

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖRT ROTORLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ VE
PID KONTROLCÜ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet KARAHAN

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

AĞUSTOS 2019

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171211029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet KARAHAN** 'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“DÖRT ROTORLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ VE PID KONTROLÇÜ TASARIMI”** başlıklı tezi **8 Ağustos 2019** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Coşku KASNAKOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Tolga GİRİCİ (Başkan)**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

Yüksek Lisans Tezi

DÖRT ROTORLU BİR İNSANSIZ HAVA ARACININ MODELLENMESİ VE PID 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 2019

Çağımızda insansız hava araçlarının oldukça yaygın bir kullanım alanı bulunmaktadır. İnsansız hava araçları arama kurtarma, yangınla mücadele, kargo taşıma, tarımsal ilaçlama, haritalama, bilimsel araştırma ve savunma sanayii alanlarında kullanılmaktadır. İnsansız hava araçları üzerinde pilot bulundurmaması nedeniyle insanlı uçaklar için sert ve tehlikeli olabilecek manevraları yapabilmektedir. Ayrıca üretim maliyetlerinin insanlı uçaklara göre daha düşük olması onları daha avantajlı hale getirmektedir. Dört rotorlu insansız hava araçları ise dikine iniş kalkış yapabilmesi, havada asılı kalabilmesi, sert manevra kabiliyeti, açık ve kapalı alanlarda uçabilmesi ve küçük boyutları sayesinde popüler hale gelmiştir. Dört rotorlu bir insansız hava aracının dinamikleri uzaydaki bir cismin 6 serbestlik dereceli hareketidir. Euler açıları olan yalpa, yunuslama, sapma açıları ve üç boyutlu uzayda lineer hareketleri ifade eden x, y ve z eksenleri 6 serbestlik derecesini oluşturmaktadır. Quadrotorun rotorlarının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmesi bu hareketlerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle quadrotorun doğrusal olmayan matematiksel modeli çıkartılmıştır. Sonraki adımda matematiksel model Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra gerçek bir quadrotora ait fiziksel parametreler sisteme girilmiştir. Quadrotorun yükseklik, yalpa,

yunuslama ve sapma açıları için farklı kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında oransal integral türevsel (PID) kontrolcü tasarımı kullanılmıştır. Tasarlanan PID kontrolcüler Simulink ortamındaki sisteme eklenmiştir. PID kontrolcüde çıkıştan geri besleme ile gelen sinyal referans sinyali ile karşılaştırılmakta ve farkından bir hata oluşmaktadır. PID kontrolcü oluşan hatayı en aza indirmeye çalışacak bir etki yaparak çıkışa göndermektedir. Hata en aza indirilinceye kadar sürekli olarak çıkıştan girişe geri besleme ile hatalar belirlenmekte ve kontrolcü etkisini çıkışa göndererek hata azaltılmaktadır. PID kontrolcü oransal kazanç K_p , integral kazancı K_i ve türevsel kazanç K_d olmak üzere üç kazanç parametresine sahiptir. Oransal kazanç yükselme zamanını azaltmakta ancak sürekli hal hatasını kaldırmamaktadır. İntegral kazancı sürekli hal hatasını azaltmakta ancak geçici hal tepkisinin daha kötü olmasına neden olmaktadır. Türevsel kazanç ise aşımı azaltmakta ve sistemin kararlılığını arttırmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında farklı referans sinyalleri için farklı PID kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Yükseklik, ve pozisyon kontrolü için tasarlanan kontrolcülerin söz konusu farklı referans değerlerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmüştür. Ayrıca PID Tuning yöntemiyle de kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Bu yöntemde PID katsayıları Matlab tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Ancak bu yöntemle belirlenen kontrolcülerin quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu anlaşılmıştır çünkü rotorların üretebileceği maksimum tork değeri aşılmaktadır. Bu tez çalışmasında parametre belirsizliği altında kontrolcülerin performansı da incelenmiştir. Quadrotorun kütlesi (m) ve eylemsizlik momentleri (I_x , I_y ve I_z) için parametre belirsizliği uygulanmıştır. Tasarlanan PID kontrolcülerin parametre belirsizliği altında birim basamak ve sinuzoidal referans değerlerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmüştür. Tasarlanan kontrolcülerin gürültüye karşı dayanıklılığı da incelenmiştir. Sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı gürültü verilerek, kontrolcülerin performansı incelenmiştir. Sonuç olarak tasarlanan kontrolcülerin gürültüye de dayanıklı olduğu görülmüştür. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüler için de parametre belirsizliği ve gürültü uygulanmıştır. Ancak kendi tasarladığımız kontrolcülerin PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülere kıyasla parametre belirsizliğine ve gürültüye karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Quadrotor, İnsanız hava aracı kontrolü, Quadcopter, Dinamik modelleme, Gauss gürültüsü, Gürbüz kontrol, Oransal integral türevsel kontrolcü, Matematiksel model, Yükseklik kontrolü, Pozisyon kontrolü, Parametre belirsizliği.

ABSTRACT

Master of Science

MODELING AND PID CONTROLLER DESIGN OF A FOUR ROTOR

UNMANNED AERIAL VEHICLE

Mehmet Karahan

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

Supervisor: Prof. Cosku Kasnakoglu

Date: August 2019

In our era, unmanned aerial vehicles have a widespread usage area. Unmanned aerial vehicles are used in search and rescue, fire fighting, cargo transportation, agricultural spraying, mapping, scientific research and defense industries. Due to unmanned aerial vehicles do not have a pilot on board, they could perform maneuvers that may be harsh and dangerous for manned aircraft. Moreover, the lower production costs of unmanned aircraft makes them more advantageous than manned aircraft. Unmanned aerial vehicles with four rotors have become popular thanks to their vertical landing and take-off, hanging in the air, hard maneuverability, flying in open and closed areas and their small size. The dynamics of the quadrotor makes possible to move in 6 DOF. It consists of 3 translational and 3 rotational DOF. Euler angles, which also are known as roll (ϕ), pitch (θ), yaw (ψ) angles, and x, y and z axes, which represent linear movements in 3-dimensional space, constitute 6 degrees of freedom. The rotors of quadrotor could be controlled separately, allowing these movements to be performed. In this thesis, first of all, nonlinear mathematical model of a quadrotor has been extracted. In the next step, this mathematical model was implemented in Simulink. The real physical parameters of a quadrotor used in system. Different controllers are designed for the height, roll angle, pitch angle and yaw angle of the quadrotor. In this

work, PID controller design is used. Designed controllers are added to the system in Simulink. In the PID controller, the signal from the output is compared with the reference signal and an error occurs from its difference. PID controller tries to minimize the error. The error is detected by continuous feedback from output to input until the error is minimized and the error is decreased by sending the controller effect to the output. The PID controller has three gain parameters: proportional constant K_p , integral constant K_i and derivative constant K_d . Proportional constant decreases the rise time but does not remove the steady state error. The integral gain reduces the steady state error, but makes the transient response poor. Derivative constant reduces the overshoot and increases the stability of system. In this work, different PID controllers are designed for different reference signals.

Controllers designed for altitude and attitude have been found to follow different reference values successfully. In addition, PID Tuning method was used to design the controllers. In this method, PID coefficients are determined automatically by Matlab. However, it has been found that the controllers identified by this method are incompatible with the physical parameters of the quadrotor because the maximum torque that the rotors could produce is exceeded. In this thesis, the performance of controllers under parameter uncertainty was also examined. The disturbances includes parameter uncertainties in the quadrotor mass (m) and moments of inertia (I_x , I_y and I_z). It was observed that designed PID controllers successfully tracked unit step and sinusoidal reference values under parameter uncertainty. The noise resistance of the designed controllers is also examined. The performance of the controllers was examined by giving noise to the inputs and outputs of the system separately. As a result, the designed controllers were found to be noise resistant. Parameter uncertainty and noise were also applied to controllers designed with PID Tuning. However, the controllers we designed were more resistant to parameter uncertainty and noise than the controllers designed with PID Tuning.

Keywords: Quadrotor, Unmanned aerial vehicle control, Quadcopter, Dynamic modeling, Gaussian noise, Robust control, Proportional integral derivative controller, Mathematical modeling, Altitude control, Attitude control, Parameter uncertainty.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana yol gösteren eden ve yardım eden danışman hocam Prof. Dr. Coşku Kasnakoğlu'na, görüşlerinden istifade ettiğim bölümümüzdeki hocalarıma, her daim beni destekleyen aile bireylerime ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvi
SEMBOL LİSTESİ	xvii
RESİM LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Hedefi	1
1.2 Quadrotorların Tarihçesi	2
1.3 Literatür Taraması	4
2. QUADROTORUN MODELLENMESİ	9
2.1 Uçma Prensipleri	9
2.1.1 Dikey ekseninde hareket	11
2.1.2 Yalpa açısı hareketi	11
2.1.3 Yunuslama açısı hareketi	11
2.1.4 Sapma açısı hareketi.....	12
2.1.5 Quadrotorun eksenlere göre hareketi	12
2.2 Matematiksel Denklemler	13
2.3 Fiziksel Parametreler	16
3. KONTROLCÜ TASARLANMASI	17
3.1 PID Kontrolcünün Genel Yapısı	17
3.2 Birim Basamak Referansı için PID Kontrolcü Tasarımı.....	18
3.2.1 İrtifa kontrolcü	18
3.2.2 Yalpa açısı kontrolcü	19
3.2.3 Yunuslama açısı kontrolcü.....	21
3.2.4 Sapma açısı kontrolcü	22
3.2.5 Rotor tork simülasyonları.....	23
3.3 Sinuzoidal Referans için PID Kontrolcü Tasarımı.....	24
3.3.1 İrtifa kontrolcü	24
3.3.2 Yalpa açısı kontrolcü	25
3.3.3 Yunuslama açısı kontrolcü.....	27
3.3.4 Sapma açısı kontrolcü	28
3.3.5 Rotor tork simülasyonları.....	29
4. PID TUNING İLE KONTROLCÜ TASARLANMASI	31
4.1 Birim Basamak Referansı için PID Tuning ile Kontrolcü Tasarımı	31
4.1.1 İrtifa kontrolcü	32
4.1.2 Yalpa açısı kontrolcü	33
4.1.3 Yunuslama açısı kontrolcü.....	34
4.1.4 Sapma açısı kontrolcü	35

4.1.5 Rotor tork simülasyonları.....	36
4.2 Sinuzoidal Referans için PID Tuning ile Kontrolcü Tasarımı	37
4.2.1 İrtifa kontrolcü.....	38
4.2.2 Yalpa açısı kontrolcü.....	39
4.2.3 Yunuslama açısı kontrolcü	40
4.2.4 Sapma açısı kontrolcü	41
4.2.5 Rotor tork simülasyonları.....	42
5. PARAMETRE BELİRSİZLİĞİ	45
5.1 Birim Basamak Referansı için Parametre Belirsizliği.....	45
5.1.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.....	46
5.1.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü	46
5.1.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	47
5.1.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.....	48
5.2 PID Tuning ile Birim Basamak Referansı için Parametre Belirsizliği.....	49
5.2.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.....	49
5.2.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü	50
5.2.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	51
5.2.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.....	51
5.3 Sinuzoidal Referans için Parametre Belirsizliği.....	52
5.3.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.....	53
5.3.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü	53
5.3.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	54
5.3.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.....	55
5.4 PID Tuning ile Sinuzoidal Referans için Parametre Belirsizliği.....	56
5.4.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.....	56
5.4.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü	57
5.4.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	58
5.4.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.....	59
6. GÜRÜLTÜ EKLENMESİ	61
6.1 Birim Basamak Referansı için Gürültü Eklenmesi	61
6.1.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü	61
6.1.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü	63
6.1.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü.....	64
6.1.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü.....	65
6.2 PID Tuning ile Birim Basamak Referansı için Gürültü Eklenmesi	66
6.2.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü	66
6.2.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü	68
6.2.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü.....	70
6.2.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü.....	71
6.3 Sinuzoidal Referans için Gürültü Eklenmesi	72
6.3.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü	72
6.3.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü	74
6.3.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü.....	75
6.3.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü.....	76
6.4 PID Tuning ile Sinuzoidal Referans için Gürültü Eklenmesi	77
6.4.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü	77
6.4.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü	78
6.4.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü.....	80
6.4.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü.....	81
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	83

KAYNAKLAR	87
EKLER.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	93



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : 6 serbestlik derecesinin gösterimi.....	9
Şekil 2.2 : Artı ve çapraz konfigürasyonların gösterimi	10
Şekil 2.3 : Rotor çiftlerinin dönüş yönlerinin gösterimi	10
Şekil 2.4 : Quadrotorun eksenlere göre hareketi.....	11
Şekil 2.5 : Gaz kontrolü (throttle control), yalpa (roll) kontrolü, yunuslama (pitch) kontrolü ve sapma (yaw) kontrolü	12
Şekil 3.1 : PID kontrolcü genel yapısı.	17
Şekil 3.2 : Yükseklik kontrolcü diyagramı.	18
Şekil 3.3 : Birim basamak referansı yükseklik kontrolcü simülasyonu.....	19
Şekil 3.4 : Yalpa açısı kontrolcü diyagramı	20
Şekil 3.5 : Birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü simülasyonu	20
Şekil 3.6 : Yunuslama açısı kontrolcü blok şeması	21
Şekil 3.7 : Birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.....	22
Şekil 3.8 : Sapma açısı kontrolcü blok şeması.....	22
Şekil 3.9 : Birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü simülasyonu.....	23
Şekil 3.10 : Birim basamak referansında rotorların ürettiği tork	23
Şekil 3.11 : Sinozoidal referans yükseklik kontrolcü blok şeması.....	24
Şekil 3.12 : Sinozoidal referans yükseklik kontrolcü simülasyonu	25
Şekil 3.13 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü blok şeması.	25
Şekil 3.14 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.	26
Şekil 3.15 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü blok şeması	27
Şekil 3.16 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu	28
Şekil 3.17 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü blok şeması.....	28
Şekil 3.18 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü simülasyonu	29
Şekil 3.19 : Sinuzoidal referansta rotorların ürettiği tork	29
Şekil 4.1 : Birim basamak referansı PID Tuning yükseklik kontrolcü diyagramı	32
Şekil 4.2 : Birim basamak referansı PID Tuning yükseklik kontrolcü simülasyonu.	33
Şekil 4.3 : Birim basamak referansı PID Tuning yalpa açısı kontrolcü diyagramı....	33
Şekil 4.4 : Birim basamak referansı PID Tuning yalpa açısı kontrolcü simülasyonu	34
Şekil 4.5 : Birim basamak referansı PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü diyagramı.....	34
Şekil 4.6 : Birim basamak referansı PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu	35
Şekil 4.7 : Birim basamak referansı PID Tuning sapma açısı kontrolcü diyagramı ..	35
Şekil 4.8 : Birim basamak referansı PID Tuning sapma açısı kontrolcü simülasyonu.....	36
Şekil 4.9 : Birim basamak referansı PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin torqu.	37
Şekil 4.10 : Sinuzoidal referans PID Tuning yükseklik kontrolcü diyagramı	38
Şekil 4.11 : Sinuzoidal referans PID Tuning yükseklik kontrolcü simülasyonu	38
Şekil 4.12 : Sinuzoidal referans PID Tuning yalpa açısı kontrolcü diyagramı.....	39
Şekil 4.13 : Sinuzoidal referans PID Tuning yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.....	40

Şekil 4.14 : Sinuzoidal referans PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü diyagramı .	40
Şekil 4.15 : Sinuzoidal referans PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.....	41
Şekil 4.16 : Sinuzoidal referans PID Tuning sapma açısı kontrolcü diyagramı	41
Şekil 4.17 : Sinuzoidal referans PID Tuning sapma açısı kontrolcü simülasyonu	42
Şekil 4.18 : Sinuzoidal referans PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin torqu	43
Şekil 5.1 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü	46
Şekil 5.2 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü	47
Şekil 5.3 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	47
Şekil 5.4 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü	48
Şekil 5.5 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	49
Şekil 5.6 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü	50
Şekil 5.7 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.....	51
Şekil 5.8 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.....	52
Şekil 5.9 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü	53
Şekil 5.10 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü ..	54
Şekil 5.11 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü	54
Şekil 5.12 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü	55
Şekil 5.13 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	56
Şekil 5.14 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	57
Şekil 5.15 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yalpa kontrolü.	58
Şekil 5.16 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile sapma kontrolü.	59
Şekil 6.1 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yükseklik kontrolü	62
Şekil 6.2 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yükseklik kontrolü	62
Şekil 6.3 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yalpa açısı kontrolü	63
Şekil 6.4 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yalpa açısı kontrolü	63
Şekil 6.5 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolü	64
Şekil 6.6 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolü	65
Şekil 6.7 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı sapma açısı kontrolü	65

Şekil 6.8 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı sapma açısı kontrolü	66
Şekil 6.9 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	67
Şekil 6.10 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	67
Şekil 6.11 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü	68
Şekil 6.12 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü	69
Şekil 6.13 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü	70
Şekil 6.14 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü	70
Şekil 6.15 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.....	71
Şekil 6.16 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.....	72
Şekil 6.17 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yükseklik kontrolü.....	73
Şekil 6.18 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yükseklik kontrolü.....	73
Şekil 6.19 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolü	74
Şekil 6.20 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolü	74
Şekil 6.21 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolü	75
Şekil 6.22 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolü	75
Şekil 6.23 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans sapma açısı kontrolü ...	76
Şekil 6.24 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans sapma açısı kontrolü ..	76
Şekil 6.25 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	77
Şekil 6.26 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.....	78
Şekil 6.27 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü	79
Şekil 6.28 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü	79
Şekil 6.29 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü	80
Şekil 6.30 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü	80
Şekil 6.31 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.....	81
Şekil 6.32 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.....	82

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : OS4 Quadrotoruna ait fiziksel parametreler	16
Çizelge 3.1 : PID sabitlerinin etkisi.	18
Çizelge 3.2 : Birim basamak referansı yükseklik kontrolcü parametreleri.....	19
Çizelge 3.3 : Birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü parametreleri	20
Çizelge 3.4 : Birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü parametreleri.....	21
Çizelge 3.5 : Birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü parametreleri.....	22
Çizelge 3.6 : Sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü parametreleri	25
Çizelge 3.7 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü parametreleri.....	26
Çizelge 3.8 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü parametreleri	27
Çizelge 3.9 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü parametreleri	28
Çizelge 4.1 : PID Tuning birim basamak referansı yükseklik kontrolcü parametreleri	32
Çizelge 4.2 : PID Tuning birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü parametreleri	33
Çizelge 4.3 : PID Tuning birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü parametreleri	34
Çizelge 4.4 : PID Tuning birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü parametreleri	35
Çizelge 4.5 : PID Tuning sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü parametreleri.....	38
Çizelge 4.6 : PID Tuning sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü parametreleri ...	39
Çizelge 4.7 : PID Tuning sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü parametreleri	40
Çizelge 4.8 : PID Tuning sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü parametreleri..	41
Çizelge 5.1 : Parametre belirsizliği değerleri.....	45
Çizelge Ek.1: Türkçe ve İngilizce Teknik Terimler Çizelgesi.....	92

KISALTMALAR

DOF	: Degrees of Freedom
İHA	: İnsansız Hava Aracı
PD	: Proportional Derivative
PID	: Proportional-Integral-Derivative
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle



SEMBOL LİSTESİ

Bu tez çalışmasında kullanılan simgeler açıklamalarıyla beraber aşağıdaki listede yer almaktadır.

Simgeler	Açıklama
b	İtki (thrust) katsayısı
d	Sürüklenme (drag) katsayısı
e	Hata
F	Kuvvet
g	Yerçekimi
I_x	X eksen eylemsizlik momenti
I_y	Y eksen eylemsizlik momenti
I_z	Z eksen eylemsizlik momenti
J_r	Rotor eylemsizlik momenti
l	Quadrotor kol uzunluğu
m	Quadrotor kütlesi
Ω	Rotor hızı
p	Yalpa oranı
θ	Yunuslama (pitch) açısı
q	Yunuslama (pitch) oranı
R	Rotasyon matrisi
r	Sapma (yaw) oranı
ϕ	Yalpa (roll) açısı
T	Tork
U_1	İrtifa referansı kontrolcü girdisi
U_2	Yalpa açısı kontrolcü girdisi
U_3	Yunuslama açısı kontrolcü girdisi
U_4	Sapma açısı kontrolcü girdisi
w_i	Rotor hızı ($i = 1, 2, 3, 4$)
w_{max}	Maksimum rotor hızı
ψ	Sapma (yaw) açısı



RESİM LİSTESİ

Sayfa

Resim 1.1 : The Gyroplane No.1.	2
Resim 1.2 : Oehmichen No.2	3
Resim 1.3 : De Bothezat Helicopter'in yandan ve üstten görünüşü	3
Resim 1.4 : Convertawings Model A	4
Resim 1.5 : Curtiss – Wright VZ-7	4
Resim 1.6 : Pennsylvania Üniversitesi'nde kullanılan Draganflyer Quadrotor.....	5
Resim 1.7 : Modifiye edilerek STARMAC adı verilen Draganflyer Quadrotor.....	5
Resim 1.8 : EPFL'de geliştirilen quadrotor test düzeneği 1) RS232 – 12C çevirici 2) Motor modülleri 3) 3D Evrensel bağlantı 4) Mikro IMU 5) Tahrik grubu.	6
Resim 1.9 : Ascending Technologies firması tarafından üretilen X-3D Quadrotoru. .	6
Resim 1.10 : Sadegzadeh ve Mehta tarafından kullanılan Qball X-4 Quadrotoru.....	7

1. GİRİŞ

Sensörlerin, eyleyicilerin ve mikroişlemcilerin ucuzlaması ve batarya ömrünün artması ile insansız hava araçları daha yaygın bir kullanım alanına ulaşmıştır [1]. Arama kurtarma, yangınla mücadele, kargo taşıma, tarımsal ilaçlama, haritalama, bilimsel araştırma ve savunma sanayii İHA'ların yaygın olarak kullanıldığı alanlardır [2, 3].

İHA'lar üzerinde pilot bulundurmamaktadır. İHA'lar yer kontrol istasyonları ile uzaktan kontrol edilebildikleri gibi otopilot yazılımları sayesinde otonom uçuşlar da gerçekleştirebilmektedir. Üzerinde pilot bulundurmaması nedeniyle insan için tehlikeli olabilecek sert manevralar yapabilmektedir. Boyutlarının küçük olması, üretim maliyetlerinin düşük olması ve kapalı mekanlarda da uçabilmesi quadrotorların önemli avantajlarından [4].

Quadrotorlar da helikopterler gibi dikey iniş kalkış yapabilmektedir. Ancak quadrotorlarda dört rotor kullanıldığı için rotor çaplarının quadrotorun gövdesine oranı helikopterdeki ana rotor çapının helikopter gövdesine olan oranından küçük olmaktadır. Quadrotorun 4 farklı rotoru olduğundan uçuş esnasında rotor daha az kinetik enerji depolamakta ve bir çarpma durumunda rotorun parçalanması riski azalmaktadır [5].

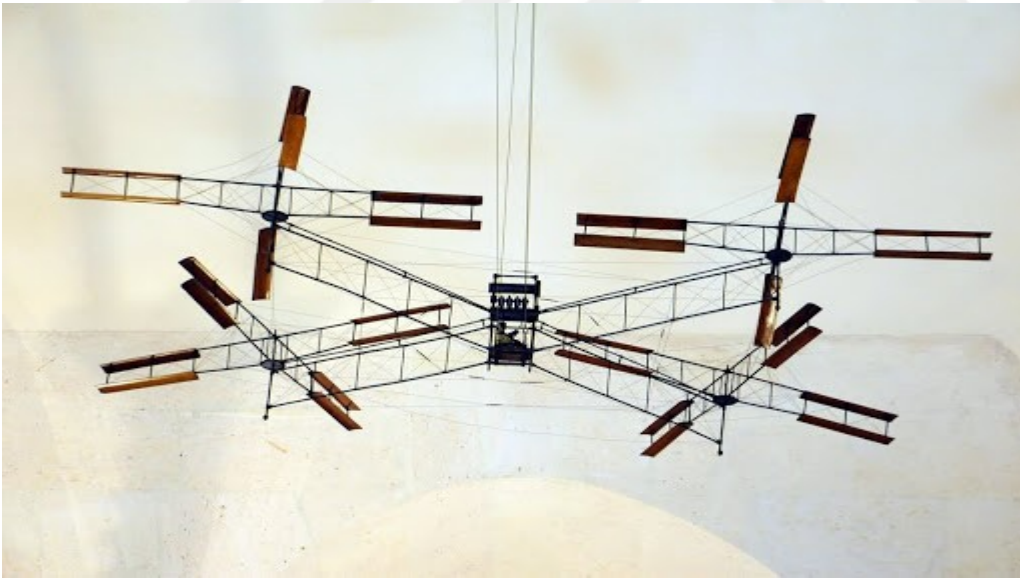
1.1 Tezin Hedefi

Sensör, eyleyici, mikroişlemci ve batarya teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler quadrotorların kullanım alanının gittikçe yaygınlaşmasına ve daha önemli hale gelmesine neden olmuştur [1]. Bu çalışmada gerçek bir quadrotorun fiziksel parametreleri kullanılarak Matlab/Simulink ortamında modellenmesi yapılacaktır. Daha sonra kontrolcü tasarımı yapılarak yükseklik ve pozisyon kontrolü yapılacak ve quadrotorun farklı referansları takip etmesi sağlanacaktır. Quadrotorun kütlesi (m) ve eylemsizlik momentlerine (I_x, I_y, I_z) parametre belirsizliği uygulanarak, tasarlanan kontrolcülerin parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu gösterilecektir. Daha sonra

quadrotorun giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklenerek, tasarlanan kontrolcülerin gürültüye karşı dayanıklılığı incelenecektir. Ayrıca kontrolcü katsayılarının Matlab tarafından belirlendiği PID Tuning yöntemiyle de kontrolcü tasarlanarak kendi tasarladığımız kontrolcülerle referans takibi, parametre belirsizliği ve gürültüye dayanıklılık açısından kıyaslanacaktır.

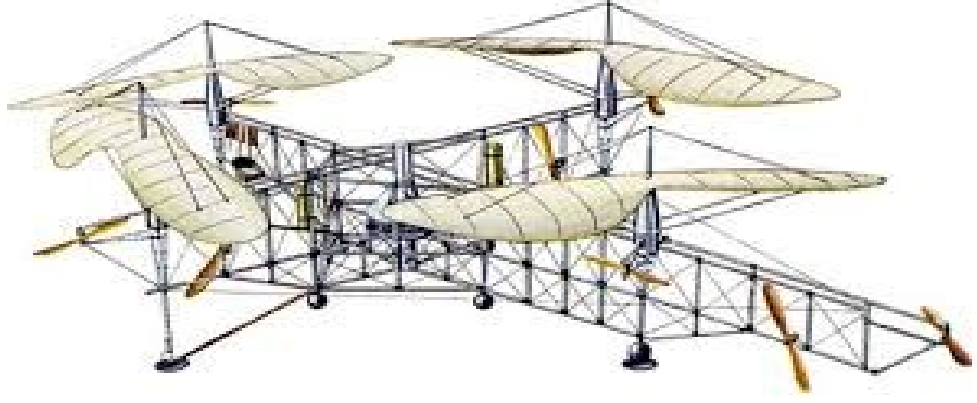
1.2 Quadrotorların Tarihçesi

20. yüzyılın başlarından itibaren quadrotorlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Fransız bilim adamı Charles Richet küçük bir insanız helikopter yapmış ancak başarılı bir şekilde uçuramamıştır. Daha sonra Richet'in öğrencisi Louis Breguet ve onun kardeşi Jacques Breguet, Profesör Richet'in çalışmalarını devam ettirmiştir. Breguet kardeşler, 1907 yılında Resim 1.1'de görülen ve The Gyroplane No.1 adıyla bilinen ilk insan taşıyan helikopteri yapmıştır. Quadrotorun yapısı X şeklindedir ve sadece dikey olarak hareket edebiliyordu. Karşılıklı pervaneleri bir yönde dönmekteyken diğer iki pervane ters istikamette dönmekteydi. Quadrotor, pilotu yerden 1.5 metre yüksekliğe kadar kaldırabiliyordu [6].



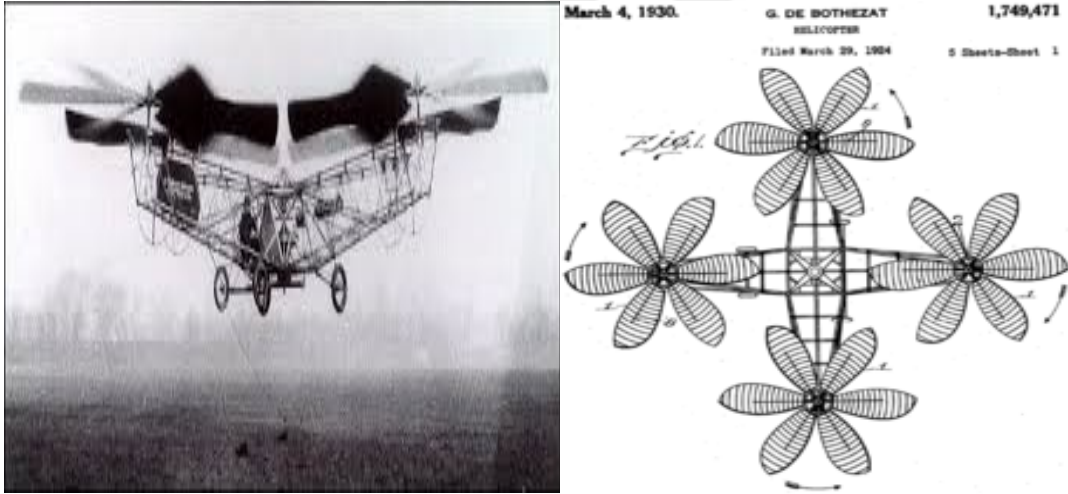
Resim 1.1 : The Gyroplane No.1 [7].

Etienne Oehmichen 1922 yılında Resim 1.2'de görülen 4 rotor ve 8 pervaneye sahip Oehmichen No.2 adlı quadrotoru icat etti. Quadrotorun kollarının ucunda iki kanatlı pervaneleri vardı. Quadrotorun yapısı çarpı konfigürasyon yapısındaydı. Quadrotor 1924 yılında yapılan bir denemesinde 14 dakika boyunca uçarak 1.6 km'den fazla yol almıştı [8].



Resim 1.2 : Oehmichen No.2 [9].

Dr. George de Bothezat ve Ivan Jerome 1922 yılında Resim 1.3’de görülen, yapısı X şeklinde olan ve 6 adet pervaneye sahip olan De Bothezat Helicopter ismini verdikleri bir quadrotor geliştirdiler. Bu quadrotor 5 m yüksekliğe kadar çıkabiliyordu [10].



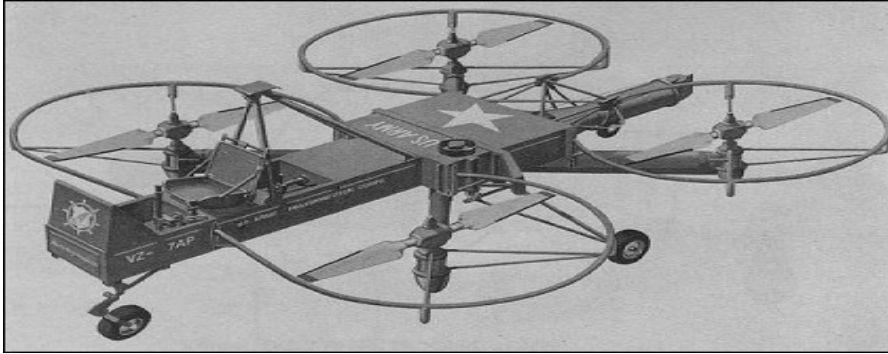
Resim 1.3 : De Bothezat Helicopter’in yandan ve üstten görünüşü [11].

Convertawings firması, 1922 yılında Oehmichen ve 1923 yılında Bothezat tarafından geliştirilen konseptleri gözden geçirmiştir. Convertawings bu konseptlerden yola çıkarak dört pervane kavramını geliştirmiştir. 1955 yılında ilk başarılı uçuşunu yapmıştır. Resim 1.4’de görülen Convertawings Model A’nın ana gövdesi çelikten, 4 rotorunu taşıyan kolları ise alüminyumdan yapılmıştır. Convertawings Model A başarılı bir şekilde ileri doğru uçabilen ilk quadrotordur. Quadrotorun kontrolü rotorların itme kuvvetinin değişmesiyle sağlanıyordu. Başarılı denemelerine rağmen ABD ordusunun savunma harcamalarındaki kısıtlamalardan dolayı Convertawings Model A projesi durdurulmuştur [12].



Resim 1.4 : Convertawings Model A [13].

Curtiss – Wright şirketi 1958 yılında ABD ordusu için Curtiss – Wright VZ-7 adlı quadrotoru geliştirmiştir. Resim 1.5’de yer alan Curtiss – Wright VZ-7 quadrotorunun ilerlemesi pervanelerinin itme kuvvetlerinin ayarlanmasıyla kontrol ediliyordu. Test uçuşlarında başarılı performans göstermesine rağmen ABD ordusunun irtifa ve hız gereksinimlerini karşılayamadığından proje iptal edilmiştir [14].



Resim 1.5 : Curtiss – Wright VZ-7 [15].

1.3 Literatür Taraması

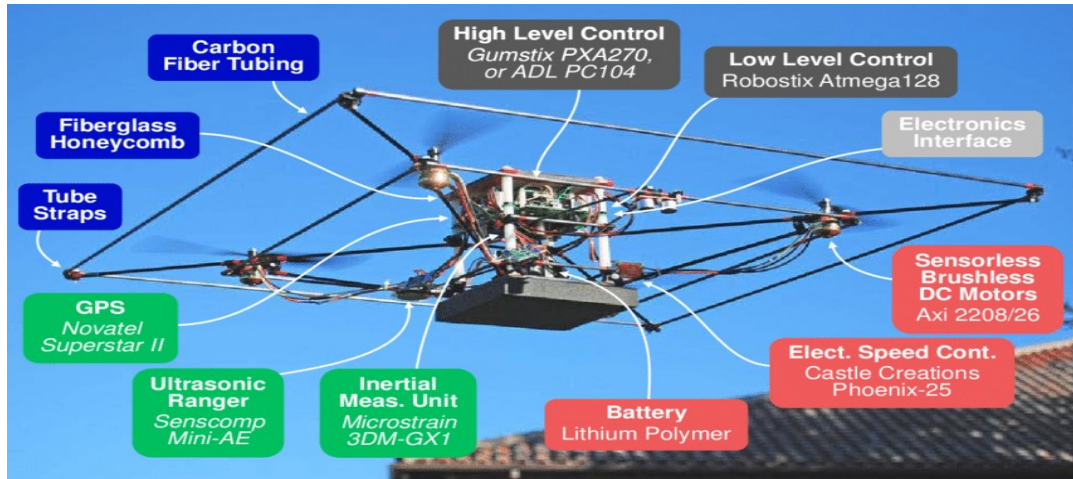
Literatürde quadrotorlar üzerine yapılmış çalışmalara sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmalarda eğitim amaçlı programlanabilir quadrotor üreten şirketlerin ürettiği quadrotorlar direk veya modifiye edilerek kullanılmakta, bazen de üniversiteler kendi laboratuvarlarında geliştirdikleri quadrotorları kullanmaktadır. Draganfly firması 1998’deki kuruluşundan bu yana çok çeşitli quadrotorlar üretmiştir. Bu quadrotorlar yakın tarihli akademik çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmıştır. 2002 yılında Pennsylvania Üniversitesi Genel Robotik, Otomasyon, Sensör ve Algılama Laboratuvarında Erdinç Altuğ ve James P. Ostrowski, Draganflyer quadrotoru için

geliştirdikleri geribesleme doğrusallaştırması ve geri adımlamalı (backstepping) kontrol metotlarını kıyaslamıştır (Resim 1.6). Yaptıkları deneysel çalışmalarda geri adımlamalı kontrolcünün daha iyi sonuç verdiği görülmüştür [16].



Resim 1.6 : Pennsylvania Üniversitesi'nde kullanılan Draganflyer Quadrotor [16].

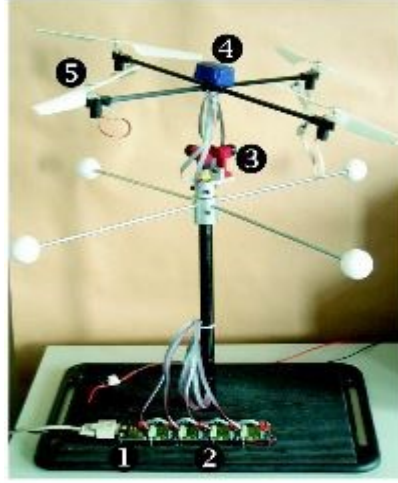
Stanford Üniversitesi'nden Gabriel M. Hoffmann ve Haomiao Huang 2005 yılında Draganflyer quadrotoru modifiye ederek ona STARMAC adını vermiştir (Resim 1.7). Draganflyer'in üstündeki elektronik devre, Stanford Üniversitesi'nde üretilen bir baskı devreyle değiştirilmiştir. Araştırma grubu iki quadrotor hazırlayarak integral kayan kipli kontrol tasarımı ve takviyeli öğrenme (reinforcement learning) kontrol tasarımını karşılaştırmıştır. Araştırma sonucunda her iki tasarımın da birbirine yakın tepki süreleri verdiği ve kararlı olduğu görülmüştür [17].



Resim 1.7 : Modifiye edilerek STARMAC adı verilen Draganflyer Quadrotor [18].

İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü'nden (EPFL) Samir Bouabdallah ve Roland Siegwart 2004 yılında Otonom Sistemler Laboratuvarı'nda yaptıkları çalışmalarda LQ (Doğrusal Karesel) ve PD (Oransal Türevsel) kontrolcü tekniklerini kıyaslamıştır. Bu çalışmada quadrotor bir test düzeneğinde sabitlenerek yalnızca 3 serbestlik

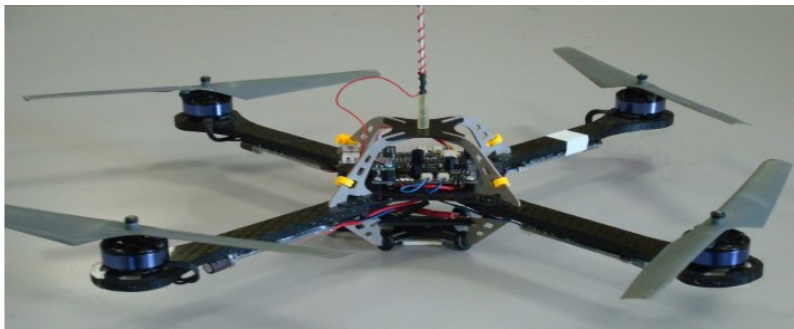
derecesinde (3 DOF) hareket etmesine izin verilmiştir (Resim 1.8). Bu çalışmada eyleyici dinamikleri dikkate alınmadığından ve tahrik gruplarındaki sistematik küçük farklılıklardan dolayı sürekli hal hatası giderilememiştir [19].



Resim 1.8 : EPFL’de geliştirilen quadrotor test düzeneği 1) RS232 – 12C çevirici 2) Motor modülleri 3) 3D Evrensel bağlantı 4) Mikro IMU 5) Tahrik grubu [20].

2010 yılında Dortmund Teknik Üniversitesi Robotik Araştırma Enstitüsü’nden Frank Hoffmann ve Niklas Goddemeier dört rotorlu bir insansız hava aracının mekatronik tasarımı, eyleyici dinamiklerinin modellenmesi ve irtifa kontrolünü yapmıştır. İrtifa kontrolü için PID ve geri adımlamalı kontrol tekniklerini kıyaslamış ve geri adımlamalı kontrol tekniğinin daha iyi bir sonuç verdiğini görmüşlerdir [21].

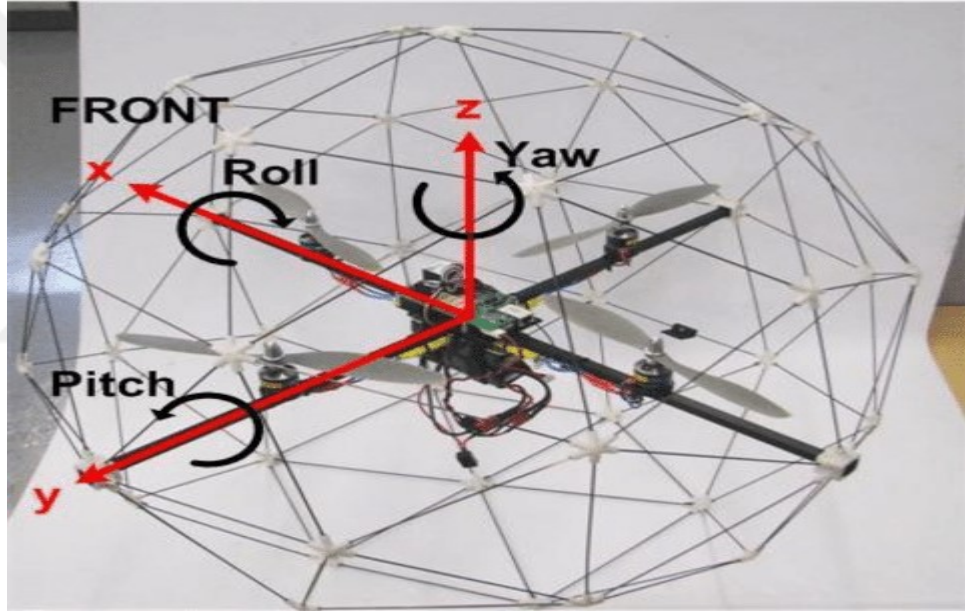
2010 yılında Aalborg Üniversitesi Kontrol Mühendisliği’nden Anders Friis Sorensen ve Morten Bisgaard, Resim 1.9’da görülen Ascending Technology firmasının ürettiği X-3D quadrotoruna otonom gürbüz uçuş gerçekleştirecek şekilde LQR ve H_{∞} kontrolcü tasarımı yapmıştır. Tasarladıkları LQR kontrolcü referansları daha iyi ve hızlı bir şekilde takip etmiştir. H_{∞} kontrolcünün ise X- 3D quadrotoru ile gerçekleştirilen uçuşta stabil olmadığı görülmüştür [22].



Resim 1.9 : Ascending Technologies firmasının ürettiği X-3D Quadrotoru [23].

2011 yılında Pennsylvania Üniversitesi Makine Mühendisliği'nden Quentin Lindsey, Daniel Mellinger ve Vijay Kumar birden fazla quadrotor kullanarak özel tasarlanmış küpleri bir araya getirerek yeni şekiller oluşturmuştur. Quadrotorların altına küpleri taşımak için özel bir kanca sistemi yerleştirilmiş, küplerin de birbirine yapışabilmesi için yüzeylerine mıknatıs koyulmuştur [24].

2012 yılında Imam Sadegzadeh ve Ankit Mehta, Resim 1.10'da görülen Quanser Qball-X4 quadrotorunun yükseklik kontrolü için kazanç ayarlamalı bir PID kontrolcü tasarlamıştır. Yaptıkları çalışmada eyleyici arızası durumunda kazanç ayarlamalı PID kontrolcününün klasik PID kontrolcüye kıyasla daha dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir. Kazanç ayarlamalı PID kontrolcü kullanıldığında eyleyici arızası durumunda daha az irtifa kaybı yaşandığı gözlenmiştir [25].



Resim 1.10 : Sadegzadeh ve Mehta tarafından kullanılan Qball X-4 Quadrotoru [26].

2013 yılında Concordia Üniversitesi Makine ve Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden Bin Yu ve Youmin Zhang bir quadrotor insansız hava aracında eyleyici arızası durumunda LQR ve Model Öngörülü Kontrol tekniklerini kıyaslamıştır. Qball X-4 quadrotorunun eyleyici arızası durumundaki yükseklik kontrolü performansı her iki kontrolcü için de değerlendirilmiştir. Araştırma neticesinde model öngörülü kontrolcününün eyleyici arızası durumunda daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir [27].

2013 yılında Kanada Kraliyet Askeri Akademisi'nden Mohamad Iskandarani ve Ahmed T. Hafez birden çok Qball X-4 quadrotorunu kullanarak belirlenen bir hedefi daire içine almıştır. Quadrotorlar belirlenen hedefin etrafında dairesel bir yörünge

çizerek onu izole etmektedir. Bunun için Linear Model Öngörülü Kontrol yöntemini kullanmışlardır [28].

2013 yılında Münih Teknik Üniversitesi'nden Paul De Monte ve Boris Lohmann geri adımlamalı kontrol (backstepping control) tekniğini kullanarak quadrotorun yörünge takibini gerçekleştirmiştir. Tasarlanan kontrolcü başarılı bir şekilde yörüngeyi takip edebilmiştir [29].

2014 yılında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'nden Coşku Kasnakoğlu ve Övünç Elbir dört rotorlu İHA için otopilot sistemi geliştirmiş, sistemin tasarımı, bileşenleri ve işleyişini ayrıntılı bir şekilde ele almıştır [3, 30].

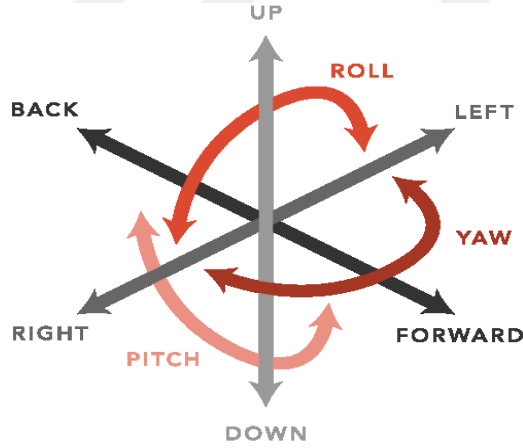
2016 yılında ise TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'nden Coşku Kasnakoğlu ve Ceren Cömert yaptıkları çalışmalarda bir quadrotor için geliştirilen PID kontrolcü ve kayan kipli kontrolcü tasarımlarını kıyaslamıştır. Çalışmada kayan kipli kontrolcüde meydana gelen çatırtı sorunu da çözülmüştür. Kayan kipli kontrolcünün PID kontrolcüye kıyasla referans değerlerini daha hızlı ve daha az hatayla takip edebildiği gözlemlenmiştir [31, 32].

Bu tez çalışmasında ise PID kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Tasarlanan PID kontrolcü model parametre belirsizliğine ve gürültüye dayanıklı olacaktır. Model parametre belirsizliği uygulanırken quadrotorun kütlesi (m) ile I_x , I_y ve I_z eylemsizlik momentlerinde parametre belirsizliği olduğu varsayılacaktır. Sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı gürültü eklenecek ve gürültü altında çalışması sağlanacaktır. Kendi tasarladığımız PID kontrolcüye ek olarak PID Tuning ile de kontrolcü tasarımı yapılacaktır. PID Tuning yönteminde kontrolcü ve filtre katsayıları Matlab tarafından otomatik belirlenmektedir. PID Tuning için de parametre belirsizliği ve gürültü uygulanacaktır. Böylece referans takibi, parametre belirsizliği ve gürültüye dayanıklılık açısından kendi kontrolcü tasarımı ve PID Tuning ile elde edilen kontrolcü kıyaslanacaktır. Tasarlanan kontrolcüler referans değerlerini sürekli hal hatasıyla karşılaşmadan takip edebilecektir. Bugüne kadar quadrotorlar için yapılan pek çok PD ve PID kontrolcü tasarımında sürekli hal hatasıyla karşılaşmıştır. Örneğin 2004 yılında EPFL'de Samir Boubdallah ve Roland Siegwart tasarladıkları PD kontrolcüde sürekli hal hatasını giderememiştir. Quadrotorlar için yapılan PD ve PID kontrolcü tasarımlarında birim basamak referansı yaygın olarak tercih edilirken bu çalışmada farklı referans değerleri için de kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

2. QUADROTORUN MODELLENMESİ

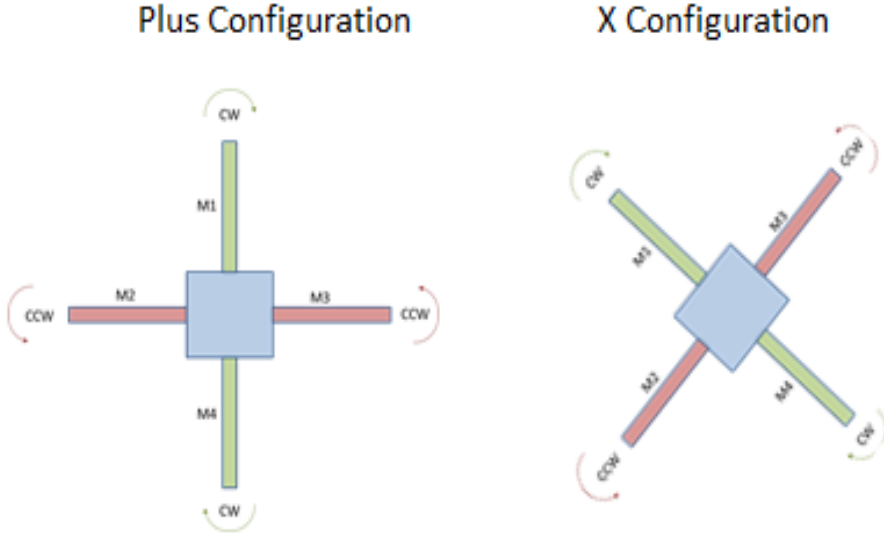
2.1 Uçma Prensipleri

Quadrotor, rotor olarak adlandırılan dört adet motora sahiptir ve dikey olarak iniş kalkış yapabilmektedir. Rotorlar birbirine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Rotor çiftleri birbirine zıt ancak kendi içlerinde aynı istikamette dönmektedir. Bu sayede rotorlar tarafından üretilen antitork dengelenir ve quadrotorun sapması engellenir. Quadrotor 6 serbestlik derecesinde (6 DOF) hareket edebilir. Bu kavram 3 dikey ekseninde dönebilmeyi ve ileri geri, aşağı yukarı, sağa ve sola gidebilmeyi ifade etmektedir. 6 serbestlik derecesi 12 durum ile ifade edilmektedir. Şekil 2.1'de 12 durum gösterilmektedir. İlk altı durum euler açıları olan yalpa (roll), yunuslama (pitch), sapma (yaw) açıları ve açısal hızlar p , q ve r olmaktadır. Diğer 6 durum ise x , y , z ile bunların lineer hız bileşenleri olan u , v ve w 'dur [33].



Şekil 2.1 : 6 serbestlik derecesinin gösterimi.

Quadrotorlar + (artı) ve x (çapraz) olmak üzere iki farklı konfigürasyonda üretilmektedir. Artı konfigürasyonunda yalpa açısını ve yunuslama açısını kontrol edebilmek için karşılıklı 2 rotor kullanılmaktayken çapraz konfigürasyonda 4 rotor kullanılmaktadır. Artı konfigürasyonunda x ve y yönünde hareket etmek için iki rotor kullanılırken çapraz konfigürasyonda dört rotor kullanılmaktadır. Dört rotorun kullanılması gücün dağılmasını sağlamakta ve eyleyici limitlerinin aşılmasına engel olmaktadır. Ayrıca çapraz konfigürasyonun manevra kabiliyeti daha yüksektir [34].



Şekil 2.2 : Artı ve çapraz konfigürasyonların gösterimi.

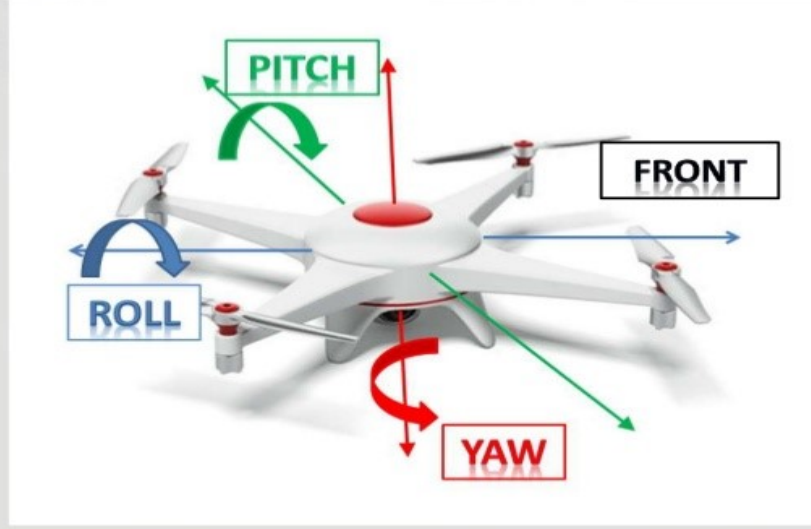
Şekil 2.2’de artı konfigürasyon (plus configuration) ve çapraz konfigürasyon (x configuration) gösterilmektedir. Bu tez çalışmasında çapraz konfigürasyon kullanılmıştır. Çapraz konfigürasyonda (1,3) ile (2,4) rotor çiftleri birbiriyle zıt ancak kendi içlerinde aynı istikamette dönmektedir. Şekil 2.3’de çapraz konfigürasyondaki rotorların dönüş yönleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3 : Rotor çiftlerinin dönüş yönlerinin gösterimi.

Quadrotorun 3 eksendeki hareketi dikey eksende hareket, yalpa, yunuslama ve sapma hareketleri olarak özetlenebilir. Şekil 2.4’de quadrotorun eksenlere göre hareketi anlatılmaktadır.

Euler Angles



Şekil 2.4 : Quadrotorun eksenlere göre hareketi.

2.1.1 Dikey eksende hareket

Quadrotorun dikey eksendeki hareketi dört rotorun devirlerinin aynı oranda artırılması veya azaltılmasıyla gerçekleşmektedir. Quadrotor askıda durmakta iken dört rotorun devirleri aynı miktarda artırılırsa rotorların üretmekte olduğu itki kuvveti quadrotorun ağırlığını geçer ve yukarı yönlü harekete neden olur. Quadrotor askıda durmakta iken dört rotorun devirleri aynı miktarda azaltılırsa pervanelerin ürettiği itki kuvveti quadrotorun ağırlığından daha az olur ve quadrotor alçalmaya başlar.

2.1.2 Yalpa açısı hareketi

Yalpa (roll) hareketi sol ve sağ pervanelerin dönüş hızlarındaki farktan meydana gelir. Dönüş hızları arasındaki farktan dolayı kaldırma kuvvetleri arasında fark oluşması yalpa açısını değiştirmektedir.

2.1.3 Yunuslama açısı hareketi

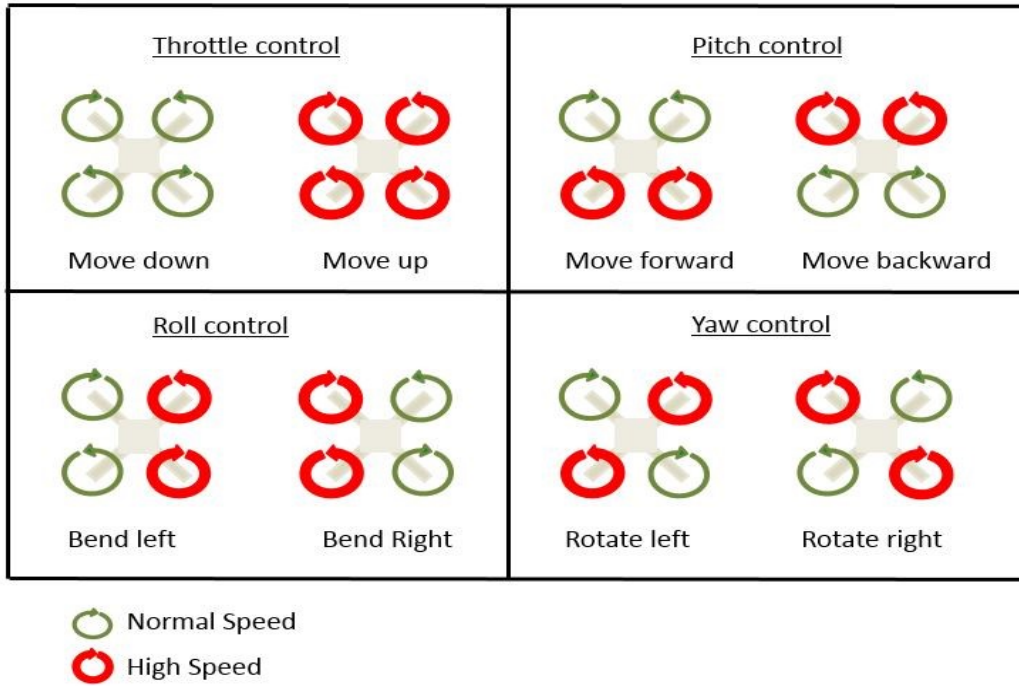
Yunuslama (pitch) hareketi ön ve arka pervanelerin dönüş hızlarındaki farktan meydana gelir. Ön ve arka pervanelerin dönüş hızları arasındaki farktan dolayı kaldırma kuvvetleri arasında fark oluşması yunuslama açısını değiştirmektedir.

2.1.4 Sapma açısı hareketi

Aynı yönde dönen pervane çiftinin hızı, diğer istikamette dönmekte olan pervane çiftinin hızına kıyasla değiştirildiğinde quadrotor kendi eksenini etrafında döner. Bu dönüş hareketine sapma (yaw) hareketi denir.

2.1.5 Quadrotorun eksenlere göre hareketi

Önceki bölümlerde quadrotorun dikey eksenindeki hareketi, yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı hareketleri ayrı ayrı ele alınmıştı. Bu bölümde quadrotorun farklı eksenlerdeki hareketleri tek bir şekilde bir araya getirilmiştir.



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

Şekil 2.5’de quadrotorun dikey hareketi, yalpa, yunuslama ve sapma hareketleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Şekildeki kırmızı daireler yüksek devir hızıyla (high speed) dönen rotorları temsil etmektedir. Yeşil daireler normal hızla (normal speed) dönen devir hızını temsil etmektedir [35]. Gaz kontrolü (throttle control) dikey eksenli hareketi temsil etmektedir. Dört rotor da aynı anda yüksek hızla dönerse quadrotor

yukarı doğru hareket etmektedir. Dört rotorun dönüş hızı da aynı anda düşerse quadrotor alçalmaktadır.

Sağ taraftaki rotorlar soldaki rotora kıyasla yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor sola doğru yalpa (roll) hareketi yapar. Sol taraftaki rotorlar sağdakine göre yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor sağa doğru yalpa (roll) hareketi yapar.

Arka taraftaki rotorlar öndeki rotora kıyasla yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor ileri doğru yunuslama (pitch) hareketi yapar. Ön taraftaki rotorlar arkadaki rotora kıyasla yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor geriye doğru yunuslama (pitch) hareketi yapar.

Aynı yönde dönen 2 ve 4 numaralı rotorlar, 1 ve 3 numaralı rotora göre daha yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor kendi eksenini etrafında sola doğru dönmeye başlar. Aynı yönde dönen 1 ve 3 numaralı rotorlar, 2 ve 4 numaralı rotora göre daha yüksek devir hızıyla dönerse quadrotor kendi eksenini etrafında sağa doğru dönmeye başlar. Bu harekete de sapma (yaw) hareketi denir.

2.2 Matematiksel Denklemler

Bir eksen takımındaki denklemi başka bir eksen takımında gösterebilmek için dönüşüm matrisi kullanılmaktadır. Euler Dönüşümü yöntemi bunlardan biridir. Bu yöntemde bir eksen takımı diğer eksen takımıyla çakışacak biçimde sırasıyla 3 kez döndürülmektedir. Bu yöntem kullanılarak yere bağlı eksen takımı hava aracına bağlı eksen takımına dönüştürülecektir. Yere bağlı eksen takımının hava aracına bağlı eksen takımı etrafında sırasıyla sapma (ψ), yunuslama (θ) ve yalpa (φ) açılarıyla döndürülmesi sonucu Eşitlik (2.1-2.3) ile gösterilen denklemler ortaya çıkar [36].

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

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

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

$R(\psi)$, $R(\theta)$ ve $R(\varphi)$ matrisleri birbirine dik matrislerdir ve çarpımları herhangi bir vektörü yere bağlı eksen takımından hava aracına bağlı eksen takımına dönüştüren dönüşüm (rotasyon) matrisini oluşturmaktadır. Bu çarpım neticesinde oluşan rotasyon matrisi Eşitlik (2.4-2.5)'de görülmektedir [37].

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

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

Uçuş kontrol sisteminde Euler açıları (φ , θ , ψ) direk ölçülememektedir. Hava aracına bağlı eksen takımındaki açısal hızlar P, Q, R direk olarak ölçülebilmektedir. Hava aracına bağlı eksen takımındaki açısal hızlara dönüşüm uygulanarak Euler açısal hızları ($\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$) elde edilebilir [37, 38].

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & \sin(\varphi)\cos(\theta) \\ 0 & -\sin(\varphi) & \cos(\varphi)\cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi}' \\ \dot{\theta}' \\ \dot{\psi}' \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi}' \\ \dot{\theta}' \\ \dot{\psi}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\varphi)\tan(\theta) & \cos(\varphi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi)\sec(\theta) & \cos(\varphi)\sec(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Quadrotorun rotorlarına ait kuvvet ve tork denklemleri Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9)'da gösterildiği şekildedir. F_i ve T_i sırasıyla i . rotor tarafından üretilen tork ve kuvvettir. b itki sabiti (Ns^2), d tork sabiti (Nms^2), w_i i . rotorun devir sayısı (dev/dak) ve $i = 1, 2, 3, 4$ rotor numarasıdır [39].

$$F_i = bw_i^2 \quad (2.8)$$

$$T_i = dw_i^2 \quad (2.9)$$

Quadrotoru kontrol etmek için U_1 , U_2 , U_3 ve U_4 şeklinde dört kontrol girdisi kullanılmaktadır. Kontrol girdileri ile kuvvet ve tork arasındaki ilişki Eşitlik (2.10)'da görülmektedir. Eşitlik 2.10'da yer alan l quadrotorun kol uzunluğunu, w_i^2 ise açısal hızın karesini ifade etmektedir [40].

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ T_\varphi \\ T_\theta \\ T_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b & b & b & b \\ 0 & -lb & 0 & lb \\ lb & 0 & -lb & 0 \\ -d & d & -d & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

U_1 , toplam kaldırma kuvveti U_2 , U_3 ve U_4 ise quadrotor üzerine etki eden torklardır. Açısal hızların karesi ile kuvvet ve torklar arasındaki dönüşüm matrisi Eşitlik (2.11)'deki gibi tanımlanabilir [40].

$$\begin{bmatrix} w_1^2 \\ w_2^2 \\ w_3^2 \\ w_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4b} & 0 & \frac{1}{2bl} & \frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & -\frac{1}{2bl} & 0 & \frac{1}{4d} \\ -\frac{1}{4b} & 0 & -\frac{1}{2bl} & -\frac{1}{4d} \\ \frac{1}{4b} & \frac{1}{2bl} & 0 & \frac{1}{4d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Quadrotorun öteleme ve dönme hareketleri sonucunda oluşan hareket denklemleri Eşitlik (2.12-2.17) ile gösterildiği şekildedir [41]:

$$\ddot{X} = (\sin\theta\cos\varphi\cos\psi + \sin\psi\sin\varphi) \frac{U_1}{m} \quad (2.12)$$

$$\ddot{Y} = (\sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) \frac{U_1}{m} \quad (2.13)$$

$$\ddot{Z} = (\cos\varphi\cos\theta) \frac{U_1}{m} - g \quad (2.14)$$

$$\ddot{\varphi} = \left(\frac{I_y - I_z}{I_x} \right) \dot{\theta}\dot{\psi} + \frac{J_R}{I_x} \dot{\theta}w_R + \frac{1}{I_x} U_2 \quad (2.15)$$

$$\ddot{\theta} = \left(\frac{I_z - I_x}{I_y} \right) \dot{\theta}\dot{\psi} + \frac{J_R}{I_x} \dot{\varphi}w_R + \frac{1}{I_y} U_3 \quad (2.16)$$

$$\ddot{\psi} = \left(\frac{I_x - I_y}{I_z} \right) \dot{\varphi}\dot{\theta} + \frac{1}{I_z} U_4 \quad (2.17)$$

Bu bölümdeki denklemler kullanılarak quadrotorun Simulink ortamında modeli oluşturulacaktır. Denklemlerde yer alan quadrotorun kütlesi (m), quadrotorun kol uzunluğu (l), itki katsayısı (b), tork katsayısı (d), I_x , I_y , I_z eylemsizlik momentleri ve J_r rotor eylemsizlik momenti için OS4 quadrotoruna ait değerler kullanılacaktır.

2.3 Fiziksel Parametreler

Bu tez çalışmasında OS4 Quadrotor platformu kullanılmıştır. Kullanılan OS4 Quadrotor platformuna ait fiziksel parametreler Çizelge 2.1'de görülmektedir [42].

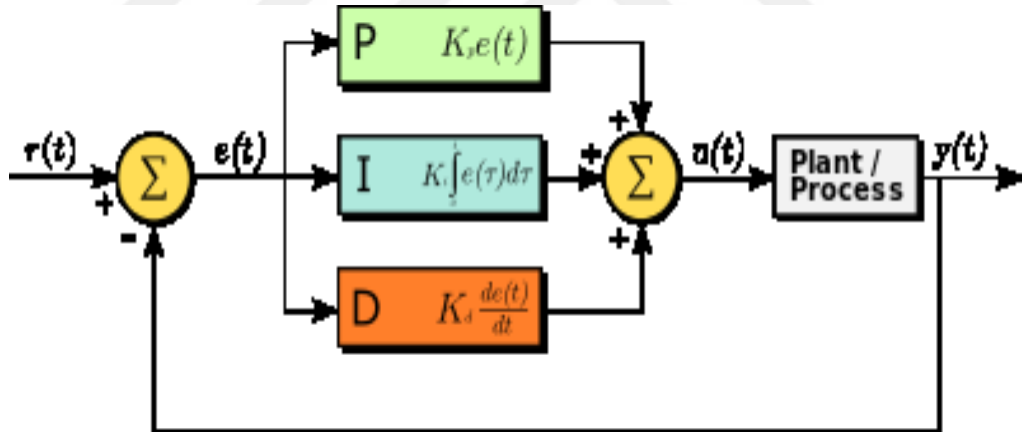
Çizelge 2.1 : OS4 Quadrotoruna ait fiziksel parametreler.

Parametre	Açıklama	Değer
m	Quadrotorun kütlesi	0.65 kg
l	Quadrotorun kol uzunluğu	0.23 m
b	İtke katsayısı	$3.13 \times 10^{-5} \text{ N s}^2$
d	Tork katsayısı	$7.5 \times 10^{-7} \text{ N s}^2$
I _x	x-eksenine göre eylemsizlik momenti	$7.5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
I _y	y-eksenine göre eylemsizlik momenti	$7.5 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
I _z	z-eksenine göre eylemsizlik momenti	$1.3 \times 10^{-2} \text{ kg.m}^2$
J _r	Rotor eylemsizlik momenti	$6.5 \times 10^{-5} \text{ kg.m}^2$
w _{max}	Maksimum rotor hızı	1000 rad/sn
t _{max}	Maksimum tork	0.15 Nm
g	Yerçekimi ivmesi	9.81 m/s ²

3. KONTROLCÜ TASARLANMASI

3.1 PID Kontrolcünün Genel Yapısı

PID kontrolcüler kullanım kolaylığı nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. PID kontrolcü sürekli surette bir hata değerini, yani hedeflenen sistem durumu ile anlık sistem durumu arasındaki farkı hesap etmektedir. Kontrolcü süreç kontrol girdisini ayarlayarak hatayı minimuma indirmeye çalışmaktadır. Şekil 3.1'deki blok şeması incelendiğinde PID kontrolcünün sürekli olarak bir $e(t)$ hata değerini hesapladığı anlaşılabilmektedir. Hata değeri $e(t)$, hedeflenen durum $r(t)$ ile ölçülen durum $y(t)$ arasındaki farka karşılık gelmektedir [43, 44, 45].



Şekil 3.1 : PID kontrolcü genel yapısı.

PID (Oransal Integral Türevsel) kontrolcü 3 temel parametreye sahiptir. Bunlar K_p , K_i ve K_d 'dir. Bu parametreler sırasıyla oransal kazanç, integral kazancı ve türevsel kazancı temsil etmektedir. Oransal kazanç K_p yükseliş zamanını azaltır ancak sürekli hal hatasını yok edemez. İntegral kazancı K_i sürekli hal hatasını azaltır. Türevsel kazanç K_d ise aşımı azaltmak için kullanılır. PID kontrolcünün parametrelerinin her birinin meydana getirdiği etki Çizelge 3.1'de görülmektedir. Çizelge 3.1'de parametrelerin kapalı çevrim yanıtı, yükseliş süresi, aşım, yerleşme süresi ve sürekli hal hatası açısından etkileri incelenmiştir [46].

Çizelge 3.1 : PID sabitlerinin etkisi.

Kapalı Çevrim Yanıtı	Yükseliş Süresi	Aşım	Yerleşme Süresi	Sürekli Hal Hatası
K _p	Düşürür	Arttırır	Küçük oranda arttırır	Azaltır
K _i	Küçük oranda düşürür	Arttırır	Arttırır	Büyük oranda azaltır
K _d	Küçük oranda değiştirir	Azaltır	Azaltır	Küçük oranda değiştirir

3.2 Birim Basamak Referansı için PID Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde verilen bir birim basamak referansını takip edebilecek şekilde PID kontrolcüler tasarlanmıştır. Quadrotorun yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma hareketlerinin kontrolü için ayrı ayrı PID kontrolcü tasarımları yapılmıştır.

3.2.1 İrtifa kontrolcü

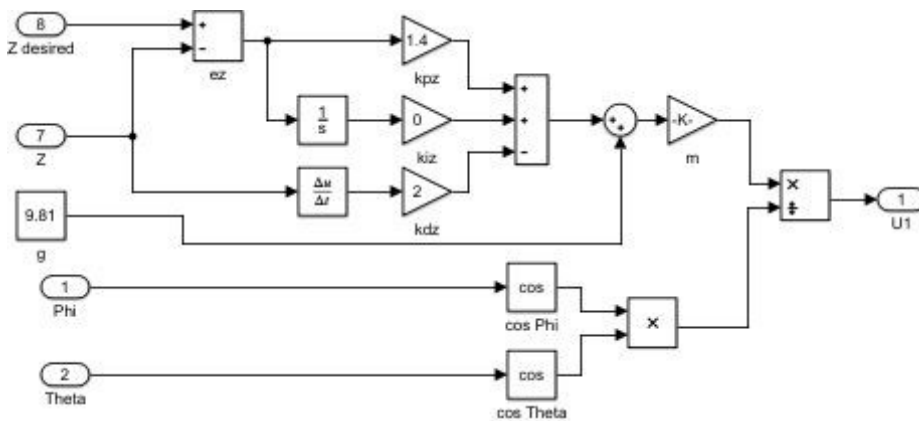
Yükseklik kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün hata fonksiyonu ve kontrol girdisi Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2)'de görülmektedir.

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

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

Hata fonksiyonu e, yükseklik girdisi z, istenilen yükseklik z_d ve kontrolcü girişi U₁'dir.

Yükseklik kontrolü için tasarlanan PID kontrolcü Şekil 3.2'de görülmektedir.



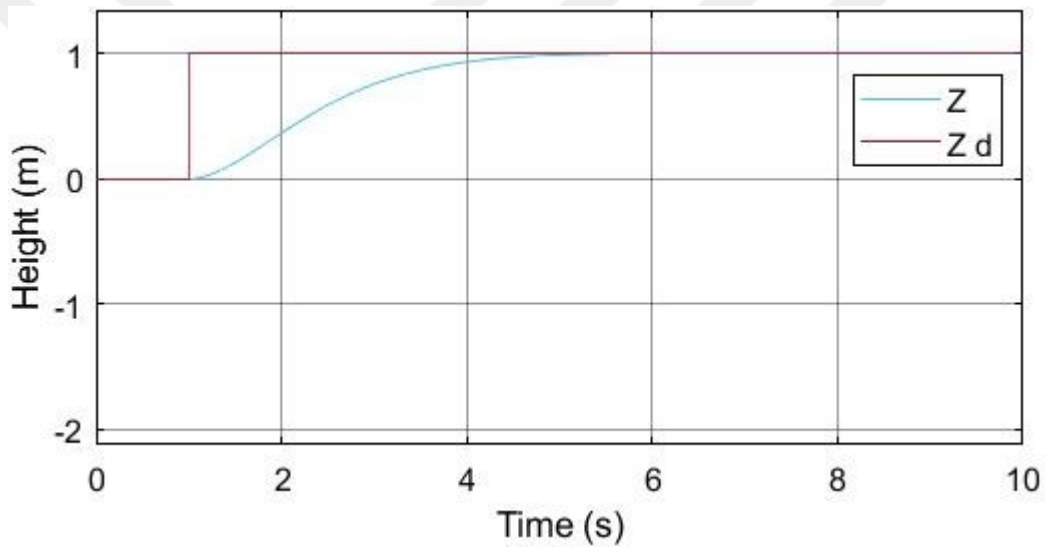
Şekil 3.2 : Yükseklik kontrolcü diyagramı.

Çizelge 3.2’de ise yükseklik kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir. Sürekli hal hatası ile karşılaşmadığından Ki değeri 0 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.2 : Birim basamak referansı için yükseklik kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	1.4
Ki	0
Kd	2

Şekil 3.3’de yükseklik kontrolcüsünün simülasyonu görülmektedir. Kontrolcü yaklaşık 5 sn’de referansı yakalamakta ve başarılı şekilde takip etmektedir. Z yükseklik değerini, Zd referans değerini belirtmektedir. Referans değeri 1 m ‘dir. Dikey eksen yüksekliktir ve birimi metredir. Yatay eksen zamandır ve birimi saniyedir.



Şekil 3.3 : Birim basamak referansı yükseklik kontrolcü simülasyonu.

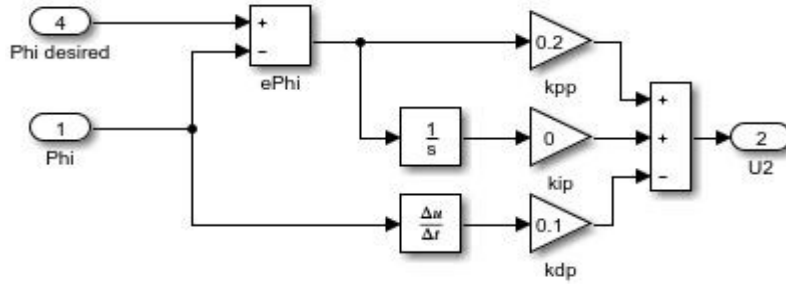
3.2.2 Yalpa açısı kontrolcü

Yalpa açısının kontrolü amacıyla tasarlanan PID kontrolcüsünün hata fonksiyonu ve kontrol girdisi Eşitlik (3.3) ve Eşitlik (3.4)’de yer almaktadır.

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

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

Yalpa açısı için tasarlanan kontrolcüsünün blok şeması Şekil 3.4’de görülmektedir. Yunuslama ve sapma açıları için tasarlanan kontrolcülerin blok şemaları da referans açıları ve kontrolcü parametrelerinin değerleri hariç aynıdır.



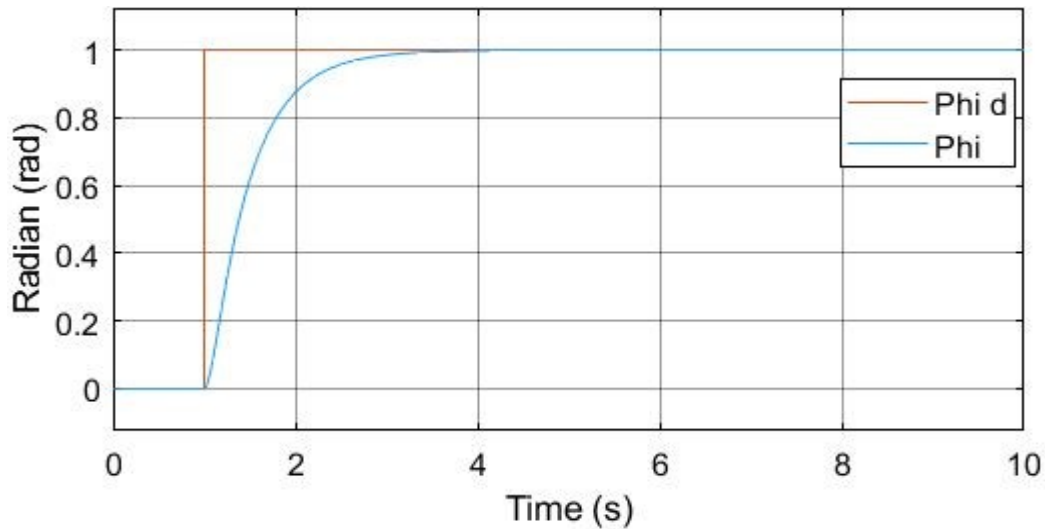
Şekil 3.4 : Yalpa açısı kontrolcü diyagramı.

Çizelge 3.3’de yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcünün parametreleri görülmektedir. Sürekli hal hatası gözlenmediğinden Ki değeri 0 alınmıştır.

Çizelge 3.3 : Birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.2
Ki	0
Kd	0.1

Şekil 3.5’de yalpa açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcü birim basamak referans değerini yaklaşık 4 sn’de yakalamakta ve başarılı bir şekilde takip edebilmektedir. Yalpa açısı Phi ile yalpa açısı referans değeri ise Phi d ile temsil edilmektedir. Referans değeri 1 radyandır. Dikey eksen açısal değeri ifade etmekte olup radyan (rad) cinsindedir. Yatay eksen ise zamanı temsil etmekte ve saniye (sn) cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 3.5 : Birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.

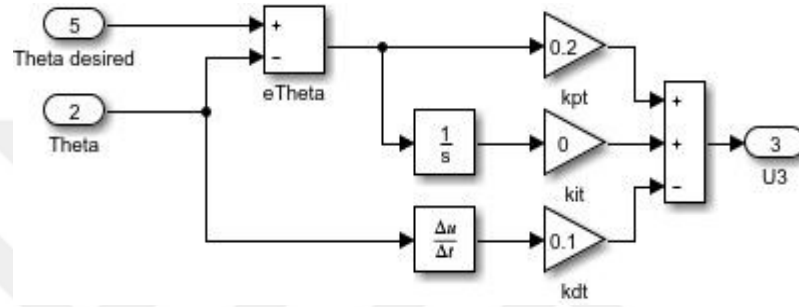
3.2.3 Yunuslama açısı kontrolcü

Yunuslama açısının kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün hata fonksiyonu ve kontrol girdisi Eşitlik (3.5) ve Eşitlik (3.6)'da yer almaktadır.

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

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

Yunuslama açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 3.6'da görülmektedir.



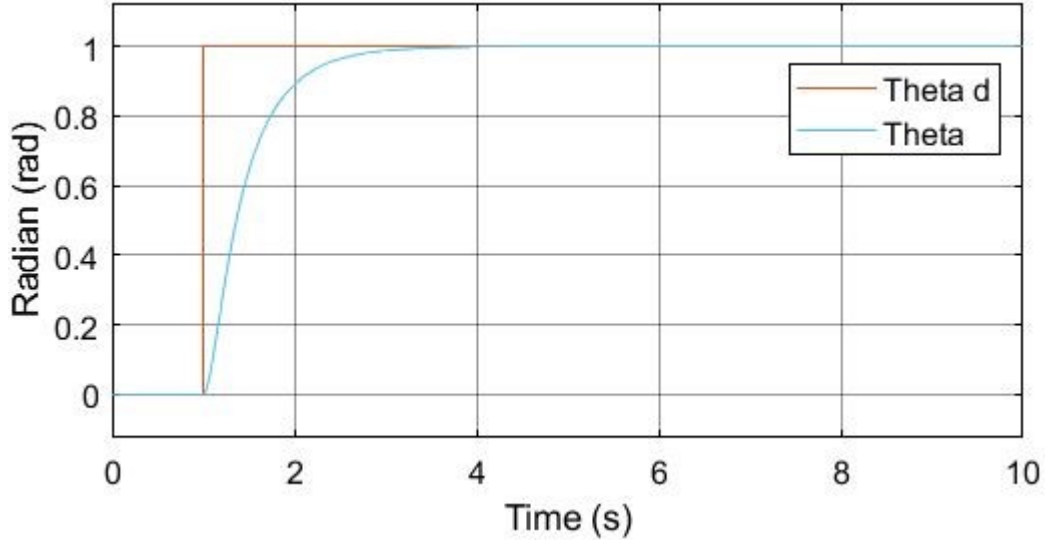
Şekil 3.6 : Yunuslama açısı kontrolcü blok şeması.

Çizelge 3.4'de yunuslama açısı için tasarlanan kontrolcünün parametreleri görülmektedir. Yunuslama açısı kontrolcü verilen referans değeri 1 radyanı takip ederken sürekli hal hatası ile karşılaşmadığından integral kazancı Ki değeri 0 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.4 : Birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.2
Ki	0
Kd	0.1

Şekil 3.7'de yunuslama açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Yunuslama açısı için tasarlanan PID kontrolcünün referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Yunuslama açısı Theta ile yunuslama açısı referans değeri Theta d ile temsil edilmektedir. Referans değer radyan cinsindedir. Dikey eksen açısal değeri temsil etmektedir ve radyan olarak gösterilmektedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir. Referans değeri 4. saniyede yakalanmakta ve başarılı bir şekilde takip edilmektedir.



Şekil 3.7 : Birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.

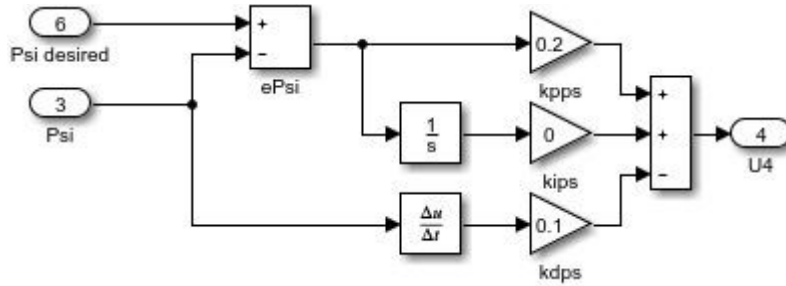
3.2.4 Sapma açısı kontrolcü

Sapma açısının kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün hata fonksiyonu ve kontrol girdisi Eşitlik (3.7) ve Eşitlik (3.8)'de yer almaktadır.

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

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

Sapma açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 3.8'de görülmektedir.



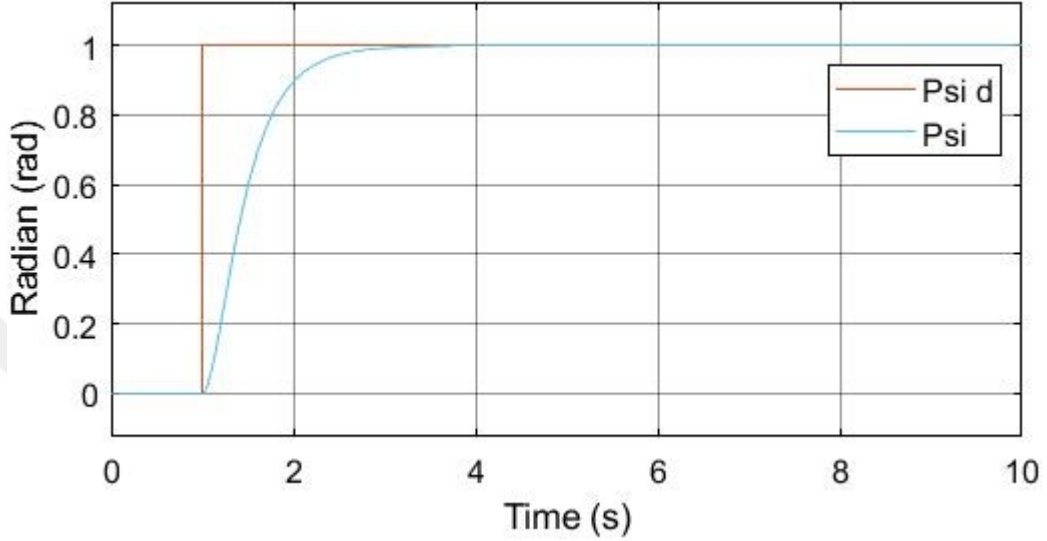
Şekil 3.8 : Sapma açısı kontrolcü diyagramı.

Çizelge 3.5'de sapma açısı için tasarlanan kontrolcünün parametreleri görülmektedir. Referans takibi esnasında sürekli hal hatası gözlenmediğinden Ki değeri 0 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.5 : Birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.2
Ki	0
Kd	0.1

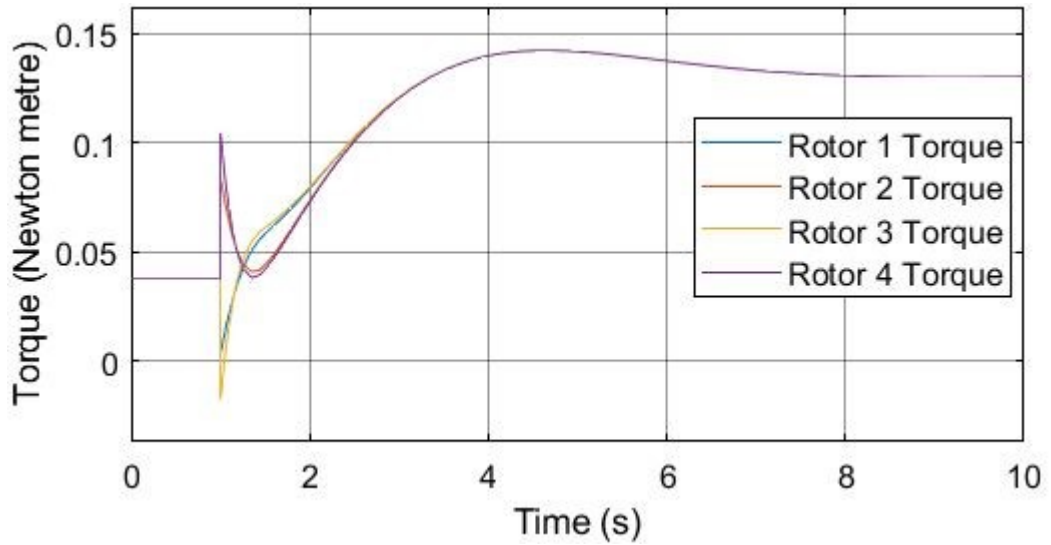
Şekil 3.9’da sapma açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Sapma açısı için tasarlanan PID kontrolcünün referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Sapma açısı Ψ , sapma açısı referans değeri Ψ_d ile temsil edilmektedir. Referans değer 1 radyandır. Dikey eksen açısal değeri belirtmektedir ve radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı belirtmektedir ve birimi saniyedir.



Şekil 3.9 : Birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü simülasyonu.

3.2.5 Rotor tork simülasyonları

Fiziksel parametrelerin gösterildiği Çizelge 2.1’e göre her bir rotorun üretebileceği maksimum tork 0.15 Nm’dir. Tasarladığımız kontrolcülerin quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumlu olduğunu göstermek için rotorların tork grafiği çizilmiştir.



Şekil 3.10 : Birim basamak referansında rotorların ürettiği tork.

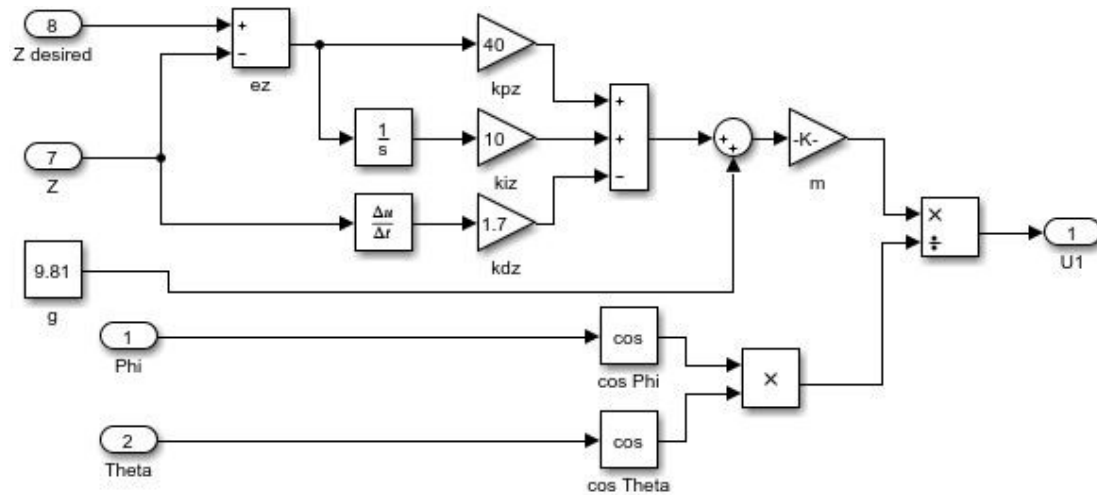
Şekil 3.10 'dan anlaşılacağı üzere rotorların ürettiği tork, Çizelge 2.1'de yer alan maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm'nin altındadır. Bu durumda rotor tork simülasyonlarıyla elde edilen sonuç, quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumludur.

3.3 Sinuzoidal Referans için PID Kontrolcü Tasarımı

Bu bölümde verilen bir sinuzoidal referansı takip edebilecek şekilde PID kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Sisteme takip etmesi için genliği 1 ve frekansı 1 rad/sn olan sinuzoidal referans verilmiştir. Quadrotorun yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma hareketlerinin kontrolü için ayrı ayrı PID kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Önceki bölümde birim basamak referansını takip için tasarlanan kontrolcülerde sürekli hal hatası görülmediğinden integral kontrolcü katsayısı 0 olarak alınmıştır. Sinuzoidal referansı takip ederken sürekli hal hatasına rastlandığından bunu gidermek adına integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. PID kontrolcü blok şeması katsayılar haricinde ayındır.

3.3.1 İrtifa kontrolcü

Yükseklik kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün blok şeması Şekil 3.11'de görülmektedir.



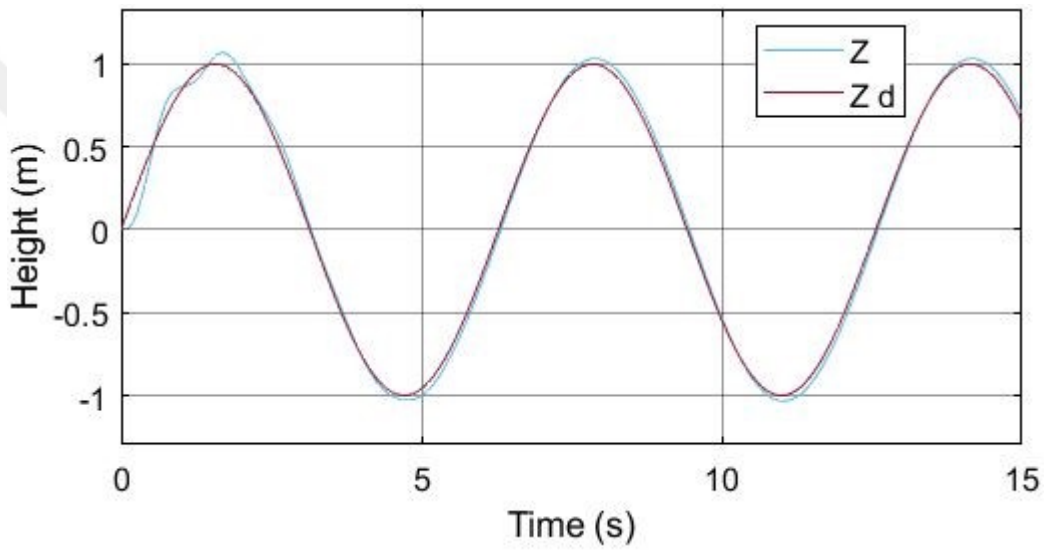
Şekil 3.11 : Sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü blok şeması.

Yükseklik kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün katsayıları çizelge 3.6'da görüldüğü gibidir. Birim basamak referansının aksine integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. Bu sayede sürekli hal hatası giderilmiştir.

Çizelge 3.6 : Sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	40
K_i	10
K_d	1.7

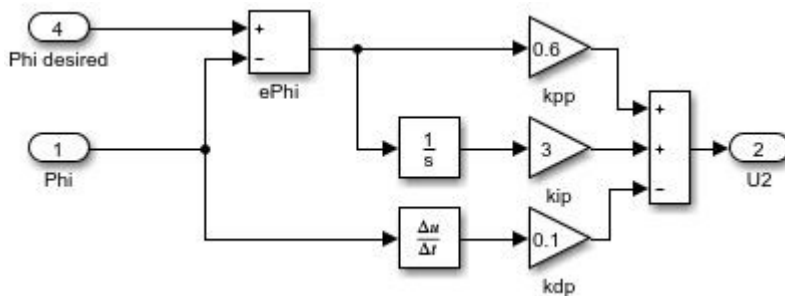
Şekil 3.12’de yükseklik kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Yükseklik kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün sinuzoidal referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Yükseklik Z ile yükseklik referans değeri Z_d ile temsil edilmektedir. Dikey eksen yüksekliği ifade etmektedir ve birimi metredir. Yatay eksen zamanı ifade etmektedir ve birimi saniyedir.



Şekil 3.12 : Sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü simülasyonu.

3.3.2 Yalpa açısı kontrolcü

Yalpa açısı için tasarlanan kontrolcünün diyagramı Şekil 3.13’de görülmektedir.



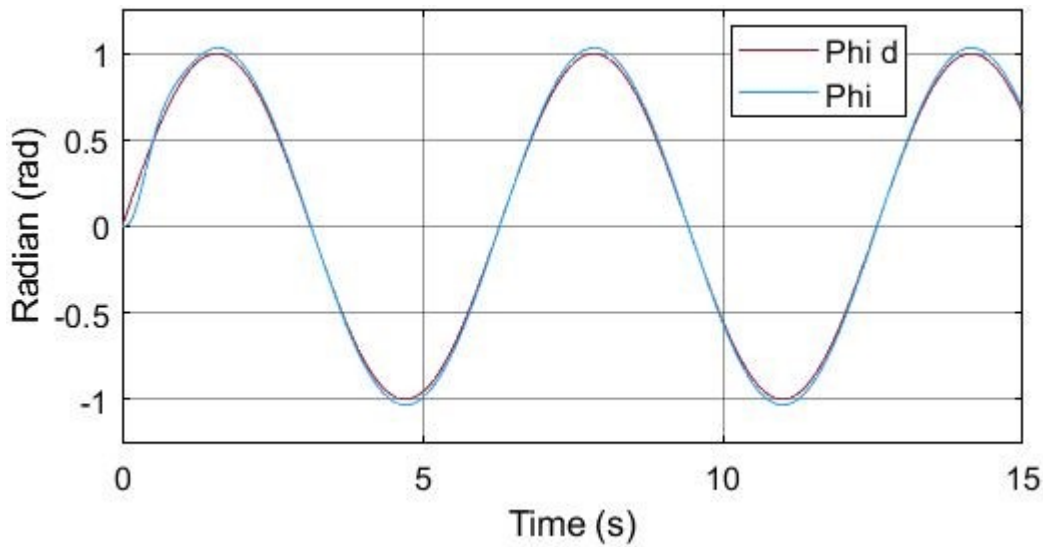
Şekil 3.13 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü blok şeması.

Yalpa açısının kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün katsayıları Çizelge 3.7’de görüldüğü gibidir. Önceki bölümde birim basamak referansı için tasarlanan yalpa açısı kontrolcünde sürekli hal hatası görülmediğinden integral kontrolcü katsayısı kullanılmamıştı. Bu bölümde sinuzoidal referans değerini takip için tasarlanan yalpa açısı kontrolcünde verilen referans değeri takip ederken sürekli hal hatası gözlemlendiğinden integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. İntegral kontrolcü katsayısının kullanılması sayesinde sürekli hal hatası giderilmiştir. Ayrıca sinuzoidal referansı takip etmek birim basamak referansını takip etmekten daha zor olduğundan daha yüksek kontrolcü katsayıları (K_p , K_i , K_d) kullanılmıştır.

Çizelge 3.7 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	0.6
K_i	3
K_d	0.1

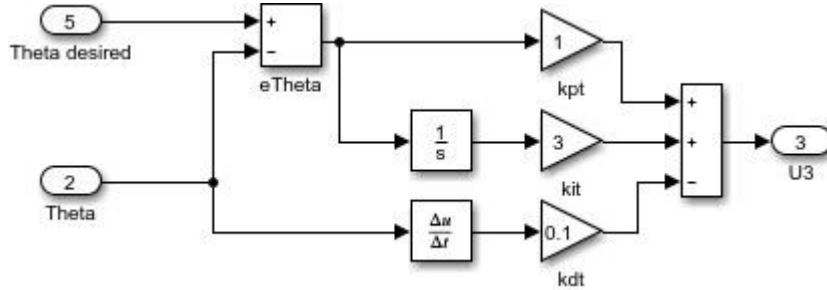
Şekil 3.14’de yalpa açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Sisteme genliği 1 ve frekansı 1 radyan/sn olan sinuzoidal referans verilmiştir. 15 saniye süresince gerçekleştirilen simülasyonda yalpa açısı için tasarlanan PID kontrolcünün referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Yalpa açısı Φ ile yalpa açısı referans değeri Φ_d ile temsil edilmektedir. Referans değer radyan cinsindedir. Dikey eksen açı değerini temsil etmektedir ve radyan cinsinden gösterilmektedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 3.14 : Sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.

3.3.3 Yunuslama açısı kontrolcü

Yunuslama açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 3.15’de görülmektedir.



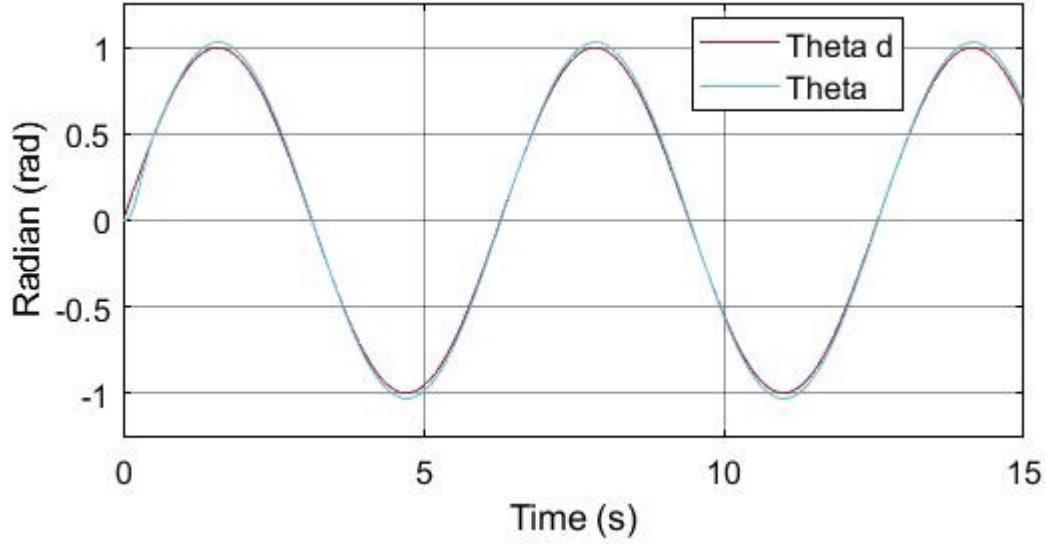
Şekil 3.15 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü blok şeması.

Yunuslama açısının kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün katsayıları Çizelge 3.8’de görüldüğü gibidir. Birim basamak referansını takip etmesi için tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünde integral kontrolcü katsayısı kullanılmamıştı. Bu durumun nedeni birim basamak referansını takip esnasında sürekli hal hatasıyla karşılaşılmasıydı. Ancak sinuzoidal referansı takip etmek için tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünde sürekli hal hatasıyla karşılaşıldığı için integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. İntegral kontrolcü katsayısının kullanılması sayesinde karşılaşılan sürekli hal hatası giderilmiştir.

Çizelge 3.8 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	1
Ki	3
Kd	0.1

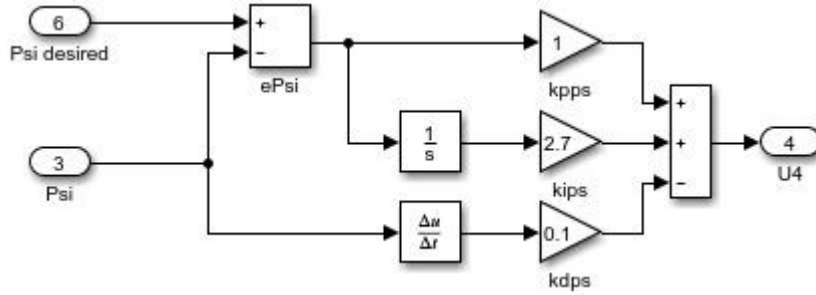
Şekil 3.16’da yer alan grafikte yunuslama açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu gösterilmektedir. Sisteme takip etmesi için genliği 1 ve frekansı 1 radyan/sn olan sinuzoidal referans verilmiştir ve 15 saniye süresince simülasyon yapılmıştır. Şekil 3.16 incelendiğinde yunuslama açısı için tasarlanan PID kontrolcünün verilen referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği anlaşılmaktadır. Yunuslama açısı Theta ile yunuslama açısı referans değeri Theta d ile temsil edilmektedir. Referans değer radyan cinsindedir. Grafikteki dikey eksen açıl değerini temsil etmekte ve radyan olarak gösterilmektedir. Grafikteki yatay eksen ise zamanı temsil etmekte ve saniye cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 3.16 : Sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.

3.3.4 Sapma açısı kontrolcü

Sapma açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 3.17’de görülmektedir.



Şekil 3.17 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü blok şeması.

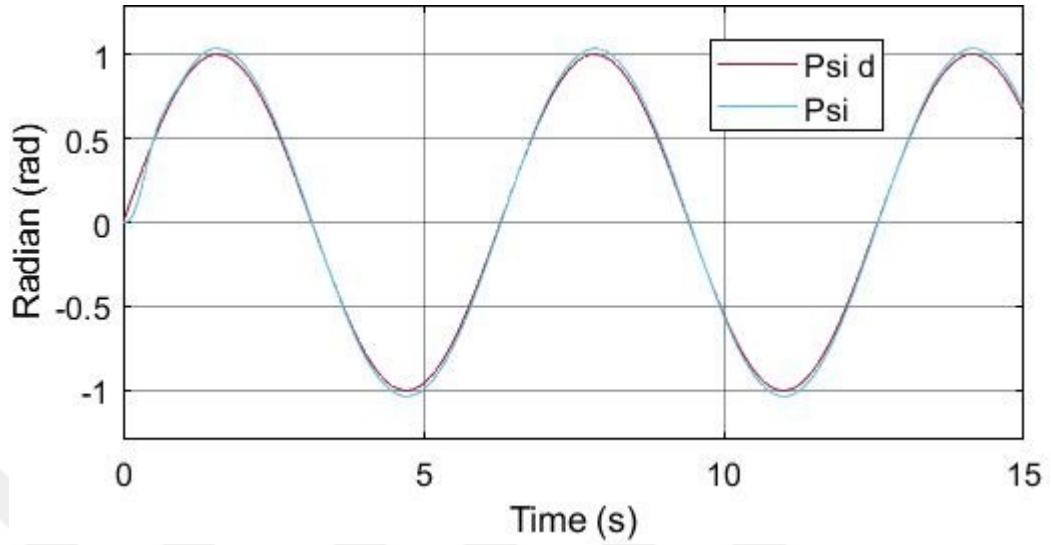
Sapma açısının kontrolü için tasarlanan PID kontrolcünün katsayıları Çizelge 3.9’da görüldüğü gibidir. Birim basamak referansının aksine integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. Bu sayede sürekli hal hatası giderilmiştir.

Çizelge 3.9 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K _p	1
K _i	2.7
K _d	0.1

Şekil 3.18’de sapma açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Sapma açısı için tasarlanan PID kontrolcünün referans değerini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Sapma açısı Psi ile sapma açısı referans değeri Psi d ile

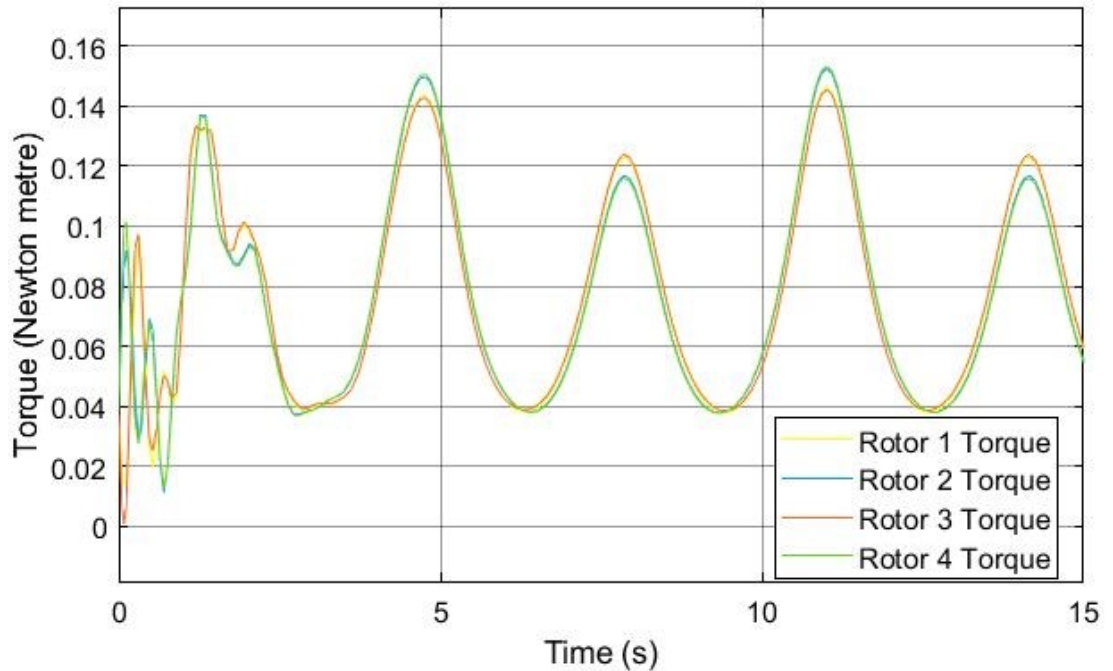
temsil edilmektedir. Referans değer radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir.



Şekil 3.18 : Sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü simülasyonu.

3.3.5 Rotor tork simülasyonları

Fiziksel parametrelerin gösterildiği Çizelge 2.1'e göre her bir rotorun üretebileceği maksimum tork 0.15 Nm'dir. Tasarladığımız kontrolcülerin quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumlu olduğunu göstermek için rotorların tork grafiği çizilmiştir. Şekil 3.19 'da görüldüğü üzere rotorların ürettiği tork quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumludur.



Şekil 3.19 : Sinuzoidal referansta rotorların ürettiği tork.



4. PID TUNING İLE KONTROLCÜ TASARLANMASI

Bu bölümde PID Tuning ile kontrolcü katsayıları belirlenerek birim basamak referansı ve sinuzoidal referans için grafikler çizilmiştir. Daha önce kontrolcü katsayılarını sistemin fiziksel parametrelerini de dikkate alarak kendimiz belirlemiştik. Kontrolcü katsayılarını ayarlarken sistemin rotorlarının maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm değerini aşmamasını sağlamıştık. Bu bölümde ise PID Tuning katsayıları ile kontrolcü katsayılarını Matlab'ın belirlemesini sağlayacak ve PID Tuning yöntemi ile tasarladığımız kontrolcülerle 3. Bölümdeki kendi tasarladığımız kontrolcülerini kıyaslayacağız.

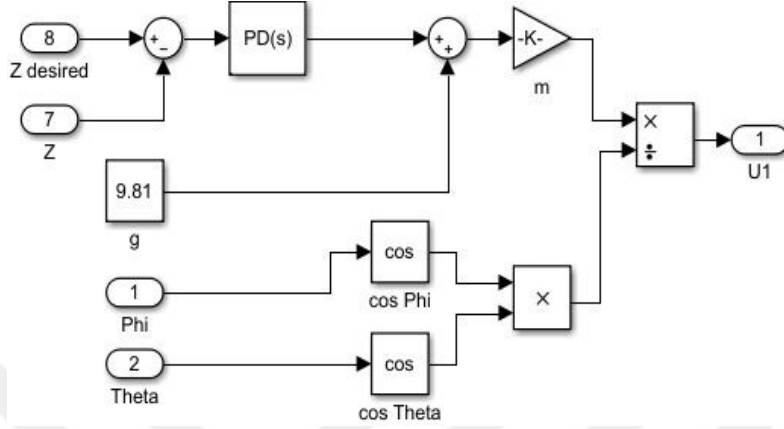
4.1 Birim Basamak Referansı için PID Tuning ile Kontrolcü Tasarımı

Bu kısımda quadrotor modeli için Simulink'te hazırladığımız kontrolcü şemasındaki P, I ve D katsayı blokları çıkarılmış, yerine yalnız PID Tuning bloğu konulmuştur. Bu PID Tuning bloğu ile katsayılar otomatik olarak Matlab tarafından belirlenmiştir. Birim basamak referansı için otomatik olarak belirlenen katsayıların yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarını takip grafikleri çizilmiştir. Ayrıca rotor tork grafikleri çizilerek maksimum tork değerinin aşılmadığı kontrol edilmiştir. Birim basamak referansı verilen sistemdeki yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açıları için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin genel formülü Eşitlik 4.1'de verilmektedir. P ve D kontrolcü katsayıları, N ise filtre katsayısıdır. Birim basamak referansının takip edilebilmesi için integral kontrolcüye gerek olmadığından PID Tuning'in ayarlarındaki integralci kısmı devre dışı bırakılmıştır.

$$P + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (4.1)$$

4.1.1 İrtifa kontrolcü

Yükseklik kontrolü için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü Şekil 4.1’de görülmektedir.



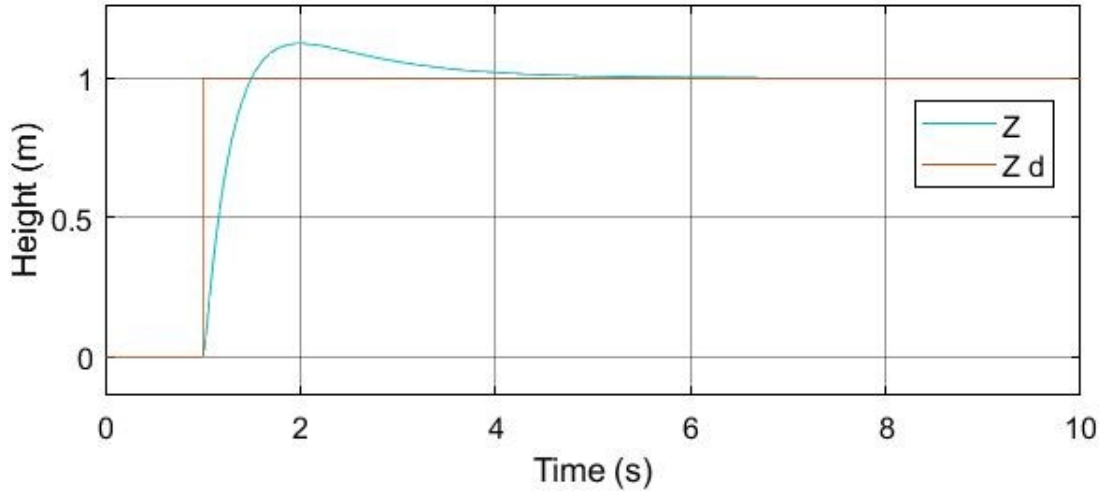
Şekil 4.1 : Birim basamak referansı PID Tuning yükseklik kontrolcü diyagramı.

Çizelge 4.1’de ise yükseklik kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir. K_p , K_i ve K_d kontrolcü katsayıları N ise filtre katsayısıdır. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünde kontrolcü ve filtre katsayıları otomatik olarak Matlab tarafından belirlenmektedir.

Çizelge 4.1 : PID Tuning birim basamak referansı yükseklik kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	3.4
K_i	0
K_d	4.04
N	58.37

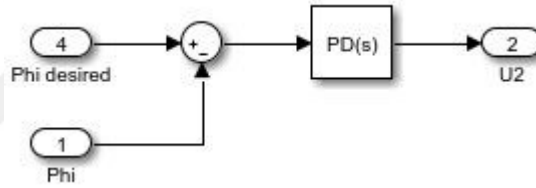
Şekil 4.2’de PID Tuning yükseklik kontrolcüsünün simülasyonu yer almaktadır. Yükseklik Z , referans değeri Z_d ile temsil edilmektedir. Referans değeri 1 m ‘dir. Dikey eksen yüksekliği temsil etmektedir ve metre cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmektedir ve sn cinsindedir. Kontrolcü yaklaşık 7 sn’de referans değeri yakalamakta ve başarılı şekilde takip etmektedir. Grafik incelendiğinde aşımın yüksek olduğu gözlenmektedir. 3. Bölümde kendi tasarladığımız birim basamak referansı yükseklik kontrolcünde ise hem aşım gözlenmiyordu hem referans 5 sn’de yakalanıyordu hem de Çizelge 3.2’de gösterildiği üzere kontrolcü katsayıları daha düşüktü. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcünün daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2 : Birim basamak referansı PID Tuning yükseklik kontrolcü simülasyonu.

4.1.2 Yalpa açısı kontrolcü

Yalpa açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 4.3’de görülmektedir.



Şekil 4.3 : Birim basamak referansı PID Tuning yalpa açısı kontrolcü diyagramı.

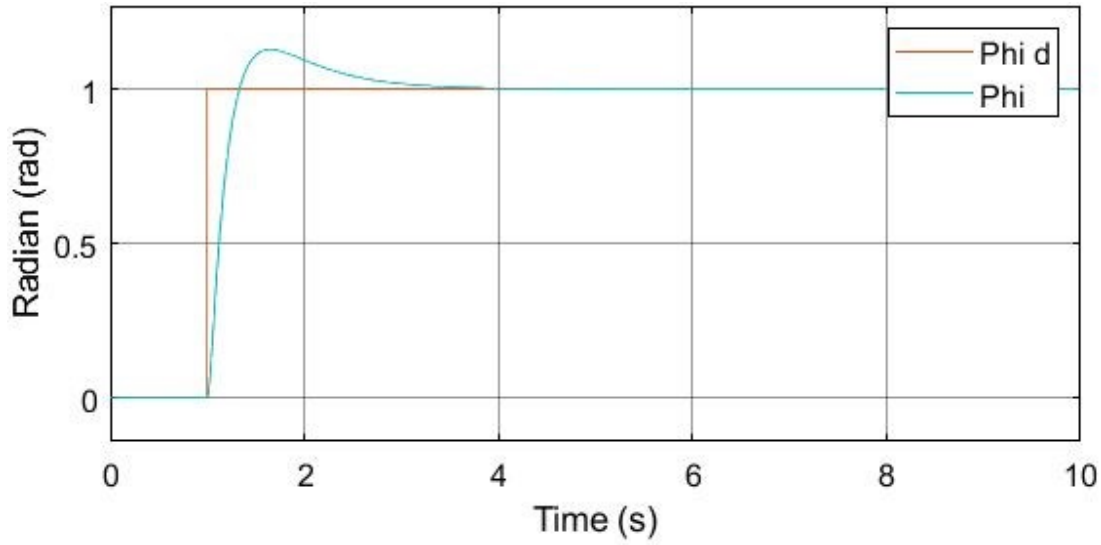
Çizelge 4.2’de ise yalpa açısı kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.2 : PID Tuning birim basamak referansı yalpa açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.0567
Ki	0
Kd	0.0433
N	42.332

Şekil 4.4’de yalpa açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Phi yalpa açısı, Phi d yalpa açısı referans değeridir. Dikey eksen açısal değeri belirtmektedir ve radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir. Yalpa açısı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü referans değerini başarılı bir şekilde takip etmektedir ancak kendi tasarladığımız kontrolcüyle kıyaslandığında aşımın yüksek olduğu gözlenmektedir. 3. Bölümde

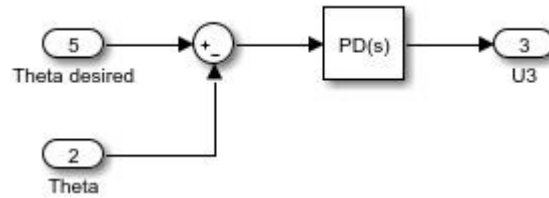
kendi tasarladığımız kontrolcüde ise referans takibi esnasında aşım gözlenmemektedir. Bu nedenle kendi tasarladığımız kontrolcü referans takibinde daha başarılıdır.



Şekil 4.4 : Birim basamak referansı PID Tuning yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.

4.1.3 Yunuslama açısı kontrolcü

Yunuslama açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5 : Birim basamak referansı PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü diyagramı.

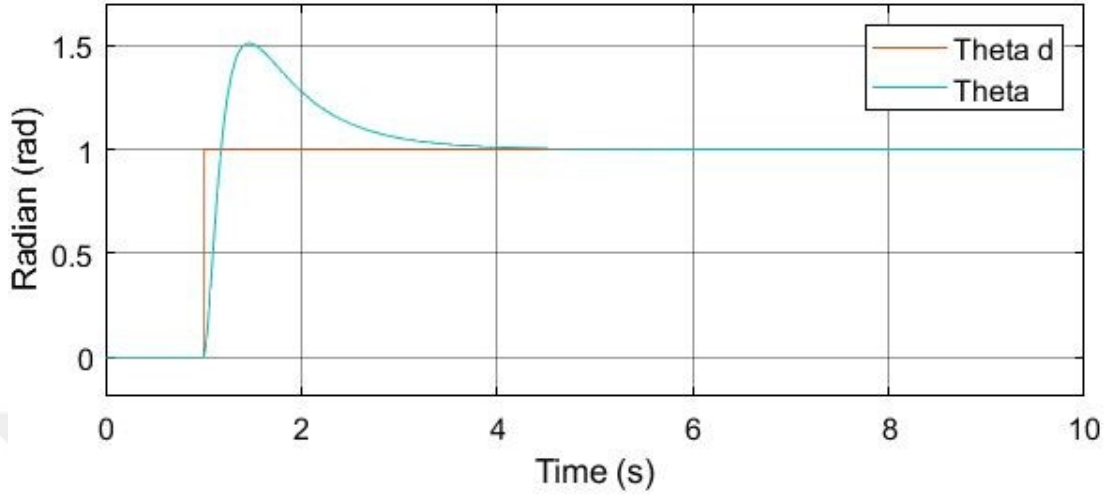
Çizelge 4.3’de ise yunuslama açısı kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.3 : PID Tuning birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.06237
Ki	0
Kd	0.0477
N	34.679

Şekil 4.6’da yunuslama açısı kontrolcü için yapılan simülasyon görülmektedir. Theta yunuslama açısı, Theta d yunuslama açısı referans değeridir. Referans değer radyan cinsinden ve zaman sn cinsindedir. PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı

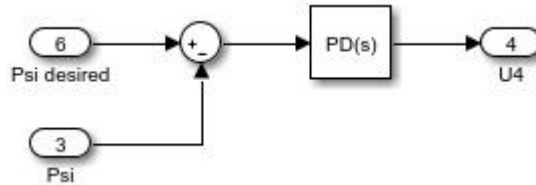
kontrolcü referansı başarılı şekilde takip etmektedir. Ancak aşım değeri çok yüksektir. 3. Bölümde kendi tasarladığımız kontrolcü herhangi bir aşım gözlenmeden referansı takip ettiğinden dolayı PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünden daha başarılıdır.



Şekil 4.6 : Birim basamak referansı PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.

4.1.4 Sapma açısı kontrolcü

Sapma açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7 : Birim basamak referansı PID Tuning sapma açısı kontrolcü diyagramı.

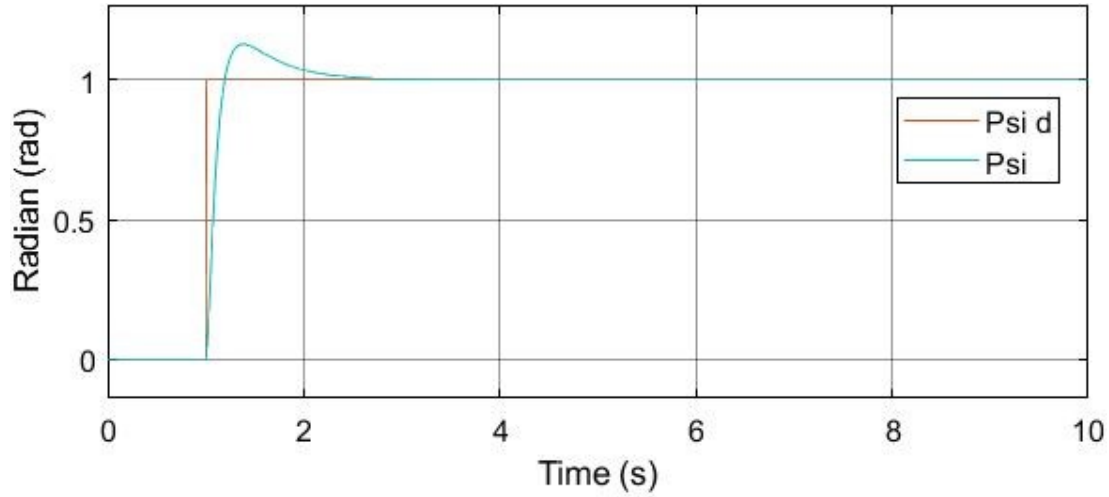
Çizelge 4.4’de ise sapma açısı kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.4 : PID Tuning birim basamak referansı sapma açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	0.24767
Ki	0
Kd	0.12528
N	52.4901

Şekil 4.8’de sapma açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Sapma açısı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün referans değerini başarılı bir

şekilde takip ettiği görülmektedir. Sapma açısı Psi ile sapma açısı referans değeri Psi d ile temsil edilmektedir. Referans değer radyan cinsindedir. Dikey eksen açısal değeri temsil etmekte ve radyan cinsinden gösterilmektedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir. 3. Bölümde kendi tasarladığımız sapma açısı kontrolcünde aşım gözlenmiyordu. Ancak PID Tuning ile tasarlanan sapma açısı kontrolcünde aşım gözlenmektedir. Çizelge 3.5'te görüldüğü üzere 3. Bölümde kendi tasarladığımız kontrolcünün katsayıları daha düşüktü. Ayrıca her iki kontrolcünün de yaklaşık 3 sn'de referansı yakaladığı gözlenmektedir. Bu durumda aşım gözlenmemesi, daha düşük kontrolcü katsayısı kullanılması ve referans değerinin aynı sürede yakalanması nedeniyle kendi tasarladığımız kontrolcü daha iyidir.

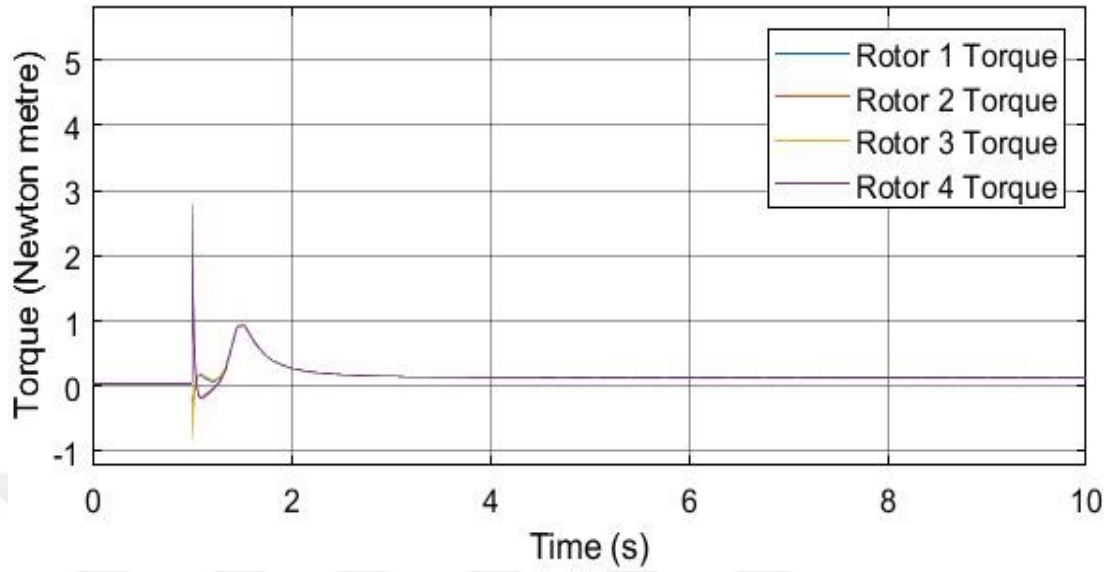


Şekil 4.8 : Birim basamak referansı PID Tuning sapma açısı kontrolcü simülasyonu.

4.1.5 Rotor tork simülasyonları

Fiziksel parametrelerin gösterildiği Çizelge 2.1'e göre her bir rotorun üretebileceği maksimum tork 0.15 Nm'dir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumlu olup olmadığını göstermek için her bir rotorun tork grafiği çizilmiştir. Şekil 4.9 'da görüldüğü üzere rotorların ürettiği tork quadrotorun fiziksel parametrelerinden çok daha yüksektir. Bu durumda 3. bölümde kendi tasarladığımız kontrolcülerin Matlab'ın PID Tuning ile otomatik olarak tasarladığı kontrolcülerden çok daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Kendi tasarladığımız kontrolcülerde aşım olmazken Matlab'ın PID Tuning ile otomatik olarak tasarladığı yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açısı kontrolcülerinin tamamında aşım olduğu görülmektedir. Ayrıca kendi tasarladığımız kontrolcülerde torklar 0.15 Nm'nin altında

ve fiziksel parametrelerle uyumluken PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde torklar rotorların üretebileceği maksimum torkun çok üzerindedir.



Şekil 4.9 : Birim basamak referansı PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin torku.

4.2 Sinuzoidal Referans için PID Tuning ile Kontrolcü Tasarımı

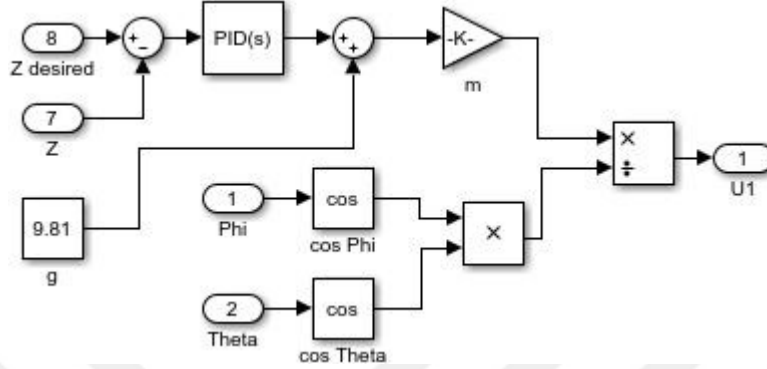
Bu kısımda quadrotor modeli için Simulink'te hazırladığımız kontrolcü şemasındaki P, I ve D katsayı blokları çıkarılmış, yerine yalnız PID Tuning bloğu konulmuştur. Bu PID Tuning bloğu ile katsayılar otomatik olarak Matlab tarafından belirlenmiştir. Sinuzoidal referans için otomatik olarak belirlenen katsayıların yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarını takip grafikleri çizilmiştir. Ayrıca rotor tork grafikleri çizilerek maksimum tork değerinin aşılmış aşılmadığı kontrol edilmiştir. Sinuzoidal referans verilen sistemin yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açıları için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin genel formülü Eşitlik 4.2'de yer almaktadır. P, I ve D kontrolcü katsayıları N ise filtre katsayısıdır.

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.2'de görüldüğü üzere sürekli hal hatasını gidermek için PID Tuning ayarlarındaki integral kontrolcü katsayısının kullanımına izin verilmiştir.

4.2.1 İrtifa kontrolcü

Yükseklik kontrolü için PID Tuning ile tasarlanan PID kontrolcü Şekil 4.10'da görülmektedir.



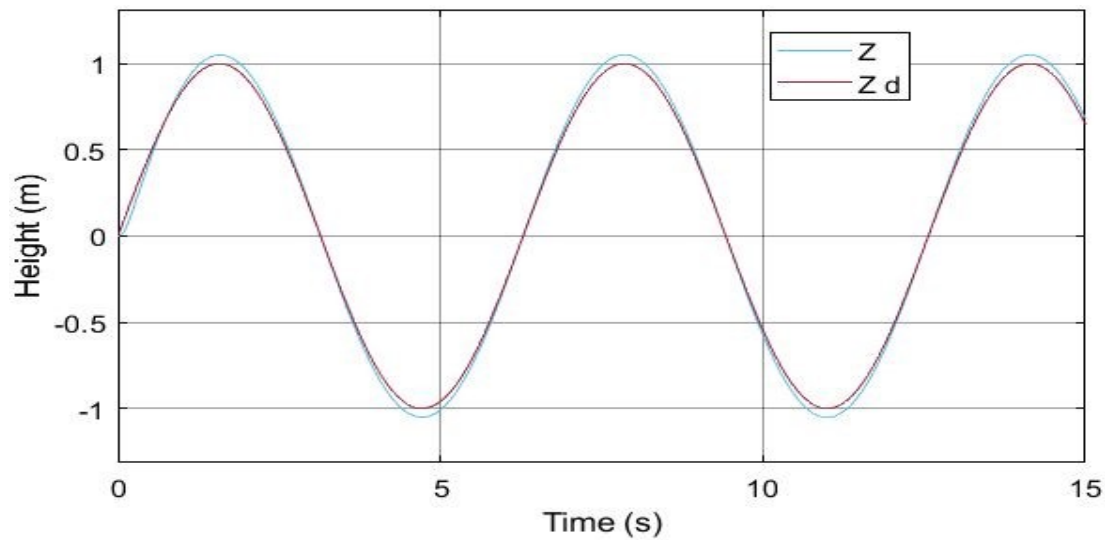
Şekil 4.10 : Sinuzoidal referans PID Tuning yükseklik kontrolcü diyagramı.

Çizelge 4.5'de ise yükseklik kontrolcüsünün katsayıları görülmektedir.

Çizelge 4.5 : PID Tuning sinuzoidal referans yükseklik kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
Kp	20.278
Ki	10.368
Kd	9.690
N	54.539

Şekil 4.11'de yükseklik kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir.

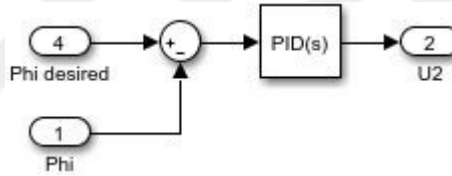


Şekil 4.11 : Sinuzoidal referans PID Tuning yükseklik kontrolcü simülasyonu.

15 saniyelik simülasyon incelendiğinde kontrolcünün referans değeri yakaladığı ve başarılı bir şekilde takip ettiği gözlenmektedir. Yükseklik Z ile referans değeri Z_d ile temsil edilmektedir. Referans değeri 1 m 'dir. Dikey eksen açısal değeri temsil etmektedir ve radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmektedir ve sn cinsindedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüde sinuzoidal referans için Çizelge 3.6'da yer alan yükseklik kontrolcüsü parametreleri incelendiğinde, PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün daha düşük bir K_p katsayısı kullandığı ancak daha yüksek K_i ve K_d katsayıları kullandığı gözükmektedir. Ayrıca grafikler incelendiğinde kendi tasarladığımız kontrolcünün sinuzoidal referansı daha başarılı bir şekilde takip ettiği anlaşılmaktadır.

4.2.2 Yalpa açısı kontrolcü

Yalpa açısı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 4.12'de görülmektedir.



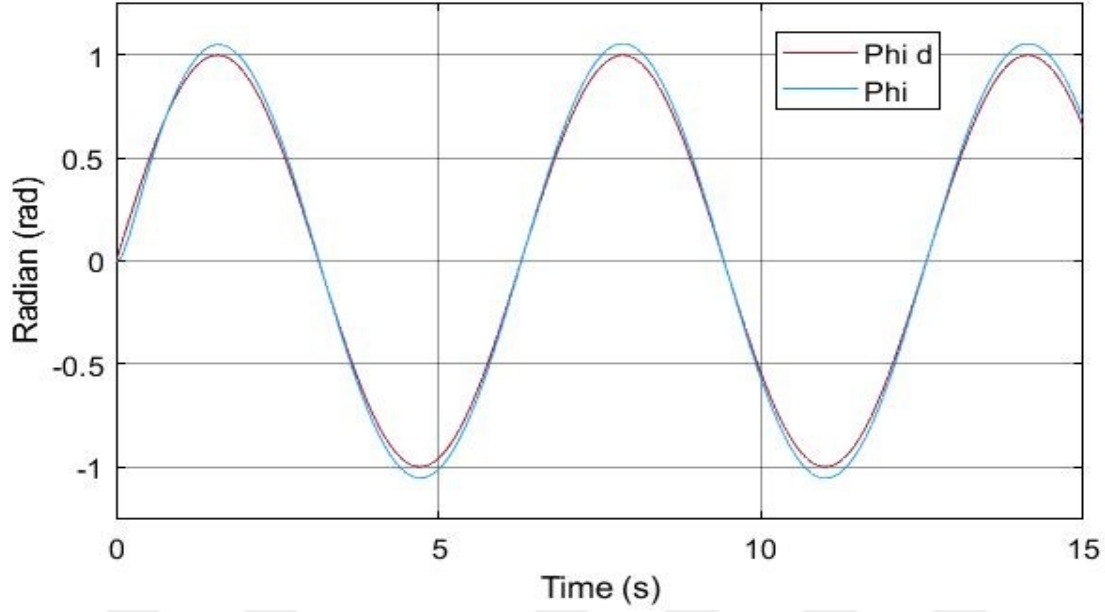
Şekil 4.12 : Sinuzoidal referans PID Tuning yalpa açısı kontrolcü diyagramı.

Çizelge 4.6'da yalpa açısı kontrolcünün kontrolcü ve filtre katsayıları yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : PID Tuning sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	0.139
K_i	0.065
K_d	0.073
N	54.539

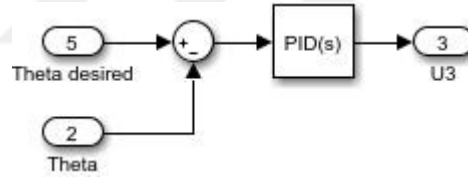
Şekil 4.13'de yalpa açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Yalpa açısı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün referans değerini takip edebildiği görülmektedir. Yalpa açısı Φ , yalpa açısı referans değeri Φ_d ile temsil edilmektedir. Dikey eksen açısal değeri temsil etmektedir ve radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü kendi tasarladığımız kontrolcüden daha düşük kontrolcü katsayıları kullanmakta ve referans değeri daha kötü takip etmektedir.



Şekil 4.13 : Sinuzoidal referans PID Tuning yalpa açısı kontrolcü simülasyonu.

4.2.3 Yunuslama açısı kontrolcü

Yunuslama açısı kontrolcünün blok şeması Şekil 4.14’de yer almaktadır.



Şekil 4.14 : Sinuzoidal referans PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü diyagramı.

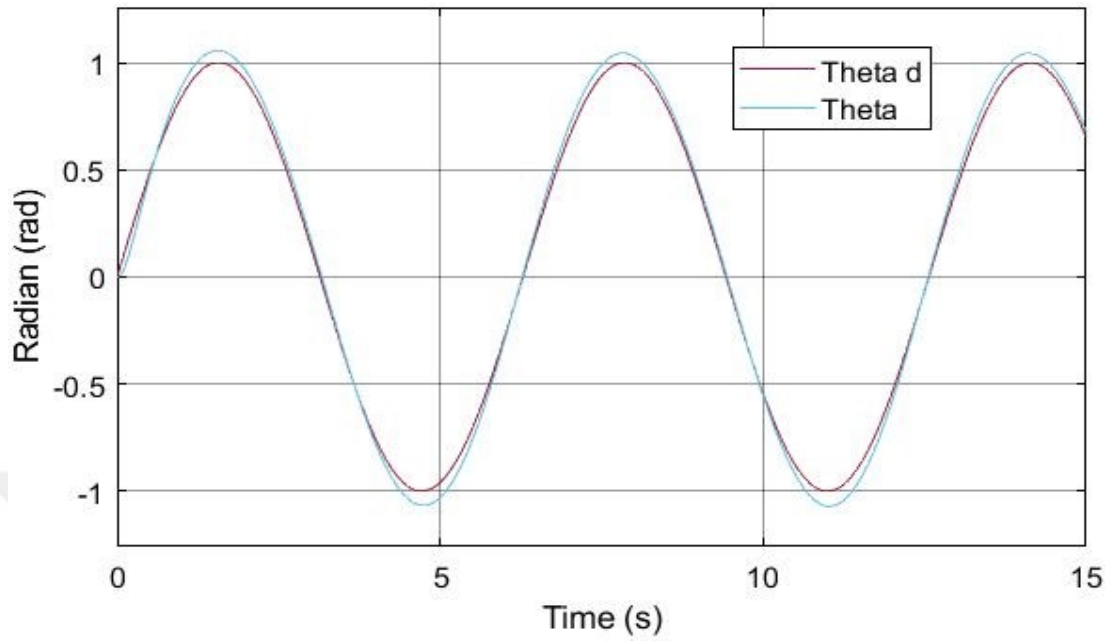
Çizelge 4.7’de ise yunuslama açısı kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.7 : PID Tuning sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	0.139
K_i	0.065
K_d	0.073
N	54.539

Şekil 4.15’de yunuslama açısı kontrolcü için yapılan simülasyon gözükmemektedir. Theta yunuslama açısı, Theta d ise yunuslama açısı referans değeridir. Referans değer radyan cinsindedir. Zaman ise sn cinsindedir. PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcü referans değeri başarılı şekilde takip etmektedir. 3. Bölümde kendi

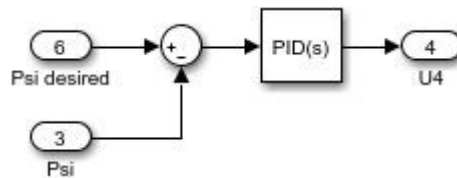
tasarladığımız kontrolcüyle kıyaslırsak, kendi tasarladığımız kontrolcünün PID katsayıları daha büyüktür ve verilen referansı daha iyi takip etmektedir.



Şekil 4.15 : Sinuzoidal referans PID Tuning yunuslama açısı kontrolcü simülasyonu.

4.2.4 Sapma açısı kontrolcü

Sapma açısı için tasarlanan kontrolcünün blok şeması Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16 : Sinuzoidal referans PID Tuning sapma açısı kontrolcü diyagramı.

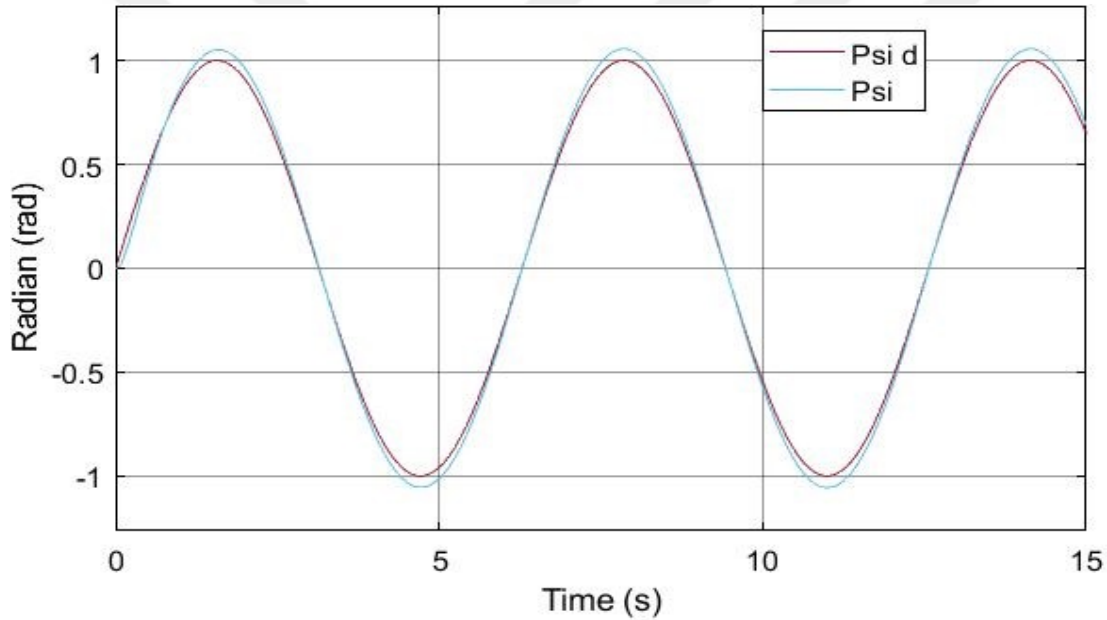
Çizelge 4.8’de ise sapma açısı kontrolcüsünün parametreleri görülmektedir.

Çizelge 4.8 : PID Tuning sinuzoidal referans sapma açısı kontrolcü parametreleri.

Parametre	Değer
K_p	0.241
K_i	0.113
K_d	0.127
N	54.539

Şekil 4.17’de sapma açısı kontrolcü için yapılan simülasyonun sonucu görülmektedir. Sapma açısı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün referans değerini başarılı bir

şekilde takip ettiği görülmektedir. Sapma açısı Psi ile sapma açısı referans değeri Psi d ile temsil edilmektedir. Referans değer olarak genliği 1 ve frekansı 1 rad/sn olan sinuzoidal sinyal verilmiştir. Dikey eksen açısal değeri temsil etmektedir ve radyan cinsindedir. Yatay eksen zamanı temsil etmekte ve sn cinsinden gösterilmektedir. Çizelge 3.9 ile Çizelge 4.8 kıyaslandığında kendi tasarladığımız sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolcünün K_p ve K_i katsayılarının PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünden daha yüksek, K_d katsayısının ise daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.18'deki sinuzoidal referans için kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcünün grafiği ile Şekil 4.17'deki PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün grafiği kıyaslandığında kendi tasarladığımız kontrolcünün verilen referansı daha iyi takip ettiği gözlenmektedir.

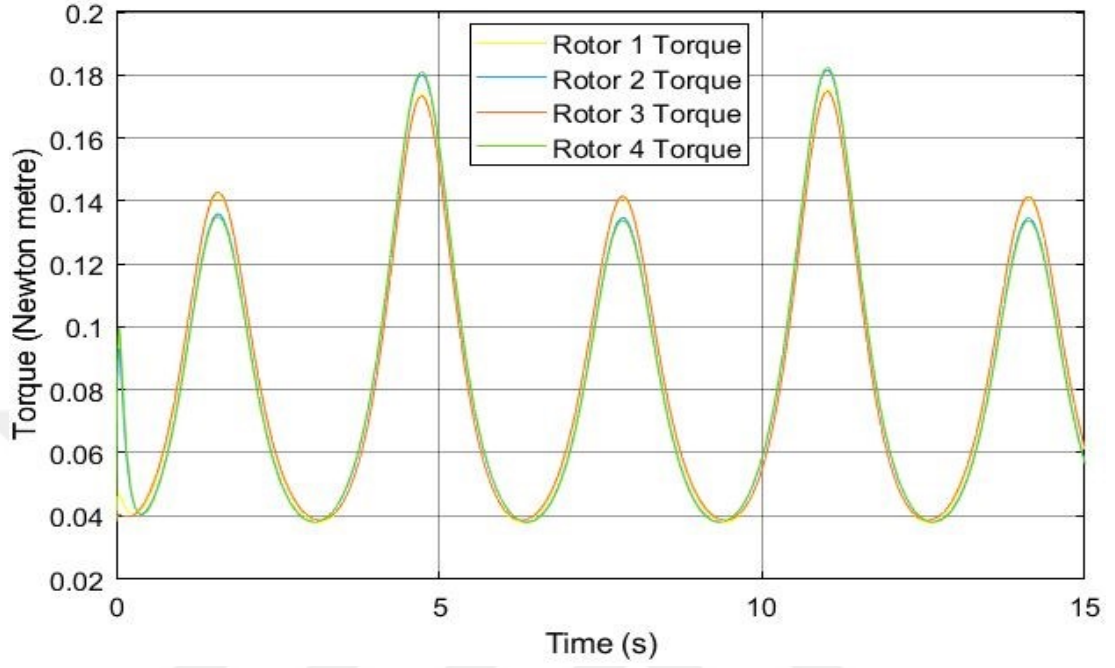


Şekil 4.17 : Sinuzoidal referans PID Tuning sapma açısı kontrolcü simülasyonu.

4.2.5 Rotor tork simülasyonları

Fiziksel parametrelerin gösterildiği Çizelge 2.1'e göre her bir rotorun üretebileceği maksimum tork 0.15 Nm'dir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumlu olup olmadığını göstermek için her bir rotorun tork grafiği çizilmiştir. Şekil 4.18 'de görüldüğü üzere rotorların ürettiği tork, Çizelge 2.1'e göre rotorların üretebileceği maksimum torktan daha yüksektir. Bu durumda 3. bölümde kendi tasarladığımız kontrolcülerin Matlab'ın PID Tuning ile otomatik olarak tasarladığı kontrolcülerden çok daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Kendi tasarladığımız

kontrolcülerde torklar 0.15 Nm'nin altında ve fiziksel parametrelerle uyumluyken, PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde torklar rotorların üretebileceği maksimum tork değerinin üzerindedir.



Şekil 4.18 : Sinuzoidal referans PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin torku.



5. PARAMETRE BELİRSİZLİĞİ

Quadrotorun üstleneceği göreve göre üzerinde kamera, ölçüm için kullanılacak sensörler veya taşınması gereken bir yük olabilir [47]. Quadrotorların yörünge takibi performansı yük değişimi, kütle değişimi, rüzgar ve hatalı model parametreleri gibi bozucu dış etmenlerden etkilenir. Bu durumda kontrolcünün parametre belirsizliklerine karşı dayanıklı olması beklenir [48, 49]. Bu bölümde model parametre belirsizliği altında kontrolcülerin performansı incelenmiştir. Quadrotorun kütlesi (m) ve eylemsizlik momentlerine (I_x , I_y ve I_z) sırasıyla %100 ve %200 parametre belirsizliği uygulanmıştır. Birim basamak referansı ve sinüzoidal referans için parametre belirsizliği altında kontrolcülerin referansları takip performansı incelenmiştir. Kendi tasarladığımız kontrolcülerin parametre belirsizliğine dayanıklılığı ile PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin parametre belirsizliğine dayanıklılığı karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.1 : Parametre belirsizliği değerleri.

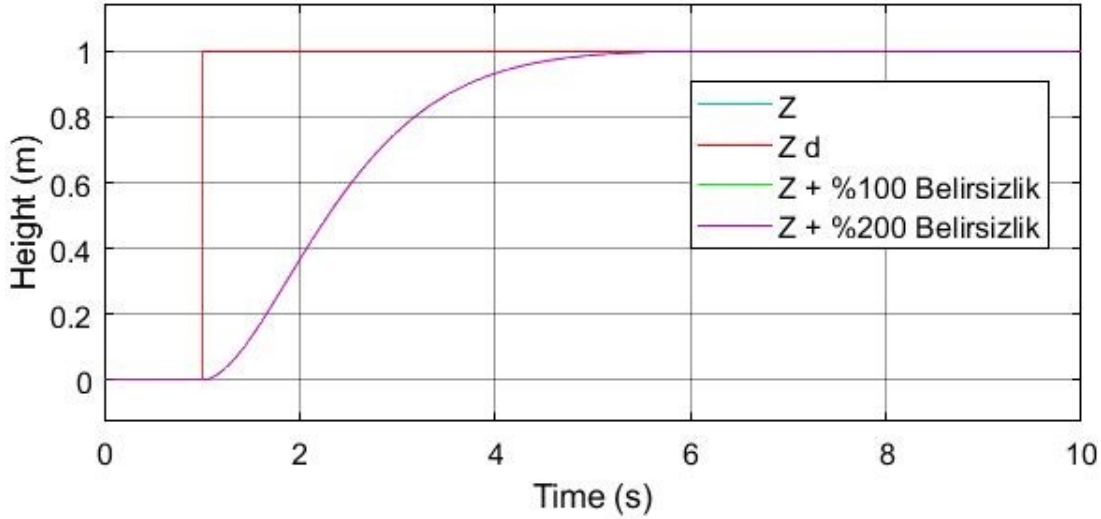
Parametre	Normal Değeri	+ %100 Belirsizlik	+ %200 Belirsizlik
m	0.65 kg	1.3 kg	1.95 kg
I_x	7.5×10^{-3} kg.m ²	15×10^{-3} kg.m ²	22.5×10^{-3} kg.m ²
I_y	7.5×10^{-3} kg.m ²	15×10^{-3} kg.m ²	22.5×10^{-3} kg.m ²
I_z	1.3×10^{-2} kg.m ²	2.6×10^{-2} kg.m ²	3.9×10^{-2} kg.m ²

5.1 Birim Basamak Referansı için Parametre Belirsizliği

Bu kısımda birim basamak referansı verilen quadrotorun + %100 ve + %200 parametre belirsizliği altında yörünge takibi performansı izlenmiştir. Yükseklik, yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı kontrolcüler için ayrı ayrı simülasyonlar yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

5.1.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için tasarlanan yükseklik kontrolcünün grafiği Şekil 5.1'de görölmektedir. Z_d birim basamak yükseklik referansı, Z normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.

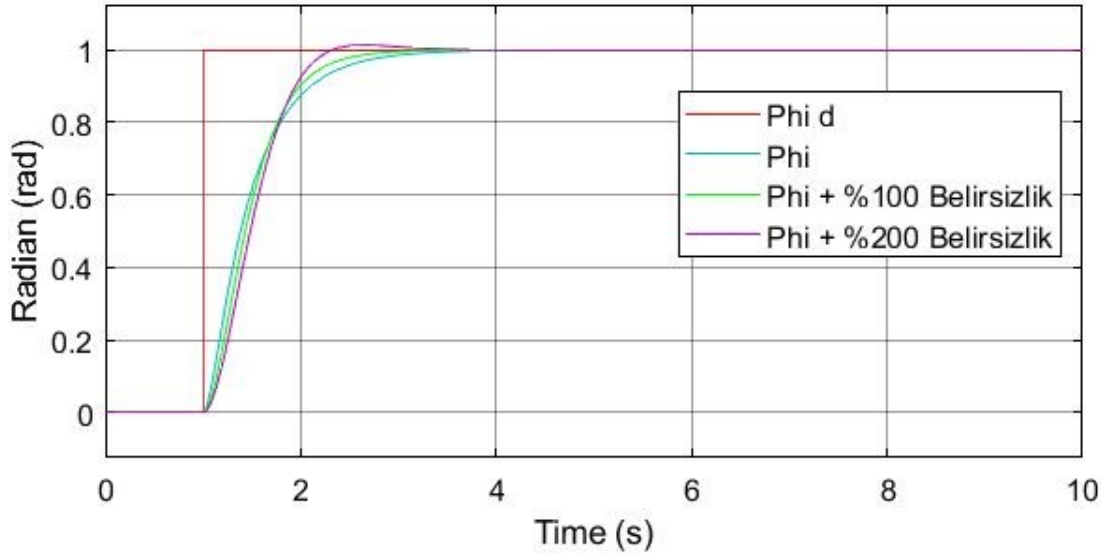


Şekil 5.1 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.

Z , $Z + \%100$ Belirsizlik ve $Z + \%200$ Belirsizlik grafikleri üst üste çakışmaktadır. Bu durumda parametre belirsizliğinin yükseklik kontrolcünün performansını olumsuz etkilemediği anlaşılmaktadır. I_x , I_y ve I_z eylemsizlik momentleri dönme eksenine ilgilidir. Bu yüzden söz konusu eylemsizlik momentlerindeki parametre belirsizliği yükseklik kontrolcüsünü etkilememektedir. Kütledeki artış ise rotorların daha fazla tork üretmesiyle dengelenmekte ve böylece yükseklik kontrolcü quadrotorun kütlesi m ile I_x , I_y ve I_z eksenlerindeki belirsizlikten etkilenmemektedir.

5.1.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü

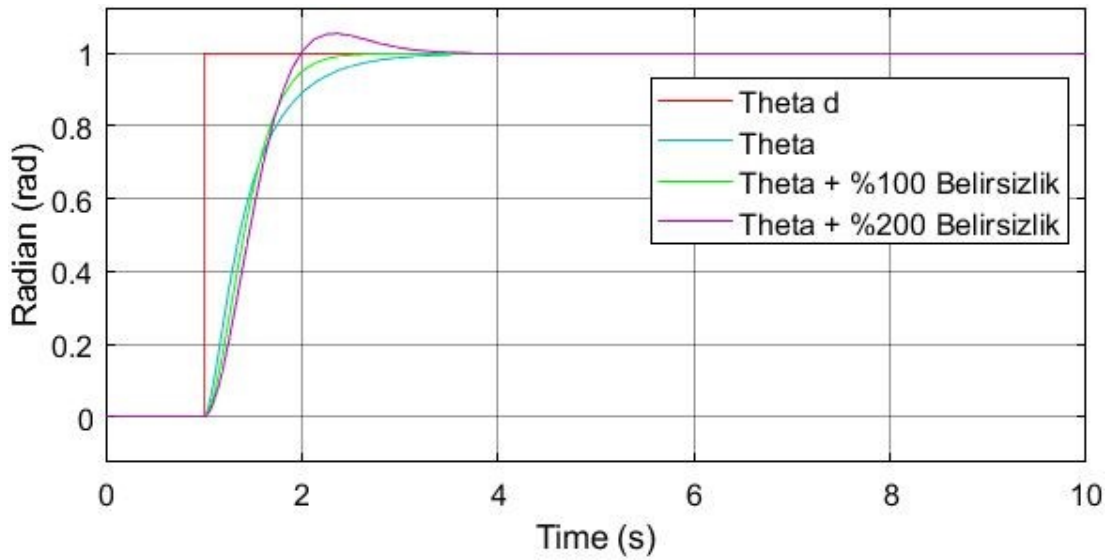
Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.2'de görölmektedir. Φ_d yalpa açısı referansı, Φ normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.



Şekil 5.2 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü. Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörüngede farklılık oluşmaktadır. %200 parametre belirsizliği incelendiğinde belirsizliğin artmasıyla aşımın da arttığı anlaşılmaktadır. Belirsizlik quadrotorun izlediği yörüngede bozulma meydana getirirse de belirli bir süre sonra verilen referans değer yakalanabilmektedir. Bu durumda kontrolcü tasarımının parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

5.1.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.3’de görülmektedir.



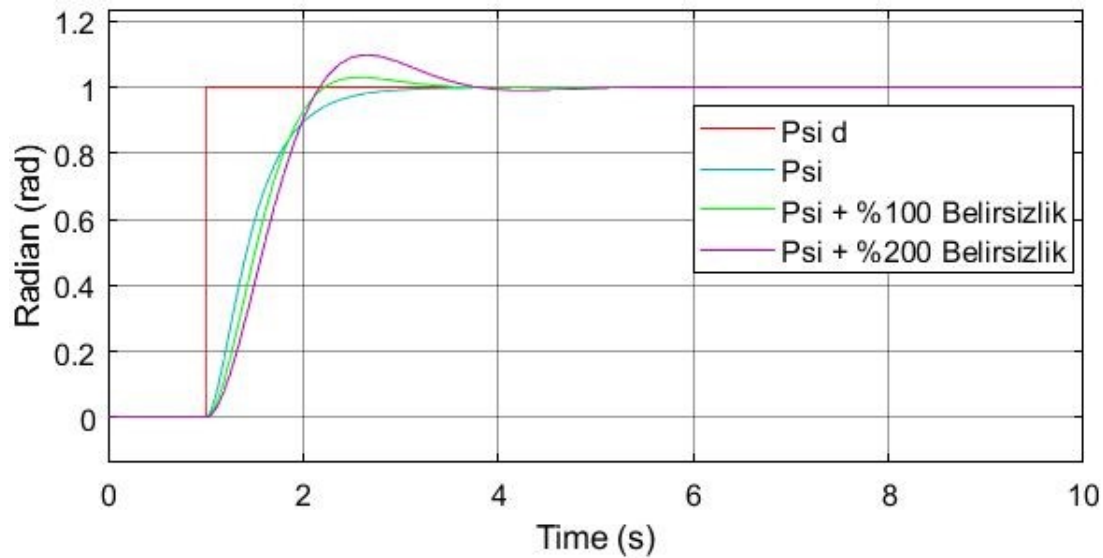
Şekil 5.3 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü.

Theta d yunuslama açısı referansı, Theta normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.

Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörüngede farklılık oluşmaktadır. %200 parametre belirsizliği incelendiğinde belirsizliğin artmasıyla birlikte aşımın da arttığı anlaşılmaktadır. Belirsizlik quadrotorun izlediği yörüngede bozulma meydana getirirse de belli bir süre sonra verilen referans değeri yakalanabilmektedir. Bu durumda kontrolcü tasarımının parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

5.1.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için tasarlanan sapma açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.4’de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.4 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.

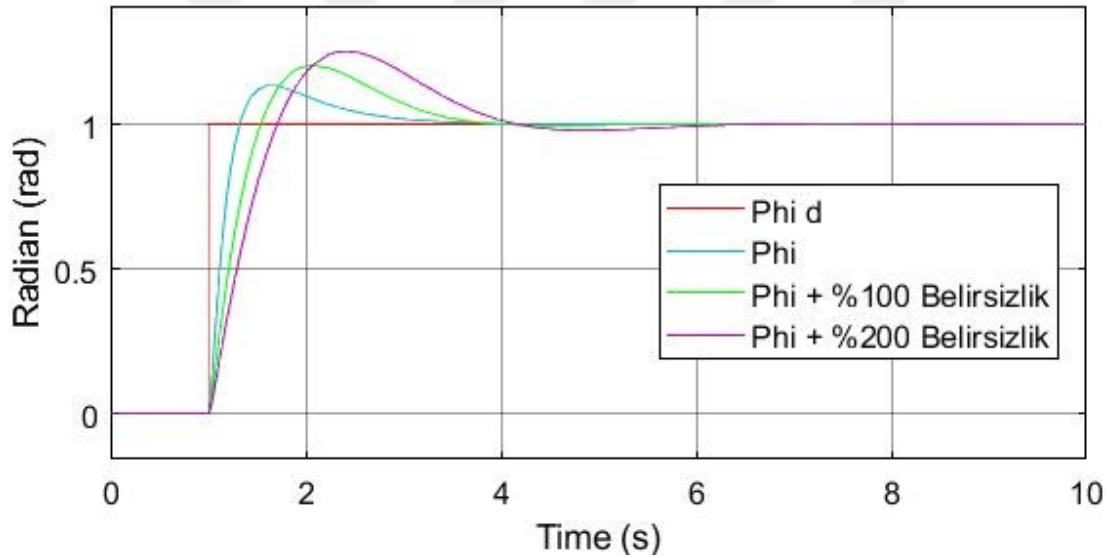
Psi d sapma açısı referansı, Psi normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %100 Belirsizlik ile Psi + %200 Belirsizlik sırasıyla + %100 ve + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.

Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörüngede farklılık oluşmaktadır. %100 ve %200 parametre belirsizlikleri incelendiğinde belirsizliğin artmasıyla birlikte aşımın da arttığı anlaşılmaktadır. Belirsizlik quadrotorun izlediği yörüngede bozulma meydana getirirse de bir süre sonra verilen referans değeri yakalanabilmektedir. Bu durumda kontrolcünün parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

yükseklik kontrolcünün performansını olumsuz etkilemediği anlaşılmaktadır. I_x , I_y ve I_z eylemsizlik momentleri dönme eksenleriyle ilgilidir. Bu yüzden söz konusu eylemsizlik momentlerindeki parametre belirsizliği yükseklik kontrolcüsünü etkilememektedir. Kütledeki artış ise rotorların daha fazla tork üretmesiyle dengelenmekte ve böylece yükseklik kontrolcü quadrotorun kütlesi m ile I_x , I_y ve I_z eksenlerindeki belirsizlikten etkilenmemektedir.

5.2.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Φ d yalpa açısı referansı, Φ normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.

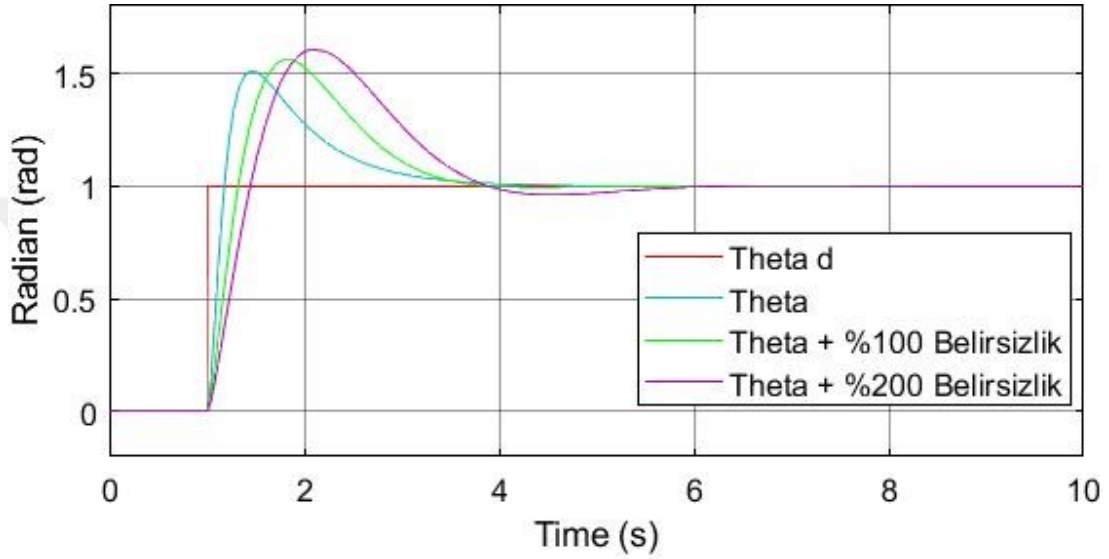


Şekil 5.6 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla hem aşım değeri daha yüksek çıkmakta hem de oturma süresi daha uzun olmaktadır. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değerlerinin, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm 'yi aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de maksimum rotor tork değerlerini aştığı anlaşılmaktadır.

5.2.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.7’de görölmektedir. Theta d yunuslama açısı referansı, Theta normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge dir.



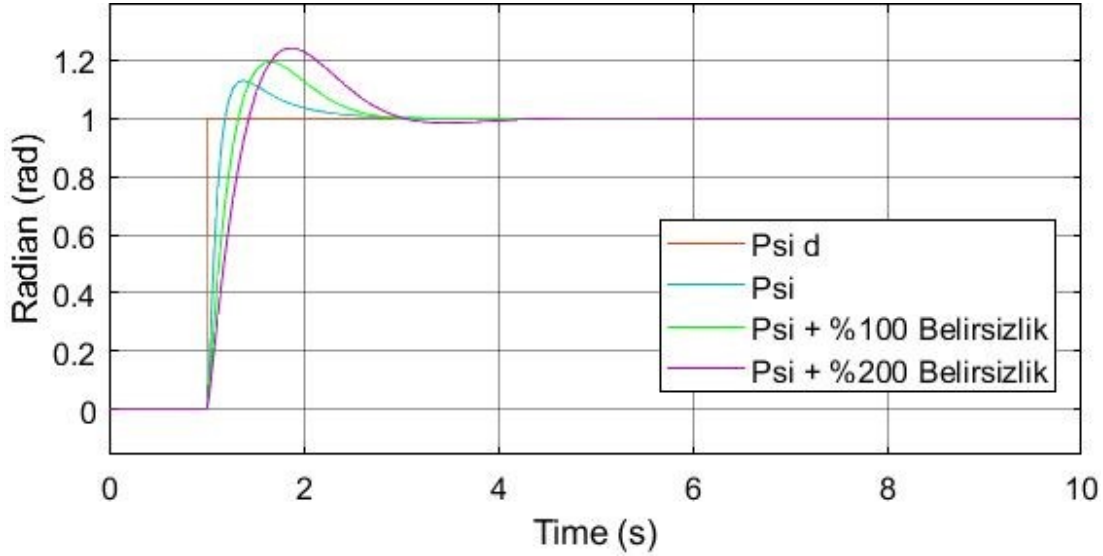
Şekil 5.7 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla hem aşım değeri daha yüksek çıkmakta hem de oturma süresi daha uzun olmaktadır. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değeri, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm’yi aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de Çizelge 2.1’de verilen maksimum rotor tork değeri sağlanmadığı anlaşılmaktadır.

5.2.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında birim basamak referansı için PID Tuning ile tasarlanan sapma açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.8’de görölmektedir. Psi d sapma açısı referansı, Psi normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %100

Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge dir.



Şekil 5.8 : Birim basamak referansı parametre belirsizliği altında PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

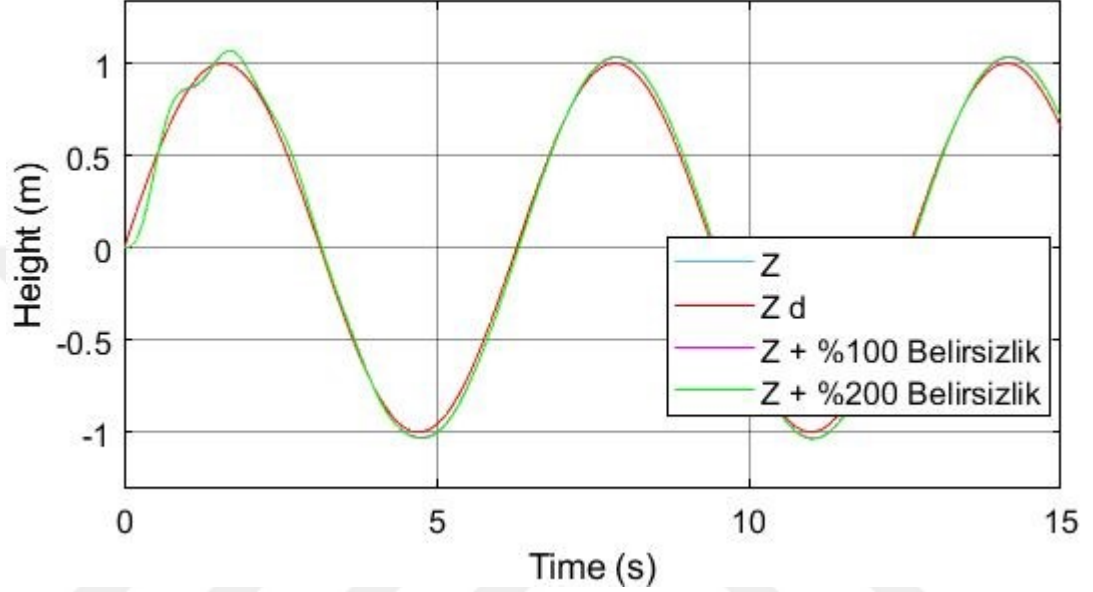
PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla hem aşım değeri daha yüksek çıkmakta hem de oturma süresi daha uzun olmaktadır. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değerlerinin, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm'yi aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. 3. Bölümde kendi tasarladığımız kontrolcülerde ise maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm aşılmıyordu. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de Çizelge 2.1'de verilen maksimum rotor tork değerlerini aştığı anlaşılmaktadır. Kendi tasarladığımız kontrolcü aşım gözlenmemesi, oturma süresinin daha kısa olması ve maksimum tork değerlerini aşmaması nedeniyle daha başarılıdır.

5.3 Sinuzoidal Referans için Parametre Belirsizliği

Bu bölümde sinuzoidal referans verilen quadrotorun + %100 ve + %200 parametre belirsizliği altında yörünge takibi performansı izlenmiştir. Yükseklik, yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı kontrolcüler için ayrı ayrı simülasyonlar yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

5.3.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan yükseklik kontrolcünün grafiği Şekil 5.9'da görölmektedir. Z_d sinuzoidal dalga yükseklik referansı, Z normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörüngedir.

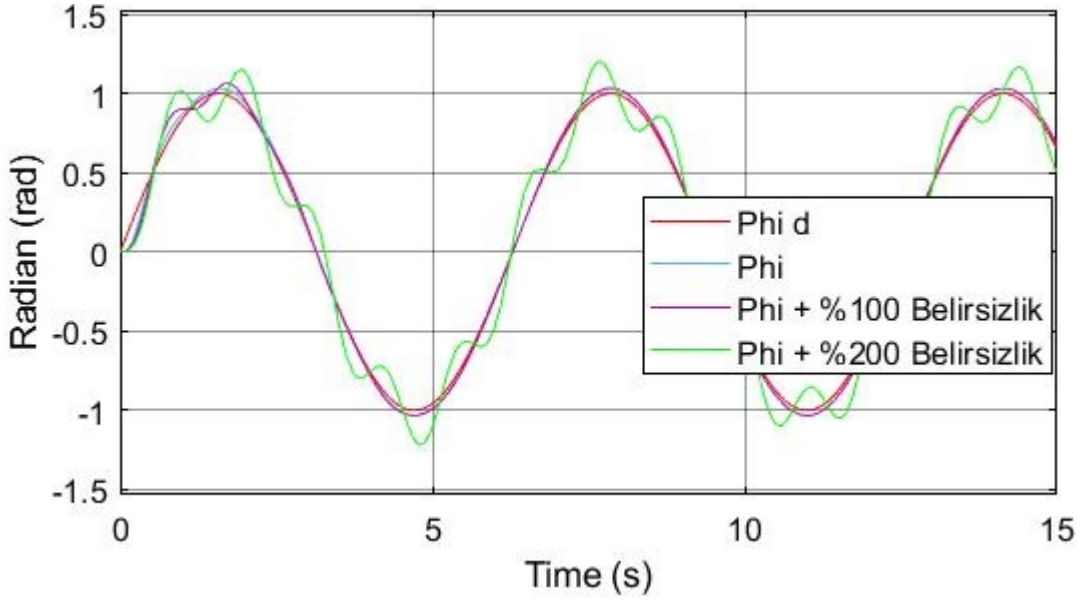


Şekil 5.9 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü.

Z , $Z + \%100$ Belirsizlik ve $Z + \%200$ Belirsizlik grafikleri üst üste çakışmaktadır. Bu durumda parametre belirsizliğinin yükseklik kontrolcünün performansını olumsuz etkilemediği anlaşılmaktadır. Kontrolcü parametre belirsizliğine dayanıklı olarak çalışmaktadır. I_x , I_y ve I_z eylemsizlik momentleri dönme eksenine ilgilidir. Bu yüzden söz konusu eylemsizlik momentlerindeki parametre belirsizliği yükseklik kontrolcüsünü etkilememektedir. Kütledeki artış ise rotorların daha fazla tork üretmesiyle dengelenmekte ve böylece yükseklik kontrolcü quadrotorun kütlesi m ile I_x , I_y ve I_z eksenlerindeki belirsizlikten etkilenmemektedir.

5.3.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.10'da görölmektedir. Φ_d yalpa açısı referansı, Φ normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $\Phi + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörüngedir.

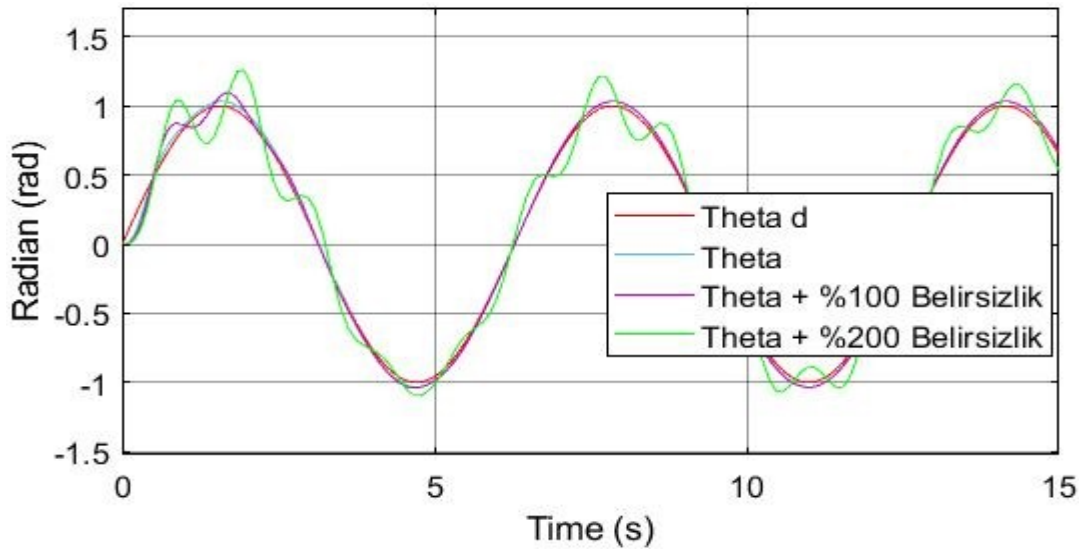


Şekil 5.10 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü.

Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörünge de bozulmaktadır. %200 parametre belirsizliği incelendiğinde belirsizliğin artmasıyla birlikte quadrotorun sinüzoidal referansı düzgün bir şekilde takip edemediği belli olmaktadır. Ancak bozulmalara rağmen sinüzoidal referansın belli ölçüde takip edilebildiği, bu durumda kontrolcü tasarımının parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

5.3.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.11’de görülmektedir.



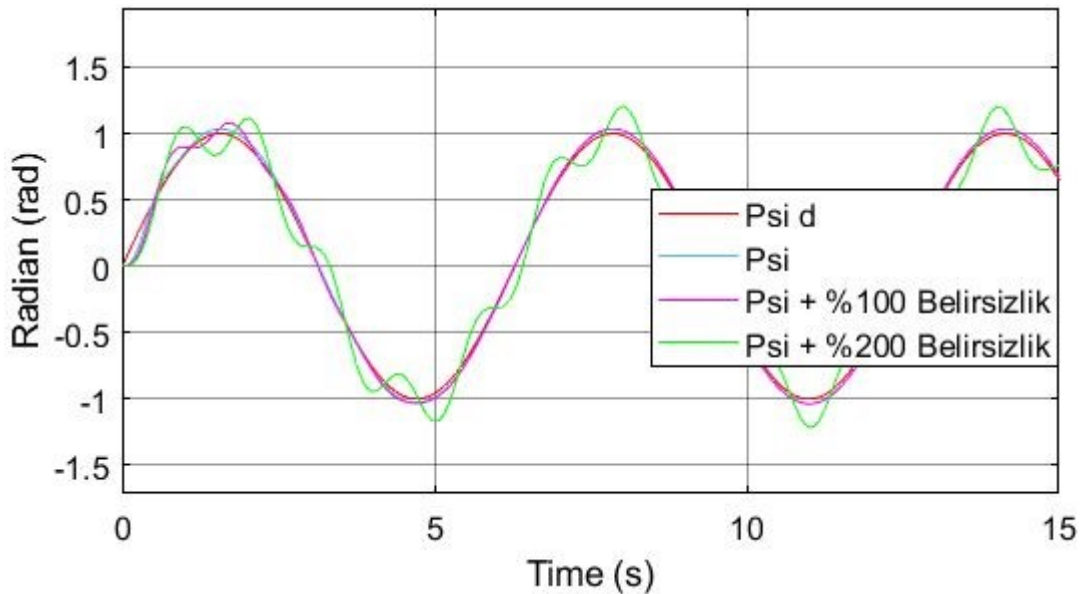
Şekil 5.11 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü.

Theta d yunuslama açısı referansı, Theta normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.

Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörüngede bozulma oluşmaktadır. %100 parametre belirsizliğinde ortaya çıkan yörünge referans değere (Theta d) yakındır ve bozulma belirgin değildir. Ancak %200 parametre belirsizliği incelendiğinde belirsizliğin artmasıyla birlikte quadrotorun sinüzoidal referansı düzgün bir şekilde takip edemediği belli olmaktadır. Ancak bozulmalara rağmen sinüzoidal referansın belli ölçüde takip edilebildiği, bu durumda kontrolcü tasarımının parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

5.3.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinüzoidal referans için tasarlanan sapma açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.12’de görüldüğü gibidir. Psi d sapma açısı referansı, Psi normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.



Şekil 5.12 : Sinüzoidal referans parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü.

Parametre belirsizliği arttıkça quadrotorun izlediği yörüngede bozulma oluşmaktadır. %100 parametre belirsizliğinde ortaya çıkan yörünge referans değere (Psi d) yakındır ve bozulma belirgin değildir. Ancak %200 parametre belirsizliği incelendiğinde

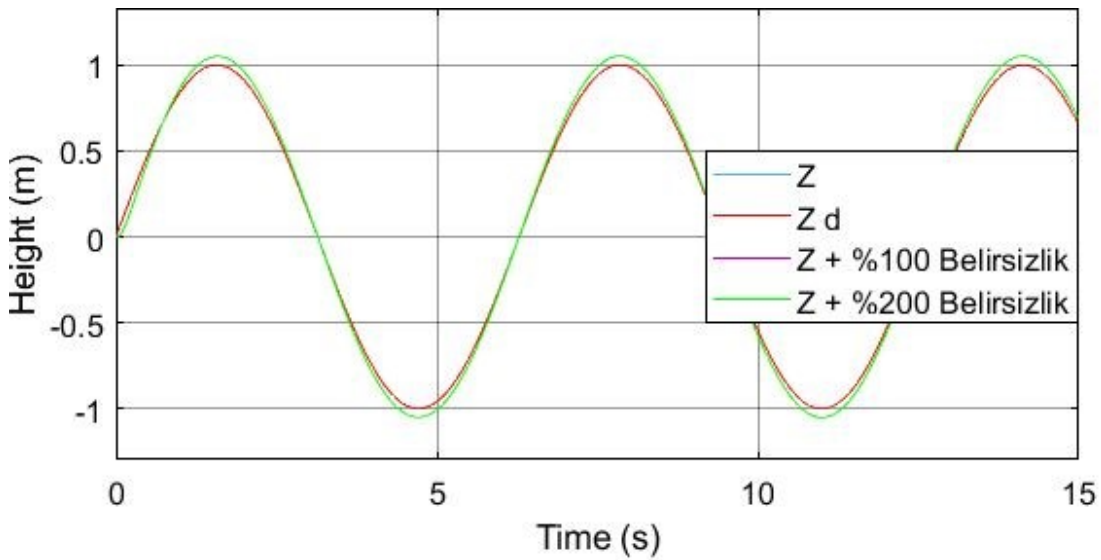
belirsizliğin artmasıyla birlikte quadrotorun sinüzoidal referansı düzgün bir şekilde takip edemediği belli olmaktadır. Ancak bozulmalara rağmen sinüzoidal referansın belli ölçüde takip edilebildiği, bu durumda kontrolcü tasarımının parametre belirsizliğine dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

5.4 PID Tuning ile Sinüzoidal Referans için Parametre Belirsizliği

Bu kısımda 4. Bölümde sinüzoidal referans için katsayıları Matlab tarafından PID Tuning ile belirlenerek oluşturulan kontrolcüler kullanılmış ve sisteme parametre belirsizliği uygulanmıştır. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin olduğu sisteme sinüzoidal referans verilerek yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açıları için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlar neticesinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin kendi tasarladığımız kontrolcülere kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir.

5.4.1 Parametre belirsizliği altında yükseklik kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinüzoidal referans için PID Tuning ile tasarlanan yükseklik kontrolcünün grafiği Şekil 5.13'de görülmektedir. Z_d birim basamak yükseklik referansı, Z normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%100$ Belirsizlik, $+ \%100$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, $Z + \%200$ Belirsizlik ise $+ \%200$ parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge dir.

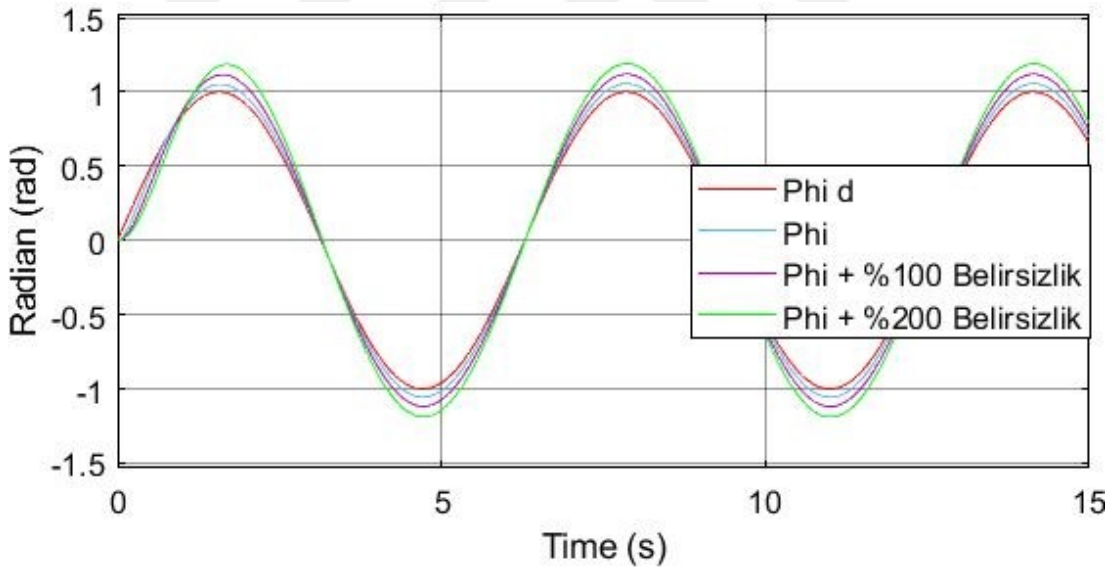


Şekil 5.13 : Sinüzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yükseklik kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde de kendi tasarladığımız kontrolcüde olduğu gibi Z, Z + %100 Belirsizlik ve Z + %200 Belirsizlik grafiklerinin üst üste çakıştığı fark edilmektedir. Bu durumda parametre belirsizliğinin yükseklik kontrolcünün performansını olumsuz etkilemediği anlaşılmaktadır. Ix, Iy ve Iz eylemsizlik momentleri dönme eksenine ilgilidir. Bu yüzden söz konusu eylemsizlik momentlerindeki parametre belirsizliği yükseklik kontrolcüsünü etkilememektedir. Kütledeki artış ise rotorların daha fazla tork üretmesiyle dengelenmekte ve böylece yükseklik kontrolcü quadrotorun kütlesi m ile Ix, Iy ve Iz eksenlerindeki belirsizlikten etkilenmemektedir.

5.4.2 Parametre belirsizliği altında yalpa açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.14'de görülmektedir. Phi d yalpa açısı referansı, Phi normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Phi + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Phi + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge.



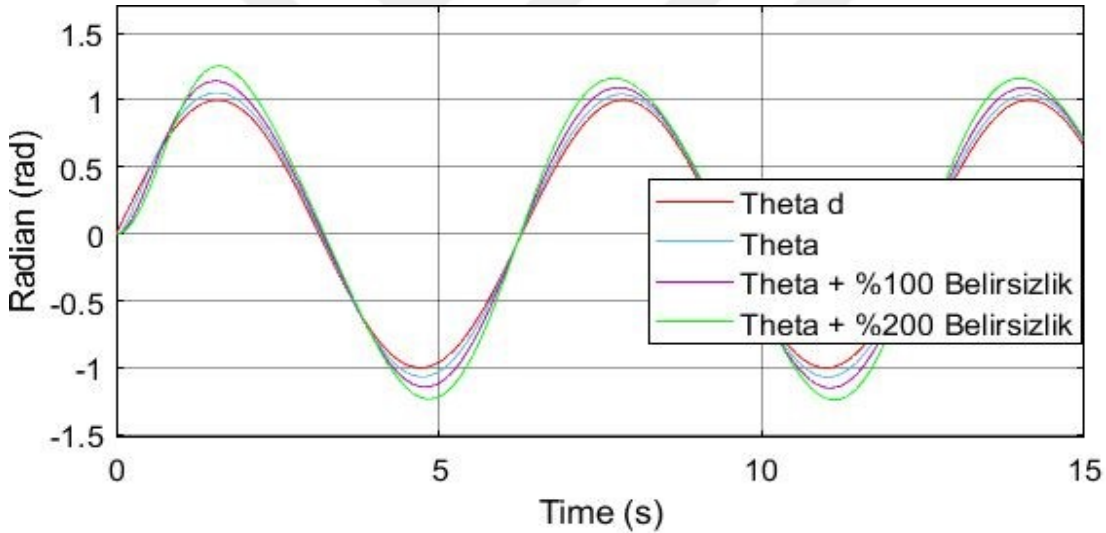
Şekil 5.14 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüde %100 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözüküyordu ancak %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma fark ediliyordu. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde ise bozulma daha eşit aralıklarla

fark edilmekte olup %100 parametre belirsizliğinde ve %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözlenmektedir. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değerlerinin, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm'yi aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de rotor tork değerlerini sağlamadığı anlaşılmaktadır.

5.4.3 Parametre belirsizliği altında yunuslama açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.15'de görülmektedir. Theta d yunuslama açısı referansı, Theta normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Theta + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörüngedir.



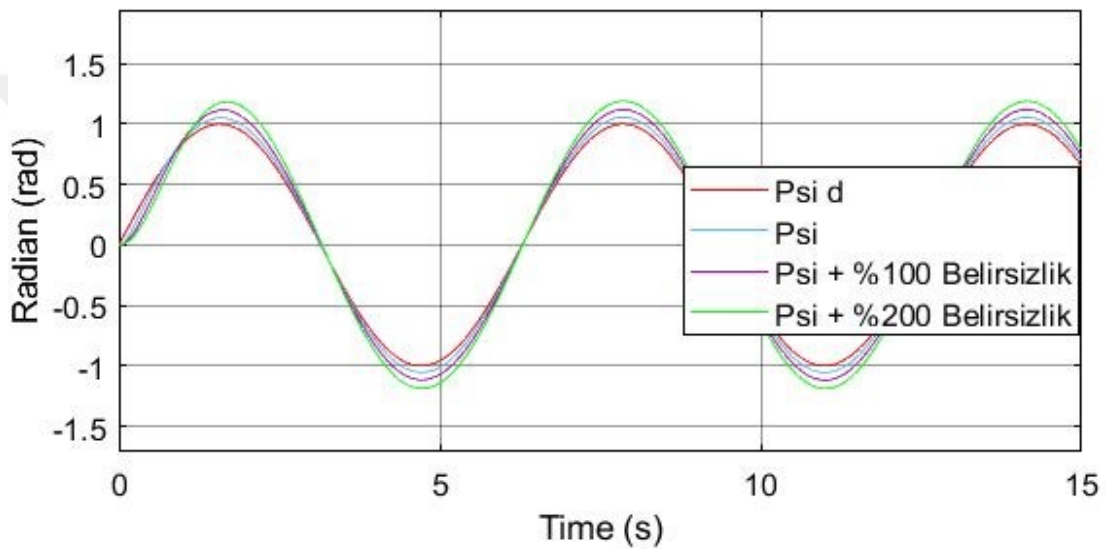
Şekil 5.15 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüde %100 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözüküyordu ancak %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma fark ediliyordu. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde ise bozulma daha eşit aralıklarla fark edilmekte olup %100 parametre belirsizliğinde ve %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözlenmektedir. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değerlerinin, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm'yi

aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de rotor tork değerlerini sağlamadığı anlaşılmaktadır.

5.4.4 Parametre belirsizliği altında sapma açısı kontrolü

Parametre belirsizliği altında sinuzoidal referans için tasarlanan sapma açısı kontrolcünün grafiği Şekil 5.16'da görülmektedir. Psi d sapma açısı referansı, Psi normal parametrelere sahip quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %100 Belirsizlik, + %100 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörünge, Psi + %200 Belirsizlik ise + %200 parametre belirsizliğinde quadrotorun izlediği yörüngedir.



Şekil 5.16 : Sinuzoidal referans parametre belirsizliği altında PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız kontrolcüde %100 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözüküyordu ancak %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma fark ediliyordu. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde ise bozulma daha eşit aralıklarla fark edilmekte olup %100 parametre belirsizliğinde ve %200 parametre belirsizliğinde belirgin bir bozulma gözlenmektedir. Ayrıca 4. Bölümde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin rotor tork değerlerinin, maksimum rotor tork değeri olan 0.15 Nm'yi aştığı ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumsuz olduğu göz önüne alınmalıdır. Bu durumda PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin hem parametre belirsizliğinden daha çok etkilendiği hem de rotor tork değerlerini sağlamadığı anlaşılmaktadır.



6. GÜRÜLTÜ EKLENMESİ

Quadrotor sistemi çalışma esnasında gürültüden etkilenebilir. Bu nedenle tasarlanan kontrolcülerin gürültüye karşı dayanıklı olması gerekmektedir [50]. Bu bölümde sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı gürültü eklenerek quadrotorun gürültü altında referansları takip edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Bunun için öncelikle sistemin girişine bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklenerek yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının grafikleri çizilmiştir. Daha sonra sistemin çıkışına bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklenerek yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının grafikleri çizilmiştir. Birim basamak referansı ve sinuzoidal referans için ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin de gürültüye dayanıklılığı incelenmiştir. Her iki kontrolcü tasarımı da bozulmalara karşı referansları takip edebilmiştir. Ancak kendi tasarladığımız kontrolcülerin, daha az bozulma ve daha düşük aşım gözlenmesi nedeniyle gürültüye karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmıştır.

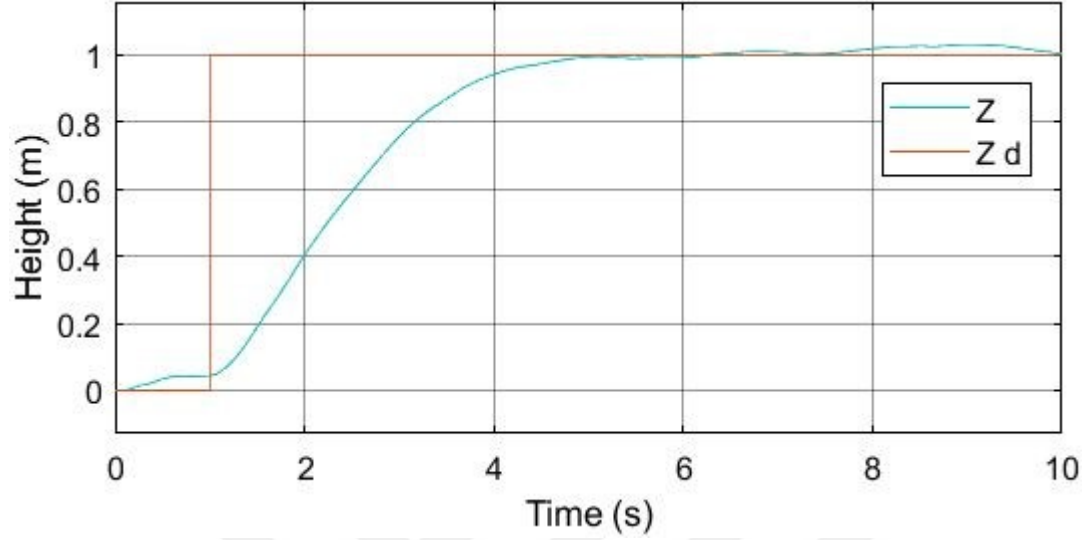
6.1 Birim Basamak Referansı için Gürültü Eklenmesi

Bu bölümde giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verilen bir sistemin birim basamak referansını takip edebilme yeteneği incelenmiştir. Quadrotorun yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının gürültülü ortamdaki grafikleri çizilerek verilen referansı takip yetenekleri değerlendirilmiştir. Önce sistemin girişine gürültü verilmiş ve verilen referansı takip esnasında yükseklik, yunuslama ve sapma açılarındaki bozulmalar gözlenmiştir. Daha sonra sistemin çıkışına gürültü verilmiş ve verilen referansı takip esnasında yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarındaki bozulmalar incelenmiştir. Çıkışa eklenen gürültünün referans takibi esnasında daha çok bozulmaya neden olduğu fark edilmiştir.

6.1.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü

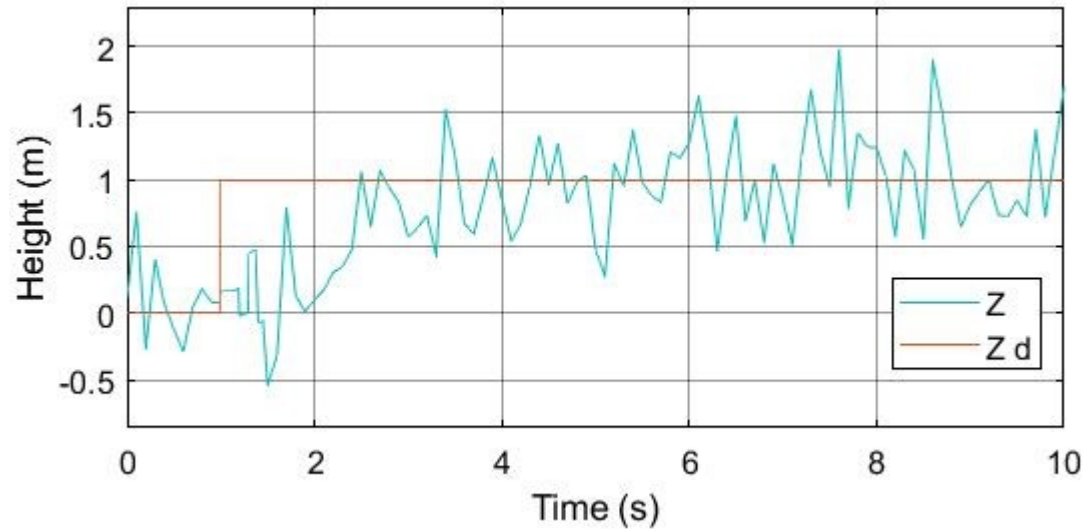
Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yükseklik kontrolcününün birim basamak referansını takip

edebilme yeteneği Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Grafikten de anlaŐılabileceđi üzere girişe gürültü verildiğinde birtakım bozulmalar olsa da verilen referans takip edilebilmektedir.



Şekil 6.1 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yükseklik kontrolü.

Çıkışa gücü 0.01 ve rneklemeye zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.2'deki gibidir.

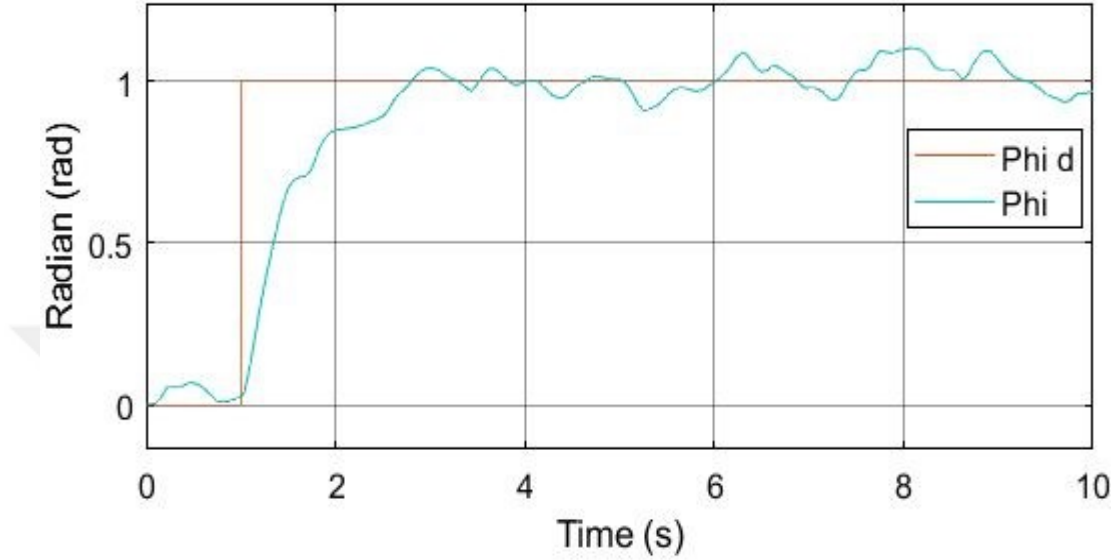


Şekil 6.2 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yükseklik kontrolü.

Çıkışa gürültü eklendiğinde sistemde daha fazla bozulma olduğu anlaşılmaktadır. Çıkışa eklenen gürültüye karşın sistem verilen birim basamak referansını takip edebilmektedir. Bu durumda sistemin gürültüye dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

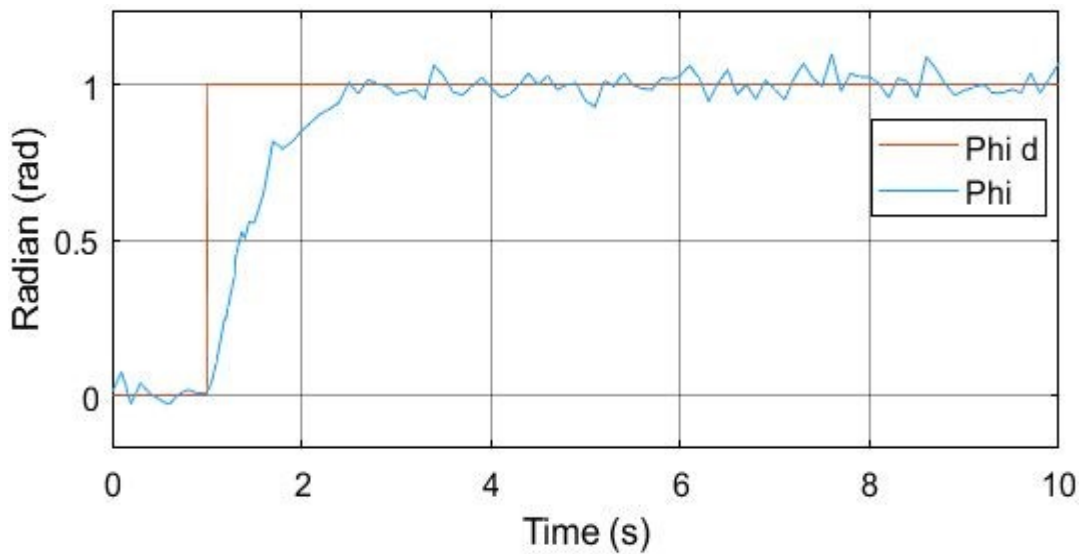
6.1.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yalpa açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.3’de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Giriş gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yalpa açısı kontrolü.

Şekil 6.3’ den anlaşılacağı üzere gürültü verildiğinde birtakım bozulmalar olsa da verilen referans takip edilebilmektedir. Çıkışa gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan gürültü eklendiğinde yalpa açısı için elde edilen grafik ise Şekil 6.4’deki gibidir.



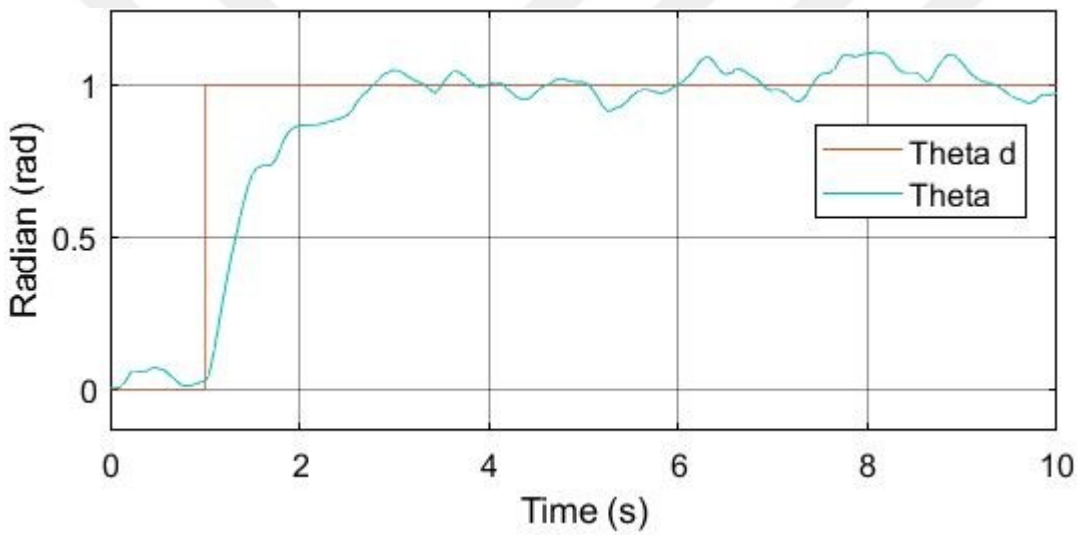
Şekil 6.4 : Çıkış gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yalpa açısı kontrolü.

Bozulmalara rağmen referans takibinin başarılı bir şekilde yapıldığı ancak çıkışa eklenen gürültünün girişe eklenen gürültüye kıyasla daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır.

6.1.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yunuslama açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.5’de gösterilmiştir.

Şekil 6.5’ den anlaşılacağı üzere gürültü verildiğinde birtakım bozulmalar olsa da yunuslama açısının verilen referans değerini takip edebildiği gözlemlenmektedir.

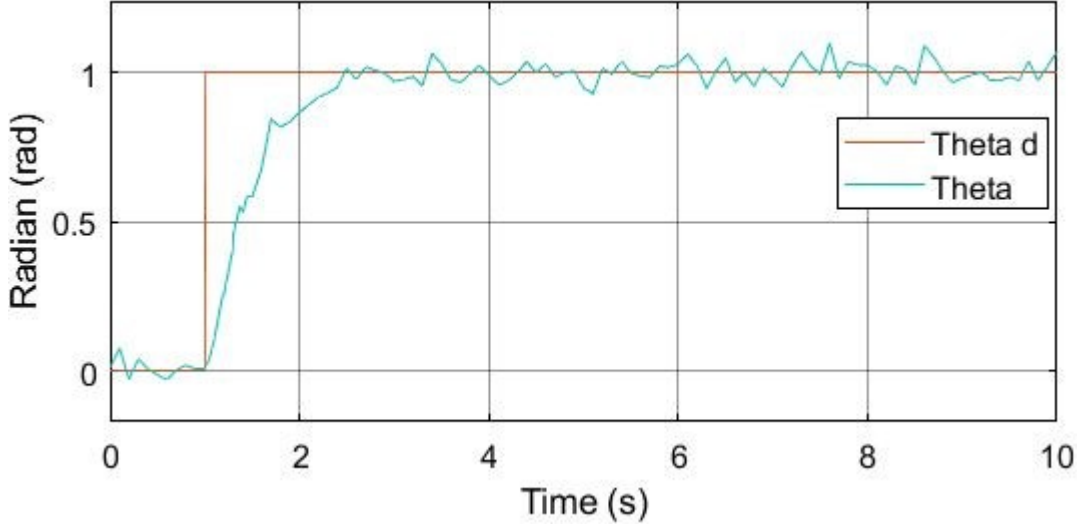


Şekil 6.5 : Giriş gürültü eklendiğinde birim basamak referansını yunuslama açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına gürültü gücü (noise power) 0.0001 ve örnekleme zamanı (sampling time) 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde elde edilen grafik Şekil 6.6’da yer almaktadır.

Çıkışa eklenen gürültünün gücü ve örnekleme zamanı girişe eklenen gürültünün gücü ve örnekleme zamanıyla aynı olmasına rağmen daha fazla bozulmaya neden olmaktadır. Ancak bozulmaya rağmen birim basamak referansını takip edilebilmektedir.

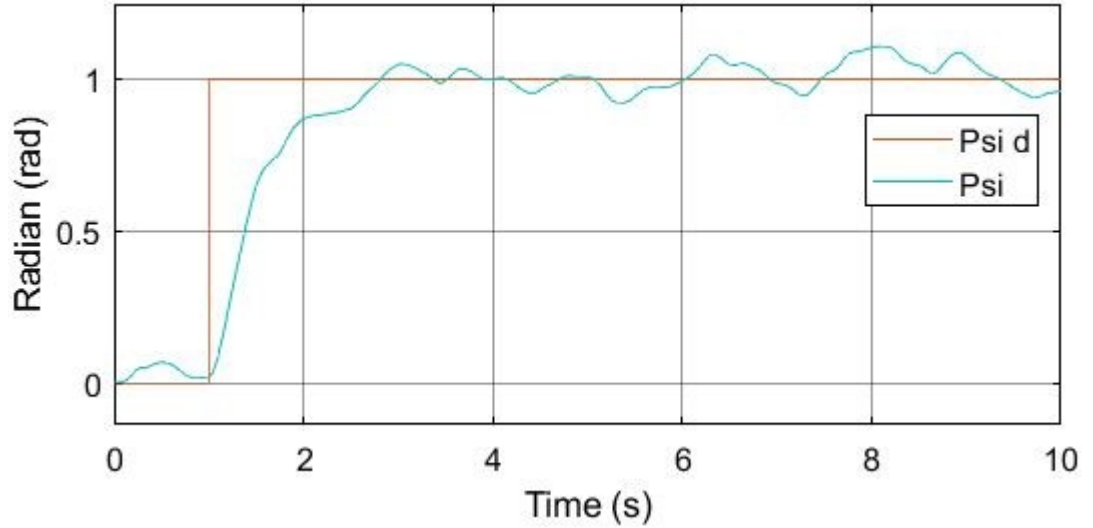
Sistem giriş ve çıkış gürültüsü altında bozulmalara rağmen referansını takip edebildiğinden tasarlanan kontrolcünün gürültüye dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.6 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı yunuslama açısı kontrolü.

6.1.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü

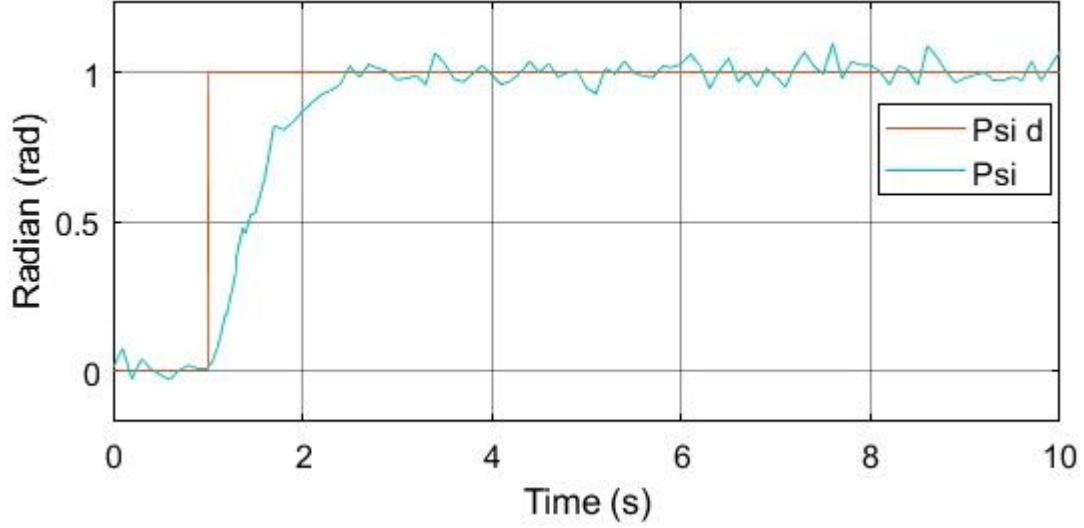
Sistemin girişine gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde sapma açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı sapma açısı kontrolü.

Grafikten anlaşılacağı üzere gürültü verildiğinde birtakım bozulmalar olsa da verilen referans takip edilebildiğinden tasarlanan kontrolcü gürültüye dayanıklıdır.

Sistemin çıkışına gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde elde edilen grafik Şekil 6.8’de yer almaktadır.



Şekil 6.8 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı sapma açısı kontrolü.

Çıkışa eklenen gürültünün gücü ve örnekleme girişe eklenen gürültüyle aynı olmasına rağmen daha fazla bozulmaya neden olmaktadır. Ancak bozulmaya rağmen birim basamak referansı takip edilebildiğinden kontrolcü gürültüye dayanıklıdır.

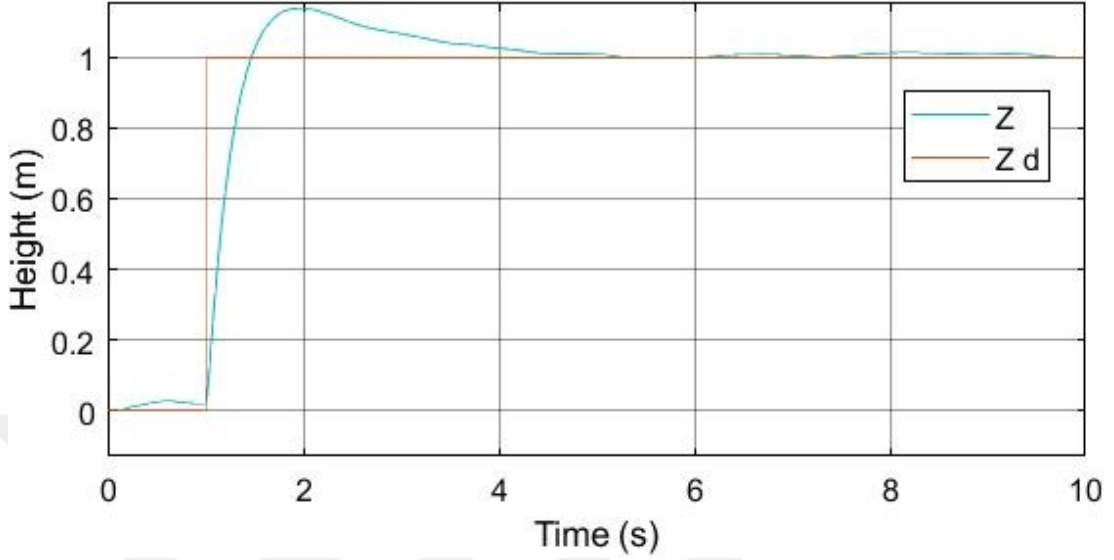
6.2 PID Tuning ile Birim Basamak Referansı için Gürültü Eklenmesi

Bu kısımda, 4. Bölümde birim basamak referansı için katsayıları Matlab tarafından PID Tuning ile otomatik belirlenerek oluşturulan kontrolcüler kullanılmıştır. Sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verilerek sistemin birim basamak referansını takip edebilme yeteneği incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar neticesinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin kendi tasarladığımız kontrolcülere kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. Referans takibi esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmiştir.

6.2.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü.

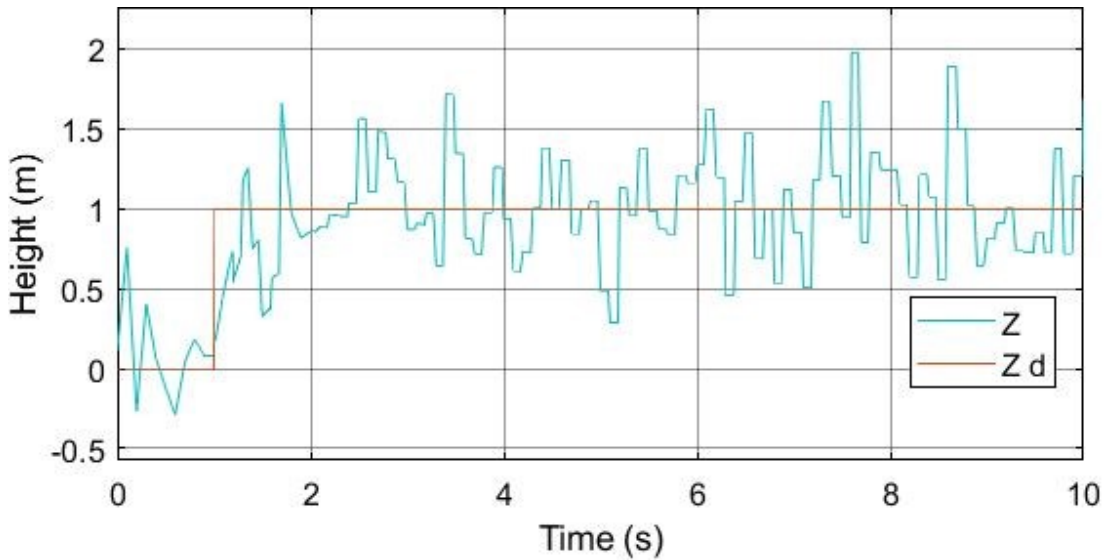
Sistemin girişine gücü (noise power) 0.01 ve örnekleme zamanı (sampling time) 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde PID Tuning ile tasarlanan yükseklik kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Şekil 6.1'de ise girişe gürültü eklendiğinde kendi tasarladığımız yükseklik kontrolcünün grafiği yer alıyordu. Şekil 6.1 ve Şekil 6.9'daki grafikler kıyaslandığında PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. PID Tuning ile

katsayıları Matlab tarafından otomatik belirlenerek tasarlanan kontrolcü verilen referansı takip ederken hem daha çok bozulmaya uğramakta hem de daha çok aşım oluştuğu gözlenmektedir. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcü daha başarılıdır.



Şekil 6.9 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.

Sistemin çıkışına gürültü gücü (noise power) 0.01 ve örnekleme zamanı (sampling time) 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde elde edilen grafik ise Şekil 6.10'da yer almaktadır.

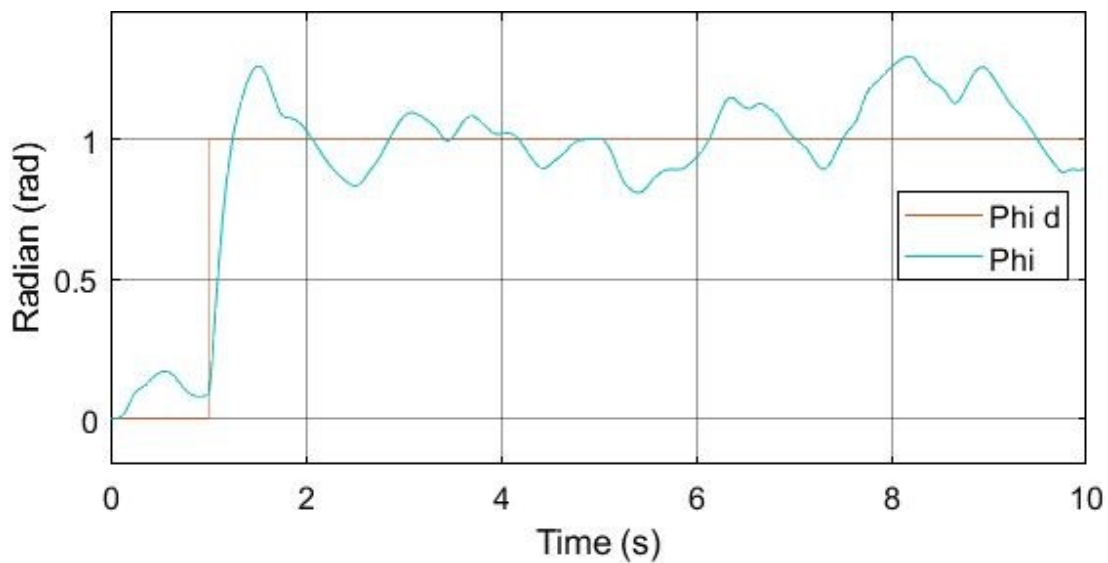


Şekil 6.10 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.

Sistemin çıkışına eklenen gürültü sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha fazla bozulmaya neden olmaktadır. Şekil 6.2’de çıkışa gürültü eklendiğinde kendi tasarladığımız kontrolcünün yükseklik kontrolü grafiği yer alıyordu. Şekil 6.10’da ise çıkışa gürültü eklendiğinde PID Tuning ile tasarlanan yükseklik kontrolcünün grafiği yer almaktadır. Şekil 6.2 ile Şekil 6.10 kıyaslandığında PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün bir önceki bölümde kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha çok etkilendiği fark edilmiştir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü referansı takip ederken hem daha çok bozulmaya uğramakta hem de daha çok aşım olmaktadır. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcü daha başarılıdır.

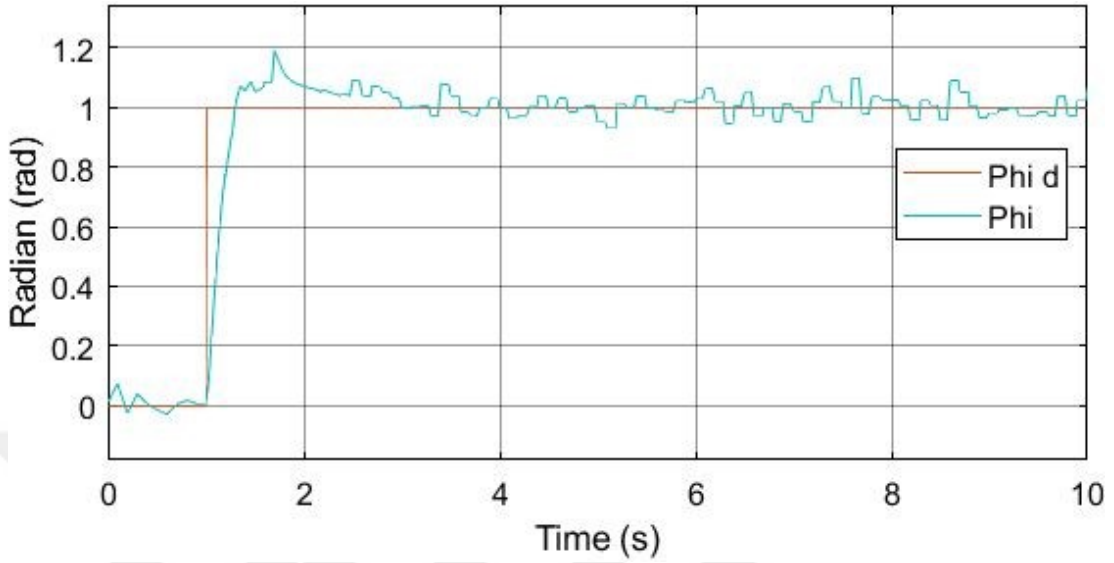
6.2.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü

Sistemin girişine gürültü gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Şekil 6.3’te ise girişe gürültü verildiğinde kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcünün grafiği yer alıyordu. Söz konusu grafikler incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü verilen referansı takip esnasında daha çok bozulma göstermektedir. Ayrıca PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünde referans takibi esnasında daha çok aşım olduğu gözlenmektedir. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcünün gürültüye karşı daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.11 : Girişe gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına gürültü gücü (noise power) 0.0001 ve örnekleme zamanı (sampling time) 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde elde edilen grafik Şekil 6.12’de görülmektedir.



Şekil 6.12 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

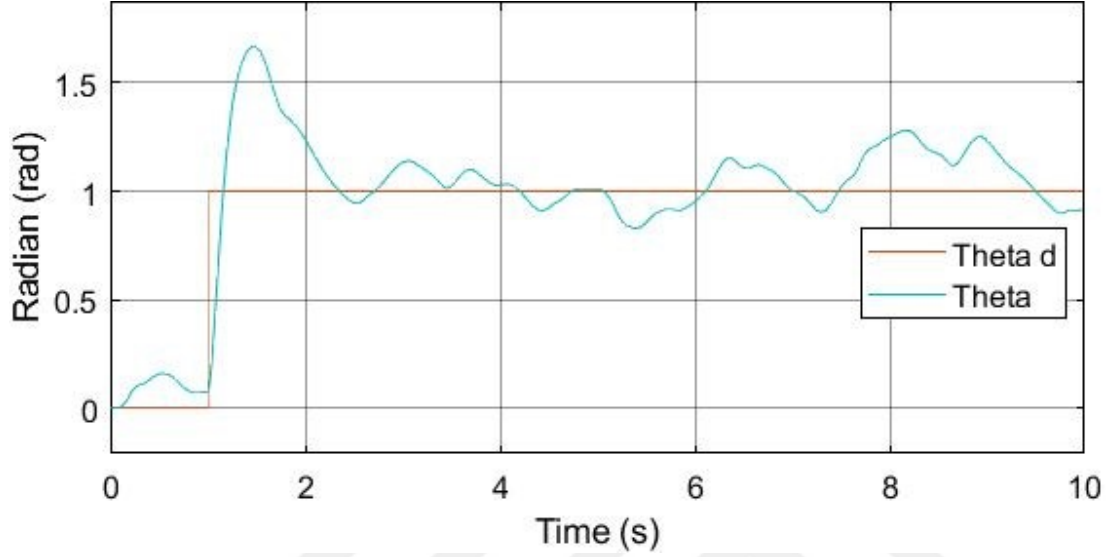
Şekil 6.11’deki sistemin girişine eklenen gürültünün grafiği ile Şekil 6.12’deki sistemin çıkışına eklenen gürültünün grafiği kıyaslandığında, çıkışa eklenen gürültünün sistemde daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır.

Bir önceki bölümde kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcünün giriş ve çıkış gürültüsü altındaki simülasyonları sırasıyla Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te verilmişti. Kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcü için çıkışa gürültü eklendiğinde elde edilen grafik Şekil 6.4’te görülmektedir. Şekil 6.12 ise çıkışa gürültü eklendiğinde PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün simülasyonudur. Şekil 6.4 ve Şekil 6.12 kıyaslandığında PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünün kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcüye kıyasla çıkışa eklenen gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir.

PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcü birim basamak referansını takip esnasında daha çok bozulma göstermektedir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde referans takibi sırasında daha çok aşım olduğu gözlenmektedir. Ayrıca kendi tasarladığımız kontrolcü daha küçük kontrolcü katsayıları kullanmaktadır. Bu durumda kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcünün PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcünden daha başarılı olduğu gözlenmektedir.

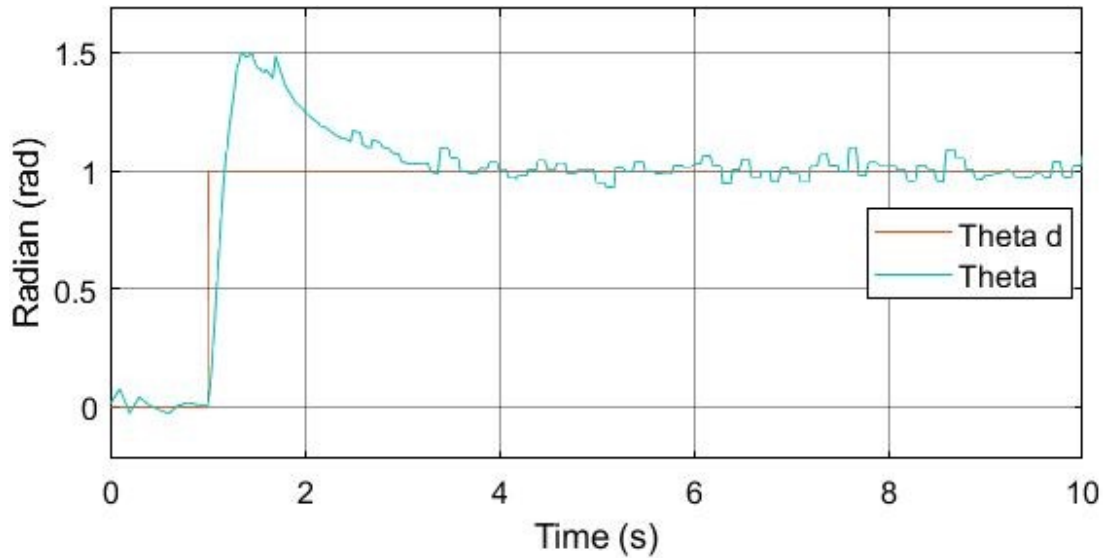
6.2.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.13’de gösterilmiştir.



Şekil 6.13 : Giriş gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

Çıkışa gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.14’deki gibidir.

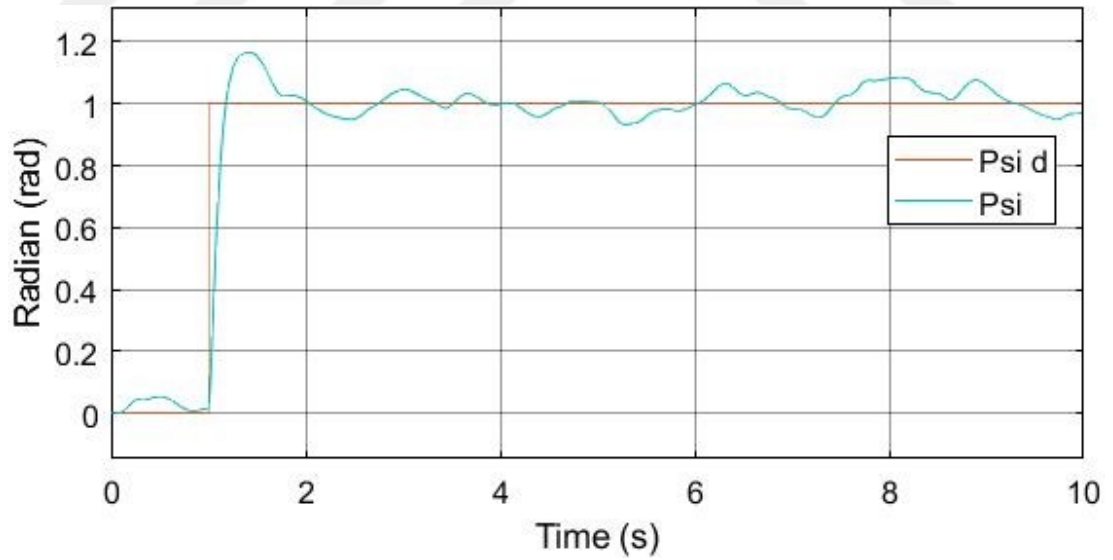


Şekil 6.14 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla sistemde daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.5'te kendi tasarladığımız yunuslama açısı kontrolcünün girişe gürültü eklendiğindeki grafiği ile Şekil 6.13'de PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün girişe gürültü verildiğindeki grafiği kıyaslandığında PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde daha fazla bozulma ve aşım oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 6.6'daki kendi tasarladığımız yunuslama açısı kontrolcünün çıkışa gürültü eklendiğindeki grafiği ile Şekil 6.14'te PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcünün çıkışa gürültü eklendiğindeki grafiği kıyaslandığında da PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün gürültüden daha fazla etkilendiği ve daha fazla aşım oluştuğu fark edilmektedir. Bu durumda kendi tasarladığımız PID kontrolcünün, PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.

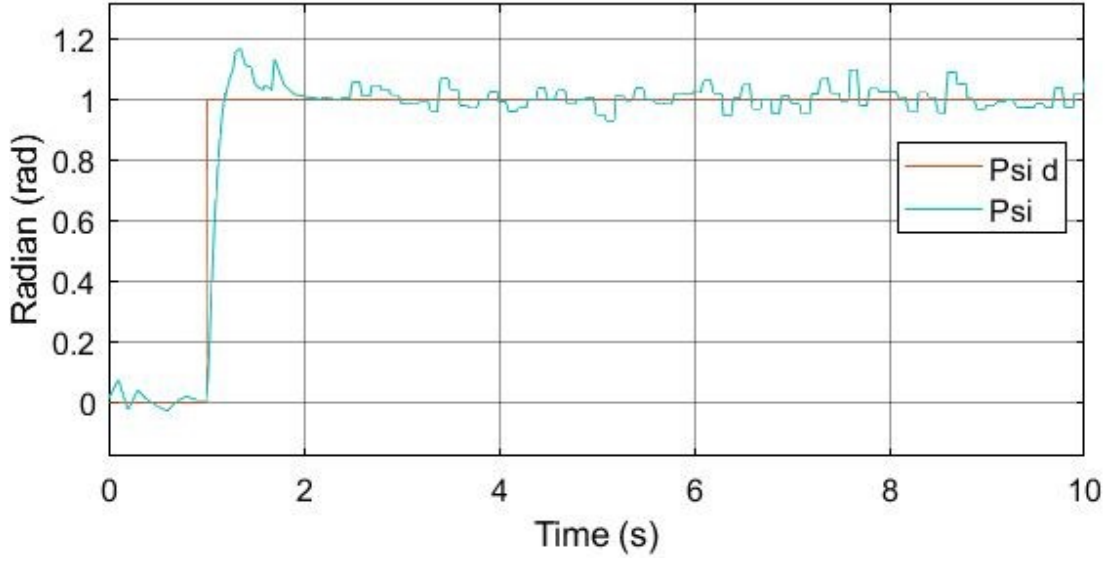
6.2.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde PID Tuning ile tasarlanan sapma açısı kontrolcünün birim basamak referansını takip edebilme yeteneği Şekil 6.15'de gösterilmiştir.



Şekil 6.15 : Giriş gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

Çıkışa gücü 0.0001 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.16'daki gibidir.



Şekil 6.16 : Çıkışa gürültü eklendiğinde birim basamak referansı için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

Çıkışa eklenen gürültünün girişe eklenen gürültüye kıyasla sistemde daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Giriş ve çıkış grafikleri incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün bir önceki bölümde kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. Verilen referansı takip esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmektedir.

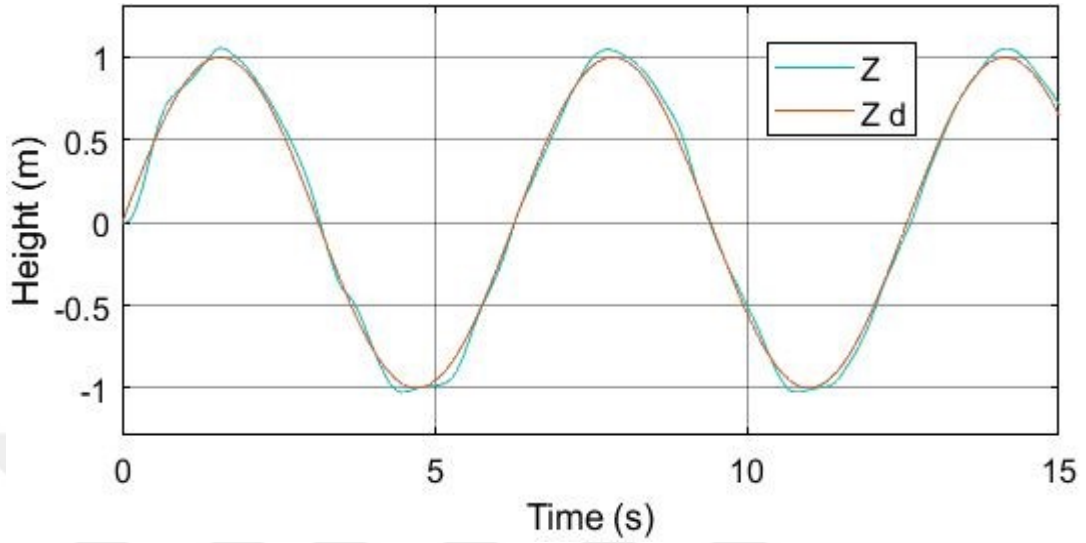
6.3 Sinuzoidal Referans için Gürültü Eklenmesi

Bu bölümde giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü (band limited white noise) verilen bir sistemin sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği incelenmiştir. Quadrotorun yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının gürültülü ortamdaki grafikleri çizilerek verilen referansı takip yetenekleri değerlendirilmiştir. Önce sistemin girişine gürültü verilmiş ve verilen referansı takip esnasında yükseklik, yunuslama ve sapma açılarındaki bozulmalar gözlenmiştir. Daha sonra sistemin çıkışına bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verilmiştir. Çıkıştaki gürültünün sinuzoidal referansı takipte meydana getirdiği etkiyi ölçmek için yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının grafikleri çizilmiştir. Çıkışa eklenen gürültünün referans takibi esnasında daha büyük bir bozulmaya neden olduğu fark edilmiştir.

6.3.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü

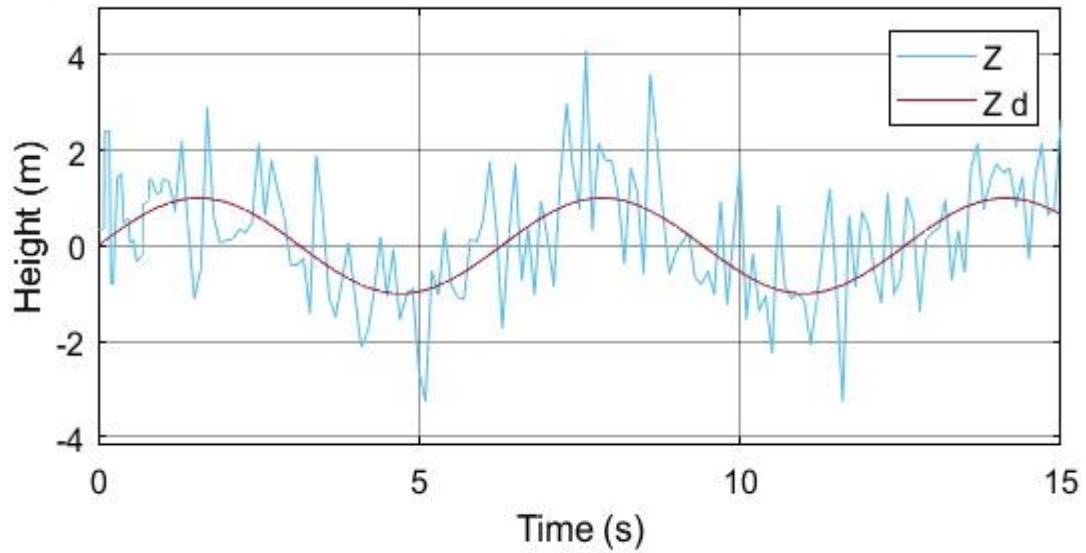
Sistemin girişine gücü (noise power) 0.1 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yükseklik kontrolcünün sinuzoidal referansı takip

edebilme yeteneği Şekil 6.17’de gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılabilceği üzere gürültü verildiğinde birtakım bozulmalar olsa da verilen referans takip edilebilmektedir.



Şekil 6.17 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yükseklik kontrolü.

Sistemin çıkışına gücü 0.1 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.18’deki gibidir.



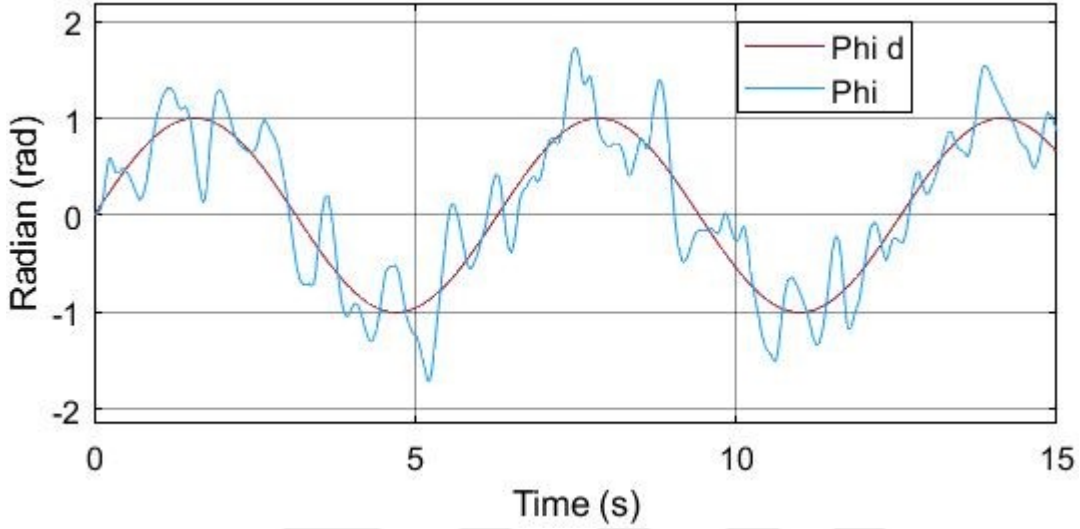
Şekil 6.18 : Çıkış gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yükseklik kontrolü.

Giriş ve çıkışa eklenen gürültünün gücü ve örnekleme zamanı aynıdır. Ancak çıkışa gürültü eklendiğinde sistemde daha fazla bozulma olmaktadır. Çıkışa eklenen gürültüye karşın verilen sinuzoidal referans başarılı bir şekilde takip edilebilmektedir.

Bu durumda tasarlanan kontrolcü gürültüye karşı dayanıklıdır.

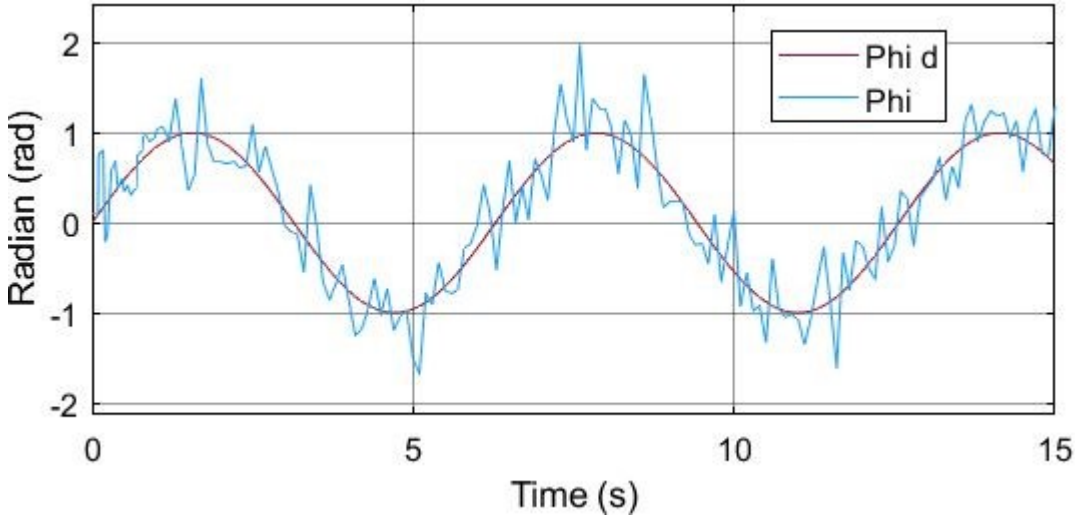
6.3.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yalpa açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.19 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolü.

Çıkışa gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.20'deki gibidir.

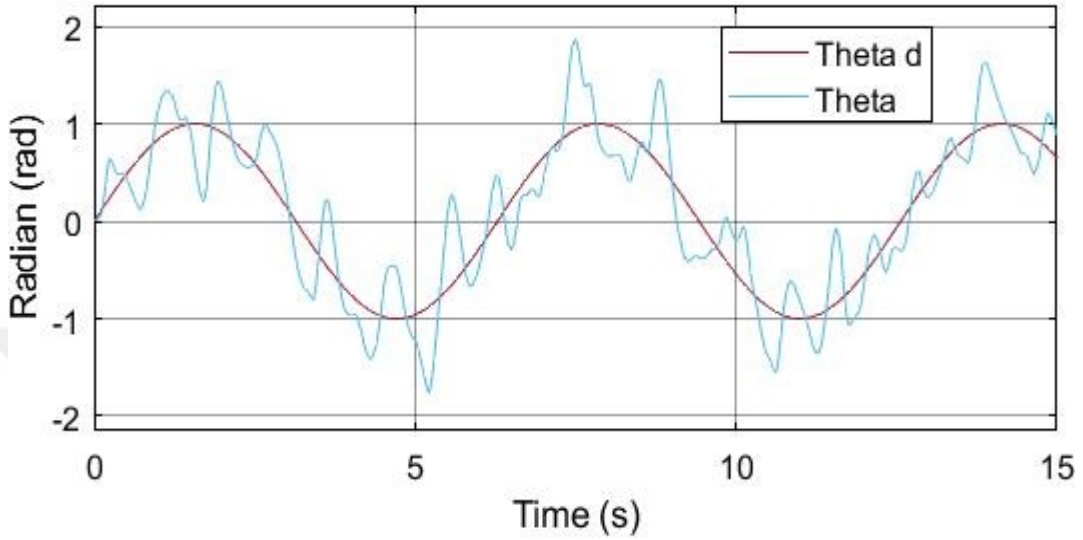


Şekil 6.20 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yalpa açısı kontrolü.

Giriş ve çıkış gürültüsü altında quadrotorun verilen referansı takip edebildiği gözlenmektedir. Ancak sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha çok bozulmaya neden olduğu fark edilmektedir.

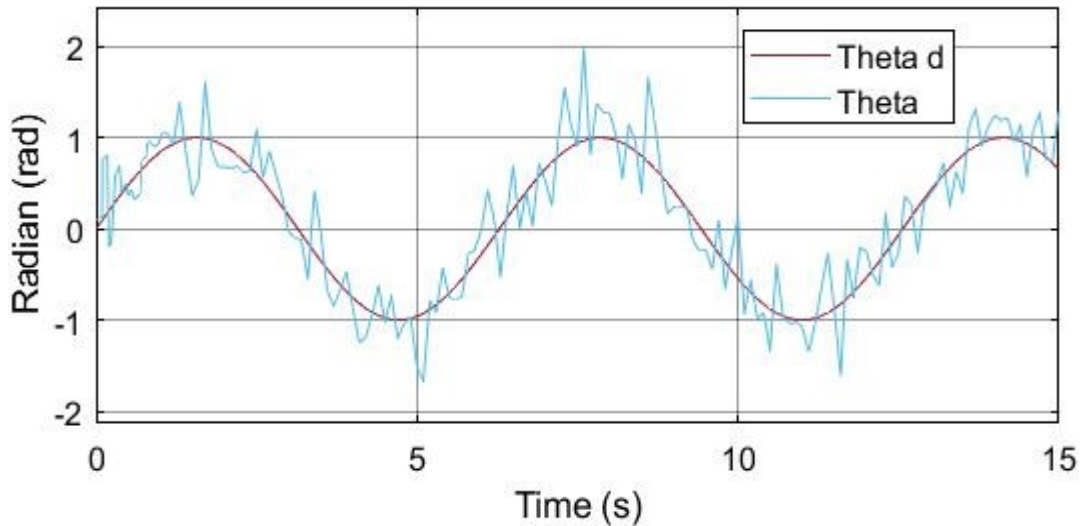
6.3.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yunuslama açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.21’de gösterilmiştir.



Şekil 6.21 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolü.

Çıkışa gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.22’deki gibidir.

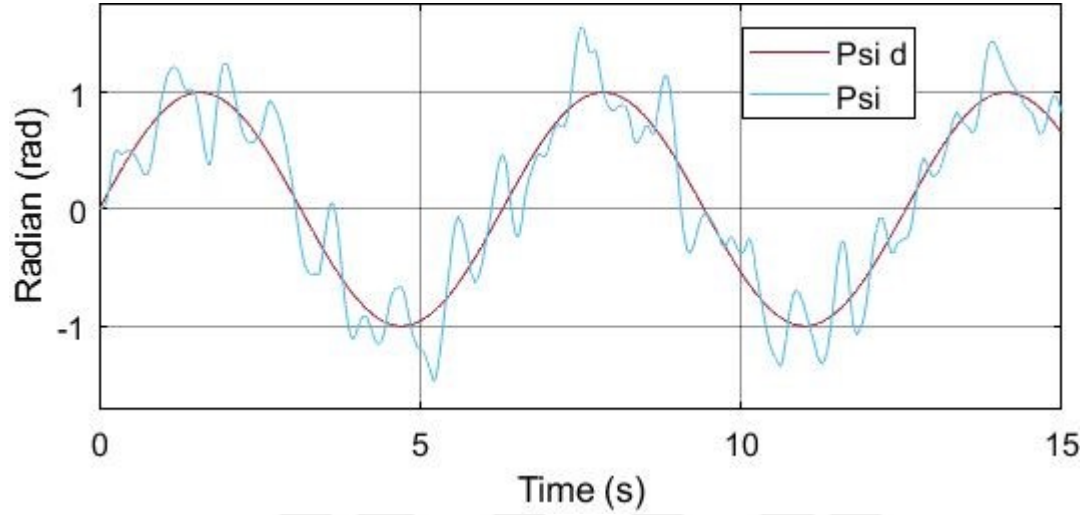


Şekil 6.22 : Çıkış gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans yunuslama açısı kontrolü.

Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcünün referansı takip edebildiği gözlenmektedir. Ancak sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha çok bozulmaya neden olduğu fark edilmektedir.

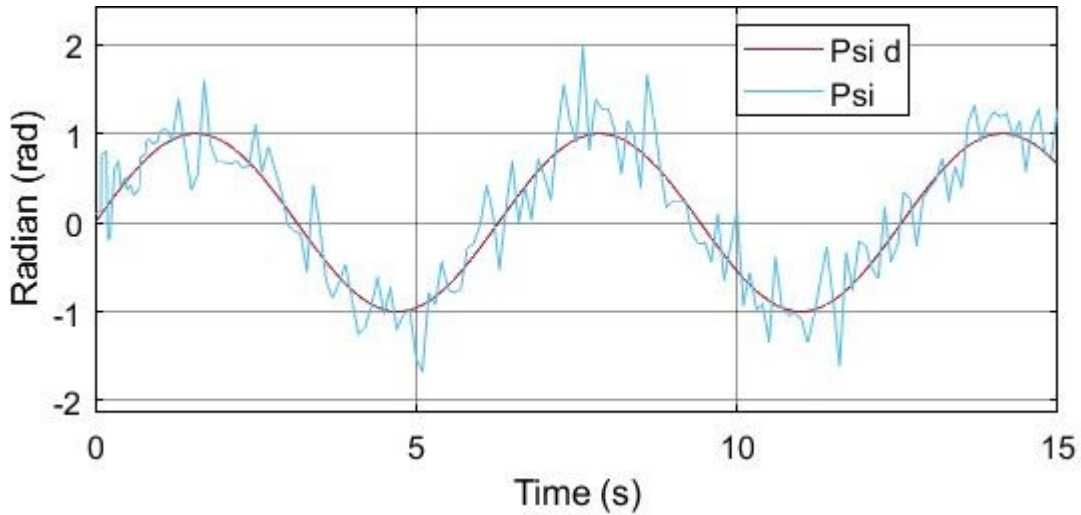
6.3.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde sapma açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.23’de gösterilmiştir.



Şekil 6.23 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans sapma açısı kontrolü

Sistemin çıkışına gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan gürültü verildiğinde Şekil 6.24’deki grafik elde edilmektedir.



Şekil 6.24 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans sapma açısı kontrolü

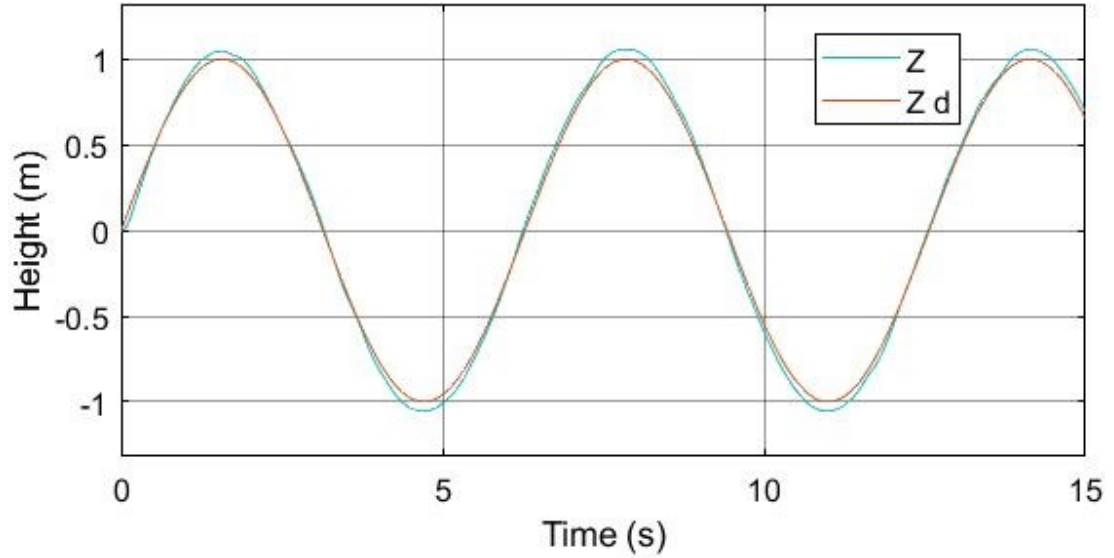
Çıkışa eklenen gürültünün gücü ve örneklemesi girişe eklenen gürültüyle aynı olmasına rağmen daha fazla bozulmaya neden olmaktadır. Ancak bozulmalara rağmen giriş ve çıkış gürültüsü altında sinuzoidal referans takip edilebilmektedir.

6.4 PID Tuning ile Sinuzoidal Referans için Gürültü Eklenmesi

Bu kısımda 4. Bölümde birim basamak referansı için katsayıları Matlab tarafından PID Tuning ile belirlenerek oluşturulan kontrolcüler kullanılmıştır. Sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verilerek sistemin sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar neticesinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin kendi tasarladığımız kontrolcülere kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde referans takibi esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmiştir.

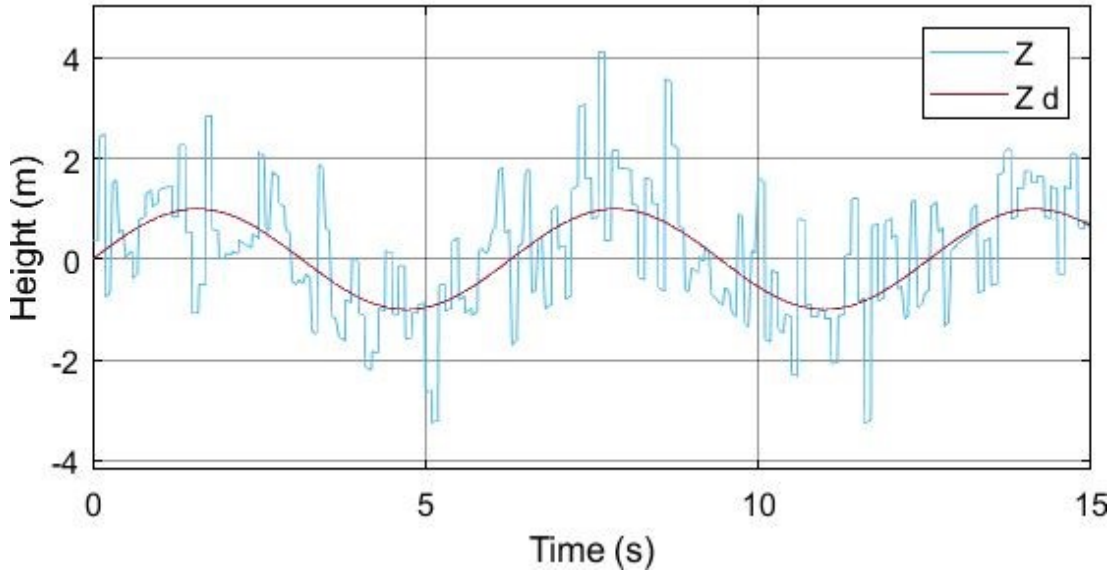
6.4.1 Giriş ve çıkış gürültüsü altında irtifa kontrolcü

Sistemin girişine gücü (noise power) 0.1 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yükseklik kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.25’de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. Verilen referansı takip esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmektedir.



Şekil 6.25 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.

Çıkışa gücü 0.1 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde ise elde edilen grafik Şekil 6.26'daki gibidir.

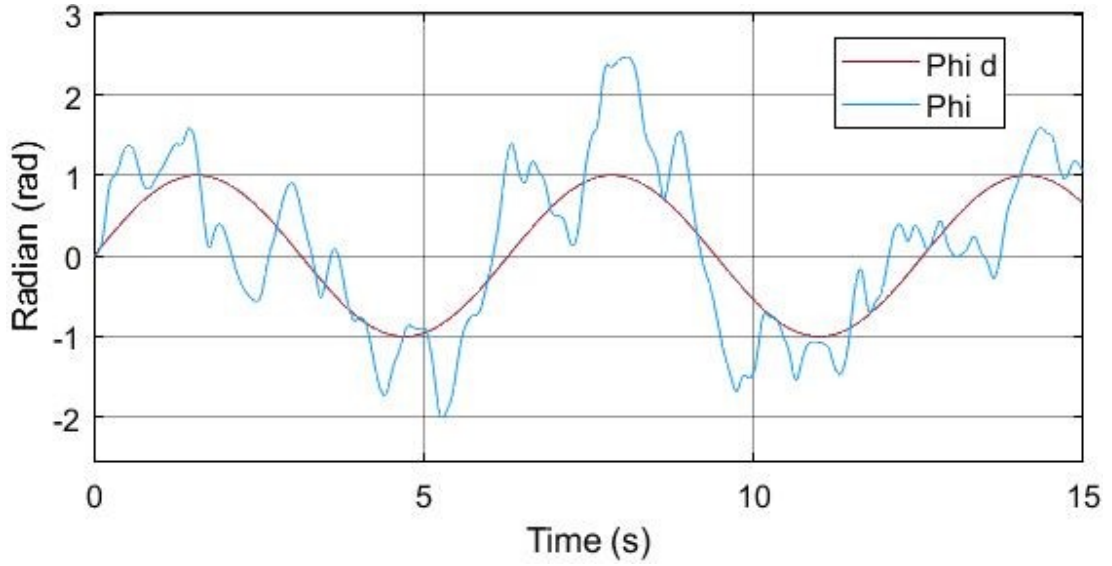


Şekil 6.26 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yükseklik kontrolü.

Sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha çok bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.18'deki kendi tasarladığımız yükseklik kontrolcünün çıkış gürültüsü eklendiğindeki grafiği ile Şekil 6.26'daki PID Tuning ile tasarlanan yükseklik kontrolcünün çıkış gürültüsü eklendiğindeki grafiği karşılaştırıldığında kendi tasarladığımız kontrolcünün daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcü gürültüden daha fazla etkilendiğinden referansı takip esnasında daha çok bozulmaktadır. Ayrıca PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde daha çok aşım olduğu gözlenmektedir.

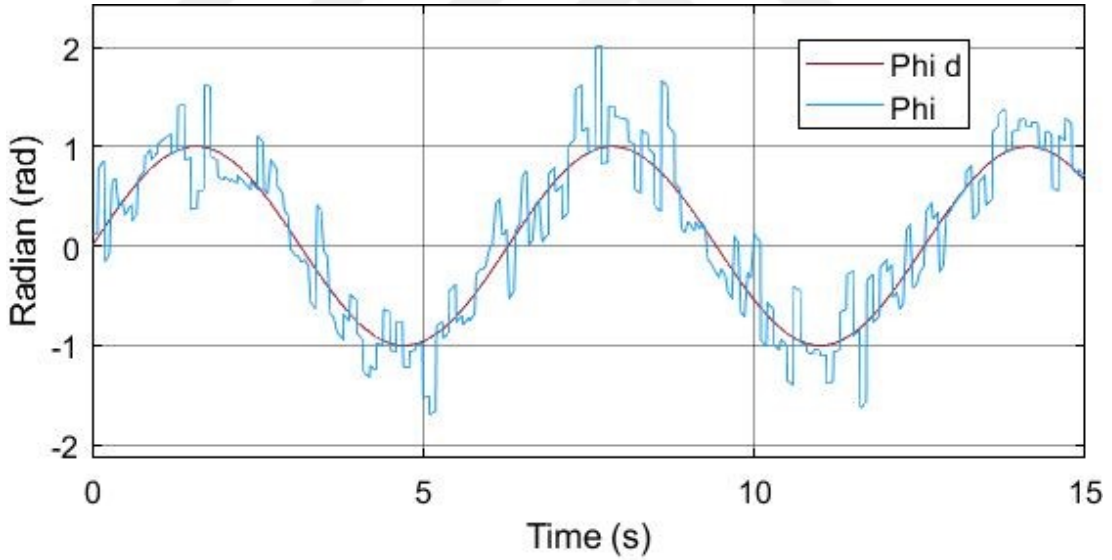
6.4.2 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yalpa açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yalpa açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Bir önceki bölümde kendi tasarladığımız yalpa açısı kontrolcünün giriş gürültüsü altındaki grafiği 6.19'da yer almaktadır. Şekil 6.19 ile Şekil 6.27 karşılaştırıldığında PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha çok etkilendiği anlaşılmaktadır. PID Tuning ile tasarlanan yalpa açısı kontrolcü sinuzoidal referansı takip sırasında hem daha çok bozulmaya uğramakta hem de daha çok aşım olduğu gözlenmektedir. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcünün daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.27 : Girişe gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

Çıkışa gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde elde edilen grafik ise Şekil 6.28'deki gibidir.

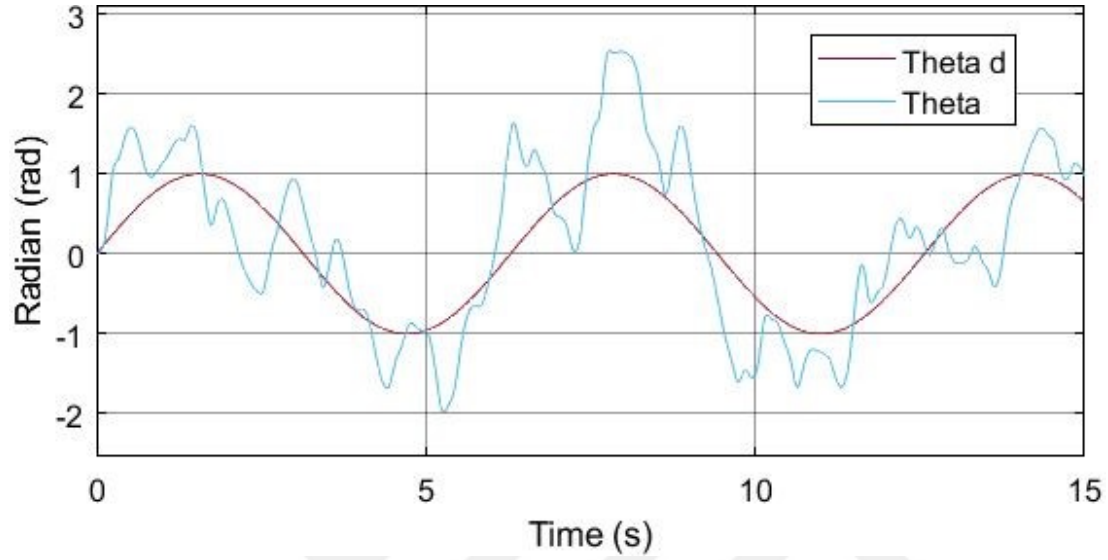


Şekil 6.28 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yalpa açısı kontrolü.

Çıkışa eklenen gürültünün girişe eklenen gürültüye kıyasla sistemde daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Grafik incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün bir önceki bölümde kendi tasarladığımız kontrolcüye kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. Verilen referansı takip esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmektedir.

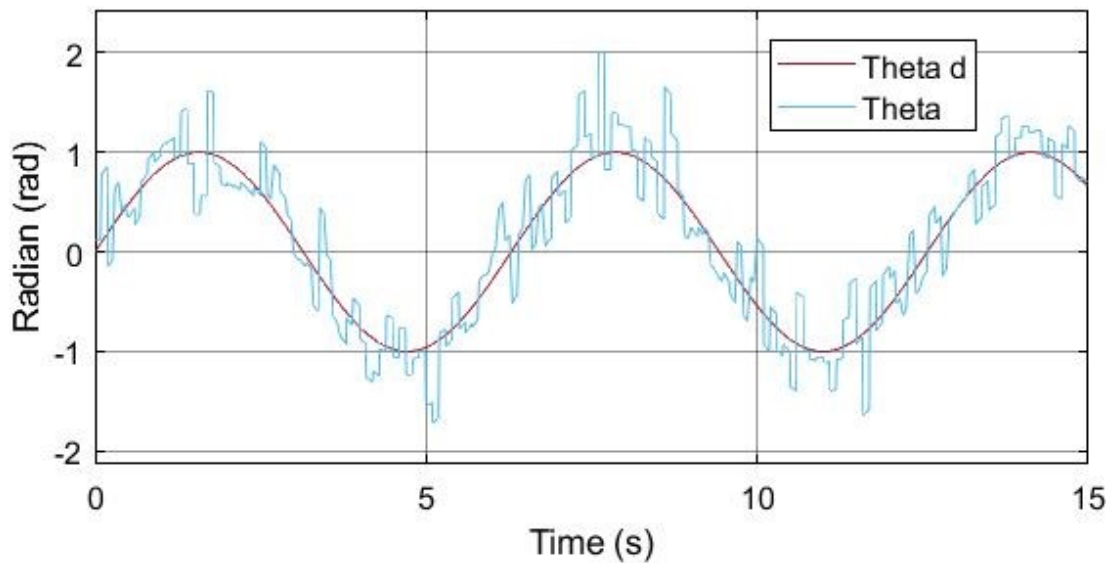
6.4.3 Giriş ve çıkış gürültüsü altında yunuslama açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde yunuslama açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.29'da gösterilmiştir.



Şekil 6.29 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde elde edilen yunuslama açısı kontrolcü grafiği Şekil 6.30'da yer almaktadır.

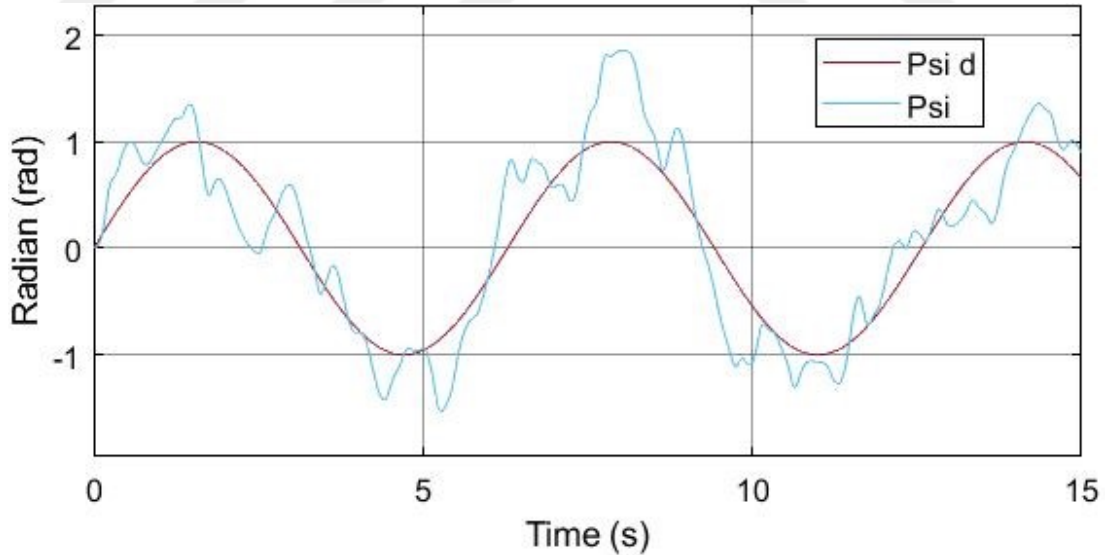


Şekil 6.30 : Çıkış gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile yunuslama açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha fazla bozulmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de önceki bölümde kendi tasarladığımız yunuslama açısı kontrolcülerin giriş ve çıkış gürültüsü verildiğinde elde edilen grafikleri yer almaktadır. Şekil 6.29 ve Şekil 6.30 ise PID Tuning ile tasarlanan yunuslama açısı kontrolcülere giriş ve çıkış gürültüsü eklendiğinde elde edilen grafiklerdir. Kendi tasarladığımız kontrolcü ve PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün giriş ve çıkış gürültüsü altındaki performansları incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmektedir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde verilen sinuzoidal referansı takip esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmektedir. Bu nedenle kendi tasarladığımız kontrolcünün gürültüye daha dayanıklı olduğu anlaşılmaktadır.

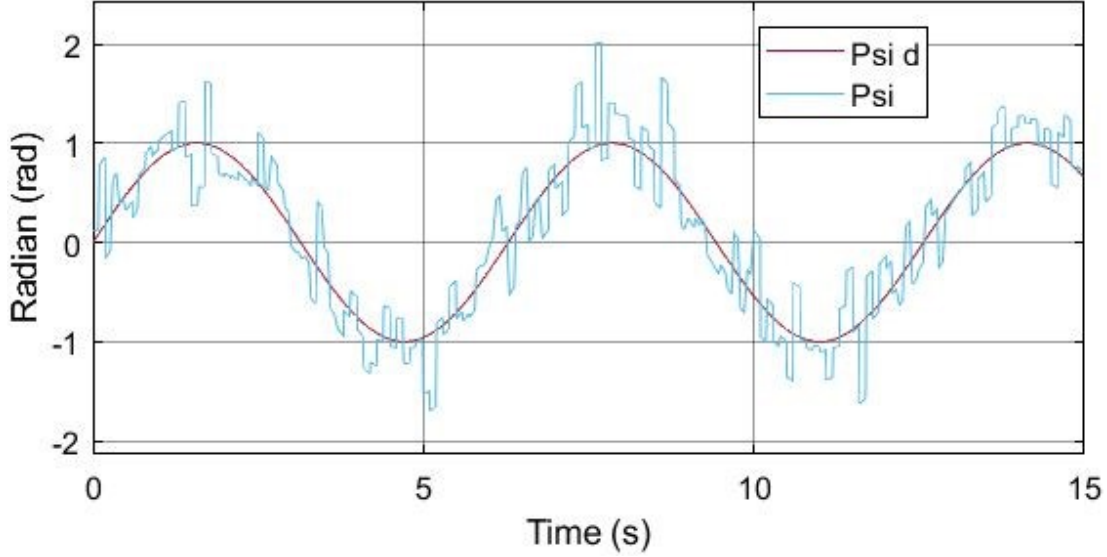
6.4.4 Giriş ve çıkış gürültüsü altında sapma açısı kontrolcü

Sistemin girişine gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü verildiğinde sapma açısı kontrolcünün sinuzoidal referansı takip edebilme yeteneği Şekil 6.31’de gösterilmiştir.



Şekil 6.31 : Giriş gürültü eklendiğinde sinuzoidal referans için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına gürültü gücü 0.01 ve örnekleme zamanı 0.1 olan bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklendiğinde elde edilen sapma açısı kontrolcü grafiği Şekil 6.32’de yer almaktadır.



Şekil 6.32 : Çıkışa gürültü eklendiğinde sinüzoidal referans için PID Tuning ile sapma açısı kontrolü.

Sistemin çıkışına eklenen gürültünün sistemin girişine eklenen gürültüye kıyasla daha çok bozulmaya yol açtığı fark edilmektedir. Kendi tasarladığımız sapma açısı kontrolcünün olduğu sistemin giriş ve çıkışlarına gürültü verildiğinde elde edilen grafikler Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'te yer almaktadır. PID Tuning ile tasarlanan sapma açısı kontrolcünün olduğu sistemin giriş ve çıkışlarına gürültü verildiğinde elde edilen grafikler ise Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'dir. Kendi tasarladığımız kontrolcü ile PID Tuning yöntemiyle katsayıları Matlab tarafından otomatik belirlenerek tasarlanan kontrolcünün giriş ve çıkış grafikleri incelendiğinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcünün giriş ve çıkışa eklenen gürültüden daha çok etkilendiği gözlenmektedir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüde verilen sinüzoidal referansı takip ederken daha çok bozulma ve daha çok aşım olduğu gözlenmektedir. Elde edilen sonuçlar kendi tasarladığımız kontrolcünün gürültüye karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında quadrotorun modellenmesi ve pid kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Öncelikle dört rotorlu insansız hava aracının uçuş prensipleri anlatılmıştır. Rotorların dönüş yönleri ve ürettikleri torklar, yükseklik, yalpa yunuslama ve sapma hareketleri anlatılmıştır. Daha sonra quadrotorun matematiksel denklemleri çıkarılmıştır. Bu denklemlerden yola çıkarak Simulink ortamında modelleme ve kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Simulinkte oluşturulan modele OS4 Quadrotoruna ait fiziksel parametreler girilmiştir. Tasarlanan kontrolcülerin fiziksel parametrelerle uyumlu olmasına dikkat edilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucu rotorların ürettiği torkların 0.15 Nm'nin altında yani fiziksel parametrelerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Tasarlanan PID kontrolcülerle quadrotorun yükseklik, yalpa açısı, yunuslama açısı ve sapma açısı kontrol edilmiştir. Sisteme birim basamak referansı ve sinuzoidal referans verilerek farklı referanslar için kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Birim basamak referansının daha küçük kontrolcü katsayılarıyla kontrol edilebildiği ve sürekli hal hatasıyla karşılaşmadığı görülmüştür. Sürekli hal hatası olmadığından integral kontrolcü katsayısının kullanımına gerek duyulmamıştır. Sinuzoidal referansı takip ederken hem daha büyük kontrolcü katsayıları kullanılmış hem de sürekli hal hatasıyla karşılaşıldığından dolayı bunu gidermek için integral kontrolcü katsayısı kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde birim basamak ve sinuzoidal referansların başarılı bir şekilde takip edildiği görülmüştür.

PID Tuning yöntemi kullanılarak da kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Bu yöntemde kontrolcü katsayıları Matlab tarafından otomatik olarak belirlenmektedir. Birim basamak referansı için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde referans takibi yapılabilse de aşımın yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca rotor tork simülasyonları incelendiğinde rotorların üretebileceği maksimum tork değerlerinin çok üzerine çıktığı gözlenmiştir. Sinuzoidal referans için PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde referans takibi kendi tasarladığımız kontrolcüye yakın bir performansla başarılı şekilde yapılmaktadır. Ancak rotor tork simülasyonları incelendiğinde PID

Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin yine maksimum rotor tork değerinin üzerine çıktığı gözlenmektedir. Bu durumda kendi tasarladığımız kontrolcülerin hem aşım olmaması hem de rotor tork değerlerinin maksimum rotor tork değerinin altında kalması nedeniyle daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Parametre belirsizliği bölümünde ise quadrotorların yörünge takibi performansının yük değişimi, kütle değişimi, rüzgar ve hatalı model parametreleri gibi bozucu dış etmenlerden etkilenebileceği varsayılmıştır. Bu durumda kontrolcünün parametre belirsizliklerine karşı dayanıklı olması gerektiği düşünülmüştür. Quadrotorun kütlesi (m) ve eylemsizlik momentlerinde (I_x , I_y ve I_z) + %100 ve + %200 parametre belirsizlikleri uygulanarak simülasyonlar yapılmıştır. Birim basamak referansı ve sinüzoidal referans için parametre belirsizliği altında yapılan simülasyonlarda kontrolcülerin referansları takip edebildiği ve parametre belirsizliğine karşı dayanıklı olduğu görülmüştür. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüler için de parametre belirsizliği uygulanmıştır. Yapılan simülasyonlar neticesinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin kendi tasarladığımız kontrolcülere kıyasla parametre belirsizliğinden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. Referans takibi esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmiştir.

Gürültü eklenmesi bölümünde sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı gürültü eklenerek quadrotorun gürültü altında referansları takip edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Bunun için sistemin girişine ve çıkışına ayrı ayrı bant sınırlı beyaz gauss gürültüsü eklenerek yükseklik, yalpa, yunuslama ve sapma açılarının grafikleri çizilmiştir. Sistemin çıkışına eklenen gürültünün girişe eklenen gürültüye kıyasla daha fazla bozulmaya neden olduğu görülmüştür. Bu durum çıkışa eklenen gürültünün sisteme doğrudan etki etmesi ile ilgilidir. Sistemin gürültü altında birtakım bozulmalar olsa da referansları takip edebildiği ve gürültüye dayanıklı olduğu anlaşılmıştır. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcüler için de sistemin giriş ve çıkışlarına ayrı ayrı gürültü verilmiştir. Yapılan simülasyonlar neticesinde PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerin kendi tasarladığımız kontrolcülere kıyasla gürültüden daha fazla etkilendiği fark edilmiştir. PID Tuning ile tasarlanan kontrolcülerde referans takibi esnasında hem daha çok bozulma hem de daha çok aşım olduğu gözlenmiştir.

Sonuç olarak quadrotor için tasarlanan kontrolcülerin farklı referansları takip edebildiği, parametre belirsizliğine ve gürültüye karşı dayanıklı olduğu görülmüştür. Kendi tasarladığımız kontrolcülerin Matlab tarafından PID Tuning ile otomatik olarak

tasarlanan kontrolcülere kıyasla referans takibi, parametre belirsizliği ve gürültüye karşı dayanıklılık noktasında daha başarılı olduğu ve quadrotorun fiziksel parametreleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Bu konu hakkında yapılacak gelecek çalışmalarda farklı kontrolcü tasarımları uygulanarak referansların daha hızlı takip edilmesi, parametre belirsizliğine ve rüzgar, gürültü gibi bozucu dış etmenlere karşı daha dayanıklı kontrolcülerin tasarlanması düşünülebilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Bouabdallah S., Siegwart R.,** (2005). Backstepping and Sliding-mode Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 18-22 April.
- [2] **Eisenbeiss H.,** (2004). A mini unmanned aerial vehicle system overview and image acquisition, in Proc. International Workshop on Processing and Visualization Using High Resolution Imagery, Thailand 18-20 November.
- [3] **Shraim H., Awada A., Youness R.,** (2018). A survey on quadrotors: Configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Volume: 33, Issue: 7.
- [4] **Elbir Ö.,** (2013). Autopilot Design for a Quadrotor, Master of Science Thesis, TOBB University of Economics and Technology, Ankara, Turkey
- [5] **Kılıç B. ,** (2014). Quadcopter'in Dinamik Analizi ve Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Bülent Ecevit Üniversitesi, Zonguldak, Türkiye.
- [6] **Young Warren R.,** (1982). The Helicopters (The Epic of Flight). Chicago: Time-Life Books, pp. 28, ISBN 0-8094-3350-8.
- [7] **Breguet L.,** (1907). Breguet-Richet no.1 gyroplane, Musee des arts et metiers, 1:10 scale model, Inventory model 16259, Paris, France.
- [8] **Seddon John M., Newman S.,** (2011). Basic Helicopter Aerodynamics, Wiley, 3rd Edition, pp. 4, ISBN 0470665017.
- [9] **Munson K.,** (1968). Helicopters and other rotorcraft since 1907, Blandford Press, London, England.
- [10] **Lambermont P. M., Pirie A.,** (1970). Helicopters and autogyros of the world, Barnes, pp. 205, 255, 258.
- [11] **De Bothezat G.,** (1924). Top view of de Bothezat quadcopter, Figure 1 of US Patent 1749471, 5 Sheets- Sheet 1, US Government.
- [12] **Stoff J.,** (2001). The Historic Aircraft and Spacecraft in the Cradle of Aviation Museum, Courier Corporation, pp.46, ISBN 9780486420417.
- [13] **Shirsat A.,** (2015). Modeling and Control of a Quadrotor UAV, Master of Science Thesis, Arizona State University, Tempe, Arizona, USA.

- [14] **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.
- [15] **Harding S.**, (1990). U S Army Aircraft Since 1947, Airlife Publishing; 1st edition, ISBN-10: 1853101028, Shrewsbury, Shrophshire, UK.
- [16] **Altuğ E., Ostrowski J. P., Taylor C.J.**, (2005). Control of a Quadrotor Helicopter Using Dual Camera Visual Feedback, *The International Journal of Robotics Research* Vol. 24, No.5, pp. 329-341.
- [17] **Hoffmann G. M., Huang H. ve Washlander S. L., Tomlin C. J.**, (2007). Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Hilton Head, SC.
- [18] **Hoffmann G. M.**, (2008). Autonomy for sensor-rich vehicles: Interaction between sensing and control actions, Doctor of Philosophy Thesis, Stanford University, Stanford, California, USA.
- [19] **Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R.**, (2004). Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor, *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, LA, USA.
- [20] **Bouabdallah S.**, (2007). Design and Control of quadrotors with application to autonomous flying, Doctor of Philosophy Thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [21] **Hoffmann F., Goddemeier N., Bertram T.**, (2010). Attitude estimation and control of a quadcopter, *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan.
- [22] **Sorensen, A.F.**, (2010). Autonomous Control of a Miniature Quadrotor Following Fast Trajectories, Master of Science Thesis, Aalborg University Aalborg, Denmark.
- [23] **Angeletti G., Valente J., Iocchi L., Nardi D.**, (2008). Autonomous indoor hovering with a quadrotor, *Workshop Proceedings of the International Conference on Simulation, Modeling and Programming for Autonomous robots (SIMPAN)*, Venice, Italy.
- [24] **Lindsey Q., Mellinger D., Kumar V.**, (2012). Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams, *Robotics: Science and Systems VII*, MIT Press, pp. 177.
- [25] **Sadeghzadeh I., Mehta A., Chamseddine A., Zhang Y.**, (2012). Active Fault Tolerant Control of a quadrotor UAV based on gainscheduled PID control, *25th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Montreal, QC, Canada.

- [26] **Sadeghzadeh I., Mehta A., Zhang Y., Rabbath C. A.,** (2011). Fault-Tolerant Trajectory Tracking Control of a Quadrotor Helicopter Using Gain-Scheduled PID and Model Reference Adaptive Control, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, Montreal, Quebec, Canada.
- [27] **Yu B., Zhang Y., Minchala I., Qu Y.,** (2013). Fault-tolerant control with linear quadratic and model predictive control techniques against actuator faults in a quadrotor UAV, 2013 Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), Nice, France.
- [28] **İskandarani M., Hafez A. T., Givigi S. N., Beaulieu A., Rabbath C. A.,** (2013). Using multiple Quadrotor aircraft and Linear Model Predictive Control for the encirclement of a target, 2013 IEEE International Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, USA.
- [29] **Monte P. D., Lohmann B.,** (2013). Trajectory tracking control for a quadrotor helicopter based on backstepping using a decoupling quaternion parametrization, 21st Mediterranean Conference on Control and Automation, Chania, Greece.
- [30] **Elbir O., Batmaz A. U., Kasnakoglu C.,** (2013). Improving quadrotor 3-axes stabilization results using empirical results and system identification, 2013 9th Asian Control Conference (ASCC), Istanbul, Turkey.
- [31] **Comert C.,** (2016). Design and Comparison of PID and Sliding Mode Controllers for Quadcopter, Master of Science Thesis, TOBB University of Economics and Technology, Ankara, Turkey
- [32] **Comert C., Kasnakoglu C.,** (2016). Design of a sliding mode controller for quadcopter, 2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO), Bursa, Turkey.
- [33] **Domingues J. M. B.,** (2009). Quadrotor prototype, Msc Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisbon University.
- [34] **Orsag M., Korpela C., Oh P., Bogdan S.** (2017). Aerial Manipulation, Springer; 1 edition, pp. 173.
- [35] **Chaudhary A.,** (2018). ATL Drone Module, Atal Innovation Mission, NITI Aayog, pp. 36.
- [36] **Pamadi B. N.,** (1998). Performance, Stability, Dynamics and Control of Airplanes, AIAA Education Series, Reston, pp. 323-328, Virginia, USA.
- [37] **Ermeydan A.,** (2016). Fault Tolerant Flight Control System Design to a Quadrotor, Msc Thesis, Anadolu University, Eskişehir, Turkey.

- [38] **Rich M.**, (2012). Model development, system identification, and control of a quadrotor helicopter, Msc Thesis, Iowa State University, Iowa, USA.
- [39] **Bresciani T.**, (2008). Modelling, identification and control of a quadrotor helicopter, MSc Theses, Lund University, Lund, Sweden.
- [40] **Vaidyanathan S., Lien C. H.**, (2017). “Applications of Sliding Mode Control in Science and Engineering (Studies in Computational Intelligence Book 709),” Springer; 1st ed., page 65.
- [41] **Bouabdallah S., Murrieri P., Siegwart R.**, (2004). Design and Control of an Indoor Micro Quadrotor, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, New Orleans, LA, USA.
- [42] **Vepa R.**, (2016). Nonlinear Control of Robots and Unmanned Aerial Vehicles: An Integrated Approach, CRC Press; 1 edition, pp. 531.
- [43] **Araki M., Unbehauen H. D.**, (2009). PID Control, Control Systems, Robotics and Automation – Volume XIX: Industrial Applications of Control Systems-II, EOLSS Publications.
- [44] **Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E.**, (2001). Classical PID Control, Control System Design, Pearson, pp. 169-174.
- [45] **Webb J. W., Reis R. A.**, (1992). PID Control, Programmable logic controllers : principles and applications, Macmillan Publishing Company, pp. 279-286.
- [46] **Coskun İ., Terzioğlu H.**, (2007). Determining Gain (PID) Parameters Make Use of Speed Performance Curve, Journal of Selcuk-Technic Volume 6, Number:3.
- [47] **Navabi M., Mirzaei H.**, (2017). Robust Optimal Adaptive Trajectory Tracking Control of Quadrotor Helicopter, Latin American Journal of Solids and Structures 14.
- [48] **Jasim W., Gu D.**, (2014). H_∞ Path Tracking for Quadrotors Based on Quaternion Representation, Advances in Autonomous Robotics Systems: 15th Annual Conference, TAROS 2014, Birmingham, UK, September 1-3.
- [49] **Akgün O., Subasi E., Turker T.**, (2017). A Lyapunov based model reference adaptive control of a quadrotor, 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey.
- [50] **Walid M., Slaheddine N., Mohamed A., Lamjed B.**, (2018). Robust internal model controller for quadrotor UAV, 2018 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies, Hammamet, Tunisia.

EKLER

EK 1: Türkçe ve İngilizce Teknik Terimler izelgesi.



EK 1

Çizelge Ek 1 : Türkçe ve İngilizce Teknik Terimler Çizelgesi.

Türkçe Terimler	İngilizce Terimler
Açı	Angle
Açısal Hız	Angular Velocity
Arka	Rear
Artı Konfigürasyonu	Plus Configuration
Aşağı Hareket	Move Down
Belirsizlik	Uncertainty
Çapraz Konfigürasyon	Cross Configuration
Dönme Matrisi	Rotation Matrix
Dördöner	Quadrotor
Eksen	Axis
Eylemsizlik Momenti	Moment of Inertia
Gaz Kontrolü	Throttle Control
Geri Hareket	Move Backward
Hata	Error
İleri Hareket	Move Forward
İrtifa	Altitude
İtki Katsayısı	Thrust Coefficient
Katsayı	Coefficient
Kazanç	Gain
Kontrolcü	Controller
Konum	Attitude
Kuvvet	Force
Kütle	Mass
Normal Hız	Normal Speed
Oransal İntegral Türevsel	Proportional Integral Derivative
Ön	Front
Rotasyon	Dönme
Sağa Dönme	Rotate Right
Sağa Eğilme	Bend Right
Sapma	Yaw
Serbestlik Derecesi	Degrees of Freedom
Sola Dönme	Rotate Left
Sola Eğilme	Bend Left
Sürekli Hal Hatası	Steady State Error
Tork	Torque
Tork Katsayısı	Torque Coefficient
Uzunluk	Length
Yalpa	Roll
Yukarı Hareket	Move up
Yunuslama	Pitch
Yüksek Hız	High Speed

ÖZGEÇMİŞ

İsim-Soyisim : Mehmet Karahan
Uyruk : Türk
Doğum Tarihi ve Yeri : 15.10.1992 Yenimahalle
E-posta : karahanmehmet13@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, TOBB ETU, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2019, TOBB ETU, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2018-	Yapınet Yapı Denetim	Denetçi Yrd.
2017	YNE Enerji	Ortak Eğitim
2017	Türk Traktör	Ortak Eğitim
2016	TÜBİTAK SAGE	Ortak Eğitim
2015	Sanayi Genel Müdürlüğü	Ortak Eğitim

YABANCI DİL: İngilizce (İyi düzey)

Almanca (Başlangıç düzeyi)

İspanyolca (Başlangıç düzeyi)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karahan, M., Kasnakoglu, C., 2019.** Modeling and Simulation of Quadrotor UAV Using PID Controller, 2019 IEEE 11th International Conference on Electronics Computers and Artificial Intelligence, June 27-29, Pitesti, Romania.