

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT ROTORLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ,
GAUSS GÜRÜLTÜSÜ VE PARAMETRE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA
LYAPUNOV TABANLI VE GERİ ADIMLAMALI KONTROLCÜ TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Mehmet KARAHAN

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

AĞUSTOS 2023

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Mehmet KARAHAN

ÖZET

Doktora Tezi

DÖRT ROTORLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ,
GAUSS GÜRÜLTÜSÜ VE PARAMETRE BELİRSİZLİĞİ ALTINDA
LYAPUNOV TABANLI VE GERİ ADIMLAMALI KONTROLCÜ TASARIMI

Mehmet KARAHAN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Tarih: Ağustos 2023

Günümüzde insansız hava araçları oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır. Terörle mücadele, keşif ve gözetleme, yangın ve doğal afetlerle mücadele, arama kurtarma, haritalama, maden arama, bilimsel araştırma, kargo taşıma, nakil amacıyla organ taşıma, tarımsal ilaçlama, fotoğrafçılık, hobi ve sportif amaçlı uçuşlar insansız hava araçlarının kullanım alanına girmektedir. İnsansız hava araçları, insanlı uçaklara kıyasla üretim maliyetinin daha düşük olması, içinde pilot bulundurmaması ve küçük boyutları sayesinde daha sert manevralar yapabilmesi nedeniyle daha avantajlıdır. İnsansız hava araçları, kanatlı insansız hava araçları ve dikey iniş kalkış yapabilen insansız hava araçları olarak iki kategoride düşünülebilir. Dikey iniş kalkış yapabilen insansız hava araçları, iniş ve kalkış esnasında piste ihtiyaç duymama, havada asılı kalabilme, kendi ekseni etrafında dönebilme, havada takla atabilme ve sert manevralar yapabilme kabiliyetine sahiptir. Bu özellikleri dikey iniş kalkış yapabilen insansız hava araçlarını sabit kanatlı insansız hava araçlarına kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir. Quadrotor insansız hava araçları da dikey iniş kalkış yapabilen dört rotorlu araçlardır. Quadrotor insansız hava aracının sistem dinamikleri katı bir cismin uzaydaki 6 serbestlik dereceli hareketine benzemektedir. Bu 6 serbestlik

derecesi açısız hızların oluşmasını sağlayan ve Euler açıları olarak bilinen yalpa, yunuslama, sapma açıları ile üç boyutlu uzayda lineer hareketleri tanımlayan x, y, z eksenlerinden oluşmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle quadrotor insansız hava aracının doğrusal olmayan modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra quadrotorun irtifasının, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için farklı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında tüm bu zor koşullara karşı en dayanıklı şekilde çalışacak gürbüz kontrolcü tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır. Öncelikle endüstride yaygın olarak kullanılması nedeniyle PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kontrolcü için PID Tuning metodu kullanılarak optimum kontrolcü katsayıları elde edilmiştir. Daha sonra endüstride yaygın olarak kullanılan PID kontrolcünden daha gürbüz bir kontrolcü yaklaşımı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla öncelikle Lyapunov kararlılık teoremine dayanan Lyapunov tabanlı kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Lyapunov kararlılık teoreminin öz yinelemeli bir uyarlaması olan geri adımlamalı kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolcüler normal koşullar altında, beyaz Gauss gürültüsü altında, parametre belirsizliği altında, eşzamanlı parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında, pembe gürültü altında, kahverengi gürültü altında, mavi gürültü altında, mor gürültü altında ve sinüzoidal bozucu altında test edilmiştir. Ayrıca kontrolcülerin sert manevra yapabilme kabiliyetlerini test etmek için üçgen referans ve sinüzoidal referans takibi simülasyonları yapılmıştır. Tasarlanan kontrolcülerin yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler geri adımlamalı kontrolcünün bütün koşullarda en az aşım ve en kısa oturma zamanına sahip olduğunu göstermiştir. Böylece yapılan simülasyonlar ve elde edilen veriler sonucunda geri adımlamalı kontrolcü tasarımının klasik PID kontrolcünden ve Lyapunov tabanlı kontrolcünden daha gürbüz olduğu ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Oransal integral türevsel kontrol, Lyapunov tabanlı kontrol, Geri adımlamalı kontrol, Beyaz Gauss gürültüsü, Pembe gürültü, Kahverengi gürültü, Mavi gürültü, Mor gürültü, Sinüzoidal bozucu, Quadrotor, İnsansız hava aracı, Gürbüz kontrol, Doğrusal olmayan kontrol, Modelleme, Simülasyon.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

**MODELING OF A QUADROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE,
LYAPUNOV BASED AND BACKSTEPPING CONTROLLER DESIGN UNDER
GAUSSIAN NOISE AND PARAMETER UNCERTAINTY**

Mehmet KARAHAN

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Cosku KASNAKOGLU

Date: August 2023

Nowadays, unmanned aerial vehicles are used in a very wide area. Combating terrorism, reconnaissance and surveillance, fighting fire and natural disasters, search and rescue, mapping, mineral exploration, scientific research, cargo transport, organ transport, agricultural spraying, photography, hobby and sportive flights are among the areas of use of unmanned aerial vehicles. Unmanned aerial vehicles are more advantageous compared to manned aircraft due to their lower production cost, not carrying pilots, and being able to perform harder maneuvers thanks to their small size. Unmanned aerial vehicles can be considered in two categories: winged unmanned aerial vehicles and vertical take-off and landing unmanned aerial vehicles. Unmanned aerial vehicles that can take-off and land vertically do not need a runway during take-off and landing, they have the ability to hang in the air, rotate around their own axis, flip in the air and perform harsh maneuvers. These features make unmanned aerial vehicles capable of vertical take-off and landing more advantageous compared to fixed-wing unmanned aerial vehicles. Quadrotor unmanned aerial vehicles are four propeller vehicles that can take off and land vertically. The system dynamics of the quadrotor unmanned aerial vehicle are similar to the motion of a

rigid body in space with 6 degrees of freedom. These 6 degrees of freedom consist of roll, pitch and yaw angles, known as Euler angles, which enable the formation of angular velocities, and x, y, z axes, which define linear movements in three-dimensional space. Within the scope of this thesis work, first of all, a nonlinear model of the quadrotor unmanned aerial vehicle was created. This created model was implemented in computer environment using MATLAB/Simulink software. Then, different controller designs were developed to control the altitude, roll, pitch and yaw angles of the quadrotor. Within the scope of the thesis work, an attempt was made to obtain a robust controller design that would work in the most durable way against all these difficult conditions. First of all, PID controller design was carried out due to its widespread use in the industry. For this controller, optimum controller coefficients were obtained by using the PID Tuning method. Then, an attempt was made to obtain a more robust controller approach than the PID controller commonly used in the industry. For this purpose, firstly, a Lyapunov based controller design based on the Lyapunov stability theorem was carried out. Then, a backstepping controller design, which is a recursive adaptation of the Lyapunov stability theorem, was carried out. The designed controllers were tested under normal conditions, white Gaussian noise, parameter uncertainty, simultaneous parameter uncertainty and white Gaussian noise, pink noise, brown noise, blue noise, purple noise and sinusoidal disturbance. In addition, triangle reference and sinusoidal reference tracking simulations were made to test the hard maneuvering capabilities of the controllers. The rise time, overshoot and settling time data of the designed controllers were compared. The data obtained showed that the backstepping controller had the least overshoot and the shortest settling time under all conditions. Thus, as a result of the simulations and the data obtained, it has been proven that the backstepping controller design is more robust than the classical PID controller and the Lyapunov based controller.

Keywords: Proportional integral derivative control, Lyapunov based control, Backstepping control, Gaussian white noise, Pink noise, Brownian noise, Blue noise, Violet noise, Sinusoidal disturbance, Quadrotor, Unmanned aerial vehicle, Robust control, Nonlinear control, Modelling, Simulation.

TEŐEKKÖR

Bu tez alıŐması TÖBİTAK 2211-C Yurt İi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı tarafından desteklenmiŐtir. Desteklerinden ötürü sayın TÖBİTAK BaŐkanı'na, TÖBİTAK BİDEB'e ve bütÖn kıymetli TÖBİTAK personeline sevgi, saygı ve Őükranlarımı sunarım. Doktora eğitimim süresince bana özel baŐarı bursu veren TOBB ETÖ'ye sunduğu maddi destekler ve imkanlar için teŐekkÖr ederim. Tez çalıŐmam süresince kıymetli yardım ve katkılarıyla bana destek olan tez danıŐmanım Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu'na, değerli birikimlerinden istifade ettiğim TOBB Ekonomi ve Teknoloji Öniversitesi Elektrik-Elektronik MÖhendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve her daim beni destekleyen sevgili aileme, değerli ağabeyim Metin Karahan'a ve arkadaŐlarıma teŐekkÖr ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
RESİM LİSTESİ	xivxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Quadrotorların Tarihsel Gelişimi	2
1.3 Literatür Araştırması	133
1.4 Literatüre Yapılan Katkıları	18
2. QUADROTOR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ	21
2.1 Quadrotor İHA'nın Yapısı ve Uçuş İlkeleri	21
2.1.1 Dikey eksenindeki hareket	23
2.1.2 Yalpa hareketi	24
2.1.3 Yunuslama hareketi.....	24
2.1.4 Sapma hareketi.....	24
2.1.5 Quadrotorun eksenlere göre hareketlerinin şematik gösterimi	24
2.2 Quadrotorun Doğrusal Olmayan Modeli.....	26
2.3 Quadrotorun Parametreleri	29
2.4 Quadrotorun MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi	30
3. KONTROLÇÜLERİN TASARLANMASI	31
3.1 PID Kontrolcü Tasarımı	31
3.2 Lyapunov Tabanlı Kontrolcü Tasarımı	34
3.3 Geri Adımlamalı Kontrolcü Tasarımı	37
4. SİMÜLASYONLAR	43
4.1 Normal Koşullar Altında Yapılan Simülasyonlar	43
4.2 + %50 Parametre Belirsizliği Altında Yapılan Simülasyonlar	46
4.3 - %50 Parametre Belirsizliği Altında Yapılan Simülasyonlar	48
4.4 Bant Sınırlı Beyaz Gauss Gürültüsü Altında Yapılan Simülasyonlar.....	51
4.5 Parametre Belirsizliği ve Bant Sınırlı Beyaz Gauss Gürültüsü Altında Yapılan Simülasyonlar	55
4.6 Pembe Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar	57
4.7 Kahverengi Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar	60
4.8 Mavi Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar.....	63
4.9 Mor Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar	66
4.10 PID Kontrolcü için ikinci Katsayılarla Yapılan Simülasyonlar.....	69
4.11 Sinüzoidal Bozucu Altında Yapılan Simülasyonlar.....	72
4.12 Üçgen Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar.....	74
4.13 1 rad/s Sinüzoidal Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar	78

4.14 3 rad/s Sinüzoidal Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar	81
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	95
ÖZGEÇMİŞ	101



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 6 serbestlik derecesi	21
Şekil 2.2 : Soldan sağa artı ve çapraz konfigürasyonlu quadrotorların gösterimi	22
Şekil 2.3 : Çapraz konfigürasyonlu quadrotorda rotorların dönüş yönü	23
Şekil 2.4 : Quadrotorun 3 eksenindeki hareketleri	23
Şekil 2.5 : Gaz (throttle), yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) hareketleri	25
Şekil 2.6 : Quadrotorun küresel ve noktasal kütlelerinin gösterimi	28
Şekil 2.7 : Quadrotorun şematik gösterimi	29
Şekil 2.8 : Quadrotorun blok şeması	30
Şekil 3.1 : PID kontrolcünün blok şeması	31
Şekil 3.2 : PID yükseklik kontrolcüsünün Simulink blok şeması	32
Şekil 3.3 : Yalpa açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı	33
Şekil 3.4 : Yunuslama açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı	33
Şekil 3.5 : Sapma açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı	33
Şekil 3.6 : Lyapunov tabanlı irtifa kontrolcünün blok şeması	36
Şekil 3.7 : Lyapunov tabanlı yalpa açısı kontrolcünün blok şeması	36
Şekil 3.8 : Lyapunov tabanlı yunuslama açısı kontrolcünün blok şeması	36
Şekil 3.9 : Lyapunov tabanlı sapma açısı kontrolcünün blok şeması	37
Şekil 3.10 : Geri adımlamalı irtifa kontrolcünün blok şeması	39
Şekil 3.11 : Geri adımlamalı yalpa açısı kontrolcünün blok şeması	40
Şekil 3.12 : Geri adımlamalı yunuslama açısı kontrolcünün blok şeması	40
Şekil 3.13 : Geri adımlamalı sapma açısı kontrolcünün blok şeması	41
Şekil 4.1 : Normal koşullar altında yalpa açısı referans takibi	44
Şekil 4.2 : Normal koşullar altında yunuslama açısı referans takibi	44
Şekil 4.3 : Normal koşullar altında sapma açısı referans takibi	44
Şekil 4.4 : Normal koşullar altında yükseklik referans takibi	45
Şekil 4.5 : + %50 parametre belirsizliği altında yalpa açısı referans takibi	46
Şekil 4.6 : + %50 parametre belirsizliği altında yunuslama açısı referans takibi	47
Şekil 4.7 : + %50 parametre belirsizliği altında sapma açısı referans takibi	47
Şekil 4.8 : + %50 parametre belirsizliği altında irtifa referans takibi	47
Şekil 4.9 : - %50 parametre belirsizliği altında yalpa açısı referans takibi	49
Şekil 4.10 : - %50 parametre belirsizliği altında yunuslama açısı referans takibi.	49
Şekil 4.11 : - %50 parametre belirsizliği altında sapma açısı referans takibi.	50
Şekil 4.12 : - %50 parametre belirsizliği altında irtifa referansı takibi.	50
Şekil 4.13 : Beyaz Gauss gürültüsü altında yalpa açısı referans takibi.	52
Şekil 4.14 : Beyaz Gauss gürültüsü altında yunuslama açısı referans takibi.	52
Şekil 4.15 : Beyaz Gauss gürültüsü altında sapma açısı referans takibi.	53
Şekil 4.16 : Beyaz Gauss gürültüsü altında irtifa referans takibi.	53
Şekil 4.17 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında yalpa açısı referans takibi.	55
Şekil 4.18 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında yunuslama açısı referans takibi	55

Şekil 4.19 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında sapma açısı referans takibi.	56
Şekil 4.20 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında irtifa referans takibi	56
Şekil 4.21 : Pembe gürültü altında yalpa açısı referans takibi	58
Şekil 4.22 : Pembe gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.	58
Şekil 4.23 : Pembe gürültü altında sapma açısı referans takibi.....	59
Şekil 4.24 : Pembe gürültü altında irtifa referans takibi	59
Şekil 4.25 : Kahverengi gürültü altında yalpa açısı referans takibi.....	61
Şekil 4.26 : Kahverengi gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.....	61
Şekil 4.27 : Kahverengi gürültü altında sapma açısı referans takibi	62
Şekil 4.28 : Kahverengi gürültü altında irtifa referans takibi.....	62
Şekil 4.29 : Mavi gürültü altında yalpa açısı referans takibi.....	64
Şekil 4.30 : Mavi gürültü altında yunuslama açısı referans takibi	64
Şekil 4.31 : Mavi gürültü altında sapma açısı referans takibi	65
Şekil 4.32 : Mavi gürültü altında yükseklik referans takibi.....	65
Şekil 4.33 : Mor gürültü altında yalpa açısı referans takibi	67
Şekil 4.34 : Mor gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.....	67
Şekil 4.35 : Mor gürültü altında sapma açısı referans takibi.....	67
Şekil 4.36 : Mor gürültü altında yükseklik referans takibi.....	68
Şekil 4.37 : İkinci katsayılarla yapılan yalpa açısı referans takibi	69
Şekil 4.38 : İkinci katsayılarla yapılan yunuslama açısı referans takibi	70
Şekil 4.39 : İkinci katsayılarla yapılan sapma açısı referans takibi	70
Şekil 4.40 : İkinci katsayılarla yapılan yükseklik referans takibi.....	70
Şekil 4.41 : Sinüzoidal bozucu altında yalpa açısı referans takibi	72
Şekil 4.42 : Sinüzoidal bozucu altında yunuslama açısı referans takibi	73
Şekil 4.43 : Sinüzoidal bozucu altında sapma açısı referans takibi	73
Şekil 4.44 : Sinüzoidal bozucu altında yükseklik referans takibi.....	73
Şekil 4.45 : Üçgen referans için yalpa açısı takibi.....	75
Şekil 4.46 : Üçgen referans için yunuslama açısı takibi	75
Şekil 4.47 : Üçgen referans için sapma açısı takibi	76
Şekil 4.48 : Üçgen referans için irtifa takibi	76
Şekil 4.49 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yalpa açısı takibi	78
Şekil 4.50 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yunuslama açısı takibi	78
Şekil 4.51 : 1 rad/s sinüzoidal referans için sapma açısı takibi	79
Şekil 4.52 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yükseklik referansı takibi	79
Şekil 4.53 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yalpa açısı takibi	81
Şekil 4.54 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yunuslama açısı takibi	82
Şekil 4.55 : 3 rad/s sinüzoidal referans için sapma açısı takibi	82
Şekil 4.56 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yükseklik referansı takibi	82
Şekil Ek.1 : Doğrusal olmayan quadrotor modelinin Simulink şeması.....	96
Şekil Ek.2 : PID kontrolcülere Gauss gürültüsü eklenen Simulink şeması	97
Şekil Ek.3 : PID kontrolcülere renkli gürültü eklenen Simulink şeması	98

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Quadrotorun parametreleri	30
Çizelge 3.1 : PID parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi	32
Çizelge 3.2 : PID kontrolcü katsayıları	34
Çizelge 3.3 : Lyapunov tabanlı kontrolcü katsayıları.....	36
Çizelge 3.4 : Geri adımlamalı kontrolcü katsayıları.....	39
Çizelge 4.1 : Normal koşullar altında kontrolcülerin zaman cevabı	45
Çizelge 4.2 : + %50 parametre belirsizliği altında kontrolcülerin zaman cevabı	48
Çizelge 4.3 : - %50 parametre belirsizliği altında kontrolcülerin zaman cevabı	51
Çizelge 4.4 : Bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında kontrolcülerin zaman cevabı	54
Çizelge 4.5 : + %50 parametre belirsizliği ve bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında kontrolcülerin zaman cevabı.....	57
Çizelge 4.6 : Pembe gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı.....	60
Çizelge 4.7 : Kahverengi gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı	63
Çizelge 4.8 : Mavi gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı	66
Çizelge 4.9 : Mor gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı	68
Çizelge 4.10 : PID kontrolcü için ikinci katsayılar	69
Çizelge 4.11 : İkinci katsayılar için kontrolcülerin zaman cevabı karşılaştırması.....	71
Çizelge 4.12 : Lyapunov tabanlı kontrolcü için ikinci katsayılar	72
Çizelge 4.13 : Sinüzoidal bozucu altında kontrolcülerin zaman cevabı.....	74
Çizelge 4.14 : Lyapunov tabanlı kontrolcü için üçüncü katsayılar	75
Çizelge 4.15 : Üçgen referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı.....	77
Çizelge 4.16 : Lyapunov tabanlı kontrolcü için dördüncü katsayılar.....	78
Çizelge 4.17 : 1 rad/s sinüzoidal referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı... 80	
Çizelge 4.18 : 3 rad/s sinüzoidal referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı... 83	
Çizelge Ek.1 : İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları.....	99



KISALTMALAR

DOF	: Serbestlik Derecesi (Degrees of Freedom)
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LQG	: Doğrusal Karesel Gauss (Linear Quadratic Gaussian)
LQR	: Doğrusal Karesel Düzenleyici (Linear Quadratic Regulator)
PID	: Oransal Türevsel (Proportional Derivative)
PD	: Oransal Türevsel (Proportional Derivative)
VTOL	: Dikey Kalkış ve İniş (Vertical Take-Off and Landing)





SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
b	İtki (thrust) katsayısı
d	Sürüklenme (drag) katsayısı
e	Hata (error)
F	Kuvvet
f	Frekans
g	Yerçekimi ivmesi
I_x	X eksenindeki eylemsizlik momenti
I_y	Y eksenindeki eylemsizlik momenti
I_z	Z eksenindeki eylemsizlik momenti
J_r	Rotor eylemsizlik momenti
k	Sürtünme katsayısı
K_d	Türevsel kontrolcü katsayısı
K_i	İntegral kontrolcü katsayısı
K_p	Oransal kontrolcü katsayısı
l	Quadrotorun kol uzunluğu
m	Quadrotorun kütlesi
Ω	Rotor hızı
p	Yalpa açısal hızı
θ	Yunuslama (pitch) açısı
q	Yunuslama açısal hızı
R	Rotasyon (döndürme) matrisi
r	Sapma (yaw) açısal hızı
ϕ	Yalpa (roll) açısı
T	Tork
t	Zaman
f	Frekans
U_1	İrtifa referanslı kontrolcü girişi
U_2	Yalpa referanslı kontrolcü girişi
U_3	Yunuslama referanslı kontrolcü girişi
U_4	Sapma referanslı kontrolcü girişi
w_i	i. rotor açısal hızı (i = 1, 2, 3, 4)
w_{max}	Maksimum rotor hızı
ψ	Sapma (yaw) açısı
x	Kartezyen koordinat sisteminde x koordinatı
y	Kartezyen koordinat sisteminde y koordinatı
z	Kartezyen koordinat sisteminde z koordinatı



RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 1.1 : The Gyroplane No.1.....	3
Resim 1.2 : The Gyroplane No.2.....	4
Resim 1.3 : Oehmichen No.2.....	4
Resim 1.4 : de Bothezat quadrotorunun yandan ve üstten görünümü	5
Resim 1.5 : Convertawings Model A	6
Resim 1.6 : Curtiss-Wright VZ-7.....	6
Resim 1.7 : Piasecki PA-97	7
Resim 1.8 : Ehang 184.....	7
Resim 1.9 : Jetson One	8
Resim 1.10 : Draganflyer.....	8
Resim 1.11 : AR.Drone	9
Resim 1.12 : Solo quadrotor	9
Resim 1.13 : DJI Phantom 4 Advanced.....	10
Resim 1.14 : Ehang DHL kargo quadrotoru	10
Resim 1.15 : Ambulance Drone	11
Resim 1.16 : EFT E Series Hexacopter	11
Resim 1.17 : İHA'nın organ taşıma esnasında çekilen fotoğrafı	12
Resim 1.18 : 6 adet mini roket taşıyan Songar	12



1. GİRİŞ

Donanım ve yazılım teknolojisindeki gelişmeler quadrotor insansız hava araçlarının (İHA) maliyetinin düşmesine, üretiminin yaygınlaşmasına ve kullanım alanının genişlemesine yol açmıştır [1]. Quadrotorlar gözetleme, fotoğrafçılık, haritalama, madencilik, arama kurtarma, sınır devriyesi, doğal yaşamı izleme, tarımsal ilaçlama, yangınla ve doğal afetlerle mücadele, ilk yardım kiti taşıma, kargo taşıma, hastaneler arasında nakil için organ taşıma ve terörle mücadelede etkin olarak kullanılmaktadır [2-5].

Quadrotor İHA'ların dikine iniş kalkış yapabilmesi, havalanmak için piste ihtiyaç duymaması, bozuk zeminlere inip kalkabilmesi, kendi eksenini etrafında dönebilmesi, havada takla atabilmesi, havada asılı kalabilmesi ve kapalı mekanlarda uçabilmesi onları kanatlı insansız hava araçlarından daha avantajlı kılmaktadır [6, 7]. Quadrotor İHA'lar pilotsuz olmaları nedeniyle bir insan için tehlikeli olabilecek sert ve keskin manevraları yapabilmektedir. Quadrotorlar otopilot yazılımı vasıtasıyla önceden planlanmış uçuşları gerçekleştirebilmekte veya yer kontrol istasyonları vasıtasıyla uzaktan kontrol edilebilmektedir [8]. Quadrotorların 4 rotoru olduğundan bu rotorlardan birinde veya ikisinde arıza nedeniyle güç kaybı olsa dahi uçuşuna devam edebilmektedir [9].

Quadrotorların helikoptere kıyasla da önemli üstünlükleri bulunmaktadır. Quadrotor dört rotora sahip olduğundan rotor çapının quadrotorun gövdesine oranı helikopterin ana rotorunun helikopter gövdesine oranından küçüktür. Bu nedenle quadrotorun rotorları helikopterin ana rotoruna kıyasla uçuş sırasında daha az kinetik enerji depolamakta ve olası bir çarpma halinde rotorun parçalanma riski düşmektedir [10].

Quadrotorun birbirinden farklı ve zor görevleri yerine getirirken sert manevralar yapabilmesi, yörünge izleme takibinin iyi olması ve uçuş esnasında az salınım yapması gerekmektedir. Ayrıca uçuş esnasında parametre belirsizliği, Gauss gürültüsü, pembe gürültü (elektronik cihazlardaki arka plan gürültüsü), sinüzoidal bozucu gibi etmenlere maruz kalabilir. Bu nedenle bütün bu faktörlere dayanıklı gürbüz kontrolcü tasarımı önem kazanmaktadır. Bu tez kapsamında da quadrotorun

irtifasını ve pozisyon açılarını kontrol etmek için yukarıda bahsedilen faktörlere dayanıklı gürbüz geri adımlamalı kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

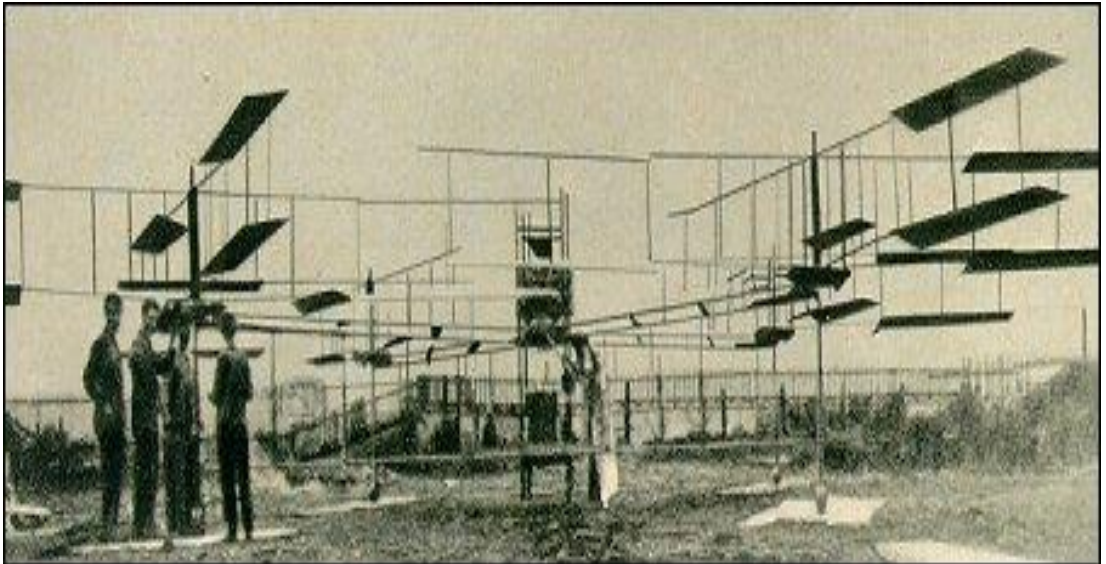
1.1 Tezin Amacı

Bu tezde öncelikle dört rotorlu bir İHA olan quadrotorun çalışma prensipleri açıklanacak ve doğrusal olmayan modeli çıkartılacaktır. MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında doğrusal olmayan model oluşturulacaktır. Daha sonra quadrotorun irtifasının, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için kontrolcü tasarımı gerçekleştirilecektir. Bu kapsamda klasik PID kontrolcü, Lyapunov tabanlı kontrolcü ve geri adımlamalı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilecektir. Tez kapsamında önerilen geri adımlamalı kontrolcünün üstünlüğünü vurgulamak için karşılaştırmalı gürbüzlük analizi yapılacaktır. PID kontrolcü endüstride yaygın olarak kullanılan klasik bir kontrolcüdür. Lyapunov tabanlı kontrolcü Lyapunov kararlılık teoremine dayanan doğrusal olmayan bir kontrolcüdür. Geri adımlamalı kontrolcü ise Lyapunov kararlılık teoreminin öz yinelemeli bir versiyonuna dayanan doğrusal olmayan kontrolcü tasarımıdır. Üç kontrolcü de normal koşullar altında, + 50 ve - %50 parametre belirsizliği altında, Gauss gürültüsü altında, eş zamanlı parametre belirsizliği ve Gauss gürültüsü altında, pembe gürültü altında, kahverengi gürültü altında, mavi gürültü altında, mor gürültü altında ve sinüzoidal bozucu altında test edilecektir. Ayrıca kontrolcülerin sert manevra kabiliyetlerini test edebilmek amacıyla üçgen referans ve sinüzoidal referans takibi simülasyonları yapılacaktır. Üç kontrolcünün de yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri her bir koşul için ayrı ayrı elde edilecektir. Kontrolcülerin performansları ayrı ayrı incelenerek matematiksel bir karşılaştırma yapılacaktır. Bu analizlerin sonucunda geri adımlamalı kontrolcünün en az aşımaya sahip olduğu, en kısa oturma süresine sahip olduğu ve salınım yapmadığı gösterilecektir. Bu şekilde tasarlanan geri adımlamalı kontrolcünün diğer iki kontrolcüden daha gürbüz olduğu kanıtlanacaktır.

1.2 Quadrotorların Tarihsel Gelişimi

Quadrotor dikine iniş kalkış yapabilen dört rotorlu bir hava aracıdır. İlk geliştirilen quadrotorlar bir insan tarafından kontrol edilen hava araçlarıydı. Pilot tarafından

kontrol edilen ilk quadrotorlar 20. yy.'ın başında üretilmiştir. 1990'lı yılların sonlarından itibaren de quadrotor insansız hava araçları ortaya çıkmıştır. 1907 yılında Fransız elektrik mühendisi Louis Charles Breguet ve kardeşi havacılık mühendisi Jacques Breguet, Fransız psikoloji profesörü Charles Richet ile birlikte Bréguet-Richet Gyroplane No. 1 adını verdikleri ilk quadrotoru geliştirmiştir. Quadrotorun merkezinde pilotun oturması için bir koltuk ve yine merkezinde bir motor bulunmaktaydı. Quadrotorun merkezden dört tane rotora doğru uzayan iki katlı olacak şekilde imal edilmiş çelik kolları vardı. Tork etkisini yok etmek amacıyla iki rotor saat yönüne doğru dönerken diğer iki rotor saat yönünün tersine doğru dönmekteydi. Quadrotor sadece dikey yönlü hareket edebiliyordu ve stabil kalabilmesi için dört kişi tarafından tutuluyordu. Bréguet-Richet Gyroplane No. 1 ilk denemesinde yerden 0.6 metre yükselmiştir. Daha sonra yapılan geliştirmelerle yerden 1.52 metre yükselebilmştir. 1908 yılında mevcut tasarımın biraz daha geliştirilmesiyle Bréguet-Richet Gyroplane No. 2 üretilmiştir. Bu tasarımda 7.85 m çapında pervaneler ve sabit kanatlar kullanılmıştır. Güç kaynağı olarak 55 hp gücünde bir Renault motor kullanılmıştır. Bu ikinci versiyon birkaç başarılı uçuş yaptıktan sonra iniş sırasında ağır hasar görmüştür [11]. Resim 1.1'de Bréguet-Richet Gyroplane No. 1 gözükmektedir. Resim 1.2'de Bréguet-Richet Gyroplane No. 2 yer almaktadır.

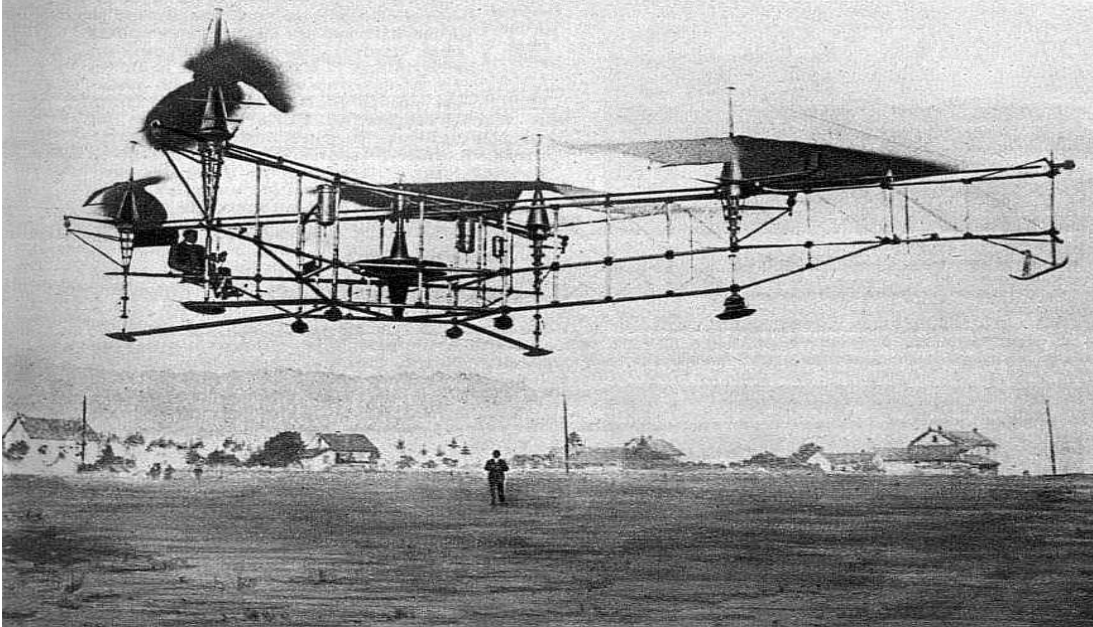


Resim 1.1 : The Gyroplane No.1 [12].



Resim 1.2 : The Gyroplane No.2 [13].

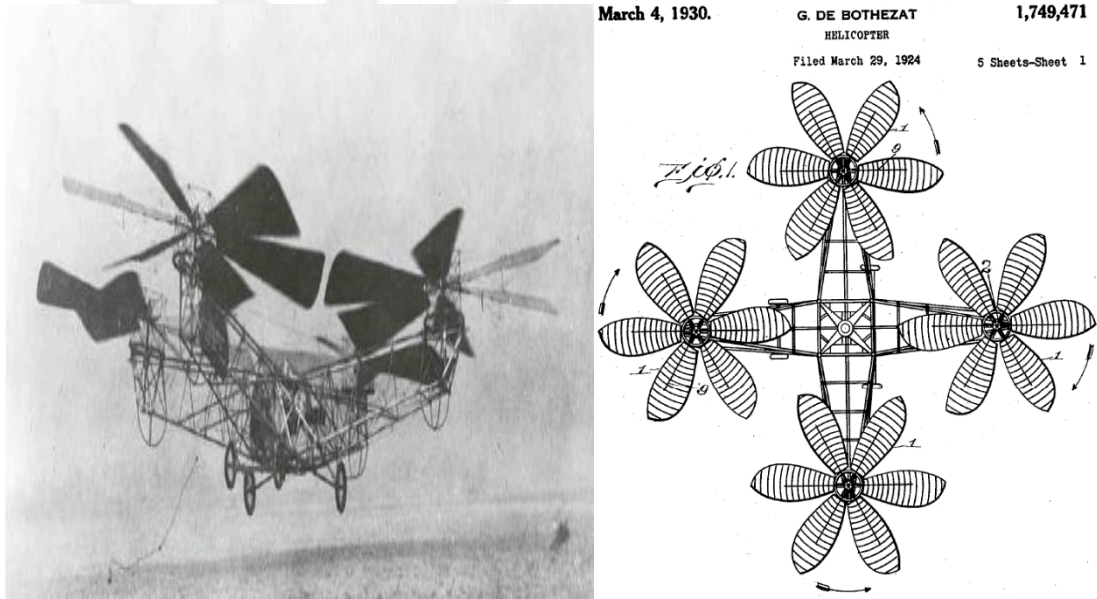
Fransız mühendis ve kanatlı böcekler üzerine çalışan bir biyolog olan Etienne Oehmichen 1921 yılında bir helikopterle başarılı bir uçuş gerçekleştirmiştir. Daha sonra kendisi de bir quadrotor geliştirmeye karar vermiştir. 1922 yılında 4 rotorlu ve 8 pervaneli Oehmichen No.2 adını verdiği quadrotoru geliştirmiştir. 1924 yılında önce 360 metre ve sonra da 525 metre uçarak o dönem için bir rekor kırmıştır. Daha sonra üçgen şeklinde bir yörünge takip ederek 7 dakika 40 saniye boyunca uçmuş ve 1 km yol almıştır. Yine 1924 yılında yanına 2 yolcu alarak başarılı bir uçuş gerçekleştirmiştir. Resim 1.3'te Oehmichen No.2 adlı quadrotorun resmi yer almaktadır [14].



Resim 1.3 : Oehmichen No.2 [15].

Rus kökenli bir soylu ve bilim insanı olan George de Bothezat da quadrotor üzerine önemli çalışmalar yapmıştır. George de Bothezat 1902 yılında Harkov Politeknik Üniversitesi'nde Elektrik Mühendisliği bölümüne başlamıştır. Daha sonra 1905 ile 1907 yılları arasında Belçika'daki Liège Üniversitesi Elektrik Mühendisliği'nde 2 yıl

okumuştur. Sonra ülkesine geri dönmüş ve 1908 yılında Harkov Politeknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği'nden mezun olmuştur. Mezun olduktan sonra Almanya'daki Göttingen ve Berlin Humbolt Üniversitelerinde lisansüstü çalışmalar yapmıştır. 1911 yılında ise Sorbonne Üniversitesi'nde hava araçlarının stabilitesi üzerine doktorasını tamamlamıştır. Akademik çalışmaları esnasında genel aerodinamik teori yerine kanatlı hava araçları üzerine yoğunlaşmıştır. 1918 yılında Rusya'da Bolşevik Devrimi yaşanması üzerine ABD'ye göç etmiştir. Burada MIT ve Columbia Üniversitelerinde ders vermiş ve 1920 yılında döner kanatlı insansız hava araçları üzerine bilimsel literatürdeki ilk makalelerden birini yazmıştır. ABD ordusunun talebi üzerine Ohio Eyaleti'ne giderek ilk quadrotorlardan birini tasarlamaya başlamıştır. 1922 yılının aralık ayında "de Bothezat helicopter" adını verdiği quadrotoru geliştirmiştir. Söz konusu quadrotor ilk uçuşunda yerden 1.8 metre yükselebilmştir. Daha sonraki uçuşlarında ise 9.1 metre yüksekliğe kadar erişebilmiştir. Bir pilot ve beraberinde 4 yolcu taşıyabilen quadrotorun, maksimum hızı saatte 48 km olarak belirlenmiştir. Ancak yalnızca uygun bir rüzgar yakaladığında uçabilmesi ve kontrolünün çok zor olması nedeniyle 1924 yılında ABD ordusu tarafından quadrotorun üretimi iptal edilmiştir [16]. Resim 1.4'te de Bothezat helikopteri yer almaktadır.



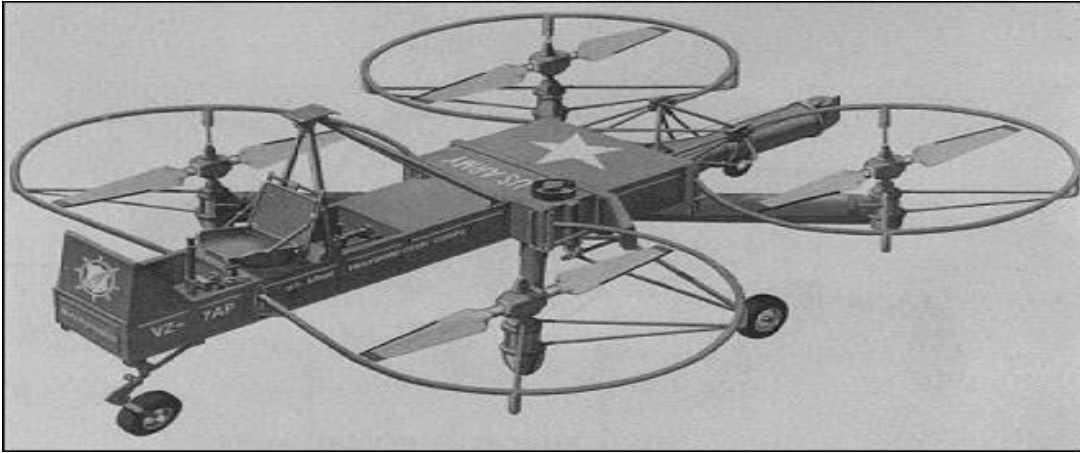
Resim 1.4 : de Bothezat quadrotorunun yandan ve üstten görünümü [17].

Convertawings şirketi Oehmichen ve Bothezat tarafından üretilen quadrotorları incelemiştir. Bu konseptlerden faydalanarak dört pervane kavramını geliştirmiştir. 1955 yılında Convertawings Model A isimli ilk prototipini üretmiş ve başarılı bir şekilde uçurmuştur. Convertawings Model A'nın ana gövdesi çelikten üretilmiş, 4 rotoru taşıyan kolları da alüminyumdan üretilmişti. Kontrol mekanizması son derece basitleştirilmiştir ve rotorlar arasındaki itme kuvvetinin diferansiyel değişimi ile elde edilmiştir. Güç, rotor tahrik sistemine çoklu V kayışlarla bağlanan iki motor tarafından sağlanmıştır. Şaft ve şanzıman kasaları, dört rotor arasında ara bağlantıyı sağlamıştır, böylece ihtiyaç duyulduğunda her iki motor da quadrotoru çalıştırabilmektedir. Convertawings Model A'nın üretimi başarılı deneme uçuşlarına karşın ABD ordusundaki bütçe kesintilerinden dolayı durdurulmuştur [18]. Convertawings Model A, Resim 1.5'te gösterilmektedir.



Resim 1.5 : Convertawings Model A [19].

Curtiss-Wright firması 1958'de ABD ordusunun kullanımı için Resim 1.6'da gösterilen Curtiss-Wright VZ-7 adını verdikleri quadrotoru üretmiştir. Curtiss – Wright VZ-7'nin bir pilot koltuğu, yakıt depoları ve üzerinde uçuş kontrolleri olan bir gövdesi vardı. Quadrotor her bir pervanenin itme gücü değiştirilerek kontrol ediliyordu, manevra kabiliyeti yüksek ve uçuşu kolaydı. Seyir hızı 40 km/sa olup maksimum 51 km/sa hıza ulaşabiliyordu. 200 feet (61 metre) yükseklikte uçabiliyordu. VZ-7 testlerde başarılı olmasına karşın ordunun standartlarını sağlamadığı gerekçesiyle 1960 yılında üretim programı durdurulmuştur [20].



Resim 1.6 : Curtiss-Wright VZ-7 [21].

Piasecki Havacılık şirketi 1980 yılında ABD donanması için ağır yükleri kaldırmada kullanılacak bir quadrotor tasarlamaya başladı. Bu maksatla Resim 1.7'de gösterilen Piasecki PA-97 isimli quadrotor üretilmiştir. Piasecki PA-97 helyumla şişirilmiş bir zeplinin altına bağlı alüminyum bir çerçeveye sahipti. Alüminyum çerçeveye bağlı dört adet Sikorsky H-34J helikopteri bulunmaktaydı. Bu çerçevenin yapısal niteliklerine ve stres analizine ilişkin eleştiriler dile getirilmiştir. İlk uçuşunu 28 Nisan 1986 tarihinde yapmıştır. 1 Temmuz 1986 tarihindeki bir test uçuşunda kalkıştan hemen sonra düşmüş, bir pilot ölmüş diğer 4 pilot yaralanmıştır. Bu kazadan sonra üretim süreci durdurulmuştur [22].



Resim 1.7 : Piasecki PA-97 [23].

Pilot tarafından idare edilen quadrotorların birtakım kazalar yaşaması ve özellikle ABD ordusunun standartlarını karşılayamaması nedeniyle insanlı quadrotorların savunma sanayiinde kullanımından vazgeçilmiştir. Bu durumda 1990'lı yıllardan itibaren quadrotor insansız hava araçlarının üretilmesi fikri doğmuştur. İnsanlı quadrotorların ise hava taksi olarak kullanılması veya akrobasi pilotları tarafından gösteri yarışlarında kullanılması süreci başlamıştır. Çinli EHang şirketi Resim 1.8'de verilen Ehang 184 isimli yolcu taşıyan quadrotoru üretmiştir. Ehang elektrikle çalışan bir quadrotor olup, otopilot tarafından idare ediliyor ve bir yolcu taşıyabiliyordu. Saatte 130 km hıza ulaşabiliyor ve 500 metre yükseklikte görev yapıyordu. Menzili ise 16 km'yd. Fırtınalı koşullarda, sisli koşullarda ve gece test uçuşları yapılmıştır. 2015 yılından itibaren yolcu taşımaya başlamış olup 2018 yılı Şubat ayında kadar 40 başarılı seyahat yapmıştır. Temmuz 2018'e kadar toplamda 40 tane üretilmiştir [24].



Resim 1.8 : Ehang 184 [25].

2022 yılında İsveç merkezli Jetson Aero şirketi Resim 1.9'da gösterilen Jetson One isimli quadrotoru üretmiştir. Bu quadrotor elektrikli olup bir pilot tarafından idare ediliyordu ve 20 dakikalık bir uçuş süresine sahipti. Quadrotorun toplam ağırlığı 115

kg olup saatte 101 km hıza ulaşabiliyordu. Quadrotor pervanelerinden birini kaybetmesi halinde de uçmaya devam etmektedir ancak bu tür bir durumda pilottan acil iniş yapmasını istemektedir. Üzerinde bulunan Lidar (light detection and range = ışık algılama ve menzil) sensörü sayesinde yere yaklaşıldığı zaman quadrotor otomatik olarak yavaşlamakta ve çarpışmayı önlemektedir. Şirket 2022 yılında 92.000 ABD doları üzerinden siparişleri almıştır ve 2023 yılında teslim edeceğini duyurmuştur [26].



Resim 1.9 : Jetson One [26].

1990'lı yılların sonundan itibaren quadrotor İHA'ların kullanılması gündeme gelmişti. Çinli Draganfly şirketi 1998 yılında kurulmuş ve 1999 yılında Resim 1.10'da verilen ilk ticari quadrotor İHA olan Draganflyer'ı üretmiştir. İlk üretilen quadrotor insansız hava aracı MIT ve Vanderbilt Üniversiteleri'ndeki araştırmalarda yoğun olarak kullanılmıştır. Ayrıca Inspector Gadget (Müfettiş Gadget) filminde ve ABD'li TV kanalı NBC'deki Community dizisinde kullanılmıştır [27]. Şirket 2001 yılında ilk entegre kameralı quadrotor İHA'yı da üretmiştir [28].



Resim 1.10 : Draganflyer [29].

2010 yılında Fransız Parrot firması Resim 1.11'de gösterilen AR.Drone isimli müşteriler tarafından kolayca uçurulabilen ilk ticari quadrotoru üretti. Bu quadrotor aynı zamanda Wifi bağlantısıyla uçurulabilen ilk quadrotordur [30].



Resim 1.11 : AR.Drone [31].

2015 yılında 3D Robotics Resim 1.12’de verilen Solo adlı quadrotoru üretti. Bu quadrotor üzerine eklenen GoPro kamera sayesinde profesyonel kalitede video kaydı yapabilen ilk quadrotor idi [30].



Resim 1.12 : Solo quadrotor [32].

Çinli şirket DJI 2016 yılında Phantom 4 adlı quadrotoru tanıttı. Phantom 4 görüntü işleme ve makine öğrenmesi özellikleri sayesinde GPS kullanmaksızın bir insanı, hayvanı veya yerdeki bir nesneyi takip edebilmektedir [30]. 2017 yılında üretilen ve Resim 1.13’te görseli verilen DJI Phantom 4 Advanced ise daha gelişmiş bir kameraya sahiptir. DJI Phantom 4 Advanced trafik izleme amacıyla da kullanılmaktadır. Trafikteki araçların türünü, hızını ve ivmesini ölçebilmektedir [33].



Resim 1.13 : DJI Phantom 4 Advanced [33].

2019 yılında Çinli Ehang şirketi Alman DHL kargo şirketi için Resim 1.14'teki kargo taşıyan quadrotoru üretmiştir. Söz konusu quadrotor 5 kg yük taşıma kapasitesine sahiptir. Bu quadrotor normalde 40 dakika süren kargo teslim süresini 8 dakikaya indirmiştir. Quadrotorun rotorların bozulması ihtimaline karşı yedekli sisteme sahiptir. Akıllı ve güvenli uçuş kontrol sistemi, yüksek hassasiyetli GPS, akıllı rota planlama özelliği, otonom uçuş ve gerçek zamanlı ağ bağlantısına sahiptir. Gelecekte yüz tanıma ve kimlik tarama özelliklerinin de quadrotora eklenmesi düşünülmektedir [34].



Resim 1.14 : Ehang DHL kargo quadrotoru [34].

2021 yılında Hollanda'daki Delft Teknik Üniversitesi'nde Resim 1.15'te gösterilen ambulans quadrotor geliştirilmiştir. Bu şekilde insanlara hızlı bir şekilde ilk yardım yapılması planlanmaktadır. Quadrotor kamerası sayesinde 112 ilk yardım ekipleriyle ilk yardım ekipleri arasında video görüşme imkanı da sağlamaktadır [35].



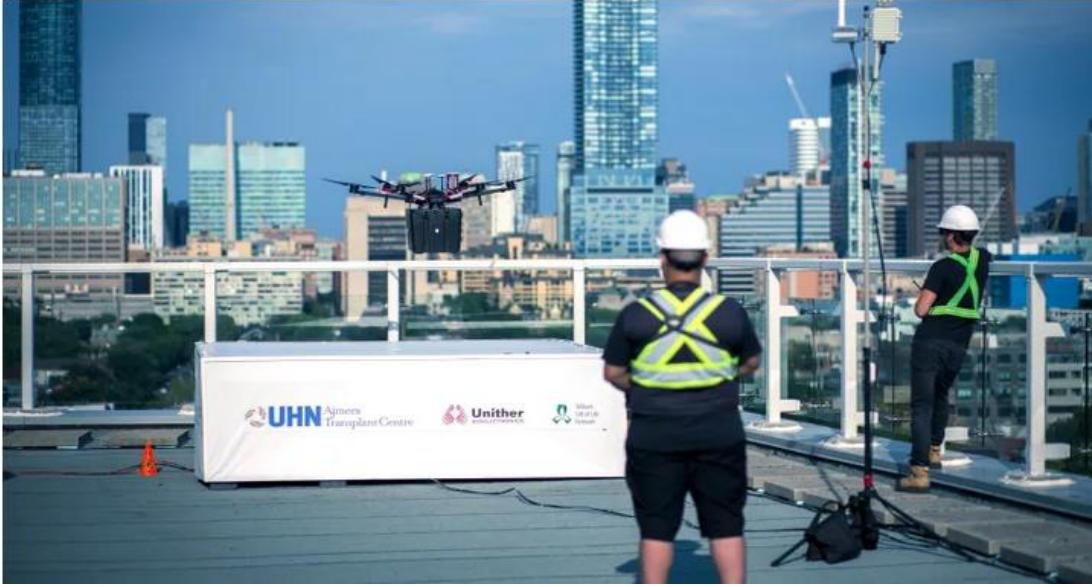
Resim 1.15 : Ambulance Drone [35].

2022 yılında Çinli EFT şirketi tarımsal ilaçlamada kullanılması amacıyla dört rotorlu ve altı rotorlu insansız hava araçları üretmiştir. Çinli şirketin Resim 1.16’da yer alan E Series Hexacopter isimli tarımsal ilaçlama İHA’sı 16 litre tarım ilacı taşıma kapasitesine sahiptir. Üzerindeki pompa düzeneği vasıtasıyla tarım ilacını püskürtebilmektedir [36].



Resim 1.16 : EFT E Series Hexacopter [36].

2021 yılında Kanada’daki Unither Bioélectronique şirketi döner kanatlı İHA kullanarak Toronto şehrindeki iki hastane arasında organ nakli amacıyla akciğer organını taşımıştır. Organ taşıma amacıyla döner kanatlı İHA kullanılmasının nedeni zaman kaybını önlemek olarak açıklanmıştır. Bu şekilde organın taşınması 6 dakika sürmüştür. Karayolu ile organ taşıma esnasında gecikme yaşanması halinde taşınan organın dokusunda bozulma meydana gelebilmekte ve nakil için uygunluğunu kaybedebilmektedir [37]. Resim 1.17’de organ taşıma esnasında çekilen fotoğraf verilmektedir.



Resim 1.17 : İHA'nın organ taşıma esnasında çekilen fotoğrafı [37].

2019 yılında Türkiye'deki Asisguard firması Resim 1.18'da yer alan Songar isimli makineli tüfek taşıyan quadrotor İHA'yı üretmiştir. Songar silahlı bir drone olması açısından quadrotorların savunma sanayiindeki kullanımı açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir. Songar yer seviyesinden 300 metre deniz seviyesinden 3000 metre irtifada operasyon yapabilmektedir. Harita üzerinde rota planlayabilmekte, otonom uçuş gerçekleştirebilmekte ve 5 km menzilde görev icra edebilmektedir. Songar gerçek zamanlı görüntü işleyebilmektedir. Kritik batarya veya bağlantı kopması durumunda eve dönebilme özelliğine sahiptir [38]. İlk başta otomatik makineli tüfek taşıyan Songar zaman içerisinde geliştirilmiş ve 6 adet mini roket atabilme özelliğini kazanmıştır [39].



Resim 1.18 : 6 adet mini roket taşıyan Songar [39].

1.3 Literatür Araştırması

Quadrotorların dikey iniş kalkış yapabilmesi, piste ihtiyaç duymaması, kendi ekseni etrafında dönebilmesi, havada asılı kalabilmesi, bozuk zeminler üzerinde iniş kalkış yapabilmesi onu kanatlı İHA'lara karşı avantajlı kılmaktadır [40]. Quadrotor İHA'lar arama ve kurtarma, gözetleme, maden arama, yangınlarla mücadele, tarımsal ilaçlama, kargo taşımacılığı, trafik izleme, hava fotoğrafçılığı ve video çekimi, ilk yardım kiti taşıma, hastaneler arasında nakil için organ taşıma, terörle mücadele ve sınır devriyeliği yapma gibi çeşitli görevlerde kullanılmaktadır [41, 42]. Quadrotor İHA'nın bu zor görevleri başarılı bir şekilde yerine getirebilmesi için yükselme zamanının hızlı olması, uçuş esnasında az salınım yapması ve verilen yörüngeleri başarılı bir şekilde takip edebilmesi gerekmektedir [43]. Ayrıca parametre belirsizliği ve gürültü gibi ideal olmayan koşullar altında çalışmak zorunda kalabileceği göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle quadrotorun irtifasının ve pozisyon açılarının (yalpa, yunuslama ve sapma) kontrolü için gürbüz kontrolcü tasarımı önem kazanmaktadır.

Bugüne kadar pek çok araştırmacı quadrotor İHA'ların kontrolü üzerine çalışmalar yapmıştır. Bazı araştırmacılar yalnızca irtifa kontrolüne veya pozisyon açılarının kontrolüne odaklanırken, bazıları da bütüncül bir yaklaşımla hem irtifa hem de pozisyon açılarının kontrolüne odaklanmıştır. Pek çok araştırmacı yapısının basitliği ve parametrelerinin kolay ayarlanabilir olması nedeniyle PID kontrolcüyü tercih etmektedir. Yine pek çok araştırmacı quadrotorun sistem dinamiklerini doğrusallaştırmakta, bazı aerodinamik katsayıları da ihmal etmektedir. Ayrıca çok sayıda araştırmacı tasarladıkları kontrolcülerini yalnızca ideal ortamda test etmekte, parametre belirsizliği ve gürültü olmayacağını varsaymaktadır. Bu tarz yaklaşımların gürbüz kontrolcü tasarımından uzak olduğu açıktır.

Avustralya'daki New South Wales Üniversitesi Mühendislik ve Bilişim Teknolojisi Bölümü'nden Dr. Fendy Santoso ve arkadaşları bir Quadrotor İHA için klasik PD (Oransal Türevsel) ve bulanık PD kontrolcü tasarımları gerçekleştirmişlerdir. Bu iki kontrolcüyü yörünge takibi performansı açısından karşılaştırmışlardır. Ayrıca parametre belirsizliği ve rüzgar altında simülasyonlar yapmışlardır. Bütün bu simülasyonlar sonucunda bulanık PD kontrolcünün klasik PD kontrolcüden daha gürbüz olduğu ispatlanmıştır [44].

Fransa'daki Lille Üniversitesi'nden Wang ve arkadaşları bir Quadrotor İHA için PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Yaptıkları çalışmada Coriolis terimlerini, merkez momentini ve kuvvetini ihmal etmişlerdir. Tasarladıkları PID kontrolcüyü model belirsizlikleri altında test etmişlerdir [45].

Avustralya'daki Deakin Üniversitesi'nden Connor ve arkadaşları bir quadrotor İHA için irtifa kontrolcüsü tasarlamıştır. PID kontrolcünün katsayıları parçacık sürü optimizasyonu kullanarak optimize etmişlerdir. Connor ve arkadaşları quadrotorun düşük hızlarda uçtuğu gerekçesiyle çalışmalarında sürtünme katsayısını ihmal etmiştir. Ayrıca sadece irtifa kontrolcüsüne odaklanmış ve quadrotorun pozisyon açılarını kontrol etmek için herhangi bir kontrolcü tasarımı yapmamışlardır [46].

ABD'deki Kaliforniya Üniversitesi Berkeley'den Kotaru ve arkadaşları quadrotorun dinamiklerini doğrusallaştırmış ve bazı katsayılarını ihmal ederek bir model hazırlamıştır. Doğrusallaştırılmış quadrotor modelinin pozisyon açılarını LQR (Doğrusal Karesel Düzenleyici) kontrolcü ile kontrol etmişlerdir [47].

Portekiz'de bulunan Instituto Superior Técnico Makine Mühendisliği bölümünden Martins ve arkadaşları öncelikle doğrusallaştırma yaparak quadrotor İHA'nın modelini basitleştirmiştir. Çalışmalarında jiroskopik etkiler, yer etkisi ve aerodinamik sürüklenme katsayısı gibi pek çok faktörü ihmal ettiklerini açıklamışlardır. Basitleştirdikleri bu quadrotor modelinin yörünge takibi için LQR kontrolcü tasarımı yapmışlardır [48].

Çin'deki Shenzhen Polytechnic Üniversitesi'nden Lin ve arkadaşları quadrotor İHA'nın irtifa kontrolü için LQG (Linear Quadratic Gaussian) kontrolcü tasarlamıştır. LQG kontrolcü için doğrusallaştırılmış bir durum uzayı modeli kullanmışlardır. Quadrotorun yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için bir kontrolcü tasarımı yapmamış, irtifa kontrolüne odaklanmışlardır [49].

Çin'deki Nanjing Posta ve Telekomünikasyon Üniversitesi'nden Zhao ve arkadaşları quadrotorun irtifasını ve pozisyon açılarını kontrol etmek için hata toleranslı kayan kipli kontrolcü tasarımı yapmıştır. Jiroskopik etkileri ve bundan kaynaklanan torkları ihmal etmişlerdir. Klasik kayan kipli kontrolcülerde görülen çatırdama etkisini ortadan kaldırmak için satürasyon fonksiyonu kullanmışlardır [50].

Çin'deki Şanghai Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nden Cheng ve arkadaşları quadrotorun havada asılı kaldığı durumu kontrol edebilmek için kayan kipli

kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Problemi basitleştirmek için hava direncini ihmal etmişler ve jiroskopik etkileri görmezden gelmişlerdir [51].

İtalya'daki Politecnico di Milano Üniversitesi'nden Pekkaptan geribesleme ve ileribesleme doğrusallaştırma yöntemleriyle quadrotorun dinamiklerini doğrusallaştırmıştır. Bu şekilde doğrusal olmayan quadrotor modelini Brunovski Kanonik Formunda doğrusal bir sistem haline getirmiştir. Daha sonra doğrusallaştırdığı quadrotor modeli için yüksek dereceli kayan kipli kontrolcü tasarlamıştır [52].

Almanya'daki Stuttgart Üniversitesi'nden Luo ve arkadaşları doğrusal olmayan model öngörülebilir kontrol (MPC) tasarımı yapmıştır. Bu kontrolcüyle birlikte Gauss Süreç Regresyonu yöntemini kullanarak yörünge takibi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında Pixhawk uçuş kontrol ünitesini kullanmışlardır. Ayrıca kontrolcü tasarımında quadrotorun dönme dinamiklerini ihmal etmişler ve kontrolcünün quadrotorun açışal hızlarını doğrudan kontrol edebileceğini varsaymışlardır [53].

Çin'deki Hong Kong Politeknik Üniversitesi'nden Jiang ve arkadaşları quadrotor İHA'nın kontrolü için sinir ağları temelli model öngörülebilir kontrol (MPC) tasarlamıştır. Yaptıkları tasarımda sapma açısı uçuş boyunca 0 kabul etmişler ve kontrolcü tasarımından dışlamışlardır. Bu durumda yaptıkları tasarımda quadrotorun hiçbir zaman kendi eksenini etrafında dönmeyeceğini varsaymışlardır [54].

Çin'deki Macau Üniversitesi Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden Cabecinhas ve arkadaşları asılı yük taşıyan bir quadrotorun yörünge takibi için Lyapunov tabanlı bir kontrolcü tasarlamıştır. Yörünge izleme boyunca yükü taşıyan ipin her zaman gergin durumda olacağı varsayılmıştır. Giriş yanıtının 0,1 saniye gecikmesine yol açan ve pil voltajına bağımlılığı içeren bazı giriş dinamikleri ihmal edilmiştir. Ayrıca hiç haberleşme ve ölçüm hatası olmadığı varsayılmıştır [55].

Meksika'daki Instituto Politécnico Nacional'den Alcocer ve arkadaşları bir quadrotor İHA'nın yörünge takibi için Lyapunov tabanlı kontrolcü tasarlamıştır. Kapalı çevrim sisteminin lokal asimptotik kararlılık Lyapunov teoremi sayesinde sağlanmıştır. Tasarladıkları kontrolcüyü PD (oransal türevsel) ve PID (oransal integral türevsel) kontrolcülerle karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmalı analiz için kullandıkları PD kontrolcünde ise sapma açısını 0 olarak kabul etmişlerdir. Bu durumda quadrotorun kendi eksenini etrafında dönme hareketi ihmal edilmiştir [56].

Çin'deki Xinyu Üniversitesi Makine ve Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden Zhou ve arkadaşları quadrotorun yörünge takibi için geri adımlamalı kontrolcü tasarımı yapmıştır. Kontrolcü tasarımını yaparken aerodinamik sürtünme kuvveti F_d 'yi ve aerodinamik tork M_d 'yi ihmal etmişlerdir [57].

Macaristan'daki Budapeşte Teknoloji ve Ekonomi Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilişim Bölümü'nden Bodó ve Lantos bir quadrotor İHA için geri adımlamalı kontrolcü tasarlamıştır. Quadrotorun dinamik modelini basitleştirmişlerdir. Quadrotorun yavaş hareket edeceğini ileri sürerek bütün aerodinamik etkileri ihmal etmişlerdir. Yalpa, yunuslama, sapma açılarının kontrolünde ve x, y, z eksenlerindeki pozisyon kontrolünde aerodinamik sürtünme kuvvetini ihmal etmişlerdir [58].

Quadrotor İHA'lar konusunda TOBB ETÜ'de çok sayıda araştırma yapılmıştır. TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği öğretim üyesi Mehmet Önder Efe alçak irtifadan uçan bir quadrotor insansız hava aracının irtifa kontrolü için kayan kipli kontrolcü tasarımı yapmıştır [59]. Efe daha sonraki çalışmalarında bir quadrotor İHA'nın yüksekliğini ve yalpa, yunuslama, sapma açılarını kontrol etmek için integral kayan kipli kontrolcü tasarlamıştır. Bu kontrolcüyü değişik rüzgar kuvvetleri altında test etmiştir. Düşük şiddetli rüzgarlarda quadrotorun yörüngeyi takip edebildiği gözlenirken, yüksek şiddetli rüzgarlarda quadrotorun yörüngeyi takip edemediğini gözlemlenmiştir [60].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Mert Önkol, Prof. Dr. Mehmet Önder Efe'nin danışmanlığında "Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracının tasarımı, modellenmesi ve kontrolü" başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Bu tezde bir quadrotor İHA modellenmiştir. Bu quadrotor için PID ve kayan kipli kontrolcüler tasarlamış, sonuçları karşılaştırılmıştır [61].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nden Nevrez İmamoğlu Prof. Dr. Mehmet Önder Efe'nin danışmanlığında "Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracıyla video tabanlı üst düzey işlevlerin tasarlanması" başlıklı yüksek lisans tezini yazmıştır. Bu tezde quadrotor İHA'nın üzerine monte edilen bir kamerayla farklı görüntü ve video işleme teknikleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [62].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği'nden Aydın Eresen, Mehmet Önder Efe'nin danışmanlığında "Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracının görüntü

tabanlı kontrolü” başlıklı yüksek lisans tezini yazmıştır. Tezde bir quadrotorun Google Earth programının üç boyutlu sanal ortamında otonom olarak engellere çarpmaksızın belli hedeflere varabilmesi için uygulamalar yapılmıştır [63].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nden Necdet Sinan Özbek, Coşku Kasnakoğlu’nun tez danışmanlığında “İnsansız hava araçlarında farklı kontrol tekniklerinin performans karşılaştırması” başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Bu tezde öncelikle döner ters sarkaç incelenmiştir. Bu sistem üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan birtakım kontrol metotları çalışılmıştır. Daha sonra, geliştirilen algoritmalar quadrotoru kontrolü etmek amacıyla kullanılmıştır. Farklı kontrolcü tekniklerinin yalpa, yunuslama ve sapma referanslarını takip performansı incelenmiştir [64].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nden Övünç Elbir, Coşku Kasnakoğlu’nun danışmanlığında “Dört rotorlu insansız hava aracı için otopilot tasarımı” başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Tez kapsamında bir quadrotor İHA için otopilot tasarımı yapılmıştır. Quadrotorun kontrolü için de PID kontrolcü kullanılmıştır [65].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nden Anıl Ufuk Batmaz, Coşku Kasnakoğlu’nun danışmanlığında “Çok rotorlu insansız hava aracı tasarımı ve kablosuz algılayıcı ağlarda kaynak ataması eniyilemesi” başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Tezin ilk kısmında bir quadrotorun tasarlanması ve hazır bir otopilot sisteminin kullanılması üzerinde durulmuştur. Tezin ikinci kısmında ise ağ yaşam süresi üzerinde durulmuştur [66].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nden Ceren Cömert, Coşku Kasnakoğlu’nun danışmanlığında “Dört rotorlu bir insansız hava aracı için pid ve kayan kipli kontrolcü tasarımı ve kıyaslanması” başlıklı yüksek lisans tezini yazmıştır. Bu tezde, quadrotor İHA’yı kontrol etmek amacıyla PID ve kayan kipli kontrolcüler tasarlanmış ve performansları karşılaştırılmıştır [67].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nden Bekircan Keçeoğlu, Coşku Kasnakoğlu’nun tez danışmanlığında “Dört rotorlu bir insansız hava aracına field programmable gate array tabanlı irtifa kontrolcüsü tasarımı” başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır. Keçeoğlu, bir quadrotor İHA için FPGA tabanlı irtifa kontrolcüsünü tasarlarken farklı yöntemler kullanmış ve bunların performanslarını

kıyaslamıştır. Ayrıca parametre belirsizliği ve Gauss gürültüsü altında irtifa takibi simülasyonları yapmıştır [68].

TOBB ETÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden Mehmet Karahan, Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu'nun tez danışmanlığında "Dört rotorlu bir insansız hava aracının modellenmesi ve PID kontrolcü tasarımı" başlıklı yüksek lisans tezini hazırlamıştır [69, 70]. Başka bir çalışmada ise Mehmet Karahan, Prof. Dr. Hamza Kurt ve Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu kameralı ve programlanabilir bir drone olan Tello Edu quadrotorunu kullanarak yüz tanıma ve takip işlemini gerçekleştirmiştir [71]. Karahan ve Kasnakoğlu, bir diğer çalışmada A* yapay zeka algoritmasını kullanarak patika planlayan ve engelden kaçan bir quadrotor geliştirmiştir [72]. Mehmet Karahan, Ahmet Nuri Akay ve Coşku Kasnakoğlu bir quadrotor İHA'nın parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında gürbüz kontrolünü ele alan bir çalışma da gerçekleştirmiştir [73]. Karahan ve Kasnakoğlu bir quadrotor İHA için Lyapunov tabanlı kontrolcü tasarımı ve geri adımlamalı kontrolcü tasarımı da yapmıştır [74, 75]. Karahan ve Kasnakoğlu SCIE (Science Citation Index Expanded) indeksli *Control Engineering and Applied Informatics* dergisinde, PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcülerin normal koşullar altında, + %50 ve - %50 parametre belirsizliği altında, bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında ve eş zamanlı parametre belirsizliği ile bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında karşılaştırıldığı bir yayın da yapmıştır [76]. Karahan İnal ve Kasnakoğlu bir Quadrotor İHA için hata toleranslı süper bükümlü kayan kipli kontrolcü tasarlamıştır. Çalışmada tek bir rotorda güç kaybı yaşanması durumunda verilen referansların takip edilebilmesi konusu ele alınmıştır. Tasarlanan kontrolcü tek bir rotorda %40 güç kaybı yaşanması durumunda verilen sinüzoidal referansları az bir hata ile takip edebilmiştir [77]. Karahan, Kasnakoğlu ve Akay SCIE indeksli *Studies in Informatics and Control* dergisinde bir quadrotor İHA'nın elektronik cihazlardaki arka plan gürültüsü olan pembe gürültü altında ve sinüzoidal bozucu altında gürbüz geri adımlamalı kontrolünü ele alan bir çalışma da yapmıştır [78].

1.4 Literatüre Yapılan Katkılar

Literatür taraması incelendiğinde quadrotor İHA için yapılan pek çok kontrolcü tasarımında sistem dinamiklerinin doğrusallaştırıldığı görülmektedir. Ayrıca bazı aerodinamik katsayılar, aerodinamik sürtünme kuvveti, jiroskopik etkiler ve bundan

kaynaklanan torklar, yer etkisi de ihmal edilmiştir. Bazı araştırmacılar da çalışmalarında sapma etkisini 0 kabul ederek quadrotorun kendi eksenini etrafında dönmeyeceğini varsaymıştır. Yine pek çok çalışmada basit yapısı ve parametrelerinin kolay ayarlanabilir olması nedeniyle PID kontrolcü tasarımı kullanılmıştır. Araştırmacılar, kontrolcüleri gürültü altında analiz ederken sadece beyaz Gauss gürültüsü altında çalışmalar yapmıştır. Renkli gürültüler altında analiz yapılmamıştır. Ayrıca sert dönüş manevraları yapmamış, genellikle birim basamak takibi veya dairesel yörünge takibi yapmışlardır. Araştırmacılar çoğunlukla + %20 ve + %25 aralığında parametre belirsizliği uygulamıştır. %50 gibi yüksek oranlarda parametre belirsizliği uygulamamış ve negatif parametre belirsizliği vermemişlerdir. Ayrıca eş zamanlı parametre belirsizliği ve Gauss gürültüsü altında analiz yapmamış, ikisini ayrı ayrı analiz etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında ise öncelikle bir quadrotor İHA'nın doğrusal olmayan modellenmesi yapılmıştır. Doğrusallaştırma yapılmamış, herhangi bir aerodinamik katsayı, sürtünme katsayısı ihmal edilmemiştir. Sapma açısı 0 kabul edilmemiş, bütün açısal hareketler dikkate alınmıştır. Oluşturulan doğrusal olmayan quadrotor modeli MATLAB/Simulink programını kullanarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.

Daha sonra quadrotorun yüksekliğinin, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için kontrolcü tasarımı bölümüne geçilmiştir. PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı olarak toplamda 3 kontrolcü geliştirilmiştir. Tez kapsamında önerilen geri adımlamalı kontrolcünün grbzlyđn kanıtlamak için klasik PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcülerle karşılaştırmalı grbzlyđ analizi yapılmıştır.

Diğer akademik çalışmalardan farklı olarak çok geniş kapsamlı bir grbzlyđ analizi gerçekleştirilmiştir. Her üç kontrolcü de normal koşullar altında, + %50 parametre belirsizliği altında, - %50 parametre belirsizliği altında, Gauss gürültüsü altında, eş zamanlı parametre belirsizliği ve Gauss gürültüsü altında, pembe gürültü altında, kahverengi gürültü altında, mavi gürültü altında, mor gürültü altında ve sinüzoidal bozucu altında test edilmiştir. Ayrıca kontrolcülerin sert manevra yapabilme kabiliyetini test etmek amacıyla üçgen referans ve sinüzoidal referans takibi simülasyonları yapılmıştır. Her koşul için üç kontrolcünün de yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler kullanarak matematiksel bir grbzlyđ analizi yapılmıştır. Geri adımlamalı kontrolcünün bütün koşullarda en az aşıma ve en kısa oturma zamanına sahip olan kontrolcü olduğu

gözlemlenmiştir. Bütün bu analizlerin sonucunda geri adımlamalı kontrolcünün klasik PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcülerden daha gürbüz olduğu ispat edilmiştir.

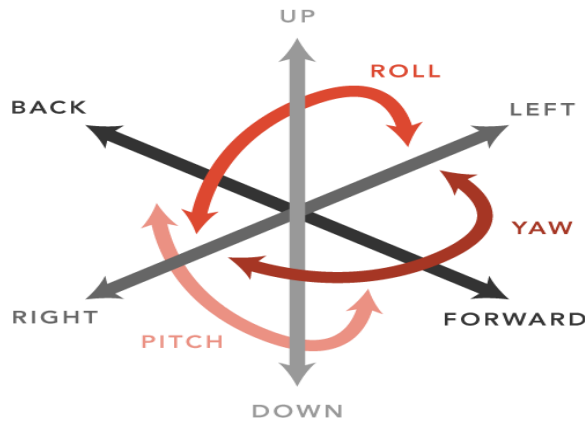


2. QUADROTOR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ

Bu bölümde öncelikle quadrotor İHA'nın yapısı ve uçuş ilkeleri anlatılacaktır. Daha sonra quadrotorun doğrusal olmayan matematiksel denklemleri çıkartılacaktır. Araştırmada kullanılan quadrotor modelinin fiziksel parametreleri verilecektir. Son olarak quadrotorun MATLAB/Simulink ortamına aktarılması anlatılacaktır.

2.1 Quadrotor İHA'nın Yapısı ve Uçuş İlkeleri

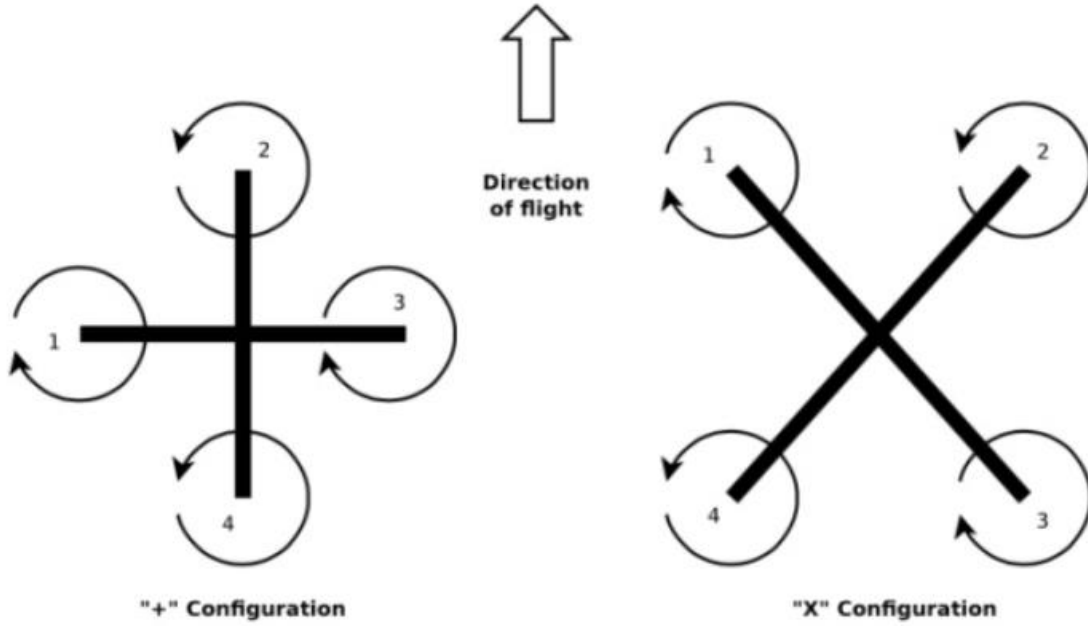
Quadrotor İHA, dikey iniş kalkış yapabilen (VTOL), simetrik yapıya ve dört rotorlu bir hava aracıdır. Doğru akım motorlarının dönen kısmı rotor olarak ifade edilmektedir. Quadrotorun dört rotoru tarafından döndürülen dört pervanesi bulunmaktadır. Quadrotorun rotor çiftleri birbirine zıt olarak dönmektedir. Ancak aynı rotor çifti içinde yer alan iki rotor birbiriyle aynı yönde döner. Böylece rotorların ürettiği anti tork dengelenerek quadrotorun sapması engellenmektedir. Quadrotor 6 serbestlik derecesinde (6 DOF) hareket edebilmektedir. 6 serbestlik derecesi katı bir cismin 3 boyutlu uzayda serbestçe hareket edebildiği eksen sayısını ifade etmektedir. 6 serbestlik derecesi 3 dikey eksendeki dönme hareketlerini ve ileri-geri (forward-back), yukarı-aşağı (up-down), sağa-sola (right-left) gidebilmeyi belirtir. 6 serbestlik derecesi 12 durumdan oluşmaktadır. Şekil 2.1'de 12 durum şematik olarak verilmektedir. İlk 6 durum Euler açıları olarak bilinen yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) ile bunların açısal hızları olan p , q ve r 'dir. İkinci 6 durum x , y , z ile bunlardan oluşan doğrusal hızlar olan u , v ve w olmaktadır [79].



Şekil 2.1 : 6 serbestlik derecesi.

Quadrotor İHA'lar artı (+) ve çapraz (x) olmak üzere iki tip konfigürasyona sahiptir. Artı konfigürasyonlu quadrotorlarda yalpa ve yunuslama açılarını kontrol ederken karşılıklı 2 rotor kullanılır, çapraz konfigürasyonlu quadrotorlarda ise 4 rotor kullanılır. Artı konfigürasyonlu quadrotorlarda x ve y yönlerinde hareket edebilmek için, 2 rotor kullanılır, çapraz konfigürasyonlu quadrotorlarda ise 4 rotor kullanılır. Bu hareketleri yaparken 4 rotorun birlikte kullanılması gücün dağılmasını sağlayarak, eyleyici limitlerinin aşılmasını önler. Böylece arıza yaşanması ihtimali de azalır. Buna ek olarak, çapraz konfigürasyonlu quadrotorların, artı konfigürasyonlu quadrotorlara göre manevra kabiliyeti daha yüksektir [80].

Artı konfigürasyon ve çapraz konfigürasyonun şematik gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Sol taraftaki şekil artı konfigürasyonlu quadrotoru, sağ taraftaki şekil ise çapraz konfigürasyonlu quadrotoru göstermektedir. İki rotor saat yönünde (CW) dönmektedir. Diğer iki rotor da saat yönünün tersi (CCW) yönde dönmektedir [81].



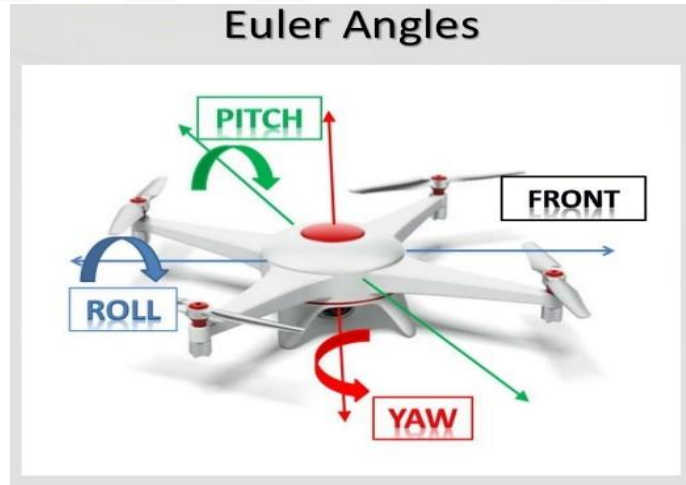
Şekil 2.2 : Soldan sağa artı ve çapraz konfigürasyonlu quadrotorların gösterimi.

Bu tez çalışmasında çapraz konfigürasyonlu bir quadrotor kullanılmıştır. Çapraz konfigürasyonlu bir quadrotorda (1,3) ve (2,4) birbirine zıt ancak kendi içinde aynı yönde döner. Şekil 2.3 çapraz konfigürasyonlu quadrotorda rotorların dönüş yönünü göstermektedir.



Şekil 2.3 : Çapraz konfigürasyonlu quadrotorda rotorların dönüş yönü.

Quadrotorun 3 eksendeki hareketleri, dikey eksende hareket, yalpa hareketi, yunuslama hareketi ve sapma hareketi şeklinde ifade edilebilir. Şekil 2.4 quadrotorun 3 eksendeki hareketlerini göstermektedir. Şekil 2.4'te 3 farklı eksen kırmızı, yeşil ve mavi renklerle gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Quadrotorun 3 eksendeki hareketleri.

2.1.1 Dikey eksendeki hareket

Quadrotor İHA'nın dört rotorunun devirlerinin aynı oranda artırılması ya da azaltılması sonucu dikey eksendeki hareket gerçekleşir. Quadrotor havada asılı dururken, dört rotorunun devirleri aynı oranda arttırılırsa rotorların ürettiği itki kuvveti quadrotorun ağırlığını geçerek yukarı doğru harekete yol açar. Quadrotor

havada asılı dururken dört rotorun devirleri aynı oranda azaltılırsa rotorların ürettiği itki kuvveti quadrotorun ağırlığından daha az olacağından alçalma hareketi oluşur.

2.1.2 Yalpa hareketi

Yalpa hareketi quadrotorun sol ve sağ rotorlarının dönüş hızlarındaki farktan oluşur. Sol ve sağ rotorların dönüş hızlarındaki farktan ötürü kaldırma kuvvetleri arasında oluşan fark yalpa açısının değişmesini sağlar. Yalpa açısı quadrotorun sola veya sağa hareketini sağlamaktadır.

2.1.3 Yunuslama hareketi

Yunuslama hareketi ön ve arka rotorların dönüş hızlarındaki farktan dolayı ortaya çıkar. Ön ve arka rotorların dönüş hızları arasındaki farktan ötürü kaldırma kuvvetleri arasında fark oluşması yunuslama açısının değişmesini sağlar.

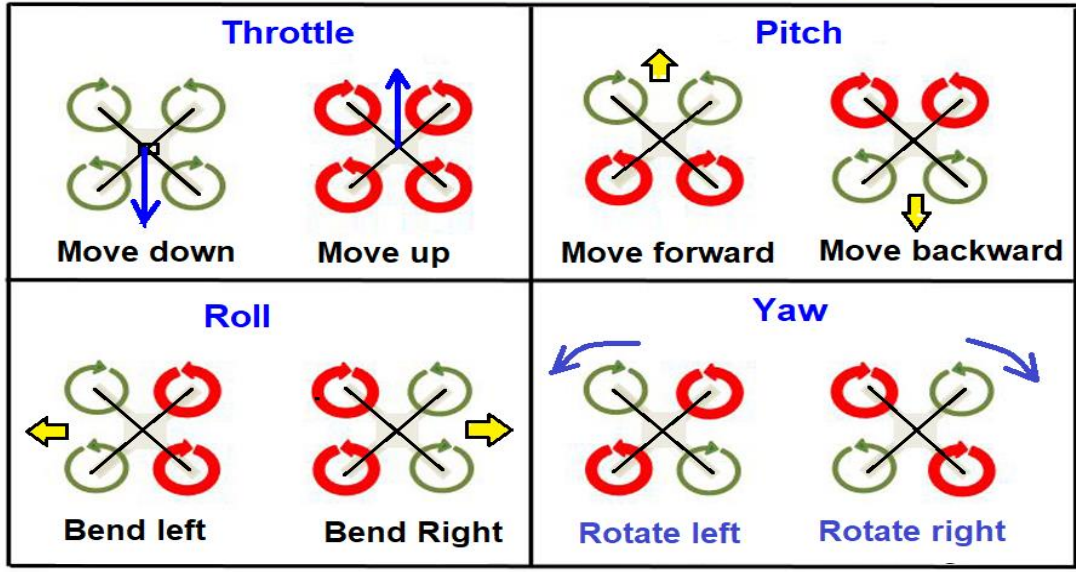
2.1.4 Sapma hareketi

Aynı istikamette dönen rotor çiftinin hızı, diğer yönde dönen rotor çiftinin hızına kıyasla değiştiğinde quadrotor kendi eksenini etrafında dönme hareketi yapar. Bu harekete sapma hareketi denir.

2.1.5 Quadrotorun eksenlere göre hareketlerinin şematik gösterimi

Önceki kısımlarda quadrotorun hareketleri açıklanmıştı. Bu bölümdeyse dikey eksenindeki hareket, yalpa hareketi, yunuslama hareketi ve sapma hareketi tek bir şeklin üzerinde anlatılmıştır. Böylece söz konusu hareketlerin görsel üzerinden anlatılarak daha iyi anlaşılması sağlanmıştır. Şekil 2.5'te bütün hareketler gösterilmiştir. Dikey eksenindeki alçalma (Move down) ve yükselme (Move up) hareketi Gaz (Throttle) başlığı altında gösterilmiştir. Yalpa hareketi Roll başlığı altında gösterilmiştir. Yalpa hareketi quadrotorun sola (Band left) ve sağa (Band right) gitmesini sağlar. Yunuslama hareketi Pitch başlığı altında gösterilmiştir. Yunuslama hareketi quadrotorun ileri (Move forward) ve geri (Move Backward) gitmesini sağlar. Sapma hareketi Yaw başlığı altında gösterilmiştir. Sapma hareketi quadrotor havada asılı durumdayken kendi eksenini etrafında sola (Rotate left) ve sağa (Rotate right) dönmesini belirtir.

How to Fly a Drone: Controls of Quadcopter



 Normal speed  High Speed

Şekil 2.5 : Gaz (throttle), yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) hareketleri.

Yukarıdaki Şekil 2.5'te kırmızı renkli daireler yüksek devir hızıyla (high speed) dönen rotorları belirtmektedir. Yeşil renkli daireler ise normal devir hızıyla (normal speed) dönen daireleri belirtmektedir. Rotor çiftleri arasındaki dönüş hızı farklılıkları quadrotorun hangi yöne gideceğini belirlemektedir.

Dört rotor da aynı anda yüksek devir hızıyla dönerse, üretilen itki kuvveti quadrotorun ağırlığını geçer ve quadrotor yukarı doğru harekete başlar. Dört rotorun da aynı anda dönüş hızı azalır ve ürettikleri itki kuvveti quadrotorun ağırlığından az olursa quadrotor alçalmaya başlar.

Quadrotorun sağ taraftaki rotorları sol taraftaki rotorlarına kıyasla daha yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor sola doğru yalpa (roll) hareketi yapar. Sol taraftaki rotorlar sağ taraftaki rotora göre daha yüksek devir hızıyla dönerse sağa doğru yalpa (roll) hareketi oluşur.

Quadrotorun arka taraftaki rotorları ön taraftaki rotora göre daha yüksek devir hızıyla dönerse ileri doğru yunuslama (pitch) hareketi oluşur. Ön taraftaki rotorlar arka taraftaki rotora göre daha yüksek devir hızıyla dönerse geriye doğru yunuslama (pitch) hareketi oluşur.

Aynı istikamette dönen 2 ve 4 nolu rotorlar 1 ve 3 nolu rotorlara kıyasla daha yüksek bir devir hızıyla dönerse quadrotor kendi eksenini etrafında sol tarafa doğru dönerek sapma (yaw) hareketi yapar. Aynı istikamette dönen 1 ve 3 nolu rotorlar 2 ve 4 nolu rotorlara kıyasla daha yüksek bir devir hızıyla dönerse quadrotor kendi eksenini etrafında sağa doğru dönerek sapma (yaw) hareketi yapar.

2.2 Quadrotorun Doğrusal Olmayan Modeli

Bu bölümde quadrotorun doğrusal olmayan matematiksel denklemlerinin çıkarımı anlatılacaktır. Öncelikle yere bağlı eksen takımı ile gövdeye bağlı eksen takımı arasındaki ilişki anlatılacaktır. Buradaki gövde quadrotor hava aracının gövdesidir. Döndürme (rotasyon) matrisi sayesinde yere bağlı eksen takımındaki bir denklem gövdeye bağlı eksen takımındaki bir denkleme dönüştürülebilir. Bunun için Euler Dönüşümü metodu kullanılmaktadır. Bu metotta bir eksen takımı diğer eksen takımını ile çakışacak şekilde sırasıyla 3 kez döndürülmektedir. Böylece yere bağlı eksen takımından gövdeye bağlı eksen takımına dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Yere bağlı eksen takımının gövdeye bağlı eksen takımı etrafında sırasıyla yalpa (φ), yunuslama (θ) ve sapma (ψ) açılarıyla döndürülmesi neticesinde Eşitlik (2.1-2.3) ile verilen denklemler oluşur.

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c(\varphi) & s(\varphi) \\ 0 & -s(\varphi) & c(\varphi) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} c(\theta) & 0 & -s(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ s(\theta) & 0 & c(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} c(\psi) & s(\psi) & 0 \\ -s(\psi) & c(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$R(\psi)$, $R(\theta)$ ve $R(\varphi)$ matrisleri birbirine dik ve çarpımları bir vektörü yere bağlı eksen takımından gövdeye bağlı eksen takımına çeviren dönüşüm (rotasyon) matrisini vermektedir. Bu çarpım Eşitlik (2.4)'te, çarpım sonucu oluşan rotasyon matrisi ise Eşitlik (2.5)'te verilmektedir.

$$R(\varphi, \theta, \psi) = R(\varphi) R(\theta) R(\psi) \quad (2.4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Uçuş kontrolünde Euler açıları (φ, θ, ψ) direk olarak ölçülememektedir. Ancak gövdeye bağlı eksen takımındaki açısal hızlar P, Q, R direk olarak ölçülebilir. Gövdeye bağlı eksen takımındaki açısal hızlara dönüşüm uygulanarak Euler açısal hızları $(\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi})$ elde edilir. Eşitlik (2.6-2.7) bu dönüşümü vermektedir.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & \tan(\theta) \sin(\varphi) & \tan(\theta) \cos(\varphi) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sec(\theta) \sin(\varphi) & \sec(\theta) \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7)'deki türevler $\theta \neq \frac{\pi}{2}$ olmasını gerektirir. φ ve θ açıları 0'a yaklaştığında quadrotor havada asılı kalma pozisyonuna yaklaşmış demektir. Bu durumda T matrisi birim matris haline gelmektedir. Bu koşullar altında açılar ve açısal hızlar arasındaki ilişki Eşitlik (2.8)'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Kuvvet ve tork denklemleri sırasıyla Eşitlik (2.9)'da ve Eşitlik (2.10)'da verilmiştir. F_i quadrotorun i. rotoru tarafından üretilen kuvvet, T_i quadrotorun i. rotoru tarafından üretilen torktur. b itki sabiti (Ns^2), d sürüklenme sabiti (Nms^2), w_i i. rotorun açısal hızıdır. $i = 1, 2, 3, 4$ quadrotorun ilgili rotor numarasını vermektedir. Eşitlik (2.11) rotorun bağıl hız denklemini vermektedir.

$$F_i = bw_i^2 \quad (2.9)$$

$$T_i = dw_i^2 \quad (2.10)$$

$$w_r = -w_1 + w_2 - w_3 + w_4 \quad (2.11)$$

Quadrotorun U_1, U_2, U_3 ve U_4 olmak üzere toplamda 4 kontrol girişi bulunmaktadır. Bu kontrol girişleri sayesinde quadrotor kontrol edilmektedir. Eşitlik (2.12) quadrotorun kontrol girişleri ile açısal hızları arasındaki ilişkiyi vermektedir. U_1 kaldırma kuvvetini, U_2, U_3 ve U_4 ise ilgili torkları ifade etmektedir. l sembolü metre cinsinden quadrotorun kol uzunluğunu, w_i^2 ise $(rad/s)^2$ cinsinden açısal hızı vermektedir.

$$u = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ T_\varphi \\ T_\theta \\ T_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ lb & 0 & -lb & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Açısal hızlardan kontrol girişlerine olan dönüşüm ise Eşitlik (2.13)'te verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4b} & 0 & \frac{1}{2bl} & -\frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & -\frac{1}{2bl} & 0 & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & 0 & -\frac{1}{2bl} & -\frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & \frac{1}{2bl} & 0 & \frac{1}{4d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

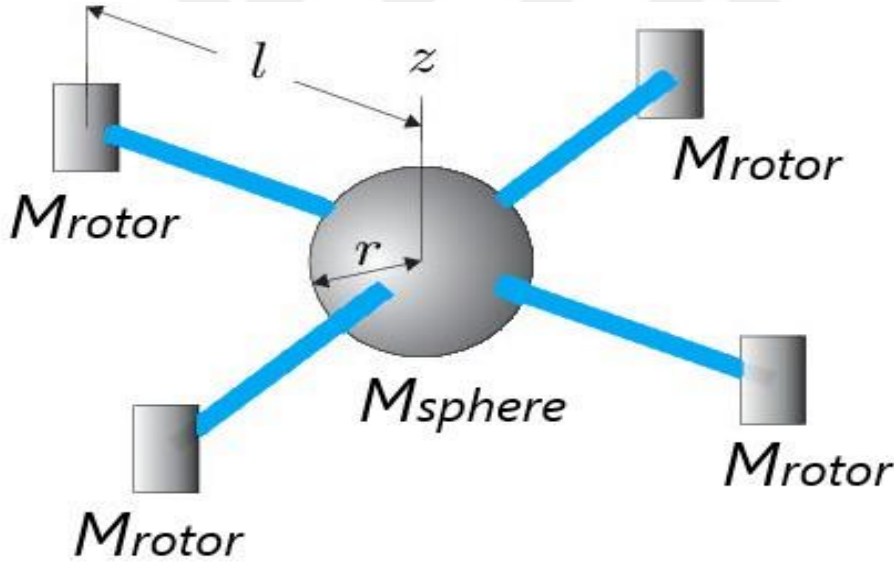
Quadrotorun eylemsizlik momentleri Eşitlik (2.14-2.16) arasında verilmiştir. M_{sphere} quadrotorun küresel yoğunluk merkezini, r yarıçapı, M_{rotor} rotorun kütesini ve l quadrotorun kol uzunluğunu belirtmektedir [82].

$$I_x = \frac{2}{5} M_{\text{sphere}} r^2 + 2l^2 M_{\text{rotor}} \quad (2.14)$$

$$I_y = \frac{2}{5} M_{\text{sphere}} r^2 + 2l^2 M_{\text{rotor}} \quad (2.15)$$

$$I_z = \frac{2}{5} M_{\text{sphere}} r^2 + 4l^2 M_{\text{rotor}} \quad (2.16)$$

Şekil 2.6'da quadrotorun küresel yoğunluk merkezi M_{sphere} ve noktasal M_{rotor} kütleleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Quadrotorun küresel ve noktasal kütlelerinin gösterimi.

Quadrotorun dönme ve öteleme hareketleri neticesinde oluşan hareket denklemleri Eşitlik (2.17-2.22) arasında verilmiştir.

$$\ddot{X} = \frac{U_1}{m} [c(\varphi) s(\theta)c(\psi) + s(\varphi)s(\psi)] \quad (2.17)$$

$$\ddot{Y} = \frac{U_1}{m} [s(\theta) s(\psi)c(\varphi) - s(\varphi)c(\psi)] \quad (2.18)$$

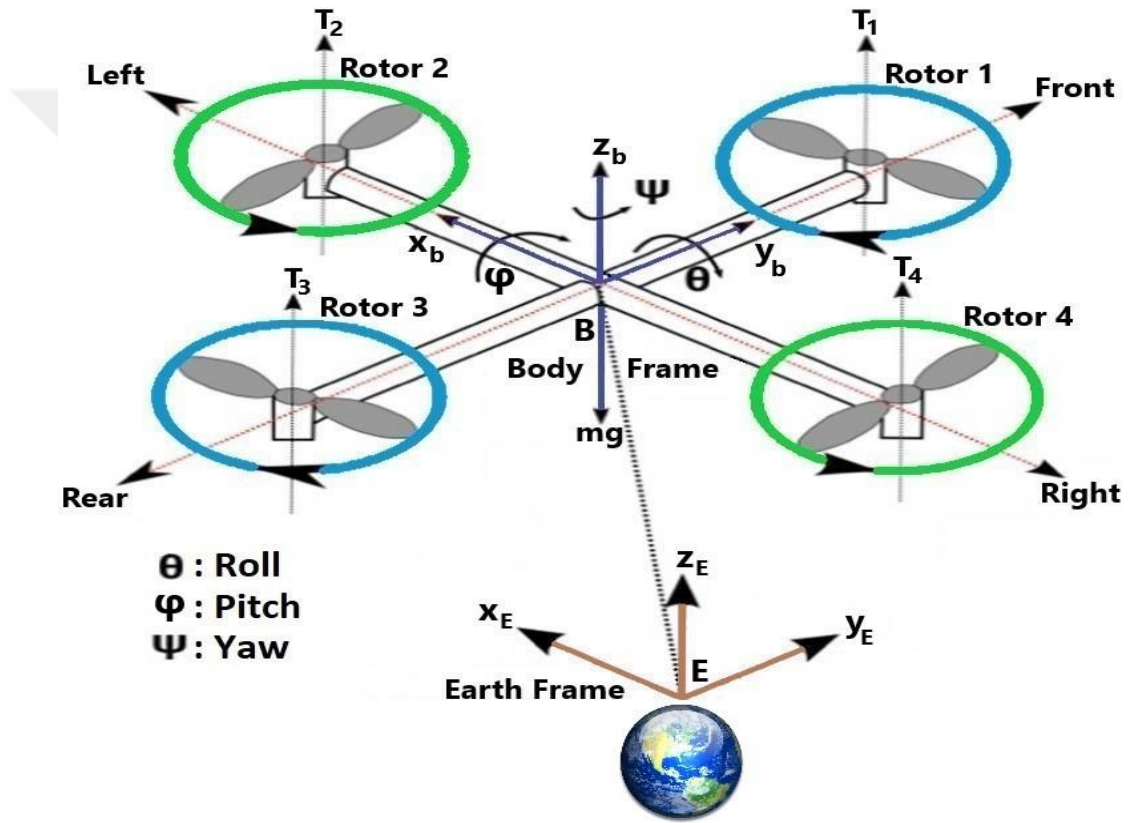
$$\ddot{Z} = -g + \frac{U_1}{m} [c(\varphi)c(\theta)] \quad (2.19)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{I_x} U_2 + \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) \psi \dot{\theta} + w_r \frac{I_R}{I_x} \dot{\theta} \quad (2.20)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{I_y} U_3 + \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) \dot{\theta} \psi + w_r \frac{I_R}{I_y} \dot{\phi} \quad (2.21)$$

$$\dot{\psi} = \frac{1}{I_z} U_4 + \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) \dot{\theta} \phi \quad (2.22)$$

Şekil 2.7’de quadrotorun şematik gösterimi yer almaktadır. Şekilde Body Frame gövde merkezli eksenleri, Earth Frame yer merkezli eksenleri belirtmektedir. Torklar, T ile gösterilmiştir. Rotorların dönüş yönü ok ile gösterilmiştir. Aynı yönde dönen rotorlar aynı renk ile ifade edilmiştir. Yalpa (roll), yunuslama (pitch) ve sapma (yaw) açılarının dönüş yönleri quadrotor üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Quadrotorun şematik gösterimi.

2.3 Quadrotorun Parametreleri

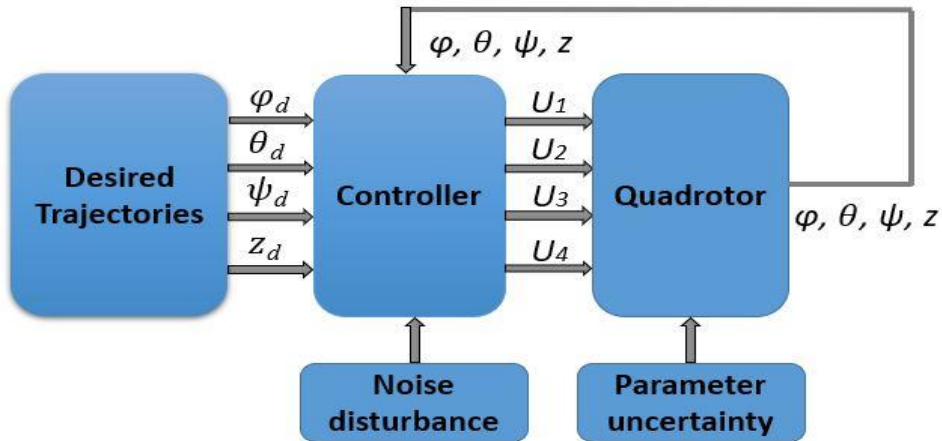
Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan quadrotora ait parametreler verilmiştir. Tez çalışmasında OS4 Quadrotor modeli kullanılmıştır. Bu quadrotor modeli ETH Zürih Üniversitesi Otonom Sistemler Laboratuvarı'nda geliştirilmiş bir modeldir. Çizelge 2.1’de quadrotora ait parametreler verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Quadrotorun parametreleri.

Sembol	Parametre	Değer
b	İtki katsayısı	$3.13 \times 10^{-5} \text{Ns}^2$
d	Sürüklenme katsayısı	$7.5 \times 10^{-7} \text{Ns}^2$
g	Yerçekimi ivmesi	9.81m/s^2
I_x	x eksenindeki eylemsizlik momenti	$7.5 \times 10^{-3} \text{kg.m}^2$
I_y	y eksenindeki eylemsizlik momenti	$7.5 \times 10^{-3} \text{kg.m}^2$
I_z	z eksenindeki eylemsizlik momenti	$1.3 \times 10^{-2} \text{kg.m}^2$
J_r	Rotor eylemsizlik momenti	$6.5 \times 10^{-5} \text{kg.m}^2$
l	Quadrotorun kol uzunluğu	0.23 m
m	Quadrotorun kütlesi	0.65 kg
t_{\max}	Maksimum tork	0.15 Nm
ω_{\max}	Maksimum rotor hızı	1000 rad/sn

2.4 Quadrotorun MATLAB/Simulink Ortamında Modellenmesi

Doğrusal olmayan denklemleri çıkartılan quadrotor Simulink ortamında modellenmiştir. Model iki ana kısımdan oluşmaktadır. Her iki kısım da alt sistemlerden oluşmaktadır. Birinci kısım kontrolcü kısmıdır. Birinci kısımda yalpa, yunuslama, sapma ve yükseklik için ayrı ayrı kontrolcüler tasarlanmıştır. İkinci kısım ise quadrotorun modellendiği bölümdür. Sistemin blok şeması Şekil 2.8’de verilmektedir. Quadrotorun takip etmesi istenen yörüngeler Desired Trajectories ile gösterilmektedir. Kontrolcü bloğu bu referans değerleri yakalayacak şekilde çalışmaktadır. Kontrolcü bloğu ürettiği U_1 , U_2 , U_3 ve U_4 değerlerini quadrotor sistemine iletmektedir. Kontrolcüye verilen gürültüler Noise disturbance bloğu ile gösterilmiştir. Parametre belirsizliği ise Quadrotor modeline verilmektedir ve Parameter uncertainty bloğu ile gösterilmektedir. Quadrotorun kütlesine, eylemsizlik momentlerine, itki ve sürüklenme katsayılarına parametre belirsizliği uygulanmıştır.



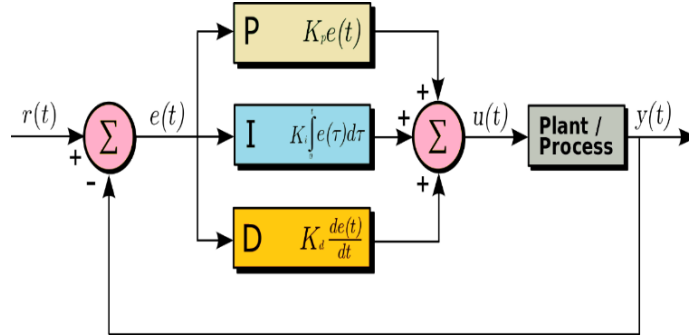
Şekil 2.8 : Quadrotorun blok şeması.

3. KONTROLÇÜLERİN TASARLANMASI

Bu bölümde quadrotorun yüksekliğinin, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için geliştirilen kontrolçüler anlatılmıştır. Sırasıyla PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilmiştir. PID kontrolcü basit yapısı ve kolay üretilmesi nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılan klasik bir kontrolçüdür. Lyapunov tabanlı kontrolcü, Lyapunov kararlılık teoremine dayanmaktadır. Geri adımlamalı kontrolcü ise Lyapunov tabanlı kontrolcünün öz yinelemeli bir versiyonuna dayanmaktadır. Tez kapsamında önerilen geri adımlamalı kontrolcünün farklı koşullar altında PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcüyle karşılaştırılarak gürbüzlüğü ispatlanacaktır.

3.1 PID Kontrolcü Tasarımı

PID kontrolcü endüstride yaygın olarak kullanılan bir kontrolçüdür. Yapısının basitliği ve parametrelerinin kolayca ayarlanabilmesi nedeniyle çok tercih edilen bir kontrolçüdür. Şekil 3.1’de PID kontrolçüye ilişkin bir blok şeması verilmektedir.



Şekil 3.1 : PID kontrolcünün blok şeması.

Şekil 3.1’de hata değeri $e(t)$, ölçülen durum $r(t)$ ve hedeflenen durum $y(t)$ ile ifade edilmiştir. PID kontrolcü sürekli bir şekilde hedeflenen durum ile sistemin anlık durumu arasındaki farkı yani hatayı hesaplamaktadır. Kontrol girdilerini ayarlayarak hatayı minimuma indirmeye çalışmaktadır.

PID kontrolcü K_p , K_i ve K_d olmak üzere 3 parametreye sahiptir. K_p oransal kazancı, K_i integral kazancını ve K_d türevsel kazancı belirtmektedir. K_p yükselme zamanını arttırmakta fakat sürekli hal hatasını yok edememektedir. K_i sürekli hatasını

düşürmektedir ve K_d aşımı azaltmaktadır. PID parametrelerinin sistem üzerinde meydana getirdiği etki Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1 : PID parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi.

Parametre	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Sürekli Hal Hatası
K_p	Azaltır	Arttırır	Küçük oranda arttırır	Azaltır
K_i	Azaltır	Arttırır	Arttırır	Büyük oranda azaltır
K_d	Küçük oranda değiştirir	Azaltır	Azaltır	Küçük oranda değiştirir

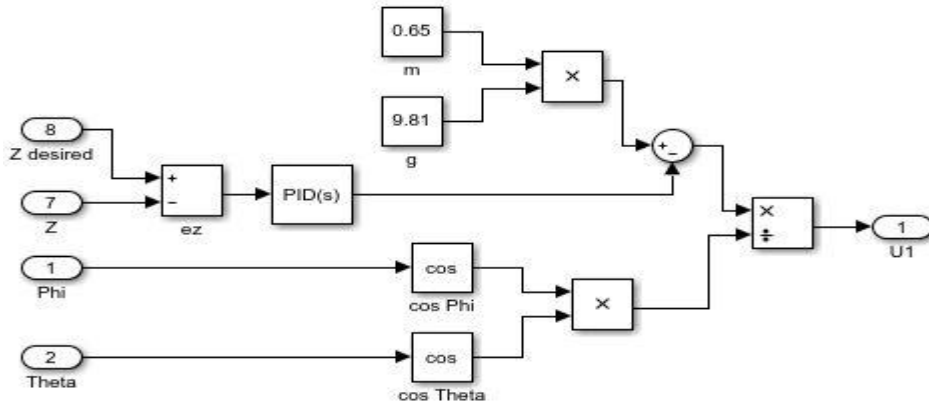
Quadrotorun yüksekliğinin, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için farklı PID kontrolcüler tasarlanmıştır.

Quadrotorun irtifasını kontrol etmek için geliştirilen PID kontrolcünün hata fonksiyonu Eşitlik (3.1)’de ve kontrol girişi U_1 Eşitlik (3.2)’de verilmektedir.

$$e_z = z_d - z \quad (3.1)$$

$$U_1 = \frac{(g + K_p e_z + K_i \int e_z dt - K_d \frac{d}{dt} e_z) m}{\cos \varphi \cos \theta} \quad (3.2)$$

Yükseklik için tasarlanan PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



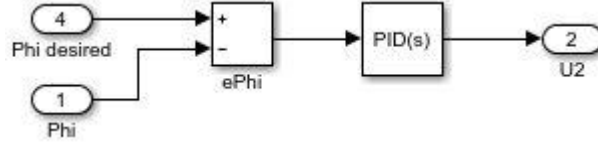
Şekil 3.2 : PID yükseklik kontrolcüsünün Simulink blok diyagramı.

Yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcünün hata fonksiyonu Eşitlik (3.3)’de ve kontrol girişi U_2 Eşitlik (3.4)’te verilmiştir.

$$e_\varphi = \varphi_d - \varphi \quad (3.3)$$

$$U_2 = K_p e_\varphi + K_i \int e_\varphi dt - K_d \frac{d}{dt} \varphi \quad (3.4)$$

Yalpa açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı Şekil 3.3'te yer almaktadır.



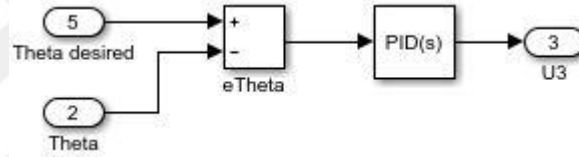
Şekil 3.3 : Yalpa açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı.

Yunuslama açısı PID kontrolcünün hata fonksiyonu Eşitlik (3.5)'de, kontrol girişi U_3 ise Eşitlik (3.6)'da gösterilmiştir.

$$e_{\theta} = \theta_d - \theta \quad (3.5)$$

$$U_3 = K_p e_{\theta} + K_i \int e_{\theta} dt - K_d \frac{d}{dt} \theta \quad (3.6)$$

Yunuslama açısı PID kontrolcünün Simulink'te oluşturulan blok şeması Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



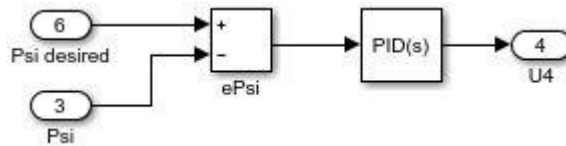
Şekil 3.4 : Yunuslama açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı.

Yalpa açısı PID kontrolcüye ait hata fonksiyonu Eşitlik (3.7)'de ve kontrol girişi U_4 Eşitlik (3.8)'de verilmiştir.

$$e_{\psi} = \psi_d - \psi \quad (3.7)$$

$$U_4 = K_p e_{\psi} + K_i \int e_{\psi} dt - K_d \frac{d}{dt} \psi \quad (3.8)$$

Sapma açısı PID kontrolcünün Simulink blok gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5 : Sapma açısı PID kontrolcünün Simulink blok diyagramı.

Yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için geliştirilen PID kontrolcülerin katsayıları MATLAB'da bulunan PID Tuning aracı kullanılarak bulunmuştur. Bu sayede kontrolcü katsayıları otomatik olarak belirlenmiş ve

optimum katsayılar elde edilmiştir. Kontrolcülerin katsayıları Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : PID kontrolcü katsayıları.

Parametre	Yükseklik	Yalpa	Yunuslama	Sapma
K_p	0.116	0.134	0.127	0.116
K_i	0.045	0.065	0.043	0.045
K_d	0.054	0.073	0.092	0.054

3.2 Lyapunov Tabanlı Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde quadrotor İHA’nın yüksekliğinin ve yalpa, yunuslama, sapma açılarının kontrol edilebilmesi için Lyapunov tabanlı kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Lyapunov tabanlı kontrolcü Lyapunov kararlılık teoremine dayanmaktadır. Lyapunov tabanlı kontrolcü doğrudan dört rotorun pozisyonunu kontrol etmeyi amaçlar. Denge noktası $x = 0$ olsun. $x = 0$ sistemin global asimptotik kararlı bir denge noktasıdır ve ikinci dereceden bir Lyapunov fonksiyonu vardır. D ’nin R^n ’de $f(0)$ ’in kompakt bir komşuluğu olduğunu varsayalım. R^n reel sayılar üzerindeki koordinat uzayıdır. R^+ pozitif gerçel sayılardır. Lyapunov fonksiyonu $V: D \rightarrow R^+$ sağlayan sürekli bir fonksiyon olsun.

$$V(0) = 0, V(x) > 0 \text{ in } D, x \neq 0 \quad (3.9)$$

$$\dot{V}(x) \leq 0 \text{ in } D \quad (3.10)$$

Bu durumda denge noktası D alanında kararlıdır. Lyapunov fonksiyonu denge durumunda Eşitlik (3.11)’de gösterildiği gibi D alanında asimptotik kararlıdır.

$$\dot{V}(x) < 0 \text{ in } D, x \neq 0 \quad (3.11)$$

Öncelikle, pozisyon kontrolü için quadrotorun denge noktasında istenen konum olarak stabilizasyon açılarını ve bunların zamana göre türevlerini içeren bir bölüm tanımlanır. Örneğin, $X = (\varphi_d, 0, \theta_d, 0, \psi_d, 0)$ olarak tanımlanır. Burada φ_d , θ_d ve ψ_d , istenen yalpa, yunuslama ve sapma açılarıdır. Açısal hızları ve zamana göre türevleri, stabilizasyon noktasında sıfır olacaktır.

$$V(x) = \frac{1}{2} [(\varphi - \varphi_d)^2 + \dot{\varphi}^2 + (\theta - \theta_d)^2 + \dot{\theta}^2 + (\psi - \psi_d)^2 + \dot{\psi}^2] \quad (3.12)$$

$V(x)$, istenen konum etrafında pozitif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonudur. $V(x)$ ’in türevi, Eşitlik (3.13)’te verilmiştir.

$$\dot{V}(x) = (\varphi - \varphi_d) \dot{\varphi} + \dot{\varphi} \ddot{\varphi}_d + (\theta - \theta_d) \dot{\theta} + \dot{\theta} \ddot{\theta}_d + (\psi - \psi_d) \dot{\psi} + \dot{\psi} \ddot{\psi}_d \quad (3.13)$$

Eşitlik (2.17-2.22) arasındaki denklemlerde verilen açı ve konumun fonksiyonu mükemmel çapraz VTOL ($I_x=I_y$) durumunda basitleştirilebilir. Sistem denge noktasına yaklaştığında $w_r = 0$, $\dot{\varphi} = 0$, $\dot{\theta} = 0$, $\dot{\psi} = 0$ olur ve Eşitlik (3.14) elde edilir.

$$\dot{V}(x) = (\varphi - \varphi_d) \dot{\varphi} + \dot{\varphi} \frac{l}{I_x} U_2 + (\theta - \theta_d) \dot{\theta} + \dot{\theta} \frac{l}{I_y} U_3 + (\psi - \psi_d) \dot{\psi} + \dot{\psi} \frac{l}{I_z} U_4 \quad (3.14)$$

Daha sonra stabiliteyi sağlamak için kontrol girişleri Eşitlik (3.15-3.17) arasındaki gibi seçilir.

$$U_2 = -\frac{I_x}{l}(\varphi - \varphi_d) - k_1 \dot{\varphi} \quad (3.15)$$

$$U_3 = -\frac{I_y}{l}(\theta - \theta_d) - k_2 \dot{\theta} \quad (3.16)$$

$$U_4 = -I_z(\psi - \psi_d) - k_3 \dot{\psi} \quad (3.17)$$

Kontrol girişlerini Eşitlik (3.14)'te yerine yazdığımızda Eşitlik (3.18) elde edilir:

$$\dot{V}(x) = -\dot{\varphi}^2 \frac{l}{I_x} k_1 - \dot{\theta}^2 \frac{l}{I_y} k_2 - \dot{\psi}^2 \frac{l}{I_z} k_3 \quad (3.18)$$

Burada k_1 , k_2 , k_3 katsayıları Eşitlik (3.15-3.18) ile tanımlanan pozitif parametrelerdir. Eşitlik (3.18) ile verilen fonksiyon negatif yarı tanımlıdır. Yükseklik kontrolcüsü için Eşitlik (3.19)'da verilen Lyapunov fonksiyonu ile Eşitlik (3.20)'de verilen açılara ve yüksekliğe göre türevi aşağıdaki gibidir:

$$V(x) = \frac{1}{2} [(z - z_d)^2 + \dot{z}^2] \quad (3.19)$$

$$\dot{V}(x) = (z - z_d) \dot{z} + \dot{z} (g - (\cos\theta \cos\varphi) U_1/m) \quad (3.20)$$

U_1 kontrol girişi kararlılık için aşağıdaki gibi seçilir:

$$U_1 = -\frac{m}{\cos\theta \cos\varphi} (z_d - z - g) - k_z \dot{z} \quad (3.21)$$

Bu durumda Eşitlik (3.20) aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

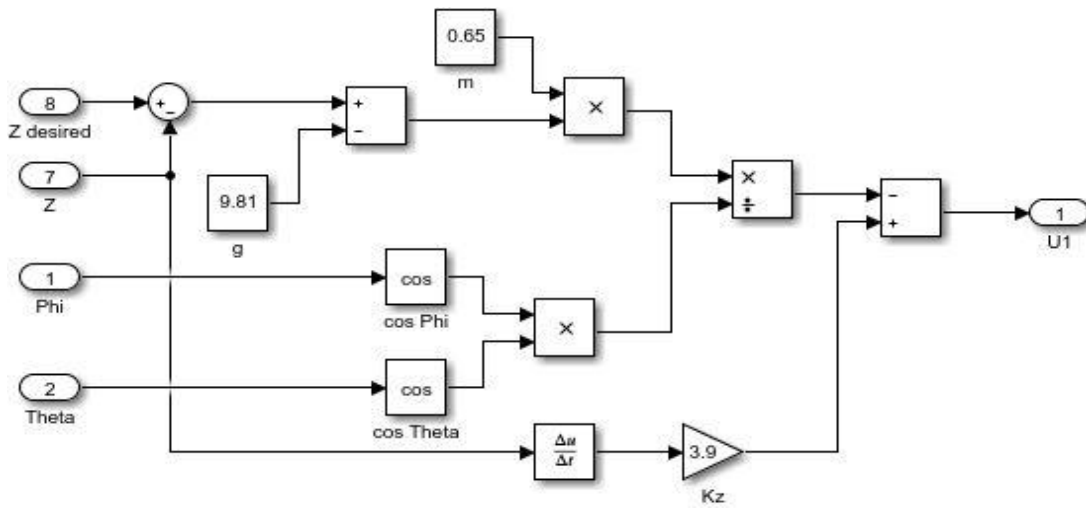
$$\dot{V}(x) = -\dot{z}^2 k_z \quad (3.22)$$

Burada k_z , Eşitlik (3.22) ile tanımlanan pozitif bir sabittir. Yukarıdaki fonksiyon negatif yarı tanımlıdır. Lyapunov tabanlı kontrolcünün katsayıları Çizelge 3.3'te gösterilmiştir. k_1 , k_2 ve k_3 pozisyon açıları kontrolcü katsayıları ve k_z yükseklik katsayısıdır.

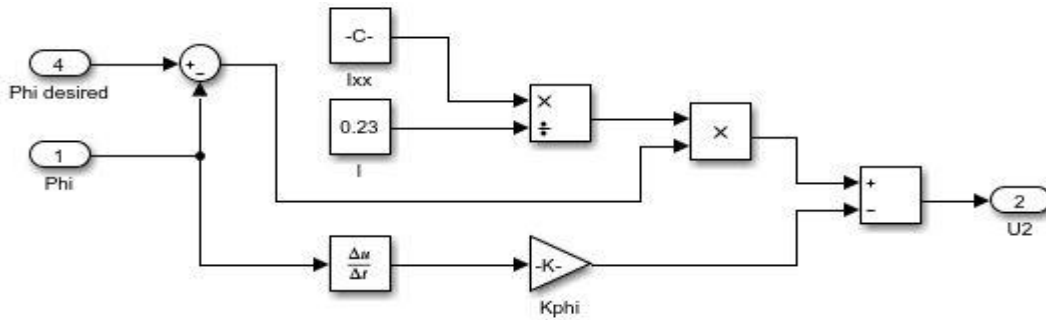
Çizelge 3.3 : Lyapunov tabanlı kontrolcü katsayıları.

Parametre	Değer
k_1	0.03
k_2	0.025
k_3	0.023
k_4	3.9

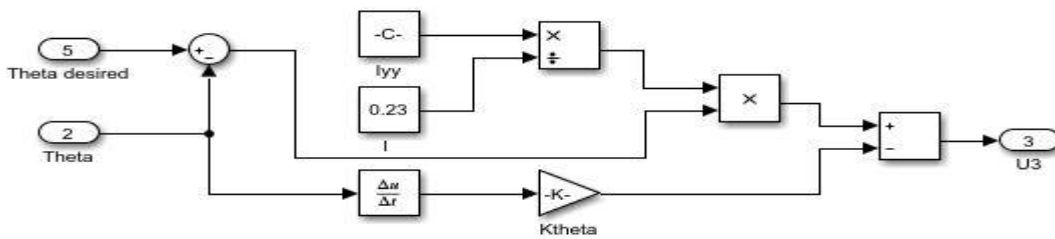
İrtifa kontrolü ile yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için tasarlanan Lyapunov tabanlı kontrolcülerin blok şemaları Şekil 3.6'dan Şekil 3.9'a kadar olan şekillerde gösterilmektedir. Söz konusu kontrolcüler MATLAB/Simulink programı kullanılarak tasarlanmıştır.



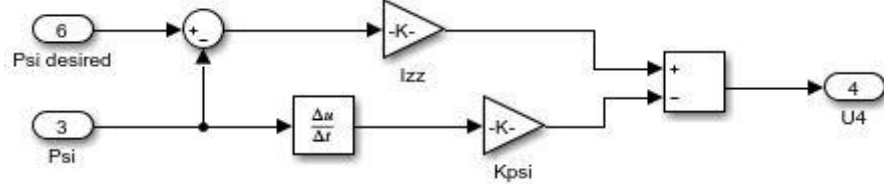
Şekil 3.6 : Lyapunov tabanlı irtifa kontrolcünün blok şeması.



Şekil 3.7 : Lyapunov tabanlı yalpa açısı kontrolcünün blok şeması.



Şekil 3.8 : Lyapunov tabanlı yunuslama açısı kontrolcünün blok şeması.



Şekil 3.9 : Lyapunov tabanlı sapma açısı kontrolcünün blok şeması.

3.3 Geri Adımlamalı Kontrolcü Tasarımı

Geri adımlama, doğrusal olmayan sistemler için kullanılan bir kontrol tekniğidir. Geri adımlamalı kontrol, sonunda gerçek girişe bağlanan sanal kontrol girişlerinin tanımlanmasına dayanır. İlk olarak, z_1 izleme hatasındaki bir Lyapunov fonksiyonu pozitif tanımlı olarak tanımlanır ve zamana göre türevi negatif yarı tanımlı yapılır. Bu izleme hatası aşağıdaki gibi açıklansın:

$$z_1 = \varphi_d - \varphi \quad (3.23)$$

Lyapunov fonksiyonu ve onun zaman alanındaki türevi Eşitlik (3.24) ve Eşitlik (3.25)'te verilmiştir.

$$V(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (3.24)$$

$$\dot{V}(z_1) = z_1(\dot{\varphi}_d - \dot{\varphi}) \quad (3.25)$$

z_1 fonksiyonunun stabilizasyonu için yeni bir sanal kontrol girişi $\dot{\varphi}$ kullanılır:

$$\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_d + a_1 z_1 \quad (3.26)$$

a_1 negatif yarı kararlılık elde etmek için pozitif bir katsayı olmalıdır. Sanal kontrol girişi Eşitlik (3.26)'daki gibi tanımlandığında ve Eşitlik (3.25)'te yerine yazıldığında Eşitlik (3.27) elde edilir.

$$\dot{V}(z_1) = -a_1 z_1^2 \quad (3.27)$$

Başka bir değişken değişikliği aşağıdaki gibidir:

$$z_2 = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_d - a_1 z_1 \quad (3.28)$$

Arttırılmış Lyapunov fonksiyonu daha sonra Eşitlik (3.29)'daki gibi tanımlanabilir.

$$V(z_1, z_2) = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (3.29)$$

Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi aşağıdaki gibidir:

$$\dot{V}(z_1, z_2) = -a_1 z_1^2 - z_1 z_2 + z_2 \dot{\varphi} - z_2(\dot{\varphi}_d - a_1(z_2 + a_1 z_1)) \quad (3.30)$$

Eşitlik 2.20'ye göre, $\dot{\phi}$ değişkeni aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\dot{\phi} = \psi \dot{\theta} a_1 + a_2 \dot{\theta} w_r + \frac{l}{I_x} U_2 \quad (3.31)$$

U_2 Kontrol girişi, $\dot{\phi}$, $\ddot{\phi}$, $\ddot{\theta}_d = 0$ ve $\dot{V}(z_1, z_2) < 0$ koşulları altında aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$U_2 = \frac{I_x}{l} (z_1 - a_1 \dot{\theta} \dot{\psi} - a_2 \dot{\theta} \Omega_r - a_1 (z_2 + a_1 z_1) - a_2 z_2) \quad (3.32)$$

z_1 'i kararlı hale getirmek için $a_2 > 0$ olan $a_2 z_2$ terimi eklenir. Aynı yöntem kullanılarak, yunuslama açısını ve sapma açısını kontrol eden U_3 ve U_4 kontrol girişleri aşağıdaki gibi çıkarılır:

$$U_3 = \frac{I_y}{l} (z_3 - a_3 \dot{\phi} \dot{\psi} - a_4 \dot{\phi} \Omega_r - a_3 (z_4 + a_3 z_3) - a_4 z_4) \quad (3.33)$$

$$U_4 = \frac{I_z}{1} (z_5 - a_5 \dot{\phi} \dot{\theta} - a_5 (z_6 + a_5 z_5) - a_6 z_6) \quad (3.34)$$

Aşağıdaki tanımlar U_3 ve U_4 kontrol girişlerinde kullanılmıştır:

$$z_3 = \theta_d - \theta \quad (3.35)$$

$$z_4 = \dot{\theta} - \dot{\theta}_d - a_3 z_3 \quad (3.36)$$

$$z_5 = \psi_d - \psi \quad (3.37)$$

$$z_6 = \dot{\psi} - \dot{\psi}_d - a_5 z_5 \quad (3.38)$$

İrtifa kontrolü için izleme hatası z_7 Eşitlik (3.39)'daki gibi tanımlanır. Bu hatanın Lyapunov fonksiyonu ise Eşitlik (3.40)'deki gibi tanımlanır.

$$z_7 = z - z_d \quad (3.39)$$

$$V(z_7) = \frac{1}{2} z_7^2 \quad (3.40)$$

Lyapunov fonksiyonunun zamana göre türevi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\dot{V}(z_7) = z_7 (\dot{z}_d - \dot{z}) \quad (3.41)$$

Sanal kontrol girişi x_8 , $\dot{V}(z_7)$ fonksiyonunu kararlı hale getirmek için tanımlanır.

$$x_8 = \dot{z}_d + a_7 z_7 \quad (3.42)$$

İkinci değişken değişikliği aşağıdaki gibidir:

$$z_8 = x_8 - \dot{z}_d - a_7 z_7 \quad (3.43)$$

Değişken değişikliklerinin ardından yeni Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$V(z_7, z_8) = \frac{1}{2} z_7^2 + \frac{1}{2} z_8^2 \quad (3.44)$$

Bu fonksiyonun zamana göre türevi Eşitlik (3.45)'te verilmiştir.

$$\dot{V}(z_7, z_8) = -a_7 z_7^2 - z_7 z_8 + z_8 x_8 - z_8(\ddot{z}_d - a_7(z_8 + a_7 z_7)) \quad (3.45)$$

Sanal kontrol girişinin türevi Eşitlik (3.46)'da verilmiştir.

$$\dot{x}_8 = g - \cos\theta \cos\varphi \frac{U_1}{m} \quad (3.46)$$

U_1 kontrol girişi ise Eşitlik (3.47)'de gösterilmiştir.

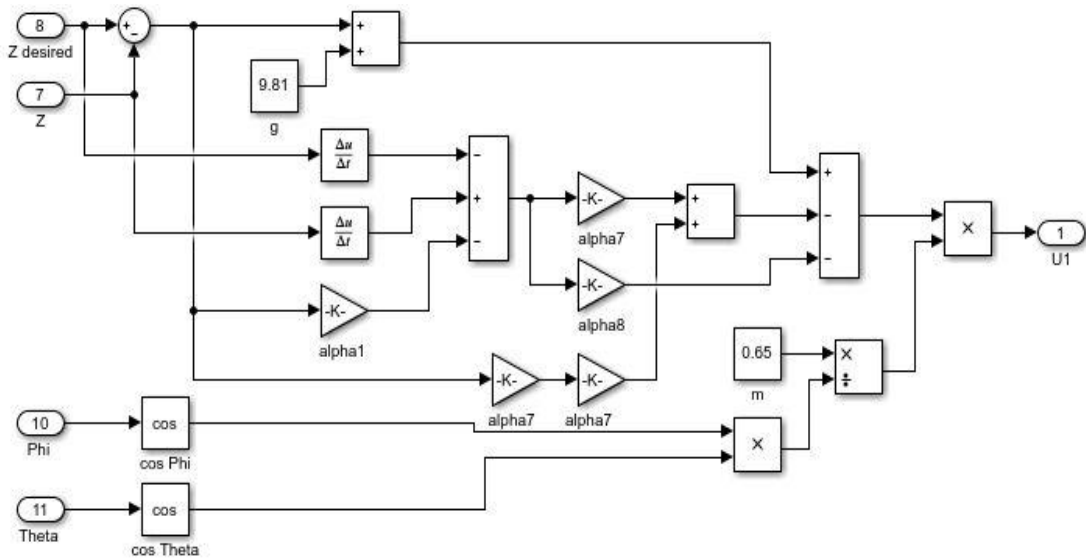
$$U_1 = \frac{m}{\cos\theta \cos\varphi} (z_7 + g - a_7(z_8 + a_7 z_7) - a_8 z_8) \quad (3.47)$$

MATLAB/Simulink programı kullanılarak geliştirilen geri adımlamalı kontrolcüyeye ilişkin katsayılar Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Geri adımlamalı kontrolcü katsayıları.

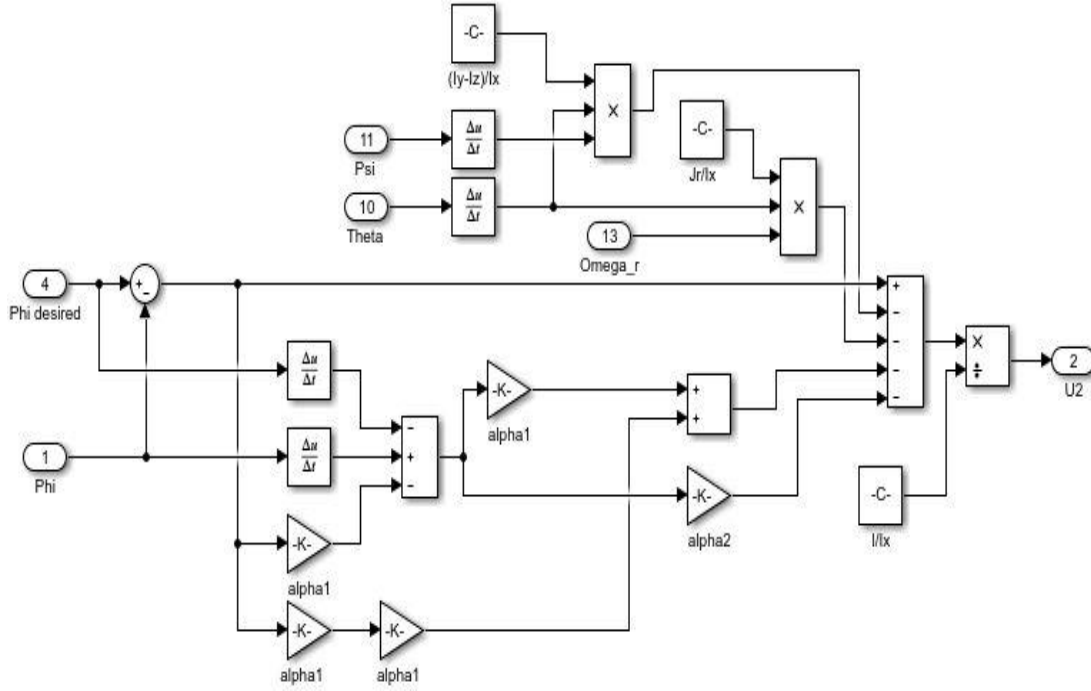
Katsayı	Yalpa (a_1, a_2)	Yunuslama (a_3, a_4)	Sapma (a_5, a_6)	Yükseklik (a_7, a_8)
a_i, a_{i+1}	(8.7, 7)	(8, 4)	(8.45, 4.05)	(1.5, 6)

İrtifa kontrolü ile yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için tasarlanan geri adımlamalı kontrolcülerin blok şemaları Şekil 3.10 ile Şekil 3.13 arasında gösterilmektedir. Söz konusu kontrolcüler MATLAB/Simulink programı kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 3.10'da geri adımlamalı irtifa kontrolcüsünün blok diyagramı yer almaktadır.



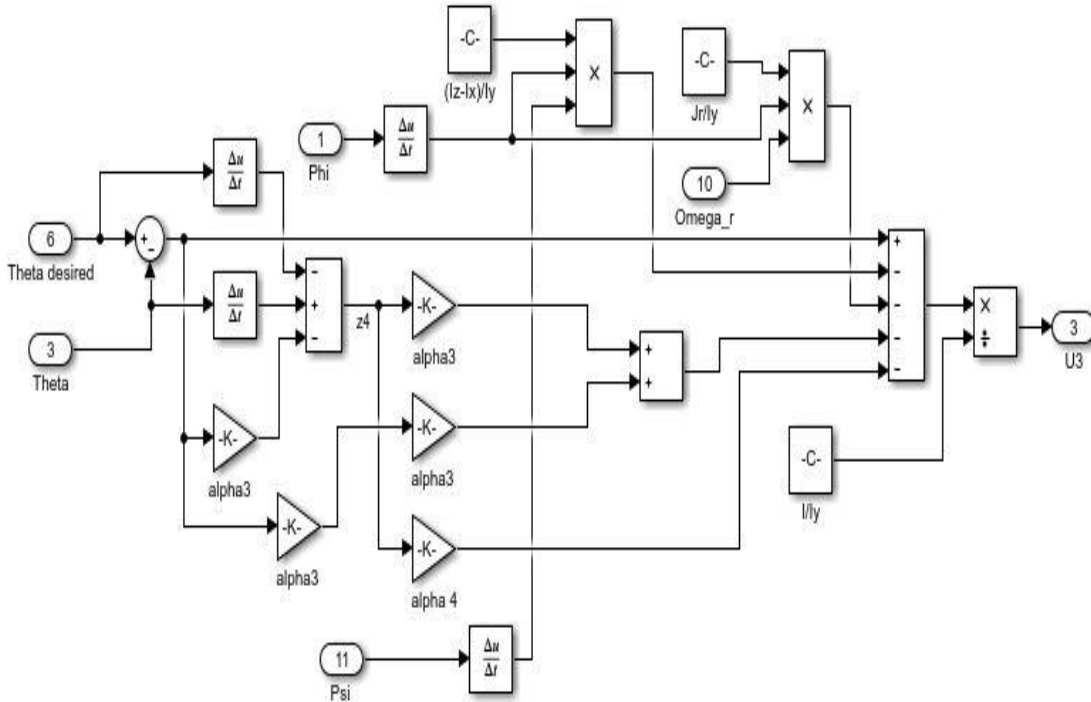
Şekil 3.10 : Geri adımlamalı irtifa kontrolcüsünün blok şeması.

Şekil 3.11’de geri adımlamalı yalpa açısı kontrolcünün blok diyagramı yer almaktadır.



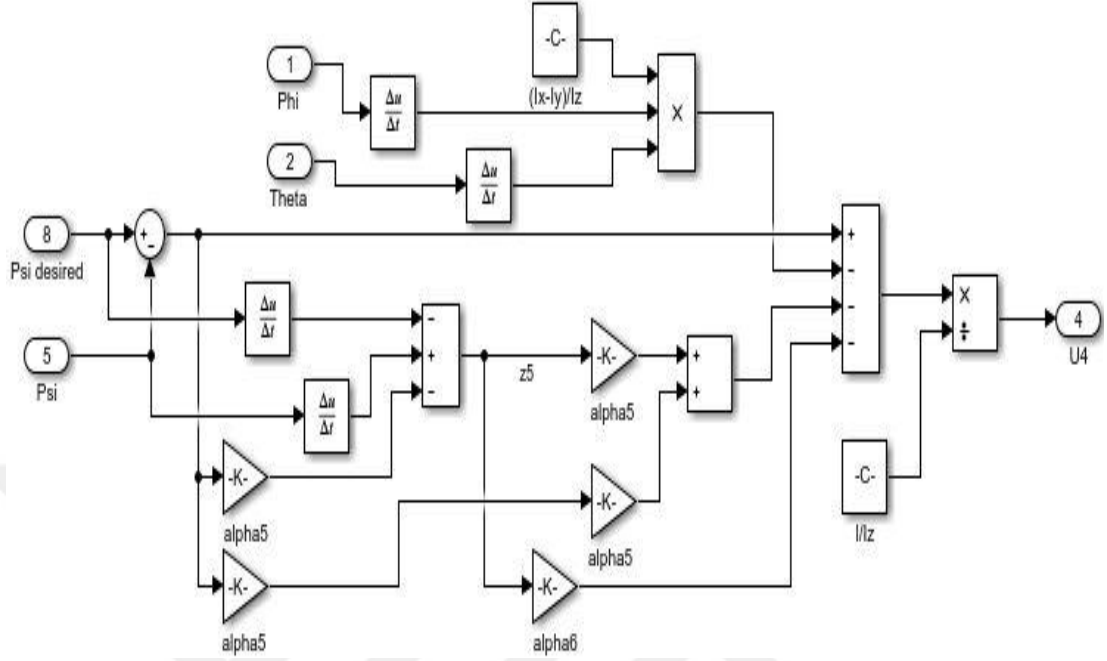
Şekil 3.11 : Geri adımlamalı yalpa açısı kontrolcünün blok şeması.

Şekil 3.12’de geri adımlamalı yunuslama açısı kontrolcünün blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Geri adımlamalı yunuslama açısı kontrolcünün blok şeması.

Şekil 3.13'te geri adımlı malı sapma açısı kontrolcünün blok diyagramı verilmektedir.



Şekil 3.13 : Geri adımlı malı sapma açısı kontrolcünün blok şeması.

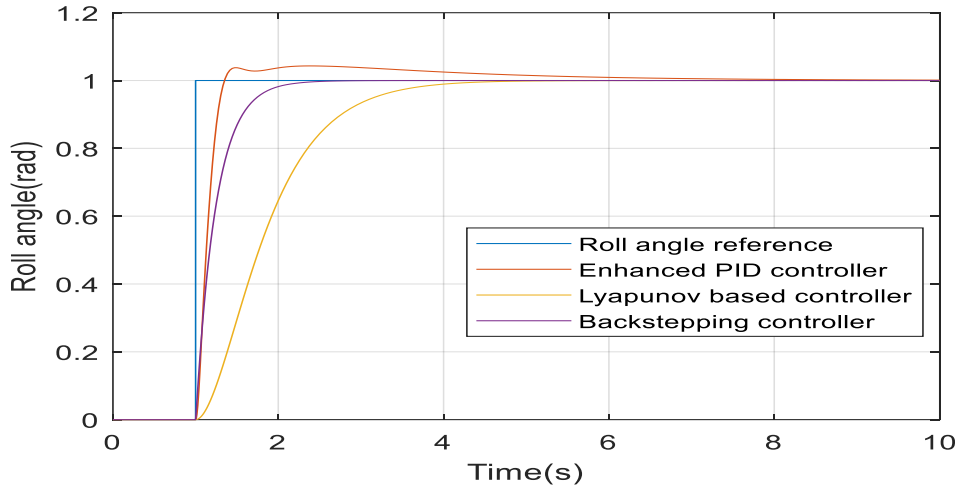


4. SİMÜLASYONLAR

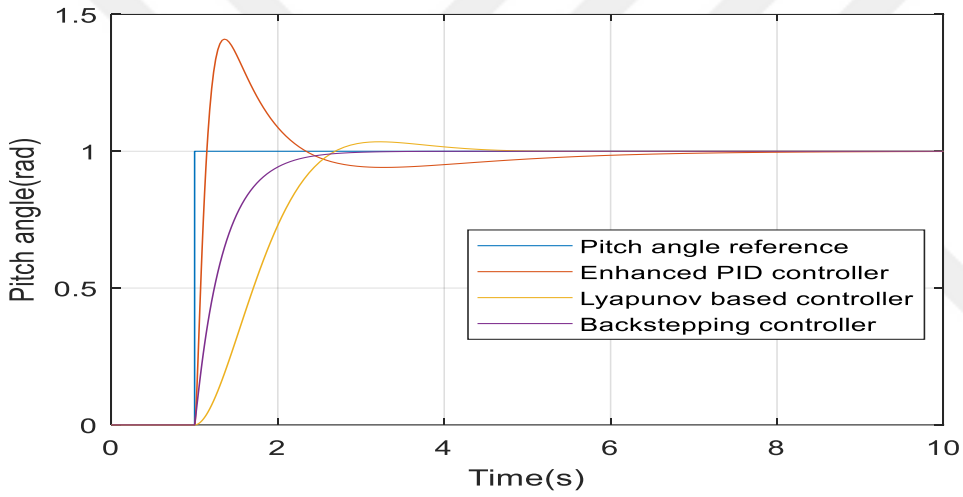
Bu bölümde quadrotorun yüksekliğinin, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının kontrolü için tasarlanan PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcülerin farklı koşullar altında simülasyonları yapılacaktır. Kontrolcüler normal koşullar altında, + %50 parametre belirsizliği altında, - %50 parametre belirsizliği altında, Gauss gürültüsü altında, eş zamanlı parametre belirsizliği ve Gauss gürültüsü altında, pembe gürültü altında ve sinüzoidal bozucu altında simülasyonlar yapılacaktır. Her bir koşul için kontrolcülerin yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri elde edilerek karşılaştırmalı bir gürbüzlük analizi yapılacaktır. Yükselme zamanı ve oturma zamanı saniye cinsindedir. Aşım ise % olarak hesaplanmıştır. Yükselme zamanı sistem cevabının %10'dan %100'e ulaşması için gereken süre olarak hesaplanmıştır. Oturma zamanı, yanıt eğrisinin nihai değerin \pm %2 aralığına ulaşması ve içinde kalması için gereken süre olarak tanımlanmıştır. Aşım sistem çıkışının ulaştığı maksimum değer ile kararlı durum değeri arasındaki farkın normalize edilmesidir. Simulink'te yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı değerlerini hesaplamak için Bilevel Measurements paneli kullanılmaktadır. Bu karşılaştırmalı analizler neticesinde geri adımlamalı kontrolcünün gürbüzlüğü ispat edilecektir.

4.1 Normal Koşullar Altında Yapılan Simülasyonlar

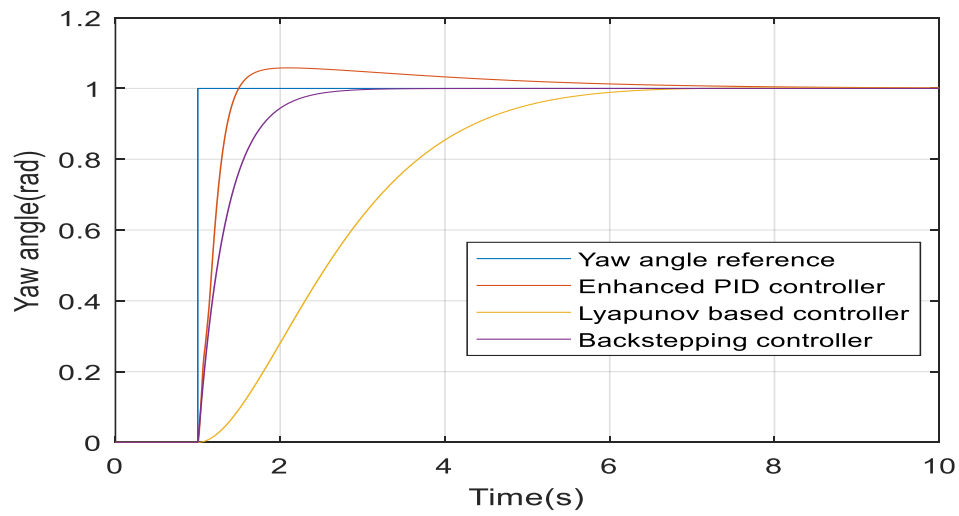
Bu bölümde normal koşullar altında PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcülerin yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma referanslarını takip edebilme performansları karşılaştırılmıştır. Yükseklik referansı metre, yalpa, yunuslama ve sapma referansları ise radyandır. Kontrolcülerin yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri elde edilerek karşılaştırmalı bir gürbüzlük analizi yapılmıştır. Şekil 4.1'den Şekil 4.3'e kadar PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcülerin normal koşullar altındaki yalpa, yunuslama ve sapma açıları takip simülasyonları verilmiştir. Şekil 4.4'te ise yükseklik referansı takip simülasyonu verilmiştir.



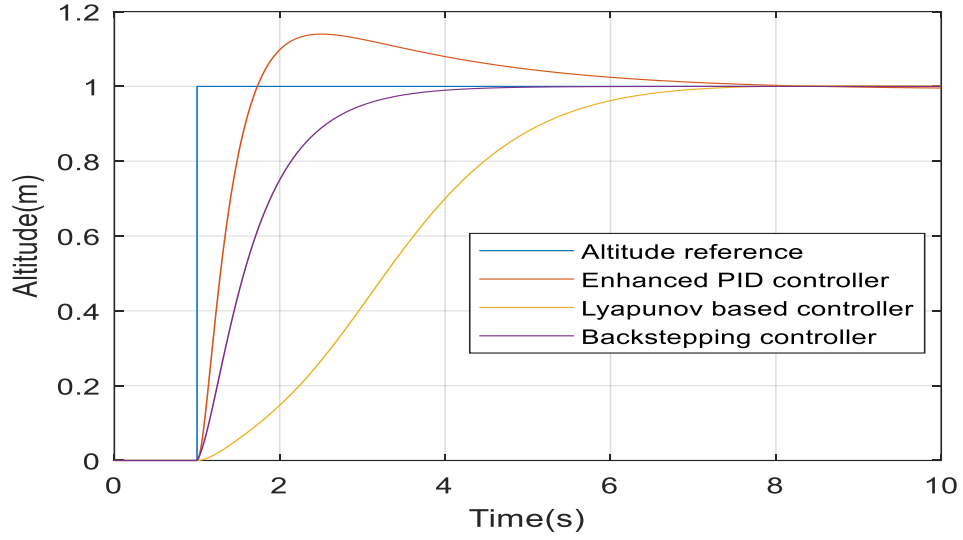
Şekil 4.1 : Normal koşullar altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.2 : Normal koşullar altında yunuşlama açısı referans takibi.



Şekil 4.3 : Normal koşullar altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.4 : Normal koşullar altında yükseklik referans takibi.

Çizelge 4.1’de normal koşullar altında yapılan simülasyonlara ilişkin zaman cevabı verileri (yükselme zamanı, aşım, oturma zamanı) verilmiştir. Aşımın görülmediği durumlar “-” işareti ile belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 : Normal koşullar altında kontrolcülerin zaman cevabı.

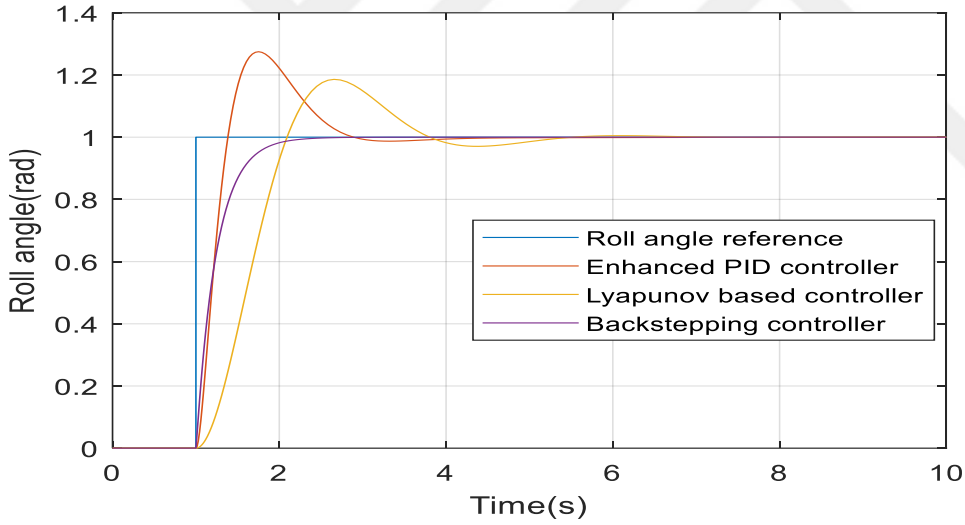
Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.23	3.12	4.53
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.487	0.5	3.66
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.52	0.49	1.99
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.1	42.14	5.47
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.06	3.64	3.82
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.75	0.5	2.45
Sapma açısı PID kontrolcü	0.32	5.85	5.13
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	2.8	-	5.66
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.74	0.5	2.38
İrtifa PID kontrolcü	0.49	14.37	6.68
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.85	-	6.43
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.5	3.62

Simülasyon sonuçları ve Çizelge 4.1 incelendiğinde geri adımlamalı kontrolcünün bütün referans takiplerinde diğer iki kontrolcüden daha kısa bir oturma zamanına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda geri adımlamalı kontrolcü verilen referans değerinin %2 aralığına en hızlı şekilde ulaşmakta ve oturmaktadır. Ayrıca geri adımlamalı kontrolcü en az aşımaya sahip kontrolcüdür. PID kontrolcünün oturma zamanı da en yüksektir. Referans takiplerinde gösterdiği aşım %1’in altındadır. PID kontrolcü hızlı bir yükselme zamanına sahip olsa da en yüksek aşımı göstermektedir.

Ayrıca oturma zamanı da uzundur. Lyapunov tabanlı kontrolcü yükselme zamanı en uzun süren kontrolcüdür. Sapma açısı ve irtifa referansı takiplerinde aşırı sönümlü bir halde olduğundan aşım göstermemektedir. Ayrıca Lyapunov tabanlı kontrolcünün de oturma zamanı geri adımlamalı kontrolcüye kıyasla daha uzun sürmektedir. Bu durumda normal koşullar altında bu üç kontrolcünün performansı kıyaslandığında, geri adımlamalı kontrolcünün daha üstün olduğu ortaya çıkmaktadır.

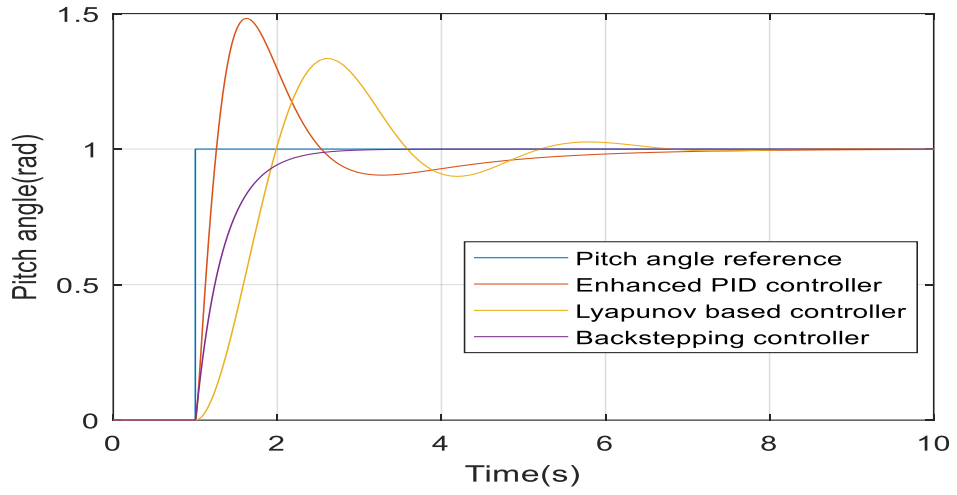
4.2 + %50 Parametre Belirsizliği Altında Yapılan Simülasyonlar

Bu bölümde quadrotorun m , l , b , d , w_{max} , J_r , I_x , I_y ve I_z parametrelerine + %50 parametre belirsizliği uygulanmıştır. Şekil 4.5'ten Şekil 4.8'e kadar olan şekillerde yapılan simülasyonlar gösterilmektedir. Şekil 4.5'te + %50 parametre belirsizliği altında 3 farklı kontrolcünün yalpa açısı referans takibine ilişkin simülasyonu yer almaktadır.

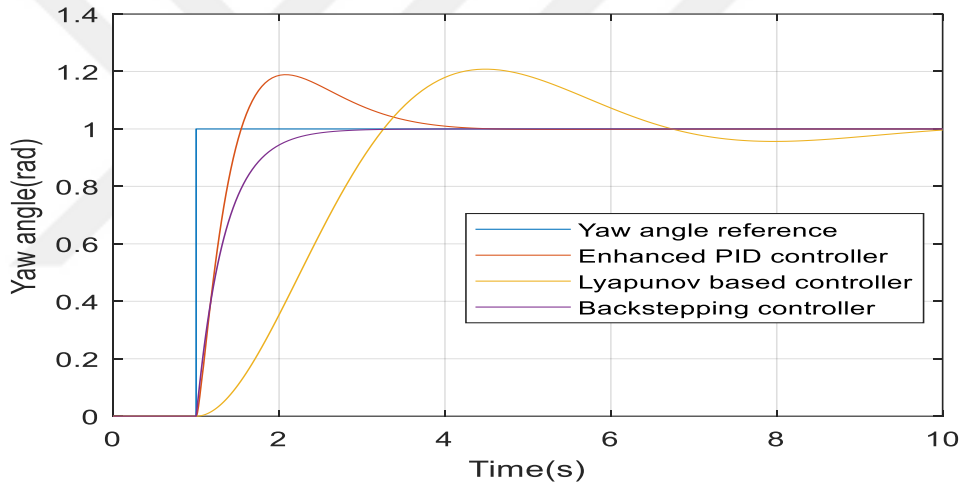


Şekil 4.5 : + %50 parametre belirsizliği altında yalpa açısı referans takibi.

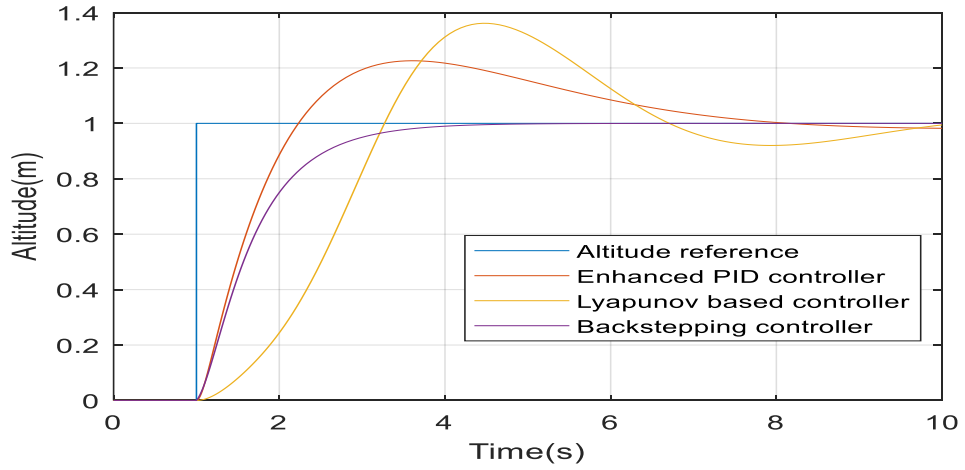
Şekil 4.6'dan Şekil 4.9'a kadar + %50 parametre belirsizliği altında kontrolcülerin pozisyon açısı takibi simülasyonları gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : + %50 parametre belirsizliği altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.7 : + %50 parametre belirsizliği altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.8 : + %50 parametre belirsizliği altında irtifa referans takibi.

Çizelge 4.2’de + %50 parametre belirsizliği altında gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verileri (yükselme zamanı, aşım, oturma zamanı) yer almaktadır.

Çizelge 4.2 : + %50 parametre belirsizliği altında kontrolcülerin zaman cevabı.

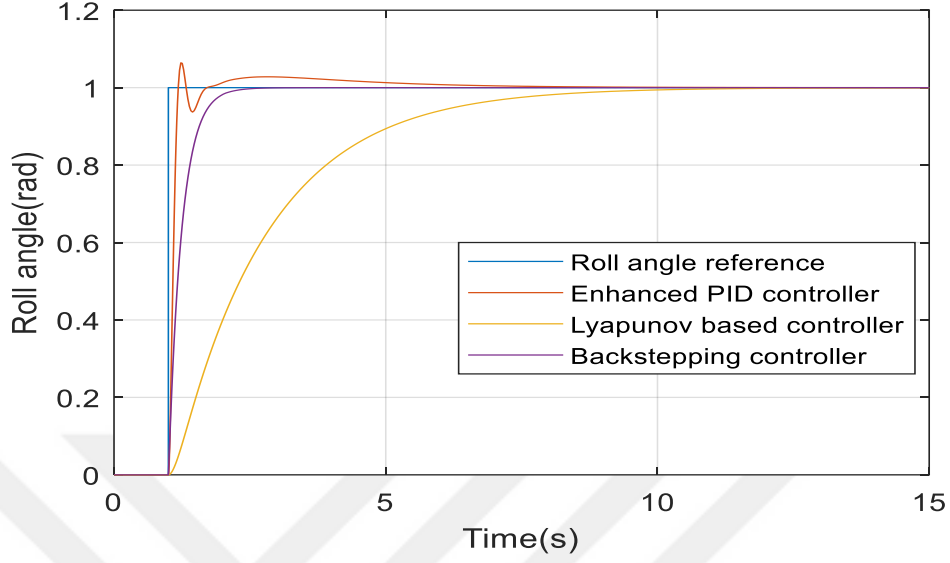
Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.27	27.6	2.91
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	0.73	18.4	4.87
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.53	0.49	1.95
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.19	48.5	6.03
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	0.66	34.5	6.19
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.75	0.5	2.41
Sapma açısı PID kontrolcü	0.39	18.5	3.8
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.45	25.9	9.33
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.74	0.5	2.42
İrtifa PID kontrolcü	0.87	24.38	7.52
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.44	48.5	9.66
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.5	3.69

Çizelge 4.2’de yer alan sayısal veriler ve simülasyon sonuçları gözden geçirildiğinde PID kontrolcünün en hızlı yükselme zamanına sahip olduğu görülmektedir. Ancak PID kontrolcü yüksek bir aşım göstermektedir. Yalpa ve yunuslama açılarında en yüksek aşımı PID kontrolcü göstermektedir. Ayrıca PID kontrolcünün oturma zamanı geri adımlamalı kontrolcünden daha uzundur. Lyapunov tabanlı kontrolcü ise sapma ve irtifa referanslarını takip ederken en yüksek aşımı göstermektedir. Ayrıca Lyapunov tabanlı kontrolcü, bütün referans takiplerinde oturma zamanı en uzun süren kontrolcüdür. Geri adımlamalı kontrolcü bütün referans takiplerinde aşımı en az olan kontrolcüdür. Gösterdiği aşım %0.5 olup önemsenmeyecek düzeydedir. Yine geri adımlamalı kontrolcü bütün referans takibi simülasyonlarında oturma zamanı en kısa olan kontrolcüdür. Ayrıca yükselme zamanı Lyapunov tabanlı kontrolcünden daha kısadır. Neredeyse hiç aşım göstermemesi ve oturma zamanının en kısa olması geri adımlamalı kontrolcünün diğer iki kontrolcünden daha gürbüz olduğunu göstermektedir.

4.3 - %50 Parametre Belirsizliği Altında Yapılan Simülasyonlar

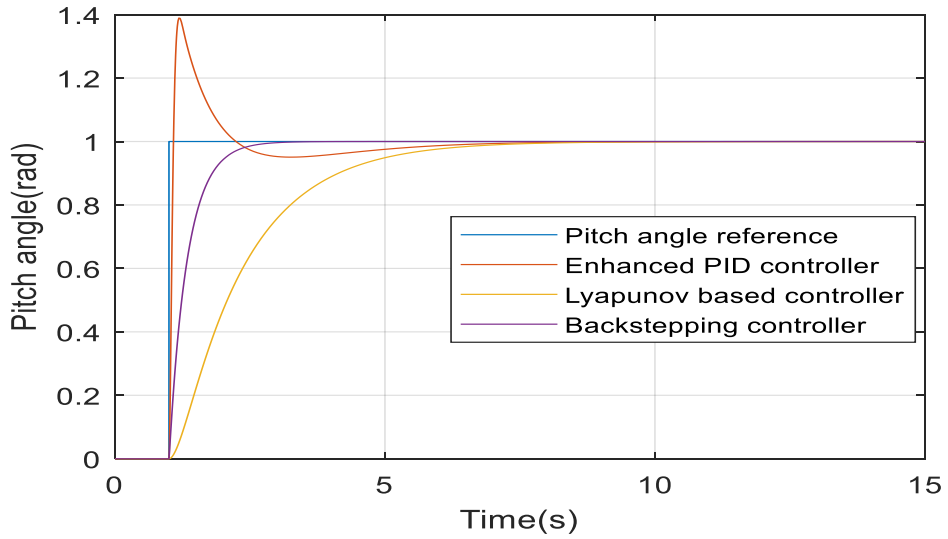
Bu bölümde quadrotorun m , l , b , d , w_{max} , J_r , I_x , I_y ve I_z parametrelerine - %50 parametre belirsizliği uygulanmıştır. Şekil 4.9’dan Şekil 4.12’ye kadar olan

şekillerde yapılan simülasyonlar gösterilmektedir. Şekil 4.9 - %50 parametre belirsizliği altında yalpa açısı referans takibini vermektedir.



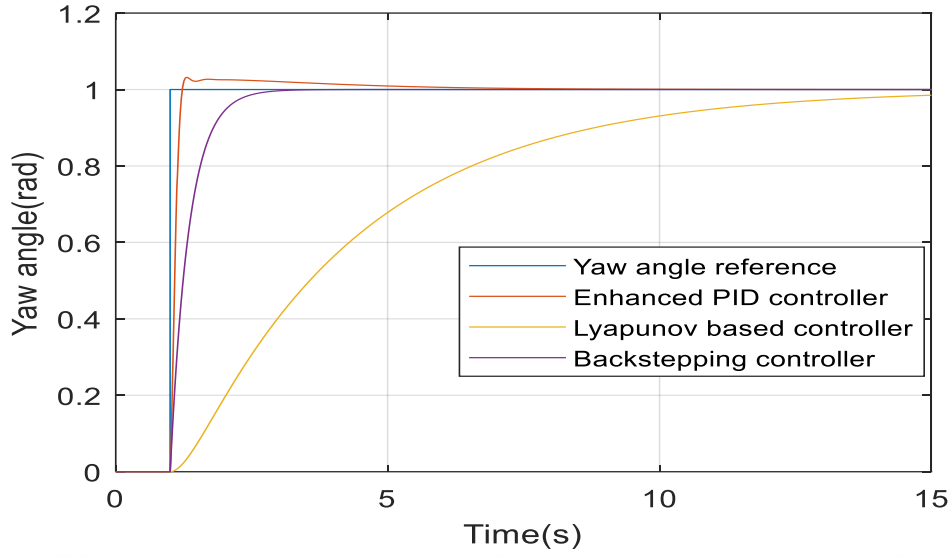
Şekil 4.9 : - %50 parametre belirsizliği altında yalpa açısı referans takibi.

Şekil 4.10 - %50 parametre belirsizliği altında yunuslama açısı referans takibini göstermektedir.



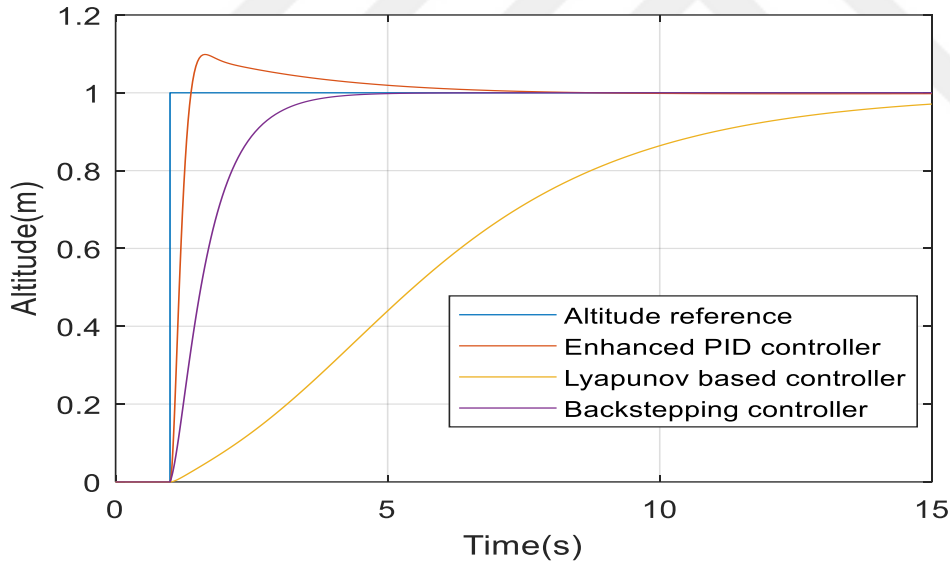
Şekil 4.10 : - %50 parametre belirsizliği altında yunuslama açısı referans takibi.

Şekil 4.11 - %50 parametre belirsizliği altında sapma açısı referans takibi simülasyonunu göstermektedir.



Şekil 4.11 : - %50 parametre belirsizliği altında sapma açısı referans takibi.

Şekil 4.12 - %50 parametre belirsizliği altında irtifa referansı takibi simülasyonunu vermektedir.



Şekil 4.12 : - %50 parametre belirsizliği altında irtifa referansı takibi.

Çizelge 4.3'te PID, Lyapunov tabanlı ve geri adımlamalı kontrolcüler için - %50 parametre belirsizliği altında yapılan simülasyonların zaman cevabına ilişkin veriler gösterilmektedir. Çizelge 4.3'te bazı kontrolcülerin Aşım (%) hanesinde yer alan “-“ işareti aşım görülmediğini ifade etmektedir.

Çizelge 4.3 : - %50 parametre belirsizliği altında kontrolcülerin zaman cevabı.

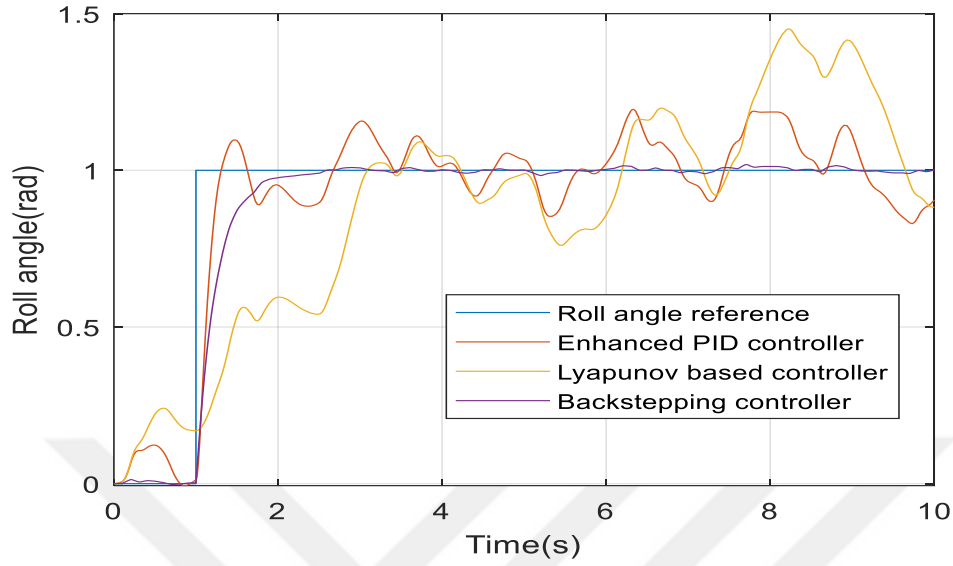
Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.12	5.86	4.45
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.93	-	7.98
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.53	0.49	1.99
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.57	40.14	5.5
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.15	-	6.36
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.75	0.5	2.42
Sapma açısı PID kontrolcü	0.15	2.57	3.74
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	8.67	-	14.1
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.74	0.5	2.41
İrtifa PID kontrolcü	0.25	10.55	5.21
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	10.89	-	15.78
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.5	3.68

Çizelge 4.3'teki verilerden anlaşılacağı üzere geri adımlamalı kontrolcünün oturma zamanı en kısadır. Lyapunov tabanlı kontrolcü hiç aşım göstermese de oturma zamanı en uzun olan kontrolcüdür. Bu durum Lyapunov tabanlı kontrolcünün aşırı sönümlü bir karaktere sahip olduğunu göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcü istenilen referans değerine yavaş bir şekilde ve uzun sürede ulaşmaktadır. PID kontrolcü en kısa yükselme zamanına sahiptir. PID kontrolcü çok hızlı yükselmesi aşımının da yüksek olmasına yol açmaktadır. Üç kontrolcü arasında aşımı en yüksek olan PID kontrolcüdür. Geri adımlamalı kontrolcü %0.5 kadar bir aşım göstermektedir. Bu oran ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu durumda geri adımlamalı kontrolcünün oturma zamanı en kısa, aşımı %0.5 düzeyinde ve PID kontrolcünden çok daha az, yükselme zamanı ise 0.53 ile 1.39 saniye arasında değişmekle birlikte Lyapunov kontrolcünün yükselme zamanından çok daha kısadır. Bütün bu özellikler bir arada düşünüldüğünde geri adımlamalı kontrolcünün PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcülerden daha gürbüz olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

4.4 Bant Sınırlı Beyaz Gauss Gürültüsü Altında Yapılan Simülasyonlar

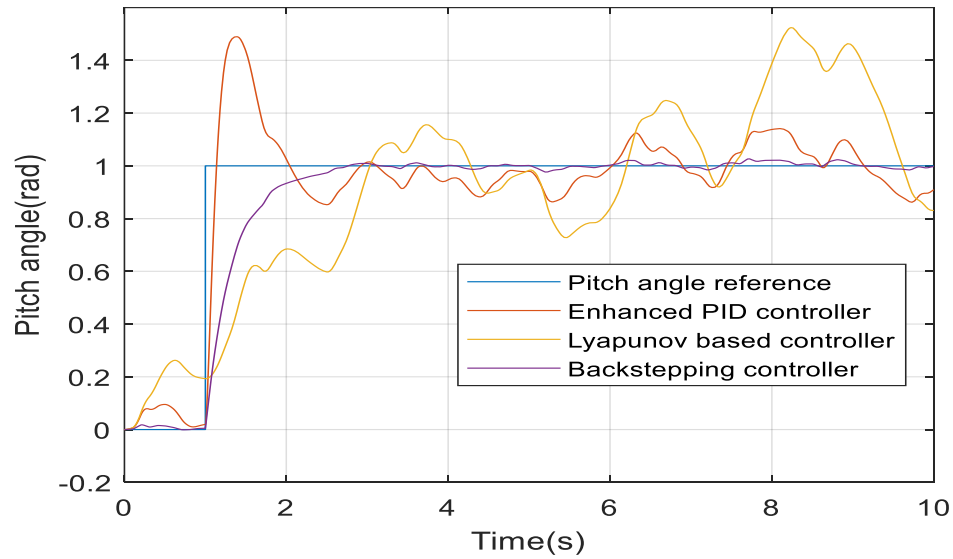
Bu bölümde bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında simülasyonlar yapılmıştır. Yükseklik kontrolcüsüne 0.01 güç ve 0.1 örnekleme süresi ile bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü verilmiştir. Yalpa, yunuslama, sapma açıları kontrolcülerine ise 0.0001 güç ve 0.1 örnekleme süresi ile bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü verilmiştir. Şekil 4.13'ten Şekil 4.16'ya kadar bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında yapılan

simülasyonlar verilmiştir Şekil 4.13 beyaz Gauss gürültüsü altında yalpa açısı referans takibi simülasyonu vermektedir.



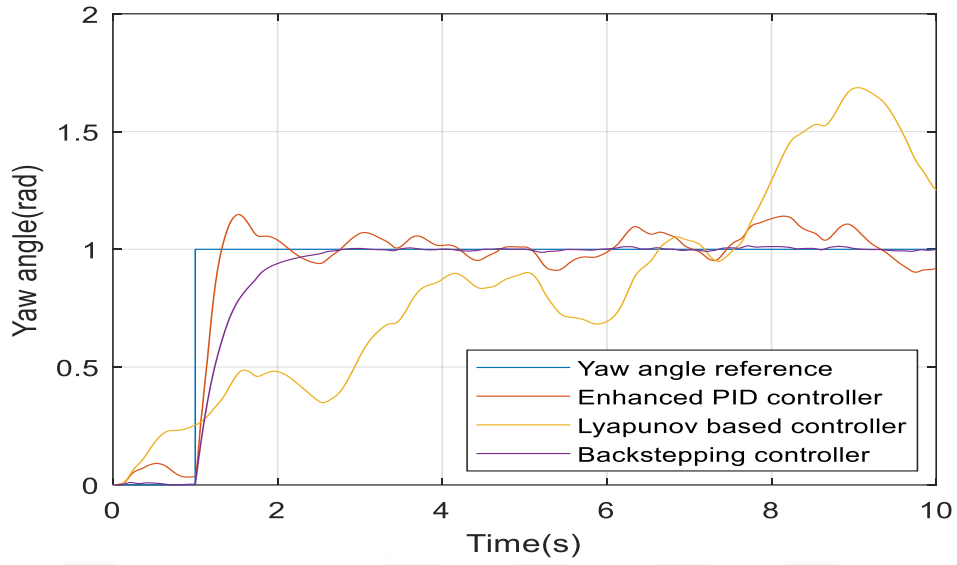
Şekil 4.13 : Beyaz Gauss gürültüsü altında yalpa açısı referans takibi.

Şekil 4.14'te beyaz Gauss gürültüsü altında yunuslama açısı referans takibi simülasyonu yer almaktadır.



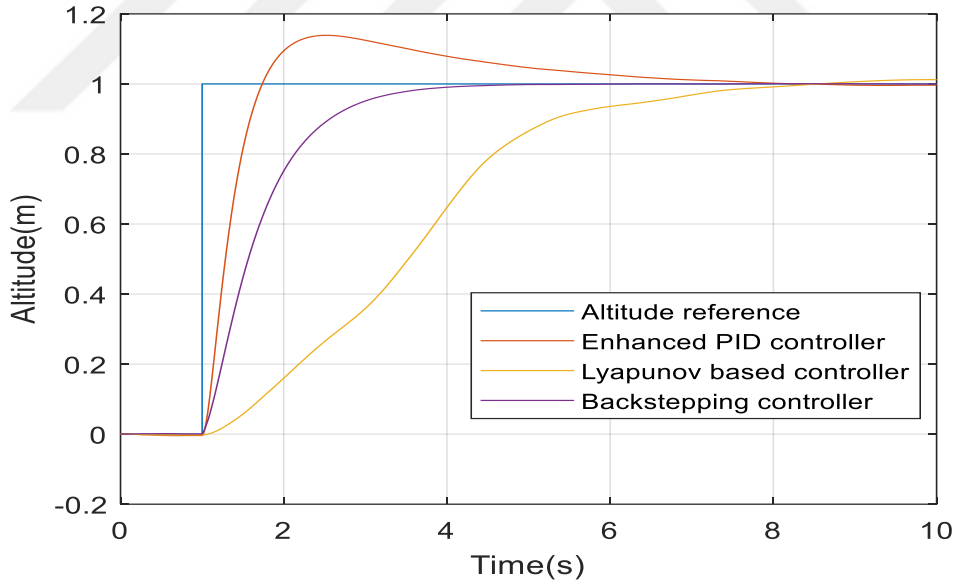
Şekil 4.14 : Beyaz Gauss gürültüsü altında yunuslama açısı referans takibi.

Şekil 4.15'te kontrolcülerin beyaz Gauss gürültüsü altında sapma açısı referans takibi simülasyonu yer almaktadır.



Şekil 4.15 : Beyaz Gauss gürültüsü altında sapma açısı referans takibi.

Şekil 4.16 kontrolcülerin beyaz Gauss gürültüsü altında irtifa referansı takibini göstermektedir.



Şekil 4.16 : Beyaz Gauss gürültüsü altında irtifa referans takibi.

Çizelge 4.4'te bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında yapılan simülasyonların zaman cevabı verileri gösterilmektedir. Oturma Zamanı sütununda “-“ işareti ile gösterilen durumlar, kontrolcünün gürültü nedeniyle verilen referansın \pm %2 aralığına yerleşemediği durumları ifade etmektedir.

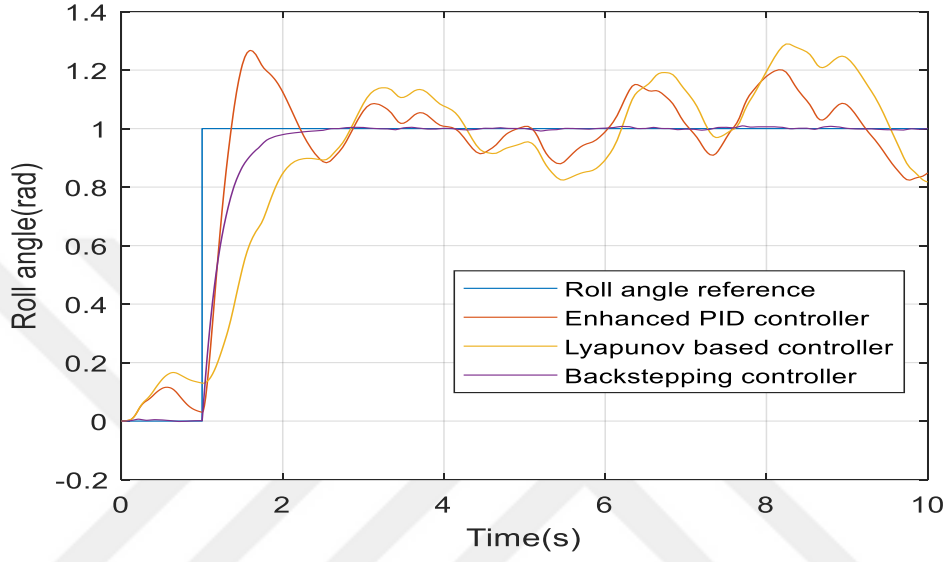
Çizelge 4.4 : Bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.19	15.85	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.83	45.08	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.57	0.58	2.13
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.1	47.01	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.73	67.48	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.77	1.09	2.56
Sapma açısı PID kontrolcü	0.25	10.92	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	0.73	13.43	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.76	0.7	2.53
İrtifa PID kontrolcü	0.49	14.37	6.44
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.3	1.53	7.38
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.45	3.6

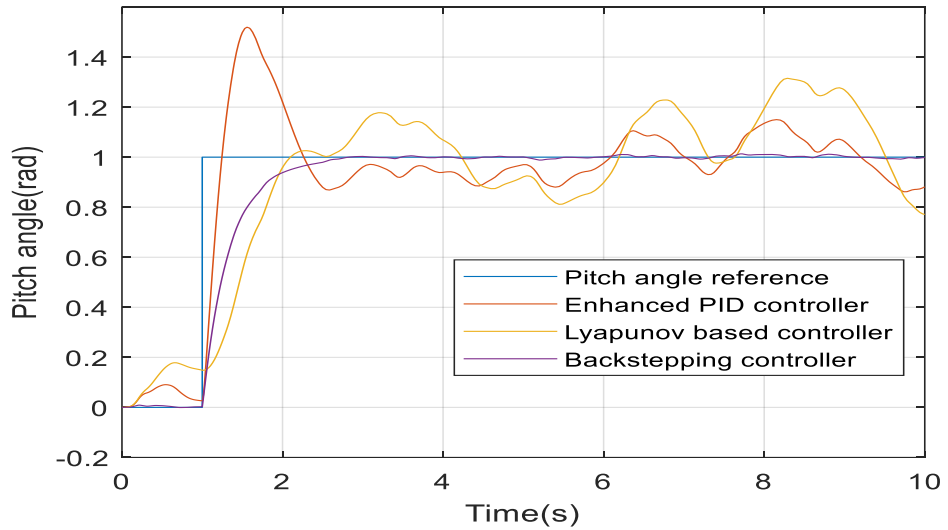
Çizelge 4.4 incelendiğinde yükselme zamanı en kısa olan kontrolcü PID kontrolcüdür. Ancak PID kontrolcünün aşımı geri adımlamalı kontrolcüdenden yüksektir. Ayrıca PID kontrolcü Gauss gürültüsünün etkisi nedeniyle verilen referansın \pm %2 aralığına oturamamaktadır. Bu nedenle irtifa için tasarlanan PID kontrolcü hariç olmak üzere diğer PID kontrolcülerin bir oturma zamanı yoktur. Lyapunov tabanlı kontrolcünün yükselme zamanı en uzundur. Ayrıca Lyapunov tabanlı kontrolcü en yüksek aşımı göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcünün irtifa referansı hariç olmak üzere bir oturma zamanı verisi yoktur. Bu durumda Gauss gürültüsünden en çok etkilenen Lyapunov tabanlı kontrolcüdür. Geri adımlamalı kontrolcünün yükselme zamanı irtifa referansı için 1.39 saniye diğer referanslar için ise 1 saniyenin altındadır. Bu durumda makul bir yükselme zamanı süresine sahiptir. Geri adımlamalı kontrolcünün aşımı ise üç kontrolcü arasında en azdır. Aşım yunuslama referansı için %1 civarında diğer referanslar için ise %1'in altındadır. Sadece geri adımlamalı kontrolcü bütün referanslarda oturma zamanına sahiptir. Oturma zamanı süresi 2.13 ile 3.6 saniye arasında değişmektedir. Bütün bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde Gauss gürültüsünden en az etkilenen kontrolcü geri adımlamalı kontrolcüdür.

4.5 Parametre Belirsizliği ve Bant Sınırlı Beyaz Gauss Gürültüsü Altında Yapılan Simülasyonlar

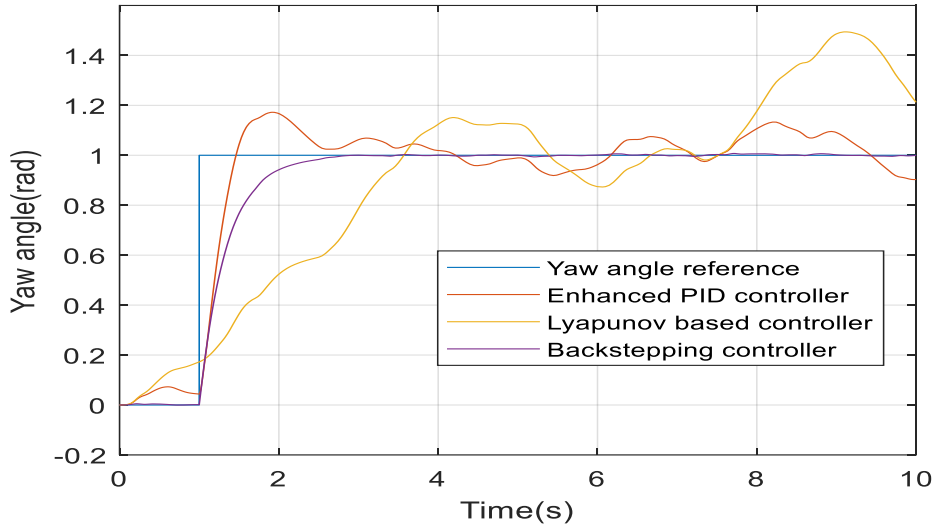
Bu bölümde eş zamanlı + %50 parametre belirsizliği ve bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 4.17 ve Şekil 4.20 arasında yapılan simülasyonlar verilmiştir.



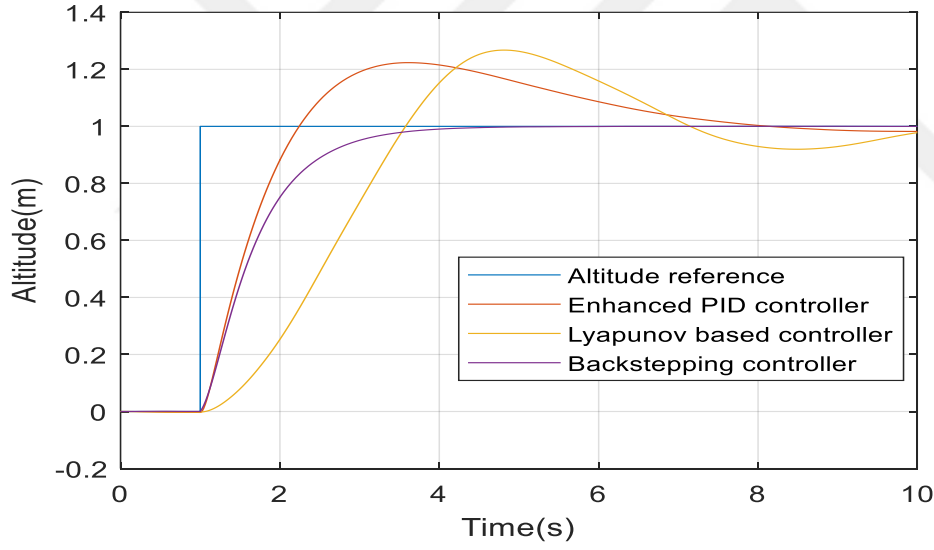
Şekil 4.17 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.18 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.19 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.20 : + %50 parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında irtifa referans takibi.

Çizelge 4.5'te eş zamanlı + %50 parametre belirsizliği ve bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında yapılan simülasyonların zaman cevabı verileri gösterilmektedir. Tablodaki Oturma Zamanı hanesinde “-“ işareti ile gösterilen durumlar, kontrolcünün eş zamanlı parametre belirsizliği ve gürültü nedeniyle verilen referansın \pm %2 aralığına yerleşemediği durumları belirtmektedir.

Çizelge 4.5 : + % 50 parametre belirsizliği ve bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

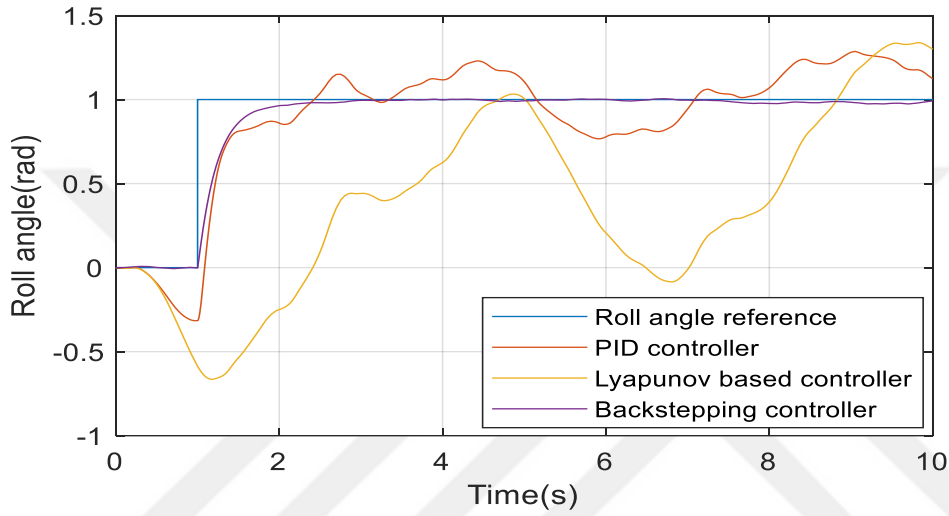
Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.3	13.37	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	0.67	41.6	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.56	0.01	2.02
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.24	24.68	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	0.66	27.95	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.76	0.77	2.50
Sapma açısı PID kontrolcü	0.45	0.52	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	2.22	38.28	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.77	0.07	2.49
İrtifa PID kontrolcü	0.73	24.38	7.56
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.64	25.95	9.97
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.47	3.53

Çizelge 4.5'te ifade görüldüğü üzere, PID kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahiptir. Ancak hızlı yükselme beraberinde önemli bir aşımı getirmektedir. PID kontrolcü geri adımlamalı kontrolcüden çok daha yüksek bir aşımına sahiptir. Ayrıca irtifa referansı hariç olmak üzere bir oturma zamanına sahip değildir. Lyapunov tabanlı kontrolcü ise en yüksek aşımı göstermektedir. Ayrıca irtifa referansı haricinde bir oturma zamanına sahip değildir. Geri adımlamalı kontrolcü ise en az aşımı göstermektedir. Bütün referans takiplerinde gösterdiği aşım %1'in altındadır. Geri adımlamalı kontrolcü bütün referanslar için oturma zamanına sahiptir. Makul bir zamanda bütün referansların %2 aralığına girerek oturmaktadır. Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde geri adımlamalı kontrolcünün eş zamanlı parametre belirsizliği ve bant sınırlı beyaz Gauss gürültüsü altında daha gürbüz bir performans gösterdiği ortaya çıkmaktadır.

4.6 Pembe Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar

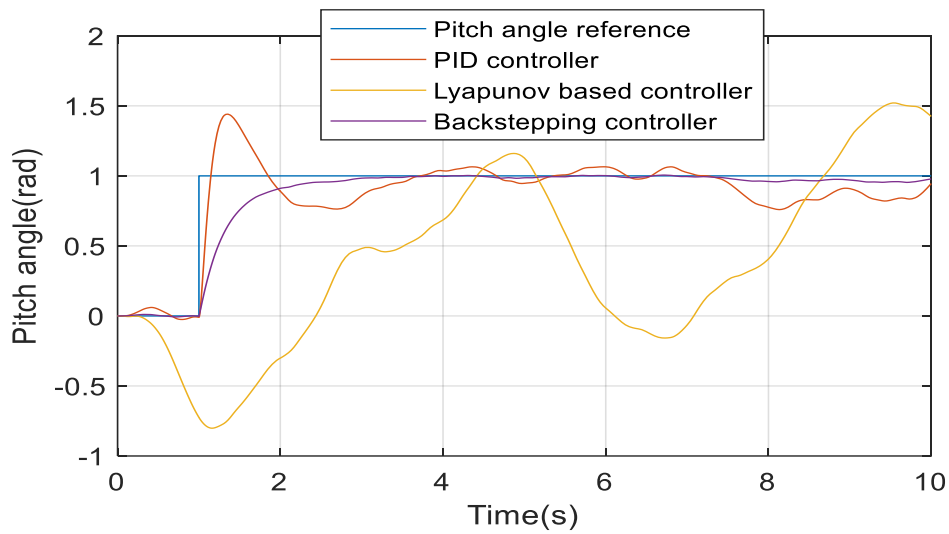
Bu bölümde pembe gürültü altında kontrolcülerin performansları karşılaştırılmıştır. Elektronik cihazlarda arka plan gürültüsü pembe gürültü olarak adlandırılır. Elektronik aletlerdeki pembe gürültünün ana kaynakları hemen her zaman aletlerin yoğun madde malzemelerinin özelliklerinin yavaş dalgalanmalarından kaynaklanmaktadır [83]. Pembe gürültü, güç spektral yoğunluğunun sinyalin frekansıyla ters orantılı olduğu frekans spektrumuna sahip bir sinyaldir. Pembe gürültüde her oktav aralığı eşit miktarda gürültü enerjisi taşır. Pembe gürültü adı, bu

güç tayfı ile görünür ışığın pembe görünümünden kaynaklanmaktadır. Bu, frekans aralığı başına eşit yoğunluğa sahip beyaz gürültünün tersidir. Bilimsel literatürde, $1/f$ gürültüsü terimi, f 'nin frekans olduğu ve a 'nın 0 ile 2 arasında olduğu $1/f^a$ biçiminde bir güç spektral yoğunluğuna sahip herhangi bir gürültüyü ifade etmek için kullanılır [84]. Şekil 4.21 ve Şekil 4.24 arasında kontrolcülerin pembe gürültü altında yapılan simülasyonları verilmiştir. Şekil 4.21 kontrolcülerin pembe gürültü altında yalpa açısı referans takibi simülasyonunu göstermektedir.



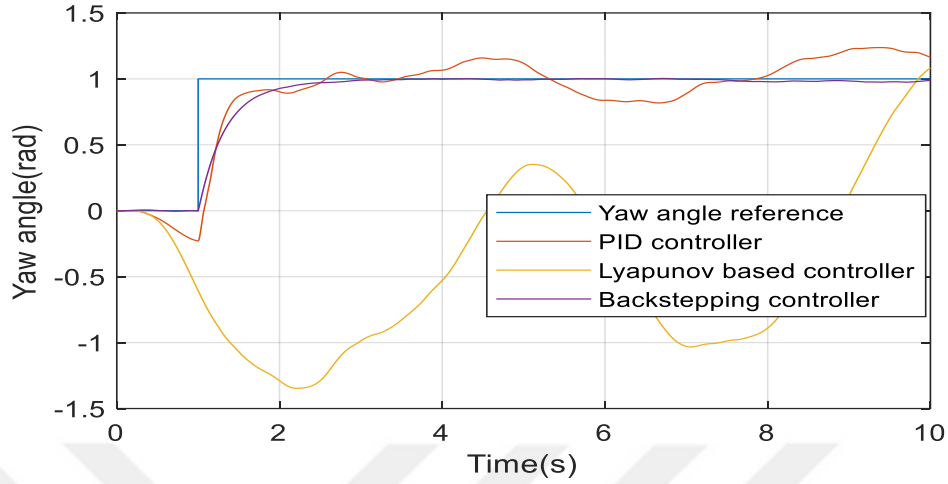
Şekil 4.21 : Pembe gürültü altında yalpa açısı referans takibi.

Şekil 4.22 kontrolcülerin pembe gürültü altında yunuslama açısı referans takibi simülasyonunu göstermektedir.



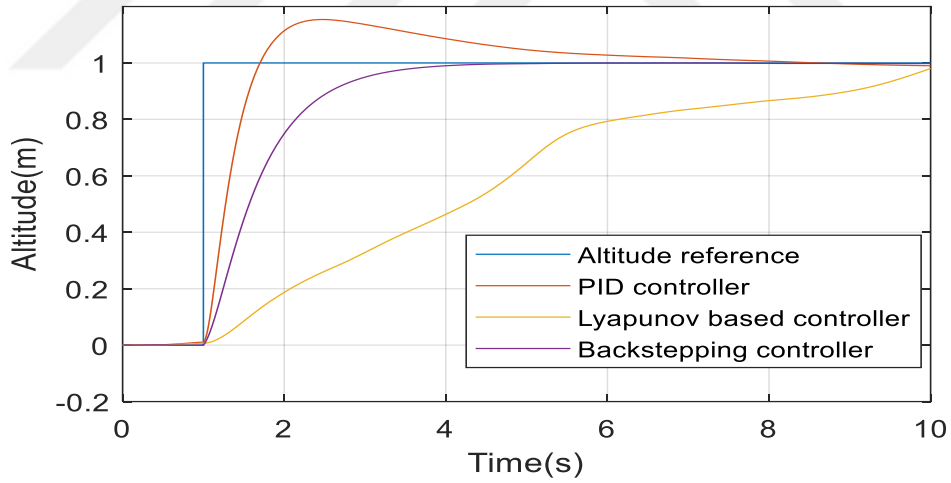
Şekil 4.22 : Pembe gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.

Şekil 4.23 kontrolcülerin pembe gürültü altındaki sapma açısı takibi simülasyonunu ifade etmektedir.



Şekil 4.23 : Pembe gürültü altında sapma açısı referans takibi.

Şekil 4.24'te kontrolcülerin pembe gürültü altında irtifa referansı takip simülasyonu yer almaktadır.



Şekil 4.24 : Pembe gürültü altında irtifa referans takibi.

Çizelge 4.6'da pembe gürültü altında gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verileri yer almaktadır. Pembe gürültünün yarattığı bozucu etki yüksek olduğundan referans takibi esnasında daha çok dalgalanma meydana gelmektedir. Bu nedenle pembe gürültüde oturma zamanı referans çizgisinin \pm %5 aralığı olacak şekilde belirlenmiştir. Çizelge 4.6'daki Oturma Zamanı bölümünde “-“ işareti ile gösterilen durumlar, kontrolcünün pembe gürültü nedeniyle verilen referansın \pm %5 aralığına yerleşemediği durumları göstermektedir.

Çizelge 4.6 : Pembe gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	1.45	23.28	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.69	34	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.22	1.83
Yunuslama açısı PID kontrolcü	1.12	43.9	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.29	52.2	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	1.5	1.23	2.30
Sapma açısı PID kontrolcü	1.40	8.30	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	9.85	8.7	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	1.56	0.34	2.16
İrtifa PID kontrolcü	1.47	15	4.93
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	10.16	0	9.7
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	2.14	0	2.99

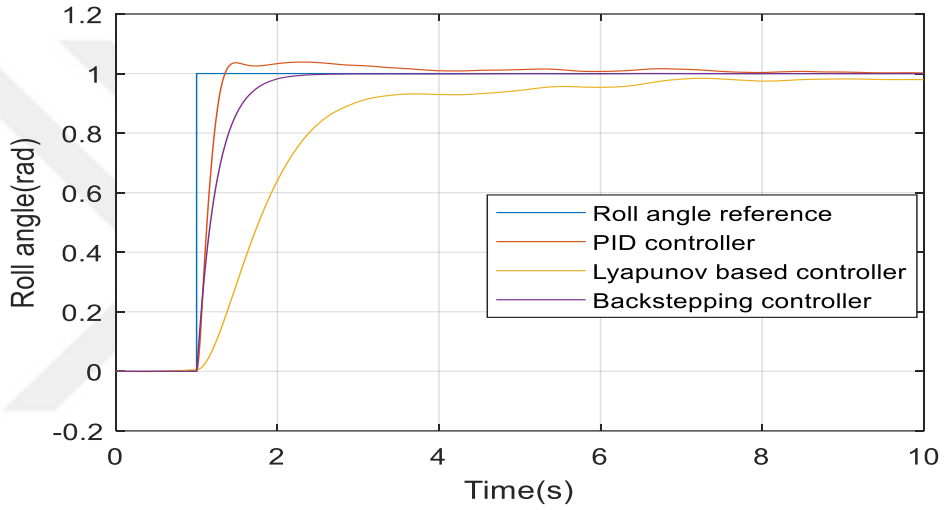
Çizelge 4.6 incelendiğinde yalpa açısı hariç olmak üzere en hızlı yükselme zamanını gösteren PID kontrolcüdür. Yalpa açısında en hızlı yükselme zamanı geri adımlamalı kontrolcüye aittir. Bütün referans türlerinde en uzun yükselme zamanı ise Lyapunov tabanlı kontrolcüye aittir. Yalpa, yunuslama ve sapma açılarında en yüksek aşımı Lyapunov tabanlı kontrolcü göstermektedir. İrtifa referansında ise en yüksek aşımı PID kontrolcü göstermektedir. Bütün referans türlerinde en düşük aşım geri adımlamalı kontrolcüye aittir. PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcüler, yalpa, yunuslama ve sapma referansları için oturma zamanına sahip değildir. Gürültü nedeniyle referansın \pm %5 aralığına yerleşememektedirler. Sadece geri adımlamalı kontrolcü bütün referanslarda oturma zamanı verisine sahiptir. En düşük aşımına sahip olması ve bütün referanslarda oturma zamanına sahip olması nedeniyle geri adımlamalı kontrolcü en gürbüz kontrolcüdür.

4.7 Kahverengi Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar

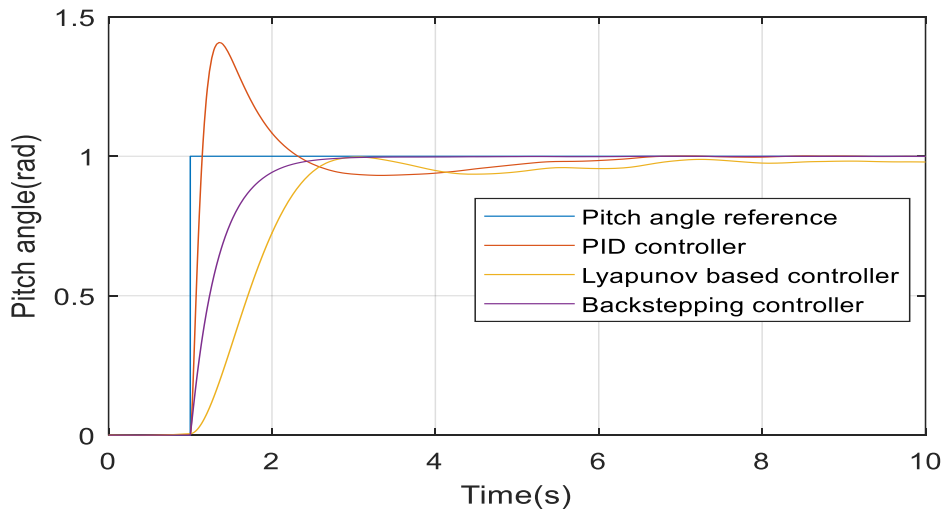
Bu bölümde kahverengi gürültü altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Kahverengi gürültünün doğadaki karşılığı akan şelaleler ve nehirlerin çıkardığı gürültü, yoğun yağış gürültüsü ve gök gürültüsüdür [85]. Kahverengi gürültü ya da diğer ismiyle kırmızı gürültü, Brownian hareketinin ürettiği sinyal gürültüsü türüdür. Bu yüzden diğer ismi rastgele yürüyüş gürültüsüdür. Kahverengi gürültü ismi renkten gelmemektedir, sudaki çok sayıda cansız parçacık türü için düzensiz hareketi bulan botanikçi Robert Brown'dan gelmektedir. Kırmızı gürültü kavramı ise beyaz

gürültü/beyaz ışık analogisinden gelmektedir. Kırmızı gürültü, görünür tayfın kırmızı ucuna benzerlik gösterecek biçimde daha uzun dalga boylarında güçlüdür [86, 87].

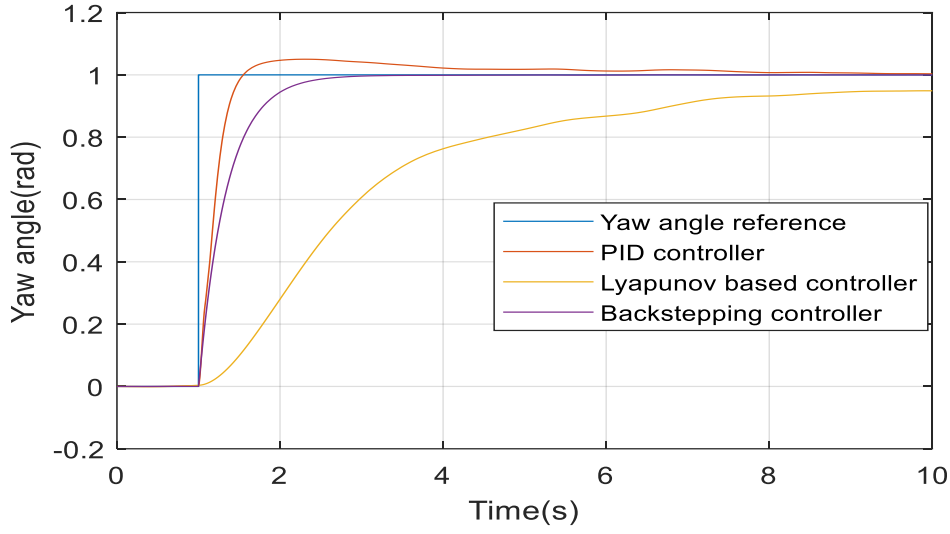
Ses sinyalinin grafik gösterimi bir Brown modeline benzer. Spektral yoğunluğu f^2 ile ters orantılıdır. Bu nedenle düşük frekanslarda pembe gürültüden daha yüksek yoğunluğu vardır. Yoğunluğu oktav başına 6 dB azalmaktadır ve duyulduğunda beyaz ve pembe gürültüye göre sönümlenmiş ya da yumuşak bir kalitesi vardır. Brown hareketi Gauss dağılımına sahiptir, fakat kırmızı gürültü $1/f^2$ frekans spektrumuna sahip herhangi bir sinyal için geçerli olabilir [88]. Şekil 4.25 ve Şekil 4.28 arasında kahverengi gürültü altında yapılan simülasyonlar verilmektedir.



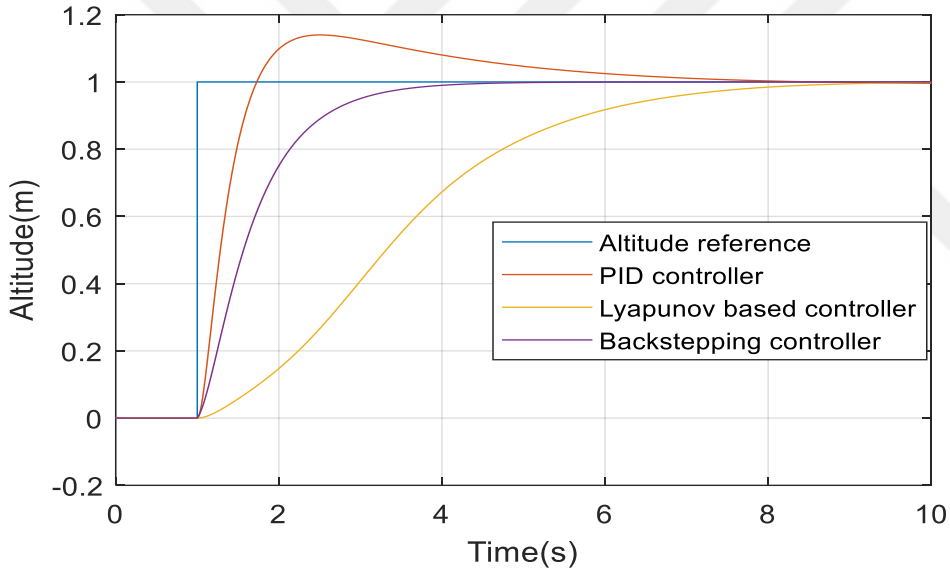
Şekil 4.25 : Kahverengi gürültü altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.26 : Kahverengi gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.27 : Kahverengi gürültü altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.28 : Kahverengi gürültü altında irtifa referans takibi.

Çizelge 4.7’de kahverengi gürültü altında gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verilmektedir. Oturma zamanı referansın \pm %2 aralığına yerleşme süresi olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.7’deki Oturma Zamanı hanesinde “-“ işaretiyle gösterilen durum, kontrolcünün gürültü nedeniyle verilen referansın \pm %2 aralığına yerleşemediği durumu belirtmektedir. Aşım hanesinde %0 ile gösterilen durumlar kontrolcünün hiç aşım göstermediği durumları belirtmektedir.

Çizelge 4.7 : Kahverengi gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

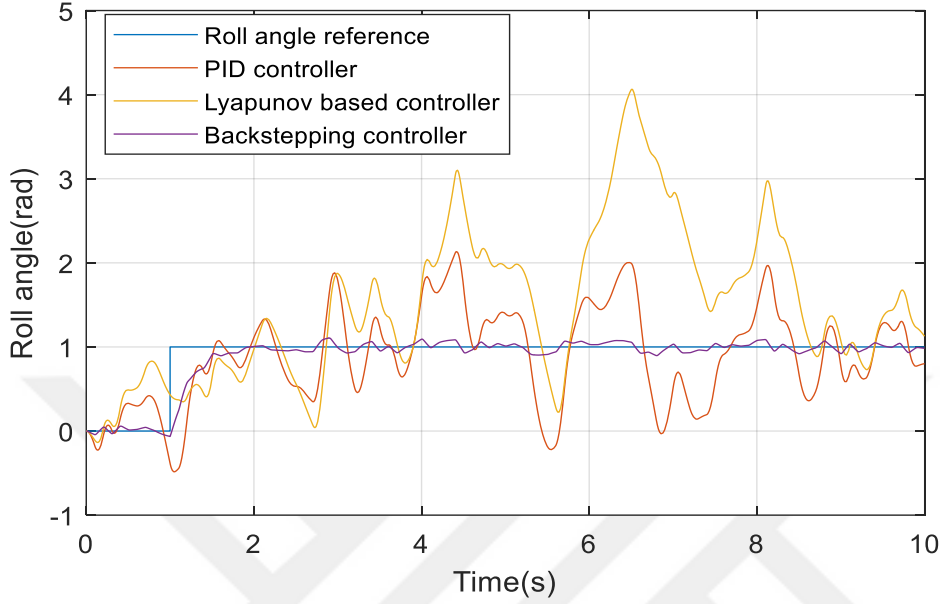
Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.24	3.7	1.33
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.73	0	7.01
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.53	0.39	1.98
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.11	40.9	5.3
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.12	1.53	6.8
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.76	0.33	2.33
Sapma açısı PID kontrolcü	0.34	5.1	4.06
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	5.26	0	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.77	0.41	2.34
İrtifa PID kontrolcü	0.49	14.3	6.47
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.97	0	7.70
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.43	0.5	3.51

Çizelge 4.7'deki veriler dikkate alındığında, PID kontrolcü kısa bir yükselme zamanına sahip olsa da bütün referanslarda en yüksek aşımı göstermektedir. Oturma zamanı ise geri adımlamalı kontrolcüden uzundur. Lyapunov tabanlı kontrolcü en uzun yükselme zamanına sahiptir. Yükselme zamanının çok uzun sürmesinden kaynaklı olarak aşım göstermemektedir. Ayrıca en uzun oturma zamanına sahiptir. Sapma açısı takibinde ise referansın \pm %2 aralığına oturmadığından bir oturma zamanı yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü ise %0'a yakın bir aşım göstermektedir. Ayrıca oturma zamanı, yalpa açısı haricindeki referans takiplerinin tamamında diğer kontrolcülerden daha kısadır. Neredeyse hiç aşım göstermemesi ve diğer kontrolcülerden daha kısa bir oturma zamanı göstermesi nedeniyle geri adımlamalı kontrolcü daha gürbüz bir performans ortaya koymaktadır.

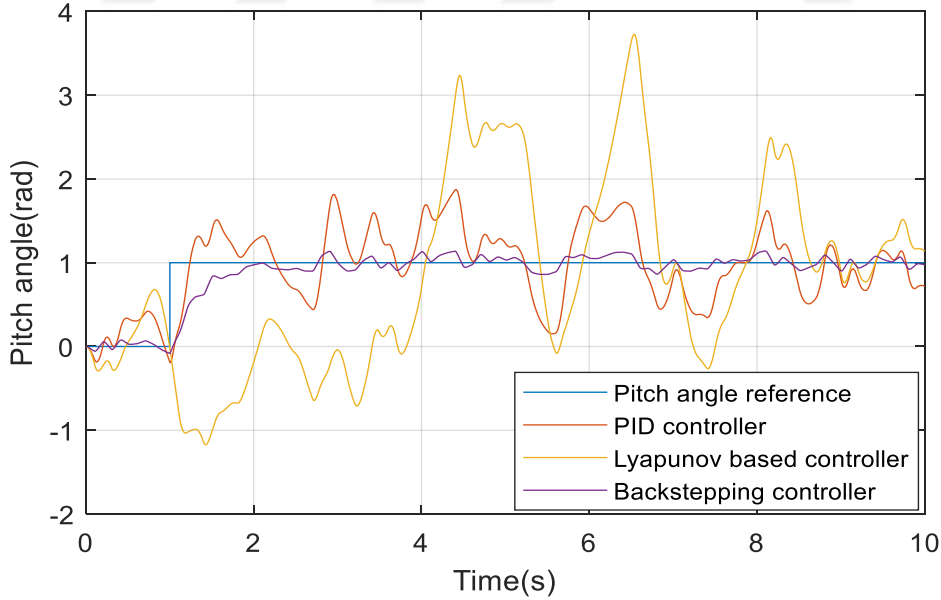
4.8 Mavi Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar

Bu bölümde mavi gürültü altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Mavi gürültünün doğadaki karşılığı fiskiyelerin çıkardığı tıslama sesine benzemektedir [89]. Mavi gürültünün güç yoğunluğu, sonlu bir frekans aralığında artan frekans ile (f ile orantılı yoğunluk) oktav başına $10\log_{10} 2 = 3,01$ dB artmaktadır [90]. Bilgisayar grafiklerinde, mavi gürültü kavramı bazen minimum düşük frekans bileşenlerine sahip ve enerjide yoğun ani yükselmeleri olmayan herhangi bir gürültü olarak kullanılır. Mavi gürültü, bilgisayar ortamında kısırtılabilir (dithering) işleminde kullanılır [91, 92]. Bilgisayar grafiklerinde kısırtılabilir, sınırlı renk paletine sahip görüntülerde renk derinliği yanılması yaratmak için kullanılan bir görüntü işleme

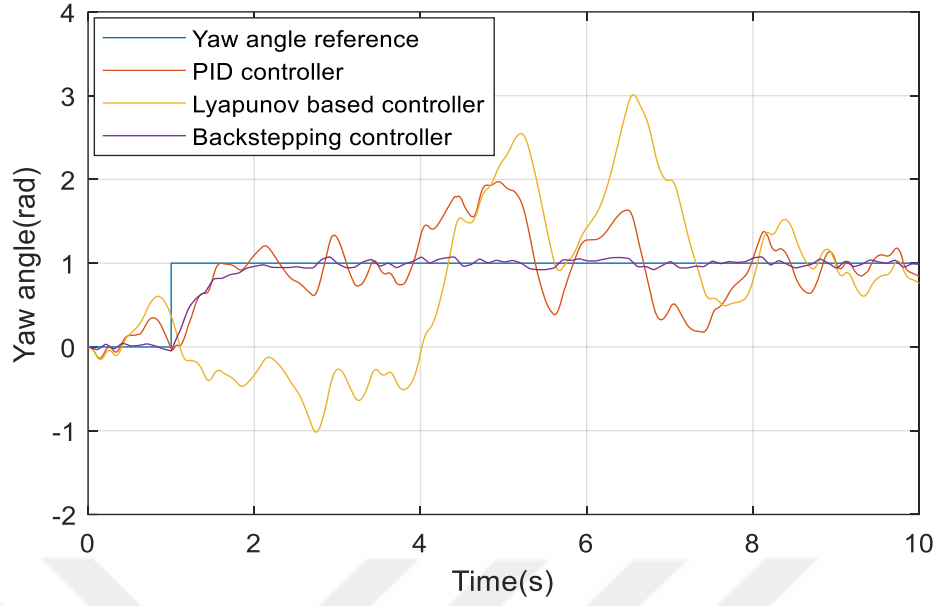
işlemdir [93]. Retina hücreleri, yüksek kalitede görsel çözünürlük sağlayan mavi gürültü benzeri bir örüntüde düzenlenmiştir [94]. Şekil 4.29 ile Şekil 4.32 arasında mavi gürültü altında yapılan kontrolcü simülasyonları verilmektedir.



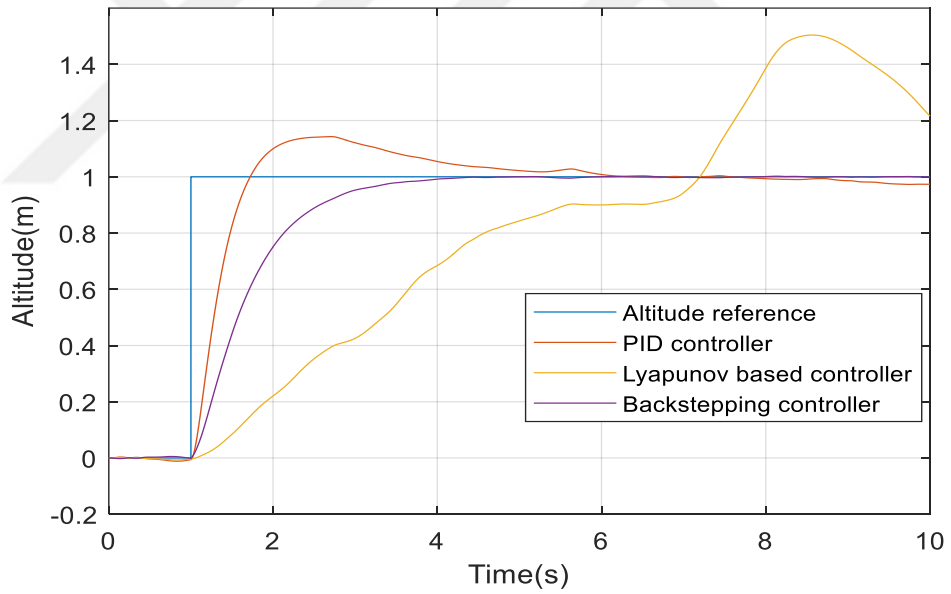
Şekil 4.29 : Mavi gürültü altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.30 : Mavi gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.31 : Mavi gürültü altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.32 : Mavi gürültü altında yükseklik referans takibi.

Çizelge 4.8’de mavi gürültü altında yapılan simülasyonlara ilişkin zaman cevabı verileri yer almaktadır. Oturma zamanı referans değerinin \pm %5 aralığı olacak şekilde belirlenmiştir. Çizelge 4.8’de Oturma Zamanı hanesinde yer alan “-“ işareti gürültü nedeniyle referans değerinin \pm %5 aralığına yerleşilemediği durumları belirtmektedir.

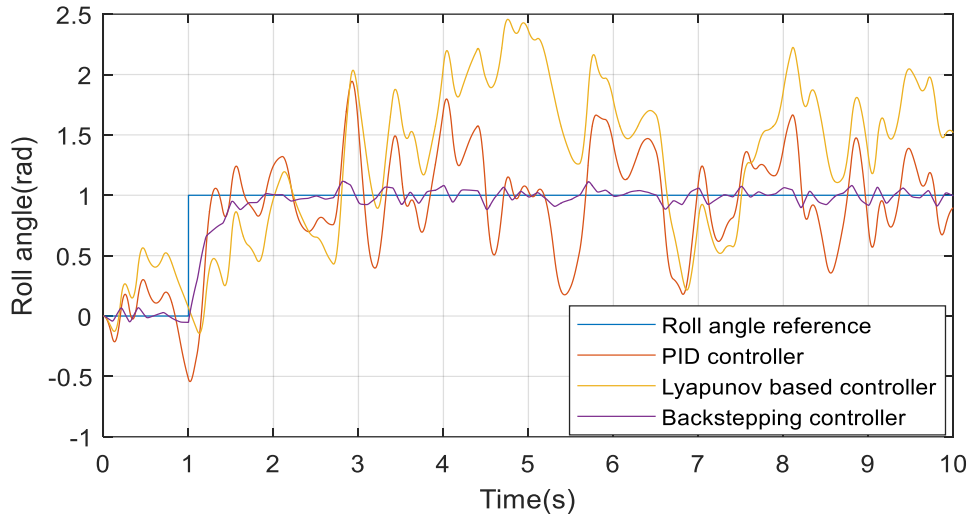
Çizelge 4.8 : Mavi gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	1.12	113.3	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.74	307.7	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.42	10.4	9.05
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.98	87.2	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.49	272.9	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.77	13.3	9.07
Sapma açısı PID kontrolcü	1.1	98.4	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.88	203.1	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.75	8.1	6.87
İrtifa PID kontrolcü	0.49	14.2	4.02
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.96	50.7	-
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.42	0.5	2.57

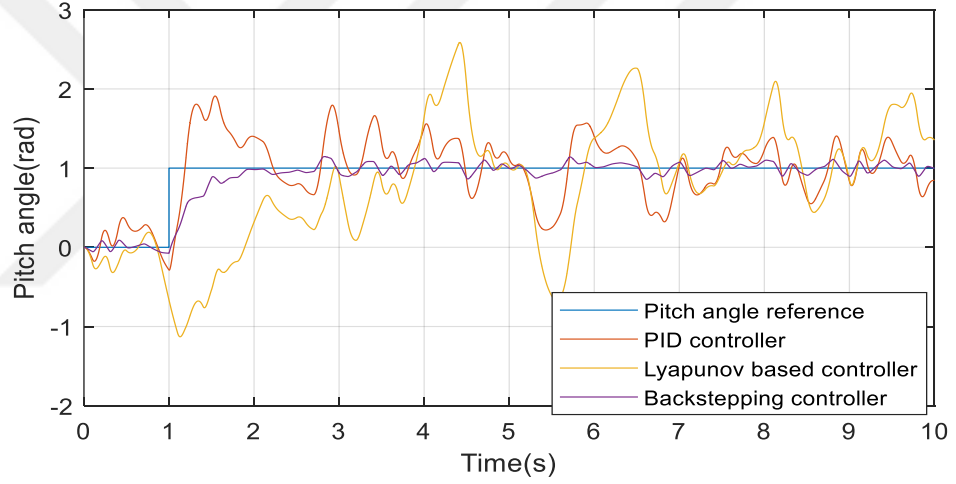
Çizelge 4.8 incelendiğinde yalpa, yunuslama ve sapma açıları için en kısa yükselme zamanına sahip olan kontrolcü geri adımlamalı kontrolcüdür. Ayrıca geri adımlamalı kontrolcü bütün referans türlerinde en az aşımı göstermektedir. Bütün referanslarda oturma zamanına sahip olan tek kontrolcü geri adımlamalı kontrolcüdür. Diğer kontrolcüler gürültü nedeniyle referans değerinin \pm %5 aralığına yerleşmemektedir. PID kontrolcü sadece yükseklik referansında oturma zamanına sahiptir. Diğer referanslarda oturma zamanı verisi yoktur. Lyapunov tabanlı kontrolcü ise hiçbir referansta oturma zamanına sahip değildir ve en yüksek aşımı göstermektedir. Bütün bu sonuçlar bir arada değerlendirildiğinde geri adımlamalı kontrolcünün hepsinden daha gürbüz olduğu ortaya çıkmaktadır.

4.9 Mor Gürültü Altında Yapılan Simülasyonlar

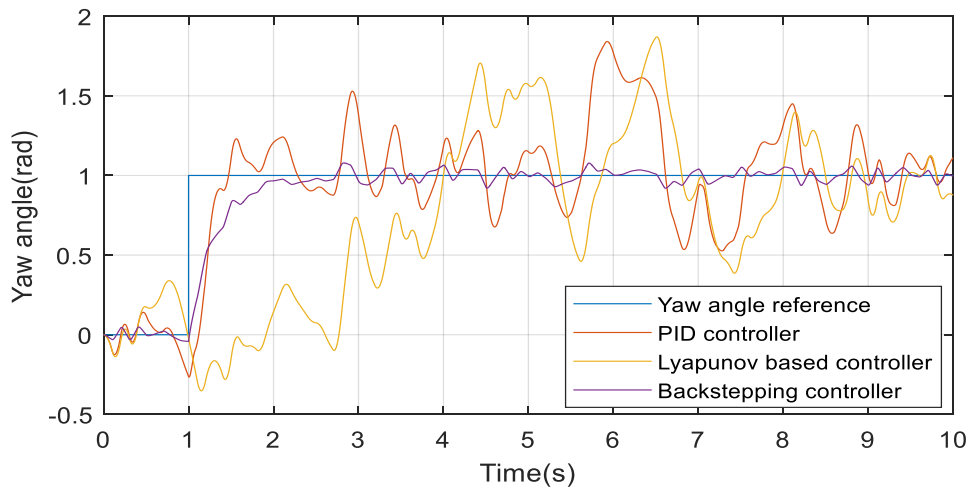
Bu bölümde mor gürültü altında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Mor gürültünün doğadaki karşılığı tiz bir tıslama sesidir. Mor gürültünün güç yoğunluğu, artan frekansla birlikte oktav başına 6,02 dB artmaktadır. "Spektral analiz, GPS ivme hatalarının mor gürültü süreçleri gibi görüldüğünü göstermektedir. Sonlu bir frekans aralığında yüksek frekanslı gürültü hakimdir (f^2 ile orantılı yoğunluk). Mor gürültü, beyaz gürültü sinyalinin farklılaşması neticesinde oluştuğundan farklılaştırılmış beyaz gürültü olarak da bilinmektedir [95]. Şekil 4.33 ile Şekil 4.36 arasında mor gürültü altında gerçekleştirilen simülasyonlar yer almaktadır.



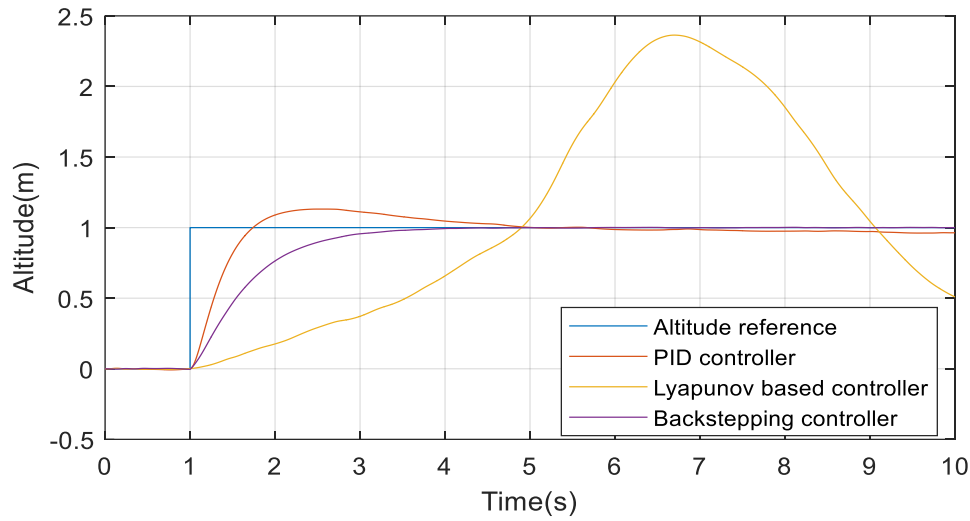
Şekil 4.33 : Mor gürültü altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.34 : Mor gürültü altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.35 : Mor gürültü altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.36 : Mor gürültü altında yükseklik referans takibi.

Mor gürültü altında yapılan simülasyonlara ilişkin zaman cevabı verileri Çizelge 4.9’da gösterilmektedir. Oturma zamanı referans değerinin \pm %5 aralığı olacak şekilde belirlenmiştir. Oturma Zamanı kısmındaki “-“ işareti gürültü nedeniyle kontrolcünün verilen referansın \pm %5 aralığına yerleşemediği durumları belirtmektedir.

Çizelge 4.9 : Mor gürültü altında kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	1.04	95	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.77	145.8	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.41	12	9.85
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.99	91.9	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	2.22	158	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.44	14.9	9.86
Sapma açısı PID kontrolcü	0.88	84.3	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.55	87.6	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.77	8	6.86
İrtifa PID kontrolcü	0.50	13.3	4.05
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.10	137	14.58
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.42	0.45	2.93

Çizelge 4.9’deki veriler ele alındığında irtifa referansı hariç olmak üzere diğer tüm referanslarda geri adımlamalı kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahiptir. Geri adımlamalı kontrolcü bütün referans takiplerinde en düşük aşımı göstermektedir. Ayrıca geri adımlamalı kontrolcü bütün referanslarda oturma zamanına sahiptir. PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcüler irtifa referansı hariç bir oturma zamanına sahip değildir. Bu durumda verilen referans değerinin \pm %5 aralığını yakalayamamaktadırlar.

İrtifa referansında ise geri adımlamalı kontrolcü diğer iki kontrolcünden çok daha kısa bir oturma zamanına sahiptir. Bütün bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde geri adımlamalı kontrolcünün mor gürültü altında diğer iki kontrolcünden daha gürbüz bir performans ortaya koyduğu anlaşılmaktadır.

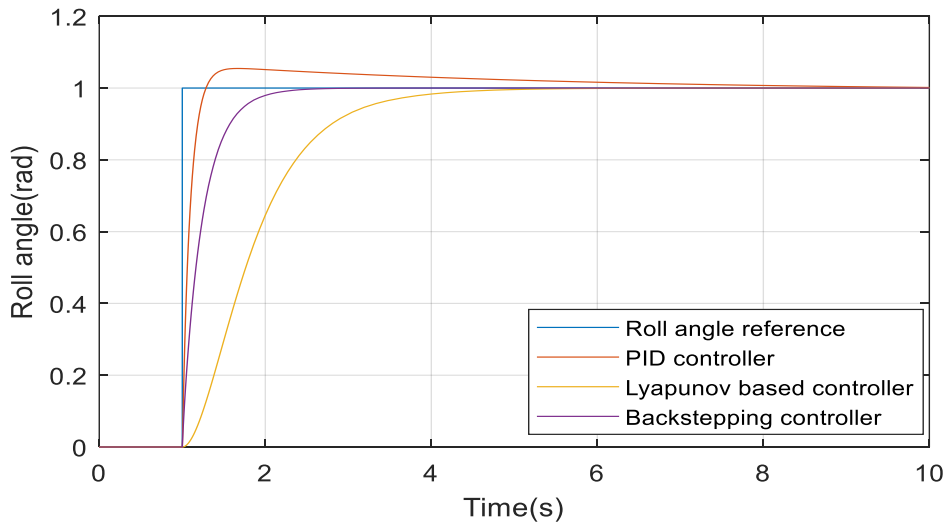
4.10 PID Kontrolcü için İkinci Katsayılarla Yapılan Simülasyonlar

Bu bölümde farklı katsayılar kullanılarak önceki bölümde yapılan simülasyonlar tekrar edilmiştir. PID kontrolcünün aşımını azaltacak şekilde yeni katsayılar belirlenmiştir. Lyapunov tabanlı kontrolcünün simülasyonlarında hiç aşım görülmediğinden veya çok az aşım olduğundan yeni katsayılar belirlenmemiştir. Geri adımlamalı kontrolcü bütün kontrolcüler arasında en az aşım ve en kısa oturma zamanına sahip olduğundan onun için de yeni katsayılar belirlenmemiştir. PID kontrolcü için farklı katsayılar ile simülasyonlar tekrarlanmıştır. Çizelge 4.10 PID kontrolcü için ikinci katsayıları vermektedir.

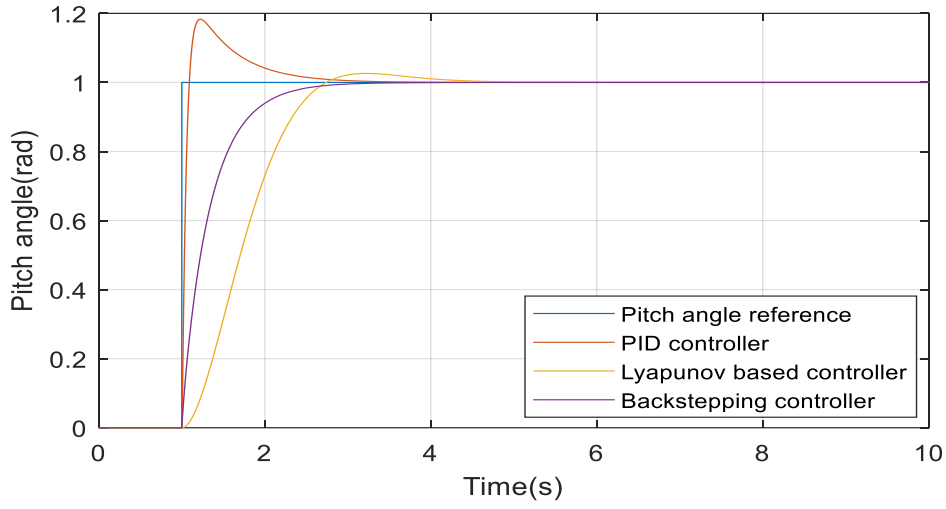
Çizelge 4.10 : PID kontrolcü için ikinci katsayılar.

Parametre	Yalpa	Yunuslama	Sapma	Yükseklik
K_p	0.019	0.306	0.068	3.513
K_i	0.001	5.268	0.004	0.257
K_d	0.075	0.163	0.122	6.490

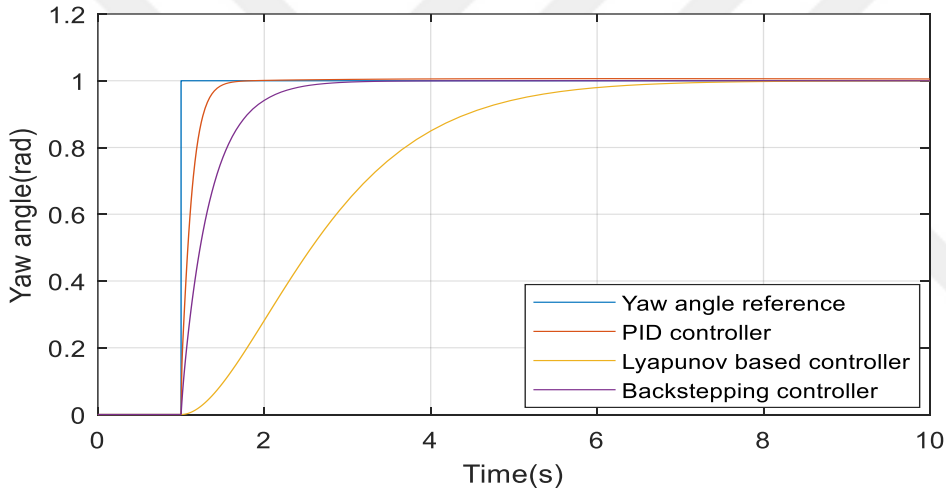
Şekil 4.37 - Şekil 4.40 arasında ikinci katsayılarla yapılan simülasyonlar verilmiştir.



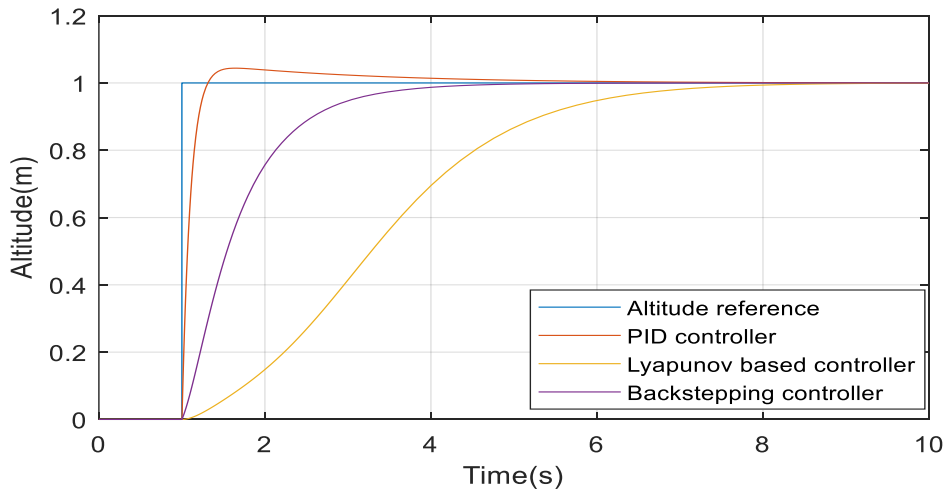
Şekil 4.37 : İkinci katsayılarla yapılan yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.38 : İkinci katsayılarla yapılan yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.39 : İkinci katsayılarla yapılan sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.40 : İkinci katsayılarla yapılan yükseklik referans takibi.

İkinci katsayılarla yapılan simülasyonlara ilişkin zaman cevabı verileri Çizelge 4.11’de gösterilmektedir. Oturma zamanı referans değerin \pm %2 aralığında olacak biçimde belirlenmiştir. Aşım hanesinde “-“ ile gösterilen bölümlerde aşım gözlenmemiştir.

Çizelge 4.11 : İkinci katsayılar için kontrolcülerin zaman cevabı karşılaştırması.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.183	5.3	5.59
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.487	0.5	3.66
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.52	0.49	1.99
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.06	18.11	2.42
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.06	3.64	3.82
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.75	0.5	2.45
Sapma açısı PID kontrolcü	0.26	0.9	1.46
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	2.8	-	5.66
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.74	0.5	2.38
İrtifa PID kontrolcü	0.22	4.5	3.60
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.85	-	6.43
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.39	0.5	3.62

Normal koşullar altında ilk katsayılarla yapılan simülasyonlara kıyasla yalpa açısı PID kontrolcünde yeni katsayılarla salınım azaltılmış, yükselme zamanı kısalmıştır. Ancak aşım artmış ve oturma zamanı yükselmiştir. Yükselme zamanı 0.23 saniyeden 0.183 saniyeye düşmüştür. Aşım %3.12’den %5.3’e çıkmıştır. Oturma zamanı 4.53 saniyeden 5.59 saniyeye çıkmıştır.

Yunuslama açısı PID kontrolcüsünde ise yeni katsayılar sayesinde yükselme zamanı düşürülmüş, aşım azaltılmış ve oturma zamanı kısalmıştır. Yükselme zamanı 0.1 saniyeden 0.06 saniyeye düşmüştür. Aşım %42.14’den %18.11’e düşmüştür. Oturma zamanı 5.47 saniyeden 2.42 saniyeye düşmüştür.

Sapma açısı PID kontrolcünde ise yeni katsayılarla yükselme zamanı azalmış, aşım düşmüş ve oturma zamanı azalmıştır. Yükselme zamanı 0.32 saniyeden 0.26 saniyeye düşmüştür. Aşım %5.85’ten %0.9’a düşmüştür. Oturma zamanı 5.13 saniyeden 1.46 saniyeye düşmüştür.

İrtifa PID kontrolcünde yeni katsayılarla yapılan simülasyonlar neticesinde yükselme zamanı kısalmış, aşım düşmüş ve oturma zamanı kısalmıştır. Yükselme zamanı 0.49

saniyeden 0.22 saniyeye düşmüştür. Aşım %14.37'den %4.5'e düşmüştür. Oturma zamanı 6.68 saniyeden 3.60 saniyeye düşmüştür.

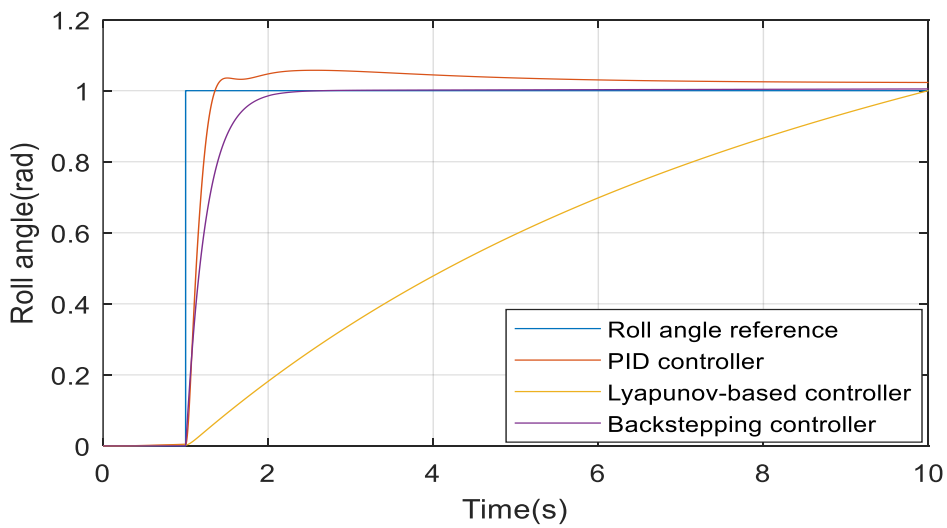
4.11 Sinüzoidal Bozucu Altında Yapılan Simülasyonlar

Bu bölümde kontrolcülerin sinüzoidal bozucu altında yapılan simülasyonları yer almaktadır. Sisteme 1 genlik ve 0.001 rad/s frekanslı sinüzoidal bir bozucu uygulanmıştır. Her üç kontrolcünün de yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri elde edilmiş ve karşılaştırmalı sağlamlık gürbüzlük yapılmıştır. Lyapunov tabanlı kontrolcü ilk katsayılar kullanıldığı takdirde referansları takip edemediğinden yeni katsayılar belirlenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Lyapunov tabanlı kontrolcünün de aşımını ve salınımını azaltacak şekilde katsayılar belirlenmiştir. Çizelge 4.12'de yeni katsayılar kullanılarak tasarlanan Lyapunov tabanlı kontrolcüye ilişkin katsayılar verilmektedir.

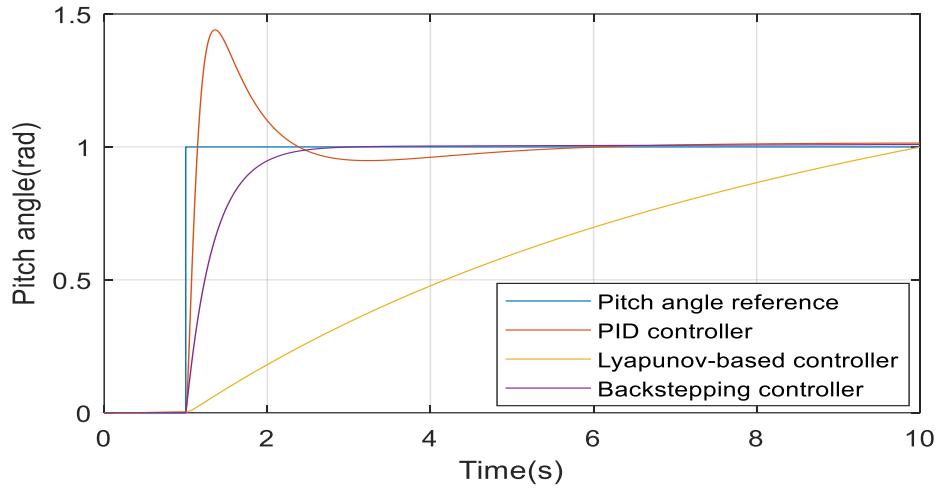
Çizelge 4.12 Lyapunov tabanlı kontrolcü için ikinci katsayılar.

Parametre	Değer
k_1	0.167
k_2	0.168
k_3	0.104
k_z	2.15

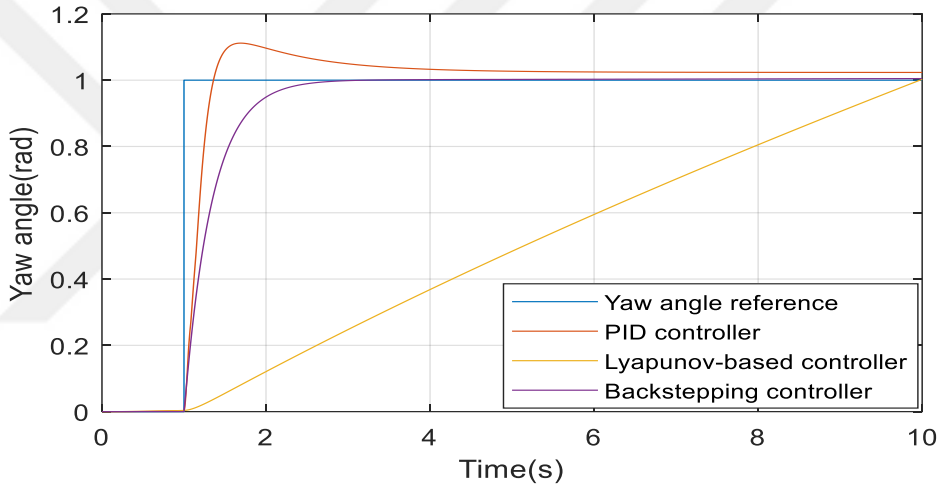
Şekil 4.41'den Şekil 4.44'e kadar sinüzoidal bozucu altında yapılan simülasyonlar verilmiştir.



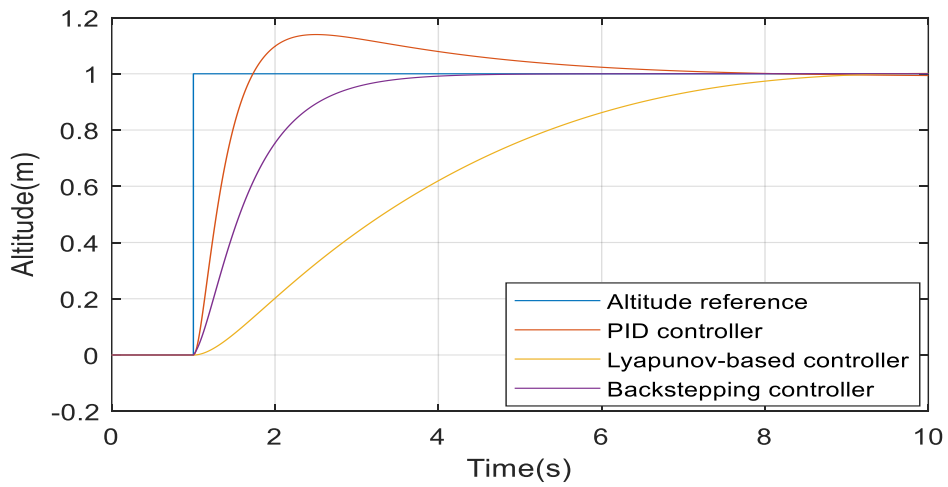
Şekil 4.41 : Sinüzoidal bozucu altında yalpa açısı referans takibi.



Şekil 4.42 : Sinüzoidal bozucu altında yunuslama açısı referans takibi.



Şekil 4.43 : Sinüzoidal bozucu altında sapma açısı referans takibi.



Şekil 4.44 : Sinüzoidal bozucu altında yükseklik referans takibi.

Sinüzoidal bozucu altında gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verileri Çizelge 4.13'te verilmektedir.

Çizelge 4.13 : Sinüzoidal bozucu altında kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.21	6	3.3
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	7.35	0	9.19
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.52	0.5	1.7
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.1	44.1	2.17
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	6.91	0	9.2
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.73	1	2
Sapma açısı PID kontrolcü	0.28	11.2	2.92
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	7.11	0	9.42
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.71	0.5	2
İrtifa PID kontrolcü	0.49	13.8	4.77
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	4.87	0.2	7.36
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	1.07	0	2.95

Yukarıdaki tabloda yer alan veriler incelendiğinde PID kontrolcünün en hızlı yükselme zamanına sahip olduğu açıkça gözlemlenmektedir. Ancak hızlı yükselmesinin de etkisiyle en yüksek aşım değerine sahiptir. PID kontrolcü Lyapunov tabanlı kontrolcüden daha kısa bir oturma zamanına sahiptir. Ancak geri adımlamalı kontrolcüden çok daha uzun bir oturma zamanına sahiptir. Lyapunov tabanlı kontrolcü en uzun yükselme zamanına sahiptir. Ancak yavaş yükselmesinin de etkisiyle bütün referans takiplerinde 0 aşım göstermektedir. Hiç aşım göstermeyen tek kontrolcüdür. Ayrıca yavaş tepki vermesinin etkisiyle en uzun oturma zamanına sahiptir. Geri adımlamalı kontrolcünün yükselme zamanı Lyapunov tabanlı kontrolcüden daha hızlı ancak PID kontrolcüden daha yavaştır. Geri adımlamalı kontrolcü yalpa, yunuslama ve sapma referanslarını takip ederken %0.5, irtifa referansını takip ederken 0 aşım göstermektedir. Geri adımlamalı kontrolcü bütün referans takiplerinde en kısa oturma zamanına sahiptir. Bütün referanslarda en kısa oturma zamanına sahip olması ve neredeyse hiç aşım göstermemesi nedeniyle geri adımlamalı kontrolcü diğerlerinden daha gürbüzdür.

4.12 Üçgen Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar

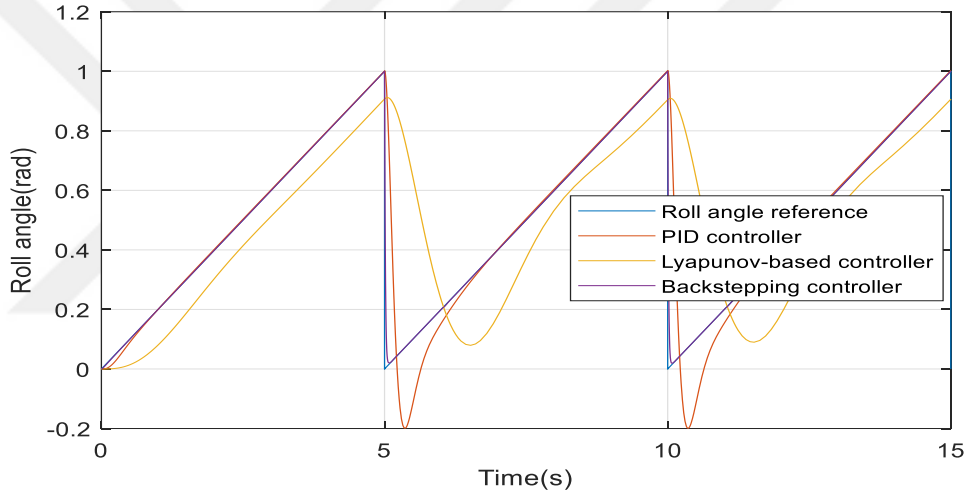
Bu bölümde kontrolcülerin sert manevra yapabilme kabiliyetlerini test etmek amacıyla üçgen referans takibi performansları incelenmiştir. Referans olarak genliği

1 ve periyodu 5 olan bir üçgen dalga kullanılmıştır. Lyapunov tabanlı kontrolcü birinci ve ikinci katsayılarla üçgen referans takibi yapamadığından yeni katsayılar kullanılmıştır. Lyapunov tabanlı kontrolcü için elde edilen üçüncü katsayılar Çizelge 4.14'te verilmektedir.

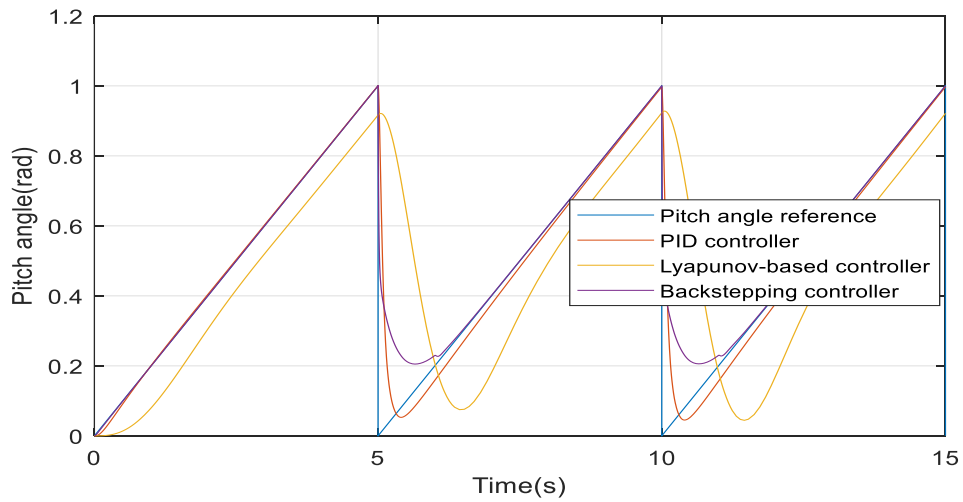
Çizelge 4.14 Lyapunov tabanlı kontrolcü için üçüncü katsayılar.

Parametre	Değer
k_1	0.015
k_2	0.015
k_3	0.007
k_z	0.45

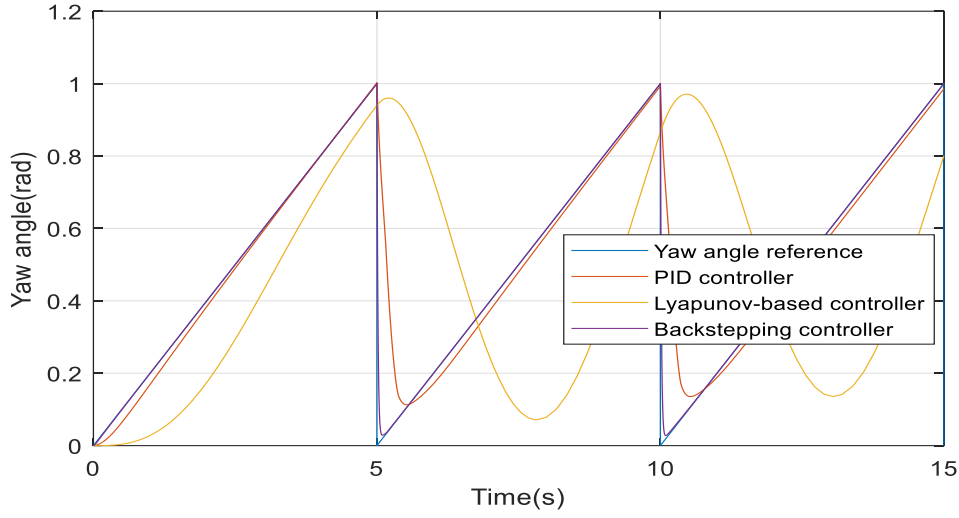
Şekil 4.45 ile Şekil 4.48 arasında kontrolcülerin üçgen referans takibi performansı gösterilmektedir.



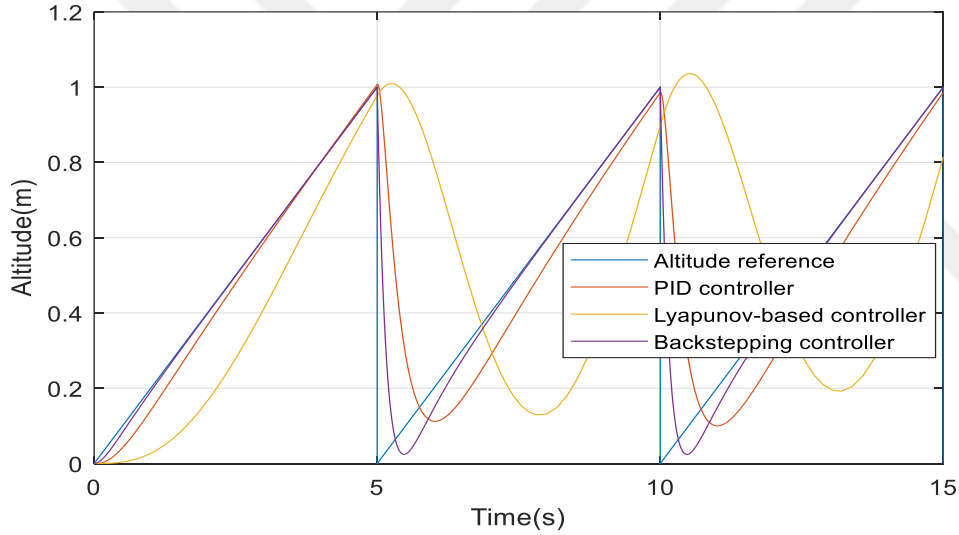
Şekil 4.45 : Üçgen referans için yalpa açısı takibi.



Şekil 4.46 : Üçgen referans için yunuslama açısı takibi.



Şekil 4.47 : Üçgen referans için sapma açısı takibi.



Şekil 4.48 : Üçgen referans için irtifa takibi.

Üçgen referans takibi için gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verileri Çizelge 4.15'te yer almaktadır. Oturma Zamanı hanesinde “-“ hanesiyle gösterilen bölümlerde oturma zamanı verisi yoktur. Oturma Zamanı hanesinde 0 ile gösterilen yerlerde ise simülasyonun başlangıcından itibaren verilen referans yakalandığı için oturma zamanı 0. saniye olarak ifade edilmiştir. Aşım hanesinde %0 olarak gösterilen durumlar kontrolcülerin aşım göstermediği durumları ifade etmektedir.

Çizelge 4.15 : Üçgen referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	3.97	20	6.16
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.84	0	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	3.98	0	0
Yunuslama açısı PID kontrolcü	3.97	0	7.01
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.79	0	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	3.97	0	6.03
Sapma açısı PID kontrolcü	3.78	0	7.08
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.2	0	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	3.97	0	0
İrtifa PID kontrolcü	3.68	0.9	9.25
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	3.02	3.8	-
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	3.89	0	6.39

Çizelge 4.15'teki veriler ele alındığında PID kontrolcü yalpa referansını takipte en yüksek aşımı göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcü diğer iki kontrolcüden hızlı bir yükselme zamanına sahiptir ve aşım göstermemektedir. Ancak oturma zamanı yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü ise üçgen referansı simülasyonun başlangıç anından itibaren neredeyse hatasız takip ettiğinden oturma zamanı 0 saniyedir.

Yunuslama açısı takibinde ise PID kontrolcü en uzun yükselme zamanına ve en uzun oturma zamanına sahiptir. Lyapunov tabanlı kontrolcü referansı iyi takip edemediğinden oturma zamanına sahip değildir. Geri adımlamalı kontrolcü hem aşım göstermemektedir hem de en kısa oturma zamanına sahiptir.

Sapma açısı referans takibinde Lyapunov tabanlı kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahip olsa da referansın \pm %2 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü simülasyonun başından itibaren referansın \pm %2 aralığında kaldığından oturma zamanı 0 saniyedir ve hiç aşım göstermemektedir.

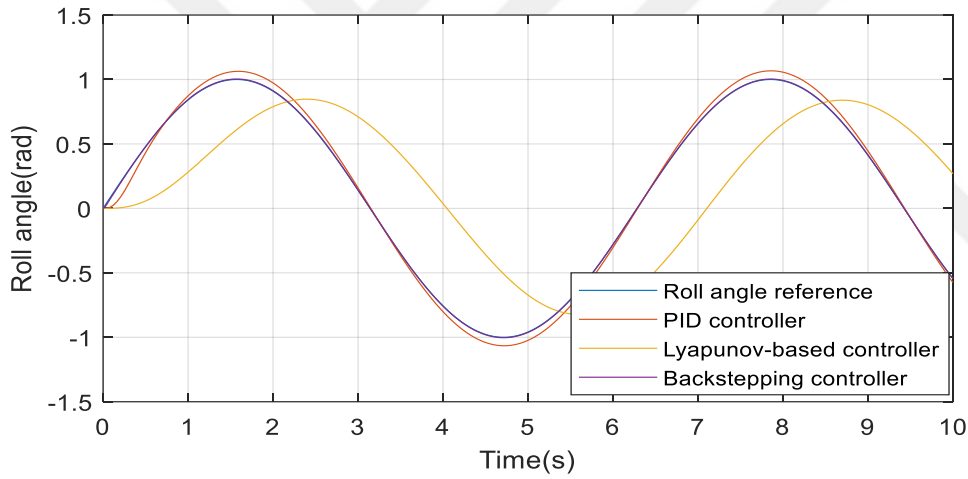
İrtifa referansı takibinde ise PID kontrolcü en uzun oturma zamanına sahiptir ve az da olsa aşım göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcü en kısa yükselme zamanına sahip olsa da referans değerinin \pm %2 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı yoktur. Ayrıca üç kontrolcü arasında en yüksek aşımı göstermektedir. Geri adımlamalı kontrolcü hem hiç aşım göstermemektedir hem de en kısa oturma zamanına sahiptir. Bütün referans takiplerinde en az aşımı göstermesi ve en kısa oturma zamanına sahip olması nedeniyle geri adımlamalı kontrolcü daha gürbüzdür.

4.13 1 rad/s Sinüzoidal Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar

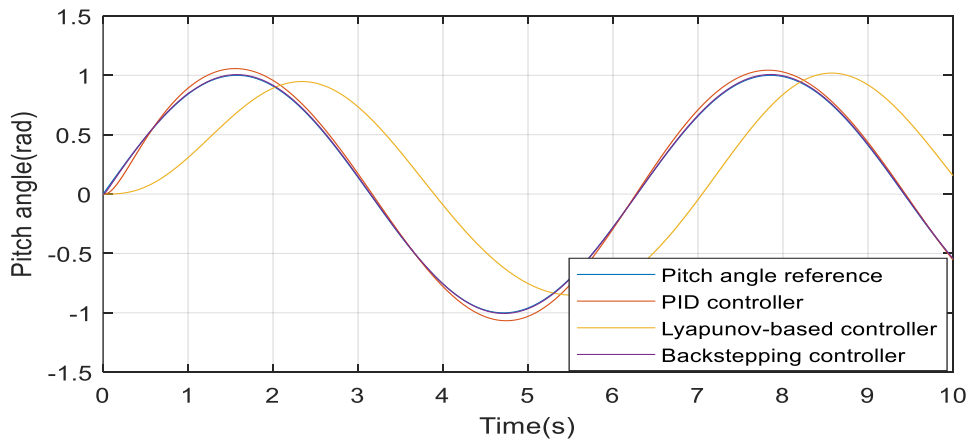
Bu bölümde kontrolcülerin manevra kabiliyetlerini gözlemleyebilmek için genliği 1 ve frekansı 1 rad/s olan sinüzoidal referans takibi simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Lyapunov tabanlı kontrolcü ilk katsayılarıyla sapma ve irtifa referanslarını takip edemediğinden bu iki referansı takip edebilmek için yeni katsayılar belirlenmiştir. Çizelge 4.16 Lyapunov tabanlı kontrolcü için yeni katsayıları vermektedir. Şekil 4.49 ve Şekil 4.52 arasında sinüzoidal referans takibi simülasyonları yer almaktadır.

Çizelge 4.16 Lyapunov tabanlı kontrolcü için dördüncü katsayılar.

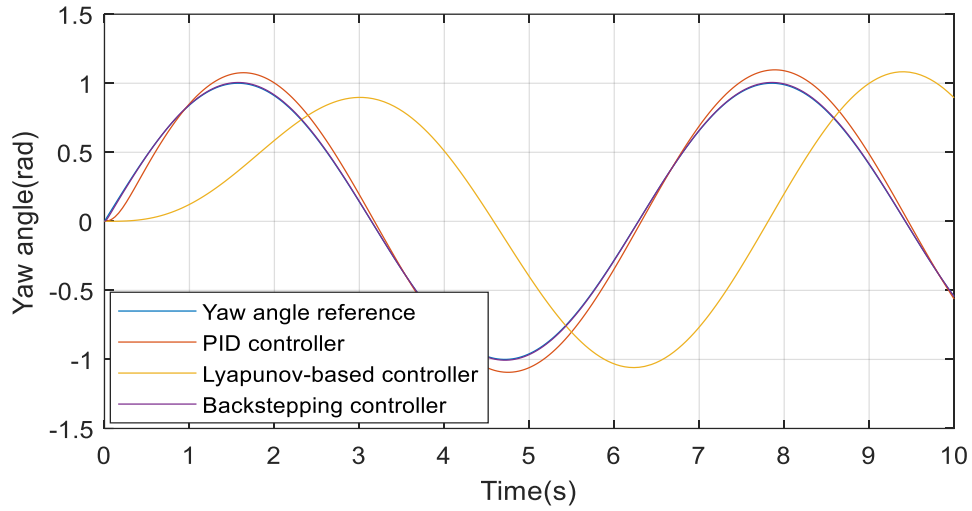
Parametre	Değer
k_1	0.03
k_2	0.024
k_3	0.012
k_z	1



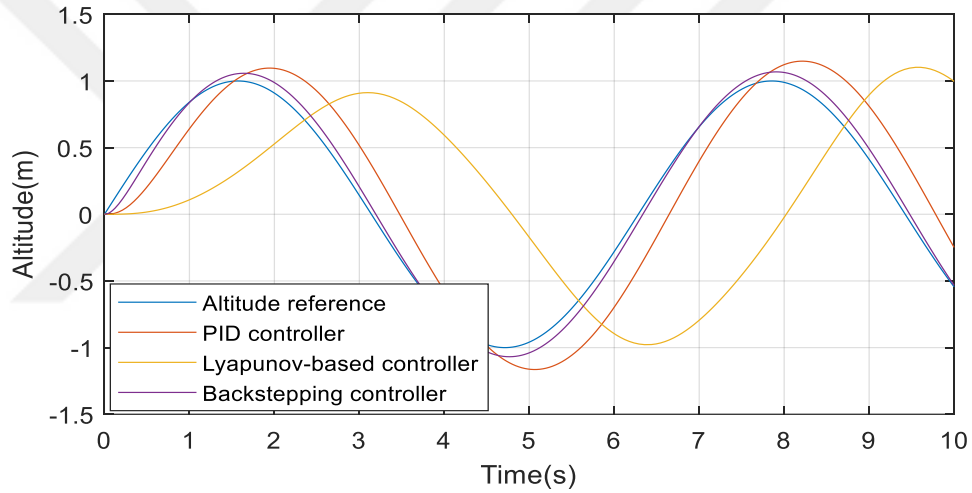
Şekil 4.49 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yalpa açısı takibi.



Şekil 4.50 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yunuslama açısı takibi.



Şekil 4.51 : 1 rad/s sinüzoidal referans için sapma açısı takibi.



Şekil 4.52 : 1 rad/s sinüzoidal referans için yükseklik referansı takibi.

1 rad/s frekanslı ve genliği 1 olan sinüzoidal referans takibi için gerçekleştirilen simülasyonlara ilişkin zaman cevabı verileri Çizelge 4.17’de gösterilmektedir. Yükselme Zamanı hanesinde “-“ ile gösterilen yerlerde kontrolcü verilen referans değerinin %90’ına ulaşamadığından yükselme zamanı yoktur. Oturma Zamanı sütununda “-“ ile gösterilen bölümlerde ise oturma zamanı verisi yoktur. Oturma Zamanı sütununda 0 olarak gösterilen durumlar söz konusu kontrolcünün simülasyonun başından itibaren verilen referansın \pm %5 aralığına yerleştiğini belirtmektedir. Aşım sütununda %0 olarak gösterilen durumlar kontrolcülerin aşım göstermediği durumları ifade etmektedir.

Çizelge 4.17 : 1 rad/s sinüzoidal referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.8	7.3	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	-	0	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	1	0	0
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.82	6.2	5.21
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.40	0.9	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.99	1.78	0
Sapma açısı PID kontrolcü	0.85	9.8	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.96	8.9	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	1	1.1	0
İrtifa PID kontrolcü	0.99	15	-
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	1.91	11.1	-
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	0.9	7.2	5.37

Çizelge 4.17’ de elde edilen sonuçlar incelendiğinde yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcü diğer iki kontrolcüden daha kısa bir yükselme zamanına sahiptir. Ancak en yüksek aşımı göstermektedir. Referansın \pm %5 aralığına yerleşemediğinden bir oturma zamanı yoktur. Lyapunov tabanlı kontrolcü referans değerinin %90’ına ulaşamadığından yükselme zamanı yoktur. Referans değerinin maksimum noktasını yakalayamadığından aşımı yoktur. Ayrıca referans değerinin \pm %5 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı da yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü ise 1 saniye gibi makul bir yükselme zamanına sahiptir. Aşım göstermemektedir ve simülasyonun başlangıcından itibaren referansı hatasız takip ettiği için oturma zamanı 0. saniyedir.

Yunuslama açısında ise PID kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahiptir. Ancak en yüksek aşımı göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcü ise en uzun oturma zamanına sahiptir ve en az aşımı göstermektedir. Ancak verilen referansın \pm %5 aralığına oturamadığından oturma zamanı yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü Lyapunov tabanlı kontrolcüden daha kısa bir yükselme zamanına sahiptir. Ayrıca PID kontrolcüden daha az aşım göstermektedir. Geri adımlamalı kontrolcü simülasyonun başlangıcından itibaren verilen referansın \pm %5 aralığında olduğundan oturma zamanı 0. saniyedir.

Sapma açısında ise yine PID kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahiptir. Ancak en yüksek aşımı göstermektedir ve verilen referansın \pm %5 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanına sahip değildir. Lyapunov tabanlı kontrolcü en uzun yükselme zamanına sahiptir. Geri adımlamalı kontrolcüye kıyasla çok yüksek

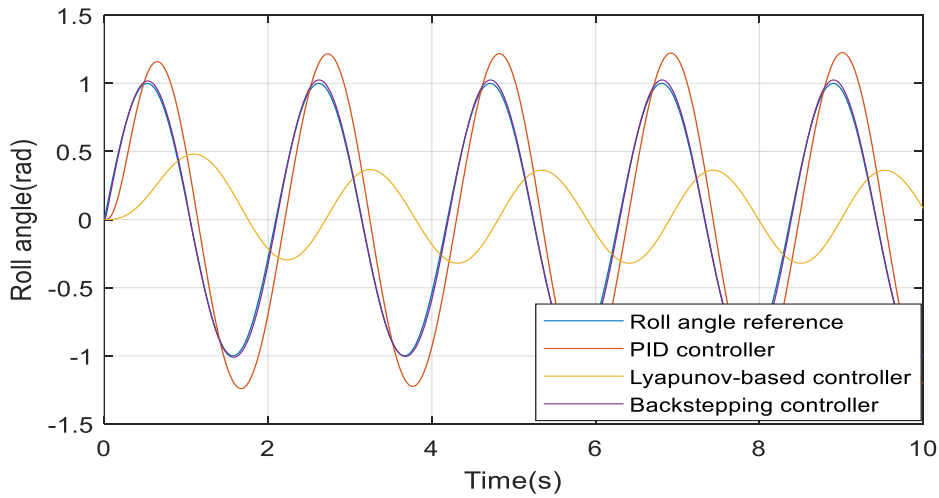
bir aşım göstermektedir ve referans değerin \pm %5 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı verisi yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü ise üç kontrolcü arasında en az aşımı göstermektedir. Ayrıca geri adımlamalı kontrolcü simülasyonun başından itibaren referans değerin \pm %5 aralığında olduğundan oturma zamanı 0. saniyedir.

Yükseklik kontrolünde ise geri adımlamalı kontrolcü en hızlı yükselme zamanına sahiptir. En az aşıma sahiptir ve oturma zamanına olan tek kontrolcüdür. PID ve Lyapunov tabanlı kontrolçüler referans değerin \pm %5 aralığına yerleşemediklerinden oturma zamanına sahip değildir. PID kontrolcü en yüksek aşımı göstermektedir. Lyapunov tabanlı kontrolcü ise en uzun oturma zamanına sahiptir.

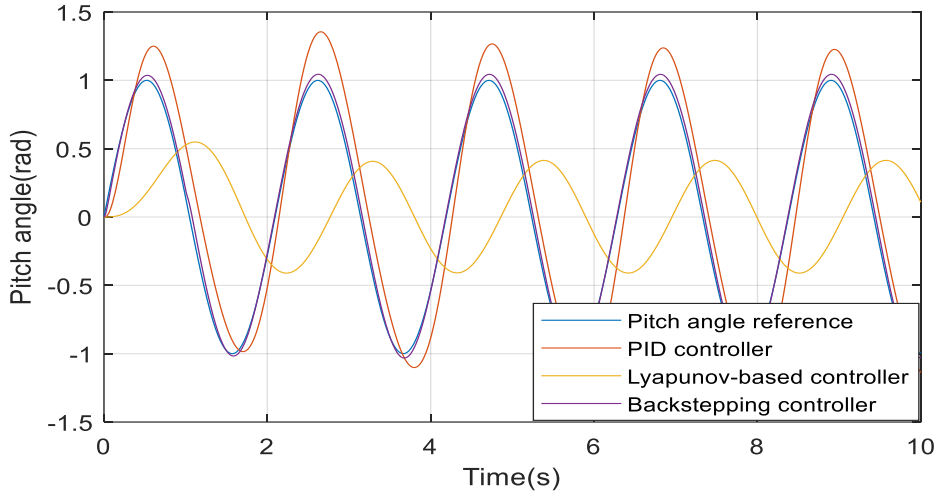
Elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde geri adımlamalı kontrolcünün genel olarak en az aşıma sahip olduğu ve en hızlı oturma zamanına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Diğer kontrolçüler referansın \pm %5 aralığına yerleşemediklerinden oturma zamanına sahip değildir. Ayrıca ya daha fazla aşım göstermektedirler. Bütün bu sonuçlar göz önüne alındığında geri adımlamalı kontrolcünün sinüzoidal referans takibinde diğer kontrolçülerden daha gürbüz olduğu ortaya çıkmaktadır.

4.14 3 rad/s Sinüzoidal Referans Takibi İçin Yapılan Simülasyonlar

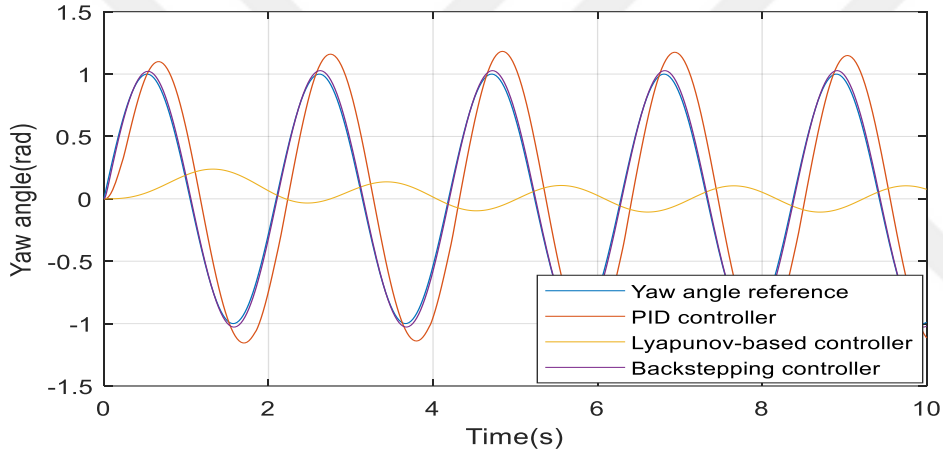
Bu bölümde kontrolçülerin daha sert bir manevra yaptıklarında ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bu maksatla bir önceki bölümdeki 1 rad/s frekanslı sinüzoidal dalga yerine 3 rad/s frekanslı bir sinüzoidal dalga referans olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.53 ile Şekil 4.56 arasında gösterilmektedir.



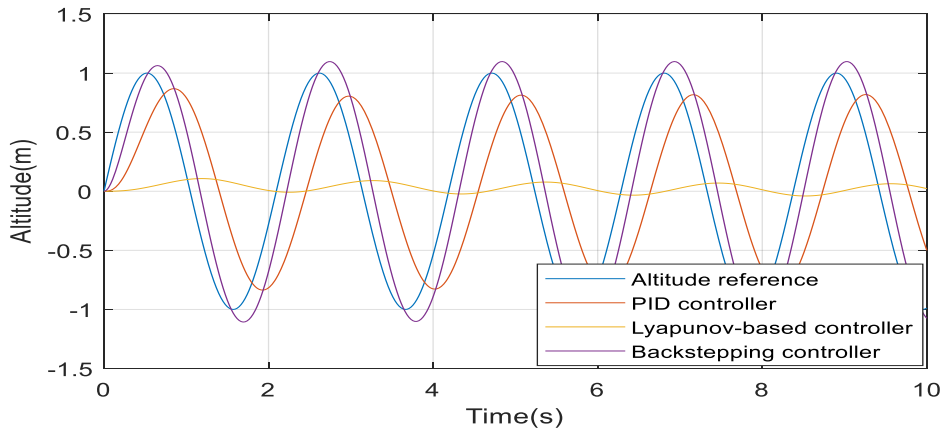
Şekil 4.53 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yalpa açısı takibi.



Şekil 4.54 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yunuslama açısı takibi.



Şekil 4.55 : 3 rad/s sinüzoidal referans için sapma açısı takibi.



Şekil 4.56 : 3 rad/s sinüzoidal referans için yükseklik referansı takibi.

3 rad/s sinüzoidal referans takibi için gerçekleştirilen simülasyonların zaman cevabı verileri Çizelge 4.18’de verilmektedir. Yükselme Zamanı hanesinde “-“ işareti ile gösterilen yerlerde kontrolcü referans değerinin %90’ına ulaşamadığından bir yükselme zamanı yoktur. Oturma Zamanı hanesinde “-“ ile gösterilen durumlarda ise kontrolcü referansın \pm %5 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı yoktur. Oturma Zamanı hanesinde 0 ile gösterilen durumlarda ise kontrolcü simülasyonun başından itibaren verilen referansın \pm %5 aralığına yerleştiğinden oturma zamanı 0 saniyedir. Aşımın %0 olarak gösterildiği durumlarda ise kontrolcü aşım göstermemektedir.

Çizelge 4.18 : 3 rad/s sinüzoidal referans takibi için kontrolcülerin zaman cevabı.

Kontrolcü Tipi	Yükselme Zamanı (s)	Aşım (%)	Oturma Zamanı (s)
Yalpa açısı PID kontrolcü	0.29	22.7	-
Yalpa açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	-	0	-
Yalpa açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.31	3.1	0
Yunuslama açısı PID kontrolcü	0.27	36.2	-
Yunuslama açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	-	0	-
Yunuslama açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.29	4.5	0.68
Sapma açısı PID kontrolcü	0.23	18.3	-
Sapma açısı Lyapunov tabanlı kontrolcü	-	0	-
Sapma açısı Geri adımlamalı kontrolcü	0.29	2.7	0
İrtifa PID kontrolcü	0.52	0	-
İrtifa Lyapunov tabanlı kontrolcü	-	0	-
İrtifa Geri adımlamalı kontrolcü	0.36	9.6	2.46

Çizelge 4.18’deki veriler incelendiğinde PID kontrolcünün bütün referanslarda en kısa yükselme zamanına sahip olduğu gözlemlenmektedir. Ancak PID kontrolcü en yüksek aşımı da göstermektedir. Ayrıca referansın %5 aralığına yerleşemediğinden oturma zamanı da yoktur. Lyapunov tabanlı kontrolcü referans değerinin %90’ına kadar yükselemediğinden yükselme zamanı yoktur. Verilen referans değerlerinin maksimum noktasına ulaşamadığından aşım göstermemektedir. Ayrıca referansı stabil bir biçimde takip edemediğinden oturma zamanı da yoktur. Geri adımlamalı kontrolcü ise PID kontrolcüye çok yakın bir yükselme zamanı göstermektedir. Ayrıca en az aşım gösteren kontrolcüdür ve bütün referanslarda oturma zamanına sahip olan tek kontrolcüdür. Bu sonuçlar dikkate alındığında geri adımlamalı kontrolcünün diğer iki kontrolcüden daha gürbüz olduğu ortaya çıkmaktadır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında bir quadrotor İHA'nın doğrusal olmayan modellenmesi ve gürbüz geri adımlamalı kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geri adımlamalı kontrolcünün gürbüzlüğünü ortaya koymak için PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcülerle karşılaştırmalı gürbüzlük analizi yapılmıştır. Bu üç kontrolcü normal koşullar altında, + %50 parametre belirsizliği altında, - %50 parametre belirsizliği altında, beyaz Gauss gürültüsü altında, eşzamanlı parametre belirsizliği ve beyaz Gauss gürültüsü altında, sinüzoidal bozucu altında, pembe gürültü altında, kahverengi gürültü altında, mavi gürültü altında ve mor gürültü altında kıyaslanmıştır. Kontrolcülerin bütün bu farklı koşullar altında yükselme zamanı, aşım ve oturma zamanı verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler tablo haline getirilerek kapsamlı bir gürbüzlük analizi yapılmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde geri adımlamalı kontrolcünün en az aşım ve en kısa oturma zamanına sahip olduğu gözlenmiştir. PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcüler bazı gürültüler altında aşırı bozulmaya uğradığından oturma zamanına sahip olamamıştır. PID ve Lyapunov tabanlı kontrolcüler gürültü altında yüksek aşım göstermiştir. Ayrıca kontrolcülerin sert manevra kabiliyetlerini incelemek için üçgen referans altında, 1 rad/s sinüzoidal referans altında ve 3 rad/s sinüzoidal referans altında gürbüzlük analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geri adımlamalı kontrolcünün en az aşım gösterdiği ve en kısa oturma zamanına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca geri adımlamalı kontrolcü bütün referanslarda oturma zamanına sahip tek kontrolcüdür. PID kontrolcü ve Lyapunov tabanlı kontrolcü ani manevraları yapmakta zorlandığından referansların çoğunda oturma zamanı verisine sahip değildir. Lyapunov tabanlı kontrolcü simülasyonların neredeyse hiçbirinde verilen referansın %90'ına ulaşamadığından yükselme zamanı verisi yoktur. Lyapunov tabanlı kontrolcünün diğer kontrolcülere kıyasla daha başarısız olmasının bir diğer nedeni Lyapunov fonksiyonu kullanmanın sistematik bir metodunun olmamasıdır. Seçilen Lyapunov fonksiyonuna göre kontrolcünün performansı değişebilmektedir. Bu çalışmada ise en sık kullanılan durumların karesinin alındığı fonksiyonu Lyapunov fonksiyonu olarak kullandık. Geri adımlamalı kontrolcünün diğer kontrolcülere göre daha çok bilgi ve

daha çok durum kullanması onu daha başarılı kılmaktadır. Ayrıca Lyapunov kararlılık teoreminin öz yinelemeli bir uyarlaması olduğundan adım adım optimum sonuca ulaşan bir kontrolcüdür. Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde geri adımlamalı kontrolcü tasarımının en gürbüz kontrolcü olduğu açıktır. Geri adımlamalı kontrolcü bütün koşullar altında en az aşım gösteren ve en kısa oturma zamanına sahip olan kontrolcüdür.



KAYNAKLAR

- [1] **Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., Jawhar, I., Idries, A., Mohammed, F.,** (2020). Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities, *Technological forecasting and social change*, 153, 119293.
- [2] **Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., Khan, M. A.,** (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends, *Intelligent Service Robotics*, 1-29.
- [3] **Wankmüller, C., Kunovjanek, M., Mayrgündter, S.,** (2021). Drones in emergency response—evidence from cross-border, multi-disciplinary usability tests, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65, 102567.
- [4] **Sun, Y., Li, J., Wang, Z., He, X., Fu, Q., Zou, Y.,** (2023). Distributed formation-aggregation control algorithm for a cluster of quadrotors, *Journal of the Franklin Institute*, 360(3), 1560-1581.
- [5] **Geronel, R. S., Botez, R. M., Bueno, D. D.,** (2023). Dynamic responses due to the Dryden gust of an autonomous quadrotor UAV carrying a payload, *The Aeronautical Journal*, 127(1307), 116-138.
- [6] **Kim, J., Lesak, M. C., Taylor, D., Gonzalez, D. J., Korpela, C. M.,** (2021). Autonomous quadrotor landing on inclined surfaces using perception-guided active asymmetric skids, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4), 7877-7877.
- [7] **Yoon, J., Doh, J.,** (2022). Optimal PID control for hovering stabilization of quadcopter using long short term memory, *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101679.
- [8] **Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I., Alsharif, M. H.,** (2022). Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review, *Drones*, 6(6), 147.
- [9] **Lien, Y. H., Peng, C. C., Chen, Y. H.,** (2020). Adaptive observer-based fault detection and fault-tolerant control of quadrotors under rotor failure conditions, *Applied Sciences*, 10(10), 3503.
- [10] **Yener, S.,** A computational analysis on rotor-propeller arm interaction in hovering flight, *M.Sc. thesis*, Middle East Technical University, (2019).
- [11] **Young Warren R.,** (1982). *The Helicopters (The Epic of Flight)*, Chicago: Time-Life Books, pp. 28, ISBN 0-8094-3350-8.
- [12] **Munson, K.,** (1969). *Helicopters and other rotorcraft since 1907*, Macmillan.
- [13] **Spooner. S.,** (1909). *Breguet-Richet Gyroplane No.2*. Flight 9 January 1909.
- [14] **Seddon John M., Newman S.,** (2011). *Basic helicopter aerodynamics*, Wiley, 3rd Edition, pp. 4, ISBN 0470665017.

- [15] **Sigalos, A., Papoutsidakis, M., Chatzopoulos, A., Piromalis, D.,** (2019). Design of a flight controller and peripherals for a quadcopter, *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(5), 463-470.
- [16] **Lambermont P. M., Pirie A.,** (1970). *Helicopters and autogyros of the world*, Barnes, pp. 205, 255, 258.
- [17] **De Bothezat G.,** (1924). *Top view of de Bothezat quadcopter*, Figure 1 of US Patent 1749471, 5 Sheets- Sheet 1, US Government.
- [18] **Stoff J.,** (2001). *The Historic Aircraft and Spacecraft in the Cradle of Aviation Museum*, Courier Corporation, pp.46, ISBN 9780486420417.
- [19] **Moreno, J., Cruz, J., Dominguez, E.,** (2016). White-donkey: Unmanned aerial vehicle for searching missing people, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 7(7).
- [20] **Harding S.,** (1998). Flying Jeeps: The U.S. Army's search for the ultimate vehicle, *Air Enthusiast*, No. 73. pp. 10–12, ISSN 0143-5450.
- [21] **Harding S.,** (1990). *U S Army Aircraft Since 1947*, Airlife Publishing, 1st edition, ISBN-10: 1853101028, Shrewsbury, Shropshire, UK.
- [22] **Dahms, J., Bardenhagen, A.,** (2019). Propulsion model for (hybrid) unmanned aircraft systems (UAS). *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(2), 373-380.
- [23] **Lobner, P.,** (2022). *The Piasecki PA-97-34J helistat (1979 – 1986)*. Piasecki Aircraft Corporation (PiAC) Helistats, pp. 12.
- [24] **Pradeep, P., Wei, P.,** (2019). Energy-efficient arrival with rta constraint for multirotor evtol in urban air mobility, *Journal of Aerospace Information Systems*, 16(7), 263-277.
- [25] **Wargo, C., Hunter, G., Young, R., Sherry, L.,** (2016). UAS as moral agents: Dilemmas and solutions. In *2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-8). IEEE.
- [26] **Baraniuk C.,** (2022). Like a drone that you sit in – but would you feel safe?, *BBC News Business*.
- [27] **Chell, C.,** (2023). The story behind Draganfly innovations, Draganfly Company Official Website.
- [28] **Chell, C.,** (2023). About us, Draganfly Company Official Website.
- [29] **National Model Aviation Museum.,** (2017). 1999 Draganflyer.
- [30] **Darack, E.,** (2017). Brief history of quadrotors, *Smithsonian Magazine*.
- [31] **Toyohara, S., Miyafuji, S., Koike, H.,** (2017). [POSTER] ARial Texture: Dynamic projection mapping on drone propellers. In *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR-Adjunct)* (pp. 206-211). IEEE.

- [32] **Martinez, P.**, Vision-based algorithms for UAV mimicking control system, *M.Sc. thesis*, University of Alberta, Alberta, (2017).
- [33] **Quilligan, M. and O'Brien, E.**, (2020) Loading on long span bridges in heavily trafficked areas, *Civil Engineering Research in Ireland Conference*, Cork, Ireland, August 28.
- [34] **Administrator.**, (2019). DHL Express collaborates with EHang on last-mile drone delivery, *Air Cargo News*.
- [35] **Momont, A.**, (2021). Ambulance drone, *Industrial Design Engineering Applied Labs*, Delft, Netherland.
- [36] **Dengeru, Y., Ramasamy, K., Allimuthu, S., Balakrishnan, S., Kumar, A. P. M., Kannan, B., Karuppasami, K. M.**, (2022). Study on spray deposition and drift characteristics of UAV agricultural sprayer for application of insecticide in redgram crop (*Cajanus cajan* L. Millsp.). *Agronomy*, 12(12), 3196.
- [37] **van Bruggen, J.**, (2021). Drone delivers lungs for transplant to Toronto hospital in world 1st, health network says, *CBC News*.
- [38] **Asisguard.**, (2023). Songar Drone Sistemleri, *Asisguard-Katalog*.
- [39] **Yıldırım, G.**, (2022). Silahlı drone Songar yerli roketleri ateşledi, *Anadolu Ajansı*.
- [40] **Şahin, H., Oktay, T.**, (2019). Properties of novel tricopter and comparison of other unmanned aerial vehicles, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 816-825.
- [41] **Grünblatt, R.**, From WiFi performance evaluation to controlled mobility in drone networks, *Doctoral dissertation*, Université de Lyon, Lyon, (2021).
- [42] **Poljak, M., Šterbenc, A. J. C. M.**, (2020). Use of drones in clinical microbiology and infectious diseases: current status, challenges and barriers, *Clinical Microbiology and Infection*, 26(4), 425-430.
- [43] **Faust, A., Palunko, I., Cruz, P., Fierro, R., Tapia, L.**, (2017). Automated aerial suspended cargo delivery through reinforcement learning, *Artificial Intelligence*, 247, 381-398.
- [44] **Santoso, F., Garratt, M. A., Anavatti, S. G.**, (2019). Hybrid PD-fuzzy and PD controllers for trajectory tracking of a quadrotor unmanned aerial vehicle: Autopilot designs and real-time flight tests, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 51(3), 1817-1829.
- [45] **Wang, S., Polyakov, A., Zheng, G.**, (2022). Quadrotor stabilization under time and space constraints using implicit PID controller, *Journal of the Franklin Institute*, 359(4), 1505-1530.
- [46] **Connor, J., Seyedmahmoudian, M., Horan, B.**, (2017). Using particle swarm optimization for PID optimization for altitude control on a quadrotor, In *2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)* (pp. 1-6). IEEE.

- [47] **Kotaru, P., Sreenath, K.,** (2020). Multiple quadrotors carrying a flexible hose: dynamics, differential flatness and control, *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8832-8839.
- [48] **Martins, L., Carneira, C., Oliveira, P.,** (2019). Linear quadratic regulator for trajectory tracking of a quadrotor, *IFAC-PapersOnLine*, 52(12), 176-181.
- [49] **Lin, H., Sun, P., Cai, C., Lu, S., Liu, H.,** (2022). Secure LQG control for a Quadrotor under false data injection attacks, *IET Control Theory & Applications*, 16(9), 925-934.
- [50] **Zhao, J., Ding, X., Jiang, B., Jiang, G., Xie, F.,** (2022). A novel sliding mode fault-tolerant control strategy for variable-mass quadrotor, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*.
- [51] **Cheng, N., Wang, C.,** (2023). A Switching mode control scheme for the hovering control of quadrotor unmanned aerial vehicles, *Mathematics*, 11(4), 994.
- [52] **Pekkaptan, M. M.,** Higher order sliding mode control of a flatness-based feedforward-feedback linearized quadrotor, *M.Sc. thesis*, Politecnico di Milano, Milan, (2020).
- [53] **Luo, W., Eschmann, H., Eberhard, P.,** (2022). Gaussian process regression-augmented nonlinear model predictive control for quadrotor object grasping, In *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* (pp. 11-19). IEEE.
- [54] **Jiang, B., Li, B., Zhou, W., Lo, L. Y., Chen, C. K., Wen, C. Y.,** (2022). Neural network based model predictive control for a quadrotor UAV, *Aerospace*, 9(8), 460.
- [55] **Cabecinhas, D., Cunha, R., Silvestre, C.,** (2019). A trajectory tracking control law for a quadrotor with slung load, *Automatica*, 106, 384-389.
- [56] **Pérez-Alcocer, R., Moreno-Valenzuela, J.,** (2019). A novel Lyapunov-based trajectory tracking controller for a quadrotor: Experimental analysis by using two motion tasks, *Mechatronics*, 61, 58-68.
- [57] **Zhou, L., Xu, S., Jin, H., Jian, H.,** (2021). A hybrid robust adaptive control for a quadrotor UAV via mass observer and robust controller, *Advances in Mechanical Engineering*, 13(3), 16878140211002723.
- [58] **Bodó, Z., Lantos, B.,** (2019). Integrating backstepping control of outdoor quadrotor UAVs, *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 63(2), 122-132.
- [59] **Efe, M. O.,** (2007). Robust low altitude behavior control of a quadrotor rotorcraft through sliding modes, In *2007 Mediterranean Conference on Control & Automation* (pp. 1-6). IEEE.
- [60] **Efe, M. Ö.,** (2011). Integral sliding mode control of a quadrotor with fractional order reaching dynamics, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 33(8), 985-1003.

- [61] **Önkol, M.**, Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracının tasarımı, modellenmesi ve kontrolü, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2010).
- [62] **İmamoğlu, N.**, Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracıyla video tabanlı üst düzey işlevlerin tasarlanması, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2010).
- [63] **Eresen, A.**, Dönerkanat tipinde bir insansız hava aracının görüntü tabanlı kontrolü, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2010).
- [64] **Özbek, N. S.**, İnsansız hava araçlarında farklı kontrol tekniklerinin performans karşılaştırması, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2010).
- [65] **Elbir, Ö.**, Dört rotorlu insansız hava aracı için otopilot tasarımı, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2013).
- [66] **Batmaz, A. U.**, Çok rotorlu insansız hava aracı tasarımı ve kablosuz algılayıcı ağlarda kaynak ataması eniyilemesi, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2013).
- [67] **Comert, C.**, Dört rotorlu bir insansız hava aracı için pid ve kayan kipli kontrolcü tasarımı ve kıyaslanması, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2016).
- [68] **Keceoglu, B.**, Dört rotorlu bir insansız hava aracına field programmable gate array tabanlı irtifa kontrolcüsü tasarımı, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2021).
- [69] **Karahan, M.**, Dört rotorlu bir insansız hava aracının modellenmesi ve PID kontrolcü tasarımı, *M.Sc. thesis*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, (2019).
- [70] **Karahan, M., Kasnakoglu, C.**, (2019). Modeling and simulation of quadrotor UAV using PID controller, In *2019 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-4). IEEE.
- [71] **Karahan, M., Kurt, H., Kasnakoglu, C.**, (2020). Autonomous face detection and tracking using quadrotor UAV, In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-4). IEEE.
- [72] **Karahan, M., Kasnakoglu, C.**, (2021). Path planning and collision avoidance with artificial intelligence for a quadrotor UAV, In *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)* (pp. 163-166). IEEE.
- [73] **Karahan, M., Akay, A. N., Kasnakoglu, C.**, (2021). Nonlinear modeling and robust control of a quadrotor UAV under uncertain parameters and white Gaussian noise, In *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 252-256). IEEE.
- [74] **Karahan, M., Kasnakoglu, C.**, (2022). Nonlinear modeling and Lyapunov stability based controller design of a quadrotor UAV, In *2022 3rd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)* (pp. 1-6). IEEE.

- [75] **Karahan, M., Kasnakoglu, C.,** (2022). Nonlinear modeling and robust backstepping control of a quadrotor unmanned aerial vehicle, In *2022 5th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)* (pp. 94-99). IEEE.
- [76] **Karahan, M., Kasnakoğlu, C.,** (2021). Modeling a quadrotor unmanned aerial vehicle and robustness analysis of different controller designs under parameter uncertainty and noise disturbance, *Control Engineering and Applied Informatics*, 23(4), 13-24.
- [77] **Karahan, M., Inal, M., Kasnakoğlu, C.,** (2023). Fault tolerant super twisting sliding mode control of a quadrotor UAV using control allocation, *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(2), 270-285.
- [78] **Karahan, M., Kasnakoğlu, C., Akay, A. N.,** (2023). Robust backstepping control of a quadrotor UAV under pink noise and sinusoidal disturbance, *Studies in Informatics and Control*, 32(2), 15-24.
- [79] **Domingues J. M. B.,** Quadrotor prototype, *M.Sc. Thesis*, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, (2009).
- [80] **Orsag M., Korpela C., Oh P., Bogdan S.,** *Aerial Manipulation*, 1st edition, (pp. 173), Berlin/Heidelberg, Germany, Springer, (2017).
- [81] **Thu, K. M., Gavrilov, A. I.,** (2017). Designing and modeling of quadcopter control system using L1 adaptive control, *Procedia Computer Science*, 103, 528-535.
- [82] **Zabidin, Y. A. A., Pairan, M. F., Shamsudin, S. S.,** (2020). Dynamic modelling and control for quadcopter uav with labview and x-plane flight simulator, *Journal of Complex Flow*, 2(2), 19-26.
- [83] **Liao, Z., Ma, K., Tang, S., Sarker, M. S., Yamahara, H., Tabata, H.,** (2021). Phase locking of ultra-low power consumption stochastic magnetic bits induced by colored noise, *Chaos, Solitons & Fractals*, 151, 111262.
- [84] **Smeele, S. J., Adhia, D. B., De Ridder, D.,** (2023). Feasibility and safety of high-definition infraslow pink noise stimulation for treating chronic tinnitus—A randomized placebo-controlled trial, *Neuromodulation: Technology at the Neural Interface*, 26(4), 801-816.
- [85] **Hongisto, V., Varjo, J., Oliva, D., Haapakangas, A., Benway, E.,** (2017). Perception of water-based masking sounds—Long-term experiment in an open-plan office, *Frontiers in psychology*, 8, 1177.
- [86] **Córdova, F.,** (2022). On the meaning of Hurst entropy applied to EEG data series, *Procedia Computer Science*, 199, 1385-1392.
- [87] **Stallworthy, I. C., Sifre, R., Berry, D., Lasch, C., Smith, T. J., Elison, J. T.,** (2020). Infants' gaze exhibits a fractal structure that varies by age and stimulus salience, *Scientific Reports*, 10(1), 17216.
- [88] **Monobe, K., Matsubara, A., Nishifuji, S.,** (2019). Impact of characteristics of noise added to auditory stimulus on auditory steady-state response, In *2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)* (pp. 818-821). IEEE.

- [89] **Tran, T., Bader, S., Lundgren, J.,** (2022). Denoising induction motor sounds using an autoencoder, *arXiv preprint arXiv:2208.04462*.
- [90] **Richter, M. M., Paul, S., K epuska, V., Silaghi, M.,** (2022). Noisy speech, In *Signal Processing and Machine Learning with Applications* (pp. 369-378). Cham: Springer International Publishing.
- [91] **Um, D., Um, D.,** (2018). Rendering theory, *Solid Modeling and Applications: Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory*, 173-191.
- [92] **Lau, D. L., Arce, G. R., Parada-Mayorga, A., Dapena, D., Pena-Pena, K.,** (2020). Blue-noise sampling of graph and multigraph signals: Dithering on non-euclidean domains. *IEEE Signal Processing Magazine*, 37(6), 31-42.
- [93] **Araujo, L. C., Sansao, J. P., & Junior, M. C.,** (2020). Effects of Color Quantization on JPEG Compression. *International Journal of Image and Graphics*, 20(03), 2050026.
- [94] **Guo, J. M., Sankarasrinivasan, S.,** (2019). BN-IQA: A rapid image quality assessment based on blue noise dithering, In *2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)* (pp. 1-2). IEEE.
- [95] **Rezaei-Hachesu, V., Niri, H. H., Farahani, S., Esmaelpour, M. R. M.,** (2023). Frequency-based analysis of auditory threshold shifts induced by noise color in rats, *Journal of Health and Safety at Work*, 13(2), 236-251.



EKLER

EK 1: Doğrusal olmayan quadrotor modelinin Simulink şeması

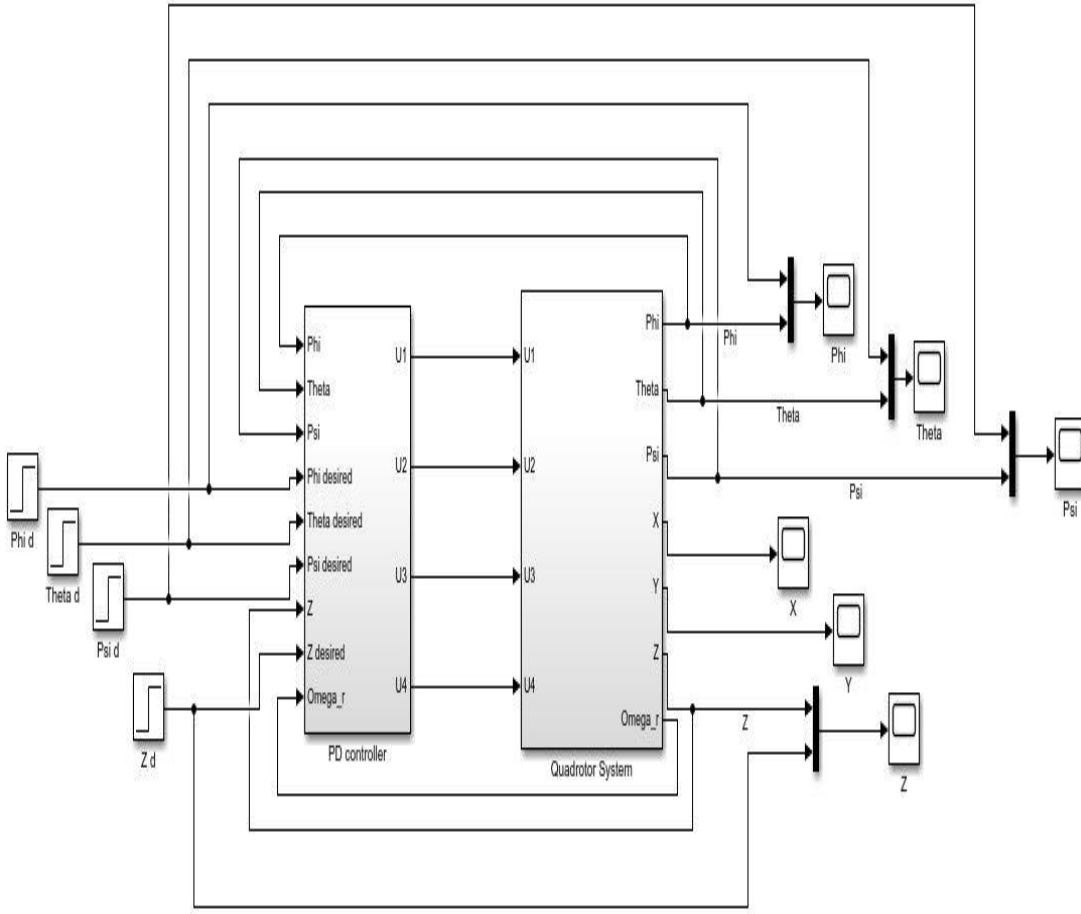
EK 2: PID kontrolcülere Gauss gürültüsü eklenen Simulink şeması

EK 3: PID kontrolcülere renkli gürültü eklenen Simulink şeması

EK 4: İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları

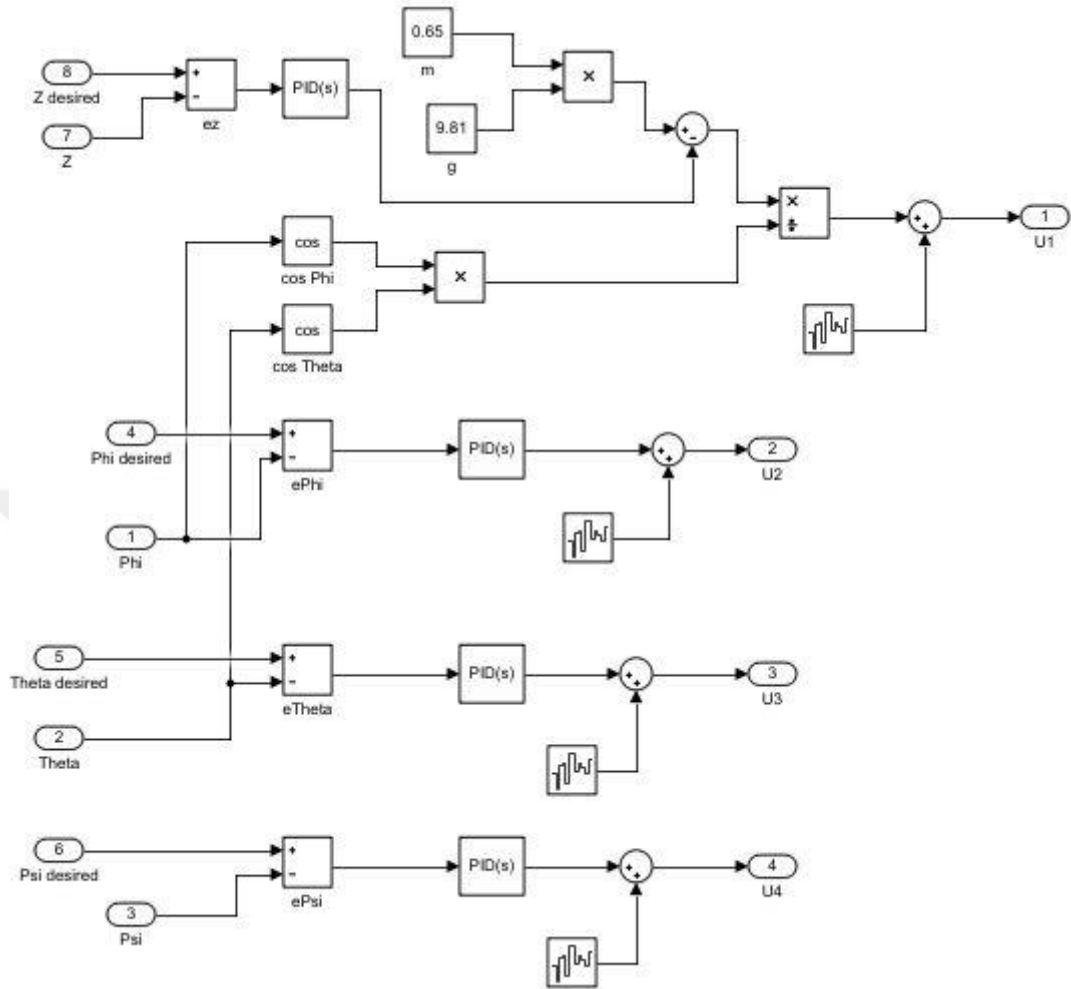


EK 1



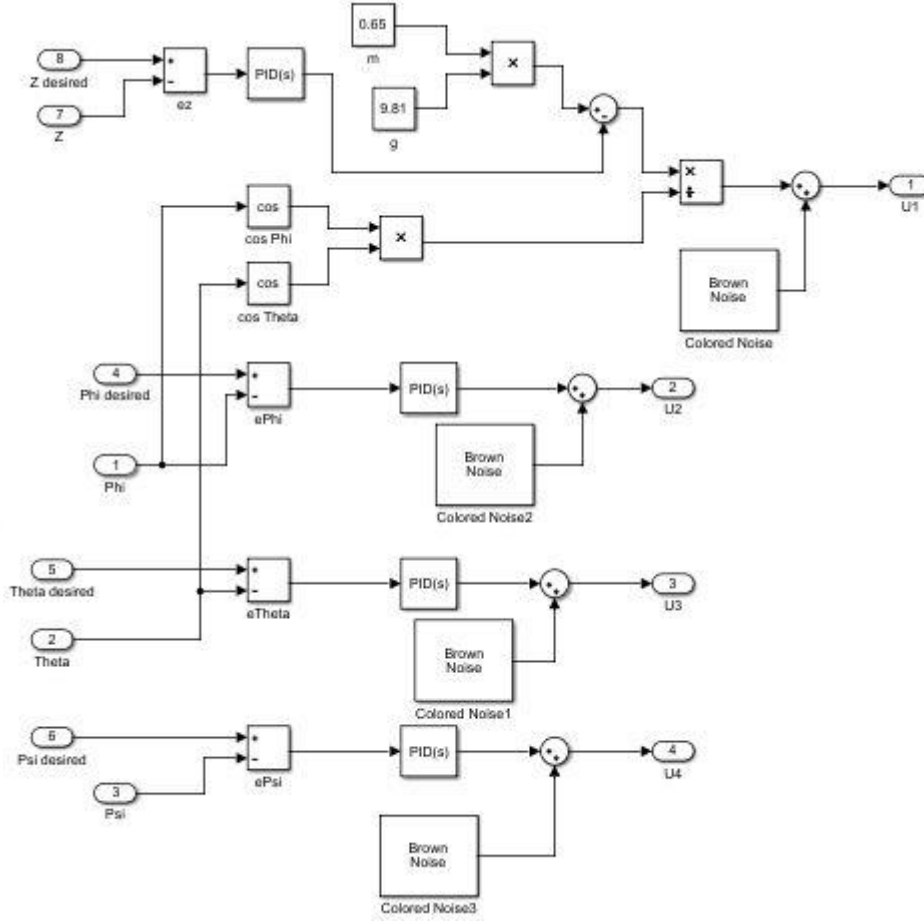
Şekil Ek.1 : Doğrusal olmayan quadrotor modelinin Simulink şeması.

EK 2



Şekil Ek.2 : PID kontrolcülere Gauss gürültüsü eklenen Simulink şeması.

EK 3



Şekil Ek.3 : PID kontrolcülere renkli gürültü eklenen Simulink şeması.

EK 4

Çizelge Ek.1 : İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları.

İngilizce Terim	Türkçe Karşılık
Angle	Açı
Angular velocity	Açısal hız
Altitude	İrtifa
Attitude	Pozisyon
Axis	Eksen
Backstepping	Geri adımlamalı
Blue noise	Mavi gürültü
Brown noise	Kahverengi gürültü
Coefficient	Katsayı
Controller	Kontrolcü
Cross configuration	Çarpı konfigürasyon
Force	Kuvvet
Front	Ön
Gain	Kazanç
Gravity	Yerçekimi
Inertia	Eylemsizlik
Length	Uzunluk
Mass	Kütle
Move backward	Geri gitmek
Move forward	İleri gitmek
Move down	Aşağı gitmek
Move up	Yukarı çıkmak
Parameter uncertainty	Parametre belirsizliği
Pink noise	Pembe gürültü
Plus configuration	Artı konfigürasyon
Purple noise	Mor gürültü
Quadrotor	Dört rotor
Rotation matrix	Dönme matrisi
Rotate left	Sola dönmek
Rotate right	Sağa dönmek
Roll	Yalpa
Steady state error	Sürekli hal hatası
Throttle	Gaz
Thrust	İtki
Torque	Tork



TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2021.** Path planning and collision avoidance with artificial intelligence for a quadrotor UAV. In *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, September 30-October 2, Varna, Bulgaria, (pp. 163-166). IEEE.
- **Karahan, M., Akay, A. N., & Kasnakoglu, C., 2021.** Nonlinear Modeling and Robust Control of a Quadrotor UAV under Uncertain Parameters and White Gaussian Noise. In *2021 5th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, October 21-23, Ankara, Turkey, (pp. 252-256). IEEE.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2021.** Modeling a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle and robustness analysis of different controller designs under parameter uncertainty and noise disturbance. *Control Engineering and Applied Informatics*, 23(4), 13-24.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2022.** Robust Backstepping Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle under Pink Noise, In *2022 10th The International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis*, July 12-14, St. Anne's College, Oxford, UK.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2022.** Nonlinear Modeling and Robust Backstepping Control of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. In *2022 5th International Conference of Computer and Informatics Engineering (IC2IE)*, September 13-14, Jakarta, Indonesia, (pp. 94-99). IEEE.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2022.** Nonlinear Modeling and Lyapunov Stability Based Controller Design of a Quadrotor UAV. In *2022 3rd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC)*, December 15-16, Ankara, Turkey, (pp. 1-6). IEEE.
- **Karahan, M., Inal, M., & Kasnakoglu, C., 2023.** Fault Tolerant Super Twisting Sliding Mode Control of a Quadrotor UAV Using Control Allocation. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 3(2), 270-285.
- **Karahan, M., Kasnakoglu, C., & Akay, A. N., 2023.** Robust Backstepping Control of a Quadrotor UAV Under Pink Noise and Sinusoidal Disturbance. *Studies in Informatics and Control*, 32(2), 15-24.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2019.** Modeling and simulation of quadrotor UAV using PID controller. In *2019 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, June 27-29, Pitesti, Romania, (pp. 1-4). IEEE.
- **Karahan, M. (2019).** *Dört rotorlu bir insansız hava aracının modellenmesi ve PID kontrolcü tasarımı* (Master's thesis, TOBB University of Economics and Technology, Graduate School of Engineering and Science).

- **Karahan, M., Kurt, H., & Kasnakoglu, C., 2020.** Autonomous face detection and tracking using quadrotor UAV. In *2020 4th international symposium on multidisciplinary studies and innovative technologies (ISMSIT)*, October 22-24, Istanbul, Turkey, (pp. 1-4). IEEE.
- **Karahan, M., 2020.** Yarı İletkenlerde İyon Aşılması. *Parçacık Hızlandırıcıları ve TOGG*, (pp. 52-66). TOBB ETÜ Yüksek Enerji Fiziği Enstitüsü.
- **Karahan, M., Lacinkaya, F., Erdonmez, K., Eminagaoglu, E. D., & Kasnakoglu, C., 2021.** Face detection and facial feature extraction with machine learning. In *2021 3rd International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (INFUS)*, August 24-26, Istanbul, Turkey, (pp. 205-213). Springer International Publishing.
- **Karahan, M., Lacinkaya, F., Erdonmez, K., Eminagaoglu, E. D., & Kasnakoglu, C., 2022.** Age and gender classification from facial features and object detection with machine learning. *Journal of fuzzy extension and applications*, 3(3), 219-230.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2022.** Stability Analysis and Optimum Controller Design for an Inverted Pendulum on Cart System. In *2022 International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, April 28-30, Nur-Sultan, Kazakhstan, (pp. 1-4). IEEE.
- **Karahan, M., & Kasnakoglu, C., 2022.** LQR Control and Observer Design of a Magnetically Suspended Ball. In *2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, June 9-11, Ankara, Turkey, (pp. 1-4). IEEE.
- **Karahan, M., Kurt, H., & Kasnakoglu, C., 2022.** Moving object detection and counting in traffic with gaussian mixture models and vehicle license plate recognition with Prewitt Method. In *2022 International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, October 20-22, Ankara, Turkey, (pp. 32-36). IEEE.
- **Karahan, M., Dilmen, A., Lacinkaya, F., Akay, A. N., & Kasnakoglu, C., 2023.** Track While Scan Radar Design and Simulation. In *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, March 23-25, Bucharest, Romania, (pp. 1-4). IEEE.
- **Karahan, M., Lacinkaya, F., Inal, M., Dilmen, A., Akay, A.N., & Kasnakoglu, C., 2023.** Detection of the Coordinates of the Bee Swarm in the Sky Through Image Processing. In *2023 6th International Conference on Sustainable Science and Technology (ICSuSaT)*, Istanbul, Turkey.



