştür. PD denetimin ise diğer yöntemlere göre bozucu bir etki geldiğinde toparlanmasının daha zor olduğu görülmüştür. Bu çalışma ile doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemlerinden hangisinin dörtpervanelinin denetimi için daha uygun olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dörtpervanelinin denetimi, PID, Doğrusal Karesel Denetleyici, geriadımlamalı denetim, kayan kipli denetim.

ABSTRACT

MODELING AND CONTROL OF A QUADROTOR

Ahmet DEMİRYÜREK

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: PROF. DR. Hüseyin DEMİRCİOĞLU

February 2018, 132 pages

This thesis deals with the modeling and control of an Unmanned Aerial Vehicle called as 'quadrotor'. The quadrotor, which is capable of vertically taking off and landing, does its basic movements by adjusting the rotational speeds of propellers fixed on four rotors that are mounted on a crossed or plus structured arms. These basic movements are hovering, rising, pitching, rolling and yawing. The quadrotor can go forward, backward, to the left or right by generating moments at its center of gravity. These moments occur when the propeller pairs rotate at different speeds. In this work, the quadrotor model is derived to describe these movements mathematically. The six degrees of freedom model in body frame is provided by using the Newton-Euler equations and then it is expressed in Earth fixed inertial frame by using the vector transformations.

By using the derived model, linear and nonlinear controllers are designed. These controllers are used for position and attitude control of the quadrotor. The linear control methods such as PID and Linear Quadratic Regulator and the nonlinear control methods such as backstepping and sliding mode control are preferred to

control the quadrotor which has a nonlinear model. All the controller designs are agreed with the pre-determined constraints. The performances of the control methods are observed by analyzing the step responses and the tracking success of trajectories under different scenarios. A robust system is insensitive to uncertainties. In this work the robustness of the designed control methods are tested by adding disturbance and noisy measurements to the system.

The simulation results show that the quadrotor can be controlled by any methods given in this thesis except the PI controller. The most successful control method in following the trajectories is the Linear Quadratic Regulator designed over a single model that is also the most robust method. But it exhibits more control efforts than others. PD control is found to be more difficult to restabilize the quadrotor upon its exposure to a disturbance compared to the other methods.

Keywords: Control of quadrotor, PID, Linear Quadratic Regulator, backstepping control, sliding mode control.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bana yardımcı olan, yol göstericiliği ve desteği ile vazgeçmeme izin vermeyen değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Hüseyin Demircioğlu'na saygı ve sevgi ile teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimim boyunca anlayış ve destekleri için TÜBİTAK SAGE yöneticileri ve çalışma arkadaşlarıma, teşviklerinden dolayı Özkan Kılıç'a ve Eren Cengiz'e hayatım boyunca benim yanımda yer alan, yardımlarını ve sevgilerini hiç esirgemeyen aileme, son olarak vatanımızın bekası için şu anda Afrin'de terörle mücadele eden askerlerimize çok teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK.....	i
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. DÖRTPERVANELİNİN MODELLENMESİ.....	6
2.1. Referans Çerçeveler	6
2.1.1. Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve	6
2.1.2. Gövde Çerçevesi.....	7
2.2. Euler Açıları.....	7
2.3. Dönüşüm Matrisi	8
2.4. Açısal Hızlar	9
2.5. Dörtlervanelinin Temel Hareket Kavramları.....	10
2.5.1. Askıda Kalma	11
2.5.2. İtki.....	12
2.5.3. Yunuslama	12
2.5.4. Yuvarlanma	13
2.5.5. Sapma.....	14
2.6. Dörtlervanelinin Matematiksel Modeli.....	14
2.6.1. Kinematik Denklemler.....	15
2.6.2. Dinamik Denklemler	17
2.7. Durum Uzayı Gösterimi	24
2.8. Dörtlervanelinin Doğrusallaştırılmış Modeli	26
3. DÖRTPERVANELİNİN DENETLENMESİ.....	29
3.1. Dörtlervanelinin Denetim Kavramları.....	29
3.1.1. Konum Denetimi.....	30
3.1.2. Yönelim Denetimi	32

3.2. Dörtpervanelinin PID İle Denetimi	33
3.3. Dörtpervanelinin Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetleyici İle Denetimi	36
3.4. Dörtpervanelinin Geriadımlamalı Denetim Yöntemi İle Denetimi	44
3.5. Dörtpervanelinin Kayan Kipli Denetim Yöntemi ile Denetimi	47
4. BENZETİM ÇALIŞMASI.....	50
4.1. PID Tabanlı Denetim	52
4.1.1. PD Denetim	52
4.1.2. PID Denetim	64
4.2. Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetim	75
4.2.1. Altsistemler Üzerinden Denetim (DKD1)	75
4.2.2. Altsistemlere Ayrıştırımdan Denetim (DKD2)	85
4.3. Geriadımlamalı Denetim.....	94
4.4. Kayan Kipli Denetim	103
4.5. Gürbüzlük Benzetimleri	112
4.5.1. Bozucu Etkiyi Geri Çevirme Benzetimi	112
4.5.2. Gürültülü Algılayıcı Benzetimi.....	117
4.6. Sonuçların İrdelenmesi.....	121
5. SONUÇ.....	124
KAYNAKLAR.....	127
EKLER	130
ÖZGEÇMİŞ	132

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 4.1 Dört pervanelinin Parametreleri	50
Çizelge 4.2 PD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları	52
Çizelge 4.3 PD Basamak Tepkisi Sonuçları	54
Çizelge 4.4 PD En Yüksek Pervane Hızları	54
Çizelge 4.5 PID Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları	64
Çizelge 4.6 PID Basamak Tepkisi Sonuçları	64
Çizelge 4.7 PID En Yüksek Pervane Hızları	66
Çizelge 4.8 DKD1 Basamak Tepkisi Sonuçları	76
Çizelge 4.9 DKD1 En Yüksek Pervane Hızları	78
Çizelge 4.10 DKD2 ile Basamak Tepkisi Sonuçları	86
Çizelge 4.11 DKD2 ile En Yüksek Pervane Hızları	87
Çizelge 4.12 GAD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları	94
Çizelge 4.13 GAD ile Basamak Tepkisi Sonuçları	95
Çizelge 4.14 GAD ile En Yüksek Pervane Hızları	95
Çizelge 4.15 KKD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları	103
Çizelge 4.16 KKD ile Basamak Tepkisi Sonuçları	104
Çizelge 4.17 KKD ile En Yüksek Pervane Hızları	104

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 1.1 Breguet-Richet Gyroplane	2
Şekil 2.1 Referans Çerçeveler	6
Şekil 2.2 Eksenlerin ψ, θ, ϕ kadar döndürülmesi	9
Şekil 2.3 Askıda Kalma Hareketi	11
Şekil 2.4 İtke Kuvveti	12
Şekil 2.5 Yunuslama Hareketi	13
Şekil 2.6 Yuvarlanma Hareketi	13
Şekil 2.7 Sapma Hareketi	14
Şekil 2.8 Dörtlervanelinin Şematik Çizimi	15
Şekil 3.1 Dörtlervanelinin Açık Döngü Dinamikleri	30
Şekil 3.2 Kapalı Döngü Dörtlervaneli Denetimi Öbek Şeması	33
Şekil 3.3 PID Genel Yapısı	33
Şekil 3.4 Tümler Alıcı Eklenmiş Doğrusal Karesel Denetleyici Öbek Şeması	39
Şekil 4.1 PD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri	53
Şekil 4.2 Senaryo 1; PD ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	56
Şekil 4.3 Senaryo 1; PD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	57
Şekil 4.4 Senaryo 1; PD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	58
Şekil 4.5 Senaryo 1; PD ile Pervanelerin Açıl Hızları	59
Şekil 4.6 Senaryo 2; PD ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	60
Şekil 4.7 Senaryo 2; PD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	61
Şekil 4.8 Senaryo 2; PD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	62
Şekil 4.9 Senaryo 2; PD ile Pervanelerin Açıl Hızları	63
Şekil 4.10 PID ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri	65
Şekil 4.11 PD ve PID Basamak Tepkilerinin Karşılaştırılması	67
Şekil 4.12 Senaryo 1; PID ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	68
Şekil 4.13 Senaryo 1; PID ile Konum ve Yönelim Denetimleri	69
Şekil 4.14 Senaryo 1; PID ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	70
Şekil 4.15 Senaryo 1; PID ile Pervanelerin Açıl Hızları	71
Şekil 4.16 Senaryo 2; PID ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	72
Şekil 4.17 Senaryo 2; PID ile Konum ve Yönelim Denetimleri	73
Şekil 4.18 Senaryo 2; PID ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	74

Şekil 4.19 Senaryo 2; PID ile Pervanelerin Açısal Hızları.....	74
Şekil 4.20 DKD1 ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri	77
Şekil 4.21 Senaryo 1; DKD1 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol	79
Şekil 4.22 Senaryo 1; DKD1 ile Konum ve Yönelim Denetimleri	80
Şekil 4.23 Senaryo 1; DKD1 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	81
Şekil 4.24 Senaryo 1; DKD1 ile Pervanelerin Açısal Hızları	81
Şekil 4.25 Senaryo 2; DKD1 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol	82
Şekil 4.26 Senaryo 2; DKD1 ile Konum ve Yönelim Denetimleri	83
Şekil 4.27 Senaryo 2; DKD1 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	84
Şekil 4.28 Senaryo 2; DKD1 ile Pervanelerin Açısal Hızları	84
Şekil 4.29 DKD1 ve DKD2 ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri Karşılaştırması	86
Şekil 4.30 Senaryo 1; DKD2 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol	88
Şekil 4.31 Senaryo 1; DKD2 ile Konum ve Yönelim Denetimleri	89
Şekil 4.32 Senaryo 1; DKD2 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	90
Şekil 4.33 Senaryo 1; DKD2 ile Pervanelerin Açısal Hızları	90
Şekil 4.34 Senaryo 2; DKD2 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol	91
Şekil 4.35 Senaryo 2; DKD2 ile Konum ve Yönelim Denetimleri	92
Şekil 4.36 Senaryo 2; DKD2 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	93
Şekil 4.37 Senaryo 2; DKD2 ile Pervanelerin Açısal Hızları	93
Şekil 4.38 GAD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri	96
Şekil 4.39 Senaryo 1; GAD ile Dört pervanelinin İzlediği Yol.....	97
Şekil 4.40 Senaryo 1; GAD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	98
Şekil 4.41 Senaryo 1; GAD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	99
Şekil 4.42 Senaryo 1; GAD ile Pervanelerin Açısal Hızları	99
Şekil 4.43 Senaryo 2; GAD ile Dört pervanelinin İzlediği Yol.....	100
Şekil 4.44 Senaryo 2; GAD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	101
Şekil 4.45 Senaryo 2; GAD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	102
Şekil 4.46 Senaryo 2; GAD ile Pervanelerin Açısal Hızları	102
Şekil 4.47 KKD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri	105
Şekil 4.48 Senaryo 1; KKD ile Dört pervanelinin İzlediği Yol	106
Şekil 4.49 Senaryo 1; KKD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	107
Şekil 4.50 Senaryo 1; KKD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	108

Şekil 4.51 Senaryo 1; KKD ile Pervanelerin Açısal Hızları	108
Şekil 4.52 Senaryo 2; KKD ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	109
Şekil 4.53 Senaryo 2; KKD ile Konum ve Yönelim Denetimleri	110
Şekil 4.54 Senaryo 2; KKD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	111
Şekil 4.55 Senaryo 2; KKD ile Pervanelerin Açısal Hızları	111
Şekil 4.56 Bozucu Etki Uygulandığında Dörtlervanelinin İzlediği Yol	113
Şekil 4.57 Bozucu Etki Uygulandığında Konum ve Yönelim Denetimleri.....	114
Şekil 4.58 Bozucu Etki Uygulandığında Yuvarlanma Açısı Değişimi	115
Şekil 4.59 Bozucu Etki Uygulandığında Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler	116
Şekil 4.60 Gürültülü Ölçüm ile Dörtlervanelinin İzlediği Yol	118
Şekil 4.61 Gürültülü Ölçüm ile Konum ve Yönelim Denetimleri	120
Şekil 4.62 Gürültülü Ölçüm ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler.....	121

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

x, y, z	Ataletsel çerçevede konum
x_b, y_b, z_b	Gövde çerçevesinde konum
u, v, w	Gövde çerçevesinde hız bileşenleri
ϕ, θ, ψ	Euler açıları
p, q, r	Gövde çerçevesinde açısal hız bileşenleri
R	Dönüşüm Matrisi
T	Açısal dönüşüm matrisi
F	Dört pervaneliye etkiyen toplam kuvvet
F_{xb}, F_{yb}, F_{zb}	Toplam kuvvetin gövde çerçevesindeki bileşenleri
Ω	Pervane hızı
Ω_r	Pervanelerin birbirlerine göre hızı
k	Aerodinamik itki sabiti
d	Aerodinamik sürüklenme sabiti
m	Kütle
g	Yerçekimi ivmesi
U_1, U_2, U_3, U_4	Denetim sinyalleri
M	Dört pervaneliye etkiyen toplam moment

M_{xb}, M_{yb}, M_{zb}	Toplam momentin gövde çerçevesindeki bileşenleri
I	Atalet matrisi
I_x, I_y, I_z	Ataletsel momentler
l	Dört pervanelinin kol uzunluğu
A	Pervanenin alanı
ρ	Hava yoğunluğu
J	Rotor ataleti

Kısaltmalar

İHA	İnsansız Hava Aracı
PID	Oransal Tümlerel Tümlerel
PI	Oransal Tümlerel
PD	Oransal Tümlerel
DKD	Doğrusal Karesel Denetleyici
DKD1	Altsistemler üzerinden tasarılan Doğrusal Karesel Denetleyici
DKD2	Tek model üzerinden tasarılan Doğrusal Karesel Denetleyici
GAD	Geriadımamlalı Denetim
KKD	Kayan Kipli Denetim

1. GİRİŞ

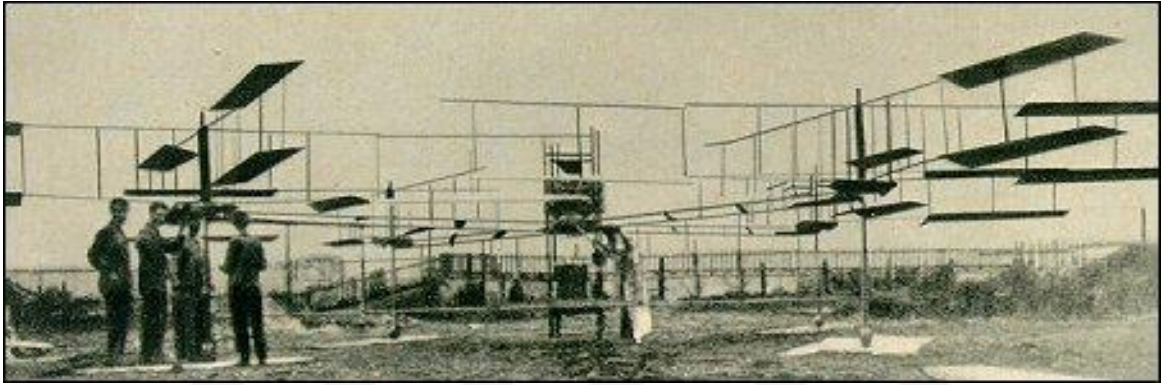
İnsansız Hava Araçları (İHA), isminden de anlaşılacağı üzere, uçuşu için üzerinde taşıyacağı bir pilota ihtiyaç duymayan, uzaktan denetlenebilen ve belli amaçlar için geliştirilmiş, son teknolojinin kullanıldığı sistemlerdir. Son yıllarda birçok sahada etkinliğinin fark edilmesi ile bu uçakların modelleme ve denetimi için çok büyük bir araştırma ve geliştirme sahası ortaya çıkmıştır. Farklı tiplerdeki İHA'lar akademik çalışmalarda incelenmiş ve yakın gelecekte de incelenmeye devam edilecektir.

Bu tez çalışmasının konusu için İnsansız Hava Aracı sınıfında yer alan dört pervaneliler tercih edilmiştir. Özellikle, 2000'li yılların başından itibaren, elektronik alanındaki gelişmeler ile ucuzlayan mikrodeneleyiciler, ivmeölçerler, jiroskoplar, önceleri çok yüksek teknoloji sistemlerde kullanılmasına rağmen, günümüzde herkesin cebine kadar girmeyi başarmış Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) ve son derece hafif ve yüksek kalitede resimler yakalayabilen kameralar, dört pervanelilerin gelişmesine ve gözde sistemler olmasına neden olmuştur.

Dört pervanelilerin bu kadar yaygın olmasının başka sebepleri de bulunmaktadır. Diğer İHA'lardan farklı olarak çok basit bir yapıya sahiptirler. Üzerine sabitlenmiş dört adet motor ve pervaneler ile küçük boyutta ama manevra yeteneği yüksek sistemlerdir. Ayrıca kullanım alanına göre atılgan ve kıvrak hareket edebilmektedir. Dikey iniş ve kalkış yapabilen bu sistemler düşük maliyetli ve kullanımı kolay olan sistemlerdir.

2000'li yıllarda gözde olan dört pervanelilerin tarihi çok eskiye dayanmaktadır. Bilinen ilk dört pervaneli 'Breguet-Richet Gyroplane' isminde bir uçaktır [1]. Şekil 1.1'de görseli verilen, dört adet rotor ve döner kanatlar ile uçuşu amaçlanan en erken çalışma olan bu sistem, Profesör Charles Richet'in yardımıyla Louis ve Jacques isimli Breguet kardeşler tarafından 1907 yılında tasarlanmıştır. Bu tasarım havalanabilmiş ama kararsızlığa uğrayıp havada kalamamıştır. 1920 yılında 'Oehmichen No. 2' isimli başka bir hava aracı Étienne Oehmichen tarafından tasarlanmıştır. 360 metre uzağa uçup havada 7 dakika 40 saniye kalarak zamanının uçuş rekorunu kırmayı başarmıştır [2]. Aynı yıllarda Dr. George de Bothezat'ın tasarlayıp 'Uçan Ahtapot' ismini verdiği dört pervaneli, ilk defa askeri

bir amaç için tasarlanmıştır. Sadece 7 metre yüksekliğe ulaşmış ve kararsızlığı nedeniyle bu çalışma kapatılmıştır. Mart 1956 yılında ilk başarılı uçuşunu gerçekleştiren 'Convertawings Model A' isimli dörtpervaneli, Dr. George de Bothezat ve Ivan Jerome tarafından geliştirilmiştir [3]. Pervanelerin ürettiği itki ilk defa bu tasarımda hava aracına yunuslama, yuvarlanma ve sapma yönelimlerini yaptırabilmek için kullanılmıştır. Günümüzde de çok başarılı dörtpervaneliler bulunmaktadır. DJI firmasının geliştirdiği Phantom ve Parrot firmasının geliştirdiği AR Drone isimli dörtpervaneliler örnek olarak verilebilir.



Şekil 1.1 Breguet-Richet Gyroplane [1]

Dörtpervaneliler, günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. En etkin ve yaygın olarak askeri ve istihbarat alanında, üzerinde taşıdıkları kameralar yardımıyla anlık gözlem ve keşif için kullanılmaktadır. Bu küçük aletler sadece devletler tarafından değil terör örgütleri tarafından da kullanılmaktadır. Teröristler, aynı amaçla gözlem için kullandıkları bu sistemlere küçük patlayıcılar ve bombalar yerleştirerek saldırı gerçekleştirmektedir. Son olarak Irak'ta 200 Dolar değerindeki dörtpervanelileri etkisiz hale getirmek için tanesi 3 milyon Dolar olan hava savunma füzesi Patriot'ların kullanıldığı Amerikalı bir general tarafından itiraf edilmiştir [4]. Bu durum dörtpervaneli ve diğer İHA'ların askeri alanda ne kadar önemli bir yer tuttuğunun kanıtıdır. Ayrıca, dörtpervanelilerin yardımıyla yapılan sınır gözlemi ile kaçakçılık ve sınır ihlali gibi suçlar emniyet birimleri tarafından takip edilmektedir. Sivil alanda ise medya kuruluşları doğal afetleri, protestoları ve savaşları büyük helikopterler yerine daha ucuz olan İHA'lar ile takip etmekte ve resimler elde etmektedir. Günümüzün gözde alışveriş siteleri de bu tarz hava araçları ile kargo

teslimi yapmaya başlamışlardır. Geniş bir sahada kullanılan dörtpervaneli tarım alanında da mahsulün takip edilmesi gözlenmesi ve ilaçlanması amacıyla kullanılmaktadır.

Dörtpervaneliler üzerlerine yerleştirilen dört adet motorun pervaneleri döndürmesi ile elde edilen itki kuvvetinin yardımıyla hareketini gerçekleştirirler. Dört adet motor ile üç adet konum ve üç adet yönelim durumunu denetlemesi gereken dörtpervaneliler bu yapısı ile doğrusal olmayan bir modele sahiptir. Motorların hareketi ile durumlar arasında bir bağ olan ve bu durumun bozucu bir etki oluşturduğu dörtpervanelilerin denetlenmesi zordur. Bu zorluk nedeniyle dörtpervanelinin denetlenmesi amacıyla birçok akademik çalışma yapılmış ve gelecekte de yapılmaya devam edilecektir. Dörtpervanelinin denetimi için 'hızlı değişen bir ister sinyali çok kısa bir gecikme ile gürbüz biçimde takip edilebilir mi?' sorusunun cevabı aranmış ve birçok denetim yöntemi denenmiştir.

Dörtpervaneliler üzerine yapılan çalışmalardan bir tanesi P. Pounds ve arkadaşlarının geliştirdiği, 'X-4 Flayer' ismini verdikleri hava aracıdır. Bu sistem açısıl konumunu korumak amacıyla doğrusal tek giriş tek çıkışlı yaklaşımla PID denetleyicisi ile denetlenmektedir [5]. Bunun gibi yapılan birçok çalışmada Newton-Euler denklemleri ile elde edilen dörtpervanelinin matematiksel modeli kullanılarak farklı denetleyiciler denenmiş ve bu yapıya en uygun denetim yöntemi bulunmaya çalışılmıştır. Endüstride en yaygın kullanımı olan PID yöntemi, uygulamadaki kolaylığı ve etkinliği nedeniyle dört pervanelinin denetiminde de en yaygın kullanılan yöntemdir [5–8]. PD yöntemi de tercih edilen diğer bir yöntemdir [9]. Bouabdallah, doktora çalışmasında PID denetleyicisinin etkinliği OS4 ismini verdiği dörtpervanelisinde göstermiştir[10]. Dörtpervanelinin denetimi için kullanılan diğer yöntemler, durum geri beslemelerini ağırlıklandırarak denetim sinyallerinin elde edildiği, kutup yerleştirme [11-12], ve kutup yerleştirmeyi en iyi biçimde yapmayı amaçlayan Doğrusal Karesel Denetleyici [13–15] isimli denetleyicilerdir. Doğrusal olmayan dörtpervaneliler yukarıda bahsedilen doğrusal denetleyiciler ile denetlenebildiği gibi bazı çalışmalarda doğrusal olmayan denetleyiciler de kullanılmıştır. Geriadımlamalı denetim bunlardan biridir. Geriadımlamalı denetim yöntemi ile dörtpervanelerinin denetlenmesi üzerine yapılmış çalışmalar bulunmaktadır [16-17]. Bu yöntem, sadece dörtpervaneliler için değil yörünge takibi yapılan birçok sistemler için de tercih edilen yöntemdir

[18]. Doğrusal olmayan diğer bir denetim yöntemi de kayan kipli denetimdir. Günümüzde kare sinyaller ile tetiklenen motorların kullanıldığı sistemler için en uygun denetim sinyalini üreten kayan kipli denetim ile yapılmış çalışmalar [19] ve [20]'da bulunabilir. Doğrusal olmayan denetim yöntemlerinden bir tanesi olan geribesleme doğrusallaştırma yöntemi de tercih edilen diğer bir yöntemdir [21-22]. Şu anda pek yaygın olmasa da üzerinde birçok çalışma yapılan ve gelecekte de kullanımının artacağı tahmin edilen uyarlamalı denetim yöntemlerinden Model Öngörülü Denetim ile de yapılmış birçok çalışma mevcuttur [23-26]. Aynı şekilde sinir ağları ile de dörtpervanelilere öğrenme yetisi kazandırılmaya çalışılmaktadır [27-28].

Bu tez çalışmasında, dörtpervanelinin matematiksel modeli türetilmiş, bu model kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler tasarlanmış ve dörtpervanelinin konum ve yönelim denetimi gerçekleştirilmiştir. Dörtpervaneli, askıda kalma, yükselme, yunuslama, yuvarlanma ve sapma hareketlerini pervanelerinin dönme hızını ayarlayarak gerçekleştirir. Dörtpervanelinin hareketinin temelini oluşturan yuvarlanma, yunuslama ve sapma yönelimleri Euler açıları (ϕ, θ, ψ) ile ifade edilirler. İşte bu yönelimler ve yönelim neticesinde gerçekleşecek olan konum değişimi; Newton kanunlarının uygulanabilmesi için yapılan bazı varsayımlardan sonra Newton-Euler denklemleri ile matematiksel olarak ifade edilmiştir. Modelde yer alan değişkenler gövde çerçevesinde tanımlandığı için dörtpervaneliyi ataletsel çerçevede ifade edebilmek amacıyla dönüşüm matrisi kullanılmıştır. Yön Kosinüs Matrisi ile dörtpervanelinin gövde çerçevesinde gerçekleşen konum değişimleri Dünya'ya sabit ataletsel çerçeveye dönüştürülmektedir.

Bu tez çalışmasında, kendisine verilen yörüngeyi takip edebilen bir sistem için denetleyiciler tasarımılanmış ve başarımları karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan bir sistem olan dörtpervaneli, doğrusal ve doğrusal olmayan denetleyiciler ile denetlenmiştir. Doğrusal denetleyicilerden PID, PD ve Doğrusal Karesel Denetleyici, Taylor serisi yaklaşımı ile doğrusallaştırılmış dörtpervaneli modeli kullanılarak tasarımılanmış ve denetim başarımları gözlemlenmiştir. Doğrusal olmayan yöntemlerden ise geriadımlamalı denetim ve kayan kipli denetim dörtpervanelinin denetimi için tercih edilmiştir. Tasarımlanan denetleyicilerin başarımları, benzetim ortamında önceden belirlenmiş senaryolar üzerinden

gerçekleşen yörünge takibi incelenerek gözlemlenmiştir. Gürbüzlük, denetim sistemleri için belirsizliklere karşı koyma anlamında en önemli bir yetenek olduğu için tasarımı denetleyicilerin dışardan gelen bozucu etki ve gürültülü ölçümlere karşı gürbüzlüğü de karşılaştırılmıştır.

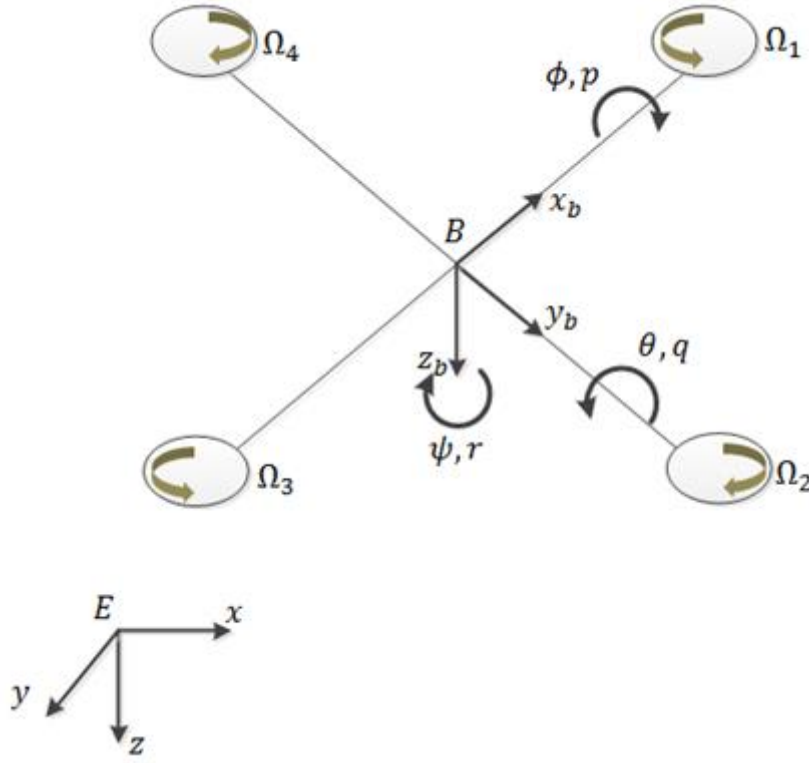
Tez çalışmasının yapısı şu şekildedir: İkinci Bölüm’de referans çerçeveler tanıtılmış, dörtpervanelinin hareketleri tanımlanmış ve matematiksel modeli türetilmiştir. Doğrusal denetim yöntemlerinin tasarımı için gereken doğrusallaştırılmış model de bu bölümde verilmiştir. Üçüncü Bölüm’de bu çalışmada kullanılan denetim yöntemleri ile dörtpervanelinin denetimi verilmiştir. Dördüncü Bölüm ise benzetim sonuçlarının verildiği bölümdür. Bu bölümde tasarımı denetleyicilerin basamak tepkileri ile hızları gözlenmiş ve senaryolar üzerinden takip başarımları incelenmiştir. Ayrıca, yapılan karşılaştırmalar sonucunda başarılı görülen denetleyiciler gürbüzlük incelemesi için, bozucu etki ve gürültülü ortamda denenmiş ve sonuçlar bu bölümde verilmiştir. Beşinci Bölüm ise sonuçların yorumlandığı ve çıkarımların elde edildiği bölümdür.

2. DÖRTPERVANELİNİN MODELLENMESİ

Tezin bu bölümünde dörtpervanelinin matematiksel modelinin ifade edileceği referans çerçeveler tanımlanmış ve hareket denklemleri elde edilmiştir.

2.1. Referans Çerçeveler

Referans çerçeveler olmadan katı bir cismin konumu ve hareketleri tanımlanamaz. Dörtpervanelinin hareketlerini tanımlamak için de referans çerçeveler kullanılmaktadır. Bunlar; Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve ve Gövde Çerçevesi olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2.1 Referans Çerçeveler [29]

2.1.1. Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve

Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve, merkezi dünya üzerinde hareketin başladığı herhangi bir nokta olarak kabul edilen, dönmeyen ve uzayda ataletsel olarak ifade edilen bir çerçevedir. Ataletsel olarak ifade edilmesi yanlış olmaz çünkü dörtpervanelinin menzili ve dünyanın yarıçapı karşılaştırıldığında dünyanın hareketinin hava aracı hareketini etkilemede çok yavaş kaldığı görülmektedir.

Böylelikle, Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve, Newton kanunlarının uygulanabildiği bir çerçevedir. Şekil 2.1'de E ile ifade edilen referans çerçevenin $[x, y, z]$ eksen takımlarının yönleri aşağıda tanımlanmıştır.

- x eksen, kuzey yönünü,
- y eksen, doğu yönünü,
- z eksen ise sağ el kuralına göre yer çekim kuvvetinin gösterdiği vektör ile çakışık olup aşağı yönünü göstermektedir.

2.1.2. Gövde Çerçevesi

Hava aracına uygulanan bütün kuvvet ve momentler gövde çerçevesinde uygulandığından, dört pervanelinin hareket denklemleri gövde çerçevesinde elde edilmektedir. Ayrıca, ölçüm almak için kullanılan duyargaçlar da bu çerçevede tanımlanmaktadır. Gövde çerçevesi, hava aracının kütle merkezine konumlandırılmış ve gövdeye sabitlenmiştir. Böylece, dört pervaneli ile hareket etmekte ve dönme hareketi gerçekleştiren bir çerçevedir. Şekil 2.1'de görülen B noktası çerçevenin konumlandığı noktadır ve $[x_b, y_b, z_b]$ eksenleri aşağıda tanımlanmıştır.

- x_b eksen, dört pervanelinin önünü ifade eder.
- z_b eksen, aşağı yönünü göstermektedir.
- y_b eksen ise sağ el kuralına göre çerçeveyi tamamlayarak dört pervanelinin yanını göstermektedir.

2.2. Euler Açıları

Euler açıları dört pervanelinin havada iken aldığı yönelimleri ifade etmek için kullanılan açısal ifadelerdir. Bu ifadeler literatürde belli bir sıra ile kullanılarak hava araçlarının yönelimleri tespit edilir. Bu tezde 3-2-1 sırası ile kullanılacak olan açı değerleri, Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- Yuvarlanma (ϕ) açısı, x_b ekseninde gerçekleşen sağ el dönme hareketinin gövdede oluşturduğu pozitif açıdır.
- Yunuslama (θ) açısı, y_b ekseninde gerçekleşen sağ el dönme hareketinin gövdede oluşturduğu pozitif açıdır.
- Sapma (ψ) açısı, z_b ekseninde gerçekleşen sağ el dönme hareketinin gövdede oluşturduğu pozitif açıdır.

Dört pervanelinin, gövde çerçevesindeki açısal hız bileşenleri ise $[p, q, r]$ ile ifade edilirler.

2.3. Dönüşüm Matrisi

Dönüşüm matrisi, farklı çerçevelerde ifade edilen vektörlerin birbirleri ile olan ilişkilerini temsil eder. Bir çerçevede tanımlanan bir vektör, farklı çerçevede bu dönüşüm matrisleri yardımı ile ifade edilebilir. Dönüşüm matrisi, iki çerçevenin eksenleri arasındaki açının kosinüs değerleri olarak da ifade edildiği için literatürde Yön Kosinüs Matrisi (Direction Cosine Matrix) olarak da adlandırılmaktadır [29].

Bir vektör B çerçevesinde r_b ile, E çerçevesinde ise r_e ile gösterilsin. r_b ve r_e arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$r_e = R^{(E,B)} r_b \quad (2.1)$$

Burada $R^{(E,B)}$, birimlik bir dönüşüm matrisidir ve B çerçevesinden, E çerçevesine dönüşümü ifade eder. Birimlik olması sebebiyle Denklem 2.2’de verilen özellikleri sağlar.

$$R^{(B,E)} = R^{(E,B)^{-1}} = R^{(E,B)^T} \quad (2.2)$$

Dönüşüm matrisi, Şekil 2.1’de verilen gövde çerçevesi eksenlerinin $[x_b, y_b, z_b]$, sırasıyla ψ , θ ve ϕ açı değerleri kadar döndürülerek oluşturulan dönüşüm matrislerinin çarpımları ile bulunur. Şekil 2.2’de verilen bu dönüşüm işlemleri sonucunda oluşan dönüşüm matrisleri aşağıda verilmiştir.

- x_b ekseninde ϕ kadar döndürüldüğünde elde edilen dönüşüm matrisi:

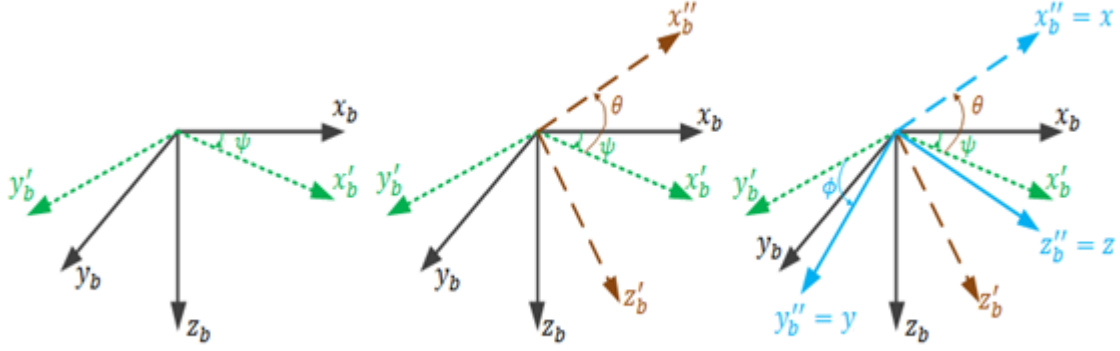
$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- y_b ekseninde θ kadar döndürüldüğünde elde edilen dönüşüm matrisi:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

- z_b ekseninde ψ kadar döndürüldüğünde elde edilen dönüşüm matrisi:

$$\mathbf{R}_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$



Şekil 2.2 Eksenlerin ψ, θ, ϕ kadar döndürülmesi

Daha önceden belirtildiği gibi 3-2-1 sırasıyla yani $\psi \rightarrow \theta \rightarrow \phi$ yapılan dönüşüm işlemi sonucunda, gövde çerçevesinden Dünya'ya Sabit Ataletsel Çerçeve'ye dönüşüm için elde edilen dönüşüm matrisi Denklem 2.6'da verildiği gibi olur [29].

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi) \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi - \cos\phi\sin\psi & \cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi \\ \cos\theta\sin\psi & \sin\phi\sin\theta\sin\psi + \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ -\sin\theta & \sin\phi\cos\theta & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2.6) \end{aligned}$$

2.4. Açısal Hızlar

Açıların zamana göre değişimleri açısal hızlar ile ifade edilir. Dört pervanelinin gövde çerçevesindeki açısal hızları, $[p, q, r]$ ile adlandırılır. x_b ekseninde döndürülme hızı p , y_b ekseninde döndürülme hızı q , z_b ekseninde döndürülme hızı r 'dir. Bu değişkenler gövde çerçevesinde tanımlanmıştır. Ancak, dört pervanelinin hareketi dünya üzerinde gerçekleşmektedir. Dört pervanelinin kütle merkezine yerleştirilen bir Ataletsel Ölçüm Birimi ile açısal hızları gövde çerçevede ölçülebilmektedir. İşte, gövde üzerinde gerçekleşen açısal hız değişimleri Euler açılarının değişim hızları ile ifade edilebilir. Böyle bir dönüşüm işlemi için de daha

önce verilen dönüşüm matrisleri kullanılır. Denklem 2.7 bu dönüşüm işlemini gerçekleştiren matrisin nasıl hesaplandığını göstermektedir [30].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = I \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + R_x(\phi)^T \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} + R_x(\phi)^T R_y(\theta)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8'de ataletsel çerçeveden gövde çerçevesine dönüşüm söz konusudur. Bu nedenle Denklem 2.2'de verilen kural gereği dönüşüm matrislerinin devriği kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Bu işlem sonucunda elde edilen matris T , aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\cos\theta \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Tersine ilişki ise Denklem 2.11'de verildiği gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \frac{\sin\phi}{\cos\theta} & \frac{\cos\phi}{\cos\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.5. Dört pervanelinin Temel Hareket Kavramları

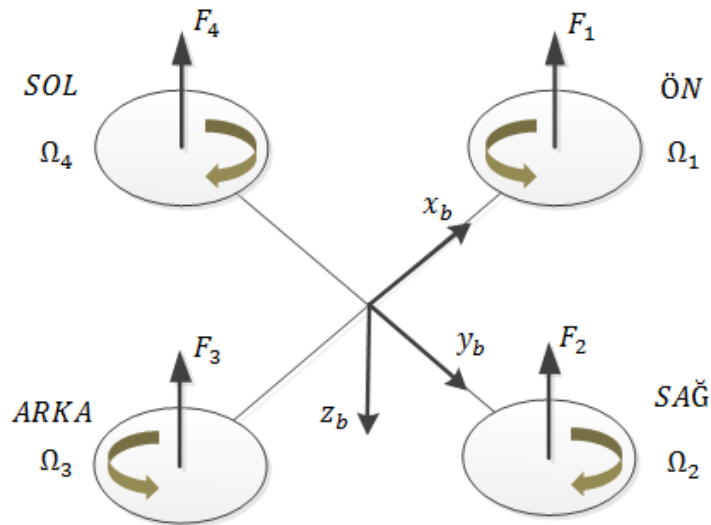
Dört pervaneli, dikey iniş ve kalkış yapabilen bir hava aracıdır. Dört pervaneli hareketlerini rotorlarına bağlı pervaneler yardımıyla gerçekleştirir. Pervanelerin döndürülme yönleri sabittir, uçuş boyunca değişiklik göstermez. Pervanelerin döndürülmesi ile oluşan hava akımı aşağı yönlüdür ki bu durum kaldırma kuvveti

oluşturur. Her bir pervanenin uyguladığı kaldırma kuvveti, döndürölme hızının karesiyle orantılıdır ve bu konu ilerleyen bölümlerde anlatılmaktadır. Pervanelerin hızları değiştirilerek meydana getirilen kuvvetler arası farklar ile oluşan momentler yardımıyla, dörtpervaneli belli başlı hareketleri gerçekleştirir.

Dörtpervanelinin, pervane çiftleri uçuş boyunca farklı yönlerde döndürölmektedir. x_b ekseninin tanımlandığı vektör üzerinde bulunan, ön ve arka pervaneler, saat yönünün tersine dönerken, y_b ekseninin tanımlandığı vektör üzerinde bulunan yan pervaneler, saat yönünde dönmektedir. Bu farklılık, rotorlar yardımıyla dönen pervanelerin oluşturduğu momentlerin birbirlerini etkilemelerini engeller. Böylece, dörtpervaneli havada sabit bir yönelimde durabilmektedir. Bu duruma örnek olarak helikopterler verilebilir. Helikopterler için kuyrukta bir rotor kullanarak tepe pervanenin oluşturduğu dönme momenti sıfırlanmıştır.

2.5.1. Askıda Kalma

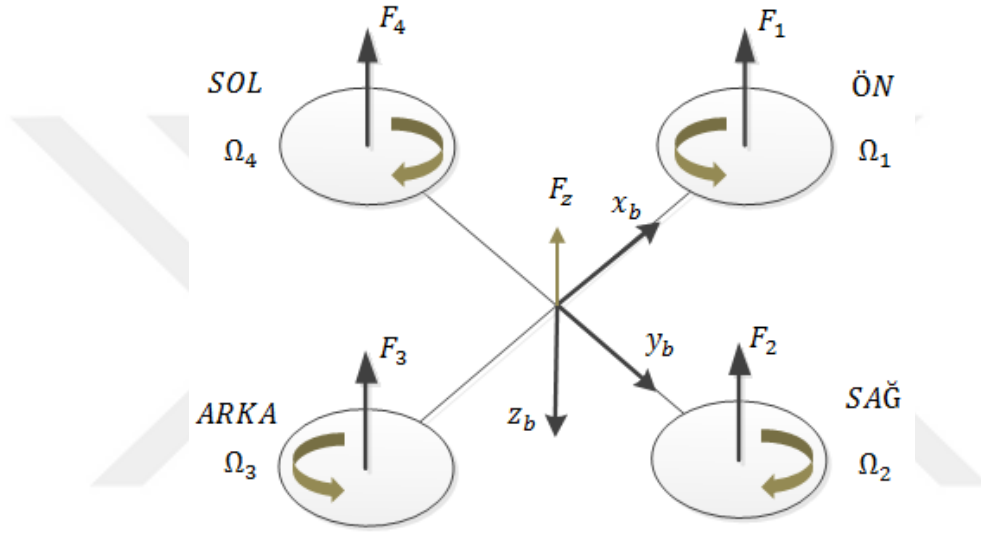
Askıda kalma hareketi dörtpervanelinin uçuşu boyunca en çok kaldığı durumdur. Dörtpervaneli bu durumda sabit bir yükseklikte uçuşunu sürdürmektedir. Şekil 2.3'den göröleceğı üzere, dörtpervanelinin pervaneleri, x_b ekseninin tanımlandığı vektörün yönündeki pervane ilk olacak biçimde saat yönünde artırılarak numaralandırılmıştır. 1, 2, 3 ve 4 numaralı pervaneler aynı hızda dönmektedirler. Bu dört pervanenin de oluşturduğu toplam kaldırma kuvveti, dörtpervanelinin kütle merkezine uygulanan yer çekimi kuvvetine eşittir. Böylece dörtpervaneli hareketsiz olarak, yükselip alçalmadan havada asılı kalır.



Şekil 2.3 Askıda Kalma Hareketi

2.5.2. İtki

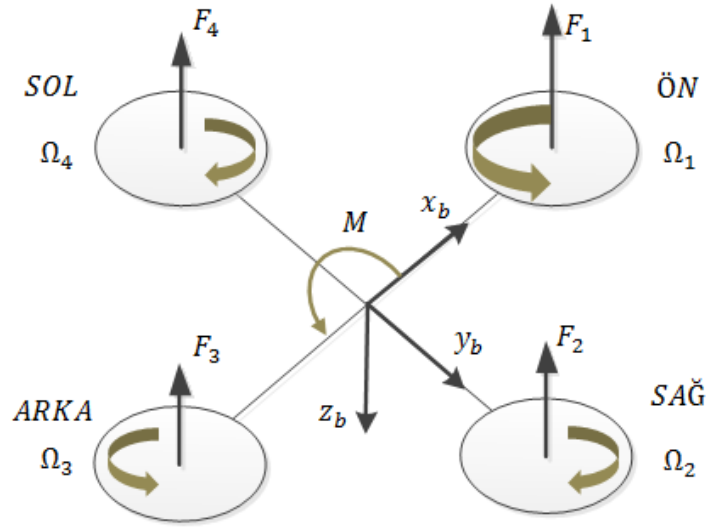
İtki, dörtpervanelinin her bir pervanesinin dönme hızlarının aynı anda artırılması ya da azaltılmasını ifade etmek için kullanılır. Eğer pervaneler aynı anda ve açısal hızları aynı büyüklükte olacak biçimde hızlandırılırlarsa gövde çerçevesine göre toplam kaldırma kuvveti artar ve dörtpervaneli yönelimi değişmeden, yükselme hareketini gerçekleştirir. Aynı şekilde, dönme hızları aynı kalacak biçimde azaltılırsa olduğu yönelimde alçalmaya başlar.



Şekil 2.4 İtki Kuvveti

2.5.3. Yunuslama

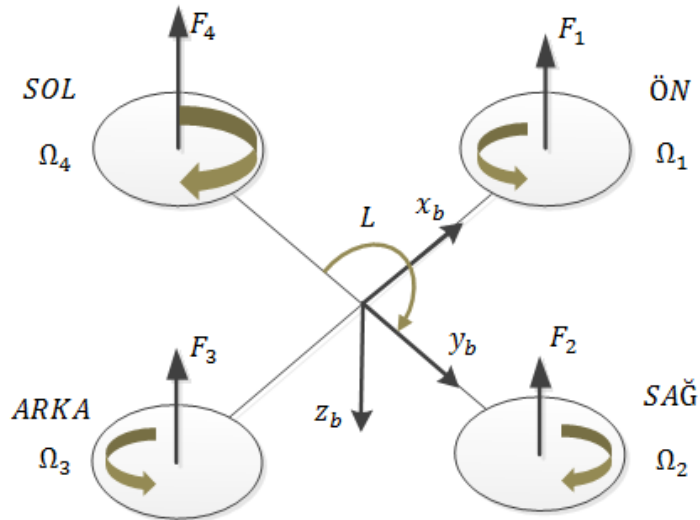
Yunuslama hareketi ile dörtpervaneli ileri ve geri yönde ilerlemektedir. Bu hareketi gerçekleştirmek için dörtpervanelinin sağ ve sol pervanelerinin açısal hızları sabit kalmak şartıyla, ön ve arka pervanelinin dönme hızları birbirlerine göre azaltılıp artırılır. Şekil 2.5’de verildiği gibi, eğer 1 numaralı yani ön pervane hızlandırılıp, 3 numaralı yani arka pervane yavaşlatılırsa ya da hızı sabit bırakılırsa, dörtpervaneli kuvvet farkından meydana gelen tork ile y_b ekseninde pozitif bir moment oluşur ve dörtpervaneli oluşan bu pozitif yunuslama açısı ile geriye gider. Ters durumda ise y_b ekseninde negatif bir moment oluşur ve dörtpervaneli ileriye doğru gider.



Şekil 2.5 Yunuslama Hareketi

2.5.4. Yuvarlanma

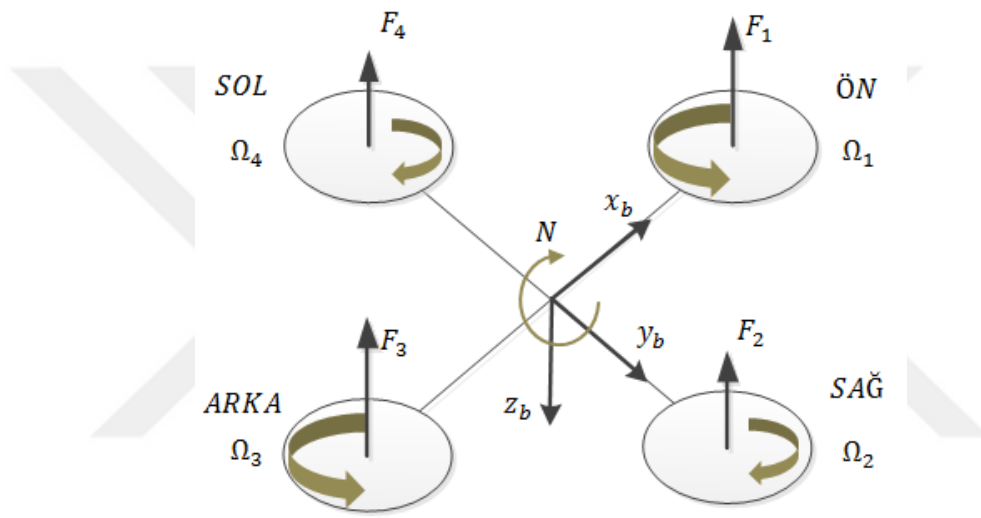
Yuvarlanma hareketi ile dörtpervaneli sağa ya da sola doğru ilerlemektedir. Bu hareketi gerçekleştirmek için, dörtpervanelinin ön ve arka pervanelerinin dönme hızları sabit tutulur ve sağ ve sol pervanelerin dönme hızları birbirlerine göre artırılır ya da azaltılır. Şekil 2.6'da görüldüğü gibi, 4 numaralı pervane hızlandırılıp, 2 numaralı pervane hızı sabit tutulur ya da yavaşlatılırsa, meydana gelen kuvvet farklılıklarından dolayı meydana gelen tork ile x_b ekseninde pozitif bir moment oluşur ve dörtpervaneli sağa doğru hareket eder. Ters durumda ise x_b ekseninde negatif bir moment oluşur ve negatif yuvarlanma açısı ile dörtpervaneli sola doğru hareket eder.



Şekil 2.6 Yuvarlanma Hareketi

2.5.5. Sapma

Sapma, dörtpervelinin z_b ekseninde dönmesidir. Pervanelerin dönme yönleri tanımlanırken, dönmelerinin birbirlerini etkilediğinden bahsedilmiştir. Dörtpervelili sapma hareketini yaparken işte bu etkileşimi kullanır. Şekil 2.7'den görüleceği üzere, ön ve arka pervane çiftleri ve sağ ve sol pervane çiftleri birlikte kullanılır. Ön ve arka pervane çiftlerinin açısal hızları aynı büyüklükte artırılarak ve sağ ve sol pervane çiftlerinin hızları aynı büyüklükte azaltılarak, sürüklenme farkından dolayı, z_b ekseninde pozitif bir moment oluşur ve dörtpervelili z_b ekseninde dönmeye başlar.



Şekil 2.7 Sapma Hareketi

2.6. Dörtpervelinin Matematiksel Modeli

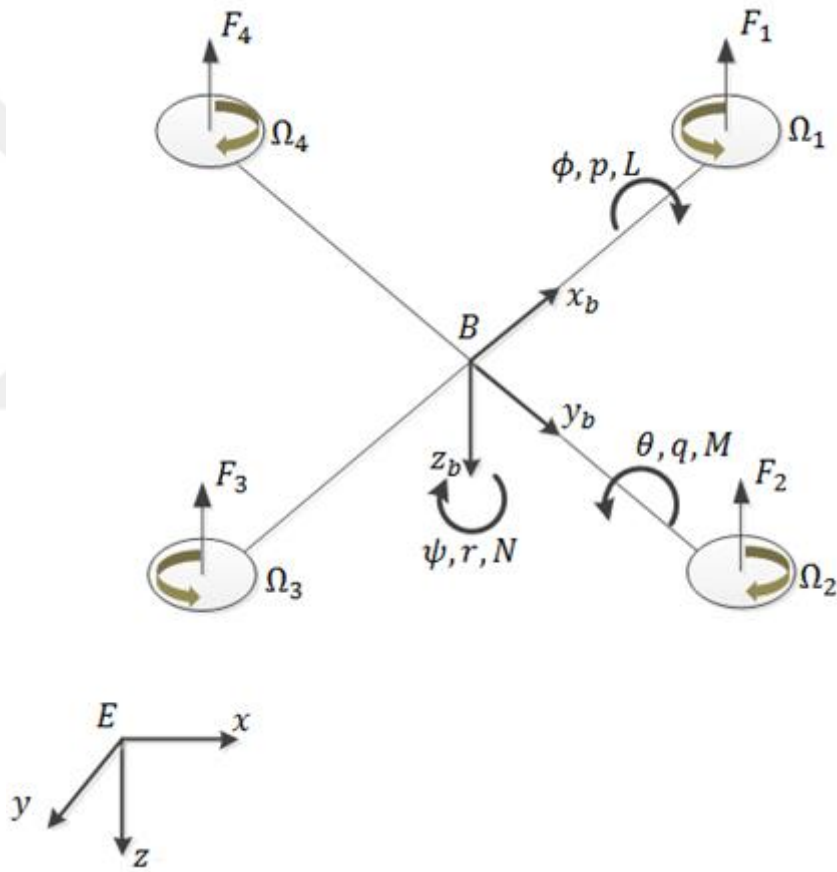
Dörtpervelili basit yapısına karşılık son derece doğrusal olmayan bir sistemdir. Dört adet rotoru, pervaneleri ve çapraz olarak bütünleştirilmiş kolları ile farklı bir aerodinamik yapıya sahip olan dörtpervelinin modellemesini gerçekleştirmek için bazı varsayımlar yapılmıştır. Newton'un hareket yasalarını uygulayabilmek için yapılan bu varsayımlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Dörtpervelinin yapısı tamamen katıdır. Eğilme ya da bükülme gerçekleştirmemektedir.
- Dörtpervelili mükemmel bir bakışma sahiptir.

- Dört pervanelinin kütle merkezi, gövde referans çerçevesinin merkezi ile bire bir örtüşmektedir.
- Pervaneler de katı bir yapıya sahiptir.
- Pervanelerden sağlanan itki ve maruz kalınan sürüklenme kuvveti, pervanelerin dönme hızlarının karesi ile doğru orantılıdır.
- Dört pervaneli uçuşunun büyük bir kısmını askıda kalarak devam ettirmektedir.

2.6.1. Kinematik Denklemler

Şekil 2.8 dört pervanelinin şematik çizimini göstermektedir.



Şekil 2.8 Dört pervanelinin Şematik Çizimi

Hava aracının doğrusal hızları gövde çerçevesinde $[u, v, w]$ ile ifade edilir. Gövde çerçevesinde tanımlanan açısal hız ise daha önce verildiği gibi $[p, q, r]$ ile ifade edilir ve ω vektörü ile gösterilir. Dünya çerçevesinde ise dört pervanelinin konumu $[x, y, z]$ ile doğrusal hızı ve ivmesi sırasıyla $[\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]$ ve $[\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}]$ ile ifade edilir.

$[\phi, \theta, \psi]$ Euler açıları ile dörtpervenelinin ataletsel çerçeveye göre yönelimi ifade edilirken [30], Euler açılarının değişim hızları ve ikinci dereceden türevleri sırasıyla $[\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]$ ve $[\ddot{\phi}, \ddot{\theta}, \ddot{\psi}]$ ile gösterilmektedir.

Kuvvet ve momentler, dörtpervanelinin gövdesine uygulandığından yapılan ölçümler de gövde çerçevesindeki değerleri vermektedir. Dörtpervanelinin hareketini dünyada gözlemleyebilmek için Denklem 2.6 ve Denklem 2.11'de verilen dönüşüm matrisleri kullanılarak, yukarıda tanımlanan gövde çerçevesindeki doğrusal hız dünya çerçevesinde ifade edilirken, Euler açılarının türevleri ise açısal hızlar cinsinden elde edilirler.

Dörtpervanelinin dünyada gerçekleştirdiği doğrusal hız aşağıdaki dönüşüm ile hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dörtpervanelinin Euler açılarının değişim hızları, gövde çerçevesinde ölçülen açısal hız bileşenleri kullanılarak aşağıdaki dönüşüm ile hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\dot{\phi} = p + \sin\phi \tan\theta q + \cos\phi \tan\theta r$$

$$\dot{\theta} = \cos\phi q - \sin\phi r \quad (2.14)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\sin\phi}{\cos\theta} q + \frac{\cos\phi}{\cos\theta} r$$

Dörtpervaneli çoğunlukla askı durumunda kalmaktadır. Dolayısıyla ϕ , θ ve ψ Euler açıları çok küçük değerler almaktadır ($\phi \cong 0, \theta \cong 0, \psi \cong 0$). Buna göre, $\sin\phi \cong 0$, $\cos\phi \cong 1$ yaklaşımlarını kullanarak Denklem 2.14'deki ifadeleri şu şekilde sadeleştirebiliriz.

$$\begin{aligned}
\dot{\phi} &\cong p \\
\dot{\theta} &\cong q \\
\dot{\psi} &\cong r
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

2.6.2. Dinamik Denklemler

Dört pervaneli doğrusal olmayan altı serbestlik dereceli bir sistemdir. Dört pervanelinin hareketleri iki ayrı alt başlık altında incelenebilir. Bunlar, ötelenme ve dönel dinamiklerdir. Ötelenme dinamikleri, dört pervanelinin doğrusal konum, hız ve ivmesini, üzerine etkiyen kuvvetler üzerinden incelerken, dönel dinamikler dört pervanelinin açısal konum, açısal hız ve ivmesini, üzerine etkiyen momentler üzerinden inceler.

Ötelenme Dinamikleri

Ötelenme dinamikleri denklemlerinin türetilmesi için Newton'un ikinci yasası kullanılır. Bu yasaya göre, sabit kütleli katı bir cismin üzerine etkiyen toplam kuvvet, cismin kütlesi ve sahip olduğu ivmesinin çarpımına eşittir.

$$\mathbf{F} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{V})
\tag{2.16}$$

Burada, $\mathbf{F}$ dört pervanelinin ağırlık merkezine uygulanan toplam kuvvet, m dört pervanelinin kütlesi, $\mathbf{V}$ ise dört pervanelinin hız vektörüdür. Denklem 2.16'da verilen $\mathbf{F}$, gövde çerçevesinde aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir [31–33].

$$\mathbf{F} = m\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{w} \times m\mathbf{V}
\tag{2.17}$$

Denklem 2.17'de verilen $\mathbf{F}$, $\mathbf{V}$ ve $\mathbf{w}$ gövde çerçevesindeki bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix}
\tag{2.18}$$

Verilen bu vektörler ile Denklem 2.17 açıkça yazılırsa dört pervaneliye etki eden toplam kuvvetin gövde çerçevesindeki bileşenleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times m \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} 0 & -r & q \\ r & 0 & -p \\ -q & p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix}$$

Dört pervanelinin çoğunlukla askı durumunda kaldığı, hareket ederken açısal hız değerlerinin çok küçük değerler aldığı düşünülürse, Denklem 2.19'da verilen açısal hızların doğrusal hız üzerinden uygulanan kuvvetlere etkisinin çok az olacağı görülmektedir. Bununla beraber, eşitlikteki ikinci terim, eksenler arası çapraz bağları da ifade etmektedir.

Pervaneler, yapısı gereği, döndürülmesi ile oluşan hava akımını aşağı yönlü iletirler ve bir kaldırma kuvveti oluştururlar. Bu kuvvet aşağıda verilen Denklem 2.20 ile hesaplanabilir.

$$F_i = \frac{1}{2} \rho A C_t (r \Omega_i)^2, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.20)$$

Burada, ρ , hava yoğunluğunu, A , pervanenin alanını, C_t , aerodinamik katsayısı, r , pervanenin yarıçapını, Ω_i ise i numaralı pervanenin dönme hızını göstermektedir. Hava yoğunluğu ρ , yüksekliğe bağlı olarak aşağıda verilen Denklem 2.21 ile hesaplanır.

$$\rho = \begin{cases} \rho_0 (1 - 0.00002256h)^{4.256}; & h \leq 10000m \\ 0.412e^{-0.000151(h-10000)}; & h > 10000m \end{cases} \quad (2.21)$$

ρ_0 , deniz seviyesindeki hava yoğunluğudur ve 1.223 kg/m^3 değerindedir. C_t aerodinamik katsayısı ise dört pervanelinin hızına göre değişmektedir. Dört pervanelinin uçabildiği yükseklik kısıtlıdır ve bu durum hava yoğunluğunun çok değişmeyeceği anlamına gelir. Ayrıca, doğrusal hızındaki değişimin ise çok fazla olmaması aerodinamik katsayılarının değişmeyeceğini göstermektedir. Pervanenin alan ve yarıçapı da sabit olduğuna göre, pervanenin oluşturduğu kuvvetin tamamen pervanenin dönme hızına bağlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak pervanelerin oluşturduğu kuvvet dönme hızlarının karesinin belli bir oranına eşittir.

$$F_i = k\Omega_i^2, \quad i = 1,2,3,4. \quad (2.22)$$

Denklem 2.22'de k aerodinamik itki sabitidir.

Aynı durum dörtpervanelinin maruz kaldığı sürüklenme kuvveti için de geçerlidir. Denklem 2.23'de Q_i , pervanelerin dönmesiyle oluşan, pervanelere etkiyen sürüklenme kuvvetidir. Burada d , aerodinamik sürüklenme sabitidir.

$$Q_i = d\Omega_i^2, \quad i = 1,2,3,4. \quad (2.23)$$

Gövde çerçevesinde, dörtpervanelinin bütün pervaneleri z_b ekseninin tersi yönünde bir kuvvet oluşturmaktadır. Bu nedenle, yanıl eksenlerde itki değeri sıfır olmaktadır. Yukarı yönlü toplam kuvvet, pervanelerin oluşturduğu bireysel kuvvetlerin toplamına eşittir.

$$\begin{aligned} U_1 &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ &= k(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Denklem 2.12'de dörtpervanelinin ataletsel çerçevede ve gövde çerçevesinde ifade edilen doğrusal hız bileşenleri arasındaki ilişki dönüşüm matrisi ile verilmişti. Aynı dönüşüm matrisi kullanılarak gövde çerçevesindeki kuvvet bileşenleri ile ataletsel çerçevedeki kuvvet bileşenleri arasındaki ilişki de elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\ddot{x} \\ m\ddot{y} \\ m\ddot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Dörtpervanelinin gövdesine etkiyen toplam kuvvetler itki kuvveti ve yer çekimi kuvvetidir ve gövde çerçevesinde aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{bmatrix} F_{xb} \\ F_{yb} \\ F_{zb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U_1 \end{bmatrix} + m\mathbf{R}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Denklem 2.26'da g , yerçekimi ivmesidir(9.81 m/s^2). Denklem 2.26'daki eşitlik Denklem 2.25'de kullanılarak ataletsel çerçevede elde edilen ötelenme dinamikleri aşağıda verildiği gibi bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{m} \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -U_1 \end{bmatrix} + m \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-U_1}{m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Denklem 2.6'da verilen dönüşüm matrisi ile Denklem 2.28 yeniden yazılırsa, dörtpervanelinin itki ve yönelime bağlı ivme değişimleri Denklem 2.29'da verildiği gibi modellenir.

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\cos\phi \sin\theta \cos\psi + \sin\phi \sin\psi) \frac{-U_1}{m} \\ (\cos\phi \sin\theta \sin\psi - \sin\phi \cos\psi) \frac{-U_1}{m} \\ g - (\cos\theta \cos\phi) \frac{U_1}{m} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Dönel Dinamikler

Dönel dinamikler, dörtpervanelinin ağırlık merkezi etrafındaki dönme hareketinin oluşturduğu; yuvarlanma, yunuslama ve sapma açıları, açısal hızları ve ivmelerdir. Dönel hareket denklemleri aşağıda verilen denklem takımının yardımıyla türetilir.

$$\mathbf{M} = \frac{d}{dt} (\mathbf{I} \mathbf{w}) \quad (2.30)$$

$\mathbf{M}$, dörtpervaneliye etkiyen moment vektörü, $\mathbf{w}$ ise açısal hız vektörüdür. $\mathbf{I}$ dörtpervanelinin atalet değerlerini içeren matrisdir.

Ötelenme dinamik denklemlerinde olduğu gibi, dönel dinamikler de gövde çerçevesinde tanımlanmalıdır. Bu nedenle, Denklem 2.30'da verilen eşitlik gövde çerçevesinde aşağıdaki gibi ifade edilir [31-33].

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} \dot{\mathbf{w}} + \mathbf{w} \times \mathbf{I} \mathbf{w} \quad (2.31)$$

Denklem 2.31'deki vektörler dörtpervanelinin gövde çerçevesinde tanımlanan moment bileşenlerini ve açısal hız bileşenlerini içermektedir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

L , M ve N , sırasıyla x_b, y_b, z_b eksenlerinde dönme hareketinin oluşturulduğu momentlerdir.

Dört pervanelinin bakışimli yapısından dolayı atalet matrisi $\mathbf{I}$, köşegen bir yapıdadır.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Denklem 2.32 ve Denklem 2.33, Denklem 2.31'de yerine konur ise dört pervaneliye etkiyen toplam momentler Denklem 2.34'deki gibi bulunur.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Dört pervanelinin dönel dinamikleri açısal ivmesi ile ifade edilir. Denklem 2.34'de yer alan açısal ivmeler, $\dot{p}, \dot{q}$ ve $\dot{r}$, yönelim ivmesini vermemektedir. Daha önce Denklem 2.10'da tanımlanan $\mathbf{T}$ matrisi kullanılarak p, q ve r açısal hızları ile $\dot{\phi}, \dot{\theta}$ ve $\dot{\psi}$ Euler açılarının değişim hızları arasındaki ilişki tanımlanmıştı. Aynı ilişki kullanılarak, açısal ivmeler ve yönelim ivmeleri arasındaki ilişki de tanımlanabilir. Bunun için Denklem 2.7'nin türevi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Denklem 2.35 ve Denklem 2.7, Denklem 2.34'de yerine konur ise aşağıdaki gibi bir eşitlik elde edilir.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \mathbf{IT} \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \mathbf{I} \left(\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \phi} \dot{\phi} + \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \theta} \dot{\theta} \right) \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \left(\mathbf{T} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) \times \left(\mathbf{IT} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \right) \quad (2.36)$$

Daha önce verilen I ve T Denklem 2.36'da yerine konur ise, dörtpervaneliye etki eden toplam momentler, Euler açılarının değişim hızı ve ivmeleri cinsinden Denklem 3.37'de verildiği gibi elde edilir. Burada s ve c , sırasıyla $\sin$ ve $\cos$ işlevlerini temsil etmektedir.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x(\ddot{\phi} - s\theta\ddot{\psi} - c\theta\dot{\theta}\dot{\psi}) + (I_y - I_z)(c\phi\dot{\theta} + s\phi c\theta\dot{\psi})(s\phi\dot{\theta} - c\phi c\theta\dot{\psi}) \\ I_y(c\phi\ddot{\theta} + s\phi c\theta\ddot{\psi} - s\phi\dot{\phi}\dot{\theta} + c\phi c\theta\dot{\phi}\dot{\psi} - s\phi s\theta\dot{\theta}\dot{\psi}) + (I_z - I_x)(s\phi\dot{\theta} - c\phi c\theta\dot{\psi})(\dot{\phi} - s\theta\dot{\psi}) \\ I_z(-s\phi\ddot{\theta} + c\phi c\theta\ddot{\psi} - c\phi\dot{\phi}\dot{\theta} - s\phi c\theta\dot{\phi}\dot{\psi} - c\phi s\theta\dot{\theta}\dot{\psi}) + (I_y - I_x)(c\phi\dot{\theta} + s\phi c\theta\dot{\psi})(\dot{\phi} - s\theta\dot{\psi}) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Dörtpervanelinin denetim modelini basitleştirmek adına, dörtpervanelinin çoğunlukla askı durumunda kaldığı ve hareketini küçük yönelimler yaparak gerçekleştirdiği varsayımıyla, Denklem 2.37'de verilen karmaşık ifadeler aşağıdaki gibi sadeleştirilerek denetim modelinde kullanılmıştır

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x\ddot{\phi} + (-I_x + I_z - I_y)\dot{\theta}\dot{\psi} \\ I_y\ddot{\theta} + (I_y + I_x - I_z)\dot{\phi}\dot{\psi} \\ I_z\ddot{\psi} + (-I_z + I_y - I_x)\dot{\phi}\dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Pervanelerin farklı açısal hızlarla dönmesi kütle merkezi etrafında bir moment oluşturur. Bu momentlerin hareketi nasıl etkilediği Bölüm 2.5'de anlatılmıştı. Şekil 2.8'de verilen modele göre, x_b ekseninde gerçekleşen moment, yuvarlanma açısı oluşturur ve bu durum 2 ve 4 numaralı rotorların farklı kuvvetler meydana getirmesiyle gerçekleşir. Sağ el kuralına göre gerçekleşen pozitif moment M_{xb} , aşağıda verildiği gibidir.

$$M_{xb} = -lF_2 + lF_4 = lU_2 \quad (2.39)$$

$$M_{xb} = lk(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2)$$

Burada, l dörtpervanelinin rotorlarının kütle merkezine olan uzaklıklarıdır ve bütün rotorlar için aynı değere sahiptir. y_b ekseninde gerçekleşen moment yunuslama açısı oluşturur. Bu açının oluşması için 1 ve 3 numaralı rotorların farklı kuvvetler oluşturması gerekmektedir. Sağ el kuralına göre gerçekleşen pozitif moment M_{yb} , aşağıda verildiği gibidir.

$$M_{yb} = lF_1 - lF_3 = lU_3 \quad (2.40)$$

$$M_{yb} = lk(\Omega_1^2 - \Omega_3^2)$$

z_b ekseninde gerçekleşen moment, ψ sapma açısı oluşturur. Rotor çiftlerinin farklı açısal hızlarda dönmesiyle pervanelerin ürettiği kaldırma kuvvetleri x_b ve y_b eksenlerinde farklı momentlerin görülmesine neden olur. Eksenler arası moment farkı pervanelere etkiyen sürüklenme kuvveti ile ifade edilebilir. İşte, pervanelerin farklı sürüklenme kuvvetine maruz kalmaları sonucunda z_b ekseninde ψ sapma açısını oluşturacak bir moment oluşur. Sağ el kuralına göre gerçekleşen pozitif moment M_{zb} , aşağıda verildiği gibidir.

$$M_{zb} = Q_1 - Q_2 + Q_3 - Q_4 = U_4 \quad (2.41)$$

$$M_{zb} = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2)$$

Yukarıda tanımlanan momentlere ek olarak rotorların dönmesiyle ters momentler oluşur. Bu momentler rotorların jiroskopik etkileri olarak adlandırılır ve her bir eksen için aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$M_{gx} = J\dot{\theta}\Omega_r$$

$$M_{gy} = -J\dot{\phi}\Omega_r \quad (2.42)$$

$$M_{gz} = J\dot{\Omega}_r$$

J , her bir rotorun atalet değeridir. Ω_r rotorların birbirlerine göre dönme hızlarıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Omega_r = \Omega_1 + \Omega_3 - \Omega_2 - \Omega_4 \quad (2.43)$$

Dört pervaneliye etki eden toplam momentler, pervanelerin farklı hızlarla dönmesiyle oluşan momentler ve rotorların jiroskopik etkilerinin toplamıdır. Denklem 2.38'de tanımlanan toplam moment denklemleri kullanılarak, dönel dinamiklerin hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{xb} + M_{gx} \\ M_{yb} + M_{gy} \\ M_{zb} + M_{gz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \ddot{\phi} + (-I_x + I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ I_y \ddot{\theta} + (I_y + I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ I_z \ddot{\psi} + (-I_z + I_y - I_x) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$\begin{bmatrix} lU_2 + J\dot{\theta}\Omega_r \\ lU_3 - J\dot{\phi}\Omega_r \\ U_4 + J\dot{\psi}\Omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x \ddot{\phi} + (-I_x + I_z - I_y) \dot{\theta} \dot{\psi} \\ I_y \ddot{\theta} + (I_y + I_x - I_z) \dot{\phi} \dot{\psi} \\ I_z \ddot{\psi} + (-I_z + I_y - I_x) \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$\begin{bmatrix} I_x \ddot{\phi} \\ I_y \ddot{\theta} \\ I_z \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I_x + I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi} + J\dot{\theta}\Omega_r + lU_2 \\ (-I_y + I_z - I_x) \dot{\phi} \dot{\psi} - J\dot{\phi}\Omega_r + lU_3 \\ (I_z + I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta} + J\dot{\psi}\Omega_r + U_4 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

2.7. Durum Uzayı Gösterimi

Elde edilen matematiksel denklemler göstermektedir ki dörtpervaneli, birçok çağdaş sistemde olduğu gibi çok girişli çok çıkışlı doğrusal olmayan bir sistemdir. Bu durum, sistemin anlaşılmasını daha karmaşık hale getirmektedir. Böyle bir sistemi inceleyebilmek ve tasarımcının işlem yükünü azaltmak adına sistemin iç dinamiklerini yani *durum değişkenlerini* birinci dereceden türevsel denklemler ile ifade etmeye yarayan durum uzayı gösterimi kullanılmaktadır.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2.47)$$

Denklem 2.47’de $\mathbf{x}$, durum vektörünü, $\mathbf{u}$ ise denetim vektörünü göstermektedir. Dörtpervanelinin durum vektörü ve denetim vektörü aşağıda verildiği gibidir.

$$\mathbf{x} = [x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi}]^T \quad (2.48)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2) \\ k(-\Omega_2^2 + \Omega_4^2) \\ k(\Omega_1^2 - \Omega_3^2) \\ d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Denklem 2.29 ve Denklem 2.46 kullanılarak dörtpervanelinin denetimi için elde edilen durum uzayı gösterimi Denklem 2.50’de verildiği gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ (cos\phi sin\theta cos\psi + sin\phi sin\psi) \frac{-U_1}{m} \\ \dot{y} \\ (cos\phi sin\theta sin\psi - sin\phi cos\psi) \frac{-U_1}{m} \\ \dot{z} \\ g - (cos\theta cos\phi) \frac{U_1}{m} \\ \dot{\phi} \\ \frac{(I_x + I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} + \frac{J \dot{\theta} \Omega_r}{I_x} + \frac{l U_2}{I_x} \\ \dot{\theta} \\ \frac{(-I_y + I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} - \frac{J \dot{\phi} \Omega_r}{I_y} + \frac{l U_3}{I_y} \\ \dot{\psi} \\ \frac{(I_z + I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} + \frac{J \dot{\Omega}_r}{I_z} + \frac{U_4}{I_z} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Denklem 2.49’da verilen denetim vektöründe, U_1 ; dörtpervaneliye yükseklik kazandırmak için dört rotorun dönme hızını ayarlayan denetim girişidir. U_2 komutu, dörtpervaneliye yuvarlanma hareketini yaptırmak için 2 ve 4 numaralı rotorların farklı hızlarda döndürülmesini sağlar. Aynı şekilde, U_3 komutu, dörtpervanelinin yunuslama hareketini yapması için 1 ve 3 numaralı rotorların farklı hızlarda döndürülmesini sağlar. U_4 komutu dörtpervaneliye sapma hareketi gerçekleştirmesi için kullanılır.

Gerçek bir sistemde, oluşturulan bu denetim girişleri rotorların dönme hızlarını ayarlar. İstenilen hareketi gerçekleştirmek için pervanelerin gerçekleştirmesi gereken dönme hızları verilen komutlar üzerinden aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4k} & 0 & \frac{1}{2k} & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & -\frac{1}{2k} & 0 & -\frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & 0 & -\frac{1}{2k} & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4k} & \frac{1}{2k} & 0 & -\frac{1}{4d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

2.8. Dörtpervanelinin Doğrusallaştırılmış Modeli

Doğrusal denetim yöntemleri doğrusal zamanla değişmeyen sistemlere uygulanabilirler. Doğrusal olmayan sistemlere uygulanabilmeleri için sistemin doğrusallaştırılması gerekir. Denklem 2.50'de verilen durum uzayı modelinden de anlaşılacağı üzere dörtpervaneli, tamamen doğrusal olmayan bir sistemdir. Doğrusal denetim yöntemlerini uygulamak için bu sistemin belirli bir çalışma koşulunda doğrusallaştırma işlemi yapılmalıdır.

Doğrusal olmayan n durumlu ve m girişli

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2.52)$$

$$\mathbf{f} = [f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_n]^T$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n]^T$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_m]^T$$

sistemini ele alalım. Bu sistemin denge noktası $(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0)$ olsun. Denge noktası etrafında Denklem 2.52'nin Taylor serisi açılımı aşağıda verildiği gibidir.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \cong \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \left. \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{u}} \right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0 \\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_0}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_0) + Y.D.T \quad (2.53)$$

Y.D.T: Yüksek Dereceli Terimler

$\delta \mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$ ve $\delta \mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_0$ olarak küçük sarsım modeli ile durum ve giriş değerleri verildiğinde, $\mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0) = \mathbf{0}$ varsayılırsa ve yüksek dereceli terimler ihmal edilirse, Denklem 2.53 ile gösterilen Taylor serisi açılımı kullanılarak doğrusal durum uzayı modeli aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$\delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta \mathbf{u} \quad (2.54)$$

Denklem 2.54'de $\mathbf{A}$ ve $\mathbf{B}$ Jacobian matrisleri olarak anılır ve aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
A = \frac{\partial f}{\partial x} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \end{bmatrix} \\
B = \frac{\partial f}{\partial u} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} \bigg|_{\substack{x=x_0 \\ u=u_0}} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.55}$$

Doğrusal Dörtpervaneli Modeli

Dörtpervaneli uçuşunun büyük bir kısmını askı durumunda geçirir. Bu nedenle dörtpervaneliyi, askı durumundaki durum değerleri ile doğrusallaştırmak yanlış olmaz. Askı durumunda dörtpervanelinin $[x \ y \ z]$ konumu sabit iken $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]$ hızları, açısal yönelimleri $[\phi \ \theta \ \psi]$ ve Euler açılarının değişim hızları $[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]$ sıfırdır. Sistemin itki değeri cismin ağırlığına eşit iken yönelim yaptıracak moment komutları sıfırdır.

$$\begin{aligned}
x_0 &= [x \ 0 \ y \ 0 \ z \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\
u_0 &= [mg \ 0 \ 0 \ 0]^T
\end{aligned} \tag{2.56}$$

Yukarıda verilen denge noktaları ile Denklem 2.55'de verilen Jacobian matrisleri oluşturulursa elde edilecek doğrusal dörtpervaneli modeli Denklem 2.57'da verildiği gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^+ \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$U_1^+ = U_1 - mg$, U_1^+ gösterimi basitleştirmek için seçilen sanal itki kuvvetidir.

3. DÖRTPERVANELİNİN DENETLENMESİ

Bu bölümde, dörtpervanelinin denetimi ile ilgili bilinmesi gereken bazı konular ve Bölüm 2'de oluşturulan dörtpervanelinin matematiksel modelleri kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemlerinin tasarım adımları anlatılmıştır. Doğrusal denetleyiciler; Oransal-Tümlevsel-Türevsel denetleyici ve türevleri ile Doğrusal Karesel Denetleyici iken, doğrusal olmayan denetleyiciler ise Lyapunov tabanlı Geriadımlamalı ve Kayan Kipli denetimlerdir.

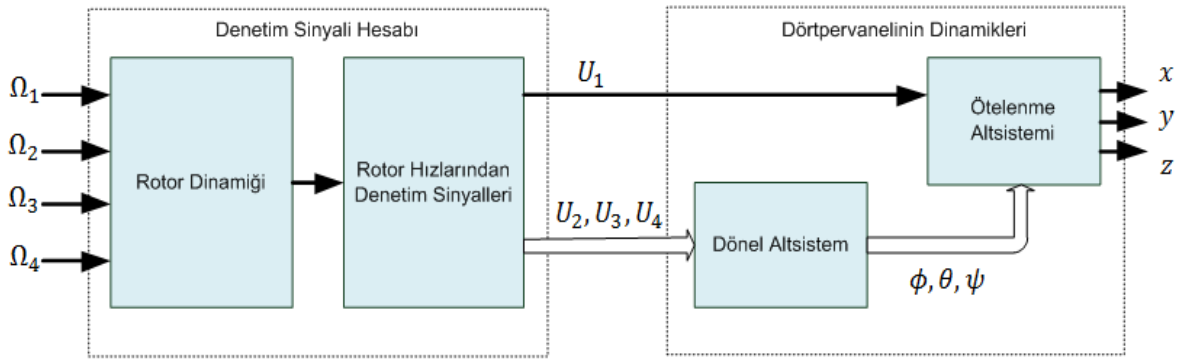
3.1. Dörtpervanelinin Denetim Kavramları

Dörtpervaneli artı (+) ya da çapraz (x) olarak yerleştirilmiş rotorların pervaneleri döndürmesiyle oluşan itki kuvvetlerinin yardımıyla hareketini gerçekleştirmektedir. Dörtpervaneli üzerine etkiyen kuvvetler rotorlardan gelen yukarı yönlü itki kuvvetleri ve aşağı yönlü yerçekimi kuvvetidir. Dörtpervanelinin istenilen bir konuma ve yönelime getirilmesi, bu rotorların dönme hızlarının ayarlanması ile olur. İşte bu görevi gerçekleştirmek, hava aracına istediğimiz hareketi kararlı bir şekilde yaptırabilmek için denetleyiciler kullanılır.

Dörtpervanelinin altı serbestlik dereceli modeli Denklem 2.29 ve Denklem 2.46'da verildiği gibi konum ve yönelimin ivmesel ifadeleridir. Dörtpervaneliye hareketini yaptıran üzerine etkiyen toplam itki ve tork değerleri ise Bölüm 2.6'da verilmişti.

Bu tezde anlatılan dörtpervaneli, istenilen bir konuma gidebilmelidir. Dörtpervanelinin, gitmesi istenen konum koordinatı dünyaya sabit ataletsel çerçevede (x, y, z) , sırasıyla kuzey, doğu ve aşağı olacak biçimde ve hareketine başladığı konum ise başlangıç koordinatı $(0, 0, 0)$ olmak üzere verilir, bu noktaya yönlendirilmesi gerekmektedir. Altı serbestlik dereceli denklemlerden anlaşılacağı üzere dörtpervaneli doğrusal ivme ve açısal ivmeler üzerinden denetlenir. Dörtpervaneli yükselmek için U_1 , yuvarlanma, ϕ , yunuslama, θ ve sapma açısı, ψ , gerçekleştirebilmek için U_2, U_3 ve U_4 komutlarını kullanır. Denetlenmesi gereken altı durum bulunmasına rağmen sadece dört adet denetim sinyali ve bunları üreten eyleyicileri bulunmaktadır. Dolayısıyla, dörtpervaneli literatürde bilinen ismiyle eksik eyleyicili bir sistemdir. Bu durum, dörtpervanelinin denetiminin yükseklik z , yuvarlanma, ϕ , yunuslama, θ ve sapma açısı, ψ , üzerinden gerçekleştirildiğini göstermektedir. x ve y konumları için ise dörtpervaneliyi istenilen konuma

götürecek ϕ_d ve θ_d , yuvarlanma ve yunuslama açısı isterleri üretilir. Bu açı isterlerini üretebilmek için de konum hatalarını yorumlayan denetleyiciler kullanılır. Böylelikle, dörtpervanelinin denetimi için altı adet denetleyici sistem tasarlanmalıdır. Dörtpervaneli özünde iki alt sisteme ayrılabilir. Bunlardan ilki ötelenme hareketini belirleyen alt sistemdir ki, hava aracının doğrusal konum, hız ve ivmesini meydana getirir. Diğeri ise dönel alt sistemdir ki, bu sistem ise hava aracının açıları, açısal hızlarını ve ivmelerini barındıran dönel dinamiklerini içerir. Şekil 3.1 bu alt sistemlerin hava aracının denetimindeki rollerini anlatmaktadır.



Şekil 3.1 Dörtpervanelinin Açık Döngü Dinamikleri

3.1.1. Konum Denetimi

Yükseklik Denetimi:

Dünya üzerinde dörtpervanelinin, kuzey konumunu x , doğu konumunu y ve yere olan konumu, yani yüksekliğini z ile ifade edelim. Dörtpervaneli, istenilen bu konumlara gidebilmek için rotor hızlarını denetleyiciden gelen dönme hızı komutuna göre ayarlar. Altı serbestlik dereceli hava aracı modelinden görüleceği üzere yükseklik denetimi, U_1 , toplam itki kuvveti denetim sinyali, üzerinden yapılır.

$$m\ddot{z} = mg - (\cos\theta\cos\phi)U_1 \quad (3.1)$$

Yükseklik denetleyicimizden gelen komutumuz u_z yani yükseklik isterini yerine getirecek itki kuvveti olsun. Eğer u_z kuvveti $m\ddot{z}$ toplam kuvvete eşit olursa yükseklik isterinin takip edildiğini söyleyebiliriz. Böyle bir yaklaşım bize olması gereken U_1 denetim sinyalini verir. U_1 ile rotorların hızları, istenilen yükseklik

değerine ulaşabilmek için belirlenir. Denklem 3.1'den görüldüğü gibi askı durumunda hava aracının ağırlık merkezine etkiyen toplam itki kuvveti, yerçekimi kuvvetine eşit olur, $U_1 = mg$.

$$u_z = mg - (\cos\theta\cos\phi)U_1 \quad (3.2)$$

$$U_1 = (mg - u_z) \frac{1}{\cos\theta\cos\phi} \quad (3.3)$$

x ve y Konumları Denetimi:

Genellikle x ve y konumlarına erişebilmek için dörtpervanelinin rotorlarına doğrudan bir denetleyici sinyali göndermek yerine, hava aracını bu konuma yönelmesini sağlayan yuvarlanma ve yunuslama açıları belirlenir. Gövde çerçevesi ile ataletsel çerçevenin çakışık olduğunu varsayalım. Bu durumda yuvarlanma açısı gerçekleştiğinde dörtpervaneli dünya üzerinde doğu yönüne (y) ilerler; yunuslama açısı gerçekleştirdiğinde ise dünya üzerinde kuzey yönüne (x) ilerler. Böylelikle, hava aracının istenen x ve y konumlarına götürebilmek için tasarımılanan denetleyici, mevcut konuma göre yapılması gereken yuvarlanma ve yunuslama açı isterlerinin türetilmesinde kullanılır.

Hava aracını x yönünde ilerletecek komutumuz u_x , y yönünde iletleyecek komutumuz u_y olsun. Bu iki komut da dörtpervaneliyi istediğimiz yöne götürecektir x ve y yönündeki kuvvetler olarak varsayılırsa Denklem 2.29'da verilen ifadelerle açı isterlerinin değerleri de eklenerek elde edilecek olan yeni ifade aşağıda verildiği gibi olur.

$$u_x = m\ddot{x} = (\cos\phi_d \sin\theta_d \cos\psi_d + \sin\phi_d \sin\psi_d)(-U_1) \quad (3.4a)$$

$$u_y = m\ddot{y} = (\cos\phi_d \sin\theta_d \sin\psi_d - \sin\phi_d \cos\psi_d)(-U_1) \quad (3.4b)$$

Burada; ϕ_d , y yönüne yönelmesi için istenen yuvarlanma açısı isteri; θ_d , x yönüne yönelmesi için istenen yunuslama açısı isteri; ψ_d , ise dörtpervanelinin baş açısını belirler, dışardan verilebilen serbest sapma açı isteridir.

Denklem 3.4a $\sin\psi_d$, Denklem 3.4b ise $-\cos\psi_d$ ile çarpılıp toplanırsa yuvarlanma açısı isteri, ϕ_d , Denklem 3.5'de verildiği gibi bulunur.

$$\phi_d = \sin^{-1} \left(-\frac{1}{U_1} (u_x \sin \psi_d - u_y \cos \psi_d) \right) \quad (3.5)$$

Aynı şekilde, Denklem 3.4a $\cos \psi_d$, Denklem 3.4b ise $\sin \psi_d$ ile çarpılıp toplanırsa yunuslama açısı isteri, θ_d , Denklem 3.6'da verildiği gibi bulunur.

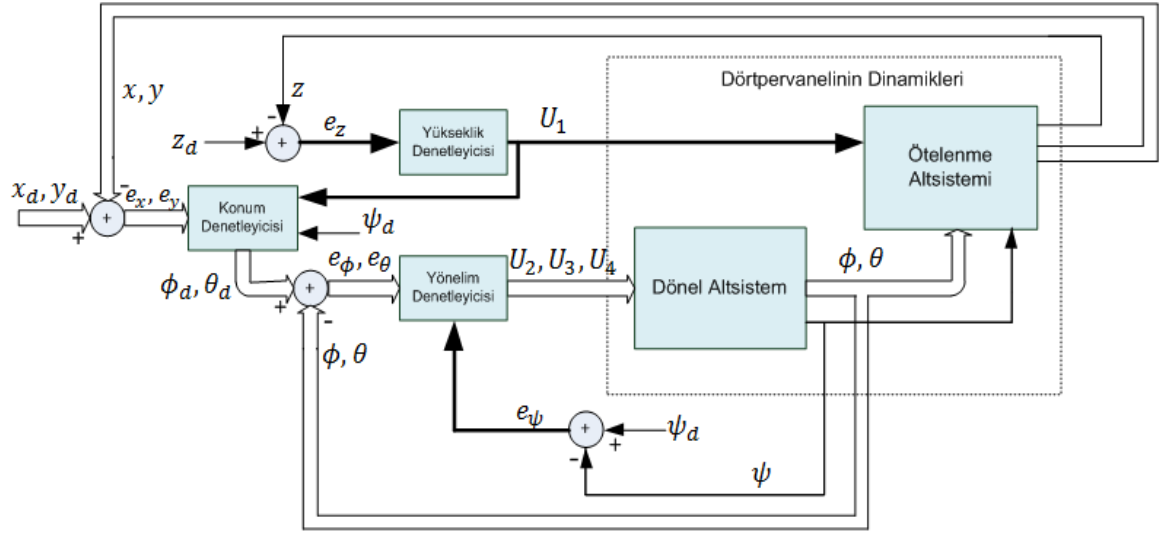
$$\theta_d = \sin^{-1} \left(-\frac{1}{U_1} \left(\frac{u_x \cos \psi_d + u_y \sin \psi_d}{\cos \phi_d} \right) \right) \quad (3.6)$$

3.1.2. Yönelim Denetimi

Dört pervanelinin yönelim denetimi dönel altsistem üzerinden gerçekleştirilir. Denklem 2.46'da verilen altı serbestlik dereceli açısal ivme eşitlikleri kullanılarak denetleyiciler tasarımılanır.

Dört pervanelinin ϕ , yuvarlanma açısı gerçekleştirebilmesi için denetleyici U_2 denetim sinyali üretir. Aynı şekilde θ , yunuslama açısı gerçekleştirebilmesi için denetleyici U_3 denetim sinyali üretir. ψ , sapma açısı dört pervanelinin önünü çevirmek için kullanılır. Kullanıcının isteğine bağlı olan bu açı değerinin gerçekleştirebilmek için denetleyici U_4 denetim sinyalini üretir. Bu denetim sinyalleri rotorların yerine getirmesi gereken dönme hızlarına çevrilerek, dört pervanelinin ağırlık merkezine etkiyen tork değerlerinin oluşmasına neden olur. Böylece hava aracının yönelimi değiştirilir.

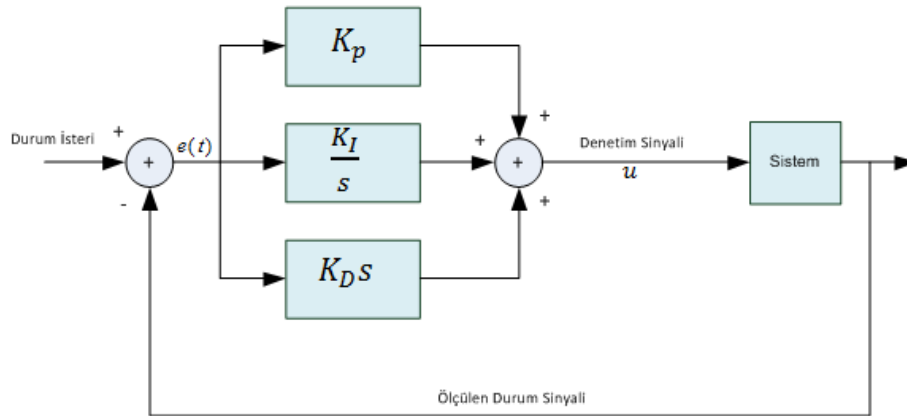
Bu tezde üçü ötelenme altsistem, üçü dönel altsistem için olmak üzere konum ve yönelim denetimi için altı adet denetleyici tasarımılanmıştır. Bütün denetleyiciler kapalı döngü yani geri beslemeli olarak, ister ve gerçek değerler arasındaki hata değeri üzerinden denetimi yerine getirmektedir. Dört pervanelinin ardışık yapıda, kapalı döngü konum ve yönelim denetimini gösteren öbek şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 Kapalı Döngü Dörtpervelinli Denetimi Öbek Şeması

3.2. Dörtpervelinin PID İle Denetimi

Oransal (Proportional) – Tümlövsel (Integral) – Türevsel (Derivative) denetleyici kısaca PID, endüstride en çok kullanılan doğrusal denetleyicidir. Bunun nedeni, karmaşık olmayan yapısı, uygulamada sağladığı kolaylık ve denetim konusunda kendisini kanıtlamış olmasıdır [34]. Çoğunlukla doğrusal olan sistemler için kullanılsa da doğrusal olmayan sistemler üzerinde de etkili bir denetleyicidir. Basit yapısı, bilinmeyen ve matematiksel olarak modellenemeyen sistemleri, sadece denetleyicideki katsayıları ayarlanarak denetlenebilir hale getirilebilmesine imkan sunar. PID denetleyicisinin yapısı ve denetim kuralı Şekil 3.3 ve Denklem 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.3 PID Genel Yapısı

$$u = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

PID denetleyici, ister ve gerçekleşen arasındaki hata değeri üzerinden bir denetim sinyali üretir. Denklem 3.7'den de görüleceği üzere, hata değeri, hatanın tümlevi ve hatanın türevi önceden belirlenen katsayılar ile ağırlıklandırılarak sisteme geri beslenmektedir. Oransal çarpım, tümlev ve türev almanın sistemin çıkışı üzerindeki etkileri farklı olmaktadır. PID ve PID tabanlı denetleyicilerin K_P , K_I ve K_D kazanç değerleri bu etkiler göz önüne alınarak istenilen zaman ve sıklık kısıtlarını sistem tepkisinin sağlaması için seçilir ve kararlı bir denetleyici-sistem birlikteliği oluşturulur.

Denetleyicilerde kullanılmak üzere bazı tanımlamalar yapmak gerekir. Denetim kurallarının oluşturulmasında, yapılan bu tanımlamalar kullanılmaktadır. Kuzey konum isteri x_d , doğu konum isteri y_d , yükseklik isteri z_d , yuvarlanma açısı isteri ϕ_d , yunuslama açısı isteri θ_d ve sapma açısı isteri ψ_d olarak verilirsin. İster ve gerçekleşen arasındaki hata farkları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$e_x(t) = x_d - x \quad (3.8a)$$

$$e_y(t) = y_d - y \quad (3.8b)$$

$$e_z(t) = z_d - z \quad (3.8c)$$

$$e_\phi(t) = \phi_d - \phi \quad (3.8d)$$

$$e_\theta(t) = \theta_d - \theta \quad (3.8e)$$

$$e_\psi(t) = \psi_d - \psi \quad (3.8f)$$

K_{Pi} , K_{Ii} ve K_{Di} ($i = x, y, z, \phi, \theta, \psi$) oransal, tümlev ve türevsel kazanç sabitleridir ve her bir değişken için ayrı ayrı bulunmaktadır.

Dört pervanelinin denetiminde, Oransal – Tümlevsel (PI), Oransal – Türevsel (PD) ve Oransal – Tümlevsel – Türevsel (PID) denetim yöntemleri kullanılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi altı adet PID, PD ve PI denetleyicisi tasarlanmıştır.

Yükseklik ve Yönelim Denetleyicileri:

Dört pervanelinin yükseklik ve yönelim denetimi aşağıda verilen denetim kuralları ile yapılmıştır.

$$u_z = K_{Pz}e_z(t) + K_{Iz} \int_0^t e_z(\tau)d\tau + K_{Dz} \frac{de_z(t)}{dt}$$
$$U_1 = (mg - u_z) \frac{1}{\cos\theta \cos\phi} \quad (3.9)$$

$$U_2 = K_{P\phi}e_\phi(t) + K_{I\phi} \int_0^t e_\phi(\tau)d\tau + K_{D\phi} \frac{de_\phi(t)}{dt} \quad (3.10)$$

$$U_3 = K_{P\theta}e_\theta(t) + K_{I\theta} \int_0^t e_\theta(\tau)d\tau + K_{D\theta} \frac{de_\theta(t)}{dt} \quad (3.11)$$

$$U_4 = K_{P\psi}e_\psi(t) + K_{I\psi} \int_0^t e_\psi(\tau)d\tau + K_{D\psi} \frac{de_\psi(t)}{dt} \quad (3.12)$$

PI denetleyici için ise dört pervanelinin yükseklik ve yönelim denetim kuralları, $K_{Dz} = K_{D\phi} = K_{D\theta} = K_{D\psi} = 0$ seçilerek, PI denetleyicinin yanısıra tasarımılanan PD denetleyicinin yükseklik ve yönelim denetim kuralları ise $K_{Iz} = K_{I\phi} = K_{I\theta} = K_{I\psi} = 0$ seçilerek Denklem 3.9-3.12'de verildiği gibidir.

Konum Denetimi:

x ve y konum denetimi için tasarımılanan PID denetleyici ile ϕ_d ve θ_d , yuvarlanma ve yunuslama açısı isterleri aşağıdaki denetim kuralları yardımıyla elde edilir. Denklem 3.13 ve Denklem 3.14'de verilen denetim kuralları ile hesaplanan u_x ve u_y denetleyici çıktıları Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da kullanılarak ϕ_d ve θ_d , yuvarlanma ve yunuslama açısı isterleri elde edilir.

$$u_x = K_{Px}e_x(t) + K_{Ix} \int_0^t e_x(\tau)d\tau + K_{Dx} \frac{de_x(t)}{dt} \quad (3.13)$$

$$u_y = K_{Py}e_y(t) + K_{Iy} \int_0^t e_y(\tau)d\tau + K_{Dy} \frac{de_y(t)}{dt} \quad (3.14)$$

x ve y konum denetimi için tasarımılanan PI denetleyicinin denetim kuralları, $K_{Dx} = K_{Dy} = 0$ seçilerek, PD denetleyicinin denetim kuralları ise $K_{Ix} = K_{Iy} = 0$ seçilerek Denklem 3.13-3.14'de verilen denetim kuralları ile elde edilir.

3.3. Dörtlü pervanelinin Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetleyici İle Denetimi

Bu bölümde ikinci bölümde elde edilen doğrusal model kullanılarak dörtlü pervanelinin yükseklik, yönelim ve konum denetimi anlatılmıştır.

Sistemin kapalı döngü aktarım işlevi, sıklık ve zaman alanında sistemin davranışını belirler. Kapalı döngü kutuplar bu davranışın en önemli belirleyicileridir. Sistemin istenilen bir davranış göstermesi için kutup yerlerinin uygun seçilmesi gerekmektedir. Kararsızlığa neden olmamak için tüm kutupların karmaşık düzlemin sol tarafında olması, denetim sistemi tasarımında en çok bilinen kuraldır. Tüm durumların ölçülebildiği bir sistemde, uygun olarak seçilen bir kazanç matrisi ile kapalı döngü kutupları istenilen yerlere atanabilir [35], [36]. Kutup yerleştirme denetim yöntemi bu şekilde çalışan bir yöntemdir. Burada, kutup yerleri birtakım kıstaslar göz önüne alınarak belirlenir ve kapalı döngü sistemin kutuplarını bu yerlere taşıyacak kazanç matrisi, Denklem 3.16'da verilen denetim kuralında kullanılır. Ancak, tasarımda gözlenen bazı olumsuzluklar (gümbüzlük sorunu vb.) ya da Çok Girişli Çok Çıkışlı sistemlere uygulamadaki sorunlar, daha iyi bir K geri besleme kazanç matrisi bulunabilir mi sorusunu beraberinde getirmiştir. Bu konuda çağdaş denetim kuramı, Doğrusal Karesel Denetleyici'yi önermektedir.

Doğrusal Karesel Denetleyici, kutup yerleştirme yönteminin aksine, sistemin kararlılığını, istenilen kapalı döngü kutuplarının nerede olması gerektiği üzerinden değil, bir takım başarımlar hedefleri belirleyerek sağlamaya çalışır. Bunun için, kutup yerleştirmeden farklı olarak durum geri besleme kazançlarını hesaplamada sistematik bir yol izlemektedir.

Doğrusal sistemimizin durum uzayı modeli Denklem 3.15'de verildiği gibi olsun.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{3.15}$$

Burada, $x \in R^n$, sistemin durum vektörünü, $y \in R^m$, çıkış vektörünü, $u \in R^k$, ise giriş vektörünü ifade eder. $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times k}$ ve $C \in R^{m \times n}$ sistem dinamiklerini ifade eden matris ve/veya vektörlerdir.

Doğrusal Karesel Denetleyici ile hesaplanan kazançlar, sistem durumlarını ağırlıklandırıp Denklem 3.16'da verilen denetim sinyalinin belirlenmesinde kullanılır.

$$u = -Kx \quad (3.16)$$

K kazanç matrisini bulmak için Doğrusal Karesel Denetleyici, Denklem 3.17'de verilen karesel maliyet işlevini en aza indirmeyi hedefler.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.17)$$

Burada Q ve R , pozitif tanımlı, gerçekte bakışımli matrislerdir. Q , sistemin durumlarını, R ise sistemin giriş sinyallerini ağırlıklandırmak için kullanılır. J maliyet işlevinin, verilen tanımlar ile her zaman pozitif olduğu görülebilir. J maliyet işlevini en küçük yapan kazanç matrisi K , Denklem 3.18'de verilmiştir [36].

$$K = R^{-1} B^T P \quad (3.18)$$

Burada P , pozitif tanımlı, bakışımli bir matristir ve Riccati denkleminin çözümü ile bulunur.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (3.19)$$

Sonuç olarak, Doğrusal Karesel Denetleyici ile önce Q ve R ağırlıklandırma matrisleri seçilir sonra Riccati denkleminin çözümü ile bulunan P matrisi Denklem 3.18'de K kazanç matrisinin hesaplanmasında kullanılır. Bulunan bu en iyi K geri besleme kazanç matrisi, denetim kuralının oluşturulmasında kullanılır.

$$u = -Kx = -R^{-1} B^T P x \quad (3.20)$$

Denklem 3.17'de verilen maliyet işlevi J her zaman pozitif olduğu için, Denklem 3.20'deki denetim kuralıyla x durumları sıfıra gitmektedir. Ancak, yörünge takibi için durumlar sıfırlanmamalı, isteri izlemelidir. Doğrusal Karesel Denetleyici ile ister

ya da yörünge takibi için birçok yöntem önerilmiştir [37]. Durum vektörünün, ister ve gerçekleşen arasındaki hatanın tümlevi ile uzatılması bu yöntemlerden biridir. Durum vektörüne hatanın tümlevi eklenerek, durgun halde hatanın sifıra ulaşması ile beraber, sistem gürbüzlüğünde de iyileşme amaçlanmıştır [38]. Önceki çalışmalarda, hava araçlarının denetleyici tasarımı [39] ve DA-DA çeviricilerde [40] uygulanmış bir yöntemdir.

Hata

$$e = y_d - y = y_d - Cx \quad (3.21)$$

biçiminde tanımlansın. Burada y_d istenilen çıkışı, y sistem çıkışını, x ise durum vektörünü ifade etmektedir. Durum vektörünü bu hatanın tümlevi ile aşağıda verildiği gibi genişletelim.

$$\bar{x} = \left[\int e^T \quad x^T \right]^T \quad (3.22)$$

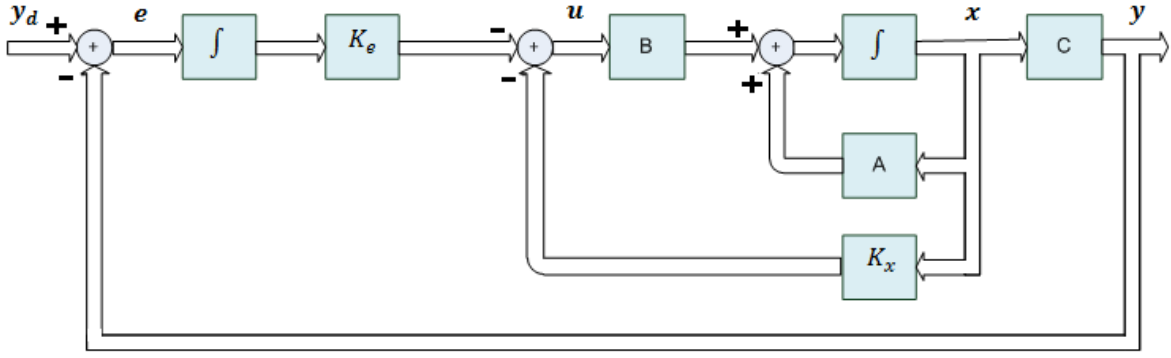
Sistemin yeni durum uzayı Denklem 3.23'de verildiği gibi olur.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{m \times m} & -\mathbf{C} \\ \mathbf{0}_{n \times m} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \bar{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{m \times k} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m \times m} \\ \mathbf{0}_{n \times m} \end{bmatrix} y_d \\ y &= [\mathbf{0}_{m \times m} \quad \mathbf{C}] \bar{x} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Burada; $\mathbf{I}$ birim matrisidir. Bu durumda yeni sistem dinamikleri Denklem 3.17'deki maliyet işlevinde kullanılır ve Denklem 3.23'deki üçüncü terim ihmal edilirse [41] yeni denetim kuralı Denklem 3.24'de verildiği gibi elde edilecektir.

$$\begin{aligned} u &= -\bar{K}\bar{x} = -[K_e \quad K_x]\bar{x} \\ &= -K_e \int e - K_x x \end{aligned} \quad (3.24)$$

Genişletilmiş durum vektörü ile tümlev etkili Doğrusal Karesel Denetleyici'nin öbek şeması Şekil 3.4'den görülebilir.



Şekil 3.4 Tümler Alıcı Eklendi Doğrusal Karesel Denetleyici Öbek Şeması

Doğrusal Karesel Denetleyici doğrusal bir denetim yöntemidir. Bu nedenle, doğrusal olmayan bir modele sahip olan dörtpervaneliye doğrudan bu yöntem uygulanamaz. Ancak, dörtpervanelinin doğrusallaştırılmış modeli üzerinden tasarımılanan denetleyici, doğrusal olmayan model üzerinde kullanılabilir.

Yükseklik ve Yönelim Denetimi:

Yükseklik ve yöneliminin doğrusallaştırılmış durum uzayı gösterimi Denklem 2.57'den aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.25)$$

$$x = [z \quad \dot{z} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi}]^T$$

Burada, A ve B matrisleri Denklem 3.26'da verilen açık ifadede görülebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^+ \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Doğrusal Karesel Denetleyici, yükseklik ve yönelim denetimini Denklem 3.23’de verildiği gibi yükseklik ve yönelim hatalarının tümlevleri ile genişletilmiş durum uzayı denklemi üzerinden gerçekleştirir.

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{x}} &= \left[\int e_z \quad \int e_\phi \quad \int e_\theta \quad \int e_\psi \quad z \quad \dot{z} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi} \right]^T \\ \mathbf{y}_d &= [z_d \quad \phi_d \quad \theta_d \quad \psi_d]^T \\ \mathbf{y} &= [z \quad \phi \quad \theta \quad \psi]^T \\ \mathbf{e} &= \mathbf{y}_d - \mathbf{y}\end{aligned}\tag{3.27}$$

Genişletilmiş durum vektörü $\bar{\mathbf{x}}$ ile sistemin durum uzayı denklemleri Denklem 3.28’deki gibi ifade edilebilir. Doğrusal Karesel Denetleyici yöntemini uygulamak için seçilen $\mathbf{Q}$ ve $\mathbf{R}$ ağırlıklandırma matrisleri de Denklem 3.29’da verilen yapıdadır.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} e_z \\ e_\phi \\ e_\theta \\ e_\psi \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \\ \dot{\psi} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int e_z \\ \int e_\phi \\ \int e_\theta \\ \int e_\psi \\ z \\ \dot{z} \\ \phi \\ \dot{\phi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{l}{I_x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{l}{I_y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^+ \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_d \\ \phi_d \\ \theta_d \\ \psi_d \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \bar{x}$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 \\ 0_{8 \times 4} & 0_{4 \times 8} & 0_{8 \times 8} \end{bmatrix}, \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Görüldüğü üzere $\mathbf{Q}$ matrisi ile sadece hatanın tümlevleri ağırlıklandırılmaktadır. Bu şekilde tam bir ister takibinin gerçekleşmesi amaçlanmıştır. $\mathbf{R}$ matrisi ile de denetim sinyalleri ağırlıklandırılarak denetimin etkinliği, dolayısıyla sistem tepkisinin hızı ayarlanmaktadır. Doğrusal Karesel Denetleyici probleminin Denklem 3.28'de verilen genişletilmiş durum denklemleri için çözülmesi sonucunda hesaplanan $\bar{\mathbf{K}}$ geribesleme kazancı denetim sinyallerinin hesaplanmasında kullanılır.

$$\begin{bmatrix} U_1^+ \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = -\bar{\mathbf{K}}\bar{\mathbf{x}} = -[\mathbf{K}_e \quad \mathbf{K}_x]\bar{\mathbf{x}} \quad (3.30)$$

Konum Denetimi:

Aynı şekilde x ve y konumlarına karşılık gelen dörtpervanelinin doğrusallaştırılmış durum uzayı gösterimi Denklem 3.4'de verilen ifadeler kullanılarak Denklem 2.29'dan aşağıdaki biçimde elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [u_x] \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [u_y] \quad (3.32)$$

Yükseklik ve yönelim denetiminde olduğu gibi, kuzey ve doğu konumlarının isterleri ile gerçekleşen değerlerin arasındaki hatalarının tümlevleri durum vektörlerine eklenerek genişletilmiş durum uzayı denklemleri, Denklem 3.33 ve Denklem 3.34'de verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} e_x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int e_x \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [u_x] + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [x_d] \quad (3.33)$$

$$\begin{bmatrix} e_y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int e_y \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} [u_y] + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [y_d] \quad (3.34)$$

x ve y için aynı değerlere sahip olacak biçimde seçilen Q ve R ağırlıklandırma matrisleri aşağıda verilen yapıdadır.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = [r] \quad (3.35)$$

Aynı şekilde durum vektöründen sadece $\int e_x$ ve $\int e_y$ durumları ağırlıklandırılmıştır. Doğrusal Karesel Denetleyici ile en iyi olarak elde edilen $\bar{K}_x$ ve $\bar{K}_y$ değerleri kullanılarak aşağıdaki denetim sinyalleri elde edilir.

$$u_x = -\bar{K}_x \begin{bmatrix} \int e_x \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$u_y = -\bar{K}_y \begin{bmatrix} \int e_y \\ y \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Hesaplanan u_x ve u_y sinyalleri kullanılarak, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da verilen formüller ile θ_d ve ϕ_d yunuslama ve yuvarlanma açı isterleri üretilir. Bu açı isterleri daha önce bahsedilen yükseklik ve yönelim denetleyicisinde kullanılarak konum denetimi gerçekleştirilir.

Bütünsel Yaklaşım:

Yukarıda sistem altsistemlere ayrılarak, bu alt sistemler üzerinden denetim gerçekleştirilmektedir. Bunun yerine gerçekleştireceğimiz bütün durumları tek bir durum vektöründe toplayıp yukarıda bahsedilen adımlar ile tek seferde bir kazanç matrisi oluşturarak, dörtpervanelinin konum ve sapma açısını denetlenebilir. Böyle

bir tasarımda x ve y konumları için herhangi bir yunuslama ve yuvarlanma açısı isteri üretilmeden ve yunuslama ve yuvarlanma denetimi de yapılmadan, doğrudan U_2 ve U_3 denetim sinyalleri elde edilebilir.

Bu durumda sistemin tümlev alıcı ile genişletilmiş durum vektörü, ister ve hata vektörü aşağıda verildiği gibi olur.

$$\bar{x} =$$

$$\left[\int e_x \quad \int e_y \quad \int e_z \quad \int e_\psi \quad x \quad \dot{x} \quad y \quad \dot{y} \quad z \quad \dot{z} \quad \phi \quad \dot{\phi} \quad \theta \quad \dot{\theta} \quad \psi \quad \dot{\psi} \right]^T$$

$$y_d = [x_d \quad y_d \quad z_d \quad \psi_d]^T \quad (3.38)$$

$$y = [x \quad y \quad z \quad \psi]^T$$

$$e = y_d - y$$

Sadece x , y , z ve ψ hatalarının tümlevlerini ağırlıklandıracak Q ve R birim matrisi ile Denklem 3.17'de verilen J maliyet işlevini en küçük yapacak uygun K kazanç matrisi yukarıda belirtilen adımlarla bulunabilir. Denetim sinyalleri, yukarıda tanımlanan durum vektörü ve bu kazanç matrisi ile Denklem 3.30'da yerlerine konularak yapılan çarpım sonucunda elde edilir.

3.4. Dört pervanelinin Geriadımlamalı Denetim Yöntemi İle Denetimi

Önceki bölümlerde dört pervanelinin doğrusal denetim yöntemleri olan PID ve Doğrusal Karesel Denetleyici ile denetimi ele alınmıştır. Bu bölümde dört pervanelinin doğrusal olmayan bir denetim yöntemi olan Geriadımlamalı Denetim yöntemi kullanılarak denetlenmesi ele alınmıştır [42-43], [10].

Yükseklik ve Yönelim Denetimi:

Bu bölümde dört pervanelinin yükseklik ve yönelim denetimi için denetim girişlerinin, geriadımlamalı denetim yöntemi ile türetilmesi anlatılmıştır. Denetim kuralları, konum ve yönelimlerin hataları ile açısal ve doğrusal hız hataları üzerinden bir geriadımlama ile bulunmuştur [16], [44-46].

İlk olarak $\dot{z} = v_1$ sanal sistemi için aşağıdaki gibi bir takip hatası tanımlansın.

$$e_z = z_d - z \quad (3.39)$$

Sistemin kararlılık analizi için aşağıda verilen Lyapunov işlevini seçelim.

$$V_1 = \frac{1}{2}(e_z^2 + \lambda_1 \gamma_1^2), \quad \lambda_1 > 0 \quad (3.40)$$

Burada, $\gamma_1 = \int_0^t e_z(\tau) d\tau$, yükseklik hatasının tümlevi olarak tanımlanmıştır ve durgun hal hatasını sıfırlamak için bir ilave terimi olarak eklenmiştir. Lyapunov işlevinin türevi

$$\dot{V}_1 = e_z(\dot{z}_d - \dot{z} + \lambda_1 \gamma_1) = e_z(\dot{z}_d - v_1 + \lambda_1 \gamma_1) \quad (3.41)$$

olur. Denklem 3.41'de görülen sanal denetim sinyali v_1 aşağıda verildiği gibi seçilsin.

$$v_1 = \dot{z}_d + \lambda_1 \gamma_1 + c_1 e_z, \quad c_1 > 0 \quad (3.42)$$

Böylece Lyapunov işlevinin türevi

$$\dot{V}_1 = -c_1 e_z^2 < 0 \quad (3.43)$$

olur ve Lyapunov kuramı gereği, pozitif tanımlı olan V_1 ve negatif tanımlı olan $\dot{V}_1$ sistemin kararlılığını garantiler [43].

Sanal denetim sinyali v_1 ile yükselme hızı arasında ikinci bir hata tanımlaması yapalım.

$$e_{z_2} = v_1 - \dot{z} \quad (3.44)$$

İkinci bir Lyapunov işlevi de aşağıdaki gibi tanımlansın.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_{z_2}^2 \quad (3.45)$$

Lyapunov işlevinin türevi

$$\dot{V}_2 = e_z(\dot{e}_z + \lambda_1 \gamma_1) + e_{z_2} \dot{e}_{z_2} \quad (3.46)$$

olur. Denklem 3.42 ve Denklem 3.44 kullanılarak yükselme hatası ve yükselme hızı hatasının türevleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\dot{e}_z = -\lambda_1 \gamma_1 - c_1 e_z + e_{z_2} \quad (3.47)$$

$$\dot{e}_{z_2} = \ddot{z}_d + \lambda_1 e_z + c_1 \dot{e}_z - \ddot{z} \quad (3.48)$$

Denklem 3.47 ve Denklem 3.48, Denklem 3.46'da yerine konur ve bazı düzenlemeler yapılırsa ikinci Lyapunov işlevinin türevinin son hali aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_z^2 + e_{z_2} \left[(1 + \lambda_1 - c_1^2) e_z + \ddot{z}_d - c_1 \lambda_1 \gamma_1 + c_1 e_{z_2} - g + \frac{\cos \phi \cos \theta}{m} U_1 \right] \quad (3.49)$$

Yükselme hızı denetiminde olduğu gibi, yükselme ivmesi için de tanımlanan U_1 denetim sinyali aşağıdaki gibi seçilsin.

$$U_1 = \frac{m}{\cos \phi \cos \theta} \left[g - \left((1 + \lambda_1 - c_1^2) e_z + \ddot{z}_d - c_1 \lambda_1 \gamma_1 + (c_1 + c_2) e_{z_2} \right) \right] \quad (3.50)$$

Böyle bir seçim ile Lyapunov işlevinin türevi

$$\dot{V}_2 = -c_1 e_z^2 - c_2 e_{z_2}^2 < 0, \quad c_1, c_2 > 0 \quad (3.51)$$

olur ve Lyapunov kuramı gereği yükselme işlevini gerçekleştiren sistem bu denetim kuralıyla kararlı bir hale gelir.

Aynı işlem basamakları ile yunuslama, yuvarlanma ve sapma denetim sinyalleri de aşağıda verildiği şekliyle bulunur.

$$U_2 = \frac{I_x}{I} \left[(1 + \lambda_3 - c_3^2) e_\phi + \ddot{\phi}_d - c_3 \lambda_3 \gamma_3 + (c_3 + c_4) e_{\phi_2} - \frac{(I_x + I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J \dot{\theta} \Omega_r}{I_x} \right] \quad (3.52)$$

$$U_3 = \frac{I_y}{I} \left[(1 + \lambda_5 - c_5^2) e_\theta + \ddot{\theta}_d - c_5 \lambda_5 \gamma_5 + (c_5 + c_6) e_{\theta_2} - \frac{(-I_y + I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J \dot{\phi} \Omega_r}{I_y} \right] \quad (3.53)$$

$$U_4 = \frac{I_z}{I} \left[(1 + \lambda_7 - c_7^2) e_\psi + \ddot{\psi}_d - c_7 \lambda_7 \gamma_7 + (c_7 + c_8) e_{\psi_2} - \frac{(I_z + I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{J \dot{\phi} \Omega_r}{I_z} \right] \quad (3.54)$$

Konum Denetimi:

Dört pervaneli istenilen x_d ve y_d konumlarını gerçekleştirmek için tasarımılanan geriadımlamalı denetleyici sinyalleri, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da kullanılmak üzere u_x ve u_y sinyalleridir. Bu sinyaller yükseklik denetimi için izlenen yol ile aşağıdaki gibi bulunur.

$$u_x = -\frac{m}{U_1} [(1 + \lambda_9 - c_9^2)e_x + \ddot{x}_d - c_9\lambda_9\gamma_9 + (c_9 + c_{10})e_{x_2}] \quad (3.55)$$

$$u_y = -\frac{m}{U_1} [(1 + \lambda_{11} - c_{11}^2)e_y + \ddot{y}_d - c_{11}\lambda_{11}\gamma_{11} + (c_{11} + c_{12})e_{y_2}] \quad (3.56)$$

Bulunan bu sinyaller, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da yerine konur ve dörtpervaneliye istenilen konuma yönlendirecek ϕ_d ve θ_d açılar üretilir.

Sonuç olarak, geriadımlama denetimi ile bulunan bu denetim sinyalleri ile dörtpervanelinin denetimi gerçekleştirilir. Denetim sinyallerinden görüleceği gibi sistemin doğrusal olmayan birtakım etmenleri, giriş sinyali ile iptal edilmeye çalışılmıştır. Her bir durum için ayrı ayrı tasarımılanan denetleyici yapısı, kararlı bir oluşum için uygun katsayılar bulunmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada yönelim ve konum hatalarını ve bu hataların tümlevini ağırlıklandıran c_i ($i = 1, 2, \dots, 11, 12$) ve λ_i ($i = 1, 3, 5, 7, 9, 11$) sabitlerinin uygun seçimi ile dörtpervanelinin denetimi gerçekleştirilmiştir.

3.5. Dörtpervanelinin Kayan Kipli Denetim Yöntemi ile Denetimi

Bu bölümde dörtpervanelinin konum ve yönelim denetim kurallarının kayan kipli denetim ile elde edilişi anlatılmaktadır.

Kayan kipli denetim, geriadımlamalı denetim gibi sistemin kararlılığı ve icra kabiliyetini sağlamada sistematik bir yaklaşım sunan, doğrusal olmayan bir denetim yöntemidir [47]. Bu yöntem ile tasarım iki ayrı adımı içermektedir. Birinci adım, kayan yüzey tanımlamaktır. Sistemin durumlarının bu yüzey üzerinde kalmaları sağlanarak tasarım kistaslarının sağlanması amaçlanır. İkinci adım ise oluşturulan bu kayma yüzeyine göre denetim sinyalinin oluşturulmasıdır [10], [48–50].

Yükseklik ve Yönelim Denetimi:

Öncelikle, yükseklik denetimini ele alalım. Denklem 2.50'den görüleceği üzere z ile U_1 arasındaki altsistemin derecesi 2'dir. Bu bilgiye göre, Denklem 3.39'da verilen takip hatası için s_z kayan yüzey, Denklem 3.57'de verildiği gibi tanımlanmıştır.

$$s_z = \dot{e}_z + \lambda_z e_z, \quad \lambda_z > 0 \quad (3.57)$$

Sistem kararlılığının incelenmesinde Lyapunov işlevi aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$V = \frac{1}{2}(s_z^2) \quad (3.58)$$

$\dot{s}_z = -k_{z1} \text{sign}(s_z) - k_{z2} s_z$ olarak seçilirse Lyapunov işlevinin türevi

$$\dot{V} = -k_{z1} s_z \text{sign}(s_z) - k_{z2} s_z^2 < 0 \quad (3.59)$$

olur ve her zaman negatif olan $\dot{V}$ ile Lyapunov kuramı gereği sistem kararlıdır. $\dot{s}_z$ için sadece işaret işlevinin kullanılması çatırtı adı verilen soruna neden olmaktadır. Bu çatırtıyı azaltmak için kayan yüzeyin türevine $-k_{z2} s_z$ eklenmiştir. Böylece yükseklik denetimi için denetim kuralı aşağıdaki verilen sıra ile bulunur.

$$\dot{s}_z = \ddot{e}_z + \lambda_z \dot{e}_z = -k_{z1} \text{sign}(s_z) - k_{z2} s_z \quad (3.60a)$$

$$\dot{s}_z = \ddot{z}_d - \ddot{z} + \lambda_z (s_z - \lambda_z e_z) = -k_{z1} \text{sign}(s_z) - k_{z2} s_z \quad (3.60b)$$

Denklem 2.50'de verilen, $\ddot{z}$, yükselme ivmesinin matematiksel ifadesi, Denklem 3.60b'de yerine konur ise sonuç olarak U_1 denetim kuralı aşağıdaki gibi olur.

$$U_1 = \frac{m}{\cos \phi \cos \theta} [g - k_{z1} \text{sign}(s_z) - (k_{z2} + \lambda_z) s_z - \ddot{z}_d + \lambda_z^2 e_z] \quad (3.61)$$

Yükseklik denetmi için izlenen yol aynı şekilde yönelim durumları için de ilerletilerek yunuslama, yuvarlanma ve sapma denetim kuralları aşağıda verildiği şekilde bulunur.

$$U_2 = \frac{I_x}{1} \left[k_{\phi 1} \text{sign}(s_\phi) + (k_{\phi 2} + \lambda_\phi) s_\phi + \ddot{\phi}_d - \lambda_\phi^2 e_\phi - \frac{(I_x + I_y - I_z)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi} - \frac{J \dot{\theta} \Omega_r}{I_x} \right] \quad (3.62)$$

$$U_3 = \frac{I_y}{1} \left[k_{\theta 1} \text{sign}(s_\theta) + (k_{\theta 2} + \lambda_\theta) s_\theta + \ddot{\theta}_d - \lambda_\theta^2 e_\theta - \frac{(-I_y + I_z - I_x)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi} + \frac{J \dot{\phi} \Omega_r}{I_y} \right] \quad (3.63)$$

$$U_4 = \frac{I_z}{1} \left[k_{\psi 1} \text{sign}(s_\psi) + (k_{\psi 2} + \lambda_\psi) s_\psi + \ddot{\psi}_d - \lambda_\psi^2 e_\psi - \frac{(I_z + I_x - I_y)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta} - \frac{J \dot{\psi} \Omega_r}{I_z} \right] \quad (3.64)$$

Konum Denetimi:

Dört pervanelinin, istenilen x_d ve y_d konumlarını gerçekleştirmek için tasarımılanan kayan kipli denetim sinyalleri, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6'da kullanılmak üzere u_x ve u_y sinyalleridir ve yükseklik denetimi için izlenen yol ile aşağıdaki gibi bulunurlar.

$$u_x = -\frac{m}{U_1} [k_{x_1} \text{sign}(s_x) + (k_{x_2} + \lambda_x) s_x + \ddot{x}_d - \lambda_x^2 e_x] \quad (3.65)$$

$$u_y = -\frac{m}{U_1} [k_{y_1} \text{sign}(s_y) + (k_{y_2} + \lambda_y) s_y + \ddot{y}_d - \lambda_y^2 e_y] \quad (3.66)$$

Yukarıda verilen denetim sinyalleri ile bulunan ϕ_d ve θ_d yuvarlanma ve yunuslama açı isterlerinin, yönelim denetimi ile gerçekleşmesi sağlanarak, istenilen konuma erişilir.

Sonuç olarak, tasarımılanan kayan kipli denetim durum değişimlerine hızlı tepki veren, gürbüz ve uygulaması kolay olan bir yöntemdir. Denetim sinyallerinden görüleceği üzere, tıpkı geriadımlamalı denetim yönteminde olduğu gibi, kayan kipli denetim de sistemin doğrusal olmayan etkilerini giriş sinyali ile ortadan kaldırmaya çalışmaktadır. Uygun olarak seçilen λ_i , k_{i_1} ve k_{i_2} ($i = x, y, z, \phi, \theta, \psi$) sıfırdan büyük sabitleri ile dört pervanelinin konum ve yönelim denetimi kararlı bir şekilde gerçekleştirilir.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu bölümde Bölüm 3’de anlatılan denetim yöntemlerinin benzetimleri yapılmış ve başarımları karşılaştırılmıştır. Bölüm 2’de verilen dörtpervanelinin altı serbestlik dereceli matematiksel modeli Matlab-Simulink ortamında oluşturulmuş ve denetim yöntemleri bu model üzerinden denenmiştir. Denklem 2.50’de verilen matematiksel model için kullanılan parametreler Samir Bouabdallah’ın doktora çalışmasında kullandığı dörtpervaneli modelinden alınmıştır [10]. Buna göre benzetimi yapılacak dörtpervanelinin teknik parametreleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 4.1 Dörtpervanelinin Parametreleri

Parametre	Simge	Değeri	Birimi
Kütle	m	0.65	kg
Eylemsizlik Momenti	I_x	0.0075	kg.m ²
	I_y	0.0075	kg.m ²
	I_z	0.013	kg.m ²
İtke Sabiti	k	0.0000313	N.s ²
Sürüklenme Sabiti	d	0.00000075	N.m.s ²
Kol Boyu	l	0.23	m
Rotor Eylemsizliği	J	0.00006	kg.m ²

Denetleyici tasarımları sistemin yetenekleri doğrultusunda yapılır. Yetenekleri aşan tasarımlar beklenen sonuçları vermezler. Bu nedenle denetim sistemi tasarımlarken dörtpervanelinin yetenekleri göz önüne alınmak zorundadır. Dörtpervanelinin yeteneğini gösteren en önemli değer motorunun üretebildiği açısal hız değeridir. Çünkü açısal hız değerinin karesi ile doğru orantıda pervanelerden kuvvet ve momentler üretilebilmektedir. Yapılan benzetimlerde her

biri dakikada 5250 tur atabilen, diğ er bir deyişle en yüksek 550 rad/s açısal hız üretebilen birbirine eşdeğ er motorların kullanıldığı varsayılmaktadır.

Denetleyicileri tasarımlarken bu parametreler ile aşağıdaki kıstaslara göre bir tasarım yapılmıştır.

- Dörtpervanelinin denetleyici tasarımları basamak tepkilerine göre belirlenecektir. Buna göre, dörtpervanelinin konum denetleyicileri için basamak başarısı 1 metreye ulaşabilme olarak belirlenmişken, yönelim için ise 1 radyanlık a ı yani 57.29 dereceye ulaşabilmedeki başarısı incelenmiştir.
- Dörtpervanelinin yetenekleri aşılmayacaktır. Yani motorların 550 rad/s açısal hızdan daha fazla hızlanmasını isteyecek komutlar  retilmeyecektir. Tasarım için gereken en önemli koşul budur.
- Konum ve yönelim için tasarımılanan denetleyicilerin basamak tepkisi göz önüne alınarak tasarımlarda en yüksek aşma değ eri %15 olmalıdır.
- Daha önceden anlatıldığı üzere dörtpervaneli yükseklik ve yönelim denetleyicileri ile motorlara komutlar üretmektedir. Kuzey ve doğu konumları için ise gereken yunuslama ve yuvarlanma komutları ise bu konumlar için tasarımılanan denetleyiciler tarafından üretilmektedir. Bu nedenle doğrudan motora etki eden yükseklik ve yönelim denetleyicilerinin tepkisinin, diğ er konum denetleyicilerinin tepkisine göre daha hızlı olması doğaldır. Bu nedenle yükseklik ve yönelim denetleyicileri için basamak tepkisi yükselme süresi en fazla 1 saniye, kuzey ve doğu denetleyicileri için ise en fazla 5 saniye olması uygun görülmüştür.
- Aynı şekilde yükseklik ve yönelim denetleyicileri için basamak tepkisi $\pm\%2$ durulma süresi en fazla 5 saniye, kuzey ve doğu denetleyicileri için ise en fazla 20 saniye olması uygun görülmüştür.
- Dörtpervaneli, yunuslama ve yuvarlanma yönelim değ erleri 90 dereceye yaklaştı ı a kararsızlığa doğru ilerlemektedir; 90 derecede ise dönüşümlerde Y n Kosinüs Matrisi kullanıldığı için tam bir kararsızlık halindedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında kararlı uçuşun sürekliliği için yunuslama ve yuvarlanma değ erlerinin 60 dereceyi aşmayacak biçimde bir tasarım yapılmıştır.

Bu bölümde Bölüm 2’de anlatıldığı biçimde tasarımılanan, sırasıyla PID, PI, PD, Doğrusal Karesel Denetleyici, geriadımleme ve kayan kipli denetim yöntemlerinin benzetim sonuçları önce basamak tepkileri üzerinden incelenecektir. Daha sonra ise dörtpervanelinin izlemesi gereken yörüngeler iki farklı senaryo ile belirlenmiş ve denetim yöntemlerinin yörünge takibi yapma yetenekleri incelenmiştir. Denetleyici sistemlerinin başarısı gürbüzlüğü ile ifade edilmektedir. Gürbüzlük, belirsizlik durumlarında bile denetleyicinin görevini yapabilmadaki yeteneğidir. Bu tez kapsamında dörtpervanelinin gürbüzlüğü, parametre belirsizliği üzerinden incelenmeyip, bozucu etkiye maruz kalmış sinyallerin denetleyiciler üzerinde etkisi incelenerek gözlemlenecektir. Yapılan bütün benzetimlerde hareketin başladığı ilk anda gövde çerçevesi ve ataletsel çerçevenin çakışık olduğu ve uçuş boyunca sapma açısı sıfırda tutularak, x yönüne ilerlemek kuzeye, y yönüne ilerlemek ise doğuya gitmek biçiminde ifade edilmiştir.

4.1. PID Tabanlı Denetim

Bu bölümde Bölüm 3.2’de anlatılan PID tabanlı denetleyicilerin benzetim sonuçları verilmiştir.

Denetim kuralı Denklem 3.9-12’de verildiği gibi bir denetim uygulandığında PID ve PD ile başarılı bir denetim gerçekleştirilmesine rağmen PI ile başarılı bir denetim mümkün olmamıştır. O nedenle PI sonuçları verilmemiştir.

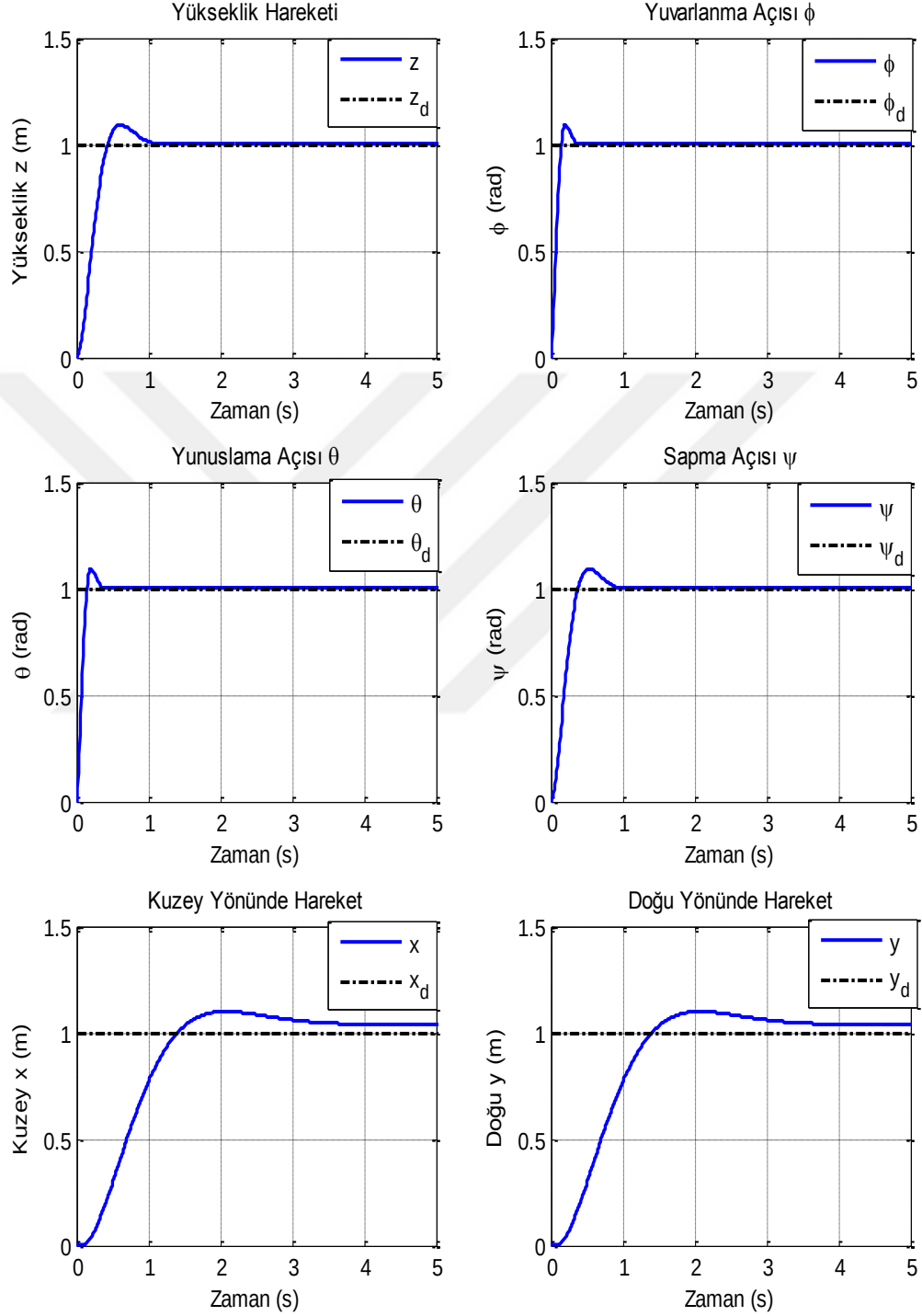
4.1.1. PD Denetim

Oransal–Türevsel kısaca PD denetleyicisi ile dörtpervanelinin konum ve yönelim denetleyicileri yukarıda maddelenen ölçütler çerçevesinde tasarımılanmıştır. Denklem 3.9-3.14 arasında verilen denetim kurallarının kazanç değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu değerler, yapılan çok sayıda benzetimlerin incelenmesi sonucunda yukarıda sıralanan ölçütlere göre en uygun başarıyı veren değerler olarak seçilmiştir.

Çizelge 4.2 PD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları

	Yükseklik (z)		Yuvarlanma (ϕ)		Yunuslama (θ)	
Kazançlar	K_{pz}	K_{Dz}	$K_{p\phi}$	$K_{D\phi}$	$K_{p\theta}$	$K_{D\theta}$
	0.136525	3.396557	0.014366	8.238072	0.014366	8.238072
	Sapma (ψ)		Kuzey (x)		Doğu (y)	
Kazançlar	$K_{p\psi}$	$K_{D\psi}$	K_{px}	K_{Dx}	K_{py}	K_{Dy}
	0.003599	21.668338	0.080716	1.399179	0.080716	1.399179

Seçilen bu kazanç değerleri ile konum ve yönelim denetleyicilerinin basamak tepkileri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 PD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri

PD denetleyicisinin dörtperaneli üzerinde basamak tepkisi yeteneğini gösteren sonuçlar Çizelge 4.3'de verildiği gibidir. Tepkinin isterin yüzde onundan yüzde doksanına ulaştığı süre yükselme süresi (TR), en fazla yüzde iki buçuk hata ile durgun hal değerine ulaştığı süre ise durulma süresi (TS) olarak tanımlanmıştır. Bununla beraber, dörtperanelinin motorlarının gerçekleştirdiği en yüksek açısal hızlar da Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.3 PD Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0,289845	0,96124	9,202096
Yuvarlanma (ϕ)	0,096339	0,318384	9,175
Yunuslama (θ)	0,096339	0,318384	9,175
Sapma (ψ)	0,253063	0,829373	9,026579
Kuzey (x)	0,901136	17,0679	9,924874
Doğu (y)	0,901136	17,0679	9,924874

Çizelge 4.4 PD En Yüksek Pervane Hızları

	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	Ω_3 (rad/s)	Ω_4 (rad/s)
Yükselme (z)	520,77702	520,77702	520,77702	520,77702
Yuvarlanma (ϕ)	332,406897	388,120448	332,406906	502,492293
Yunuslama (θ)	502,492293	332,406906	388,120448	332,406897
Sapma (ψ)	523,6	437,541629	523,6	437,541629
Kuzey (x)	290,17291	234,527842	391,23717	234,527844
Doğu (y)	234,527842	290,17291	234,527844	391,23717

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere motorların doğrudan etkilediği yükselme ve yönelme hareketleri, kuzey ve doğuya ilerleme hareketinden çok daha hızlıdır. 1 metre yüksekliğin %90'nı yaklaşık 0.3 saniyede gerçekleştirmiştir. Durulma süresi ise bir saniyenin altındadır. Ancak, %9.2 civarında bir aşma görülmektedir. Dörtperaneli bu başarımı gösterebilmesi için PD denetleyicisi tüm motorlara yaklaşık 520 rad/s açısal hız yaptırmıştır. Motorların bu açısal hızları ile dörtperaneliye toplamda en yüksek 33.95 N büyüklüğünde bir itki U_1 , uygulamış ve bu değerler elde edilmiştir.

Yönelimler incelendiğinde, yuvarlanma ve yunuslama hareketleri dörtperanelinin bakışımı kabul edilen yapısı nedeniyle, beklendiği gibi, aynı sonuçları vermiştir. 1 radyanlık açının % 90'nına çok hızlı ulaşılmış ve yaklaşık 0.31 saniyede bu açı

değerine tamamen ulaşılmıştır. % 9.1 lik bir aşma değeri burada da görülmektedir. Çizelge 4.4'de verilen en yüksek pervane hızları ile en yüksek 2.9 N.m yuvarlanma torku U_2 ve aynı değere sahip yunuslama torku U_3 , motorlar ile üretilmiştir. Sapma hareketi ise diğer yönelim hareketlerinden biraz yavaştır. Çünkü yunuslama ve yuvarlanma hareketleri iki motorun farklı hızlar ile dönmesiyle oluşan her bir itki kuvvetinin ağırlık merkezine uyguladığı farklı momentler nedeniyle gerçekleşirken, sapma hareketi biraz farklı olarak motor çiftlerinin dönmelerinin birbirlerine etkisi nedeniyle sürüklenmeye bağlı olarak gerçekleşir. 1 radyanlık sapma açısı 0.82 saniyede gerçekleşmiştir. %9'luk aşma değeri burada da görülmektedir. En büyük sapma torku U_4 , 0.69 N.m değerindedir.

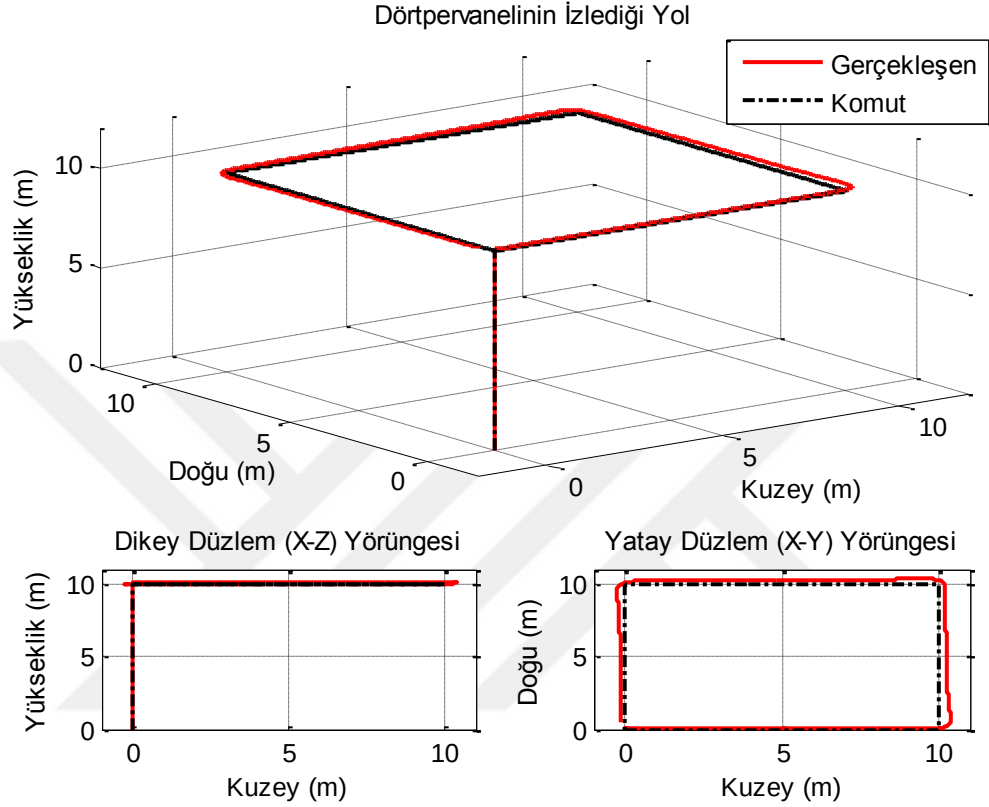
Kuzeye yani x yönüne ve doğuya yani y yönüne 1 metre ilerlemek, dörtpervanelinin bakışimli kabul edilen yapısı nedeniyle aynı sonuçları vermiştir. Daha önceden de bahsedildiği gibi burada kullanılan PD denetleyicisi doğrudan motorlara iletilecek komutlar üretmez, bunun yerine, istenilen konuma dörtpervaneliyi götürecektir x yönüne ilerlemek için yunuslama, y yönüne ilerlemek için ise yuvarlanma açısı isteri üretir. Bu nedenle bu denetleyici yapıları, yükselme ve yönelme denetleyicilerine göre daha yavaş olmaktadır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere yaklaşık 0.9 saniyede isterin % 90'nına ulaşılmışken % 2'lik durulma 17 saniye ile çok yavaş gerçekleşmiştir. Bununla beraber diğer denetleyicilerde de görüldüğü gibi % 10'a yakın bir aşma görülmektedir. Dörtpervaneli x ve y konumlarına gidebilmek için en fazla 391 rad/s pervane hızları gerçekleştirmiştir. Bu da en yüksek 1.47 N.m büyüklüğünde yunuslama ve yuvarlanma torku üretmiştir.

Birinci Senaryo Benzetimi

PD denetleyicisinin başarımının gözlemleneceği bu senaryoda, dörtpervanelinin istenilen bir yörüngeyi izlemesi sağlanmıştır. Bu senaryoya göre dörtpervaneli önce 10 metre yüksekliğe 5 saniyede ulaşması istenmiştir. Daha sonra sırasıyla 10 saniyede +x yönüne 10 metre, 10 saniyede +y yönüne 10 m, 10 saniyede -x yönüne 10 metre ve son olarak 10 saniyede -y yönüne 10 metre ilerleyerek ilk yükseldiği konuma gelmelidir.

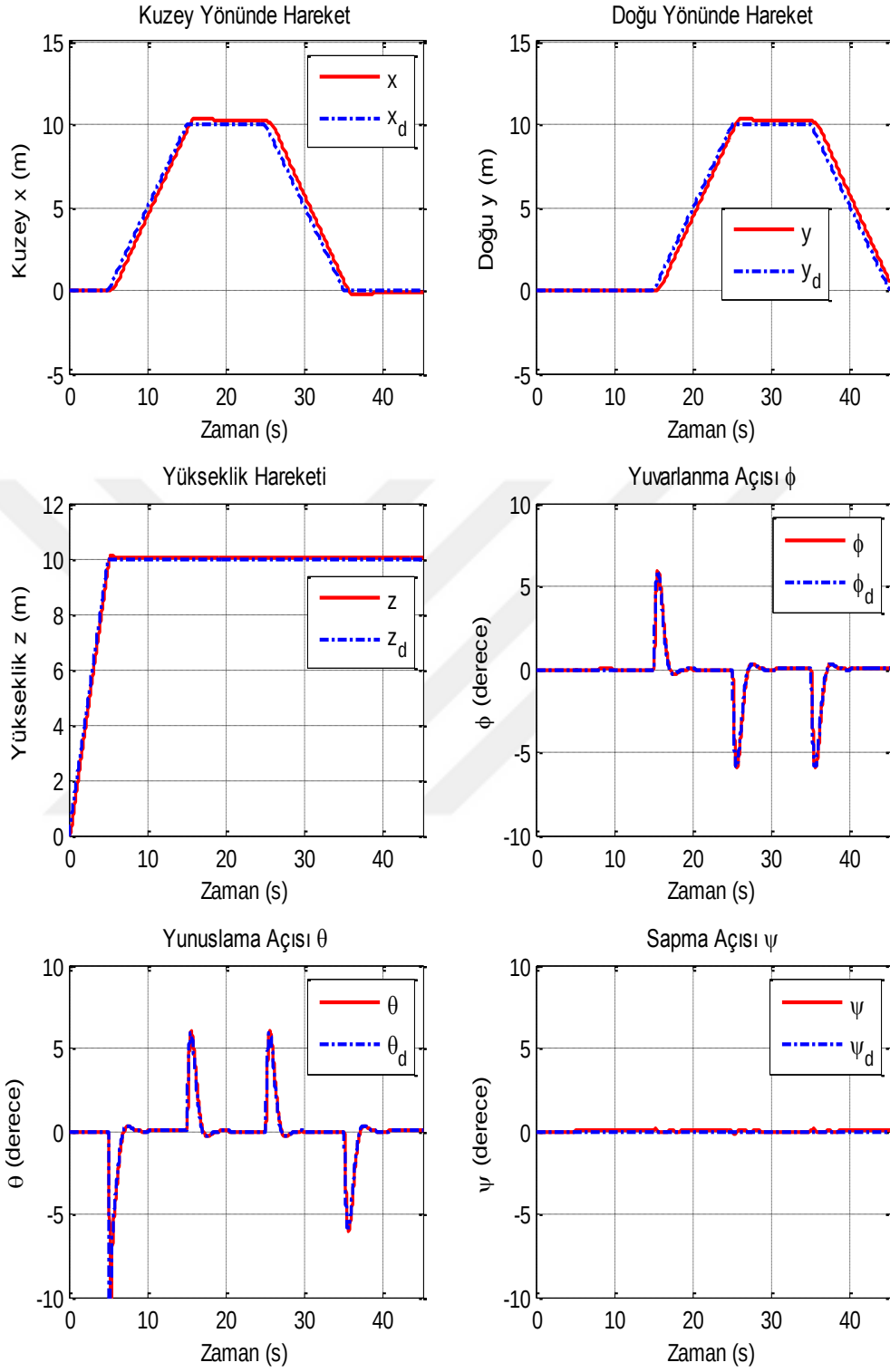
Şekil 4.2'de istenilen yörünge ile Çizelge 4.2'deki kazanç değerlerine sahip PD denetleyicisi ile denetlenen dörtpervanelinin gerçekleştirdiği yörüngeler görülebilir.

Şekilden de görüldüğü üzere dörtperaneli istenilen yörüngeyi takip edebilmiştir. Basamak tepkilerinden görünen aşmalar düzlemsel takip sonuçlarını gösteren grafiklerde kendini belli etmektedir.



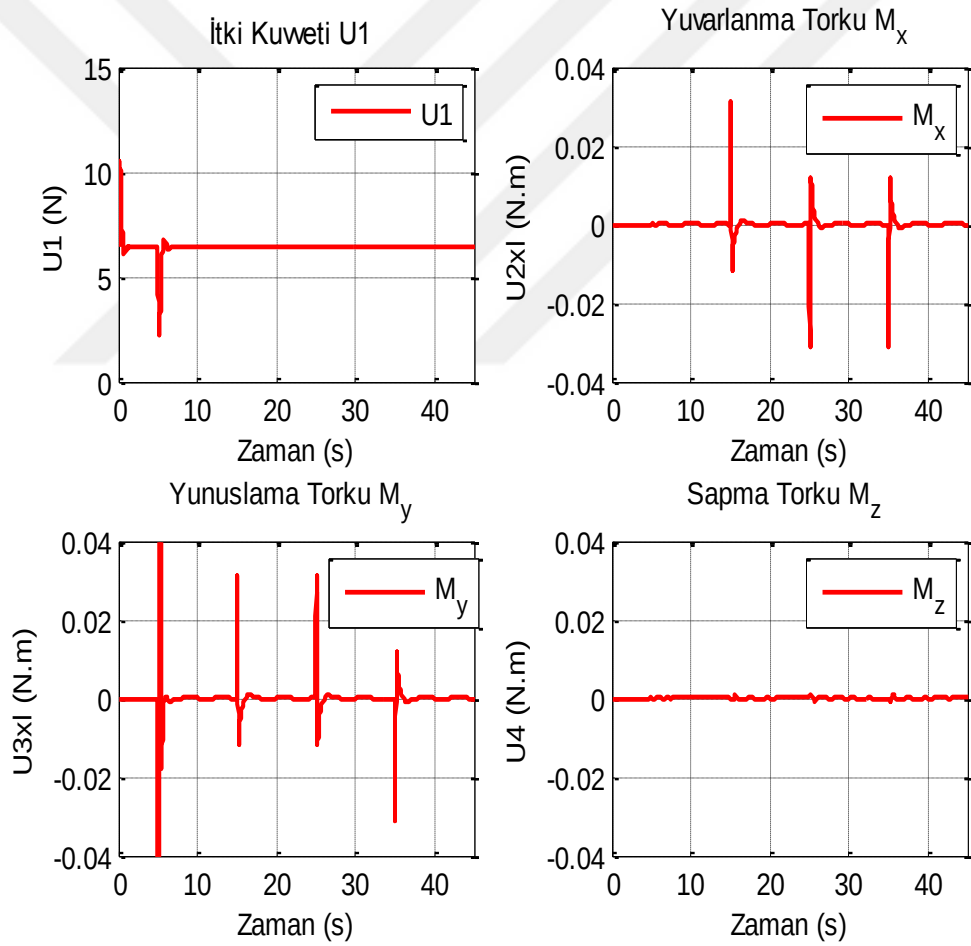
Şekil 4.2 Senaryo 1; PD ile Dörtperanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.3, PD denetleyicisinin dörtperanelinin konum ve yönelim denetimini nasıl gerçekleştirdiğini göstermektedir. Üç boyutlu ve XY ve XZ düzlemlerinde gerçekleşen yörünge takibini gösteren Şekil 4.3'den görüleceği üzere, yükselme denetleyicisi gayet hızlı ve başarılı bir takip gerçekleştirmiştir. Basamak tepkisinde görülen aşma burada da görülmektedir. Ayrıca, durgun hal hatası da çok azdır. Yine basamak tepkilerinden yavaş ve durgun hal hatası yapacak gibi görünen x ve y yönüne hareketler, beklendiği gibi yükselme hareketine göre daha yavaş kalmıştır. Her ikisi içinde yol boyunca yaklaşık 0.2 metrelik takip hatası gerçekleşmiştir. Ama yine de başarılı bir takip görülmektedir.



Şekil 4.3 Senaryo 1; PD ile Konum ve Yönelim Denetimleri

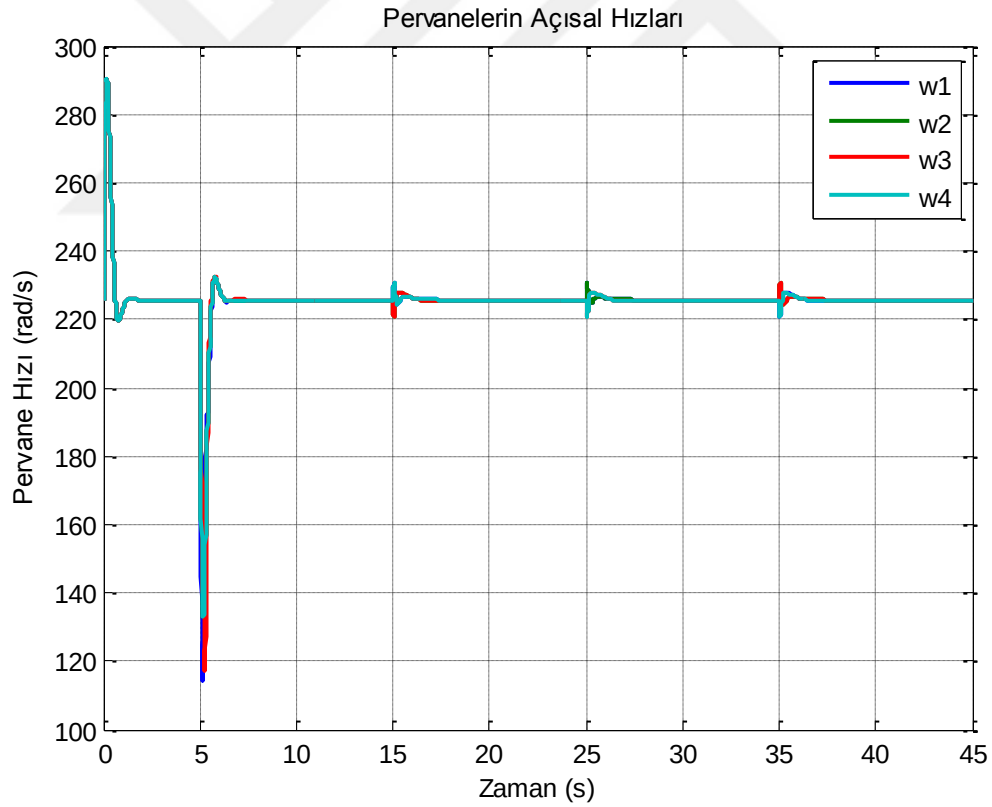
Yönelim denetimi ise konum denetimine göre çok daha başarılıdır. Şekillerden görüldüğü gibi x yönüne ilerlemek için denetleyicin ürettiği yunuslama açısı komutu θ_d , denetleyici tarafından başarılı bir şekilde takip edilmiştir. Aynı şekilde, y yönüne ilerlemek için denetleyicin ürettiği yuvarlanma açısı komutu ϕ_d , denetleyici tarafından başarılı bir şekilde takip edilmiştir. Dört pervaneliye yaptırılan bu açılar ile konum takibi yapılmıştır. Uçuş boyunca sapma açısı ψ değiştirilmemiştir. Sapma açısının başarılı bir biçimde sifıra yakın tutulduğu sonuçlardan görülmektedir. Dört pervanelinin pervaneleri aracılığıyla gerçekleştirdiği kuvvet ve torklarının zamana göre değişimi Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Senaryo 1; PD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler

Yükselmenin gerçekleşmesi için uçuşun başında en yüksek 10.55 N büyüklüğünde bir itici üretilmiştir. Burada 5. saniyedeki hareket dikkat çekicidir. Bu tepki

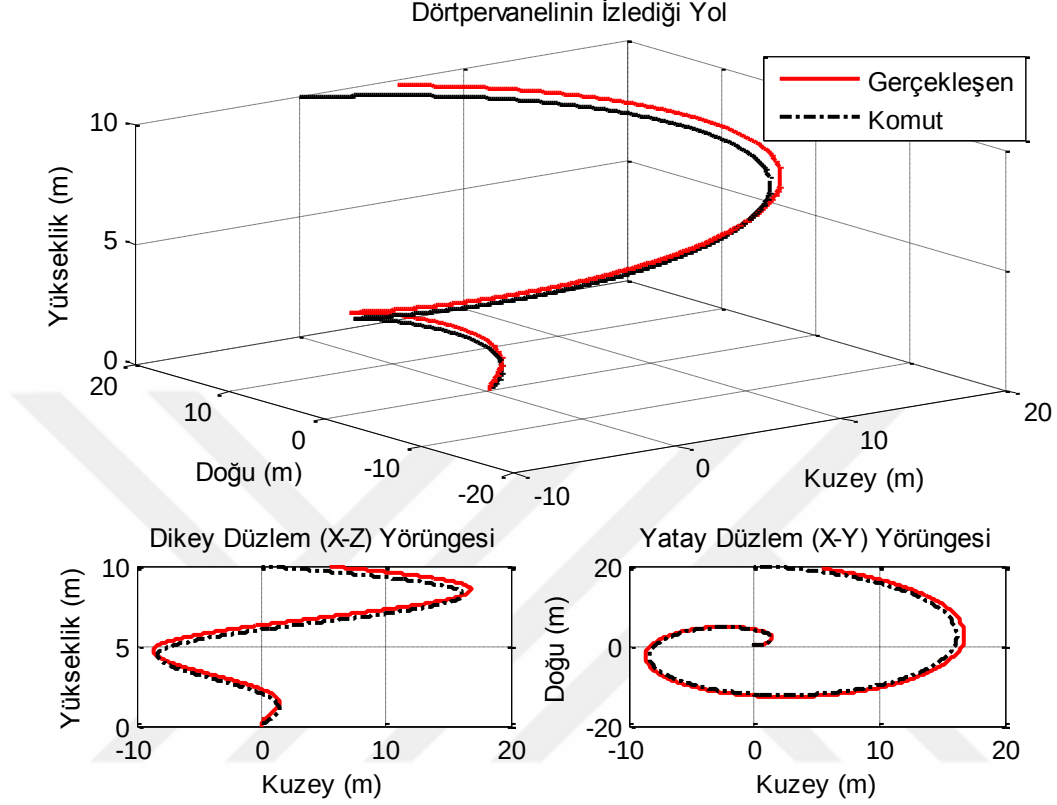
dört pervaneliyi yavaşlatarak yapılan yükseklik aşımı azaltmak için yaklaşık 0.5 saniye süren bir eylemdir. Daha sonra dört pervaneliyi sabit yükseklikte tutacak 6.377 N büyüklüğündeki itki dört pervaneli tarafından sağlanmıştır. Aynı şekilde yuvarlanma ve yunuslama tork değerlerinde de benzer tepkiler görülmektedir. Gerçekleşen 6 derecelik yuvarlanma en yüksek 0.0312 N.m tork ile sağlanmıştır. Benzer şekilde, +x yönüne ilerlemenin başladığı anda 12.5 derecelik yunuslama açısı yaptıran, en yüksek yunuslama torku 0.123 N.m olacak biçimde gerçekleşmiştir. Şekil 4.5 ise itki ve tork değerlerini meydana getiren pervanelerin açısal hızlarını göstermektedir. En yüksek açısal hız değerine 290.2 rad/s ile yükselmenin gerçekleştiği anda ulaşılmıştır. Daha sonra dört pervaneliyi sabit yükseklikte tutmak için gereken 6.377 N büyüklüğündeki itki pervanelerin 225.2 rad/s hızla dönmesi ile oluşmuştur.



Şekil 4.5 Senaryo 1; PD ile Pervanelerin Açısal Hızları

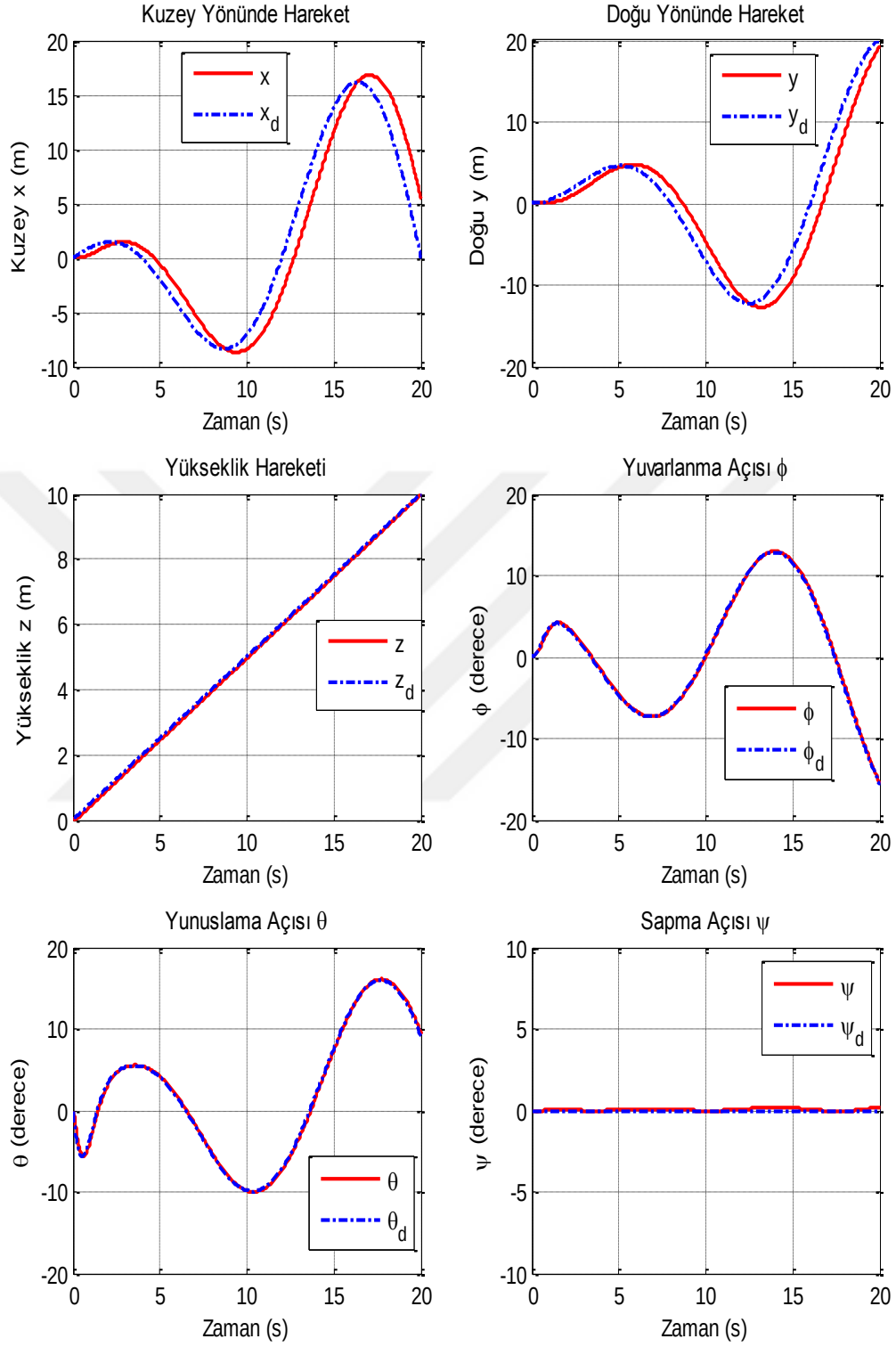
İkinci Senaryo Benzetimi

Bu senaryoda, dörtpervanelinin merkez noktasından doğrusal yükselerek ve aynı zamanda XY düzleminde ise sarmal bir yörünge izlemesi amaçlanmıştır.



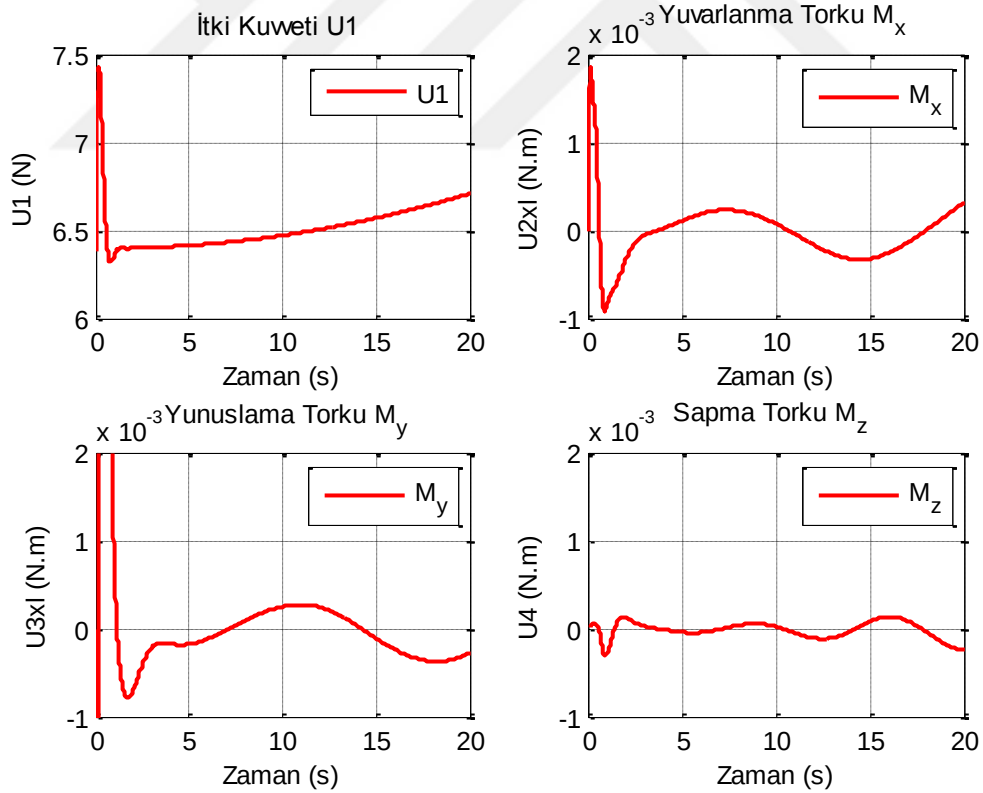
Şekil 4.6 Senaryo 2; PD ile Dörtpervanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.6’da istenilen yörünge ve PD denetleyicisi ile denetlenen dörtpervanelinin gerçekleştirdiği hareket görülebilir. Şekilden de görüldüğü üzere dörtpervaneli istenilen yörüngeyi takip edebilmiştir. Bu senaryoda basamak tepkilerinden görülen durgun hal hataları hem üç boyutlu çizimde hem de düzlemsel çizimlerde görülebilmektedir.



Şekil 4.7 Senaryo 2; PD ile Konum ve Yönelim Denetimleri

Şekil 4.7, PD denetleyicisinin dört pervanelinin konum ve yönelim denetimini nasıl gerçekleştirdiğini göstermektedir. Yükseklik hareketi beklenildiği gibi çok başarılı gerçekleşmiştir. Doğrusal komutun takip hatası çok azdır. Dört pervanelinin XY düzleminde görülen sarmal hareketi gerçekleştirebilmesi için x ve y yönünde sinüs biçimli hareketler gerçekleştirmesi gerekmektedir. Çizimlerden de görüldüğü üzere istenilen konumu daha geriden bir takip olsa da PD denetleyicisinin konum takibinin başarılı olduğu söylenebilir. Bu konumları gerçekleştirebilmek için üretilen yuvarlanma ve yunuslama açıların takibi ise birinci senaryoda da olduğu gibi son derece hızlı ve başarılıdır. Merkez noktasından giderek uzaklaşan, bir yörünge istendiği için x ve y konum denetimi için tasarımılanan PD denetleyicisinin ürettiği açı komutları da giderek artmaktadır. Buna rağmen açı denetleyicileri dört pervanelinin bu açıları gerçekleştirmesini sağlayabilmiştir. Sapma açısı yine değiştirilmemiş ve sapma denetleyicisi, sapma açısını sıfırda tutmayı başarmıştır.

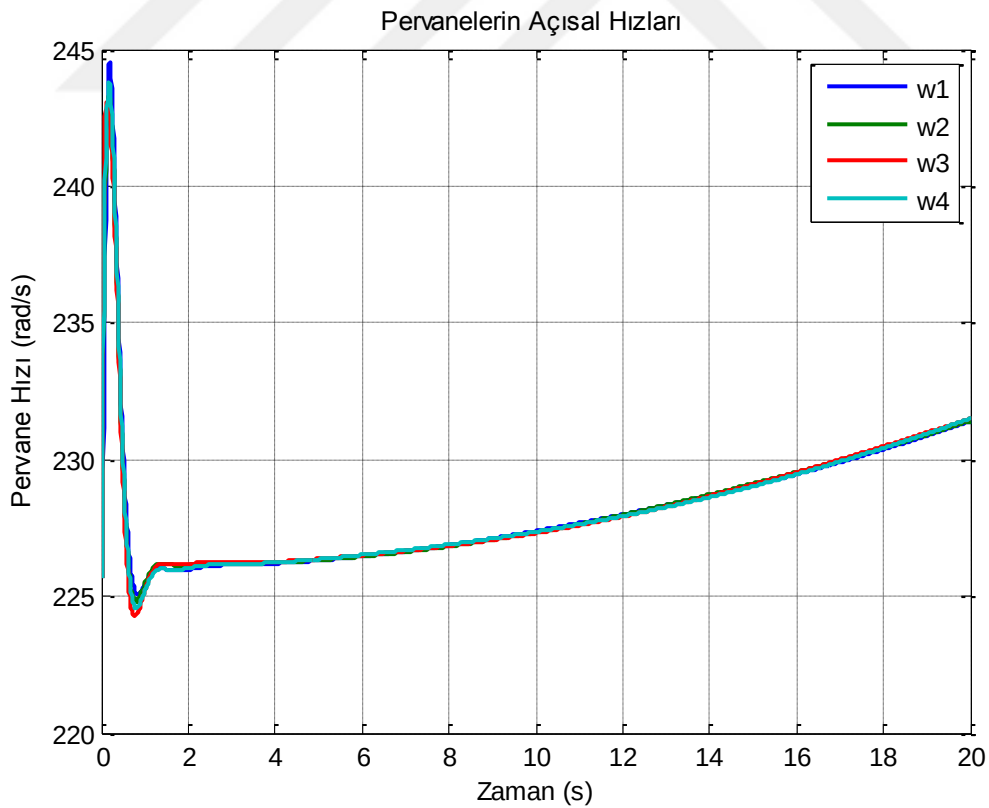


Şekil 4.8 Senaryo 2; PD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler

Dört pervanelinin istenilen yörüngeyi takip edebilmesi için gerçekleştirdiği itki ve tork değerleri Şekil 4.8’de verilmiştir. Yükselme bu senaryoda daha yavaş olduğu için uçuşun başında ilk kaldırmayı sağlamak için en yüksek 7.42 N büyüklüğünde bir itki üretilmiştir. Daha sonra yükselmenin devamı itki yavaşça artırılarak sağlanmıştır. Burada dört pervanelinin yönelimi için farklı bir durum gözlenmektedir. Yunuslama ve yuvarlanma açısının bu kadar yüksek değerlere çıkması birinci senaryonun aksine çok az moment ile sağlanmıştır. Bunun nedeni giderek artan itkidir yani pervanelerin hızlarıdır. Pervaneler hızlandıkça gereken açıları sağlamak için daha az moment değerleri gerekmektedir.

Şekil 4.9 ise itki ve tork değerlerini meydana getiren pervanelerin açısal hızlarını göstermektedir. En yüksek açısal hız değerine birinci pervane 244.5 rad/s ile yükselmenin gerçekleştiği anda ulaşılmıştır. Bu senaryoda sürekli açısal hareket olduğu için pervaneler uçuş boyunca farklı hızlarda dönmektedirler.

Sonuç olarak PD denetleyicisi ile başarılı bir konum ve yönelim denetiminin yapıldığı senaryolar ile görülmektedir.



Şekil 4.9 Senaryo 2; PD ile Pervanelerin Açısal Hızları

4.1.2. PID Denetim

Dört pervanelinin konum ve yönelim denetimi Oransal–Tümlevsel–Türevsel (PID), denetleyicisi ile gerçekleştirilmiştir. Daha önceden verilen tasarım ölçütleri temel alınarak tasarımılanan PID denetleyicilerinin benzetim ortamında yapılan çok sayıda benzetimlerin sonuçları gözlemlenerek, Denklem 3.9–3.14’de verilen denetim kurallarına göre seçilen kazançları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 PID Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları

	Yükseklik (z)			Yuvarlanma (ϕ)		
Kazançlar	K_{pz}	K_{Iz}	K_{Dz}	$K_{p\phi}$	$K_{I\phi}$	$K_{D\phi}$
	1.036023	0.033956	2.869775	0.109022	0.098982	0.917207
	Yunuslama (θ)			Sapma (ψ)		
Kazançlar	$K_{p\theta}$	$K_{I\theta}$	$K_{D\theta}$	$K_{p\psi}$	$K_{I\psi}$	$K_{D\psi}$
	0.109022	0.098982	0.917207	0.022719	0.034320	2.645254
	Kuzey (x)			Doğu (y)		
Kazançlar	K_{px}	K_{Ix}	K_{Dx}	K_{py}	K_{Iy}	K_{Dy}
	0.034157	0.000222	1.160328	0.034157	0.000222	1.160328

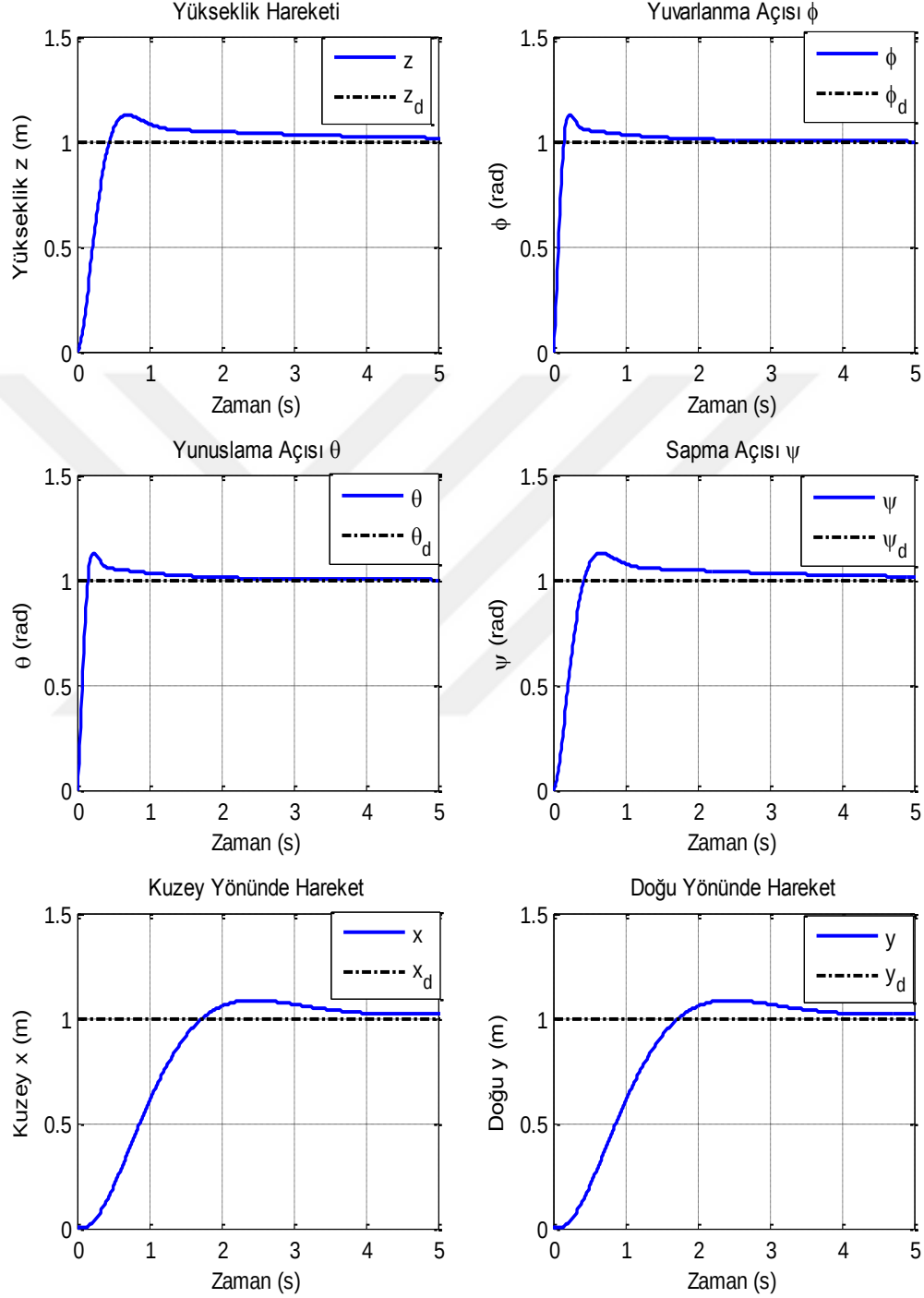
Bu kazanç değerleri ile gerçekleşen konum ve yönelim basamak tepkileri Şekil 4.10’da verildiği gibidir. PID denetleyicisinin dört pervaneli üzerindeki yeteneğini gösteren basamak tepkilerinin sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Ayrıca, gerçekleşen en yüksek pervane açısall hızları da Çizelge 4.7’den görülebilir.

Çizelge 4.6 PID Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0,302746	4,411291	12,59145
Yuvarlanma (ϕ)	0,100703	1,460718	12,59484
Yunuslama (θ)	0,100703	1,460718	12,59484
Sapma (ψ)	0,289212	4,212749	12,59068
Kuzey (x)	1,111428	15,53887	8,579052
Doğu (y)	1,111428	15,53887	8,579052

Sonuçlardan da görüleceği üzere yükseklik ve yönelim hareketleri hızlı, kuzey ve doğu yönüne ilerleme yavaş gerçekleşmiştir. Yükselme hareketi 0.3 saniyede

isterin % 90'nına ulaşırken durulma süresi 4.41 saniye sürmüştür. Ayrıca, % 12'lik aşma ile tasarım için belirlediğimiz kısıt aşılmamıştır.



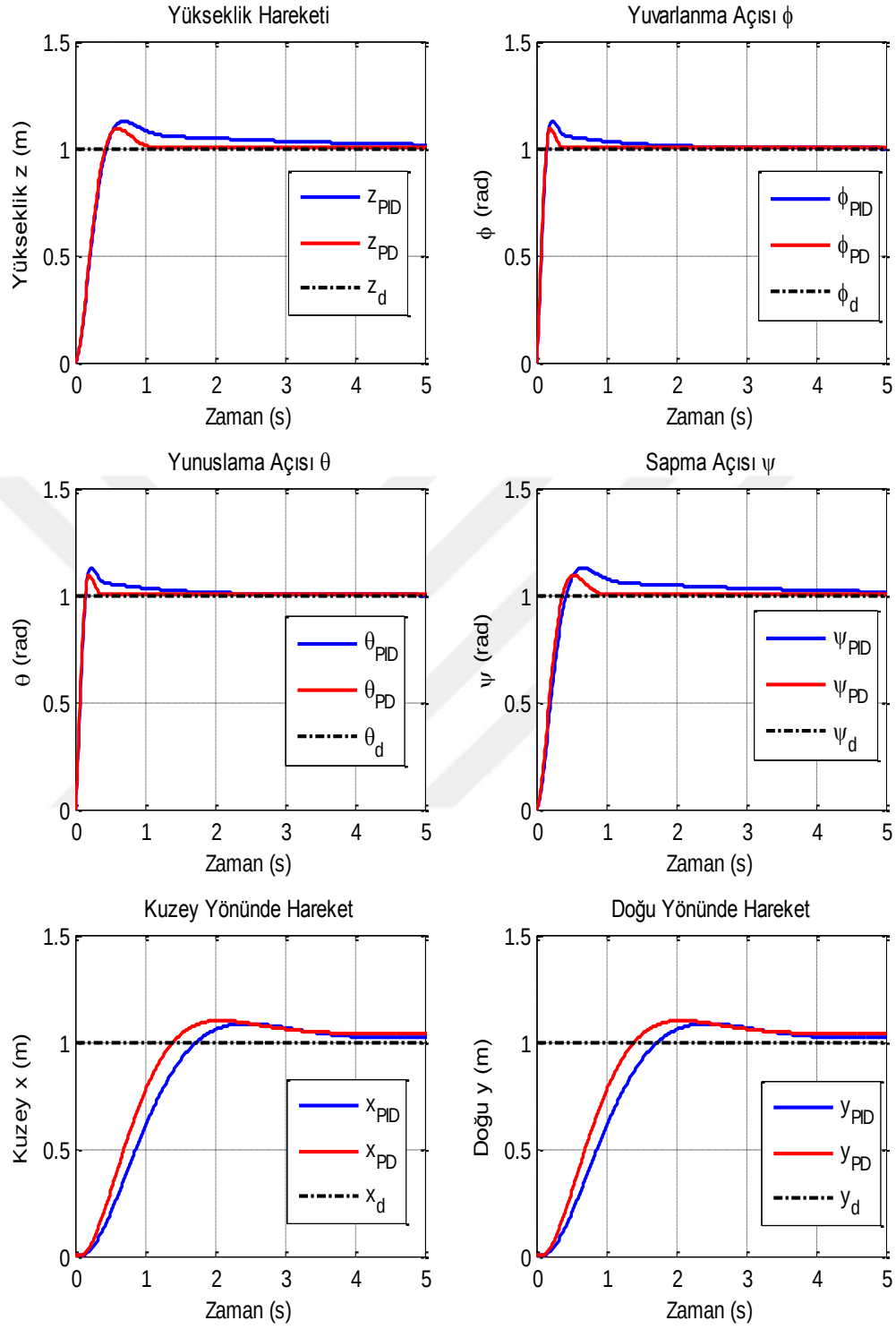
Şekil 4.10 PID ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri

Yuvarlanma ve yunuslama yönelimleri çok hızlı gerçekleşmiş 1 radyanlık açı değerinin % 90'nına 0.1 saniyede ulaşılırken durgun hale geçiş 1.46 saniye sürmüştür. Yükselme ile benzer biçimde %12.6'lık bir aşma görülmektedir. Dörtpervaneli bu değerlere ulaşabilmek için en yüksek 494 rad/s pervane hızı üretmiş ve en yüksek 2.78 N.m moment elde edilmiştir. Sapma yönelimi diğer yönelimlere göre biraz yavaş gerçekleşmiştir. Yaklaşık 0.3 saniye yükselme süresi ile beraber durulma süresi 4.2 saniye sürmüştür. %12.6'lık aşma burada da görülmektedir. Bu değerler için dörtpervaneli en yüksek 0.58 N.m'lik moment üretmiştir. Kuzey ve doğu yönüne ilerleme beklendiği gibi yavaş olmuştur. Bir metre isterin % 90'nına 1.11 saniyede ulaşılırken 1 metreye tam durulma 15.5 saniye ile çok yavaş gerçekleşmiştir. Bu hareketi yaparken dörtpervaneli en yüksek 326 rad/s pervane hızı ile 0.8 N.m moment üretmiştir. Aşma değeri %8.57 ile diğerlerine göre daha az olmuştur.

Çizelge 4.7 PID En Yüksek Pervane Hızları

	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	Ω_3 (rad/s)	Ω_4 (rad/s)
Yükselme (z)	511,909011	511,909011	511,909011	511,909011
Yuvarlanma (ϕ)	344,027279	377,17035	344,027287	494,08349
Yunuslama (θ)	494,08349	344,027287	377,17035	344,027279
Sapma (ψ)	494,111853	377,207504	494,111853	377,207504
Kuzey (x)	256,762218	229,096629	326,083074	229,096628
Doğu (y)	229,096629	256,762218	229,096628	326,083074

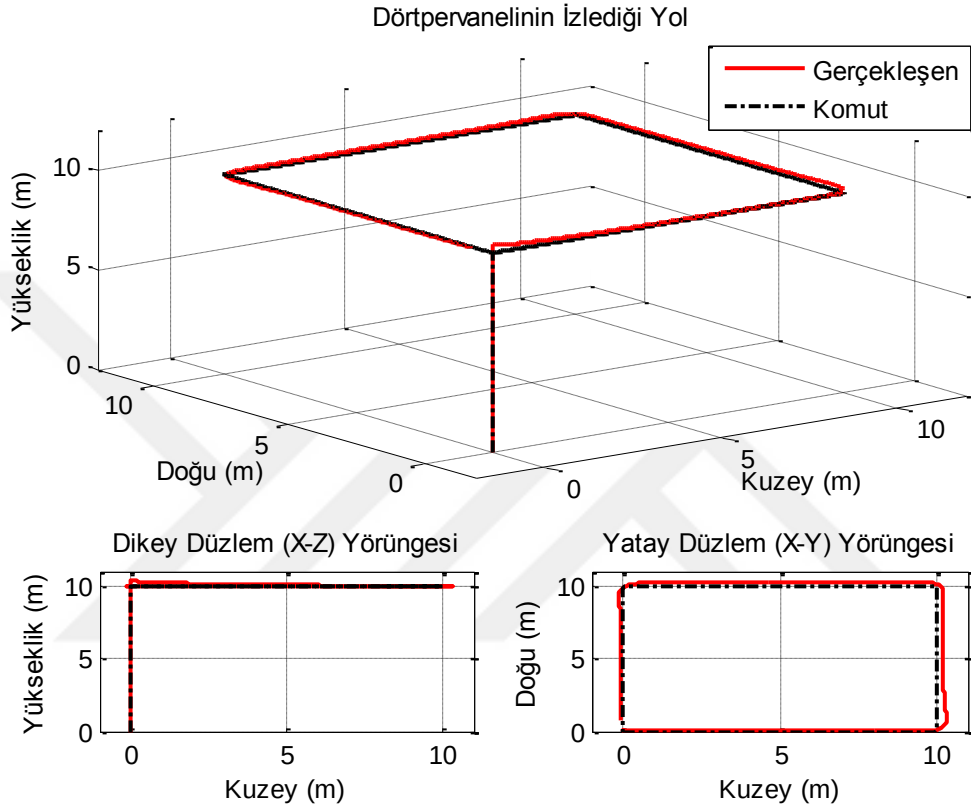
Basamak tepkileri üzerinden, PID ve PD denetleyicileri karşılaştırıldığında, PD denetleyicisinin konum ve yönelim denetleyicilerinin tamamında PID denetleyicisine göre biraz daha hızlı olduğu görülmektedir. Şekil 4.11'den görüleceği üzere ikisi arasındaki en büyük farklar durulma sürelerinde görülmektedir. PID denetleyicisi ile her bir altsisteme bir tümlev alıcı eklenmesi sistemi yavaşlatmıştır. PD denetleyicisi yükselme ve yönelme hareketlerini PID denetleyicisinden çok daha kısa sürede durgun hale getirmektedir. Ayrıca, PD denetleyicisinin, yükselme ve yönelim hareketlerinde aşma değeri daha düşük iken, kuzey ve doğu yönünde ilerlemede aşma değerinin benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 PD ve PID Basamak Tepkilerinin Karşılaştırılması

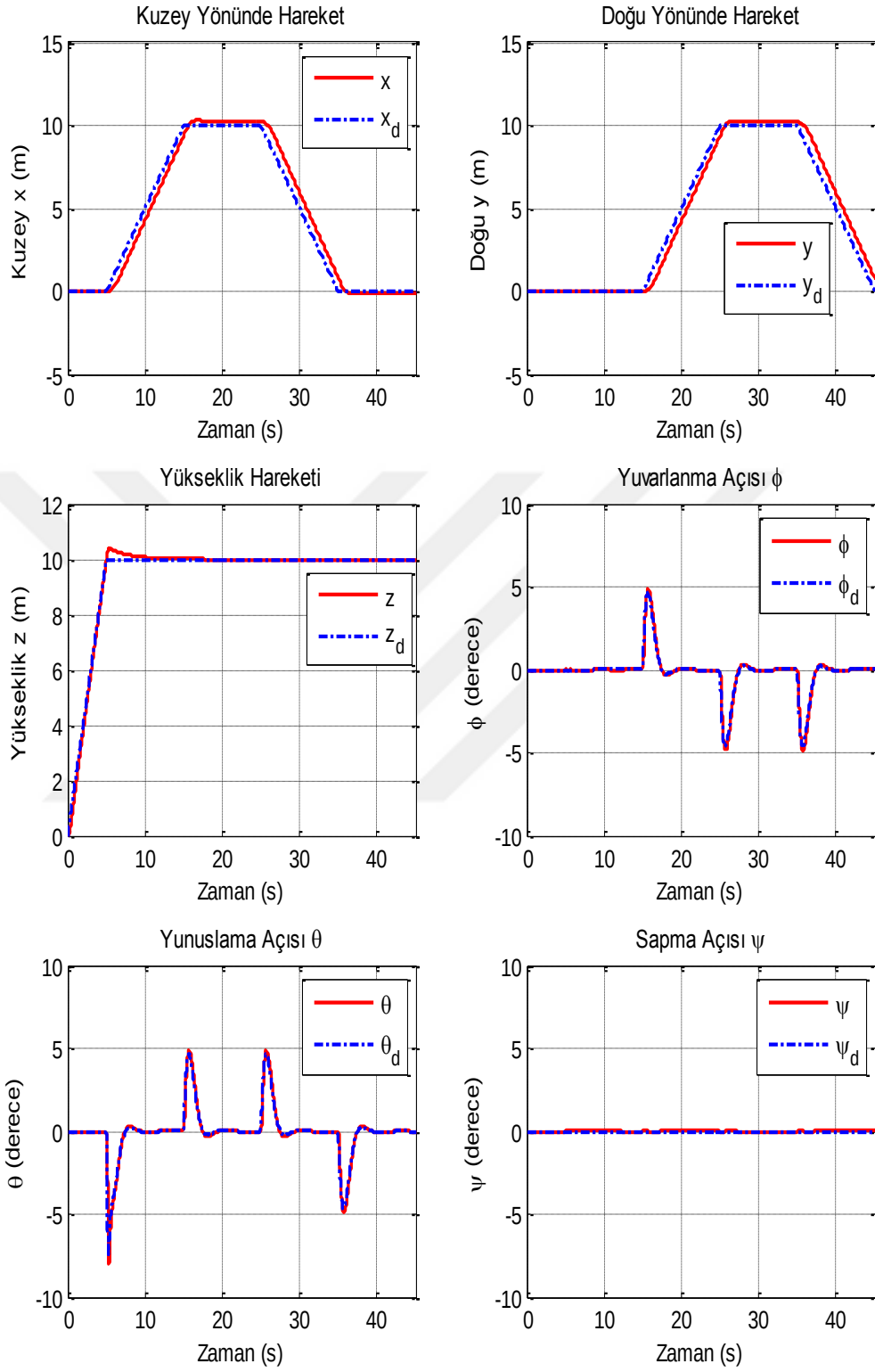
Birinci Senaryo Benzetimi

PD denetleyicisi için benzetimi yapılan senaryo, bu sefer PID denetleyicisinin yeteneğinin gözlemlenmesi için çalıştırılmıştır. Bu benzetimin yörünge takibi Şekil 4.12’de verilmiştir.

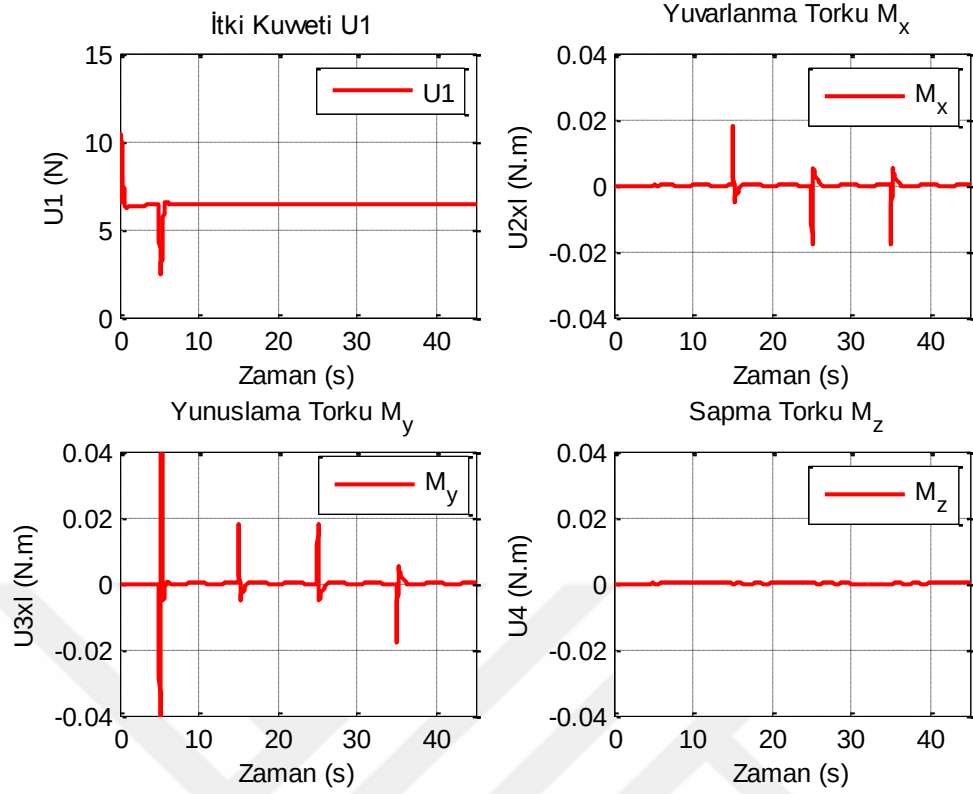


Şekil 4.12 Senaryo 1; PID ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

PID denetleyicisi ile dört pervaneli istenilen yörüngeyi takip edebilmiştir. Şekil 4.13’den görüleceği üzere konum ve yönelim denetimi başarıyla gerçekleşmiştir. Basamak tepkilerinden görülen aşmalar burada kendini belli etmiştir. Yükselme hareketinde bir miktar aşma vardır ancak, durgun hal hatası çok azdır. Kuzey ve doğu yönüne ilerlerken durulma süresinin uzunluğu nedeniyle 0.8 metre kadar bir takip hatası görülmektedir. Üretilen yunuslama, θ_d ve yuvarlanma, ϕ_d , komutlarının takibi ise çok daha başarılıdır. Aşmalar görölse bile çok hızlı bir takip gerçekleşmiştir. Sapma denetleyicisi ise dört pervanelinin sapma açısını sıfırda tutmayı başarmıştır.

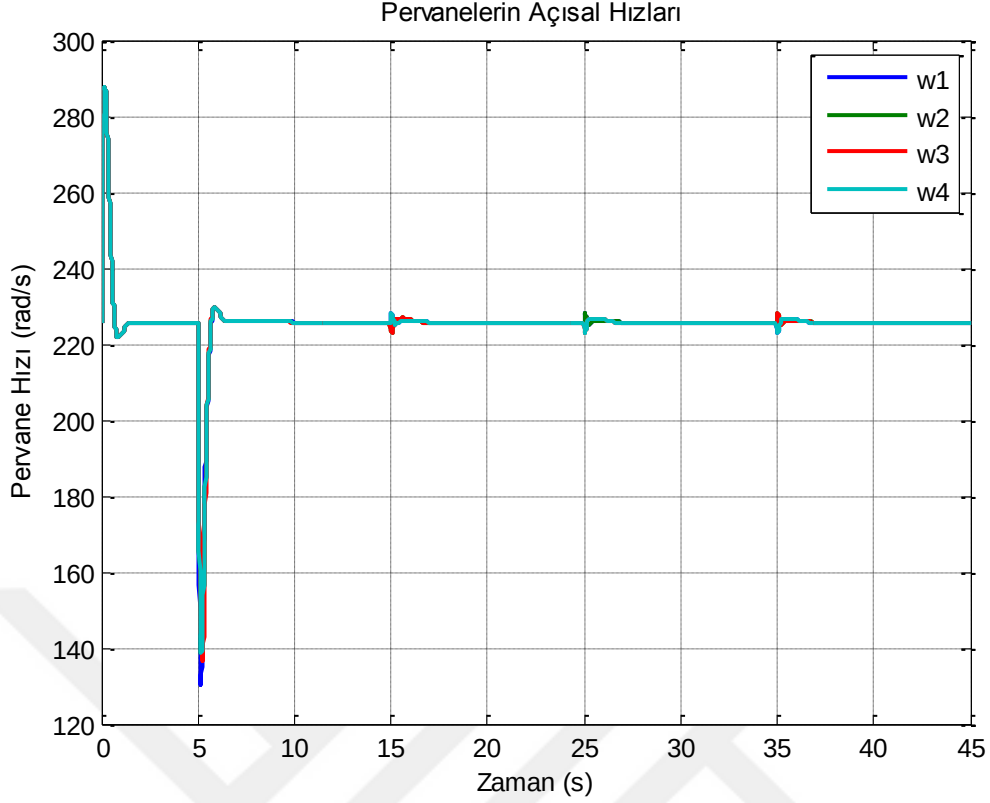


Şekil 4.13 Senaryo 1; PID ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.14 Senaryo 1; PID ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler

Denetleyici komutları ile oluşan itki ve tork değerleri Şekil 4.14’de verilmiştir. Uçuşun başladığı ilk anda yaklaşık 287.5 rad/s pervane hızları ile 10.35 N’luk bir itki kuvvet oluşturularak dörtpervaneli yükseltilmiştir. Daha sonra 5. Saniyede yükselme eylemini durdurmak için pervanelerin hızları düşürülerek 2.4 N’luk itki kuvveti üretilmiştir. Daha sonrasında dörtpervaneliyi sabit yükseklikte tutacak 6.36 N’luk kuvvet 225.7 rad/s pervane hızı ile üretilmiştir. +x yönünde ilerlemenin başladığı anda 0.057 N.m’lik bir yunuslama torku ile açı isteri sağlanmaya çalışılmıştır. +x yönüne ilerleme ile yükselme hareketinin durdurulması aynı zamanda gerçekleştiği için sonraki görülen tork değerlerine göre daha yüksek bir tork değeri görülmektedir. Nitekim, 5. saniyede -8 derecelik yunuslama gerçekleşirken daha sonra 4.9 derecelik yunuslama açısı ile hareket devam etmektedir. Aynı durum y yönüne ilerlemede de görülmektedir. Yükseklik y’de ilerleme yapılırken sabit olduğu için 4.9 derecelik daha az açı 0.017 N.m’lik tork değeri ile yapılmıştır. Şekil 4.15 uçuş boyunca pervanelerin gerçekleştirdiği açısal hızlarını göstermektedir.

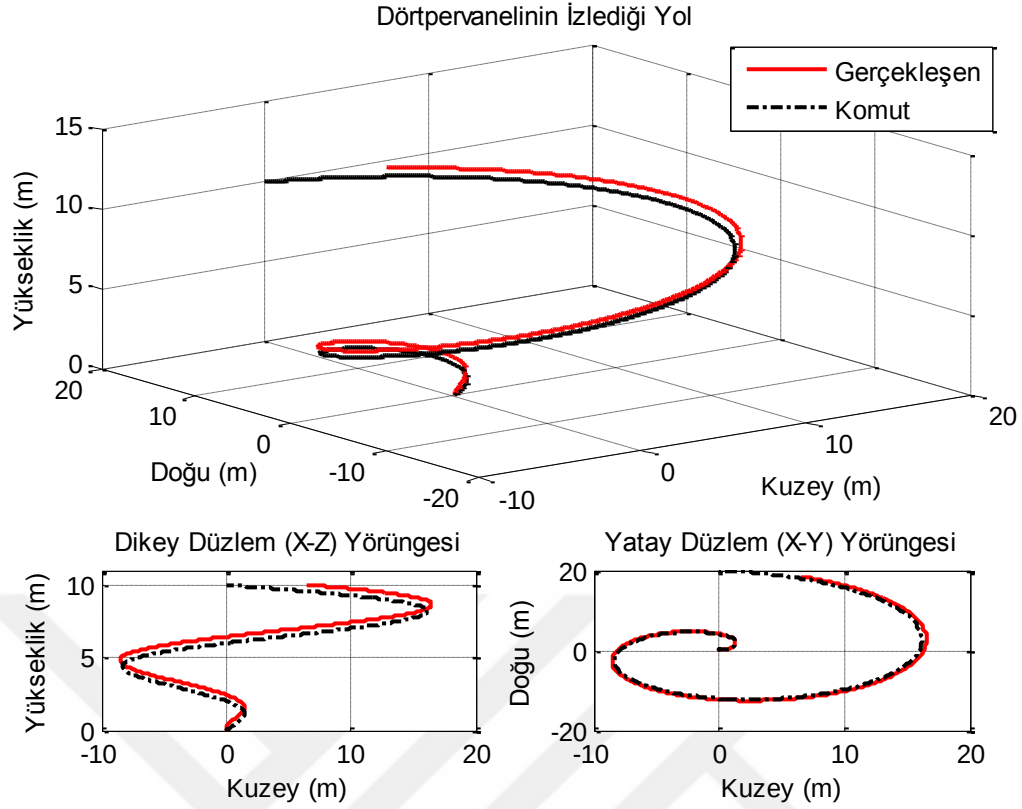


Şekil 4.15 Senaryo 1; PID ile Pervanelerin Açısal Hızları

İkinci Senaryo Benzetimi

PID denetleyicisi ile denetlenen dörtpervelinin izlediği yörünge Şekil 4.16'da verildiği gibidir.

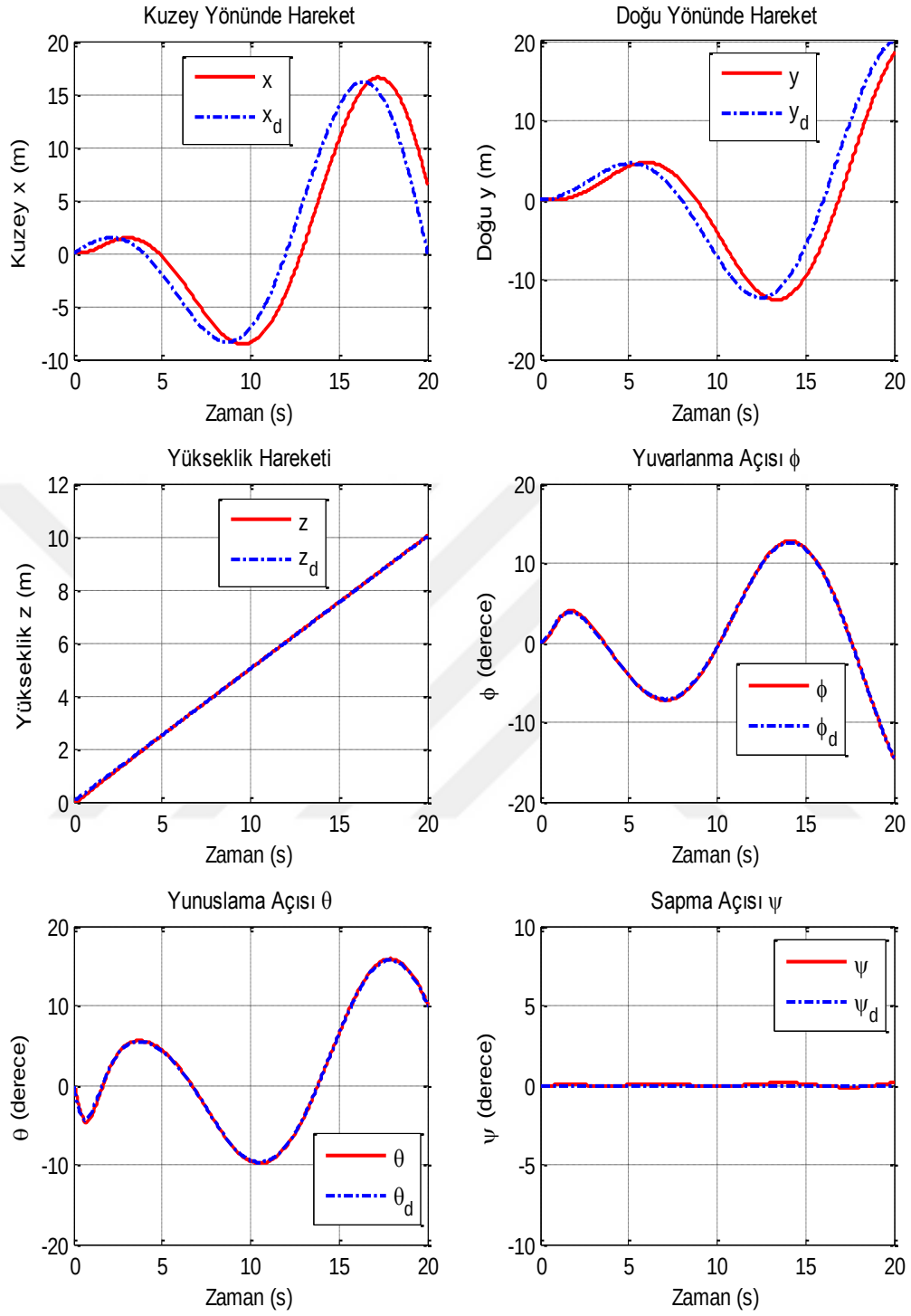
PID denetleyicisi ile dörtpervelini istenilen sarmal yörüngeyi takip edebilmiştir. Şekil 4.17'den görüleceği üzere konum ve yönelim denetimi başarıyla gerçekleşmiştir. Ancak, çok fazla takip hatası görülmektedir. Yükselme hareketi çok başarılıdır, durgun hal hatası çok azdır. Kuzey ve doğu yönüne ilerleme incelendiğinde komutu takip edebildiği ama çok fazla takip hatası gerçekleştirdiği görülmektedir. Her iki denetim için yaklaşık 3 metre olan takip hatası kuzey ve doğu denetleyicilerinin durulma sürelerinin uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Dinamik olarak değişen istere ayak uydurmak biraz geç olmaktadır. Ama kuzey ve doğu denetleyicilerinin ürettiği yunuslama, θ_d ve yuvarlanma, ϕ_d , komutlarının takibi ise çok başarılıdır. Takip hatası yok denecek kadar azdır. Çok hızlı değişen açı isterleri yönelim denetleyicileri tarafından hızlıca yerine getirilmiştir. Sapma denetleyicisi ise dörtpervelinin sapma açısını sıfırda tutmayı başarmıştır.



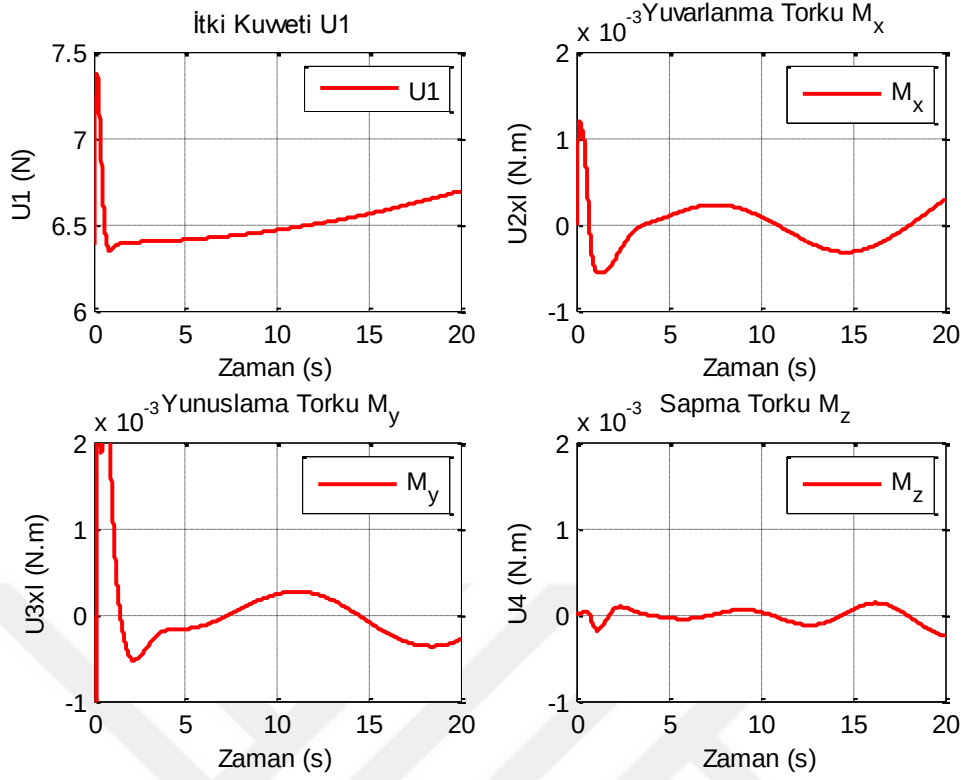
Şekil 4.16 Senaryo 2; PID ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

Uçuş boyunca gerçekleşen itki, moment ve pervane hızlarının değişimleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir. Birinci senaryoya göre yükselme daha yavaş gerçekleştiği için nispeten daha az itki kuvveti üretilmiştir. Uçuşun başında yaklaşık 7.4 N'luk kuvvet pervanelerin 243 rad/s açısal hızları ile elde edilirken daha sonra dörtpervaneliyi dengede tutacak olan 225.7 rad/s açısal hız değerinden doğrusal olmayan bir biçimde artarak yükselme gerçekleşmiştir. Dörtpervaneli yunuslama ve yuvarlanma hareketinde 14 dereceyi aşmasına rağmen çok az tork değerleri ile bunu başarabilmiştir. Bunun nedeni pervanelerin açısal hızlarının yüksek olmasıdır. Pervanelerin dönme hızları arttıkça en ufak bir farkta yüksek açılar oluşabilir.

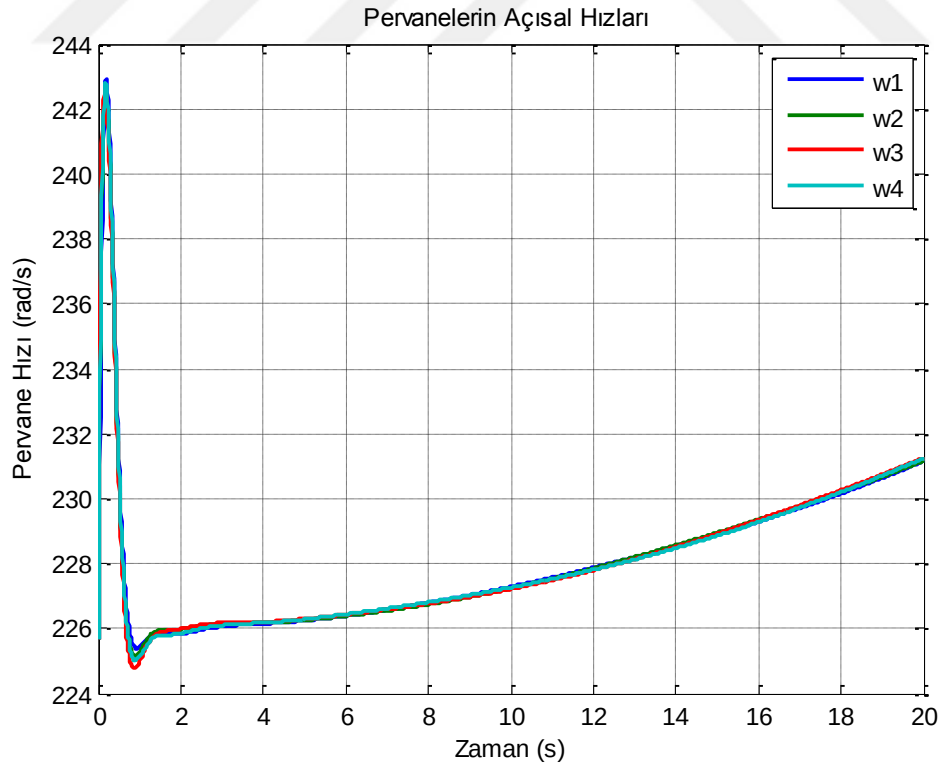
Sonuç olarak PID takip hatası olmasına rağmen dörtpervaneliyi istenilen yörüngede tutabilmiştir.



Şekil 4.17 Senaryo 2; PID ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.18 Senaryo 2; PID ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.19 Senaryo 2; PID ile Pervanelerin Açısal Hızları

4.2. Tümler Etkili Doğrusal Karesel Denetim

Bölüm 3.3'de Doğrusal Karesel Denetleyici (DKD) yöntemi kullanılarak iki farklı yaklaşım ile denetleyici tasarımı anlatılmıştı. İlk yaklaşımda dörtperanelinin DKD yöntemi ile denetimi altsistemler üzerinden ayrı ayrı tasarımı olarak (DKD1) gerçekleştirilirken ikinci yaklaşımda ise denetim, altsistemlere ayrıştırılmadan tek model üzerinden (DKD2) gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde her iki yaklaşım ile denetlenen dörtperanelinin benzetim sonuçları verilmiş ve başarımları karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Altsistemler Üzerinden Denetim (DKD1)

Tasarım için öncelikle Q ve R durum ve giriş sinyalleri ağırlıklandırma matrislerinin elde edilmesi gerekmektedir. Verilen tasarım kıstaslarına göre yapılan çok sayıda benzetimlerden yükselme ve yönelim denetimi için gereken Q ve R ağırlıklandırma matrisleri Denklem 4.5'de ve konum denetimi için gereken Q ve R ağırlıklandırma matrisleri Denklem 4.6'da verildiği gibi seçilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 300 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 70000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 70000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 70000 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 5.667 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, R = [1] \quad (4.6)$$

Bu değerler ile tasarımılanan denetleyicilerin Denklem 3.30 ve Denklem 3.36 - 3.37'de verilen kazanç matrisleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K_x = \begin{bmatrix} -71.40 & -9.634 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.277 & 0.528 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.277 & 0.528 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.148 & 0.286 \end{bmatrix}$$

$$K_e = \begin{bmatrix} 264.5751 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -17.3205 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -17.3205 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -17.3205 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}\bar{K}_x &= [-2.3805 \quad 3.5657 \quad 2.6705] \\ \bar{K}_y &= [-2.3805 \quad 3.5657 \quad 2.6705]\end{aligned}\tag{4.8}$$

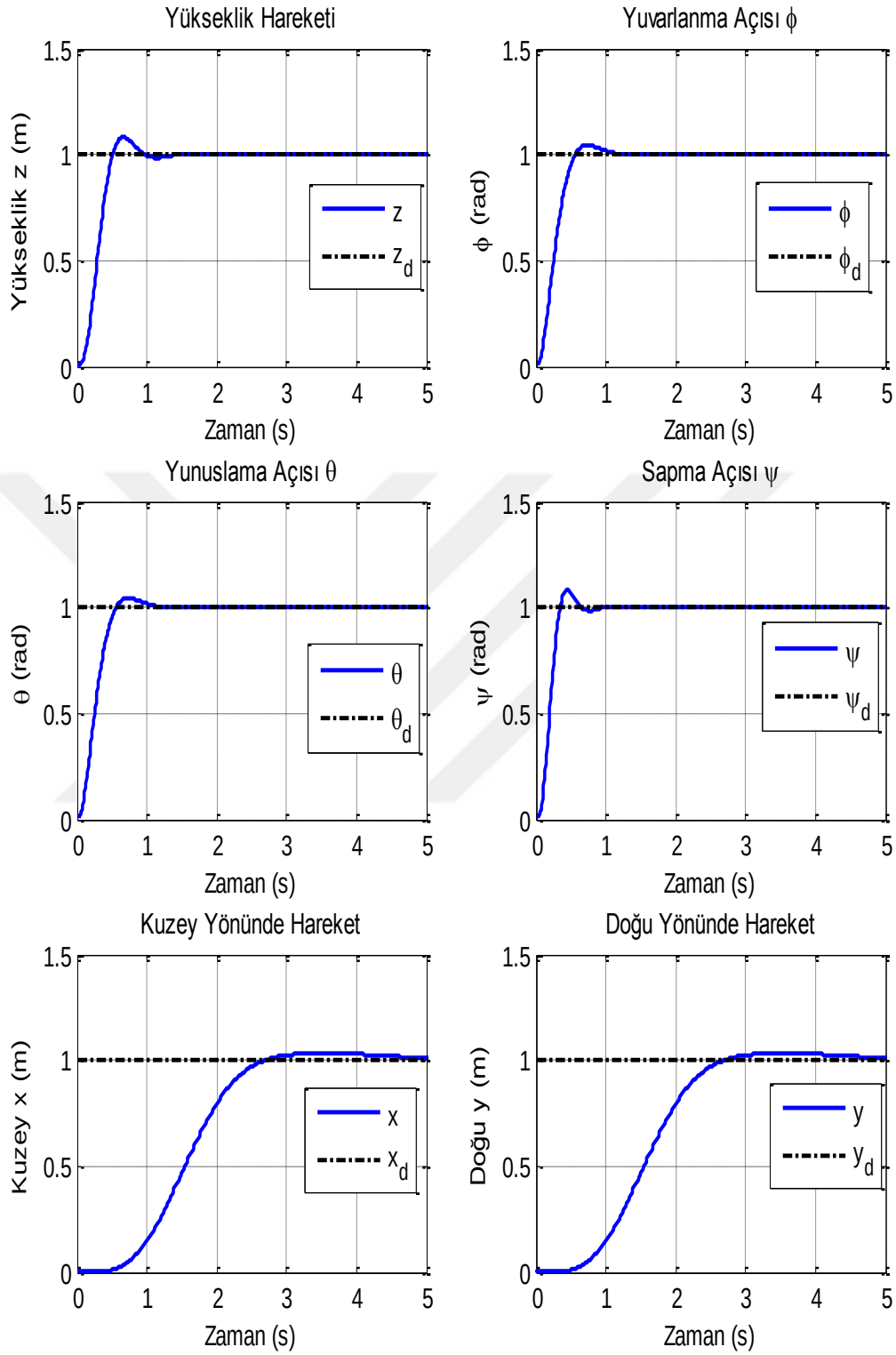
Bu kazanç matrisleri ile dörtpervanelinin basamak tepkileri Şekil 4.20’de verildiği gibi gerçekleşmiştir.

Görüleceği üzere, durgun hal hataları sıfır olmuştur. Bu durum daha önceki tasarımlardan farklı olarak durum vektöründen sadece hata tümlevlerinin ağırlıklandırılması ile elde edilmiştir. Ayrıca, kazanç matrislerinden de görüleceği üzere her bir denetleyicinin sahip olması gereken değer ilgilendiği durum tarafından belirlenmektedir. Mesela, U_1 itki komutu denetim kuralı gereği sadece yükselme hatasının tümlevi, yükseklik ve yükselme hız değerleri ile çarpılarak elde edilir. Diğer değişkenlerin etkisi sıfırdır. Bu yapıyla Doğrusal Karesel Denetleyici daha gürbüz bir yapıdadır.

Çizelge 4.8 basamak tepkilerinin sonuçlarını vermektedir. Bu sonuçlara göre yeterince hızlı bir yükselme gerçekleştiği söylenebilir. % 8 gibi bir aşma olsa da durgun hale bir saniyenin altında yaklaşık 0.9 saniyede ulaşmaktadır. Yuvarlanma ve yunuslama yönelimleri tıpkı PID ve PD denetiminde olduğu gibi bakışımli yapısından dolayı aynı sonuçları vermiştir. Yükselme süresi olarak biraz daha yavaş olsa da yaklaşık % 4.3 gibi az bir aşım göstermiştir. Sapma yönelimi ise biraz daha hızlıdır. Yaklaşık 0.6 saniyede durgun hale geçerken % 8.1 gibi bir aşma değerine sahiptir. Kuzey ve doğu konumları denetimi ise PID ve PD denetimlerine göre daha hızlıdır. Yaklaşık 2.3 saniyede 1 metre isterin % 90’ı gerçekleşirken, en önemli fark durgun hale 4.5 saniye gibi kısa bir sürede geçmesidir. Aşım değeri ise % 3.2 gibi küçük bir seviyededir. Ancak, yaklaşık 0.5 saniye kadar bir gecikme ile denetimin başladığı görülmektedir.

Çizelge 4.8 DKD1 Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0,30921	0,895677	8,142312
Yuvarlanma (ϕ)	0,352454	0,992531	4,364379
Yunuslama (θ)	0,352454	0,992531	4,364379
Sapma (ψ)	0,208242	0,603297	8,143014
Kuzey (x)	1,34696	4,506186	3,207552
Doğu (y)	1,34696	4,506186	3,207552



Şekil 4.20 DKD1 ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri

Çizelge 4.9 DKD1 En Yüksek Pervane Hızları

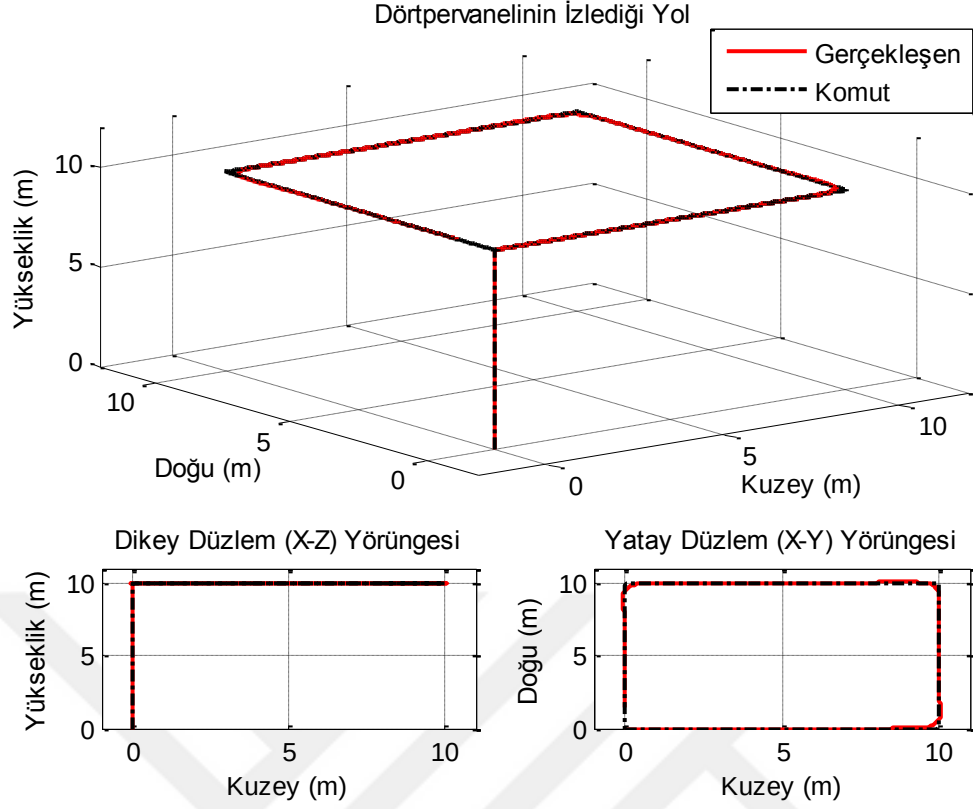
	$\Omega_1(\text{rad/s})$	$\Omega_2(\text{rad/s})$	$\Omega_3(\text{rad/s})$	$\Omega_4(\text{rad/s})$
Yükselme (z)	375,1729	375,1729	375,1729	375,1729
Yuvarlanma (ϕ)	318,18	319,6641	318,18	316,9863
Yunuslama (θ)	316,9863	318,18	319,6641	318,18
Sapma (ψ)	464,8067	389,3984	464,8067	389,3984
Kuzey (x)	226,9887	226,1817	226,4377	226,1817
Doğu (y)	226,1817	226,9887	226,1817	226,4377

Çizelge 4.9 Doğrusal Karesel Denetleyici ile basamak tepkilerinde görülen en yüksek pervane hızlarını vermektedir. Pervane hızı limitimiz 550 rad/s olsa da konum ve yönelimde daha düşük pervane hızları görülmüştür. Bu durum tamamen tasarım ile alakalıdır. Bununla beraber, farklı Q ve R matrisleri ile yapılan benzetimlerden daha hızlı tepkilere sahip tasarımlar elde edilmiştir. Ancak, sonuçlar incelendiğinde denetlenen durumların basamak tepkilerinde salınımlar yaptığı görülmektedir. Sistemin bant genişliği ile açıklanabilecek bu salınımlar, sistemi hızlandırırsalar bile herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldıklarında dörtpervanelinin denetimini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, Denklem 4.5 ve Denklem 4.6'da verilen ağırlıklandırma matrisleri ile daha yavaş ama salınımına neden olmayan bir denetleyici bütünü tasarımlanmıştır. Sonuç olarak elde edilen tasarım, kıstasları karşılamaktadır.

Birinci Senaryo Benzetimi

Altsistemler üzerinden DKD yöntemi (DKD1) ile denetlenen dörtpervanelinin birinci senaryoda gösterdiği yörünge takibi Şekil 4.21'de verildiği gibidir.

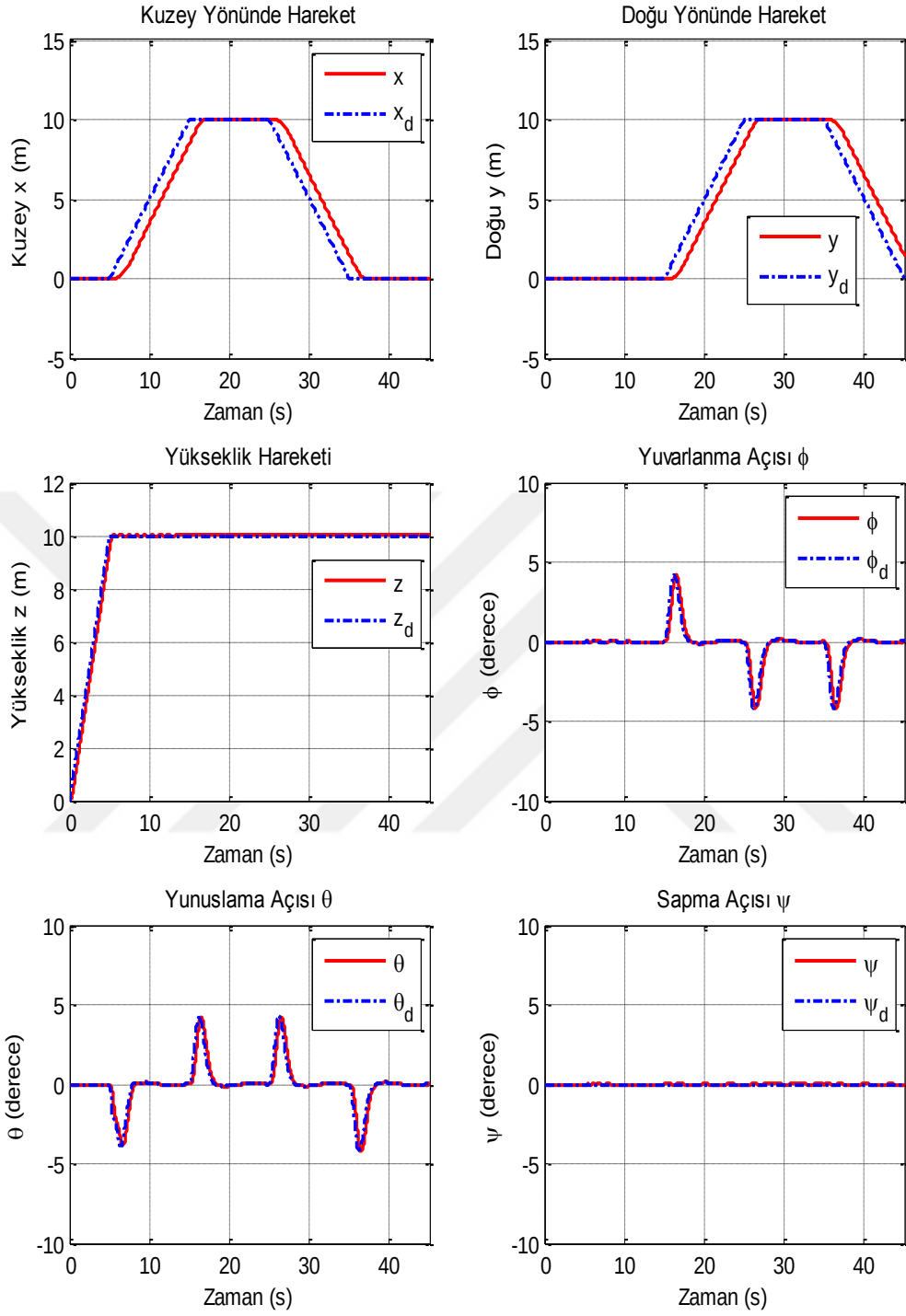
Dörtpervaneli bu denetim yöntemi ile başarılı bir yörünge takibi gerçekleştirmiştir. Bu durum Şekil 4.22'de verilen denetimi yapılan değişkenlerden de görülebilir. Yükselme hareketini başarılı bir şekilde yapmıştır. Durulma süresinin yaklaşık 0.9 saniye olması nedeniyle yükselirken yaklaşık 0.5 metre takip hatası yaptığı görülmektedir. Ama yüksekliği 10 metrede kararlı bir biçimde tutmayı başarmıştır. Kuzey ve doğu konumlarındaki değişim ise basamak tepkilerinden de görüldüğü gibi biraz gecikmeli olmuştur. Kuzey yönüne hareketin başladığı 5. saniyede, doğu yönüne hareketin başladığı 15. saniyede ve konumun değiştiği diğer zamanlarda yaklaşık 0.5 saniyelik bir gecikme 1.5 metre gibi bir takip hatasına neden olmaktadır. Ancak durgun halde hata olmadığı da görülmektedir.



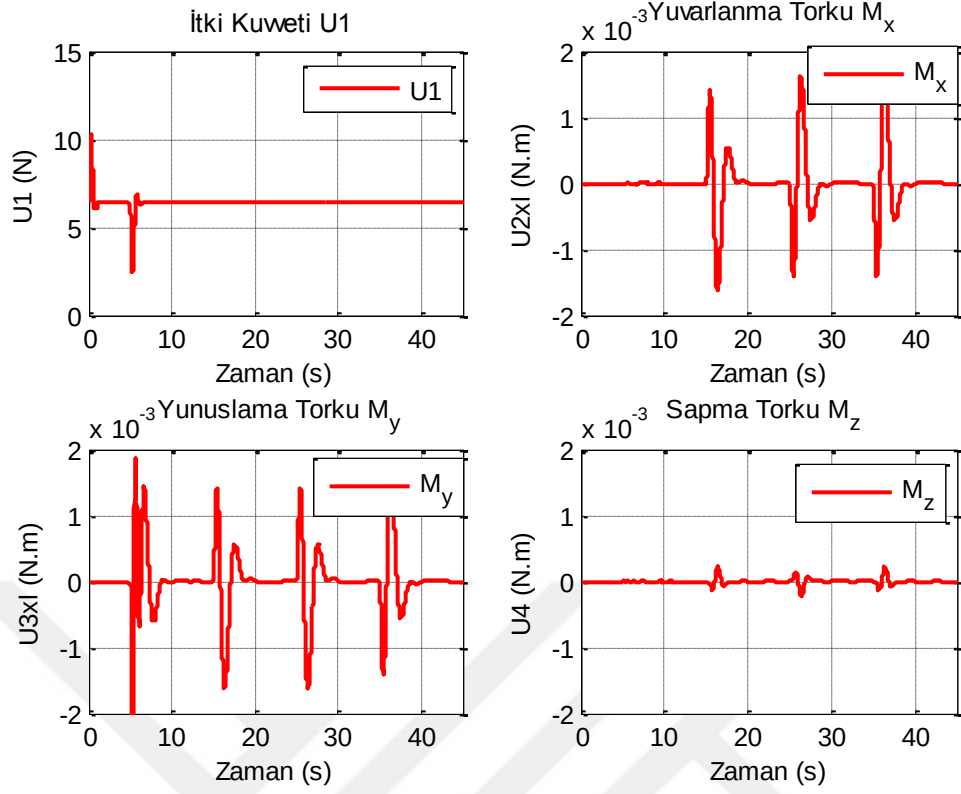
Şekil 4.21 Senaryo 1; DKD1 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

Yönelimler ise incelenen diğer denetleyicilerde olduğu gibi konum denetimine göre çok daha hızlı ve başarılıdır. Dört pervaneli uçuşu boyunca en yüksek 4.2 derece yuvarlanma ve yunuslama açısı gerçekleştirmiştir. PID ve PD denetimleri ile karşılaştırıldığında açı değişimlerinin biraz daha az olduğu ve daha tutarlı davrandığı görülebilir. Sapma açısı ise istenilen sıfır derecede başarılı bir biçimde tutulmuştur.

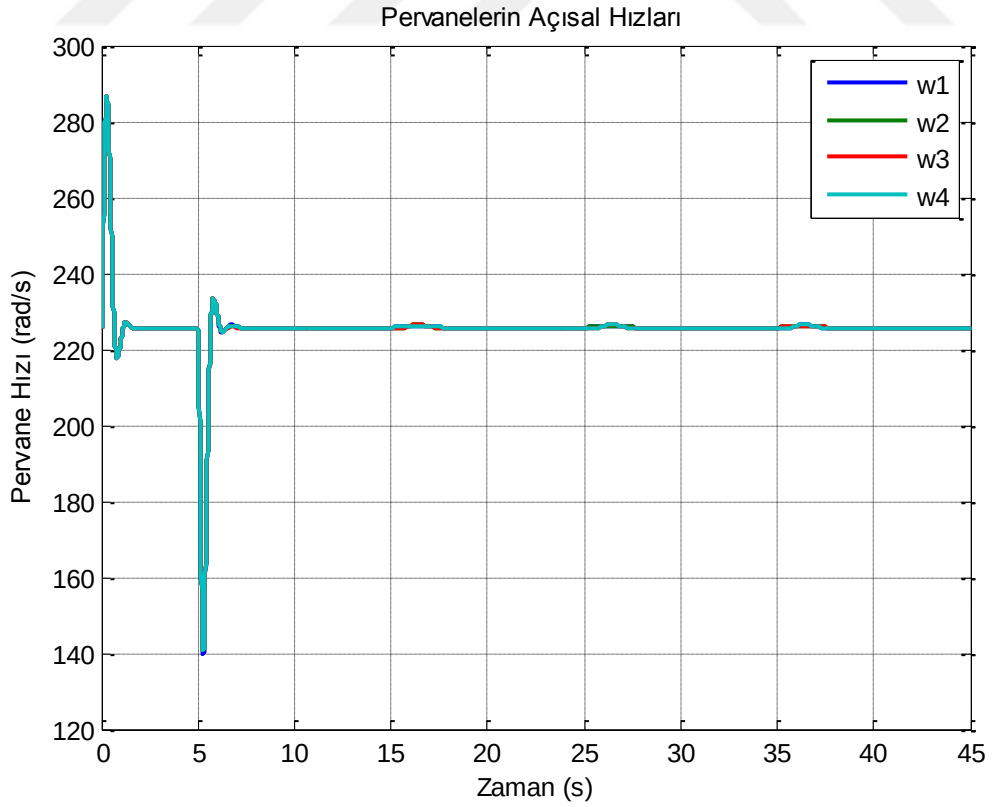
Şekil 4.23’de verilen kuvvet ve moment değişimi ile Şekil 4.24’de verilen pervane hızlarının değişimi incelendiğinde; yükselme hareketi en yüksek 286 rad/s pervane hızı ile elde edilen 10.27 N’luk kuvvet ile yapılmıştır. Yükselmenin azalması için ise pervaneler yaklaşık 141 rad/s hıza düşmüştür. İncelenen diğer yöntemlerden farklı olarak bu yöntem ile yunuslama ve yuvarlanma açılarının çok az tork değerleri ile gerçekleştirildiği görülmektedir. 0.0017 N.m tork ile 4.2 derece yunuslama ve yuvarlanma açısı elde edilebilmiştir. Böylece, pervane hızlarının birbirlerine göre çok az değişikliğe uğrayarak kararlı bir uçuş gösterdiği görülebilir.



Şekil 4.22 Senaryo 1; DKD1 ile Konum ve Yönelim Denetimleri



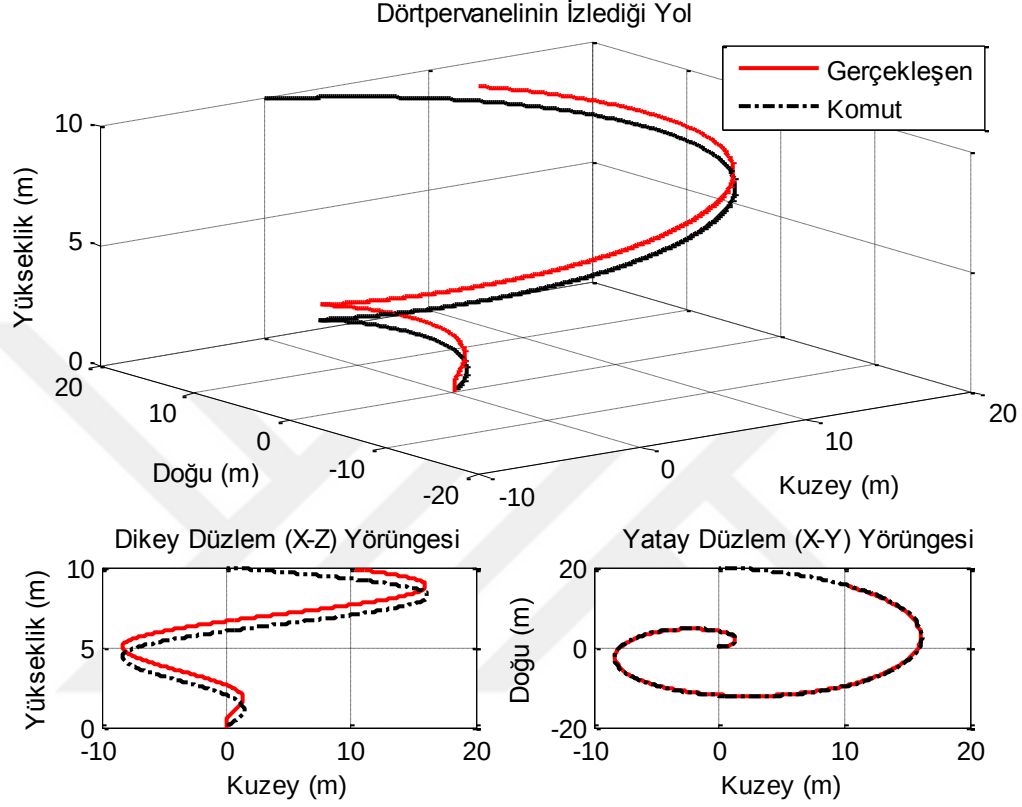
Şekil 4.23 Senaryo 1; DKD1 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.24 Senaryo 1; DKD1 ile Pervanelerin Açısal Hızları

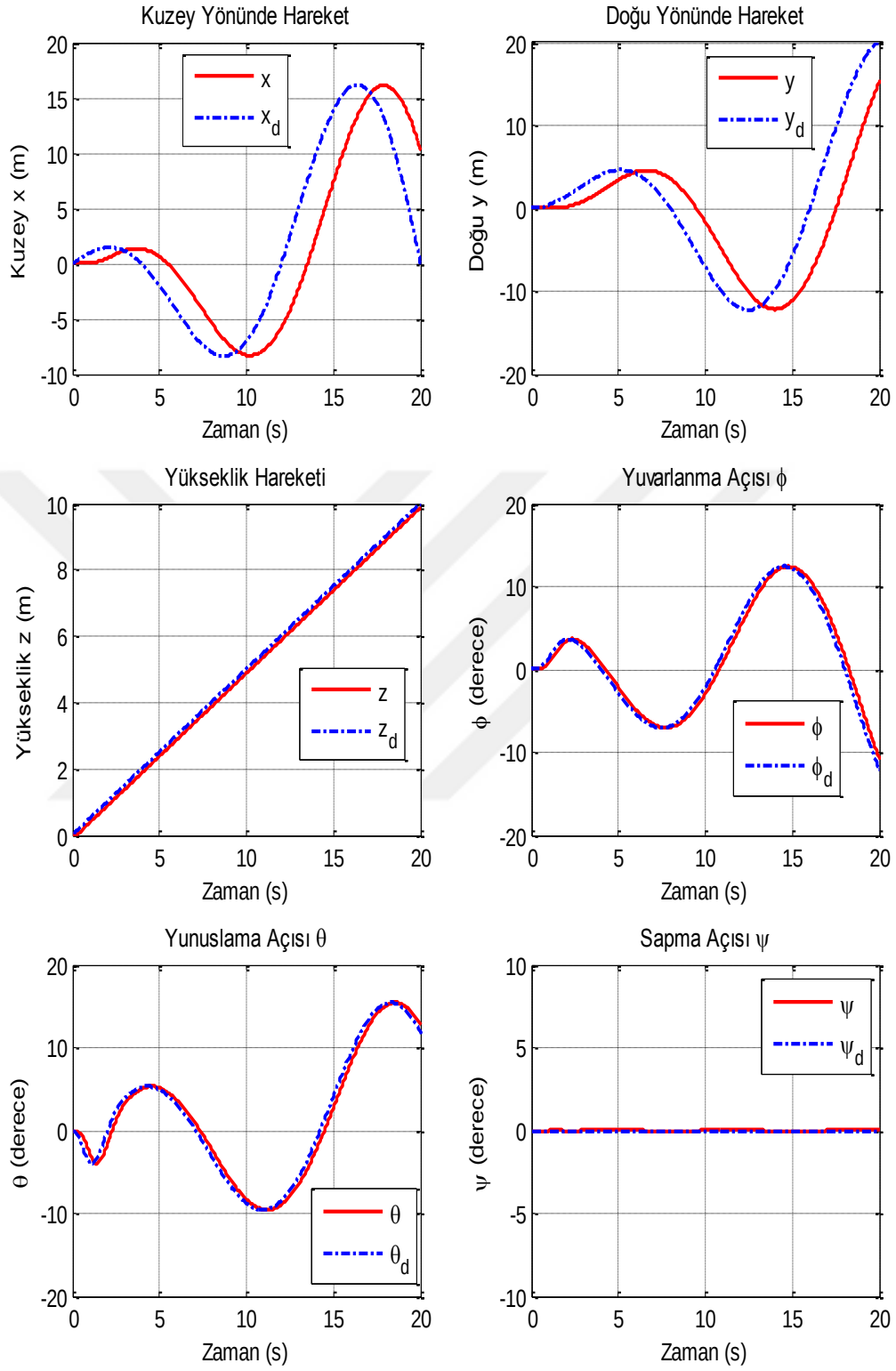
İkinci Senaryo Benzetimi

Doğrusal Karesel Denetleyici ile denetlenen dörtpervanelinin ikinci senaryoda gerçekleştirdiği konum takibi Şekil 4.25’de verilmiştir.

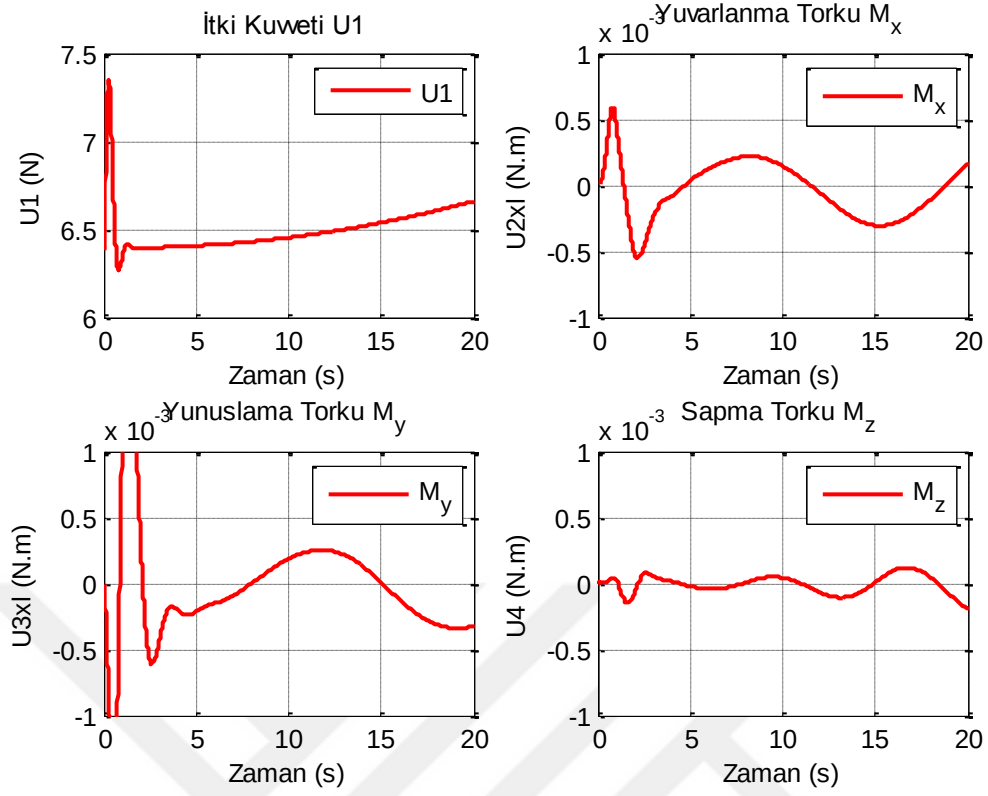


Şekil 4.25 Senaryo 2; DKD1 ile Dörtpervanelinin İzlediği Yol

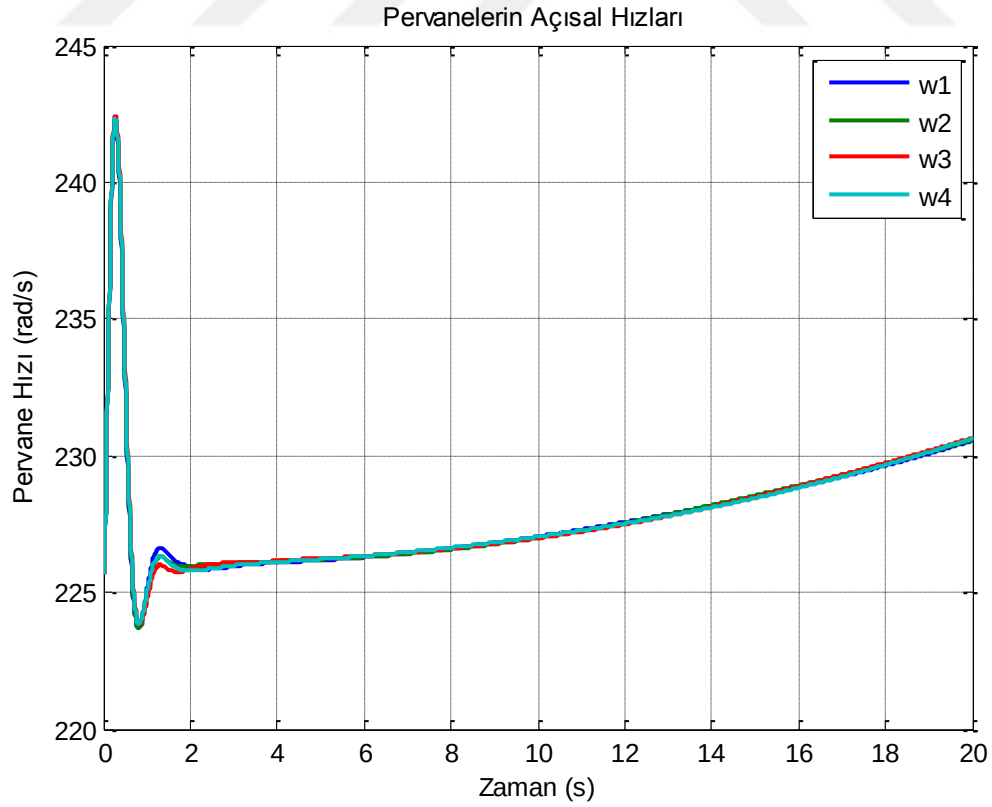
Dörtpervanelinin yörünge takibini gecikmeli olsa da başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği yatay ve dikey düzlem çizimlerinden görülebilir. Şekil 4.26’da verilen konum ve yöneliminin değişimlerine göre birinci senaryoda olduğu gibi burada da yükselme hareketinin çok başarılı olduğu ancak kuzey ve doğu yönüne doğru ilerlemenin ise gecikmeli olarak gerçekleştiği görülmektedir. Kuzey ve doğu denetleyicilerinin doğrudan denetim sinyali üretmediği bunun yerine dörtpervanelinin yapması gereken yunuslama ve yuvarlanma açısı isterleri ürettiği daha önceden bahsedilmiştir. Çizimlerden yaklaşık 1.5 saniye olarak görülen bu gecikme ve yavaşlığın bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.26 Senaryo 2; DKD1 ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.27 Senaryo 2; DKD1 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.28 Senaryo 2; DKD1 ile Pervanelerin Açısal Hızları

Yunuslama, yuvarlanma ve sapma açılarının denetimi ise çok daha başarılıdır. Çok az bir gecikme olsa da artan açı değerlerine hızlı bir biçimde ulaşılmıştır. Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'den dörtpervanelinin gerçekleştirdiği kuvvet, moment ve pervane hızları görülebilir. Dörtpervaneli hareketin başladığı ilk zamanlarda 0.006 ve 0.002 N.m olan en yüksek yuvarlanma ve yunuslama tork değerleri, PD ve PID denetleyicilerine kıyasla daha az gerçekleşmiştir. DKD1 ile daha az denetim çabası harcanarak başarılı bir denetim sağlanmıştır.

4.2.2. Altsistemlere Ayırıştırımdan Denetim (DKD2)

Bölüm 3.3'de ikinci bir yaklaşım olarak önerilen, sistemin tüm durumlarını içeren tek bir yapı ile altsistemlere ayırıştırımdan Doğrusal Karesel Denetleyici tasarımının benzetim sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır.

Verilen tasarım kıstaslarına göre farklı q_1, q_2, q_3, q_4 ve r değerleri ile yapılan çok sayıda benzetim sonuçları incelenerek, yükselme ve yönelim denetimi için gereken Q ve R ağırlıklandırma matrisleri Denklem 4.9'de verildiği gibi seçilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 25000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1000 \\ 0_{8 \times 4} & 0_{4 \times 8} & 0_{8 \times 8} \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Bu bilgilerle tasarımılanan denetleyicilerin geribesleme kazanç matrisleri aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K_x(1:6) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -50.658 & -8.115 \\ 0 & 0 & 59.364 & 11.144 & 0 & 0 \\ -59.364 & -11.144 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

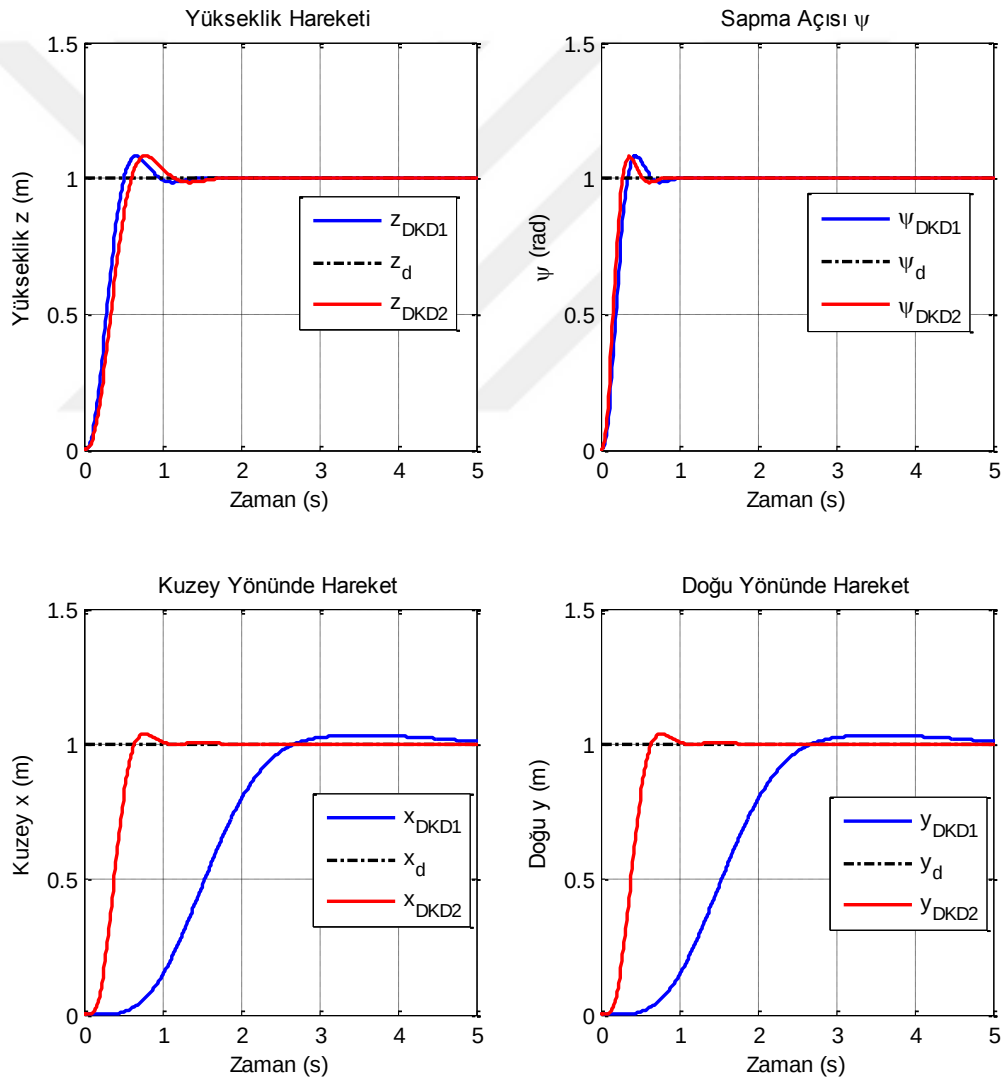
$$K_x(7:12) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 12.684 & 0.909 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12.684 & 0.909 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.702 & 0.349 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$K_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 158.1139 & 0 \\ 0 & -158.1139 & 0 & 0 \\ 158.1139 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -31.6228 \end{bmatrix}$$

Bu yaklaşımla tasarımı yapılan denetleyicinin başarımı ile iki altsistem için ayrı ayrı tasarımı yapılan denetleyicinin başarımı Şekil 4.29'da verilen basamak tepkilerinden karşılaştırılabilir. Ayrıca Çizelge 4.8 ile Çizelge 4.10 da bu karşılaştırmada kullanılabilir.

Çizelge 4.10 DKD2 ile Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0.3669	1.0633	8.1462
Sapma (ψ)	0.1765	0.4936	8.1344
Kuzey (x)	0.3362	0.9281	3.7689
Doğu (y)	0.3362	0.9281	3.7689



Şekil 4.29 DKD1 ve DKD2 ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri Karşılaştırması

Görüldüğü üzere, dörtpervanelinin bütün durumlarını barındıran tek bir model üzerinden Doğrusal Karesel Denetleyici tasarımı yapıldığında altsistemli tasarıma göre kuzey ve doğu konumlarına ilerlemede çok daha hızlıdır. İsterin % 90'nına 0.33 saniyede ulaşılabilirken durgun hale geçiş yaklaşık 3.5 saniye daha hızlı gerçekleşmiştir. Yükselme ve sapma açısı arasındaki fark çok az olsa da Q matrisinin ilgili hata terimlerini ağırlıklandıran değerleri değiştirilerek daha benzer sonuçlar elde edilebilir. Diğer yöntemden farklı olarak kuzeye ve doğuya ilerlemek için yunuslama ve yuvarlanma açı istekleri üretilmemiş olması dörtpervanelinin gerçekleştireceği yönelimlerin doğrudan konuma bağlı değişeceğini göstermektedir. Yunuslama ve yuvarlanma açılarındaki bu serbestlik nedeniyle tasarım yapılırken bu açıların 60 dereceyi aşmaması sağlanmaya çalışılmıştır. Bu durum Çizelge 4.11'den de görüleceği üzere pervane hızı limitimiz 550 rad/s olsa da konum için daha düşük pervane hızları gerçekleşmesine neden olmuştur. Buna rağmen altsistemli tasarıma göre çok daha hızlı tepkiler görülmektedir.

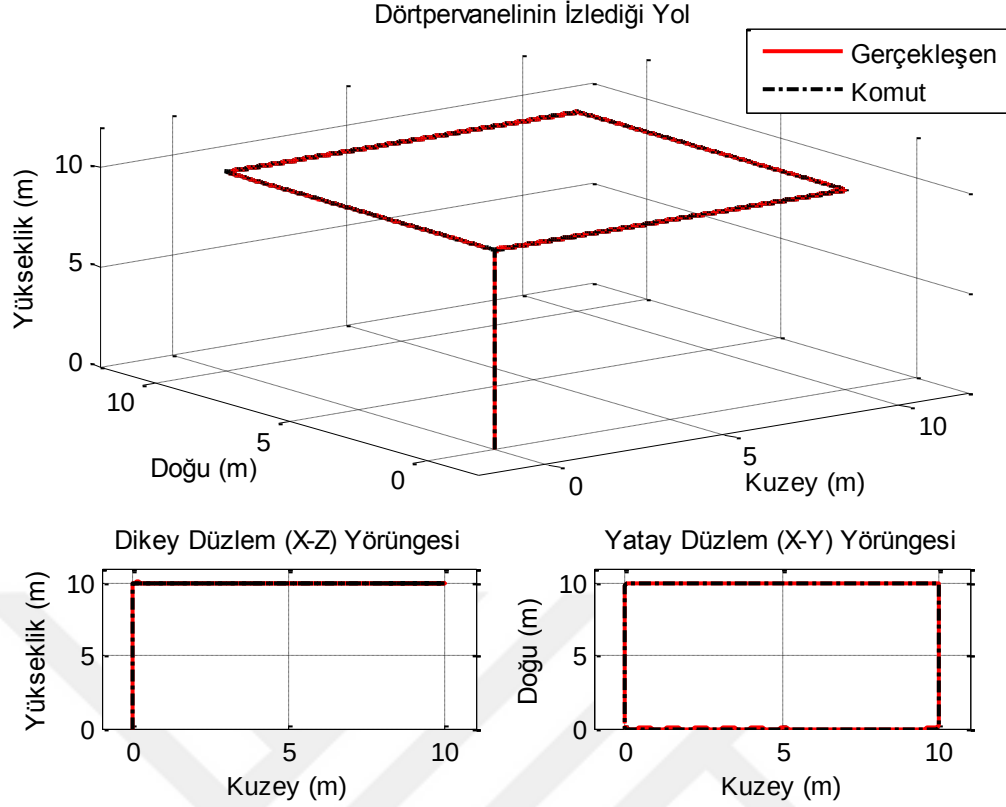
Çizelge 4.11 DKD2 ile En Yüksek Pervane Hızları

	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	Ω_3 (rad/s)	Ω_4 (rad/s)
Yükselme (z)	338,6045	338,6045	338,6045	338,6045
Sapma (ψ)	544,5671	448,659	544,5671	448,659
Kuzey (x)	407,5395	314,5914	357,9949	314,5914
Doğu (y)	314,5914	407,5395	314,5914	357,9949

Birinci Senaryo Benzetimi

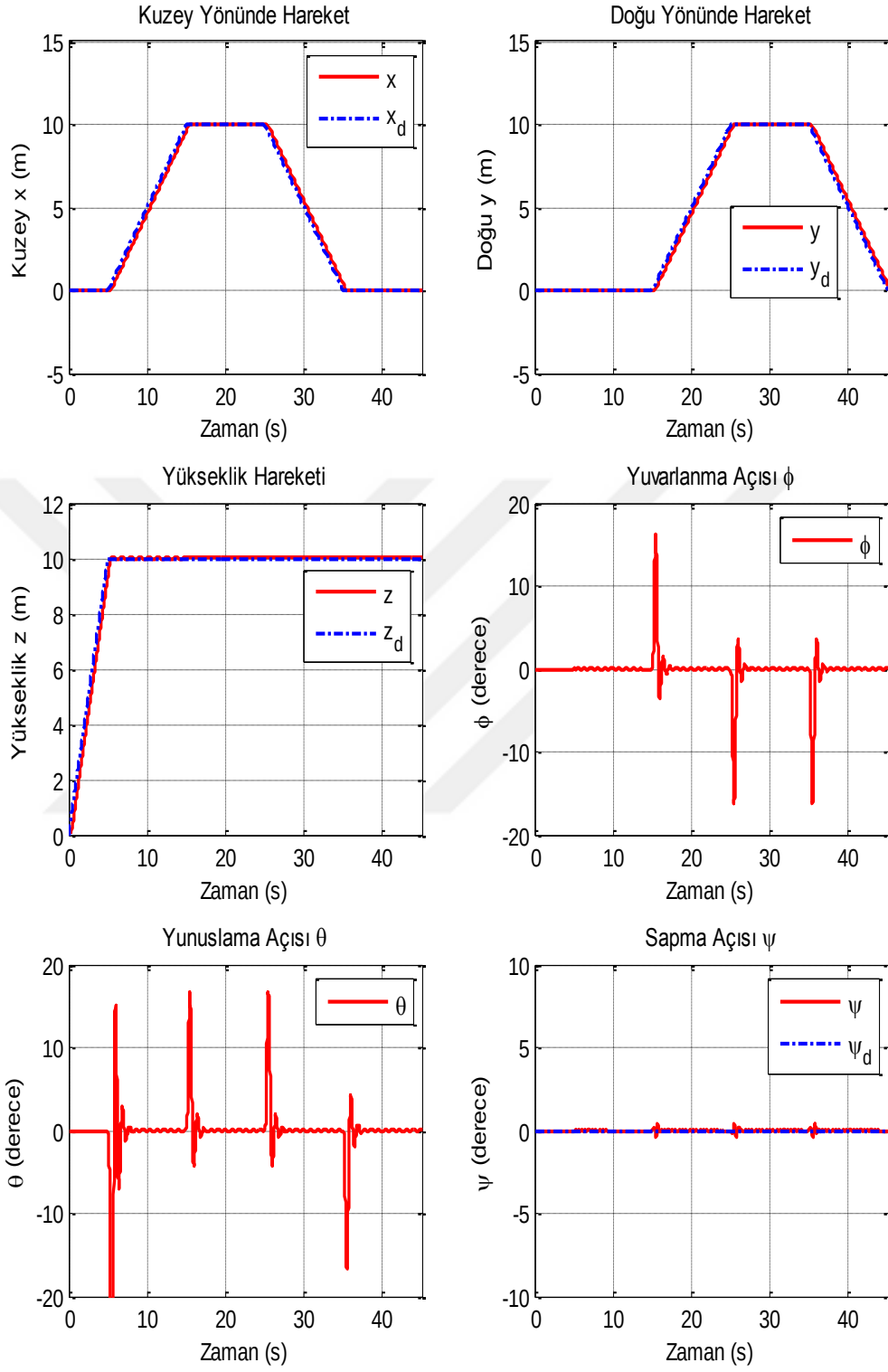
Tek model üzerinden tasarımı yapılmış Doğrusal Karesel Denetleyici ile denetlenen dörtpervanelinin birinci senaryoda gösterdiği yörünge takibi Şekil 4.30'da verildiği gibi gerçekleşmiştir.

Dörtpervaneli bu denetim yöntemi ile başarılı bir yörünge takibi gerçekleştirmiştir. Bu durum Şekil 4.31'de verilen denetimi yapılan değişkenlerden de görülebilir. Yükselme hareketi diğer yöntemlerde de olduğu gibi gayet başarılıdır. Kuzey ve doğu yönlerindeki ilerleme ise çok az takip hatası ile gerçekleşmiştir. Yaklaşık 0.35 metre olan hata DKD1 tasarımına göre çok daha başarılıdır.

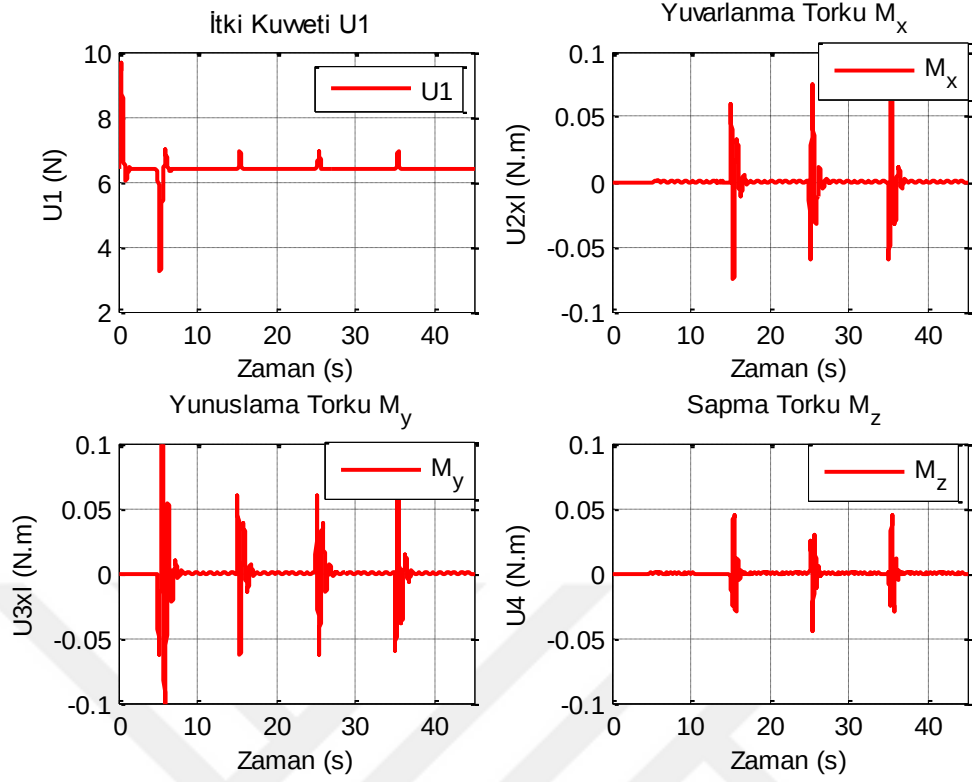


Şekil 4.30 Senaryo 1; DKD2 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

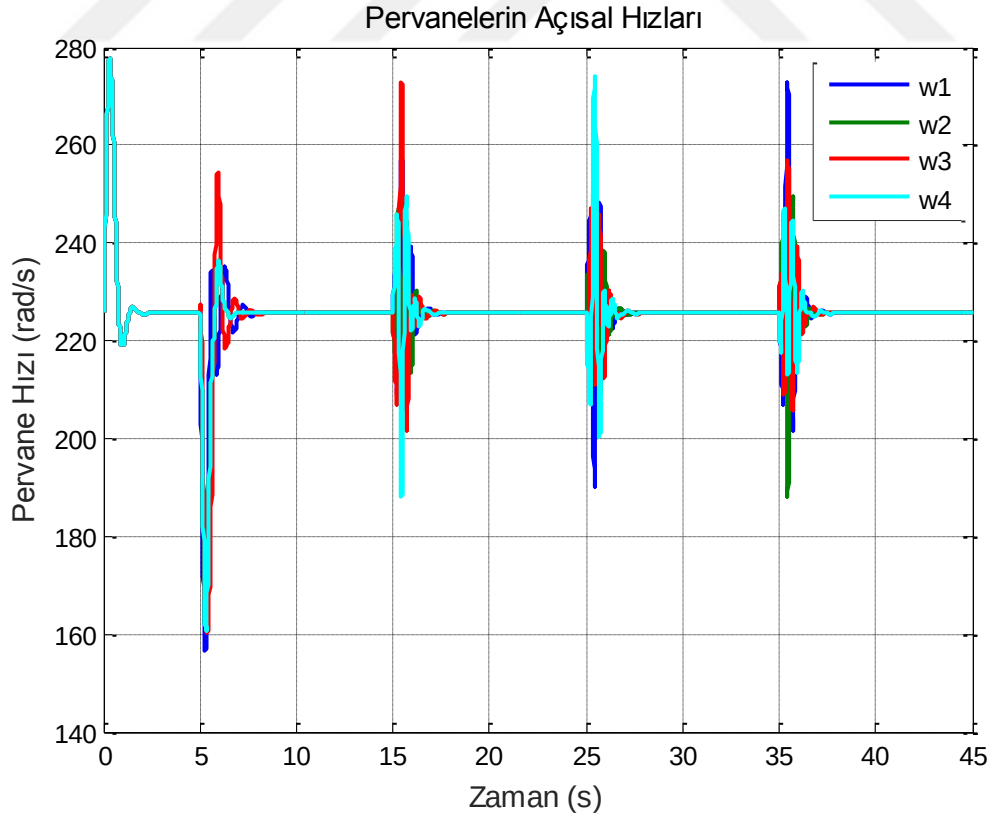
Yönelimler incelendiğinde ise, önceki benzetimlerde çok az yunuslama ve yuvarlanma açıları ile yörüngeler takip edilirken bu tasarımda bu açıların serbest bırakılması nedeniyle çok daha yüksek açılar görülmektedir. Kuzey yönüne hareketin başladığı beşinci saniyeden sonra yunuslama açısının en küçük -31.14 derece gerçekleştirdiği görülmektedir. Aynı şekilde yuvarlanma açısının ise 16.19 derece gerçekleştirdiği görülmektedir. DKD1 ile bu açıların en yüksek 4.2 derece olduğu daha önce verilmişti. Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'de verilen kuvvet, tork ve pervanelerin açısal hız değişimleri de DKD1 yaklaşımından çok daha farklı sonuçlar vermiştir. Yunuslama ve yuvarlanma torkları gerçekleşen yüksek açılar nedeniyle çok daha yüksektir. Sapma açısını sıfırda tutmayı başarsa bile yunuslama ve yuvarlanmanın başladığı anlarda çok küçük salınımlar görülmektedir. Pervane hızlarının değişimi ise böyle bir tasarımın hızlı olsa bile motorlar üzerinde daha yorucu bir etkisi olduğunu göstermektedir. Diğer yöntemlerde çok çok az değişimler ile uçuş gerçekleşirken burada pervane hızlarının harekete göre çok fazla değiştiğini söylemek mümkündür.



Şekil 4.31 Senaryo 1; DKD2 ile Konum ve Yönelim Denetimleri

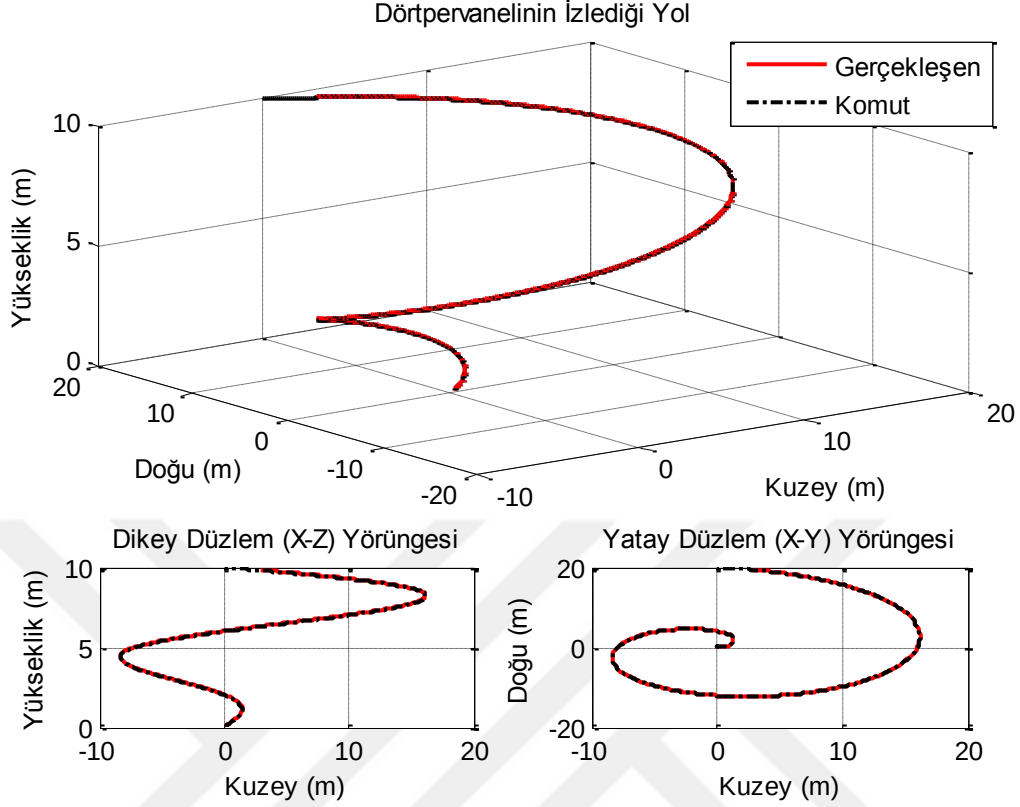


Şekil 4.32 Senaryo 1; DKD2 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.33 Senaryo 1; DKD2 ile Pervanelerin Açısal Hızları

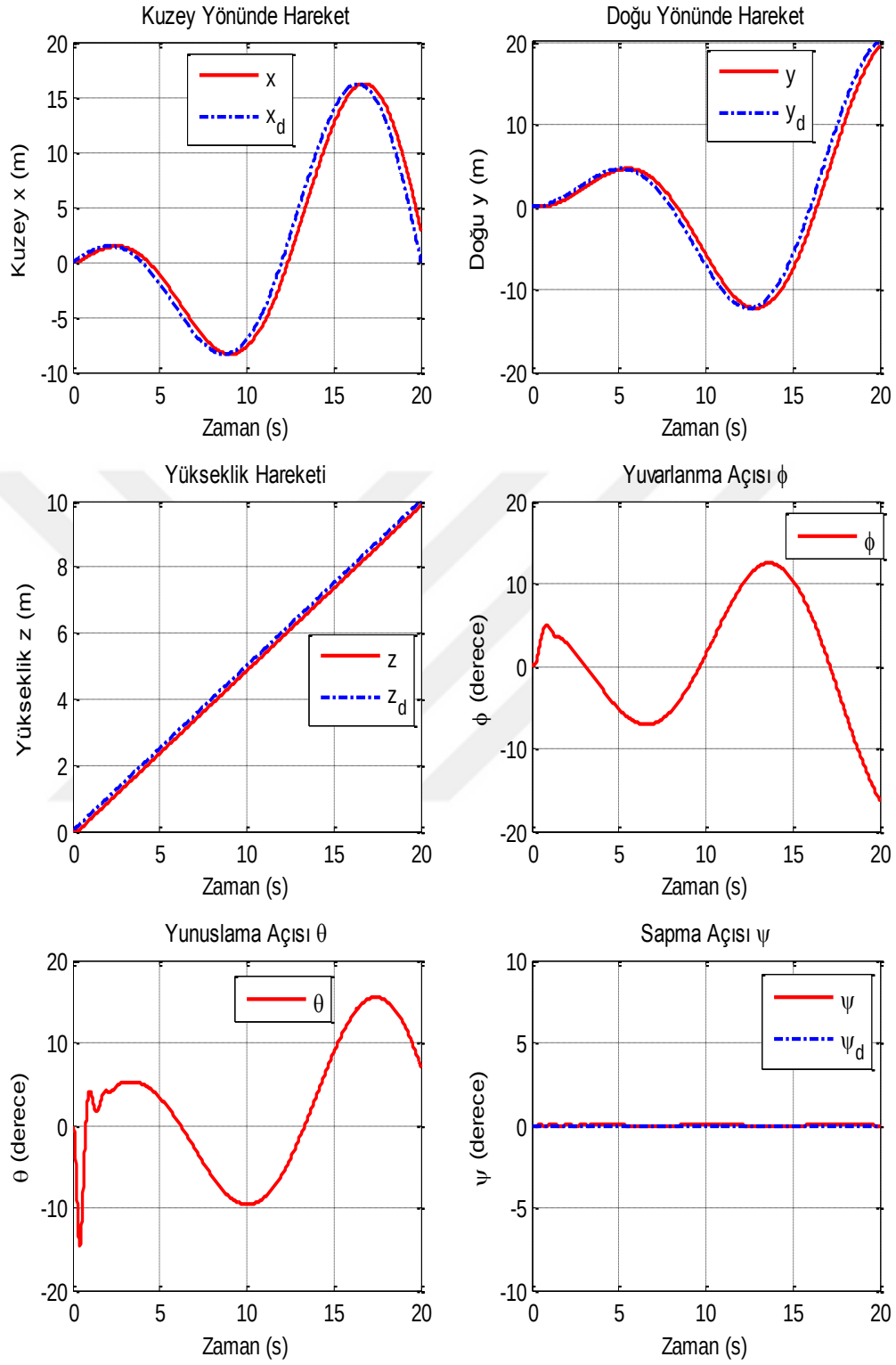
İkinci Senaryo Benzetimi



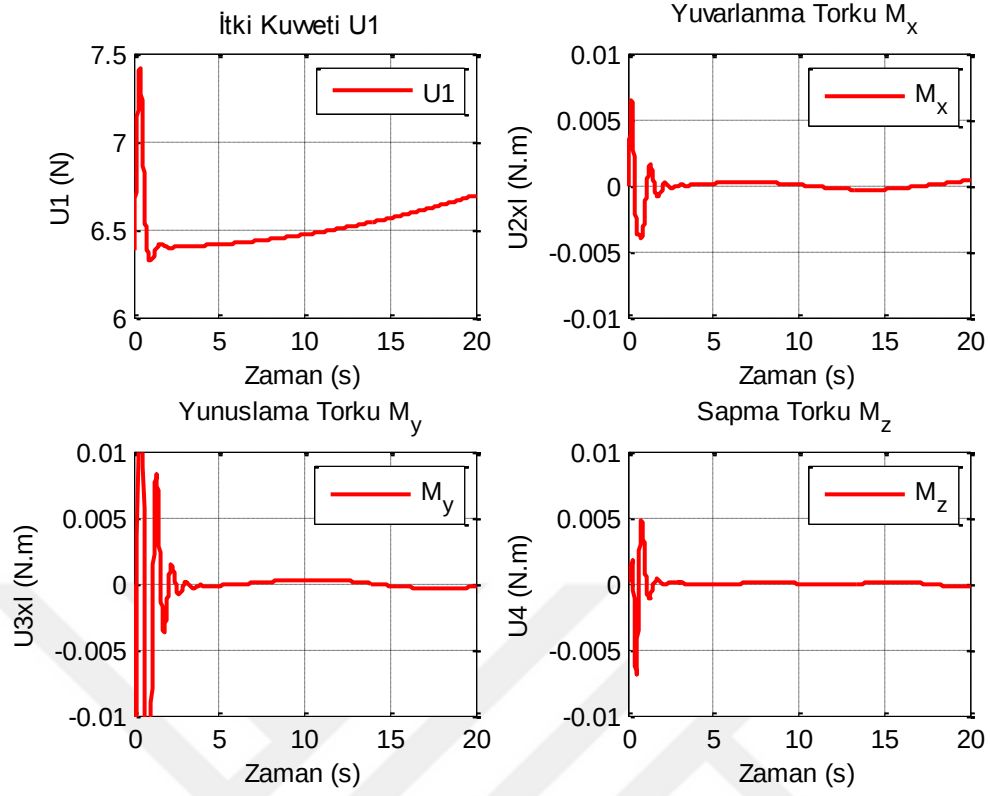
Şekil 4.34 Senaryo 2; DKD2 ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.34'den izlenen yol ve Şekil 4.35'den durumların tepkileri incelendiğinde dört pervanelinin çok başarılı bir yörünge takibi gerçekleştirdiği görülmektedir. Takip hatası bu senaryo için de altsistemli tasarımdan daha az ve kuzey ve doğu ister takibi çok daha hızlıdır. Yunuslama ve yuvarlanma açıları diğer benzetimlerde görüldüğünden çok farklı değildir. Sapma açısı başarılı bir biçimde sıfıra yakın tutulmuştur. Şekil 4.36'da verilen kuvvet ve torklar karşılaştırıldığında ise sadece uçuşun başladığı ilk zamanlarda daha fazla tork değerleri görülmektedir. Bu durum Şekil 4.37'de verilen pervanelerin açısal hız değişimlerinden de görülebilir.

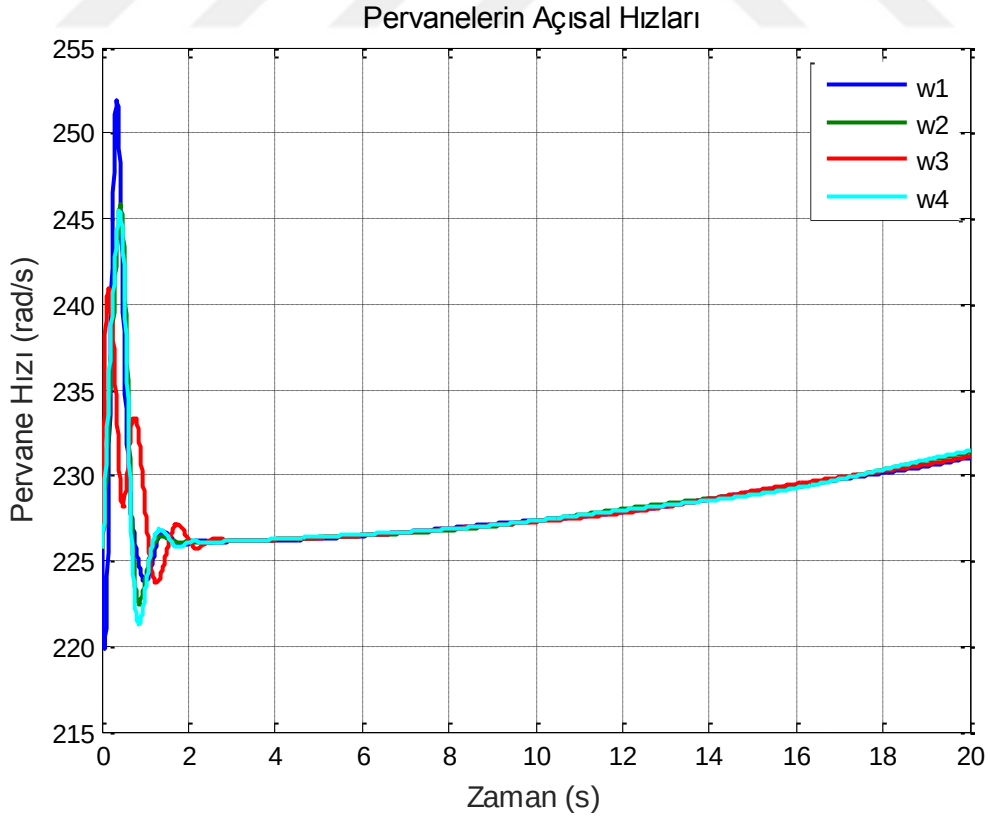
Sonuç olarak, tek bir model üzerinden tasarımılanan denetleyici (DKD2), altsistemler modeli üzerinden çalışan denetleyiciden (DKD1) çok daha hızlı kuzey ve doğu ilerlemesi sağlamıştır. Yunuslama ve yuvarlanma açılarının serbest bırakılması çok yüksek açıların gerçekleşmesine neden olabilmekte ama tasarım yapılırken uygulanan kısıtlamalar ile tehlikeli olabilecek açı değerlerine ulaşılması engellenebilir.



Şekil 4.35 Senaryo 2; DKD2 ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.36 Senaryo 2; DKD2 ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.37 Senaryo 2; DKD2 ile Pervanelerin Açısal Hızları

4.3. Geriadımlamalı Denetim

Bu bölüme kadar incelediğimiz PID, PD ve eniyilemeli denetim yöntemleri doğrusal denetim yöntemleriydi. Bu yöntemler ile doğrusal olmayan modele sahip dörtpervanelinin başarılı bir şekilde denetlenebileceği gösterilmişti. Şimdi ise doğrusal olmayan dörtpervaneli, doğrusal olmayan denetim yöntemleri ile denetlenmeye çalışılacaktır. Geriadımlamalı denetim (GAD) yöntemi bu yöntemlerden biridir. Bölüm 3.4’de ayrıntılı olarak anlatılan bu yöntemin, Denklem 3.50, Denklem 3.52-56’da verilen denetim kuralları için gereken kazançlar, yapılan çok sayıda benzetimin sonuçları incelenip, tasarım kıstaslarına bağlı kalınarak Çizelge 4.12’deki gibi seçilmiştir.

Çizelge 4.12 GAD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları

	Yükseklik (z)			Yuvarlanma (ϕ)		
Kazançlar	c_1	c_2	λ_1	c_3	c_4	λ_3
	6	7	0.001	12	12	0.4
	Yunuslama (θ)			Sapma (ψ)		
Kazançlar	c_5	c_6	λ_5	c_7	c_8	λ_7
	12	12	0.4	7	8	0.4
	Kuzey (x)			Doğu (y)		
Kazançlar	c_9	c_{10}	λ_9	c_{11}	c_{12}	λ_{11}
	0.7	5	0.01	0.7	5	0.01

Bu kazanç değerleri ile dörtpervanelinin konum ve yönelimlerinin basamak tepkileri Şekil 4.38 ve Çizelge 4.13’de verildiği gibidir. Çizelge 4.14’den ise dörtpervanelinin gerçekleştirdiği en yüksek pervane hızları görülebilir.

Yükselme hareketi yaklaşık 0.9 saniyede tamamlanmaktadır ve herhangi bir aşım olmamıştır. Dörtpervaneli bu yeteneği için 523 rad/s pervane hızı üreterek incelenen diğer yöntemlere göre daha hızlı bir yükselme gerçekleştirmiştir. Bu pervane hızları ile yükselmek için 34.3 N’luk bir kuvvet üretilmiştir.

Yuvarlanma ve yunuslama açıları diğer yöntemlerle benzer sonuçları üretmiştir. İsterin %90’nı 0.33 gibi kısa bir sürede ulaşıp durgun hale yaklaşık 0.6 saniyede geçilmiştir. % 0.52 gibi küçük bir aşım görülmektedir. Ancak, pervane hızı 550 rad/s’lik sınıra dayanmaktadır. Bu yüksek pervane hızları daha yüksek tork oluşturmuştur. Dörtpervaneli 1 radyanlık açı isterini gerçekleştirmek için yaklaşık

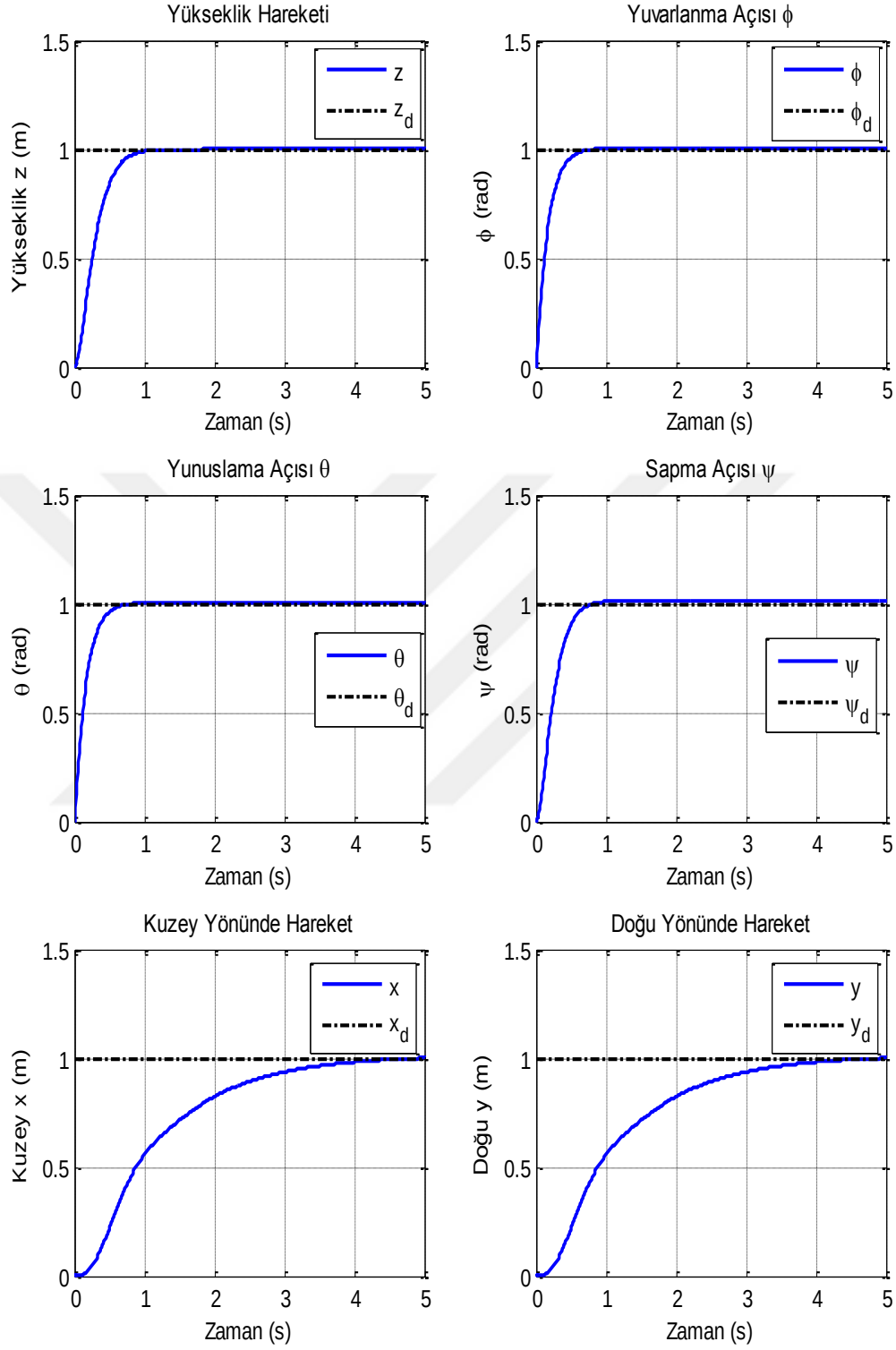
4.18 N.m yunuslama ve yuvarlanma torku ürettiği görülmektedir. Sapma açısı denetimi ise diğer yönelim açılarının denetimine göre yaklaşık 0.1 saniye daha yavaş kalmıştır. Yaklaşık % 1.4 aşım göstermektedir. Kuzey ve doğuya ilerleme hareketi ise yine bakışımli yapı nedeniyle aynı sonuçları vermiş ve diğer yöntemlerde olduğu gibi bu yöntemde de yavaş gerçekleşmiştir. Ancak, diğer yöntemlere göre durgun hale geçiş süresi daha kısadır. 1 metre kuzeyde ve doğuda ilerlemeyi 3.91 saniye de, % 1.28 aşım ile gerçekleştirmiştir. Dört pervaneli verilen bu pervane hızları ile yaklaşık 2.26 N.m tork oluşturarak yönelim açısını üretmiş ve 1 metrelik mesafeye erişebilmiştir.

Çizelge 4.13 GAD ile Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0,505484	0,874128	0,004919
Yuvarlanma (ϕ)	0,335633	0,583408	0,522425
Yunuslama (θ)	0,335633	0,583408	0,522425
Sapma (ψ)	0,422688	0,68432	1,3823
Kuzey (x)	2,224313	3,912972	1,286898
Doğu (y)	2,224313	3,912972	1,286898

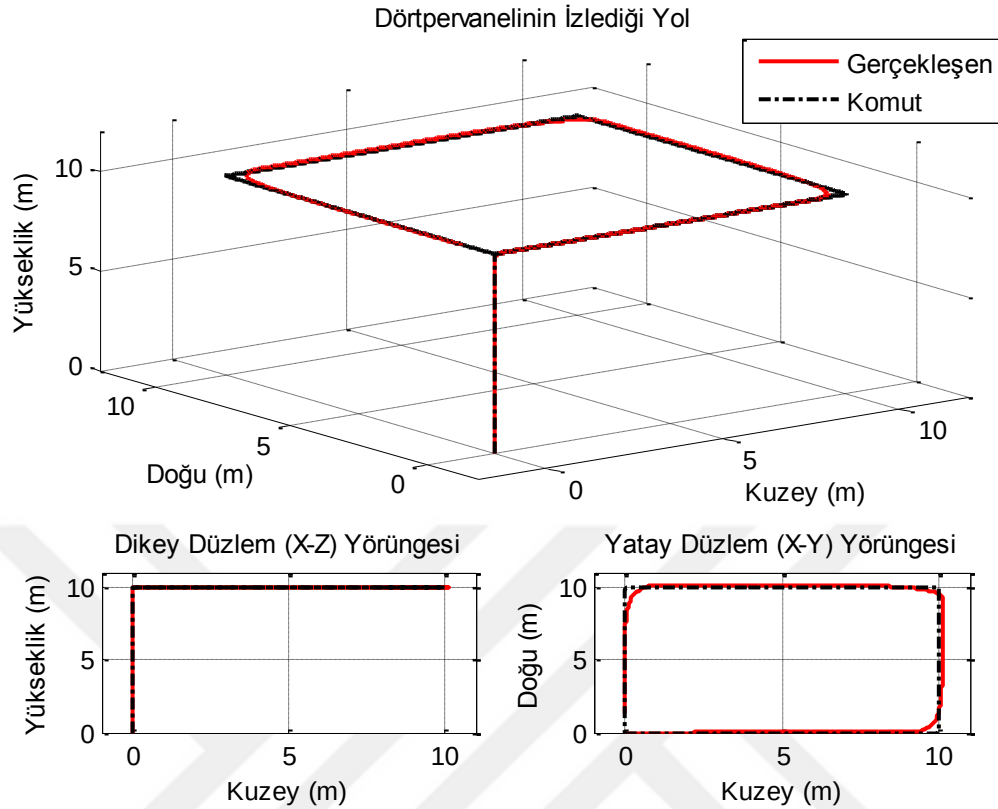
Çizelge 4.14 GAD ile En Yüksek Pervane Hızları

	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	Ω_3 (rad/s)	Ω_4 (rad/s)
Yükselme (z)	523,6206	523,6206	523,6206	523,6206
Yuvarlanma (ϕ)	308,2815	527,6102	308,2815	550
Yunuslama (θ)	550	308,2815	527,6102	308,2815
Sapma (ψ)	547,4156	444,7503	547,4156	444,7503
Kuzey (x)	326,154	229,6961	456,3304	229,6961
Doğu (y)	229,6961	326,154	229,6961	456,3304



Şekil 4.38 GAD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri

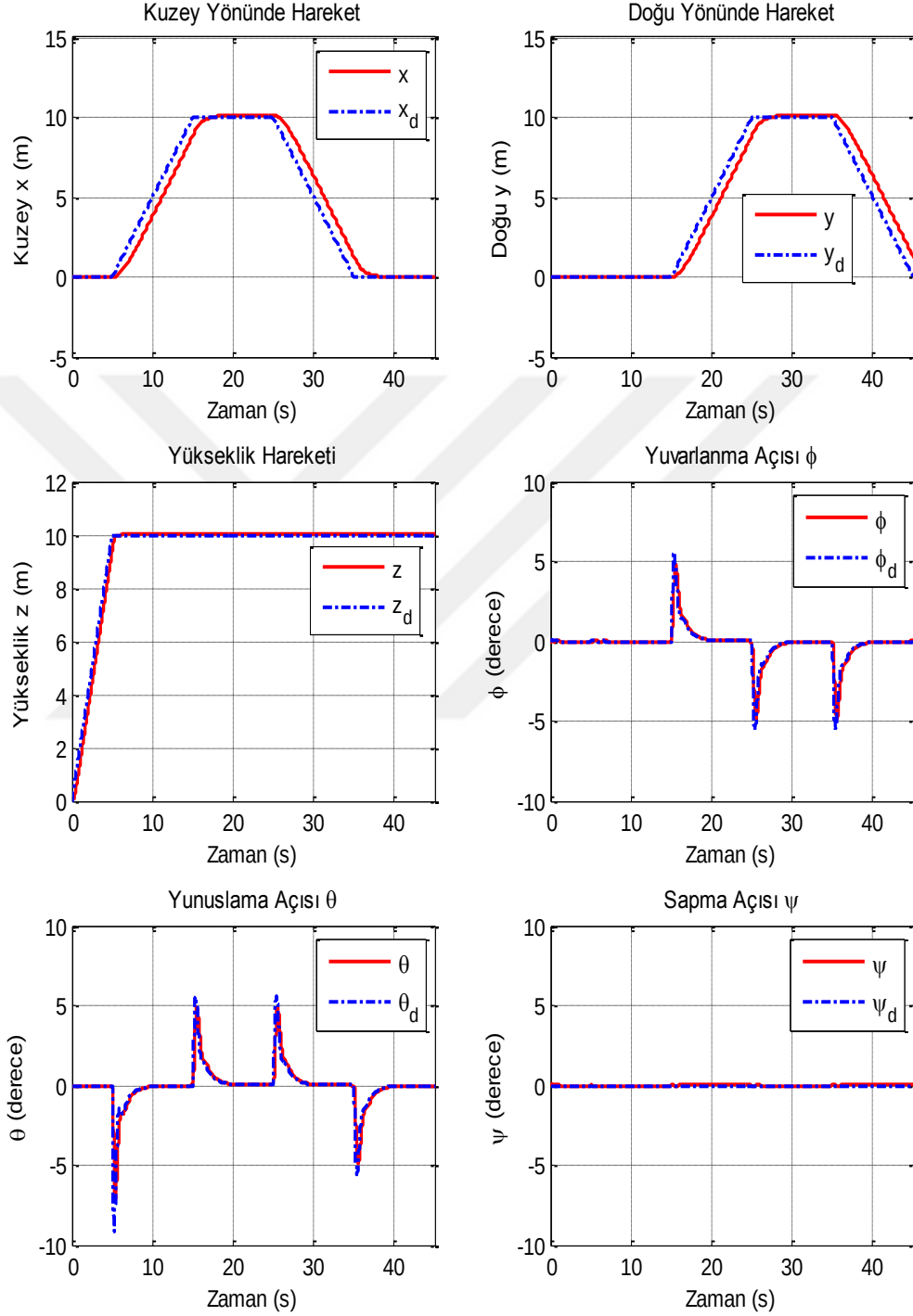
Birinci Senaryo Benzetimi



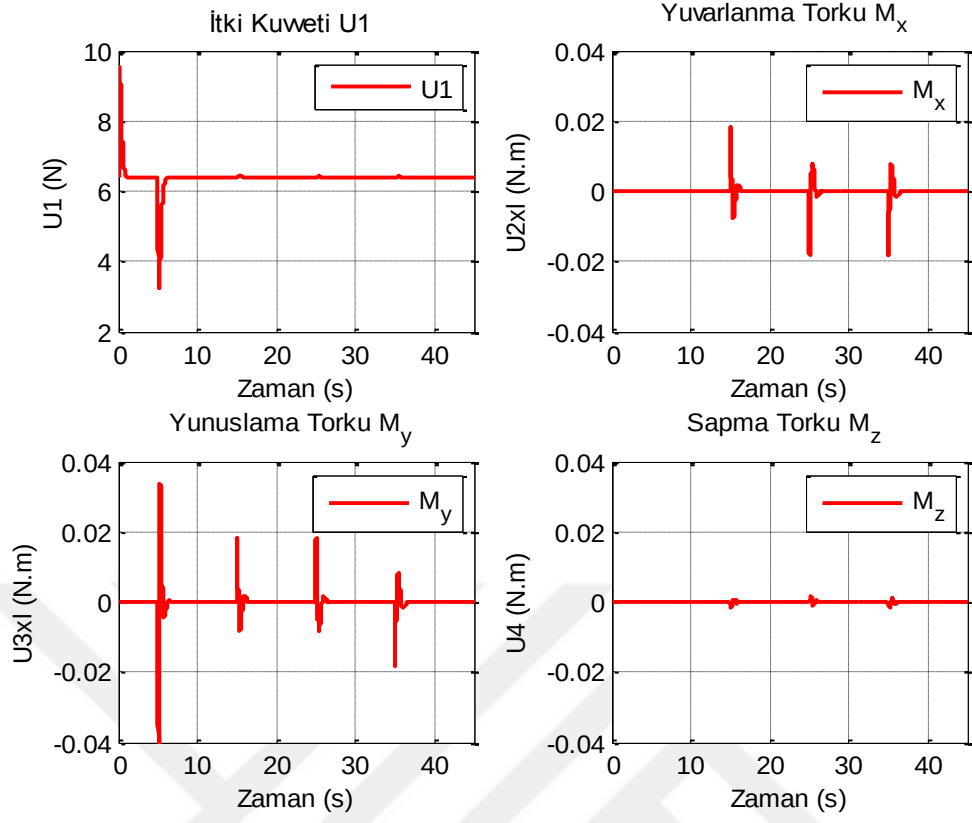
Şekil 4.39 Senaryo 1; GAD ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.39'da birinci senaryo için Çizelge 4.12'de verilen kazanç değerleri ile dörtpervanelinin izlediği yörünge gösterilmiştir. Dörtpervaneli başarılı bir konum takibi gerçekleştirmiştir. Şekil 4.40 konum ve yönelim değişimlerini isterleri ile beraber göstermektedir. Şekil 4.41 ve Şekil 4.42 ise uçuş boyunca gerçekleşen kuvvet ve momentler ile pervane hızlarını göstermektedir. Buna göre yükselme hareketi hızlı ve çok az bir takip hatası ile yapılmıştır. En yüksek 276 rad/s pervane hızı ile 9.5 N'luk itki kuvveti üretilmiştir. Kuzey ve doğuya ilerleme ise beklendiği gibi yükselme hareketine göre yavaş olmuştur. Ancak, bu durum istenilen yörüngeyi takip etmeyi bozmamaktadır. Kuzeye ve doğuya ilerlenirken yaklaşık 1 metre takip hatası ile yaklaşık 1.2 saniye geriden gelerek takip tamamlanmıştır. Kuzeye ilerlemenin başladığı 5. Saniye de en yüksek yunuslama torku 0.04 N.m, doğuya ilerlemenin başladığı 15. Saniyeden sonra ise en yüksek 0.0185 N.m yuvarlanma torku gerçekleşmiştir. Durgun halde ise herhangi bir takip

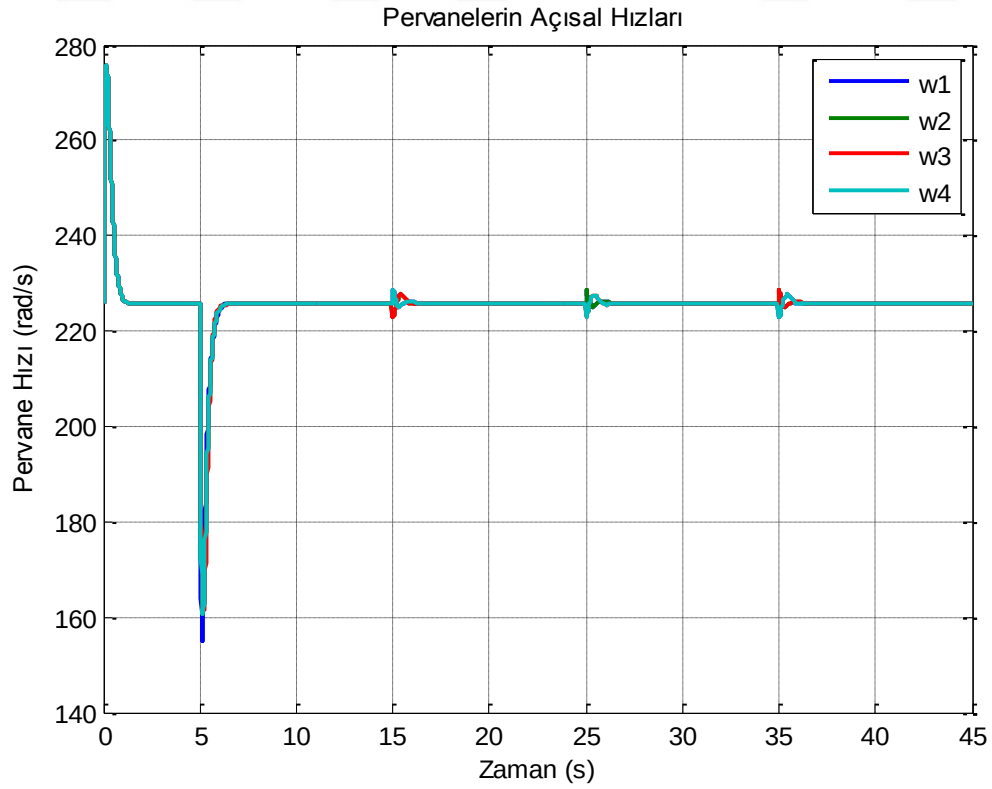
hatası yoktur. Yunuslama ve yuvarlanma ister takibi ise gayet başarılı ve hızlıdır. Aynı şekilde sapma açısı da başarılı olarak denetlenmiştir.



Şekil 4.40 Senaryo 1; GAD ile Konum ve Yönelim Denetimleri



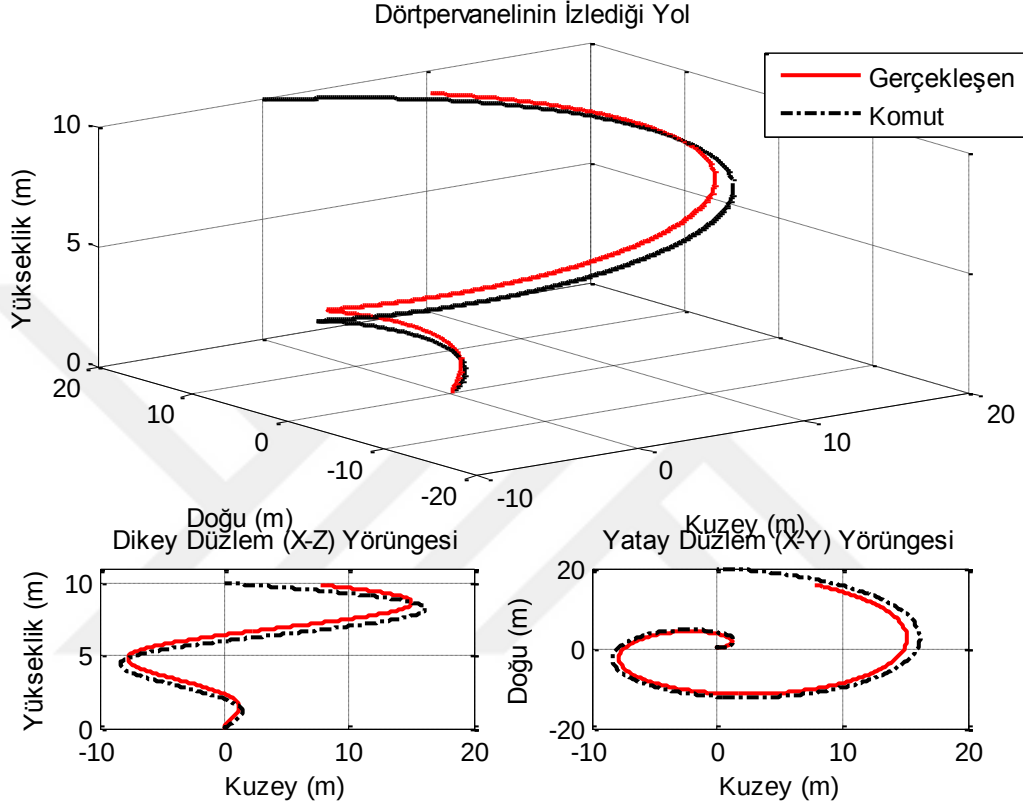
Şekil 4.41 Senaryo 1; GAD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.42 Senaryo 1; GAD ile Pervanelerin Açısal Hızları

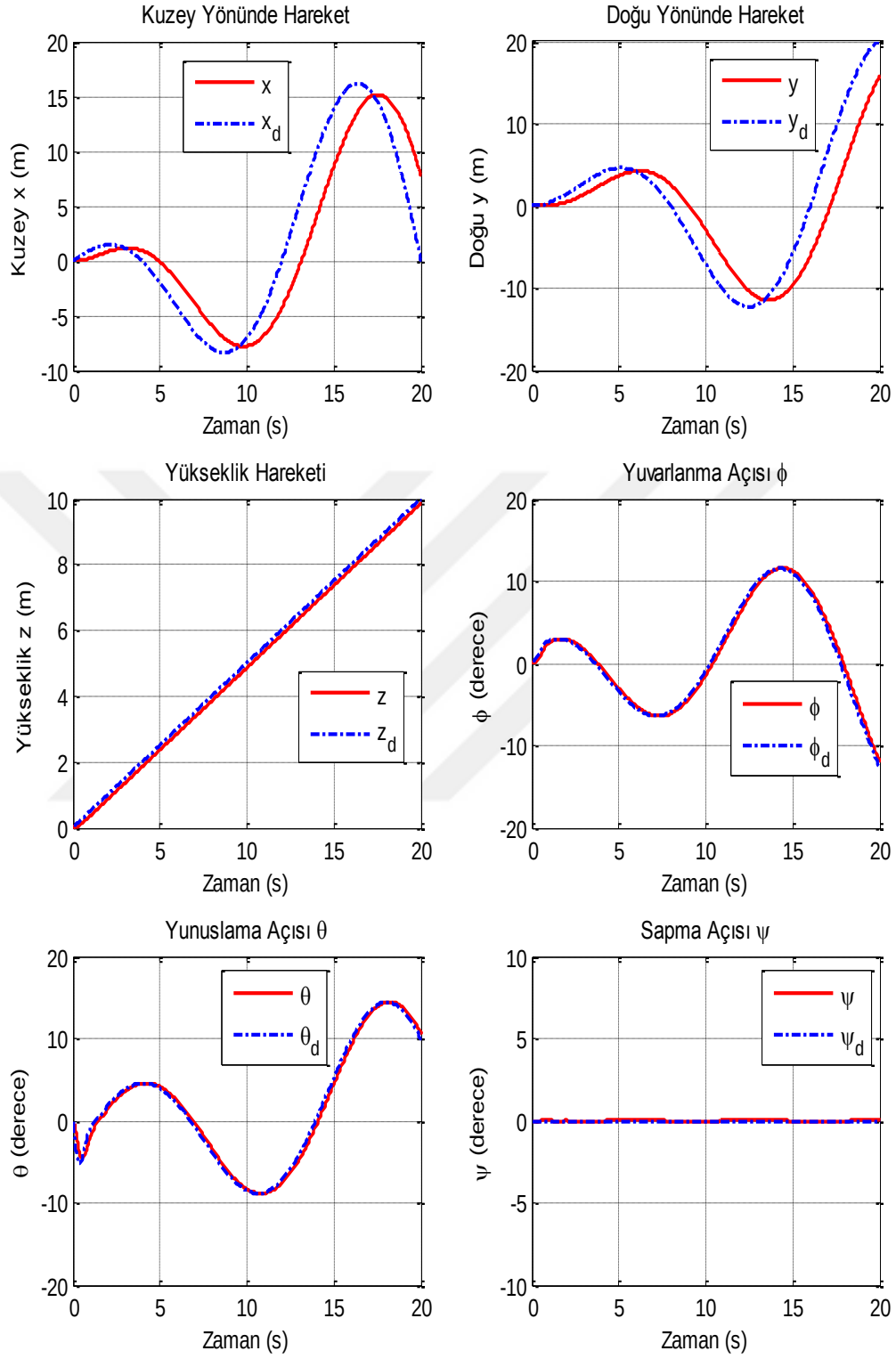
İkinci Senaryo Benzetimi

Geriadımlamalı denetim yönteminin ikinci senaryoda gösterdiği takip yeteneği Şekil 4.43'de görülebilir. Daha ayrıntılı konum ve yönelim çizimleri ise Şekil 4.44'de verilmiştir. Uçuş boyunca gerçekleşen kuvvet ve momentler ile pervane hızlarındaki değişim Şekil 4.45 ve Şekil 4.46'da verildiği gibidir.

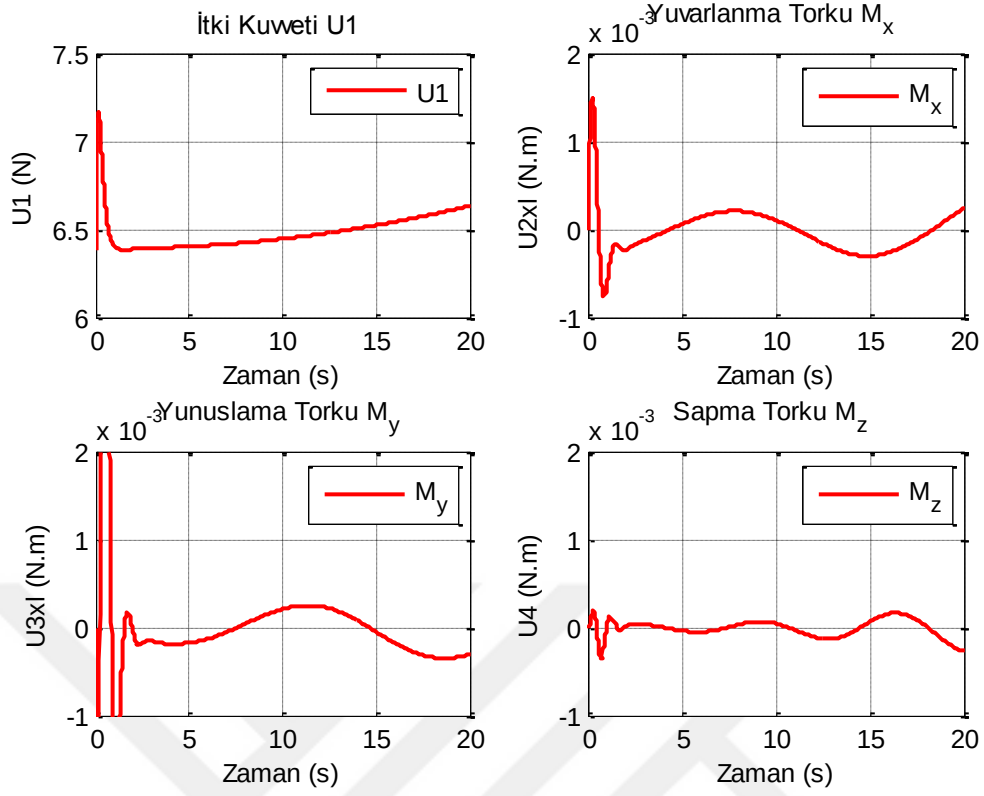


Şekil 4.43 Senaryo 2; GAD ile Dört pervanelinin İzlediği Yol

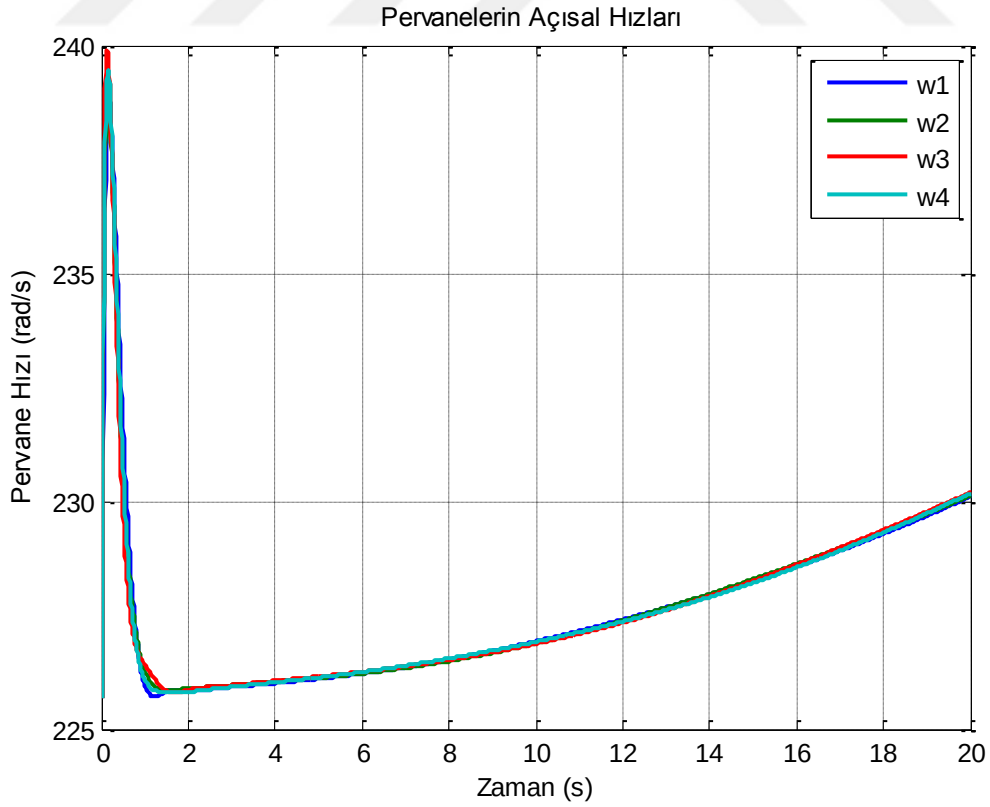
Dört pervanelinin istenilen yörüngeyi takip edebildiği görülmektedir. Yükselme hareketi birinci senaryodaki gibi hızlı ve neredeyse hatasızdır. Uçuşun başında 7.16 N'luk kuvvet ile yükselmeye başlanırken daha sonra artan pervane hızlarının karesiyle doğru orantıda artan itki kuvveti sebebiyle yükselmeye devam etmektedir. Kuzey ve doğuya ilerleme isteri sinüs biçimli zamanla artan bir yapıda olduğu ve hızlı değiştiği için diğer yöntemlerde olduğu gibi burada da daha fazla takip hatası göstermektedir. Kuzey ve doğu isterleri zamanla arttıkça yunuslama ve yuvarlanma isterleri de artmaktadır. Geriadımlamalı denetim ile yunuslama ve yuvarlanma açıları daha iyi takip edilebilmiştir. Sapma açısı ise istenildiği gibi sıfırda tutulabilmektedir.



Şekil 4.44 Senaryo 2; GAD ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.45 Senaryo 2; GAD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.46 Senaryo 2; GAD ile Pervanelerin Açısal Hızları

4.4. Kayan Kipli Denetim

Kayan kipli denetim (KKD) de geriadımlamalı denetim gibi Lyapunov tabanlı doğrusal olmayan denetim yöntemlerindendir. Denklem 3.61-66'da verilen denetim kurallarında yer alan kazanç değerleri tasarım kıstaslarına göre diğer denetleyici tasarımlarında olduğu gibi çok sayıda benzetimler sonucunda elde edilmiştir. Bulunan kazanç değerleri Çizelge 4.15'de verildiği gibidir. Denetim kurallarında yer alan *sign* işlevi doğrusal olmayan bir işlemdir ve *S* kayan yüzeyinin işaretini bulmada kullanılmıştır. Takip gerçekleşirken kayan yüzey sıfır çevresinde değişeceği için bu işlev nedeniyle denetim sinyallerinde çatırtı (chattering) görülmektedir. Bu nedenle *sign* işlevi yerine sıfıra yakın değerlerde daha doğrusal olan Denklem 4.11'de tanımlanan *sat* işlevi kullanılmıştır. Burada ϵ sıfıra yakınlığı belirlemek için kullanılan bir sabittir. Benzetimlerde ϵ sabiti 8 olarak belirlenmiştir.

$$sat\left(\frac{S}{\epsilon}\right) = \begin{cases} \frac{S}{\epsilon} & , \left|\frac{S}{\epsilon}\right| \leq 1 \\ sign\left(\frac{S}{\epsilon}\right) & , \left|\frac{S}{\epsilon}\right| > 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

Çizelge 4.15 KKD Konum ve Yönelim Denetleyicileri Kazançları

	Yükseklik (z)			Yuvarlanma (ϕ)		
Kazançlar	K_{z_1}	K_{z_2}	λ_z	K_{ϕ_1}	K_{ϕ_2}	λ_ϕ
	8	3.5	8	5	7	10
	Yunuslama (θ)			Sapma (ψ)		
Kazançlar	K_{θ_1}	K_{θ_2}	λ_θ	K_{ψ_1}	K_{ψ_2}	λ_ψ
	5	7	10	5	4	9
	Kuzey (x)			Doğu (y)		
Kazançlar	K_{x_1}	K_{x_2}	λ_x	K_{y_1}	K_{y_2}	λ_y
	1	1	1.4	1	1	1.4

Kayan kipli denetim yöntemi ile denetlenen dörtpervanelinin konum ve yönelimlerinin basamak tepkileri Şekil 4.47'de ve sonuçları ise Çizelge 4.16 ve Çizelge 4.17'da verilmiştir. Buna göre, dörtpervaneli yükselme hareketini yaklaşık 1 saniye içinde gerçekleştirmiştir. Hiç aşımın olmadığı gözlenmiş ve yaklaşık 487 rad/s en yüksek pervane hızı ile 29.8 N'luk itki kuvveti üretilmiştir. Yunuslama ve yuvarlanma yönelimleri yaklaşık 0.47 saniyede %90'nını tamamlamış, durgun hale

geçmesi ise yaklaşık 0.9 saniye sürmektedir. PD ve geriadımlamalı yöntemine göre biraz yavaş kalsa da hiç aşım görülmemiştir. Dörtpervaneli bu yeteneği için en yüksek 2.44 N.m tork üretmiştir. Sapma açısı da bir saniyede 1 radyanlık açı değerine ulaşmaktadır.

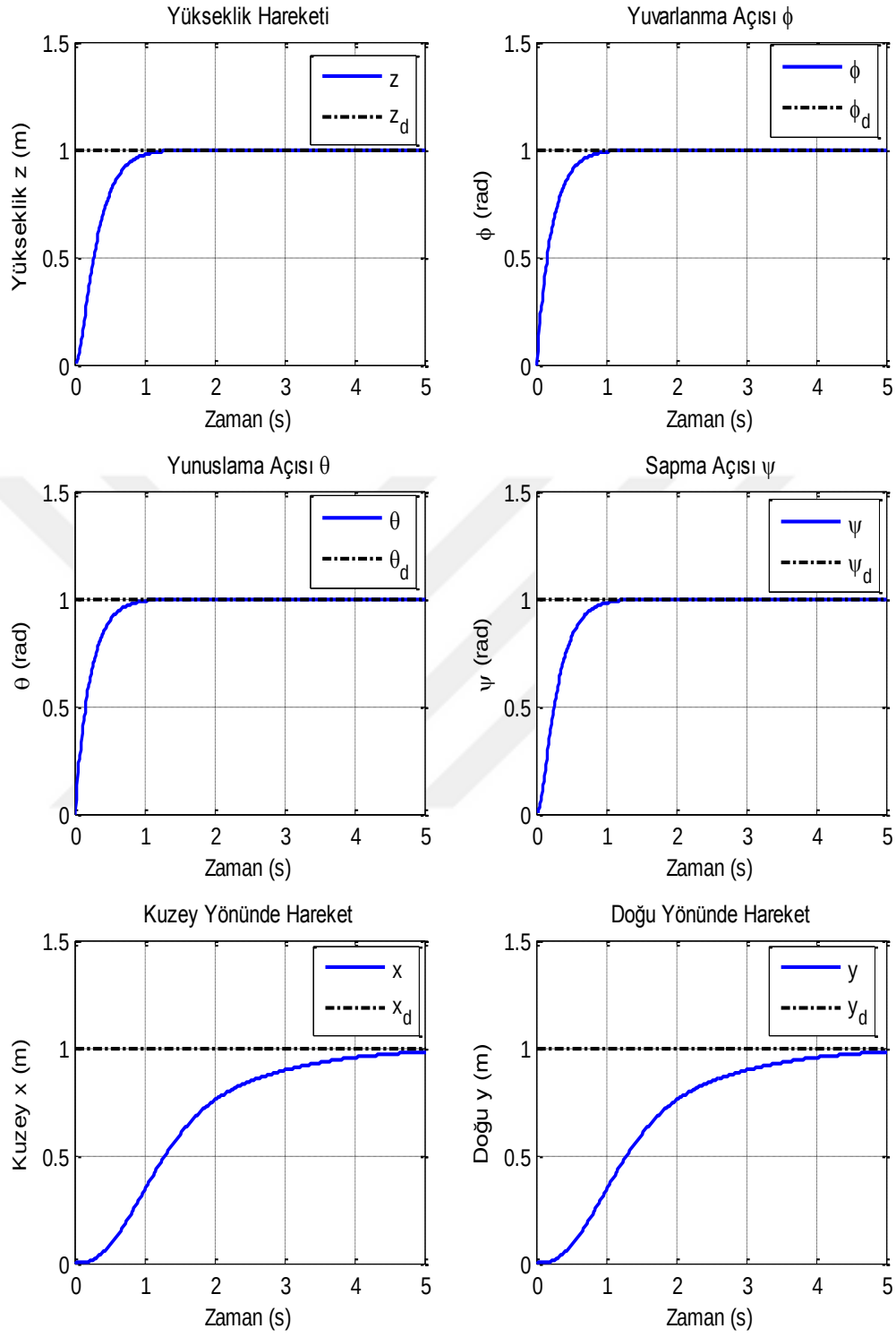
Kuzey ve doğuya 1 metre ilerleme diğer yöntemlerde olduğu gibi kayan kipli denetimde de yavaş kalmıştır. 1 metre isterinin % 90'nına yaklaşık 2.5 saniyede ulaşılırken durgun hale geçiş yaklaşık 5 saniye sürmektedir. Her iki denetimde de aşım görülmemiştir. Dörtpervaneli bu yeteneği için en yüksek 0.4 N.m yunuslama ve yuvarlanma torku üretmiştir.

Çizelge 4.16 KKD ile Basamak Tepkisi Sonuçları

	TR(s)	TS(s)	AŞMA(%)
Yükselme (z)	0,582957	1,058323	0
Yuvarlanma (ϕ)	0,475134	0,861393	0
Yunuslama (θ)	0,475134	0,861393	0
Sapma (ψ)	0,553091	1,008877	0
Kuzey (x)	2,511179	4,941047	0
Doğu (y)	2,511179	4,941047	0

Çizelge 4.17 KKD ile En Yüksek Pervane Hızları

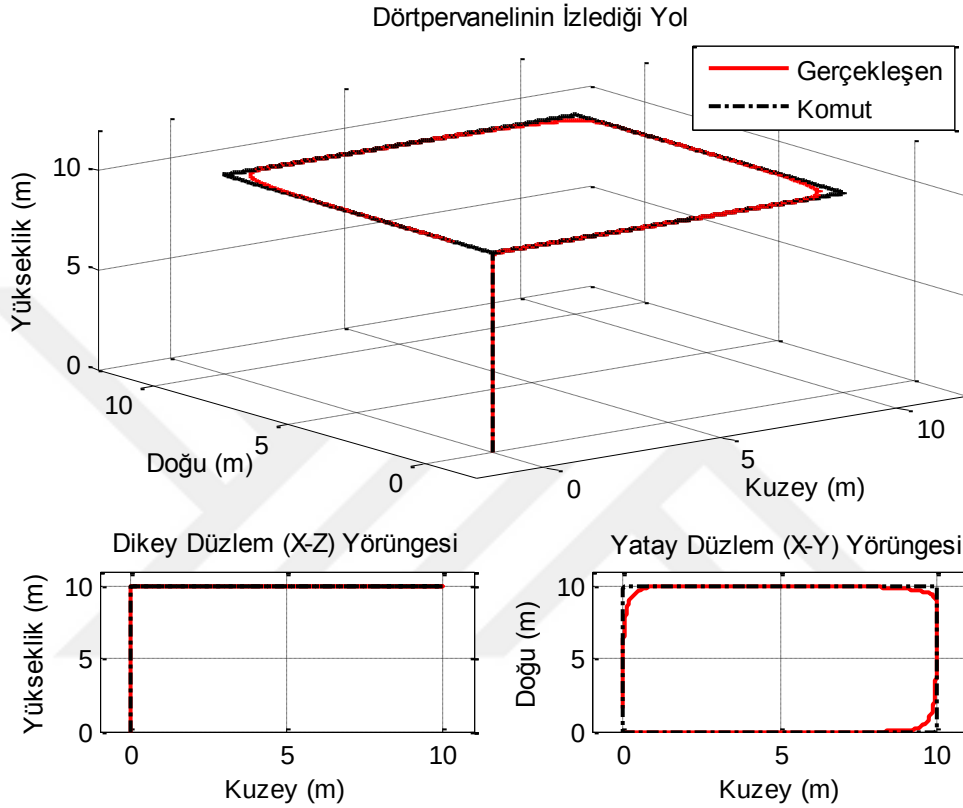
	Ω_1 (rad/s)	Ω_2 (rad/s)	Ω_3 (rad/s)	Ω_4 (rad/s)
Yükselme (z)	487,7161	487,7161	487,7161	487,7161
Yuvarlanma (ϕ)	307,0228	438,9933	307,0228	469,9247
Yunuslama (θ)	469,9247	307,0228	438,9933	307,0228
Sapma (ψ)	478,1585	356,0002	478,1585	356,0002
Kuzey (x)	272,7248	226,29	280,9738	226,29
Doğu (y)	226,29	272,7248	226,29	280,9738



Şekil 4.47 KKD ile Konum ve Yönelim Basamak Tepkileri

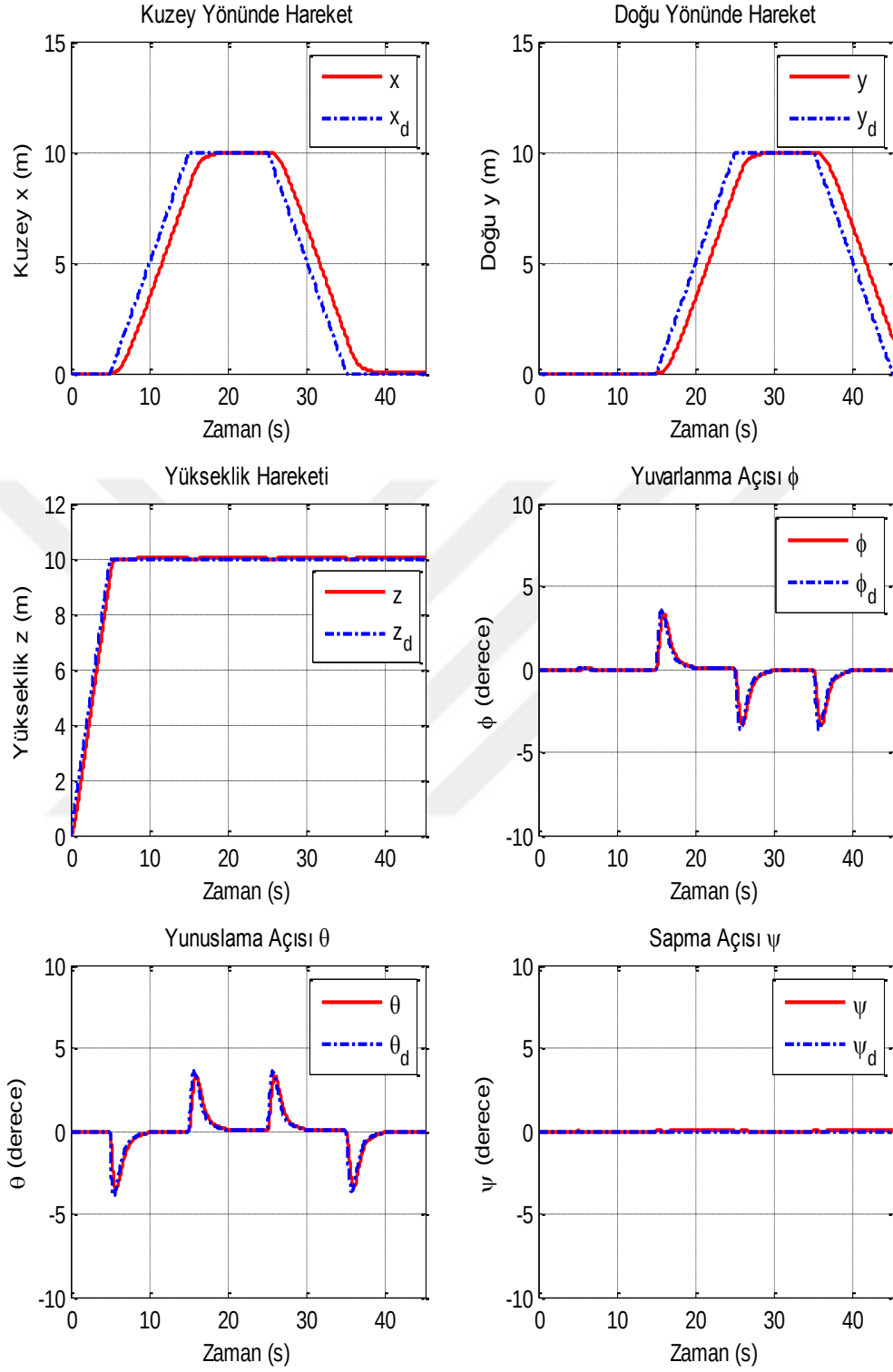
Birinci Senaryo Benzetimi

Kayan kipli denetim yönteminin birinci senaryoda gösterdiği takip yeteneği Şekil 4.48'de görülebilir. Konum ve yönelim çizimleri ise Şekil 4.49'de verilmiştir. Uçuş boyunca gerçekleşen kuvvet ve momentler ile pervane hızlarındaki değişim Şekil 4.50 ve Şekil 4.51'de verilmiştir.

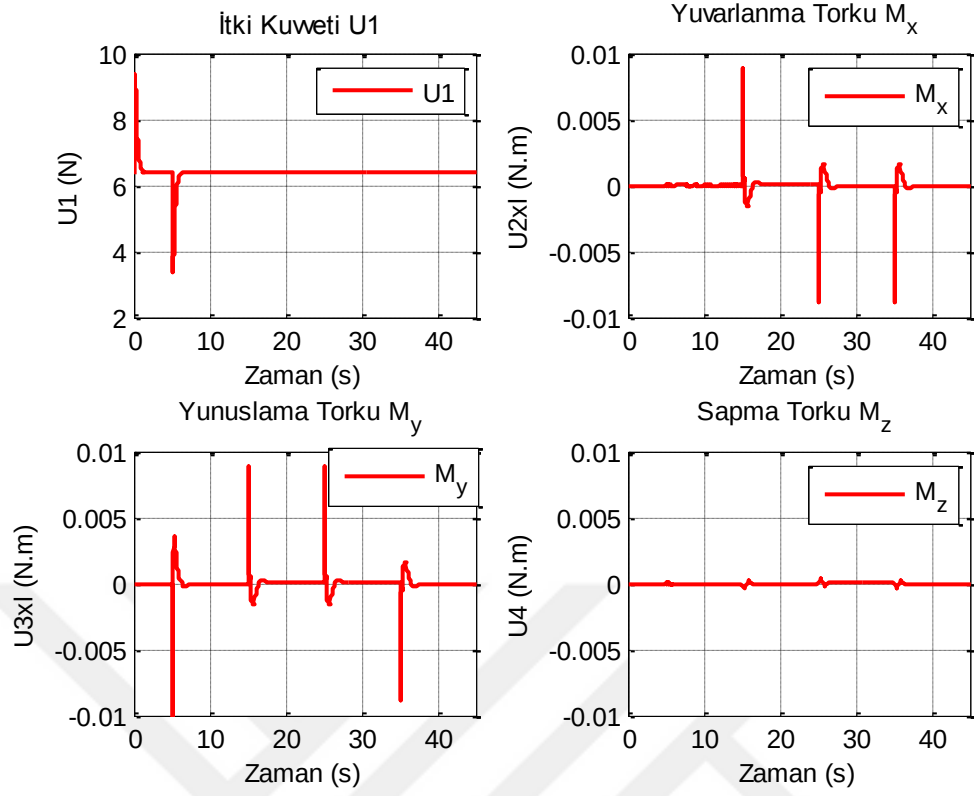


Şekil 4.48 Senaryo 1; KKD ile Dörtpervanelinin İzlediği Yol

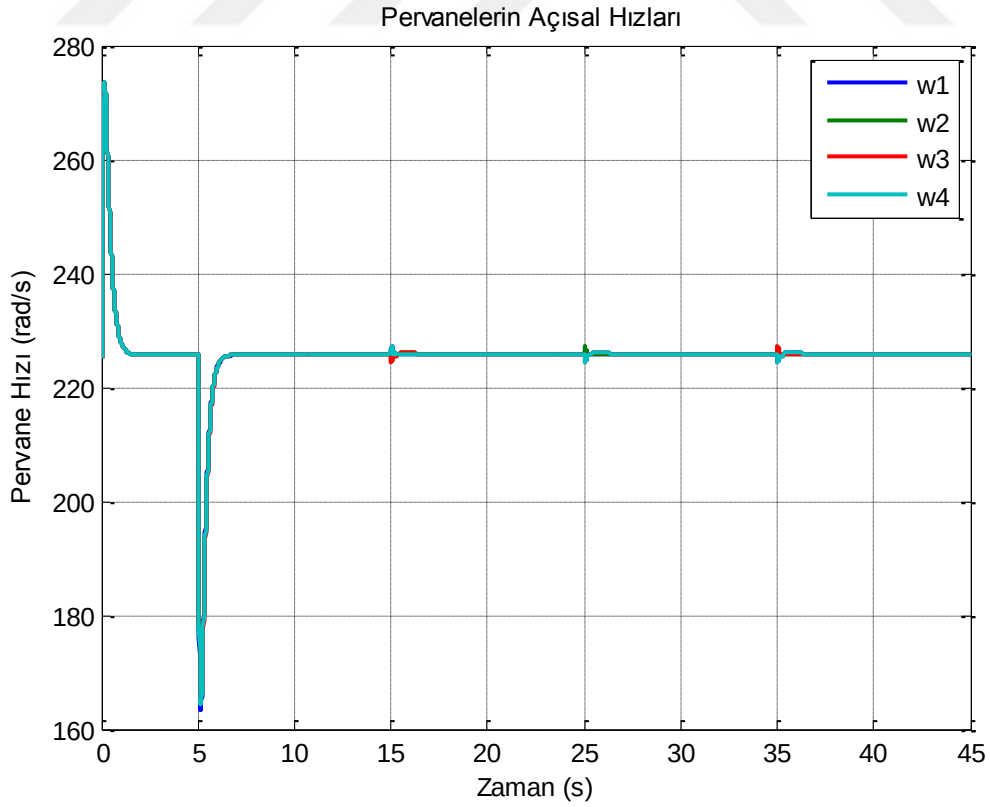
Dörtpervanelinin istenilen yörüngeyi takip edebildiği görülmektedir. Yükselme hareketi hızlı ve başarılıdır. En yüksek 275 rad/s pervane hızı ile 9.4 N itki kuvveti üretilmiştir. Kuzey ve doğu yönlerindeki hareket ise beklendiği gibi yavaş kalmıştır. Yaklaşık 3.6 derece yunuslama ve yuvarlanma açıları ile diğer yöntemlerden daha az açı isteri üreterek ilerlemeye çalışılmıştır. Bu düşük açı dörtpervanelinin konum isterlerini 1.5 saniye geriden takip etmesine neden olmuştur. Yunuslama ve yuvarlanma açı takibi ise son derece başarılı ve hızlıdır. Pervane hızları çok az değişerek yaklaşık 0.089 N.m dönme torkları üretilmiştir. Sapma açısı ise istenilen sıfır derecede tutulmuştur. *sat* işlevinin kullanılması nedeniyle sistem girişlerinde çatırtı görülmemektedir.



Şekil 4.49 Senaryo 1; KKD ile Konum ve Yönelim Denetimleri



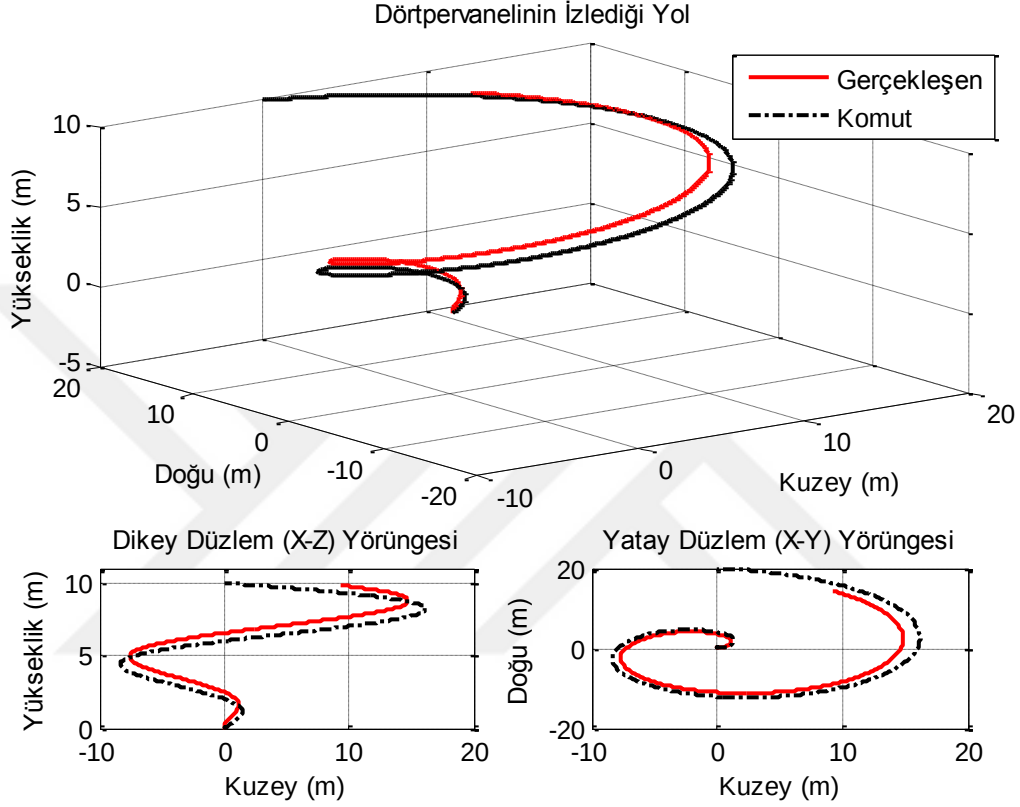
Şekil 4.50 Senaryo 1; KKD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.51 Senaryo 1; KKD ile Pervanelerin Açısal Hızları

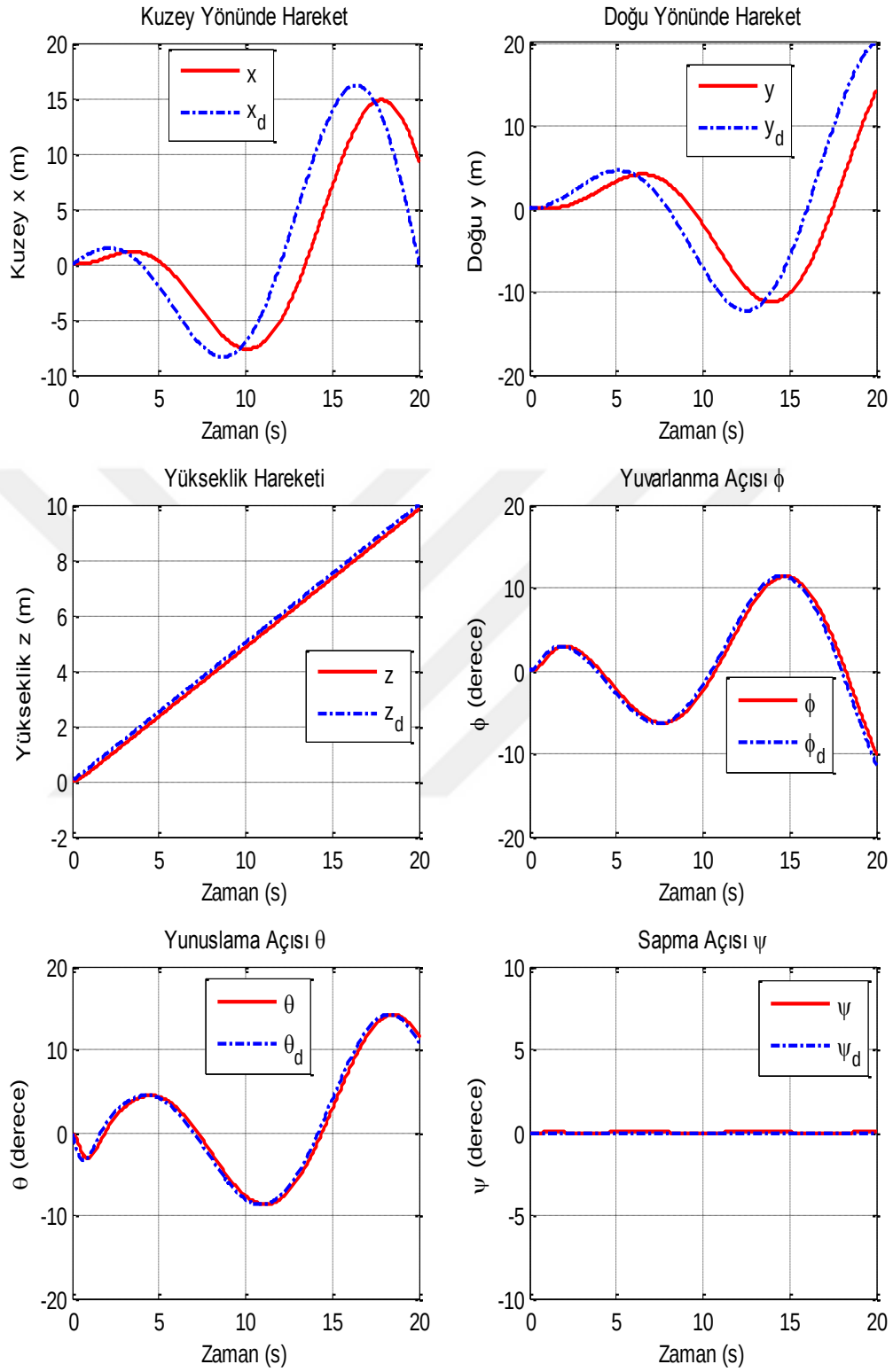
İkinci Senaryo Benzetimi

İkinci senaryoda gösterilen takip yeteneği Şekil 4.52'den görülebilir. Konum ve yönelim çizimleri ise Şekil 4.53'de verilmiştir. Uçuş boyunca gerçekleşen kuvvet ve momentler ile pervane hızlarındaki değişim Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'de gösterildiği gibidir.

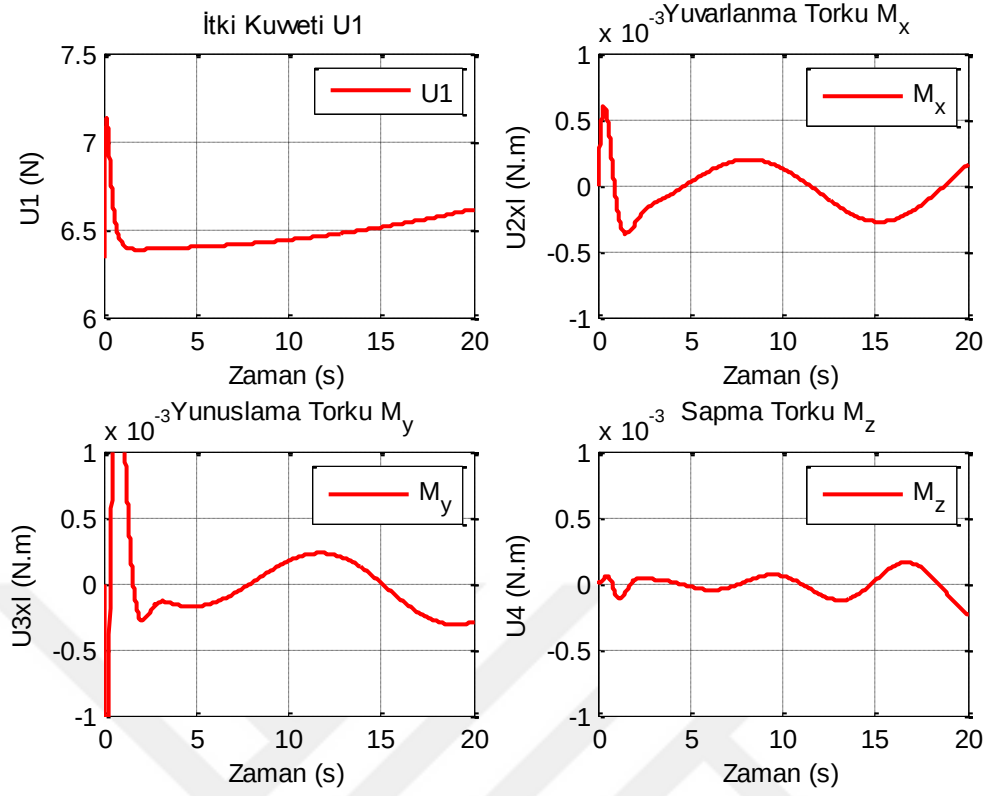


Şekil 4.52 Senaryo 2; KKD ile Dörtlü pervanelinin izlediği yol

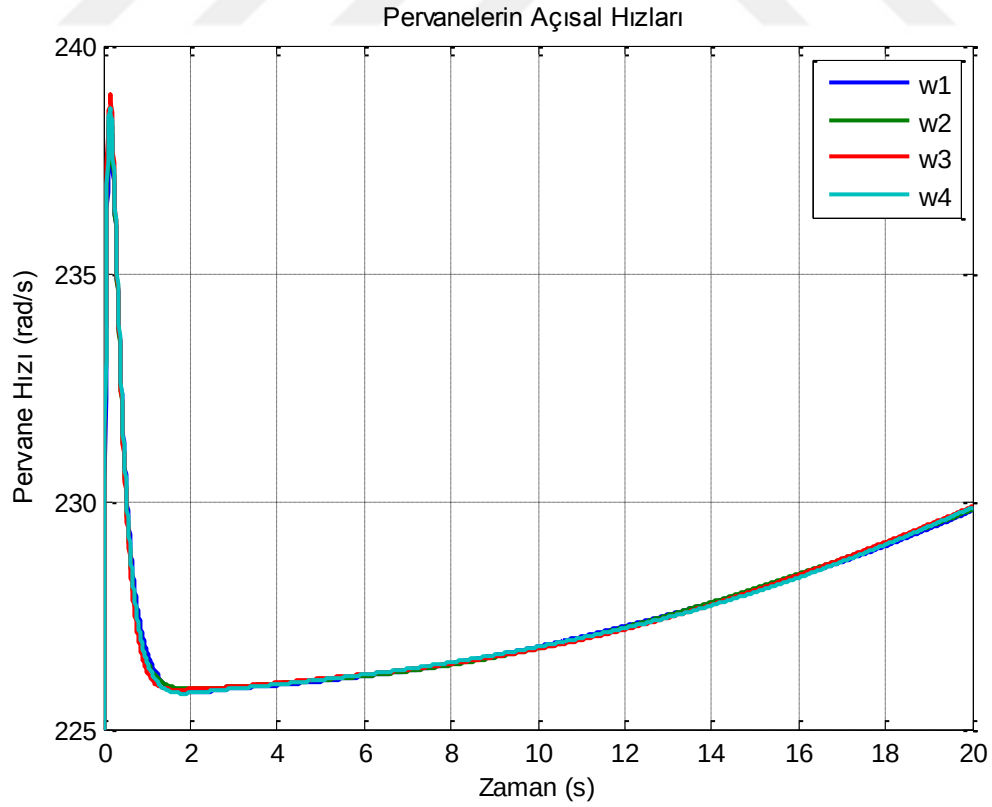
Dörtlü pervanelinin istenilen yörüngeyi takip edebildiği görülmektedir. Tıpkı birinci senaryoda olduğu gibi burada da yükselme hareketi gayet başarılıdır. En yüksek 239 rad/s pervane hızı ile 7.16 N itki üreterek ilk yükselmesini gerçekleştirmiştir. Daha sonra ise artan pervane hızı ile beraber yönelimler ve yükselme gerçekleşmektedir. Kuzey ve doğuya ilerleme yavaş ve gecikmeli olarak gerçekleşmiştir. Yaklaşık 1.7 saniye geriden gerçekleşen takip yine de kararlı bir biçimde devam etmektedir. Yunuslama ve yuvarlanma açıları ise açı isterlerini yakından takip etmektedir. Giderek artan pervane hızları ile daha az torklar üretilerek daha yüksek açılar gerçekleştirilmiştir. Sapma açısı ise sıfırda tutulmuştur. Girişlerde çatırtı görülmemektedir.



Şekil 4.53 Senaryo 2; KKD ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.54 Senaryo 2; KKD ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler



Şekil 4.55 Senaryo 2; KKD ile Pervanelerin Açısal Hızları

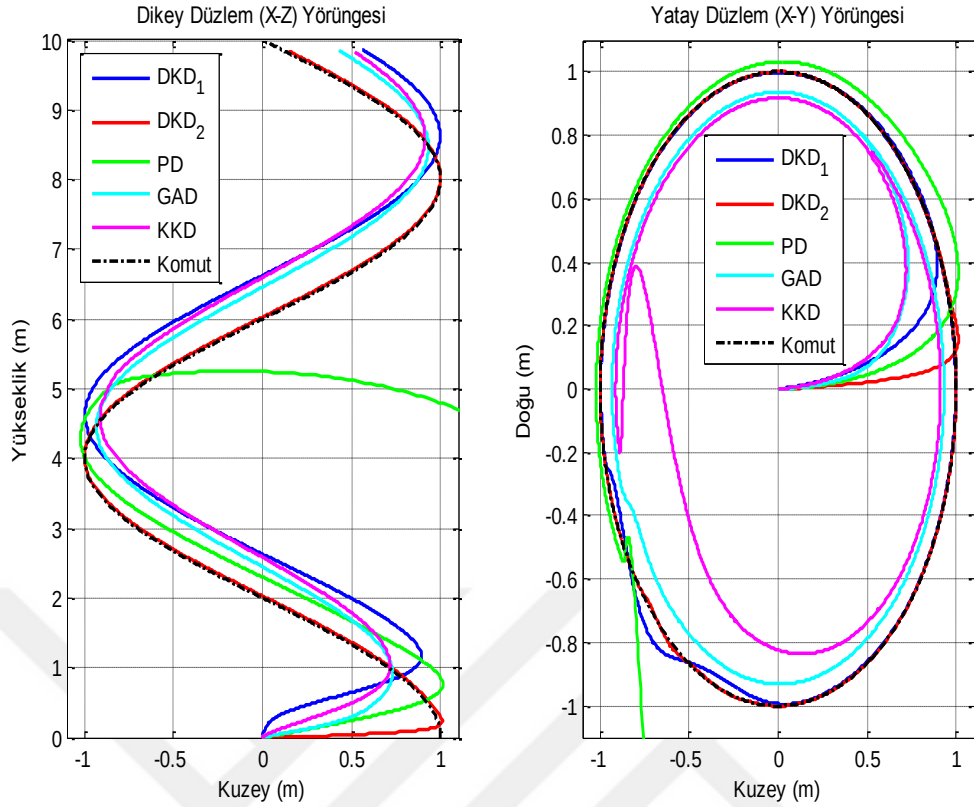
4.5. Gürbüzlük Benzetimleri

Denetim sistemleri tasarımında kullanılan matematiksel modeller, gerçek modelleri yaklaşık olarak ifade ederler. Gerçek ve matematiksel model arasındaki farklılıklar fiziksel sistemlerde benzetimlerden fark edilmeseler de kararsızlıklara neden olabilmektedir. Denetim sisteminin gürbüzlük kavramı da burada ortaya çıkmaktadır. Belirsizlik olarak ifade edebileceğimiz her türlü bozucu etki, gürültü ya da bahsedilen modelleme farklılıklarına karşı sistem kararlılığını bozmayan denetleyiciler gürbüz olarak ifade edilir. Bu nedenle gürbüzlük denetim sisteminin tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Bu bölümde tasarımılanan denetim yöntemlerinin, bozucu etki ve gürültü altındaki başarımları incelenmiştir.

Bölüm 4.1'de dörtperanelinin PID tabanlı denetleyiciler ile yapılan benzetim sonuçları verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere her iki yöntem ile dörtperaneli denetlenebildiği halde PD denetim PID denetime göre biraz daha hızlı ve aşımı az olmaktadır. Denetim çabası olarak PID biraz daha iyi olsa da eyleyici sınırları ikisi içinde aşılmamıştır. Ayrıca senaryo benzetimlerinden de görüleceği üzere PID ile denetimde PD denetime göre çok fazla aşım görülmektedir. Bu nedenle diğer yöntemler ile gürbüzlük karşılaştırmasında PD denetleyici kullanılmıştır. Altsistemler üzerinden tasarımılanan DKD1 ve altsistemlere ayrıştırılmadan tasarımılanan DKD2 de gürbüzlük karşılaştırılmasında tercih edilmiştir. Geriadımlamalı denetim (GAD) ve kayan kipli denetim (KKD) de gürbüzlük benzetimleri için karşılaştırılacak diğer denetleyicilerdir.

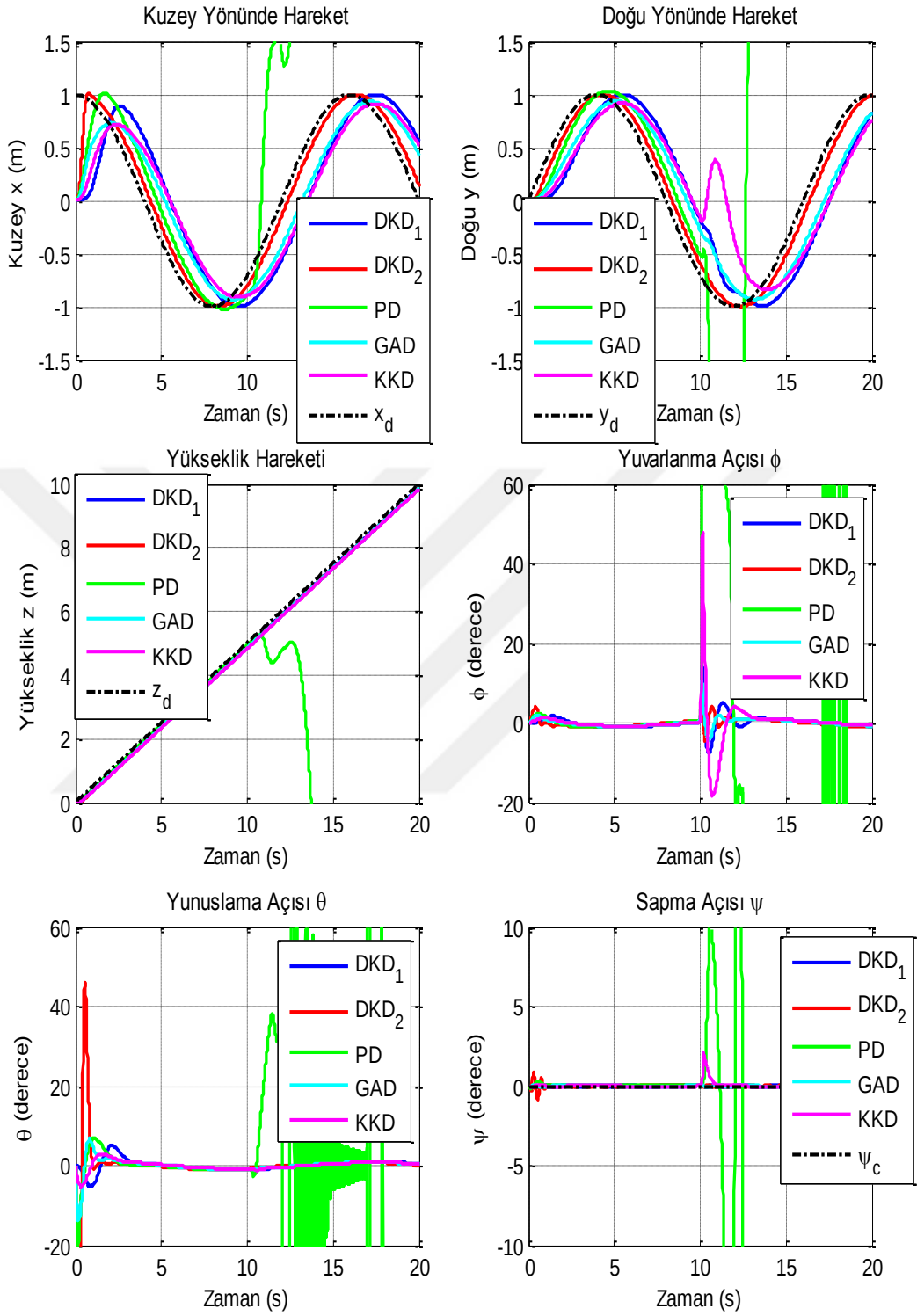
4.5.1. Bozucu Etkiyi Geri Çevirme Benzetimi

Özellikle hava araçlarında, sistemi doğrudan etkileyen dışardan hiç beklenmedik anda gelen bir etki kararsız bir duruma neden olabilir. Örnek olarak, rüzgar fırtınası bu tipte görülen en etkili bozucu etmendir. Bu bölümde de görev halinde iken 10. saniyede gelen ani bir etkiye maruz kalan dörtperanelinin kendini toparlayabilme yeteneği incelenmiştir. Bu senaryoda dörtperaneli X-Y düzleminde 1 metre sabit yarıçaplı daire çizerken sabit hızla yükselmektedir. Bozucu etki ise dört numaralı pervanenin olduğu kola 0.1 saniye boyunca yokuş biçiminde uygulanan en fazla 15 N'luk bir kuvvet olarak belirlenmiştir.

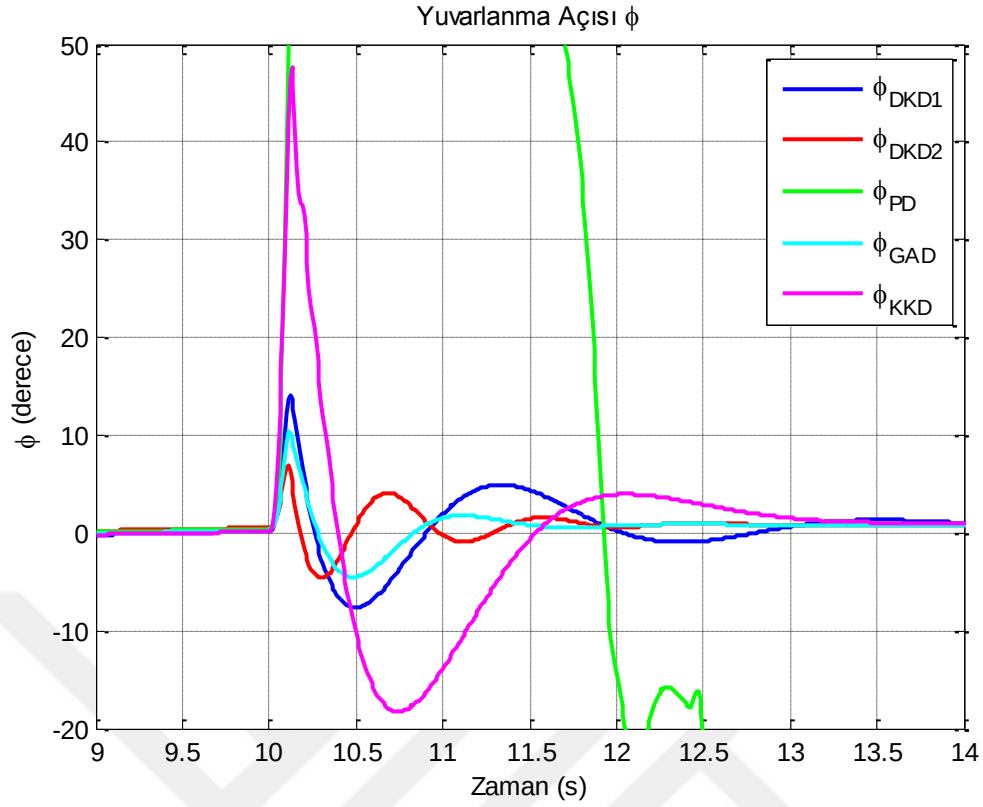


Şekil 4.56 Bozucu Etki Uygulandığında Dört pervanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.56'da verilen dört pervanelinin izlediği yörüngeye ve Şekil 4.57'de verilen takip biçimlerine göre, PD denetleyicisi 15 N büyüklüğünde bir etki uygulandığında kararsızlığa düşmekte ve yörüngeden çıkmaktadır. Benzetimlerde PD denetleyicisinin en fazla 11 N'luk kuvvete karşı dört pervaneliyi toparlayabildiği görülmüştür. Diğer dört yöntem ile yükselme ve kuzeye ilerleme uygulanan eğme kuvvetinden etkilenmemiştir. DKD1'nin takibi iyi olmakla beraber, etki geldiğinde biraz yörüngeden çıksa da çok sapmadan tekrar yörünge takibine devam etmiştir. En başarılı sonuç tek model ile tasarımılanan DKD2'de görülmektedir. Etkiye rağmen neredeyse hiç sapma olmamıştır. GAD ve KKD yöntemleri önceki benzetimlerde de takip hatası gösteriyordu. Burada da takip hatası görülmektedir. Bununla beraber, Geriadımlamalı denetim etkiye karşı çok iyi bir tepki vererek çok çok az bir sapmayla tekrar yörüngesinde kalmayı başarmıştır. Kayan kipli denetim ise en kötü sonuçları vermiş ve etkinin geldiği andan sonra 0.6 m uzaklaşarak ve çok fazla sapma göstererek yörünge takibine tekrar başlamıştır.



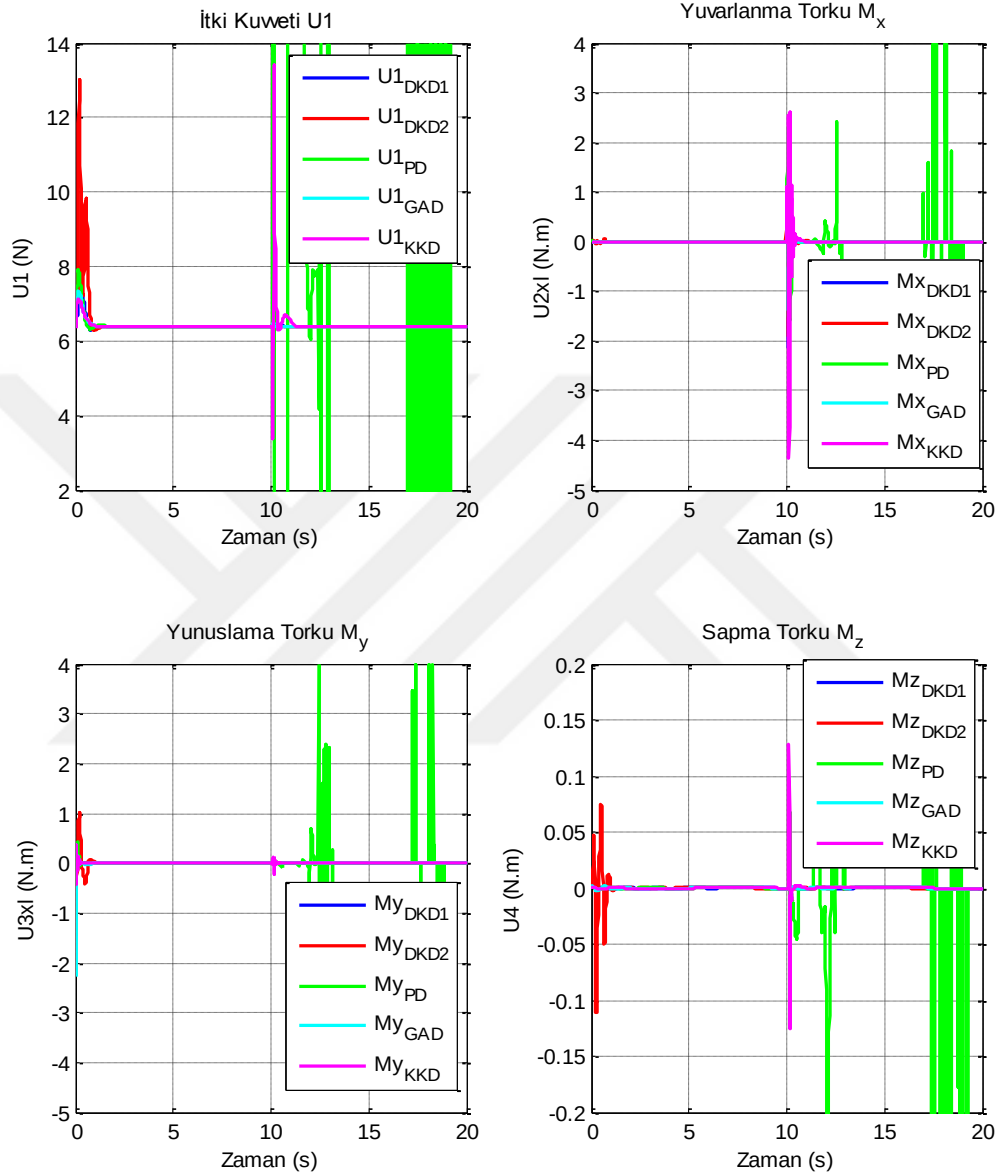
Şekil 4.57 Bozucu Etki Uygulandığında Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.58 Bozucu Etki Uygulandığında Yuvarlanma Açısı Değişimi

Açılar incelendiğinde ise böyle bir etkinin doğal olarak en çok yuvarlanma açısını etkilediği görülmektedir. Şekil 4.58 bozucu etkinin başladığı andan sonra değişimini göstermektedir. Şekil 4.59 ise uçuş boyunca gerçekleşen kuvvet ve momentleri göstermektedir. DKD1 ile denetimde dört pervaneli etki bittiğinde yaklaşık 14 derece yuvarlanma açısı gerçekleştirmiştir. Daha sonra toparlanması yaklaşık 3 saniye sürmüş ve takibine devam etmiştir. Yunuslama ve sapma açıları bu denetim yöntemi ile bozucu etkiden etkilenmemiştir. Gerçekleşen yunuslama ve sapma torku değişimlerinden de bu durum görülmektedir. Denetleyici tarafından etkiyi gidermek için yaklaşık -2.12 N.m yuvarlanma torku yaptırılmıştır. Bu pervane artışı ile yükselme kuvveti 6.57 N'a çıkmaktadır. Tek model ile tasarılan DKD2 ise etkiye sadece 6.9 derece yuvarlanma yaptırmıştır. Yaklaşık iki saniyede toparlayarak hareketine devam etmiştir. Bu nedenle yörüngeden çok fazla sapma görülmemiştir. Aynı şekilde yunuslama ve sapma açıları ve tork değerleri değişmemiş, tepkiyi düzeltmek için gerçekleşen yuvarlanma torku ise -1.92 N.m'dir. Geriadım lamalı denetimde ise dört pervaneli etki nedeniyle 10.25 derece

yuvarlanma açısı gerçekleştirmiştir. Dört pervaneli 1.5 saniye gibi kısa bir sürede toparlanmış ve takibe devam etmiştir. Yunuslama ve sapma etkilenmemiştir. Tepkiye -1.4 N.m yuvarlanma torku ile en az tepki verilmiştir.



Şekil 4.59 Bozucu Etki Uygulandığında Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler

Kayan kipli denetimde ise dört pervaneli 47.65 derece yuvarlanma açısı gerçekleştirerek bozucu etkiyi geri çevirmede diğer denetim yöntemlerine göre çok geride kalmıştır. Yunuslama ve sapma açıları da bozucudan etkilenmiş yaklaşık 2

derece oynamalar görülmüştür. Toparlanma süresi yaklaşık 3 saniyedir. En çok salınım bu yöntem ile görülmüştür. Etkiye karşı pervane hız limitlerini zorlayarak - 4.33 N.m gibi yüksek bir tepki verilmeye çalışılmıştır. Yunuslama ve sapma torkunda da etkinin neden olduğu değişimler ile yunuslama ve sapma açıları yaklaşık 2 derece normal hallerinden sapmıştır. Artan pervane hızları nedeniyle yükselme kuvveti de 13.43 gibi yüksek bir değere çıkmıştır. Dörtpervanelinin en çok denetim çabası gösterdiği durum bu yöntem ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, etkiden en az tek modelle tasarımılanan DKD2 etkilenirken daha sonra GAD ve DKD1 sırayla gelmektedir. Kararlı uçuşu bozmayan en kötü tepki ise KKD yönteminde görülmüştür. En az denetim çabası ise GAD ile gerçekleştirilmiştir.

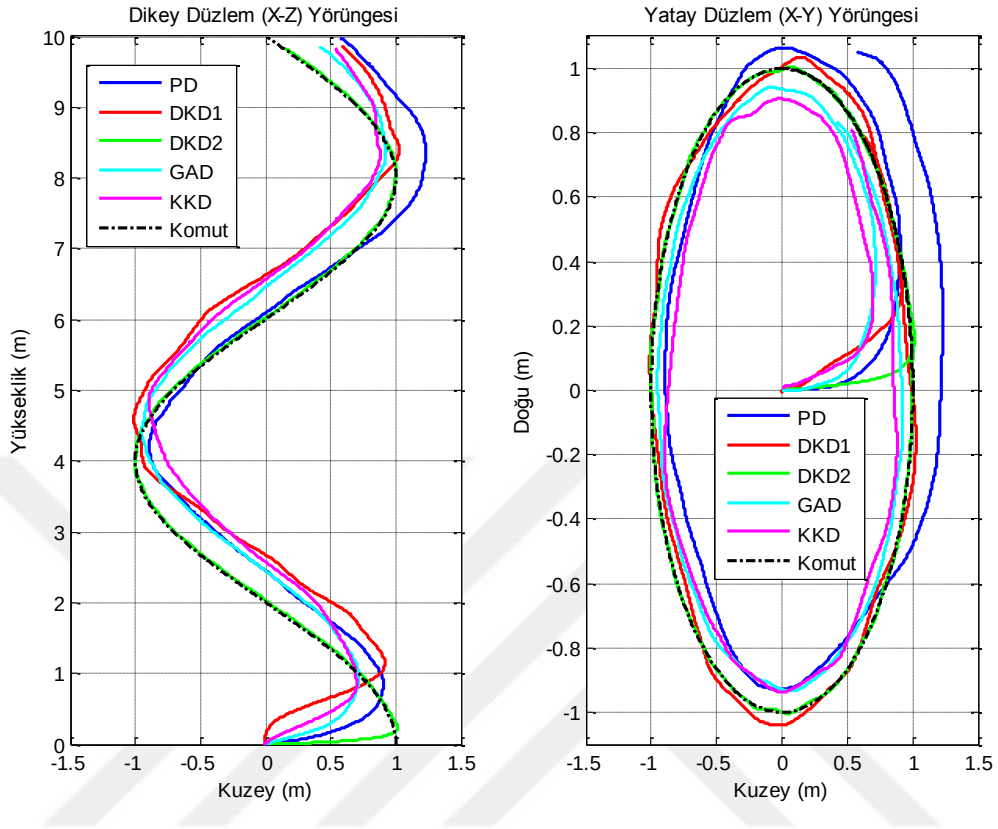
4.5.2. Gürültülü Algılayıcı Benzetimi

Gerçek hayatta dörtpervaneli sistemlerde, burada bahsedilen durum değişkenleri Ataletsel Ölçüm Birimi adı verilen algılayıcılar tarafından ölçülürler. Ataletsel Ölçüm Birimi, üzerinde bulunduğu yapının üç eksenli doğrusal ivmesini ve yine üç eksenli dönümleri ölçer ve denetim için gereken çıktıları üretir. Bu algılayıcı tarafından elde edilen veriler tamamen doğru veriler değildir. Her algılayıcı gibi hatalı ölçüm yaparlar. Gürültülü olarak adlandıracağımız bu ölçümler ile elde edilen durum değişkenleri dörtpervaneliyi kararsızlığa doğru götürebilir. Bu bölümde bozucu etkinin denendiği aynı senaryo, gürültülü ölçümler ile beslenen denetleyiciler tarafından gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Buna göre dörtpervanelinin Ataletsel Ölçüm Birimi, dönü ölçümlerini; ortalaması 0 derece/s, değişintisi 0.1 (derece/s)^2 ; ivme ölçümlerini ise ortalaması 0 m/s^2 , değişintisi $0.5 \text{ (m/s}^2\text{)}^2$ Gaussian dağılımlı bir gürültü ile beraber vermektedir.

PD denetim, yapısında bir türev alıcıyı içerdiği için küçük ama hızlı değişen hata sinyallerine karşılık çok yüksek denetim sinyali üretir. Bu nedenle PD denetim, uygulamada türev çıkışını filtreleyen bir filtre ile beraber kullanılır. Bu bölümde PD ile denetlenen dörtpervanelinin gürültülü ortamdaki başarımı incelemek amacıyla türev alıcıdan sonra bir alçak geçiren filtre eklenmiştir.

PD denetim ile gerçekleştirilen benzetimde, Çizelge 4.2'de verilen K_p ve K_D kazanç değerleri ile birlikte alçak geçiren filtrenin band genişliği 15.91 radyan (100 Hz) olarak alınmıştır.

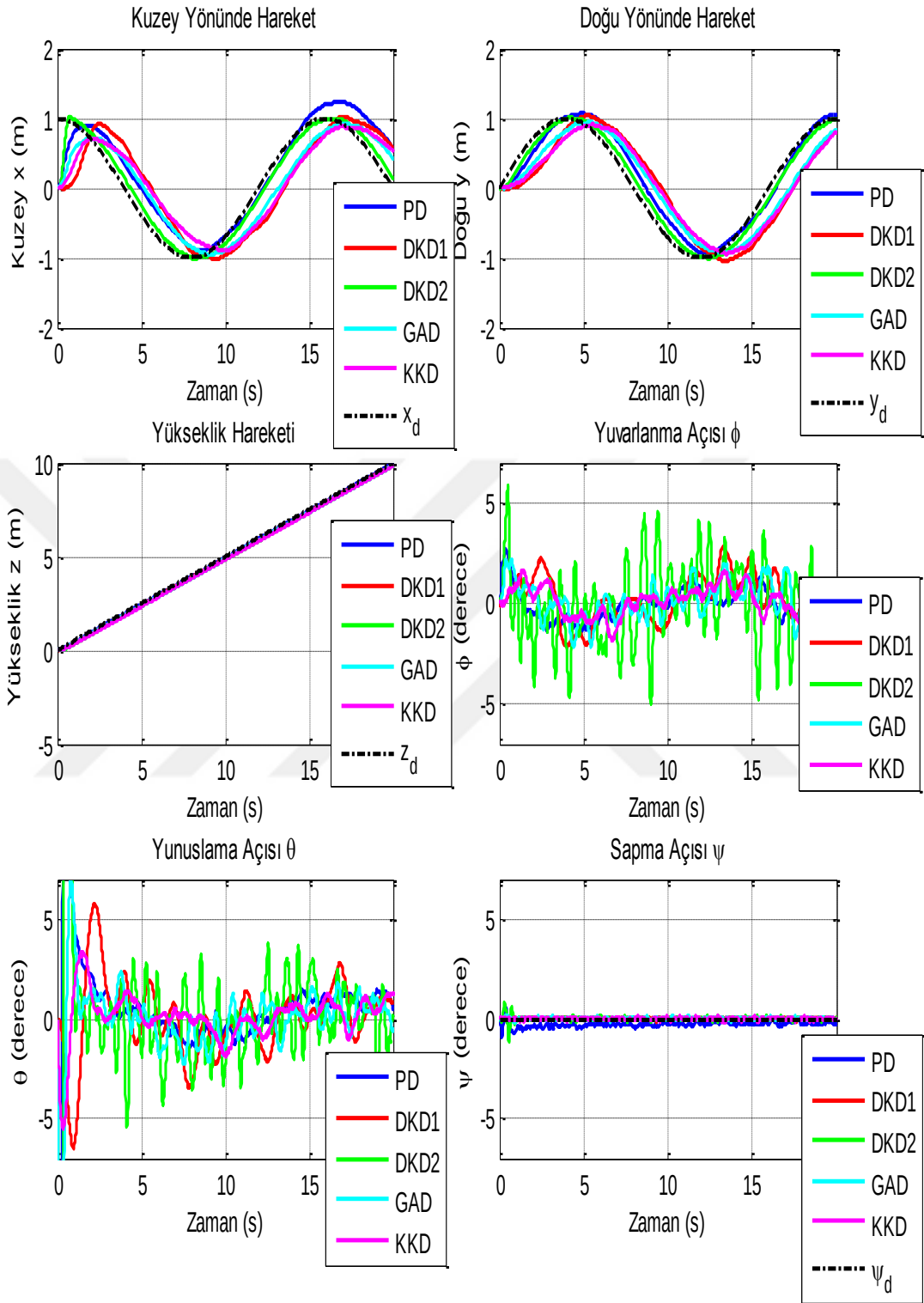
Şekil 4.60 gürültülü ölçümler ile gerçekleştirilen benzetim sonucunda dörtpervanelinin izlediği yörüngeyi göstermektedir.



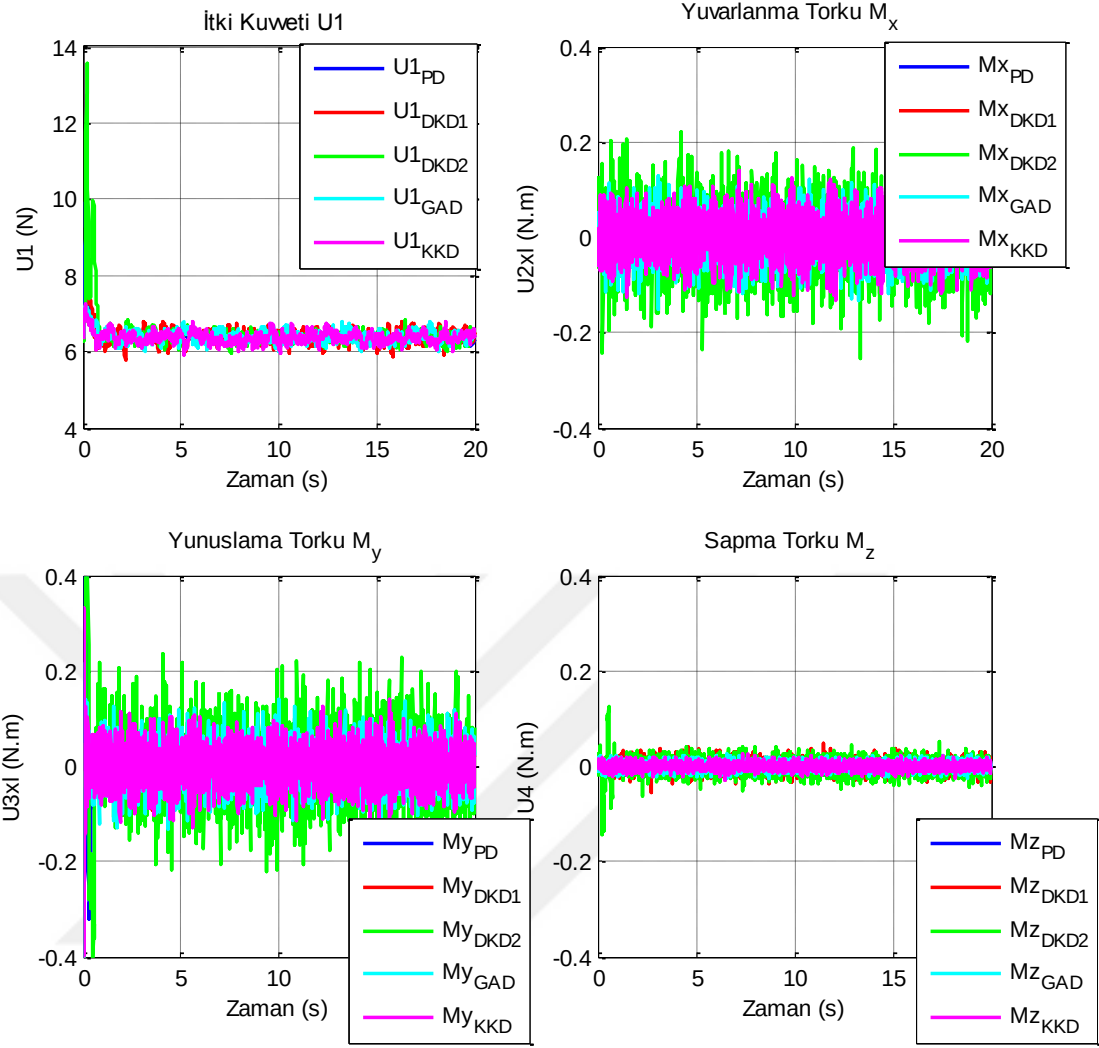
Şekil 4.60 Gürültülü Ölçüm ile Dörtpervanelinin İzlediği Yol

Şekil 4.61'den ise gürültülü verilerle gerçekleşen takip görülebilir. Görüldüğü gibi, hatalı ölçümler konum ve yönelim denetimini zorlaştırmaktadır. Buna göre dörtpervanelinin konum değişimleri incelendiğinde gürültülü ölçümlerde bile kararsızlığa düşülmemiş ve yörünge takibi gerçekleştirilmiştir. Her beş yöntem de yükselme hareketini iyi bir takiple sağlamış ve sapma değerini sıfıra yakın tutmayı başarmıştır. Yörüngeden en çok sapma beklediği gibi içerisinde bir türev alıcıyı barındıran PD ile denetlenen dörtpervaneli tarafından yapılmıştır. Ancak, Şekil 4.61'den görüleceği gibi konum isterlerini takip etmeye devam etmektedir. Takip hatası çok az olan, tek model ile tasarımlanan DKD2 ise gürültüden en az etkilenen yöntem olarak görülmektedir. DKD1 için ise ikinci başarılı yöntem denebilir. Yörüngeden küçük sapmalar olsa da yol üstünde kalmayı başarmıştır. Altsistemlere ayrıştırılmadan tasarımlanan DKD2, yunuslama ve yuvarlanma

açıları ile ilgilenmediğinden altsistemler üzerinden tasarımılanan DKD1 yöntemine göre açısal gürültüden daha az etkilenmektedir. Bu durum onun diğer yaklaşıma göre daha başarılı olmasına neden olmuş olabilir. GAD ve KKD yöntemleri zaten yörüngeyi belli bir takip hatasıyla izlemekteydi. Yörüngeden sapma değerlerine bakılırsa hatadan çok fazla etkilendikleri söylenemez. Açısal değişimler incelendiğinde ise PD yöntemi ile denetlenen dörtpervanelide açıların çok fazla değişime uğradığı görülmektedir. Bunun nedeni denetim sinyalinin filtreleyen bir filtreye sahip olmasıdır. Ancak konum takibi incelendiğinde ise isterden çokça saptığı görülmektedir. İki farklı DKD yaklaşımı ile denetimde ise gerçekleşen açıların çok fazla değişmekte, açılarda en fazla oynamalar özellikle DKD2 yönteminde görülmektedir. Ancak, bu yöntemde denetim kuralları açıların üzerinden belirlenmediği için bu durum herhangi bir olumsuzluğa neden olmamıştır. KKD ve GAD yöntemlerinde de açıların çok fazla etkilenmemekle beraber KKD bu konuda biraz daha başarılıdır. Şekil 4.62’de gerçekleşen kuvvet ve moment biçimleri incelendiğinde eyleyici kısmında gürültünün zorlayıcı etkileri bariz biçimde görülmektedir. Gürültünün dörtpervaneliyi en az yorduğu yani en az denetim çabası gösterilen durumun filtre eklenmiş PD ile denetlenen dörtpervaneli tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. PD yapısına eklenen filtre türev alıcıdan çıkan yüksek ve hızlı sinyalleri filtreleyerek daha sakin denetim sinyalleri üretmiştir. Ancak, filtre ile gürültünün etkileri azaltılmış olsa bile en kötü takip PD denetiminde gerçekleşmiştir. Tersine, dörtpervanelinin en çok denetim çabası harcadığı durum ise bütün başarısına rağmen tek model ile tasarımılanan DKD2 ile denetlendiği durumdur. Denetim çabasına göre sıralama yaparsak başarıda ikinci sırayı dörtpervaneliyi altsistemlere ayrıştırarak ayrı ayrı tasarımılanan DKD1 ve onu takiben sırayla KKD ve GAD yöntemleri almaktadır. Sonuç olarak beş denetim yöntemi de eyleyicinin sınırlarını zorlamayacak denetim komutları üretmiş, dörtpervanelinin bu gürültü değerleri ile uçuş boyunca kararlı kalmasını sağlamışlardır.



Şekil 4.61 Gürültülü Ölçüm ile Konum ve Yönelim Denetimleri



Şekil 4.62 Gürültülü Ölçüm ile Gerçekleşen Kuvvet ve Momentler

4.6. Sonuçların İrdelenmesi

Benzetimlerden dörtpervanelinin denetimi için kullanılan yöntemlerden sadece PI denetleyicisinin başarısız olduğu diğer yöntemlerin ise başarılı bir denetim sağladığı görülmektedir. Basamak tepkileri incelendiğinde, bütün denetleyiciler için benzer sonuçlar görülsede yükselme hareketi için PD denetleyicisinin biraz daha hızlı olduğu, bunu sırasıyla DKD1, DKD2, GAD ve KKD yöntemlerinin izlediği görülmektedir. PID denetleyici ise ilk tepkisi çok hızlı olmasına rağmen durgun hale geçişte çok yavaş kalmaktadır. Yunuslama ve yuvarlanma açı denetiminde ise yine en hızlı tepki PD denetleyicisi ile elde edilmiştir. PD denetleyicisini sırasıyla GAD, DKD1 ve KKD yöntemleri takip etmektedir. Sapma açısı için ise en

hızlı tepki sıralaması ise DKD2, DKD1, PD, GAD ve KKD yöntemleri olarak gerçekleşmiştir. PID denetleyicisi aynı şekilde oturma süresi olarak diğerlerinden geride kalmıştır. Kuzey ve doğuya ilerleme diğer durumlara göre çok yavaş gerçekleşmektedir. Ardışık yapıda denetlenen bu durum için en hızlı basamak tepkisi geriadımlamalı denetim ile verilmiştir. Onu DKD1, KKD, PD ve PID denetleyicileri takip etmiştir. Ancak, DKD2 açıcı isteri üretmeden doğrudan konum hatalarını kullanarak denetim sinyali ürettiği için diğer bütün altsistemli tasarımlardan çok daha hızlı kuzey ve doğu yönüne ilerleme sağlayabilmektedir. Başarım açısından diğer bir ölçüt aşma değerleridir. Kayan kipli denetim hiç aşma yapmazken, geriadımlamalı denetim ve Doğrusal Karesel Denetleyici yaklaşımları çok az aşım yapmışlardır. Ancak, en yüksek aşım PID ve PD denetleyicilerinde görülmektedir.

Denetim çabası, denetleyicilerin eyleycilere bindirdiği yük olarak basitçe ifade edilebilir. Bir sistemin sınırlarını aşmadan en az çaba ile en doğru takibin yapılması sistemi gerçekleştirmedeki en önemli tasarım ölçütüdür. Bu sistem için de elde edilen sonuçlar, en az denetim çabasının DKD1 tarafından yapıldığını göstermektedir. Diğer yöntemlerden daha az çaba ile yani motor yeteneğini en az kullanıp diğerleri ile benzer sonuçları üreterek bu konuda üstünlüğü yakalamıştır. KKD, PID, PD ve GAD yöntemleri olarak devam eden sıralamada eyleycilere en büyük yük DKD2 tarafından yüklenmiştir.

Senaryo benzetimlerine göre tezde yer alan PI hariç bütün denetleyiciler ile dörtpervaneli istenilen görevleri yerine getirebilmiştir. PID ve PD ile iyi bir takibin yapıldığı ama aşmanın çokça olduğu görülmektedir. Doğrusal Karesel Denetleyici ve geriadımlamalı denetimin de takibinin iyi olduğu ama az da olsa aşmaların görüldüğü söylenebilir. Kayan kipli denetim ise neredeyse hiç aşmaya sebep olmamasına rağmen kuzey ve doğu takibinde biraz yavaş kalmıştır. Yönelim ve yükselme denetiminde bütün denetleyicilerin çok başarılı olduğu görülmektedir. Neredeyse hiç takip hatası yapmadan denetim gerçekleşmiştir. Ardışık yapısı nedeniyle en çok takip hatasının görüldüğü kuzey ve doğu yönlerinin denetiminde en başarılı denetim, bu durumu tek bir model ile çözen DKD2 daha sonra PD ve DKD1, onları takiben GAD ve KKD yöntemleri olmuştur.

Gürbüzlüğün incelendiği senaryolarda ise bütün yöntemlerin başarılı olmasına rağmen bozucu etkilerde en hızlı toparlanmanın salınımı en az olan GAD ile

yapıldığı onu, DKD2, DKD1 ve KKD yöntemlerinin izlediği görülmüştür. Kayan kipli denetim ile dörtpervaneli bozucu etkiyi giderecek, yeterince çabuk ve etkili bir tepki veremezken, DKD2 bozucu etkiden neredeyse hiç etkilenmeden yörünge takibini sürdürdüğü görülmüştür. PD denetleyici ile denetlenen dörtpervanelinin ise benzetimin yapıldığı koşulda kararlılığını koruyamadığı görülmüş ve diğer yöntemlere göre daha kısıtlı etkilerde, geç toparlansa da kararlılığını koruyabildiği gözlemlenmiştir. Gürültülü ortamda incelenen denetimlerde ise ivmesel bozulmalardan en az Doğrusal Karesel Denetleyici tasarımlarının etkilendiği görülmüştür. PD denetim ise yapısında filtre içerdiği için denetim çabası olarak en uygun sonuçları vermesine rağmen konumda diğerlerine göre büyük sapmalar gerçekleştirmiştir. Dönü ölçümlerinde görülen gürültülerden ise en çok Doğrusal Karesel Denetleyici tasarımları ve GAD yöntemi etkilenirken PD ve KKD yöntemi daha az etkilenmiştir. Yine de bütün yöntemler gürültülü ortamda dörtpervaneliyi kararsızlığa götürerek istenilen görevi yapmasına engel olmamış, küçük sapmalar ile başarılı olmuşlardır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, insansız hava aracı sınıfındaki dörtpervanelilerin matematiksel modeli türetilmiş, doğrusal ve doğrusal olmayan denetim yöntemleri ile konum ve yönelim denetimi yapılmıştır. Tasarımlanan denetleyicilerin başarımlarını gözlemlemek amacıyla farklı senaryolar ile benzetimler yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir.

Dörtpervaneliler hareketi için gerekli olan kuvvet ve momentleri üzerinde barındırdığı dört adet motor ve pervane yardımıyla gerçekleştirirler. Euler açıları ile ifade edilebilen yönelimleri ile yükselme, ileri veya yana doğru ilerleme hareketini gerçekleştirir. Dörtpervanelinin modellenmesi Newton-Euler denklemleri olarak bilinen denklem takımları ile yapılmıştır. Yön Kosinüs Matrisi ile gövde çerçevesinden Dünya'ya sabit ataletsel çerçeveye yapılan dönüşüm ile türetilen model kullanılarak, dörtpervanelinin askıda kalma, yükselme, yuvarlanma, yunuslama ve sapma hareketleri matematiksel olarak ifade edilmiş ve denetleyici tasarımında bu model kullanılmıştır. Doğrusal olmayan bir sistem olan dörtpervaneli, doğrusal denetim yöntemleri ile denetlenebilmesi için Taylor serisi açılımının yardımıyla doğrusallaştırılmış ve doğrusal denetleyiciler bu model üzerinden tasarımılanmıştır.

Dörtpervanelinin denetimi için doğrusal denetim yöntemlerinden, PID, PD ve PI ile eniyilemeli kutup yerleştirme yöntemi olan Doğrusal Karesel Denetleyici kullanılmıştır. Doğrusal olmayan denetim yöntemlerinden ise Lyapunov kararlılık kuramına göre tasarımılanan geriadımlamalı denetim ve kayan kipli denetim, dörtpervanelinin denetimi için tercih edilmiştir. Dört adet giriş değeri ile altı adet çıkışın denetlenmesi nedeniyle eksik eyleyicili olarak isimlendirilen bir sistem olan dörtpervanelilerin konum ve yönelimleri yukarıda ismi geçen denetleyiciler ile denetlenmiştir. Belirlenen senaryolarda denetim başarımları ile bozucu ve gürültü etkisi altındaki başarımları incelenmiştir.

Bu tez kapsamında istenilen konuma gidebilen bir dörtpervaneli düşünülmektedir. Yükselme hareketi için doğrudan eyleyicilere komut gönderilebiliyorken, kuzey ve doğu yönüne ilerlemek için denetleyiciler uygun yönelim değerleri üretirler ve yönelim denetleyicileri açı isterlerini gerçekleştirmeye çalışırlar. Bu yapısı ile denetim sistemi ardışık bir yapıya sahiptir. Ancak, Doğrusal Karesel Denetleyici ile

bütün sistem durumlarını içinde barındıran tek bir yapı için de denetleyici tasarımı yapılmıştır ve benzetimi yapılmıştır.

Dört pervanelinin denetleyicileri, belirlenen ölçütlere göre çok sayıda yapılan benzetimlerin sonuçları incelenerek, dört pervanelinin yeteneğini aşmadan en hızlı tepkileri verebilecek bir seçimle tasarımı yapılmıştır. Yapılan tasarımların kapalı döngü başarımları dört pervanelinin altı durumu için basamak tepkilerinden gözlemlenmiştir. Basamak tepkileri sistemlerin zaman alanındaki başarımlarını yansıtsalar bile sistemin bir bütün olarak nasıl davranacağı konusunda da fikir verebilirler.

Basamak tepkilerinden PID denetleyicisinin durgun hale geçişte çok yavaş kaldığı görülmektedir. Yükselme ve yönelim denetiminde diğerleri ile benzer sonuçlar görülse de biraz daha hızlı tepki PD denetleyicisi tarafından verilmiştir. Doğrusal Karesel Denetleyici yaklaşımları, geriadımlamalı ve kayan kipli denetim ise birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir. Kuzey ve doğu yönlerine ilerleme denetimi eğer dört pervanelinin ardışık yapısı ile tasarım yapıldığında, çok yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Tek bir model üzerinden tasarımı yapılan Doğrusal Karesel Denetleyici ise diğer yöntemlerden çok daha hızlı denetimini gerçekleştirmiştir. Ancak, bu yöntem ile elde edilen bu çabukluğun eyleyicilere diğer yöntemlere göre, daha fazla yüklenilmesine neden olduğu görülmüştür. Senaryo benzetimlerinden de PI hariç bütün denetleyiciler ile dört pervaneli yörünge takibi yapabilmektedir. En başarılı takibin ise yine tek model üzerinden tasarımı yapılan Doğrusal Karesel Denetleyici'yi kullanan dört pervanelinin gerçekleştirdiği ama açısı denetimi yapılmadığı için diğer denetim yöntemlerine göre çok fazla yuvarlanma ve yunuslama açısı oluşturduğu görülmüştür. Gürbüzlüğün incelendiği benzetimlerden ise bozucu etkiye en hızlı tepkinin geriadımlamalı denetim ile verildiği, kayan kipli denetimde ise toparlanmanın biraz geç olduğu görülmüştür. Doğrusal Karesel Denetleyici yaklaşımları ise bozucu etkiye rağmen başarılı bir denetim sağlamışlardır. PD denetleyici ise diğer yöntemlere göre daha kısıtlı bir etkiye kararsızlığı bozmayacak tepki verebilmektedir. Gürültülü ölçümler kullanıldığında da en başarılı yörünge takibi Doğrusal Karesel Denetleyici yaklaşımları kullanıldığında görülmektedir. PD denetleyici ile yörüngeden çok fazla sapma olsa da yapısında barındırdığı filtre ile eyleyicileri bu ortamda en az

zorlayan yöntem olmuştur. Geriadımlamalı ve kayan kipli denetim kullanıldığında da başarılı bir takip yapıldığı söylenebilir.

Sonuç olarak, PI denetleyicisi ile tasarım yapılamamış dörtpervaneli kararlı bir biçimde uçurulamamıştır. PID, PD, Doğrusal Karesel Denetleyici tasarımları, geriadımlamalı ve kayan kipli denetleyiciler ile doğrusal olmayan bu sistem başarılı bir şekilde denetlenebilmiştir. Tasarım kolaylığı açısından Doğrusal Karesel Denetleyici'yi, PD ve PID yöntemleri takip etmektedir. Sahip oldukları katsayı çokluğu nedeniyle geriadımlamalı ve kayan kipli denetleyicileri tasarımılaması süre almıştır. Bahsi geçen ufak farklar dışında bu beş yöntemin de dörtpervaneli denetiminde tercih edilebileceği görülmektedir. Tek model üzerinden tasarımılanan Doğrusal Karesel Denetleyici diğer yöntemlere göre çok başarılı konum takibi gerçekleştirirse de onun da yüksek yönelim açıları oluşturmaları, eyleyicilere çok yük bindirmesi gibi eksileri bulunmaktadır. Ancak, tezde yer alan iki farklı yaklaşımla tasarımılanan Doğrusal Karesel Denetleyici, tasarım kolaylığı, eyleyici kabiliyetini etkin bir biçimde kullanması ve bozucu ortamlarda daha iyi bir takip göstererek daha gürbüz görünmesi nedeniyle dörtpervanelinin denetiminde diğerlerinden bir adım öndedir.

Gelecek çalışmalarda burada bahsedilen denetleyiciler gerçek bir sistem üzerinde denenebilir ve en uygun denetleyici seçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Anonim, Breguet - Richet Gyroplane, <https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Breguet-Richet%20Gyroplane>.
- [2] Anonim, Oehmichen No. 2, http://www.aviastar.org/helicopters_eng/oemichen.php.
- [3] Anonim, Convertawings Model, http://www.aviastar.org/helicopters_eng/convertawings.php.
- [4] C. Baraniuk, "Small drone 'shot with Patriot missile'", <http://www.bbc.com/news/technology-39277940> (Mart **2017**).
- [5] P. Pounds, R. Mahony, P. Corke, "Modelling and control of a large quadrotor robot," *Control Eng. Pract.*, vol. 18, no. 7, pp. 691–699, **2010**.
- [6] K. S. Salih, A.L. Moghavvemi, M. Mohamed, H.A.F. Gaeid, "Flight PID controller design for a UAV quadrotor," *Sci. Res. Essays*, 5, 23, 3660–3667, **2010**.
- [7] J. Li, Y. Li, "Dynamic analysis and PID control for a quadrotor," *2011 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom.*, 573–578, **2011**.
- [8] W. Guo, J. F. Horn, "Modeling and Simulation for the Development of a Quad- Rotor UAV Capable of Indoor Flight," *Aerospace*, 1–11, **2006**.
- [9] B. Erginer, E. Altug, "Modeling and PD Control of a Quadrotor VTOL Vehicle," *2007 IEEE Intell. Veh. Symp.*, 894–899, **2007**.
- [10] S. Bouabdallah, "Design and Control of Quadrotors With Application To Autonomous Flying," Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lozan, **2007**.
- [11] H. M. N. ElKholy, "Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches," Master Tezi, The American University in Cairo, Kahire, **2014**.
- [12] W. E. Rodríguez, R. Ibarra, G. Romero, D. Lara, "Comparison of Controllers for a UAV Type Quadrotor: Feedback Control by Bessel's Polynomials and LQR with Kalman Filter," *Appl. Mech. Mater.*, 555, 40–48, **2014**.
- [13] D. C. Tosun, Y. Işık, H. Korul, "LQR control of a quadrotor helicopter," 247–252, **2015**.
- [14] L. M. Argentim, W. C. Rezende, P. E. Santos, R. A. Aguiar, "PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform," in *2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV)*, 1–6, **2013**.
- [15] S. Khatoon, D. Gupta, L. K. Das, "PID & LQR control for a quadrotor: Modeling and simulation," in *2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 796–802 **2014**.
- [16] L. Pollini, A. Metrangolo, "Simulation and Robust Backstepping Control of a Quadrotor Aircraft," in *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, **2008**.
- [17] H. Bouadi, F. Mora-Camino, "Modeling and Adaptive Flight Control for Quadrotor Trajectory Tracking," *J. Aircr.*, 1–16, **2017**.

- [18] Yaolong Tan, Jie Chang, Jun He, Hualin Tan, "Advanced nonlinear control strategy for motion control systems," in *Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435)*, 1, 116–121, **2000**.
- [19] P. Adigbli, C. Grand, J.-B. Mouret, S. Doncieux, "Nonlinear Attitude and Position Control of a Micro Quadrotor using Sliding Mode and Backstepping Techniques," *Eur. Micro Air Veh. Conf. Flight Compet.*, 17–21, **2007**.
- [20] S. Bouabdallah, R. Siegwart, "Backstepping and sliding-mode techniques applied to an indoor micro Quadrotor," *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2247–2252, **2005**.
- [21] D. Lee, H. J. Kim, S. Sastry, "Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter," *Int. J. Control. Autom. Syst.*, 7, 3, 419–428, **2009**.
- [22] E. Altug, J. Ostrowski, R. Mahony, "Control of a quadrotor helicopter using visual feedback," *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 72–77, **2002**.
- [23] B. Whitehead, S. Bieniawski, "Model Reference Adaptive Control of a Quadrotor UAV," *AIAA Guid. Navig. Control Conf.*, **2010**.
- [24] M. Bangura, R. Mahony, *Real-time model predictive control for quadrotors*, 19, 3. IFAC, **2014**.
- [25] R. Lopes, P. Santana, G. Borges, J. Ishihara, "Model Predictive Control applied to tracking and attitude stabilization of a VTOL quadrotor aircraft," *International Congress of Mechanical Engineering*, 5, 176–185, **2011**.
- [26] M. W. Mueller, R. D'Andrea, "A model predictive controller for quadcopter state interception," *Proc. Eur. Control Conf. (ECC)*, 2013, 1383–1389, **2013**.
- [27] C. Nicol, C. J. B. Macnab, a. Ramirez-Serrano, "Robust Neural Network Control of a Quadrotor Helicopter," *Proc. CCECE 2008, Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, 1, 1233–1238, **2008**.
- [28] H. Boudjedir, "Adaptive Neural Network for a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle," *Int. J. Found. Comput. Sci. Technol.*, 2, 4, 1–13, **2012**.
- [29] P. H. Zipfel, *Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics, Second Edition*. AIAA, Virginia, **2007**.
- [30] B. L. Stevens, F. L. Lewis, *Aircraft control and simulation, Third Edition*. J. Wiley, New Jersey, **2003**.
- [31] D. J. Morin, *Introduction to classical mechanics: with problems and solutions*. Cambridge University Press, **2008**.
- [32] D. McLean, *Automatic flight control systems*. Prentice Hall, **1990**.
- [33] H. Goldstein, C. P. Poole, J. L. Safko, *Classical mechanics*. Addison Wesley, **2002**.
- [34] K. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice-Hall, **2010**.
- [35] J. C. Doyle, B. A. Francis, A. Tannenbaum, *Feedback control theory*. Dover, **2009**.
- [36] B. D. O. Anderson, J. B. Moore, *Linear optimal control*. Prentice-Hall, **1971**.

- [37] F. L. Lewis, D. L. Vrabie, V. L. Syrmos, *Optimal Control*. John Wiley & Sons, **2012**.
- [38] K. J. Åström, R. M. Murray, *Feedback systems : an introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press, **2008**.
- [39] E. Lavretsky, K. A. Wise, *Robust and adaptive control : with aerospace applications*. Springer, **2013**.
- [40] C. Jaen, J. Pou, R. Pindado, V. Sala, J. Zaragoza, "A Linear-Quadratic Regulator with Integral Action Applied to PWM DC-DC Converters," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 2280–2285, **2006**.
- [41] J. B. Burl, *Linear optimal control: H_2 and $H[\text{infinity}]$ methods*. Addison Wesley Longman, **1999**.
- [42] M. Krstić, I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotović, I. Κανελλακόπουλος, *Nonlinear and adaptive control design*. Wiley, **1995**.
- [43] H. K. Khalil, *Nonlinear systems*. Prentice Hall, **2002**.
- [44] X. Zhang, Y. Zhang, C.-Y. Su, Y. Feng, "Fault-Tolerant Control for Quadrotor UAV via Backstepping Approach," in *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, **2010**.
- [45] S. Bouabdallah, R. Siegwart, "Full control of a quadrotor," in *2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 153–158, **2007**.
- [46] T. Madani, A. Benallegue, "Backstepping Control for a Quadrotor Helicopter," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3255–3260, **2006**.
- [47] J.-J. E. Slotine, W. Li, *Applied nonlinear control*. Prentice Hall, **1991**.
- [48] S. A. Swarup, "Comparison of Quadrotor Performance Using Backstepping and Sliding Mode Control - Semantic Scholar," in *Proceedings of the 2014 International Conference on Circuits, Systems and Control*, 7982, **2014**.
- [49] K. Runcharoon, V. Srichatrapimuk, "Sliding Mode Control of quadrotor," in *2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE)*, 552–557, **2013**.
- [50] R. Xu, U. Ozguner, "Sliding Mode Control of a Quadrotor Helicopter," in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 4957–4962, **2006**.

EKLER

EK 1 İNGİLİZCE-TÜRKÇE TERİMLER SÖZLÜĞÜ

Actuator	: Eyleyici
Adaptive	: Uyarlamalı
Air density	: Hava yoğunluğu
Attitude	: Yönelim
Backstepping	: Geriadımlama
Body	: Gövde
Cascade	: Ardışık
Closed loop	: Kapalı döngü
Component	: Bileşen
Constraint	: Kısıtlama
Controller	: Denetleyici
Cost function	: Maliyet işlevi
Direction Cosine Matrix	: Yön Kosinüs Matrisi
Disturbance	: Bozucu
Drag	: Sürüklenme
Equilibrium point	: Denge noktası
Error	: Hata
Feedback	: Geribesleme
Frame	: Çerçeve
Force	: Kuvvet
Gain	: Kazanç
Hovering	: Askıda kalma
Inertial	: Ataletsel
Input	: Giriş
Integral	: Tümler
Lift	: Kaldırma
Linear	: Doğrusal
Lowpass	: Alçak geçirgen
Mode	: Kip
Noise	: Gürültü
Open loop	: Açık döngü
Orthonormal	: Birimdik

Output	: Çıkış
Overshoot	: Aşma
Performance	: Başarım
Pitch	: Yunuslama
Pole	: Kutup
Predictive	: Öngörölü
Propeller	: Pervane
Quadratic	: Karesele
Quadrotor	: Dörtpervaneli
Response	: Tepki
Rigid	: Katı
Robustness	: Gürbüzlük
Roll	: Yuvarlanma
Rotational	: Dönel
Sensor	: Duyargaç
Sliding mode	: Kayan kip
Sliding surface	: Kayan yüzey
Stability	: Kararlılık
Steady state	: Durgun hal
Step	: Basamak
State	: Durum
Symmetry	: Bakışım
Theory	: Kuram
Thrust	: İtke
Torque	: Tork, Moment
Tracking	: İzleme
Trajectory	: Yörünge
Translational	: Ötelenme
Transpose	: Devrik
Uncertainty	: Belirsizlik
Underactuated	: Eksik eyleyicili
Virtual	: Sanal
Weighting	: Ağırlıklandırma
Yaw	: Sapma

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Ahmet Demiryürek
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Bekar
E-posta : ahmet1demiryurek@gmail.com

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2007-2012)
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2013-2018)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce, İyi

İş Deneyimi

Ocak 2014-Ağustos 2014 RND Medikal, ODTÜ Ostim Teknokent, Ankara
Haziran 2015-... TÜBİTAK SAGE, Ankara

Deneyim Alanları

Biyomedikal, Devre Tasarımı, Denetim Sistemleri Tasarımı

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu İle Katıldığı Toplantılar



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 09/02/2018

Tez Başlığı / Konusu: **Bir Dörtpervanelinin Modellenmesi ve Denetimi**

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 132 sayfalık kısmına ilişkin, 09/02/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/ [REDACTED]
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

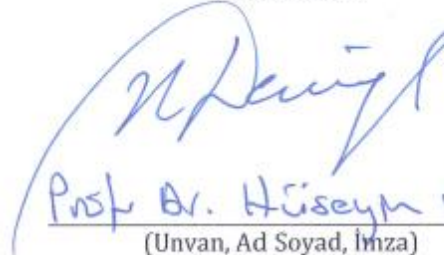
09.02.2018

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Ahmet Demiryürek
Öğrenci No: N12220960
Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.


Prof. Dr. Hüsseyin Demirelioğlu
(Unvan, Ad Soyad, İmza)