



**DEĞİŞKEN PARAMETRELİ BİR ALT EKSTREMİTE GÜÇLENDİRME  
ROBOTUNUN MEKANİK TASARIMI VE İLERİ KONTROL  
ALGORİTMALARININ UYGULANMASI**

**Yük. Müh. Alper Kadir TANYILDIZI**

**Doktora Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Oğuz YAKUT  
Haziran-2018**

T.C  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEĞİŞKEN PARAMETRELİ BİR ALT EKSTREMİTE GÜÇLENDİRME  
ROBOTUNUN MEKANİK TASARIMI VE İLERİ KONTROL  
ALGORİTMALARININ UYGULANMASI

DOKTORA TEZİ

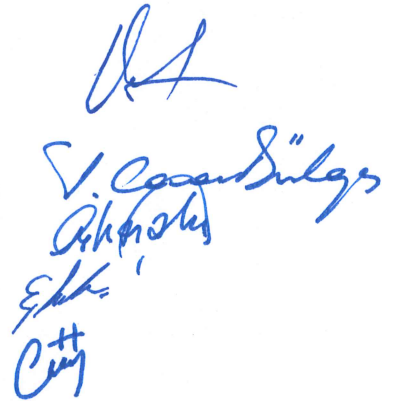
Yük. Müh. Alper Kadir TANYILDIZI

(112120202)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Mayıs 2018

Tezin Savunulduğu Tarih: 06 Haziran 2018

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Oğuz YAKUT (F.Ü)  
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. L. Canan DÜLGER (G.Ü)  
Doç. Dr. Orhan ÇAKAR (F.Ü)  
Dr. Öğr. Ü. Erkan BAHÇE (İ.Ü)  
Dr. Öğr. Ü. Hakan ÇELİK (F.Ü)



HAZİRAN-2018

## ÖNSÖZ

Benzerler çalışmalardan oldukça farklı bir matematik modelin kullanılmış olması, bu tez çalışmasını farklı kılan özelliklerdendir. Bu tez çalışmasının diğer bir özgün yönü ise deneysel uygulamalarda kullanılan ileri kontrol yöntemleridir. Çalışmanın devamı olacak evrelerde robot tahrik elemanları olarak hidrolik sistemler kullanılması ve tüm vücut hareketlerini destekleyici bir robot tasarlanması hedeflenmektedir.

Doğal olarak yorucu -ancak sağladığı katkılarıyla bir o kadar haz veren- çalışmalarım süresince beni değerli bilgi, görüş ve yakın teşvikleriyle yönlendiren saygıdeğer hocam Doç. Dr. Oğuz Yakut'a;

Tez çalışmamın deneysel kısmının ortaya çıkmasında samimî destekleriyle çalışma azim ve hevesimi artıran, başta İhsan Asutay olmak üzere, -görev yaptığım F.Ü. Müh. Fak. Mekatronik Mühendisliği Bölümü teknik personeli- Ali Rıza Dermanlı ve Veysel Ceylan'a;

MF.17.12 numaralı Doktora Tezi Projesi kapsamında tezim için gerekli malzemelerin temininde maddî destek sağlayan Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na;

Tezimin çalışma ciddiyetini sürdürmem gerektiren her aşamasında beni yalnız bırakmayan, dua ve desteklerini hep yanımda hissettiğim, hoşgörülerini eksik etmeyen sevgili eşim ve aileme en içten teşekkürlerimi sunarım...

Alper Kadir TANYILDIZI

ELAZIĞ Haziran 2018

## İÇİNDEKİLER TABLOSU

### Sayfa No

|                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖNSÖZ .....                                                                    | II        |
| İÇİNDEKİLER TABLOSU.....                                                       | III       |
| ÖZET .....                                                                     | V         |
| SUMMARY .....                                                                  | VI        |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                         | VII       |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                         | XI        |
| KISALTMALAR LİSTESİ .....                                                      | XII       |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                           | <b>1</b>  |
| 1.1. Motivasyon.....                                                           | 2         |
| 1.2. Kapsam ve Hedefler .....                                                  | 3         |
| 1.3. Literatür Özeti .....                                                     | 6         |
| 1.3.1. Dış İskelet Robot ve Tarihi .....                                       | 6         |
| 1.3.2. Güçlendirme Amaçlı Dış İskelet Robotlar .....                           | 7         |
| 1.3.3. Rehabilitasyon Amaçlı Dış İskelet Robotlar .....                        | 16        |
| <b>2. DIŞ İSKELET ROBOTUN MEKANİK TASARIMI .....</b>                           | <b>22</b> |
| <b>3. DIŞ İSKELET ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELİ VE DİNAMİĞİ .....</b>            | <b>24</b> |
| 3.1. Tasarım .....                                                             | 24        |
| 3.2. İnsan Bacağı ve Robotun Dinamiği.....                                     | 25        |
| <b>4. DIŞ İSKELET ROBOTA UYGULANAN KONTROL YÖNTEMLERİ VE</b>                   |           |
| <b>SAYISAL BENZETİM SONUÇLARI .....</b>                                        | <b>35</b> |
| 4.1. Sayısal Benzetim Kontrol Uygulamaları.....                                | 35        |
| 4.1.1. Genetik Algoritma ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu .....      | 36        |
| 4.1.2. PID Kontrol Yöntemi .....                                               | 39        |
| 4.1.2.1. Giriş.....                                                            | 39        |
| 4.1.2.2. PID Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması.....                       | 41        |
| 4.1.3. Kayan Kipli Kontrol Yöntemi .....                                       | 48        |
| 4.1.3.1. Giriş.....                                                            | 48        |
| 4.1.3.2. KKK Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması.....                       | 51        |
| 4.1.4. Yapay Sinir Ağ Tabanlı Kontrol Yöntemi ile Benzetim Uygulaması.....     | 58        |
| 4.1.4.1. Giriş.....                                                            | 58        |
| 4.1.4.2. Yapay Sinir Ağ Tabanlı Kontrol Yönteminin Tasarımı ve Uygulaması..... | 59        |
| 4.1.5. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yöntemi ile Benzetim Uygulaması .....    | 67        |
| 4.1.5.1. Giriş.....                                                            | 67        |
| 4.1.5.2. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yönteminin Tasarımı ve Uygulaması..... | 69        |
| 4.2. Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....                              | 78        |
| <b>5. DIŞ İSKELET ROBOT DENEY DÜZENİĞİNİN TASARIMI .....</b>                   | <b>82</b> |
| 5.1. Mekanik Tasarım.....                                                      | 82        |
| 5.2. Elektronik Tasarım .....                                                  | 85        |
| 5.3. Deneysel Sonuçlar.....                                                    | 89        |
| 5.3.1. Dış İskelet Robot Deney Düzenine Uygulanan Kontrol Yöntemleri .....     | 91        |
| 5.3.1.1. PID Kontrol Yöntemi .....                                             | 91        |
| 5.3.1.2. KKK Yöntemi .....                                                     | 91        |
| 5.3.1.3. Hareketli KKK Yöntemi .....                                           | 92        |
| 5.3.1.4. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yöntemi .....                          | 94        |
| 5.3.2. 1. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....                        | 96        |



|           |                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.3.    | 2. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....                        | 105        |
| 5.3.4.    | 3. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....                        | 113        |
| 5.3.5.    | 4. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....                        | 120        |
| 5.3.6.    | 5. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar.....                        | 128        |
| 5.3.7.    | Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması .....                             | 135        |
| <b>6.</b> | <b>SONUÇLAR VE KAZANIMLAR.....</b>                                      | <b>140</b> |
| <b>7.</b> | <b>KAYNAKÇA .....</b>                                                   | <b>142</b> |
| <b>8.</b> | <b>EKLER.....</b>                                                       | <b>147</b> |
| 8.1.      | Pwm Sinyallerinin Frekansını Değiştiren FPGA Programı .....             | 147        |
| 8.2.      | Deneysel Uygulama için Kullanılan Genel MATLAB/Simulink Modeli.....     | 151        |
| 8.3.      | Deneysel Uygulama PID Kontrolcü Bloğu .....                             | 152        |
| 8.4.      | Deneysel Uygulama KKK Bloğu .....                                       | 153        |
| 8.5.      | Deneysel Uygulama HKKK Blokları.....                                    | 154        |
| 8.6.      | Deneysel Uygulama BM Kontrol Bloğu .....                                | 155        |
| 8.7.      | Deneysel Uygulama Sabit Hareket MATLAB/Simulink Modeli .....            | 156        |
| 8.8.      | Deneysel Sonuçları Kaydetme ve Grafiklerini Çizdirme Programı.....      | 157        |
| 8.9.      | Deneysel Sonuçları Karşılaştırma ve Grafiklerini Çizdirme Programı..... | 158        |
| 8.10.     | Deney Düzeneği Tasarım Elemanları.....                                  | 159        |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>                                                   | <b>167</b> |

## ÖZET

Robotlar, uzun yıllar endüstride kullanılıyor olsalar dahi teknolojik gelişmeler sonucunda insan hareketlerini desteklemek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu tez çalışmasında sağlıklı insanların yorgunluk seviyelerini azaltmak ve yük taşıma kapasitelerini arttırmak amacıyla bir alt-ekstremité güçlendirme robot tasarımı yapılmış, prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışma ile uygulanan kontrol yöntemlerinin performansları değerlendirilmiştir.

Tez çalışması, robotun ve insan bacağına matematiksel modelinin oluşturulması, farklı kontrol yöntemleri için benzetim çalışmalarının yapılması, deney düzeneğinin mekanik ve elektronik tasarımı, deney düzeneğine farklı kontrol yöntemlerinin ve parametrik değişikliklerin uygulanması ile sonuçların elde edilmesi ve bu sonuçların karşılaştırılması bölümlerinden oluşmaktadır.

Tez çalışması kapsamında literatürde karşılaşılmamış bir matematiksel model oluşturulmuş ve benzetim çalışmaları içerisinde kullanılmıştır. MATLAB ile çözümü gerçekleştirilen hareket denklemleri sonucunda, robotun bacak hareketlerini başarılı bir şekilde izlediği gözlemlenmiştir. Prototip üretimi için gerekli mekanik ve elektronik tasarımlar gerçekleştirildikten sonra deney düzeneği ortaya çıkarılmıştır. MATLAB/Simulink ile modellenen her bir kontrol yöntemi sisteme uygulanmıştır. Ayrıca 5 farklı durum ortaya çıkarmak amacı ile sistemin parametreleri değiştirilmiştir. Bu farklı durumlara her bir kontrol yöntemi ayrı ayrı uygulanarak deneysel uygulama sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçların karşılaştırılmaları yapılarak kontrolcülerin performansları değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alt-ekstremité dış iskelet robot, PID kontrol, kayan kipli kontrol, hareketli kayan kipli kontrol, yapay sinir ağ tabanlı kontrol, bulanık mantık tabanlı kontrol

## SUMMARY

### **Mechanical Design and Implementation of Advanced Control Algorithms of a Variable Parametered Strengthening Lower-Extremity Exoskeleton**

Even though robots have been used for many years in industry, they have been used in order to support human movements as a result of technological developments. In this thesis study, a sub-limb strengthening robot was designed in order to reduce the fatigue levels of healthy people and to increase the load carrying capacities, the prototype production was performed and the performance of the control methods applied by the experimental study was evaluated.

This thesis consists of mathematical modelling of robot and human leg, simulation studies for different control methods, mechanical and electronic design of experimental setup, applying different control methods and parametric changes to experimental setup and getting and comparing the results.

In the scope of the thesis, a mathematical model which is not encountered in the literature has been created and used in the simulation studies. As a result of the equations of motion solved with MATLAB, it has been observed that the robot has successfully tracked the leg movements. After the necessary mechanical and electronic designs for prototype production were carried out, the experimental setup was produced. Each control method, modeled with MATLAB / Simulink, has been applied to the system. In addition, the parameters of the system have been changed with the aim of revealing 5 different situations. In these different cases, each control method was applied separately and experimental results were obtained. The performances of the controllers were evaluated by comparing these results.

**Keywords:** Lower-limb exoskeleton, PID control, sliding mode control, moving sliding mode control, artificial neural network based control, fuzzy logic based control

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. Alt-ekstremité dış iskeletlerin genel yapısı (Chu, 2005).....                                    | 2  |
| Şekil 1.2. Yük taşımaya yardımcı alt ekstremité dış iskelet sisteminin genel görünümü .....                 | 5  |
| Şekil 1.3. Hardiman dış iskelet robot (Corliss & Johnsen, 1968) .....                                       | 6  |
| Şekil 1.4. DARPA dış iskelet robot (Lenzo, 2013) .....                                                      | 7  |
| Şekil 1.5. BLEEX (Zoss, Kazerooni, & Chu, 2006) .....                                                       | 8  |
| Şekil 1.6. Berkeley Bionics tarafından geliştirilen a)ExoHiker b) Exo Climber c) HULC ..                    | 8  |
| Şekil 1.7. XOS.....                                                                                         | 9  |
| Şekil 1.8. MIT tarafından geliştirilen dış iskelet .....                                                    | 10 |
| Şekil 1.9. HAL dış iskelet robot (Sankai, 2011) .....                                                       | 10 |
| Şekil 1.10. Body extender (Marcheschi, Salsedo, Fontana, & Bergamasco, 2011).....                           | 11 |
| Şekil 1.11. Yang ve arkadaşları tarafından geliştirilen dış iskelet robot.....                              | 12 |
| Şekil 1.12. ELEBOT dış iskelet robot .....                                                                  | 12 |
| Şekil 1.13. Rusya Bilim Akademisi ve Nanyang Teknoloji Fakóltesi ortaklığında geliştirilen dış iskelet..... | 13 |
| Şekil 1.14. NTU dış iskelet sistemi .....                                                                   | 14 |
| Şekil 1.15. T-Wrex dış iskelet robot (Sanchez, ve diğlerleri, 2006) .....                                   | 17 |
| Şekil 1.16. MGA dış iskelet robot (Lenzo, 2013) .....                                                       | 17 |
| Şekil 1.17. LOPES dış iskelet robotu (Veneman, ve diğlerleri, 2007).....                                    | 18 |
| Şekil 1.18. eLEGS dış iskelet robot (Lenzo, 2013).....                                                      | 18 |
| Şekil 1.19. RUPERT .....                                                                                    | 19 |
| Şekil 1.20. L-EXOS (Frisoli, Bergamasco, Carboncini, & Rossi, 2009).....                                    | 20 |
| Şekil 1.21. IAE güç destek sistemi.....                                                                     | 20 |
| Şekil 1.22. YÜDİS dış iskelet sistemi .....                                                                 | 21 |
| Şekil 2.1. Dış iskelet robot tasarım şeması.....                                                            | 22 |
| Şekil 3.1. Robot ve çift-sarkacın kinematik diyagramı .....                                                 | 26 |
| Şekil 4.1. GA blok diyagramı.....                                                                           | 37 |
| Şekil 4.2. PID kontrol blok diyagramı .....                                                                 | 40 |
| Şekil 4.3. $F=0$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (PID kontrol yöntemi) .....             | 42 |
| Şekil 4.4. $F=100$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (PID kontrol yöntemi) .....           | 42 |
| Şekil 4.5. $F=500$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (PID kontrol yöntemi) .....           | 43 |
| Şekil 4.6. Sabit mafsalları hatası (PID kontrol yöntemi).....                                               | 44 |
| Şekil 4.7. Hareketli mafsalları hatası (PID kontrol yöntemi) .....                                          | 44 |
| Şekil 4.8. 1. Yayda oluşan kuvvetler (PID kontrol yöntemi) .....                                            | 45 |
| Şekil 4.9. 2. Yayda oluşan kuvvetler (PID kontrol yöntemi) .....                                            | 45 |
| Şekil 4.10. Robotun sabit mafsallının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....                           | 46 |
| Şekil 4.11. Robotun hareketli mafsallının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....                       | 46 |
| Şekil 4.12. Çift-sarkacın sabit mafsallının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....                     | 47 |
| Şekil 4.13. Çift-sarkacın hareketli mafsallının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....                 | 48 |
| Şekil 4.14. Kayma yüzeyi .....                                                                              | 49 |
| Şekil 4.15. $F=0$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (KKK kontrol yöntemi) .....            | 52 |
| Şekil 4.16. $F=100$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (KKK kontrol yöntemi) .....          | 52 |
| Şekil 4.17. $F=500$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (KKK kontrol yöntemi) .....          | 53 |
| Şekil 4.18. Sabit mafsalları hatası (KKK kontrol yöntemi).....                                              | 53 |

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.19. Hareketli mafsalsal hatası (KKK kontrol yöntemi) .....                                              | 54 |
| Şekil 4.20. 1. yayda oluşan kuvvetler (KKK kontrol yöntemi).....                                                | 54 |
| Şekil 4.21. 2. yayda oluşan kuvvetler (KKK kontrol yöntemi).....                                                | 55 |
| Şekil 4.22. Robotun sabit mafsalsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi) .....                             | 55 |
| Şekil 4.23. Robotun hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi).....                          | 56 |
| Şekil 4.24. Çift-sarkacın sabit mafsalsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi) .....                       | 56 |
| Şekil 4.25. Çift-sarkacın hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi).....                    | 57 |
| Şekil 4.26. Biyolojik sinir sisteminin blok diyagramı.....                                                      | 58 |
| Şekil 4.27. İleri beslemeli üç katmanlı YSA modeli.....                                                         | 60 |
| Şekil 4.28. $F=0$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (YSA kontrol yöntemi) ..                    | 61 |
| Şekil 4.29. $F=100$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (YSA kontrol yöntemi) .....               | 62 |
| Şekil 4.30. $F=500$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (YSA kontrol yöntemi) .....               | 62 |
| Şekil 4.31. Sabit mafsalsal hatası (YSA kontrol yöntemi) .....                                                  | 63 |
| Şekil 4.32. Hareketli mafsalsal hatası (YSA kontrol yöntemi) .....                                              | 63 |
| Şekil 4.33. 1. yayda oluşan kuvvetler (YSA kontrol yöntemi) .....                                               | 64 |
| Şekil 4.34. 2. yayda oluşan kuvvetler (YSA kontrol yöntemi) .....                                               | 64 |
| Şekil 4.35. Robotun sabit mafsalsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi).....                              | 65 |
| Şekil 4.36. Robotun hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi) .....                         | 65 |
| Şekil 4.37. Çift-sarkacın sabit mafsalsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi).....                        | 66 |
| Şekil 4.38. Çift-sarkacın hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi) .....                   | 66 |
| Şekil 4.39. Üyelik Ağırlık Dereceleri (Boolean Mantığı) .....                                                   | 68 |
| Şekil 4.40. Üyelik Fonksiyonları ve Giriş Değerlerinin Bu Ağırlık Fonksiyonlarına göre Ağırlık Dereceleri ..... | 69 |
| Şekil 4.41. En Çok Kullanılan Üyelik Fonksiyonları.....                                                         | 69 |
| Şekil 4.42. Mafsalsal Hatasının Üyelik Fonksiyonu.....                                                          | 70 |
| Şekil 4.43. Mafsalsal Hatasının Türevinin Üyelik Fonksiyonu.....                                                | 70 |
| Şekil 4.44. Çıkış Sinyalinin Üyelik Fonksiyonu .....                                                            | 71 |
| Şekil 4.45. $F=0$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (BM kontrol yöntemi)....                    | 72 |
| Şekil 4.46. $F=100$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (BM kontrol yöntemi) 72                   |    |
| Şekil 4.47. $F=500$ N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (BM kontrol yöntemi) 73                   |    |
| Şekil 4.48. Sabit mafsalsal hatası (BM kontrol yöntemi) .....                                                   | 73 |
| Şekil 4.49. Hareketli mafsalsal hatası (BM kontrol yöntemi) .....                                               | 74 |
| Şekil 4.50. 1. yayda oluşan kuvvetler (BM kontrol yöntemi) .....                                                | 74 |
| Şekil 4.51. 2. yayda oluşan kuvvetler (BM kontrol yöntemi) .....                                                | 75 |
| Şekil 4.52. Robotun sabit mafsalsalının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....                               | 75 |
| Şekil 4.53. Robotun hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi) .....                          | 76 |
| Şekil 4.54. Çift-sarkacın sabit mafsalsalının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....                         | 77 |
| Şekil 4.55. Çift-sarkacın hareketli mafsalsalının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi) .....                    | 77 |
| Şekil 4.56. Kontrol yöntemlerinin sabit mafsalsal hataları.....                                                 | 78 |
| Şekil 4.57. Kontrol yöntemlerinin hareketli mafsalsal hataları .....                                            | 79 |
| Şekil 4.58. Sabit mafsala uygulanan kontrol sinyalleri .....                                                    | 80 |
| Şekil 4.59. Hareketli mafsala uygulanan kontrol sinyalleri .....                                                | 81 |
| Şekil 5.1. Prototip CAD tasarımı.....                                                                           | 82 |
| Şekil 5.2. Mekanik sınırlama elemanı .....                                                                      | 83 |
| Şekil 5.3. Lineer potansiyometre bağlantı elemanları .....                                                      | 84 |
| Şekil 5.4. Deney düzeneği .....                                                                                 | 89 |
| Şekil 5.5. MATLAB/Simulink' te oluşturulan kontrol algoritması .....                                            | 90 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.6. PID kontrol Simulink modeli .....                                              | 91  |
| Şekil 5.7. KKK Simulink modeli .....                                                      | 92  |
| Şekil 5.8. Hareketli kayma yüzeyi a) dönme yapan b) öteleme yapan .....                   | 93  |
| Şekil 5.9. HKKK Simulink modeli .....                                                     | 93  |
| Şekil 5.10. a) Hareketli c katsayısı alt sistemi b) hatanın türevi/hata alt sistemi ..... | 94  |
| Şekil 5.11. BM Simulink modeli.....                                                       | 94  |
| Şekil 5.12. Hata değerinin üyelik fonksiyonu .....                                        | 94  |
| Şekil 5.13. Hatanın türevinin üyelik fonksiyonu.....                                      | 95  |
| Şekil 5.14. Çıkışın üyelik fonksiyonu .....                                               | 95  |
| Şekil 5.15. BM kural listesi .....                                                        | 96  |
| Şekil 5.16. 1. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi) .....                        | 96  |
| Şekil 5.17. 1. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi).....              | 97  |
| Şekil 5.18. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....    | 98  |
| Şekil 5.19. 1. durum için hata grafiği (KKK yöntemi).....                                 | 99  |
| Şekil 5.20. 1. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi) .....                     | 99  |
| Şekil 5.21. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi).....             | 100 |
| Şekil 5.22. 1. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi).....                                | 101 |
| Şekil 5.23. 1. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi) .....                    | 101 |
| Şekil 5.24. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi).....            | 102 |
| Şekil 5.25. 1. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi .....                      | 103 |
| Şekil 5.26. 1. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi) .....                         | 103 |
| Şekil 5.27. 1. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi).....               | 104 |
| Şekil 5.28. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....      | 105 |
| Şekil 5.29. 2. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi) .....                        | 106 |
| Şekil 5.30. 2. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi).....              | 106 |
| Şekil 5.31. 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....    | 107 |
| Şekil 5.32. 2. durum için hata grafiği (KKK yöntemi).....                                 | 107 |
| Şekil 5.33. 2. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi) .....                     | 108 |
| Şekil 5.34. 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi).....             | 108 |
| Şekil 5.35. 2. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi).....                                | 109 |
| Şekil 5.36. 2. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi) .....                    | 109 |
| Şekil 5.37. 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi).....            | 110 |
| Şekil 5.38. 2. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi .....                      | 110 |
| Şekil 5.39. 2. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi) .....                         | 111 |
| Şekil 5.40. 2. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi).....               | 112 |
| Şekil 5.41. 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....      | 112 |
| Şekil 5.42. 3. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi) .....                        | 113 |
| Şekil 5.43. 3. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi).....              | 114 |
| Şekil 5.44. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) .....    | 114 |
| Şekil 5.45. 3. durum için hata grafiği (KKK yöntemi).....                                 | 115 |
| Şekil 5.46. 3. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi) .....                     | 115 |
| Şekil 5.47. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi).....             | 116 |
| Şekil 5.48. 3. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi).....                                | 117 |
| Şekil 5.49. 3. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi) .....                    | 117 |
| Şekil 5.50. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi).....            | 118 |
| Şekil 5.51. 3. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi .....                      | 118 |
| Şekil 5.52. 3. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi) .....                         | 119 |
| Şekil 5.53. 3. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi) .....              | 119 |
| Şekil 5.54. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....      | 120 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 5.55. 4. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi) .....                     | 121 |
| Şekil 5.56. 4. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi).....           | 121 |
| Şekil 5.57. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) ..... | 122 |
| Şekil 5.58. 4. durum için hata grafiği (KKK yöntemi).....                              | 122 |
| Şekil 5.59. 4. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi) .....                  | 123 |
| Şekil 5.60. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi).....          | 123 |
| Şekil 5.61. 4. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi).....                             | 124 |
| Şekil 5.62. 4. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi) .....                 | 125 |
| Şekil 5.63. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi).....         | 125 |
| Şekil 5.64. 4. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi .....                   | 126 |
| Şekil 5.65. 4. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi) .....                      | 126 |
| Şekil 5.66. 4. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi) .....           | 127 |
| Şekil 5.67. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....   | 127 |
| Şekil 5.68. 5. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi) .....                     | 128 |
| Şekil 5.69. 5. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi).....           | 129 |
| Şekil 5.70. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi) ..... | 129 |
| Şekil 5.71. 5. durum için hata grafiği (KKK yöntemi).....                              | 130 |
| Şekil 5.72. 5. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi) .....                  | 130 |
| Şekil 5.73. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi).....          | 131 |
| Şekil 5.74. 5. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi).....                             | 132 |
| Şekil 5.75. 5. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi) .....                 | 132 |
| Şekil 5.76. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi).....         | 133 |
| Şekil 5.77. 5. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi .....                   | 133 |
| Şekil 5.78. 5. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi) .....                      | 134 |
| Şekil 5.79. 5. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi).....            | 134 |
| Şekil 5.80. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi).....   | 135 |
| Şekil 5.81. 1. durum hata karşılaştırması .....                                        | 136 |
| Şekil 5.82. 2. durum hata karşılaştırması .....                                        | 136 |
| Şekil 5.83. 3. durum hata karşılaştırması .....                                        | 137 |
| Şekil 5.84. 4. durum hata karşılaştırması .....                                        | 138 |
| Şekil 5.85. 5. durum hata karşılaştırması .....                                        | 138 |
| Şekil 1. Mafsalarda kullanılan planet redüktör .....                                   | 159 |
| Şekil 2. Mafsalarda kullanılan sonsuz vida redüktör .....                              | 159 |
| Şekil 3. Mekanik uzuvlar .....                                                         | 159 |
| Şekil 4. BLDC motor .....                                                              | 160 |
| Şekil 5. BLDC motor sürücüsü (ESC) .....                                               | 161 |
| Şekil 6. Triyak modeli .....                                                           | 161 |
| Şekil 7. Yön değiştirme için tasarlanan elektronik devre.....                          | 162 |
| Şekil 8. MOC3021 triyak çıkışlı optokuplör .....                                       | 162 |
| Şekil 9. Arduino Mega 2560 kontrol kartı .....                                         | 163 |
| Şekil 10. XILINX Spartan-3 FPGA kartı .....                                            | 164 |
| Şekil 11. LM7812 voltaj regülatörü .....                                               | 165 |
| Şekil 12. XL4005 DC- DC gerilim düşürücü devresi .....                                 | 165 |
| Şekil 13. Lineer potansiyometre.....                                                   | 165 |
| Şekil 14. Robot hareketini kaydeden potansiyometre .....                               | 166 |
| Şekil 15. Lineer motor kontrol kartı ve sürücü ünitesi.....                            | 166 |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tablo 4.1.</b> Sayısal benzetim parametreleri.....                                      | 35  |
| <b>Tablo 4.2.</b> Sayısal benzetim başlangıç şartları.....                                 | 35  |
| <b>Tablo 4.3.</b> Genetik algoritma parametre değerleri .....                              | 39  |
| <b>Tablo 4.4.</b> Kontrolcü parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi (Karataş, 2011)..... | 41  |
| <b>Tablo 4.5.</b> PID kontrol parametreleri.....                                           | 41  |
| <b>Tablo 4.6.</b> KKK parametre değerleri .....                                            | 51  |
| <b>Tablo 4.7.</b> Yapay sınır ağları ağırlık değerleri.....                                | 61  |
| <b>Tablo 4.8.</b> Bulanık mantık kontrol yöntemi parametre değerleri .....                 | 70  |
| <b>Tablo 4.9.</b> Bulanık mantık kural tablosu.....                                        | 71  |
| <b>Tablo 4.10.</b> Sabit (kalça) ekleme ait hata değerleri .....                           | 79  |
| <b>Tablo 4.11.</b> Hareketli (diz) ekleme ait hata değerleri .....                         | 79  |
| <b>Tablo 5.1.</b> BLDC motor avantaj ve dezavantajları .....                               | 85  |
| <b>Tablo 5.2.</b> Deneysel uygulama parametre değerleri .....                              | 90  |
| <b>Tablo 5.3.</b> Deneysel sonuçlar için hatanın en yüksek ve ortalama değerleri.....      | 139 |
| <b>Tablo 1.</b> BLDC motor teknik özellikleri.....                                         | 160 |
| <b>Tablo 2.</b> ESC teknik özellikleri.....                                                | 161 |
| <b>Tablo 3.</b> Triyak teknik özellikleri .....                                            | 162 |
| <b>Tablo 4.</b> MOC3021 triyak çıkışlı optokuplörün teknik özellikleri .....               | 163 |
| <b>Tablo 5.</b> Arduino Mega 2560 kontrol kartının teknik özellikleri.....                 | 164 |



## KISALTMALAR LİSTESİ

|        |                                                                                               |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| EMG    | Elektromiyografi                                                                              |
| IMU    | Atalet Ölçü Birimi (Inertial Measurement Unit)                                                |
| DOF    | Serbestlik Derecesi (Degree of Freedom)                                                       |
| DARPA  | Amerikan Savunma Sanayi İleri Araştırma Projeleri Ajansı                                      |
| HULC   | Human Universal Load Carrier (İnsan Evrensel Yük Taşıyıcısı)                                  |
| MIT    | Massachusetts Teknoloji Enstitüsü                                                             |
| HAL    | Hybrid Assistive Limb (Hibrid Yardımcı Uzun)                                                  |
| ANFIS  | Adaptive Network Based Fuzzy Interface System (Uyarlamalı Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi) |
| ZMP    | Sıfır Moment Noktası                                                                          |
| BLEEX  | Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (Berkeley Alt Ekstremité Ekzoskeleton)                   |
| T-WREX | Therapy Wilmington Robotic Exoskeleton (Terapi Wilmington Robotik Dış İskelet)                |
| MGA    | Maryland-Georgetown-Army                                                                      |
| RUPERT | Robotik Üst Ekstremité Tekrarlayıcı Terapi                                                    |
| L-EXOS | Light Exoskeleton                                                                             |
| YÜDİS  | Yürüyüş Destekleyici Dış İskelet                                                              |
| LP     | Lineer Potansiyometre                                                                         |
| GA     | Genetik Algoritma                                                                             |
| PID    | Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)                                  |
| KKK    | Kayan Kipli Kontrol                                                                           |
| HKKK   | Hareketli Kayan Kipli Kontrol                                                                 |
| YSA    | Yapay Sinir Ağları                                                                            |
| BM     | Bulanık Mantık                                                                                |
| BLDC   | Fırçasız DC Motor                                                                             |
| Li-Po  | Lityum-İyon Polimer                                                                           |
| ESC    | Electronic Speed Controller (Elektronik Hız Kontrol Cihazı)                                   |
| PWM    | Pulse Width Modulation (Sinyal Genişlik Modülasyonu)                                          |
| SİY    | Saat İbreleri Yönü                                                                            |
| SİTY   | Saat İbreleri Ters Yönü                                                                       |

## 1. GİRİŞ

Robotlar otonom veya önceden programlanmış hareketleri yerine getiren elektromekanik cihazlardır. Belirli bir işlevi yerine getirmek için bir bilgisayara bağımlı olarak çalışabilmelerinin yanında bir operatör tarafından da kontrol edilebilirler. Robotları öncelikli kullanım amacı endüstriyel uygulamalar (kaynak, boya vb.) olsa da son yıllarda insan hareketlerini destekleme amacıyla da kullanılmaya başlanmıştır.

İnsan hareketlerini destekleyen robotların tasarlanmasının en büyük nedeni, insan gücünün kısıtlı olması ve yorulma etkenleridir. İnsan hareketlerin sınırları tamamen kas gücüyle kısıtlandığından ve belirli bir çalışma süresi sonrasında oluşan yorgunluk nedeni ile kas gücü düştüğünden insan yapısını destekleyecek, güçlendirecek ve sınırlarını arttıracak robotlar 1950 yılından bu yana geliştirilmeye başlanmış ve bu robotlar dış iskelet robot (Exoskeleton) olarak adlandırılmıştır.

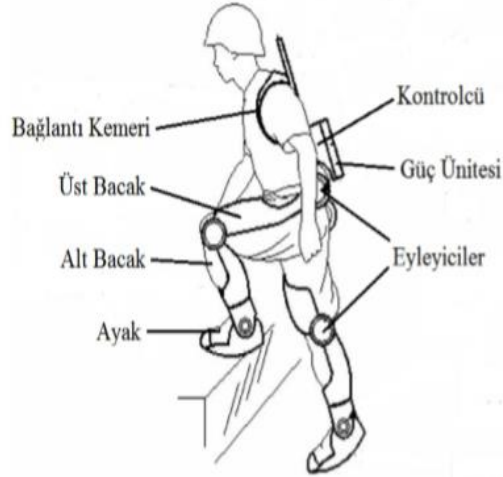
Dış iskelet robotlar bir yardımcı robot veya güç zırhı olarak da tanımlanmakta olup genel olarak iki bölüm ihtiva etmektedir: birinci bölüm insanın giyindiği dış giysi şeklindeki iskelet yapı, diğer bölüm ise bu iskelete enerji sağlayan güç ünitesi bölümdür.

Dış iskelet insan vücuduna bütünleşmiş bir mekanizma olarak tanımlanabilir. Bu fiziksel bağlantı gerekli bilgilerin dış iskelete gönderilmesine ve geri dönüş olarak mekanik gücün uygulanmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede kullanıcının hızını, gücünü, dayanıklılığını arttıran bir yardımcı olarak görülebilir.

Dış iskelet robotlar insan bedeni ile yüksek etkileşimde çalıştıkları için insan anatomisine uygun yapıda tasarlanması gereken robotlardır. Dış iskelet robotlar, askeri ve endüstriyel alanda kullanıldıkları uygulamalarda operatörlerine destek güç ve dayanım sağlarken, medikal alanda rehabilitasyon ve tedavi amacı ile hastaların tedavisinde kullanılabilir. Dış iskeletler genellikle insanın yapacağı yürüme, koşma, oturma, kalkma, ağır yük taşıma gibi temel işlerde insana destek olmak amacı ile geliştirilmektedir. Gelişen eyleyici ve sensör teknolojileri ile dış iskelet sistemleri daha güçlü, dinamik ve ergonomik bir yapıya kavuşmakta ve bu sayede kullanım alanları genişlemektedir.

Dış iskelet sistemleri kullanım amacına göre farklı tasarımlar ile üretilmekte ve isimlendirilmektedir. İnsan üst bölgesini desteklemek için tasarlanan dış iskeletler üst-

ekstremiteler olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan bel ve bacaklar destekleniyorsa alt-ekstremiteler olarak tanımlanmaktadır. Hem alt hem üst bedeni desteklemek veya güçlendirmek amacı ile tasarlanmış dış iskelet robotları da mevcuttur.



**Şekil 1.1.** Alt-ekstremiteler dış iskeletlerin genel yapısı (Chu, 2005)

Ayrıca tasarım amacına göre de dış iskelet robotları; güçlendirme amaçlı (askeri, endüstriyel vb.) ve rehabilitasyon amaçlı (felçli ve yaşlı insanlar) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bu tez kapsamında güçlendirme amaçlı alt ekstremiteler için bir dış iskelet robotunun tasarımı, imalatı ve kontrolü gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. Motivasyon

Robot teknolojilerindeki hızlı gelişimin etkisi olarak son zamanlarda özellikle insan-robot işbirliği konusunda birçok çalışma yapılmaktadır.

Dış iskelet robotları, insanla etkileşim halinde olan giyilebilir elektromekanik yapılar olarak tanımlanabilirler. Bu robotlar engelli veya yaşlı bireylerde uzuv hareketlerini destekleyecek şekilde, sağlıklı insanlarda da güç artırma işlemleri için kullanılmaktadır.

Mevcut dış iskelet robotlarda insan-robot etkileşimi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. İlk insan-robot etkileşim yöntemi rehabilitasyon amaçlı tasarlanan robotlarda olduğu gibi belirli insani hareketleri tekrarlamak suretiyle kaybedilmiş olan kabiliyetleri tekrar insana kazandırmaktır. Bu tip robotların yapılması istenen hareketler önceden tanımlanarak sürekli olarak aynı hareketleri tekrarlaması sağlanmaktadır. Örnek olarak, yürüme kabiliyetini kaybetmiş bir kişinin rehabilitasyonu sırasında robotun düz bir

zeminde standart yürüyüş hareketini tekrarlaması istenir. Bu işlem yapılırken öncelikle sağlıklı insanlardan yürüyüş analizi yapılır. Yürüyüş verilerinde bütün mafsalların anlık olarak hangi konumda oldukları tanımlanmaktadır. Robot sonradan bu verileri referans değer olarak tanımlar ve yürüyüş hareketini yapmaya başlar. Bu etkileşim yönteminde robotlar tanımlanan hareketler dışında herhangi bir hareketi yerine getirememektedir.

Etkileşimi gerçekleştirmenin başka bir yöntemi de giriş sinyallerini direk olarak insan vücudundan almaktır. Örnek verilecek olursa; robotun elektromiyografi (EMG) sinyallerinin tanımlanması ve işlenmesi sonucunda istenilen hareketin yerine getirmesi sağlanabilmektedir. Bu yöntemde EMG sinyalleri öncelikle kaydedilmekte ve hangi hareketin sinyalleri olduğu tanımlanarak istenilen işlevin yerine getirilmesi sağlanmaktadır.

Son etkileşim yöntemi ise atalet ölçüm birimi (inertial measurement unit-IMU), enkoder, potansiyometre, basınç sensörü vb. sensörler kullanılarak robotun hareketinin sağlanmasıdır. Bu durumda da sensörler hareketi izlenmesi istenen uzuv üzerine yerleştirilirler. Sensörlerden gelen verilere göre istenilen hareketin yerine getirmesi sağlanmaktadır. Örnek olarak ayak tabanına yerleştirilen basınç sensörlerinin işlevleri verilebilir. Yürüyüş sırasında bu sensörlerin hangi noktasında ne kadarlık basınç olduğuna göre insan bacağının yürüyüş hareketinin hangi evresinde olduğu tespit edilmektedir. Bu andan sonra robotun hangi hareketi yapacağı tahmin edilerek bir sonraki hareket için robot mafsalları istenilen konumlara getirilmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi sağlıklı insanların güçlendirilmesi amacıyla en basit ve maliyeti az şekilde bacak hareketlerini izleyebilecek bir dış iskelet robot tasarlanması ana motivasyonu oluşturmaktadır.

## **1.2. Kapsam ve Hedefler**

Bu tez kapsamında insan vücuduna uyumlu, insan yürüyüşünü destekleyen giyilebilir alt-ekstremitte bir dış iskelet sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem ağır sırt yükü taşımak zorunda olan insanlar için güçlendirme amacıyla kullanılmaktadır. Teknolojinin yoğun olarak kullanıldığı günümüzde askeri ve endüstriyel alanlarda iş gücünün büyük bölümünde yoğun olarak kullanılan makine ve teçhizatlar insanın fiziksel kapasitesinin çok üzerinde bir performansla çalışmasını sağlamaktadır. Bu amaca uygun olarak sırtında yük taşıyan insanın yürüyüşünü destekleyen bir dış iskelet sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen dış iskelet, askeri alanlarda, endüstride ve eğlence sektöründe farklı amaçlarla kullanılabilir.

Öncelikle özgün bir mekanik yapı Solidworks yazılımı yardımıyla tasarlanmıştır. Yapılan tasarımda özellikle uzuv boyutlarının değişken olması ve giyinecek her insanın yüküne dayanabilecek bir yapıya sahip olması sağlanmıştır. Sonrasında dinamik analizleri gerçekleştirilerek elektrik motorları yardımıyla istenilen hareketler yerine getirilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada tasarımı yapılan robotun kontrolüne yönelik ileri kontrol algoritmalarının tasarlanarak uygulanması ve birbirleriyle kıyaslanması amaçlanmıştır. Yapılan tasarım parametrik değişikliklere sahiptir. Hedeflenen kitledeki insanların boy ve kilolarının aynı olmaması sebebiyle robotun uzuvlarının değişken olması ve giyinecek her insanın yükünü taşıyabilecek mukavemete sahip olması gerekmektedir. Bütün bu parametrelerin değişmesi kullanılacak kontrol yöntemini fazlasıyla etkilediğinden, kontrol yönteminin bu parametrik değişikliklerden mümkün olduğunca az etkilenmesi gerekmektedir.

Değişken yapıli kontrol algoritmalarından bir olan kayan kipli kontrol, dış etkilere ve parametrik değişikliklere duyarsız oluşu nedeniyle en çok bilinen ve kullanılan kontrol algoritmalarından birisidir. Gelişen teknolojinin de bu tür kontrol yöntemlerinin uygulanabilirliğine zemin hazırlaması, bu yöntemi daha da cazip hale getirmektedir. Ancak kontrol sinyallerinin çok sık bir şekilde yön değiştirmesi ile oluşan çatırdamalar bu kontrol yönteminin en önemli dezavantajını oluşturmaktadır. Denetim sonucunda pratikte uygulanması mümkün olmayan kontrol kuvveti eğrileri ortaya çıkmaktadır.

Denetleyicinin başarısını arttırmanın yolları aranırken son yıllarda dikkati çeken çalışmalarda kayan kipli denetleyicinin kayma yüzeyinin hareketli tutulması ile performansının arttırılabildiği görülmüştür. Bunun üzerine robotun kontrolü için kayma yüzeyi hareketli tutularak kayan kipli kontrol algoritmasının geliştirilmesi yapılmıştır. Bu ileri kontrol yöntemlerinden elde edilecek sonuçlar aynı zamanda klasik kontrol yöntemlerinden elde edilecek cevaplar ile kıyaslanmıştır. MATLAB-Simulink yardımı ile sayısal benzetim çalışmaları yapılarak her kontrol yöntemi için robotun mafsallarının hata ve hassasiyetleri elde edilmiş, hareket grafikleri ortaya çıkarılmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırılarak hangi kontrol yönteminin daha güçlü olduğu ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Böylece belirlenen hedefler doğrultusunda tasarlanan kontrol yöntemlerinin başarısı hem grafiksel hem de rakamlarla tablo halinde verilmiştir.

Kontrol algoritmalarının tasarımında en uygun katsayıların seçimi başarıyı doğrudan etkilemektedir. Bunun için optimizasyon işlemine başvurarak bu konuda genetik algoritma tekniğinden yararlanılmıştır.

Tez kapsamında tasarlanan dış iskelet sisteminin prototipi üretilmiştir. Geliştirilen dış iskelet sisteminin genel yapısı Şekil 1.2’de görülmektedir.



**Şekil 1.2.** Yük taşımaya yardımcı alt ekstremité dış iskelet sisteminin genel görünümü

Dış iskeletler, verilen görevleri istenen hızda ve doğrulukta gerçekleştirmesi için uygun eyleyiciler ve bu eyleyicileri gerekli hassasiyet ve doğrulukta kontrol edecek kontrolcü ve yazılıma ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanında iskelet sisteminin mekanik tasarımı insan ile tam bir uyum içerisinde çalışabilecek şekilde ergonomik olmalı ve insan sağlığını tehdit etmeyecek şekilde mekanik kısıtlara sahip olmalıdır. Bu çalışma içerisinde üretilen robot da sonuçlarda da görüldüğü üzere istenilen hareketi yüksek bir hassasiyetle yerine getirmiştir.

### 1.3. Literatür Özeti

#### 1.3.1. Dış İskelet Robot ve Tarihi

ABD Savunma Bakanlığı, 1960'lı yılların başında askerlerin fiziksel yeteneklerini artırabilecek güçlendirilmiş bir zırh üzerine bir araştırma başlatmıştır. 1962'de, Hava Kuvvetleri'nin Cornell Aeronautical Laboratory' sinde, bir master robotik sistemin insan gücü olarak kullanılmasının fizibilitesine dair bir çalışma yapılmıştır. Diğer bir çalışmada Cornell, insandan çok daha az serbestlik derecesine (DOF) sahip olan, ancak insan ile aynı görsel görünümüne sahip bir robotik sistem olan bir dış iskeletin istenen birçok görevi yerine getirebileceğini bulmuştur. General Electric, 1960 ve 70 yılları arasında, insan-güçlendirme sisteminin oluşturduğu “İnsan-Güçlendirme Araştırma ve Geliştirme Araştırması”nın kısaltması olan Hardiman olarak adlandırılan bir insan-güçlendirme sistemi üzerine bir araştırma yürütmüştür (Lenzo, 2013). Şekil 1.3' de gösterilen bu sistem, operatör tarafından giyilen dış iskeletlerden meydana gelmektedir. Sunduğu avantajların yanı sıra, bazı dezavantajlara da sahiptir. Örneğin, 1970 yılı itibariyle geliştirilen sistem neredeyse 370 kg taşıma kapasitesine sahiptir ancak sistemin toplam ağırlığı yaklaşık 750 kg' dır. Dönemin teknolojik eksiklikleri sebebi ile dış iskelet robot sistemini kontrol edecek bilgisayarlar yeterince hızlı değildi ve enerji kaynakları çok büyük ve ağırdı. Ayrıca dış iskelet robotun elektromekanik kasları aşırı derecede yavaş, ağır ve hantal idi. Ancak insan güçlendirme amacına bu proje ile ulaşılmış ve bundan sonra yapılacak çalışmaların kapısı aralanmış, araştırmacılar için ufuk oluşmuştur.



Şekil 1.3. Hardiman dış iskelet robot (Corliss & Johnsen, 1968)

Sonraki yıllarda yapılan çalışmalar dış iskelet robotun farklı tasarım ve kullanımına yönelik; insan güçlendirme (askeri ve yük taşıma) ve iyileştirme (tedavi ve destek) amaçlı dış iskelet robotlar olmak üzere iki başlık altında; hiyerarşik sıraya uygun olarak özetlenmiştir.

### 1.3.2. Güçlendirme Amaçlı Dış İskelet Robotlar

DARPA (Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı) askerler ve ağır paket ve ekipman taşıyan diğer personel tarafından kullanılmak üzere dış iskelet robot projesi gerçekleştirdi. Proje sonucunda DC motorların ve 48 V' luk batarya takımının kullanıldığı 11,8 kg ağırlığında Şekil 1.4'deki gibi bir prototip üretilmiştir (Dollar & Herr, 2008) (Lenzo, 2013). Yapılan testler, dış iskelet robotun operatör sırtında taşıdığı yükü azaltmasına rağmen, normal bir şekilde yürüyüşünü gerçekleştirmek isteyen operatörün daha fazla çaba harcadığı için oksijen tüketiminin %10 arttığı kaydedilmiştir.



Şekil 1.4. DARPA dış iskelet robot (Lenzo, 2013)

Dış iskelet robot tasarımı ve kontrolünde bir üst basamağa geçmeyi başaran proje Berkeley firması tarafından geliştirilmiş olan; operatör ile robot arasında etkileşimin kuvvet sinyalleri ile sağlandığı Berkeley Alt Ekstremit Dış-iskeleti (BLEEX) dış iskelet robotudur. Bu çalışma ile operatörün dış iskelet robotun hareketi üzerinde kontrol sahibi olması sağlanmıştır (Kazerooni, 2005). BLEEX, kendi taşınabilir hibrid hidroelektrik taşınabilir güç kaynağının tasarımına sahiptir. Şekil 1.5'te gösterilen BLEEX, insan anatomisi ve yürüme analiz sonuçları incelenerek kinematik ve operasyonel tasarım çalışması ile gerçekleştirilmiştir (Zoss, Kazerooni, & Chu, 2006). Belirtilen yönleri ile BLEEX, DARPA' dan çok daha başarılı bir örnektir.





Şekil 1.5. BLEEX (Zoss, Kazerooni, & Chu, 2006)

Berkeley firması projelerini geliştirerek, boyut ve ağırlıkları BLEEX'e oranla daha düşük Şekil 1.6' da gösterilen HULC (Human Universal Load Carrier), "ExoHiker" ve "ExoClimber" isimlerinde üç adet dış iskelet robot daha üretmiştir. Diz eklemine yerleştirilen elektro-hidrolik tahrik elemanı sayesinde HULC, yüksüz durumda saatte 2 mil hız ile hareket eden operatörünün % 5-12 oranında, 35 kg yüklü durumda ise % 15 oranında daha az güç harcamasını yani oksijen tüketimini sağlamaktadır.



Şekil 1.6. Berkeley Bionics tarafından geliştirilen a)ExoHiker b) Exo Climber c) HULC

Askeri hedefli olarak Raytheon Sarcos'un geliştirdiği DARPA destekli Şekil 1.7 ' de gösterilen XOS isimli dış iskelet robot BLEEX' den farklı olarak tüm gövde dış iskelet robotudur. Robot, omuz, dirsek, kalça, diz ve ayak mafsallarına yerleştirilen elektro hidrolik tahrik elemanları ile askerlerin hareket performansını, hızını ve dayanımını arttırmak amacı ile üretilmiştir. BLEEX'den farklı olarak mafsallar sadece doğrusal tahrik sistemine sahip

değil dairesel tahrik sistemi de sahiptir. Robotun kontrolü operatörden ölçülen sensör verilerine göre mikro-kontrolcüler ile sağlanmaktadır. XOS' un en göze batan eksik yönü uzun süreli kendine yetecek güç ünitesinin bulunmamasıdır. XOS' un geliştirilmiş ikinci sürüm XOS-2, XOS' a göre daha hafif bir gövdeye sahiptir ve güç gereksinimi %70 oranında daha azdır. XOS-2 68 kg. sırt yükünü operatöre hissettirmeden taşıyabilmektedir.



Şekil 1.7. XOS

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT)'den bir grup araştırmacının DARPA' nın finansal desteği ile ağır sırt yükü taşıyan operatörlerin hissettikleri yük miktarını azaltmak amacı ile Şekil 1.8' de gösterilen bir alt ekstremité dış iskelet robot geliştirmişlerdir. 11,8 kg ağırlığında olan dış iskelet robot kendi taşınabilir güç ünitesine de sahiptir. Robotun kalça mafsalı kuvvet kontrollü tahrik elemanından, diz mafsalı damper mekanizmasından ve ayak kısmı da pasif yay elemanlarından oluşmaktadır. Bu cihazda operatörün sırtında taşıdığı yaklaşık 35 kg'lık yükün % 90' ını yere ilettiği test edildiği ifade edilmiştir. Ancak operatör cihaza uyum sağlamak için fazla çaba harcadığından oksijen tüketiminin %10 arttığı kaydedilmiştir.



**Şekil 1.8.** MIT tarafından geliştirilen dış iskelet

HAL (Hybrid Assistive Limb) doktor, hemşire, fizik tedavi uzmanı ve diğer sağlık personellerinin ve acil kurtarma timlerinde, engelli ve yardıma ihtiyacı olan kişileri kolayca taşıyabilmeleri ve bir yerden başka bir yere sevk edip bakım ve tedavilerini kolay bir şekilde yapabilmeleri için özel amaçlı olarak tasarlanmıştır (Sankai, 2011). Şekil 1.9’ da gösterilen dış iskelet robotun kendi ağırlığı 23 kg'dır ve mafsalları eyleyicileri elektrik motorlarıdır. 100 V AC batarya ile çalışmaktadır ve batarya süresi yaklaşık 3 saattir. HAL dış iskelet robotu operatörün beyninden kaslarına iletilen myo-elektrik sinyallerin elektrotlar ile alınıp anlamlandırılması yoluyla kontrol edilmektedir. Myo-elektriksel sinyalin genliğinin 10mV ile 1mV arasında değiştiği; sinyalin frekansının da 2-300 Hz aralığında olduğu ifade edilmiştir.



**Şekil 1.9.** HAL dış iskelet robot (Sankai, 2011)

The Body Extender dış iskelet robotu, operatörün hareketlerini takip etmek ve uyguladığı kuvveti arttırmak amacı ile tasarlanmış güçlendirici tüm beden dış iskelet robot sınıfındadır

(Marcheschi, Salsedo, Fontana, & Bergamasco, 2011). Şekil 1.10’ da gösterilen robot 22 serbestlik derecesine sahiptir ve sırt çantası şeklinde bir kontrol ünitesi, iki kol ve iki bacak mekanizması içermektedir. Kol ve bacak mekanizmaları insan uzvuna benzer kinematik yapıdadır. Her bir mafsallı fırçasız DC motorlar ile tahrik edilmektedir. Ayrıca kol tutucu uçlarında birer adet servo tahrik kontrollü tutucu uç bulunmaktadır.



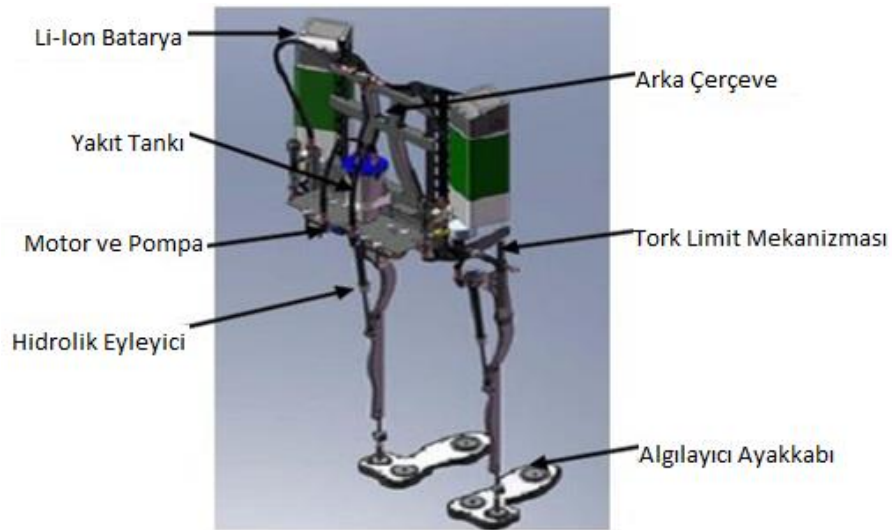
**Şekil 1.10.** Body extender (Marcheschi, Salsedo, Fontana, & Bergamasco, 2011)

Yang, Niu ve Chen diz ve kalça mafsalları pnömatik tahrik elemanları ile hareket ettirilen Şekil 1.11 ‘ de gösterildiği gibi dört serbestlik dereceli bir alt ekstremité dış iskelet robot tasarlamışlardır (Yang, Niu, & Chen, 2005). Dış iskelet robotun kontrolü potansiyometre, kuvvet sensörleri ve görüntü yakalama sistemlerinden alınan bilgiler ile eğitilen ANFIS (Adaptive Network Based Fuzzy Interface System) ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçta eğitilmiş ANFIS ağından elde edilen çıkışların orijinal mafsallı eğrileriyle neredeyse tamamen örtüştüğü görülmüştür.



**Şekil 1.11.** Yang ve arkadaşları tarafından geliştirilen dış iskelet robot

Cao ve arkadaşları, Şekil 1.12’ de gösterilen ELEBOT isimli düşük akışlı pompa-valf hibrit kontrollü hidrolik tahrik sistemli alt ekstremite dış iskelet robot tasarlamışlardır (Cao, ve diğerleri, 2006). Kullanılan pompa servo motorla sürülmüş ve yüksek hızlı on-off valf ile konum ayarlanmaya çalışılmıştır. Sistemin tahrikinde tek etkili silindirler kullanılmış ve yüksek hızlı aç-kapa valf ile akış kontrol edilmiştir. Sistemin kontrolü için basınç sensörleri ile donatılmış bir ayakkabı tasarlanmış ve hareket esnasında yerin tepki kuvveti ölçülerek dinamik analiz yardımı ile dizde oluşturduğu tork hesaplanmıştır. Sistem bu tork değerine göre tahrik edilmiştir. Dış iskeletin kontrolünde PD tip kontrolcü kullanılmıştır. ELEBOT ile operatör yüksüz olarak 4,5 km/s, 30 kg’lık yük ile 3,2 km/s hıza ulaşabilmektedir.



**Şekil 1.12.** ELEBOT dış iskelet robot

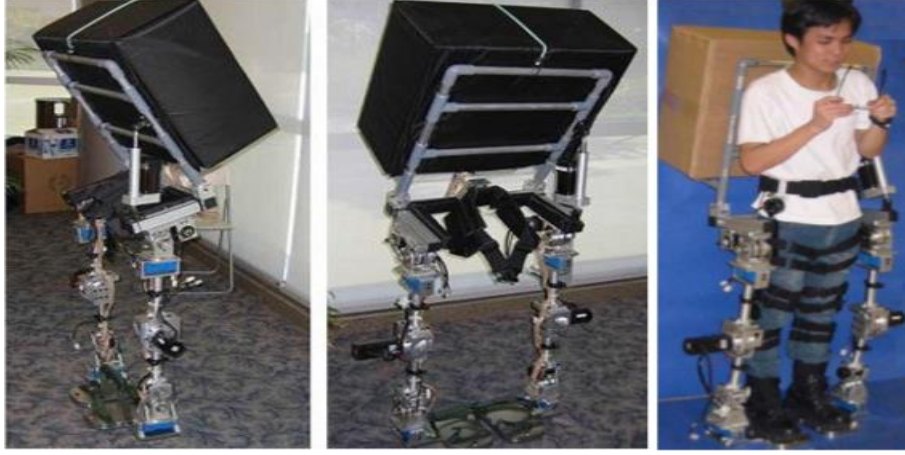
Borovin, Kostyuk, Seet ve Iastrebov, Rusya bilim akademisinin finans desteği ile yaptıkları araştırma sonucunda her türlü yük taşımada kullanılmak amacıyla Şekil 1.13’ de gösterilen 10 serbestlik dereceli, tüm vücut dış iskelet robot geliştirmişlerdir (Borovin, Kostyuk, Seet, & Iastrebov, 2006). Sistem üzerinde hidrolik silindir ve hidrolik motor kullanımı ayrı ayrı test edilmiş ve hidrolik silindir kullanımı ile robotun daha hafif, kompakt, güç gereksinimi daha az ve daha hızlı forma ulaştığı ifade edilmiştir. Tasarladıkları hidrolik motorlu robotun ağırlığı 183,63 kg, hidrolik silindirli robotun ağırlığının 64,1 kg’dır. Sistem servo valfler ile kontrol edilmekte ve güç gereksinimi patlamalı motor ile sağlanmaktadır.



**Şekil 1.13.** Rusya Bilim Akademisi ve Nanyang Teknoloji Fakültesi ortaklığında geliştirilen dış iskelet

Low, Liu ve Yu, Singapur Savunma Bakanlığı tarafından finansal destek sağlanan projeleri ile Şekil 1.14’ de gösterilen NTU adını verdikleri yük taşıma amaçlı bir dış iskelet robot geliştirmişlerdir (Low, Liu, & Yu, 2005). Bu yapı bir iç iskelet sistemi bir de dış iskelet sistemini beraber içermekte olup; dış iskelet robotun kontrolü, operatöre bağlı iç iskelet robottan alınan enkoder ölçüm verileri ile sağlanmıştır. Dış iskelet robot ise kalça, diz ve ayak mafsallarına bağlı motorlar ve yük taşımak için özel tasarlanmış sırt yük bölmesinden ve bu bölmeyi hareket ettiren silindirlerden oluşmaktadır. Dış iskeletin kontrolü için Sıfır Moment Noktası (ZMP) metodu kullanılmıştır ve Matlab ve Adams programları ile simüle edilmiştir.





**Şekil 1.14.** NTU dış iskelet sistemi

Büyük çaplı finansal destekli projeler sonucu üretilen dış iskelet robotların yanı sıra akademik çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalardan öne çıkanlar ise;

Reinicke, Fleischer ve Hommel, bir bacakları hareket güçlüğü yaşayan kişilerin sağlıklı bacaklarından çift eksenli ivme ölçerler ile alınan veriler ile hareket tarzını belirleyip yörünge analizi yapan bir kontrol algoritması geliştirmişlerdir (Reinicke, Fleischer, & Hommel, 2005). Bu algoritma ile de dış iskeletin kontrolü sağlanmıştır. Hedeflenen hareket ve sağlıklı bacağın bu hareketi gerçekleştirirken izlediği yörünge hesaplanarak hasta bacağın bu hareketi gerçekleştirmesi için gerekli referans değerleri belirlenmektedir. Sonrasında ise kontrolcü, hasta bacadan ölçülen anlık veriler ile  $\text{hata} = \text{referans} - \text{ölçüm}$  değeri hesaplaması yapıp bu değeri minimuma götürmeye çalışmaktadır. Sonuçlar başarının yüksek olduğunu gösterse de testler sadece sağlıklı bireyler üzerinde gerçekleştirildiği için nihai sonuç değildir.

Costa ve Caldwell çalışmalarında tahrik elemanı olarak pnömatik kas kullanarak, bel iki diz ve ayakların bir serbestlik derecesine sahip olduğu bir dış iskelet robotu; yürüyüş eğitimine yardımcı olması amacı ile tasarlamışlardır (Costa & Caldwell, 2006). Sistemin üç boyutlu matematik modelini ve kinematik denklemlerini elde etmiş ve ayrıca sistemin kontrolü için PID Kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Basınç ve tork sensörlerinden alınan verileri kapalı çevrim kontrolü için kullanmışlardır. Ancak deneysel sonuçlar özellikle diz eyleyicisi için önemli derecede bir gecikme oluştuğunu ve sistemin sağlıklı çalışmadığını göstermektedir. Yapılacak araştırma ve geliştirmelerden sonra bu değerlerin çok daha iyi hale getirilebileceği ifade edilmiştir.

Morogumi iki farklı tip dış iskelet robot tasarımı gerçekleştirmiş, biri ile bacak diğeri ile de parmak hareketlerine destek olmayı hedeflemiştir (Morogumi, 2003). Bacak iskelet robotunda her bir mafsallık için dört adet pnömatik yapay kas kullanırken, parmak iskelet robotunda her bir mafsallık için bir adet pnömatik silindirik tahrik elemanı kullanmıştır. Ayrıca çalışması kapsamında yeni bir rijitlik sensörü tasarlamış ve bu sensörden aldığı kas hareket bilgi verileri ile PD kontrolcü ve ileri beslemeli bir kontrol algoritması tasarlamıştır. Kullanılan sensörlerin dış gürültüye yüksek dayanıklı ve insan kas aktivitelerini ölçmede oldukça başarılı olduğu test edilmiştir. Deneyler sonucunda dış iskeletlerin insan gücünü ve dayanıklılığını artırdığı gözlenmiştir.

Liu, Low ve Yu tarafından yapılan çalışmada NTU dış iskelet robotu için Sıfır Moment Noktası (ZMP) metodu kullanarak bir kontrol yapısı tasarlanmıştır (Liu, Low, & Yu, 2004). İnsandan ölçtükleri ZMP ve bacak pozisyon verilerini kullanarak dış iskelet gövdenin düzeltilmesini sağlayacak iskelet ZMP değerini hesaplanmıştır. Tüm bu analiz sonuçlarını ise simülasyon halinde sunmuşlardır.

Low K. , Liu, Goh ve Yu çalışmasında LEE adı verilen yük taşıma amaçlı bir iskeletin tasarım ve kontrol aşamalarını göstermiş ve bazı deney sonuçları elde etmişlerdir (Low K. , Liu, Goh, & Yu, 2006). LEE insan hareketini ölçen bir iç iskelet ve yükü taşıyan bir dış iskeletten oluşmaktadır. Özel bir ayakkabı, insanın sıfır moment noktalarını (ZMPs) ölçmek için kullanılmıştır. Ölçülen insan ZMP değerleri referans olarak kullanılarak, iskeletin ZMP değerleri kararlı yürümeyi sağlayabilecek şekilde kontrol edilmiştir. COTS programı ve MATLAB xPC Target araç kutusu kullanılarak gerçek zamanlı yürüyüş kontrolü başarıyla uygulanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar göstermiştir ki ZMP kontrol uygulanarak iskeletin kararlı bir şekilde yürümesi sağlanmıştır.

Walsh, Pasch ve Herr yük taşıma amaçlı düşük ağırlıklı bir iskelet geliştirmiştir (Walsh, Pasch, & Herr, 2006). Bu çalışma DARPA tarafından desteklenmiştir. İskeletin diz ve kalçasındaki mafsallar güçlendirilmiş ayağındaki mafsallık ise serbest bırakılmıştır. Kalça mafsalında eyleyici olarak doğrusal seri elastik eyleyici, diz mafsalında ise değişken damper mekanizması kullanılmıştır. İskelet ile yapılan ilk deneylerde, eyleyiciler çıkarılarak kalça eyleyicisi yerine burulma yayı, diz eyleyicisinin yerine ise değişken empedans aygıtı takılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. Daha sonraki deneylerde ise eyleyiciler kullanılarak kuvvet eklenmesinin yük taşıma esnasındaki yürüyüş etkileri incelenmiştir.



Yapılan diğ er bir çalışmada tasarlanan iskelete mafs al a ılları ve yer iskelet kuvvet     mlerine dayalı bir kontrol stratejisi uygulamıştır. Kontrol insan yürüyüşünden elde edilen verileri kullanarak yürüyüş esnasında iskelet için gerekli kuvvetleri hesaplamaktadır (Walsh, ve diğ erleri, 2006). İlk deneyler göstermiştir ki diz ve kalça kontrolü gürbüz (robust) bir şekilde gerçekleştirilebilmekte ve iskelet yürüyüş esnasında yükleri etkin bir şekilde yere iletebilmektedir.

Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) adı verilen diğ er bir çalışmada y k taşımaya yardımcı bir iskeletin tasarımı gerçekleştirmiştir. BLEEX projesi DARPA tarafından desteklenmiştir ve g   ve kontrol ünitesini taşıyan ilk iskelettir (Chu, Kazerooni, & Zoss, 2005). Tasarlanan iskelet kalça, diz ve ayak mafsallarından hidrolik silindirler kullanılarak hareket ettirilmektedir.  skelet için gerekli mafs al a ılları, torkları ve g   gereksinimleri klinik yürüyüş analizinden elde edilmiştir.  skeletin serbestlik derecesi ve hareket aralığı ise bir maket kullanılarak yapılan testler sonucunda belirlenmiştir.

Bilek yardımı, insan ağırlık desteği ve insan robot etkileşimi konularındaki gelişmelerin irdelendiği diğ er bir çalışmada yapay pnömatik kasa sahip bir yürüyüş rehabilitasyon dış iskeleti geliştirilmiştir. Kontrol ve tasarım kavramlarının değerlendirilmesi için bir prototip tasarımı yapılmıştır. Mekanik tasarım prosedüründe optimizasyonun önemi vurgulanmıştır (Beyl, ve diğ erleri, 2008).

Zhu, Zhou ve Wang tarafından geliştirilen alt-ekstremit  dış iskelet robotu yük taşımak için tasarlanmıştır. Dış iskelet 30 kg sırt yükü taşıyabilecek şekilde tasarlanmıştır (Zhu, Zhou, & Wang, 2012). Tek etkili hidrolik silindirler ile çalışan sistemde silindirlerin kontrolü için servo valf kullanılmıştır. Hidrolik devrede dişli pompa kullanılmış ve pompa fırçasız DC motor ile çalıştırılmıştır. Dış iskeletin kontrolünde pozisyon kontrolü için PI kontrol c  kullanılmıştır. Farklı sırt yüklerinde yürüyüş testleri yaparak yürüyüş boyunca diz açısı değişimi ve sistemin hidrolik basınç değişimleri gözlemlenmiştir.

### **1.3.3. Rehabilitasyon Amaçlı Dış  skelet Robotlar**

Therapy Wilmington Robotik Exoskeleton (T-WREX), kolayca bulunabilen düşük maliyetli, pasif bir eğitim cihazı olarak üretilmiştir (Sanchez, ve diğ erleri, 2006). şekil 1.15' de gösterilen bu cihaz, çeşitli destek seviyeleri ve nicel geri bildirimler sağlar ve yarı otonom kol eğitimine izin verir. Kronik fel  geçiren ve normal yerçekimi koşulları altında kol

fonksiyonuna sahip olan hastalar, T-WREX kullanılarak uzanma ve çekme hareketlerini gerçekleştirebilirler.

Ragonesi, Agrawal, Sample, Rahman ve Wrex elastik aktüatör kullanarak WREX'i modifiye etmişlerdir (Ragonesi, Agrawal, Sample, Rahman, & Wrex, 2011). Yerçekimine göre kendisini dengeleyen ve kas distrofisi veya spinal müsküler atrofi gibi kas problemleri olan çocuklar için tasarlanmış bir üst ekstremité ortezi haline getirmişlerdir.



**Şekil 1.15.** T-Wrex dış iskelet robot (Sanchez, ve diğerleri, 2006)

Üst kol dış iskelet robotunun bir örneği, Şekil 1.16' da gösterilen omuz için tasarlanmış olan Maryland-Georgetown-Ordu (MGA) dış iskeletidir (Lenzo, 2013). Cihazın omuz rotasyonu için üç, dirsek hareketleri için bir tane ve skapula hareketleri için bir tane olmak üzere beş serbestlik derecesi vardır. Bu cihaz, kol mukavemetini, hızı ve hareket aralığını yerleşik sensörler kullanarak değerlendirmektedir.



**Şekil 1.16.** MGA dış iskelet robot (Lenzo, 2013)

LOPES cihazı, Şekil 1.17’ de gösterildiği gibi kalçada 2 ve dizde 1 olmak üzere 3 ameliyatsız rotasyonel eklemden oluşan bir bacak dış iskeletidir (Veneman, ve diğerleri, 2007). Operatör ile robot arasındaki çift yönlü mekanik etkileşimi sağlamak için eklemlerde empedans kontrolü kullanılır. Robot iki moda sahiptir: hastayı takip et, destekle ve hareketleri yönlendir ve kontrol et modları hem “hastayla sorumlu” hem de “robotlu şarj” moduna izin verir. EMG değerleri, bacağın 8 önemli bölgesinde ölçülmüş ve sonuçlar, bu sistemdeki serbest yürüyüşün, serbest koşu bandı yürüyüşü ile benzer olduğunu göstermiştir.



**Şekil 1.17.** LOPES dış iskelet robotu (Veneman, ve diğerleri, 2007)

Başka bir giyilebilir dış iskelet sistemi, Şekil 1.18’ de gösterilen Berkeley eLEGS'dir (Strausser & Kazerooni, 2011). Bu cihaz operatörün jestsel niyetlerini tespit etmek için, operatörün hareketine dayanan bir operatör-cihaz ara yüzü kullanır. Niyet tespit edildikten sonra, bu cihaz onlarla uyumlu olarak hareket eder. Bu sistemde kullanılan sensörler, operatörün girdileri hakkında bilgi sağlamak için kullanılır. Bu sensörler aracılığıyla, paraplejik operatörler bile yürüyebilir veya hareket edebilir.



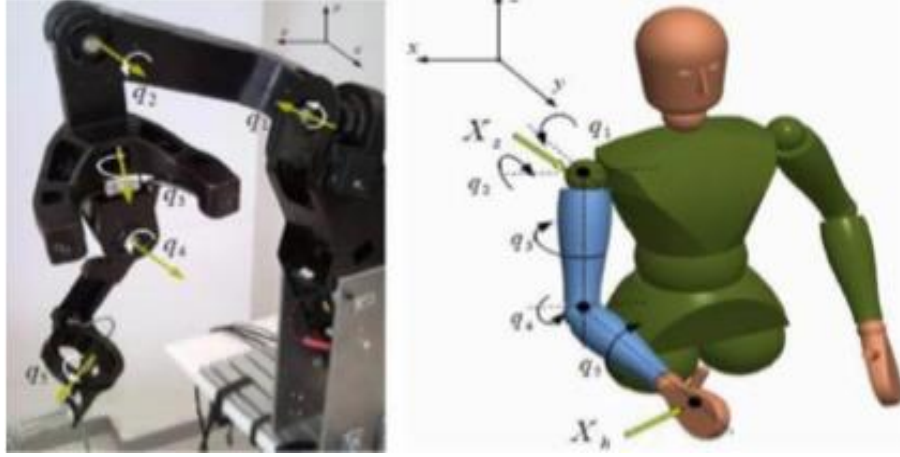
**Şekil 1.18.** eLEGS dış iskelet robot (Lenzo, 2013)

RUPERT (Robotik Üst Ekstremité Tekrarlayıcı Terapi) robotu, ABD'de hastalar için uygun maliyetli tedaviye odaklanan bir cihaz olarak üretilmiştir. Birden fazla prototipe sahip olan cihazın RUPERT, RUPERT II gibi ilk nesillerinde, omuz hareketlerini güçlendirmek için omuz, dirsek ve el bileğinde 4 pnömatisel kas vardır. Şekil 1.19'da gösterilen bu robot çeşitli uzuv boyutlarına sahip çeşitli kullanıcılara hizmet sağlamak için uyarlanabilir bir mekanik kol tasarımına sahiptir. Bu robotla, kişi bir yerden yemek ya da bir şey almak gibi günlük ihtiyaçlarını kolayca karşılayabilir. Kontrol üniteleri, kullanıcılar için ayarlanabilir, böylece kol / el esnekliği ve gücü artırılabilir. Ancak dış iskelet tarafından sağlanan rehabilitasyon programı geleneksel tekrarlı hareket eğitimi ile sınırlıdır.



Şekil 1.19. RUPERT

L-EXOS (Light Exoskeleton), uzaktan kumandalı bir sağ kol dış iskelet rehabilitasyon robotu olarak geliştirilmiştir (Frisoli, Bergamasco, Carboncini, & Rossi, 2009). Bu cihaz 100 N'a kadar kontrol edilebilir ve ayarlanabilir kuvvet uygulayabilir. Şekil 1.20'de gösterilen bu cihaz, operatörlerin herhangi bir spatial düzlemde hareket etmesini sağlar ve kolay kullanım için tasarlanmıştır. Bu yüzden; bilek kapalı şekilde dizayn edilmiş ekleme yerleştirilir ve takarken operatöre yardımcı olmak için sadece bir terapist yeterlidir. Operatörlerin, verilen görevleri kolaylıkla yerine getirebildiği ifade edilmiştir.



**Şekil 1.20.** L-EXOS (Frisoli, Bergamasco, Carboncini, & Rossi, 2009)

Cao, Ling, Zhu, Wang ve Wang diğer bir çalışmada fiziksel olarak yürüme güçlüğü çeken insanlar için servo motor kullanılarak Şekil 1.21’ de gösterildiği gibi bir dış iskelet geliştirmiştir (Cao, Ling, Zhu, Wang, & Wang, 2009). Bu iskeletin kontrolünde EMG sinyalleri temel alınarak insanın yürüyüş tahmini anlık olarak yapılmıştır. Kontrol algoritması olarak Yapay Sinir Ağları eğitim algoritması kullanılmış ve ağı eğitimi anlık olarak yapılandırılmaktadır.



**Şekil 1.21.** IAE güç destek sistemi

Önen tarafından YÜDİS isimi verilen bir alt ekstremité dış iskelet robot tasarlanmıştır (Önen, 2011). Şekil 1.22’ de gösterilen bu robotun temel amaçları ortopedik veya nörolojik rahatsızlıklar, tramva, yaşlılık sebebi ile yürüyemeyen veya yürüme zorluğu çeken insanların yürüyüşünü desteklemektir. Araştırmacılar çalışmaları kapsamında mekanik tasarım, kinematik ve dinamik analiz modellemesi ve kontrol çalışmalarının tümünü gerçekleştirmiş ve bir prototip üretmişlerdir. CAD ortamında oluşturulan YÜDİS katı modeli, MATLAB

Simulink/Simmechanics ortamına aktararak yürüyüş sümülasyonları gerçekleştirilmiştir. YÜDİS' in kontrolünde, PD kontrolcü ve Aralık Tip-2 bulanık mantık türünde iki farklı kontrolcü kullanılarak performanslarını karşılaştırılmıştır. Deneysel testler sonucunda Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolcü, PD kontrolcüye göre daha başarılı olduğu ifade edilmiştir.

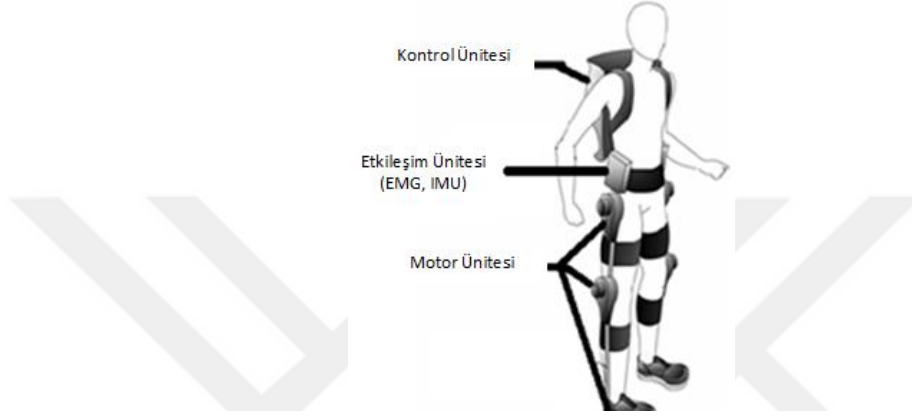


**Şekil 1.22.** YÜDİS dış iskelet sistemi

## 2. DIŞ İSKELET ROBOTUN MEKANİK TASARIMI

Bu bölümde tasarlanması planlanan robotun özellikleri ve tasarım aşamaları verilecektir.

Dış iskelet robotlar kullanıcı ile tam olarak senkronize çalışmak durumunda olduğu için gerek tasarımı gerekse kontrol yapısı son derece önemlidir.



Şekil 2.1. Dış iskelet robot tasarım şeması

Şekil 2.1 de yer alan şemadan da anlaşılacağı gibi kullanıcının yapmak istediği hareket sensörler aracılığı ile kontrol birimine iletilir. Kontrolcü gelen bilgiyi işleyerek tahrik elemanlarına ne kadarlık bir tork veya açı oluşturacağını bildirerek hareketin başlamasını sağlar.

Dış iskelet robot tasarlanırken göz önüne alınması gereken birçok husus bulunmaktadır. Özellikle tasarım aşamasında aşağıdaki karakteristiklere karar verilmelidir.

- Giyilebilirlik
- Kullanıcı kişi ile etkileşim
- Kullanıcının hareket tipinin kontrolü
- Vücut uzuvlarının yani exoskeletonun hareket ettirilmesi

Dış iskelet robotun kişiye özel tasarlanması gereken bir destek robotu olduğu ifade edilmiştir. Bu sebeple sağlıklı olan insan için güçlendirme robotu özellikleri seçilmelidir.

**Dış İskelet Robotun Giyilmesi:** Bu robot bütün yaşam süreci boyunca kullanıcı tarafından vücuda monteli bir şekilde taşınmayacağı için belirli özelliklere sahip olmalıdır. Tasarlanan robot kişinin ihtiyaç duyduğu durumlarda rahatlıkla giyinebileceği gibi istediğinde de çıkarılacak şekilde tasarlanmalıdır. Hedef kitle askerler ve ağır işlerde çalışan kişiler olduğu

için, bu robotu her an kullanmaları gerekmeyecektir. Özellikle ağır yüklerin taşınması gereken durumlar veya aşırı derecede yorgunluğa sebep olacak durumlarda kullanıcının yorulmasını engellemek gerektiğinde bu robotlardan yardım alınacaktır. Bunun dışındaki durumlarda kullanımına gerek duyulmayacağı için çok kolay bir biçimde giyilip çıkarılması gerekmektedir.

Kullanım amacı açısından bu robotlar belirli mekanik ve ergonomik özelliklere sahip olmalıdırlar.

Dayanıklılık: Dış iskelet robot dayanıklı olmalıdır. Ağır yükler altında bile bükülme, eğilme ve kırılma söz konusu olmamalıdır. Bu sebeple robotun imal edileceği malzemenin niteliği iyi seçilmeli, kaliteli şekilde işlenmeli ve tüm parçalar iyi bir işçilikle ile bir araya getirilmelidir.

Konfor: Kullanıcı bu robotla kendini rahat hissetmelidir. Kişi bu robotu kullanırken herhangi bir şekilde rahatsız olmamalı ya da yaralanmamalıdır.

Kullanıcının isteğinin tanımlanması: Bu fonksiyon robotun en önemli özelliklerinden birini içermektedir. Dış iskelet robot tamamen kullanıcı ile senkron olarak çalışması gerektiği için gerçek zamanlı olarak kullanıcının isteklerini algılamalı ve hemen cevap vermelidir. Bu sebeple bütün sensörlerden gelen veri toplanır. Kontrol birimine aktarılan bu veriler sayesinde yapılması planlanan hareket tipi belirlenir.

Vücut ve Dış iskelet Robotun uzuvlarının hareket ettirilmesi: Kontrol ünitesinde işlenen veriler sonucunda hareket belirlenmiştir. Belirlenen hareketi yerine getirmek için vücutla aynı anda robotun tahrik elemanları aktif hale getirilir. Kontrolcüde hesaplanan değerlere göre kalça kemiği, diz ve bilek tahrik elemanlarına bulunmaları gereken konum ve uygulamaları gereken torkları ayrı ayrı iletilir.



### 3. DIŞ İSKELET ROBOTUN MATEMATİKSEL MODELİ VE DİNAMİĞİ

#### 3.1. Tasarım

Eksoskeletonlar yukarıda da belirtildiğı şekilde protez, rehabilitasyon, güçlendirme ve destekleme gibi farklı amaçlar için tasarlanmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan robot sadece güçlendirme amacı taşımaktadır. Özellikle ağır yüklerin taşınması gereken durumlarda insanın bacağında herhangi bir farklılık hissetmeden istenilen bütün hareketleri yapması hedeflenmektedir. Bu durumda ağırlık tamamen robotün üstüne yüklenecek, bacak kaslarında ağırlıksız durumdan farklı bir güç harcanmayacaktır.

Toplam 2 mafsaldan oluşacak olan tasarımda sadece kalça ve diz mafsallarına tahrik uygulanacaktır.

Yukarıda belirtilen çalışmalarda robot için gerekli olan referans hareketler IMU, ayak tabanındaki basınç sensörleri, jiroskop vb. birçok sensörün robotun üzerine yerleştirilmesi sonucunda algılanmaktadır. Ancak bu çalışmada benzer şekilde yapılan bütün tasarımlardan farklı olarak bu çalışmada, robot uzuvları ve bacak arasında oluşan açısız hatalar lineer potansiyometre (LP) ortadan kaldırılmaya çalışılarak robot hareketi sağlanmıştır.

LP üzerinde hataların algılanabilmesi için insan bacağı ve robotun hareketlerinin birbirlerinden bağımsız olması gerekmektedir. Bu sebeple robot ve bacak mafsallarının aynı dönme merkezine sahip olmasına rağmen birbirlerinden bağımsız hareket edecek şekilde tasarlanmıştır.

Öncelikle bacak bağlantı aparatı üzerine sabitlenen LP tutma kolu, strok uzunluğunun tam ortasına yakın bir yerde konumlandırılarak robot ile aynı hizaya getirilmiştir. Bu esnada LP' den ölçülerek alınan değer referans değer olarak kaydedilmiştir. Bacak ilk harekete başladığı esnada lineer potansiyometre üzerindeki tutamaç hareket etmeye başlayacaktır. Bacak öne doğru hareket ettiğinde LP tutamacı öne doğru hareket edeceğinden ilk değerle arasında farklılık oluşacak ve ölçülen hata değerinin büyüklüğüne göre ayarlanmış hız ile tahrik elemanları robotun öne doğru hareket etmesini sağlayacaktır. LP üzerinde elde edilen değer referans değerine ulaşana kadar tahrik elemanları robotun hareketine devam edecektir. Aynı şekilde LP tutamacı ters tarafa hareket ettiğinde robot arkaya doğru hareket edecektir.

Yapılan bu tasarım sayesinde robot, herhangi bir hareket tanımlaması yapılmadan bacağın bütün hareketlerini takip etmiş olacaktır.

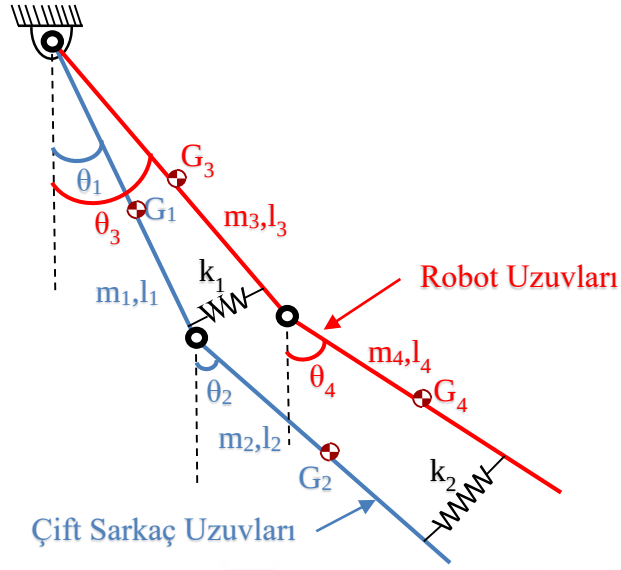
### 3.2. İnsan Bacağı ve Robotun Dinamiği

Bütün boyutları bilinen bir mekanizmanın konum, hız ve ivme gibi kinematik parametrelerinin bulunması işlemlerine kinematik analiz adı verilir. Kinematik analiz mekanizmaların dinamik analizi için ilk basamağı teşkil ettiği gibi, mekanizmaların sentezi için de temel teşkil eder.

Tasarlanan robotun aynı insan bacağında olduğu gibi toplamda üç eklemi bulunmaktadır. Bu eklemler kalça, diz ve bilek eklemleridir. Çalışma içerisinde sadece kalça ve dizde bulunan mafsallar tahrik edilecektir. Bilekte bulunan mafsalda herhangi bir tahrik elemanı bulunmayacaktır. Bu mafsal sadece robotun bütün yükünü yere aktarırken insanın hareket kabiliyetini engellemek için kullanılacaktır. Bilek mafsalı tahrik edilmediği için kinematik analiz içerisinde gösterilmesine gerek kalmamıştır. Benzetim çalışmalarının yapılması için insan bacağı ve robot gövdesi birer çift-sarkaç olarak modellenmiştir. Boyutları birbirlerinin aynı olan bu çift-sarkaçların (ikiz-çift sarkaç mekanizması) bağlantıları aralarına konumlandırılan birer yay ile sağlanmıştır. Modelde bahsedilen yayların hareketli uçlarında oluşan açısal pozisyon farkı, robot üzerine yerleştirilen LP elemanları ile ölçülerek elde edilmiştir.

İkiz çift-sarkaç mekanizmasının kinematik diyagramı Şekil 3.1' de gösterildiği gibidir. Burada insan bacağı yerine modellenen birinci çift-sarkaç sadece çift-sarkaç, robot yerine modellenen ikinci çift-sarkaçtan da robot olarak bahsedilecektir. Simülasyon çalışmaları yapılırken bu iki çift sarkaç sistemin modelleri sensörleri temsil eden yay elemanları ile birleştirilerek etkileşimleri sağlanmıştır.

Çift-sarkacın uzuvları mavi renkle, robotun uzuvları ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Uzuvların yaptığı açılar  $\theta_i$ , kütleleri  $m_i$ , uzunlukları  $l_i$ , ağırlık merkezleri de  $G_i$  ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Robot ve çift-sarkacın kinematik diyagramı

Matematiksel model oluşturulurken Lagrange denklemleri yöntemi kullanılmıştır.

$$L = T - V \quad (3.1)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q \quad (3.2)$$

Burada  $T$  kinetik,  $V$  potansiyel enerjiyi,  $Q$  ise genelleştirilmiş kuvvetleri ifade etmektedir.

$$Q_{\text{çs}} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = [J_{\text{çs}}]^T \begin{bmatrix} F_{x_{\text{çs}}} \\ F_{y_{\text{çs}}} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Denklem 3' de belirtilen  $J_{\text{çs}}$  çift-sarkacın Jakobiyen matrisini,  $F_{x_{\text{çs}}}$  çift-sarkaca  $x$  doğrultusunda uygulanan kuvveti,  $F_{y_{\text{çs}}}$  ise çift-sarkaca  $y$  doğrultusunda uygulanan kuvveti göstermektedir. Çift-sarkacın Jakobiyen matrisi,

$$J_{\text{çs}} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 & l_2 \cos \theta_2 \\ -l_1 \sin \theta_1 & -l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Çift-sarkaç için,

$$T_{cs} = \frac{1}{2} m_1 V_{G_1}^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_{G_2}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (3.5)$$

$$V_{cs} = m_1 g \frac{l_1}{2} (1 - \cos \theta_1) + m_2 g \left[ \left( l_1 + \frac{l_2}{2} \right) - \left( l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \right) \right] \quad (3.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Modelde yer alan yay elemanları sistemdeki sensörleri temsil ettiğinden ileride yapılacak olan çalışmalarda sistemden çıkarıldığı durumların da incelenmesi ön görüldüğü için toplam potansiyel enerji ifadesine dahil edilmemiştir. Yay elemanlarının etkisi bir dış tahrik olarak hareket denklemlerinde eklenmiştir. Öte yandan tasarımdaki amaçlardan birisi de sistemdeki parametrelerin değişken tutularak parametrik belirsizlikler karşısında kontrolcülerin başarısını araştırmaktır. Sistemimizdeki belirsizliklere yol açabilecek parametrelerimiz uzuv kütleleri ve boylarıdır. Sistemde yer alan yay katsayıları belirlidir ve sabit bir değere sahiptir. Bu sebeple yay elemanları sistemin iç dinamiklerinden sayılmayıp dış tahrik elemanı olarak kabul edilmiştir. Bu enerji denklemleri içerisinde kullanılacak olan parametreler,

$$I_1 = \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \quad (3.7)$$

$$I_2 = \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \quad (3.8)$$

$$v_{G_1}^2 = v_{G_{1x}}^2 + v_{G_{1y}}^2 \quad (3.9)$$

$$v_{G_{1x}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{l_1}{2} \sin \theta_1 \right) = \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \quad (3.10)$$

$$v_{G_{1y}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 \right) = -\frac{l_1}{2} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \quad (3.11)$$

$$v_{G_1}^2 = \frac{l_1^2}{4} \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{l_1^2}{4} \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 = \frac{l_1^2 \dot{\theta}_1^2}{4} \quad (3.12)$$

$$v_{G_2}^2 = v_{G_{2x}}^2 + v_{G_{2y}}^2 \quad (3.13)$$

$$v_{G_{2x}} = \frac{d}{dt} \left( l_1 \sin \theta_1 + \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \right) = l_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (3.14)$$

$$v_{G_{2y}} = \frac{d}{dt} \left( l_1 \cos \theta_1 + \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \right) = -l_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_2 \quad (3.15)$$

$$v_{G_{2x}}^2 = l_1^2 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + l_1 l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{l_2^2}{4} \cos^2 \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (3.16)$$

$$v_{G_{2y}}^2 = l_1^2 \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + l_1 l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \frac{l_2^2}{4} \sin^2 \theta_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (3.17)$$

$$v_{G_2}^2 = l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{l_2^2}{4} \dot{\theta}_2^2 \quad (3.18)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Elde edilen kinetik ve potansiyel enerji denklemleri Denklem 1 içerisine yazılırsa çift-sarkaç için Lagrange denklemi,

$$\begin{aligned} L_{\zeta s} = & \frac{1}{8} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{24} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{8} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{24} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\ & - m_1 g \frac{l_1}{2} + m_1 g \frac{l_1}{2} \cos \theta_1 - m_2 g l_1 - m_2 g \frac{l_2}{2} \\ & + m_2 g l_1 \cos \theta_1 + m_2 g \frac{l_2}{2} \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Buradan sonuçla,

$$\begin{aligned} L_{\zeta s} = & \frac{1}{6} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{1}{6} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\ & - m_1 g \frac{l_1}{2} (1 - \cos \theta_1) - m_2 g l_2 (1 - \cos \theta_1) \\ & - m_2 g \frac{l_2}{2} (1 - \cos \theta_2) \end{aligned} \quad (3.20)$$

olarak ortaya çıkmaktadır.

Hareket denkleminin oluşturulması için Denklem 2 deki işlemler yerine getirilir.

$$\frac{\partial L_{\zeta s}}{\partial \dot{\theta}_1} = \frac{1}{4} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_{\zeta s}}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = & \frac{1}{4} m_1 l_1^2 \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1^2 \ddot{\theta}_1 \\ & - \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \dot{\theta}_2 \\ & + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial L_{\zeta s}}{\partial \theta_1} = \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_1 g \frac{l_1}{2} \sin \theta_1 - m_2 g l_1 \sin \theta_1 \quad (3.23)$$

Bu işlemler sonucunda birinci hareket denklemi,

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 \left( \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 \right) + \ddot{\theta}_2 \left( \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \right) \\ + \dot{\theta}_2 \left( -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \right) + l_1 g \sin \theta_1 \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) \\ = Q_1 \end{aligned} \quad (3.24)$$

şeklinde elde edilir. İkinci hareket denklemi için de aynı işlemler tekrar edilerek

$$\frac{\partial L_{\text{CS}}}{\partial \dot{\theta}_2} = \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 + \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \dot{\theta}_2 \quad (3.25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_{\text{CS}}}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \dot{\theta}_1 \\ + \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \ddot{\theta}_1 + \frac{1}{4} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial L_{\text{CS}}}{\partial \theta_2} = -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_2 g \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \quad (3.27)$$

İkinci hareket denklemi de,

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 \left( \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \right) + \ddot{\theta}_2 \left( \frac{1}{3} m_2 l_1^2 \right) + \dot{\theta}_1^2 \left( \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \right) \\ + m_2 g \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 = Q_2 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Hareket denklemleri matris formunda yazılırsa,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 & \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) & \frac{1}{3} m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 \\ \frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 g \sin \theta_1 \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) \\ m_2 g \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 & -l_1 \sin \theta_1 \\ l_2 \cos \theta_2 & -l_2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_{\text{CS}}} \\ F_{y_{\text{CS}}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.29)$$

eşitliği elde edilir.

Yukarıda elde edilen hareket denklemi sayesinde insan bacağına uygulanması gereken torklar ve zamana karşılık insan bacağının hareketi ortaya çıkarılacaktır. Aynı şekilde robotun hareket denklemini elde etmek için uygulanan bütün işlemler robot parametreleri ile tekrarlanarak robot için gerekli hareket denklemleri,

$$Q_r = \begin{bmatrix} Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = [J_r]^T \begin{bmatrix} F_{x_r} \\ F_{y_r} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$J_r = \begin{bmatrix} l_3 \cos \theta_3 & l_4 \cos \theta_4 \\ -l_3 \sin \theta_3 & -l_4 \sin \theta_4 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$T_r = \frac{1}{2} m_3 V_{G_3}^2 + \frac{1}{2} I_3 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 V_{G_4}^2 + \frac{1}{2} I_4 \dot{\theta}_4^2 \quad (3.32)$$

$$V_r = m_3 g \frac{l_3}{2} (1 - \cos \theta_3) + m_4 g \left[ \left( l_3 + \frac{l_4}{2} \right) - \left( l_3 \cos \theta_3 + \frac{l_4}{2} \cos \theta_4 \right) \right] \quad (3.33)$$

$$I_3 = \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \quad (3.34)$$

$$I_4 = \frac{1}{12} m_4 l_4^2 \quad (3.35)$$

$$v_{G_3}^2 = v_{G_{3x}}^2 + v_{G_{3y}}^2 \quad (3.36)$$

$$v_{G_{3x}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{l_3}{2} \sin \theta_3 \right) = \frac{l_3}{2} \cos \theta_3 \dot{\theta}_3 \quad (3.37)$$

$$v_{G_{3y}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{l_3}{2} \cos \theta_3 \right) = -\frac{l_3}{2} \sin \theta_3 \dot{\theta}_3 \quad (3.38)$$

$$v_{G_3}^2 = \frac{l_3^2}{4} \cos^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + \frac{l_3^2}{4} \sin^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 = \frac{l_3^2 \dot{\theta}_3^2}{4} \quad (3.39)$$

$$v_{G_4}^2 = v_{G_{4x}}^2 + v_{G_{4y}}^2 \quad (3.40)$$

$$v_{G_{4x}} = \frac{d}{dt} \left( l_3 \sin \theta_3 + \frac{l_4}{2} \sin \theta_4 \right) = l_3 \cos \theta_3 \dot{\theta}_3 + \frac{l_4}{2} \cos \theta_4 \dot{\theta}_4 \quad (3.41)$$

$$v_{G_{4y}} = \frac{d}{dt} \left( l_3 \cos \theta_3 + \frac{l_4}{2} \cos \theta_4 \right) = -l_3 \sin \theta_3 \dot{\theta}_3 - \frac{l_4}{2} \sin \theta_4 \dot{\theta}_4 \quad (3.42)$$

$$v_{G_{4x}}^2 = l_3^2 \cos^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + l_3 l_4 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + \frac{l_4^2}{4} \cos^2 \theta_4 \dot{\theta}_4^2 \quad (3.43)$$

$$v_{G_{4y}}^2 = l_3^2 \sin^2 \theta_3 \dot{\theta}_3^2 + l_3 l_4 \sin \theta_3 \sin \theta_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 + \frac{l_4^2}{4} \sin^2 \theta_4 \dot{\theta}_4^2 \quad (3.44)$$

$$v_{G_4}^2 = l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + l_3 l_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) + \frac{l_4^2}{4} \dot{\theta}_4^2 \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} L_r = & \frac{1}{8} m_3 l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{24} m_3 l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3^2 \dot{\theta}_3^2 \\ & + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) + \frac{1}{8} m_4 l_4^2 \dot{\theta}_4^2 + \frac{1}{24} m_4 l_4^2 \dot{\theta}_4^2 \\ & - m_3 g \frac{l_3}{2} + m_3 g \frac{l_3}{2} \cos \theta_3 - m_4 g l_3 - m_4 g \frac{l_4}{2} \\ & + m_4 g l_3 \cos \theta_3 + m_4 g \frac{l_4}{2} \cos \theta_4 \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} L_r = & \frac{1}{6} m_3 l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3^2 \dot{\theta}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) + \frac{1}{6} m_4 l_4^2 \dot{\theta}_4^2 \\ & - m_3 g \frac{l_3}{2} (1 - \cos \theta_3) - m_4 g l_4 (1 - \cos \theta_3) \\ & - m_4 g \frac{l_4}{2} (1 - \cos \theta_4) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \dot{\theta}_3} = \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \dot{\theta}_3 + \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \dot{\theta}_3 + m_4 l_3^2 \dot{\theta}_3 + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \dot{\theta}_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \quad (3.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_r}{\partial \dot{\theta}_3} \right) = & \frac{1}{4} m_3 l_3^2 \ddot{\theta}_3 + \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \ddot{\theta}_3 + m_4 l_3^2 \ddot{\theta}_3 \\ & - \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_4 \\ & + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \ddot{\theta}_4 \end{aligned} \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \theta_3} = \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) \dot{\theta}_3 \dot{\theta}_4 - m_3 g \frac{l_3}{2} \sin \theta_3 - m_4 g l_3 \sin \theta_3 \quad (3.50)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_3 \left( \frac{1}{3} m_3 l_3^2 + m_4 l_3^2 \right) + \ddot{\theta}_4 \left( \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \right) \\ + \dot{\theta}_4 \left( -\frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) \right) + l_3 g \sin \theta_3 \left( \frac{m_3}{2} + m_4 \right) \\ = Q_3 \end{aligned} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial L_r}{\partial \dot{\theta}_4} = \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \dot{\theta}_3 + \frac{1}{4} m_4 l_4^2 \dot{\theta}_4 + \frac{1}{12} m_4 l_4^2 \dot{\theta}_4 \quad (3.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L_r}{\partial \dot{\theta}_4} \right) = & -\frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) (\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_3 \\ & + \frac{1}{2} m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \ddot{\theta}_3 + \frac{1}{4} m_4 l_4^2 \ddot{\theta}_4 + \frac{1}{12} m_4 l_4^2 \ddot{\theta}_4 \end{aligned} \quad (3.53)$$



$$\frac{\partial L_r}{\partial \theta_4} = -\frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3)\dot{\theta}_3\dot{\theta}_4 - m_4g\frac{l_4}{2}\sin\theta_4 \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} & \ddot{\theta}_3 \left( \frac{1}{2}m_4l_3l_4\cos(\theta_4 - \theta_3) \right) + \ddot{\theta}_4 \left( \frac{1}{3}m_4l_3^2 \right) + \dot{\theta}_3^2 \left( \frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3) \right) \\ & + m_4g\frac{l_4}{2}\sin\theta_4 = Q_4 \end{aligned} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_3l_3^2 + m_4l_3^2 & \frac{1}{2}m_4l_3l_4\cos(\theta_4 - \theta_3) \\ \frac{1}{2}m_4l_3l_4\cos(\theta_4 - \theta_3) & \frac{1}{3}m_4l_4^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3)\dot{\theta}_4^2 \\ \frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3)\dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_3g\sin\theta_3\left(\frac{m_3}{2} + m_4\right) \\ m_4g\frac{l_4}{2}\sin\theta_4 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} l_3\cos\theta_3 & -l_3\sin\theta_3 \\ l_4\cos\theta_4 & -l_4\sin\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_r} \\ F_{y_r} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.56)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_3l_3^2 + m_4l_3^2 & \frac{1}{2}m_4l_3l_4\cos(\theta_4 - \theta_3) \\ \frac{1}{2}m_4l_3l_4\cos(\theta_4 - \theta_3) & \frac{1}{3}m_4l_4^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3)\dot{\theta}_4^2 \\ \frac{1}{2}m_4l_3l_4\sin(\theta_4 - \theta_3)\dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_3g\sin\theta_3\left(\frac{m_3}{2} + m_4\right) \\ m_4g\frac{l_4}{2}\sin\theta_4 \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} l_3\cos\theta_3 & -l_3\sin\theta_3 \\ l_4\cos\theta_4 & -l_4\sin\theta_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_r} \\ F_{y_r} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.57)$$

şeklinde elde edilmiştir.

Matris formundaki hareket denklemi aşağıdaki gibidir:

$$M\ddot{\theta} + V = \mathfrak{J} + Q \quad (3.58)$$

burada  $M$  kütleleri içeren eylemsizlik matrisi,  $V$  Coriolis-merkezkaç ve yerçekimi kuvvetlerini içeren matris,  $\mathfrak{J}$  mafsallara uygulanan moment matrisi ve  $Q$  ise genelleştirilmiş dış moment matrisidir.

Genelleştirilmiş dış momentler, hem çift-sarkaç hem de robotu etkileyecek hem yay hem de dış kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan momentleri içermektedir. Bu momentler şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$T_k = \begin{bmatrix} l_1 k_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \\ l_2 k_2 \sin(\theta_2 - \theta_4) \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Çift-sarkacın hareket denklemi içindeki katsayı matrisleri şu şekildedir:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 & \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) & \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_2^2 \\ \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 g \sin \theta_1 \left(\frac{m_1}{2} + m_2\right) \\ m_2 g \frac{l_2}{2} \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = [J_{\zeta s}]^T \begin{bmatrix} F_{x_{\zeta s}} \\ F_{y_{\zeta s}} \end{bmatrix} - T_k \quad (3.62)$$

$$\mathfrak{I}_{\zeta s} = u \quad (3.63)$$

$Q_1$  tanımlanmış olsa da çift-sarkaca herhangi bozucu bir dış kuvvet uygulanmayacağı için matrisi değeri sadece yaydan kaynaklı moment olacaktır.  $\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \end{bmatrix}$  olarak tanımlanan matris de çift-sarkacın mafsallarının hareketi için mafsallara uygulanması gereken kontrol sinyallerini ifade etmektedir.

Benzer şekilde robot için de matris şu şekilde ortaya çıkarılmıştır:

$$M_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_3 l_3^2 + m_4 l_3^2 & \frac{1}{2}m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) \\ \frac{1}{2}m_4 l_3 l_4 \cos(\theta_4 - \theta_3) & \frac{1}{3}m_4 l_4^2 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) \dot{\theta}_4^2 \\ \frac{1}{2}m_4 l_3 l_4 \sin(\theta_4 - \theta_3) \dot{\theta}_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_3 g \sin \theta_3 \left(\frac{m_3}{2} + m_4\right) \\ m_4 g \frac{l_4}{2} \sin \theta_4 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$Q_2 = \begin{bmatrix} Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = [J_r]^T \begin{bmatrix} F_{x_r} \\ F_{y_r} \end{bmatrix} + T_k \quad (3.66)$$

$$\mathfrak{I}_r = v \quad (3.67)$$

Mafsal momentleri matrisi Denklem 67 içerisindeki  $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix}$  matrisi, sabit ve hareketli mafsallarda bulunan eyleyicilere uygulanacak kontrol sinyallerini göstermektedir.  $Q_2$

matrisi robot için hem eklenecek yükten kaynaklı oluşacak kuvvetin momentini hem de yaydan kaynaklı moment içermektedir.

Böylece ivme eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = M_1^{-1}(-V_1 + Q_1 + \mathfrak{I}_{cs}) \quad (3.68)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} = M_2^{-1}(-V_2 + Q_2 + \mathfrak{I}_r) \quad (3.69)$$

#### 4. DIŞ İSKELET ROBOTA UYGULANAN KONTROL YÖNTEMLERİ VE SAYISAL BENZETİM SONUÇLARI

Benzetim sonuçları için kullanılan uzuv parametreleri Tablo 4.1’ de verilmiştir. Sistemin hareket denklemi ikinci mertebeden değişken katsayılı lineer olmayan bir adi diferansiyel denklemdir ve MATLAB programı içerisinde 4. mertebeden Runge-Kutta metodu ile çözülmüştür.

**Tablo 4.1.** Sayısal benzetim parametreleri

|                                      |   |                     |
|--------------------------------------|---|---------------------|
| $m_1$ (Çift-sarkaç 1. Uzuv Kütlesi)  | : | 8 kg                |
| $l_1$ (Çift-sarkaç 1. Uzuv Uzunluğu) | : | 0,45 m              |
| $m_2$ (Çift-sarkaç 2. Uzuv Kütlesi)  | : | 4 kg                |
| $l_2$ (Çift-sarkaç 2. Uzuv Uzunluğu) | : | 0,43 m              |
| $m_3$ (Robot 1. Uzuv Kütlesi)        | : | 1 kg                |
| $l_3$ (Robot 1. Uzuv Uzunluğu)       | : | 0,45 m              |
| $m_4$ (Robot 2. Uzuv Kütlesi)        | : | 1 kg                |
| $l_4$ (Robot 2. Uzuv Uzunluğu)       | : | 0,43 m              |
| $k_1$ (1. Yay Katsayısı)             | : | $5 \times 10^3$ N/m |
| $k_2$ (2. Yay Katsayısı)             | : | $5 \times 10^3$ N/m |

Sayısal uygulamalar 3 farklı durum için çözüme ulaştırılmıştır. Birinci durumda robota herhangi bir dış yük uygulanmamıştır. İkinci durumda dikey olarak 100 N’ luk bir yük, üçüncü durumda ise 500 N’ luk bir dikey yük uygulanmıştır. Sayısal sonuçlarda kullanılan başlangıç şartları Tablo 4.2’ de verilmiştir.

**Tablo 4.2.** Sayısal benzetim başlangıç şartları

|                  |         |                        |       |
|------------------|---------|------------------------|-------|
| $\theta_{1_0}$ : | $45^0$  | $\dot{\theta}_{1_0}$ : | 0 m/s |
| $\theta_{2_0}$ : | $-45^0$ | $\dot{\theta}_{2_0}$ : | 0 m/s |
| $\theta_{3_0}$ : | $45^0$  | $\dot{\theta}_{3_0}$ : | 0 m/s |
| $\theta_{4_0}$ : | $-45^0$ | $\dot{\theta}_{4_0}$ : | 0 m/s |

Bu başlangıç şartları altında gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda robotun dinamik davranışı gözlemlenip kontrol başarısının araştırılması amaçlanmıştır.

##### 4.1. Sayısal Benzetim Kontrol Uygulamaları

Sayısal benzetim çalışmalarında farklı kontrol yöntemleri ile robotun kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Benzetim çalışmaları için MATLAB programı kullanılmıştır.

Sistemin denetimi her kontrol uygulaması içerisinde 0.001 saniye örnekleme zamanına sahip bir algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

Benzetim çalışmaları içerisinde verilen sonuçlarda mafsalların pozisyonları ve mafsallar arasında oluşan hata değerleri “derece” cinsinden verilmiştir. Ayrıca kontrol sinyali olarak verilen sonuçlar da mafsallara uygulanan tork değerlerini ifade etmektedir.

Benzetim çalışmaları içerisinde başarılı olan kontrol yöntemleri deneysel çalışmada da kullanılmıştır. Her bir kontrol yöntemi belirtilen farklı yük koşullarında çalıştırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmalarında çift-sarkaç mekanizmasına da bir kontrol sinyali uygulanmıştır. Çift-sarkaç mekanizması insan bacağıymış gibi modellendiği için, bacağın istenen hareketi sağlaması için harcanan güç de hesaplanabilmiştir. Böylece farklı yüklere karşılık gerçekleştirilen benzetimlerde çift-sarkaca fazladan yük binip binmediği ortaya çıkarılmıştır.

#### **4.1.1. Genetik Algoritma ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu**

Bilindiği üzere her bir kontrol yönteminin farklı parametreleri bulunmaktadır. Kontrolcünün güçlü bir şekilde sistemin denetimini sağlayabilmesi için bu parametrelere en uygun değerlerin atanması gerekmektedir. Rastgele seçilen değerlerin deneme yanılma tekniği ile iyileştirilmesi çok zahmetli olmaktadır. Hızlıca en iyi parametre değerlerinin bulunması için çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılabilir ancak bu tez çalışması içerisinde genetik algoritma yöntemi ile optimizasyon yapılmıştır.

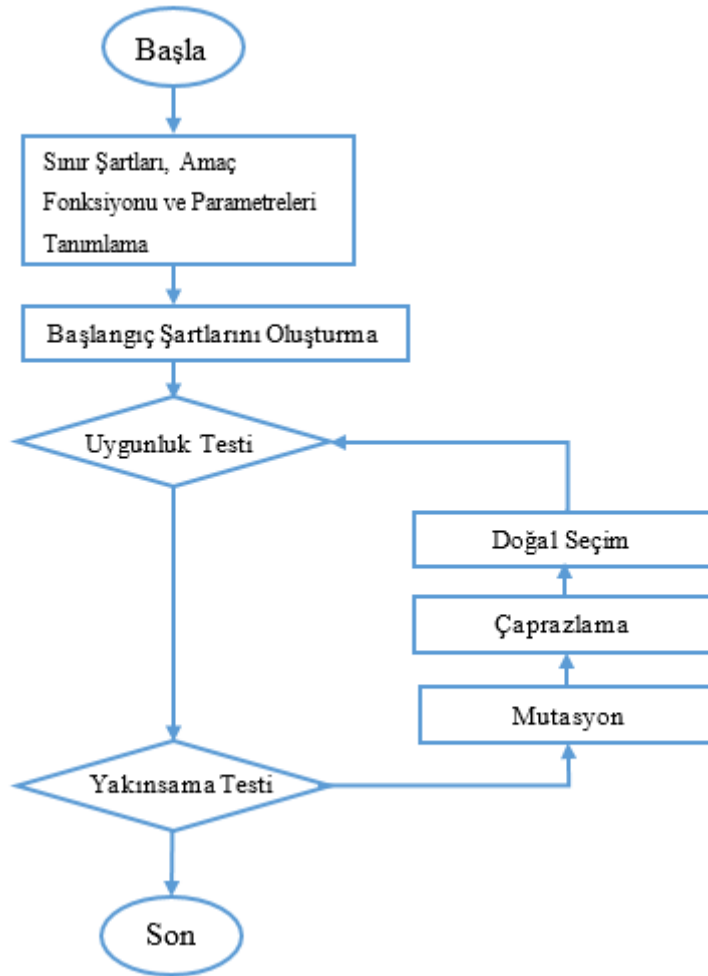
Genetik algoritmalar (GA) ilk olarak 1975 yıllarında John Holland’ ın evrimsel hesaplamaları gözeterek geliştirmesi ile kullanılmaya başlanmıştır. (Vatansever & Şen, 2013) Bu algoritmalar doğadaki yaşam koşullarının (güçlü ve iyi olanların yeni şartlara uyum sağlayabilmeleri ve yaşama devam etmeleri, zayıf veya kötü olanları hayatta kalamamaları) uygulanmasına dayanmaktadır.

GA, olasılıklı ve iterasyonlu yapısı ile bilgi sistemleri, makine öğrenmesi, birçok alandaki optimizasyon problemlerinin çözümü vb. alanlarda kullanılabilmektedir. (Man, Tang, & Kwong, 1996) Doğal yaşamda olduğu gibi en iyinin hayatta kalması ve zayıfın yok olması

mantığı sebebiyle sürekli iyileşen çözümler üretmeye çalışır. Bu esnada iyi olanlar daha da iyileştirilmeye çalışılırken kötü olan çözümler ise elenir (Goldberg, 1989).

GA, daha önceden de belirtildiği gibi olasılık esasına dayandığı için, aynı sistem veya aynı problem için her uygulamışta farklı sonuçlar vermektedir. Diğer optimizasyon yöntemleri matematiksel hesaplar ve listeleme yöntemleri içerdiği için her çözümde aynı sonuçlara ulaşmaktadırlar.

GA' nın genel işleyişi Şekil 4.1' de gösterildiği gibi sınır şartları, amaç fonksiyonu ve parametreleri tanımlama, başlangıç şartlarının (ilk neslin) oluşturulması, uygunluk ve yakınsama testinden sonra yeni neslin oluşturulması aşamalarından oluşmaktadır. Bu döngü yakınsama testinin istenilen değere ulaşmasına kadar devam eder. Yeni neslin oluşturulması için doğal seçim, çaprazlama ve mutasyon aşamaları uygulanmaktadır (Nalbantoğlu, 2009).



Şekil 4.1. GA blok diyagramı

GA' nın uygulamasında ilk olarak başlangıç nesli oluşturulur. Başlangıç popülasyonu, genellikle rastgele oluşturulur. Bu rastgele popülasyon oluşturma, kısıtlı optimizasyon problemlerinde uygun olmayan çözümlerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Çözüm grubunun rastgele seçilmesi durumunda GA tüm problem uzayını arayacağı için çözüme ulaşma zamanı önemli ölçüde uzayacaktır. Probleme göre özelleştirme sonucunda işlem hızı arttırılabilir. Diğer bir önemli faktör ise çözüm grubunun büyüklüğüdür. Büyük bir çözüm grubu çok işlem gerektirirken küçük çözüm grupları yerel maksimum değerlerinin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Başarılı bir çözümün küçük bir çözüm grubunda baskın hale gelmesi daha kolay olacağından bu gruplar çeşitliliklerini çabucak kaybederler. Bir popülasyonun değerlendirilmesi sonucunda yeni bir popülasyon ortaya çıkarılır. Büyük popülasyon uygulamasında çözüm grubu iyi örneklendiği için etkinliği artmasına rağmen hesaplama işlemleri ağırlaşmaktadır. Küçük popülasyon uygulamasında ise çözüm grubu örnekleyememe riskine sahiptir ve erken yakınsama ile karşılaşılabilir. Popülasyon genişliği için problemin ağırlığına göre genellikle 50 ile 100 arasındaki değerler kullanılmaktadır.

Uygunluk testi, amaç fonksiyonu veya ceza fonksiyonu olarak matematiksel veya deneysel olarak çözümle alakalı sistem parametrelerini ilişkilendirir. (Öztürk, 2007) Bir nesildeki bireylerin aranan çözüm olma seviyesini anlama işlemine uygunluk testi denmektedir. Bu fonksiyonun verimli ve hassas olması GA'nın başarısını arttırmaktadır. GA ile çözülecek her problem için bir uygunluk fonksiyonu gerekir. Uygunluk fonksiyonu, istenmeyen kromozomların yaşama ve üreme olasılığını azaltmak için kullanılır. Böylece başarısız olan aday çözümler ortadan kaldırılmış olur.

Doğal seçim işlemi, yeni nesil oluşturma işleminin ilk adımıdır. Üreme olarak da adlandırılmaktadır (Nalbantoğlu, 2009). Bu işlem aynı zamanda bir doğal ayıklamadır ve en uygun birey, uygunluk fonksiyonu değeri en büyük olan birey demektir (Davis, 1991).

Yeni neslin elemanları yani çocuklar, bir önceki nesilden yeni nesle aktarılan ebeveynler çaprazlanarak (çiftleşerek) üretilirler. Çaprazlama ile ebeveynlerinin özelliklerini taşıyan yeni bireylerin oluşturulması amaçlamaktadır. Bu işlemde hedef, ebeveynlerin genlerinin farklı birleşimlerinden oluşan ve daha iyi çözümü sağlayacak yeni bireylerin elde edilmesidir.

Mutasyon işleminde çaprazlama sonrası belirli sayıda birey rastgele olarak seçilir. Bu seçilen bireylerin genlerinde yine rastgele bir şekilde değişiklik yapılır. İkili kodlu mutasyon

yönteminde rastgele seçilen bir gen 0 ise 1, 1 ise 0 haline yani tersine çevrilir. Mutasyon işlemi uygulanmaz ise çözüm grubu kısıtlı bir alanda sıkışabilmektedir. Bu işlem sayesinde farklı çözümler üretecek olan yeni bireylerin elde edilmesi sağlanmaktadır. Ters çevirme dışında yer değiştirme, gen ekleme vb. mutasyon çeşitleri de bulunmaktadır (Deng, Lee, & Lee, 2009).

Benzetim çalışmaları içerisinde genetik algoritma ile uygun kontrol parametre değerleri hesap edilirken toplam hatanın karesini minimum yapan bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Genetik algoritmanın en iyi değerleri bulması için uygulanan parametreleri Tablo 4.3 de verilmiştir.

**Tablo 4.3.** Genetik algoritma parametre değerleri

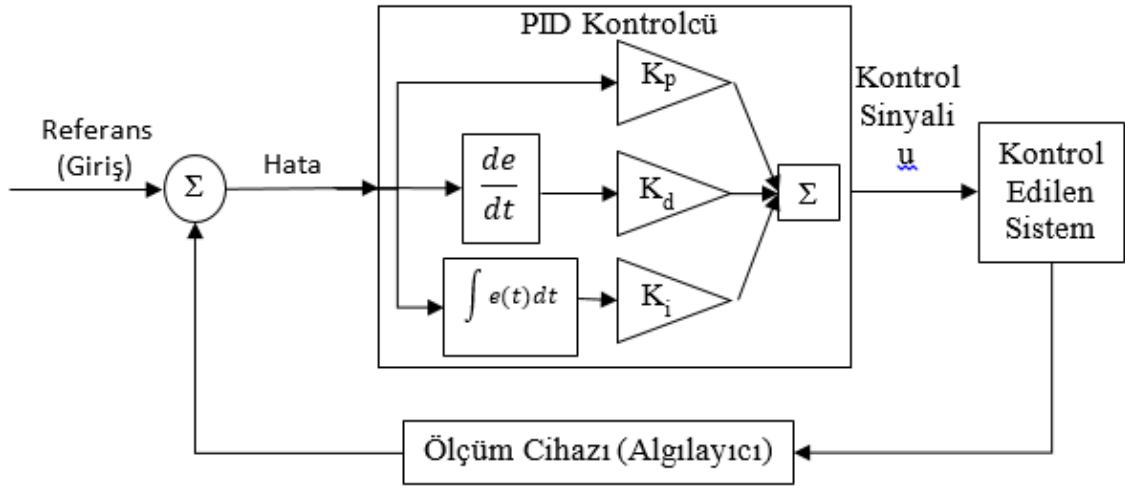
|                    |      |
|--------------------|------|
| İterasyon Sayısı:  | 200  |
| Popülasyon Sayısı: | 20   |
| Yakınsama Limiti:  | 0,01 |

#### **4.1.2. PID Kontrol Yöntemi**

##### **4.1.2.1. Giriş**

PID kontrol yöntemi, Proportional (oransal), Integral (integral) ve Derivative (türevsel) kelimelerinin baş harflerinden meydana gelen ve bu temel denetim etkilerini birleştiren sürekli bir kontrol yöntemidir. Şekil 4.2’ de gösterilen blok diyagramından anlaşılabacağı üzere sistemde hata olduğu müddetçe kontrol sinyali ortaya çıkacaktır.





Şekil 4.2. PID kontrol blok diyagramı

Bu kontrol yöntemi temel olarak,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada  $K_p$  oransal kontrol katsayısıdır. Bu katsayı hatanın anlık değişimine orantılı olarak kontrol sinyalinin değişmesini sağlar. Herhangi bir anda hatanın değeri ne kadar büyük olursa kontrol sinyalinin şiddeti de o kadar büyük olur. Bunun yanında hata değeri ne kadar küçük olursa kontrol sinyalinin değeri de o kadar küçük olur ve belirli bir değerden sonra kontrol etkisi hatayı tamamen düzeltmeye yetmez. Bu gibi durumlarda “kalıcı durum hatası” ortaya çıkmaktadır.  $K_p$  değeri küçük seçildiğinde bu kalıcı durum hatası fazla olabilir, büyük seçildiğinde ise kalıcı durum hatası küçültülse de sistem cevabı salınımlı hatta kararsız duruma gelebilir.

Oransal kontrolün yanında integral kontrolü  $K_i$ , uygulandığında sistemin kalıcı durum hatasının zaman içerisinde sıfırlanması beklenir. Ancak integral kontrol hatayı biriktirerek düzelttiği için, bu işlem uzun sürer. Bu da integral kontrolün cevabı yavaşlatmasına sebep olur ve olumsuz yöndür.

Türev kontrol  $K_d$  ise kendisi yerine hatanın değişimi üzerinde etkilidir. Böylece hatanın çok hızlı bir şekilde düzeltilmesini sağlamaktadır. Ancak hatanın sabit olması [ $e(t) = \text{sabit}$ ] durumunda  $de/dt = 0$  olacağından sabit hatalar üzerinde etkisi yoktur.  $K_d$

katsayısının büyük seçilmesi sonucunda sistemin cevap hızı artmakta ancak kararlılığı düşmektedir (Tutucu, 2006). Kontrolcü parametrelerinin değişiminin sistem üzerindeki etkileri Tablo 4.4’ de verildiği gibidir.

**Tablo 4.4.** Kontrolcü parametrelerinin sistem üzerindeki etkisi (Karataş, 2011)

| Kontrolcü | Yükselme Zamanı        | Geçici Durum Cevap Hızı | Sürekli Duruma Erişim Süresi | Sürekli Durum Hatası   |
|-----------|------------------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|
| P         | Azalır                 | Artar                   | Küçük değişim gösterir       | Azalır                 |
| I         | Azalır                 | Artar                   | Artar                        | Yok eder               |
| D         | Küçük değişim gösterir | Azalır                  | Azalır                       | Küçük değişim gösterir |

#### 4.1.2.2. PID Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması

Bu bölümde matematiksel modeli oluşturulmuş olan sistemin PID kontrolcü uygulanmış ve elde edilen sonuçlar grafiklerle verilmiştir. Genetik algoritma ile optimize edilen PID kontrol parametreleri Tablo 4.5’ de verilmiştir.

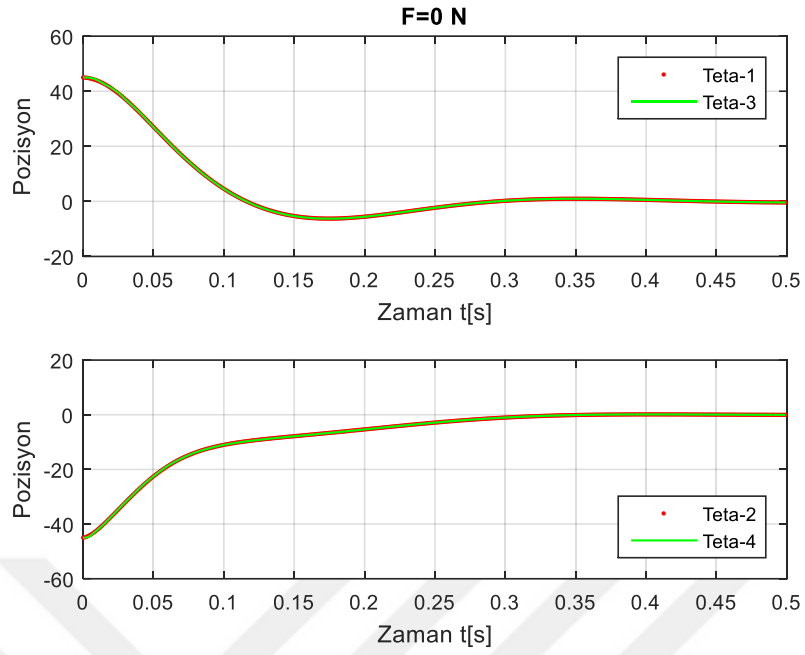
**Tablo 4.5.** PID kontrol parametreleri

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| $K_{p1}$ : 15   | $K_{p2}$ : 5     |
| $K_{i1}$ : 0,01 | $K_{i2}$ : 0,012 |
| $K_{d1}$ : 6    | $K_{d2}$ : 5     |

Burada  $K_{p1}$  sabit mafsalsın oransal katsayısını,  $K_{i1}$  sabit mafsalsın integral katsayısını,  $K_{d1}$  ise sabit mafsalsın türevsel katsayısını ifade etmektedir. Benzer şekilde  $K_{p2}$ ,  $K_{i2}$  ve  $K_{d2}$  de hareketli mafsalsın sırasıyla oransal, integral ve türevsel katsayılarını ifade etmektedir.

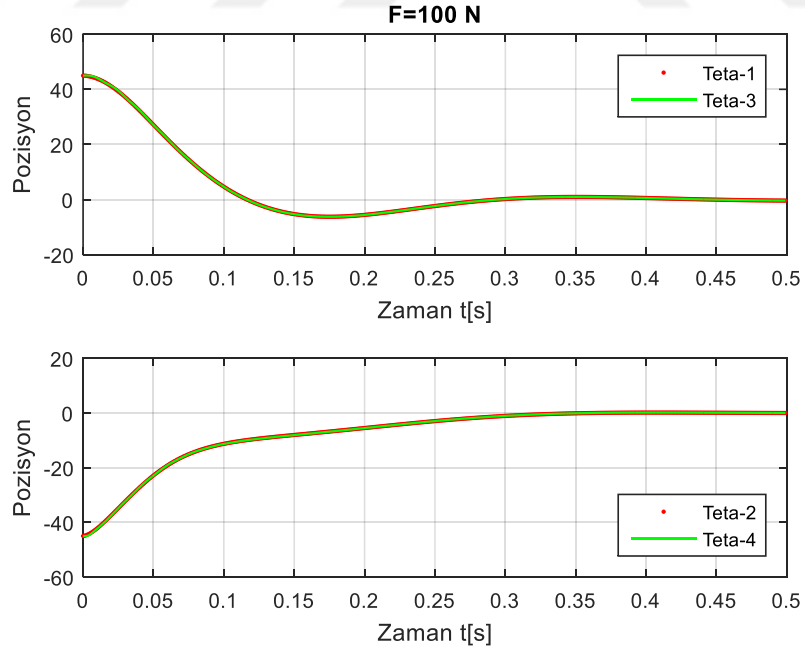
Önceden de belirtildiği gibi sistemin cevabı üç farklı koşulda elde edilmiştir. Bu koşullar robota uygulanan farklı yük koşullarıdır. İlk durumda yük uygulanmamakta, ikinci durumda uygulanan dikey yük 100 N, üçüncü durumda ise 500 N dur.

Robota kuvvet uygulanmadığı durumda çift-sarkaç ve robotun mafsallarının konumları Şekil 4.3’ deki gibidir.



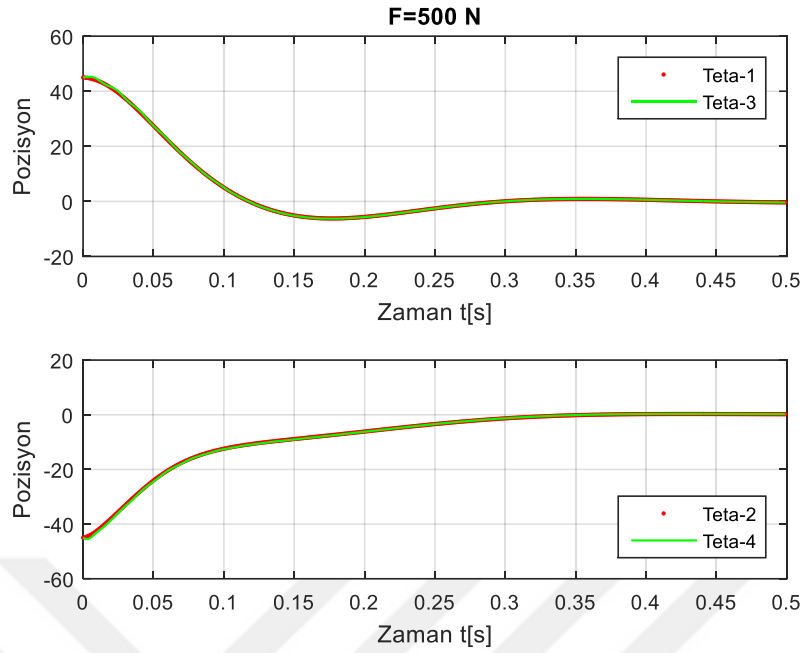
**Şekil 4.3.**  $F=0$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (PID kontrol yöntemi)

Çift-sarkaç ve robotun mafsalları, robota uygulanan kuvvet 100 N olduğunda ise Şekil 4.4’ deki gibi olur.



**Şekil 4.4.**  $F=100$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (PID kontrol yöntemi)

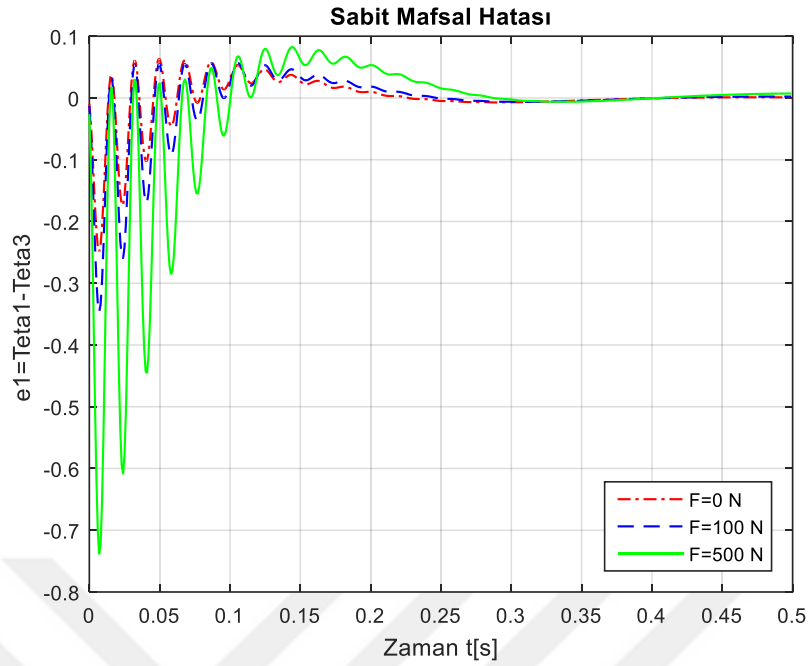
Son olarak robota 500 N kuvvet uygulandığında çift-sarkaç ve robotun mafsallarının konumları Şekil 4.5’ deki gibidir.



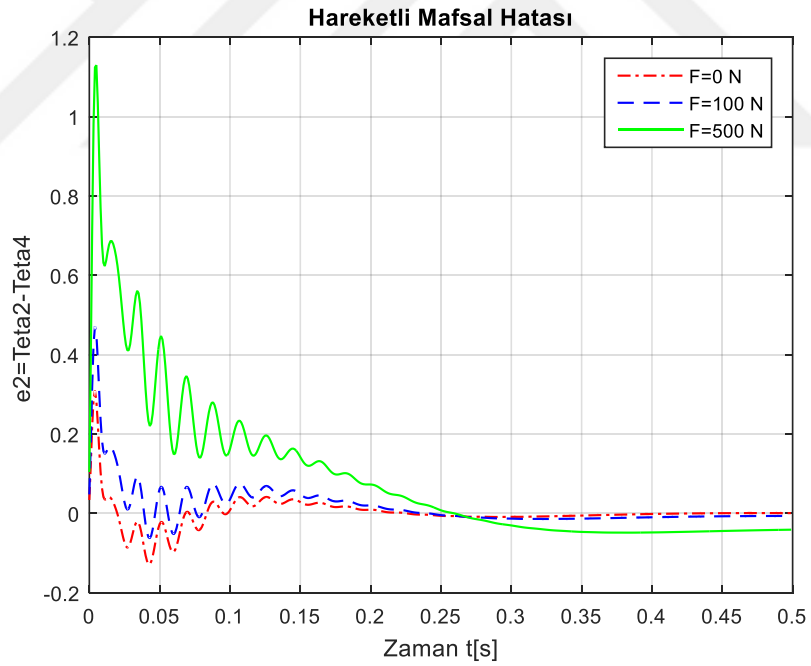
**Şekil 4.5.**  $F=500\text{ N}$  için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (PID kontrol yöntemi)

Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’ de görüldüğü üzere, robot ve çift sarkacın mafsall konumları birbirlerinin aynısıdır. Bu sebeple her üç yük durumunda da robotun başarılı bir şekilde çift-sarkaç hareketini rahatlıkla izlediği görülmektedir.

Kontrol yönteminin uygulanması için gerekli olan hata değerleri de incelenmiştir. Uygulanan farklı yüklere karşılık mafsallarda oluşan hata değerleri derece cinsinden Şekil 4.6 ve 4.7’ deki gibidir.



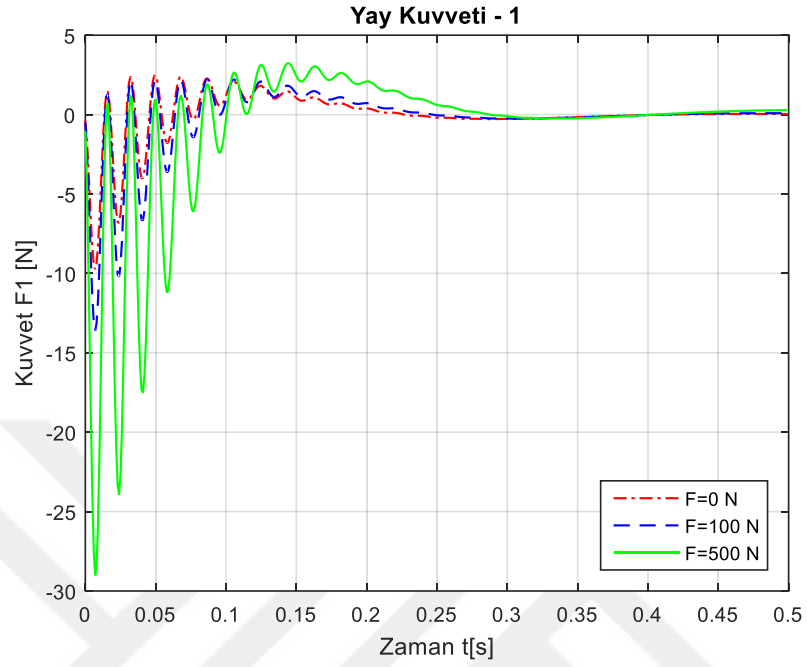
**Şekil 4.6.** Sabit mafsal hatası (PID kontrol yöntemi)



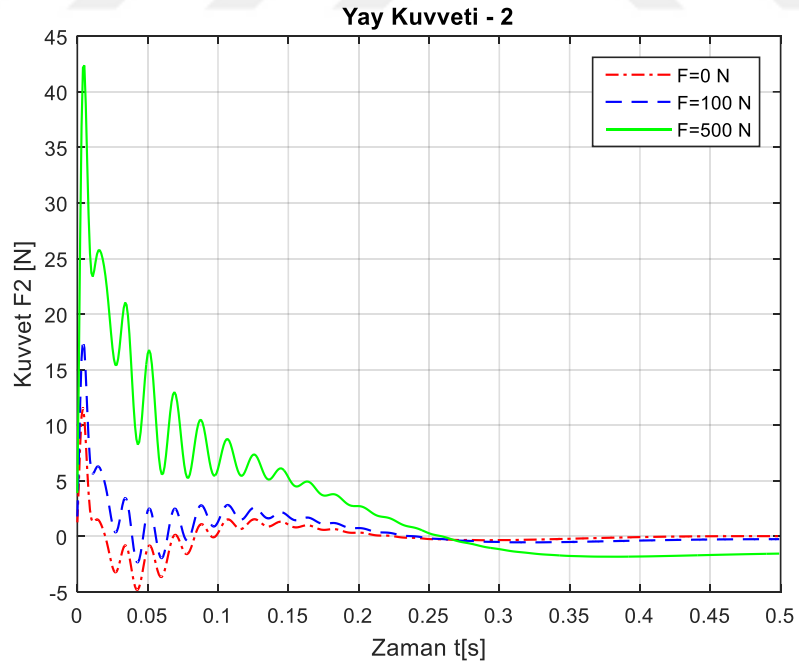
**Şekil 4.7.** Hareketli mafsal hatası (PID kontrol yöntemi)

Mafsallarda oluşan hata değerlerinin yük arttıkça artması beklenmektedir. Şekil 4.6' da görüldüğü gibi, sabit mafsalda yük bulunmayan durumda mafsal hatası 0,25 derece iken 500 N yük uygulandığında bu hata değeri 0,75 derecelere kadar ulaşmıştır. Benzer şekilde Şekil 4.7' de ise yük olmayan durumda hata değeri 0,3 derece iken 500 N yüklü durumda ise 1,15 derecelere kadar ulaşmıştır.

Robot ve çift-sarkaç arasında oluşan hataların ortaya çıkardığı yay kuvvetleri Şekil 4.8 ve 4.9’ da gösterilmiştir.



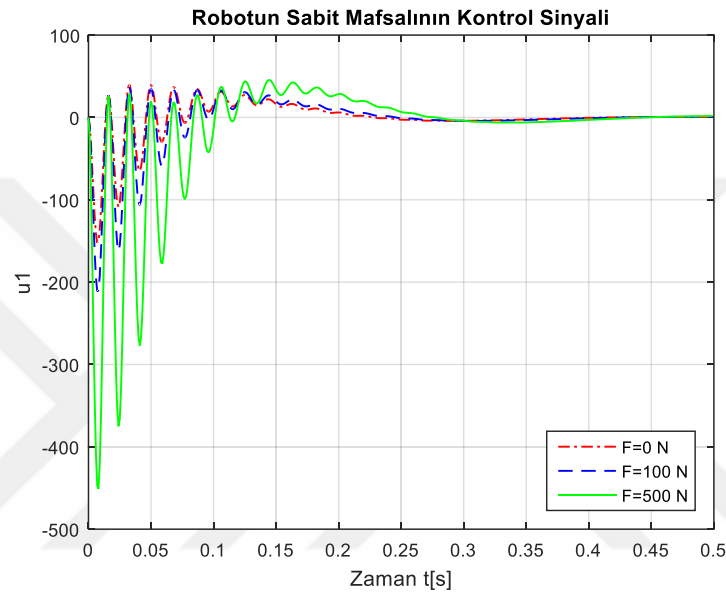
Şekil 4.8. 1. Yayda oluşan kuvvetler (PID kontrol yöntemi)



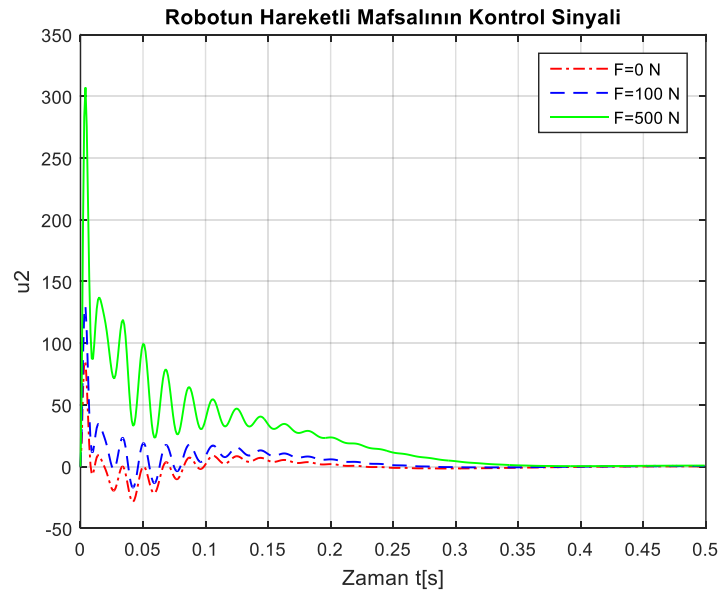
Şekil 4.9. 2. Yayda oluşan kuvvetler (PID kontrol yöntemi)

Yaylarda oluşan kuvvet değerleri hatalarla doğru orantılı şekilde değişmektedir. Bu sebeple hata değerlerinde olduğu gibi uygulanan yük büyüdükçe yaylarda oluşan kuvvetler de hatalarda olduğu gibi artmaktadır.

Şekil 4.8 ve 4.9’ da verilen yay kuvvetlerinin anlık hesabı ile robotun bu kuvvetleri ortadan kaldırması (robotun çift-sarkaç mekanizmasını izlemesini sağlamak) için robota uygulanan kontrol sinyalleri Şekil 4.10 ve 4.11’ de verilmiştir.



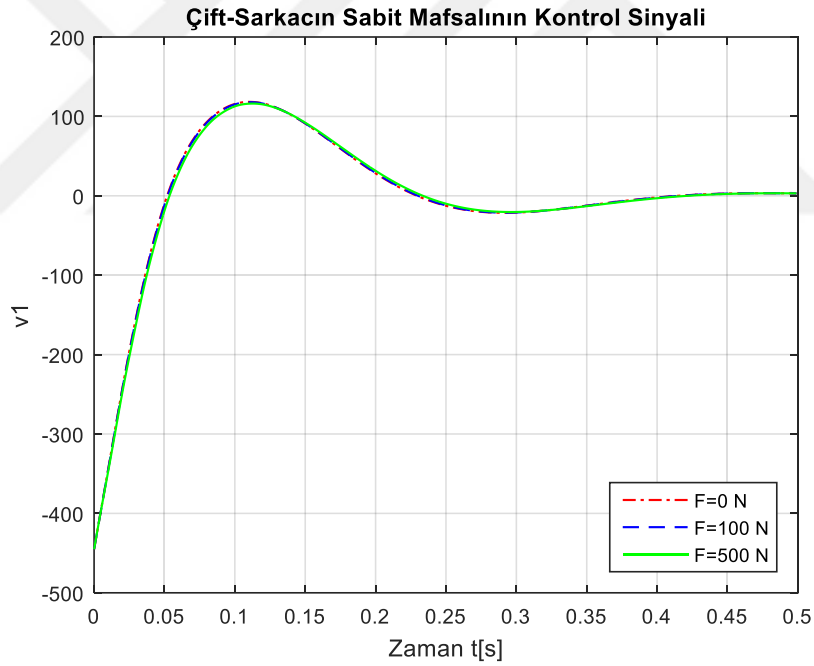
Şekil 4.10. Robotun sabit mafsalsının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)



Şekil 4.11. Robotun hareketli mafsalsının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

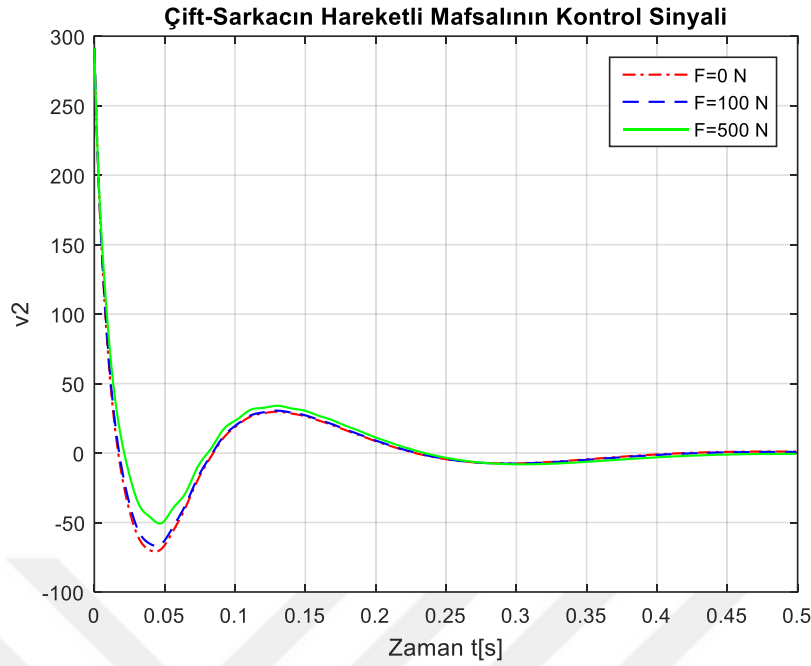
Sisteme uygulanan yük arttıkça sebep olukları hata değerlerini ortadan kaldırmak için uygulanması gereken kontrol sinyalinin de artması beklenmektedir. Şekil 4.10 ve 4.11’ de görüldüğü üzere yük arttıkça uygulanan kontrol sinyalinin değeri de büyümektedir. Sabit mafsallı kontrol sinyali yük uygulanmadığında en fazla 200 N.m değerini görürken 500 N luk yük altında 440 N.m değerlerini görmektedir. Benzer şekilde hareketli mafsalda da uygulanan kontrol sinyali değeri yüksüz durumda 90 N.m iken tam yüklü durumda 305 N.m değerlerini görmektedir.

Daha önceden de belirtildiği gibi çift-sarkaç mekanizması bacak yerine modellenmiştir. Robot dışında çift-sarkaç mekanizmasına kontrol sinyali uygulanmasının sebebi robota uygulanan yükün çift-sarkaç üzerinde herhangi bir etkisinin olup olmadığını sorgulamaktır. Çift-sarkaç mekanizmasının mafsallarına uygulanması gereken kontrol sinyalleri Şekil 4.12 ve 4.13’ de gösterilmiştir.



**Şekil 4.12.** Çift-sarkacın sabit mafsalının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)





**Şekil 4.13.** Çift-sarkacın hareketli mafsallının kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

Konum grafiklerinden de anlaşılabileceği gibi her üç durumda da PID kontrol yöntemi uygulanan robotun, çift-sarkacın hareketlerini iyi bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Hata grafiklerinde de görülebileceği gibi sisteme uygulanan kuvvetler arttıkça robot ve çift-sarkacın arasında oluşan hataların artması sebebiyle yaylarda oluşan kuvvetler de doğru orantılı olarak artmaktadır. Bunun sonucunda kontrolcü, giriş referansı olarak algıladığı yay kuvvetlerini yani hataları ortadan kaldırmak amacıyla daha yüksek kontrol sinyalleri üretmek zorunda kalmıştır. Robota uygulanması gereken kontrol sinyallerinin yüklere bağlı olarak artmasına rağmen çift-sarkaç mekanizması (insan bacağı yerine modellenmiş sistem) üzerinde bulunan mafsalların kontrol sinyallerinde neredeyse hiçbir değişiklik oluşmamaktadır. Böylece uygulanan bütün yükü tamamen robotun taşıdığı ve insan bacağına herhangi bir şekilde yük hissettirmeyeceği sonucuna varılmıştır.

### 4.1.3. Kayan Kipli Kontrol Yöntemi

#### 4.1.3.1. Giriş

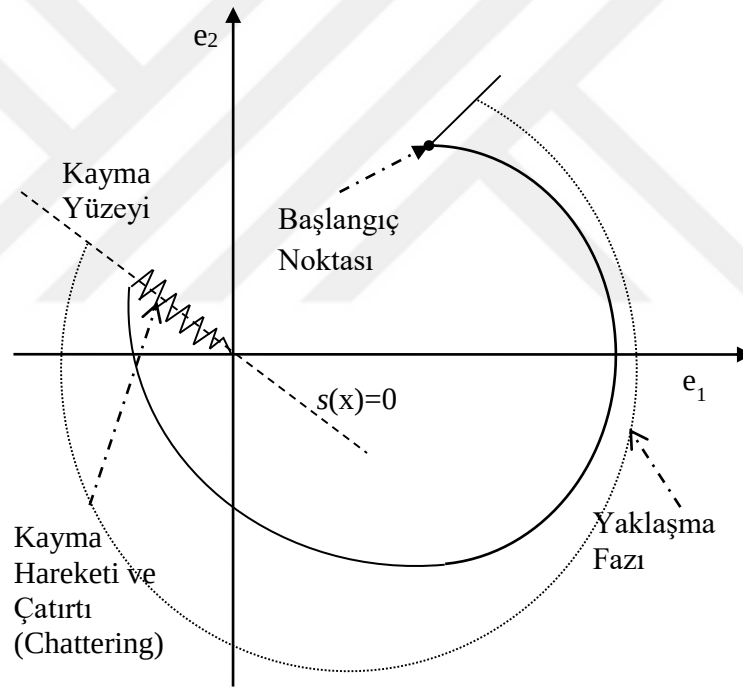
Kayan Kipli Kontrol (KKK); yüksek mertebeli doğrusal olmayan karmaşık sistemlere uygulanan, değişken yapıli bir kontrol yöntemidir. Dış etkenlere ve parametrik değişkenlere karşı duyarsız olması bu kontrol yönteminin en büyük avantajıdır (Slotine & Li, 1991). Bu

avantajı sayesinde sistemde herhangi bir değişiklik olduğunda kontrolcü değişikliklere adapte olur ve sistemin bu istemsiz değişikliklere rağmen görevini yerine getirmesini sağlar.

KKK de öncelikle hatalardan oluşan durum uzayında Şekil 4.14' de gösterilen kayma yüzeyi seçilir. Sonrasında sistemin durum değişkenleri bu yüzeye gitmeye zorlanır. Sistem kayma yüzeyine ulaştıktan sonra bu yüzey üzerinde orijine yönlendirecek kontrol sinyalleri sisteme uygulanır (Bakioglu & Aldemir, 1995).

KKK tasarımı 2'ye ayrılır:

- Kayma (anahtarlama) yüzeyini seçme;
- Kayma yüzeyindeki hareketi sağlayan kontrol kuralını belirleme



Şekil 4.14. Kayma yüzeyi

Kayma yüzeyi tasarlanırken kontrol terimini içermemesine özen gösterilir. Sistemi kayma yüzeyine götürecekt ve sistemi kayma yüzeyinde tutacak kontrol terimleri ise kontrolcünün içeriğinde bulunmalıdır.

n. mertebeden lineer olmayan sistemin durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\
\dot{x}_2(t) &= x_3(t) \\
&\dots \\
&\dots \\
&\dots \\
\dot{x}_n(t) &= \sum_{i=1}^a f_i(x,t) + b(x,t)u(t) + d(t)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Burada  $x(t)$  durum değişkenleri,  $f(x,t)$  ve  $b(x,t)$  sistemin karakteristikleri,  $u(t)$  giriş sinyali,  $d(t)$  ise zamana bağlı bozucular olarak adlandırılır. KKK yönteminde ne kadar giriş sayısı bulunuyorsa aynı sayıda kayma düzlemi seçilir. 2. mertebeden bir sistemde bir tane kayma yüzeyi vardır,  $s(x,t)=0$  ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$s(x,t) = ce_1(t) + e_2(t) \tag{4.3}$$

Burada  $c$  pozitif bir reel sayı olmak üzere sistem hataları,

$$e(t) = (e_1(t), e_2(t)) = (x_1(t) - x_{d1}(t), x_2(t) - x_{d2}(t)) \tag{4.4}$$

olarak tanımlanabilir.  $x_{di}(t)$  kontrol edilecek parametrelerin referans değerleridir.

Kayma yüzeyi  $s(x,t)$ ; hata terimleri ( $e_1$  ve  $e_2$ ) ve yüzeyin eğimini belirleyen  $c$  katsayısına bağlı olan lineer bir fonksiyondur. Durum uzayında,

$$\dot{x}_{d1} = x_{d2} \tag{4.5}$$

olduğundan,

$$\dot{e}_1 = e_2 \tag{4.6}$$

yazılabilir. Diferansiyel denklemin  $s=0$  sonucunu elde etmek için gerekli olan tek çözüm  $e=0$  değeri için geçerli olur. Hatayı sıfıra ulaştırmak için bunu sağlayacak kontrol kuralı seçilmelidir. Hatayı sıfıra ulaştıracak kontrol kuralı aşağıda verilen Lyapunov metodu kullanılarak ortaya çıkarılabilir (Slotine & Li, 1991).

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \tag{4.7}$$

Burada  $V(0) = 0$  ve her  $s \neq 0$  için  $V(s) > 0$  dır.

Verimli bir sistem durumu oluşturmak için,

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq 0 \quad (4.8)$$

eşitsizliğinin sağlanması, sistemin kararlı durumda olduğunu ve kayma yüzeyi yakınında hareket ettiğini veya kayma yüzeyinin üstünde olduğunu ifade eder.  $\dot{V}$  'ye ulaşma koşulu adı verilir.

$$\dot{s} = c\dot{e}_1 + \dot{e}_2 = (f + bu - \ddot{x}_d + c\dot{e}) \quad (4.9)$$

olmak üzere  $s(x,t)$ ,  $\dot{V}$  içerisine yerleştirilince,

$$s(f + bu - \ddot{x}_d + c\dot{e}) \leq 0 \quad (4.10)$$

elde edilir. Bu nedenle ulaşma koşulunu sağlayan kontrol girişi,

$$u = \frac{-\hat{f} + \ddot{x}_d + c\dot{e}}{b} - K\text{sign}(s) = u_{eq} + u_{dis} \quad (4.11)$$

olarak seçilir.

Burada  $\hat{f}$ , hesaplanmış durum fonksiyonudur.  $K$ , sistem parametrelerine bağlı pozitif bir katsayıdır.  $u_{eq}$ , eşdeğer kontrol olarak adlandırılır ve sistem dinamiklerine bağlıdır.  $u_{dis}$  ise sürekli olmayan kontrol olarak adlandırılır. KKK, işaret (sign) fonksiyonu kullanılması sebebiyle sürekli değişkenlik gösterir. Hata düzlemini kayma yüzeyi üzerinde hareket etmeye zorlar.

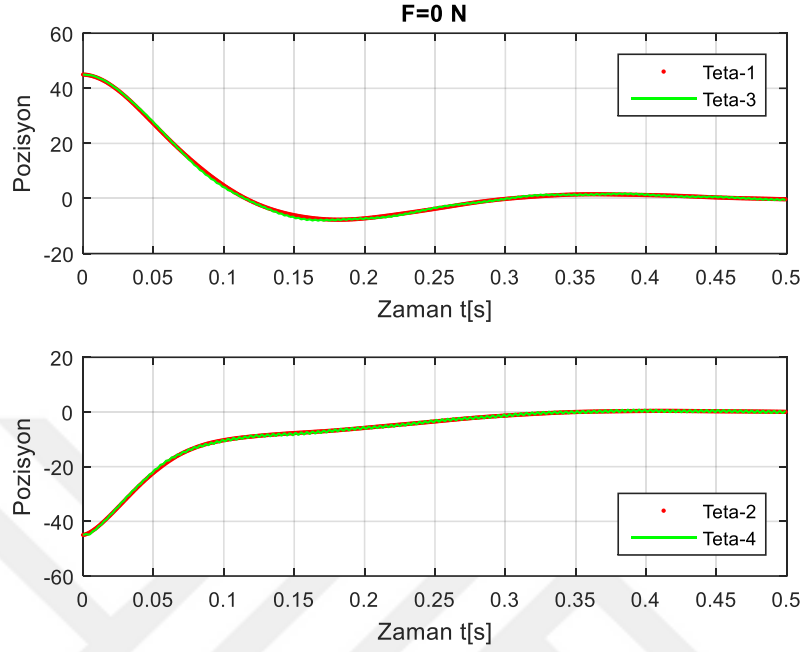
#### 4.1.3.2. KKK Kontrol Yöntemi Tasarımı ve Uygulaması

Bu bölümde sistemin kontrolü KKK yöntemi ile yapılmıştır. PID kontrol yönteminde de uygulandığı şekilde KKK kontrolcünün parametreleri GA ile optimize edilmiştir. GA ile optimize edilen parametreler Tablo 4.6' da verilmiştir.

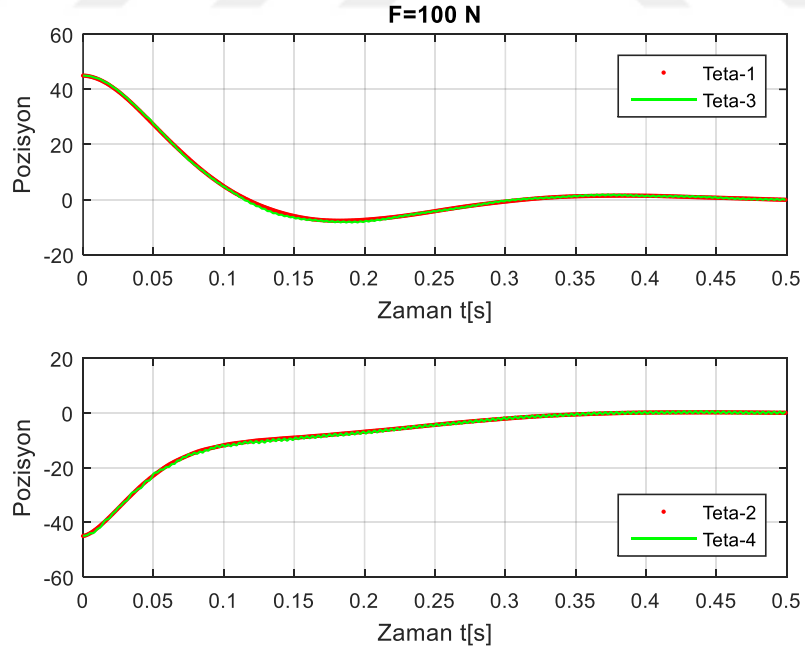
**Tablo 4.6.** KKK parametre değerleri

|     |          |     |          |
|-----|----------|-----|----------|
| c1: | 390,8518 | c2: | 606,3018 |
| K1: | 219,6908 | K2: | 276,6575 |

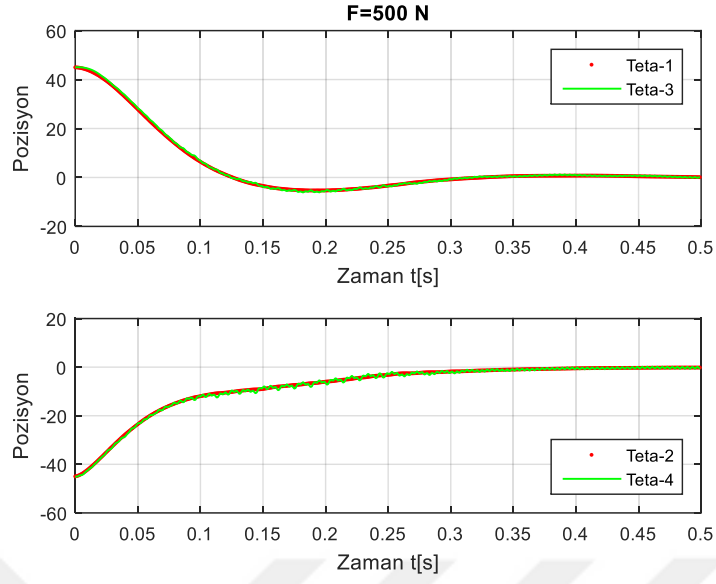
Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17’ de sırasıyla yüksüz, 100 N ve 500 N yük altında KKK kontrol yöntemi uygulandığında oluşan mafsall pozisyonları gösterilmiştir.



**Şekil 4.15.**  $F=0$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (KKK kontrol yöntemi)



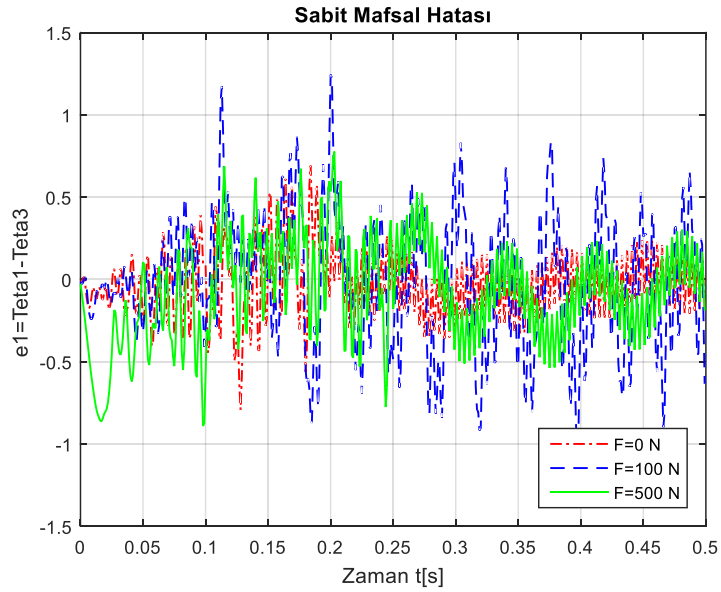
**Şekil 4.16.**  $F=100$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (KKK kontrol yöntemi)



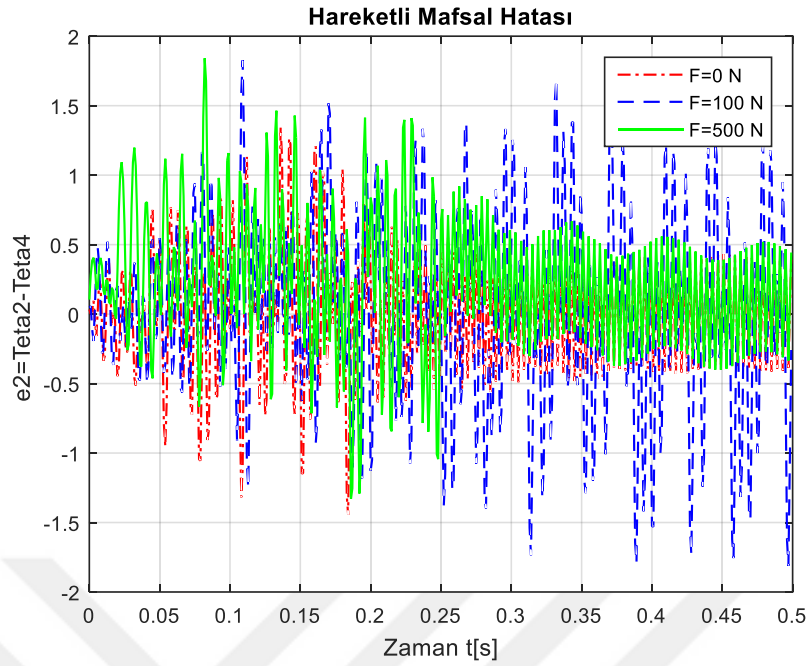
**Şekil 4.17.**  $F=500$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları (KKK kontrol yöntemi)

Şekillerden anlaşılacağı üzere aynı PID kontrol yönteminde olduğu gibi her üç durumda da robotun çift-sarkaç hareketlerini takip ettiği görülmektedir. Yalnız bu kontrol yönteminde konumlar arasında oluşan hata değerleri gözle görülür bir hal almıştır.

Konum grafiklerinde fark edilen hata değerleri çift-sarkaç ve robotun sabit mafsalları arasındaki hatalar Şekil 4.18’ de, hareketli mafsalları arasında oluşan hatalar ise Şekil 4.19’ da gösterilmiştir.



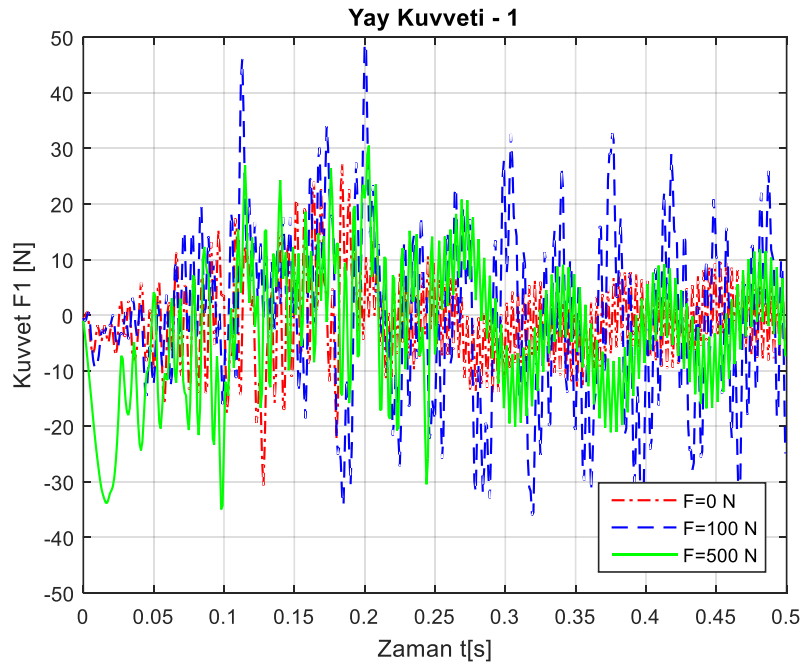
**Şekil 4.18.** Sabit mafsalları hatası (KKK kontrol yöntemi)



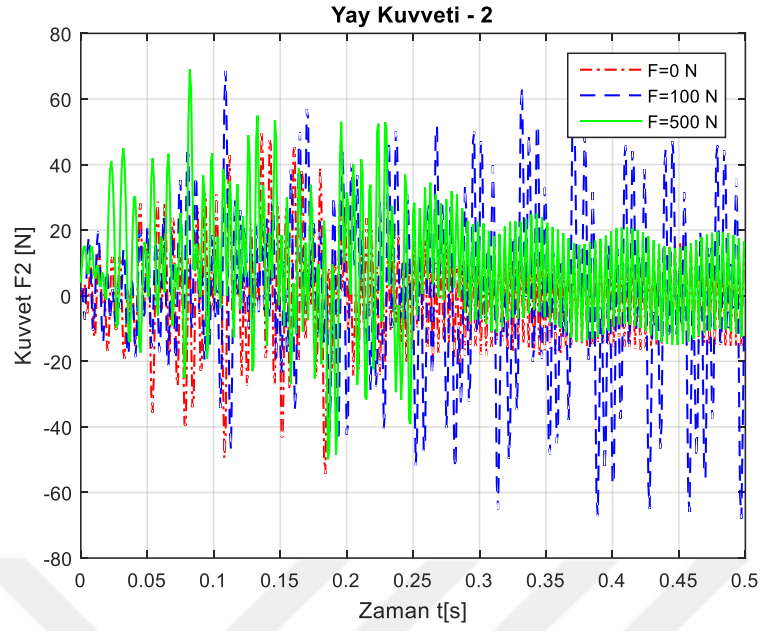
**Şekil 4.19.** Hareketli mafsal hatası (KKK kontrol yöntemi)

Şekil 4.18 ve 4.19’ dan da anlaşılacağı üzere çatırdama olayı sebebiyle sabit mafsallar arasında oluşan hata değerleri 1,25, hareketli mafsallar arasında oluşan hata değerleri ise 1,75 dereceleri bulmaktadır.

Hatalar sonucunda ortaya çıkan yay kuvvetleri ise Şekil 4.20 ve 4.21’ de gösterilmiştir.



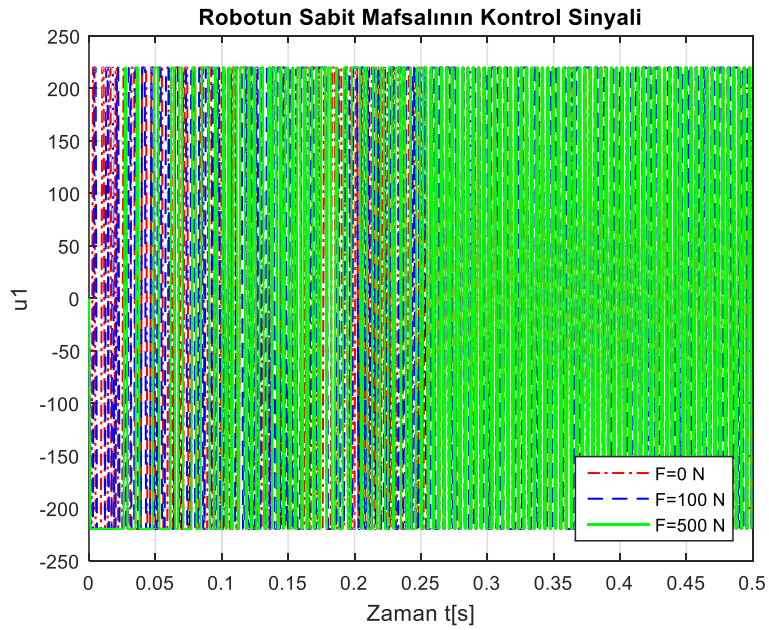
**Şekil 4.20.** 1. yayda oluşan kuvvetler (KKK kontrol yöntemi)



**Şekil 4.21.** 2. yayda oluşan kuvvetler (KKK kontrol yöntemi)

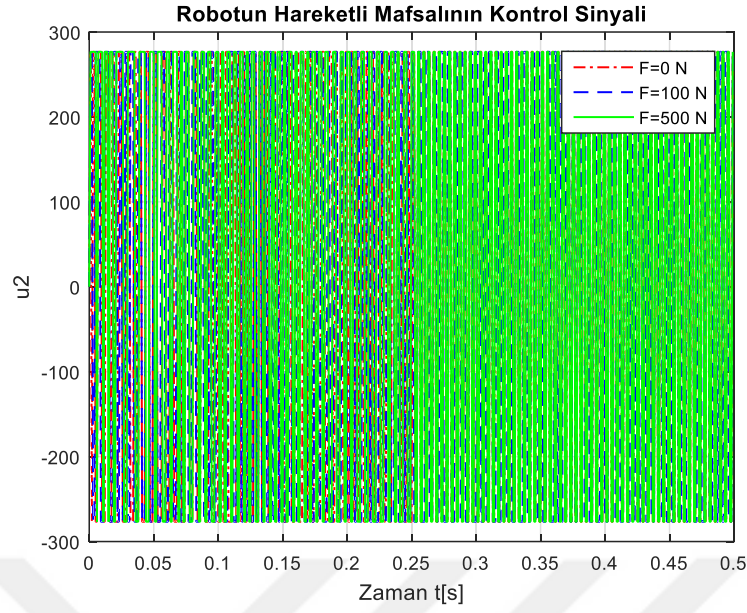
Önceden de belirtildiği gibi yaylarda oluşan kuvvetlerle hata değerleri doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu sebeple hatalarda gözlemlenen çatırdama olayı yay kuvvetlerinde de ortaya çıkmıştır.

Robotun hataları ortadan kaldırmak için uyguladığı kontrol sinyalleri Şekil 4.22 ve 4.23’ de verilmiştir.



**Şekil 4.22.** Robotun sabit mafsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi)

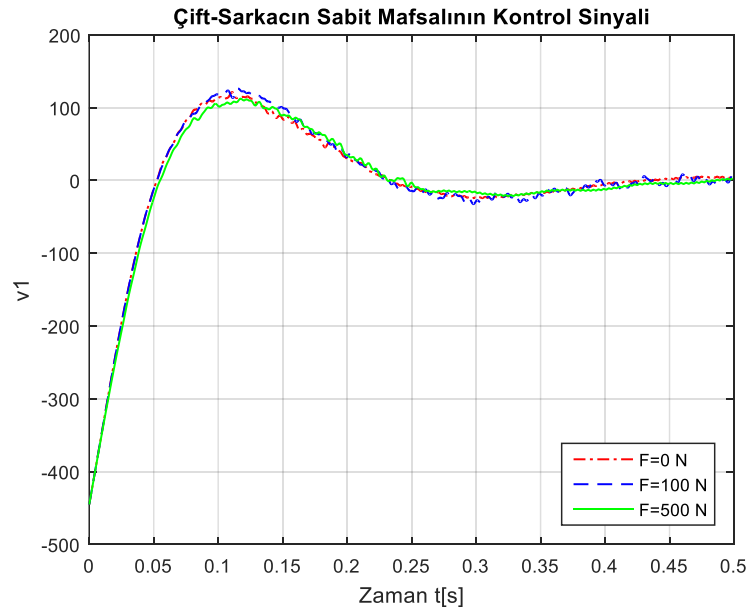




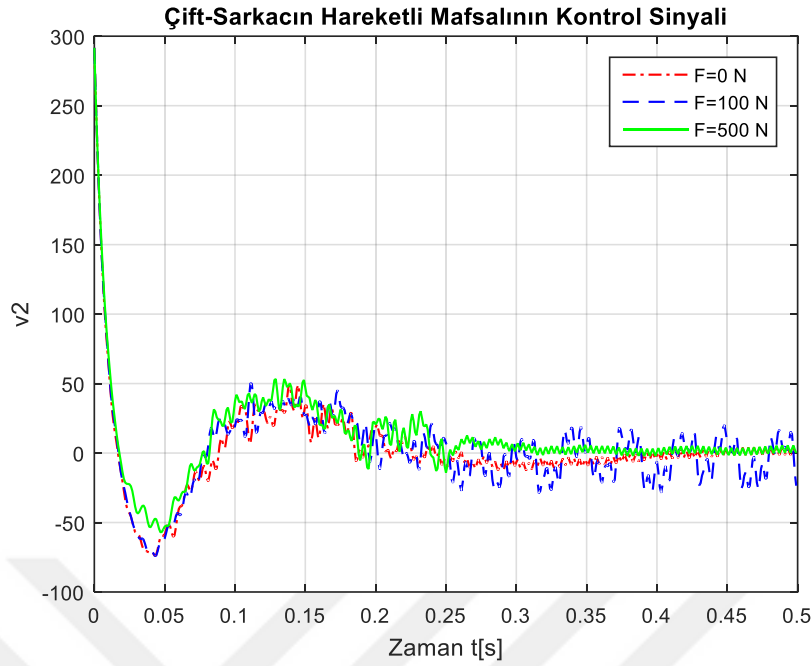
**Şekil 4.23.** Robotun hareketli mafsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi)

KKK yönteminde kullanılan işaret (signum) fonksiyonu sebebiyle kontrol sinyali değerlerinin en küçük ve en büyük değerleri alacağı belirtilmiştir. Şekil 4.22 ve 4.23’ de görüldüğü üzere mafsallara uygulanan kontrol sinyali değerleri sadece en küçük ve en büyük değerler olan -275 ve 275 N.m değerlerini almıştır.

Şekil 4.24 ve 4.25’ da ise çift-sarkacın mafsallarına uygulanması gereken kontrol sinyalleri verilmiştir.



**Şekil 4.24.** Çift-sarkacın sabit mafsalının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi)



**Şekil 4.25.** Çift-sarkacın hareketli mafsalsının kontrol sinyali (KKK kontrol yöntemi)

KKK kontrol yöntemi de PID kontrol yöntemi gibi istenilen hareketi uygulama konusunda başarılı olmuştur. Yüklerin artması yine hata değerlerinin ve dolayısıyla yaylarda oluşan kuvvetlerin artmasına sebep olmuştur. Bu sebeple robota uygulanan kontrol sinyalleri de artmıştır. Bilindiği üzere standart KKK denetçinin en büyük dezavantajı olan çatırdama durumudur. Bu simülasyon çalışmasında da bu dezavantajın sistem üzerindeki etkisi net olarak görülebilmektedir. Uygulanacak olan kontrol sinyalleri işaret fonksiyonu (signum fonksiyonu) yüzünden ara değerleri içermemektedir. Çok küçük hata durumlarında bile kontrolcü en yüksek kontrol sinyalini uygulandığı için hata değeri çok kısa zamanda hızlı bir biçimde sıfırlanmaktadır. Ancak bu hızlı sıfırlama esnasında sistemin ataletleri sebebiyle hata değeri sıfır olduktan sonra sistem durmamakta ve diğer yönde hataya sebep olmaktadır. Bu durum birbirini takip edecek şekilde devam etmektedir. Böylece çatırdama olarak gördüğümüz durum yayların çift-sarkaca dışarıdan bir yük uygulaması gibi bir sonuç verdiği için çift-sarkaç kontrol sinyallerini içerisinde de salınımlar görülmektedir. Ancak bu değişimler çok küçük değerlerdir ve aynı PID kontrol yönteminde olduğu gibi KKK kontrol yönteminde de eklenen yüklerin çift-sarkaç mekanizmasına ek bir yük bindirmedeği gözlemlenmektedir.

İlerleyen bölümlerde de bahsedileceği gibi deneysel sonuçlar elde edilmek istenirken KKK yönteminin en büyük dezavantajı olan çatırdamayı engellemek için işaret (signum)

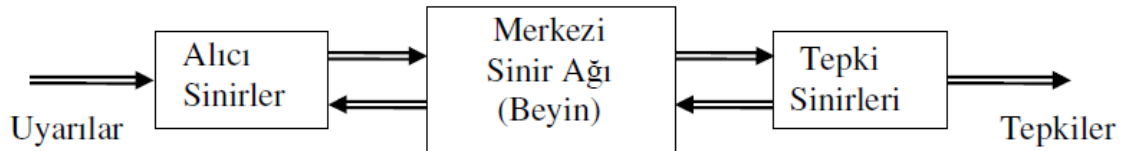
fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Bu sayede kontrol sinyallerinin sadece minimum veya maksimum değerleri arasında değil, arada kalan değerleri de görülebilmektedir.

#### 4.1.4. Yapay Sinir Ağ Tabanlı Kontrol Yöntemi ile Benzetim Uygulaması

##### 4.1.4.1. Giriş

Son yıllarda insan zekâsını yapay olarak modellemeye çalışan Yapay Sinir Ağları (YSA) birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Tek katmanlı veya çok katmanlı yapıya sahip olabilirler. Paralel şekilde çalışan birçok yapay hücrelerden oluşan bir matematiksel model olarak tanımlanabilir. Bu yapay hücrelerin ağırlıkları istenilen amacı ortaya koyabilmek için çeşitli öğrenme yöntemleri ile ayarlanmaktadır (Zurada, 1992).

Şekil 4.26' da gösterilen biyolojik sinir sistemi üç katmandan oluşmaktadır. Birinci katman alıcı sinirlerdir ve organizma içi veya dışından alınan uyarıları beyne iletir. İkinci katman bilgi alır, işler ve dışarıya uygun bir karar iletir. Üçüncü katman olan tepki sinirleri, beyin tarafından üretilen elektriksel darbeleri çıkışa uygun tepkiler haline getirir (Mehrotra, Mohan, & Ranka, 1996).



Şekil 4.26. Biyolojik sinir sisteminin blok diyagramı

Bilim insanları insan beyninin üstün özelliklerini taklit etmek amacıyla beynin nörofiziksel yapısının matematiksel modelini ortaya çıkarmaya çalışmışlardır. Bütün bu davranışları modelleyebilmek için çeşitli hücre ve ağ modelleri geliştirilmiştir. Yapay sinir hücreleri birbirlerine çeşitli şekillerde bağlanırlar ve çoğunlukla katmanlar şeklinde oluşturulurlar. Beyin gibi modellenen YSA, öğrenme sürecini tamamladıktan sonra veriyi toplar ve saklar.

YSA' nın en büyük özelliklerinden birisi topladığı örneklerle kendi öz yeteneğini düzeltebilmesidir. Bu öğrenme (eğitim) süresince ağ uyarılır ve bunun sonucunda

parametreler uyarlanarak sisteme yeni bir tepki vermesi sağlanır. YSA da ağırlıklar ile alakalı öğrenme matematiksel olarak,

$$W_{yeni} = W_{eski} \pm \Delta W \quad (4.12)$$

olarak ifade edilir.

Burada  $\Delta W$  ağırlıklara uygulanacak olan düzeltme miktarıdır. Düzeltme miktarını tanımlayan kurallara öğrenme algoritmaları denmektedir. Üç çeşit öğrenme grubu vardır.

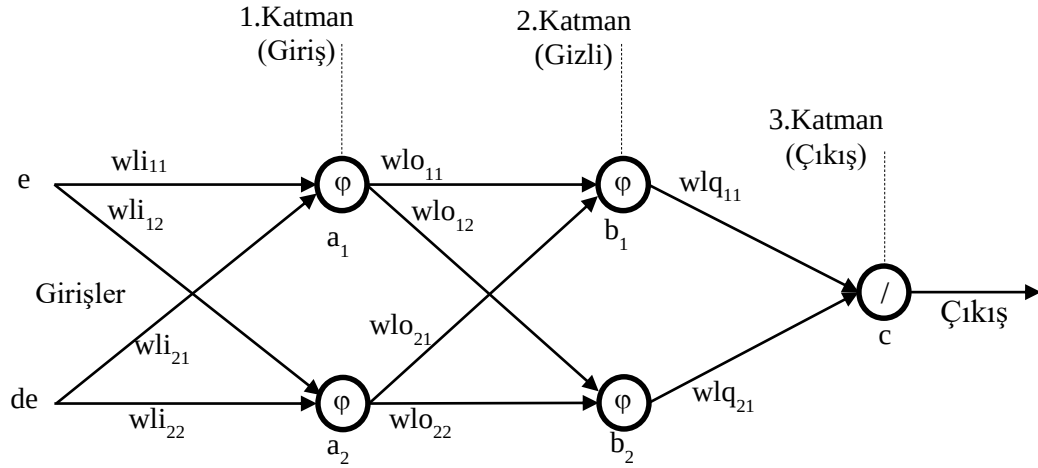
Eğitici Öğrenme: YSA' nın eğitilmesi için sistemin davranışlarını içeren bir sinyal kullanılarak YSA için istenilen tepki temsil edilir. Bu sinyalle beraber problemde alınan ağ girişleri birleştirilerek eğitici örneklemeler oluşturulur. Eğitici çıkışı ile problem çıkışı arasındaki kıyaslama ile elde edilen hata değerlerine göre yeni YSA ağırlıkları ortaya çıkarılır.

Eğitici Öğrenme: Bu öğrenme yönteminde YSA' nın ağırlıklarının ayarlanmasını sağlayan öğrenme için belirgin işlevler yani eğitici bir sinyal yoktur. Bu yöntemde YSA ağırlıkları, belirlenen bir amaca yönelik olarak ağ girişleri üzerinden ayarlanır.

Takviyeli Öğrenme: Takviyeli öğrenme YSA' nın deneme yanılma yoluna göre öğrenmeyi sağladığı, dışarıdan etki ettirilen bir eğitici sinyalin bulunmayan ancak ağ davranışının uygun olup olmadığını gösteren öz yetenek bilgisiyle ağırlıkların ayarlandığı bir yöntemdir (Haykin, 1999).

#### **4.1.4.2. Yapay Sinir Ağ Tabanlı Kontrol Yönteminin Tasarımı ve Uygulaması**

Bu çalışmada 3 katmandan oluşmuş ileri beslemeli bir YSA uygulanmıştır. Şekil 4.27' de gösterilen YSA modelinde 2 nörona sahip birinci katman, yine 2 nörona sahip ikinci katman ve son olarak tek nörona sahip çıkış katmanı bulunmaktadır. Gizli katmanlardaki nöron sayısı tamamen kullanıcının inisiyatifinde olduğu için bu sayı deneme yanılma tekniği seçilmiştir. YSA modeline giriş olarak hata ve hatanın türev değerleri verilmiş, çıkış olarak da kontrol sinyali alınmıştır.



Şekil 4.27. İleri beslemeli üç katmanlı YSA modeli

Burada c son katman olan 3. katmanın yani YSA yapısının çıkış değerini ifade eder. b değerleri 2. katmanın çıkış, 3. katmanın giriş değerlerini ifade etmektedir. Benzer şekilde a değerleri ise 1. katmanın çıkışını 2. katmanın giriş değerlerini göstermektedir. Her bir düğümde bulunan net girdiler,

$$Net_j^1 = \sum_{j=1}^2 wli_j^1 e_j \quad (4.13)$$

$$Net_j^2 = \sum_{j=1}^2 wlo_j^1 a_j \quad (4.14)$$

$$Net_j^3 = \sum_{j=1}^2 wlq_j^1 b_j \quad (4.15)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Doğrusal olmayan YSA çözümlerinde aktivasyon fonksiyonu olarak genellikle, sürekli ve doğrusal olmayan bir fonksiyon olan çift yönlü sigmoid (tanh) fonksiyonu kullanılmaktadır. Bu çalışmada da giriş ve gizli katmanlarda çift yönlü sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çıkış katmanında ise doğrusal aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Buna göre her bir katmanın çıkış değerleri,

$$a_i = \varphi_i(Net_j^1) \quad (4.16)$$

$$b_i = \varphi_i(Net_j^2) \quad (4.17)$$

$$c = \varphi_i(Net_j^3) \quad (4.18)$$

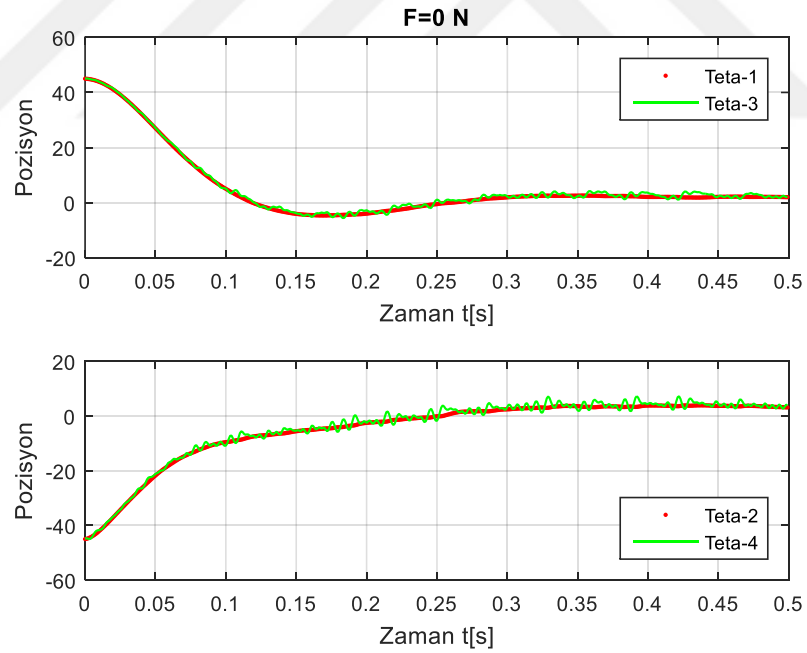
şeklinde hesaplanmaktadır.

Yukarı belirlenen ağ yapısı GA tarafından optimize edildikten sonra ortaya çıkan ağırlık değerleri Tablo 4.7’ de verilmiştir.

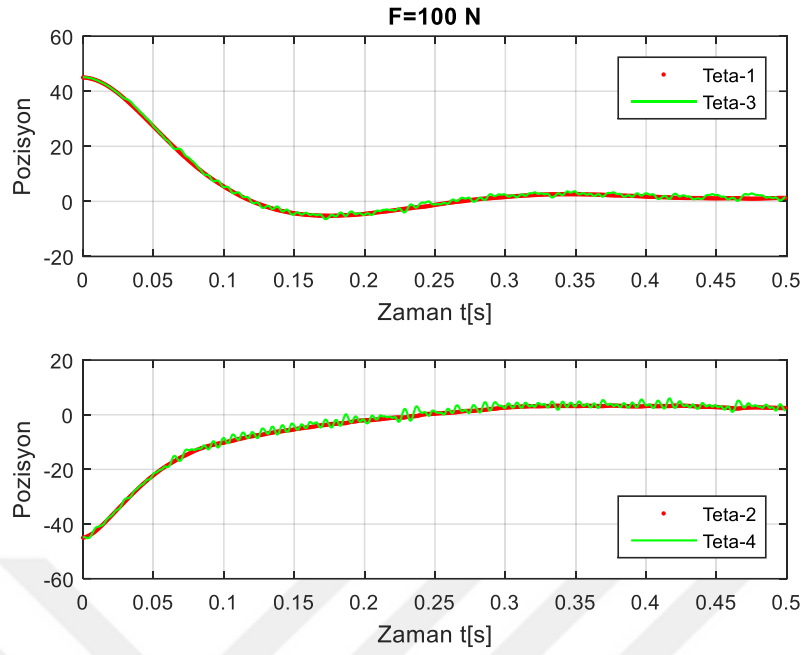
**Tablo 4.7.** Yapay sınır ağları ağırlık değerleri

|                    |                    |                     |                    |
|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| $wli_{11}=12.6288$ | $wli_{12}=63.5881$ | $wli_{21}=128.5908$ | $wli_{22}=0.0087$  |
| $wlo_{11}=31.9255$ | $wlo_{12}=51.4438$ | $wlo_{21}=19.3839$  | $wlo_{22}=39.6705$ |
| $wlq_1=232.2242$   | $wlq_2=116.5787$   | $bli_1=15.9334$     | $bli_2=67.0576$    |
| $blo_1=23.1068$    | $blo_2=14.0971$    | $blq=3.8979$        |                    |

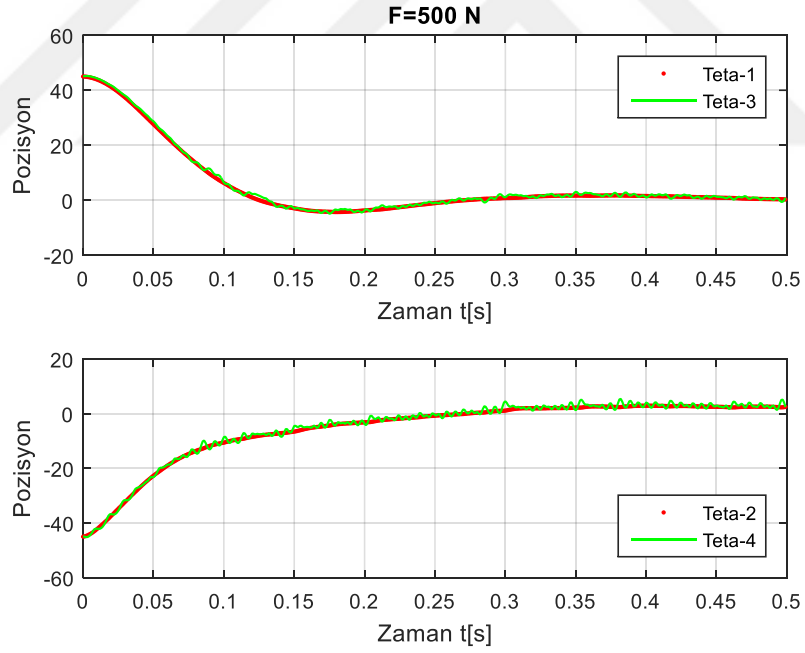
Tasarlanan YSA kontrol yöntemi ile farklı yüklere karşılık elde edilen mafsalsal konumları Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30’ da verilmiştir.



**Şekil 4.28.** F=0 N için çift-sarkaç ve robotun mafsalsal konumları (YSA kontrol yöntemi)



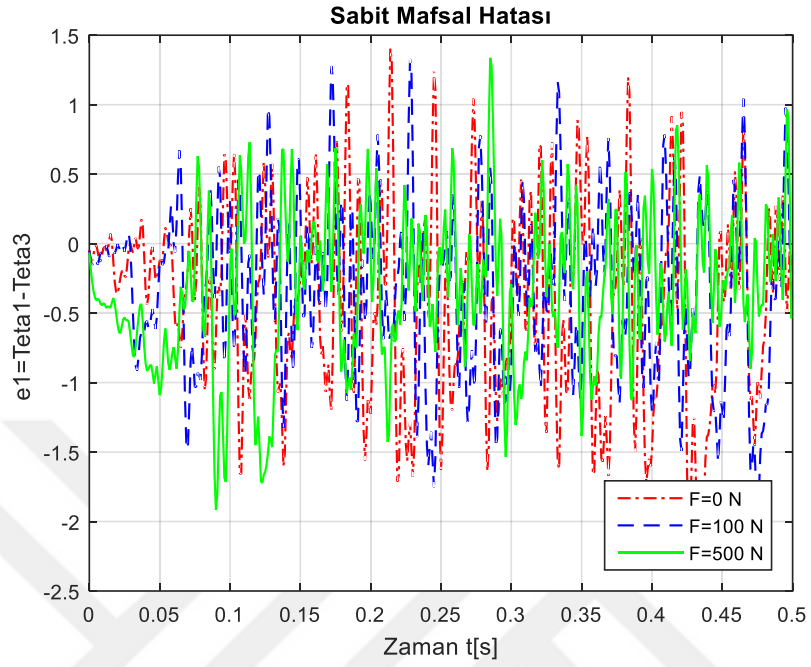
**Şekil 4.29.** F=100 N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (YSA kontrol yöntemi)



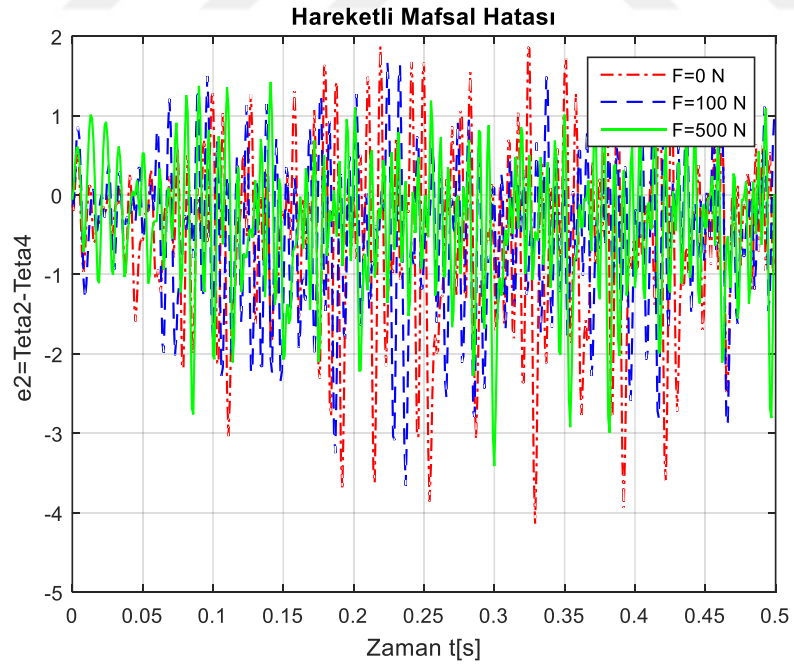
**Şekil 4.30.** F=500 N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (YSA kontrol yöntemi)

Şekil 4.28, 4.29 ve 4.30' da görüldüğü üzere YSA kontrol yöntemi uygulandığı durumda mafsallarda oluşan hata değerleri bariz bir şekilde ortaya çıkmış olsa da robotun çift-sarkaç hareketlerini takip edebildiği görülmektedir.

Şekil 4.31 ve 4.32’ de ise YSA uygulandığında robot ile çift-sarkaç arasında oluşan hatalara yer verilmiştir.



Şekil 4.31. Sabit mafsal hatası (YSA kontrol yöntemi)

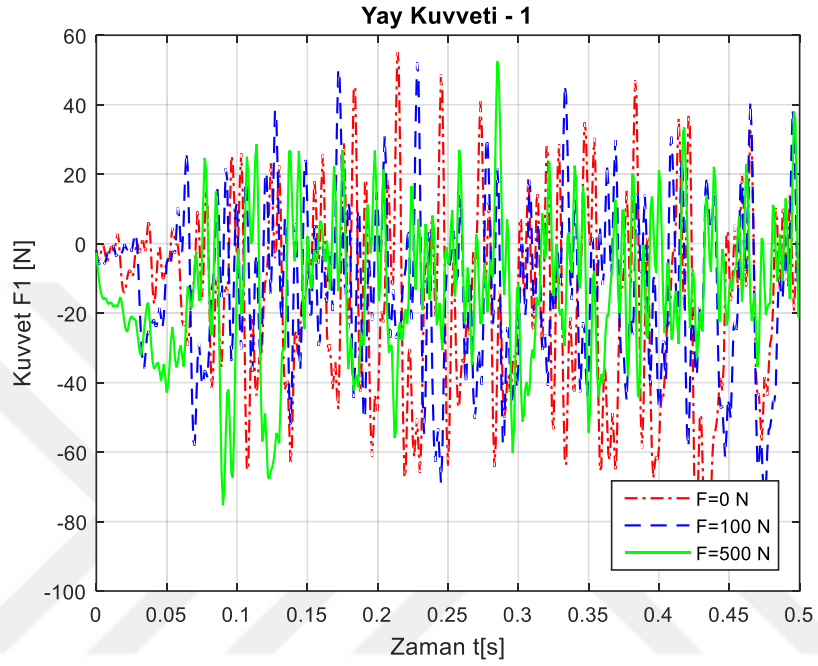


Şekil 4.32. Hareketli mafsal hatası (YSA kontrol yöntemi)

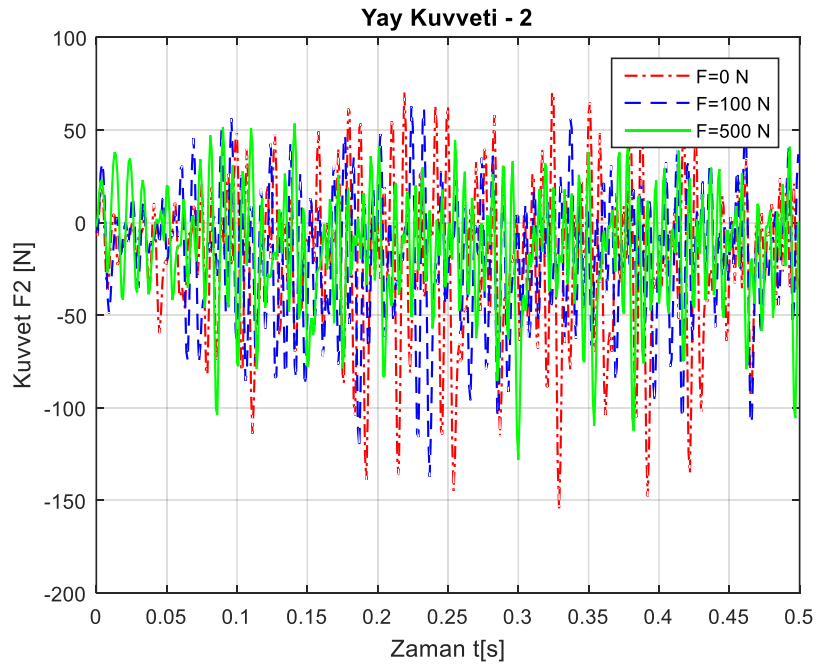


Şekil 4.31 ve 4.32’ de görüldüğü gibi YSA kontrol yönteminde de KKK yöntemine benzer şekilde çatırdama benzeri bir olay gözükmemektedir. Her üç durumda da hata değerleri sabit mafsalda 2 dereceleri, hareketli mafsalda ise 4 dereceleri bulmaktadır.

Şekil 4.33 ve 4.34’ de, hatalar sebebiyle yaylarda ortaya çıkan yay kuvvetleri verilmiştir.



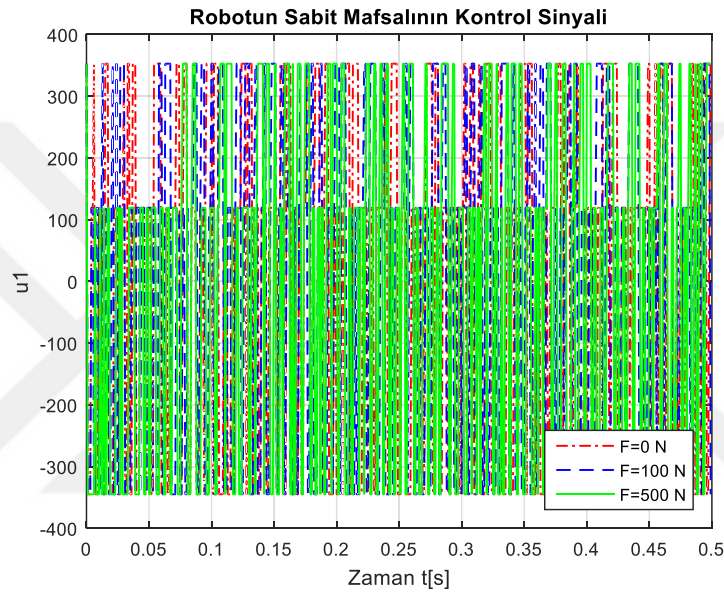
Şekil 4.33. 1. yayda oluşan kuvvetler (YSA kontrol yöntemi)



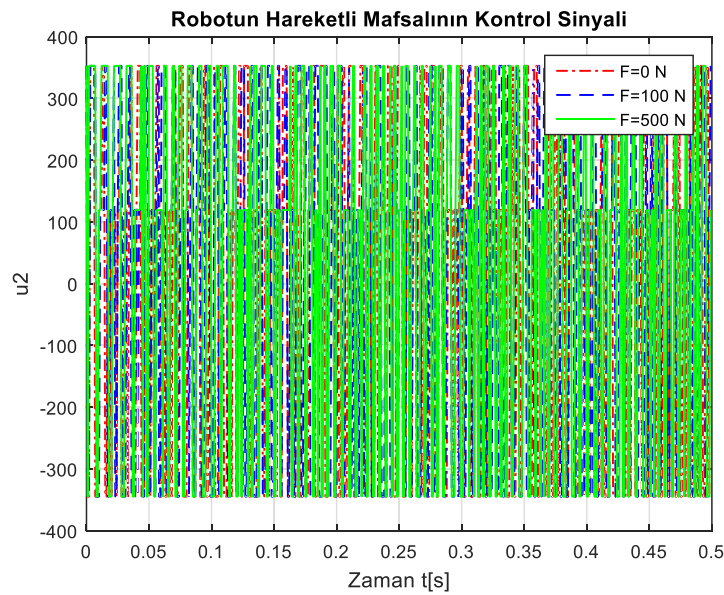
Şekil 4.34. 2. yayda oluşan kuvvetler (YSA kontrol yöntemi)

Hatalarda oluşan değişkenlikler yay kuvvetlerine de yansımıştır. Birinci mafsalda oluşan yay kuvveti -75 N ile 55 N arasında, ikinci mafsalda oluşan yay kuvveti ise -155 N ile 60 N arasında değişiklik göstermektedir.

YSA kontrol yönteminde giriş değerleri olarak verilen değerler yaylarda oluşan kuvvet ve türevinin değerleridir. YSA' nın çıkış değeri ise yüklerin taşınması ve hareketin izlenmesi için robota uygulanması gereken kontrol sinyalleridir. Bu kontrol sinyalleri Şekil 4.35 ve 4.36' da gösterilmiştir.



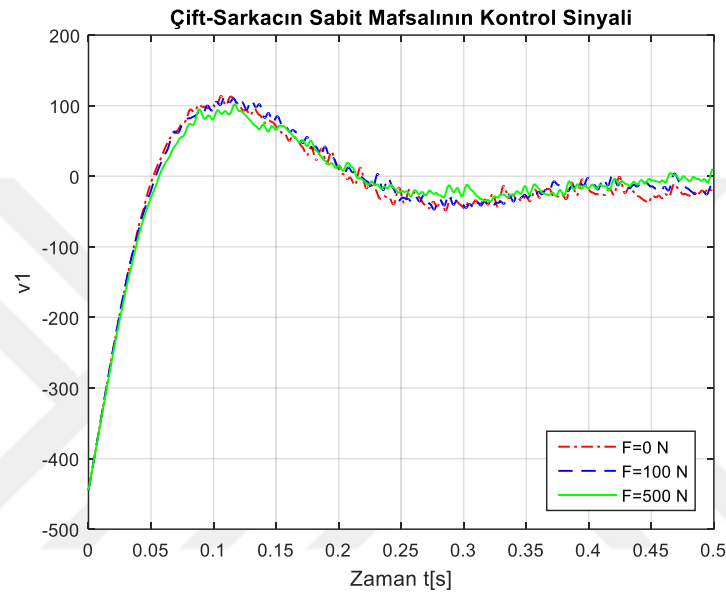
Şekil 4.35. Robotun sabit mafsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi)



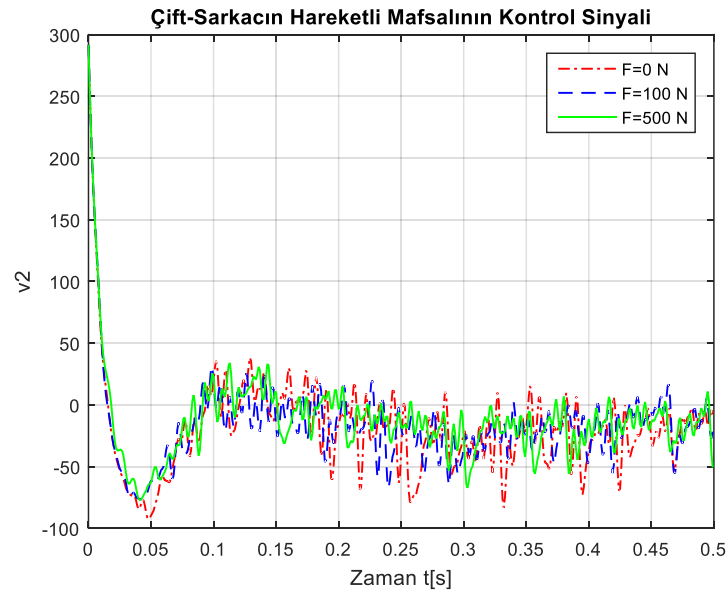
Şekil 4.36. Robotun hareketli mafsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi)

Hata değerlerinden anlaşılaçağı üzere kontrol sinyallerinde aynı KKK yönteminde olduğı gibi işaret fonksiyonu benzeri bir sinyal uygulanmıştır. Bu kontrol sinyallerinin sadece en küçük ve en büyük değerlerinin uygulanması sebebiyle çatırdama olayı ile bu kontrol yönteminde de karşılaşılmasıdır.

Eklenen yüklerin çift-sarkaç üzerinde herhangi bir ekstra etken oluşturup oluşturmadığını araştırdığımız çift-sarkaç kontrol sinyalleri Şekil 4.37 ve 4.38’ de sunulmuştur.



Şekil 4.37. Çift-sarkacın sabit mafsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi)



Şekil 4.38. Çift-sarkacın hareketli mafsalının kontrol sinyali (YSA kontrol yöntemi)

YSA kontrol yönteminin de istenilen şekilde hareketi takip ettiği söylenebilir. Ancak eklem hataları ve yay kuvvetlerinden de anlaşılacağı üzere bu yöntemde elde edilen kontrol cevapları diğer yöntemlere göre çok daha kötü durumdadır. YSA kontrol yönteminde de KKK yöntemine benzer bir çatırdama durumu ortaya çıkmaktadır.

#### **4.1.5. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yöntemi ile Benzetim Uygulaması**

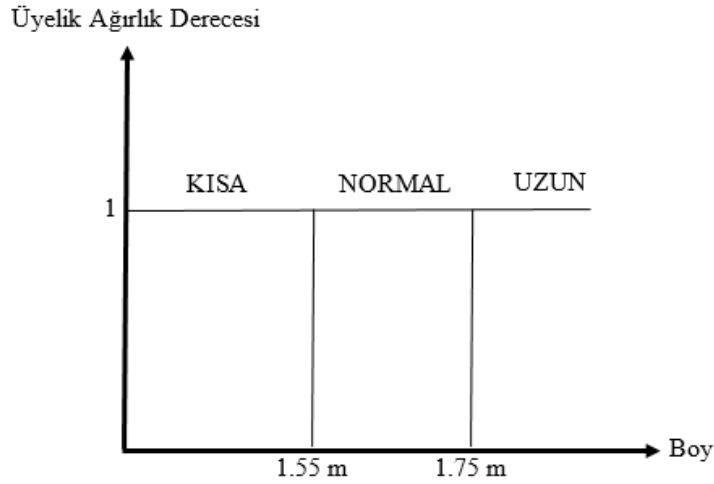
##### **4.1.5.1. Giriş**

Prof. Dr. Lotfi Ali Asker-Zadeh, bulanık mantık kontrol yönteminin temellerini ilk olarak 1962 yılında “Bulanık Küme” kavramı ile ortaya atmıştır. Sonrasında 1965 yılında Berkeley Üniversitesinde “Information and Control” adlı dergide yayınlanan “Bulanık Kümeler” makalesi ile bulanık mantık uygulamaları başlamıştır. Zadeh bu makalede matematik ile insan zekasının ilişkilendirilebileceğini ortaya koymuştur ve sonrasında bulanık mantığın temeli olan Bulanık Mantık Algoritmasını ileri sürmüştür.

Zadeh bulanık küme teorisini, kesin olmayan, belirsiz, karmaşık ve insan tarafından kontrol edilebilir sistemlerin modellenmesi için kullanmıştır (Güngör & Arıkan, 2000). Bulanık mantığın daha çok kullanılabilir hale gelmesinin sebebi klasik mantığın birçok durumda yetersiz olması ve insan zekâsı işleyişine uyuşmamasıdır. Bu uygulama sayesinde veriler daha nitelikli olarak tanımlanabilir. Bulanık kümelerin yardımı ile niteliksel ve muğlak ifadeler rahatlıkla tanımlanabilmektedir (Siler & James, 2005).

Bir karar verme işlemi esnasında genellikle tek bir kıstas yerine birçok kıstastan yararlanılır (Yager, 1981). En iyi seçimin yapılmasını sağlayan karar verme kümesi, alternatifler ve kıstaslar kümesinden oluşmaktadır (Bellman & Zadeh, 1970). Bazı durumlarda kıstasların üyelik derecesi 1 olmasına karşın başka durumlarda 1’ den az olabilirler (Arslan & Gürel, 2008).

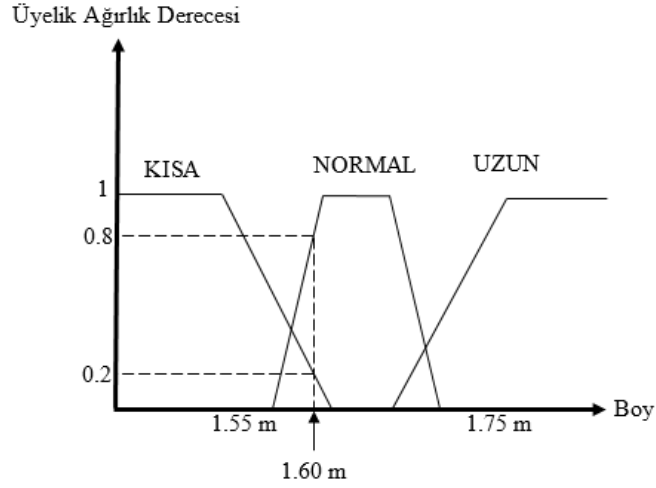
Bulanık mantığın temel matematiği oldukça ayrıntılı ve kapsamlı olmasına rağmen uygulaması çok basittir. Standart boolean mantığında (var-yok mantığı) bir eleman kümenin elemanıdır veya değildir (0 veya 1). Bu küme türlerine kesin küme adı verilir. Örnek olarak boy kavramı ele alınacak olursa; Şekil 4.39’ da görüldüğü gibi 1,55 m uzunluk altı boylar “KISA”, 1,55-1,75 arası boylar “NORMAL”, 1,75 m den üstü de “UZUN” olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.39. Üyelik Ağırlık Dereceleri (Boolean Mantığı)

Böyle bir kümeleme işleminde 1,54 m kısa iken 1,56 m normal olarak tanımlanacaktır. Herhangi bir kontrol sisteminde bu durumu ele alacak olursak, kümeler örnekteki gibi kesin çizgilerle ayrılmış ise kontrol çıkışında da ani değişiklikler olması kaçınılmaz olacaktır. Örnek olarak 0-1 (on-off) çalışan bir ısıtma sisteminde  $30^0$  C sıcak-soğuk sınırı ise  $29,9^0$  C soğuk olduğundan sistem çalışacak,  $30,1^0$  C olduğunda ise duracaktır. Bu durumlar kontrol sistemlerinde istenmeyen durumlardır.

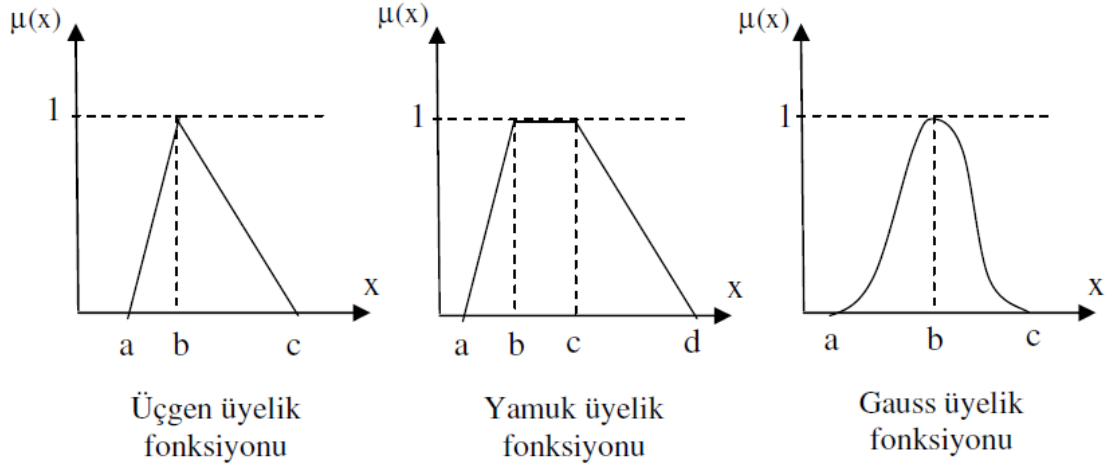
Bu durumun tersine, kümeler sıcak-soğuk, hızlı-yavaş gibi keskin ikili kavramlar yerine ara değerlerin de tanımlandığı az açık, açık, çok açık gibi kavramlar tanımlanması ve her kavrama bir üyelik derecesi verilmesi gerçek dünya ile daha çok bağdaşmaktadır. Yine boy örneği üzerinden tanımlanacak olursa 1,60 m boyunda pek kısa olarak tanımlanamayacağı gibi normal olarak da tanımlanamayabilir. Bu gibi durumlarda bazen kısa bazen normal demek doğru olabilir. Bulanık kümeler, Şekil 4.40' da görüldüğü gibi boy vb. kavramları dereceli olarak tanımlamaya yardımcı olmaktadır.



**Şekil 4.40.** Üyelik Fonksiyonları ve Giriş Değerlerinin Bu Ağırlık Fonksiyonlarına göre Ağırlık Dereceleri

Örnek olarak 1,60 m bir insanın 0,2 oranında “KISA”, 0,8 oranında ise “NORMAL” olarak tanımlanması daha doğru olacaktır.

Bulanık kümeler üyelik fonksiyonları ile tanımlanmaktadır. Bir değerin, belirli bir küme içerisinde yer alması üyelik ağırlıklarına bağlıdır. Bu özellik sayesinde bulanık mantık insan düşünce sisteminin daha iyi modellenmesini sağlamaktadır. Sıkça kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.41’ de gösterilmiştir.



**Şekil 4.41.** En Çok Kullanılan Üyelik Fonksiyonları

#### 4.1.5.2. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yönteminin Tasarımı ve Uygulaması

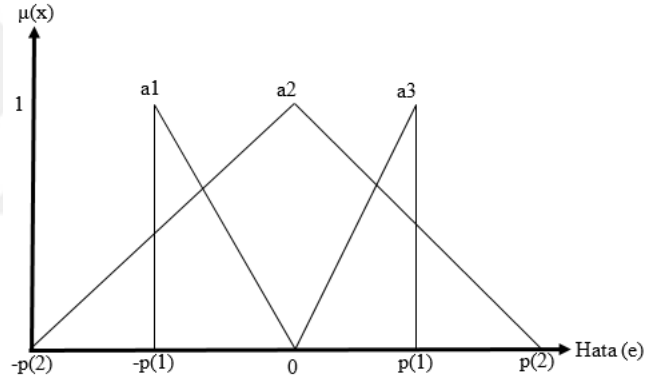
Sayısal benzetim çalışmalarının son bölümünde ise sistemin kontrolü Bulanık Mantık Kontrol yöntemi ile yapılmıştır. Diğer uygulamalarda olduğu gibi kontrolcünün

parametreleri GA ile optimize edilmiştir. GA ile optimize edilen parametreler Tablo 4.8’ de verilmiştir.

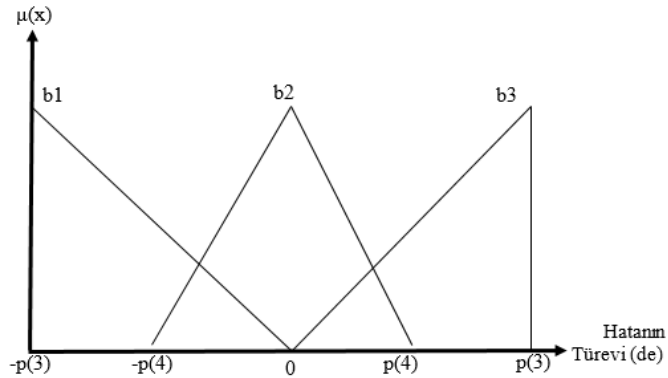
**Tablo 4.8.** Bulanık mantık kontrol yöntemi parametre değerleri

|                   |                  |
|-------------------|------------------|
| $p(1)=267.5986$   | $p(2)=423.1017$  |
| $p(3)=44823.9316$ | $p(4)=1865.4729$ |
| $p(5)=611.9380$   | $p(6)=207.0559$  |

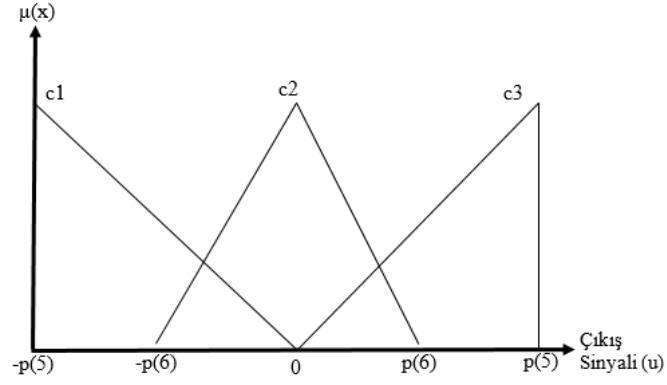
Bulanık mantık kontrol yönteminde kullanılan üyelik fonksiyonları aşağıda verilmiştir. Şekil 4.42 hatanın, Şekil 4.43 hatanın türevinin ve Şekil 4.44 ise çıkış sinyalinin üyelik fonksiyonlarını göstermektedir.



**Şekil 4.42.** Mafsal Hatasının Üyelik Fonksiyonu



**Şekil 4.43.** Mafsal Hatasının Türevinin Üyelik Fonksiyonu



**Şekil 4.44.** Çıkış Sinyalinin Üyelik Fonksiyonu

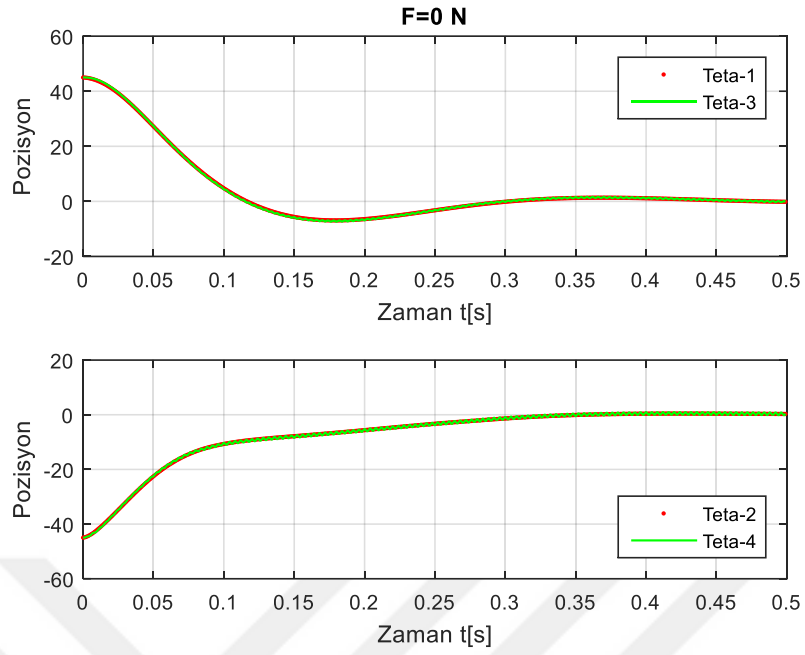
Bütün bu üyelik fonksiyonlarının çalışma sistemini oluşturan kural tablosu Tablo 4.9’ da verilmiştir.

**Tablo 4.9.** Bulanık mantık kural tablosu

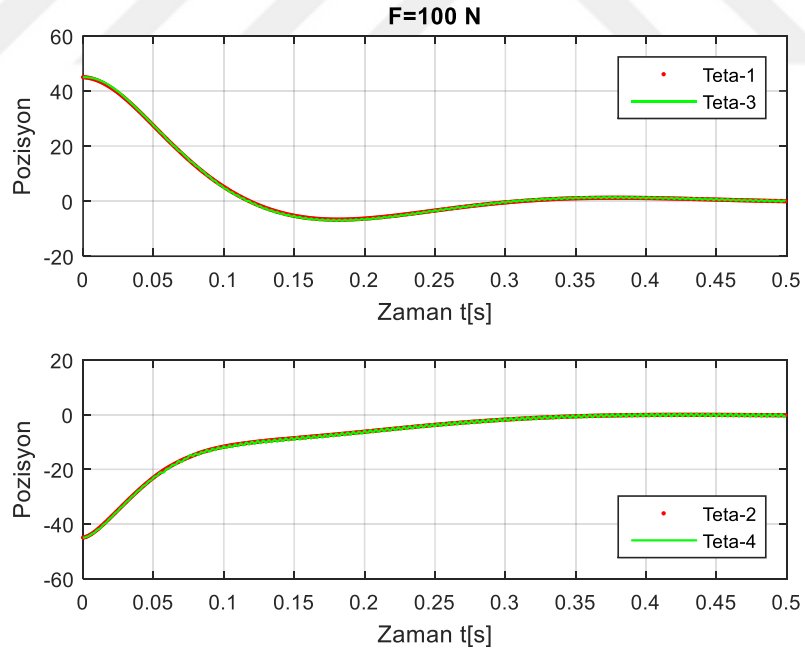
|    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|
|    |    | e2 |    |    |
| e1 | u  | b1 | b2 | b3 |
|    | a1 | c2 | c1 | c1 |
|    | a2 | c1 | c2 | c3 |
|    | a3 | c3 | c3 | c2 |

Farklı yüklere karşı mafsalların konumlarını gösteren grafikler aşağıda verilmiştir. Şekil 4.45’ de yüksüz durum, Şekil 4.46’ da 100 N yük uygulandığındaki durum, Şekil 4.47’ de ise 500 N yük uygulandığı durumu göstermektedir.

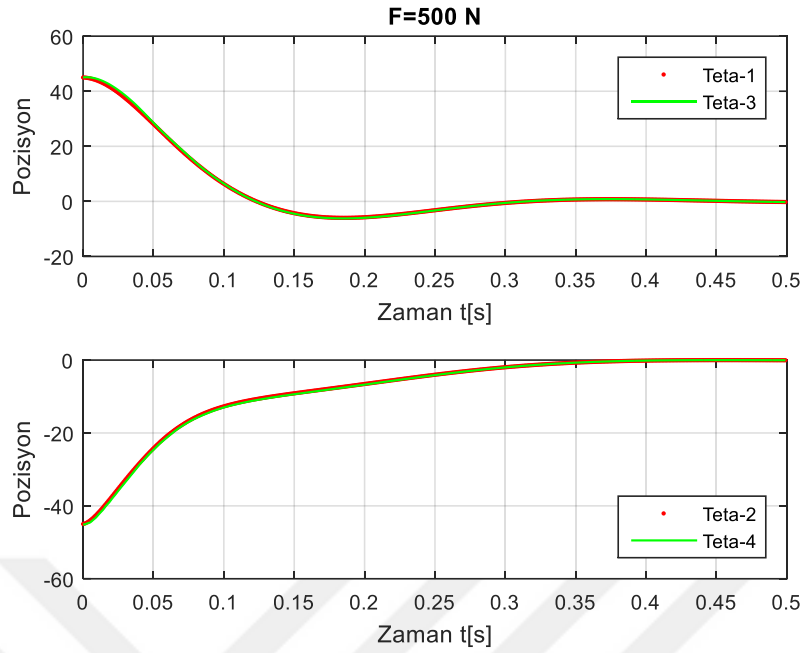




**Şekil 4.45.**  $F=0$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (BM kontrol yöntemi)



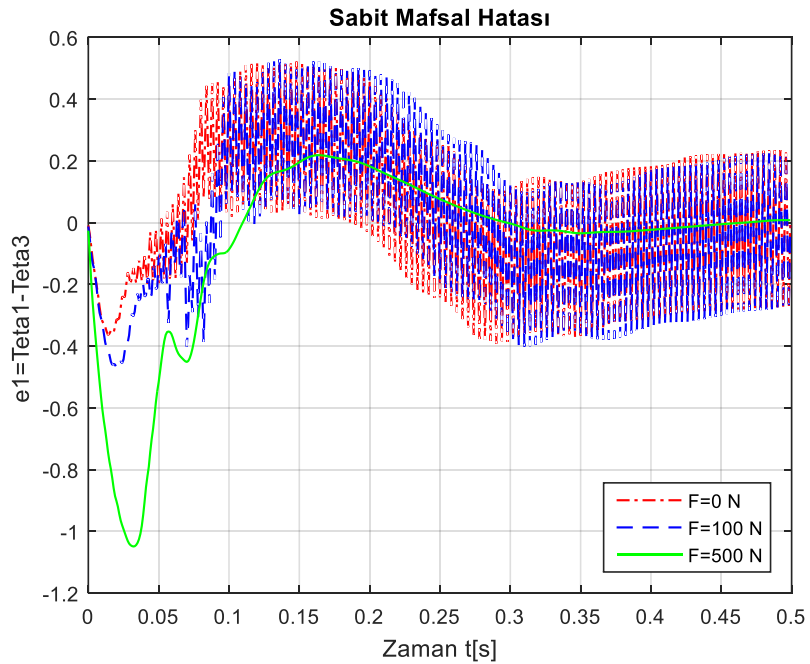
**Şekil 4.46.**  $F=100$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsall konumları (BM kontrol yöntemi)



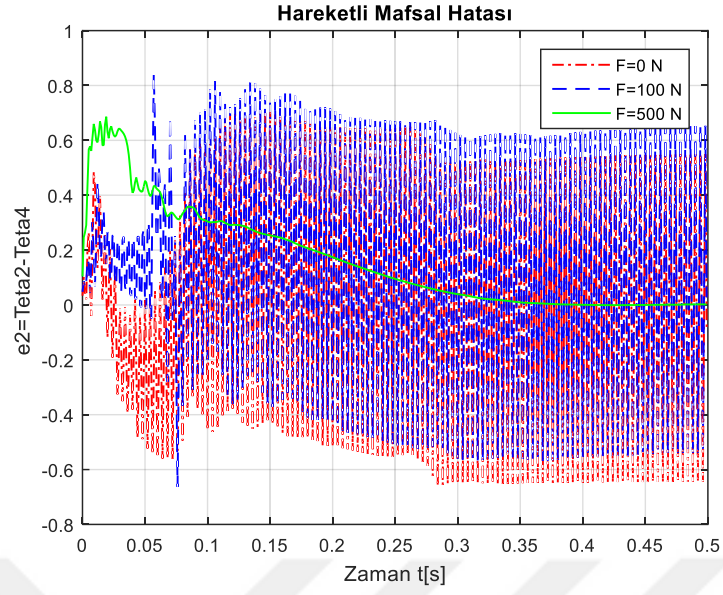
**Şekil 4.47.**  $F=500$  N için çift-sarkaç ve robotun mafsalları konumları (BM kontrol yöntemi)

Şekil 4.45, 4.46 ve 4.47’ de görüldüğü gibi BM kontrol yöntemi robotun çift-sarkaç hareketlerini düzgün bir şekilde izlemesini sağlamıştır.

Sabit mafsalda oluşan hatalar Şekil 4.48, hareketli mafsalda oluşan hatalar ise Şekil 4.49’ da verilmiştir.



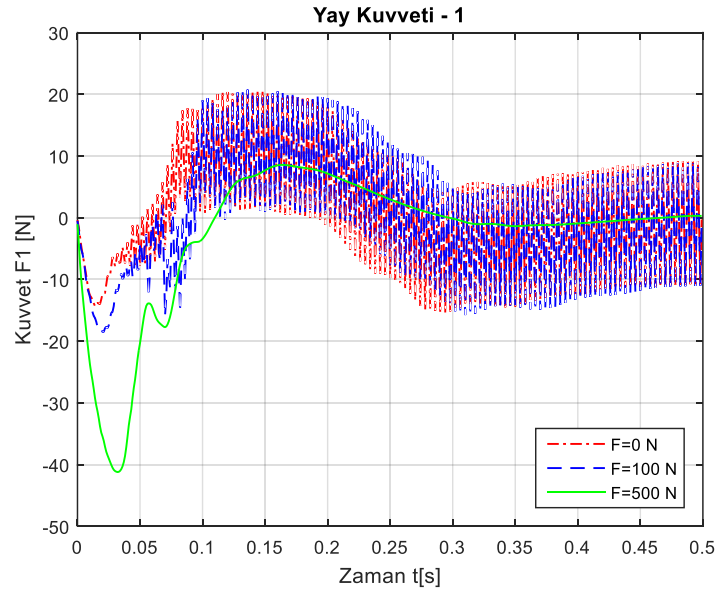
**Şekil 4.48.** Sabit mafsalları hatası (BM kontrol yöntemi)



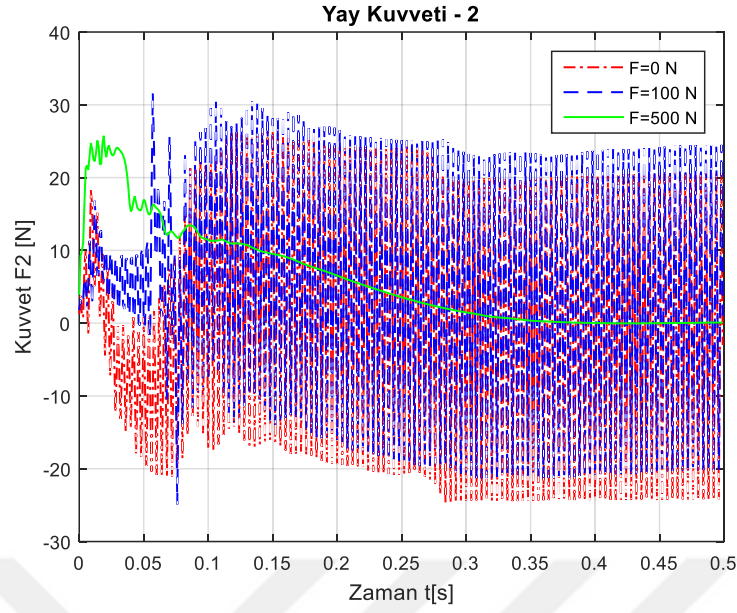
Şekil 4.49. Hareketli mafsal hatası (BM kontrol yöntemi)

Şekil 4.48 ve 4.49’ da görüldüğü gibi BM kontrol yönteminde hata değerlerinin en az durumlar 500 N yük uygulandığı durumlardır. Bunun en büyük nedeni kontrolcü parametrelerinin 500 N altındaki duruma göre optimize edilmiş olmasıdır. Bu sebeple kontrolcünün performansı diğer durumlar için düşmüş ve hata değerleri sabit mafsalda 0,5 dereceleri, hareketli mafsalda ise 0,6 dereceleri bulmuştur.

Hataların sebep olduğu yay kuvvetleri Şekil 4.50 ve 4.51’ de verilmiştir.



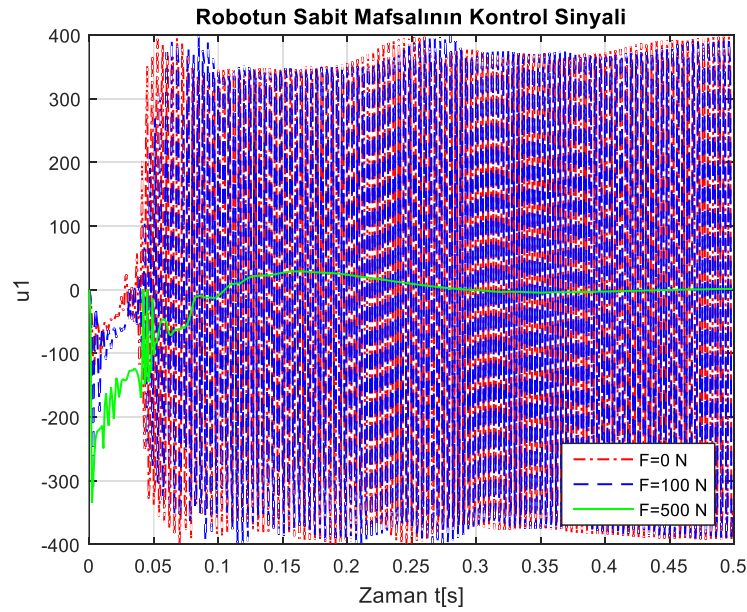
Şekil 4.50. 1. yayda oluşan kuvvetler (BM kontrol yöntemi)



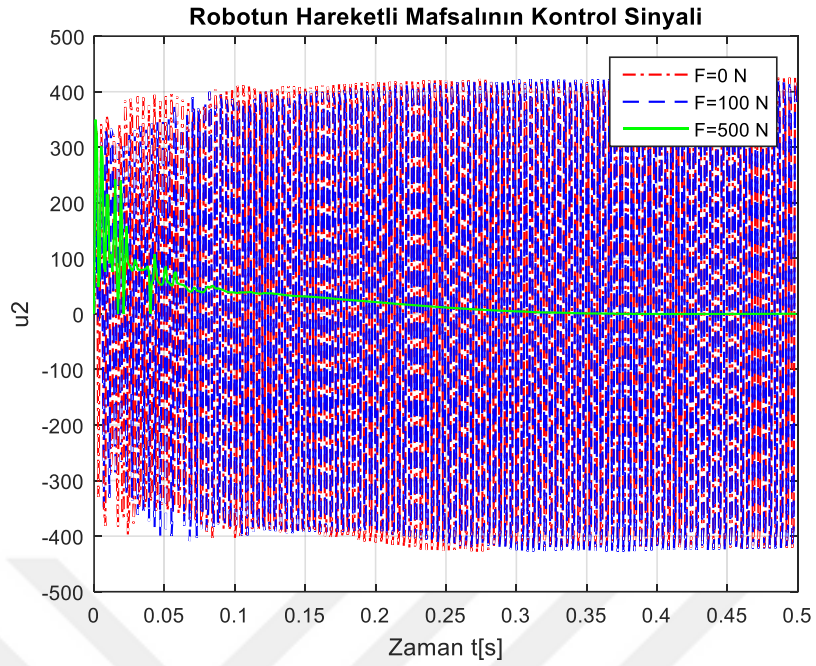
**Şekil 4.51.** 2. yayda oluşan kuvvetler (BM kontrol yöntemi)

Yaylarda oluşan kuvvetler de hata değerlerine bağlı olduğu için hata değerlerinde görüldüğü gibi yay kuvvetlerinde de en küçük yay kuvvetleri 500 N yük altında ortaya çıkmıştır. Hatalar benzer şekilde, Şekil 4.50’ de görüldüğü gibi 1. yayda oluşan kuvvet 20 N, Şekil 4.51’ de görüldüğü gibi 2. yayda oluşan kuvvet ise 50 N değerlerini bulmaktadır.

Robotun istenilen hareketleri yerine getirebilmesi için mafsallara uygulanan kontrol sinyalleri Şekil 4.52 ve 4.53’ de gösterilmiştir.



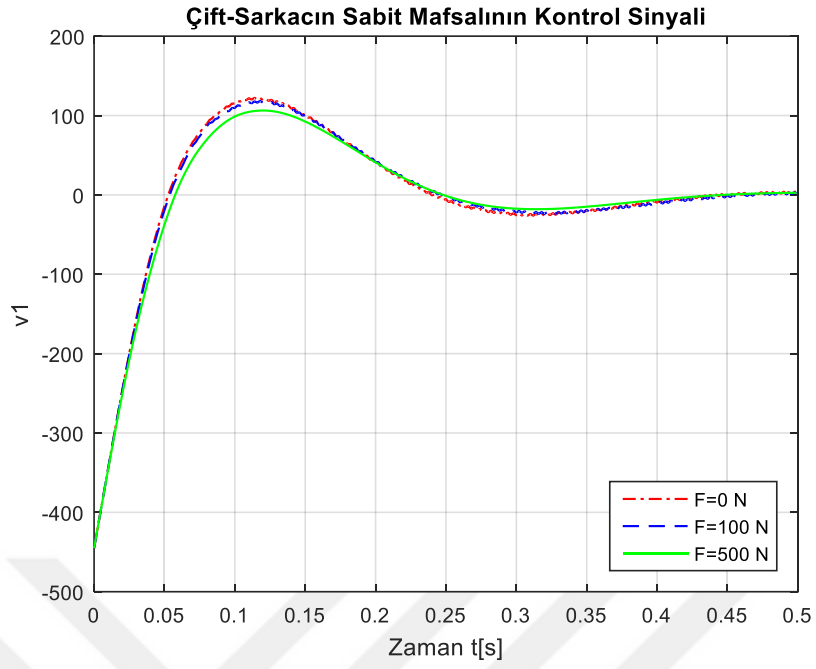
**Şekil 4.52.** Robotun sabit mafsalının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)



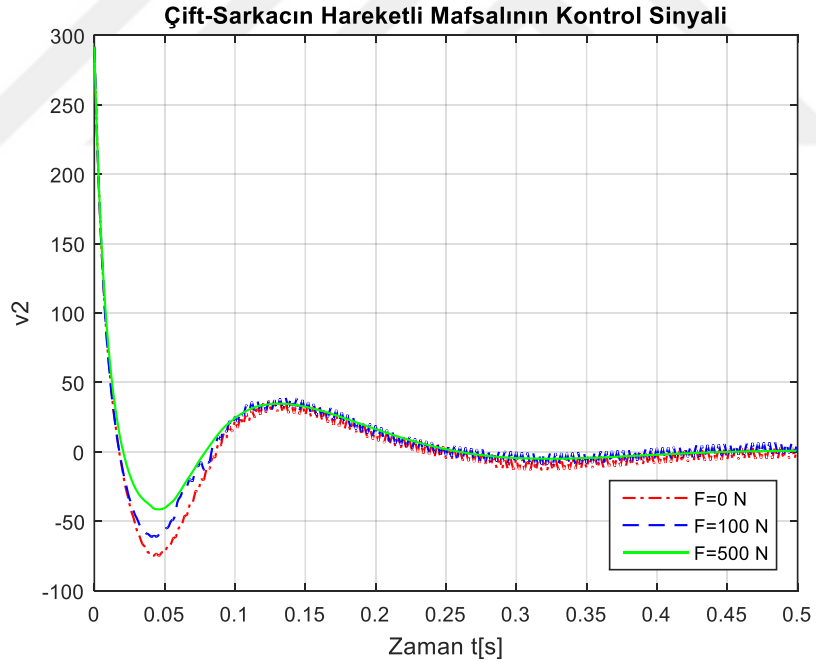
**Şekil 4.53.** Robotun hareketli mafsallının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

Şekil 4.52’ de görüldüğü gibi sabit mafsallı kontrol sinyali optimum kontrolcü parametrelerinin olduğu 500 N yüklü durumda en fazla -320 N.m olsa da diğer durumlarda -400 ve 400 N.m değerleri arasında salınım yapmaktadır. Benzer bir durum Şekil 4.53’ deki gibi hareketli mafsalda da görülmektedir. Kontrol sinyali 500 N yüklü durumda en fazla 350 N.m değerini görse de diğer durumlarda -420 N.m ve 420 N.m değerleri arasında salınım yapmaktadır.

Çift-sarkaç mekanizmasının yüklere bağlı olarak etkilenip etkilenmediğini gösteren kontrol sinyalleri Şekil 4.54 ve 4.55’ de verilmiştir.



Şekil 4.54. Çift-sarkacın sabit mafsalsının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)



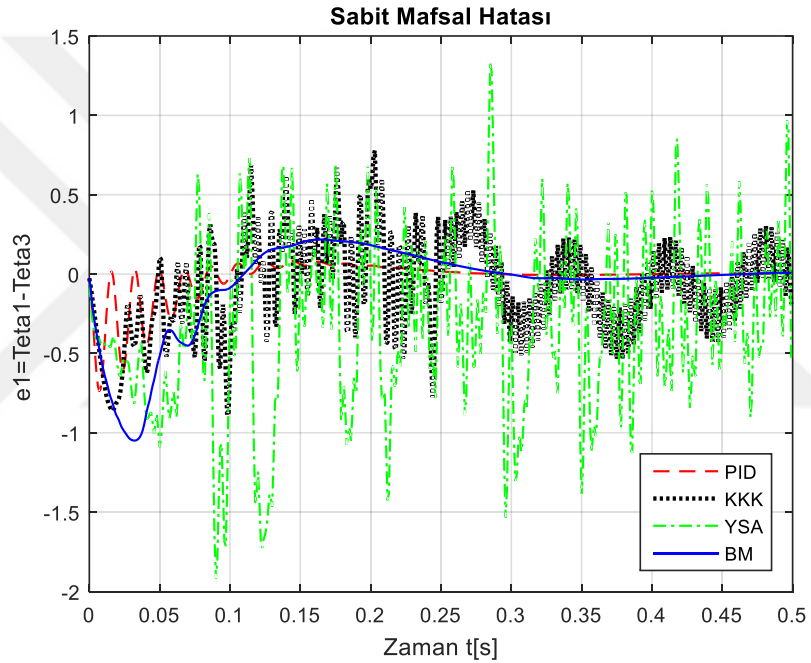
Şekil 4.55. Çift-sarkacın hareketli mafsalsının kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

Önceki bölümlerde uygulanan kontrol yöntemlerinde olduğu gibi BM kontrol yönteminde de robotun istenilen hareketi başarılı bir şekilde yerine getirdiği görülebilmektedir. Ancak bu kontrol yönteminde yüksüz durum ve 100 N yüklü durumlarda kontrol sinyallerinin KKK ve YSA da olduğu gibi maksimum değerlerde olduğu ve

kontrolcünün başarısının düşük olduğu görülmektedir. Ancak 500 N yük için BM kontrol yöntemi uygulandığında sistem cevaplarında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

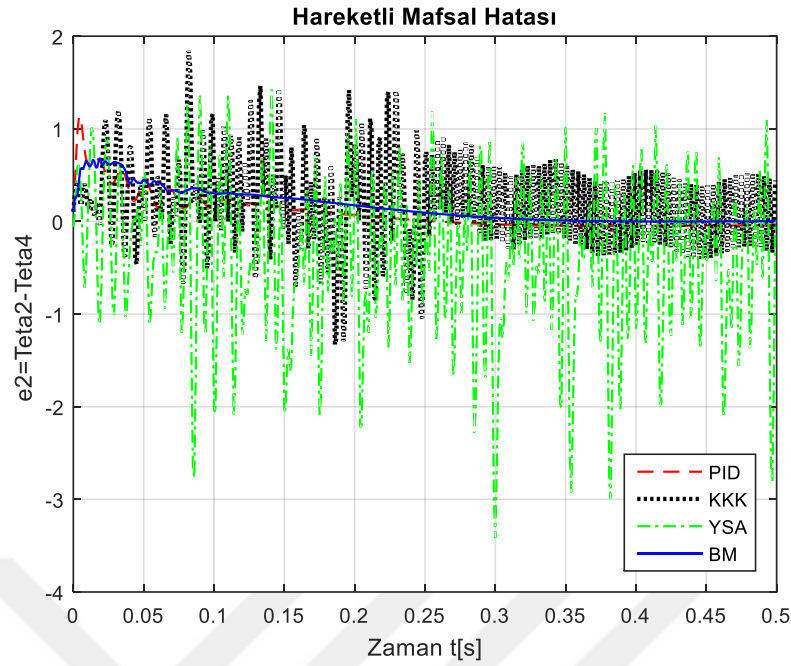
#### 4.2. Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması yapılacaktır. Bu karşılaştırılma yapılırken bütün kontrol yöntemlerinin 500 N yüke maruz kaldığı durumdaki cevapları karşılaştırılmıştır. Çünkü bütün kontrol yöntemlerinin parametreleri bu yük altında GA tarafından optimize edilmiştir. Mafsallarda oluşan hata grafikleri Şekil 4.56 ve 4.57’ de verilmiştir.



Şekil 4.56. Kontrol yöntemlerinin sabit mafsals hataları





Şekil 4.57. Kontrol yöntemlerinin hareketli mafsal hataları

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere bütün kontrol yöntemleri istenilen hareketleri çok az hatalarla gerçekleştirebilmişlerdir. Ancak KKK ve YSA kontrol yöntemlerinin detaylarının anlatıldığı bölümlerde bahsedildiği üzere bu iki kontrol yöntemlerinin uygulamasında çatırdama olayı yaşanmıştır. Çatırdama olayı yüzünden bu iki kontrol yönteminin başarılarında düşüşler görülmüştür.

Sabit mafsala ait grafiklerden derece cinsinden elde edilen ortalama ve en yüksek hata değerleri Tablo 4.10’ da, hareketli mafsala ait değerler de Tablo 4.11’ de verilmiştir.

Tablo 4.10. Sabit (kalça) ekleme ait hata değerleri

|                      | PID    | KKK    | YSA    | BM     |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Ortalama Hata</b> | 0.0214 | 0.0715 | 0.3343 | 0.0657 |
| <b>Maks. Hata</b>    | 0.7388 | 0.8908 | 1.9171 | 1.0492 |

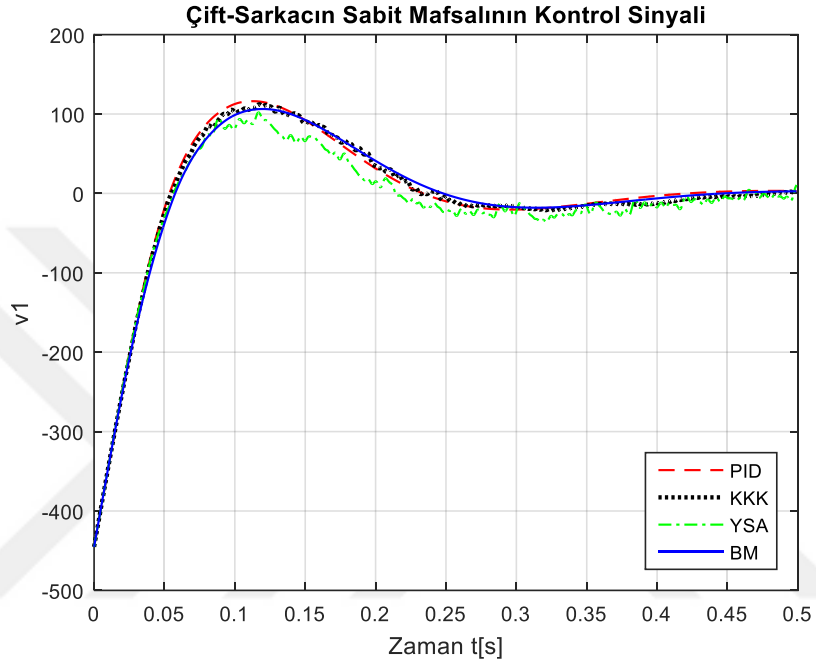
Tablo 4.11. Hareketli (diz) ekleme ait hata değerleri

|                      | PID    | KKK    | YSA    | BM     |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Ortalama Hata</b> | 0.0914 | 0.2270 | 0.3827 | 0.1627 |
| <b>Maks. Hata</b>    | 1.1294 | 1.8415 | 3.4141 | 0.6861 |

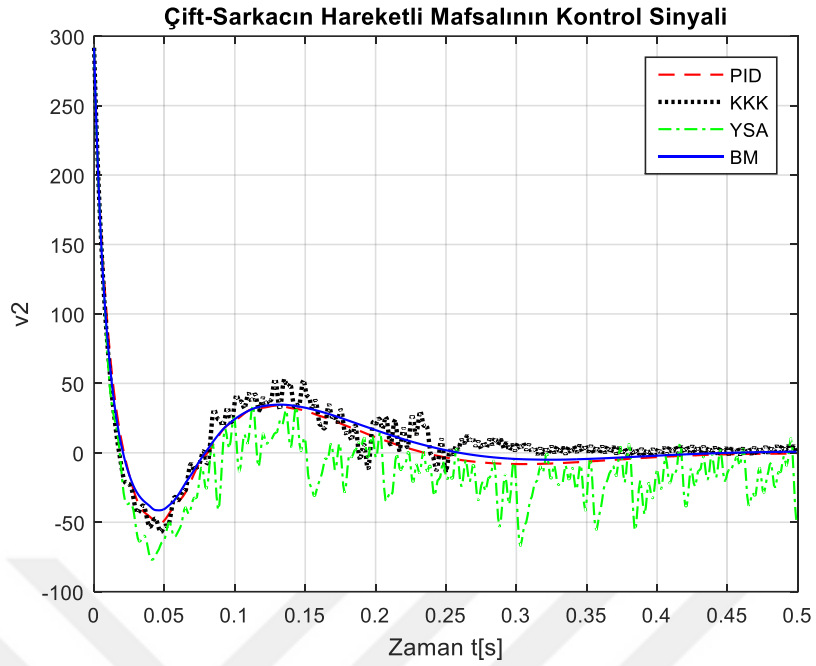


Tablo 4.10 ve 4.11’ de bulunan en büyük hata değerleri incelendiğinde sabit mafsalda PID kontrol yönteminin, hareketli mafsalda ise BM kontrol yönteminin daha başarılı olduğu söylenebilir. unk hatanın daha az olması, robotun çift-sarkacı (bacak) daha iyi takip ettiğini göstermektedir.

şekil 4.58 ve 4.59’ da mafsallara uygulanan kontrol sinyalleri gösterilmiştir.



şekil 4.58. Sabit mafsala uygulanan kontrol sinyalleri



**Şekil 4.59.** Hareketli mafsala uygulanan kontrol sinyalleri

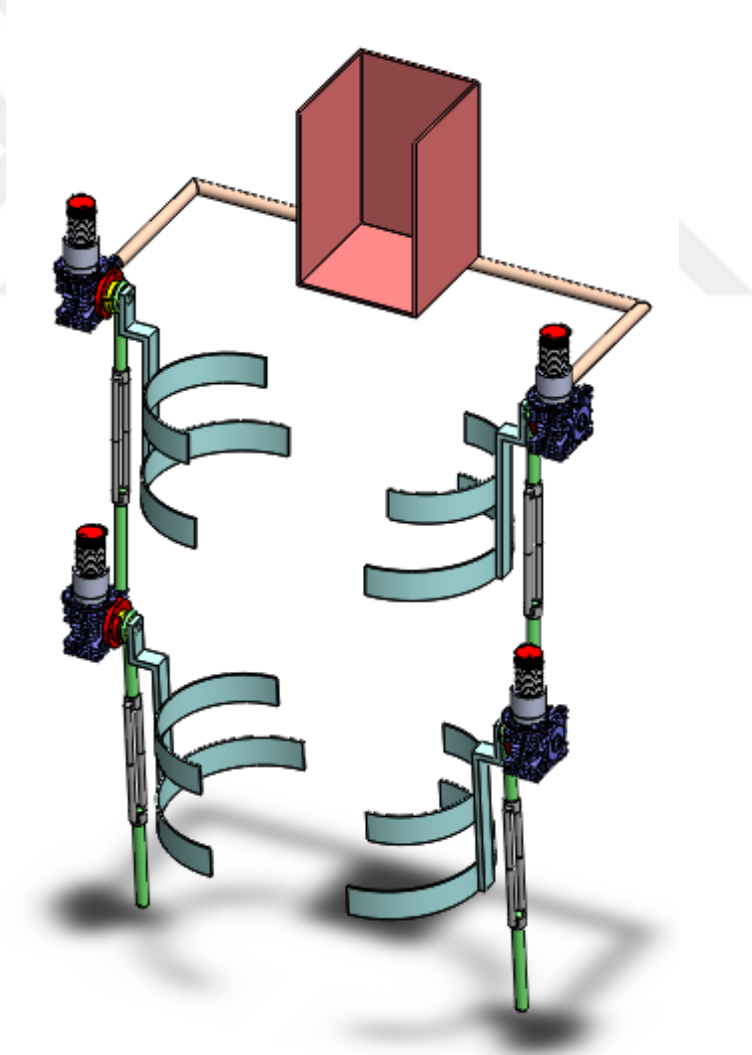
Şekil 4.58' de verilen sabit mafsala kontrol sinyallerinden anlaşılacağı üzere kontrol yöntemlerinin birbirlerinden çok da farklı bir kontrol sinyali uygulamadığı görülmektedir. Ancak Şekil 4.59' da verilen hareketli mafsala kontrol sinyalinde KKK ve YSA kontrol yöntemlerinin çatırdama durumları net bir şekilde görülmektedir.

## 5. DIŞ İSKELET ROBOT DENEY DÜZENEĞİNİN TASARIMI

Bu bölümde deney düzeneği tasarım aşamaları ve seçilen ürünlerle alakalı bilgilere yer verilmiştir.

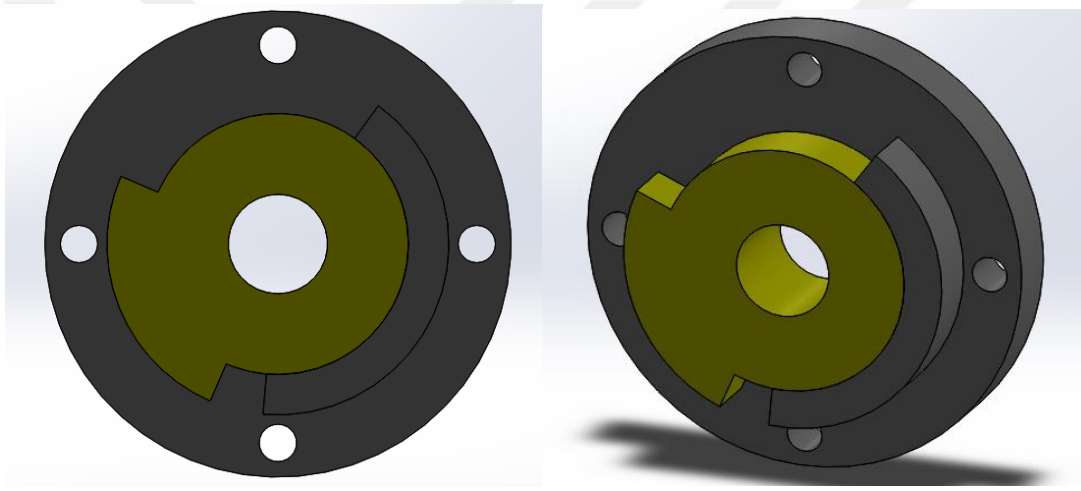
### 5.1. Mekanik Tasarım

Mekanik tasarım için gerekli olan hareket açıklığı (Chu, Kazerooni, & Zoss, 2005)' den alınmıştır. Bu hareket açıklığından kasıt kalça ve dizde bulunan mafsalların en fazla ne kadar hareket edebilecekleridir. Kalça mafsalı  $-10^0$  ile  $115^0$  arasında toplamda  $125^0$  lik, diz mafsalı ise  $5^0$  ile  $126^0$  arasında toplamda  $121^0$  lik bir hareket yapılabilmektedir. Yapılan tasarıma ait CAD çizimi Şekil 5.1' de verilmiştir.



Şekil 5.1. Prototip CAD tasarımı

Sistemde tahrik elemanı olarak elektrik motorlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Bilindiği üzere elektrik motorlarında herhangi bir sınırlayıcı etken yoktur. Elektrik motorlarının milleri aynı yönde defalarca dönebilirler. Elektronik olarak kontrol edilerek hareket ettirilmelerinin yanı sıra güvenlik amacıyla mekanik olarak sınırlama getirilmesi gerekmektedir. Çünkü tahrik elemanı olarak kullanılacakları mafsallardaki tork kapasiteleri insan vücuduna zarar verebilecek güçtedir. Elektronik kontrol mekanizmasının yanlış sinyal göndermesi vb. aksi bir durumda güvenlik amacıyla özel mekanik sınırlayıcılar tasarlanmıştır. Bu sınırlayıcılar ayrıca robotun hareket açıklığını içermektedir. Bu sayede robot istenilen hareket açıklığı dışına çıkmayacaktır. Robotun hareket açıklığını içeren mekanik sınırlama elemanları Şekil 5.2’ de verilmiştir.



Şekil 5.2. Mekanik sınırlama elemanı

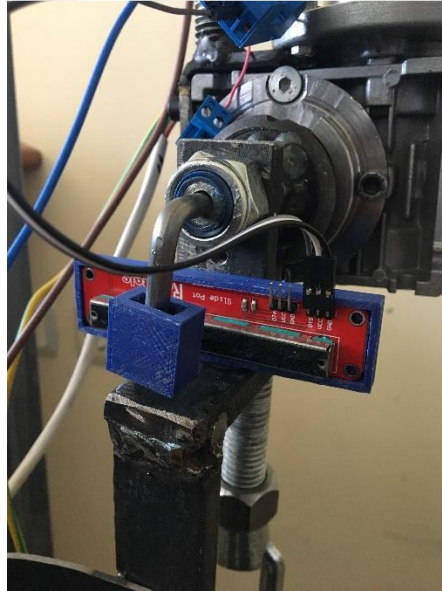
Robotun toplam taşıma kapasitesi 50 kg yüke göre belirlenmiştir. Konstrüksiyon, motorlar, bataryalar vb. ürünlerin ağırlığı 20 kg civarındadır. Dışarıdan taşınabilir toplam yükün de 30 kg olması yeterli görülmektedir. Bu yük ağırlığı arazi şartlarında askeri taşıma kapasitesine göre belirlenmiştir. Toplamda 50 kg yükü kaldırabilecek kapasitede tasarlanan robotun en büyük tork gereksinimi çömelme-kalkma hareketi esnasında gerçekleşmektedir. Bu esnada mafsallara yaklaşık olarak 200 N.m tork uygulanması gerekecektir. Bu kapasitede bir torka sahip olan elektrik motorları çok büyük ve ağırdır. Bu sebeple daha küçük gövdeli, yüksek güçlü ve hafif bir motor kullanılmasına karar verilmiştir. Ancak bu motorların da tork değerleri ancak redüktör ile istenilen seviyeye getirebilmektedir. Bu sebeple tasarım içerisinde her mafsalda iki adet birbirinden farklı özelliklerde redüktör kullanılmıştır. Kullanılan ilk redüktör 620 gr ağırlığında, 1/21 tahvil oranına sahip bir planet redüktördür.

İkinci redüktör ise hem redüksiyon hem de yön değişimi için kullanılan 1/60 tahvil oranlı 1 kg ağırlığındaki bir sonsuz vida redüktördür.

Motor direkt olarak planet redüktöre monte edilmiştir. Planet redüktörün çıkış mili ise sonsuz vida redüktörün giriş bölümüne montajlanmıştır. Böylece hem motorlar uzuvlara paralel hale getirilmiş hem de istenilen tork değerleri elde edilmiştir.

Tibia ve femur uzuvlarının yerine geçen mekanik uzuvlar için de gerdirme mekanizmaları kullanılmıştır. Bu mekanizma aslında 3 parçadan meydana gelmektedir. Orta bölümde sabit uzunlukta olan ve her iki ucuna diş açılmış bir parça bulunmaktadır. Bu iki uca cıvataya benzer şekilde M18 dişli sahip birer parça monte edilmektedir. Parça üzerindeki dişlerin açılma yönleri birbirlerinin tersidir. Bu sebeple uçlarda bulunan cıvata benzeri sabit tutulup orta bölüm kendi ekseninde bir yöne döndürüldüğünde toplam boy uzamakta, diğer yöne döndürüldüğünde de kısalmaktadır. Bu özelliği ile uzuvların boyutlarını çok kısa bir sürede ayarlamaya imkân tanımaktadır. Kullanılan bu mekanizma ile uzuv boyutları 53 cm ile 33 cm arasında değişkenlik gösterebilmektedir.

LP' nin değerinin alınması için gerçekleştirilen bağlantı elemanı Şekil 5.3' de verilmiştir.



Şekil 5.3. Lineer potansiyometre bağlantı elemanları

Şekil 5.3' de görüldüğü gibi mafsaldaki dönel hareket LP aktarılmaya çalışılmıştır. LP bacak bağlantı aparatına sabitlenmiştir. Robot hareket miline eş merkezli olarak iç kısmına monte edilen dik açılı bir parça, özel tasarlanmış bir bağlantı aparatı ile LP' ye bağlanmıştır. Robot uzvu sabit iken bacak bağlantı aparatı hareket haline geçtiği zaman doğal olarak LP

de hareket etmeye başlayacaktır. Ancak robot miline sabitlenmiş parça ile LP tutamacı hareketsiz kalacağından arada oluşan açısal farklılık direk olarak LP' den okunan değerde de değişimlere sebep olacaktır.

## 5.2. Elektronik Tasarım

Elektronik tasarım aşamasında öncelikle motor seçimi yapılmıştır. Robotun mobil olarak çalışması gerektiği için en uygun gerilim şeklinin DC gerilim olduğu düşünülmüştür. Bu sebeple DC gerilimle çalışabilecek mümkün olduğunca küçük ancak güçlü bir motor seçimi yapılmasına çalışılmıştır. Standart DC motor özellikleri incelendiği zaman yeterince güçlü olmadıkları kanısına varılmıştır. İstenilen tork değerlerini sağlayan motorlar ise çok büyük gövdeye ve ağırlığa sahiptirler. Bu sebeple en verimli motor tiplerinden biri olan ve son zamanlarda sıkça kullanılmaya başlanan Fırçasız DC motor kullanılmasına karar verilmiştir. Bu motor tipinde fırça ve kollektör bulunmadığı için bu ismi almıştır. Fırçasız (Brushless) kelimesinin kısaltmasından kaynaklı olarak BLDC olarak adlandırılırlar. Rotor kısmında çok güçlü doğal mıknatıslar kullanılmaktadır. Stator ise bobinli sargılardan oluşmaktadır. BLDC motor

**Tablo 5.1.** BLDC motor avantaj ve dezavantajları

| <b>BLDC Motor Avantajları</b>                                                  | <b>BLDC Motor Dezavantajları</b>                         |
|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Yüksek verimlidir.                                                             | Harici elektronik kontrol ünitesine ihtiyaç duymaktadır. |
| Tork-Hız ilişkisi doğrusaldır.                                                 | Konum bilgisi olmadan uygun çalışamaz.                   |
| Sessiz çalışma özelliğine sahiptir.                                            | Maliyeti yüksek bir sistemdir.                           |
| Yüksek tork-hacim gereksinimine sahiptir.<br>(Daha az sargı kullanılmaktadır.) |                                                          |
| Fırça ve kollektör içermez. (Çok daha az bakım ihtiyacı duymaktadır.)          |                                                          |
| Yüksek tork özelliğine sahiptir.                                               |                                                          |

Tablo 5.1' de verilen avantajları nedeniyle BLDC motor kullanılmasına karar verilmiştir. Redüktörlerin çıkışındaki tork gereksinimini sağlayacak motor torku 1 N.m olarak hesaplanmıştır. Küçük gövdeli ve hafif olarak bu tork değerini sağlayacak motor olarak Şekil 90' da gösterilen DT38 620kV Turnigy Hotliner BLDC Motor kullanılmıştır.

BLDC motorun nominal çalışma gerilimi 18.5 V olduğu için bütün sistemin gerilimini sağlamak amacıyla 8 adet 18.5 V (5S) gerilime sahip Lityum-İyon Polimer (Li-Po) batarya alınmıştır. Bu bataryalar 6000 mAh kapasiteye ve 675 gr ağırlığa sahiptirler. Ayrıca anlık akım çekme değerleri ise 40 C' dir. Bütün bataryalar birbirlerine paralel şekilde bağlanmıştır.

BLDC motor dezavantajları içerisinde de belirtildiği üzere harici bir kontrol ünitesi ihtiyacı bulunmaktadır. Endüstride bu motorları sürmek için birçok sürücü bulunmaktadır ancak bunlar profesyonel kullanım amacı ile üretilmiştir. Hem çok yüksek maliyete hem de yüksek boyutlara sahip oldukları için bu proje içerisinde kullanılamayacaktır. Ayrıca bu profesyonel sürücüler Hall-sensörü (konum bilgisi) olmadan çalıştırılmaları mümkün olmayan sürücülerdir. Motor üzerinde de bu sensörlerden bulunmadığı için bu motor tipi için özel üretilmiş olan Electronic Speed Control (ESC) yani elektronik hız kontrol adı verilen sürücüler kullanılmaktadır. Bu sürücüler Hall-sensörleri olmadan, bütün sargılara ilk olarak belirli bir seviyede akım göndererek rotor ilk konumunu belirler ve motoru sürme işlemini başlatırlar. Motoru sürmek için HobbyKing X-Car Beast Series ESC 120A kullanılmıştır.

Kullanılan ESC özellikle model arabaların motorlarını sürmek için tasarlanmıştır. Bu ESC' yi kontrol etmek için 50 Hz frekansa 3.3 V genliğe sahip bir Pulse Width Modulation (PWM) sinyali uygulamak gerekmektedir. ESC' nin hız kontrolü uygulanacak olan bu PWM sinyali ile gerçekleştirilmektedir. Öncelikle dur konumu olarak %7.5 doluluk oranında PWM sinyali verilerek rotor konumu belirlenir. 3 saniye süren konum belirleme işleminden sonra doluluk oranı %5-%7.5 arasında PWM verildiğinde saat ibreleri yönünde (SİY), %7.5-%10 arasında PWM sinyali verildiğinde ise saat ibreleri ters yönünde (SİTY) motorun hareketi sağlanır. Motor mili %5 doluluk oranı ile SİY, %10 doluluk oranı ile SİTY max. hıza ulaşmaktadır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan ESC' nin çok büyük bir dezavantajı bulunmaktadır. Motor mili Sİ yönünde dönüyorken diğer yöne dönüşü sağlamak için dur konumu olan %7.5 doluluk oranındaki PWM sinyali 2 saniye boyunca uygulanmak zorundadır. Motor yönünün değişmesi işleminin 2 saniye gibi uzun bir sürede olması deneyisel uygulamanın gerçekleşmesi açısından uygun değildir. Çünkü yürüyüş veya benzer bir hareket esnasında motorun bacak hareketini takip edebilmesi için anlık yön değiştirmeleri başarı ile yapılmalıdır. Bu nedenle motorun devir yönünü değiştirmek için ESC ile uyumlu olarak

çalışacak bir elektronik devre tasarlanarak kullanılmıştır. Ek-11, Şekil 7’ de gösterilen elektronik devre ile güç elektroniği anahtarı olan Triyak kullanılarak motorun herhangi iki fazının yerleri değiştirilerek motorun devir yönü değiştirilmiştir.

Her ne kadar motor ve ESC DC bir güç kaynağı ile beslense de motora giden güç kablolarından alternatif akıma benzer şekilde gerilim uygulanmaktadır. Bu sebeple güç kablolarının yerini değiştirmek için kullanılacak olan anahtarlama elemanının da alternatif akımda çalışabilir bir özellikte olması gerekmektedir. Bu işlemi yerine getirebilecek olan en uygun anahtarlama elemanı triyaktır. Triyak, güç elektroniğinde kullanılan ve tristörün daha gelişmiş yapısına sahip olan bir anahtarlama elemanıdır. Çift yönlü akım geçirebilen yarı iletken bir devre elemanıdır. İç yapısında ters bağlı kristaller bulunmaktadır.

Triyak’ ın gate ucu AC olarak tetiklendiği takdirde iki yönlü akım geçirebilmektedir. Eğer gate ucu DC olarak tetiklenir ise tristör gibi çalışmaktadır. Bu çalışma içerisinde triyakın istenilen şekilde çalıştırılabilmesi için gate ucunun alternatif olarak tetiklenmesi gerekmektedir. Triyakın gate ucunun AC olarak tetiklenmesi gereksinimi yeni bir problemi ortaya çıkarmaktadır. Bilindiği üzere kontrol kartlarının dijital çıkışları DC gerilim vermektedir. Bu sebeple triyak kontrol kartı üzerinden doğrudan kontrol edilmeye çalışırsa tristör gibi davranacağından ters yönlü akımı iletmez duruma gelecektir. Bu problemi ortadan kaldırmak için triyak çıkışlı bir optokuplör olan ve MOC3021 Triyak çıkışlı optokuplör kullanılmıştır. Bu optokuplörün aktif hale gelmesi için 1. ve 2. bacakları arasında DC olarak 3.3 V’ luk bir gerilim verilmesi yeterlidir. Bu sayede 4. ve 6. bacakları arasından geçen bütün AC akımları geçirebilmektedir.

Yukarıda bilgileri verilen ürünler ile motorların hız ayarları ve yön değiştirme işlemleri yapılabilmektedir. Ancak bu işlemler yapılırken robotun bacak hareketlerini takip etmesi için gerekli olan kontrol sinyallerinin yani PWM doluluk oranlarının ve yön bilgilerinin denetlenmesi için bir kontrol kartı kullanılması gerekmektedir. Bu çalışma içerisinde kontrol kartı olarak Arduino Mega 2560 kontrol kartı kullanılmıştır.

Bu kontrol kartı içerisine gömülebilen algoritmaları bilgisayardan bağımsız olarak çalıştırabilmektedir. Simülasyon çalışmaları içerisinde başarıları ortaya koyulmuş olan kontrol yöntemleri MATLAB/Simulink içerisinde modellenerek kontrol kartlarının içerisine gömülmüştür.



Arduino Mega 2560 kontrol kartı özellikleri içerisinde belirtildiği üzere PWM çıkış frekansı 490 ve 980 Hz olarak ayarlanmıştır. Programlama içerisinde bu frekans değerlerinin değiştirilebilmesi söz konusu değildir. Ancak ESC' nin kontrolü için gerekli olan Servo sinyallerinin 50 Hz frekansa sahip olması ve bu sinyalin doluluk oranının %1'in de altında küçük değişimlerle kontrol edilme gerekliliği düşünüldüğünde bunun Arduino kartı ile gerçekleştirilmesinin mümkün olmadığı anlaşılmaktadır. Bu uyumsuzluğu ortadan kaldırmak için Arduino Mega 2560 kontrol kartından alınan 490 Hz' lik PWM sinyallerini gerekli olan 50 Hz' lik PWM sinyallerine çevirip ESC' ye iletmek amacıyla XILINX Spartan-3 FPGA kartı kullanılmıştır.

FPGA kartının tek işlevi her eklem için kullanılan toplamda 4 adet Arduino Mega 2560 kontrol kartlarının 490 Hz frekanslı PWM çıkışlarını alarak ihtiyaç duyulan 50 Hz Servo sinyallerine çevirmektir. FPGA çıkışından verilen 50 Hz frekanslı Servo sinyalleri de her bir ESC' ye iletilerek motorların hızlarının ayarlanması sağlanmaktadır. Bu işlemin sağlanması için yazılan algoritma Ek-2' de sunulmuştur.

Bütün sistemin genel gerilimi yukarıda da belirtildiği üzere 18,5 V' dir. Ancak Arduino Mega 2560 kontrol kartları 12 V, FPGA kartı ise 5 V gerilimlerle çalışmaktadırlar. Bu sebeple 18,5 V gerilimin 5 ve 12 V' a düşürülmesi için 2 adet voltaj regülatörü kullanılmıştır. Arduinolar için LM7812 Sabit Güç Regülatörü kullanılmıştır. LM7812, 15-35 V arasındaki herhangi bir giriş gerilimini sabit 12 V çıkış gerilimine dönüştürülür. Çıkış akımı ise 0,5 A' dir.

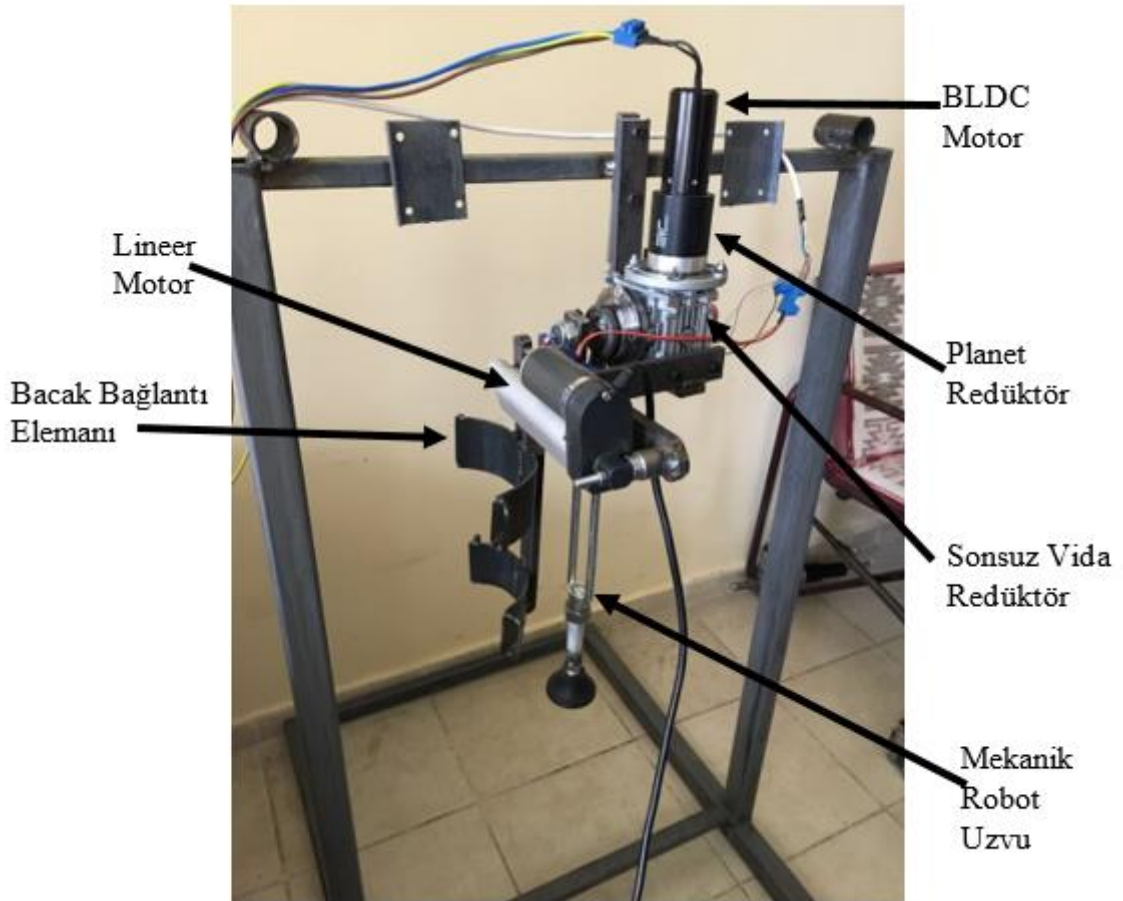
FPGA çalışma akımı 2,5 A üstünde olduğu için farklı bir voltaj regülatörünün kullanılması gerekmiştir. Bu nedenle 5 A çıkış gücüne sahip olan XL4005 DC- DC Gerilim Düşürücü Devresi kullanılmıştır. XL4005 dönüştürücünün giriş gerilimi DC 4 V-38 V arasındadır. Girişten verilen gerilimi DC 1.25 V-32 V arasında istenilen bir gerilimle dönüştürmektedir.

Robotun en önemli elemanlarından birisi mafsallarda oluşan hata değerlerini elde etmek için kullanılan lineer potansiyometredir. Robotun bütün mafsallarında 10 kOhm direnç değerine sahip LP kullanılmıştır. Toplam hareket uzunluğu 8 cm olan bu potansiyometre 0,078 mm hassasiyetle çalışabilmektedir.

Robotun hareketinin kaydedilmesi için robotun hareket mili içerisine yerleştirilen bir potansiyometre yardımı ile robotun bütün hareketlerinin kaydedilmesi sağlanmıştır.

### 5.3. Deneysel Sonuçlar

Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, tasarlanan robotun amacı bacağın herhangi bir hareketini takip etmesidir. Robotun farklı kontrol yöntemlerine karşılık gelen performans verilerini alabilmek için giriş olarak tanımlanan hareketin sürekli olarak aynı olması gerekmektedir. İnsan bacağının hareket ettirme yoluyla sürekli aynı hareketi aynı hızda yapmak mümkün olmadığı için bacağın hareketi yerine geçecek şekilde standart ve sürekli aynı olan bir girişe ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple bacağın bağlantı elemanına bir lineer motor monte edilmiş ve bu motor yardımıyla bacak bağlantı elemanı hareket ettirilmiştir. Bu lineer motorun hareketi sürekli aynı olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece bütün kontrol yöntemlerinin robot üzerindeki etkileri karşılaştırılırken giriş olarak verilen hareket aynı olacaktır. Tasarımı tamamlanmış olan deney düzeneği Şekil 5.4’ de gösterildiği gibidir.



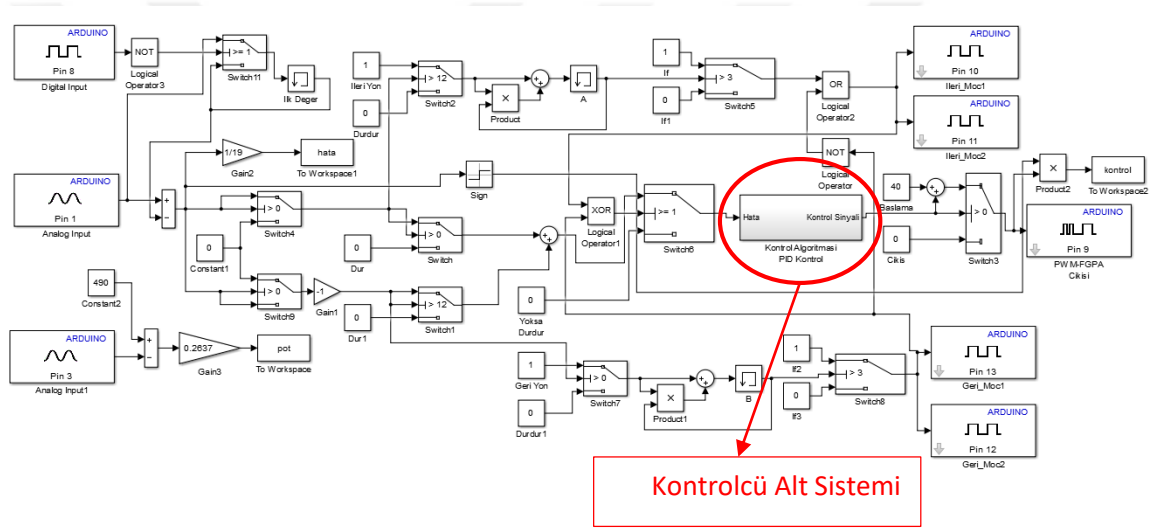
Şekil 5.4. Deney düzeneği

Sisteme eklenen lineer motor 12-24 V gerilimle çalışmaktadır. Ayrıca 100 mm strok ve 6 mm/saniye hıza sahiptir. Lineer motorun sürekli olarak standart hareketi yerine getirilmesi

Arduino Due içine gömülü bir program kullanılmıştır. Lineer motoru kontrol edebilmek için kullanılan sürücü ise yine Arduino firmasının BTS7960B 20 Amper motor sürücü devresidir.

Lineer motorun sabit hareketi için giriş olarak bir sinüs dalgası uygulanmıştır. Bu sinüs dalgasının genliği 1,5, frekansı ise 0,7 rad/sn olarak belirlenmiştir.

Deneyisel sonuçlar elde edilirken bir önceki bölümde de bahsedildiği gibi kontrol yöntemlerinin algoritmaları MATLAB/Simulink programı yardımıyla yapılmıştır. Yazılan bu algoritma her kontrol yöntemi için aynıdır, sadece kontrolcü alt sistemi üzerinde değişiklik yapılarak kontrolcü çeşitliliği sağlanmıştır. Kontrol algoritmasının olduğu Simulink Modeli Şekil 5.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. MATLAB/Simulink’ te oluşturulan kontrol algoritması

Deneyisel sonuçlar 5 farklı durum için ortaya çıkarılmıştır. Uygulanan bu durumlar için parametreler Tablo 5.2’ de verilmiştir.

Tablo 5.2. Deneyisel uygulama parametre değerleri

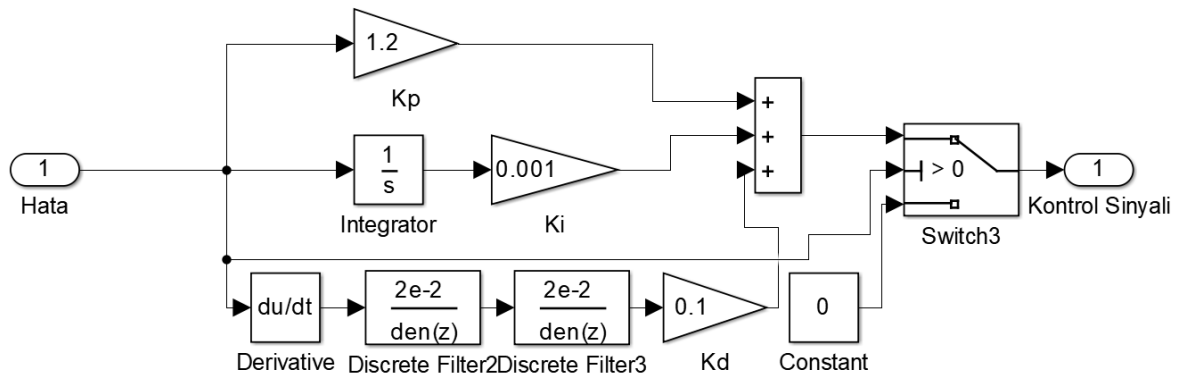
| Durum Numarası | Uzva Etki Eden Yük Miktarı (N) | Uzuv Boyu (cm) |
|----------------|--------------------------------|----------------|
| 1              | Yüksüz                         | 50             |
| 2              | 25                             | 50             |
| 3              | 75                             | 50             |
| 4              | 25                             | 45             |
| 5              | 75                             | 45             |

### 5.3.1. Dış İskelet Robot Deney Düzenegine Uygulanan Kontrol Yöntemleri

Bu bölümde deneysel uygulamada kullanılan kontrol yöntemlerinin tanıtımı ve kontrolcü parametrelerinin aldığı değerler deneme yanılma tekniği kullanılarak ortaya koyulmuştur. Benzetim çalışmaları içerisinde kullanılan tüm kontrol yönteminin parametreleri GA yöntemi ile hesaplanmıştı. Ancak deneysel çalışmalarda, YSA kontrol yönteminde, kontrolcünün sahip olduğu parametrelerin karmaşıklığı ve sayıca fazla olması deneme yanılma tekniğinin uygulanmasını imkânsız hale getirmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmalarda YSA kontrol yöntemi uygulanmamıştır.

#### 5.3.1.1. PID Kontrol Yöntemi

Benzetim çalışmalarında en başarılı yöntemlerinden biri olan PID kontrol yöntemi deneysel çalışma için uygulanmıştır. Deneysel çalışma içerisinde kullanılan PID kontrol yöntemine ait MATLAB/Simulink modeli Şekil 5.6’ da verilmiştir.



Şekil 5.6. PID kontrol Simulink modeli

Simulink modelinde de görüldüğü gibi sisteme PID kontrol yöntemi uygulanırken kontrolcü parametreleri olarak  $K_p=1,2$ ,  $K_i=0,001$  ve  $K_d=0,1$  değerleri kullanılmıştır.

#### 5.3.1.2. KKK Yöntemi

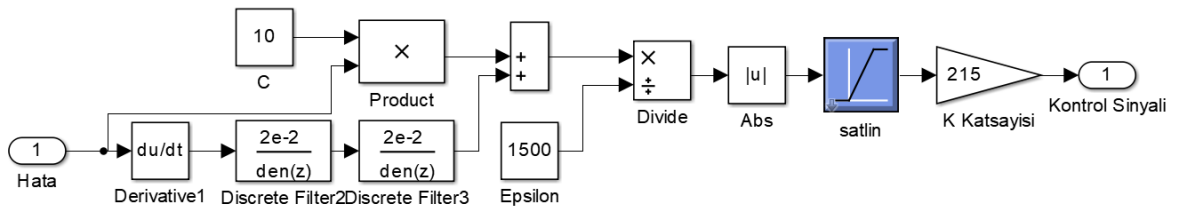
Benzetim uygulamaları içerisinde, KKK kontrol yönteminin başarısının düşük olmasına sebep olan çatırdama olayından bahsedilmiştir. Önceden de belirtildiği gibi bu çatırdama olayı pratikte uygulanabilir olmadığından deneysel uygulama içerisinde engellenmesi

gereken bir durumdur. Bu durumu ortadan kaldırmak amacıyla KKK yönteminde işaret (signum) fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonu sisteme eklenmiştir. Saturasyon fonksiyonu sisteme eklendiğinde kontrol sinyali sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutma yerine kalınlığı  $\varepsilon$  olan ince bir sınır tabaka içerisinde tutmaya çalışır. Çatırdamayı ortadan kaldırmak için uygulanan saturasyon fonksiyonu

$$sat(s) = \begin{cases} s & s > \varepsilon \\ -\varepsilon & s < -\varepsilon \\ s/\varepsilon & -\varepsilon < s < \varepsilon \end{cases} \quad (5.1)$$

şeklinde tamamlanmaktadır.

Deneysel çalışma içerisinde kullanılan PID kontrol yöntemine ait MATLAB/Simulink modeli Şekil 5.7’ de verilmiştir.



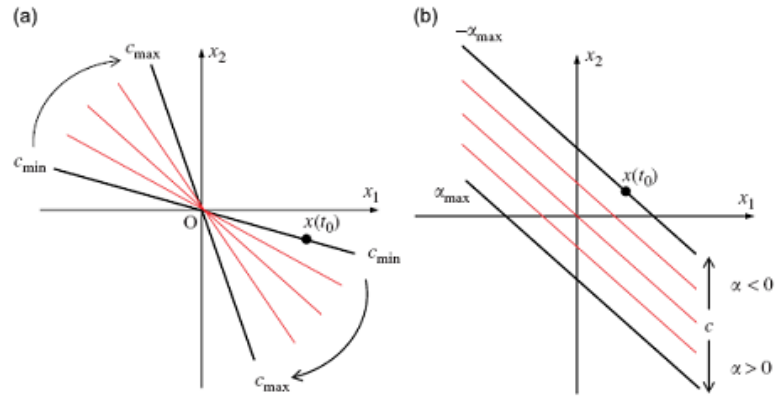
Şekil 5.7. KKK Simulink modeli

Şekil 5.7’ de görüldüğü gibi sisteme KKK yöntemi uygulanırken kontrolcü parametreleri olarak  $K=215$ ,  $\varepsilon=1500$  ve  $c=10$  değerleri kullanılmıştır.

### 5.3.1.3. Hareketli KKK Yöntemi

Geleneksel KKK yönteminde  $c$  katsayısı sabit bir değer olarak alınır. Ancak alınan bu değer optimum değer olup olmadığı bilinmemektedir. Kayma yüzeyine ulaşma zamanı ve kayma yüzeyi üzerindeki yakınsama hızını arttırmak için  $c$  katsayısının duruma göre değişkenlik göstermesi hareketli KKK (HKKK) yönteminin anahtar özelliğidir (Choi & Park, 1994).

İki çeşit hareketli kayma yüzeyi bulunmaktadır. Şekil 5.8’ de hareketli kayma yüzeyi gösterimleri verilmiştir.

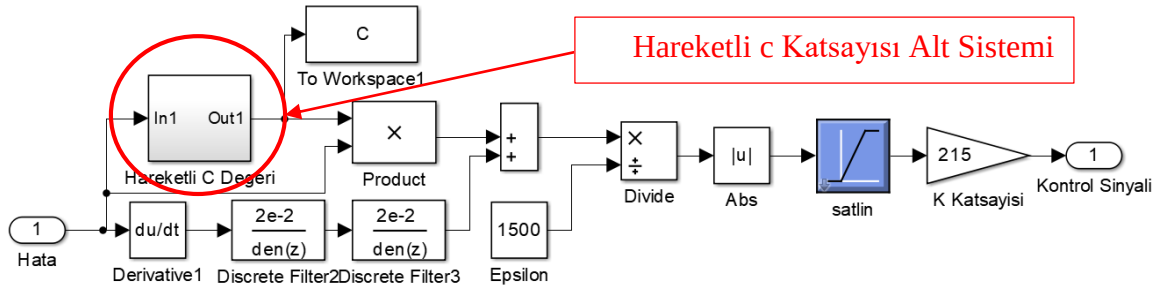


Şekil 5.8. Hareketli kayma yüzeyi a) dönme yapan b) öteleme yapan

Bu çalışma içerisinde dönme yapan kayma yüzeyi kullanılmıştır. Dönme yapan kayma yüzeyinin eğimi yani  $c$  katsayısı,

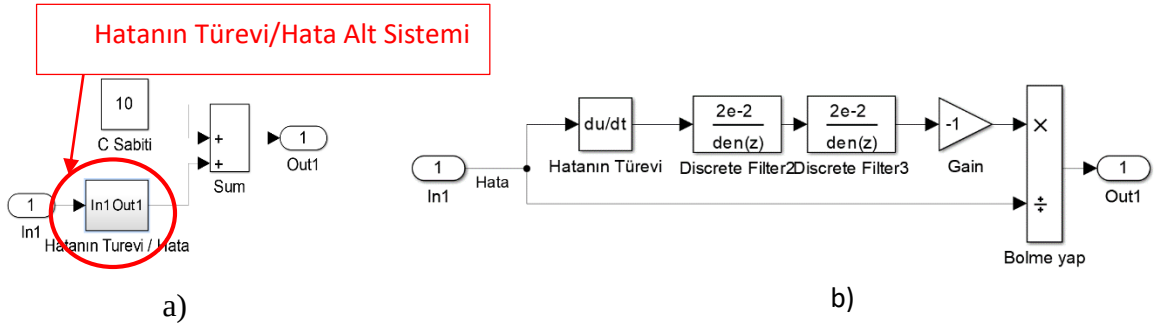
$$c(t) = c_0 - \left( \frac{e_2(t)}{e_1(t)} \right) \quad (5.2)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Aslında  $e_2(t)/e_1(t)$  oranı herhangi bir  $t$  anında  $s(t) = 0$  kayma yüzeyini sağlayan eğim yani  $c$  katsayısı anlamına gelmektedir. Eğimin her hata değeri için sürekli olarak hesaplanması kontrolcünün başarısını arttırmaktadır.



Şekil 5.9. HKKK Simulink modeli

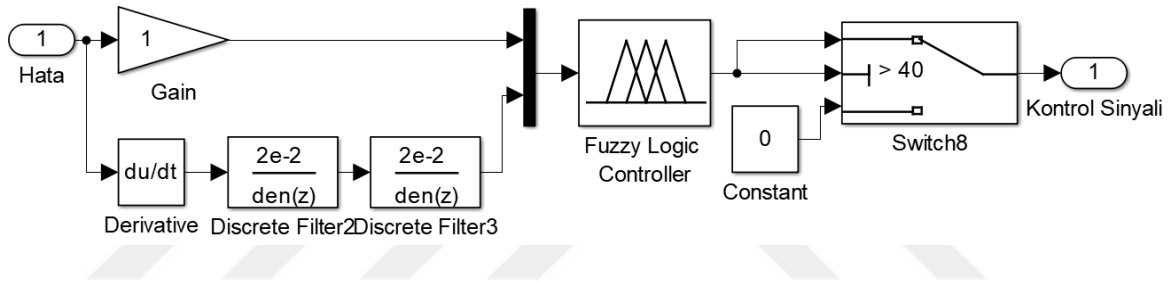
Şekil 5.9' da HKKK yönteminin MATLAB/Simulink modeli gösterilmiştir. KKK' den farklı olarak her hata için hesaplanan  $c$  değerinin modeli ise Şekil 5.10' da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. a) Hareketli c katsayısı alt sistemi b) hatanın türevi/hata alt sistemi

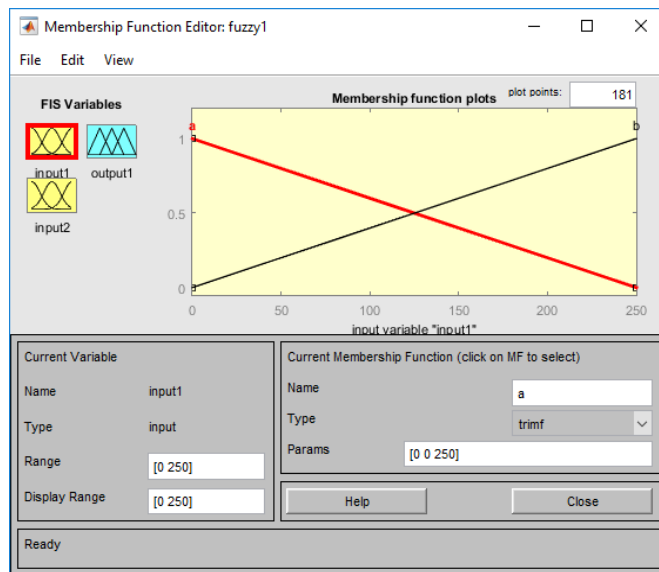
#### 5.3.1.4. Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol Yöntemi

Deneysel uygulamalar için kullanılan son kontrol yöntemi BM kontrol yöntemidir. BM kontrol yönteminin MATLAB/Simulink modeli Şekil 5.11’ de verilmiştir.

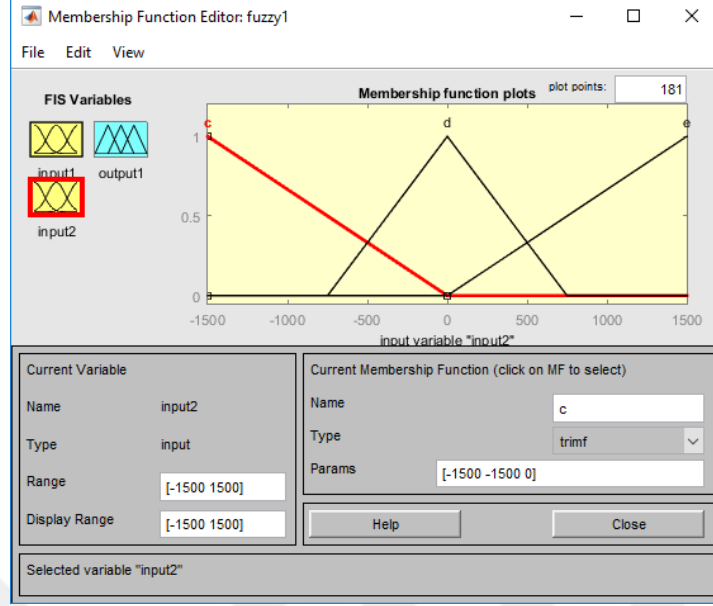


Şekil 5.11. BM Simulink modeli

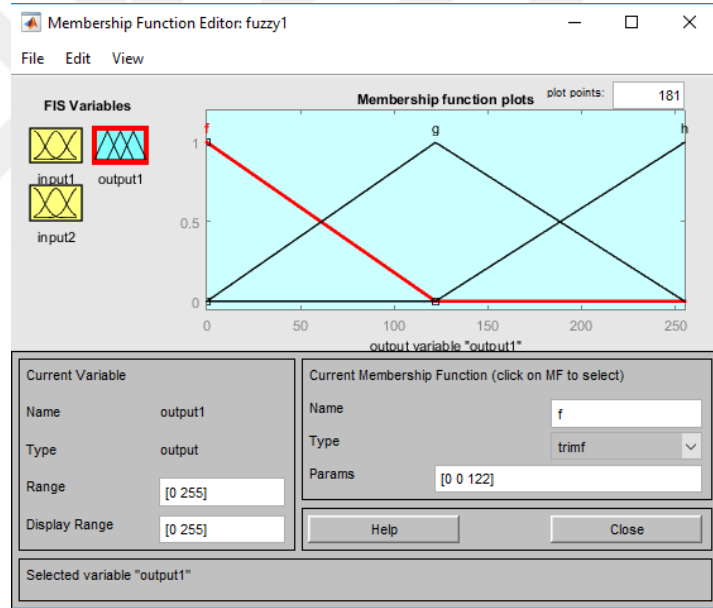
BM kontrol yöntemi içerisinde kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.12, 5.13 ve 5.14’ de verilmiştir.



Şekil 5.12. Hata değerinin üyelik fonksiyonu



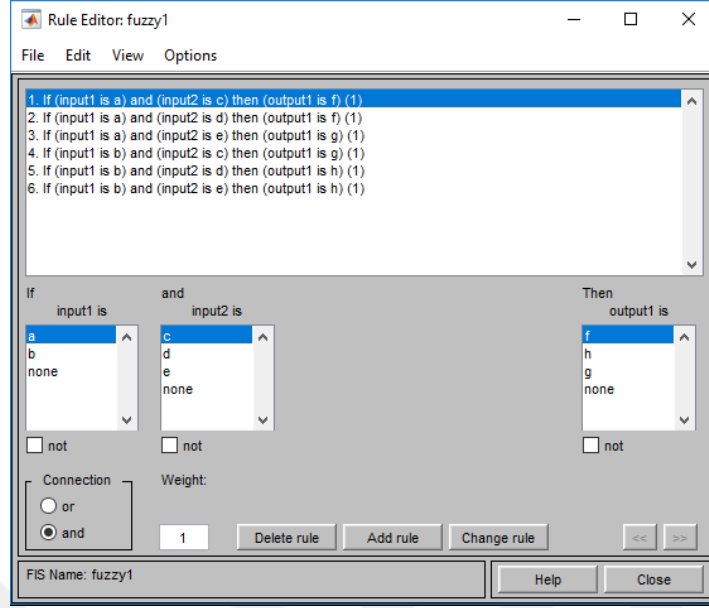
Şekil 5.13. Hatanın türevinin üyelik fonksiyonu



Şekil 5.14. Çıkışın üyelik fonksiyonu

BM kontrol yöntemi içerisinde kullanılan kural listesi Şekil 5.15' de verilmiştir.



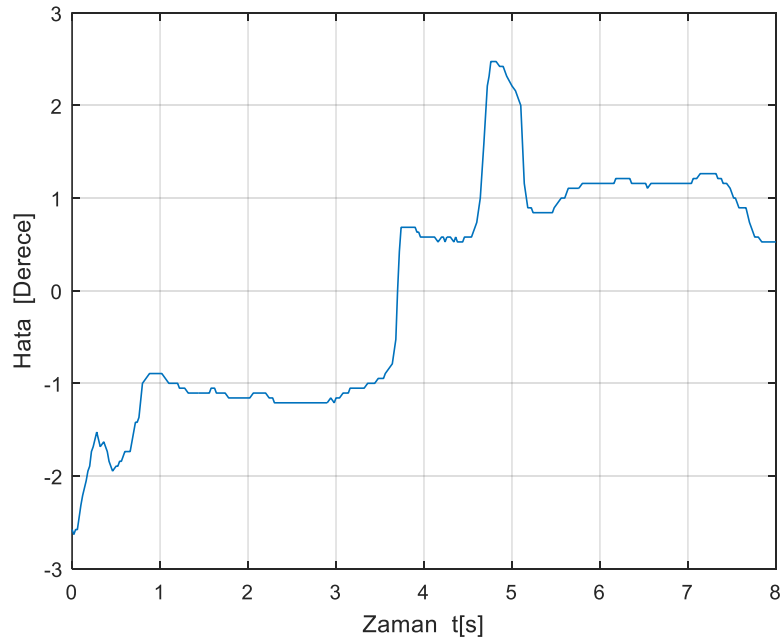


Şekil 5.15. BM kural listesi

### 5.3.2. 1. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Bu uygulamada uzva eklenen herhangi bir yük bulunmamaktadır. Uzun boyu olabilecek en büyük seçenek olan 50 cm' ye ayarlanmıştır.

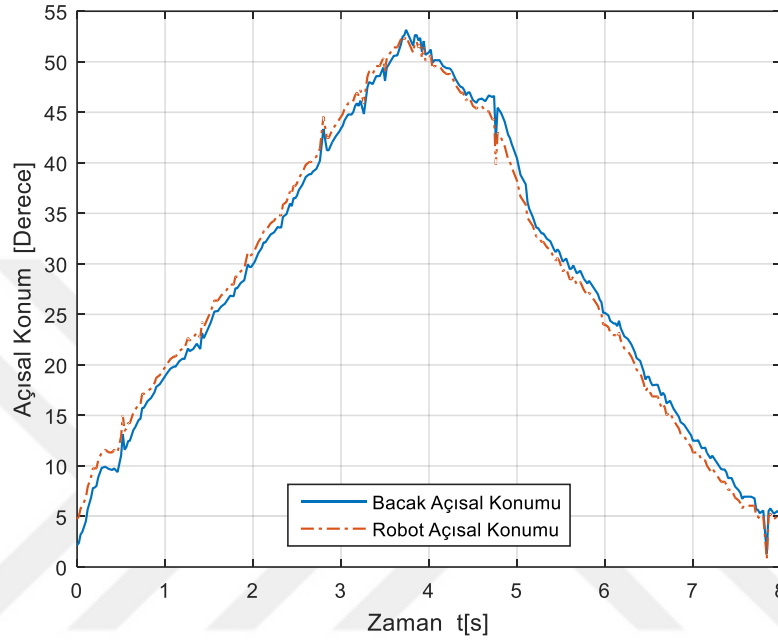
PID kontrol uygulanması sonucunda LP' den elde edilen hata değerleri Şekil 5.16' da verilmiştir.



Şekil 5.16. 1. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi)

Şekil 5.16’ da verilen PID kontrol yöntemi uygulandığı sırada ortaya çıkan en yüksek hata değeri  $2,63^0$  olarak ortaya çıkmıştır.

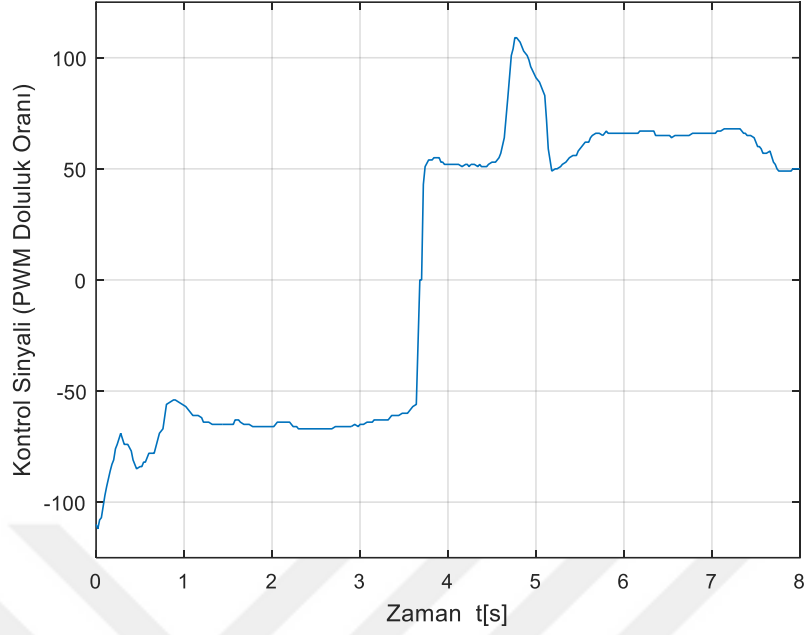
Şekil 5.17’ de ise PID kontrol uygulandığında robot ve bacağın konumlarının grafiği verilmiştir.



Şekil 5.17. 1. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi)

Şekil 5.17’ de görüldüğü gibi deneysel sonuçta da PID kontrol yöntemi ile bacağın hareketlerinin başarılı bir şekilde izlenmesi sağlanmıştır.

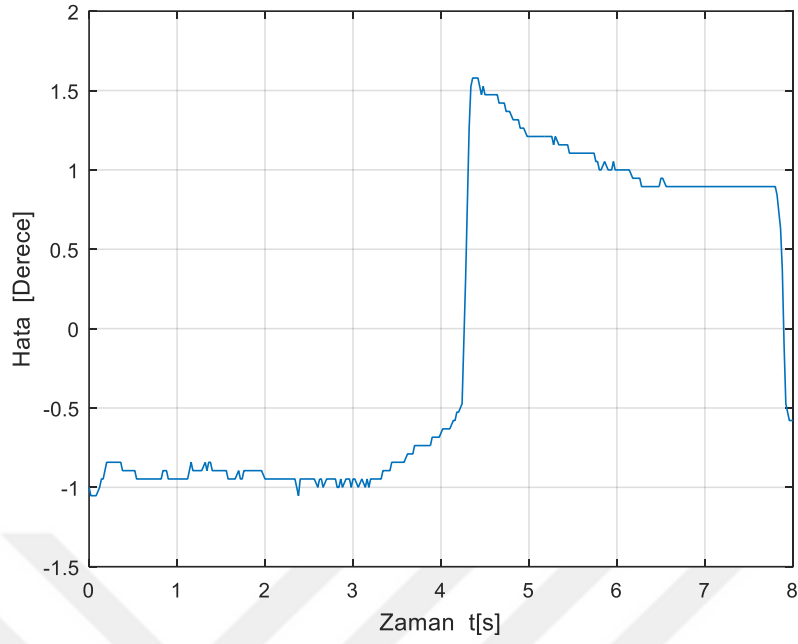
PID kontrol yöntemi uygulandığı esnada robota uygulanan kontrol sinyali Şekil 5.18’ de gösterilmiştir.



**Şekil 5.18.** 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

Kontrol sinyali içerisinde görülen sıfırın üstündeki değerler motor milinin ileri yönde, sıfırın altındaki değerler ise motor milinin geri yönde döndüğünü göstermektedir. Ayrıca bu değerler % olarak değil 8 bitlik veri değeri (0-255) cinsinden verilmiştir. Şekil 5.18’ de görüldüğü gibi bu yöntemde sisteme uygulanan kontrol sinyali 109 ile -112 doluluk oranları arasında değişmektedir.

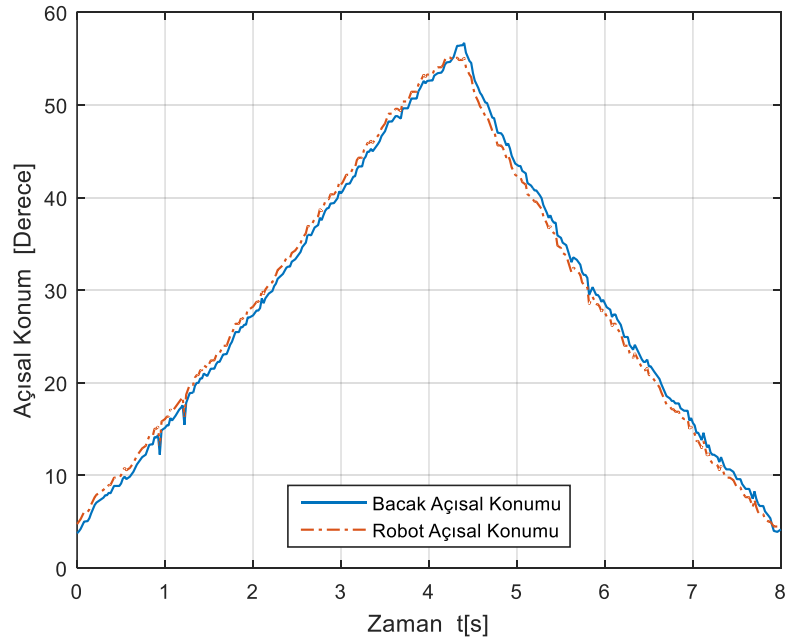
KKK kontrol yöntemi sisteme uygulandığında ortaya çıkan hata değerleri Şekil 5.19’ da verilmiştir.



**Şekil 5.19.** 1. durum için hata grafiği (KKK yöntemi)

Şekil 5.19’ da görüldüğü gibi KKK yönteminde en büyük hata değeri  $1,58^0$  olarak ortaya çıkmıştır.

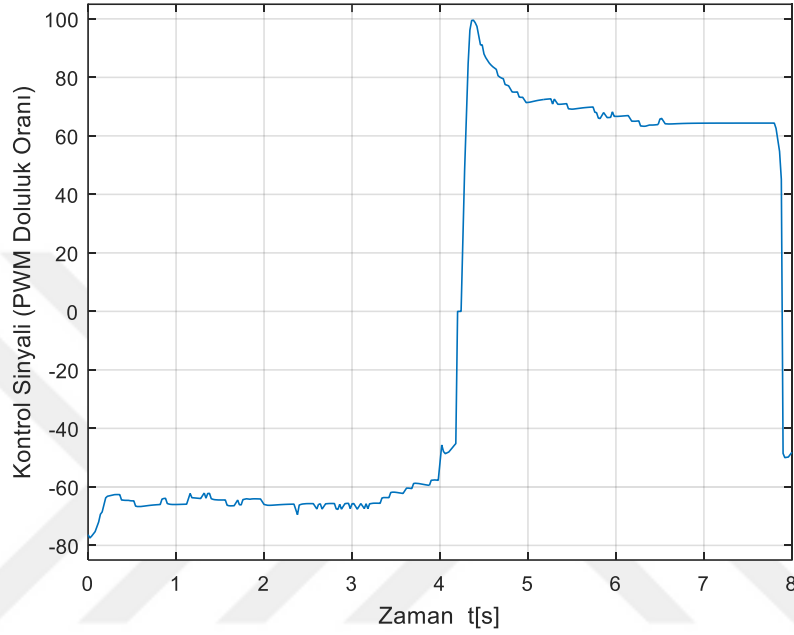
Bacak ve robotun KKK yöntemi uygulandığında ortaya çıkan konum grafiği Şekil 5.20’ de verilmiştir.



**Şekil 5.20.** 1. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi)

Şekil 5.20’ de görüldüğü gibi KKK yöntemi uygulandığında da aynı PID kontrol yönteminde olduğu gibi bacak hareketlerinin başarılı bir şekilde izlenmesi sağlanmıştır.

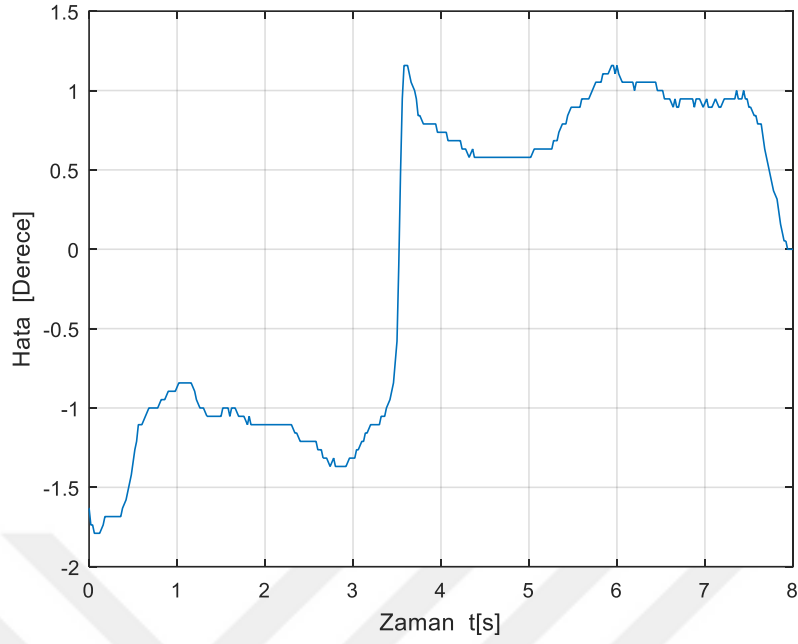
Robotun bacağın hareketlerini takip etmesini sağlayan kontrol sinyalleri ise Şekil 5.21’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.21. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi)

KKK uygulandığında robotun kontrolünü sağlayan sinyalin büyüklüğü Şekil 5.21’ de görüldüğü gibi 98,71 ile -77,47 doluluk oranları arasında değişim göstermiştir.

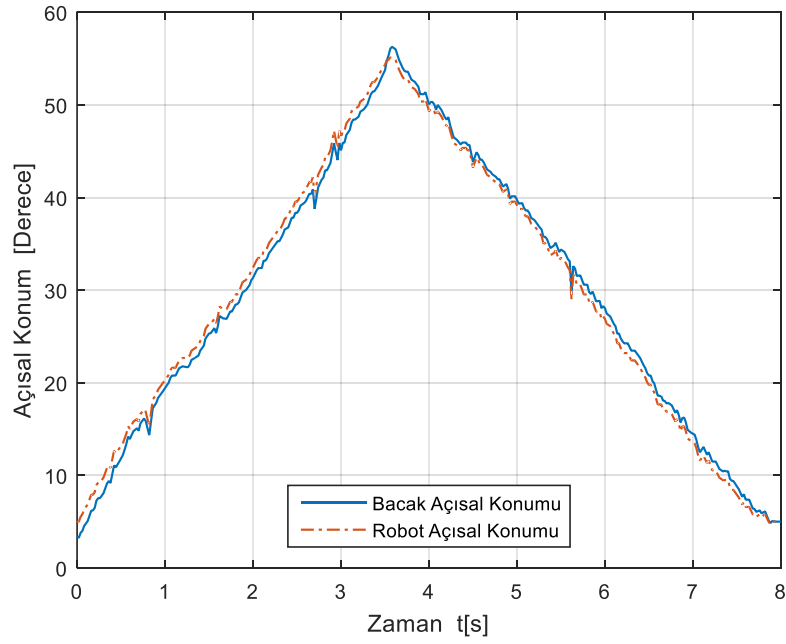
KKK kontrol yönteminden sonra sisteme HKKK yöntemi uygulanmıştır. Ortaya çıkan hata grafiği Şekil 5.22’ de gösterilmiştir.



**Şekil 5.22.** 1. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi)

HKKK yönteminde ise karşılaşılan en büyük hata değeri Şekil 5.22’ gösterildiği gibi  $1,79^0$  üstüne çıkmamıştır.

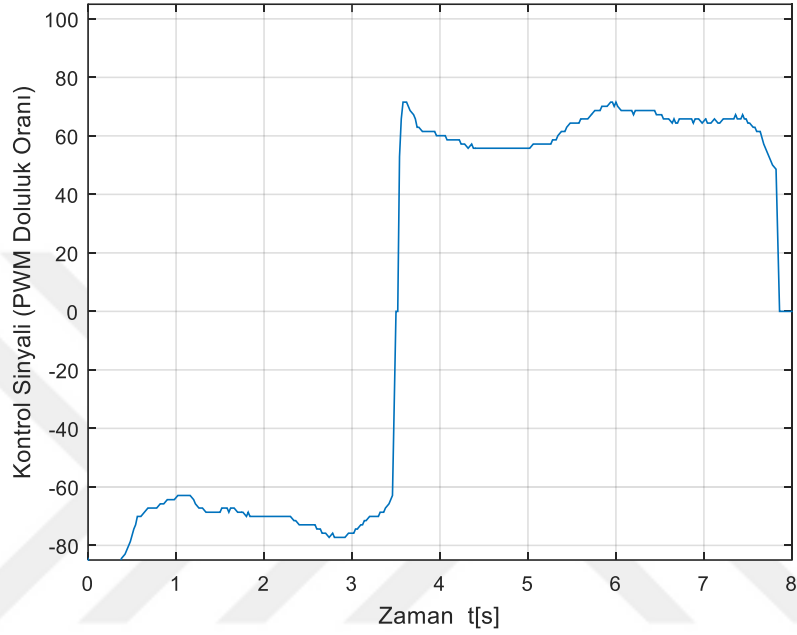
HKKK yöntemi uygulanması sonucunda bacak ve robotun aldığı konumlar Şekil 5.23’ de verilmiştir.



**Şekil 5.23.** 1. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi)

Şekil 5.23' den anlaşılacağı üzere HKKK yöntemi de bacak hareketlerinin başarılı bir şekilde izlenmesini sağlamıştır.

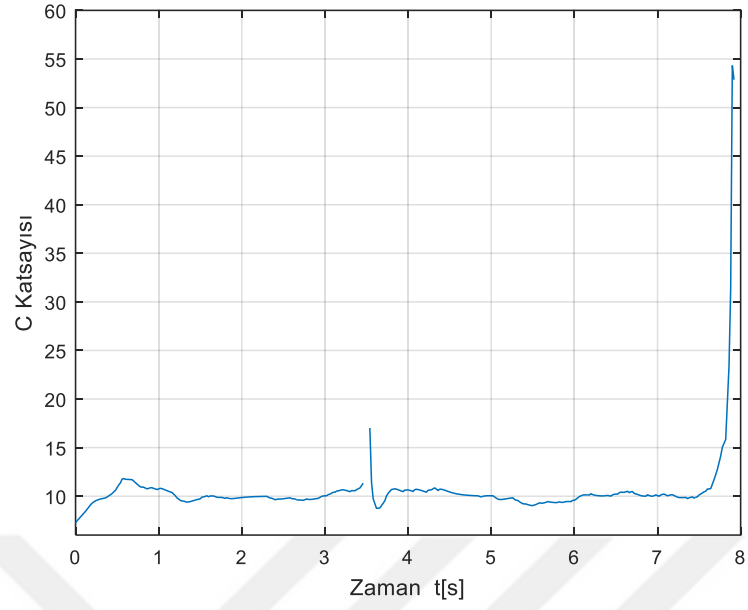
Şekil 5.24' de ise HKKK yönteminin uygulanması sonucunda ortaya çıkan kontrol sinyalleri gösterilmiştir.



Şekil 5.24. 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi)

HKKK yöntemi uygulandığı zaman sisteme uygulanması gereken kontrol sinyal büyüklüğü Şekil 5.24' de gösterildiği gibi azalarak 71,53 ile 84,43 doluluk oranları arasında değişim göstermiştir.

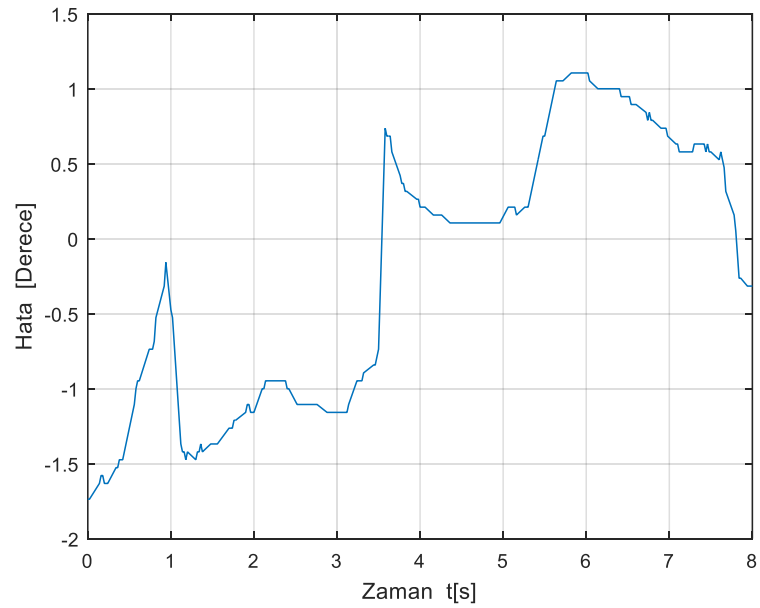
Diğer kontrol yöntemlerinden farklı olarak, HKKK yönteminde c katsayısının zamana göre değişimini gösteren grafik Şekil 5.25' de gösterilmiştir.



**Şekil 5.25.** 1. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi

Şekil 5.25’ de görüldüğü gibi HKKK yönteminde sistemin anlık hata değerine göre uygulanması gereken c katsayısı sürekli olarak değiştirilmiştir. Hata değerleri ve türevlerinin büyüklüklerine göre c katsayısının değeri 7,49 ile 54,32 arasında değişkenlik göstermiştir.

Son olarak sisteme BM kontrol sistemi uygulanmıştır. BM uygulanmasının sonucunda bacak ve robot arasında oluşan hatalar Şekil 5.26’ da gösterilmiştir.

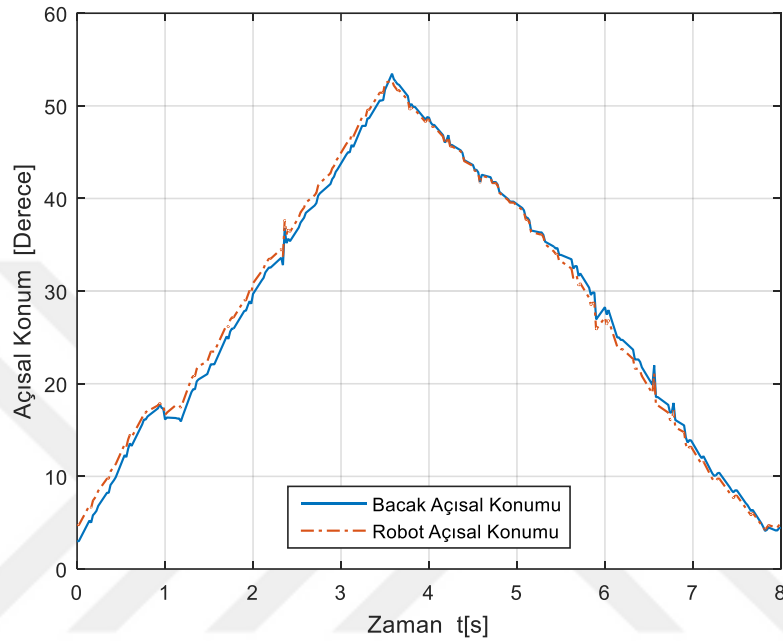


**Şekil 5.26.** 1. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi)



Şekil 5.26' görüldüğü üzere BM kontrol yönteminde sistemde ortaya çıkan en büyük hata değeri  $1,74^0$  dir.

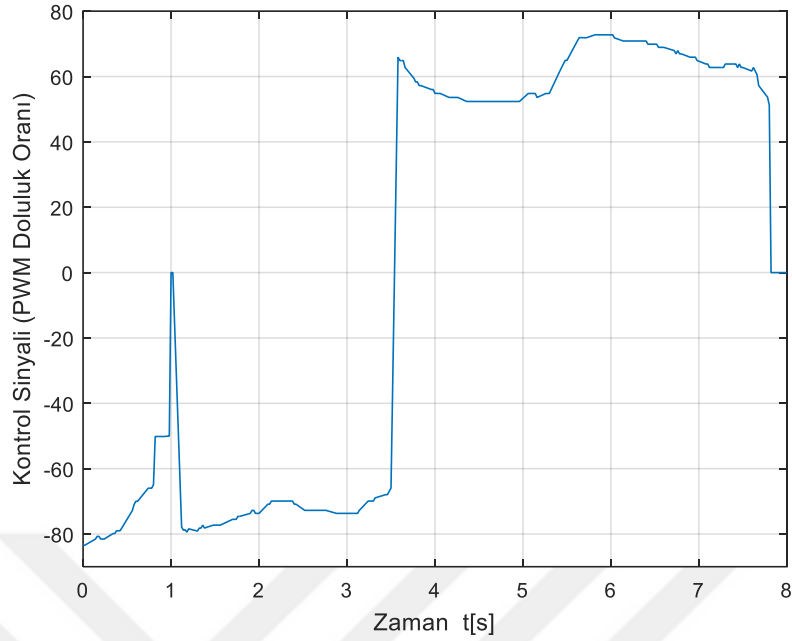
Şekil 5.27' de ise bu kontrol yöntemi uygulandığında karşılaşılan bacak ve robot konumları verilmiştir.



Şekil 5.27. 1. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.27' den anlaşılacağı üzere, diğer yöntemlerde olduğu gibi BM kontrol yönteminde de robot işlevini başarılı bir şekilde yerine getirmiştir.

BM kontrol yönteminin uygulanması sonucunda robota uygulanan kontrol sinyali Şekil 5.28' de gösterilmiştir.



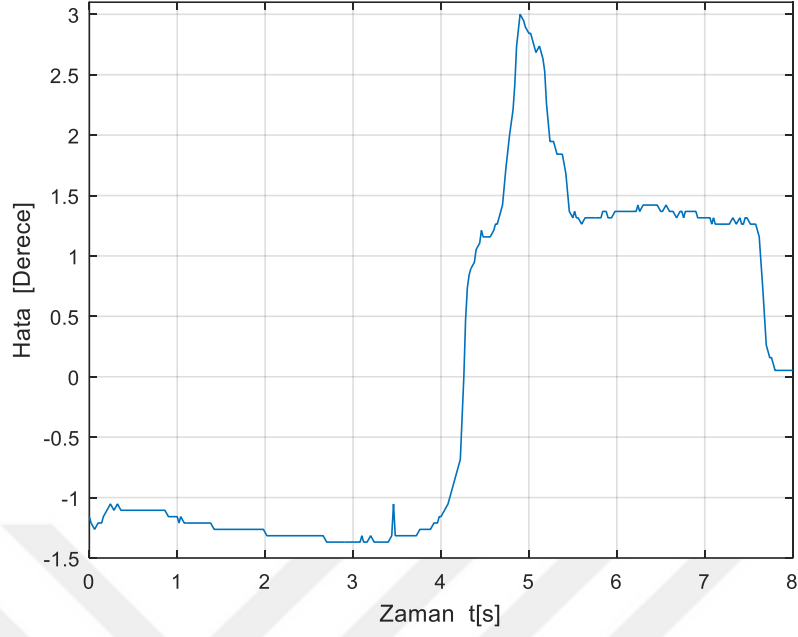
**Şekil 5.28.** 1. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.28’ de gösterildiği gibi BM kontrol yönteminde sisteme uygulanan kontrol sinyalinin büyüklüğü 72,76 ile -83,41 arasında değişmektedir.

### 5.3.3. 2. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

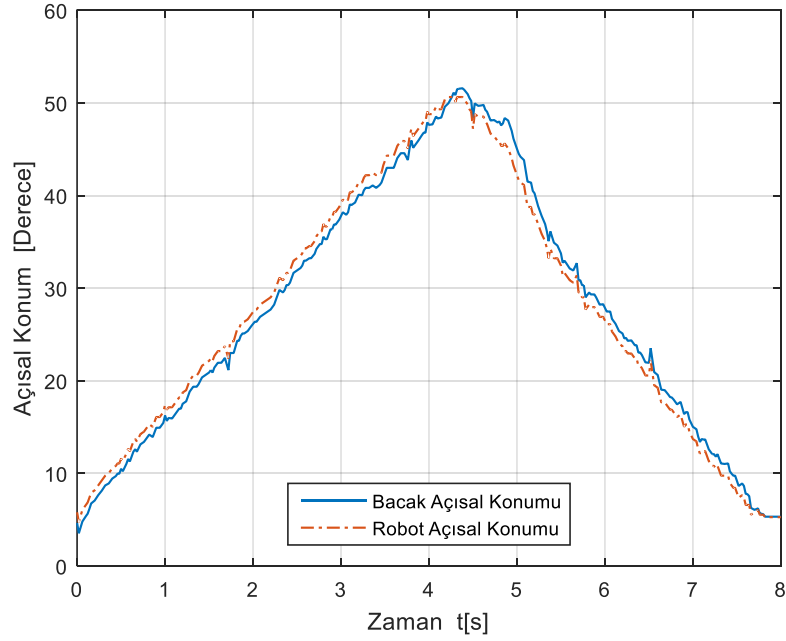
2. durumda uzvun ucuna 25 N’ luk bir yük eklenmiştir. Böylece sistemin ağırlık parametresinin değiştirilmesi amaçlanmış, kontrol yöntemlerinin davranışları incelenmiştir. Uzvun boyu yine 50 cm olarak ayarlanmıştır.

Şekil 5.29, 5.30 ve 5.31 sırasıyla PID kontrol yöntemi uygulandığında hata, bacak ve robotun konumu ve kontrol sinyalinin grafiklerini içermektedir.



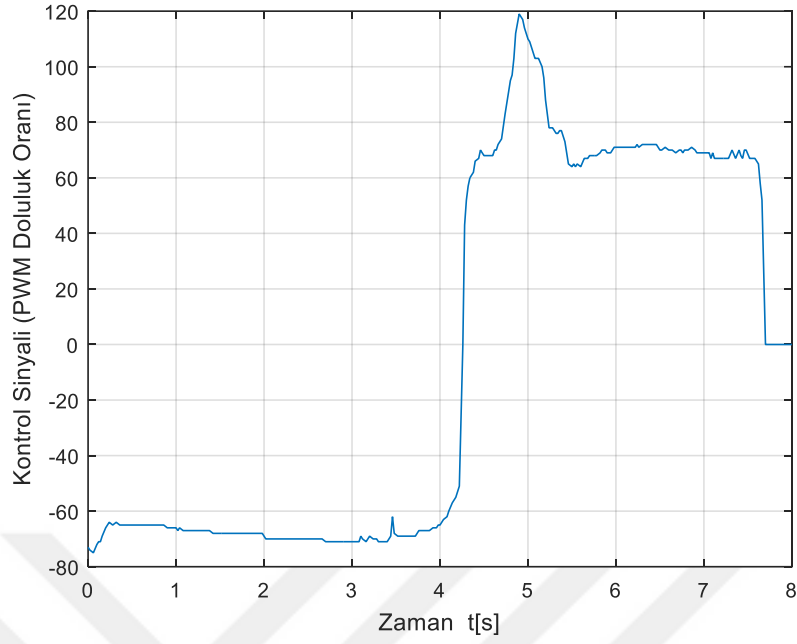
**Şekil 5.29.** 2. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi)

Şekil 5.29’ da verilen hata grafiğinde de görüldüğü gibi 2. durum için PID kontrol yöntemi uygulandığında ortaya çıkan en büyük hata değeri  $3^0$ ’ dir.



**Şekil 5.30.** 2. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi)

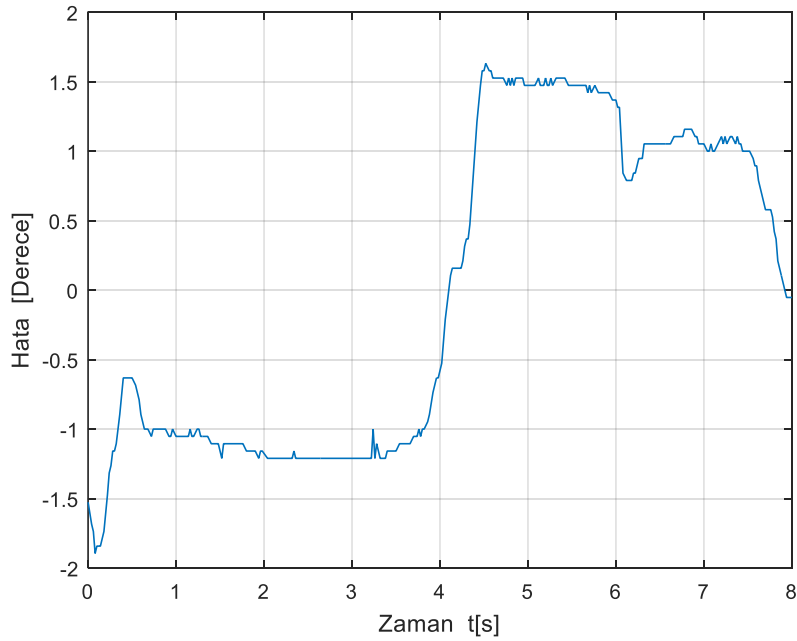
Robot, Şekil 5.30’ da gösterildiği gibi yine bacağın hareketlerini izleme konusunda başarılı olmuştur.



**Şekil 5.31.** 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

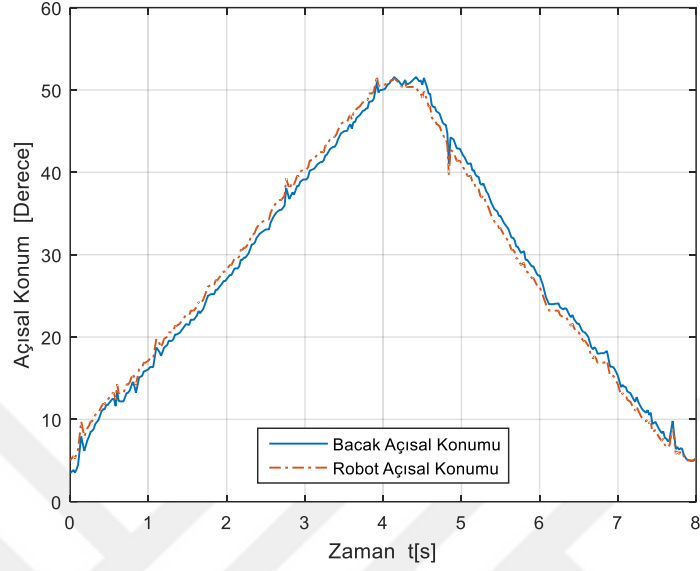
Sisteme uygulanan kontrol sinyallerinin büyüklükleri Şekil 5.31’ de gösterildiği gibi 119 ile -75 doluluk oranları arasında değişmektedir.

Daha sonra sistemde 25 N yük varken KKK yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem için hata, uzuv konumları ve kontrol sinyali grafikleri sırasıyla Şekil 5.32, 5.33 ve 5.34’ de verilmiştir.



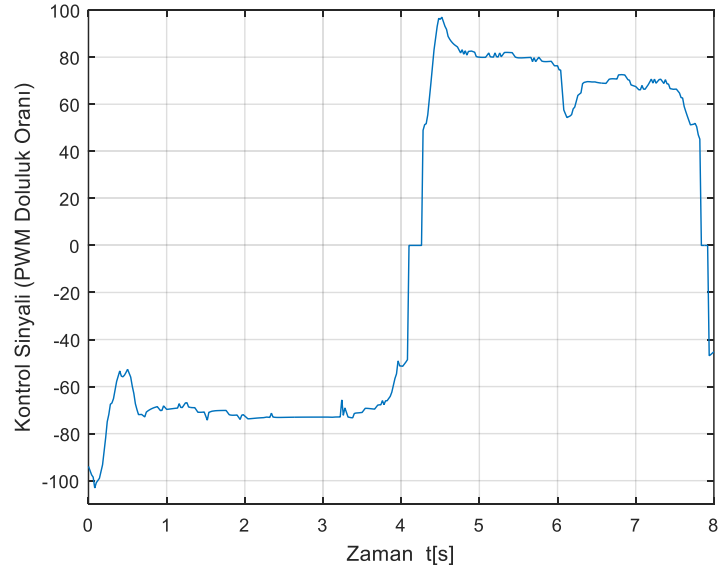
**Şekil 5.32.** 2. durum için hata grafiği (KKK yöntemi)

2. durumda KKK yönteminde hata değeri Şekil 5.32’ de gösterildiği gibi  $1,89^0$ ’ nin üstüne çıkmamıştır.



**Şekil 5.33.** 2. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi)

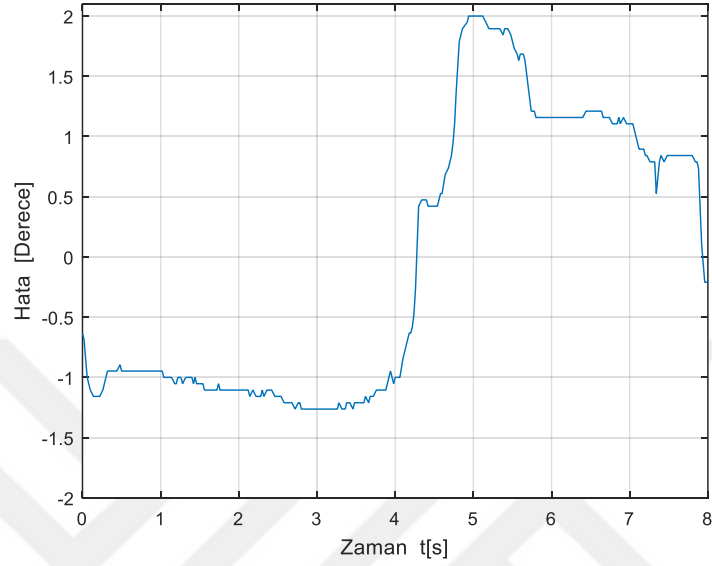
1. durumda olduğu gibi bu durumda da KKK yöntemi uygulandığında robot bacağın hareketlerini izlemeyi başarmıştır.



**Şekil 5.34.** 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi)

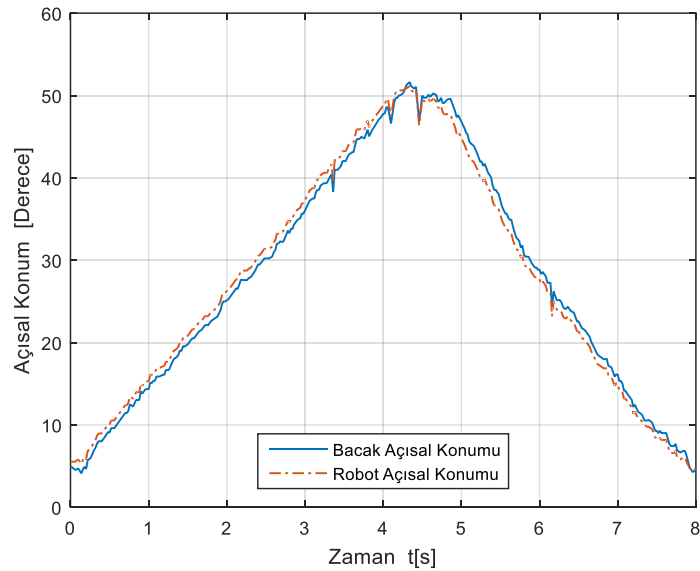
KKK yöntemi uygulandığında sisteme uygulanan kontrol sinyal büyüklükleri Şekil 5.34’ de gösterildiği gibi 97,01 ile -103,1 arasında değişmektedir.

Diğer bir uygulama olan HKKK yöntemi uygulandığında sistemde oluşan hatalar Şekil 5.35’ de, bacak ve robotun konumları Şekil 5.36’ da gösterilmiştir. Robota uygulanan kontrol sinyali ise Şekil 5.37’ de,  $c$  katsayısının değişimi ise Şekil 5.38’ de gösterilmiştir.



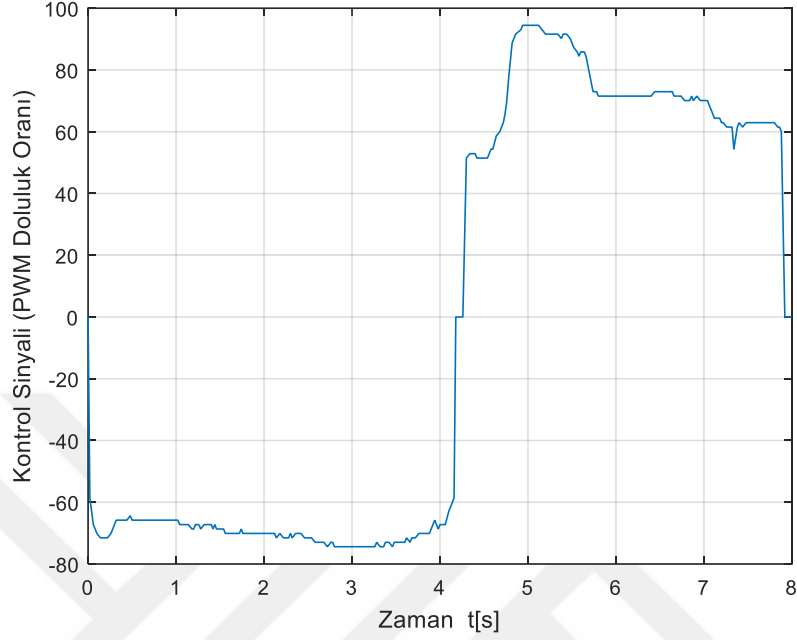
**Şekil 5.35.** 2. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi)

HKKK yönteminde Şekil 5.35’ de görüldüğü gibi hata değerinin  $2^0$ ’ nin üstüne çıkmadığı görülmüştür.



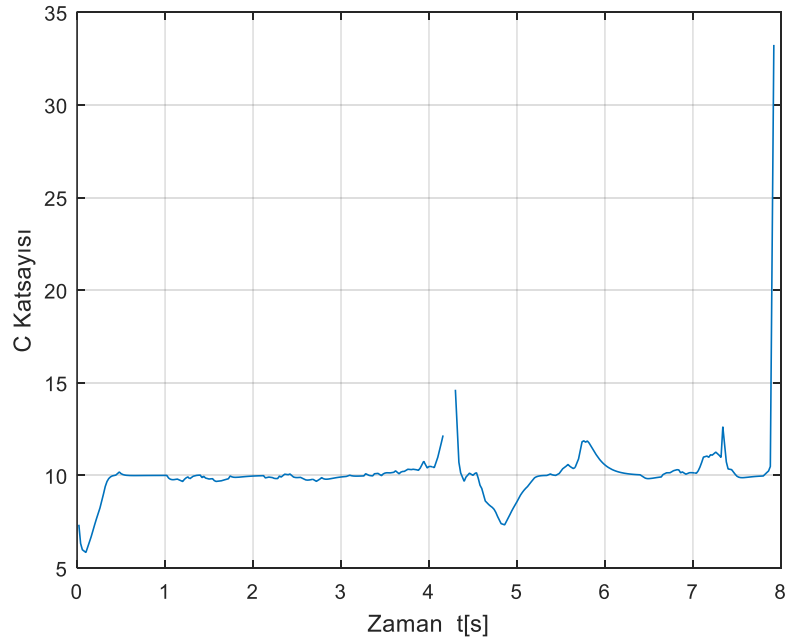
**Şekil 5.36.** 2. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi)

Şekil 5.36' da görüldüğü gibi HKKK yöntemi de bu durumda da işlevini başarılı bir şekilde yerine getirmiştir.



**Şekil 5.37.** 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi)

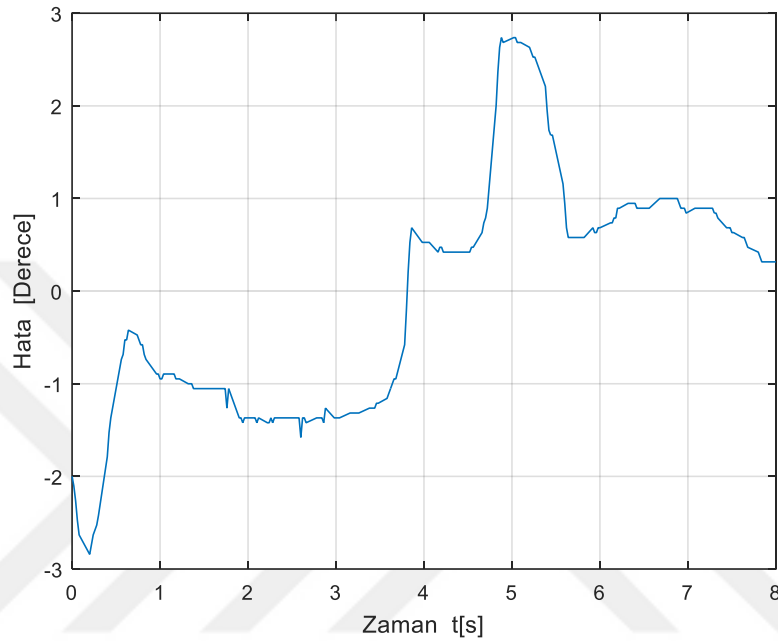
Şekil 5.37' de gösterildiği gibi HKKK yönteminde 94,47 ve 74,40 değerleri arasındaki kontrol sinyalleri uygulanmıştır.



**Şekil 5.38.** 2. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi

Şekil 5.38’ de gösterildiği gibi 2. durum için c katsayısı 5,84 ile 33,24 değerleri arasında değişkenlik göstermiştir.

Son olarak sisteme BM kontrol yöntemi uygulanmıştır. Hata değerleri Şekil 5.39’ da, bacak ve robot konumları Şekil 5.40’ da, kontrol sinyali ise Şekil 5.41’ de gösterilmiştir.

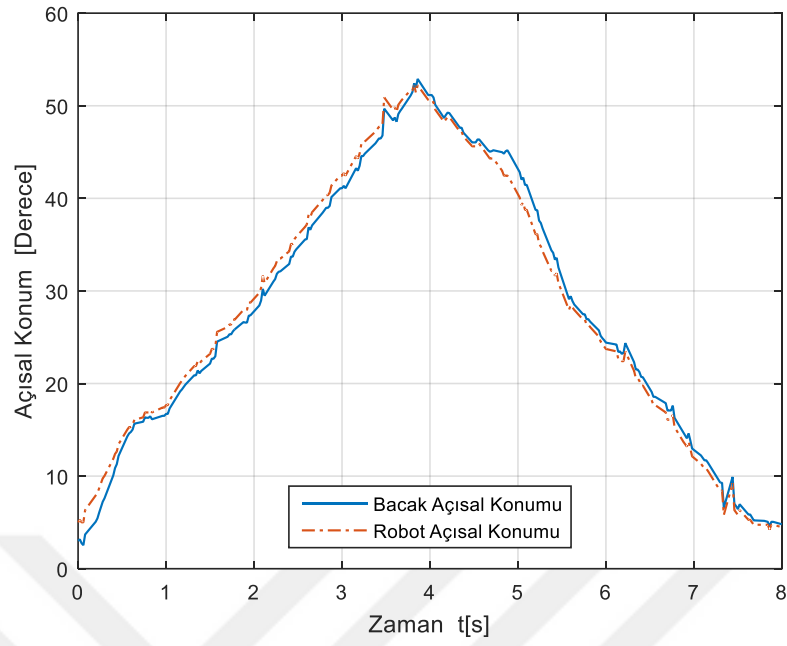


Şekil 5.39. 2. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi)

BM kontrol yönteminde ortaya çıkan hata değerleri içerisinde en büyüğü Şekil 5.39’ da görüldüğü gibi 2,74<sup>0</sup>’ dir.

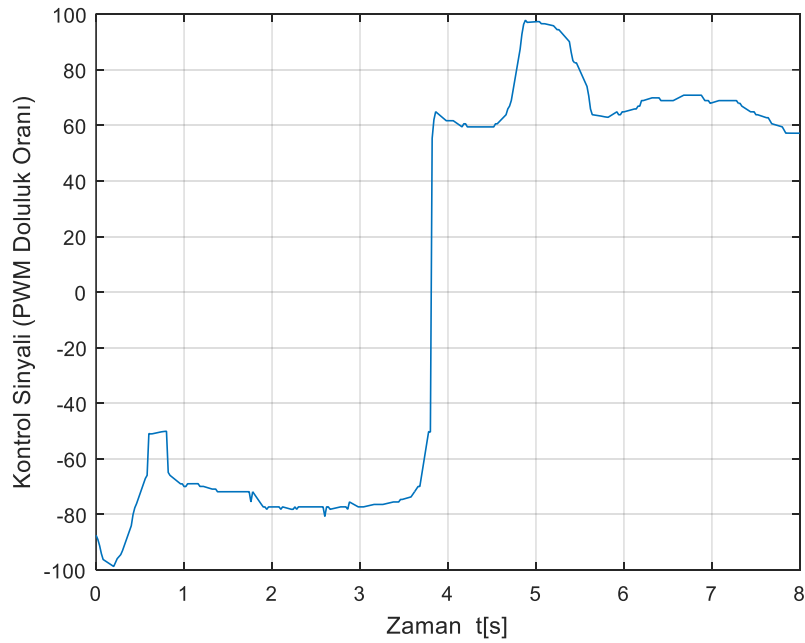
Şekil 5.39’ da gösterildiği gibi BM kontrol yönteminde ortaya çıkan en büyük hata değeri





**Şekil 5.40.** 2. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.40’ da görüldüğü üzere, BM kontrol yönteminde de robot bacak hareketlerini izlemeyi başarmıştır.



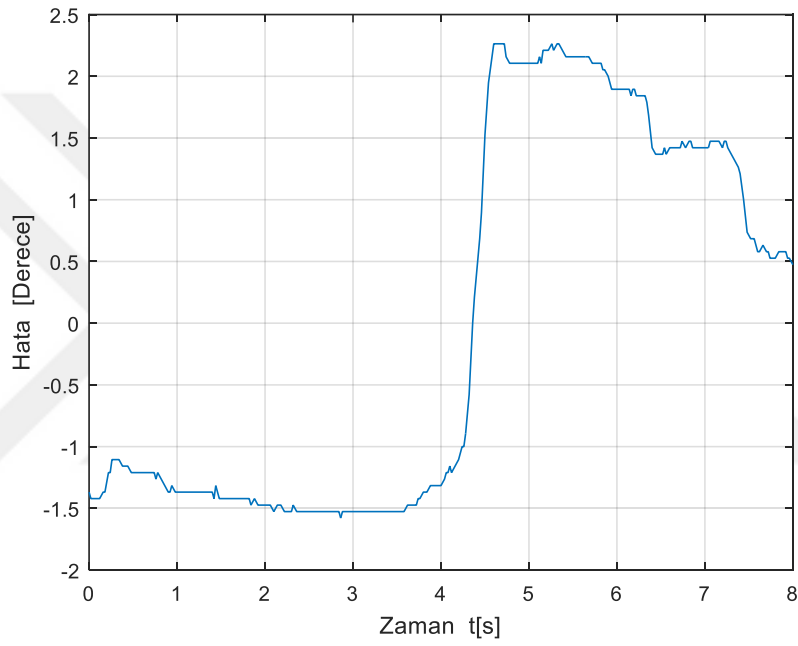
**Şekil 5.41.** 2. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

BM kontrol yönteminde sisteme uygulanan kontrol sinyali büyüklüğü Şekil 5.41’ de gösterildiği gibi 97,86 ile -98,73 arasında değişmektedir.

### 5.3.4. 3. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

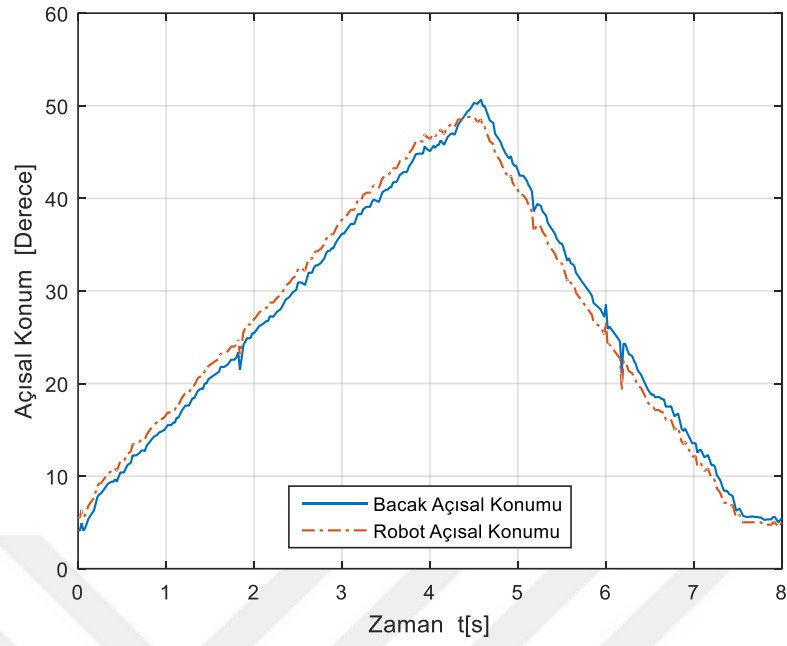
Üçüncü durumda robota eklenen yük 75 N olarak değiştirilmiştir ve sonuçlar yine aynı kontrol yöntemleri ile elde edilmiştir.

PID kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.42, 5.43 ve 5.44' de gösterilmiştir.



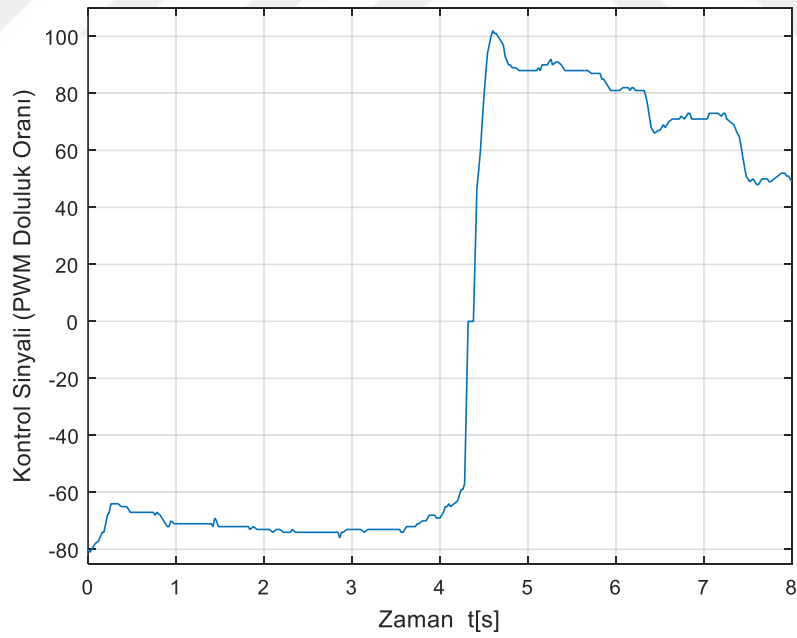
Şekil 5.42. 3. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi)

Şekil 5.42' de gösterildiği gibi PID kontrol yöntemi uygulandığında 3. durumda en büyük hata değeri 2,26<sup>0</sup> olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.43. 3. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi)

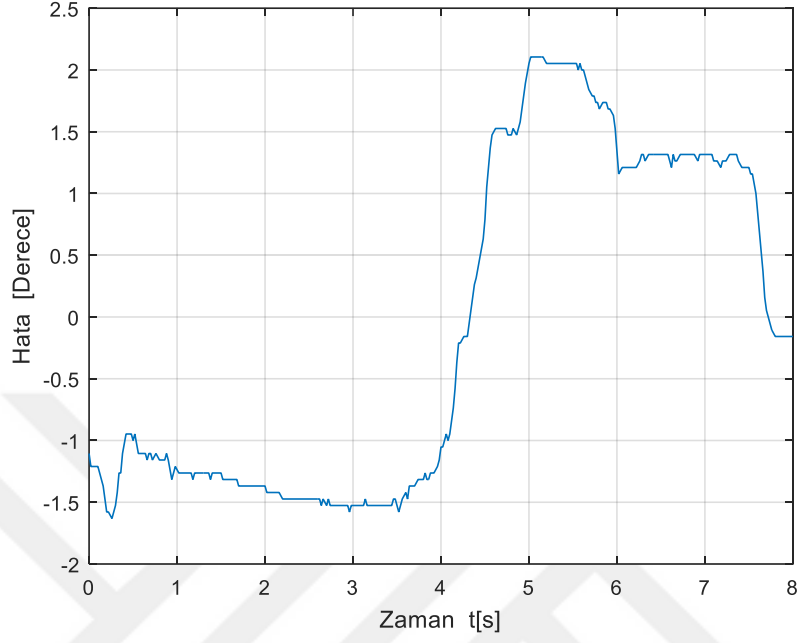
Şekil 5.43’ de gösterildiği gibi robot başarılı bir şekilde bacak hareketlerini takip etmiştir.



Şekil 5.44. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

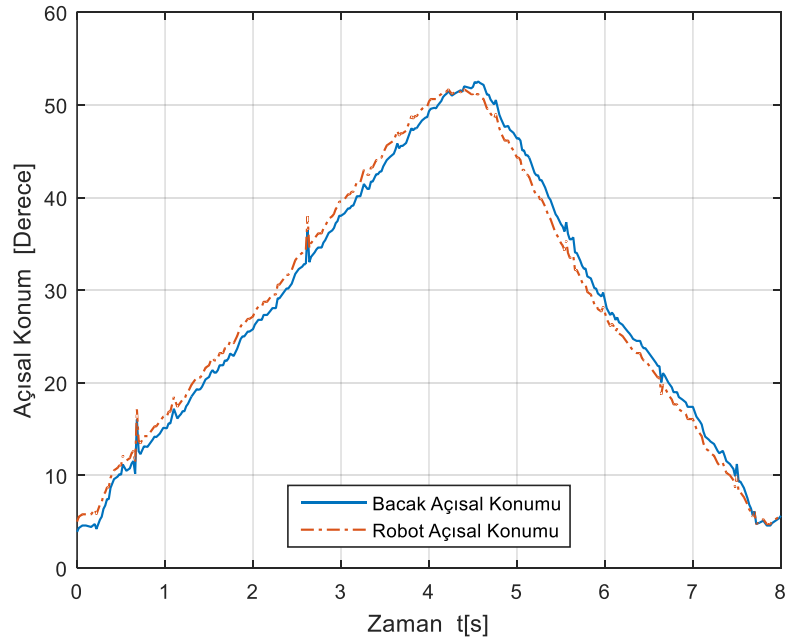
Şekil 5.44’ de gösterildiği gibi robota uygulanan kontrol sinyali 102 ile -81 değerleri arasında değişmektedir.

KKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.45, 5.46 ve 5.47’ de gösterilmiştir.



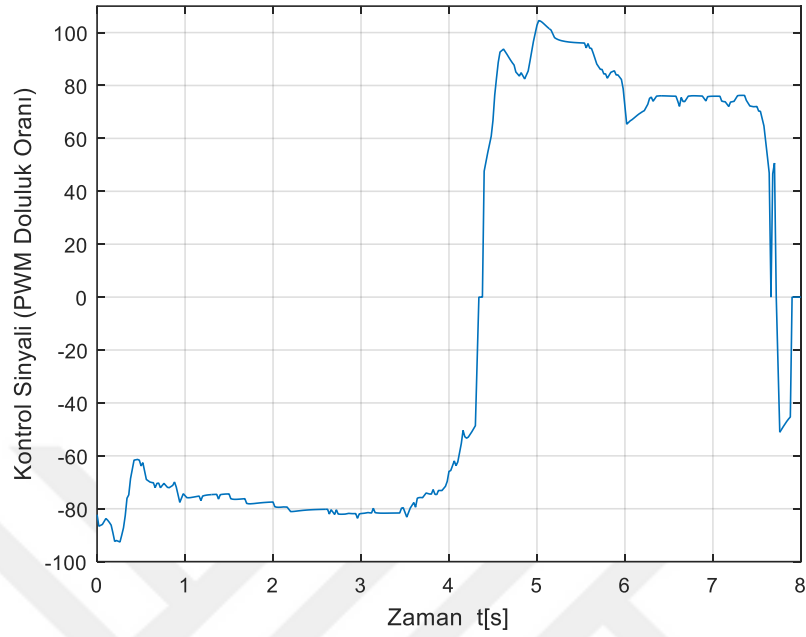
Şekil 5.45. 3. durum için hata grafiği (KKK yöntemi)

KKK yönteminde Şekil 5.45’ de gösterildiği gibi  $2,11^{0}$ ’ lik en yüksek hata değeri ile karşılaşılmıştır.



Şekil 5.46. 3. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi)

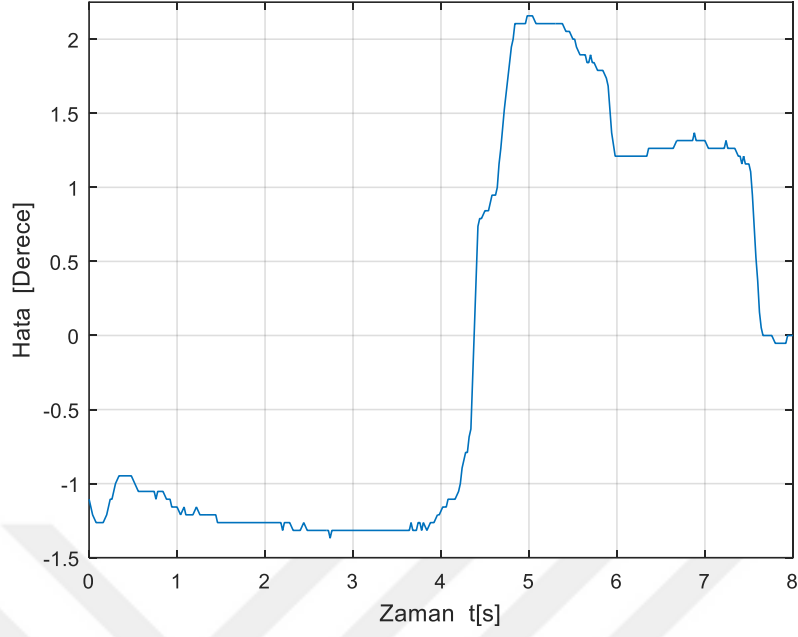
Şekil 5.46' da görüldüğü üzere robot yine bacağı izleme konusunda başarılı olmuştur.



Şekil 5.47. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi)

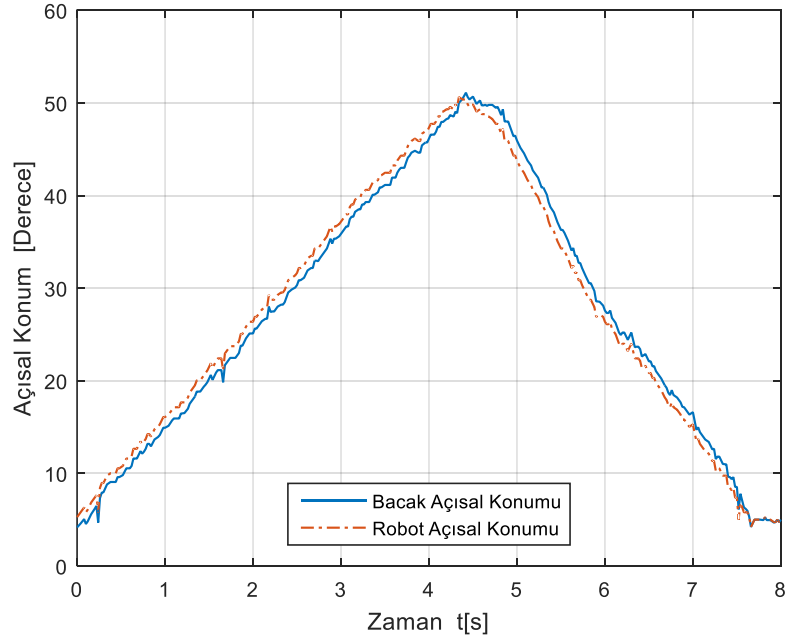
Şekil 5.47' de görüldüğü üzere sisteme 104,5 ile -92,56 değerleri arasında bir kontrol sinyali uygulanmıştır.

HKKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum, kontrol sinyali ve  $c$  katsayısının değişim grafikleri Şekil 5.48, 5.49, 5.50 ve 5.51' de gösterilmiştir.



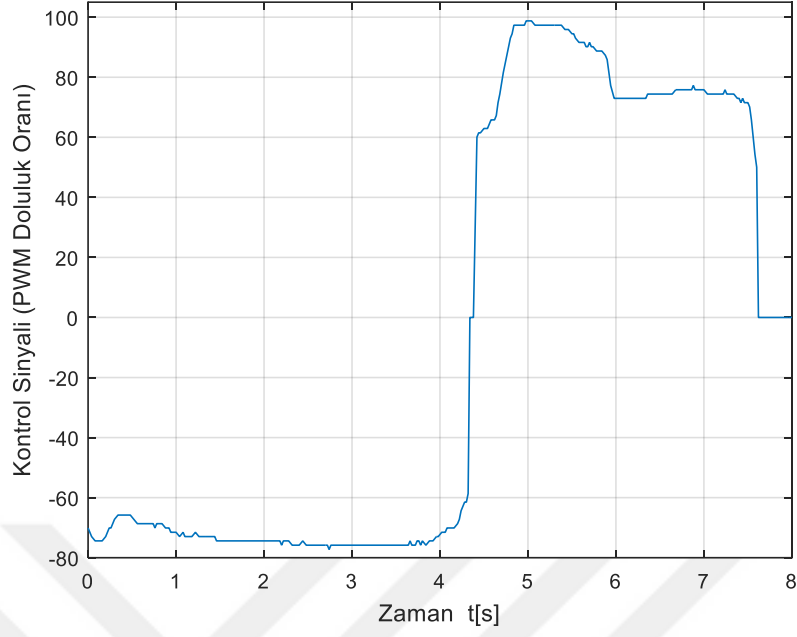
**Şekil 5.48.** 3. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi)

Şekil 5.48’ de gösterildiği gibi HKKK yöntemi için elde edilen en büyük hata değeri  $2,16^0$ ’ dir.



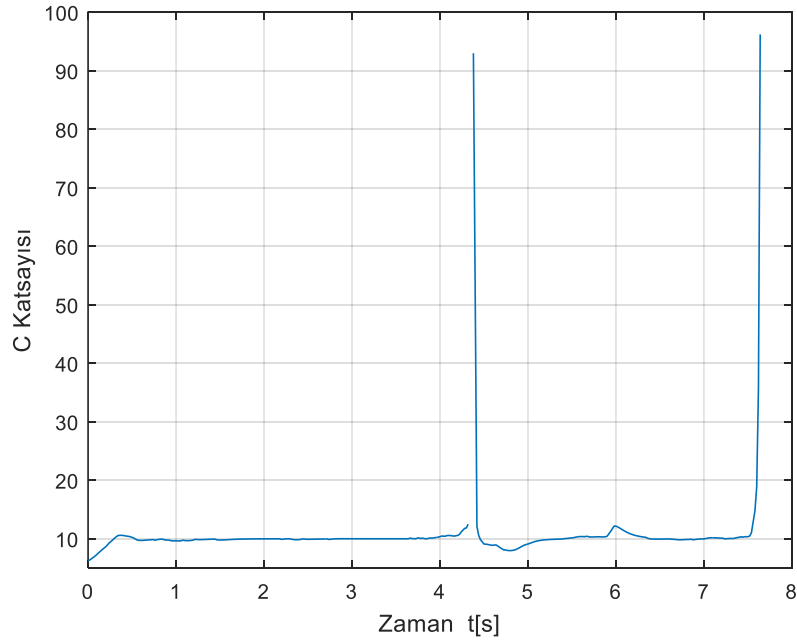
**Şekil 5.49.** 3. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi)

Şekil 5.49’ da gösterildiği üzere robot bacak hareketlerini izlemeyi başarmıştır.



**Şekil 5.50.** 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi)

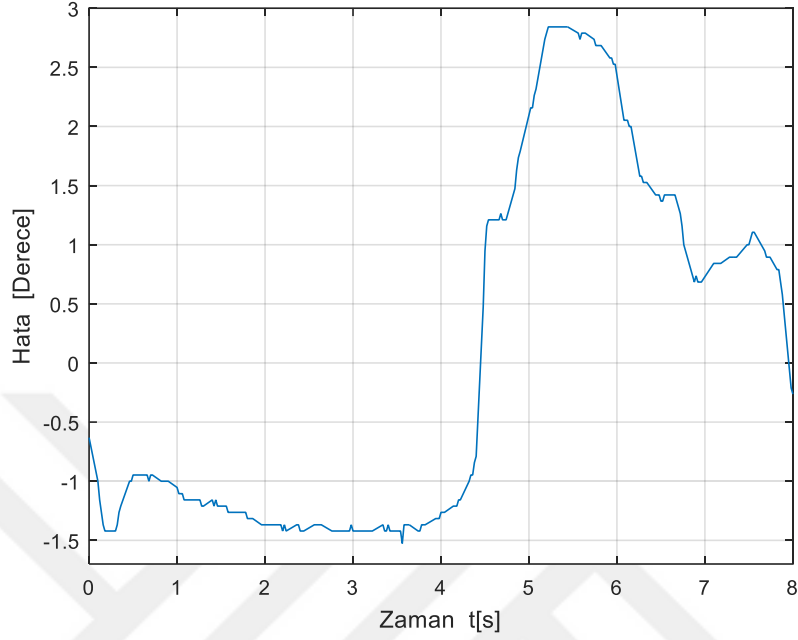
HKKK yönteminde sisteme Şekil 5.50’ de gösterildiği gibi 98,77 ile -75,83 değerleri arasında kontrol sinyalleri uygulanmıştır.



**Şekil 5.51.** 3. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi

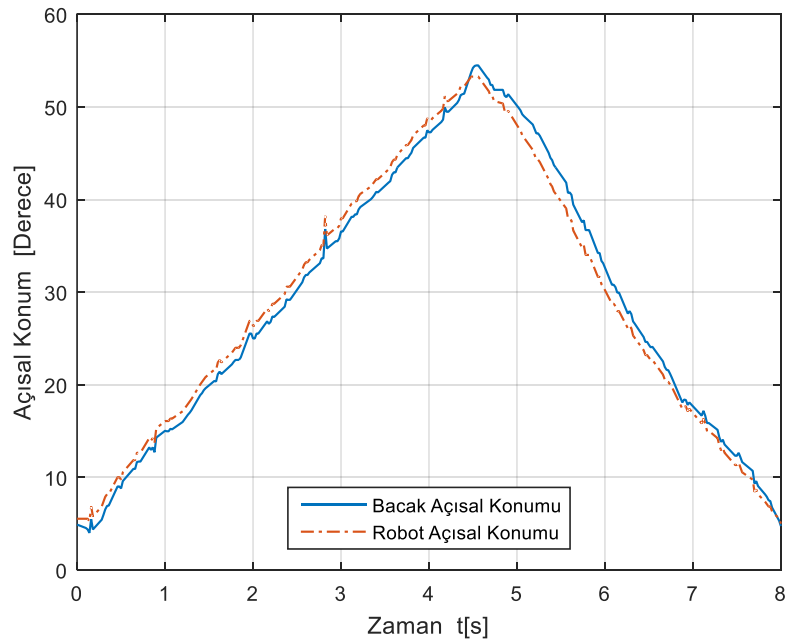
HKKK kontrolcü parametresi olan c katsayısı Şekil 5.51’ de gösterildiği gibi 6,6 ile 96,22 arasındaki değerleri almıştır.

BM kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.52, 5.53 ve 5.54' de gösterilmiştir.



Şekil 5.52. 3. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi)

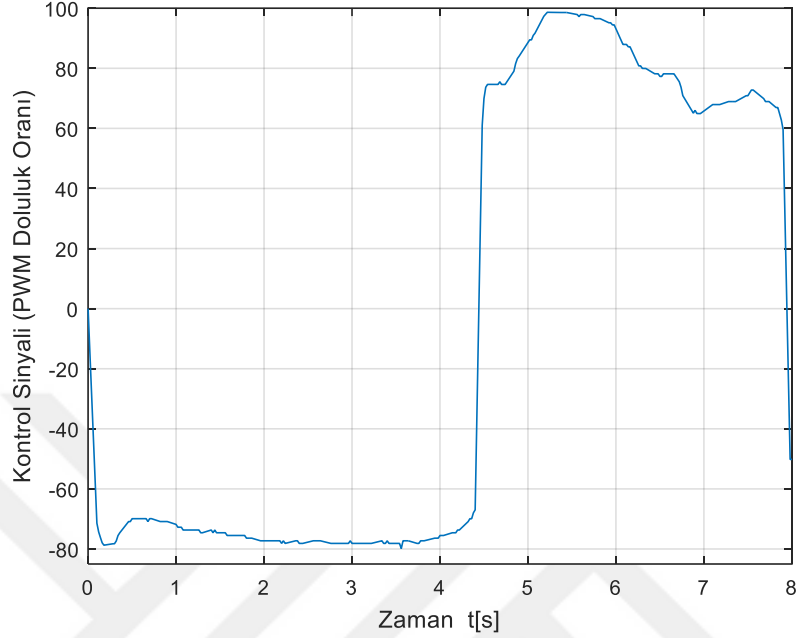
Şekil 5.52' de gösterildiği gibi BM yönteminde sistemde  $2,84^{\circ}$  lik en büyük hata değeri ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.53. 3. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi)



Şekil 5.53’ de görüldüğü gibi robot bacak hareketlerini BM kontrol yönteminde de başarılı bir şekilde takip etmiştir.



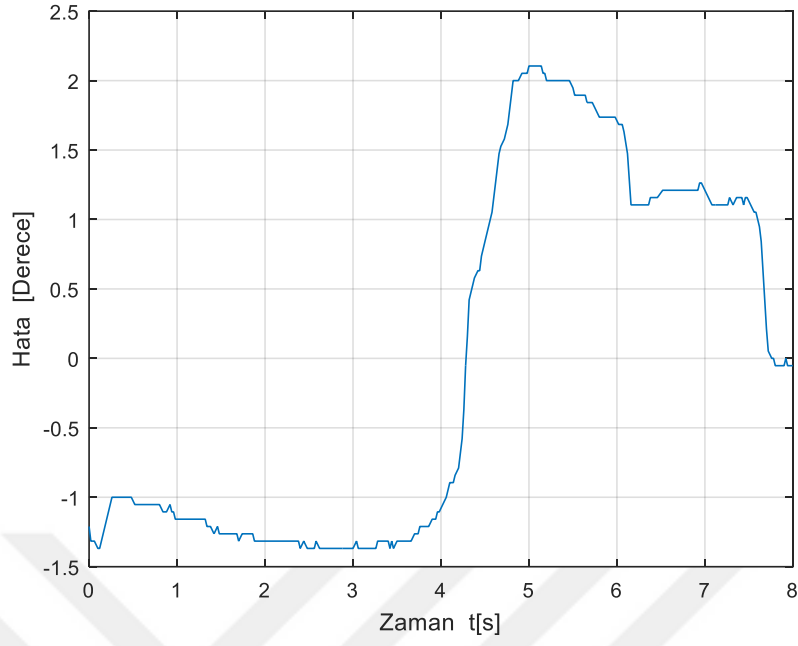
Şekil 5.54. 3. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.54’ de gösterildiği üzere BM kontrol yönteminde sisteme 98,65 ile -79,86 arasındaki kontrol sinyalleri uygulanmıştır.

#### 5.3.5. 4. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

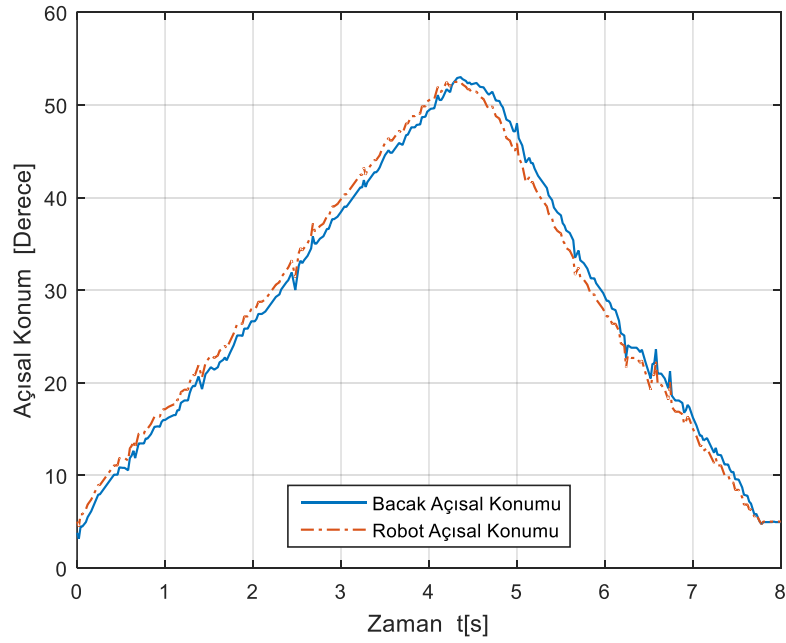
4. durumda sisteme 25 N yük uygulanmasının yanında diğer bir sistem parametresi olan robotun uzuv boyu 45 cm’ ye indirilmiştir.

PID kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.55, 5.56 ve 5.57’ de gösterilmiştir.



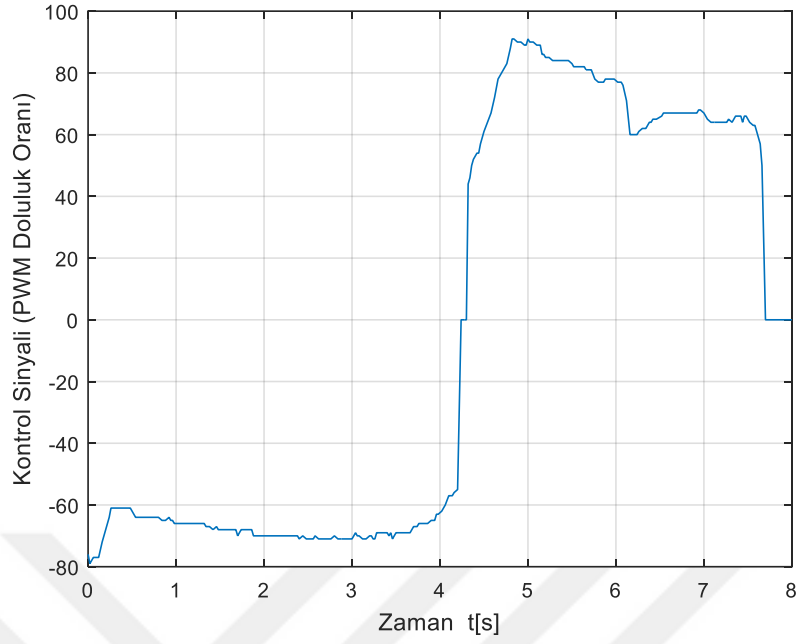
Şekil 5.55. 4. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi)

Şekil 5.55’ de görüldüğü üzere PID kontrol yönteminde ortaya çıkan en büyük hata değeri  $2,11^0$ ’ dir.



Şekil 5.56. 4. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi)

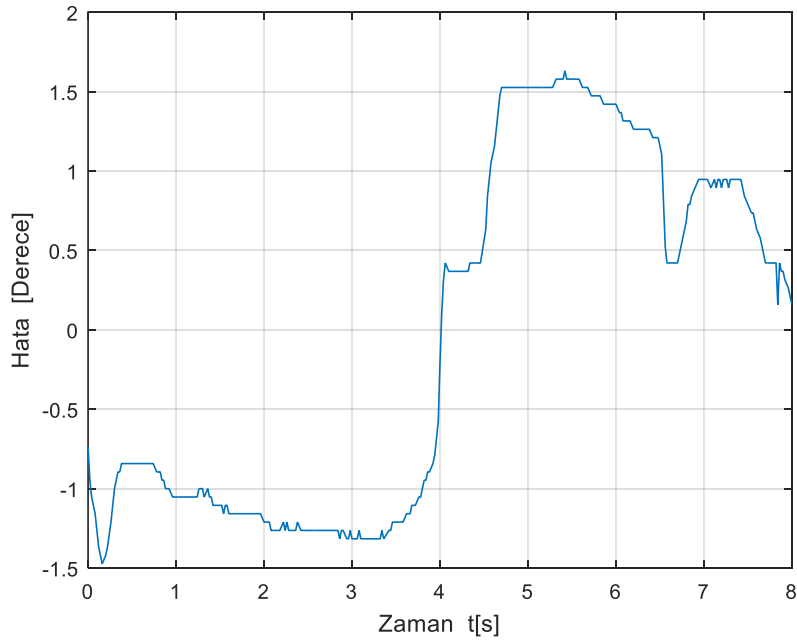
Şekil 5.56’ da görüldüğü üzere robot bacağı başarılı bir şekilde izlemiştir.



Şekil 5.57. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

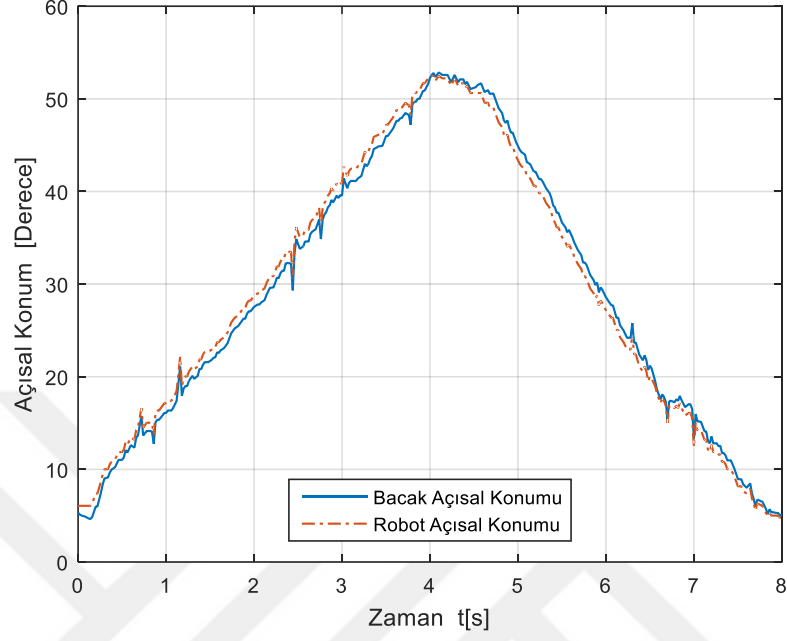
Şekil 5.57’ de görüldüğü gibi robota 91 ile -79 aralığındaki değerlere sahip kontrol sinyalleri uygulanmıştır.

KKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.58, 5.59 ve 5.60’ da gösterilmiştir.



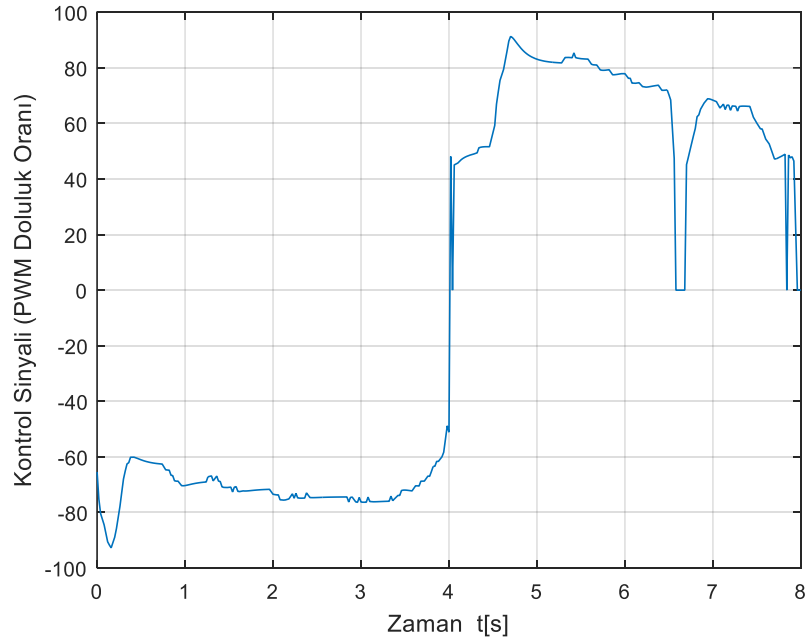
Şekil 5.58. 4. durum için hata grafiği (KKK yöntemi)

KKK yönteminde ise Şekil 5.58’ de gösterildiği gibi en fazla  $1,63^0$  hata ile karşılaşılmıştır.



Şekil 5.59. 4. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi)

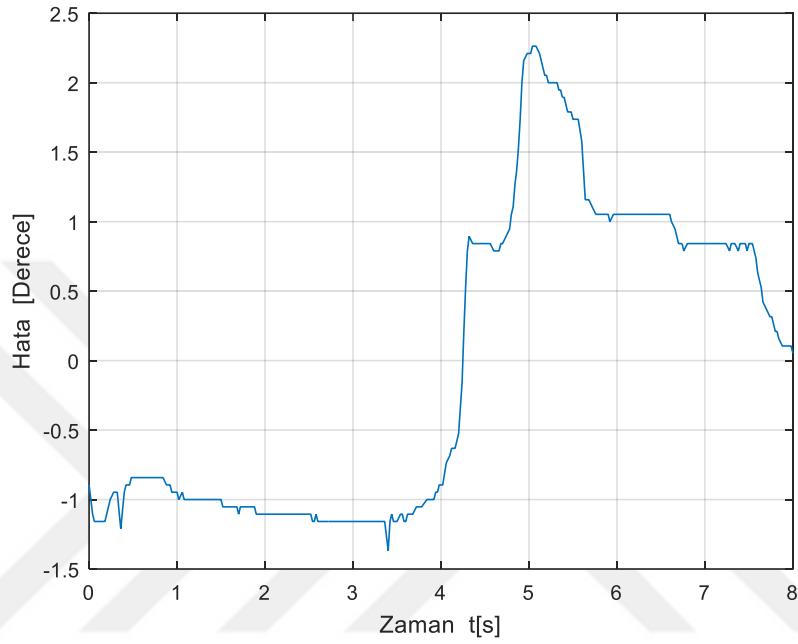
Şekil 5.59’ da görüldüğü gibi robotun KKK yöntemi ile bacağın hareketlerini izlemesi başarılı bir şekilde sağlanmıştır.



Şekil 5.60. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi)

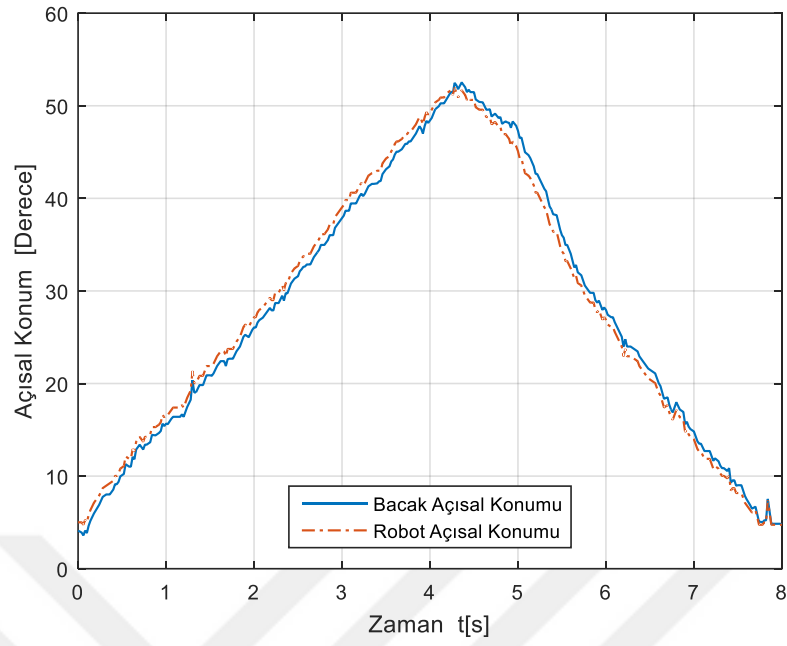
Robotun bacağın hareketlerini izlemesi esnasında sisteme uygulanan kontrol sinyali Şekil 5.60’ da gösterildiği gibi 91,3 ile -92,73 değerleri arasında değişmektedir.

HKKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum, kontrol sinyali ve  $c$  katsayısının değişim grafikleri Şekil 5.61, 5.62, 5.63 ve 5.64’ de gösterilmiştir.



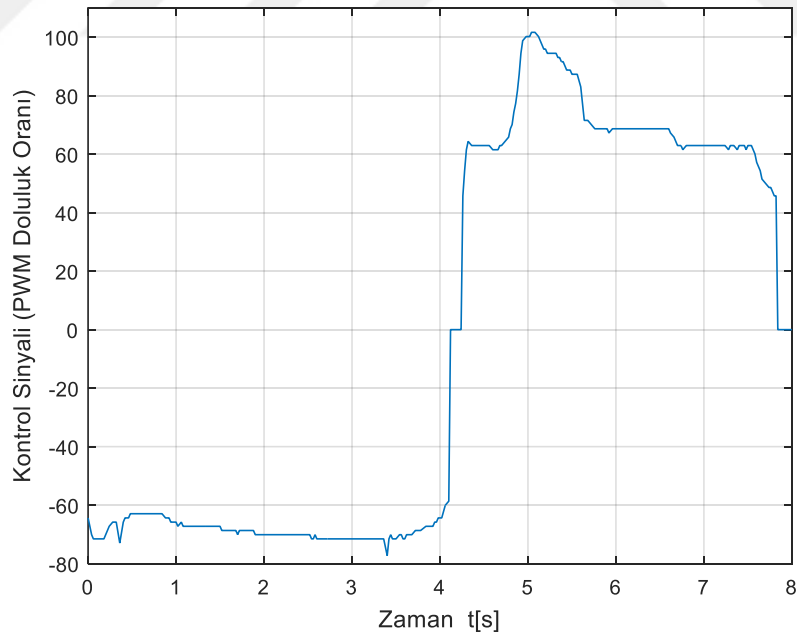
**Şekil 5.61.** 4. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi)

Şekil 5.61’ de gösterildiği gibi robot bacak hareketini en fazla  $2,26^0$  hata ile izlemeyi başarmıştır.



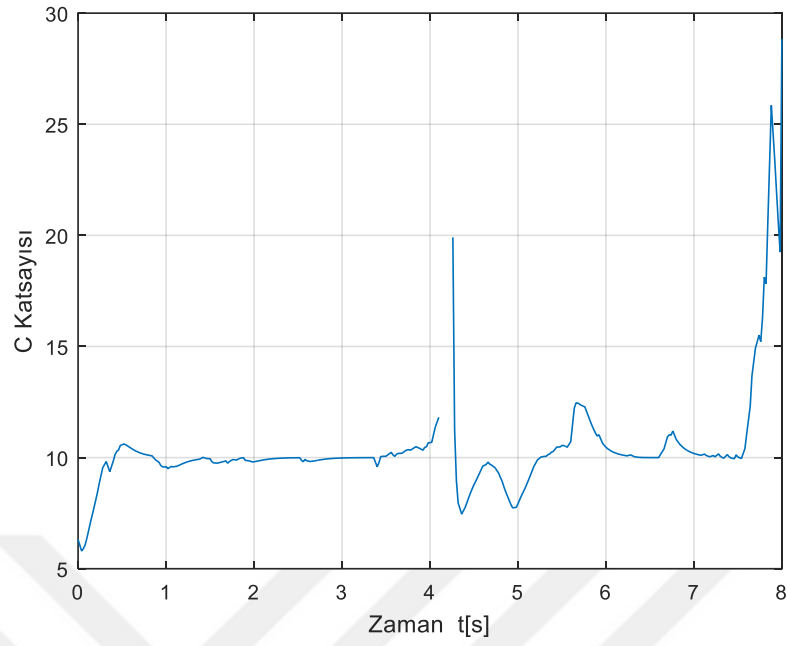
**Şekil 5.62.** 4. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi)

Şekil 5.62’ den anlaşılacağı gibi robot başarılı bir şekilde bacak hareketlerini izlemiştir.



**Şekil 5.63.** 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi)

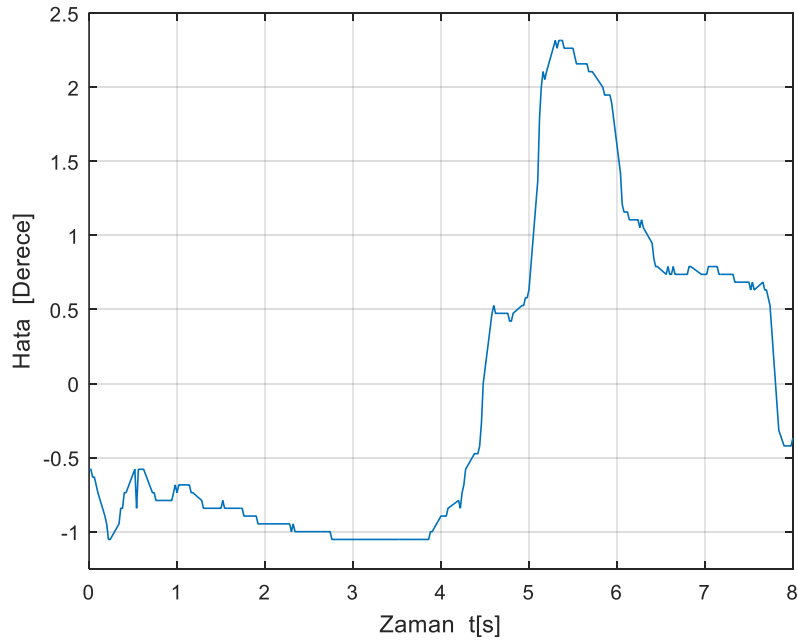
Şekil 5.63’ de görüldüğü üzere sisteme uygulanan kontrol sinyali değerleri 101,6 ile -77,27 arasındadır.



**Şekil 5.64.** 4. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi

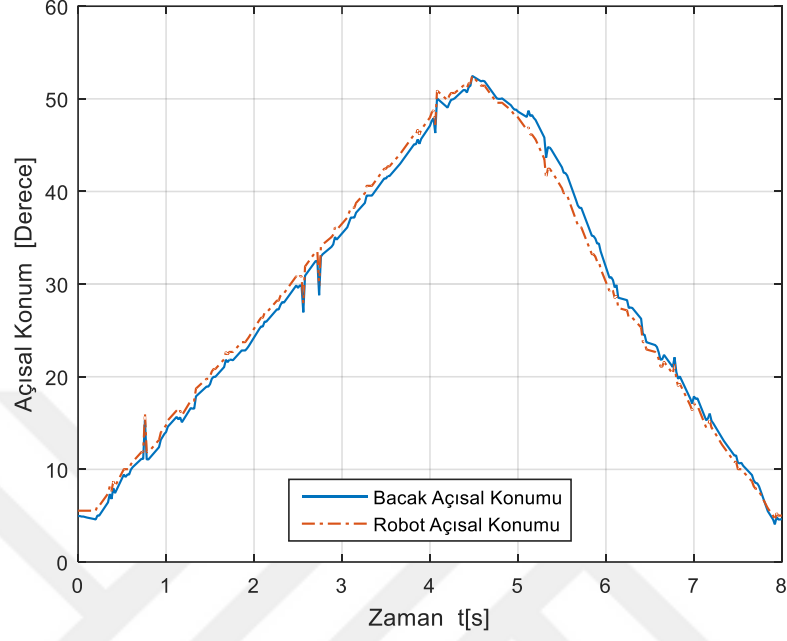
Şekil 5.64’ de görüldüğü üzere c katsayısı 5,8 ile 25,88 arasında değişkenlik göstermiştir.

BM kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.65, 5.66 ve 5.67’ de gösterilmiştir.



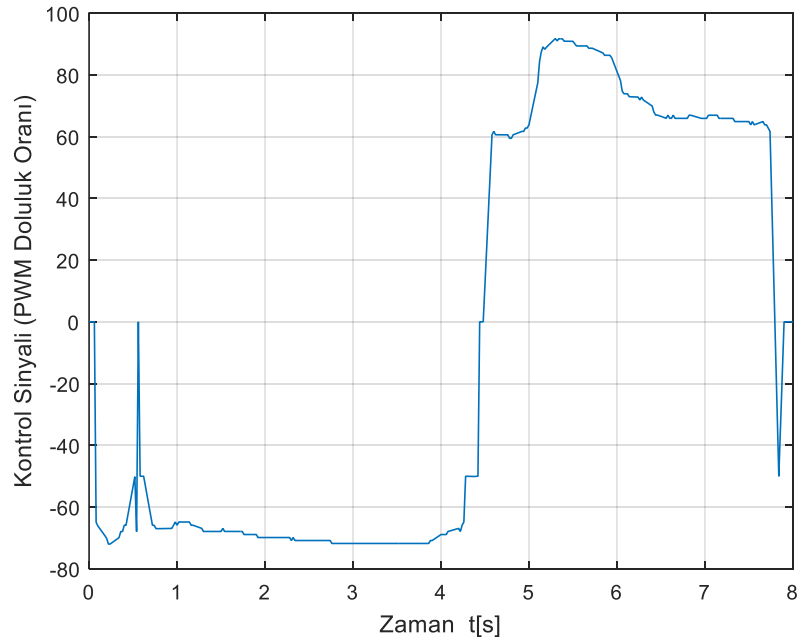
**Şekil 5.65.** 4. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.65’ de gösterildiği gibi BM kontrol yönteminde hata en fazla  $2,32^0$  değerini almıştır.



Şekil 5.66. 4. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi)

Yine Şekil 5.66’ da gösterildiği üzere robot işlevini başarılı bir şekilde yerine getirmiştir.



Şekil 5.67. 4. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

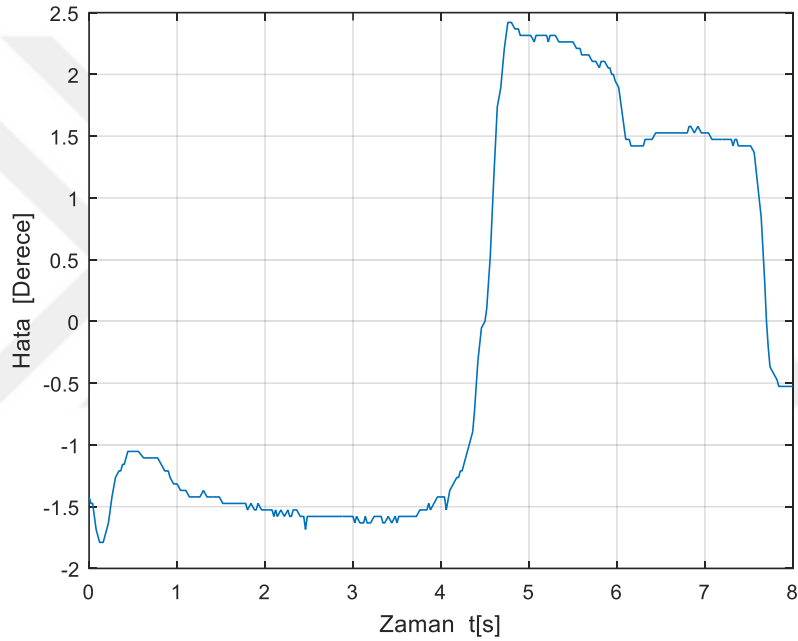


Şekil 5.67’ gösterildiği gibi sisteme uygulanan kontrol sinyali 91,77 ile -72,05 arasında değişmektedir.

### 5.3.6. 5. Durum için Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

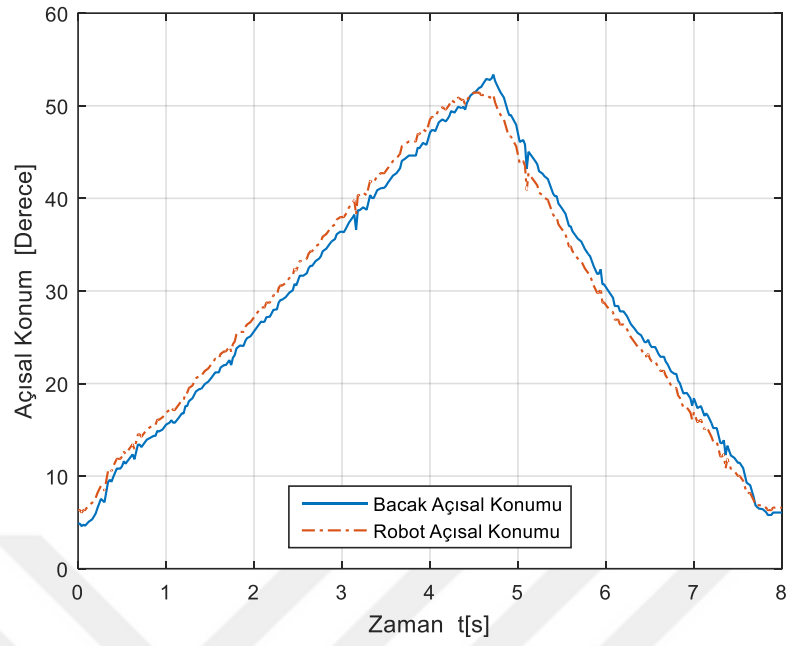
Son durumda robotun uzuv boyu 45 cm olarak sabit bırakılmış ancak robota 75 N yük uygulanmıştır.

PID kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.68, 5.69 ve 5.70’ de gösterilmiştir.



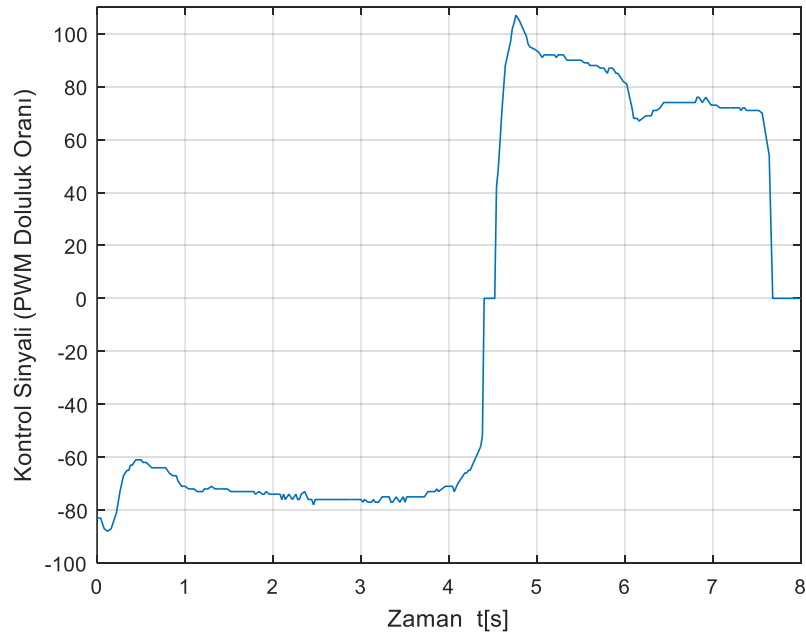
Şekil 5.68. 5. durum için hata grafiği (PID kontrol yöntemi)

Uygulanan son durumda PID kontrol yöntemi için elde edilen en büyük hata değeri Şekil 5.68’ de gösterildiği gibi  $2,42^0$ ’ dir.



**Şekil 5.69.** 5. durum için robot ve bacağın konumu (PID kontrol yöntemi)

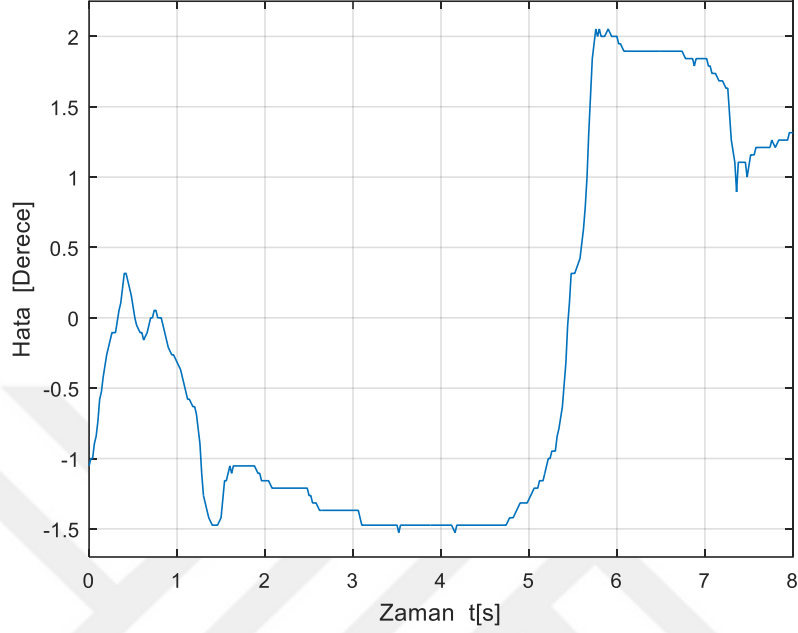
Yine bu durumda da Şekil 5.69’ da gösterildiği gibi PID kontrol yöntemi başarılı bir şekilde sistemin kontrolünü sağlamıştır.



**Şekil 5.70.** 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (PID kontrol yöntemi)

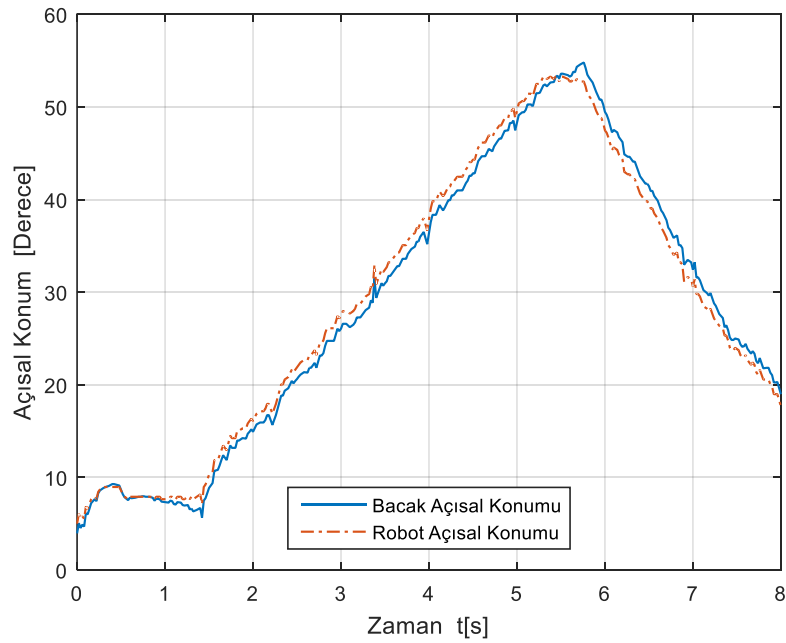
Robot hareketlerinin sağlanması için uygulanan kontrol sinyali Şekil 5.70 de gösterildiği gibi 107 ile -88 değerleri arasındadır.

KKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.71, 5.72 ve 5.73’ da gösterilmiştir.



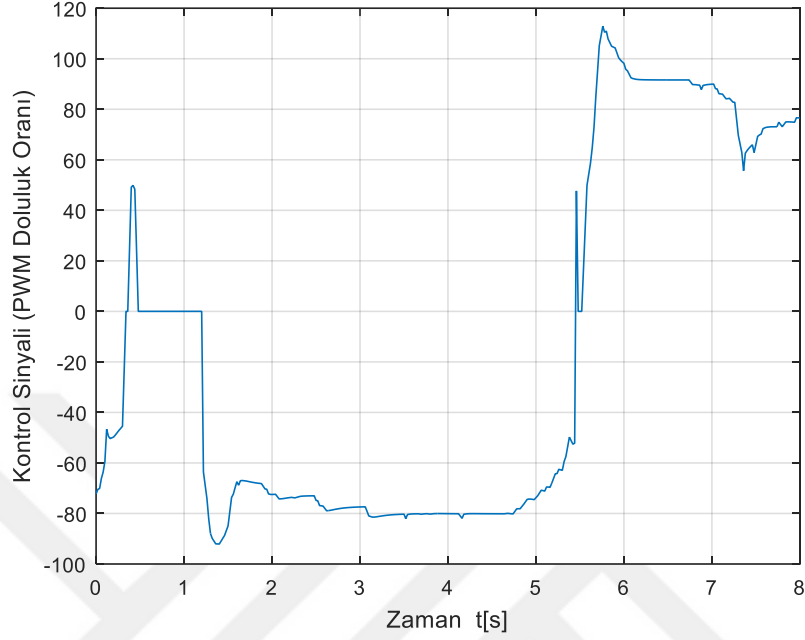
Şekil 5.71. 5. durum için hata grafiği (KKK yöntemi)

Şekil 5.71’ de gösterildiği gibi KKK yönteminde 5. durum için ortaya çıkan en büyük hata değeri  $2,05^0$ ’ dir.



Şekil 5.72. 5. durum için robot ve bacağın konumu (KKK yöntemi)

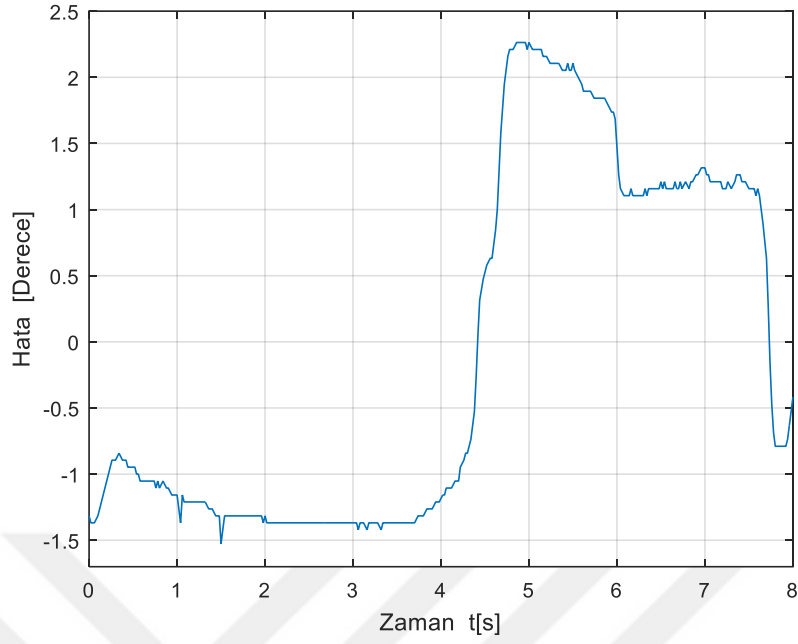
KKK yöntemi de Şekil 5.72’ de gösterildiği gibi sistemin kontrolünü başarılı bir şekilde sağlamıştır.



Şekil 5.73. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (KKK yöntemi)

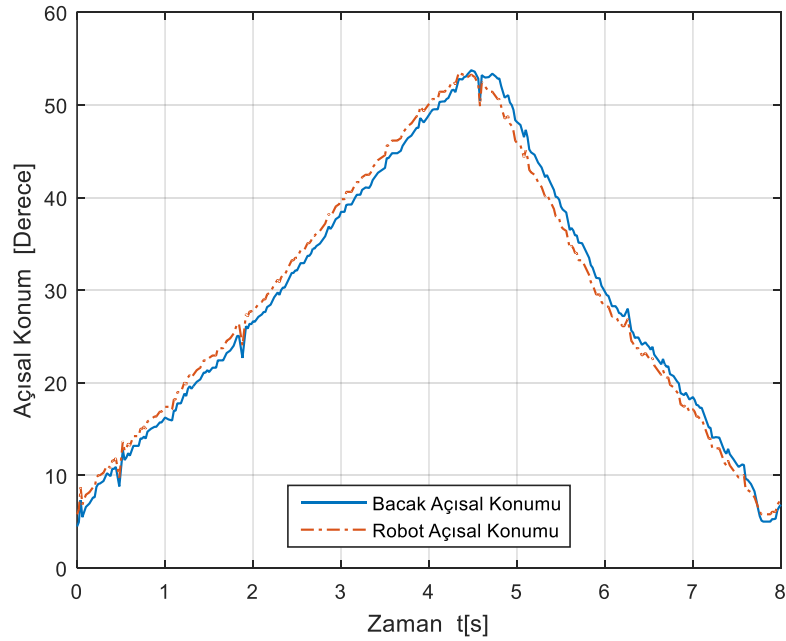
KKK yönteminde kontrol sinyali Şekil 5.73’ de gösterildiği gibi 112,9 ile -92,11 değerleri arasında değişkenlik göstermiştir.

HKKK kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum, kontrol sinyali ve  $c$  katsayısının değişim grafikleri Şekil 5.74, 5.75, 5.76 ve 5.77’ da gösterilmiştir.



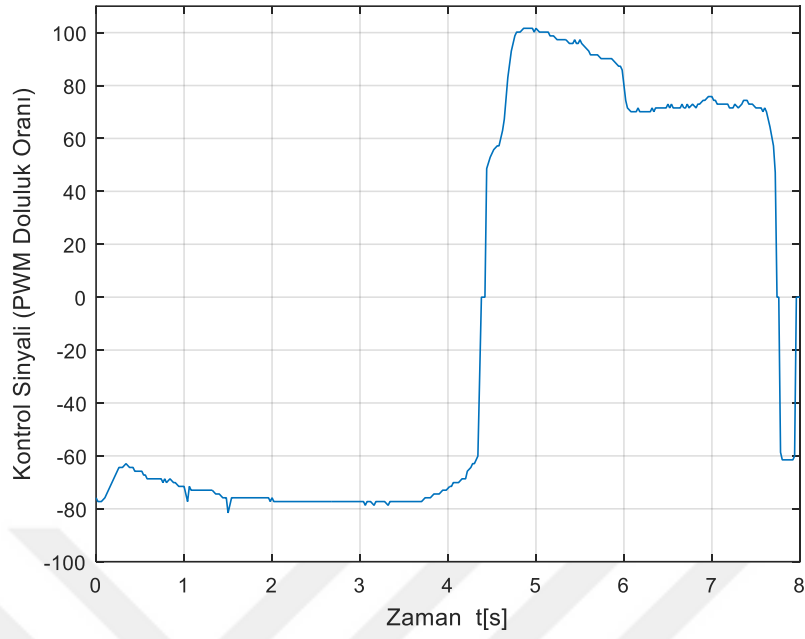
**Şekil 5.74.** 5. durum için hata grafiği (HKKK yöntemi)

HKKK yöntemi uygulandığında 5. durum için hata değeri Şekil 5.74’ de gösterildiği gibi  $2,26^0$ ’ nin üstüne çıkmamıştır.



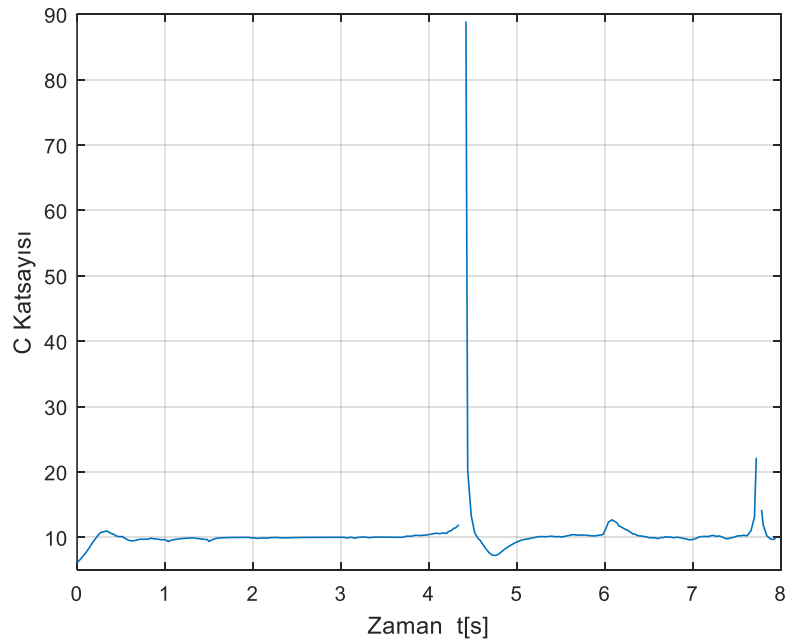
**Şekil 5.75.** 5. durum için robot ve bacağın konumu (HKKK yöntemi)

Şekil 5.75’ den görüldüğü üzere diğer durumlarda olduğu gibi bu durumda da robotun bacak hareketlerini başarılı bir şekilde izlemiştir.



**Şekil 5.76.** 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (HKKK yöntemi)

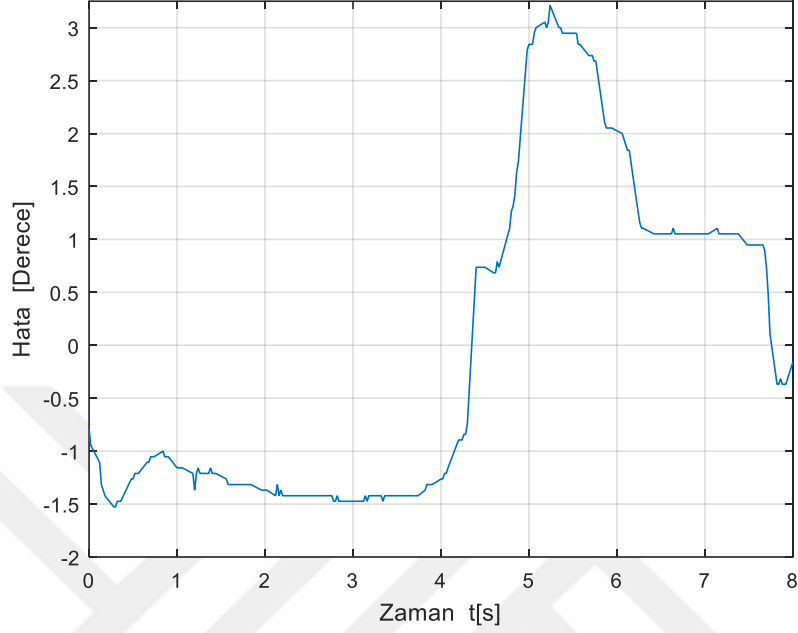
Şekil 5.76’ da gösterildiği gibi hataları ortadan kaldırmak için uygulanan kontrol sinyali 101,6 ile -81,57 değerleri arasındadır.



**Şekil 5.77.** 5. durum için HKKK yönteminde c katsayısı değişimi

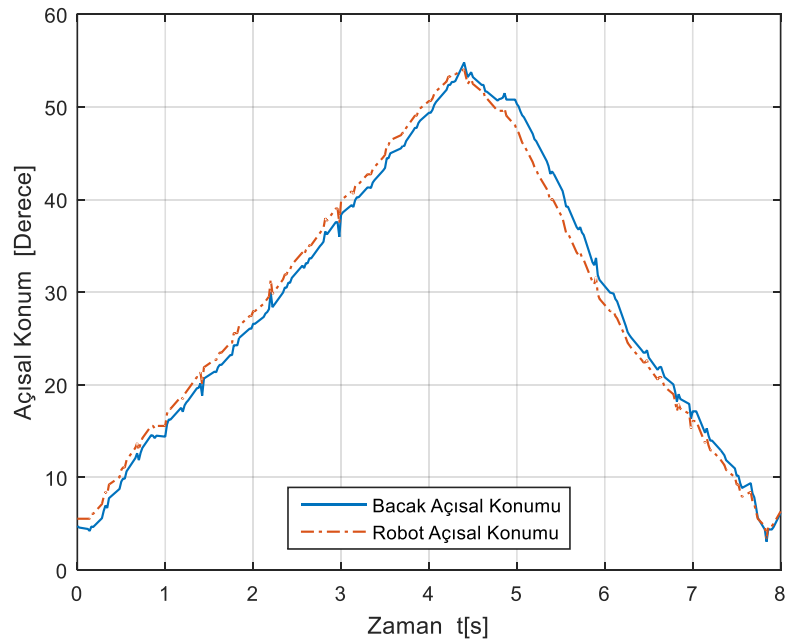
HKKK yönteminin c katsayısı ise 6,40 ile 88,89 değerleri değişkenlik göstermiştir.

BM kontrol yöntemi için elde edilen hata, bacak-robot konum ve kontrol sinyali grafikleri Şekil 5.78, 5.79 ve 5.80' de gösterilmiştir.



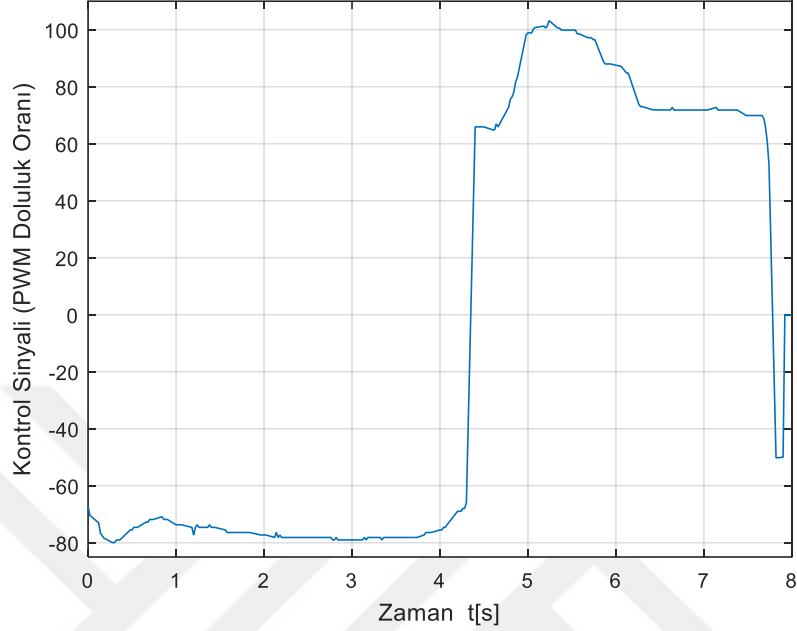
Şekil 5.78. 5. durum için hata grafiği (BM kontrol yöntemi)

BM kontrol yönteminin sisteme uygulanması sonucunda Şekil 5.78' de gösterildiği gibi en fazla  $3,21^0$  lik hata değeri görülmüştür.



Şekil 5.79. 5. durum için robot ve bacağın konumu (BM kontrol yöntemi)

Şekil 5.79' dan anlaşılacağı üzere bu yöntemde de diğer yöntemlerde olduğu gibi robotun bacağı izleme işlevini yerine getirildiği görülmektedir.



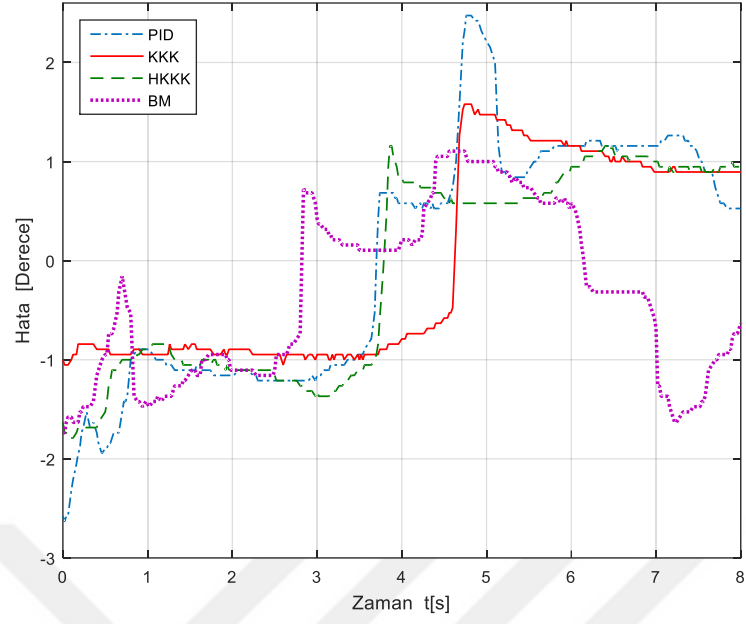
Şekil 5.80. 5. durum için robota uygulanan kontrol sinyali (BM kontrol yöntemi)

Robota bacak hareketlerinin izlenmesi esnasında Şekil 5.80' görüldüğü gibi 103,2 ile -79,98 değerleri arasında bir kontrol sinyali uygulanmıştır.

### 5.3.7. Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

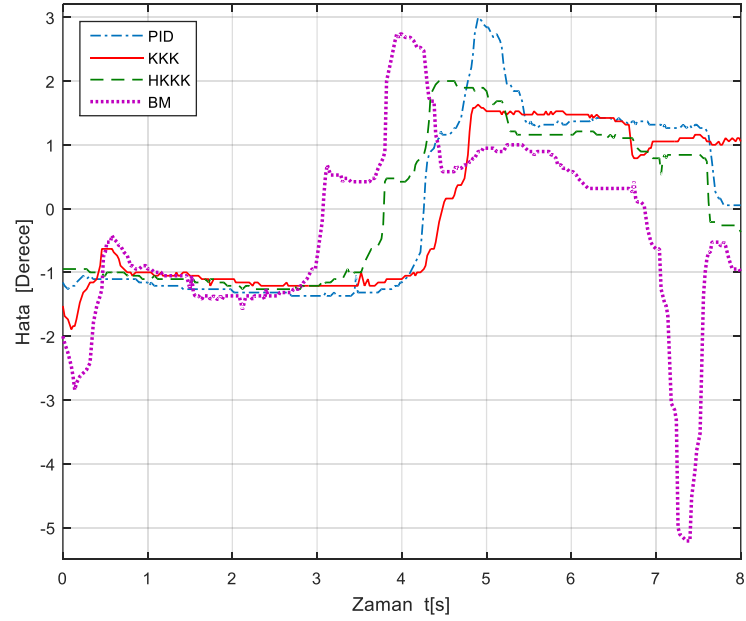
Bu bölümde elde edilen bütün deneysel sonuçlar durumlara göre karşılaştırılmıştır. Şekil 5.81' de 1. durum, 5.82' de 2. durum, 5.83' de 3. durum, 5.84' de 4. durum ve 5.85' de ise 5. durum için hata değerlerinin karşılaştırılmaları verilmiştir.





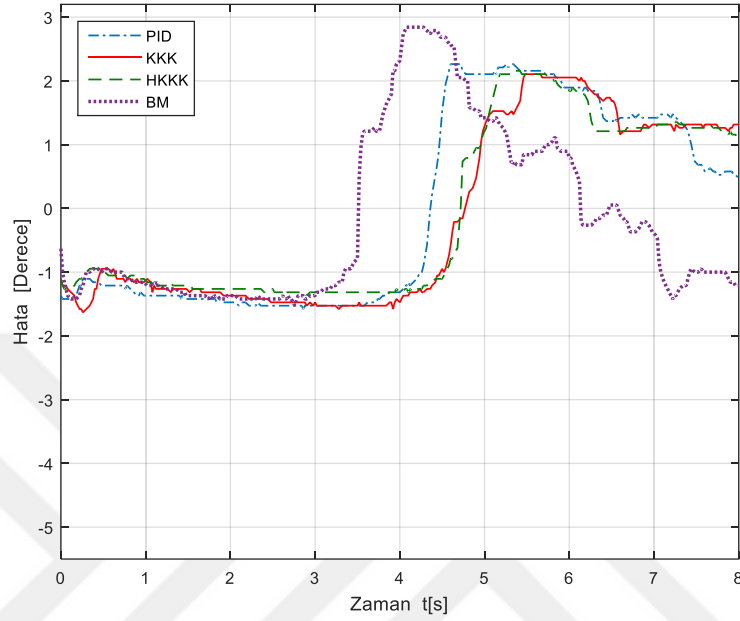
**Şekil 5.81.** 1. durum hata karşılaştırması

Şekil 5.81’ de görüldüğü gibi 1. Durumda en büyük hata değeri PID kontrol yöntemine aittir. Her ne kadar bu yöntem en başarısız yöntem gibi gözükse de hata değerleri incelendiğinde her kontrol yöntemi için robotun bacak hareketlerini başarılı bir şekilde izlediği gözlemlenmiştir.



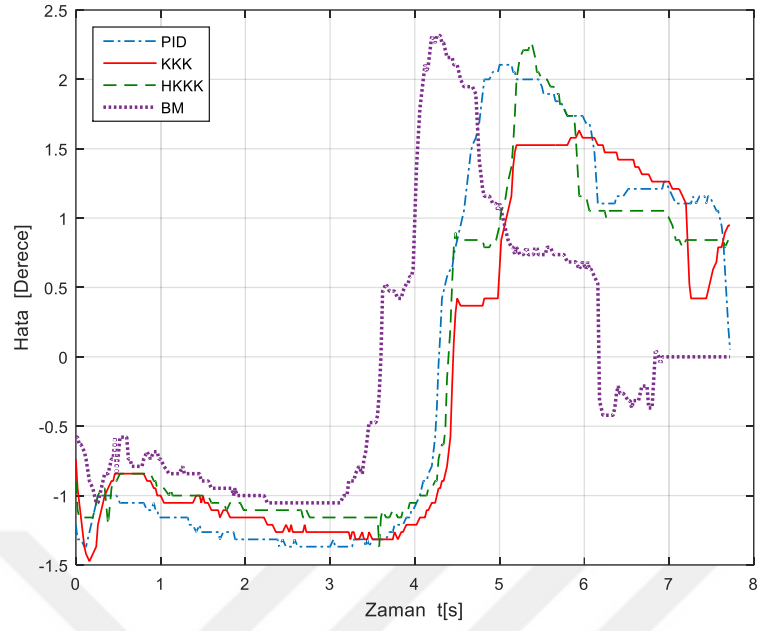
**Şekil 5.82.** 2. durum hata karşılaştırması

2. durumda sisteme 25 N yük eklendiği için sistemin parametrelerinde değişikliğe sebep olmuştur. Bu ekleme sonucunda Şekil 5.82’ de görüldüğü gibi BM kontrol yönteminin başarı düşmüştür. Diğer yöntemlerde ise çok bir değişiklik olmamıştır.



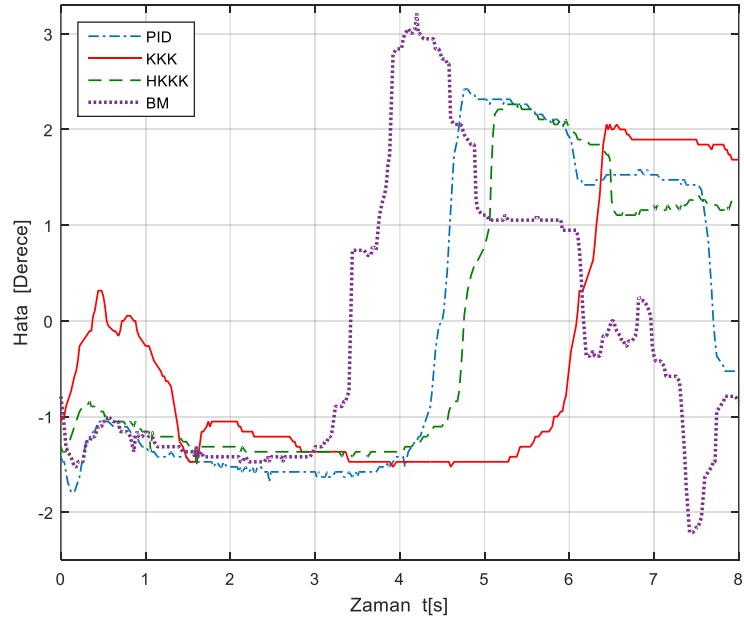
**Şekil 5.83.** 3. durum hata karşılaştırması

Şekil 5.83’ de görüldüğü gibi yine parametrik değişiklikten en fazla etkilenen kontrol yöntemi BM kontrol yöntemi olarak değerlendirilebilir. Ancak her ne kadar performansı düşmüş olsa da robotun görevini yerine getirdiği görülmektedir.



**Şekil 5.84.** 4. durum hata karşılaştırması

Şekil 5.84’ de görüldüğü gibi 4. durumda da bütün kontrol yöntemleri sistemin kontrolünü başarılı bir şekilde sağlamıştır. Yine parametrik değişiklikler olduğundan BM kontrol yönteminin performansında küçük değişikliklere rastlanmıştır.



**Şekil 5.85.** 5. durum hata karşılaştırması

Son olarak Şekil 5.83’ de görüldüğü gibi kontrol yöntemleri en fazla 3<sup>0</sup>’ lik hata ile bacak hareketini izlemeyi başarmışlardır.

Tablo 5.3’ de her kontrol yönteminin uygulaması sonucunda elde edilen en yüksek ve ortalama hata değerleri verilmiştir.

**Tablo 5.3.** Deneysel sonuçlar için hatanın en yüksek ve ortalama değerleri

|                                | <b>PID</b> | <b>KKK</b> | <b>HKKK</b> | <b>BM</b> |
|--------------------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| <b>1.Durum için Maks. Hata</b> | 2.6316     | 1.5789     | 1.7895      | 1.7368    |
| <b>2.Durum için Maks. Hata</b> | 3.0000     | 1.8947     | 2.0000      | 2.7370    |
| <b>3.Durum için Maks. Hata</b> | 2.2631     | 2.1053     | 2.1579      | 2.8421    |
| <b>4.Durum için Maks. Hata</b> | 2.1053     | 1.6316     | 2.2631      | 2.3158    |
| <b>5.Durum için Maks. Hata</b> | 2.4210     | 2.0526     | 2.2631      | 3.2105    |
| <b>1.Durum için Ort. Hata</b>  | 0.0073     | 0.0637     | 0.1045      | 0.3587    |
| <b>2.Durum için Ort. Hata</b>  | 0.0065     | 0.0729     | 0.0427      | 0.3543    |
| <b>3.Durum için Ort. Hata</b>  | 0.0015     | 0.1588     | 0.0905      | 0.1554    |
| <b>4.Durum için Ort. Hata</b>  | 0.0538     | 0.1862     | 0.0877      | 0.0548    |
| <b>5.Durum için Ort. Hata</b>  | 0.1230     | 0.3966     | 0.1286      | 0.1639    |

Tablo 5.3’ de verilmiş olan değerlerden de anlaşılacağı üzere özellik KKK ve HKKK kontrol yöntemleri sistemin kontrolünde bütün durumlarda başarılı olmuştur. Bilindiği üzere KKK ve HKKK yönteminin en büyük avantajı parametrik değişikliklerden bağımsız olmalarıdır. Bu çalışmada da robota uygulanan kuvvet ve uzuv boyutunun değiştirilmesi sonucunda parametreler değiştirilmiş ancak KKK ve HKKK yöntemlerinde hata değerleri çok az değişmiştir. PID kontrol yöntemi bu yöntemlere göre az da olsa daha kötü sonuç vermiş olsa da BM kontrol yöntemine göre çok daha başarılı olduğu görülmektedir.

Bu deneysel çalışma üzerinde uygulanan kontrolcü parametreleri deneme yanılma yoluyla bulunmuştur. Optimizasyon sonucunda bu parametrelerin daha da iyileştirilmesi ile kontrolcülerin performansları artırılabilir. Böylece hata değerleri en az seviyede tutularak daha güçlü kontrol elde edilecektir.

## 6. SONUÇLAR VE KAZANIMLAR

Güçlendirme amaçlı üretilen alt ekstremité dış iskelet robotların işlevselliğini arttıran en büyük unsur yapılan bütün hareketleri takip edebilme kabiliyetidir. Bu referans bilgi göz önünde bulundurularak şekillendirilmiş olan bu tez çalışması kapsamında insan bacağına bütün hareketlerini tekrar edebilecek kabiliyette bir robot geliştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle insan bacağı ve robotun matematiksel modeli oluşturulmuş, benzetim çalışmaları yapılmış, prototip tasarımı gerçekleştirildikten sonra da deneysel uygulama sonuçları elde edilerek karşılaştırmaları yapılmıştır.

Dış iskelet robot ve insan bacağına bir ikiz çift sarkaç modeli olarak tasarlanmıştır. Literatürde karşılaşılmamış ve yayınlar ile literatüre katkı sağlamış olan bu matematiksel modelin analiz edilmesi sonucunda elde edilen hareket denklemleri MATLAB ile çözümlenerek benzetim çalışmalarının yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında dış iskelet çalışmalarına yönelik olan genellikle klasik kontrol yöntemleri uygulanmış ve ağırlıklı olarak simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Bu çalışmada ise hem sayısal simülasyon hem de deneysel olmak üzere ileri kontrol yöntemleri uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir.

Benzetim çalışmaları içerisinde dört farklı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Geleneksel olarak uygulanan PID kontrol yönteminin dışında ileri kontrol yöntemlerinden olan kayan kipli kontrol, yapay sinir ağı tabanlı kontrol ve bulanık mantık tabanlı kontrol yöntemleri de sisteme uygulanarak bu yöntemlerin performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

Benzetim çalışmalarından sonra deneysel uygulamada kullanılması hedeflenen dış iskelet robot için mümkün olduğunca hafif, giyilebilir ve kişiye göre parametrik değişimleri mümkün kılan bir mekanik tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarım Solidworks yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Mafsallarda oluşacak büyük güçlere karşı insan sağlığını emniyete almak için özel parçalar tasarlanmıştır. Mafsalların hareket kabiliyetleri insanın günlük hareketlerini etkilemeyecek şekilde seçilmiştir. Oturma, çömelme, yürüme ve koşma hareketlerinin kısıtlanmaması için diz mafsalı  $121^{\circ}$ , kalça mafsalı ise  $126^{\circ}$  lik bir hareket kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca robotun parametrik değişiklikleri sahip olması amaçlanarak uzuvların boylarının ayarlanabilir olması sağlanmıştır. Bu sayede robotun kullanıcı kitlesinin arttırılması hedeflenmiştir.

Tasarımın diğer bir özgün yönü daha önce karşılaşılmamış bir insan-robot etkileşim yönteminin kullanılmasıdır. Her mafsala yerleştirilmiş olan lineer potansiyometreler sayesinde eklemlerde oluşan hataların tespit edilmiştir. Bu hata değerleri kontrolcü içerisine giriş değerleri olarak verilerek ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır.

Deneysel çalışma içerisinde literatüre katkı sağlanmış diğer bir konu da uygulanan kontrol yöntemleridir. Deneysel uygulama esnasında sisteme PID, kayan kipli, hareketli kayan kipli ve bulanık mantık tabanlı kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Literatürde daha önce, hareketli kayan kipli kontrol yönteminin bir dış iskelet robota uygulanmasına rastlanmamıştır. Ayrıca mekanik tasarımın özelliği gereği sistemde meydana gelen parametrik değişiklikler karşısında kontrolcülerin başarısı araştırılmıştır ve karşılaştırılmıştır.

Sistemin taşınması gereken 50 kg yük için hidrolik tahrik yerine elektrikli tahrik tercih edilerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Literatürde görüldüğü kadarıyla dış iskelet çalışmalarında genellikle eyleyici olarak hidrolik tahrik sistemi tercih edilmekte ve çok çeşitli algılayıcılar kullanılmaktadır. Bu durum sistemin maliyetini arttırmaktadır. Sunulan tez çalışmasında kullanılan elektrikli tahrik sistemi ve tek tip potansiyometre algılayıcılar sayesinde hızlı cevap verebilen ve maliyet açısından oldukça ekonomik bir tasarım elde edilmiştir.

Tez çalışması içerisinde yapılan diğer bir yenilik ise BLDC motorun yönünün değiştirilmesi için tasarlanan elektronik sürücü devresidir. Bu motorların elektronik hız kontrolcülerinde (ESC) motor yönünün değişmesi işleminin 2 saniye gibi uzun bir sürede olması deneysel uygulamanın gerçekleşmesi açısından uygun değildir. Çünkü bacak hareketleri yani yürüyüş veya benzer bir hareket esnasında motorun bacak hareketini takip edebilmesi için anlık olarak yön değiştirmeleri gerekmektedir. Bu sebeple motorun milinin dönüş yönünü değiştirmek amacıyla ESC ile uyumlu olarak çalışacak bir elektronik devre tasarlanarak kullanılmıştır.

Çalışmanın ileriye dönük hedefleri arasında bir TÜBİTAK 3501 - Kariyer Geliştirme Programı kapsamından bir proje yazılması planlanmaktadır. Bu proje sayesinde tez çalışmasında üretilen prototip geliştirilecek ve günlük kullanıma uygun hale getirilmesine çalışılacaktır.

## 7. KAYNAKÇA

- Arslan, Ö., & Gürel, O. (2008). Farklı Tip ve Boyutta Gemilerin Seçiminin Bulanık Mantık Yöntemiyle İncelenmesi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 55-60.
- Bakioglu, M., & Aldemir, Ü. (1995). Depreme Dayanıklı Bina Tasarımında Pasif Kontrol. *3. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, (s. 65-74). İstanbul.
- Bellman, R., & Zadeh, L. (1970). Decision–Making in a Fuzzy Environment. *Management Science*, 141-164.
- Beyl, P., Van Damme, M., Van Ham, R., Versluys, R., Vanderborght, R., & Lefeber, D. (2008). An Exoskeleton for Gait Rehabilitation: Prototype Design and Control Principle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (s. 2037-2042). CA.
- Borovin, G., Kostyuk, A., Seet, G., & Iastrebov, V. (2006). Computer Simulation of Hydraulic System of Exoskeleton. *Matem. Mod.*, 39–54.
- Cao, H., Ling, Z., Zhu, J., Wang, Y., & Wang, W. (2009). Design Frame of A Leg Exoskeleton For Load-Carrying Augmentation. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (s. 426–431). Guilin.
- Cao, H., Yin, Y., Du, D., Lin, L., Gu, W., & Yang, Z. (2006). Neural Network Inverse Dynamic Online Learning Control On Physical Exoskeleton. *13th International Conference On Neural Information Processing*.
- Choi, S., & Park, D. (1994). Moving Sliding Surface For Fast Tracking Control of Second-Order Dynamic Systems. *J Dyn Syst: T ASME*, 154–158.
- Chu, A., Kazerooni, H., & Zoss, A. (2005). On the Biomimetic Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX). *International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona.
- Corliss, W., & Johnsen, E. (1968). *Teleoperator Controls An Aec-Nasa Technology Survey*. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration.

- Costa, N., & Caldwell, D. (2006). Control of a Biomimetic “Soft-actuated” 10 DoF Lower Body Exoskeleton. *Proceedings of the IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics*. Piza.
- Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*. New York: Van Nostrand.
- Deng, W., Lee, J.-W., & Lee, H.-J. (2009). Kinematics Simulation and Control of a New 2 DOF Parallel Mechanism Based on Matlab/SimMechanics. *ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*.
- Dollar, A., & Herr, H. (2008). Lower Extremity Exoskeletons and Active Orthoses: Challenges and State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Robotics*, s. 144–158.
- Frisoli, A., Bergamasco, M., Carboncini, M., & Rossi, B. (2009). Robotic Assisted Rehabilitation in Virtual Reality With The L-EXOS. *Studies in Health Technology and Informatics*, 40–54.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. USA: Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- Güngör, Z., & Arıkan, F. (2000). Application of Fuzzy Decision Making in Part-Machine Grouping. *Int. J. Production Economics*, 181-193.
- Haykin, S. (1999). *Neural Networks A Comprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice Hall.
- Karataş, M. (2011). Statik Senkron Kompanzatorün PID Kontrolör ile Kontrolü. *Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği*. Malatya.
- Kazerooni, H. (2005). Exoskeletons for Human Power Augmentation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, s. 3459–3464.
- Lenzo, B. (2013). Design of Novel Robotic Exoskeletons with Hybrid Actuation for Human. Scuola Superiore Sant'anna-Pisa: Innovative Technologies.
- Liu, X., Low, K., & Yu, H. (2004). Development of A Lower Extremity Exoskeleton For Human Performance Enhancement. *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Sendai.



- Low, K., Liu, X., & Yu, H. (2005). Development Of Ntu Wearable Exoskeleton System For Assistive Technologies. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*. Niagara Falls.
- Low, K., Liu, X., Goh, C., & Yu, H. (2006). Locomotive Control Of A Wearablelower Exoskeleton For Walking Enhancement. *Journal of Vibration and Control*, 1311-1336.
- Man, K., Tang, K., & Kwong, S. (1996). Genetic Algorithms: Concepts and Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 519-534.
- Marcheschi, S., Salsedo, F., Fontana, M., & Bergamasco, M. (2011). Body Extender: Whole Body Exoskeleton for Human Power Augmentation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (s. 611–616).
- Mehrotra, K., Mohan, C., & Ranka, S. (1996). *Elements of Artificial Neural Networks*. Cambridge: MIT Press.
- Morogumi, S. (2003). Exoskeleton Suit For Human Motion Assistance. *Ph.D Thesis University of California*.
- Nalbantoğlu, M. (2009). Güç Sistemlerinin Kararlılığı için Senkron Generatörün Uyartımının Kayma Kipli Kontrolü. *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Anabilim Dalı*. Elazığ.
- Önen, Ü. (2011). İnsan Yürüyüşünü Destekleyici Dış İskelet Tasarımı ve Kontrolü. *Doktora Tezi*. Konya.
- Öztürk, A. (2007). Güç Sistemlerindeki Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma ile İncelenmesi. *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*. Sakarya.
- Ragonesi, D., Agrawal, S., Sample, W., Rahman, T., & Wrex, A. (2011). Series Elastic Actuator Control of a Powered Exoskeleton. *Proceedings 33rd Annual International Conference of the IEEE*, (s. 3515–3518). Boston.
- Reinicke, C., Fleischer, C., & Hommel, G. (2005). Exploiting Motion Symmetry İn Control Of Exoskeleton Limbs. *Proc. of the Int. Conf. on Human Computer Interaction (IASTED-HCI 2005)*. Arizona.

- Sanchez, R., Liu, J., Rao, S., Shah, P., Smith, R., Rahman, T., & Reinkensmeyer, D. (2006). Automating Arm Movement Training Following Severe Stroke: Functional Exercises With Quantitative Feedback In A Gravity-Reduced Environment. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 378–389.
- Sankai, Y. (2011). Hal: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernics. *Robotics Research-Springer*, s. 25–34.
- Siler, W., & James, J. (2005). *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*. New Jersey: John Wiley Pub. Comp.
- Slotine, J., & Li, W. (1991). *Applied Nonlinear Control*. New Jersey: Prentice Hall.
- Strausser, K., & Kazerooni, H. (2011). The Development and Testing of A Human Machine Interface for A Mobile Medical Exoskeleton. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4911–4916.
- Tutucu, İ. (2006). *Otomatik Kontrol*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- Vatansever, F., & Şen, D. (2013). Genetik Algoritma Tabanlı PID Kontrolör Simülatörü Tasarımı. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*.
- Veneman, J., Kruidhof, R., Hekman, E., Ekkelenkamp, R., Van Asseldonk, E., & Van der Kooij, H. (2007). Design And Evaluation Of The LOPES Exoskeleton Robot For Interactive Gait Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 379–386.
- Walsh, C., Paluska, D., Pasch, K., Grand, W., Valiente, A., & Herr, H. (2006). Development of A Lightweight, Underactuated Exoskeleton for Load-Carrying Augmentation. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*. Florida.
- Walsh, C., Pasch, K., & Herr, H. (2006). An Autonomous, Underactuated Exoskeleton For Load-Carrying Augmentation. *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Beijing.
- Yager, R. (1981). A New Methodology for Ordinal Multiobjective Decisions Based on Fuzzy Sets. *Decision Science*, 589-605.

- Yang, C., Niu, B., & Chen, Y. (2005). Adaptive Neuro-Fuzzy Control Based Development of A Wearable Exoskeleton Leg for Human Walking Power Augmentation. *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, (s. 467-472). California.
- Zhu, J., Zhou, H., & Wang, Y. (2012). Human-Machine Coupling Control of Exoskeleton Intelligent Load Carry Robot. *IEEE/International Conference on Mechatronics and Automation*. Chengdu.
- Zoss, A., Kazerooni, H., & Chu, A. (2006). Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, s. 128–138.
- Zurada, J. (1992). *Introduction to Artificial Neural Systems*. St. Paul: West Publishing Com.

## 8. EKLER

### 8.1. Pwm Sinyallerinin Frekansını Değiştiren FPGA Programı

```
// PWM sinyallerini Standart Servo Sinyallerine Dönüştüren FPGA Programı
module
deneme(clk50MHz,PWM_1,dir_1,Servo_1,LEDS1,sign_1,PWM_2,dir_2,Servo_2,LEDS2,sign_2,PWM_3,dir_3,Servo_3
,LEDS3,sign_3,PWM_4,dir_4,Servo_4,LEDS4,sign_4);

input clk50MHz;
/** MOTOR-1 ****
input PWM_1;
input dir_1;
output reg Servo_1=1'd0;
output reg sign_1=1'd0;
output reg LEDS1=1'd0;
reg dir1=1'd0;
reg PWM1=1'd0;
reg [19:0] sayac_1=20'd0;
reg [1:0] Status_1=2'd0;
reg [19:0] sayac_T1=20'd0;
reg [19:0] S_duty1=20'd0;
reg [19:0] D_duty1=20'd0;
reg [19:0] down_1=20'd75500;
/** MOTOR-2 ****
input PWM_2;
input dir_2;
output reg Servo_2=1'd0;
output reg sign_2=1'd0;
output reg LEDS2=1'd0;
reg dir2=1'd0;
reg PWM2=1'd0;
reg [19:0] sayac_2=20'd0;
reg [1:0] Status_2=2'd0;
reg [19:0] sayac_T2=20'd0;
reg [19:0] S_duty2=20'd0;
reg [19:0] D_duty2=20'd0;
reg [19:0] down_2=20'd75500;
/** MOTOR-3 ****
input PWM_3;
input dir_3;
output reg Servo_3=1'd0;
output reg sign_3=1'd0;
output reg LEDS3=1'd0;
reg dir3=1'd0;
reg PWM3=1'd0;
reg [19:0] sayac_3=20'd0;
reg [1:0] Status_3=2'd0;
reg [19:0] sayac_T3=20'd0;
reg [19:0] S_duty3=20'd0;
reg [19:0] D_duty3=20'd0;
reg [19:0] down_3=20'd75500;

/** MOTOR-4 ****
input PWM_4;
input dir_4;
output reg Servo_4=1'd0;
output reg sign_4=1'd0;
output reg LEDS4=1'd0;
reg dir4=1'd0;
reg PWM4=1'd0;
reg [19:0] sayac_4=20'd0;
```

```

reg [1:0] Status_4=2'd0;
reg [19:0] sayac_T4=20'd0;
reg [19:0] S_duty4=20'd0;
reg [19:0] D_duty4=20'd0;
reg [19:0] down_4=20'd75500;

reg [19:0] down_sabit=20'd75500;
reg [1:0] sayac_w=2'd0;
reg [19:0] sabit_=20'd25000; // 500 mikrosaniye süre
reg [19:0] periyot_=20'd1000000; // 20 milisaniye süre

always @ (posedge clk50MHz) begin
sabit_<=20'd25510; // 500 mikrosaniye süre
periyot_<=20'd1000000; // 20 milisaniye süre
down_sabit<=20'd75500;

/** MOTOR-1 *****/
PWM1<=PWM_1;
dir1<=dir_1;
if(sayac_w<2'd3) begin
// sayac_1'i 4 eşit parça halinde saydırıyoruz
sayac_w<=sayac_w+2'd1;
end
if(sayac_w==2'd3) begin
// Bu 4 parçanın her biri 510 mikros =25510 (clk palsi)
sayac_w<=2'd0;
if(Status_1==2'd1 && sayac_1<20'd25510) begin
// 490 Hz PWM için Periyot=2.040 ms =102040 (clk palsi)
sayac_1<=sayac_1+20'd1;
end
if(Status_1==2'd0 && PWM1==1'd1) begin Status_1<=2'd1; LEDS1<=1'd1; end
if(Status_1==2'd1 && PWM1==1'd1) begin S_duty1<=S_duty1+20'd1; end
if(Status_1==2'd1 && PWM1==1'd0) begin Status_1<=2'd2; end
if(Status_1==2'd1 && sayac_1==20'd25510) begin Status_1<=2'd2; end
if(Status_1==2'd2 ) begin D_duty1<=S_duty1; sayac_1<=20'd0; Status_1<=2'd3; end
if(Status_1==2'd3 ) begin
S_duty1<=20'd0; Status_1<=2'd0; LEDS1<=1'd0;
if(D_duty1>sabit_) begin D_duty1<=sabit_; end
end
end
if(sayac_T1<periyot_) begin
sayac_T1<=sayac_T1+20'd1;
end
if(sayac_T1==periyot_) begin
sayac_T1<=20'd0; Servo_1<=1'd1; sign_1<=1'd1;
down_1<=D_duty1+down_sabit;
end
if(sayac_T1==down_1) begin
Servo_1<=1'd0; sign_1<=1'd0;
end
end

/** MOTOR-2 *****/
PWM2<=PWM_2;
dir2<=dir_2;
if(sayac_w<2'd3) begin
// sayac_1'i 4 eşit parça halinde saydırıyoruz
sayac_w<=sayac_w+2'd1;
end
if(sayac_w==2'd3) begin
// Bu 4 parçanın her biri 510 mikros =25510 (clk palsi)
sayac_w<=2'd0;
if(Status_2==2'd1 && sayac_2<20'd25510) begin
// 490 Hz PWM için Periyot=2.040 ms =102040 (clk palsi)
sayac_2<=sayac_2+20'd1;
end
end

```

```

        if(Status_2==2'd0 && PWM2==1'd1) begin    Status_2<=2'd1; LEDS2<=1'd1;        end
        if(Status_2==2'd1 && PWM2==1'd1) begin    S_duty2<=S_duty2+20'd1; end
        if(Status_2==2'd1 && PWM2==1'd0) begin    Status_2<=2'd2;        end
        if(Status_2==2'd1 && sayac_2==20'd25510) begin    Status_2<=2'd2;        end
        if(Status_2==2'd2 ) begin    D_duty2<=S_duty2; sayac_2<=20'd0; Status_2<=2'd3; end
        if(Status_2==2'd3 ) begin
            S_duty2<=20'd0;        Status_2<=2'd0;        LEDS2<=1'd0;
            if(D_duty2>sabit_) begin    D_duty2<=sabit_; end
        end
    end

    if(sayac_T2<periyot_) begin
        sayac_T2<=sayac_T2+20'd1;
    end
    if(sayac_T2==periyot_) begin
        sayac_T2<=20'd0;    Servo_2<=1'd1;    sign_2<=1'd1;
        down_2<=D_duty2+down_sabit;
    end
    if(sayac_T2==down_2) begin
        Servo_2<=1'd0;    sign_2<=1'd0;
    end

/** MOTOR-3 ****
PWM3<=PWM_3;
dir3<=dir_3;
    if(sayac_w<2'd3) begin
// sayac_1'i 4 eşit parça halinde saydırıyoruz
        sayac_w<=sayac_w+2'd1;
    end
    if(sayac_w==2'd3) begin
// Bu 4 parçanın her biri 510 mikros =25510 (clk palsi)
        sayac_w<=2'd0;
        if(Status_3==2'd1 && sayac_3<20'd25510) begin
// 490 Hz PWM için Periyot=2.040 ms =102040 (clk palsi)
            sayac_3<=sayac_3+20'd1;
        end
        if(Status_3==2'd0 && PWM3==1'd1) begin    Status_3<=2'd1; LEDS3<=1'd1;        end
        if(Status_3==2'd1 && PWM3==1'd1) begin    S_duty3<=S_duty3+20'd1; end
        if(Status_3==2'd1 && PWM3==1'd0) begin    Status_3<=2'd2;        end
        if(Status_3==2'd1 && sayac_3==20'd25510) begin    Status_3<=2'd2;        end
        if(Status_3==2'd2 ) begin    D_duty3<=S_duty3; sayac_3<=20'd0; Status_3<=2'd3; end
        if(Status_3==2'd3 ) begin
            S_duty3<=20'd0;        Status_3<=2'd0;        LEDS3<=1'd0;
            if(D_duty3>sabit_) begin    D_duty3<=sabit_; end
        end
    end

    if(sayac_T3<periyot_) begin
        sayac_T3<=sayac_T3+20'd1;
    end
    if(sayac_T3==periyot_) begin
        sayac_T3<=20'd0;    Servo_3<=1'd1;    sign_3<=1'd1;
        down_3<=D_duty3+down_sabit;
    end
    if(sayac_T3==down_3) begin
        Servo_3<=1'd0;    sign_3<=1'd0;
    end

/** MOTOR-4 ****
PWM4<=PWM_4;
dir4<=dir_4;
    if(sayac_w<2'd3) begin
// sayac_1'i 4 eşit parça halinde saydırıyoruz
        sayac_w<=sayac_w+2'd1;
    end
    if(sayac_w==2'd3) begin

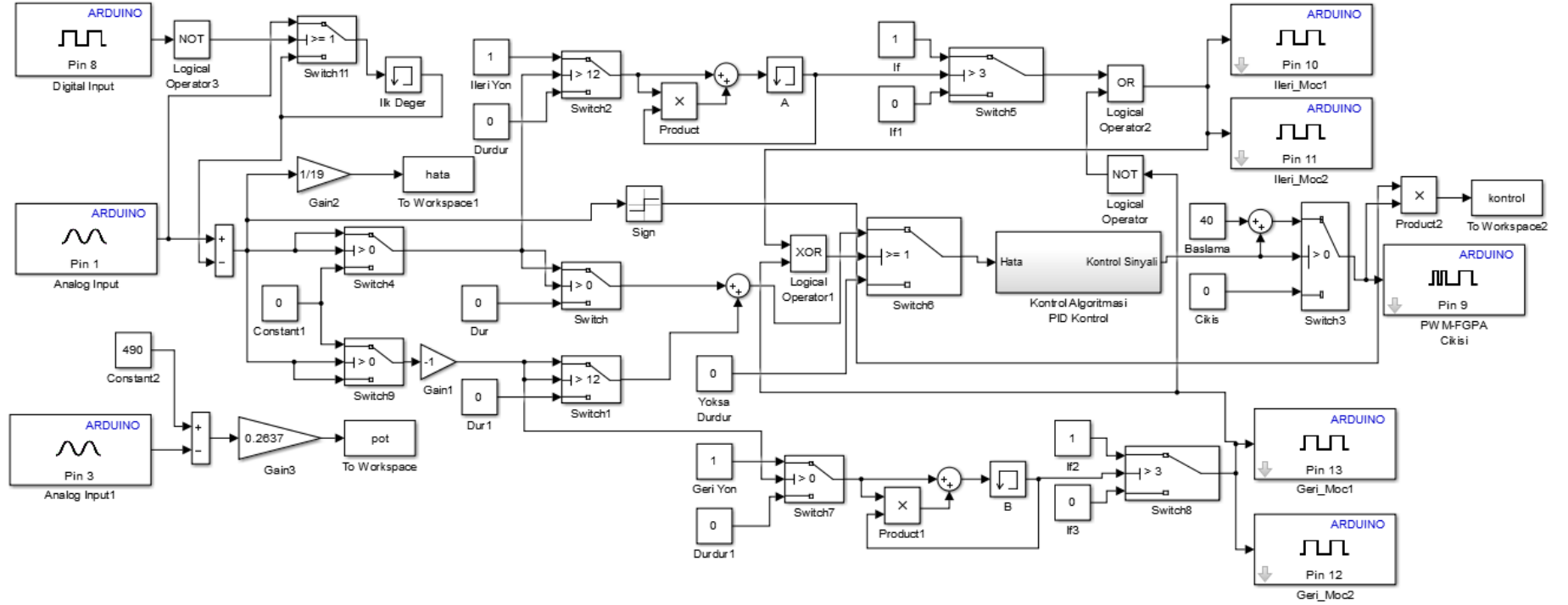
```

```

// Bu 4 parçanın her biri 510 mikros =25510 (clk palsi)
sayac_w<=2'd0;
    if(Status_4==2'd1 && sayac_4<20'd25510) begin
// 490 Hz PWM için Periyot=2.040 ms =102040 (clk palsi)
    sayac_4<=sayac_4+20'd1;
    end
    if(Status_4==2'd0 && PWM4==1'd1) begin    Status_4<=2'd1; LEDS4<=1'd1;    end
    if(Status_4==2'd1 && PWM4==1'd1) begin    S_duty4<=S_duty4+20'd1;    end
    if(Status_4==2'd1 && PWM4==1'd0) begin    Status_4<=2'd2;    end
    if(Status_4==2'd1 && sayac_4==20'd25510) begin    Status_4<=2'd2;    end
    if(Status_4==2'd2 ) begin    D_duty4<=S_duty4; sayac_4<=20'd0; Status_4<=2'd3; end
    if(Status_4==2'd3 ) begin
    S_duty4<=20'd0;    Status_4<=2'd0;    LEDS4<=1'd0;
    if(D_duty4>sabit_) begin    D_duty4<=sabit_; end
    end
    end
if(sayac_T4<periyot_) begin
    sayac_T4<=sayac_T4+20'd1;
end
if(sayac_T4==periyot_) begin
    sayac_T4<=20'd0;    Servo_4<=1'd1; sign_4<=1'd1;
    down_4<=D_duty4+down_sabit;
end
if(sayac_T4==down_4) begin
    Servo_4<=1'd0; sign_4<=1'd0;
end
end
endmodule

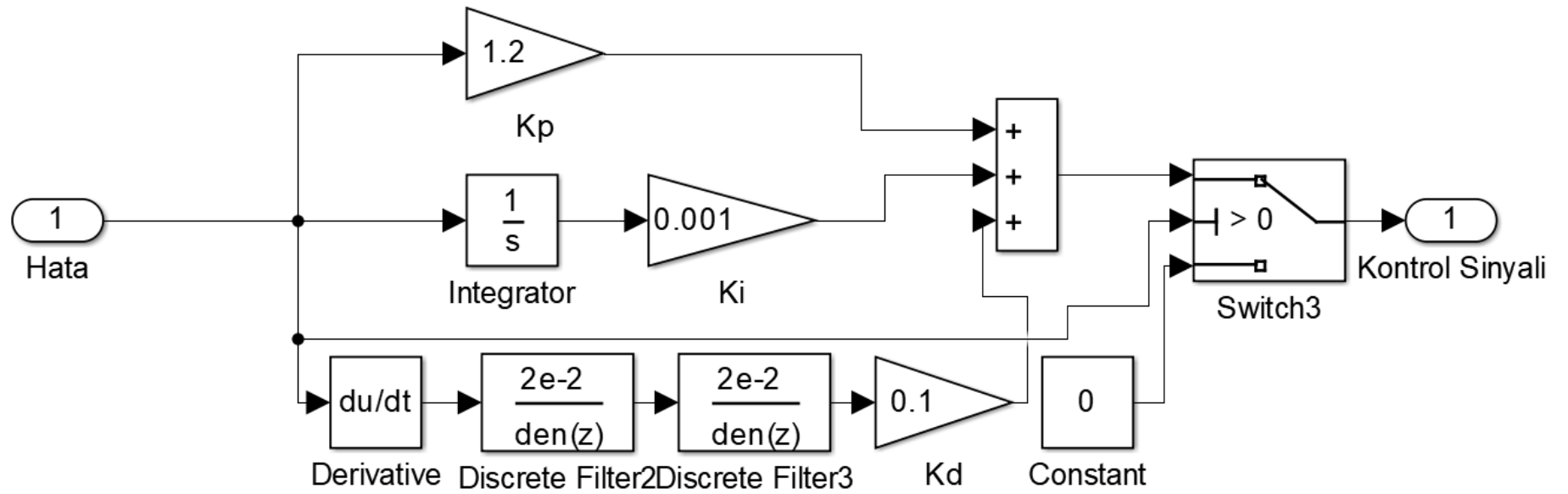
```

## 8.2. Deneysel Uygulama için Kullanılan Genel MATLAB/Simulink Modeli

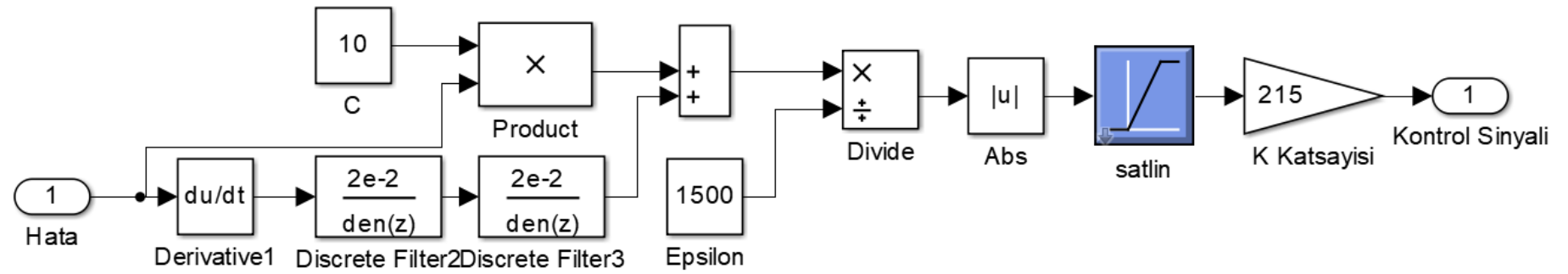




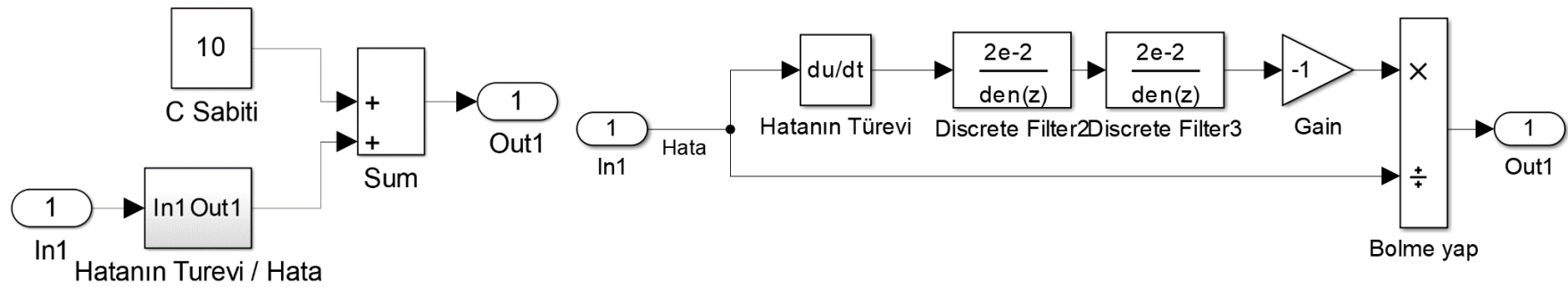
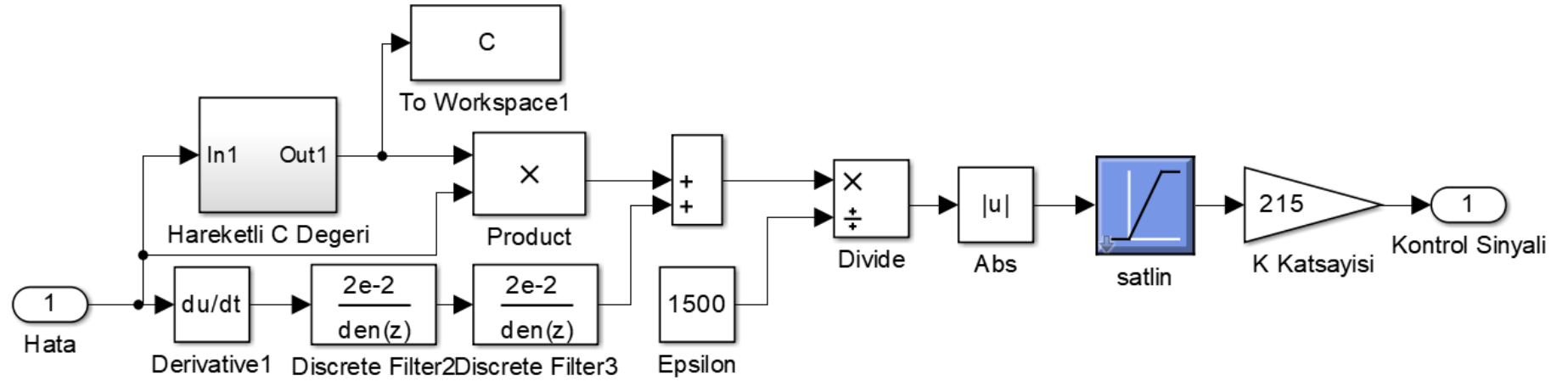
### 8.3. Deneysel Uygulama PID Kontrolcü Bloğu



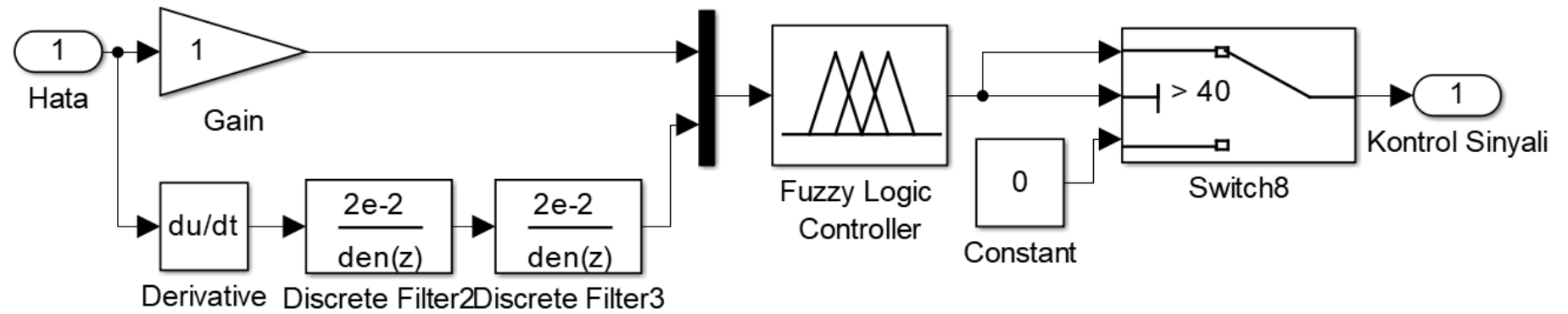
#### 8.4. Deneysel Uygulama KKK Bloğu



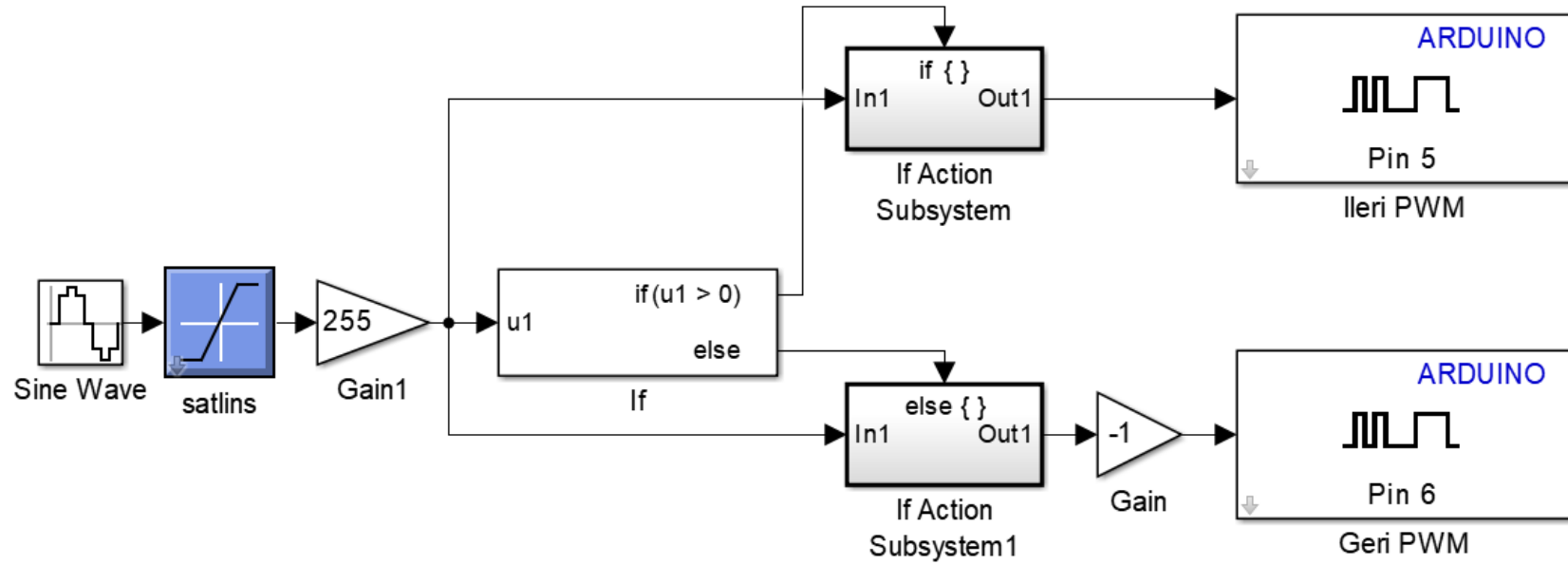
## 8.5. Deneysel Uygulama HKKK Blokları



## 8.6. Deneysel Uygulama BM Kontrol Bloğu



### 8.7. Deneysel Uygulama Sabit Hareket MATLAB/Simulink Modeli



## 8.8. Deneysel Sonuçları Kaydetme ve Grafiklerini Çizdirme Programı

```
close all
clc

%Verilerin Matris Olarak Kaydedilmesi
%1. kolon zaman, 2. kolon hata, 3. kolon bacağın konumu,
%4. kolon robotun konumu, 5. kolon kontrol sinyali
bacak.signals.values=pot.signals.values+hata.signals.values;
%a=[hata.time-29.1 hata.signals.values bacak.signals.values
pot.signals.values kontrol.signals.values];
a=[hata.time-28.7 hata.signals.values bacak.signals.values
pot.signals.values kontrol.signals.values C.signals.values];

%Verinin Kayıt İsmi
MSMC_25x45=a;
save MSMC_25x45;

%Grafik Çizimleri

aaa=1009;
bbb=1300;

figure(1) %Zaman-Hata Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(a(aaa:bbb,1),a(aaa:bbb,2));
grid on
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('Hata [Derece]')
axis([0 8 -1.5 2.5])

figure(2) %Zaman-Konum Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(a(aaa:bbb,1),a(aaa:bbb,3),a(aaa:bbb,1),a(aaa:bbb,4),'-
.','LineWidth',1);
legend('Bacak Açısai Konumu','Robot Açısai
Konumu','Location','South');
grid on
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('Açısai Konum [Derece]')
axis([0 8 0 60])

figure(3) %Zaman-Kontrol Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(a(aaa:bbb,1),a(aaa:bbb,5));
grid on
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('Kontrol Sinyali (PWM Doluluk Oranı)')
axis([0 8 -80 110])
figure(4) %Zaman-C Katsayı Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(a(aaa:bbb,1),a(aaa:bbb,6));
grid on
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('C Katsayısı')
axis([0 8 5 30])
```

## 8.9. Deneysel Sonuçları Karşılaştırma ve Grafiklerini Çizdirme Programı

```
close all
clc

%Verilerin Matris Olarak Kaydedilmesi
%1. kolon zaman, 2. kolon hata, 3. kolon bacağın konumu,
%4. kolon robotun konumu, 5. kolon kontrol sinyali

load PID_yuksuz.mat
load SMC_yuksuz.mat
load MSMC_yuksuz.mat
load fuzzy_yuksuz.mat

a=mean(PID_yuksuz(397:671,2))
b=mean(SMC_yuksuz(696:970,2))
c=mean(MSMC_yuksuz(645:919,2))
d=mean(fuzzy_yuksuz(251:525,2))

aa=max(abs(PID_yuksuz(397:671,2)))
bb=max(abs(SMC_yuksuz(696:970,2)))
cc=max(abs(MSMC_yuksuz(645:919,2)))
dd=max(abs(fuzzy_yuksuz(251:525,2)))

aaa=max(abs(PID_yuksuz(397:671,5)))
bbb=max(abs(SMC_yuksuz(696:970,5)))
ccc=max(abs(MSMC_yuksuz(645:919,5)))
ddd=max(abs(fuzzy_yuksuz(251:525,5)))

%Grafik Çizimleri

figure(1) %Zaman-Hata Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(PID_yuksuz(397:671,1),PID_yuksuz(397:671,2),PID_yuksuz(397:671,1),
,SMC_yuksuz(696:970,2)...
,PID_yuksuz(397:671,1),MSMC_yuksuz(645:919,2),PID_yuksuz(397:671,1),fuzzy
_yuksuz(251:525,2));
grid on
legend('PID','KKK','HKKK','BM','Location','NorthWest');
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('Hata [Derece]')
%axis([0 8 -2.5 3.3])
figure(2) %Zaman-Kontrol Grafiği
set(axes,'FontSize',14);
plot(PID_yuksuz(397:671,1),PID_yuksuz(397:671,5),PID_yuksuz(397:671,1),
,SMC_yuksuz(696:970,5)...
,PID_yuksuz(397:671,1),MSMC_yuksuz(645:919,5),PID_yuksuz(397:671,1),fuzzy
_yuksuz(251:525,5));
grid on
legend('PID','KKK','HKKK','BM','Location','NorthWest');
xlabel('Zaman t[s]')
ylabel('Kontrol Sinyali (PWM Doluluk Oranı)')
%axis([0 8 -100 115])
```

### 8.10. Deney Düzeneği Tasarım Elemanları



Şekil 1. Mafsallarda kullanılan planet redüktör



Şekil 2. Mafsallarda kullanılan sonsuz vida redüktör



Şekil 3. Mekanik uzuvlar





Şekil 4. BLDC motor

Tablo 1. BLDC motor teknik özellikleri

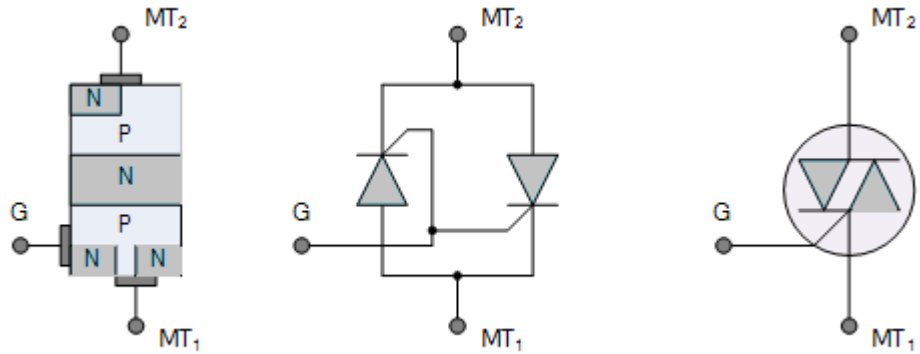
|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| <b>Maks. Gücü:</b>       | 1750 W                    |
| <b>Maks. Akım:</b>       | 110 A                     |
| <b>Maks. Tork:</b>       | 1.45 N.m                  |
| <b>Motor Devri:</b>      | 11470 rpm                 |
| <b>Çalışma Gerilimi:</b> | 14.8 V - 18.5 V           |
| <b>Ağırlık:</b>          | 365 gr                    |
| <b>Boyutlar:</b>         | 39 mm çap – 78 mm uzunluk |
| <b>ESC:</b>              | Min. 120 A                |
| <b>Mil Çapı:</b>         | 5 mm                      |



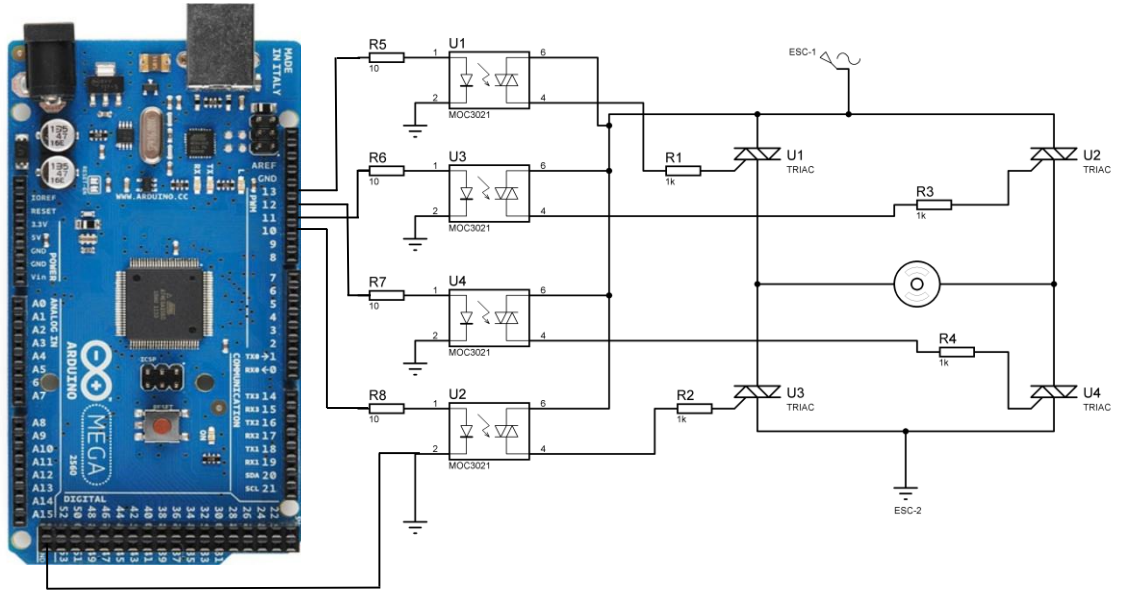
Şekil 5. BLDC motor sürücüsü (ESC)

Tablo 2. ESC teknik özellikleri

|               |                |
|---------------|----------------|
| Sürekli Akım: | 120 A          |
| Max. Akım:    | 760 A          |
| Batarya:      | 7.4 V – 22.2 V |
| Boyutlar:     | 55x48x37mm     |
| Ağırlık:      | 145 gr         |



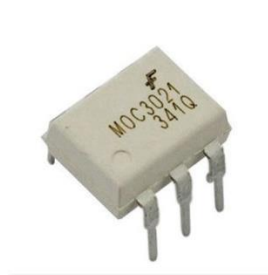
Şekil 6. Triyak modeli



Şekil 7. Yön değiştirme için tasarlanan elektronik devre

Tablo 3. Triyak teknik özellikleri

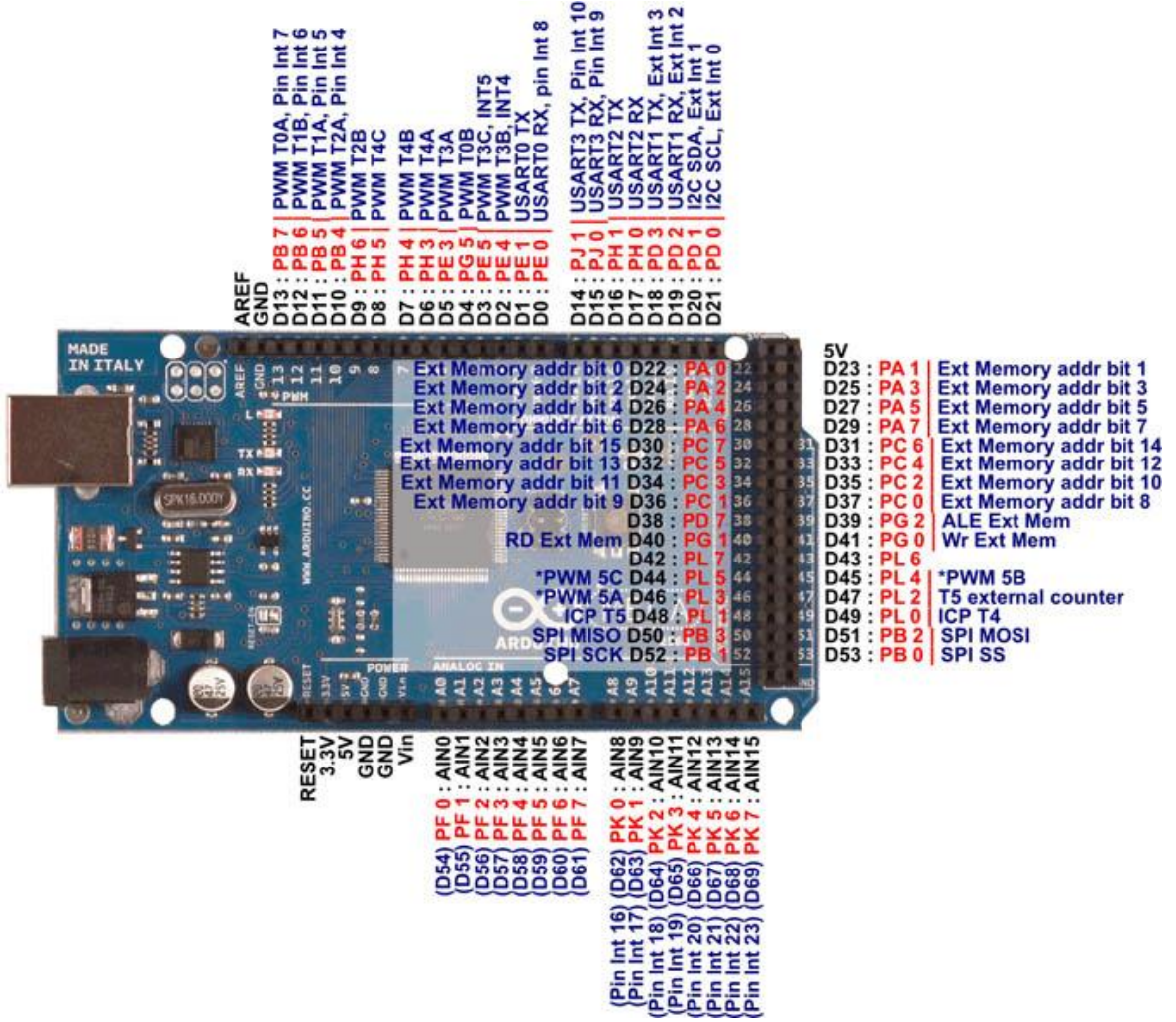
|                    |              |
|--------------------|--------------|
| Sürekli Akım:      | 60 A         |
| Gerilim:           | 600 V        |
| Çalışma Sıcaklığı: | -40°C~+125°C |



Şekil 8. MOC3021 triyak çıkışlı optokuplör

**Tablo 4.** MOC3021 triyak çıkışlı optokuplörün teknik özellikleri

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| İleri Akım Maks.:         | 0.0500 A |
| Giriş Tetik Akımı-Normal: | 8 mA     |
| Giriş Tetik Akımı-Maks.:  | 0.0150 A |
| Çalışma Gerilimi:         | 3 V      |



**Şekil 9.** Arduino Mega 2560 kontrol kartı

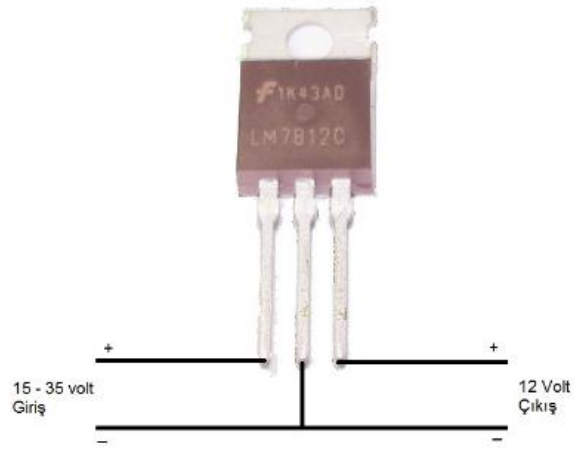
**Tablo 5.** Arduino Mega 2560 kontrol kartının teknik özellikleri

|                                          |                                           |
|------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Mikrodenetleyici:                        | ATmega2560                                |
| Çalışma gerilimi:                        | +5 V DC                                   |
| Tavsiye edilen besleme gerilimi:         | 7 - 12 V DC                               |
| Besleme gerilimi limitleri:              | 6 - 20 V                                  |
| Dijital giriş / çıkış pinleri:           | 54 adet (15 adedi PWM çıkışını destekler) |
| PWM frekansı:                            | 490 Hz (4 ve 13 pinleri 980 Hz)           |
| Analog giriş pinleri:                    | 16 adet                                   |
| Giriş / Çıkış pini başına düşen DC akım: | 40 mA                                     |
| 3,3 V pini için akım:                    | 50 mA                                     |
| Flash hafıza:                            | 256 KB (8 KB bootloader için kullanılır)  |
| SRAM:                                    | 8 KB                                      |
| EEPROM:                                  | 4 KB                                      |

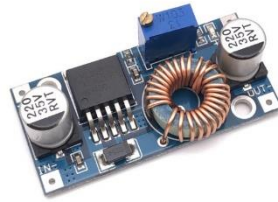


**Şekil 10.** XILINX Spartan-3 FPGA kartı





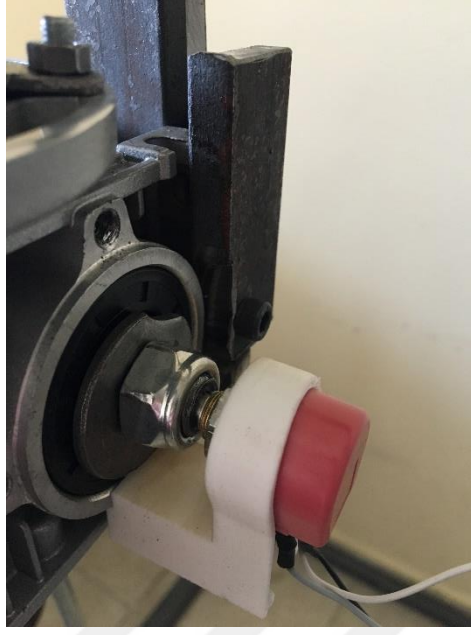
**Şekil 11.** LM7812 voltaj regülatörü



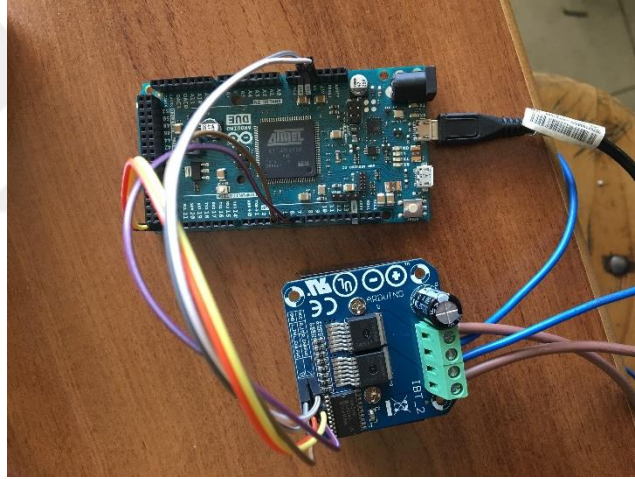
**Şekil 12.** XL4005 DC- DC gerilim düşürücü devresi



**Şekil 13.** Lineer potansiyometre



Şekil 14. Robot hareketini kaydeden potansiyometre



Şekil 15. Lineer motor kontrol kartı ve sürücü ünitesi

## ÖZGEÇMİŞ



Arş. Gör. Alper Kadir TANYILDIZI  
Fırat Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi / Mekatronik  
Mühendisliği  
Elazığ  
atanyildizi@firat.edu.tr  
alpertanyildizi@gmail.com

### **KİŞİSEL BİLGİLER:**

Doğum yeri: ELAZIĞ  
Doğum Tarihi: 17.06.1984

### **EĞİTİM:**

2012-2018: Fırat Üniversitesi, Makine Mühendisliği, (Doktora), ELAZIĞ  
Danışman Hoca: Doç. Dr. Oğuz YAKUT  
Tez Başlığı: Değişken Parametrelili Bir Alt Ekstremitte Güçlendirme Robotunun Mekanik Tasarımı ve İleri Kontrol Algoritmalarının Uygulanması  
2008-2011: Fırat Üniversitesi, Makine Elektronik Mühendisliği, (Yüksek Lisans) ELAZIĞ  
Tez Başlığı: Elastik Uzunlu Bir Dört-Kol Mekanizmasının Dinamiği Ve Hız Kontrolü  
Danışman Hoca: Doç. Dr. Orhan ÇAKAR  
2002-2007: Yeditepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği, (Lisans), İSTANBUL  
2000-2002:Elazığ Anadolu Lisesi, Elazığ

### **İŞ DENEYİMİ:**

- 1- Güralsan Otomotiv San. ve Dış Tic. Ltd. Şti. - Kalite Kontrol Müdürü (2006-2008)
- 2- Tanyıldızı Mühendislik San. ve Tic. Ltd. Şti. - Genel Müdür (2008-2009)
- 3- Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü - Araştırma Görevlisi (2009-Devam Ediyor)