



**BİR FIRLATMA ARACINDA İTKİ ETKİSİNİ AZALTICI
YÖNDE DENETİM SİSTEMLERİNİN TASARLANMASI**

Hamza KAMIŞLI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EKİM 2015

Hamza KAMIŞLI tarafından hazırlanan “BİR FIRLATMA ARACINDA İTKİ ETKİSİNİ AZALTICI YÖNDE DENETİM SİSTEMLERİNİN TASARLANMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Metin U. SALAMCI

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

İkinci Danışman: Dr. Bülent ÖZKAN

Makina Mühendisliği, TÜBİTAK SAGE

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

Başkan: Prof. Dr. Nizami AKTÜRK

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Mehmet Arif ADLI

Makina Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. M. Timur AYDEMİR

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu Onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 2/10/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Hamza KAMIŞLI

2/10/2015

BİR FIRLATMA ARACINDA İTKİ ETKİSİNİ AZALTICI YÖNDE DENETİM SİSTEMLERİNİN TASARLANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hamza KAMIŞLI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2015

ÖZET

Modern kara araçlarında kullanılan fırlatma araçları günümüzde büyük öneme sahiptir. Özellikle kara araçlarından fırlatılan füze ve roketlerin hedefe yönlendirilmesi ve sonuç olarak hedefi yüksek hassasiyetle vurması göz önüne alınması gereken problemlerdir. Füze ve roket gibi mühimmatların fırlatılmasında kullanılan iki serbestlik dereceli fırlatma araçlarının dinamik modellenmesi ve denetimi (kontrolü) önem arzeden alandır. Hareketli araçlar üzerine konumlandırıldığında; fırlatma araçlarının denetimleri mühimmat atımı sırasında oluşan itki etkisinin azaltılması ve kısa bir süre içerisinde yeni bir atışa hazırlanılması daha da önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, hedef hassasiyeti yüksek olan iki serbestlik dereceli elektromekanik eyletimli bir fırlatma aracının matematiksel modellenmesi ele alınmış ve itki etkisini azaltıcı yönde denetim sistemi tasarlanmıştır. Bu kapsamda sistemin hareket denklemleri elde edildikten sonra, itki etkisini azaltıcı yönde denetim sistemleri tasarımı gerçekleştirilmiştir. Belirlenen çerçevede hesaplanan tork ve oransal, tümlevsel ve türevsel (PID) denetim işlemi, hesaplanan tork ve kayan kipli denetim ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetim için kaskat denetim şemaları oluşturulmuştur. Sonuç bölümünde denetçilerin performansları karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinde MATLAB® yazılımı ve SIMULINK® modülü kullanılmıştır.

Bilim Kodu : 914.1.084

Anahtar Kelimeler : Fırlatma Aracı, Kayan Kipli Denetim, Hesaplanan Tork, Fırlatma Aracı Dinamiği, Kaskat

Sayfa Adedi : 96

Danışman : Prof. Dr. Metin U. SALAMCI

İkinci Danışman : Dr. Bülent ÖZKAN

DESIGN OF CONTROL SYSTEMS FOR A LAUNCHER TO REDUCE THE THRUST
EFFECT

(M. Sc. Thesis)

Hamza KAMIŞLI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2015

ABSTRACT

Nowadays, launcher used in land vehicles has great importance. Especially, orienting missiles and rockets which are fired from the land vehicles and finally hitting the intended targets with high accuracy are issues that should be taken into consideration. Dynamic modeling and control of the launchers utilized to fire munitions such as missiles and rockets become a significant field. When the launchers are allocated on the moving vehicles, their control, diminishing the thrust effect during the munition firing and preparing the system for a new shot within a short duration get more important. In this study, the mathematical modeling and control of a highly accurate two-degree-of-freedom electromechanically-actuated launcher control system has been designed in order to reduce the impact effect. In this context, after the system dynamic equations are derived, in order to reduce the thrust effect, design of control systems are carried out. Here, the control schemes are constructed as per the computed torque and proportional plus integral plus derivative (PID) control action, computed torque and sliding mode control, and cascaded control structure including computed torque and sliding mode control. The performance characteristics of these methods are compared in the conclusion chapter. In the relevant computer simulations, MATLAB[®] software and SIMULINK[®] module are utilized.

Science Code : 914.1.084

Key Words : Launcher, Sliding Mode Control, Computed Torque, Launcher Dynamics, Cascade

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Metin U. SALAMCI

Co-Supervisor : Dr. Bülent ÖZKAN

TEŞEKKÜR

Öncelikle lisans hayatımdan bu yana bende büyük emeği bulunan, mesleğimdeki ilgi alanımı bulmam konusunda büyük katkısı olan ve yüksek lisansımda da her ihtiyaç duyduğumda bana zaman ayırmak için elinden gelen her şeyi yapan danışman hocam sayın Prof Dr. Metin U. SALAMCI'ya, yine lisans hayatımdan bu yana benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve yüksek lisansımda da her ihtiyaç duyduğumda yanına koşabildiğim eş danışman hocam Dr. Bülent ÖZKAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tezimin aşamalarında yardımını esirgemeyen sistem mühendisim sayın Mete AYDEMİR'e, ihtiyaç duyduğum anda yardımını eksik etmeyen arkadaşım Burak Eren BİRİNCİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca tez boyunca desteklerini esirgemeyen anne ve babama ve de tez yapmam konusunda beni teşvik eden nişanlım Nilay'a gönülden teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. FIRLATMA ARACININ DİNAMİK MODELLENMESİ	9
2.1. Fırlatma Aracının Tanıtılması	9
2.2. Fırlatma Aracının Modellenmesi.....	11
2.2.1. Langrange-Euler yöntemi.....	12
2.2.2. Newton-Euler yöntemi.....	15
2.2.3. Hamiltonian yöntemi	18
2.2.4. Newton-Euler yöntemiyle fırlatma aracının modellenmesi	18
3. FIRLATMA ARACININ DENETİM SİSTEMİNİN TASARLANMASI	35
3.1. PID Denetçisi Tasarımı	35
3.2. Hesaplanan Tork Denetim Yöntemi	37
3.3. Kayan Kipli Denetim.....	39
3.4.Kaskat Denetçi.....	41
3.5. Fırlatma Aracı Sistemi için PID ve Hesaplanan Tork Denetçisi Tasarımı	42

3.6. Fırlatma Aracı Sistemi için Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçi Tasarımı.....	46
3.7. Fırlatma Aracı Sistemi için Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçisi için Kaskat Denetçi Tasarımı	48
4. FIRLATMA ARACININ BENZETİM SONUÇLARI	53
4.1. Atış İtki Tepkisi Olmadan Elde Edilen Benzetim Sonuçları.....	53
4.2. Atış İtki Tepkisi Olduğunda Elde Edilen Benzetim Sonuçları.....	58
4.3. Atış İtki Tepkisi Olan Fırlatma Aracında Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçi Kazanç Katsayılarının Kaskat Denetim Sistemi ile Birlikte Değerlendirilmesi	76
4.4. Atış İtki Tepkisi Olan Fırlatma Aracında Hesaplanan Tork ve PID, Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli ve Kaskat Denetim Sisteminin Ardışık İki Adet Salvo Atışa Maruz Kalması	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR	87
EKLER.....	91
EK-1. Hesaplanan tork ve PID denetçisi MATLAB kodları	92
EK-2. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi MATLAB kodları	93
EK-3. İtki tepki kuvvetinin hesaplanan tork ve PID denetçiye eklenmesi	94
EK-4. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetim için ikili salvo atış.....	95
ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Atış itki etkisi olan denetleyicilerin karşılaştırılması	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Dziopa'nın fırlatma aracı	4
Şekil 1.2. Zhang'ın roket fırlatma aracı sistemi	5
Şekil 1.3. Özkan'ın fırlatma sistemi	6
Şekil 1.4. Dokumacı'nın fırlatma aracı modeli	7
Şekil 2.1. Yan eksen bütünü ve bileşenleri	10
Şekil 2.2. Yükseliş eksenini bütünü ve bileşenleri.....	11
Şekil 2.3. Fırlatma aracı genel görünüm	19
Şekil 2.4. Fırlatma aracına etki eden kuvvetler.....	23
Şekil 2.5. α açısının ayrıntılı gösterimi	25
Şekil 2.6. Fırlatma aracına etkiyen kuvvetlerin moment noktasına göre uzaklıkları.....	29
Şekil 3.1. İkinci dereceden bir sistem için kayan kipli denetim yapısı.....	39
Şekil 3.2. Kaskat denetim şeması	41
Şekil 3.3. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi için kaskat denetçi tasarımı.....	52
Şekil 4.1. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları.....	53
Şekil 4.2. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları.....	54
Şekil 4.3. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	55
Şekil 4.4. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	56

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	57
Şekil 4.6. Sisteme etki eden itki kuvveti tepkisi	58
Şekil 4.7. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları.....	59
Şekil 4.8. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları.....	60
Şekil 4.9. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	61
Şekil 4.10. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	62
Şekil 4.11. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar	63
Şekil 4.12. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 fazla)..	64
Şekil 4.13. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 fazla)	64
Şekil 4.14. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla).	65
Şekil 4.15. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)	65
Şekil 4.16. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla).	66
Şekil 4.17. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 az)	67

Şekil	Sayfa
Şekil 4.18. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 az)	67
Şekil 4.19. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 az)	68
Şekil 4.20. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)..	68
Şekil 4.21. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 az)	69
Şekil 4.22. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 fazla)	70
Şekil 4.23. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 fazla)	70
Şekil 4.24. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)	71
Şekil 4.25. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla).	72
Şekil 4.26. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla).....	72
Şekil 4.27. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 az)	73
Şekil 4.28. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 az)	74
Şekil 4.29. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)	75

Şekil	Sayfa
Şekil 4.30. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 az).....	75
Şekil 4.31. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 az).....	76
Şekil 4.32. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için yükseltme bütünü konum denetimi.....	77
Şekil 4.33. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için döndürme bütünü konum denetimi itki kuvvetine etkisi.....	78
Şekil 4.34. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için yükseltme bütünü denetimi için gereken tork.....	79
Şekil 4.35. Farklı kayan kipli kazançları ve PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için döndürme bütünü denetimi için gereken tork.....	79
Şekil 4.36. İki adet salvo atış gerçekleştiğinde sisteme etki eden itki kuvveti tepkileri.....	80
Şekil 4.37. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları.....	81
Şekil 4.38. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları.....	82
Şekil 4.39. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar.....	82
Şekil 4.40. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar.....	83
Şekil 4.41. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar.....	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Tank üzeri dört podlu fırlatma aracı (DIEHL BGT Defence AvePS).....	1
Resim 1.2. Tank üzeri iki podlu fırlatma aracı (Israel Military Industry Iron Fist)	1
Resim 1.3. Hard kill bir aktif koruma sistemi (Rafael Trophy).....	2
Resim 2.2. Vidalı mil (Umbra Ballscrew)	10

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

m	Kütle
w	Açısal hız
\dot{w}	Açısal ivme
v	Doğrusal hız
\dot{v}	Bağın doğrusal ivmesi
R	Dönme matrisi
F	Kuvvet
M	Moment
τ	Tork
τ_d	Bozucu tork
σ	Kayma yüzeyi
θ_d	Yükseltme bütünü için istenen açısal konum
θ	Yükseltme bütünü için açısal konum
ψ_d	Döndürme bütünü için istenen açısal konum
ψ	Döndürme bütünü için açısal konum
A	Jacobian matrisi
u_{PID}	PID denetçisi
u_{SMC}	Kayan kipli denetçi

Kısaltmalar

Açıklamalar

AKS	Aktif Koruma Sistemi
-----	----------------------

1. GİRİŞ

Fırlatma araçları; ardışık atış (salvo) yeteneğine de sahip genellikle ikili, dördü, altılı ve sekizli olmak üzere birden fazla mühimmat atışını gerçekleştirebilecek özelliktedir. Geliştirilen roket veya füzelerin “pod (İng. guiderail)” olarak adlandırılan çok namlulu fırlatıcı kutuların içerisine yerleştirildiği fırlatma, mekanik konfigürasyonları itibariyle dönel mafsallara sahip iki kollu robot kollar olarak da değerlendirilebilir. Resim 1.1.’de Tank üzeri dört podlu fırlatma aracı gösterilmiştir. Resim 1.2.’de ise tank üzeri iki podlu fırlatma aracı görülmektedir.



Resim 1.1. Tank üzeri dört podlu fırlatma aracı (DIEHL BGT Defence AvePS)
(<http://www.diehl.com/en/diehl-defence/.html>)



Resim 1.2. Tank üzeri iki podlu fırlatma aracı (Israel Military Industry Iron Fist)
(www.imi-israel.com)

Kütleli ve boyutsal özellikleri farklılık göstermekle birlikte, fırlatma araçlarının neredeyse tamamı yan dönme ve yükseliş eksenlerinde olmak üzere iki serbestlik derecesine sahiptir.

Bahsedilen eksenlerdeki eyletim, topçu roketi gibi nispeten ağır ve uzun menzilli mühimmatların fırlatıldığı sistemlerde ortaya çıkan yük gereksiniminden dolayı hidrolik ve çoğunlukla açık çevrimli olarak geliştirilmektedir. Öte yandan, hava savunma sistemleri gibi hedef hassasiyet gereksinimi yüksek kısa menzilli füze ve roketleri atan fırlatma araçlarında düşük yük avantajı da kullanılarak elektromekanik eyletimli ve kapalı çevrim tipi denetimli konfigürasyonlar tercih edilmektedir (Özkan, 2013).

Fırlatma araçlarının kara araçları üzerinde kullanılmasının temel nedeni onlara yöneltilmiş güdümlü veya güdümsüz dış bir tehdidi (RPG vs.) yok etme veya saptırma mantığından kaynaklanmaktadır. Bu kullanımın genel adı aktif koruma sistemidir. Aktif koruma sistemleri (AKS) 'hard kill' ve 'soft kill' olarak ikiye ayrılmaktadır. 'Soft kill' yönteminde tehdit fiziksel tahrip edilmez ancak tehdidin platforma zarar vermesi engellenir. 'Hard kill' yönteminde ise tehdit fiziksel olarak tahrip edilir. En çok kullanılan yöntem hard kill aktif koruma sistemidir. Bu sistemlerde radar tipi antenlerle hassas bir şekilde tespit edilen düşman roket veya füzelerinin, fırlatma sistemi tarafından yapıya ulaşmadan yaklaşık 10 ila 150 m gibi oldukça yakın bir mesafede imha edilmesi istenmektedir (Haug ve Wagner, 2011). Bu tip sistemlerde tepki süresi 1 saniyenin altında olmaktadır (Döğüşken, Kılıçaslan ve Ertekin, 2011). Resim 1.3.'de hard kill bir aktif koruma sistemi görülmektedir.



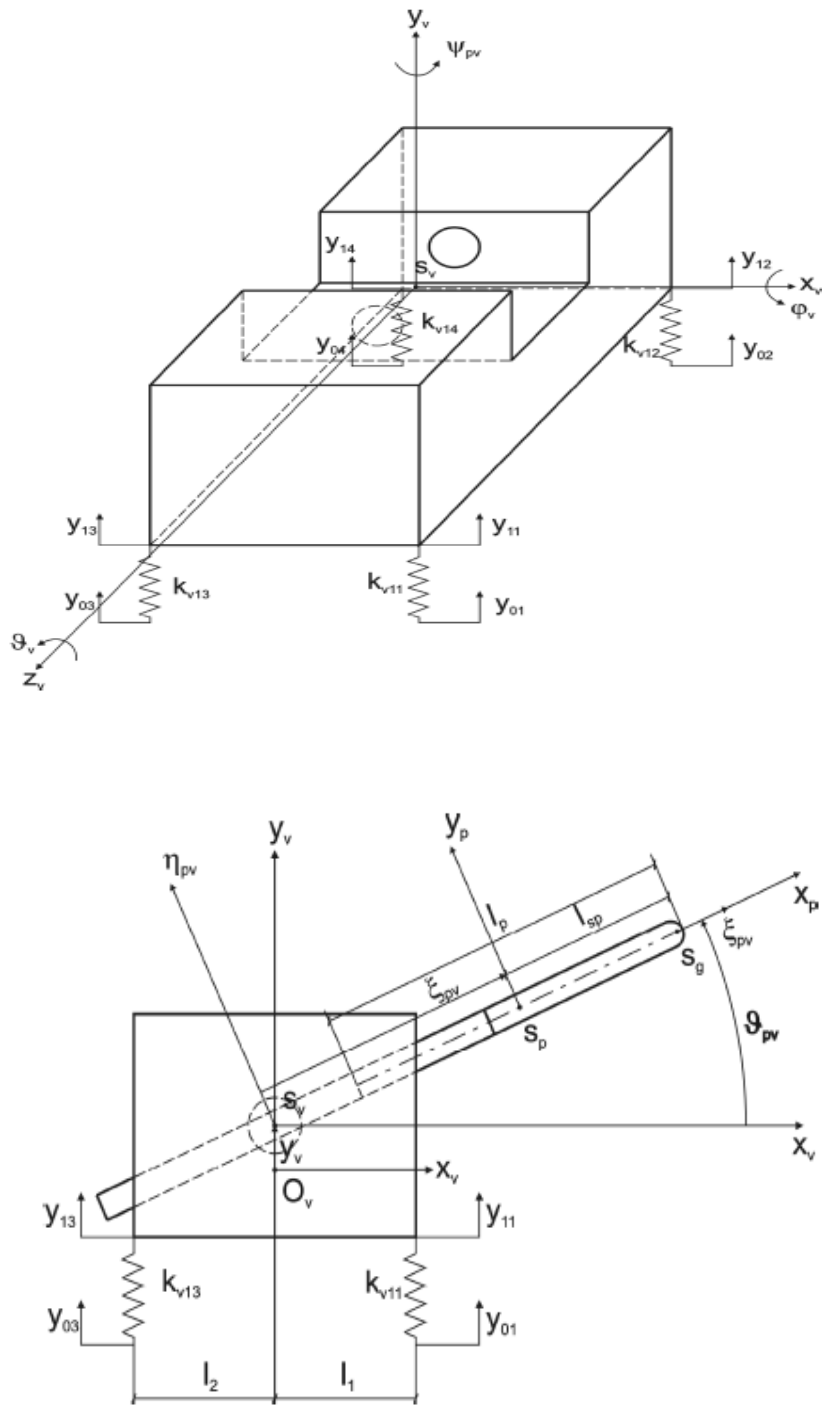
Resim 1.3. Hard kill bir aktif koruma sistemi (Rafael Trophy) (www.rafael.co.il)

Yük fırlatma aracı mekanik yapısı ve fırlatılacak mühimmat ağırlıklarının yanı sıra atış sırası ve sonrasında yapı üzerine etkiyen itki kuvvetlerini de içermekte olup, bu kuvvetler mühimmatın pod içerisinde hareketsiz konumda tutulduğu ‘alıkoyma aşaması’, poda bütünleşmiş raylar üzerinde ilerlediği ‘güdülme aşaması’, mühimmat baş kısmının fırlatıcı kutu dışına çıkmasını müteakiben arka kısmının pod tavanına doğru döndüğü ‘başeğme safhası’ ve mühimmatın tamamen pod dışına çıkarak atmosfer içerisinde yolalmaya başladığı ‘uçuş aşaması’ sırasında meydana gelmektedir (Cömert ve Özgüven, 2004).

“Saçılım” tabir edilen mühimmatın belirlenen hedef noktasından sapmasına neden olan başlıca fırlatma hataları itki kaçıklıkları, kütle dengesizlikleri, mühimmat-ray arasındaki doğrusal olmayan sürtünme karakteristiği, yapının elâstik özelliği ve üretim hataları olup, denetimli sistemlerde denetim sisteminden kaynaklanan denetleyici, eyletici ve algılayıcı hataları da saçılımı artırıcı yönde etki yapmaktadır. Yukarıda sıralanan hataların etkisini ortadan kaldırmak veya en azından asgarî bir seviyeye çekmek için, açık çevrimli fırlatma araçlarında atış öncesinde yandönme ve yükseliş platformları kilitlemektedir (Cömert ve Özgüven, 2004).

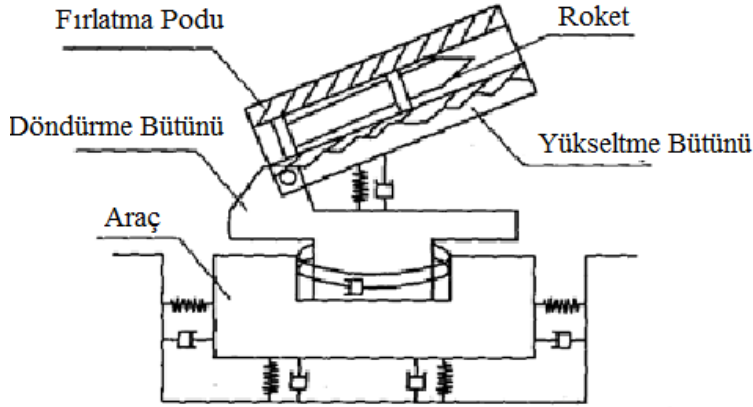
Denetim sistemine temel oluşturan fırlatma aracı dinamik modeli çıkarılırken yandönme ve yükseliş platformları elâstik özellikleri haiz gövdeler olarak ele alınırken, yükseliş platformunu kaldırmak amacıyla kullanılan pistonlar (hidrolik veya elektromekanik tip) ile aracın zemin üzerine tesviyesini sağlayan mekanik ayaklar da yay ve sönümleyici olarak değerlendirilmektedir (Dziopa ve diğerleri 2010). Dziopa ve diğerleri (Dziopa, Krzysztofik ve Koruba, 2010) fırlatma aracını Şekil 1.1.’de görüldüğü gibi dört serbestlik dereceli olarak ele almış ve matematiksel modelini çıkarmıştır. Ele alınan sistemde yan ve yükseliş eksenleri ile hareketli araçtan gelen titreşim de dikkate alındığından dolayı; yuvarlanma eksenleri ve oluşan doğrusal eksenlerde dikkate alınmıştır. Bu sayede fırlatma aracı dört serbestlik derecesine ulaşmıştır. Fırlatma aracı yan ekseninde simetrik değildir.

Şekil 1.1.’de de görüldüğü gibi fırlatma aracı iki temel kütlede ve dört adet deforme olabilen elemandan oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Dziopa'nın fırlatma aracı (Dziopa, Krzysztofik ve Koruba, 2010)

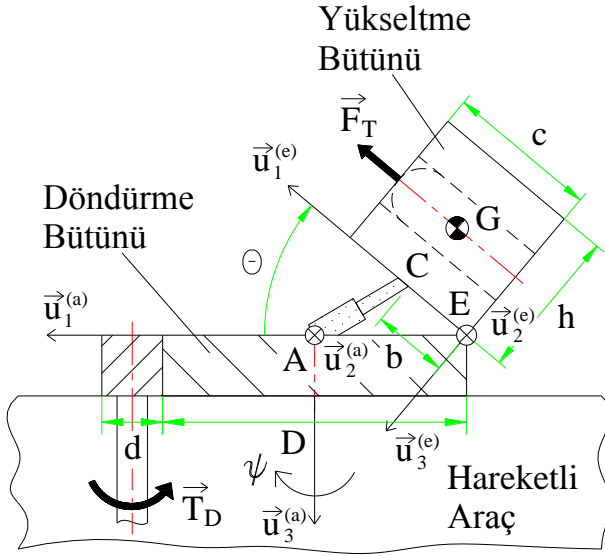
Fırlatma aracı dinamik sistemini ele alan başka bir çalışmada ise yükseltme ve döndürme bütünlüğünün yine matematiksel modelleri esnek dinamik davranışları da göz önüne alınarak yapılmıştır (Zhang ve Xiao,2005). Şekil 1.2.'de Zhang'ın roket fırlatma aracı sistemi gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Zhang'ın roket fırlatma aracı sistemi (Zhang ve Xiao, 2005)

Şekil 1.2.'de de görüldüğü üzere; bu çalışmada fırlatma aracı, hareketli fırlatma podu bulunan yükseltme bütünü ve sabit olan döndürme bütünü olacak şekilde iki alt sistemden oluşmaktadır.

Buraya kadar yapılan çalışmalarda görüldüğü gibi fırlatma araçlarının dinamik modellenmesi yapılmış ancak nasıl denetleyebileceği hakkında yeterli çalışma literatürde yer almamıştır. Fırlatma aracının modellenmesi ve denetimi çalışması bu tezin de çıkış noktası olan “Elektromekanik Eyletimli Bir Fırlatma Sisteminin Dinamik Modellenmesi ve Denetimi” makalesidir (Özkan, 2013). Şekil 1.3.'de Özkan'ın ele aldığı fırlatma sistemi gösterilmiştir.



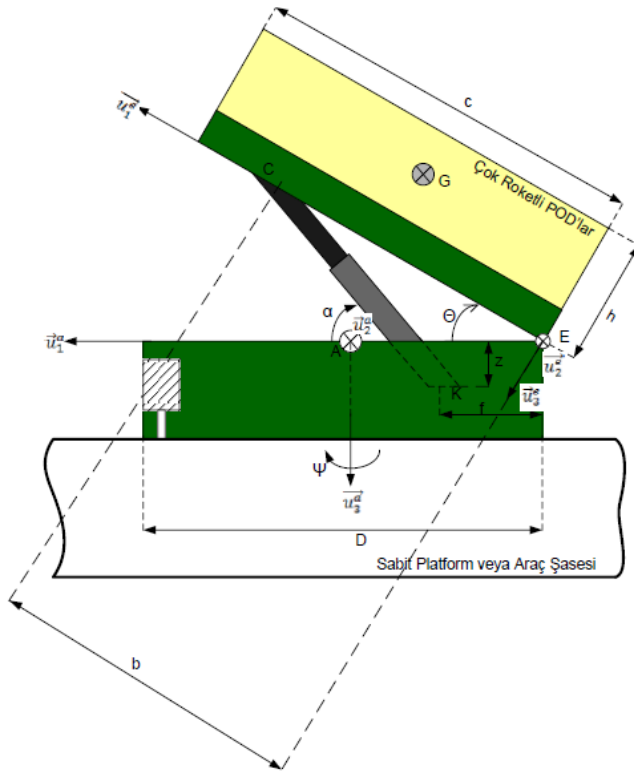
Şekil 1.3. Özkan'ın fırlatma sistemi (Özkan, 2013)

Özkan (2013), bu çalışmada fırlatma aracını modellemiş ve oransal, tümlevsel ve türevsel denetleyici ile denetim uygulamış ve sonuçlar elde etmiştir. İtki etkisini de değerlendiren Özkan, tek bir atış uygulamıştır. Bu tezde Özkan'ın çalışmasından boyutsal ve dinamik parametreler farklı olarak alınmıştır. Fırlatma aracının denetimi için hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli denetim ve itki etkisini azaltıcı denetim sistemi kaskat denetçi tasarlanmıştır. Parametre belirsizlikleri ele alınmış ve salvo atış gerçekleştirilmiştir.

Bu teze benzer bir çalışmada "Bir Roket Lançerinin Matematiksel Benzetimi, PID ve Kayan Kipli Denetim Yöntemleri ile Denetimi" adlı çalışmadır (Dokumacı). Dokumacı çalışmasında sistemi modelledikten sonra hesaplanan tork + PID denetçisi ve hesaplanan tork + kayan kipli denetçisi kullanmıştır. Benzetimlerin süreleri çok uzun alınmış ve itki etkisinin sönümlenme zamanlarına değinilmemiştir. Kullanılan roket için belirli bir yörünge oluşturulmuş ve denetleyicinin bu yörüngeyi takip etmesi istenmiştir. Ayrıca motor akımları çıkarılmıştır (Dokumacı, 2014).

Bu tezde hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli denetim farklı bir sistem için ele alınmıştır. İtki kuvveti etkisini en aza indirgeyen kaskat denetçi kullanılmıştır. Denetim sistemleri karşılaştırılmış ve ilgili sonuçlar sunulmuştur. Denetçilere belirli bir yörünge verilmemiş ve en kısa zamanda (0,5 s) denetleme performanslarını da dikkate

olarak; itki kuvveti etkisini en aza indirecek şekilde denetleyici tasarlanılmıştır. Salvo atışlarda ise; oluşan itki etkisi en kısa zamanda sönümleyebilecek denetçilerin performanslarına bakılmıştır. Kaskat denetim sistemi için, kayan kipli denetçinin kazanç katsayıları değerlendirilmiştir. Parametre belirsizliklerine bakılmış ve farklı itki kuvvet ve moment değerleri uygulanmıştır. Dokumacı'dan farklı sistem parametreleri ve kazanç katsayıları alınmıştır. Şekil 1.4.'de Dokumacı'nın fırlatma aracı modeli görülmektedir.



Şekil 1.4. Dokumacı'nın fırlatma aracı modeli (Dokumacı, 2014)

Literatürde yer alan çalışmalar içerisinde, fırlatma aracı dinamiği ile ilgili yapılmış bir çok çalışma bulunmasına rağmen, fırlatma aracının denetimi konusunda çok fazla çalışma yoktur. Literatür taraması fırlatma aracı özelinde değil de fırlatma aracı ile benzer olan robot kolu modellenmesi ve denetimi konusunda yapıldığında ise karşımıza birçok çalışma çıkmaktadır. Konu ile ilgili yazılmış Türkçe ve İngilizce kitaplar da mevcuttur. Bu kitaplardan bir tanesi özellikle fırlatma aracı modellenmesi konusunda referans alınan Bingül ve Küçük'ün "Robot Dinamiği ve Kontrolü (2008: 3, 62)" kitabıdır (Dokumacı, 2014).

Bu tezin amacı, kara araçlarından atılan füze ve roketler için geliştirilen ve hedef hassasiyetinin yüksek olduğu bir elektromekanik fırlatma aracının matematiksel modelinin çıkarılması ve itki etkisini de azaltan uygun denetim sistemlerinin tasarlanmasıdır. Bu kapsamda, diğer çalışmalardan farklı olarak hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli denetim çalışmaları yapılmış ve kayan kipli hesaplanan tork denetimi için kaskat denetçi tasarlanmış ve sonuçları sunulmuştur. Denetçilerin performansları değerlendirilmiştir.

Bu tezde ilk olarak sistem tanımlanmış; yan ve yükseliş bütünlerinin dinamik denklemleri çıkarılmıştır. Bu yapılırken fırlatma aracı iki eksenli bir robot kolu gibi ele alınmış ve robot dinamiğinin çıkarılmasında kullanılan yöntemlerden Newton-Euler yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca elektromekanik eyletici sisteminde eyletici ve güç aktarım parametreleri de denkleme katılarak sistemin denetlenmesi için gereken nihai denklem oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde hesaplanan tork ve PID denetleyicisi tasarlanmıştır. Ayrıca, PID denetçisinden daha gürbüz olan kayan kipli denetim ve hesaplanan tork denetçisi birlikte fırlatma aracına uygulanmıştır. Kayan kipli denetim ve hesaplanan tork denetimi için daha önce çalışılmayan kaskat denetçisi oluşturulmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde, tasarlanan denetçi ile hedefe ulaşan füze için benzetimler yapılmıştır. Parametre belirsizlikleri de göz önüne alınmıştır. Ayrıca kaskat denetim sistemi için, kayan kipli denetçinin kazanç katsayıları değerlendirilmiştir. Salvo atış itki kuvvetlerinin ve momentlerinin denetçiye etkisi de bu bölümde incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise üçüncü bölümde tasarlanan denetleyicilerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca sonuç ve tartışma da bu bölümde sunulmuştur.

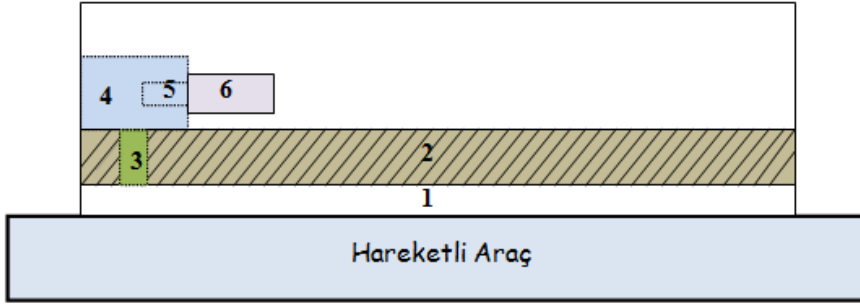
2. FIRLATMA ARACININ DİNAMİK MODELLEMESİ

Fırlatma aracının denetimini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmek için öncelikle aracın karakteristiğinin ve dinamik parametrelerinin çok iyi belirlenmesi gerekmektedir. Bu bölümde ilk olarak fırlatma aracının alt bütünleri tanıtılmıştır. İkinci olarak dinamik denklemlerin çıkarılabileceği yöntemlere değinilmiş ve Newton - Euler yöntemiyle dinamik denklemler elde edilmiştir. Elektrikli doğru akım servomotorunun belirsizlikleri dinamik denklemlere yansıtılmamıştır. Servomotorun oluşturduğu referans tork değeri kullanılmıştır. Modelde oluşan parametre belirsizliklerine de yer verilmiştir.

2.1. Fırlatma Aracının Tanıtılması

Genellikle hareketli araç üzerine konumlandırılan fırlatma araçları iki serbestlik derecesine sahiptir. Bu özellikleri bakımından fırlatma araçları robot koluna benzetilebilir. Sistem iki eksenenden oluşmaktadır; Bu eksenler yalpalama olarak bilinen, yan eksen açısını belirleyen yan eksen; diğeri ise yunuslama açısını belirleyen yükseliş eksenidir.

Yan ekseninde, fırlatma aracının yan eksenine aynı çap büyüklüğünde bir çember dişli bulunmaktadır. Bu çember dişli, hareketli araç üzerinde bulunan büyük rulman üzerinde serbestçe dönebilmektedir. Bütüne sabitlenmiş olan pinyon dişli tarafından çember dişli tahrik edilir. Pinyon dişli ile servo elektrik motoru arasında aktarma oranını ayarlayan bir dişli kutusu yer alır. Sistemin referans tork girişini servo elektrik motoru sağlamaktadır. Yan eksen bütünü ve bileşenleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Yan eksen bütünü ve bileşenleri

Şekilde görülen rakamlar;

1. Rulman
2. Çember Dişli
3. Pinyon Dişli
4. Dişli Kutusu
5. Servomotor Mili
6. Servomotor

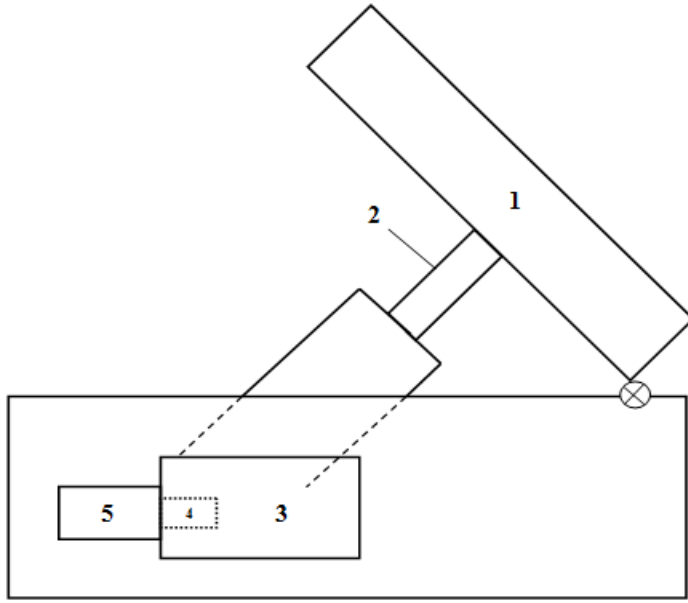
olarak tanımlanmaktadır.

Yükseliş eksenini ise yan eksene dönebilen iki noktadan bağlanmıştır ve bu noktalar dönebilmektedir. Yükseliş tablasının yükselme hareketi bilyavidalı mil piston sistemi ile sağlanmaktadır. Bilyavidalı mil, Resim 2.1.'de de görüldüğü üzere; dönme hareketini doğrusal harekete çeviren ve içinde bilya dolanan vida yapısına sahip bir makine elemanıdır.



Resim 2.1. Vidalı mil (Umbrag Ballscrew) (www.umbragroup.it/en/products)

Bilyavidalı milin dönmesini servo elektrik motoru sağlamakta olup torku arttırabilmek için bilyavidalı mil ile servomotor arasında dişli kutusu bulunmaktadır. Yükseliş eksen bütünü ve bileşenleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Yükseliş eksen bütünü ve bileşenleri

Şekilde görülen rakamlar;

1. Yükseliş Tablası
2. Bilyavidalı Mil
3. Dişli Kutusu
4. Servomotor Mili
5. Servomotor

olarak tanımlanmaktadır.

2.2. Fırlatma Aracının Modellenmesi

Fırlatma aracı daha öncede değinildiği gibi iki kollu bir robot koluna benzemektedir. Bu yüzden fırlatma araçlarının modellenmesinde temel olarak Langrange-Euler, Newton-Euler ve Hamiltonian yöntemleri kullanılmaktadır.

2.2.1. Langrange-Euler yöntemi

Bu yöntem kinetik ve potansiyel enerji farkından yararlanarak karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan bir yöntemdir. K ve P sırasıyla fırlatma aracının kinetik ve potansiyel enerjisini gösterecek olursa Langrange fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (2.1)$$

Burada q dönel eklemler için eklem açısını, \dot{q} eklem dönme hızını ifade eder. Langrange bir sistemin toplam kinetik enerjisini veren en karmaşık ifadedir. Dönel bir eklem için i . bağı kinetik enerjisini incelemek gerekir. i . bağı üç boyutlu uzayda hem doğrusal hem de açısal hızla hareket etmektedir. n eklemli bir mekanizmada kinetik enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (v_i)^T m_i v_i + (w_i)^T I_i w_i \quad (2.2)$$

Burada;

- m_i : i . bağı kütlesini,
- v_i : i .bağın kütle merkezine ana koordinat sistemine göre doğrusal hızını,
- w_i : i .bağın kütle merkezine ana koordinat sistemine göre açısal hızını,
- I_i : i .bağın kütle merkezine ana koordinat sistemine göre eylemsizlik momenti tensörünü gösterir.

Bir bağı eylemsizlik momenti tensörü, katı bir nesnenin kütle dağılımını gösteren 3 boyutlu bir matris olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$I_m = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Eş 2.3'de verilen I_m matrisi altı adet birbirinden bağımsız eleman içeren bir matristir. Köşegende yer alan elemanlar eylemsizlik momenti, geri kalan simetrik elemanlar ise eylemsizlik çarpanı olarak ifade edilir.

Toplam kinetik enerjiyi bulmada yazılması gereken ikinci bir matris de bağ Jakobiyen matrisi J_i 'dir. Bunun için i . bağıın kütle merkezinin ana koordinat sistemine göre konumu h_i vektörü kullanılarak tanımlanır.

$$h_i = {}^0iT\Delta h_i \quad (2.4)$$

Burada, Δh_i , i . ekleme yerleştirilen koordinat sistemine göre i . bağıın kütle merkezinin koordinatlarını, 0iT ise bir eklemün dönüşüm matrisi olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$${}^0iT = \begin{bmatrix} {}^0iR & P_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Burada 0iR ve P_i sırasıyla i . bağa ait koordinat sisteminin ana koordinat sistemine göre yönelimini ve konumunu göstermektedir.

Kinetik enerjiyi elde etmek için gerekli Jakobiyen matrisi şu şekildedir;

$$J_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} \dots \frac{\partial h_i}{\partial q_i} & 0 \\ \xi_1 z^1 \dots \xi_i z^i & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Burada A_i doğrusal ve B_i açısal hızlardan kaynaklanan Jakobiyen matrisleri, ξ_i ise eklem tip değişkenini, z^i ise eklemün birim vektörünü göstermektedir.

Hız ifadeleri ise aşağıdaki gibi yeniden tanımlanabilir;

$$v_i = A_i \dot{q} \quad (2.7)$$

$$w_i = B_i \dot{q} \quad (2.8)$$

Eş 2.7 ve Eş 2.8'de elde edilen ifadeler Eş 2.2'de yerine konularak toplam kinetik enerji ifadesi şu şekilde ifade edilir;

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \dot{q} \quad (2.9)$$

Eş 2.9 atalet tensörü $D(q)$ cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$K(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (2.10)$$

$D(q)$ simetrik ve pozitif tanımlı matris olup, Eş 2.11’de gösterildiği gibidir.

$$D(q) = \sum_{i=1}^n [(A_i)^T m_i A_i + (B_i)^T I_i B_i] \quad (2.11)$$

Langrange fonksiyonunu tamamen ifade edebilmek için bir manipülatörün toplam kinetik enerji tanımlandıktan sonra toplam potansiyel enerjinin de tanımlanması gerekir;

$$P(q) = \sum_{i=1}^n [m_i g^T h_i] \quad (2.12)$$

Burada g ; yer çekimi ivmesini göstermektedir.

Toplam kinetik ve potansiyel enerjiler Eş 2.1’de yerine yazılırsa;

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} - m g^T h \quad (2.13)$$

Bir fırlatma aracının hareketinden dolayı oluşan denklem Eş 2.14’de görüldüğü gibi ifade edilir;

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau \quad (2.14)$$

Burada τ eyleyicilerde oluşan $n \times 1$ boyutlu tork vektörüdür. Eş 2.14’deki L ifadesi yerine kinetik ve potansiyel enerji ifadeleri yazılırsa;

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial K}{\partial q} + \frac{\partial P}{\partial q} = \tau \quad (2.15)$$

Kinetik ve potansiyel enerji denklemleri yerine konulursa ;

$$\sum_{j=1}^n D_{ij}(q) \ddot{q}_j + \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n c_{kj}^i(q) \dot{q}_k \dot{q}_j + y_i(q) + b_i(\dot{q}) = \tau_i \quad (2.16)$$

şeklinde olur. Burada ilk terim bağların hareketlerinden kaynaklanan kuvvet ve torku temsil eden ivme terimi, ikinci terim Coriolis ve merkezkaç kuvvet vektörü ve üçüncü terim yer çekimi ivmesini göstermektedir. İkinci ve üçüncü terimin açık hali şu şekildedir;

$$c_{kj}^i(q) = \frac{\partial}{\partial q_k} D_{ij}(q) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q_i} D_{kj}(q) \quad 1 \leq i, j, k \leq n \quad (2.17)$$

$$y_i(q) = -\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^n g_k m_j A_{ki}^j(q) \quad (2.18)$$

Sürtünme ihmal edilirse sonuç olarak bir fırlatma aracının dinamik denklemi şu şekilde ifade edilebilir;

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau_i \quad (2.19)$$

2.2.2. Newton-Euler yöntemi

Bir robot kolun dinamik denklemlerine benzeyen fırlatma aracının hareket denklemlerinin çıkarılmasında kullanılan bir başka yöntemde Newton-Euler yöntemidir. Bu yöntem de robot kolunun doğrusal ve açısal hareketleri kullanılarak dinamik denklemleri çıkarılmaktadır. Katı cisme etkiyen toplam kuvvet doğrusal momentum değişimine eşittir ve şu şekilde gösterilir;

$$F = m\dot{v}_c \quad (2.20)$$

Benzer olarak açısal momentum değişim oranı cisme etkiyen torkların toplamına eşittir ve şu şekilde gösterilir;

$$N = {}^c I \dot{w} + w x {}^c I w \quad (2.21)$$

Aşağıdaki Newton ve Euler denklemlerini kullanarak kuvvet ve torklar hesaplanabilir;

$$F_i = m\dot{v}_{c_i} \text{ (Newton Denklemi)} \quad (2.22)$$

$$N_i = {}^{c_i} I \dot{w}_i + w_i x {}^{c_i} I w_i \text{ (Euler Denklemi)} \quad (2.23)$$

Bu yöntemde; açısal ve doğrusal hız ve ivmeleri kullanarak her bir eklemin kütle merkezine etkiyen kuvvet ve torkları veren dışa dönük ardışık denklemler ve kuvvet ve moment dengesini veren içe dönük denklemler kullanılmaktadır.

Dışa dönük ardışık denklemler

Bir eklemden diğerine doğru iletilen açısal hız;

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (i=0,1,2,\dots,n) \quad (2.24)$$

Dönel eklem için açısal ivme;

$${}^{i+1}\dot{w}_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i \dot{w}_i + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} + {}^{i+1}R {}^i w_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (2.25)$$

Eğer eklem prizmatik ise açısal ivme;

$${}^{i+1}\dot{w}_{i+1} = {}^{i+1}R {}^i \dot{w}_i \quad (2.26)$$

Dönel eklemin doğrusal ivmesi;

$${}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = {}^{i+1}R ({}^i \dot{w}_i \times {}^i P_{i+1} + {}^i w_i \times ({}^i w_i \times {}^i P_{i+1})) + {}^i \dot{v}_i \quad (2.27)$$

Dönel bir eklemin kütle merkezinin doğrusal ivmesi;

$${}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} = {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}} + {}^{i+1}w_{i+1} \times ({}^{i+1}w_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \quad (2.28)$$

Sonuçta her bağıın kütle merkezine uygulanan tork ve kuvvet değerleri Newton-Euler Yöntemi kullanılarak şu şekilde bulunur;

$${}^{i+1}F_{i+1} = m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{C_{i+1}} \quad (2.29)$$

$${}^{i+1}N_{i+1} = {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}\dot{w}_{i+1} + {}^{i+1}w_{i+1} \times {}^{C_{i+1}}I_{i+1} {}^{i+1}w_{i+1} \quad (2.30)$$

Yukarıdaki denklemlerde aşağıda belirtilen tanımlamalar yapılmıştır;

- w_i : i. bağı açısız hızı
 \dot{w}_i : i. bağı açısız ivmesi
 \dot{v}_i : i. bağı doğrusal ivmesi
 \dot{v}_{ci} : i. bağı kütle merkezine doğrusal ivmesi
 m_i : i. bağı kütlesi
 ${}^{i+1}R_i$: i ile i+1. bağlar arasındaki dönme matrisi
 cI_i : i. bağı kendi kütle merkezine göre eylemsizlik momenti tensörü
 ${}^iP_{C_i}$: i. bağı kütle merkezine göre konumu
 ${}^iP_{i+1}$: i. bağı i+1. bağına göre konumu
 F_i : i. bağı kütle merkezine etkiyen kuvvet
 N_i : i. bağı kütle merkezine etkiyen tork
 ${}^{i+1}Z_{i+1}$: $[0 \ 0 \ 1]^T$ matrisi

İçe dönük ardışık denklemler

i. ekleme etkiyen kuvvet dengesi;

$${}^iF_i = {}^if_i - {}_{i+1}{}^iR^{i+1}f_{i+1} \quad (2.31)$$

Kütle merkezine göre yazılan tork dengesi;

$${}^iN_i = {}^in_i - {}^in_{i+1} + (-{}^iP_{C_i})x {}^if_i - ({}^iP_{i+1} - {}^iP_{C_i})x^{i+1}f_{i+1} \quad (2.32)$$

Eş 2.31'den if_i ifadesi çekilip Eş 2.32'de yerine yazılırsa sonuç olarak kuvvet ve moment dengeleri şu şekilde bulunur;

$${}^if_i = {}_{i+1}{}^iR^{i+1}f_{i+1} + {}^iF_i \quad (2.33)$$

$${}^in_i = {}^in_i + {}_{i+1}{}^iR^{i+1}n_{i+1} + {}^iP_{C_i}x {}^iF_i + {}^iP_{i+1}x {}_{i+1}{}^iR^{i+1}f_{i+1} \quad (2.34)$$

Burada; f_i ve n_i sırasıyla i . ekleme $i-1$. eklem tarafından uygulanan kuvvet ve momenti, F_i ve N_i ise sırasıyla i . bağıın kütle merkezine etkiyen kuvvet ve momenti göstermektedir.

2.2.3. Hamiltonian yöntemi

Bir robot kolunun dinamik modelinin çıkarılmasındaki bir başka yöntem de Hamiltonian Yöntemi'dir. Bu yöntem kinetik ve potansiyel enerjinin toplamından oluşmaktadır.

$$H = K + V \quad (2.35)$$

Burada; K bir robot kolunun kinetik enerjisini V ise potansiyel enerjisini göstermektedir. Hamiltonian yönteminde bir robot eklemine etkiyen torklar şu şekildedir;

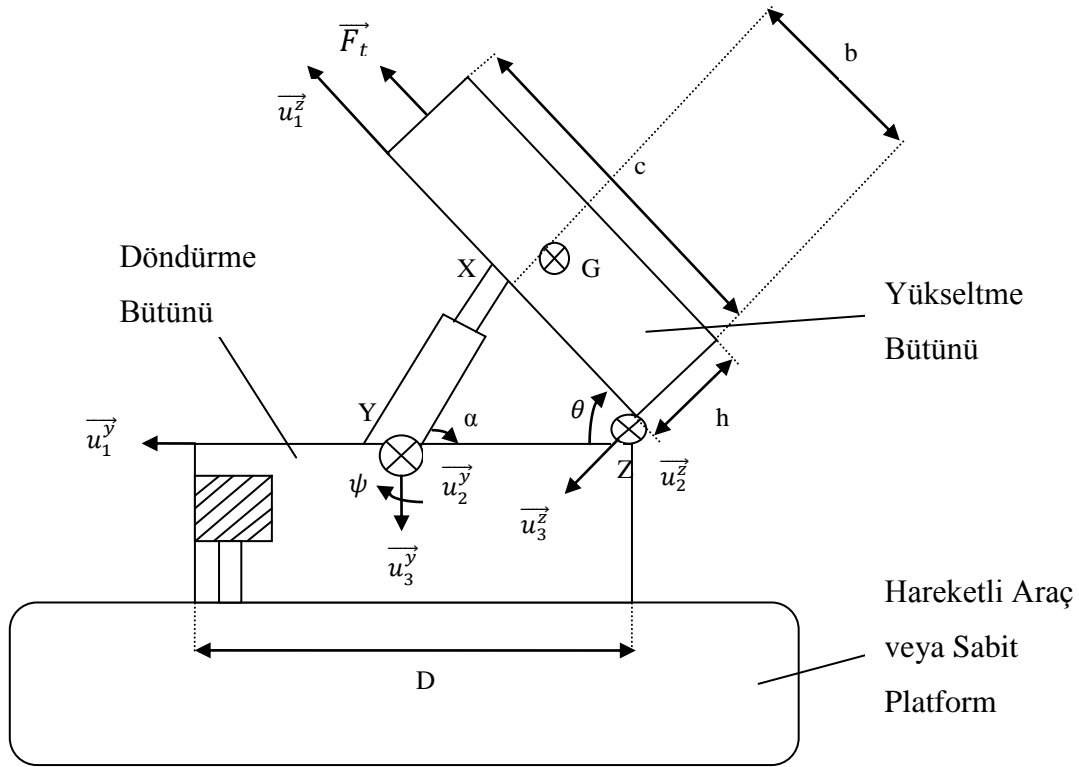
$$\frac{\partial H(q, \dot{q})}{\partial t} = \dot{q}^T \tau \quad (2.36)$$

Bu denklemde $\frac{\partial H(q, \dot{q})}{\partial t}$ terimi n serbest dereceli bir robot için zincir kuralına göre açılırsa aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{\partial H}{\partial \dot{q}_1} \ddot{q}_1 + \frac{\partial H}{\partial q_1} \dot{q}_1 + \frac{\partial H}{\partial \dot{q}_2} \ddot{q}_2 + \frac{\partial H}{\partial q_2} \dot{q}_2 \dots \frac{\partial H}{\partial \dot{q}_n} \ddot{q}_n + \frac{\partial H}{\partial q_n} \dot{q}_n = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_n] \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \dots \\ \tau_n \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.2.4. Newton-Euler yöntemiyle fırlatma aracının modellenmesi

Langrange-Euler ve Hamiltonian yöntemlerinde sistemin kinetik ve potansiyel enerjileri belirlenmesi gerektiğinden her bir ekleme gelen kuvvet ve torkların elde edilmesi zordur. Oysa Newton-Euler yöntemi kullanılırsa eklemlerin kuvvet ve torkları doğrudan elde edileceğinden dolayı tasarımcının işi kolaylaşacak gerekli eyleticileri ve diğer bileşenleri rahatça seçebilecektir. Bu sebepten dolayı fırlatma aracının dinamik modellenmesinde Newton-Euler Yöntemi seçilmiştir. Dinamik modellenecek sistem Şekil 2.3.'de görülmektedir.



Şekil 2.3. Fırlatma aracı genel görünüm

Daha önce de bahsedildiği gibi fırlatma aracı iki serbestlik dereceli bir robot koluna benzer dinamiğe sahiptir. Sistem modellenmesi, Şekil 2.3.'de de görüldüğü gibi; D döndürme bütünü dişli rulman çapını, G sistemin ağırlık merkezini, \vec{F}_t roketten dolayı yükseltme bütününe etkiyen itki kuvvetini, b, c ve h sırasıyla yükseltme bütününe pistonun bağlandığı noktanın arka kısmına uzaklığı, yükseltme bütünü kütle merkezinin arka kısmına uzaklığı ve yükseltme bütünü yüksekliğini α , θ ve ψ açıları sırasıyla piston ile döndürme eksenindeki açıyı, yükseltme bütünü ile döndürme bütünü arasındaki denetlenmesi gereken açıyı ve döndürme bütünü denetlenmesi gereken açısını göstermektedir. Ayrıca, x eksenini \vec{u}_1^z , y eksenini \vec{u}_2^y ve de z eksenini \vec{u}_3^z , yan eksen u^y ve de yükseliş eksenini u^z değişkenleri ile tanımlanmıştır.

Bu değişkenleri tanımladıktan sonra eğer C_0 sabit eksen takımını, C_y yükseltme bütünü eksen takımını ve C_z döndürme bütünü eksen takımını, gösterecek olursa; platformdan eksenlere koordinat dönüşümü aşağıdaki şekilde olur;

$$C_0 \rightarrow {}^0R C_y \rightarrow {}^2R C_z \quad (2.38)$$

Burada ${}^0R = z^{u_3\psi}$ ve ${}^2R = z^{u_2\theta}$ olarak gösterilebilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır;

$${}^0R = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$${}^2R = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

Yan eksen ve yükseliş eksenleri için dışa dönük denklemler yazılırsa;

Yan eksen açısal hızı

Eş 2.24'de $i=0$ (sabit platform) için değeri yerine yazılarak;

$${}^1w_1 = {}^0R {}^0w_0 + \dot{\theta}_1 {}^1Z_1 \quad (2.41)$$

Eş 2.41'de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; Eş 2.39 ve ${}^0w_0 = 0$, $\dot{\theta}_1 = \dot{\psi}$ ve

${}^1Z_1 = \overrightarrow{u_3^y}$ değerleri yerine yazılırsa;

$${}^1w_1 = \dot{\psi} \overrightarrow{u_3^y} \quad (2.42)$$

Yan eksen açısal ivmesi

Eş 2.25'de $i=0$ (sabit platform) için değeri yerine yazılarak;

$${}^1\dot{w}_1 = {}^0R {}^0\dot{w}_0 + \ddot{\theta}_1 {}^1Z_1 + {}^0R {}^0w_0 \times \dot{\theta}_1 {}^1Z_1 \quad (2.43)$$

Eş 2.43'de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; Eş 2.39 ve ${}^0w_0 = 0$, ${}^0\dot{w}_0 = 0$,

$\dot{\theta}_1 = \dot{\psi}$, $\ddot{\theta}_1 = \ddot{\psi}$ ve ${}^1Z_1 = \overrightarrow{u_3^y}$ değerleri yerine yazılırsa;

$${}^1\dot{w}_1 = \ddot{\psi} \vec{u}_3 \quad (2.44)$$

Yan eksen doğrusal ivmesi

Eş 2.27’de $i=0$ (sabit platform) için değeri yerine yazılarak;

$${}^1\dot{v}_1 = {}^0R({}^0\dot{w}_0 x {}^0P_1 + {}^0w_0 x ({}^0w_0 x {}^0P_1) + {}^0\dot{v}_0) \quad (2.45)$$

Eş 2.45’de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; Eş 2.39 ve ${}^0\dot{w}_0 = 0$, ${}^0w_0 = 0$, ${}^0P_1 = 0$ ve ${}^0\dot{v}_0 = 0$ değerleri yerine yazılırsa;

$${}^1\dot{v}_1 = 0 \quad (2.46)$$

Yan eksen, kütle merkezinin doğrusal ivmesi

Eş 2.28’de $i=0$ (Sabit platform) için değeri yerine yazılarak;

$${}^1\dot{v}_{C_1} = {}^1\dot{w}_1 x {}^1P_{C_1} + {}^1w_1 x ({}^1w_1 x {}^1P_{C_1}) + {}^1\dot{v}_1 \quad (2.47)$$

Eş 2.47’de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; ${}^1\dot{w}_1 = \ddot{\psi}$, ${}^1P_{C_1} = 0$, ${}^1w_1 = \dot{\psi}$ ve Eş 2.46 değerleri yerine yazılırsa;

$${}^1\dot{v}_{C_1} = 0 \quad (2.48)$$

Yükseliş ekseni açısal hızı

Eş 2.24’de $i=1$ değeri yerine yazılarak;

$${}^2w_2 = {}^2R {}^1w_1 + \dot{\theta}_2 {}^2Z_2 \quad (2.49)$$

Eş 2.49’da yükseliş ekseni için Eş 2.40, Eş 2.42 ve $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}$, ve ${}^2Z_2 = \vec{u}_2$ değerleri yerine yazılır, gerekli ara işlemler yapılırsa;

$${}^2w_2 = \dot{\psi} \sin(\theta) \overrightarrow{u_1^z} + \dot{\psi} \cos(\theta) \overrightarrow{u_3^z} + \dot{\theta} \overrightarrow{u_2^z} \quad (2.50)$$

Yükseliş eksenini açısal ivmesi

Eş 2.25'de $i=1$ değeri yerine yazılarak;

$${}^2\dot{w}_2 = {}^2R \cdot {}^1\dot{w}_1 + \ddot{\theta}_2 \cdot {}^2Z_2 + {}^2R \cdot {}^1w_1 \times \dot{\theta}_2 \cdot {}^2Z_2 \quad (2.51)$$

Eş 2.51'de yükseliş eksenini için Eş 2.40, Eş 2.42, Eş 2.44 ve $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}$, $\ddot{\theta}_2 = \ddot{\theta}$ ve

${}^2Z_2 = \overrightarrow{u_2^z}$ değerleri yerine yazılır, gerekli ara işlemler yapılırsa;

$${}^2\dot{w}_2 = [\dot{\psi} \sin(\theta) + \theta \dot{\psi} \cos(\theta)] \overrightarrow{u_1^z} + [\dot{\psi} \cos(\theta) + \theta \dot{\psi} \sin(\theta)] \overrightarrow{u_3^z} + \ddot{\theta} \overrightarrow{u_2^z} \quad (2.52)$$

Yükseliş eksenini doğrusal ivmesi

Eş 2.27'de $i=1$ değeri yerine yazılarak;

$${}^2\dot{v}_2 = {}^2R ({}^1\dot{w}_1 \times {}^1P_2 + {}^1w_1 \times ({}^1w_1 \times {}^1P_2)) + {}^1\dot{v}_1 \quad (2.53)$$

Eş 2.53'de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; Eş 2.40, Eş 2.42, Eş 2.44, Eş 2.46

ve ${}^1P_2 = -\frac{1}{2} \overrightarrow{u_2^y}$ değerleri yerine yazılır, gerekli ara işlemler yapılırsa;

$${}^2\dot{v}_2 = \frac{1}{2} D \cos \theta \dot{\psi}^2 \overrightarrow{u_1^z} - \frac{1}{2} D \ddot{\psi} \overrightarrow{u_2^z} + \frac{1}{2} D \sin \theta \dot{\psi}^2 \overrightarrow{u_3^z} \quad (2.54)$$

Yükseliş eksenini kütle merkezinin doğrusal ivmesi

Eş 2.28'de $i=1$ değeri yerine yazılarak;

$${}^2\dot{v}_{C_2} = {}^2\dot{w}_2 \times {}^2P_{C_2} + {}^2w_2 \times ({}^2w_2 \times {}^2P_{C_2}) + {}^2\dot{v}_2 \quad (2.55)$$

Eş 2.55’de yan eksenin bağlı olduğu, sabit platform için; Eş 2.40, Eş 2.50, Eş 2.52, Eş 2.54 ve ${}^2P_{C_2} = \frac{c}{2}\overline{u}_1^z - \frac{h}{2}\overline{u}_3^z$ değerleri yerine yazılarak gerekli ara işlemler yapılırsa;

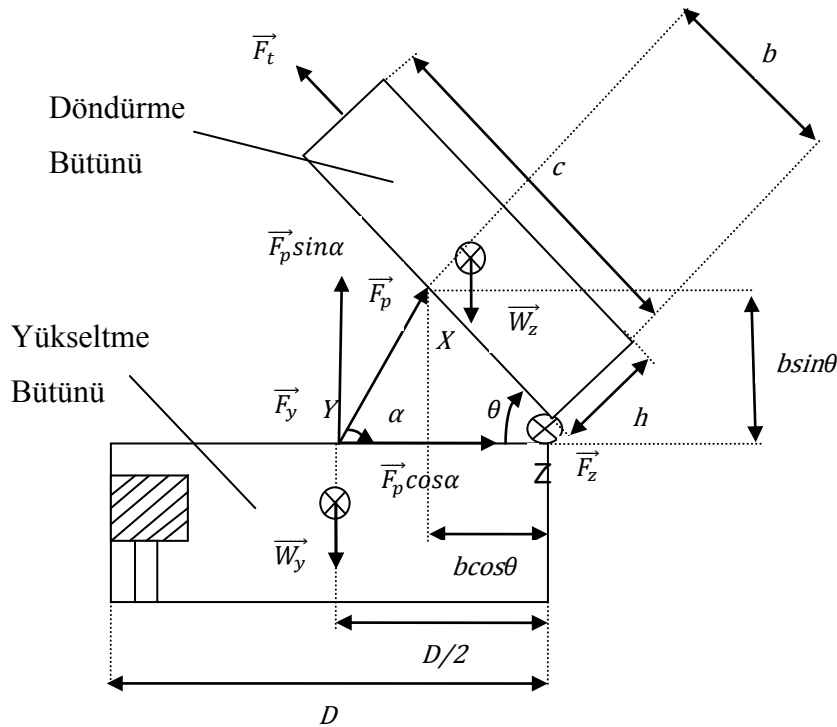
$${}^2\dot{v}_{C_2} = \frac{1}{2} \left[\left((-\dot{\psi}^2(Dc\cos\theta + c\cos^2\theta - hc\sin\theta) - \dot{\theta}^2c - \dot{\theta}h) \overline{u}_1^z \right) + \left(-\dot{\psi}(D + h\sin\theta - c\cos\theta) - 2\dot{\theta}\dot{\psi}(hc\cos\theta + c\sin\theta) \overline{u}_2^z \right) + \left(\dot{\psi}^2(D\sin\theta + h\sin^2\theta - c\sin\theta\cos\theta + \dot{\theta}^2h - \dot{\theta}c) \overline{u}_3^z \right) \right] \quad (2.56)$$

Eş 2.56’yı sadeleştirmek için, v değişkeni aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$v = c\cos\theta - h\sin\theta - D \quad (2.57)$$

Eş 2.57, Eş 2.56 yerine yazılırsa;

$${}^2\dot{v}_{C_2} = \left[\frac{1}{2} \left((-\dot{\psi}^2v\cos\theta - \dot{\theta}^2c - \dot{\theta}h) \overline{u}_1^z \right) + \left((\dot{\psi}v - 2\dot{\theta}\dot{\psi}(hc\cos\theta + c\sin\theta) \overline{u}_2^z \right) + \left((-\dot{\psi}^2v\sin\theta + \dot{\theta}^2h - \dot{\theta}c) \overline{u}_3^z \right) \right] \quad (2.58)$$



Şekil 2.4. Fırlatma aracına etki eden kuvvetler

Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi; \vec{F}_t daha önce de değinildiği üzere; füzenin araçtan ayrılması sırasında oluşan itki kuvvetini, \vec{F}_y Y noktasında meydana gelen tepki kuvvetini ve diğer bozucu kuvvetleri, \vec{F}_z Z noktasında meydana gelen tepki kuvvetini ve diğer bozucu kuvvetleri, \vec{F}_p yükseltme bütününe pistonun etki ettiği kaldırma kuvvetini, \vec{W}_y döndürme bütünüünün ağırlık vektörünü ve \vec{W}_z yükseltme bütünüünün ağırlık vektörünü göstermektedir.

Bu durumda yükseliş bütününe etkiyen toplam kuvvet;

$${}^2\vec{F}_2 = \vec{F}_t + \vec{F}_p + \vec{F}_z + \vec{W}_z \quad (2.59)$$

Benzer şekilde döndürme bütününe etki eden toplam kuvvet;

$${}^1\vec{F}_1 = \vec{F}_y - \vec{F}_p - \vec{F}_z + \vec{W}_y \quad (2.60)$$

Eş 2.59 ve Eş 2.60'da verilen itki ve tepki kuvvetleri üç ekseninde de etkiyeceğinden şu şekilde ifade edilebilir;

$$\vec{F}_t = F_{t1}\vec{u}_1^z + F_{t2}\vec{u}_2^z + F_{t3}\vec{u}_3^z \quad (2.61)$$

$$\vec{F}_z = F_{z1}\vec{u}_1^z + F_{z2}\vec{u}_2^z + F_{z3}\vec{u}_3^z \quad (2.62)$$

$$\vec{F}_y = F_{y1}\vec{u}_1^y + F_{y2} + F_{y3}\vec{u}_3^y \quad (2.63)$$

Yükseltme bütünü için ağırlık vektörü;

$$\vec{W}_z = m_z g \vec{u}_3^0 \quad (2.64)$$

Burada m_z yükseltme bütünü kütlesini göstermektedir.

Sabit platform eksenini yükseliş eksen koordinatlarına taşıdığımızda ise yani $u_0 \rightarrow {}^1_0R u_y \rightarrow {}^2_1R u_z$ dönüşümü yapılırsa Eş 2.64 şu şekilde yazılabilir;

$$\vec{W}_z = m_z g \cos\theta \vec{u}_3^z - m_z \sin\theta \vec{u}_1^z \quad (2.65)$$

Döndürme bütünü ağırlık vektörü;

$$\vec{W}_y = m_y g \vec{u}_3^0 \quad (2.66)$$

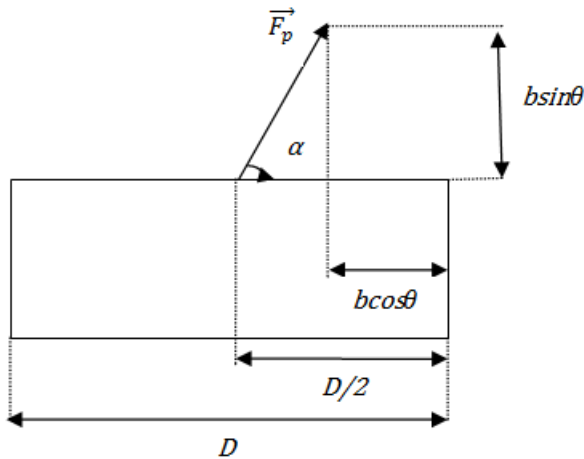
Burada m_y döndürme bütünü kütlesini göstermektedir.

Sabit platform eksenini yükseliş eksen koordinatlarına taşıdığımızda ise yani $u_0 \rightarrow {}^1_0R u_y$ dönüşümü yapılırsa Eş 2.66 şu şekilde yazılabilir;

$$\vec{W}_y = m_y g \vec{u}_3^y \quad (2.67)$$

Yine Şekil 2.4'de görüldüğü gibi yükseliş eksenine etkiyen piston kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$\vec{F}_p = -F_p \cos\alpha \vec{u}_1^y - F_p \sin\alpha \vec{u}_3^y \quad (2.68)$$



Şekil 2.5. α açısının ayrıntılı gösterimi

Şekil 2.5.'den faydalanılarak yükseltme bütününe etkiyen piston ile döndürme bütünü arasındaki α açısı şu şekilde hesaplanır;

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{b\sin\theta}{(D/2-b\cos\theta)}\right) \quad (2.69)$$

Eş 2.68 döndürme bütününden yükseltme bütünü koordinatlarına taşınacak olursa aşağıdaki denklem elde edilir;

$$\vec{F}_p = {}^2R_1\vec{F}_p \quad (2.70)$$

$$\vec{F}_p = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -F_p \cos\alpha \\ 0 \\ -F_p \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

Eş 2.71'den gerekli çarpımlar yapıp; trigonometrik toplam formülleri yerine yazılacak olursa yükseltme bütünü için \vec{F}_p aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\vec{F}_p = -F_p \cos(\alpha - \theta) \vec{u}_1^z + F_p \sin(\alpha - \theta) \vec{u}_3^z \quad (2.72)$$

Yükseliş bütününe etki eden kuvvetlerin yukarıda yapıldığı gibi yükseliş eksenine taşınmasının ardından; yükseliş bütünü için Eş 2.29'da verilen Newton denklemi yazılabilir;

Eş 2.29'da i yerine 1 yazılırsa;

$${}^2F_2 = m_2 {}^2\dot{v}_{C_2} \quad (2.73)$$

Burada $m_2 = m_z$ olarak gösterilmiştir.

Eş 2.61, Eş 2.62, Eş 2.65 ve Eş 2.72; Eş 2.59'da yerine yazılır elde edilen eşitlik Eş 2.73'de yerine yazılırsa ve Eş 2.58'de Eş 2.73'deki yerine konulacak olur ve üç eksen kendi aralarında eşitlenecek olursa yükseltme bütünü için müteakip denklemler elde edilir;

\vec{u}_1^z eksenini için;

$$F_{t1} + F_{z1} - F_p \cos(\alpha - \theta) - m_z \sin\theta = \frac{m_z}{2} [(-\dot{\psi}^2 v \cos\theta - \dot{\theta}^2 c - \ddot{\theta} h)] \quad (2.74)$$

\vec{u}_2^z eksenini için;

$$F_{t2} + F_{z2} = \frac{m_z}{2} ((\ddot{\psi} v - 2\dot{\theta}\dot{\psi}(h \cos\theta + c \sin\theta)) \quad (2.75)$$

\vec{u}_3^z eksenini için;

$$F_{t3} + F_{z3} + F_p \sin(\alpha - \theta) \vec{u}_3^z + m_z g \cos\theta = \frac{m_z}{2} (-\dot{\psi}^2 v \sin\theta + \dot{\theta}^2 h - \ddot{\theta} c) \quad (2.76)$$

Yükseliş bütününe yapılan işlemlerin benzeri döndürme bütünü için de yapılacak olursa; döndürme bütünü için Eş 2.29'da verilen Newton denklemi şu şekilde yazılabilir;

Eş 2.29'da i yerine 0 yazılırsa;

$${}^1F_1 = m_1 {}^1\dot{v}_{C_1} \quad (2.77)$$

Burada $m_1 = m_y$ olarak gösterilmiştir.

Eşitlikleri Eş 2.60'da yerine yazmadan önce yükseliş eksenini koordinatında yer alan Eş 2.62'yi döndürme eksenine dönüştürülmesi gerekir;

$$\vec{F}_z^y = {}_2R \vec{F}_z^z \quad (2.78)$$

$${}_2R = {}_1R^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{z1} \\ F_{z2} \\ F_{z3} \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

$$\vec{F}_z^y = \begin{bmatrix} F_{z1} \cos\theta - F_{z3} \sin\theta \\ F_{z2} \\ F_{z1} \sin\theta + F_{z3} \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

Eş 2.63, Eş 2.67, Eş 2.68 ve Eş 2.80, Eş 2.60'daki yerine yazılır; elde edilen denklem Eş 2.77'de yerine konulursa ve Eş 2.48'de Eş 2.73'deki yerine konulacak olur ve üç eksen kendi aralarında eşitlenecek olursa yükseltme bütünü için aşağıdaki eşitlikler elde edilir;

$\overrightarrow{u_1^y}$ eksenini için;

$$F_{y1} - F_{z1}\cos\theta + F_{z3}\sin\theta + F_p\cos\alpha = 0 \quad (2.81)$$

$\overrightarrow{u_2^y}$ eksenini için;

$$F_{y2} - F_{z2} = 0 \quad (2.82)$$

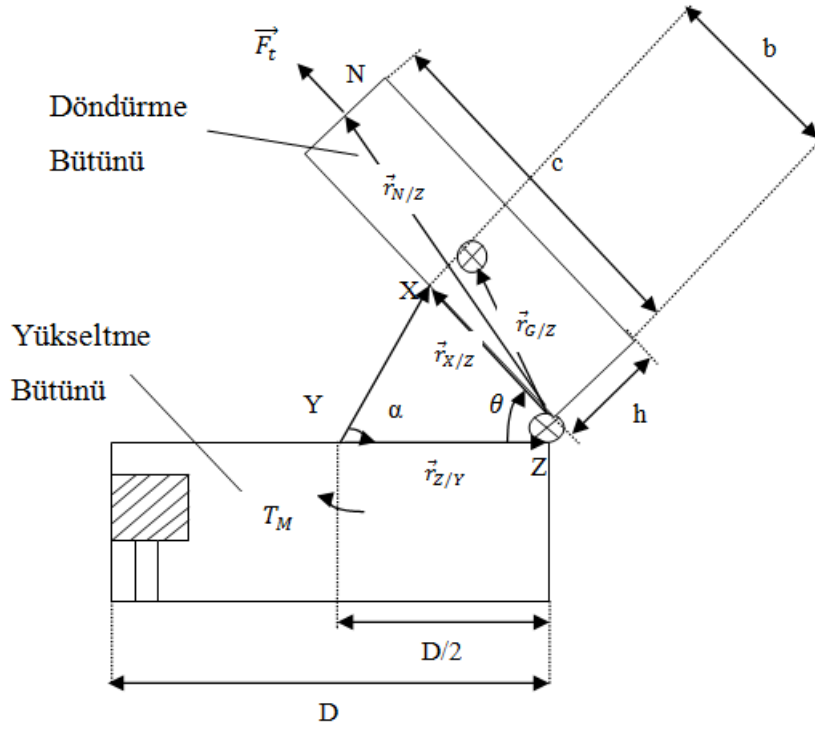
$\overrightarrow{u_3^y}$ eksenini için;

$$F_{y3} - F_{z1}\sin\theta - F_{z3}\cos\theta + F_p\sin\alpha + m_y g = 0 \quad (2.83)$$

Newton denklemlerinin her iki bütünü için yazılmasından sonra Euler denklemlerinin yazılması gerekmektedir. Euler denklemleri daha öncede bahsedildiği gibi eksenlere etki eden momentleri vermektedir.

Yükseltme bütünü için Euler denklemi Eş 2.30'da $i=1$ yazılarak aşağıdaki gibi bulunur;

$${}^2N_2 = {}^{c_2}I_2 {}^2\dot{w}_2 + {}^2w_2 x {}^{c_2}I_2 {}^2w_2 \quad (2.84)$$



Şekil 2.6. Fırlatma aracına etkiyen kuvvetlerin moment noktasına göre uzaklıkları

Şekil 2.6.'da gösterildiği gibi yükseltme bütününe Z noktasında etki eden torklar;

$$N_z = \vec{r}_{N/Z} \times \vec{F}_t + \vec{r}_{X/Z} \times \vec{F}_p + \vec{r}_{G/Z} \times \vec{W}_z + \vec{M}_z + \vec{M}_t \quad (2.85)$$

$$\vec{r}_{N/Z} = c\vec{u}_1^z - \frac{h}{2}\vec{u}_3^z \quad (2.86)$$

$$\vec{r}_{X/Z} = b\vec{u}_1^z \quad (2.87)$$

$$\vec{r}_{G/Z} = \frac{c}{2}\vec{u}_1^z - \frac{h}{2}\vec{u}_3^z \quad (2.88)$$

$$\vec{M}_z = M_{z1}\vec{u}_1^z + M_{z2}\vec{u}_2^z + M_{z3}\vec{u}_3^z \quad (2.89)$$

$$\vec{M}_t = M_{t1}\vec{u}_1^z + M_{t2}\vec{u}_2^z + M_{t3}\vec{u}_3^z \quad (2.90)$$

Burada; M_z Z noktasına etki eden tepki momenti ve diğer momentleri, M_t ise füze atışından dolayı N noktasında meydana gelen itki momentini göstermektedir.

Eş 2.61, Eş 2.65, Eş 2.72, Eş 2.86, Eş 2.87, Eş 2.88, Eş 2.89 ve Eş 2.90, Eş 2.85'deki yerine yazılırsa;

$$N_2 = \frac{h}{2} F_{t2} \vec{u}_1^z + \left(-cF_{t3} - \frac{h}{2} F_{t2} \right) \vec{u}_2^z + cF_{t2} \vec{u}_3^z - bF_p \sin(\alpha - \theta) \vec{u}_2^z + \frac{1}{2} m_z g (h \sin \theta - c \cos \theta) \vec{u}_2^z + M_{z1} \vec{u}_1^z + M_{z2} \vec{u}_2^z + M_{z3} \vec{u}_3^z + M_{t1} \vec{u}_1^z + M_{t2} \vec{u}_2^z + M_{t3} \vec{u}_3^z \quad (2.91)$$

Eş 2.84'ü yazabilmek için öncelikli olarak ${}^{c_2}I_2$ ifadesinin yani atalet momentlerinin yükseltme bütünü için yazılması gerekir.

$${}^{c_2}I_2 = J_{z11} \vec{u}_1^z \vec{u}_1^z + J_{z22} \vec{u}_2^z \vec{u}_2^z + J_{z33} \vec{u}_3^z \vec{u}_3^z + J_{z13} \vec{u}_1^z \vec{u}_1^z + J_{z13} \vec{u}_3^z \vec{u}_1^z \quad (2.92)$$

Eş 2.50, Eş 2.52 ve Eş 2.91 eşitlikleri Eş 2.84'de yerine yazılıp ara işlemler yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir;

$${}^2N_2 = {}^{c_2}I_2 {}^2\dot{w}_2 + {}^2w_2 x {}^{c_2}I_2 {}^2w_2 = (-\ddot{\psi}(J_{z11} \sin \theta - J_{z13} \cos \theta) - \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta (J_{z11} + J_{z22} + J_{z33}) - 2J_{z13} \sin \theta) \vec{u}_1^z + (J_{z22} \ddot{\theta} + \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta (J_{z33} - J_{z11}) - J_{z13} \dot{\psi} \cos 2\theta) \vec{u}_2^z + (\ddot{\psi}(J_{z33} \cos \theta - J_{z13} \sin \theta) + \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \theta (J_{z11} - J_{z22} - J_{z33}) - 2J_{z13} \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta) \vec{u}_3^z \quad (2.93)$$

Eş 2.91 ve Eş 2.92 eşitlenirse üç eksen denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır;

\vec{u}_1^z eksen için;

$$\frac{h}{2} F_{t2} + M_{z1} + M_{t1} = (-\ddot{\psi}(J_{z11} \sin \theta - J_{z13} \cos \theta) - \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta (J_{z11} + J_{z22} + J_{z33}) - 2J_{z13} \sin \theta) \quad (2.94)$$

\vec{u}_2^z eksen için;

$$-cF_{t3} - \frac{h}{2} F_{t1} - bF_p \sin(\alpha - \theta) + \frac{1}{2} m_z g (h \sin \theta - c \cos \theta) + M_{z2} + M_{t2} = (J_{z22} \ddot{\theta} + \dot{\psi}^2 \sin \theta \cos \theta (J_{z33} - J_{z11}) - J_{z13} \dot{\psi} \cos 2\theta) \quad (2.95)$$

\vec{u}_3^z eksen için;

$$cF_{t2} + M_{z3} + M_{t3} = (\ddot{\psi}(J_{z33} \cos \theta - J_{z13} \sin \theta) + \dot{\theta} \dot{\psi} \sin \theta (J_{z11} - J_{z22} - J_{z33}) - 2J_{z13} \dot{\theta} \dot{\psi} \cos \theta) \quad (2.96)$$

Döndürme bütünü için Euler denklemi Eş 2.28'de $i=0$ yazılarak aşağıdaki gibi bulunur;

$${}^1N_1 = {}^{c_1}I_1 {}^1\dot{w}_1 + {}^1w_1 x {}^{c_1}I_1 {}^1w_1 \quad (2.97)$$

Şekil 2-6'da gösterildiği gibi yükseltme bütününe Y noktasında etki eden torklar;

$$N_1 = \vec{r}_{Z/Y} \times (-\vec{F}_z) + \vec{T}_M + \vec{M}_y - \vec{M}_z \quad (2.98)$$

$$\vec{r}_{Z/Y} = \frac{D}{2} \vec{u}_1^y \quad (2.99)$$

$$\vec{T}_M = T_M \vec{u}_3^y \quad (2.100)$$

$$\vec{r}_{X/Z} = b \vec{u}_1^z \quad (2.101)$$

$$\vec{r}_{G/Z} = \frac{c}{2} \vec{u}_1^z - \frac{h}{2} \vec{u}_3^z \quad (2.102)$$

$$\vec{M}_z = M_{z1} \vec{u}_1^z + M_{z2} \vec{u}_2^z + M_{z3} \vec{u}_3^z \quad (2.103)$$

$$\vec{M}_y = M_{y1} \vec{u}_1^y + M_{y2} \vec{u}_2^y + M_{y3} \vec{u}_3^y \quad (2.104)$$

Burada T_M ; pinyon dişli tarafından çember dişliye etki eden momenti, M_y ; Y noktasına etki eden tepki momenti ve diğer momentleri ve M_z de Z noktasına etki eden tepki momentini ve diğer momentlerin Y noktasında meydana getirdiği bozucu momenti göstermektedir.

Eş 2.97'yi yazabilmek için öncelikli olarak M_z momentinin müteakip ifadelerde verildiği üzere döndürme bütünü koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekmektedir;

$$\vec{M}_z^y = {}_1^2 R \vec{M}_z^z \quad (2.105)$$

$${}_1^2 R = {}_1^2 R^T = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{z1} \\ M_{z2} \\ M_{z3} \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

$$\vec{M}_z^y = \begin{bmatrix} M_{z1} \cos\theta - M_{z3} \sin\theta \\ M_{z2} \\ M_{z1} \sin\theta + M_{z3} \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.107)$$

M_y ve M_z momentine yönleri de dikkate alınarak sırasıyla döndürme bütününde kullanılan pinyon dişli ile dişli rulman arasındaki sürtünmeyi ve yükseltme bütününde kullanılan bilyavida viskoz sürtünmesi de dikkate alınarak şu şekilde ifade edilir;

$$\overline{M}_y = M_{y1}\overline{u}_1^y + M_{y2}\overline{u}_2^y - B_y\psi\overline{u}_3^y \quad (2.108)$$

$$\overline{M}_z = M_{z1}\overline{u}_1^z - B_z\theta\overline{u}_2^z + M_{z3}\overline{u}_3^z \quad (2.109)$$

Burada B_y ve B_z ifadeleri sırasıyla döndürme bütününde kullanılan pinyon dişli ile dişli rulman arasındaki sürtünme katsayısını ve yükseltme bütününde kullanılan bilyavida viskoz sürtünme katsayısını göstermektedir.

Eş 2.80, Eş 2.99, Eş 2.100, Eş 2.107, Eş 2.108ve Eş 2.109, Eş 2.98'deki yerine yazılırsa;

$$\begin{aligned} N_1 = & (M_{y1} - M_{z1}\cos\theta - M_{z3}\sin\theta)\overline{u}_1^y + \left(M_{y2} - M_{z2} - \frac{D}{2}(F_{z1}\sin\theta + F_{z3}\cos\theta) \right)\overline{u}_2^y + \\ & (T_M + M_{y3} + \frac{D}{2}F_{z2} - M_{z1}\sin\theta - M_{z3}\cos\theta)\overline{u}_3^y \end{aligned} \quad (2.110)$$

Eş 2.97'yi yazabilmek için öncelikli olarak ${}^{c_1}I_1$ ifadesinin yani atalet momentlerinin döndürme bütünü için yazılması gerekir.

$${}^{c_1}I_1 = J_{y11}\overline{u}_1^y\overline{u}_1^y + J_{y22}\overline{u}_2^y\overline{u}_2^y + J_{y33}\overline{u}_3^y\overline{u}_3^y \quad (2.111)$$

Eş 2.42, Eş 2.44 ve Eş 2.111 eşitlikleri Eş 2. 97'de yerine yazılıp ara işlemler yapılırsa aşağıdaki ifade elde edilir;

$${}^1N_1 = J_{y33}\ddot{\psi}\overline{u}_3^y \quad (2.112)$$

Eş 2.110 ve Eş 2.112 eşitlenirse üç eksen denklemleri aşağıdaki gibi olacaktır;

$$\begin{aligned} & \overline{u}_1^y \text{ eksenini için;} \\ & M_{y1} - M_{z1}\cos\theta - M_{z3}\sin\theta = 0 \end{aligned} \quad (2.113)$$

\vec{u}_2^y eksenini için;

$$M_{y2} - M_{z2} - \frac{D}{2}(F_{z1}\sin\theta + F_{z3}\cos\theta) = 0 \quad (2.114)$$

\vec{u}_3^y eksenini için;

$$T_M + M_{y3} - J_{y33}\ddot{\psi} + \frac{D}{2}F_{z2} - M_{z1}\sin\theta - M_{z3}\cos\theta = 0 \quad (2.115)$$

Döndürme ve yükseltme bütünleri için üç ekseninde de Newton-Euler denklemleri yazıldıktan sonra bu bütünler için hareket denklemleri ilgili eksenler için aşağıdaki gibidir;

Yükseltme bütünü için hareket denklemi Eş 2.95'de de bulunan aşağıdaki denklemdir;

$$-cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} - bF_P \sin(\alpha - \theta) + \frac{1}{2}m_z g(h\sin\theta - c\cos\theta) + M_{z2} + M_{t2} = (J_{z22}\ddot{\theta} + \psi^2 \sin\theta \cos\theta (J_{z33} - J_{z11}) - J_{z13}\dot{\psi} \cos 2\theta) \quad (2.116)$$

Döndürme bütünü için ise hareket denklemi Eş 2.115'de de bulunan aşağıdaki denklemdir;

$$T_M + M_{y3} - J_{y33}\ddot{\psi} + \frac{D}{2}F_{z2} - M_{z1}\sin\theta - M_{z3}\cos\theta = 0 \quad (2.117)$$

Döndürme bütünü denkleminde bulunan yükseliş eksenini ifadelerini döndürme eksenini ifadelerine dönüştürmek gerekir;

Eş 2.75'den F_{z2} ifadesi çekilirse;

$$F_{z2} = \frac{m_z}{2}(\ddot{\psi}v - 2\dot{\theta}\dot{\psi}(h\cos\theta + c\sin\theta)) - F_{t2} \quad (2.118)$$

Eş 2.94'den M_{z1} ifadesi çekilirse;

$$M_{z1} = (-\dot{\psi}(J_{z11}\sin\theta - J_{z13}\cos\theta) - \dot{\theta}\dot{\psi}\cos\theta(J_{z11} + J_{z22} + J_{z33}) - 2J_{z13}\sin\theta) - \frac{h}{2}F_{t2} - M_{t1} \quad (2.119)$$

Eş 2.94'den M_{z3} ifadesi çekilirse;

$$M_{z3} = (\ddot{\psi}(J_{z33}\cos\theta - J_{z13}\sin\theta) + \dot{\theta}\dot{\psi}\sin\theta(J_{z11} - J_{z22} - J_{z33}) - 2J_{z13}\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\theta) - cF_{t2} - M_{t3} \quad (2.120)$$

Eş 2.118, Eş 2.119 ve Eş 2.120 eşitlikleri Eş 2.115’de yerine yazılırsa döndürme bütünü hareket denklemi şu şekildedir;

$$T_M + M_{y3} - J_{y33}\ddot{\psi} + \frac{D}{2}\left(\frac{m_z}{2}(\dot{\psi}v - 2\dot{\theta}\dot{\psi}(h\cos\theta + c\sin\theta)) - F_{t2}\right) - [(-\dot{\psi}(J_{z11}\sin\theta - J_{z13}\cos\theta) - \dot{\theta}\dot{\psi}\cos\theta(J_{z11} + J_{z22} + J_{z33}) - 2J_{z13}\sin\theta) - \frac{h}{2}F_{t2} - M_{t1}] \sin\theta - [(\dot{\psi}(J_{z33}\cos\theta - J_{z13}\sin\theta) + \dot{\theta}\dot{\psi}\sin\theta(J_{z11} - J_{z22} - J_{z33}) - 2J_{z13}\dot{\theta}\dot{\psi}\cos\theta) - cF_{t2} - M_{t3}] \cos\theta = 0 \quad (2.121)$$

Yükseltme bütünü denkleminde Eş 2.116 bazı terimler aşağıdaki gibi birleştirilir ve viskoz sürtünmelerde (Eş 2.109) dikkate alınır;

$$J_m = \sin\theta\cos\theta(J_{z33} - J_{z11}) - J_{z13}\cos 2\theta \quad (2.122)$$

$$W_m = \frac{1}{2}m_z g(h\sin\theta - c\cos\theta) \quad (2.123)$$

$$M_{z2} = -B_z\dot{\theta} \quad (2.124)$$

Yükseltme bütünü hareket denkleminin son hali şu şekilde bulunur;

$$J_{z22}\ddot{\theta} + B_z\dot{\theta} + W_m + J_m\dot{\psi}^2 = -cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} - bF_p \sin(\alpha - \theta) + M_{t2} \quad (2.125)$$

Döndürme bütünü denkleminde (Eş 2.121) bazı terimler aşağıdaki gibi birleştirilir ve viskoz sürtünmelerde (Eş 2.108) dikkate alınır;

$$J_R = J_{y33} + J_{z11}\sin^2\theta + J_{z33}\cos^2\theta + J_{z13}\sin 2\theta - \frac{Dvm_z}{4} \quad (2.126)$$

$$J_D = \frac{Dm_z}{4}[h\cos\theta + c\sin\theta] + (J_{z11} - J_{z33})\cos\theta\sin\theta - J_{z13} \quad (2.127)$$

$$M_{y3} = -B_y\dot{\psi} \quad (2.128)$$

Döndürme bütünü hareket denkleminin son hali aşağıdaki gibi elde edilir;

$$J_R\ddot{\psi} + B_y\dot{\psi} + 2J_D\dot{\theta}\dot{\psi} = T_M + \frac{1}{2}F_{t2}[2ccos\theta - hsin\theta - D] - M_{t1}\sin\theta + M_{t3}\cos\theta \quad (2.129)$$

3. FIRLATMA ARACININ DENETİM SİSTEMİNİN TASARLANMASI

Bu bölüme kadar bir fırlatma aracının bileşenleri olan döndürme ve yükseltme bütünleri için tanımlamaları yapılmış ve hareket denklemlerinin detaylı bir şekilde çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Fırlatma araçları için literatür çalışmaları incelendiğinde; genelde fırlatma aracı denetimine girildiği, sadece hareket denklemlerine yer verildiği gözlenmektedir. Fırlatma aracı denetimiyle ilgili yapılan çalışmalar daha önce de belirtildiği gibi; Özkan ve Dokumacı'nın çalışmalarıdır.

Bu tezde Özkan ve Dokumacı'nın çalışmalarından farklı olarak hesaplanan tork ve PID denetçisinin yanında kayan kipli denetçi de kullanılmış, ayrıca kaskat denetçi tasarlanmak suretiyle, oluşan itki kuvveti etkisi, en aza indirgenmeye çalışılmıştır. Denetçi performansları karşılaştırılmıştır. Dokumacı'nın çalışmasında birden fazla roketin atıldığı göz önüne alınırken bu çalışmada ele alınan fırlatma aracından bir tane füze fırlatıldığı varsayılmaktadır. Ayrıca 2 poddan oluşan sistem için ard arda 2 atış da gerçekleştirilmiş olup; tork kontrolü yapılmaya çalışılmıştır. Kontrol süresinin kısa olması dikkate alınarak pod içinde bulunan füzenin atılması sırasında meydana gelen itki tepkisinin oluşturduğu kuvvet ve momentin bozucu etkisini en aza indirecek denetçi tasarlanmaya çalışılmıştır.

3.1. PID Denetçisi Tasarımı

Kapalı çevrimli denetim sistemi tasarımında ilk tercih edilen denetçi türü olan PID tipi denetçide referans girişle gerçek çıkış arasındaki hataya oransal, tümlevsel ve türevsel işlemleri uygulanmaktadır.

Oransal (İng. proportional, P) tipi denetçide denetleme işareti denetçi çıkışına sabit bir oranla aktarılmakta olup oransal kazanç ayarlanabilmektedir. Hatanın şimdiki değeriyle ilgilenir.

$$m(t) = K_p e(t) \quad (3.1)$$

Eş 3.1 Laplace düzleminde yazılırsa;

$$M(s) = K_p E(s) \quad (3.2)$$

Buradaki K_p oransal kazanç katsayısını $e(t)$ ve $E(s)$ ise hatayı tanımlamaktadır. K_p kazancı küçük olursa denetçi görevini yerine getirmez, büyük olursa ise sistem kararsız olabilir.

Tümlevsel (integral) denetçi geçmiş hataların toplamıdır. Sistem cevabının referans değerine ulaşması geciktikçe integral denetim etkisi de artacaktır.

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.3)$$

Laplace düzlemimde yazılırsa;

$$M(s) = \frac{K_i}{s} \int_0^t E(s) \quad (3.4)$$

Buradaki K_i integral tümlevsel kazanç katsayısını $e(t)$ ve $E(s)$ ise hatayı tanımlamaktadır.

Türevsel denetleme etkisi, sistemdeki hatanın değişimine orantılı olarak belirlenmektedir. Türev işlemi sistem çıktısının hesaplandığı andan bir sonraki anda alacağı değere ilişkin bir veri üreterek gelecekteki hataları tahmin etmektedir.

$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Eş 3.5 Laplace düzleminde yazılırsa;

$$M(s) = K_d s E(s) \quad (3.6)$$

Bu üç denetçi çeşidi birleştirilirse PID denetçisinin denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$u = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.7)$$

PID denetçisini; integral zaman T_i ve türev zamanı T_d cinsinden yazacak olursak şu şekilde yazılır;

$$u = K_p (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (3.8)$$

Denetçi tasarlamak için ikinci mertebeden olan fırlatma aracı için transfer fonksiyonu;

$$G(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (3.9)$$

3.2. Hesaplanan Tork Denetim Yöntemi

Robot kolunun denetiminde, dolayısıyla da fırlatma araçlarının denetiminde temel sorun kolun veya aracın belirlenen yörüngeyi doğru bir şekilde takip etmesidir. Hesaplanan tork yöntemi geri beslemeli doğrusal olmayan sistemlerin, doğrusallaştırılmasında kullanılan özel bir yöntemdir. Hesaplanan tork (İng. computed torque) yöntemi yörünge ve robot kolundan elde edilen referans açısını girdi olarak alır ve eklem bağlantı yerlerine uygulanacak tork değerlerini çıktı olarak vermektedir. Bu yöntem model tabanlı bir denetim sistemidir. Bir fırlatma aracında oluşan her türlü bozucu tork etkileri denetçinin giriş sinyaline eklenir (Lewis, F. ve ark. (2004). Robot Manipulator Control Theory and Practice).

Hesaplanan tork denetim yöntemi denklemleri şu şekilde ifade edilebilir;

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_d = \tau \quad (3.10)$$

Burada $M(q)$ ataletlerin eylemsizlik momenti bileşenlerinin oluşturduğu matris, $N(q, \dot{q})$; Coriolis, merkezkaç, yerçekimi ve sürtünme kuvvetlerini içeren matris, τ_d bozucu torklar ve τ ise denetim torku büyüklüklerine karşılık gelmektedir.

$q_d(t)$ fırlatma aracı yörüngesinin istenen değeri kabul edilirse oluşacak hata şu şekilde bulunur;

$$e(t) = q_d(t) - q(t) \quad (3.11)$$

$\tau(t)$ 'nin giriş üzerindeki etkisini belirlemek için hatanın iki kere türevi alınırsa;

$$\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q} \quad (3.12)$$

$$\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q} \quad (3.13)$$

Eş 3.10'dan \ddot{q} ifadesi çekilir ve Eş 3.13'deki yerine yazılırsa;

$$\ddot{e} = \ddot{q}_d + [M(q)]^{-1}[N(q, \dot{q}) + \tau_d - \tau] \quad (3.14)$$

Hatanın ikinci türevini bulduktan sonra denetim girdisi ve bozucu tork fonksiyonu sırasıyla şu şekilde ifade edilmektedir;

$$u = \ddot{q}_d + [M(q)]^{-1}[N(q, \dot{q}) - \tau] \quad (3.15)$$

$$w = [M(q)]^{-1}\tau_d \quad (3.16)$$

Durum değişkeni “x” değişkeni ile temsil edilirse;

$$x = \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Hata şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & J \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ J \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ J \end{bmatrix} w \quad (3.18)$$

Bu ifade Brunovsky'nin kanonik formu içindeki sistemin doğrusal hatası olarak da bilinir.

Eş 3.15'den tork ifadesi çekilirse;

$$\tau = M(q)(\ddot{q}_d - u) + N(q, \dot{q}) \quad (3.19)$$

Yukarıda bulunan Eş 3.19; hesaplanan tork denetim ana denklemdir.

Eş 3.19'u Eş 3.10'da yerine koyarsak;

$$M(q)\ddot{q} + N(q, \dot{q}) + \tau_d = M(q)(\ddot{q}_d - u) + N(q, \dot{q}) \quad (3.20)$$

Eş 3.13'deki hatanın ikinci türevi Eş 3.20'de yerine yazılırsa;

$$\ddot{e} = u + [M(q)]^{-1}\tau_d \quad (3.21)$$

değerleri arasındaki fark olarak tanımlanmakta olup, şu şekilde yazılabilir;

$$e = q_a - q \quad (3.22)$$

$$\dot{e} = \dot{q}_a - \dot{q} \quad (3.23)$$

Şekil 3-1'e göre kayma yüzeyinin genel ifadesi ise;

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e + \beta \quad (3.24)$$

olarak yazılabilir.

Burada σ ifadesi kayma yüzeyini göstermektedir. Hatanın sifıra çekilebilmesi için $\sigma = 0$ koşulunun sağlanması gerekir. Eş 3.24 ifadesinde $\sigma = 0$ değeri yerine yazılırsa;

$$\dot{e} = -(\lambda e + \beta) \quad (3.25)$$

ifadesi elde edilir.

Kayma yüzeyinin türevi şu şekilde ifade edilebilir;

$$\dot{\sigma} = -k \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (3.26)$$

Burada k sembolü sistemin derecesine göre belirlenen pozitif bir matris, $\operatorname{sgn}(\sigma)$ ifadesi ise σ değişkenini esas alan işaret fonksiyonudur.

$$\operatorname{sgn}(\sigma) = \begin{cases} -1, & \sigma < 0 \\ 0, & \sigma = 0 \\ 1, & \sigma > 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Sistemin kararlılığını sağlamak için, $\sigma \dot{\sigma} < 0$ koşulunun sağlanması gerekir. Bu da şu koşullarda geçerlidir;

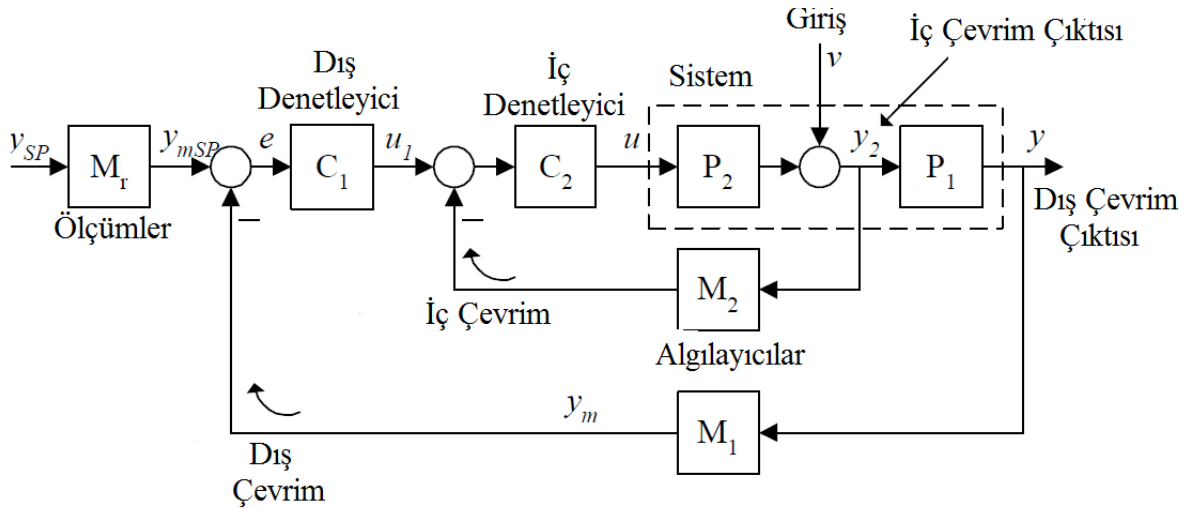
$$\begin{cases} \text{Eğer } \sigma > 0 \text{ ve } \dot{\sigma} < 0 \Rightarrow \sigma \dot{\sigma} < 0 \\ \text{Eğer } \sigma < 0 \text{ ve } \dot{\sigma} > 0 \Rightarrow \sigma \dot{\sigma} < 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

3.4. Kaskat Denetçi

Kaskat denetçi yapısı iç içe geçen seri bağlı bir denetçi yapısındadır. İki adet çevrimden oluşmaktadır. Bunlardan ilki, birincil, usta veya dış çevrim; ikincisi ise ikincil, köle veya iç çevrim olarak bilinir. Dış çevrim denetim değişkenini bulundururken, iç çevrim referans değişkeni içerir. İç çevrim birden fazla olabilirken dış çevrim bir tanedir ve denetlenmesi gereken ana değişkeni içerir. İç çevrimler birbirleri ile bağımlı veya bağımsız olabilirler. Kaskat denetim hem ileri beslemeli hem de geri beslemeli denetçileri birleştirdiği için, diğer denetçilere göre daha avantajlıdır.

Denetçi performansını daha iyileştirmektedir. Özellikle bozucu etkisini hissedilir derecede azaldığı bilinmektedir. Ayrıca iç çevrimin dış çevrime göre bozucu etkisini daha kısa sürede söndüldüğü görülmektedir.

Genel bir kaskat şeması Şekil 3.2.'de görülmektedir. İç çevrim bozucu etkiye katılmalıdır ve bunu şekilde görülen M_2 algılayıcı sağlamaktadır. P_2 ise birçok uygulamada eyleticedir.



Şekil 3.2. Kaskat denetim şeması (Haugen, 2010)

3.5. Fırlatma Aracı Sistemi için PID ve Hesaplanan Tork Denetçisi Tasarımı

Yukarıda bahsedilen denetçi çeşitlerinden PID ve hesaplanan tork denetçileri sisteme birlikte uygulanacak olursa denetçi tasarımı aşağıdaki gibi olacaktır;

Denetçi tasarlamadan önce; döndürme ve yükseltme bütünleri için bulunan dinamik denklemler (Eş 2.125 ve Eş 2.129) matris formunda düzenlenirse;

$$\begin{bmatrix} J_{z22} & 0 \\ 0 & J_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_z & 0 \\ 0 & B_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_m + J_m \dot{\psi}^2 \\ 2J_D \dot{\theta} \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -bF_p \sin(\alpha - \theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ T_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} + M_{t2} \\ \frac{1}{2}F_{t2} [2ccos\theta - hsin\theta - D] - M_{t1} sin\theta + M_{t3} cos\theta \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

ifadesi elde edilir.

Eş 3.29'dan yükseltme bütününü için denetim değişkeni çekilirse aşağıdaki ifade elde edilir;

$$u_1 = F_p = \frac{1}{-b \sin(\alpha - \theta)} \left[-cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} + M_{t2} + W_m + J_m \dot{\psi}^2 + B_z \dot{\theta} + J_{z22} u_{1PID} \right] \quad (3.30)$$

Eş 3.30 ve Eş 2.125 birlikte çözümlerse;

$$J_{z22} \ddot{\theta} = J_{z22} u_{1PID} \quad (3.31)$$

$$\ddot{\theta} = u_{1PID} \quad (3.32)$$

olarak bulunur.

Eş 3.11'de yapılan hata tanımı yükseltme bütünününün açılal konumu için yazılacak olursa;

$$e_1 = \theta_d - \theta \quad (3.33)$$

elde edilir.

Hatanın türevleri ise şu şekildedir;

$$\dot{e}_1 = \dot{\theta}_d - \dot{\theta} \quad (3.34)$$

$$\ddot{e}_1 = \ddot{\theta}_d - \ddot{\theta} \quad (3.35)$$

u_1 PID denetçisini ise Eş 3.9'da verilen transfer fonksiyonuna göre sistemin doğal frekansı ve rezonansına göre yazacak olursak yükseltme bütünü için aşağıdaki gibi bir denetçi oluşur;

$$u_{1PID} = \ddot{\theta}_d + 2\zeta_1\omega_{n1}\dot{e}_1 + \omega_{n1}^2 e_1 \quad (3.36)$$

$$\ddot{e} + 2\zeta_1\omega_{n1}\dot{e}_1 + \omega_{n1}^2 e_1 = 0 \quad (3.37)$$

Benzer işlemler döndürme bütünü içinde uygulanırsa u_{2PID} şu şekilde elde edilir;

$$u_2 = T_M = -\frac{1}{2}F_{T_2}[2ccos\theta - hsin\theta - D] + M_{T_1}sin\theta - M_{T_3}cos\theta + +2J_D\dot{\theta}\dot{\psi} + B_y\dot{\psi} + J_R u_{2PID} \quad (3.38)$$

Eş 3.38 ve Eş 2.129 birlikte çözülrse;

$$J_R \ddot{\psi} = J_R u_{1PID} \quad (3.39)$$

$$\ddot{\psi} = u_{2PID} \quad (3.40)$$

olarak bulunur.

Eş 3.11'de yapılan hata tanımı döndürme bütünü için yazılacak olursa;

$$e_2 = \psi_d - \psi \quad (3.41)$$

elde edilir.

Hatanın türevleri ise şu şekildedir;

$$\dot{e}_2 = \dot{\psi}_d - \dot{\psi} \quad (3.42)$$

$$\ddot{e}_2 = \ddot{\psi}_d - \ddot{\psi} \quad (3.43)$$

u_2 PID denetçisini ise Eş 2.9'da verilen transfer fonksiyonuna göre sistemin doğal frekansı ve rezonansına göre yazacak olursak yükseltme bütünü için aşağıdaki gibi bir denetçi oluşur;

$$u_{2PID} = \ddot{\psi}_d + 2\zeta_2\omega_{n2}\dot{e}_2 + \omega_{n2}^2 e_2 \quad (3.44)$$

$$\ddot{e} + 2\zeta_2\omega_{n2}\dot{e}_2 + \omega_{n2}^2 e_2 = 0 \quad (3.45)$$

Hesaplanan tork denetçisi tasarımına geçmeden önce Eş 3.29'da yazılan matris formu kapalı hale getirmemiz gerekir;

$$M_1\ddot{\theta} + B_1\dot{\theta} + V_1 = u_{eq1} \quad (3.46)$$

$$M_2\ddot{\psi} + B_2\dot{\psi} + V_2 = u_{eq2} \quad (3.47)$$

Her iki bütün için de bulunan denetçiler hesaplanan tork yöntemindeki denetçiler ile birleştirilirse;

$$N_1(q, \dot{q}) = B_1\dot{\theta} + V_1 \quad (3.48)$$

$$N_2(q, \dot{q}) = B_2\dot{\psi} + V_2 \quad (3.49)$$

Yükseltme bütünü için hesaplanan tork ve PID denetçisi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_1 = M_1(\ddot{\theta}_d - u_{1PID}) + N_1(q, \dot{q}) \quad (3.50)$$

Döndürme bütünü için hesaplanan tork ve PID denetçisi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_2 = M_2(\ddot{\psi}_d - u_{2PID}) + N_2(q, \dot{q}) \quad (3.51)$$

θ ve ψ için durum denklemleri yazılacak olursa denetlememiz gereken açısal konum şu şekilde bulunabilir;

$$x_1 = \theta \quad (3.52)$$

$$x_2 = \psi \quad (3.53)$$

$$x_3 = \dot{\theta} \quad (3.54)$$

$$x_4 = \dot{\psi} \quad (3.55)$$

$$\dot{x}_1 = x_3 \quad (3.56)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \quad (3.57)$$

$$\dot{x}_3 = M_1^{-1}[-N_1(q, \dot{q}) + \tau_1] \quad (3.58)$$

$$\dot{x}_4 = M_2^{-1}[-N_2(q, \dot{q}) + \tau_2] \quad (3.59)$$

Hesaplanan tork ve PID denetçisi benzetimlerinde kullanılan MATLAB[®] kodları EK-1.'de verilmiştir.

3.6. Fırlatma Aracı Sistemi için Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçi Tasarımı

Önceki bölümlerde tasarlanan denetçilerde belirsiz durumlar fazla olduğu için bunları gidermek gerekmektedir. Parametre belirsizlikleri ve bozucu dış etkilere karşı dayanıklılığı arttıracak olan kayan kipli denetçi tasarımını da hesaplanan tork ve PID denetçisine eklenirse daha gürbüz ve performansı yüksek bir denetleme sistemi elde edilebilir.

$$u_{smc} = M\ddot{e} + B\dot{e} \quad (3.60)$$

$$\begin{cases} e_1 = e \\ e_2 = \dot{e} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -M^{-1}Be_2 + M^{-1}u_{smc} + Ce_2 \end{cases} \quad (3.61)$$

Kayma yüzeyi;

$$\sigma = e_2 + Ce_1 \quad (3.62)$$

$$\dot{\sigma} = \dot{e}_2 + C\dot{e}_2 \quad (3.63)$$

$$\dot{\sigma} = -M^{-1}Be_2 + M^{-1}u_{smc} + Ce_2 \quad (3.64)$$

$$u_{smc} = M[M^{-1}Be_2 + Ce_2 + ksgn(\sigma)] \quad (3.65)$$

Eş 3.65'de değişkenler şu aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$e_2 = \dot{e}_1 = \dot{e} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} - \dot{\theta}_d \\ \dot{\psi} - \dot{\psi}_d \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

k_1 ve k_2 pozitif tam sayılar olacak şekilde;

$$k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

f_1 ve f_2 sistemlerin frekansı olacak şekilde;

$$C = \begin{bmatrix} 2\pi f_1 & 0 \\ 0 & 2\pi f_2 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{e}_1 + C_1 e_1 \\ \dot{e}_2 + C_2 e_2 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Eş 3.65 yükseltme ve döndürme bütünleri için ayrı ayrı yazılacak olursa aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$u_{smc1} = M_1[M^{-1}_1 B_1 e_x + C e_x + k_1 \text{sgn}(\sigma_1)] \quad (3.70)$$

$$u_{smc2} = M_2[M^{-1}_2 B_2 e_y + C e_y + k_2 \text{sgn}(\sigma_2)] \quad (3.71)$$

Yükseltme bütünü için hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_1 = M_1(\ddot{\theta}_d - u_{1PID} - u_{smc1}) + N_1(q, \dot{q}) \quad (3.72)$$

Döndürme bütünü için hesaplanan tork,PID ve kayan kipli denetçi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_2 = M_2(\ddot{\psi}_d - u_{2PID} - u_{smc2}) + N_2(q, \dot{q}) \quad (3.73)$$

Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi, benzetimlerinde kullanılan MATLAB® kodları EK-2.'de verilmiştir.

3.7. Fırlatma Aracı Sistemi için Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçisi için Kaskat Denetçi Tasarımı

Her iki bütün için konum değişkenleri yerine hız değişkenleri kullanılırsa;

$$\ddot{\theta} = \dot{\omega} \quad (3.74)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\lambda} \quad (3.75)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.76)$$

$$\dot{\psi} = \lambda \quad (3.77)$$

Eş 2.125 ve Eş 2.129'da konum için yazılan denklemler, Eş 3.74, Eş 3.75, Eş 3.76 ve Eş 3.77'de verilen hız ifadeleri gibi yazılacak olursa şu şekilde olacaktır;

$$J_{z22}\dot{\omega} + B_z\omega + W_m + J_m\lambda^2 = -cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} - bF_P \sin(\alpha - \theta) + M_{t2} \quad (3.78)$$

$$J_R\dot{\lambda} + B_y\lambda + 2J_D\omega\lambda = T_M + \frac{1}{2}F_{t2}[2c\cos\theta - h\sin\theta - D] - M_{t1}\sin\theta + M_{t3}\cos\theta \quad (3.79)$$

Eş 3.78 ve Eş 3.79 dereceleri bir merteye daha yükseltilecek olursa denetçi için denklemler şu şekilde olacaktır;

$$J_{z22}\ddot{\omega} + B_z\dot{\omega} + W_m + J_m\lambda^2 = -c\dot{F}_{t3} - \frac{h}{2}\dot{F}_{t1} - bF_P \sin(\dot{\alpha} - \dot{\theta}) + \dot{M}_{t2} \quad (3.80)$$

$$J_R\ddot{\lambda} + B_y\dot{\lambda} + 2J_D(\dot{\omega}\lambda + \dot{\lambda}\omega) = T_M + \frac{1}{2}\dot{F}_{t2}[2c\cos\dot{\theta} - h\sin\dot{\theta} - D] - \dot{M}_{t1}\sin\dot{\theta} + \dot{M}_{t3}\cos\dot{\theta} \quad (3.81)$$

$$M_\theta = \frac{d}{dt}[-cF_{t3} - \frac{h}{2}F_{t1} + M_{t2}] \quad (3.82)$$

$$M_{\psi} = \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} F_{t_2} [2c\cos\theta - h\sin\theta - D] - M_{t_1} \sin\theta + M_{t_3} \cos\theta \right] \quad (3.83)$$

Eş 3.80 ve Eş 3.81 dinamik denklemlerini Eş 3.82 ve Eş 3.83'ü kullanarak matris formuna dönüştürecek olursak aşağıdaki ifadeyi elde etmiş oluruz.

$$\begin{bmatrix} J_{z22} & 0 \\ 0 & J_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\omega} \\ \ddot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_z & 0 \\ 0 & B_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_m + J_m \dot{\lambda}^2 \\ 2J_D(\dot{\omega}\lambda + \dot{\lambda}\omega) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -bF_p \sin(\dot{\alpha} - \dot{\theta}) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ T_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{\theta} \\ M_{\psi} \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Burada $\dot{\alpha}$ ifadesi Eş 2.69'da bulunan α açısının türevini ifade etmektedir ve aşağıdaki gibidir;

$$\dot{\alpha} = \frac{d}{dt} \left[\tan^{-1} \left(\frac{b\sin\theta}{(D/2 - b\cos\theta)} \right) \right] = \frac{1}{1+A^2} \quad (3.85)$$

Burada A ifadesi şu şekildedir;

$$A = \frac{b\dot{\theta}\cos\theta \left(\frac{D}{2} - b\cos\theta \right) - (b\dot{\theta}\sin\theta)(b\sin\theta)}{\left(\frac{D}{2} - b\cos\theta \right)^2} \quad (3.86)$$

$$u_1 = F_p = \frac{1}{-b\sin(\dot{\alpha} - \dot{\theta})} [M_{\theta} + W_m + J_m \dot{\lambda}^2 + B_z \dot{\omega} + J_{z22} u_{1PID}] \quad (3.87)$$

Eş 3.87 ve Eş 3.80 birlikte çözümlerse;

$$J_{z22} \ddot{\omega} = J_{z22} u_{1PID} \quad (3.88)$$

$$\ddot{\omega} = u_{1PID} \quad (3.89)$$

olarak bulunur.

Eş 3.11'de yapılan hata tanımı yükseltme bütünü için yazılacak olursa;

$$e_1 = \omega_d - \omega \quad (3.90)$$

elde edilir.

Hatanın türevleri ise şu şekildedir;

$$\dot{e}_1 = \dot{\omega}_d - \dot{\omega} \quad (3.91)$$

$$\ddot{e}_1 = \ddot{\omega}_d - \ddot{\omega} \quad (3.92)$$

u_1 PID denetçisini ise Eş 3.9'da verilen transfer fonksiyonuna göre sistemin doğal frekansı ve rezonansına göre yazacak olursak yükseltme bütünü için aşağıdaki gibi bir denetçi oluşur;

$$u_{1PID} = \ddot{\omega}_d + 2\zeta_1\omega_{n1}\dot{e}_1 + \omega_{n1}^2 e_1 \quad (3.93)$$

$$\ddot{e} + 2\zeta_1\omega_{n1}\dot{e}_1 + \omega_{n1}^2 e_1 = 0 \quad (3.94)$$

Benzer işlemler döndürme bütünü içinde uygulanırsa u_{2PID} şu şekilde elde edilir;

$$u_2 = T_M = M_\psi + 2J_D(\dot{\omega}\lambda + \dot{\lambda}\omega) + B_y\dot{\lambda} + J_R u_{2PID} \quad (3.95)$$

Eş 3.81 ve Eş 3.95 birlikte çözülürse;

$$J_R \ddot{\lambda} = J_R u_{2PID} \quad (3.96)$$

$$\ddot{\lambda} = u_{2PID} \quad (3.97)$$

olarak bulunur.

Eş 3.11'de yapılan hata tanımı yükseltme bütünü için yazılacak olursa;

$$e_2 = \lambda_d - \lambda \quad (3.98)$$

elde edilir.

Hatanın türevleri ise şu şekildedir;

$$\dot{e}_2 = \dot{\lambda}_d - \dot{\lambda} \quad (3.99)$$

$$\ddot{e}_2 = \ddot{\lambda}_d - \ddot{\lambda} \quad (3.100)$$

u_2 PID denetçisini ise Eş 3.9'da verilen transfer fonksiyonuna göre sistemin doğal frekansı ve rezonansına göre yazacak olursak yükseltme bütünü için aşağıdaki gibi bir denetçi oluşur;

$$u_{2PID} = \ddot{\lambda}_d + 2\zeta_2\omega_{n2}\dot{e}_2 + \omega_{n2}^2 e_2 \quad (3.101)$$

$$\ddot{e} + 2\zeta_2\omega_{n2}\dot{e}_2 + \omega_{n2}^2 e_2 = 0 \quad (3.102)$$

Hesaplanan tork denetçisi tasarımına geçmeden önce Eş 3.84'de yazılan matris formu kapalı hale getirmemiz gerekir;

$$M_1\ddot{\omega} + B_1\dot{\omega} + V_1 = u_{eq1} \quad (3.103)$$

$$M_2\ddot{\lambda} + B_2\dot{\lambda} + V_2 = u_{eq2} \quad (3.104)$$

Her iki bütün için de bulunan denetçiler hesaplanan tork yöntemindeki denetçiler ile birleştirilirse;

$$N_1(q, \dot{q}) = B_1\dot{\omega} + V_1 \quad (3.105)$$

$$N_2(q, \dot{q}) = B_2\dot{\lambda} + V_2 \quad (3.106)$$

Yükseltme bütünü için hesaplanan tork ve PID denetçisi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_1 = M_1(\ddot{\omega}_d - u_{1PID}) + N_1(q, \dot{q}) \quad (3.107)$$

Döndürme bütünü için hesaplanan tork ve PID denetçisi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_2 = M_2(\ddot{\lambda}_d - u_{2PID}) + N_2(q, \dot{q}) \quad (3.108)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 = \dot{e} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\omega} - \dot{\omega}_d \\ \dot{\lambda} - \dot{\lambda}_d \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

$$u_{smc1} = M_1[M^{-1}_1 B_1 e_x + C e_x + k_1 \text{sgn}(\sigma_1)] \quad (3.110)$$

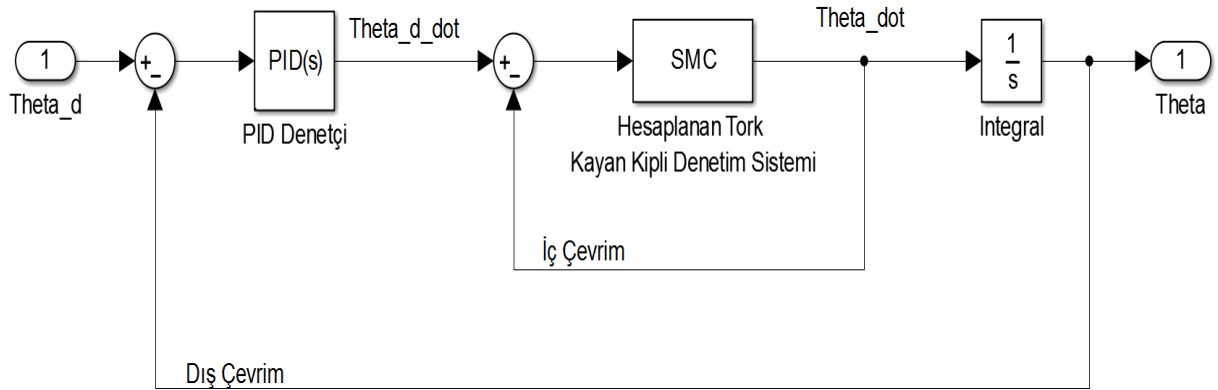
$$u_{smc2} = M_2[M^{-1}_2 B_2 e_y + C e_y + k_2 \text{sgn}(\sigma_2)] \quad (3.111)$$

Yükseltme bütünü için hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_1 = M_1(\ddot{\omega}_d - u_{1PID} - u_{smc1}) + N_1(q, \dot{q}) \quad (3.112)$$

Döndürme bütünü için hesaplanan tork, PID ve kayan kipli denetçi şu şekilde bulunabilir;

$$\tau_2 = M_2(\ddot{\lambda}_d - u_{2PID} - u_{smc2}) + N_2(q, \dot{q}) \quad (3.113)$$



Şekil 3.3. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi için kaskat denetçi tasarımı

Şekil 3.3.'de belirtilen ifadeler ise şunlardır;

$$\text{Theta_d} = \theta_d$$

$$\text{Theta_d_dot} = \dot{\theta}_d$$

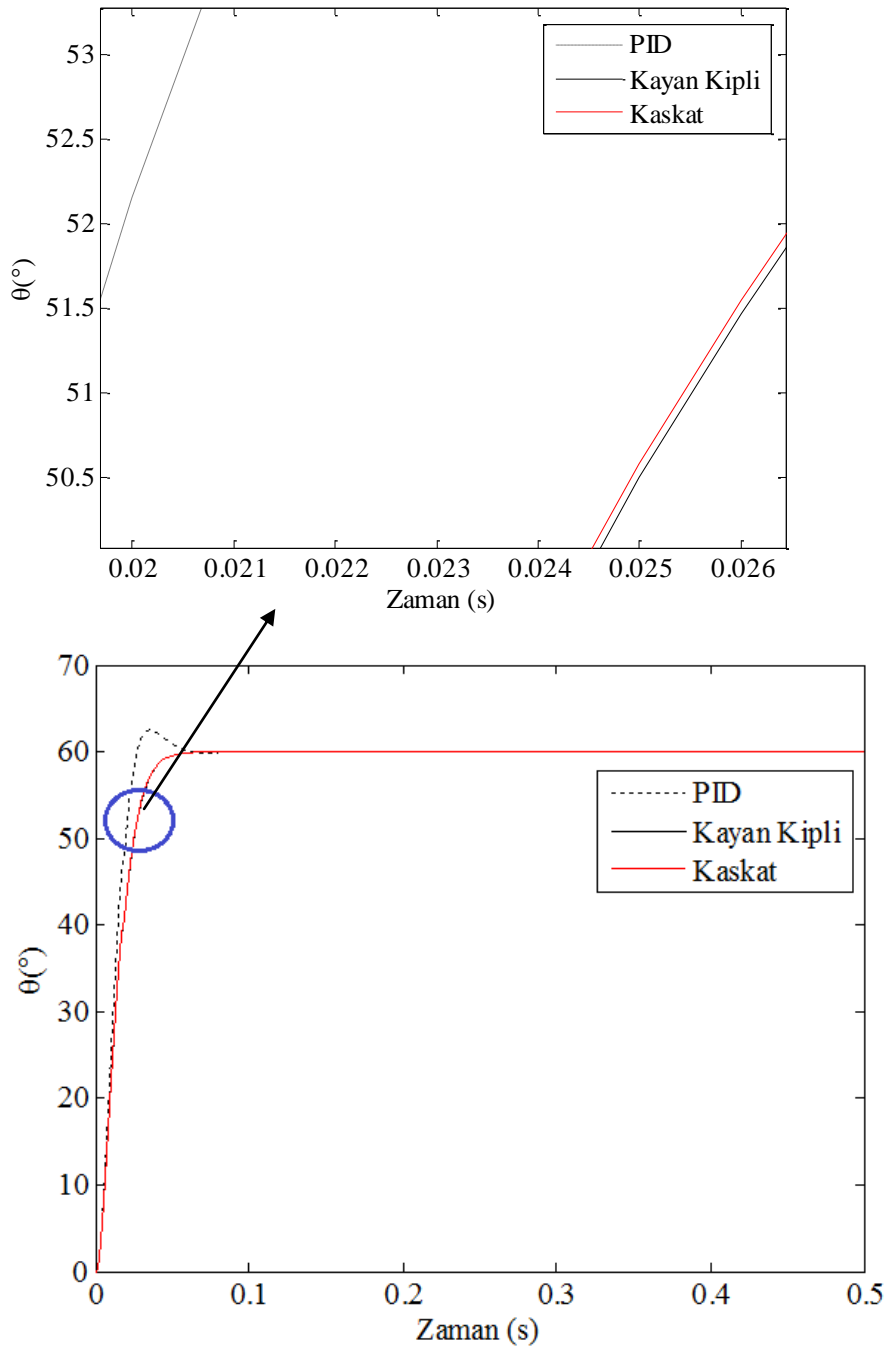
$$\text{Theta_dot} = \dot{\theta}$$

$$\text{Theta} = \theta$$

4. FIRLATMA ARACININ BENZETİM SONUÇLARI

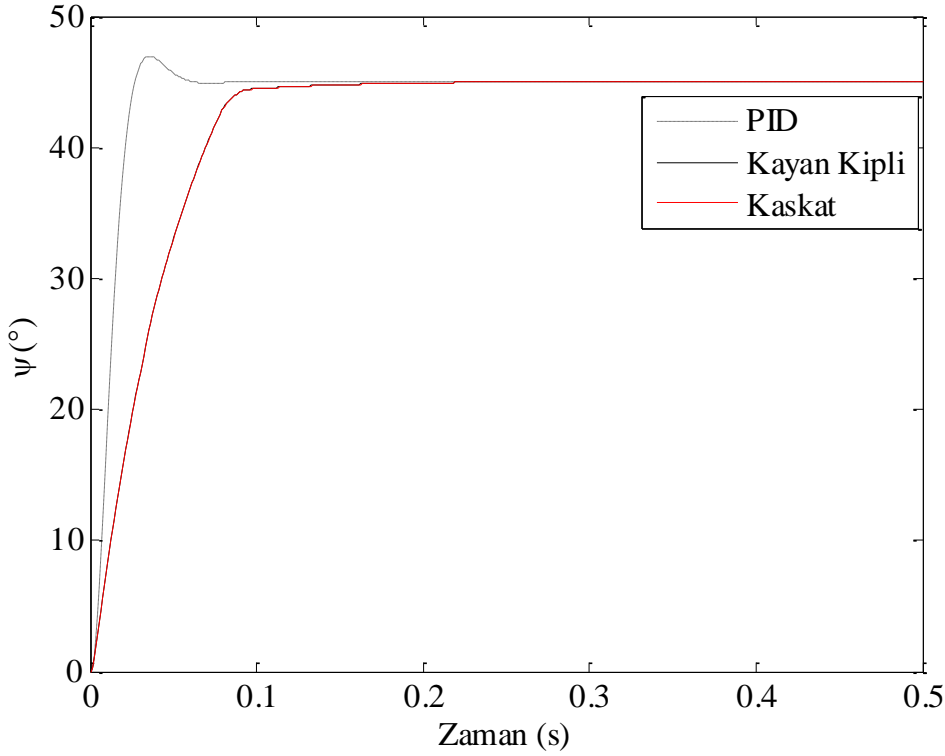
4.1. Atış İtki Kuvveti Tepkisi Olmadan Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Atış itki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;



Şekil 4.1. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları

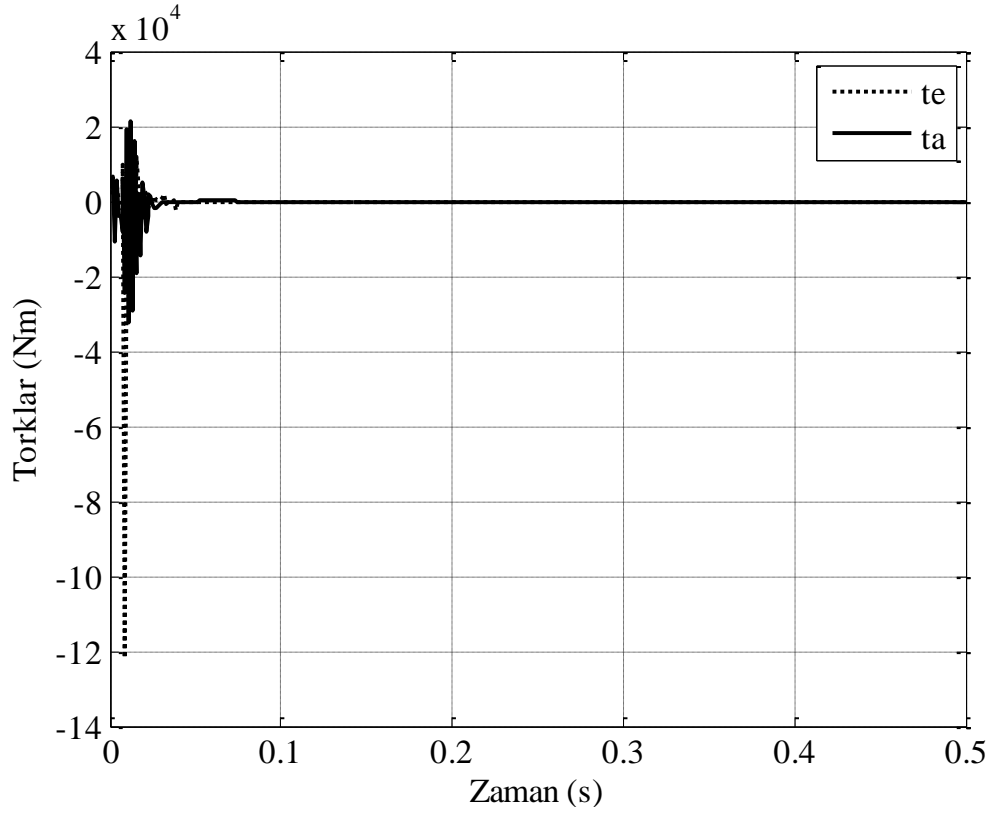
Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve PID denetçisi yükseltme bütününden tek atış yapıldığında aşım yaptıktan sonra yaklaşık 0,1s sonra sistemi istenen konuma getirmektedir. Diğer denetim sistemlerinde ise böyle bir aşım görülmemektedir. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile kaskat denetim sistemi arasında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir.



Şekil 4.2. İtme kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları

Şekil 4.2.'de görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve PID denetçisi yükseltme bütünü tek atış yapıldığında aşım yaptıktan sonra yaklaşık 0,1s sonra sistemi istenen konuma getirmektedir. Diğer denetim sistemlerinde ise böyle bir aşım görülmemektedir. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile kaskat denetim sistemi arasında kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Grafikler üst üste oturmaktadır.

Denetleme sistemleri için gereken torklar; arasındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



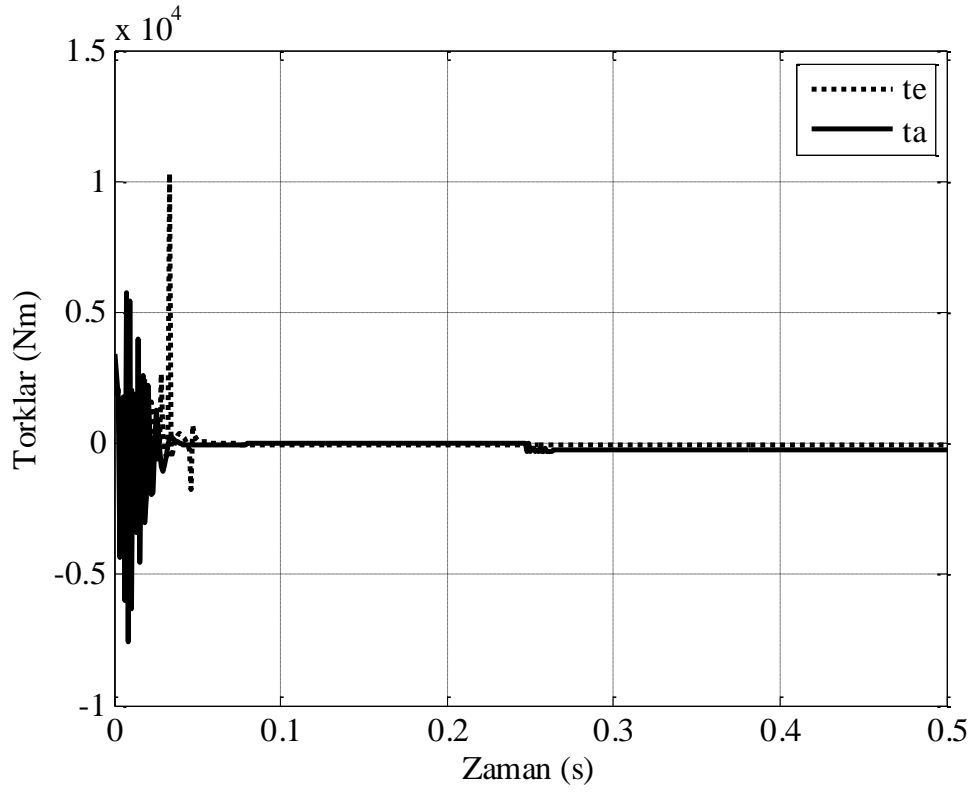
Şekil 4.3. İtke kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve PID denetçisi kısa bir sürede hem yükseltme bütünü hem de döndürme bütünü için yüksek torklar gerektirmektedir.

Şekil 4.3.'de belirtilen ifadeler şunlardır;

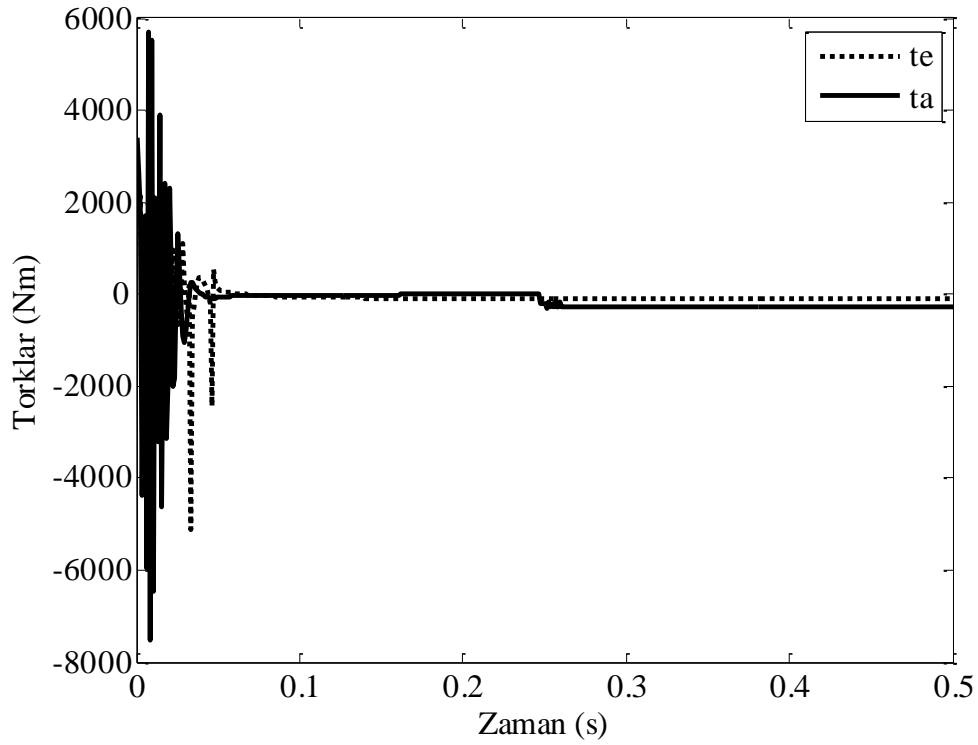
te: yükseltme bütünü için gereken tork

ta: döndürme bütünü için gereken tork



Şekil 4.4. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kısa bir sürede yükseltme bütünü için döndürme bütününe göre daha fazla tork gerekmektedir. Ancak bu denetleyici için Şekil 4.3.'de gerekli olan torklardan daha az torklar gerektiği değerlendirilmiştir.

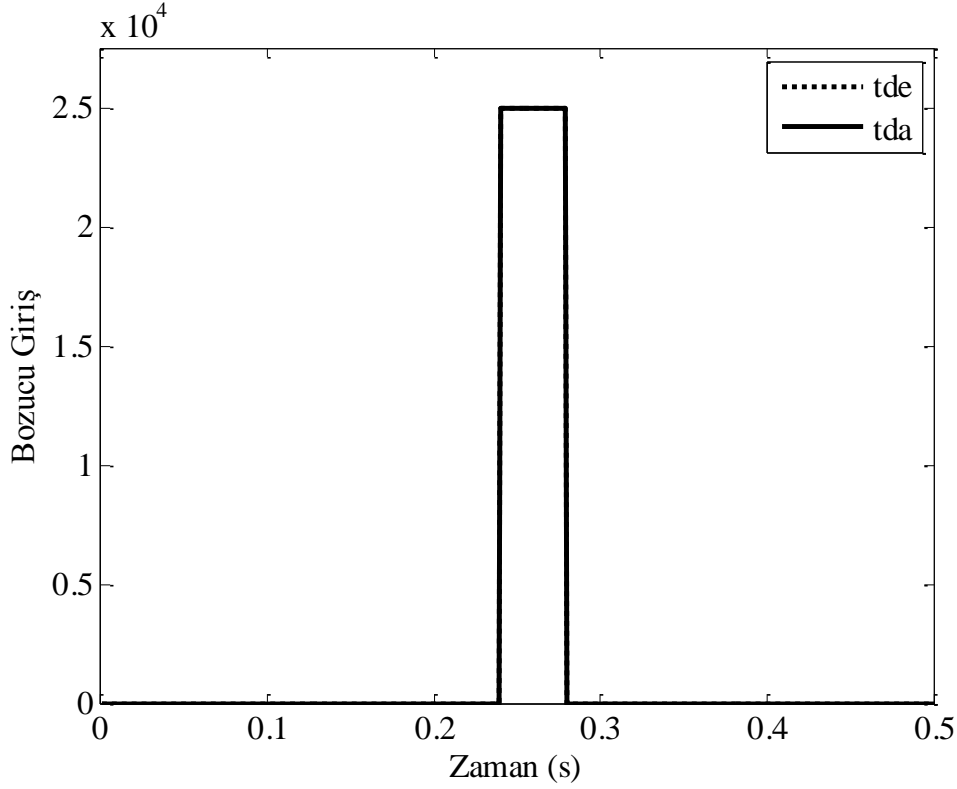


Şekil 4.5. İtki kuvveti tepkisi olmadan, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi; itki kuvveti etkisi olmadan, kaskat denetleme sisteminde hem yükseltme bütünü, hem de döndürme bütünü için gereken torkların daha da az olduğu gözlenmiştir.

Ayrıca itki kuvveti tepkisi olmayan durumda, parametre belirsizlikleri incelenmiş ve tasarlanan denetçinin aynı şekilde denetimi gerçekleştirdiği görülmüştür.

4.2. Atış İtki Kuvveti Tepkisi Olduğunda Elde Edilen Benzetim Sonuçları

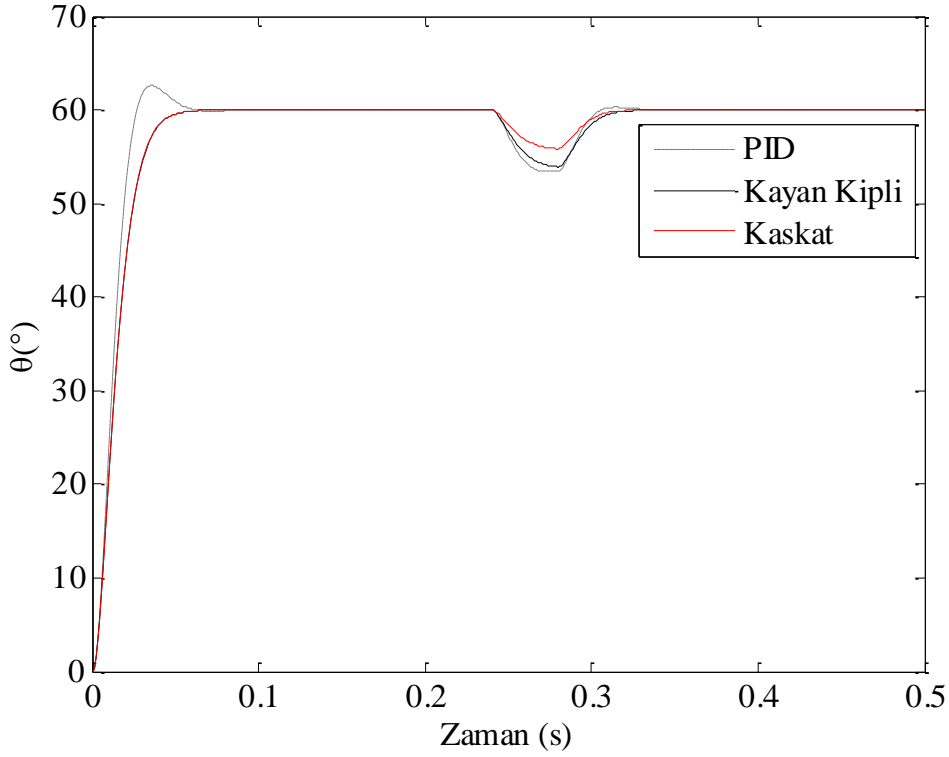


Şekil 4.6. Sisteme etki eden itki kuvveti tepkisi

Şekil 4.6.'da verilen itki kuvveti tepkisi, EK-3. MATLAB kodunda da gösterildiği gibi, her iki bütününde açılmal konuma oturduktan sonra, 0,24 s ile 0,28 s aralığında (4ms) sisteme bozucu etki olarak girildiğinde; elde edilen benzetim sonuçları belirsizlikler de dikkate alındığında her iki denetçi için şu şekildedir;

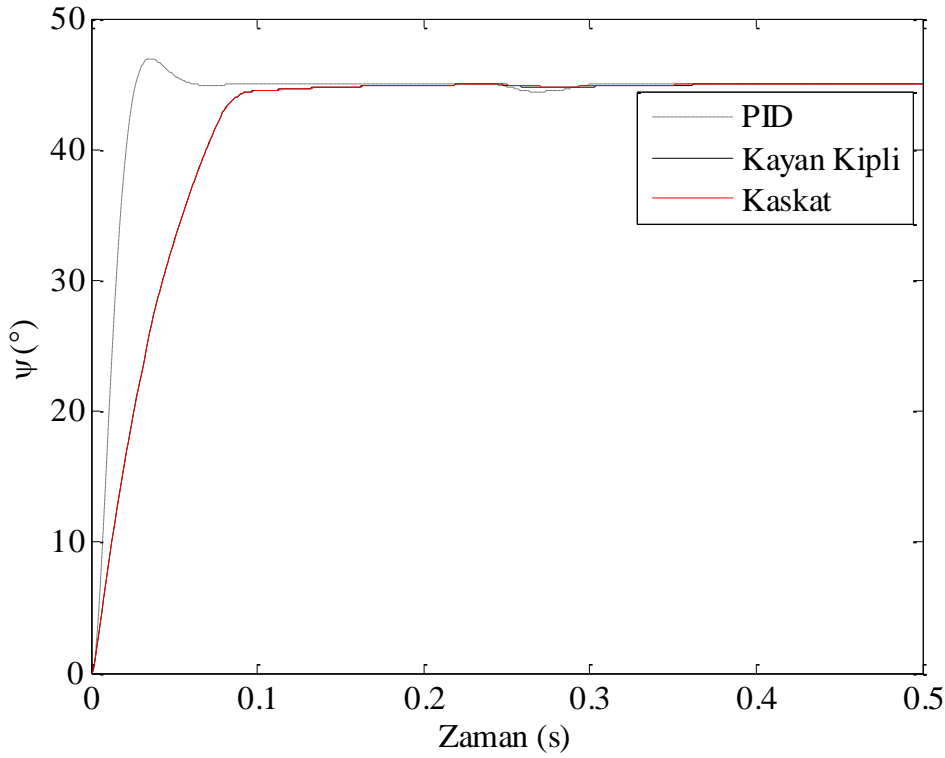
Durum 1

Atış itki kuvveti tepkisi olduğunda, tüm parametreler doğru kabul edilen, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;



Şekil 4.7. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları

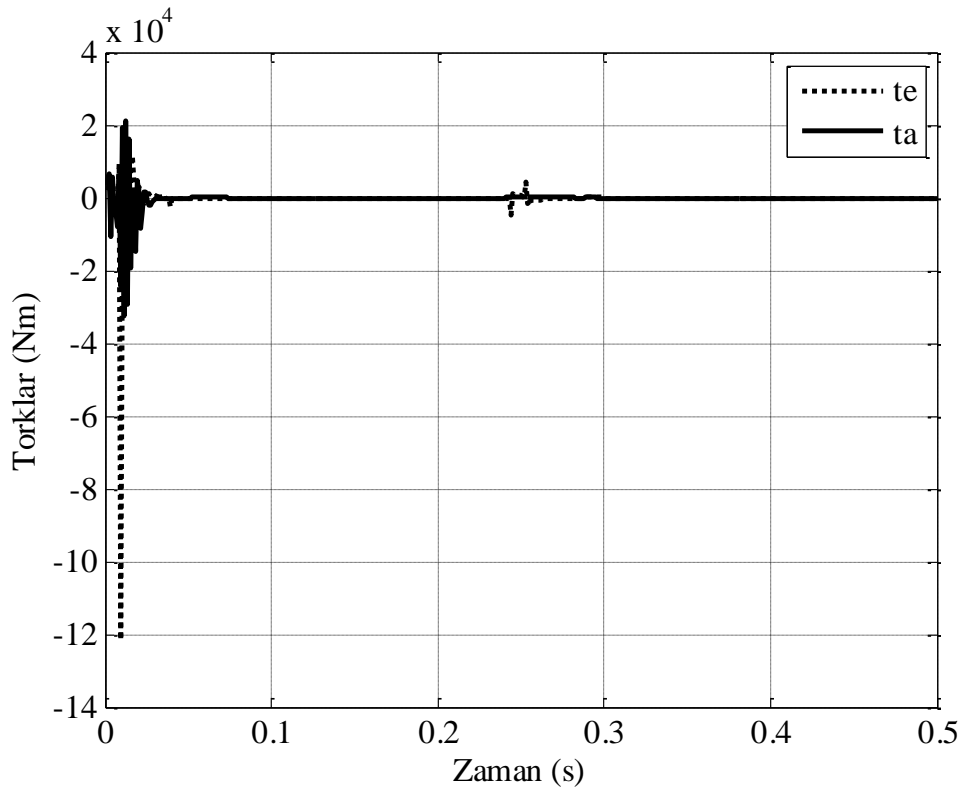
Şekil 4.7.'de görüldüğü üzere hesaplanan tork ve PID denetçisinin; yükseltme bütünü açısal konuma getirdikten sonra, yapılan atışın itki etkisini toparlamakta başarılı olduğu gözlenmektedir. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetim sistemi itki etkisini PID denetçiye göre azaltmaktadır ancak; itki etkisini en aza indiren denetim sistemi kaskat denetim sistemi olarak gözükmetedir.



Şekil 4.8. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları

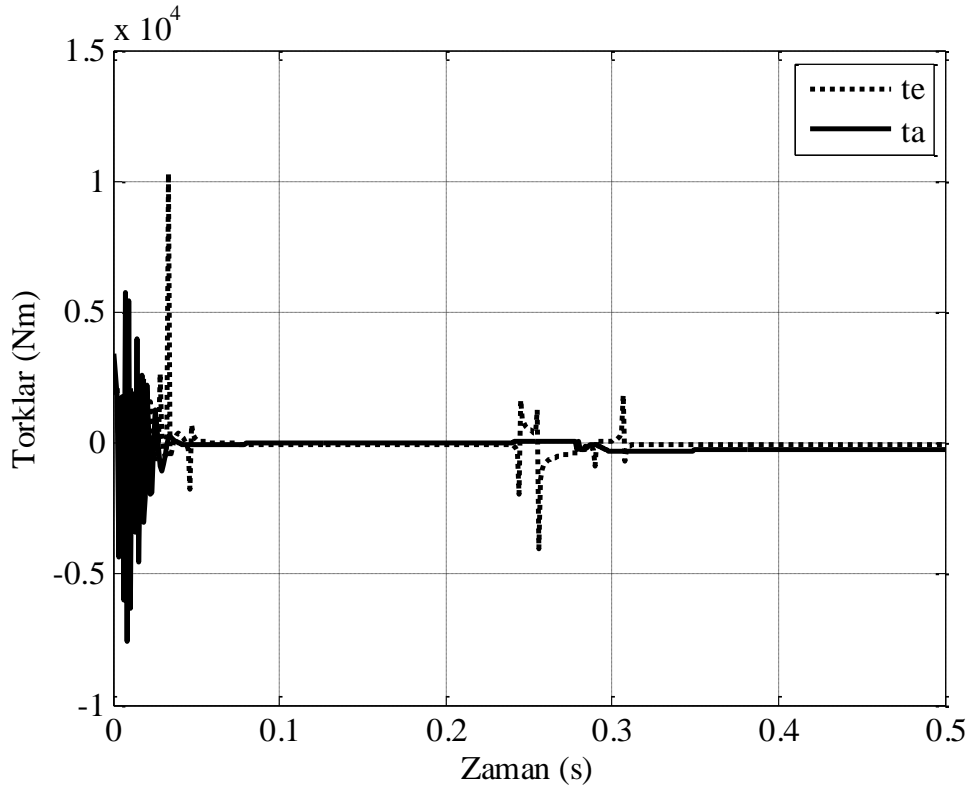
Şekil 4.8.'de görüldüğü üzere hesaplanan tork ve PID denetçisinin; yükseltme bütününe açısal konuma getirdikten sonra, yapılan atışın itki etkisini toparlamakta başarılı olduğu gözlenmektedir. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetim sistemi itki etkisini PID denetçiye göre azaltmaktadır ancak; itki etkisini en aza indiren denetim sistemi kaskat denetim sistemi olarak gözükmetedir.

Denetleme sistemleri için gereken torklar arasındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



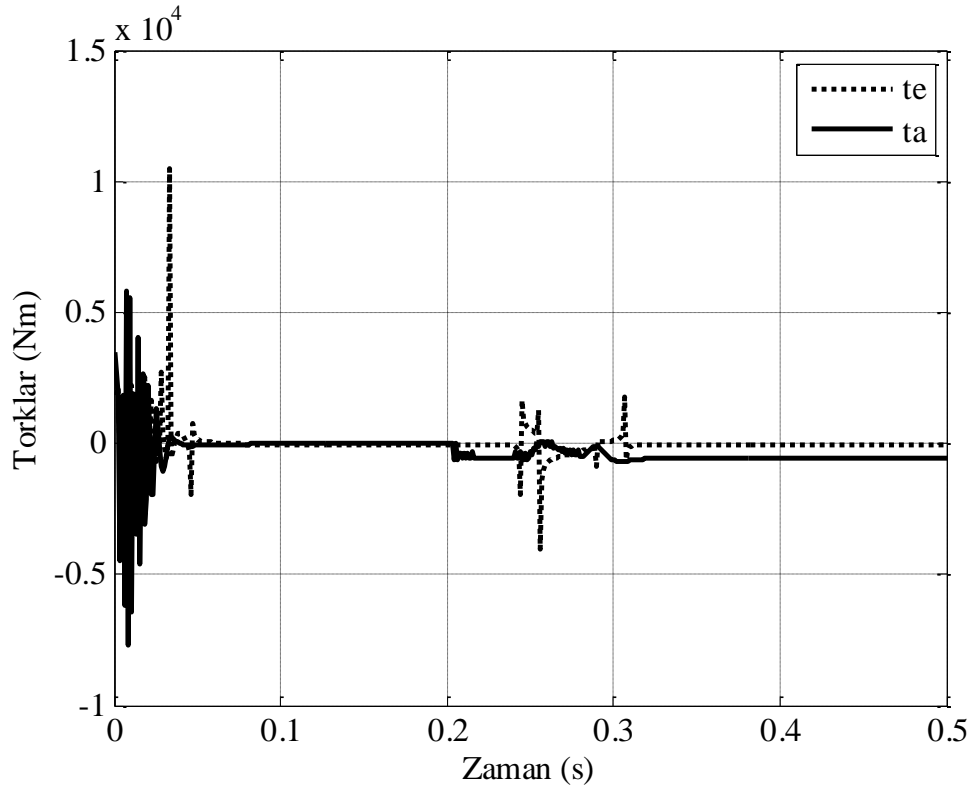
Şekil 4.9. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.9.'da görüldüğü üzere hesaplanan tork ve PID denetçisinin; her iki bütün için de yüksek torklar gerektirdiği ve atış anında da belirli bir tork istediği görülmektedir.



Şekil 4.10. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kısa bir sürede yükseltme bütünü için döndürme bütününe göre daha fazla tork gerekmekte olduğu gözlenmektedir. Atış gerçekleştiği anda ise belirli bir tork gerekmektedir. Ancak bu denetleyici için Şekil 4.9.'da gerekli olan torklardan daha az torklar gerektirdiği değerlendirilmiştir.

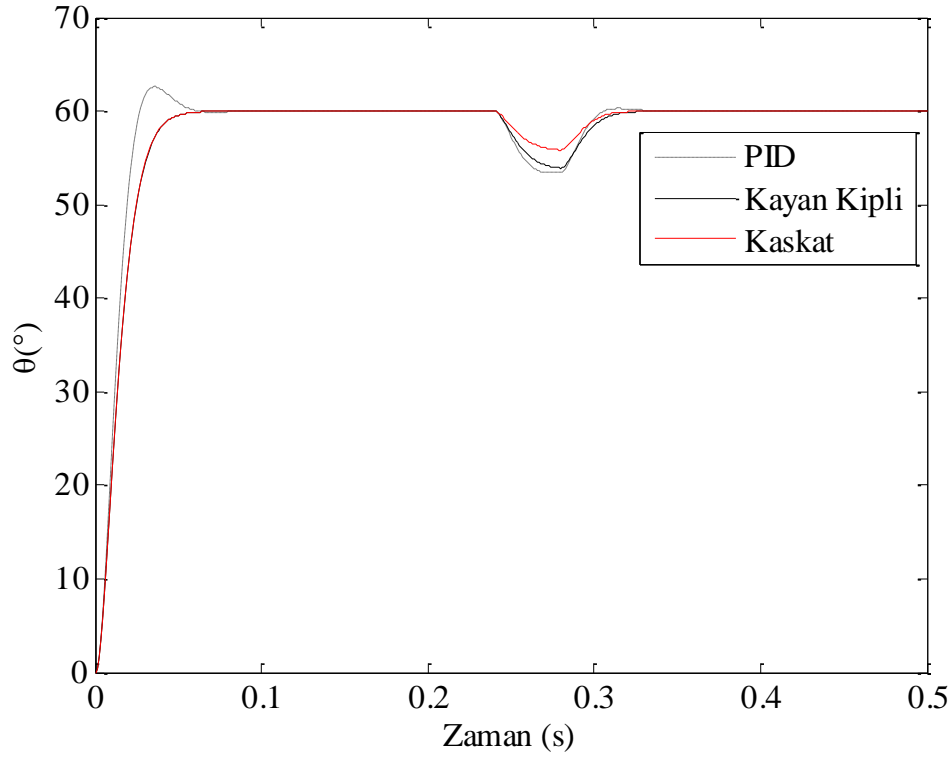


Şekil 4.11. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

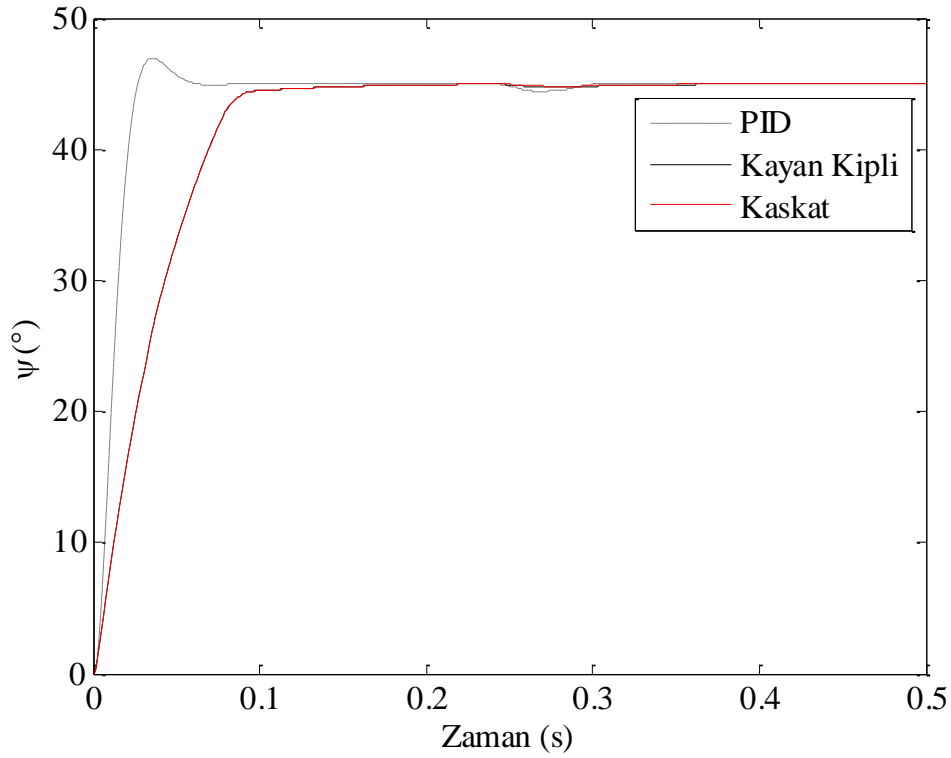
Şekil 4.11.'de görüldüğü gibi; itki kuvveti etkisi olduğunda, kaskat denetleme sisteminde hem yükseltme bütünü, hem de döndürme bütünü için gereken torkların diğer denetleme sistemlerinden, biraz daha az olduğu gözlenmiştir.

Durum 2

Atış itki kuvveti tepkisi olduğunda, parametrelerdeki belirsizliğin %10 fazla olduğu durumda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;

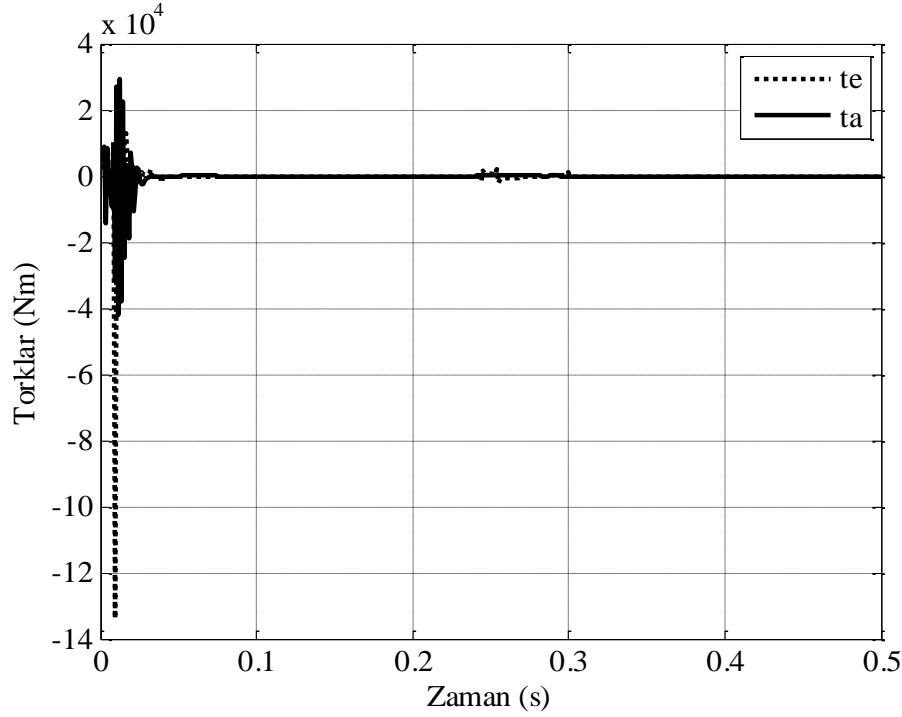


Şekil 4.12. İtme kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 fazla)

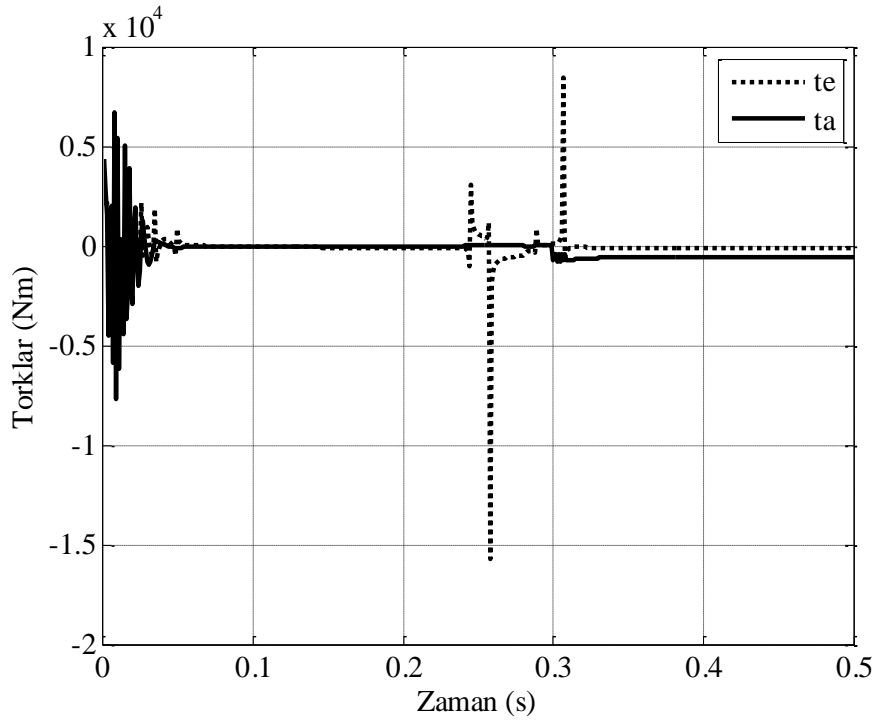


Şekil 4.13. İtme kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 fazla)

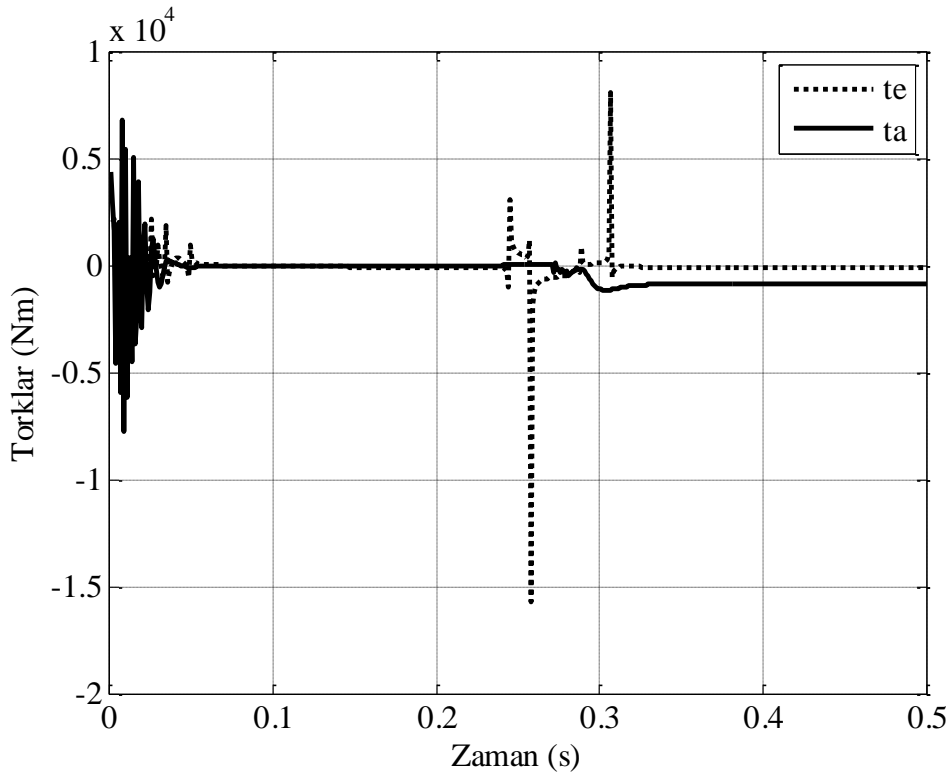
Denetleme sistemleri için gereken torklar; aralarındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



Şekil 4.14. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)



Şekil 4.15. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)

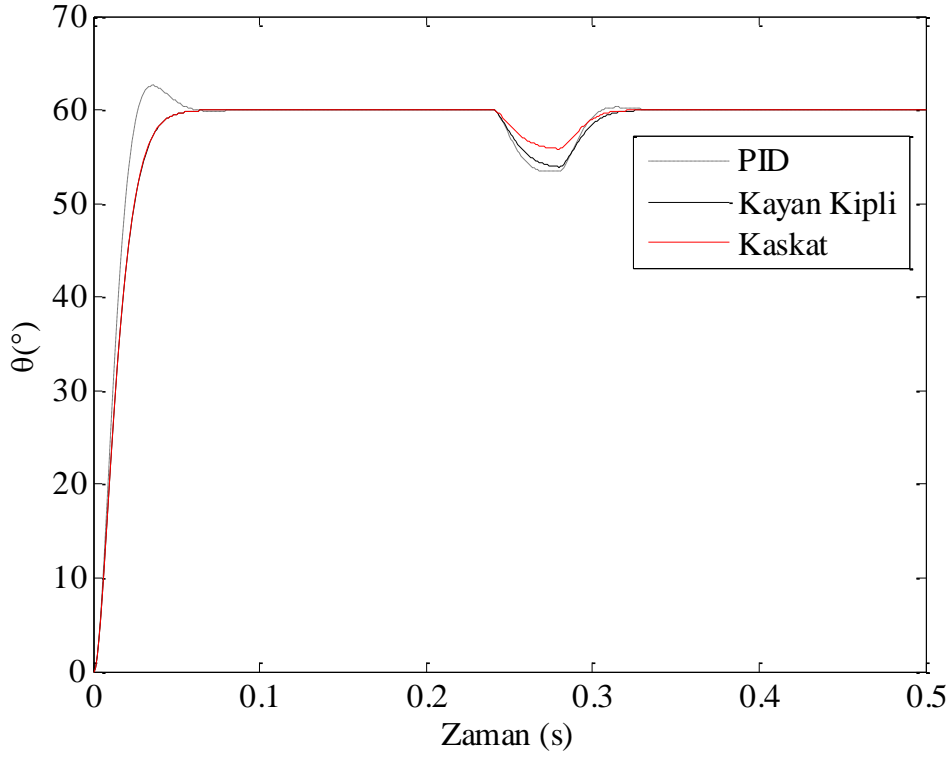


Şekil 4.16. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)

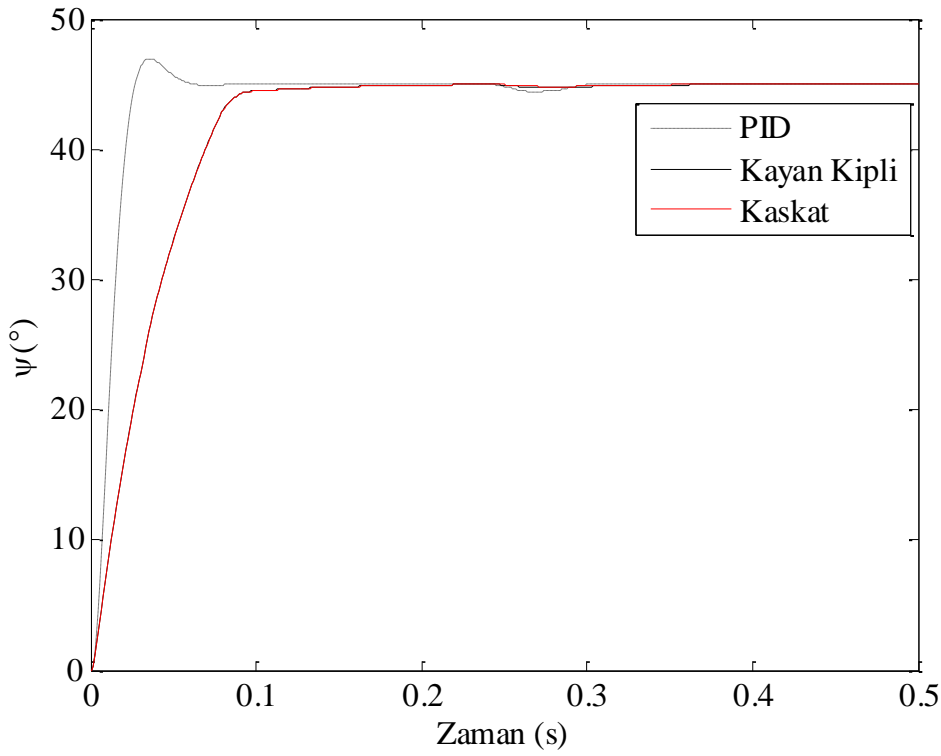
Şekil 4.12., Şekil 4.13., Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da görüldüğü gibi; her bir denetçi için bakıldığında parametre belirsizliğinin %10 fazla kabul edildiği durumda; tasarlanan denetleyicilerin, denetlemeyi başardığı gözlenmektedir. Belirsizliğin sistem için gereken torkları arttırdığı gözlenmiştir.

Durum 3

Atış itki kuvveti tepkisi olduğunda, parametrelerdeki belirsizliğin %10 az olduğu durumda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;

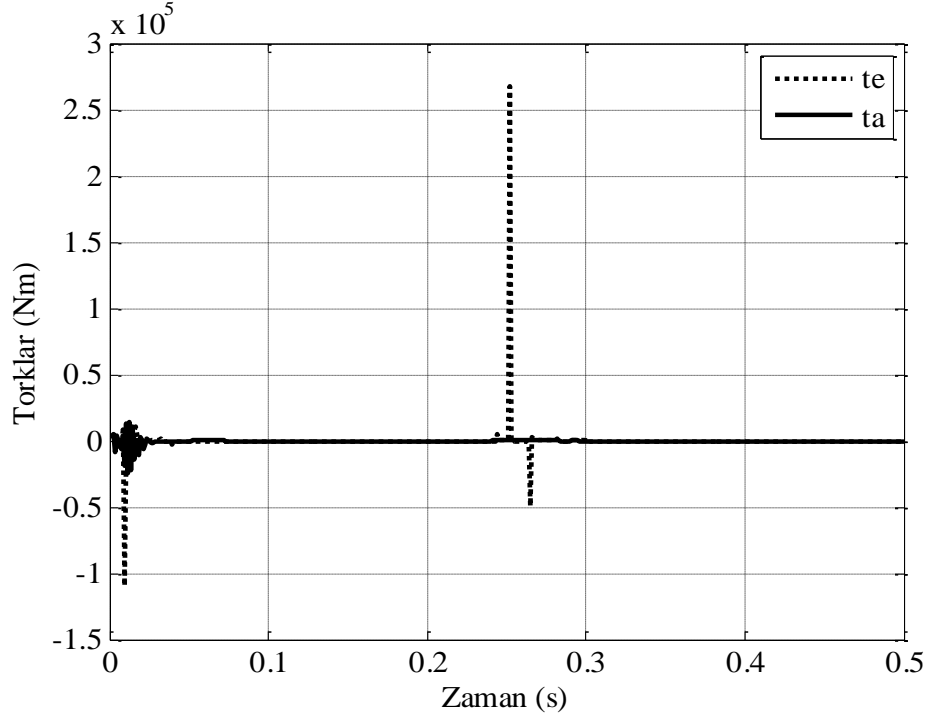


Şekil 4.17. İtme kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 az)

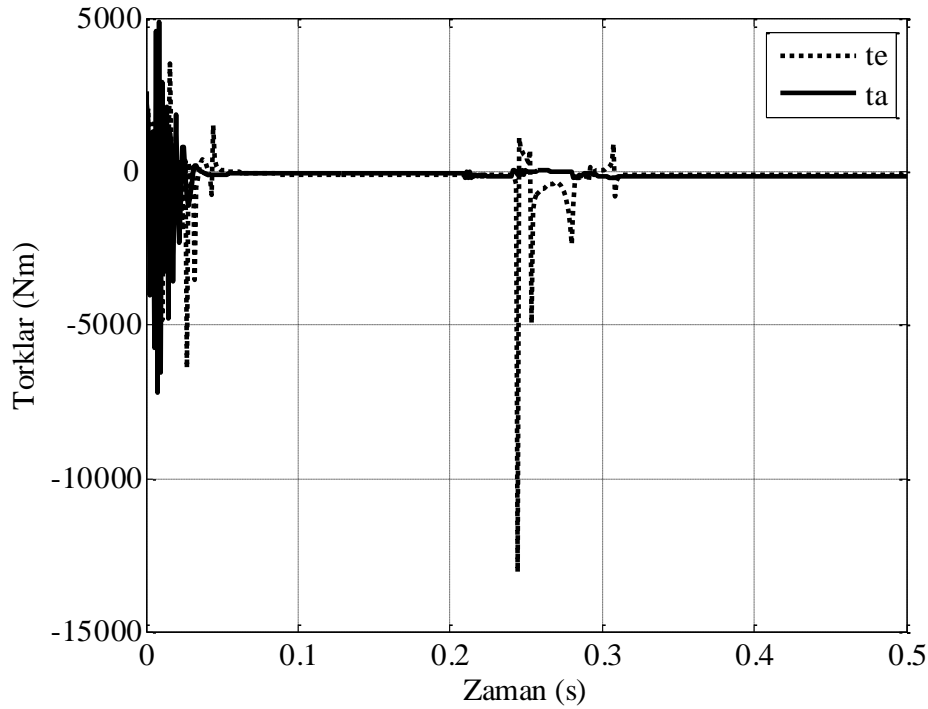


Şekil 4.18. İtme kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %10 az)

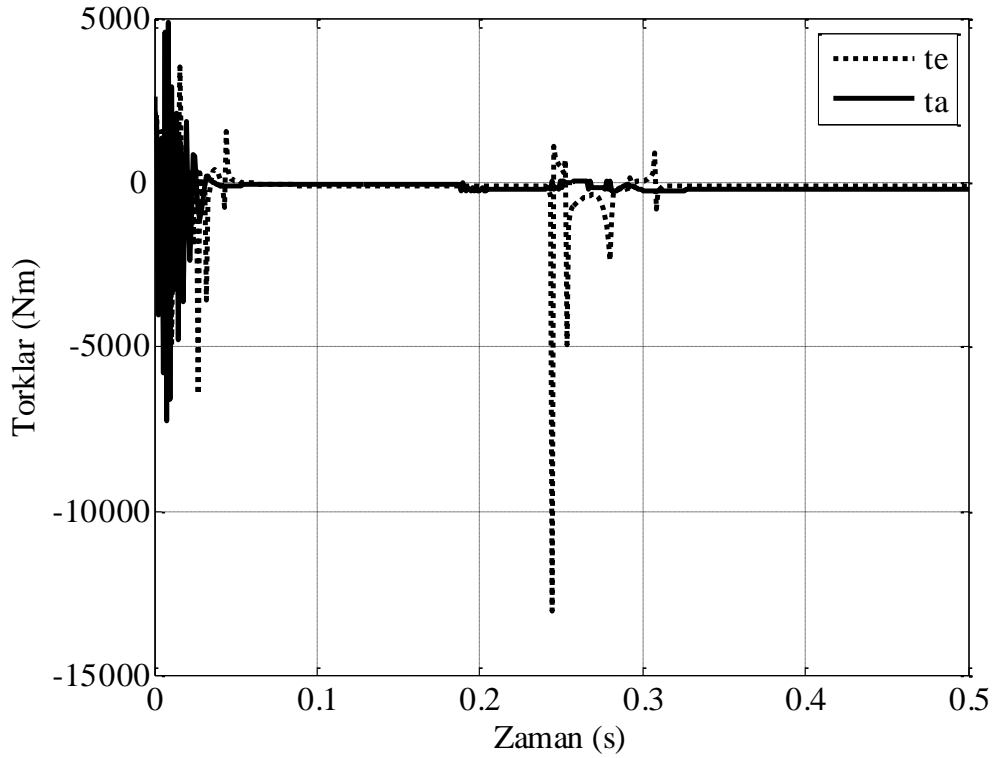
Denetleme sistemleri için gereken torklar; arasındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



Şekil 4.19. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 az)



Şekil 4.20. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 fazla)

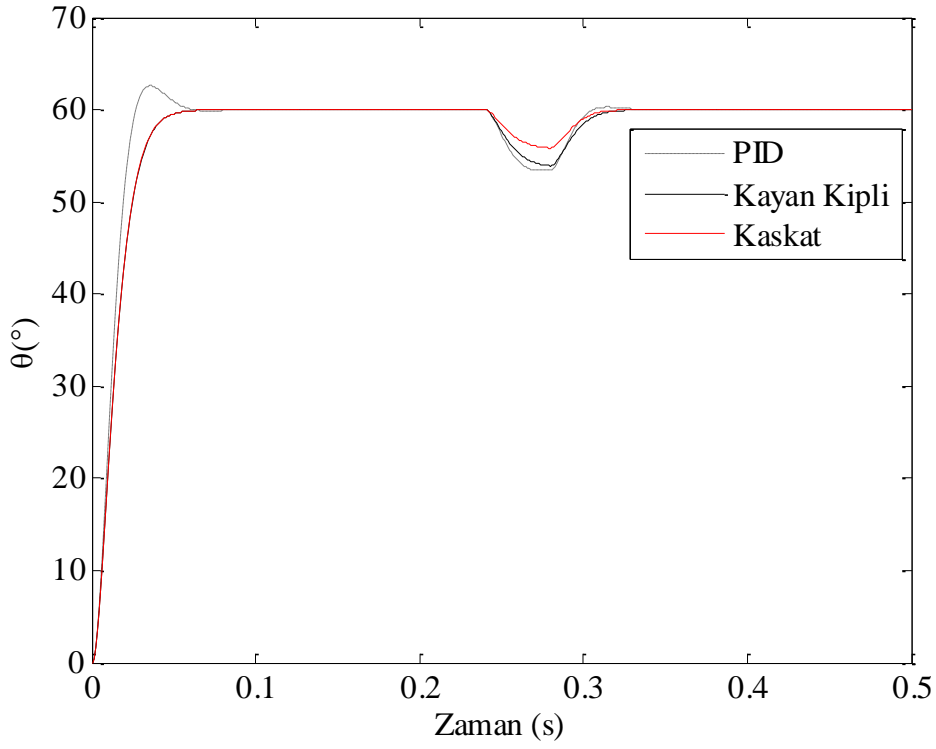


Şekil 4.21. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %10 az)

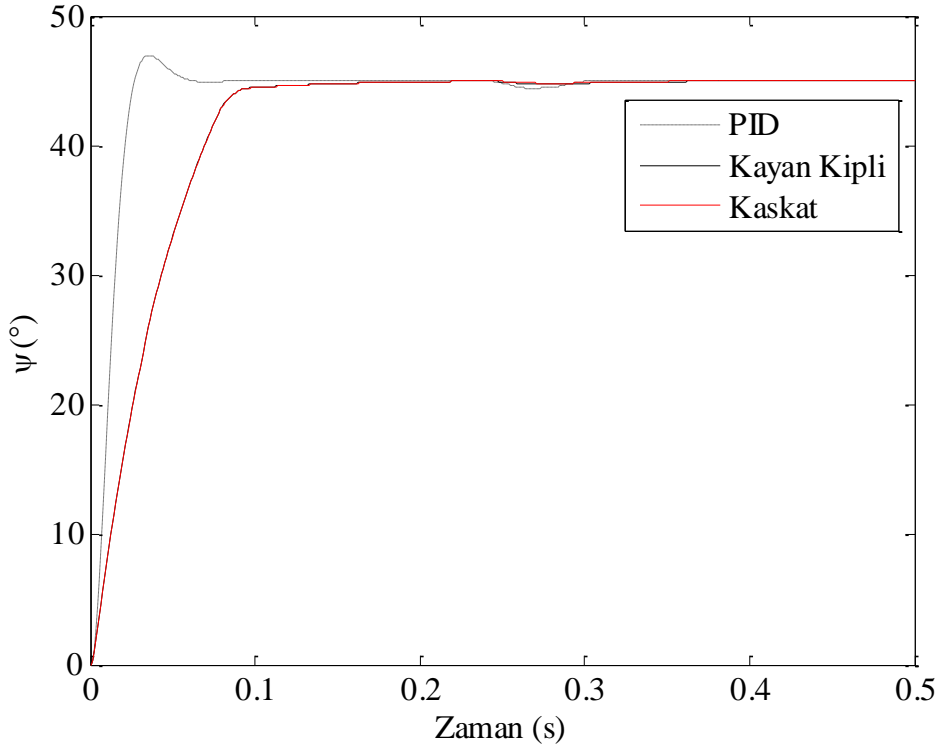
Şekil 4.17., Şekil 4.18, Şekil 4.19., Şekil 4. 20. ve Şekil 4.21.'de görüldüğü gibi; her bir denetçi için bakıldığında parametre belirsizliğinin %10 az kabul edildiği durumda; tasarlanan denetleyicilerin, denetlemeyi başardığı gözlenmektedir. Belirsizlik azaldığında sistem için gereken torkların azaldığı gözlenmiştir.

Durum 4

Atış itki kuvveti tepkisi olduğunda, parametrelerdeki belirsizliğin %20 fazla olduğu durumda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;

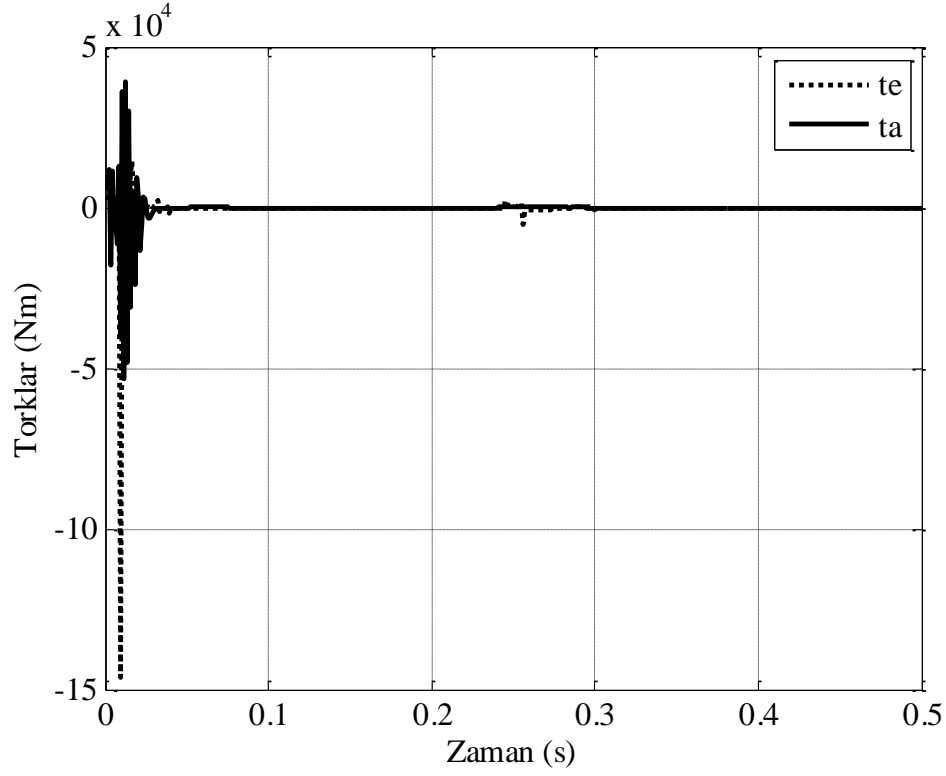


Şekil 4.22. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 fazla)

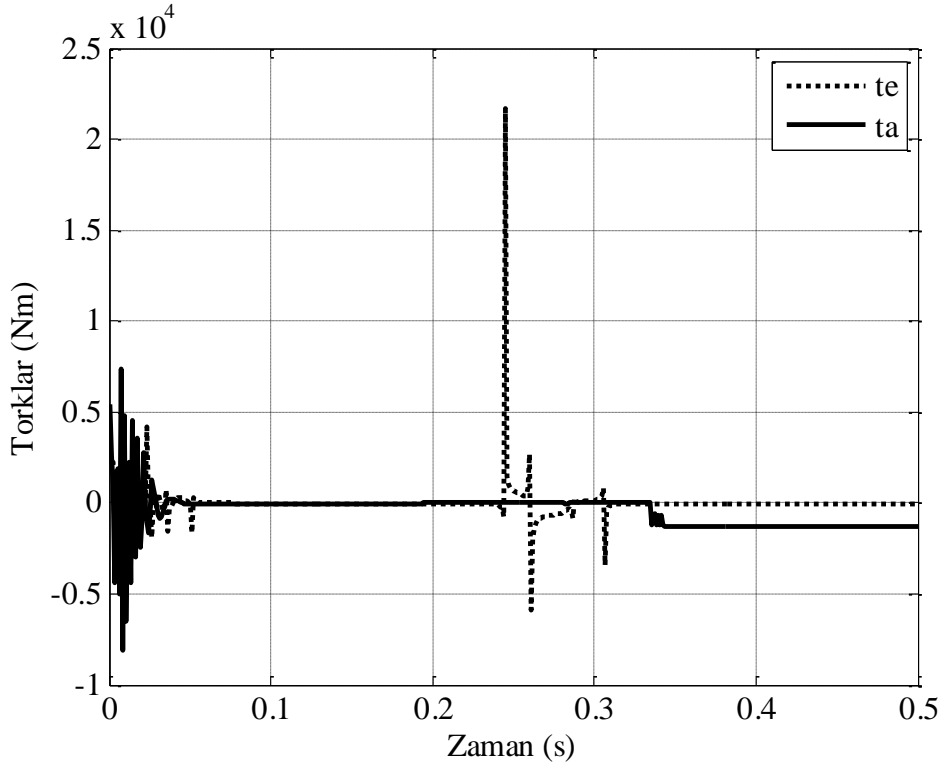


Şekil 4.23. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 fazla)

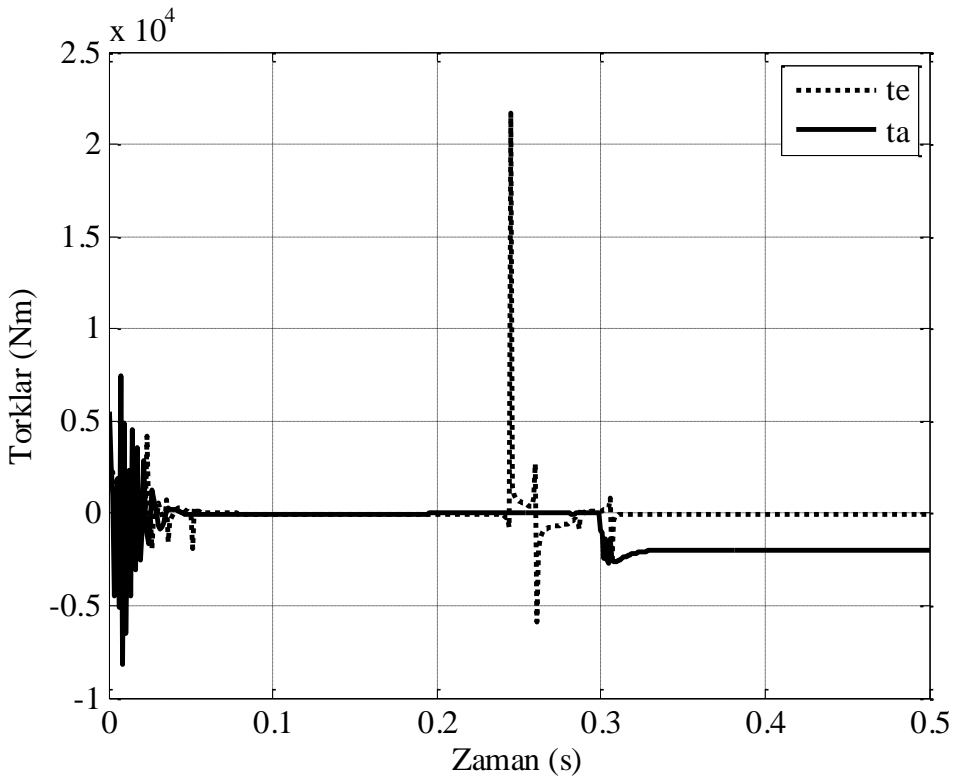
Denetleme sistemleri için gereken torklar; aralarındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



Şekil 4.24. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)



Şekil 4.25. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)

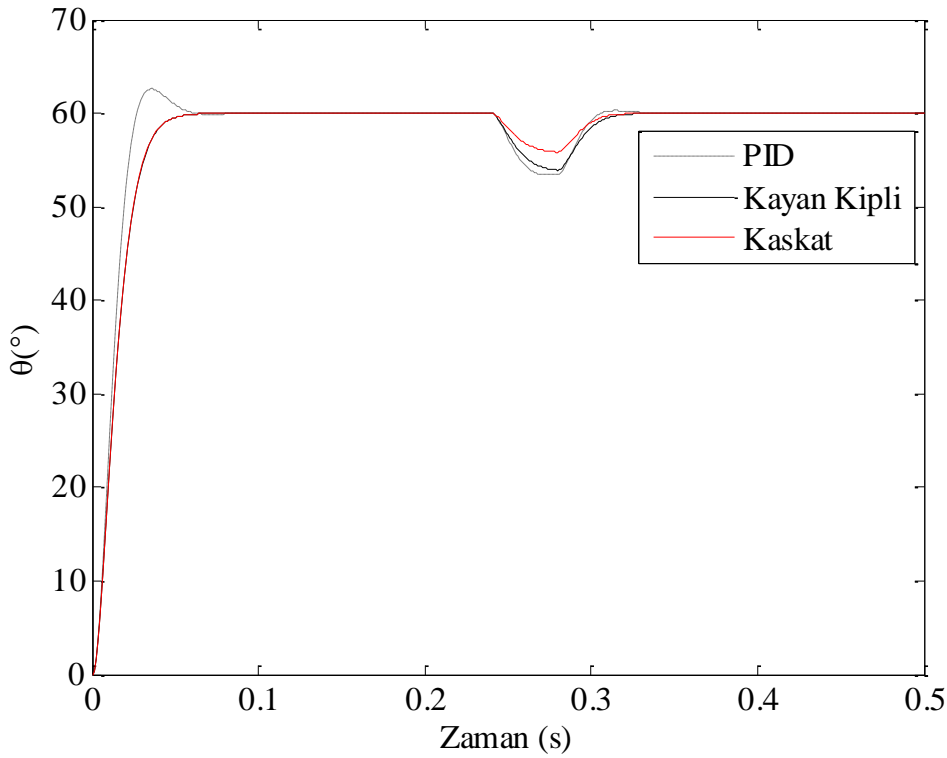


Şekil 4.26. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)

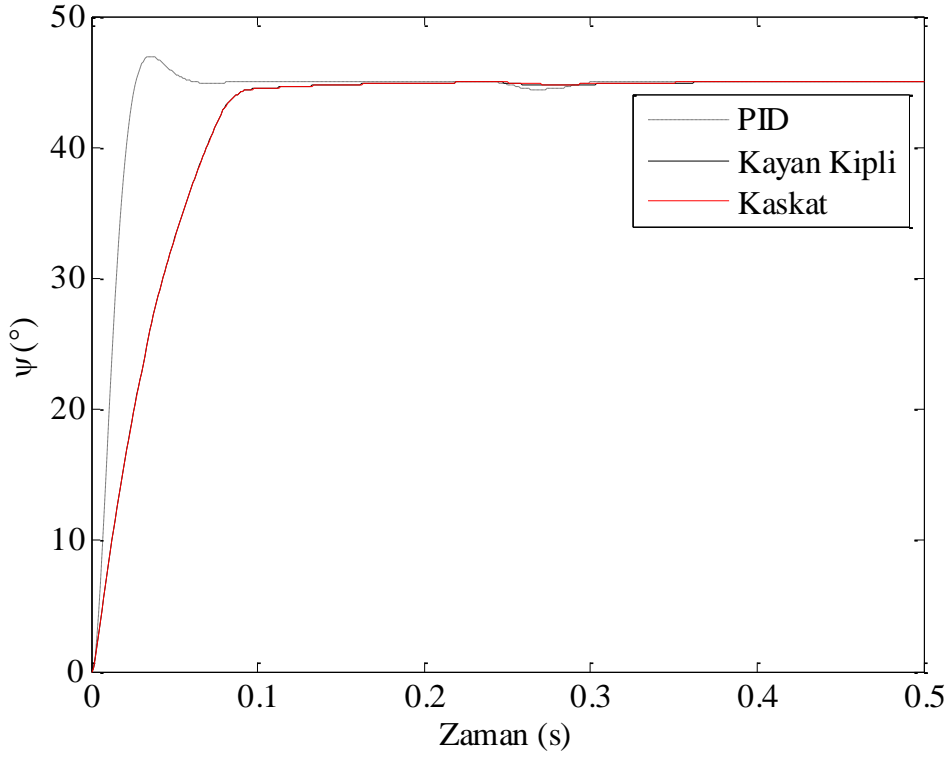
Şekil 4.22., Şekil 4.23., Şekil 4.24., Şekil 4.25. ve Şekil 4.26.'da görüldüğü gibi; her bir denetçi için bakıldığında parametre belirsizliğinin %20 fazla kabul edildiği durumda; tasarlanan denetleyicilerin, denetlemeyi başardığı gözlenmektedir. Belirsizlik arttığında sistem için gereken torkların da arttığı gözlenmiştir. Ayrıca belirsizlik arttıkça da yükselme ve döndürme bütünü arasındaki faz farkı özellikle kaskat denetim sistemi için artmaktadır.

Durum 5

Atış itki kuvveti tepkisi olduğunda, parametrelerdeki belirsizliğin %20 az olduğu durumda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi için kaskat denetim sistemi için benzetim sonuçları;

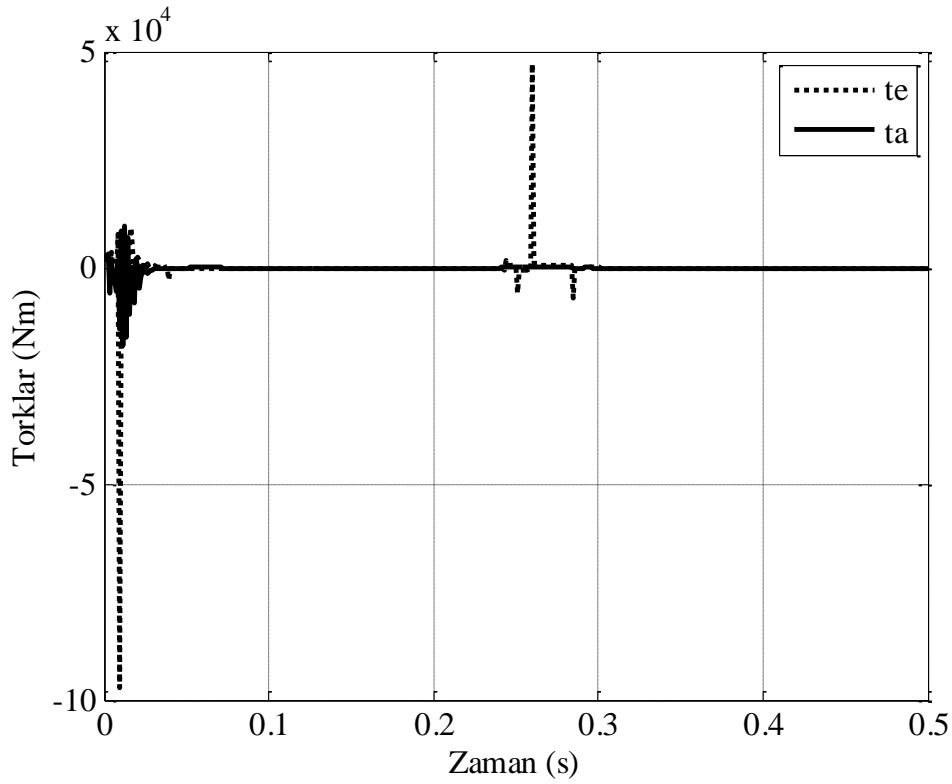


Şekil 4.27. İtme kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 az)

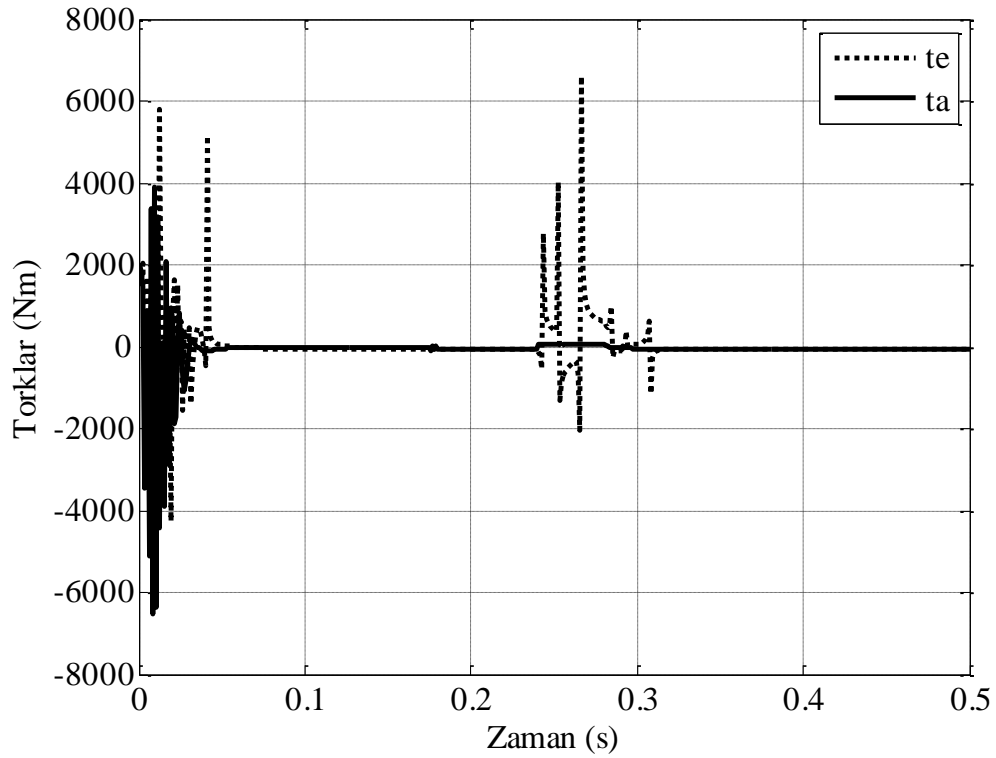


Şekil 4.28. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları (Parametre belirsizliği %20 az)

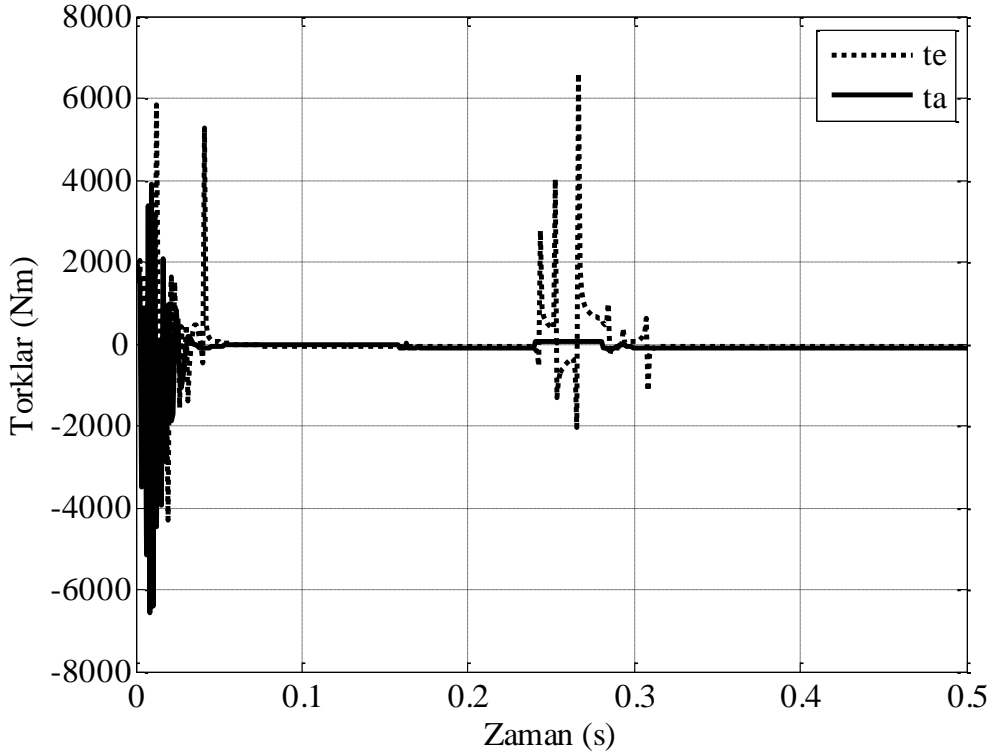
Denetleme sistemleri için gereken torklar; arasındaki farkın daha anlaşılır olabilmesi adına, her denetçi için ayrı ayrı aşağıdaki şekilde verilmiştir;



Şekil 4.29. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 fazla)



Şekil 4.30. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 az)

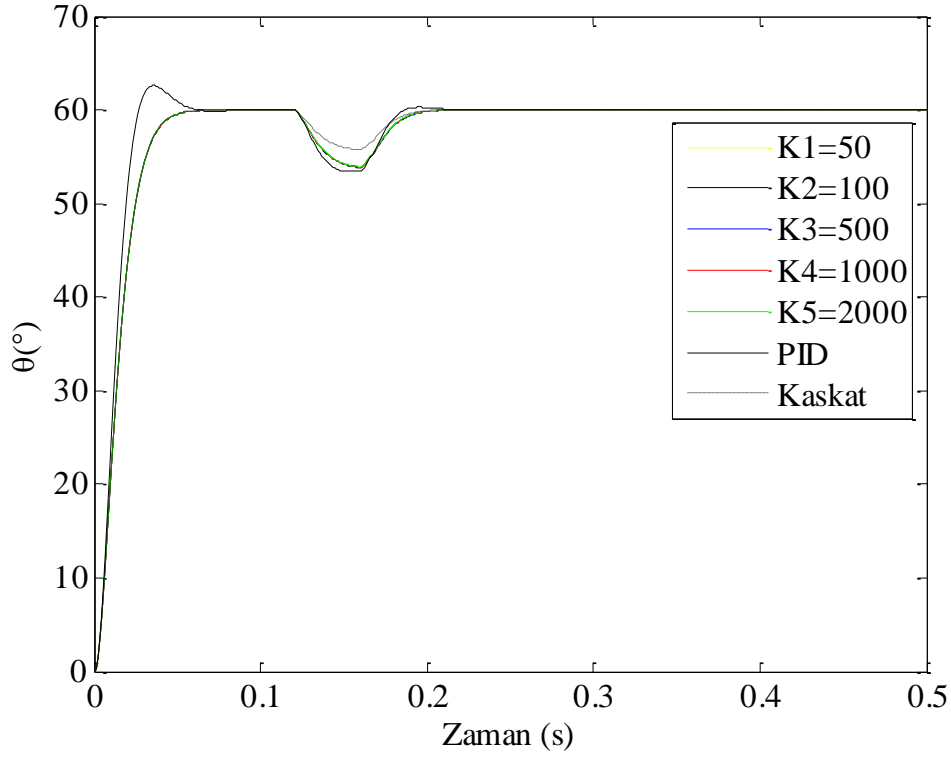


Şekil 4.31. İtki kuvveti tepkisi olduğunda, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar (Parametre belirsizliği %20 az)

Şekil 4.27., Şekil 4.28., Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31.'de görüldüğü gibi; her bir denetçi için bakıldığında parametre belirsizliğinin %20 az kabul edildiği durumda; tasarlanan denetleyicilerin, denetlemeyi başardığı gözlenmektedir. Belirsizlik azaldığında sistem için gereken torkların da azaldığı gözlenmiştir.

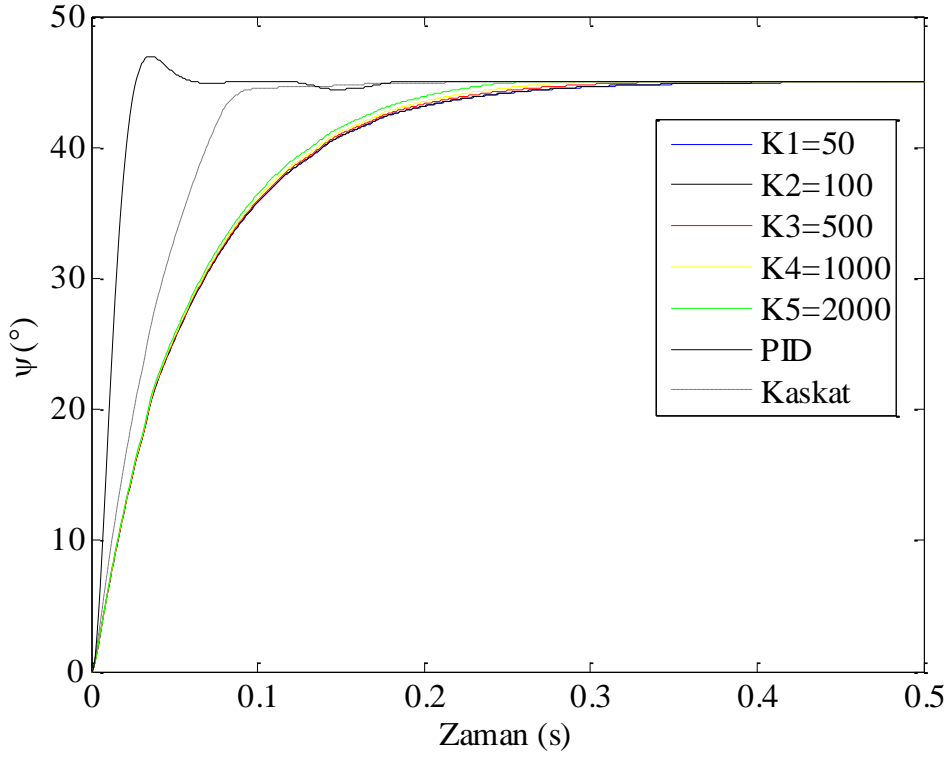
4.3. Atış İtki Kuvveti Tepkisi Olan Fırlatma Aracında Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçi Kazanç Katsayılarının Kaskat Denetim Sistemi ile Birlikte Değerlendirilmesi

Kayan kipli kazanç katsayılarının; 50, 100, 500, 1000 ve 2000 olarak alındığında oluşan benzetim sonuçları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi ile birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki gibi olmaktadır;



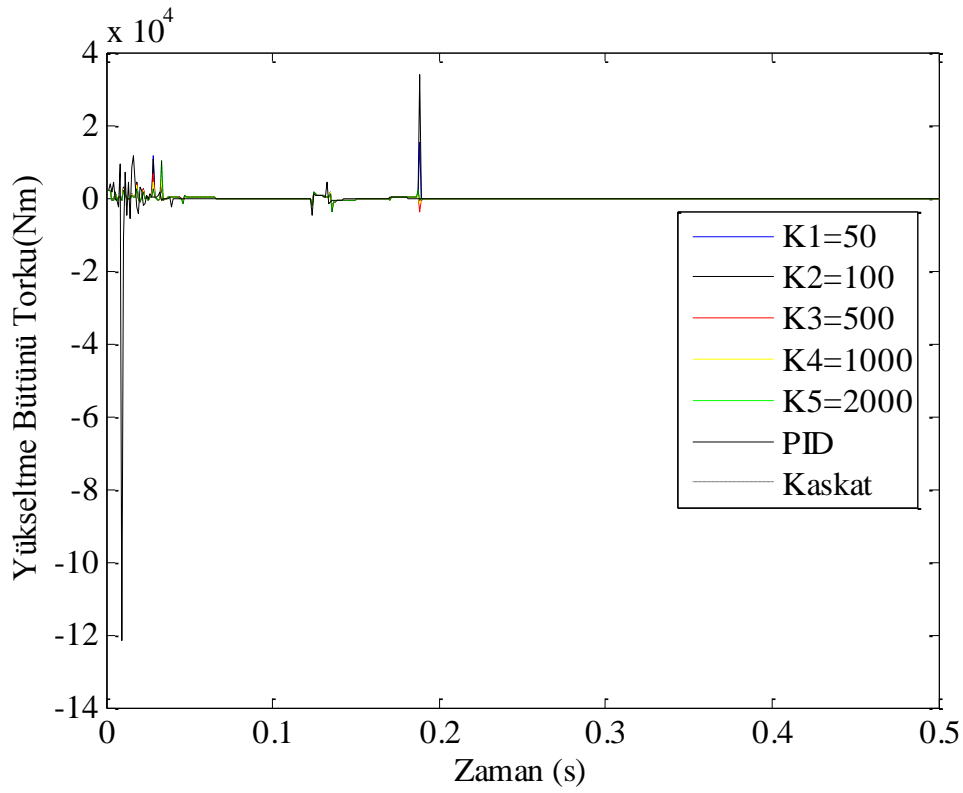
Şekil 4.32. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için yükseltme bütünü konum denetimi

Şekil 4.32.'de görüldüğü gibi yükseltme bütünü için, hesaplamalı tork ve PID denetçisine göre hesaplamalı tork ve kayan kipli denetçi daha iyi bir denetleme gerçekleştirirken; kaskat denetim sistemi itki etkisini en aza indirgeyen denetim sistemi olarak görülmektedir. Kayan kipli kazanç katsayısı arttıkça konum denetimi hassasiyeti artmaktadır.

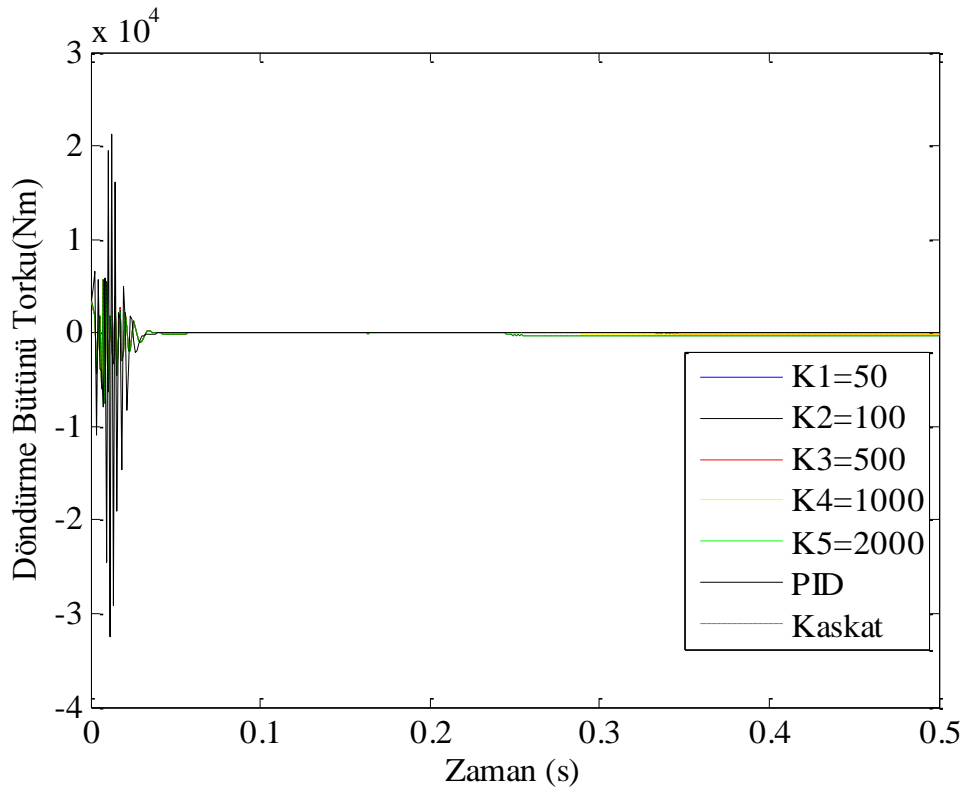


Şekil 4.33. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için döndürme bütünü konum denetimi itki kuvvetine etkisi

Şekil 4.33.'de görüldüğü gibi döndürme bütünü için, hesaplamalı tork ve PID denetçisine göre hesaplamalı tork ve kayan kipli denetçi daha iyi bir denetleme gerçekleştirirken; kaskat denetim sistemi itki etkisini en aza indirgeyen denetim sistemi olarak görülmektedir. Kayan kipli kazanç katsayısı arttıkça konum denetimi hassasiyeti artmaktadır.



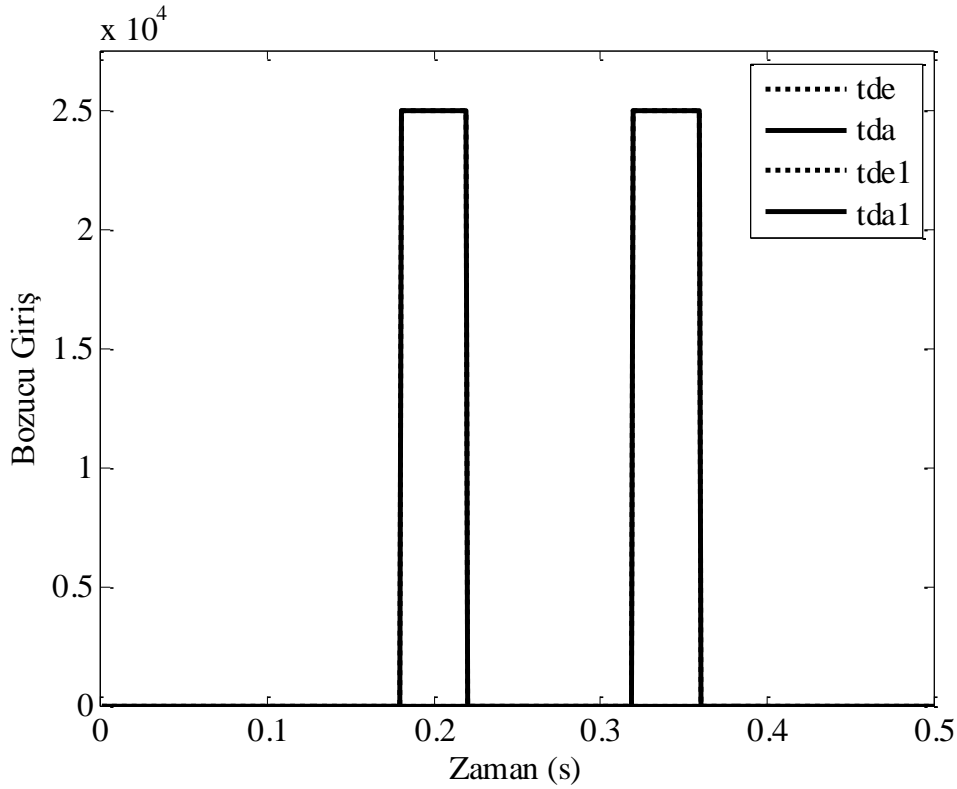
Şekil 4.34. Farklı kayan kipli kazançları, PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için yükseltme bütünü denetimi için gereken tork



Şekil 4.35. Farklı kayan kipli kazançları ve PID denetçisi ve kaskat denetim sistemi için döndürme bütünü denetimi için gereken tork

Şekil 4.34. ve Şekil 4.35.'de görüldüğü gibi her iki bütün için, hesaplamalı tork ve PID denetçisine göre hesaplamalı tork ve kayan kipli denetçi daha iyi bir denetleme gerçekleştirirken; kaskat denetim sistemi bu iki yöntemle göre daha avantajlı gözükmektedir. Kayan kipli kazanç katsayısı arttıkça gerekli olan tork değeri artmakta; ancak kaskat denetim sistemi, hesaplanan tork ve PID denetçisine göre daha makul değerler almaktadır.

4.4. Atış İtki Kuvveti Tepkisi Olan Fırlatma Aracında Hesaplanan Tork ve PID, Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli ve Kaskat Denetim Sisteminin Ardışık İki Adet Salvo Atışa Maruz Kalması



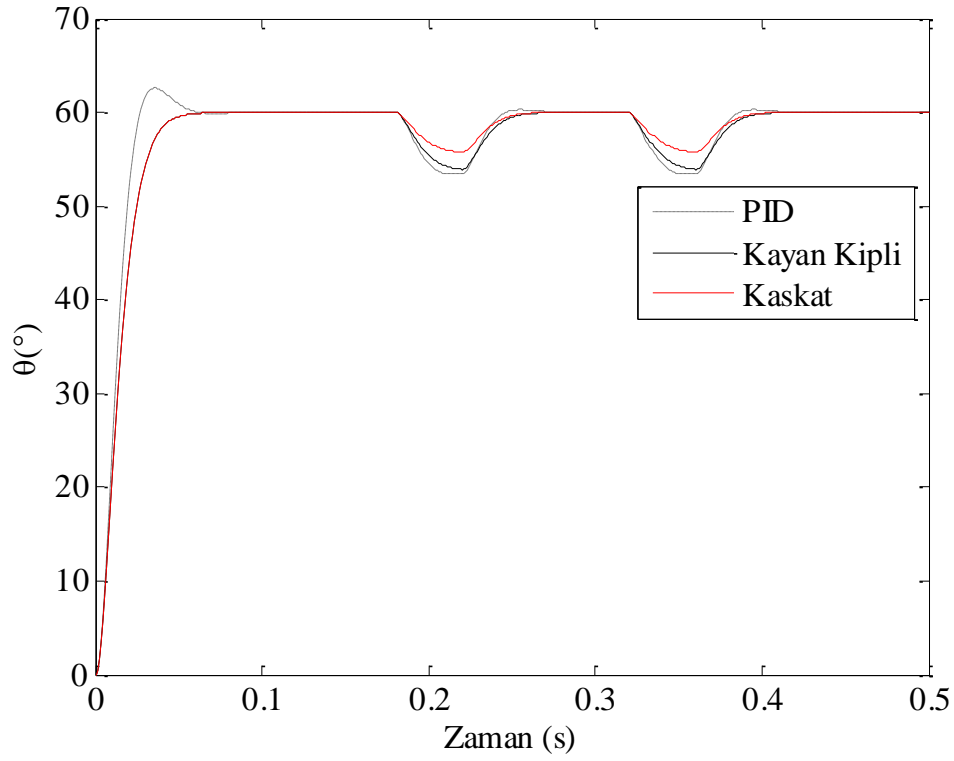
Şekil 4.36. İki adet salvo atış gerçekleştiğinde sisteme etki eden itki kuvveti tepkileri

Şekil 4.36.'da verilen itki kuvveti tepkileri, şu şekildedir;

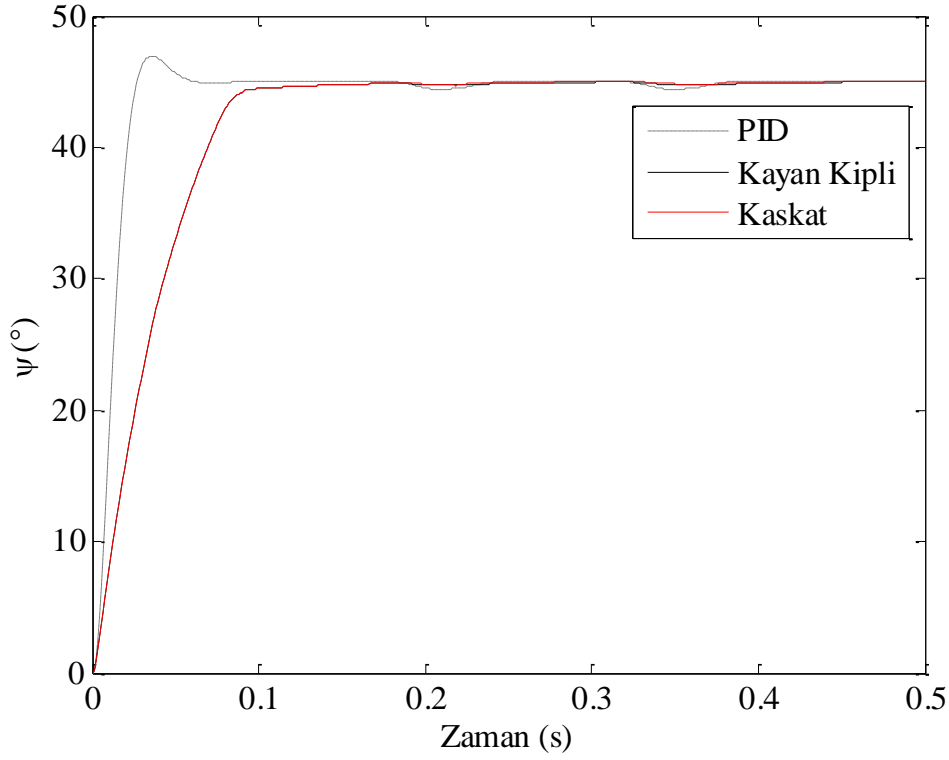
1. atış 0,18 s ile 0,22 s aralığında,
2. atış 0,32 s ile 0,36 s aralığında,

olacak şekilde, EK-4.'de MATLAB kodu verilen, iki adet salvo atış, sisteme bozucu etki olarak girildiğinde; elde edilen benzetim sonuçları hesaplanan tork ve PID, hesaplanan

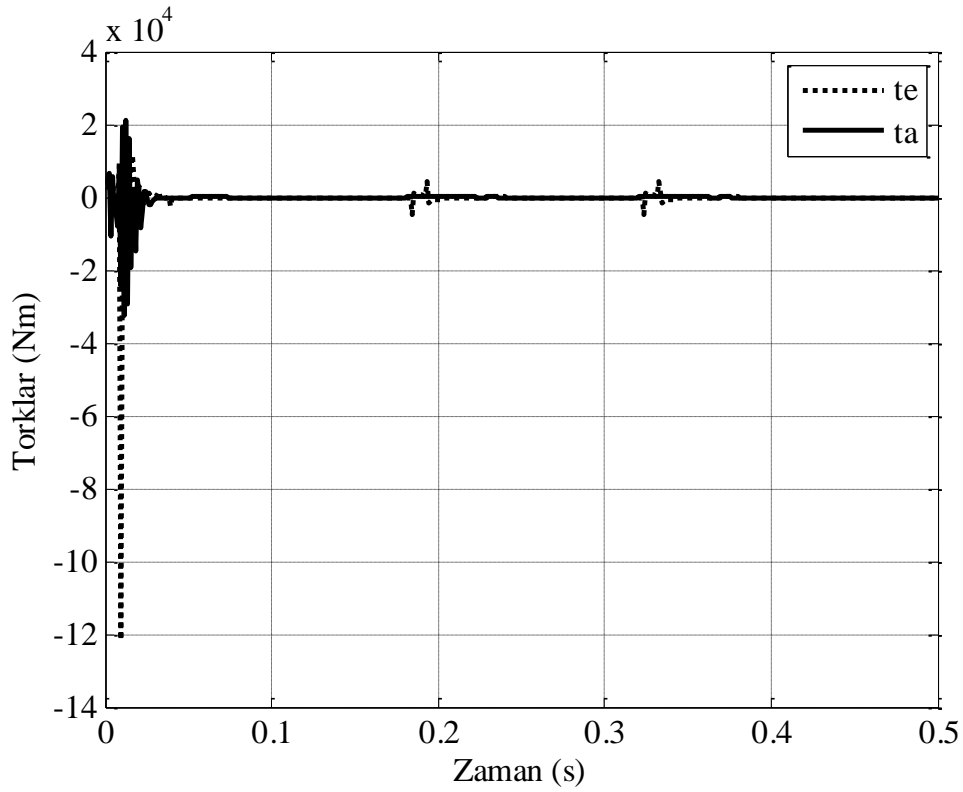
tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için şu şekildedir;



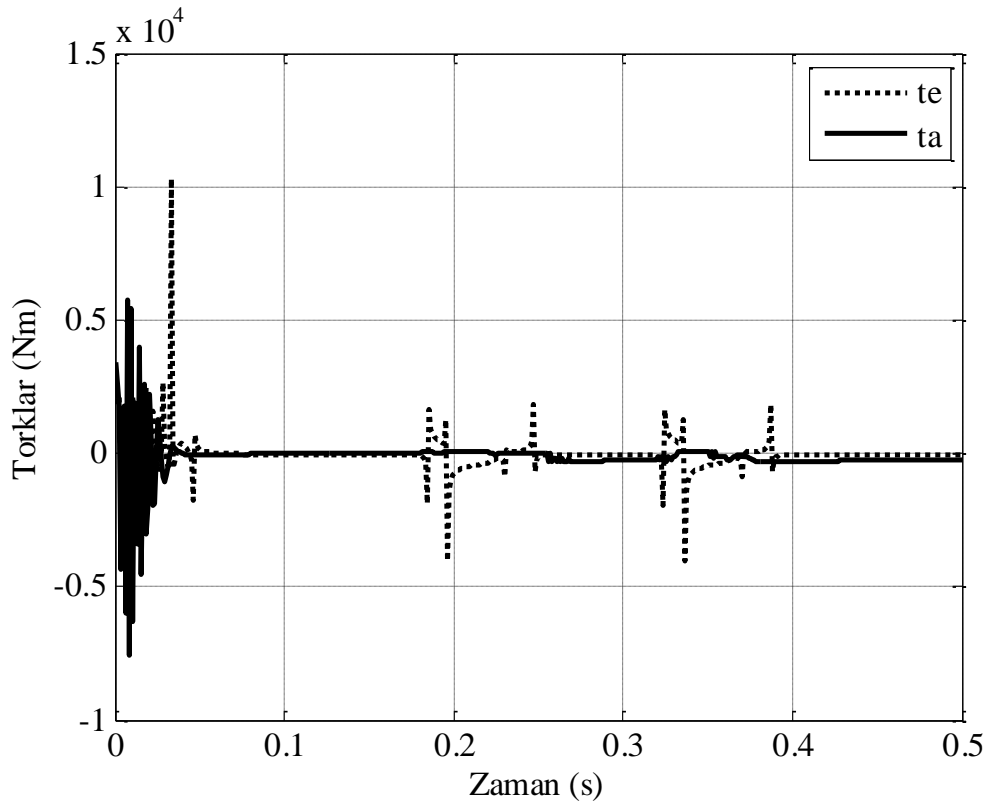
Şekil 4.37. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için yükseltme bütünü konumları



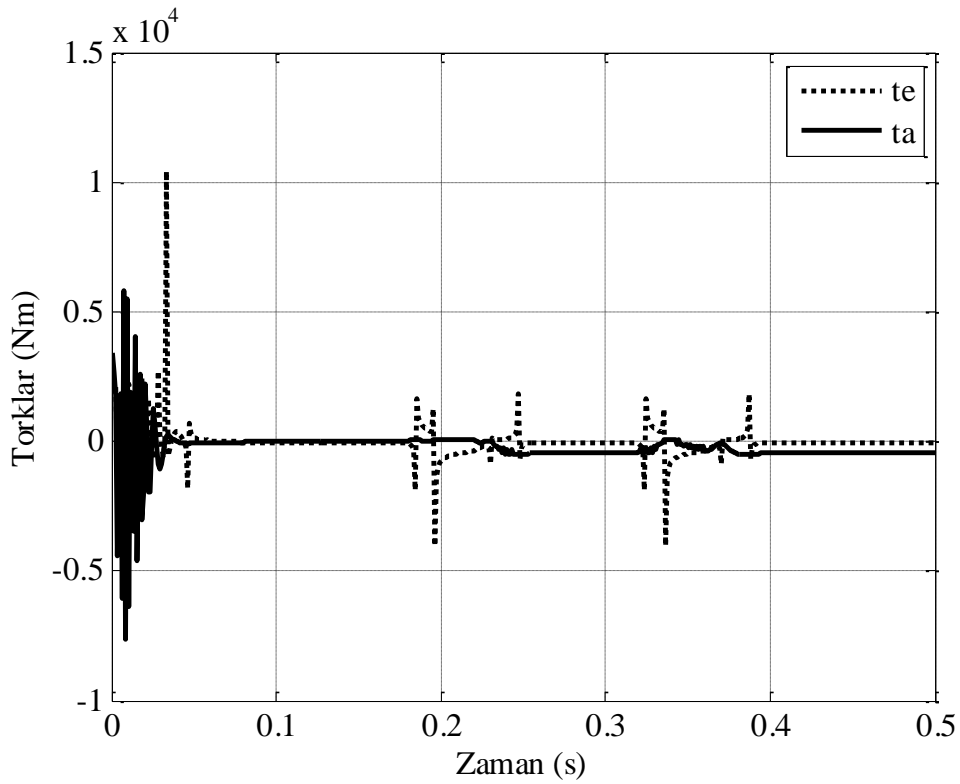
Şekil 4.38. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID, hesaplanan tork ve kayan kipli ve kaskat denetim sistemleri için döndürme bütünü konumları



Şekil 4.39. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve PID denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar



Şekil 4.40. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar



Şekil 4.41. İki adet salvo atış itki kuvveti tepkisi uygulandığında, hesaplanan tork ve kayan kipli denetçisi kaskat denetim sistemi ile yükseltme ve döndürme bütünü için gereken torklar

Şekil 4.37., Şekil 4.38., Şekil 4.39., Şekil 4.40. ve Şekil 4.41.'de iki podlu fırlatma aracımızdan, iki adet salvo atış gerçekleştirilmiş olup tasarlanmış olduğumuz denetçi itki kuvveti etkisini kısa bir sürede sönümleyip, fırlatma aracını yeni bir atışa hazırlamaktadır. Atış sırasında gereken torklar ise artmaktadır. Bu torklar kayan kipli denetim de makul seviyedeysen kaskat sistemde ise daha az bir tork gerektirmektedir.

Atış itki etkisi olan denetleyicilerin karşılaştırılması;

Çizelge 4.1. Atış itki etkisi olan denetleyicilerin karşılaştırılması

	Hesaplanan Tork PID	Hesaplanan Tork Kayan Kipli	Kaskat
Yükseliş Bütünü Konum Hatası (°)	9	8	5
Döndürme Bütünü Konum Hatası (°)	1	0.3	0
Atış Anında Yükseltme Bütünü için Gereken En Büyük Tork (N·m)	77	40	38
Atış Anında Döndürme Bütünü için Gereken En Büyük Tork (N·m)	4721	1684	1650

Çizelge 4.1.'de görüldüğü gibi atış itki etkisini en kısa sürede makul seviyelerde denetlemeyi başaran denetim sistemi kaskat denetim sistemi olarak gözükmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, iki serbestlik dereceli elektromekanik bir fırlatma aracının dinamik denklemleri çıkarılmış ve araçtan mühimmat fırlatılmasını müteakip oluşan tepki kuvvetinin dönüş üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirecek denetim sistemleri tasarlanmaya çalışılmıştır. Denetim sistemi olarak; hesaplanan tork ve PID denetçisi ile hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi kullanılmıştır. Ayrıca, literatürde fırlatma aracı denetiminde kullanılmayan bir yöntem olan kaskat denetçi, kayan kipli denetçiye eklenmiş, iç döngü kayan kipli ve dış döngü PID denetçisi olacak şekilde bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Parametre belirsizlikleri de göz önüne alınmıştır. Atış sırasında 40 ms etki eden itki kuvvetinde denetçi performansları değerlendirilmiştir. İkili salvo atış gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4'de verilen benzetim sonuçlarında da görüldüğü gibi; hesaplanan tork ve PID denetçisi hedef açığa her iki bütünü de kısa bir sürede getirebilmektedir. Ancak sistem denetiminde aşım (İng. overshoot) görülmekte ve ihtiyaç duyulan tork ise hem yükseltme bütünü için hem de döndürme bütünü için çok fazla artmaktadır.

Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi kullanıldığı zaman ise; her iki bütünde aşım yapmadan; hedef hassasiyeti çok daha yüksek olacak bir şekilde denetlenebilmektedir. Ayrıca hesaplanan tork ve PID denetçisine göre daha az tork değerleri gerektirdiğinden daha gürbüz olduğu görülmektedir. Öte yandan tork gereksinimi artmakta ve denetim işaretinde çatırtılar gözlenmektedir.

Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi, hesaplanan tork ve PID denetçisi yöntemine göre itki tepkisini daha da azaltmaktadır. İtki tepkisinin döndürme ve yükseltme bütünlüğünün açılma hareketleri üzerinde oluşturduğu istenmeyen salınımların genliğini azaltmak için, farklı kayan kipli denetçi kazançları denenmiş ve kazanç katsayısı arttıkça, her iki bütünü içinde konum denetimi hassasiyetinin arttığı ancak; gereken torkun arttığı gözlenmiştir.

Kararlılaştırma ve takip döngülerinin iç içe olduğu kaskat denetim sistemi ise; hesaplanan tork ve PID ve hesaplanan tork ve kayan kipli denetçilere göre yükseltme ve döndürme bütünlüğünün istenilen açılma konuma daha yüksek hassasiyetle getirmekte ve itki kuvveti

etkisini daha da etkili bir biçimde azaltmaktadır. Atış sırasında gereken torklar kayan kipli denetçiden çok az bir farklılık göstermektedir. Parametre belirsizliklerine bakıldığında ise; belirsizlik arttığında denetim sistemleri için performans kaybı olmazken, gereken torklar belirsizlik arttıkça artmakta ve de azaldıkça azalmaktadır. Ancak, kaskat denetim sistemi için belirsizliklerin etkisinin daha az olduğu gözlenmiştir. Salvo atış için ise kaskat denetim sistemi performansı diğer denetçilere göre çok daha iyi olmakla beraber; tork değerleri yine kayan kipli denetçi için gereken tork değerlerine yakındır.

Ardışık atış yapıldığı zaman, tasarlanan denetçi performansının istenen seviyelerde olduğu görülmektedir.

Denetleme sistemlerinin parametre belirsizlikleri göz önüne alındığında ise denetçi performanslarında kayda değer bir değişim olmadığı gözlenmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda itki etkisini daha da azaltabilecek gürbüz denetim sistemleri tasarlanabilir ve önerilen denetim sistemleri deneysel olarak incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Afrasiabi, N., Yazdi, H.M. (2013). *Sliding Mode Control for DC Motor Speed Control*, 45-50.
- Bakshi, A. U., Bakshi, V. M. (2008). *Modern Control Theory*, 1st Edition, Technical Publications Pune, 3-13 - 3-42, 6-4 - 6-30.
- Barbot, P. J. (2002). *Sliding Mode Control In Engineering*, Marcel Dekker, Inc., USA, 14-25, 29-50, 131-161.
- Bingül, Z. ve Küçük, S. (2008). *Robot Dinamiği ve Kontrolü*. İstanbul, Birsen Yayınevi, 3-121, 220-223 ve 375 – 380.
- Cetinkurt, S. (2007). *Mechatronics*, 1st Edition, John Wiley and Sons Inc, 64-73.
- Craig, J. J. (1989). *Introduction to Robotics Mechanics and Control*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 68-83, 187-195.
- Cömert, M. D. ve Özgüven, H. N. (2000). Bir Topçu Roket Fırlatıcısının Atış Dinamiğinin Fırlatma Hatalarına Etkilerinin İncelenmesi, *Savunma Teknolojileri Kongresi*, Ankara.
- Cömert, M. D. ve Özgüven, H. N. (2004). *Missile Launcher Having Flexibility*, Doktora Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Davis, A. M. (2001). Electromechanical Actuation for Launch Vehicles, *37th AIAA Joint Proposal Conference*.
- Dokumacı, K. (2014). *Bir Roket Lançerinin Matematiksel Modellenmesi, PID ve Kayan Kipli Denetim Yöntemleri İle Denetimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Dokumacı, K., Aydemir, T. M. ve Salamcı, M. U. (2014). Sabit Mıknatıslı Senkron Motor Eyletimli Bir Roket Lançerinin Matematiksel Modellemesi, *TOK Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı*, Kocaeli.
- Dokumacı, K., Aydemir, T. M. ve Salamcı, M. U. (2014). Elektromekanik Bir Roket Lançerinin Hesaplanan Tork + Kayan Kipli Denetim Yöntemi ile Denetimi, *TOK Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı*, Kocaeli.
- Dokumacı, K. and Aydemir, T. M. and Salamcı, M. U. (2014). Modeling, PID Control and Simulation of a Rocket Launcher System. *16 th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, Antalya, Turkey, 1283-1288.
- Döğüşgen, E. C., Kılıçaslan, E. ve Ertekin, Ö. (2011). Kara platformları için aktif koruma sistemleri, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 92-106.

- Dziopa, Z., Krzysztofik, I. and Koruba, Z. (2010). An analysis of the dynamics of a launcher-missile system on a movable base, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 58(4), 645 - 650.
- Haugen, F. (2010). *Exercises to Basic Dynamics and Control*, Tech Teach, 51-52.
- Haugen, F. (2010). *PID Control*, Tech Teach, 253-261.
- Guo, H. B., Liu, G. Y., Liu, G. R., Li, R. H. (2007). Cascade control of a hydraulically driven 6-DOF parallel robot manipulator based on a sliding mode, *Practice 16*, 1055 – 1058.
- Gökbilen, B. (2006). *Doğrusal Olmayan Sistemlerinin Zamanla Değişen Doğrusal Yüzey Kullanılarak Kayan Kipli Kontrolü ve Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Jackson, B. P. (2010). *Overview of Flight Control Systems*, John Hopkins APL Technical Digest, 1(29), 9-24.
- Khalil, H.K. (1996). *Nonlinear Systems*, 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, 479-509, 601-616.
- Koruba, Z., Krzysztofik, I. and Dziopa, Z. (2010). An analysis of the gyroscope dynamics of an anti-aircraft missile launched from a mobile platform. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 58(4), 651 – 656.
- Koruba, Z., Dziopa, Z. and Krzysztofik, I. (2010). Dynamics of a controlled anti-aircraft missile launcher mounted on a moveable base. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 48(2), 279-295.
- Koruba, Z., Dziopa, Z. and Krzysztofik, I. (2010). Dynamics and control of a gyroscope estabilized platform in a self-propelled anti-aircraft system. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 48(1), 5-26.
- Kuo, C. B. (2006). *Otomatik Kontrol Sistemleri*, Literatür Yayıncılık ve Dağıtım, 563-568, 687-78
- Lewis, F. L., Dawson, D. M., Abdallah, C. T. (2004). *Robot Manipulator Control Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., Second Edition, Revised and Expanded, 107-119, 169-205.
- Murray, M. R., Liz., Sastry, S. S., (1994). *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*, CRC Press, 155-165, 190-200.
- Niku, B. S. (2010). *Introduction to Robotics*, 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc, 33-103, 147-175, 230-262.
- Nise, S. N. (2011). *Control System Engineering*, 6th Edition, John Wiley and Sons Inc, 162-196, 339-356.

- Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. (Fifth Edition), New Jersey: Pearson, 577-612, 703-940.
- Özkan, B. (2013, 12-13 Ekim). Elektromekanik Eyletimli Bir Fırlatma Sisteminin Dinamik Modellemesi ve Denetimi, *16. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*, Erzurum.
- Özkan, B. (2010). Değişken Kayma Yüzeyle Kayan Kipli Denetim Yönteminin Elektromekanik Bir Kanat Tahrik Sistemine Uygulanması, *TOK Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı*, Kocaeli.
- Piltan, F., Rahmdel, S., Mehrara, S., Bayat, R. (2012). Sliding Mode Methodology Vs. Computed Torque Methodology Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control Course, *6(3)*, 142-177.
- Slotine, J. J. E. and Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. (First Edition), New Jersey: Prentice Hall, 277-283.
- Spong, W. M., Hutchinson, S., Vidyasagar, M. (2006). *Robot Modeling and Control*, John Wiley and Sons Inc, 1-30, 239-279.
- Utkin, V.I., Sliding Mode Control, Control Systems, Robotics And Automation- Vol XIII, *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*.
- Utkin, V., Guldner, J., and Shi, J. (1999). *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, Taylor and Francis, 103-153, 271-302.
- Vivek, R., Roopchand, J. (2012). Active Protection System for AFV application-Current trends and future requirements- A study report, *3(4)*,1450-1454.
- Young, K. D., Utkin, I. and Özgüner, Ü. (1999). A Control Engineers's Guide to Sliding Mode Control, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, *7(3)*, 328 – 342.
- Yoshida, K., Hayashi, K., Takami, H., Electromechanical Dynamics Simulations of Superconducting LSM Rocket Launcher System in Attractive-Mode, *623-638*.
- Zhang, D. and Xiao, J. (2005). A Dynamic Model for Rocket Launcher With Coupled Rigid and Flexible Motion, *Applied Mathematics and Mechanics*, *26(5)*, 609-617.

EKLER

EK-1. Hesaplanan tork ve PID denetçisi MATLAB kodları hataların hesaplanması

```
%Yükseltme ve Döndürme Bütünü İçin Hata Fonksiyonları
```

```
e1=-x1d+x1;
```

```
e2=-x2d+x2;
```

```
e1_dot=-x1d_dot+x3;
```

```
e2_dot=-x2d_dot+x4;
```

```
% Hesaplanan Tork ve PID Denetçi Tasarımı
```

```
u1=(2*zetaA*WA*e1_dot)+(WA)^2*e1;
```

```
u2=(2*zetaE*WE*e2_dot)+(WE)^2*e2;
```

```
N1=B(1,1)*x1d_dot+V(1,1)+W1;
```

```
N2=B(2,2)*x2d_dot+V(2,1)+W2;
```

```
te=M11*(x1d_dot_dot-u1)+N1;
```

```
ta=M22*(x2d_dot_dot-u2)+N2;
```

EK-2. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetçi MATLAB kodları

```
%Yükseltme ve Döndürme Bütünü İçin Hata Fonksiyonları
```

```
e1=-x1d+x1;
```

```
e2=-x2d+x2;
```

```
e1_dot=-x1d_dot+x3;
```

```
e2_dot=-x2d_dot+x4;
```

```
%Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetçi Tasarımı
```

```
C1=2*pi*fE;
```

```
C2=2*pi*fA;
```

```
sigma1=e1_dot+C1*e1;
```

```
sigma2=e2_dot+C2*e2;
```

```
K1=2000;
```

```
K2=2000;
```

```
N1=B(1,1)*x1d_dot+V(1,1)+W1;
```

```
N2=B(2,2)*x2d_dot+V(2,1)+W2;
```

```
u1=(2*zetaA*WA*e1_dot)+(WA)^2*e1;
```

```
u2=(2*zetaE*WE*e2_dot)+(WE)^2*e2;
```

```
u3=(-B(1,1)*e1_dot+M11*C1*e1_dot+M11*K1*sign(sigma1));
```

```
u4=(-(B(2,2)*e2_dot)+M22*C2*e2_dot+M22*K2*sign(sigma2));
```

```
te=M11*(x1d_dot_dot-u1-u3)+N1;
```

```
ta=M22*(x2d_dot_dot-u2-u4)+N2;
```

EK-3. İtki tepki kuvvetinin hesaplanan tork ve PID denetçiye eklenmesi

%İtki Kuvveti Etkisinin Denetleme Torkuna Eklenmesi

```
if t>=0.24 && t<0.28;  
    tde=25000;
```

```
else  
    tde=0;
```

```
end
```

```
if t>=0.24 && t<0.28;  
    tda=25000;
```

```
else  
    tda=0;
```

```
end
```

```
x1=x3;
```

```
x2=x4;
```

```
x3=(invM11)*(-N1+te-tde);
```

```
x4=(invM22)*(-N2+ta-tda);
```

EK-4. Hesaplanan tork ve kayan kipli denetim için ikili salvo atış

```
%Hesaplanan Tork ve Kayan Kipli Denetim İkili Salvo Atış  
Gerçekleştiriliyor
```

```
if t>=0.18 && t<0.22;  
    tde=25000;  
else  
    tde=0;  
end
```

```
if t>=0.18 && t<0.22;  
    tda=25000;  
else  
    tda=0;  
end
```

```
if t>=0.32 && t<0.36;  
    tde1=25000;  
else  
    tde1=0;  
end
```

```
if t>=0.32 && t<0.36;  
    tda1=25000;  
else  
    tda1=0;  
end
```

```
x1=x3;  
x2=x4;  
x3=(invM11)*(-N1+te-tde-tde1);  
x4=(invM22)*(-N2+ta-tda-tda1);
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :KAMIŞLI, Hamza
 Uyuğu :T.C.
 Doğum tarihi ve yeri :01.01.1987, Sungurlu
 Medeni hali :Bekar
 Telefon :0 (312) 5909578
 Faks :0 (312) 5909148
 E-Posta :hamza.kamisli@tubitak.gov.tr



Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/Makina mühendisliği	2015
Lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2011
Lise	Ankara Lisesi (Y.D:A)	2005

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2011-2012	Başkent Üniversitesi Makine Mühendisliği	Araştırma Görevlisi
2013-HALEN	TÜBİTAK SAGE	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kamışlı, H., Salamcı, M. U. ve Özkan, B. (2015, 10-12 Eylül). *Elektromekanik Eyletimli Bir Fırlatma Sisteminin İtke Etkisini En Aza İndirgeyecek Şekilde Denetimi*, TOK 2015 Otomatik Kontrol Toplantısı, Denizli.

Hobiler

Bilim-Teknoloji, Spor, Kitap, Tiyatro, Sinema



GAZİ GELECEKTİR..