

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**KAYAN KİPLİ KONTROL TEKNİKLERİNİN TEORİK
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet Buğrahan KALAYCI

**Tez Danışmanı
Yrd.Doç. Dr. İlhami YİĞİT**

Yozgat 2013

**T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**KAYAN KİPLİ KONTROL TEKNİKLERİNİN TEORİK
VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet Buğrahan KALAYCI

**Tez Danışmanı
Yrd.Doç. Dr. İlhami YİĞİT**

Yozgat 2013

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün Makine Mühendisliği Anabilim Dalı 7011090012 numaralı öğrencisi Mehmet Buğrahan KALAYCI'nın hazırladığı "**Kayan Kipli Kontrol Tekniklerinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi**" başlıklı ~~DOKTORA~~/YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 11/03/2013 Pazartesi günü saat 15:00'te yapılmış, tezin onayına OY ÇOKLUĞU / OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Prof.Dr.Feyzullah TEMURTAŞ

Üye : Yrd.Doc.Dr.İlhami YİĞİT (Danışman)

Üye : Yrd.Doç.Dr. Hamza Kemal AKYILDIZ

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 14/3/2013 tarih ve 6... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



KAYAN KIPLİ KONTROL TEKNİKLERİNİN TEORİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Buğrahan KALAYCI

**Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2013; Sayfa:115

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İlhami YİĞİT

ÖZET

Kayan kipli kontrol, dış bozucular ve sistem modelindeki belirsizliklere rağmen istenilen dinamik davranışı sağlayabilen gürbüz bir kontrol yöntemidir. Son yıllarda, kayan kipli kontrol yöntemi uygulama basitliği ve gürbüzlüğünden dolayı gözde hale gelmiş, çok sayıda kayan kipli kontrol tekniği geliştirilmiştir. Ancak, bu kontrol tekniklerinin çeşitli gerçek sistemler üzerinde aynı anda uygulandığı kapsamlı bir çalışma bulunmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, dünyada en çok kullanılan kayan kipli kontrol teknikleri çeşitli gerçek sistemler üzerinde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, tek giriş tek çıkışlı doğru akım motoru tahrikli doğrusal bilyalı kızak sistemi, doğrusal olmayan basit ters sarkaç, tek giriş çok çıkışlı dolaylı tahrikli doğrusal olmayan arabalı ters sarkaç sistemi olmak üzere üç farklı gerçek sistem kullanılmıştır. Bu sistemlerin kontrolleri, hem teorik hem de deneysel olarak tatmin edici düzeyde gerçekleştirilmiş, elde edilen çok sayıda simülasyon ve deney sonuçları değerlendirilerek karşılaştırmalar yapılmış, çeşitli sonuçlar çıkarılmış, ileriye dönük çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler : kayan kipli kontrol, doğrusal olmayan sistem, ters sarkaç, modelleme, simülasyon

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SLIDING MODE CONTROL TECHNIQUES

Mehmet Buğrahan KALAYCI

**Bozok University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Master of Science Thesis**

2013; Page:115

Advisor: Assist. Prof. Dr. İlhami YİĞİT

ABSTRACT

Sliding mode control is a robust control technique being able to provide a desired dynamic behaviour in spite of uncertainties in system model and disturbances. In recent years, because of simplicity and robustness, sliding mode control has become popular and various sliding mode control techniques have been developed. However, It is not shown that a comprehensive study dealing with the application of these control techniques on various real systems at a time does not exist. In this study, worldwide commonly used sliding mode control techniques were investigated theoretically and experimentally applying on various real systems. For this purpose, three different types of real systems were used, such as a single input single output direct current motor driven linear recirculating ball bearing system, a nonlinear simple inverted pendulum and a single input multiple output underactuated nonlinear cart inverted pendulum. Control of the systems with various control techniques were implemented satisfactorily both theoretically and experimentally, obtained simulation and experimental results were compared with each other, various inferences were made, and recommendations were presented for further studies.

Keywords: Sliding mode control, nonlinear system, inverted pendulum, modelling, simulation

TEŞEKKÜR

Yaptığım alıőmalarda, değerli bilgilerini, emeklerini ve yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr.İlhami YİĞİT'e ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen anneme teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-------------|
| ÖZET | iii |
| ABSTRACT | iv |
| TEŞEKKÜR | v |
| TABLolar LİSTESİ | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | ix |
| KISALTMALAR LİSTESİ | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ | xiv |
| 1.GİRİŞ | 1 |
| 2.GENEL BİLGİLER | 6 |
| 2.1. PID Kontrol | 6 |
| 2.1.1. PID Kontrol Yapısı | 6 |
| 2.2. Kayan Kipli Kontrol | 8 |
| 2.2.1. Değişken Yapılı Sistem | 9 |
| 2.2.2. Kayan Kipli Kontrol | 11 |
| 2.2.3. Kayan Kipli Kontrol Tasarımı | 15 |
| 2.2.3.1. Kök Yerleştirme Yöntemi..... | 15 |
| 2.2.3.1.1. Kontrolcü Tasarımı | 17 |
| 2.2.3.1.2. Durum Gözlemleyici Tasarımı | 18 |
| 2.2.3.2. Referans Yörünge İzleme Kontrolü..... | 20 |
| 2.2.3.2.1. Kontrolcü Tasarımı | 21 |
| 2.2.3.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol | 23 |
| 2.2.3.4. Hiyerarşik Kayan Kipli Kontrol | 24 |
| 2.2.3.4.1. Kararlık Analizi | 26 |
| 2.2.3.5. Kaskat Kayan Kipli Kontrol | 27 |
| 2.2.3.5.1. Kararlık Analizi | 29 |
| 3.SİSTEMLERİN MODELLENMESİ | 31 |
| 3.1. Basit Ters Sarkaç Sistemi | 31 |
| 3.2. DC Motor Tahrikli Araba Sistemi | 36 |
| 3.3. Arabalı Ters Sarkaç Sistemi | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 4.SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMA..... | 46 |
| 4.1. Basit Ters Sarkacın Kontrolü | 49 |
| 4.1.1. PID Kontrol..... | 49 |
| 4.1.2. Kayan Kipli Kontrol | 51 |
| 4.1.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol | 54 |
| 4.1.4. Gözlemleyici ile Kayan Kipli Kontrol..... | 57 |
| 4.1.5. Sonuçların Değerlendirilmesi | 60 |
| 4.2. DC Motor Tahrikli Araba Sisteminin Kontrolü | 61 |
| 4.2.1. PID Kontrol..... | 61 |
| 4.2.2. Kayan Kipli Kontrol | 64 |
| 4.2.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol | 70 |
| 4.2.4. Gözlemleyici ile Kayan Kipli | 76 |
| 4.2.5. Sonuçların Değerlendirilmesi | 80 |
| 4.3. Arabalı Ters Sarkacın Kontrolü..... | 82 |
| 4.3.1. Kayan Kipli Kontrol | 83 |
| 4.3.2. İntegral Kayan Kipli Kontrol | 86 |
| 4.3.3. Hiyerarşik Kayan Kipli Kontrol | 87 |
| 4.3.4. Kaskat Kayan Kipli Kontrol | 89 |
| 4.3.5. Sonuçların Değerlendirilmesi | 91 |
| SONUÇ..... | 93 |
| KAYNAKLAR | 95 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 98 |
| EKLER..... | 99 |

TABLolar LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Tablo 1.1: PID Kazançlarının Kapalı Çevrim Sistem Cevabına Etkileri | 7 |
| Tablo 3.1: Basit Ters Sarkaç Parametreleri..... | 33 |
| Tablo 3.2: DC Motor Tahrikli Araba Parametreleri..... | 38 |
| Tablo 3.3: Arabalı Ters Sarkacın Parametreleri..... | 45 |
| Tablo 4.1: Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu..... | 60 |
| Tablo 4.2: Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu..... | 81 |
| Tablo 4.3: Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu..... | 92 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | <u>Sayfa</u> |
|--|--------------|
| Şekil 2.1: Sistemin Faz Düzleminde Kararsız Yapıları | 10 |
| Şekil 2.2: Asimptotik kararlı sistemin faz düzlemi..... | 11 |
| Şekil 2.3: İkinci Mertebeden bir Sistemin Kayan Kipli Kontrolü | 13 |
| Şekil 2.4: Anahtarlama Fonksiyonları (Sgn,Sat ve Tanh)..... | 14 |
| Şekil 2.5: Durum Gözlemleyici ile Sistem | 19 |
| Şekil 2.6: İkinci Mertebeden bir Sistemin Kayan Kipli Kontrolü..... | 22 |
| Şekil 3.1: Dc Motor Tahrikli Ters Sarkacın Şematik Görünümü | 31 |
| Şekil 3.2: DC Motor Tahrikli Araba Sistemi..... | 36 |
| Şekil 3.3: Arabalı Ters Sarkaç Sistemi | 39 |
| Şekil 4.1: Bilgisayar Kontrollü Sistemlerin Blok Diyagramı | 46 |
| Şekil 4.2: Delphi 7 Simülasyon Ve Deneysel Kontrol Arayüzü | 47 |
| Şekil 4.3: Arabalı Ters Sarkaç Sistemi [31] | 48 |
| Şekil 4.4: Basit Ters Sarkaç Sistemi..... | 48 |
| Şekil 4.5: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı(Simülasyon) (PID, P:9.5, I :0.00025, D:0.0842) | 49 |
| Şekil 4.6: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabının Kontrol Sinyali (Simülasyon) (PID, P:9.5, I:0.00025, D:0.0842)..... | 50 |
| Şekil 4.7: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (PID, P:9.5,I :0.00025, D:0.0842) | 50 |
| Şekil 4.8: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabının Kontrol Sinyali (Deneysel) (PID, P:9.5, I :0.00025, D:0.0842)..... | 51 |
| Şekil 4.9: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, λ :18.31 ve δ :1.79)..... | 52 |
| Şekil 4.10: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, λ :18.31 ve δ :1.79)..... | 52 |
| Şekil 4.11: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, λ :11.81 ve δ :1.28)..... | 53 |
| Şekil 4.12: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, λ :11.81 ve δ :1.28)..... | 54 |
| Şekil 4.13: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (ISMIC anahtarlama ile, λ :18.31, ki :0.1 ve δ :1.79)..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.14: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:18.31$, $ki:0.1$ ve $\delta:1.79$)..... | 55 |
| Şekil 4.15: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:9.81$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.14$)..... | 56 |
| Şekil 4.16: Sarkaç açısının basamak referansa cevabı (Deneysel) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:9.81$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.14$)..... | 57 |
| Şekil 4.17: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)..... | 58 |
| Şekil 4.18: Durum Değişkenleri (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)..... | 58 |
| Şekil 4.19: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)..... | 59 |
| Şekil 4.20: Durum Değişkenleri (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $CD = [0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$ ve $\delta:1.14$)..... | 59 |
| Şekil 4.21: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)..... | 62 |
| Şekil 4.22: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)..... | 62 |
| Şekil 4.23: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)..... | 63 |
| Şekil 4.24: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)..... | 63 |
| Şekil 4.25: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)..... | 64 |
| Şekil 4.26: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 65 |
| Şekil 4.27: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 65 |
| Şekil 4.28: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 66 |
| Şekil 4.29: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 66 |
| Şekil 4.30: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 67 |
| Şekil 4.31: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:22$ ve $\delta:0.1$)..... | 68 |
| Şekil 4.32: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:22$ ve $\delta:0.1$)..... | 68 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.33: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 69 |
| Şekil 4.34: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 69 |
| Şekil 4.35: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)..... | 70 |
| Şekil 4.36: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 71 |
| Şekil 4.37: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 71 |
| Şekil 4.38: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 72 |
| Şekil 4.39: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 72 |
| Şekil 4.40: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 73 |
| Şekil 4.41: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISMC anahtarlama ile, $\lambda:22$, $ki:0.16$ ve $\delta:0.1$)..... | 74 |
| Şekil 4.42: Sistemin sinüs konum referansına cevabı (Simülasyon) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda: 22$, $ki: 0.16$ ve $\delta: 0.1$)..... | 74 |
| Şekil 4.43: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 75 |
| Şekil 4.44: Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 75 |
| Şekil 4.45: Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $ki:0.16$ ve $\delta:1.1$)..... | 76 |
| Şekil 4.46: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 77 |
| Şekil 4.47: Durum Değişkenleri (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 77 |
| Şekil 4.48: Sarkaç Açısının Sinüs Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 78 |
| Şekil 4.49: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 78 |
| Şekil 4.50: Durum Değişkenleri (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 79 |
| Şekil 4.51: Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel, bozucu ile) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057\ 0.1359\ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 79 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.52: Sarkaç Açısının Sinüs Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)..... | 80 |
| Şekil 4.53: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$)..... | 83 |
| Şekil 4.54: Kontrol Sinyali (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$)..... | 84 |
| Şekil 4.55: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)..... | 84 |
| Şekil 4.56: Kontrol Sinyali (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)..... | 85 |
| Şekil 4.57: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)..... | 85 |
| Şekil 4.58: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (İSMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$, $kis:0.1$, $kia:1$)..... | 86 |
| Şekil 4.59: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (İSMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$, $kis:0.01$, $kia:0.1$)..... | 87 |
| Şekil 4.60: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (Hiyerarşik SMC toplam sinyal ile, $c1:2.125$, $c2:1.205$, $\alpha:0.908$, $\eta2:8$ ve $k2:11$)..... | 88 |
| Şekil 4.61: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (Hiyerarşik SMC anahtarlama ile, $c1:14.31$, $c2:2$, $\alpha:0.254$, $\eta2:20.5$, $k2:0.5$ ve $\eta:4.9$)..... | 88 |
| Şekil 4.62: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (Hiyerarşik SMC anahtarlama ile, $c1:14.31$, $c2:2$, $\alpha:0.254$, $\eta2:20.5$ ve $k2:0.5$ ve $\eta:4.9$)..... | 89 |
| Şekil 4.63: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (Kaskat SMC toplam sinyal ile, $c1: 2.16$, $c2: 1.33$, $c3: 1.11$, $\eta: 20.5$ ve $k:13$)..... | 90 |
| Şekil 4.64: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel)(Kaskat SMC anahtarlama ile, $c1: 14.27$, $c2:7.84$, $c3: 7.84$, $\eta: 20.5$, $k:0.5$ ve $\eta1: 4.9$)..... | 90 |
| Şekil 4.65: Sarkaç Açısı ve Araba Konumu(Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (Kaskat SMC anahtarlama ile, $c1: 14.27$, $c2:7.84$, $c3: 7.84$, $\eta: 20.5$, $k:0.5$ ve $\eta1: 4.9$)..... | 91 |

KISALTMALAR LİSTESİ

- KKK** : Kayan kipli kontrol
SMC : Sliding mode control (Kayan Kipli Kontrol)
PID : Proportional-Integral-Derivative (Oransal integral türev)
MIMO : Çok giriş çok çıkışlı sistemler
ISMC : İntegral kayan kipli kontrol

SEMBOL LİSTESİ

| | |
|-----------------|---|
| U_{pid} | : PID kontrol sinyali |
| e | : Sistemin hata değeri |
| t | : Zaman |
| K_p | : Oransal kazanç |
| T_i | : İntegral kazancı |
| T_d | : Türev kazancı |
| u | : Kayan kipli kontrolün akıllı sinyali (kontrol girişi) |
| $\lambda_{1,2}$ | : Sistemin kökleri |
| u_{sw} | : Kayan kipli kontrol anahtarlama sinyali |
| u_{eq} | : Kayan kipli kontrol eşdeğer sinyal |
| s | : Kayma yüzeyi |
| A | : Sistem matrisi |
| B | : Kontrol girişi matrisi |
| T | : Koordinat dönüştürme matrisi |
| C | : Dönüştürülmüş uzayda kayma yüzeyi matrisi |
| C_D | : Durum uzayında kayma yüzeyi matrisi |
| V | : Lyapunov fonksiyonu |
| t_e | : Yüzeye ulaşma zamanı |
| x_r | : Referans yörünge |
| f_1, f_2 | : Doğrusal olmayan sistem fonksiyonu |
| b_1, b_2 | : Doğrusal olmayan sistem kontrol girişi fonksiyonu |
| θ | : Sarkacın yatayla yaptığı açı değeri |
| i | : Motor akımı |
| R | : Elektrik direnci |
| L | : Motor endüktansı |
| K_e | : Motor hız sabiti |
| ω | : Açısal hız |
| B | : Sönüm sabiti |
| I_m | : Atalet momenti |
| l | : Sarkaç çubuğunun kütle merkezine kadar boyu |
| m | : Sarkacın kütlesi |

| | |
|-----------|---|
| K_t | : Motor tork sabiti |
| R_g | : Kasnak yarıçapı |
| B_e | : Eşdeğer viskoz sönüm sabiti |
| m_e | : Eşdeğer kütle |
| k_{is} | : Sarkacın integral katsayısı |
| k_{ia} | : Arabanın integral katsayısı |
| δ | : Sınır tabaka kalınlığı |
| g | : Yerçekimi ivmesi |
| M_{el} | : Elektriksel sistemin oluşturduğu moment |
| M_{sis} | : Ötelemeli sistemin oluşturduğu moment |
| m_c | : Araba üzerine gelen toplam kütle |
| m_s | : Sarkacın kütlesi |
| m_a | : Yeri ayarlanabilen kütle |
| F | : Arabaya etkiyen dış kuvvet |
| F_s | : Arabaya etkiyen kum sürtünme kuvveti |
| M | : Sarkaca etkiyen dış moment |
| M_s | : Sarkaca etkiyen kuru sürtünme momenti |
| L_m | : Motorun bobin endüktansı |
| R_m | : Motorun bobin iç direnci |
| B_m | : Motorun viskoz sönüm sabiti |
| i_m | : Motor bobinlerinden geçen akım |
| $e_a(t)$ | : Kontrol girişi |
| $M_b(t)$ | : Bozucu girişi |
| x_g | : Gözlemlenen durum değişkeni |
| e_g | : Gözlemleyici hatası |

1. GİRİŞ

Kayan kipli kontrol, sistemdeki belirsizliklere, parametre değişimlerine ve bozuculara rağmen istenilen dinamik davranışı sağlayabilen son derecede gürbüz bir kontrol tekniğidir. 1950'lerde ilk defa Emelyanov tarafından ortaya atılan teknik, hem hızlı anahtarlama teknolojisinin gelişmemiş olmasından, hem de bir müddet yalnızca Rusça literatürde yer aldığından dolayı 1970'li yıllara kadar çarpıcı teorisine rağmen raflarda kalmış, gelişen hızlı anahtarlama teknolojisi ve 1977 yılında ilk kez Vadim Utkin'in İngilizce makalesi ile ciddi anlamda gündeme gelmiş [1], günümüze kadar da gittikçe artan bir ivme ile kullanım alanı genişlemiştir.

Kayan kipli kontrol Vadim Utkin tarafından şu şekilde tanımlanmaktadır : "Kayan kipli kontrol, sürekli kontrol fonksiyonlarıyla oluşmuş uygun anahtarlama mantığı ile de desteklenmiş alt sistemler kümesinden oluşur. Kontrol tekniğinin sistemi durum uzayında belli bir yüzey üzerinde süreksizliğe maruz bıraktığı kabul edilir." "..... Süreksiz dinamik sistemlerin süreksiz yüzeyler (kayma yüzeyleri) üzerinde süreksiz yörüngeler oluşturduğu bilinir. Süreksizlikten dolayı, durum hız vektörü yüzeye doğru yönelmekte, kayma kipi gerçekleşmektedir. Bu durum yüzeylerin kesişim yörüngelerinde de meydana gelebilir" [2].

Gerçek dinamik sistemlerde, modelleme hataları, istenmeyen sıcaklık, basınç veya voltaj değişimleri, titreşim ve bozucu girişler gibi çeşitli çevresel faktörlerden kaynaklanan belirsizliklerden kaçınmak imkânsızdır. Endüstride kullanılan klasik doğrusal kontrolcüler (PID kontrol gibi) genellikle parametre değişimlerine, modellenmemiş dinamiklere ve bozucu girişlere karşı tatminkâr sonuçlar verememektedir. Bu nedenle, özellikle belirsiz sistemler için, doğrusal veya doğrusal olmayan sistemlerdeki belirsizliklerin sistem cevabı üzerindeki etkisini sıfıra götürebilen kayan kipli kontrol tekniği tercih edilmekte olup kullanımını son derecede yaygınlaşmış, çok sayıda kayan kipli kontrol tekniği geliştirilmiştir [3].

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür araştırması çok sayıda kayan kipli kontrol tekniğinin farklı türden gerçek sistemler üzerinde aynı anda uygulandığı kapsamlı bir teorik ve deneysel inceleme çalışmasının bulunmadığını göstermiştir [4-12]. Çoğunlukla bir çeşit tekniğin özellikleri ortaya konulmuş, klasik bir veya iki teknik

ile karşılaştırması yapılmış, ya teorik çalışma ile yetinilmiş veya genelde bir çeşit deney düzeneği üzerinde çalışılmıştır.

Susperregui ve ark., DC motor açısıl referans takibi için iki ayrı birinci mertebeden kayan kipli kontrol yaklaşımı uygulamışlardır. Birinci yaklaşım Slotine'in genel yaklaşımı ve ikincisi de Utkin'in yaklaşımıdır. Kontrol için tam mertebe Luenberg gözlemleyici tasarlamışlardır. Simülasyon ve deneysel sonuçlarla her iki yaklaşımın da uygunluğunu ve parametre değişimlerine duyarsızlığını belirlemişlerdir [4].

Eker, Elektromekanik bir sistemin hız kontrolü için PID kayan yüzey kullanarak çalışmalar yapmıştır. Kayan kipli kontrol'ün tırlama etkisini gidermek için hiperbolik fonksiyon kullanmıştır. Deneysel çalışmalar PID kontrol ile kıyaslamıştır ve deneysel sonuçlar, önerilen kayan kipli kontrolcünün bozuculara ve belirsizliklere rağmen gürbüz olduğu doğrulamışlardır [5].

Brandtstädter ve Buss DC motor tahrikli ters sarkaç sisteminde, elektromekanik sistemler için önerdikleri kayan kipli kontrolü uygulamışlardır. Güç tüketimini düşüren, gürbüzlük sağlayan, uygulamada basitlik sağlayan ve daha iyi performans sağlayan yeni kontrol yaklaşımı önermiştir. Önerilen yaklaşımın performansı nümerik simülasyon ve deneyler ile doğrulamışlardır [6].

TaeDong ve Kiheon linear konum kontrolünde, kök yerleştirme ile belirlenen kayma yüzeyi ile kontrolün performansını deneysel olarak analiz etmişlerdir. Yüksek kontrol aktivesini elimine etmek için signum fonksiyonu yerine sigmoid-benzeri fonksiyon kullanmışlardır [7].

Nafa ve ark. bir sınıf dolaylı tahrikli sistem için düzenlenmiş kayan kipli kontrol önermişlerdir. 3 serbestlik derecesi olan dolaylı tahrikli mekanik sistem kontrol edilmiştir. Bu sistem 3 farklı altsistem içermektedir ve her bir sistem için yüzey önerilmiştir. Yaptıkları arabalı çift ters sarkaç simülasyonu, önerilen metodun doğruluğunu göstermiştir [8].

Rao ve ark. bir dönel ters sarkaç sistemini, dc motor dinamiğini de modelleyerek, kontrol sinyalini motor akımı olarak seçerek kayan kipli kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Doğrusal olmayan bu sistemin davranışı, doyma fonksiyonu ile

kontrol edilerek çalışmışlardır. Simülasyon ile kontrol sinyalinin akım seçildiği durumda çıkışların performanslarını göstermişlerdir [9].

Shin ve ark. çalışmalarında, belirlisizlikler içeren bir sınıf dolaylı tahrikli sistem için bulanık mantık ile adaptif ayarlama yapılan ayrıştırılmış kayan kipli kontrol tasarlamışlardır. Bu yöntem ile sistem alt sistemlere ayrıştırılır ve her bir alt sistemin farklı hedefleri olan kayan yüzeylerini tanımlamışlardır. Simülasyon sonuçları ile önerdikleri yaklaşımın doğruluğunu göstermişlerdir [10].

Qian ve ark. çalışmalarında, seri çift ters sarkaç sisteminin kontrolü için hiyerarşik kayan kipli kontrol yaklaşımı önermişlerdir. Sistemi alt sistemlere ayırmışlar, her bir alt sistem için yüzey tanımlamışlar ve her bir yüzey için kontrol kuralı oluşturmuşlardır. Bütün yüzeylerin asimptotik kararlılığını garanti almışlardır. Yaptıkları simülasyonlar sonucu önerdikleri yöntemin geçerliliğini göstermişlerdir [11].

Hao ve ark. çalışmalarında, belirlisizlikler içeren bir sınıf dolaylı tahrikli kayan kipli kontrol metodu tasarlamışlardır. Dolaylı tahrikli sistemler için $2n$ olan durum değişkenlerine karşılık kontrolcü için $2n-1$ yüzey tanımlamışlardır. Bütün yüzeylerin kararlılığını kanıtlamışlardır ve simülasyonlar sonucu önerdikleri yöntemin geçerliliğini göstermişlerdir [12].

Sistemi kayan kipli kontrol ile kontrol etmek isteyen bir kontrol mühendisinin hangi tür SMC tekniğinin sistemine daha yakışır olduğunu ve tatmin edici sonuçlar sağlayabileceğini bilmesi gerekir. Buradan yola çıkarak, kayan kipli kontrol tekniklerinin kapsamlı bir şekilde teorik ve deneysel olarak incelenmesi çalışmasının yapılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışmada, dünyada en çok kullanılan kayan kipli kontrol teknikleri çeşitli sistemler üzerinde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu tekniklerin incelenmesi amacıyla, tek giriş tek çıkışlı bir sistem olan doğru akım motoru tahrikli araba sistemi, direk tahrikli basit ters sarkacın yanı sıra, tek giriş çok çıkışlı bir sistem olan dolaylı tahrikli arabalı ters sarkaç sistemi olmak üzere üç farklı gerçek sistem üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ters sarkaç sistemleri, kontrol sistemlerinin

başarımının sınanmasında sıklıkla kullanılan doğrusal olmayan dolaylı tahrikli sistemler olması nedeniyle tercih edilmiştir. Sonuç olarak, çok sayıda kayan kipli kontrol tekniği teorik incelemeler ve simülasyon çalışmalarını müteakip çeşitli gerçek sistemler üzerinde çok sayıda deney ile gözlemlenmiş, uygulama şekilleri ve performansları hakkında çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur.

Çalışmada kullanılan kontrol teknikleri Slotine'in yaklaşımı, integral kayan kipli kontrol ve bunların yalnızca anahtarlama kontrol sinyali veya toplam kontrol sinyali ile birlikte kontrolü ve Utkin'in yaklaşımı olarak sıralanabilir. Klasik PID kontrol ile karşılaştırma yapılmış, bir birleri arasında da yapıları benzer olanlar karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Dolaylı tahrikli ve tek giriş çok çıkışlı bir sistem olan ters sarkaç sistemine ise Utkin'in yaklaşımı, hiyerarşik kayan kipli kontrol ve kaskat kayan kipli kontrol uygulanmıştır.

Bu çalışma kapsamında izlenen yol ve yöntem gelince, öncelikle detaylı literatür araştırması yapılmış, çalışmada kullanılacak gerçek sistemlerden bazılarının ön tasarımı yapılmıştır. Sistemin detaylı modellenmesi yapıp çeşitli durumlar için çok sayıda simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları sonuçları ışığında deneyler tasarlanmıştır. Mevcut deney düzenekleri üzerinde küçük modifikasyonlar yapılmış, deneysel çalışmalar çok sayıda performans deneyi yapılarak tamamlanmıştır. Benzetim ve deneysel çalışma sonuçları mümkün oldukça karşılaştırılmıştır. Gerek görüldüğünde modelde ve deney düzenesinde iyileştirme çalışmaları yapıp bir kısım benzetim ve deneysel çalışmaları tekrar edilmiştir. Tez çalışmasından beklenen amaçlar doğrultusunda kayan kipli kontrol teknikleri hakkında sonuçlar çıkarılmıştır. Hedefler doğrultusunda tatmin edici düzeyde sonuçlar elde edilmiş, ileriye dönük çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Kayan kipli kontrolde sistemin modeline ve durum değişkenlerinin bilgisine ihtiyaç duyulduğu için uygulamalarda güçlüklerle karşılaşmaktadır. Bu güçlüklerin giderilmesi için sistem düşük mertebeden kayma yüzeyleri ile kontrol edilmiş ve eşdeğer sinyalin elde edilemediği durumlarda tırlamayı giderecek şekilde yumuşatma fonksiyonu kullanılarak yalnızca anahtarlama kontrol tercih edilmiştir. Sonuçlar en temel ve etkili klasik kontrol tekniklerinden birisi olan PID kontrol ile ve yapıları benziyorsa kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, sistemini kayan kipli kontrol ile kontrol etmek isteyen bir uygulamacı kontrol mühendisinin hangi tür kayan kipli kontrol tekniğinin sistemine daha yakışır olduğunu ve tatmin edici sonuçlar sağlayabileceğini anlamasına yardımcı olacaktır.

Bu çalışma ileriye dönük çalışmalara zemin oluşturmakta olup, yeni ve tutulan başka kayan kipli kontrol tekniklerinin aynı yol izlenerek bu inceleme çalışmasına eklenmesi yoluyla kapsamının daha da genişletilebilmesi mümkündür.

Bölüm 2’de tezde kullanılan PID kontrol ve kayan kipli kontrolün çalışma prensiplerine yer verilmiştir. Kayan kipli kontrolün farklı sistemlere farklı uygulanış durumları incelenmiştir.

Bölüm 3’de sistemlerin matematiksel modellemeleri yapılmış, Doğrusal olmayan modellerin yanı sıra doğrusal modeller de elde edilmiş ve kayan kipli kontrolün kontrol kurallarının elde edilmesine yer verilmiştir.

Bölüm 4’te sistemlerin matematiksel modellerinden yararlanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiş ve grafiklere yer verilmiştir. Sistemlerin farklı kontrolcülerle deneysel çalışmaları yapılmış ve simülasyon grafiklerinin ardı sıra deneysel grafiklere yer verilmiştir. Ayrıca her bir sistem için teori ile deneysel olarak kontrolcülerin sonuçları değerlendirilmiştir.

Sonuç bölümünde elde edilen veriler ve uygulamalarda gözlemlenen durumlara yer verilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde PID kontrol, kayan kipli kontrol ve gözlemleyicinin temellerine yer verilmiş, sistemlere uygulanış şekilleri açıklanmış ayrıca tezde kullanılan kayan kipli kontrol tekniklerinin temelleri ayrıntılı açıklanmıştır.

2.1. PID Kontrol

PID kontrol; sistemin hatasını sıfırlamak için oransal (P:Proportional), İntegral (I:Integral) ve türev (D:Derivate) etkilerinden oluşan üç terimli bir kontrol tekniğidir. Günümüzde endüstride büyük oranda PID ve temel bileşimlerinden oluşan kontrolcüdür. Proses kontrol uygulamalarının %95'inden fazlası PID kontrolördür ve bunların çoğunluğu PI kontroldür [13]. Günümüze kadar PID hakkında birçok çalışma yapılmış ve halen çalışmalar devam etmektedir.

PID kontrol yapısının basitliği, uygulanabilirliğinin yüksek olması ve yeterli gürbüzlüğü sağlaması nedeniyle pek çok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Geliştirilen birçok yeni kontrol algoritmalarının başarısı halen PID kontrol ile karşılaştırılarak ölçülmektedir ve akıllı kontrol algoritmalarının birçoğu da PID kontrolü temel almaktadır.

PID kontrolün davranışı üç kazanç ile belirlenir. Bu kazançlar deneme-yanılma ile belirlenebilmesine karşın performansın yeterli olabilmesi için uygun tekniklerle belirlenmelidir. Bu katsayılar sabit seçilebileceği gibi kazançları kendinden ayarlamalı olarak da tasarlanabilir [13].

2.1.1. PID Kontrol Yapısı

PID kontrolde üç terimin etkisi temelde, oransal olarak anlık geri beslemeyi sağlaması, kalıcı durum hatasını integral etkisiyle telafi etmesi ve geleceği türev etkisiyle tahmin etmesi olarak sıralanabilir. Standart PID kontrol için kontrol sinyali

$$U_{pid} = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Laplace dönüşümü ile transfer fonksiyonu $\frac{1}{T_i}$ değerine K_i denilerek,

$$G_c = K_p(1 + K_i/s + K_D s) \quad (2.2)$$

olarak elde edilir. Burada K_p oransal, K_i integral ve K_D türevsel kazançlardır. Kontrol edilecek sisteme göre PID kontrolün en temel bileşenlerinin kombinasyonları kullanılabilir. Bunlar P, PI, PD ve PID olarak sıralanabilir.

Tablo 1.1. PID Kazançlarının Kapalı Çevrim Sistem Cevabına Etkileri [14]

| Kapalı Çevrim Cevabı | Yükselme Zamanı | Aşma | Yerleşme Zamanı | Kalıcı Hata |
|----------------------------------|-----------------|-------|-----------------|---------------|
| K_P Artırılırsa | Düşer | Artar | Küçük Artış | Düşer |
| K_I Artırılırsa | Küçük Düşüş | Artar | Artar | Büyük Düşüş |
| K_D Artırılırsa | Küçük Düşüş | Düşer | Düşer | Küçük Değişim |

Kontrol edilen sistemin çıktısının, arzulanan referans girişe karşı hata değerini bir katsayı ile anlık olarak kontrol sinyaline dönüştüren kontrol elemanına oransal kontrol adı verilir. Oransal kontrol, sisteme anlık hata bilgisini iletir. Oransal kontrol katsayısının artırılmasıyla yükselme zamanı artar ve kalıcı hata düşer. Ancak oransal kazanç sistemdeki kalıcı hatayı gideremez ve gerektiğinden fazla artırılması sistemi osilasyona girmeye zorlar, hatta kararsızlığa götürebilir. Ne türevsel kontrol, ne de integral kontrol tek başına kullanılamayıp oransal kontrolle kullanılması gerekirken, oransal kontrolün tek başına kullanıldığı uygulamalar mevcuttur.

Türevsel etki hatanın zamana göre değişimini ifade eder. Türevsel etki kontrol sistemine hatanın gelecek durumlarını kestirebilme kabiliyeti kazandırır. Böylelikle hatanın çok hızlı değişmesi durumuna karşı güçlü bir özellik kazanılmış olmaktadır. Türevsel kontrol hatanın geleceğini sisteme bildirir ve bu da öngörülü kontrol olduğu anlamına gelir. Bu nedendir ki; artırılmasıyla sistemdeki aşmayı düşüren sönümleme özelliği sadece türev kontrolde vardır. Türev kazancının artırılmasıyla aşma ve

yerleşme zamanında düşüş gözlenir. Ancak türevsel kontrol sistemin kalıcı hatasını yok etmeye yetmez.

İntegral kontrol, hatanın integralini sisteme bildirir. Böylelikle hatanın geçmiş bilgisi sisteme bildirilmiş olur. Bu bildirme, geçmiş bilgisinin biriktirilmesi şeklinde olur ve sistemin kalıcı durum hatasının sıfırlanmasını sağlar. İntegral kazancının artırılmasıyla kalıcı durum hatası azalır, aşma artar ve yerleşme zamanında artış gözlenir. İntegral kazancının gereğinden fazla artırılması integral birikim hatasına sebep olur ve amacının tam tersi durum oluşabilir. Bu olumsuz etkiyi giderebilmek için integral birikim giderici tedbirler almak gerekir.

PID kazançlarının belirlenmesinde çok çeşitli yöntemler vardır. Ancak kazançların belli miktar değiştirilmesi gerektiğinde veya kazançlar el ile (deneme yanılma yöntemi) ayarlanacak ise yukarıda saydığımız etkiler önem arz etmektedir. El ile ayarlama yapılırken öncelikle oransal kazanç belirlenmeli, çok aşmaya müsaade etmeden yeterli kalıcı hata değeri için bir sayı belirlenmelidir. İntegral etkisi ile kalıcı hata düşürülmelidir ancak aşmanın çok artmaması ve integral birikim hatasının olmaması sağlanmalıdır. Ardından türevsel etki ile aşma giderilmeye ve yerleşme zamanı azaltılmaya çalışılmalıdır. Ancak bazı sistemlerde elektronik gürültünün bulunması sebebiyle türevsel etkinin fazla artırılması sistemde titreşime yol açabilmektedir. Tüm bunların yapılmasıyla arzulanan cevap şekli için kontrolcünün kazançları el yordamıyla belirlenmiş olur.

2.2. Kayan Kipli Kontrol

Değişken Yapılı Sistem, kayan kipli kontrolün temelleri ve uygulamaları, tezde kullanılan kayan kipli kontrol tekniklerinin temelleri aşağıdaki bölümlerde ayrıntılı açıklanmıştır.

2.2.1. Değişken Yapılı Sistem

'Değişken Yapılı Sistem' (VSS) terimi ilk olarak ellili yılların sonlarında Rusya'da ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalarda, ikinci dereceden doğrusal ya da doğrusal olmayan sistemler için birkaç spesifik kontrol görevlerinde irdelenmiş ve bu yeni yaklaşımın avantajlarını gösterilmiştir. Gürbüzlüğü ile öne çıkan bir sistem olan VSS'nin en önemli özelliği, kapalı çevrim kontrollü sistemimizi belirsizliklere ve dış bozuculara karşı tamamen duyarsız hale gelmesidir. Bu özelliğinin yanı sıra hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemlerdeki başarımı ve kararlılığı ile ilgiyi üzerine çeken bir yaklaşım olmuştur [15].

Değişken yapıli sistemlerin anlaşılması için Vadim Utkin'in uyguladığı örneğe benzer basit bir örnek verilebilir [16];

Geribesleme kontrollü ikinci mertebeden bir sisteme ait aşağıdaki denklem olsun [17];

$$\ddot{x} - a\dot{x} = u, \quad a > 0 \quad (2.3)$$

ve

$$u = -kx. \quad (2.4)$$

Bu durumda kapalı çevrim sistemi,

$$\ddot{x} - a\dot{x} + kx = 0 \quad (2.5)$$

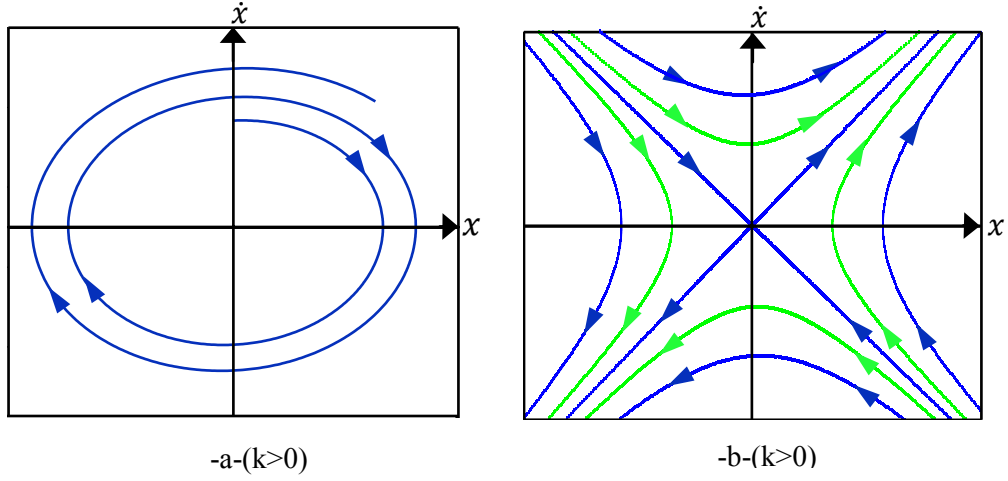
halinin alır. Sistemin kökleri,

$$\lambda_{1,2} = a/2 \pm \sqrt{a^2 - 4k}/2 \quad (2.6)$$

olarak elde edilir. Bu durumda, sistemin geribesleme kontrol kazancı,

$$|k| = c, \quad c > a^2/4 \quad (2.7)$$

olarak tanımlanırsa, sistemin kontrol kazancının sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre ($k > 0$ veya $k < 0$) iki ayrı cevap şekli ortaya çıkar.



Şekil 2.1. Sistemin Faz Düzleminde Kararsız Yapıları

Kontrol kazancının sıfırdan büyük olduğu durumda sistemin kökleri gerçekte pozitif olur ve odak noktası merkez olan kararsız bir yapı söz konusudur. Sistemin faz portresi Şekil 2.1.a'da görülmektedir. Eğer kontrol kazancı sıfırdan küçük olursa sistemin iki gerçekte kökü vardır, bunlardan biri için kararlı ($\lambda_2 < 0$) ve diğeri içinse kararsızdır ($\lambda_1 > 0$). Sistemin denge noktası merkeze eğer şekilde teğettir ve faz portresi Şekil 2.1.b'de görülmektedir [17].

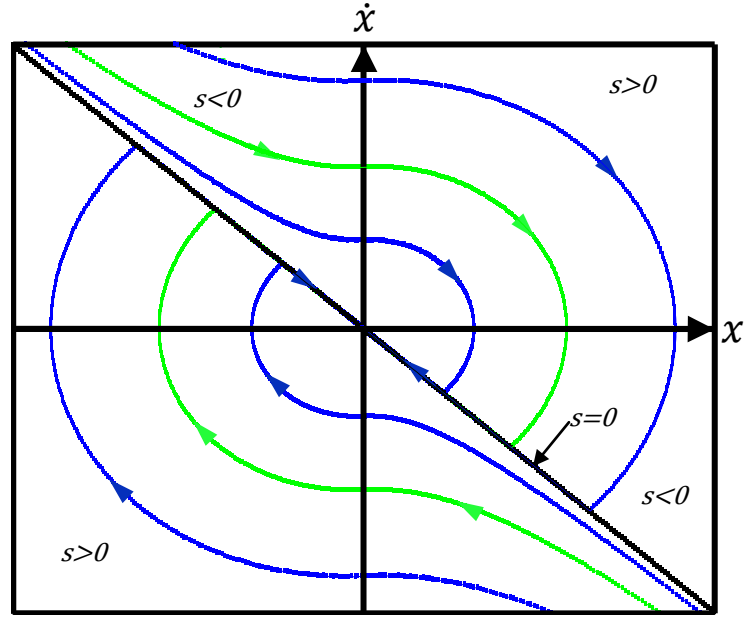
Her iki yapı da kararsız durumdadır. Ancak bununla beraber, ikinci yapıda kararlı kökleri olan bir hat vardır ($\dot{x} - \lambda_2 x = 0$). Bu hat üzerinde hareket merkeze doğru meydana gelir. Böylelikle anahtarlama fonksiyonunu aşağıdaki gibi tasarlırsak

$$s = x s_1, \quad s_1 = \dot{x} - \lambda_2 x \quad (2.8)$$

Sistemin $x = 0$ ve $s_1 = 0$ hatlarında kayması için anahtarlama kuralı

$$k = \begin{cases} c, & s > 0 \\ -c, & s < 0 \end{cases} \quad (2.9)$$

olarak tanımlanırsa sonuç Şekil 2.2. de görülebilir. Anahtarlama kuralı, sistemin her iki kararsız yapısıyla s yüzeyine ulaşmasını sağlamaktadır ve s yüzeyi üzerinde kayarak asimptotik olarak merkeze ulaşmaktadır. Böylelikle oluşan değişken yapılı sistem asimptotik kararlıdır.



Şekil 2.2. Asimptotik Kararlı Sistemin Faz Düzlemi

Sistemde kayma kipinin oluşması, kontrol sırasında sistem yapısı değişken tutularak gerçekleştirilir. Bu nedenle bu kontrol tekniği “değişken yapıli kontrol” (VSC) olarak adlandırılmaktadır. Kontrol gerçekleştirilirken kayma kipi büyük önem taşıdığından “kayan kipli kontrol” (SMC) ismi daha yaygın kullanılmaktadır [17].

2.2.2. Kayan Kipli Kontrol

Kayan kipli kontrol, sistemdeki belirsizliklere, parametre değişimlerine ve bozuculara rağmen istenilen dinamik davranışı sağlayabilen son derecede gürbüz bir kontrol tekniğidir. 1950’lerde ilk defa Emelyanov tarafından ortaya atılan teknik, hem hızlı anahtarlama teknolojisinin gelişmemiş olması, hem de bir müddet yalnızca Rusça literatürde yer almış olmasından dolayı 1970’li yıllara kadar çarpıcı teorisine rağmen raflarda kalmış, gelişen hızlı anahtarlama teknolojisi ve 1977 yılında ilk kez Vadim Utkin’in İngilizce makalesi ile ciddi anlamda gündeme gelmiş [1], günümüze kadar da gittikçe artan bir ivme ile kullanım alanı genişlemiştir.

Gerçek dinamik sistemlerde, modelleme hataları, istenmeyen sıcaklık, basınç veya voltaj değişimleri, titreşim ve bozucu girişler gibi çeşitli çevresel faktörlerden kaynaklanan belirsizliklerden kaçınmak imkansızdır. Endüstride kullanılan PID kontrolcü gibi klasik doğrusal kontrolcüler genellikle parametre değişimlerine, modellenmemiş dinamiklere ve bozucu girişlere karşı tatminkâr sonuçlar verememektedir. Bu nedenle, özellikle belirsiz sistemler için, doğrusal veya doğrusal olmayan sistemlerdeki belirsizliklerin sistem cevabı üzerindeki etkisini sıfıra götürebilen kayan kipli kontrol tekniği tercih edilmekte olup kullanımını son derecede yaygınlaştırmış, çok sayıda kayan kipli kontrol tekniği geliştirilmiştir [3].

Kayan kipli kontrolün temeli gürbüz kontrol olarak bilinen “değişken yapıli kontrol”e dayanmaktadır. kayan kipli kontrol (KKK) yönteminde, sonsuz anahtarlama geribesleme kontrolü kullanılarak, doğrusal veya doğrusal olmayan sistem durum uzayında tanımladığımız yüzey üzerine çekilir ve yüzey üzerinde tutulur. Bu yüzey durum değişkenlerinden oluşur, arzu edilen dinamik cevap şekline göre seçilir ve ‘Kayma Yüzeyi’ denilir. Sistem, kayma yüzeyine bir kez ulaştığı zaman kontrol edilen sistem (plant) parametre değişimlerinden ve bozucu etkilerden bağımsız hale gelir.

Birinci mertebeden bir sistemin kontrol edilmesi, n. mertebeden bir sistemin kontrol edilmesine nazaran daha basittir. Kayan kipli kontrol yaklaşımında ‘n’ inci mertebeden kontrol probleminin yerini birinci mertebeden kontrol problemi alır. Böylelikle, sistemdeki parametre belirsizlikleri ve bozucu girişlerin varlığına rağmen gürbüz bir kontrol gerçekleştirilmiş olur [18]. Birinci mertebeden bir sistemin geribesleme kontrol yapısı, eğer hata eksi ise sistemi artı yöne zorla; eğer hata artı ise sistemi eksi yöne zorla şeklindedir ve göreceli olarak uygulanması basittir. Bu basitlik, kayan kipli kontrol sayesinde n. mertebeden doğrusal veya doğrusal olmayan sistemlere de uygulanabilmektedir.

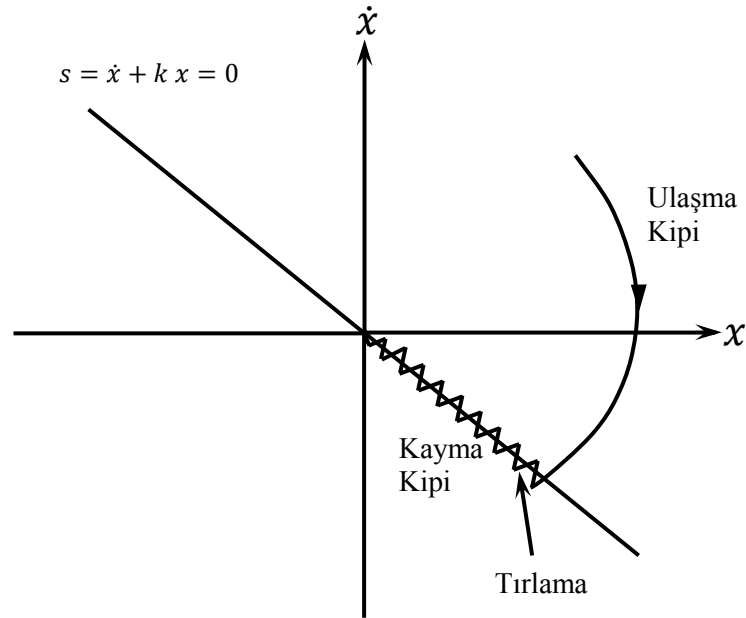
Kayan kipli kontrolün anlaşılabilmesi için bir örnek verelim; ikinci mertebeden zamanla değişmeyen doğrusal bir sistemi ele alalım;

$$\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_2x = u, \quad (2.10)$$

$$s = \dot{x} + kx, \quad u = -M \text{sign}(s), \quad (2.11)$$

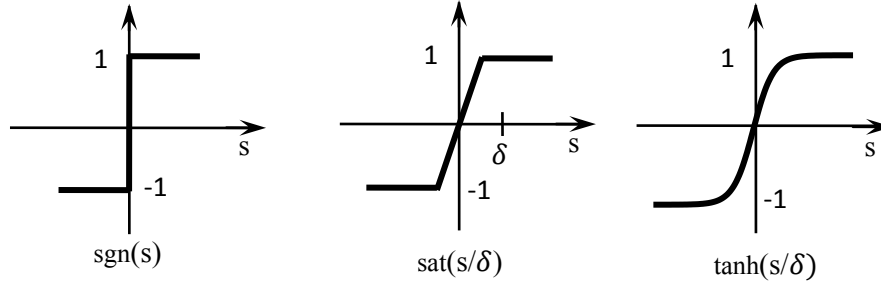
Burada a_1, a_2 plant parametreleri, k kontrol kazancı, M ise anahtarlama sinyalinin maksimum değeri olup, hepsi de sabit değerlerdir.

Kontrol sinyali süreksizdir ve sistemi yüzey üzerine çeker. Sistem ulaşma kipindedir (reaching phase) ve bir t_1 anında sistem bu yüzeye erişir ve kayma kipine girer (Şekil 2.3). Yüzey üzerinde sistem kayma kipine girmiş olup $s = \dot{x} + kx = 0$ denklemi geçerlidir ve çözümü $x(t) = x(t_1)e^{-c(t-t_1)}$ şeklindedir. Görüldüğü üzere çözüm düşük mertebededir ve sistem parametreleri ile bozucu girişlerden bağımsızdır [19]. Çözüm sadece yüzey parametrelerine bağlıdır ve yeni dinamiği seçtiğimiz yüzey belirlemektedir. Kayan kipli kontrolün duyarsızlık ve gürbüzlük özelliği buradan gelmektedir. Ancak ulaşma kipinde kontrol dinamiği sistem parametrelerine bağlıdır; kayma kipinde ise yüzeye bağlıdır, gürbüzlük özelliği kayma kipinde geçerli olur.



Şekil 2.3. İkinci Mertebeden bir Sistemin Kayan Kipli Kontrolü

Kayan kipli kontrol süreksiz bir yapıya sahiptir ve anahtarlamalı kontrol sinyaline sahiptir. Ancak yüksek frekansta anahtarlama sonucu sistemde tırlama(chattering) meydana gelir (Şekil 2.3). Tırlama gereksiz yere titreşim oluşturabilecek, sistemin ömrünü kısaltan ve gereksiz enerji tüketimine neden olan olumsuz bir etkidir. Tırlama azaltmak veya ortadan kaldırmak için sert geçişleri olan “sign” fonksiyonu yerine “sat “ doyma fonksiyonu veya “tanh” sigmoid fonksiyonu gibi yumuşak geçişleri olan “yumuşatma fonksiyonları” kullanılabilir(Şekil 2.4). Böylelikle yüzeyin yakınlarda daha yumuşak ve azalan sinyal üretilmiş olur. Bu ise kayma yüzeyinin yakınlarda yüzeye paralel sınır tabakalar tanımlanarak ve sinyal bu sınırlar içerisinde yumuşatılarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 2.4. Anahtarlama Fonksiyonları (Sgn,Sat ve Tanh)

Kayan kipli kontrol teorisinde, kontrol dinamiğinin iki ardışık kipi vardır; birincisi ulaşma kipi ve ikincisi kayma kipidir [1,3,16]. Kayan kipli kontrol tasarımı iki aşamadan oluşur. İlk aşaması kayan yüzey ikinci aşaması kontrolcü tasarlanmasıdır. Kayan yüzey, arzu edilen kapalı çevrim sütün cevabı şekline göre kök yerleştirme metoduyla durum uzayında tasarlanır. İkinci aşamada ise kontrol sinyali Lyapunov kararlılık kriteri ile elde edilir. Lyapunov kayma koşulu sistemi yüzeye ulaşmaya zorlar ve yüzey üzerinde tutar. Sistemin kararlılığı seçtiğimiz kararlı yüzey ve kayma koşulu (Lyapunov kararlılık kriteri teoremi) ile sağlanmış olur [3]. Ulaşma kipinde, kontrol dinamiği sistem parametrelerine bağlıdır; kayma kipinde ise sistemin dinamiği tasarlanan yüzey parametrelerince belirlenir, kayan kipli kontrolün gürbüzlük özelliği kayma kipinde geçerli olur.

2.2.3. Kayan Kipli Kontrol Tasarımı

Kayan kipli kontrol yüzeyini ve kontrol kuralını belirleyen kayan kipli kontrol yaklaşımları aşağıda verilmiştir.

2.2.3.1. Kök Yerleştirme Yöntemi

Doğrusal bir sistemi aşağıdaki gibi tanımlayalım;

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad \mathbf{x} \in \mathcal{R}^n, \mathbf{u} \in \mathcal{R}^1 \quad (2.12)$$

Sistem T dönüşüm matrisiyle Denklem 2.13’de görülen “kontrol edilebilir kanonik form”a dönüştürülebilir [19].

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & \cdots & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2.13)$$

T dönüşüm matrisi ile $T\mathbf{y} = \mathbf{x}$ dönüşümü gerçekleştirilirse

$$\mathbf{y} = T^{-1}\mathbf{x} \quad (2.14)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = T^{-1}\dot{\mathbf{x}}$$

$$\dot{\mathbf{y}} = T^{-1} [\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b} \mathbf{u}]$$

$$\dot{\mathbf{y}} = T^{-1} \mathbf{A}\mathbf{x} + T^{-1} \mathbf{b} \mathbf{u}$$

$$\dot{\mathbf{y}} = T^{-1} \mathbf{A}T\mathbf{y} + T^{-1} \mathbf{b} \mathbf{u} \quad (2.15)$$

bulunur. Burada T matrisi sistemin “kontrol edilebilirlik matrisi” ve köklerinden oluşan bir denklemdir [20]. T matrisi

$$T = (\mathbf{b}, \mathbf{A}\mathbf{b}, \dots, \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{b}) \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & \cdots & a_n & 1 \\ a_3 & a_4 & \cdots & 1 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_n & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

olarak tanımlanır. $Ty = x$ koordinat dönüşümünden sonra sistemin durum denklemi,

$$\dot{y}_1 = A_{11}y_1 + A_{12}y_2 \quad (2.17.a)$$

$$\dot{y}_2 = A_{21}y_1 + A_{22}y_2 + u \quad (2.17.b)$$

formuna dönüşür. Burada $y_1 \in \mathcal{R}^{(n-m)}$, $y_2 \in \mathcal{R}^m$ ve A_{ij} , $i, j = 1, 2$, sabit matrislerdir. Kayma yüzeyi,

$$s = y_2 + Cy_1 = 0 \quad (2.18)$$

olarak seçilirse sistemin s yüzeyindeki davranışı,

$$y_2 = -Cy_1 \quad (2.19)$$

İfadesiyle kendini gösterir. Bu denklem, Denklem 2.17.a'da y_2 'nin yerine yazılırsa kayma kipi davranışı,

$$\dot{y}_1 = A_{11}y_1 + A_{12}(-Cy_1) \quad (2.20)$$

$$\dot{y}_1 = (A_{11} - A_{12}C)y_1 \quad (2.21)$$

denklemleriyle belirlenir. Eğer (A, B) çifti kontrol edilebilir ise, (A_{11}, A_{12}) çifti de kontrol edilebilirdir; böylelikle klasik geribesleme tasarımları kullanılabilir, arzuladığımız karakteristik için kök yerleştirme veya lineer kuadratik yöntem vb. metodlarla $(A_{11} - A_{12}C)$ ifadesindeki C matrisi belirlenir [17,19,20,21]. Kayma dinamiği sadece A_{11}, A_{12} matrislerine bağlıdır ve A_{21}, A_{22} matrislerinden bağımsızdır. Tek girişli bir sistem için, eğer sistem kanonik kontrol edilebilirlik formunda yazılabilirse, o zaman kayma dinamikleri sistemin a_i parametrelerinden bağımsız hale gelir [21].

Kontrol yüzeyi tasarlandıktan sonra, dönüşüm matrisiyle durum uzayına geri dönülür. Sistemin kayma yüzeyi, $(s(x) = 0)$ üzerinde kalmasını sağlayacak eşdeğer sinyal, yüzeyin türev ifadesinden $(\dot{s} = 0)$ kararlılık kriterine uygun şekilde elde edilir. Denklem 2.18 ile ifade edilen kayma yüzeyi,

$$s = y_2 + Cy_1 = 0$$

olup, durum uzayında ise

$$s(x) = \mathbf{C}_D \mathbf{x} \quad (2.22)$$

$$\dot{s}(x) = \mathbf{C}_D \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}_D (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} u_{eq}) = 0 \quad (2.23)$$

$$u_{eq} = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (2.24)$$

olarak bulunur. Toplam kontrol sinyali,

$$u = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} - k \text{sign}(s) \quad (2.25)$$

olarak elde edilir. Böylelikle sistemimizin modelinden yararlanılarak, arzu edilen kapalı çevrim kontrollü sistem davranış şekli elde edilmiş olur.

2.2.3.1.1. Kontrolcü Tasarımı

Kayan kipli kontrol tasarımında kararlı bir yüzeyin tasarımından sonra sistemi o yüzeye ulaştıracak kontrol kuralının belirlenmesi gerekir. Sistemin herhangi bir başlangıç noktasına karşılık kayma yüzeyine sonlu zamanda erişmesini sağlayacak kontrol kuralına ihtiyaç vardır. Kayan kipli kontrolün bozucu girişlere ve parametre belirsizliklerine karşı gürbüzlüğü sistemin kayma yüzeyine ulaşması ve kaymasıyla geçerli bir özelliktir. Tasarımda ikinci adım olan kontrol kuralını belirlemek için Lyapunov kararlılık kriterinden yararlanılır. Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilebilir.

$$V = \frac{s^2}{2} \quad (2.26)$$

Pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonun türevi sıfırdan küçük olmalıdır, bu şarta “erişilebilirlik kriteri” denir [21] ve

$$\dot{V} = s \dot{s} < 0 \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ancak bu şart yüzeye sonlu zamanda erişim için yeterli değildir. Bu şartın yerini genellikle “ μ erişilebilirlik kriteri” alır [21].

$$s\dot{s} < -\mu|s| < 0 \quad (2.28)$$

Bu kriter sayesinde yüzeye sonlu zamanda erişim garanti altına alınmış olunur. Her iki tarafın integrali alınır,

$$|s(t)| - |s(0)| < -\mu t \quad (2.29)$$

ifadesiyle yüzeye ulaşmak için gereken zaman, ilk değer olan $s(0)$ den başlayarak,

$$t_e = \frac{|s(0)|}{\mu} \quad (2.30)$$

ifadesiyle sınırlanmıştır. 2.23 denklemini 2.28 denkleminde yerine yazılırsa;

$$sC_D(\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} u) < -\mu|s| \quad (2.31)$$

$$s(C_D \mathbf{A} \mathbf{x} + C_D \mathbf{b} u) < -\mu s \operatorname{sign}(s) \quad (2.32)$$

kontrol sinyalinin bir tarafa çekilip denklem düzenlenirse;

$$u = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} - \mu \operatorname{sign}(s) \cong u_{eq} + u_{sw} \quad (2.33)$$

olarak toplam kontrol sinyali elde edilmiş olunur. Böylelikle daha önce bulunan denklem 2.25'teki kontrol sinyali, μ erişilebilirlik kriterini sağlamış ve sistemin kararlılığını garanti altına almış olur [21,22].

2.2.3.1.2. Durum Gözlemleyici Tasarımı

Kayan kipli kontrolde katsayıların kök yerleştirme ile belirlenmesi durumunda sistemin bütün durum değişkenlerinin bilinmesine ihtiyaç vardır. Ancak gerçek sistemlerde, bütün durum değişkenlerinin ölçülüp geri beslenme olanağının olmadığı durumlar çoğunluktadır. Bu durumda durum değişkenlerini elde etmek için sisteme gözlemleyici tasarlanır. Kullanılan durum gözlemleyici, temelde ölçülen durum değişkeni veya değişkenlerini sistemin modeline eklenerek sistemin modelleme eksiklikleri ve başlangıç hatalarını gidermeyi hedef almaktadır [23]. Sistemi aşağıdaki gibi tanımlanırsa;

$$\dot{x} = A x + B u \quad x \in \mathcal{R}^n, u \in \mathcal{R}^1 \quad (2.34)$$

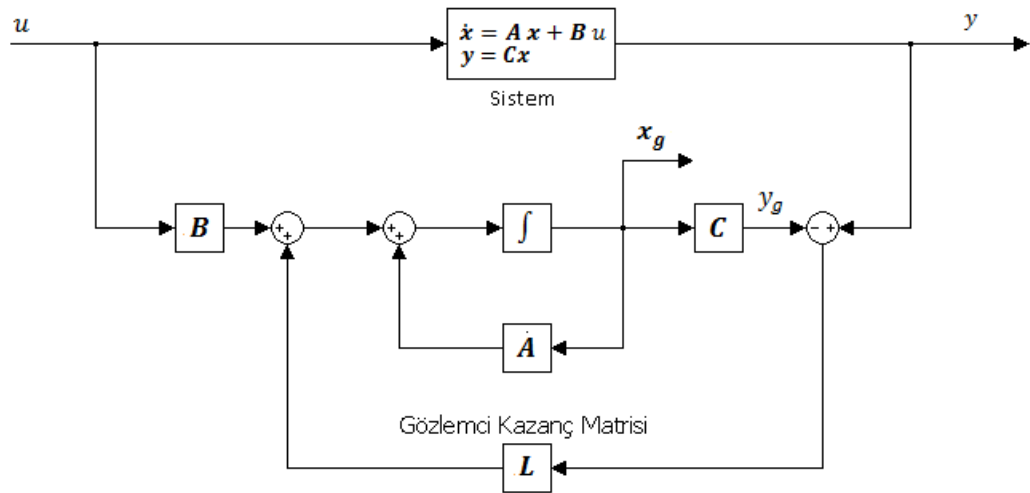
$$y = C x \quad (2.35)$$

Gözlemleyicinin matematiksel modeli temelde sistemin matematiksel modeliyle aynıdır ancak sisteme kestirim hatası eklenir. Böylelikle sistemin modelleme eksiklikleri ve başlangıç hataları telafi edilmiş olunur. Kestirim hatası, ölçülen durum değişkeni ile gözlemlenen durum değişkeni arasındaki farktır. Başlangıç hatası ise başlangıç durum değişkeni ile gözlemlene durum değişkeninin ilk değeri arasındaki farktır. Böylece, Luenberger gözlemleyicinin matematiksel modeli aşağıdaki gibi tanımlanabilir [23].

$$\dot{x}_g = A x_g + B u + L(y - C x_g)$$

$$\dot{x}_g = (A - LC)x_g + B u + L y \quad (2.36)$$

burada x_g kestirilen durum değişkeni, $C x_g$ ise kestirilen çıkıştır. Gözlemleyicinin girişleri sistemin çıkışı y ve kontrol girişi u sinyalidir. L gözlemleyici kazanç matrisi, kestirim hatasını sıfıra götürecektir şekilde tasarlanır. Şekil 2.5’de tam mertebe durum gözlemleyicinin ve sistemin blok diyagramı gösterilmiştir [23].



Şekil 2.5. Durum Gözlemleyici ile Sistem

Gözlemleyi hatasının dinamiğini elde etmek için Denklem 2.34'den Denklem 2.36'yı çıkarırsak:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{x}}_g &= \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{A}\mathbf{x}_g - \mathbf{L}(\mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{C}\mathbf{x}_g) \\ &= (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})(\mathbf{x} - \mathbf{x}_g)\end{aligned}\quad (2.37)$$

halini alır. $\mathbf{x} - \mathbf{x}_g$ farkını hata olarak (\mathbf{e}_g) tanımlar ise,

$$\mathbf{e}_g = \mathbf{x} - \mathbf{x}_g \quad (2.38)$$

Denklem 2.37 aşağıdaki hali alır.

$$\dot{\mathbf{e}}_g = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\mathbf{e}_g \quad (2.39)$$

Denklem 2.39' ten hatanın dinamik davranışının $\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$ denkleminin kökleri ile belirlendiği açıkça görülmektedir. Eğer bu denklemin kökleri kararlı seçilirse, hata değeri herhangi bir başlangıç değerine nazaran sifira ulaşacaktır. Böylelikle gözlemlenen \mathbf{x}_g değeri, sistemin \mathbf{x} değerine eşit olacaktır. Hata değerini sifira ulaşması için $\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C}$ denkleminin kökleri kararlı ve yeterince hızlı olacak şekilde seçilirse hata değeri yeterince hızlı bir şekilde sifira ulaşmaya meyilli hale gelir [23].

2.2.3.2. Referans Yörünge İzleme Kontrolü

Tek girişli tek çıkışlı dinamik bir sistemi ele alınsın,

$$\dot{\mathbf{x}}^{(n)} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \mathbf{B}(\mathbf{x})u \quad (2.40)$$

Burada, $u \in \mathcal{R}$ kontrol girişi, $\mathbf{x} \in \mathcal{R}$ kontrol edilecek çıkış ve $\mathbf{x} = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in \mathcal{R}$ durum vektörüdür. Denklemdeki $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ fonksiyonu kesin olarak bilinmese bile, fonksiyondaki belirsizlikler \mathbf{x} 'in bilinen sürekli fonksiyonu ile mutlak değerce sınırlıdır, kontrol kazancı $\mathbf{B}(\mathbf{x})$ de aynı şekilde kesin olarak bilinmemekle beraber işareti ve belirsizlikler \mathbf{x} 'in bilinen sürekli fonksiyonu ile mutlak değerce sınırlı olduğu bilinmektedir [18].

Bir sistem için genel kontrol problemi, o sistemin modelindeki belirsizliklerin varlığına rağmen keyfi seçilen referans girişi takip etmesini sağlamaktır. Arzu ettiğimiz durum vektörü $\mathbf{x}_r = [x_r, \dot{x}_r, \dots, x_r^{(n-1)}]^T$ şeklinde tanımlanmış olsun. Sistemin çıkışı x için hata $e = x - x_r$, ve hata vektörü $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_r = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$ şeklinde olsun. Zamanla değişen kayma yüzeyi durum uzayında aşağıdaki ifade uyarınca tasarlanır [18].

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + k\right)^{n-1} e \quad (2.41)$$

Burada n sistemin mertebesidir ve örneğin $n = 2$ için seçilen kayma yüzeyi $s(x, t) = \dot{e} + ke$ olarak seçilir. Referansın başlangıç değeri $x_r(0) = x(0)$ seçilmelidir [18].

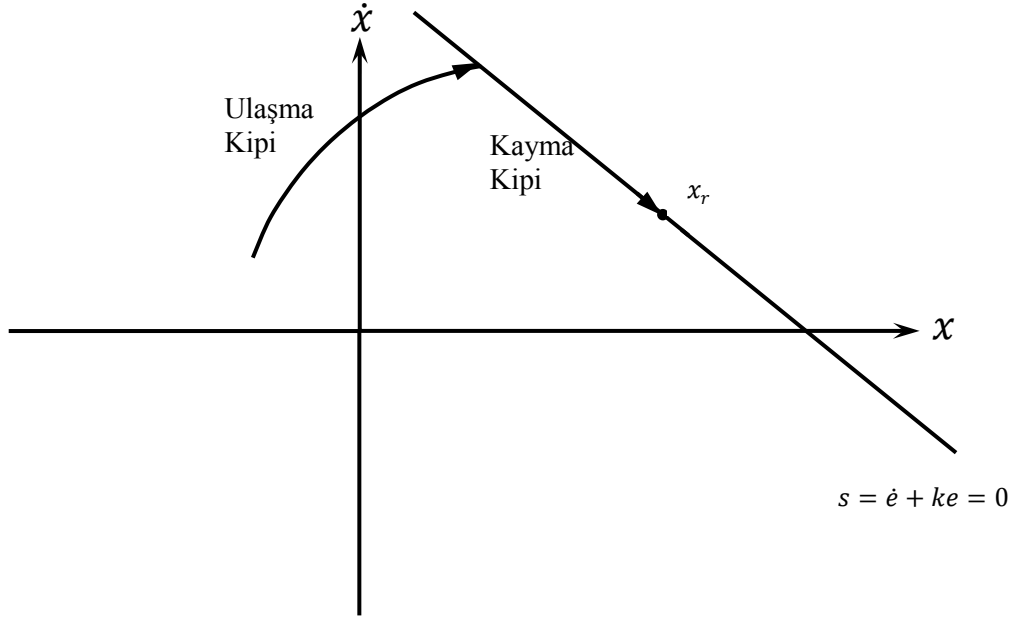
n boyutlu x_r vektörünü izleme problemi aslında s ile birinci mertebeden kararlılık problemine dönüşmüş olur. Eğer sistemin s yüzeyine çekilebilirliği sağlanabilirse, hata değeri de kayma yüzeyi dinamiğine uygun şekilde sifıra ulaşır demektir [18].

2.2.3.2.1. Kontrolcü Tasarımı

Sistemi zamanla değişen kayma yüzeyine ulaştıracak kontrol kuralı u aşağıdaki gibi μ erişilebilirlik kriterinden elde edilebilir.

$$\frac{d}{dt} s^2 < -\mu |s| < 0 \quad (2.42)$$

Burada, $\eta > 0$ 'dır. Denklem 2.42, sistem yörüngelerini yüzeye ulaşmaya zorlar ve bir kez yüzeye ulaştığı zaman üzerinde tutar (Şekil 2.5). Eğer kayma koşulu (Denklem 2.36) sağlanırsa sistem, herhangi bir başlangıç durumunda sonlu zamanda kayma yüzeyine ulaşır. Kayma yüzeyine ulaşmasıyla kontrolcünün değişmezlik özelliği kendini gösterir [18,24].



Şekil 2.6. İkinci Mertebeden bir Sistemin Kayan Kipli Kontrolü

2. mertebeden bir sistem için kayma koşulu (Denklem 2.42) sağlandığı durum Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Grafikte sistemin ulaşmasını istediğimiz referans değerlerinden ($x_r = [x_r, \dot{x}_r, \dots, x_r^{(n-1)}]^T$) oluşan yüzeye sınırlı zamanda ulaştığı görülmektedir. Sistem yüzeye bir kez ulaştığında $s = \dot{e} + k e = 0$ ifadesi geçerlidir ve sistem x_r 'ye exponansiyel olarak hareket eder. $s = \dot{e} + k e = 0$ denkleminin çözümü $e(t) = e(t_1)e^{-c(t-t_1)}$ şeklindedir ve hatanın sıfır değerine ulaşmasının exponansiyel olarak olduğu görülmektedir. Hata değeri sıfır olduğunda ise $x = x_r$ denklemi geçerli olur ve istenilen referans değerine ulaşılmış olunur.

İkinci mertebeden bir sistem için kontrol sinyalinin bulunması amacıyla sistem,

$$\ddot{x} = f + u \quad (2.43)$$

olarak tanımlanabilir. Zamanla değişen kayma yüzeyi 2. mertebeden bir sistem için

$$s = \dot{e} + k e \quad (2.44)$$

olarak arzu edilen hata dinamiğine uygun şekilde belirlenir. Burada $e = x - x_r$ olup, kontrol değişkenindeki hatadır. Eşdeğer sinyali belirlemek için yüzeyin türevi sıfıra eşitlenirse,

$$\dot{s} = \ddot{e} + k\dot{e} = \ddot{x} - \ddot{x}_r + k\dot{e} = f + u - \ddot{x}_r + k\dot{e} = 0 \quad (2.45)$$

ve buradan kontrol sinyali çekilirse,

$$u_{eq} = -f + \ddot{x}_r - k\dot{e} \quad (2.46)$$

eşdeğer kontrol sinyali elde edilmiş olunur. Toplam kontrol sinyali,

$$u = u_{eq} + u_{sw} = -f + \ddot{x}_r - k\dot{e} - \mu \text{sign}(s) \quad (2.47)$$

olarak elde ederiz. Elde edilen sinyalle birlikte Denklem 2.42'deki erişim şartı sağlanarak kontrolcünün kararlılık kriteri yerine getirilmiş olunur.

2.2.3.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol

Kayan kipli yüzey denklemine integral terimi eklenerek benzer sonuçlar elde edilebilir [8].

$$s(t) = \left(k + \frac{d}{dt}\right)^{n-1} e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.48)$$

Burada, k_i integral kazancıdır, $k_i \in \mathcal{R}^+$, 2. mertebeden bir sistem için yüzey,

$$s(t) = \dot{e}(t) + ke(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.49)$$

halini alır. Denklem 2.46'ın yerine,

$$u_{eq} = -f + \ddot{x}_r - k\dot{e} - k_i e \quad (2.50)$$

denklemini geçerli olur ve toplam sinyal

$$u = u_{eq} + u_{sw} = -f + \ddot{x}_r - k\dot{e} - k_i e - \mu \text{sign}(s) \quad (2.51)$$

olarak elde edilebilir.

2.2.3.4. Hiyerarşik Kayan Kipli Kontrol

Dolaylı tahrikli bir sistem olan arabalı ters sarkaç sistemi, tek giriş ve çok çıkışlı bir sistem olması nedeniyle kendi içinde alt sistemlere sahiptir. Bu tip sistemleri bilinen kayma yüzeyleri ile kontrol etmekte güçlüklerle karşılaşmaktadır. Çünkü birçok alt sistemden oluşan ve durum değişkenlerinin bu alt sistemlerle belirgin diferansiyel ilişkisi olmayan dolaylı tahrikli sistemlerde bilinen kayan kipli yüzey parametreleri direkt olarak Hurwitz koşuluna göre tasarlanamamaktadır [25]. Bu nedenle arabalı ters sarkaç sistemine hiyerarşik kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Bu bölümde hiyerarşik kayan kipli kontrol ile ilgili önceden yapılmış çalışmadaki metot ve notasyonun benzeri kullanılmıştır [26].

Dolaylı tahrikli ve tek girişli çok çıkışlı bir sistemin durum değişkenlerini denklem 2.52'teki gibi tanımlayalım;

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_1(x) + b_1(x)u \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= f_2(x) + b_2(x)u \\ y(t) &= [x_1, x_2]^T\end{aligned}\tag{2.52}$$

Burada x_i ($i = 1, \dots, 4$) sistemin durum değişkenleri, $f_i(t)$ ve $b(t)$ ($i = 1, 2$) durum değişkenlerine ve girişle bağlantılı doğrusal olmayan denklemlerdir.

Hiyerarşik kayan kipli kontrol için, iki ayrı grup dinamik davranışın durum değişkenleri için iki ayrı kayma yüzeyi tanımlanabilir [25,26,27].

$$s_1 = c_1 x_1 + \dot{x}_1\tag{2.53}$$

$$s_2 = c_2 x_3 + \dot{x}_3\tag{2.54}$$

Burada c_1 ve c_2 pozitif sabitlerdir. Her iki denkleminde zamana göre türevleri alırsa,

$$\dot{s}_1 = c_1 \dot{x}_1 + \ddot{x}_1 = c_1 x_2 + f_1(x) + b_1(x)u\tag{2.55}$$

$$\dot{s}_2 = c_2 \dot{x}_3 + \ddot{x}_3 = c_2 x_4 + f_2(x) + b_2(x)u\tag{2.56}$$

Eğdeşer sinyal metodu ile alt sistemlerin eşdeğer sinyalleri,

$$u_{eq1} = -(f_1(x) + c_1x_2) / b_1(x) \quad (2.57)$$

$$u_{eq2} = -(f_2(x) + c_2x_4) / b_2(x) \quad (2.58)$$

Birinci katman kayan kipli yüzeyi $S_1 = s_1$ olarak tanımlayalım. Birinci katman kayan kipli yüzey için kontrol kuralı ve Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır [28].

$$u_1 = u_{eq1} + u_{sw1} \quad (2.59)$$

ve

$$V_1(t) = \frac{1}{2} S_1^2 \quad (2.60)$$

Burada u_{sw1} , birinci katman kayan kipli kontrolün anahtarlama sinyalidir. $V_1(t)$ in zaman göre türevi ve $\dot{S}_1 = -k_1S_1 - \eta_1 \text{sgn}S_1$, burada k_1 ve η_1 pozitif sabit sayılardır, fonksiyonu tanımlanırsa birinci katman kayan kipli kontrol için kontrol kuralına aşağıdaki gibi ulaşılır.

$$u_1 = u_{eq1} + \dot{S}_1 / b_1 \quad (2.61)$$

İkinci katman kayan kipli yüzeyi aşağıdaki gibi tanımlayalım,

$$S_2 = \alpha S_1 + s_2 \quad (2.62)$$

Burada α sabit bir sayıdır.

İkinci katman kayan kipli yüzeyi için kontrol kuralı ve Lyapunov fonksiyonunu tanımlayalım,

$$u_2 = u_1 + u_{eq2} + u_{sw2} \quad (2.63)$$

ve

$$V_1(t) = \frac{1}{2} S_2^2 \quad (2.64)$$

Burada u_{sw2} , ikinci katman kayan kipli kontrolün anahtarlama sinyalidir.

$V_2(t)$ 'nin zamana göre türevi alınır ve $\dot{S}_2 = -k_2 S_2 + \eta_2 \text{sign} S_2$ (k_2 ve η_2 pozitif tamsayılar) olarak tanımlanır. Böylelikle hiyerarşik kayan kipli kontrolün toplam kontrol sinyaline aşağıdaki gibi ulaşılır.

$$u_2 = (\alpha b_1 u_{eq1} + b_2 u_{eq2} + \dot{S}_2)(\alpha b_1 + b_2)^{-1} \quad (2.65)$$

2.2.3.4.1. Kararlık Analizi

İkinci katman kayan kipli yüzey için, torkun sınırlı olup olmamasından etkilenmeksizin Lyapunov fonksiyonu değişmemektedir. Böylelikle, $V_2(t)$ 'nin zamana göre türevini alırsak,

$$\dot{V}_2(t) = S_2 \dot{S}_2 = -\eta_2 |S_2| - k_2 S_2^2 \quad (2.66)$$

ede edilebilir. Her iki tarafın integralini alınırsa aşağıdaki denklem elde ederiz.

$$\int_0^t \dot{V}_2(t) d\tau = \int_0^t (-\eta_2 |S_2| - k_2 S_2^2) d\tau \quad (2.67)$$

ve

$$V_2(t) - V_2(0) = \int_0^t (-\eta_2 |S_2| - k_2 S_2^2) d\tau \quad (2.68)$$

Buradan,

$$V_2(0) = V_2(t) + \int_0^t (\eta_2 |S_2| + k_2 S_2^2) d\tau \geq \int_0^t (\eta_2 |S_2| + k_2 S_2^2) d\tau \quad (2.69)$$

Ayrıca

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t (\eta_2 |S_2| + k_2 S_2^2) d\tau \leq V_2(0) < \infty \quad (2.70)$$

Barbalat teoremine göre eğer $t \rightarrow \infty$, o zaman $\eta_2 |S_2| + k_2 S_2^2 \rightarrow 0$ denilir. Böylelikle $\lim_{t \rightarrow \infty} S_2 = 0$ olmuş olur. Benzer şekilde Barbalat teoreminden $\lim_{t \rightarrow \infty} S_1 = 0$

denklemini elde edilebilir. Bunun anlamı, her iki katman için kayma yüzeyleri asimptotik olarak kararlıdır [26].

2.2.3.5. Kaskat Kayan Kipli Kontrol

Bu bölümde hiyerarşik kayan kipli kontrol ile ilgili önceden yapılmış çalışmadaki metot ve notasyonun benzeri kullanılmıştır [27]. Arabalı ters sarkaca kaskat kayan kipli kontrolün uygulanmasında Denklem 2.52’teki sistem için birinci düzey kayan yüzeyi durum değişkenlerinden x_1 ve x_2 olarak seçilsin [12,28,29].

$$s_1 = c_1 x_1 + x_2 \quad (2.71)$$

Bundan sonra birinci düzey yüzey s_1 genel durum değişkenlerinden biri olarak kabul edilebilir. Bu değişkeni kullanarak ikinci düzey yüzeyi tanımlanabilir.

$$s_2 = c_2 x_3 + s_1 \quad (2.72)$$

Benzer şekilde üçüncü düzey yüzey elde edilebilir.

$$s_3 = c_3 x_4 + s_2 \quad (2.73)$$

Burada c_1, c_2 ve c_3 katsayıları sabit seçilebilir [12,30]. Lyapunov fonksiyonları aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$V_1 = \frac{1}{2} s_1^2, V_2 = \frac{1}{2} s_2^2, V_3 = \frac{1}{2} s_3^2, \quad (2.74)$$

Denklem 2.71, 2.72 ve 2.73 ifadelerinden görülür ki eğer $c_i (i = 1,2,3)$ katsayıları $c_1 x_1 x_2 > 0$, $c_2 s_1 x_3 > 0$, $c_3 s_2 x_4 > 0$ denklemlerini sağlarsa, $V_1 \leq V_2 \leq V_3$ olur. Böylelikle sabit katsayılar aşağıdaki gibi seçilebilir,

$$c_1 = C_1 \text{sign}(x_1 x_2)$$

$$c_2 = C_2 \text{sign}(s_1 x_3) \quad (2.75)$$

$$c_3 = C_3 \text{sign}(s_2 x_4)$$

Burada $C_i (i = 1,2,3)$ pozitif sabit sayılardır.

Eşdeğer kontrol sinyali metodu ile her bir altsistemin eşdeğer sinyali elde edilebilir.

$$u_{eq1} = f_1 + c_1 x_2 / b_1 \quad (2.76)$$

$$u_{eq2} = -(c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1) / b_1 \quad (2.77)$$

$$u_{eq3} = -(c_3 f_2 |sgn(s_2)| + c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1) / (c_3 b_2 |sgn(s_2)| b_1) \quad (2.78)$$

Toplam kontrol sinyalini aşağıdaki gibi tanımlarız,

$$u = u_{eq} + u_{sw} \quad (2.79)$$

Anahtarlama sinyali u_{sw} 'i Lyapunov methodu kullanılarak belirlenebilir. Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$V = \frac{1}{2} s_3^2 \quad (2.80)$$

Sonra,

$$\dot{V} = s_3 \dot{s}_3 \quad (2.81)$$

$$= s_3 (c_3 \dot{x}_4 + \dot{s}_2) \quad (2.82)$$

$$= s_3 [c_3 f_2 + c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1 + (c_3 b_2 + b_1) u_{eq} + (c_3 b_2 + b_1) u_{eq}] \quad (2.83)$$

Anhtarlama sinyali,

$$u_{sw} = -(c_3 b_2 + b_1)^{-1} [\eta sign(s_3) + k s_3] \quad (2.84)$$

olarak seçilir. Burada η, k pozitif tamsayılar olup eşdeğer sinyal,

$$u_{eq} = (c_3 b_2 + b_1)^{-1} (c_3 f_2 + c_2 x_4 + c_1 x_2 + f_1) \quad (2.85)$$

olarak seçilirse,

$$\dot{V}_3 = -s_3 \eta sign(s_3) - k s_3^2 \quad (2.86)$$

$$= -\eta|s_3| - ks_3^2 \leq 0 \quad (2.87)$$

Böylelikle, Denklem (2.84) ve (2.85) te yer alan kaskat kayan kipli kontrolcü kuralları, son düzey kayan yüzeylerinin kararlılığını ve sonlu zamanda ulaşmasını garanti edebilir. Son kayan yüzeydeki durum değişkenleri ilk önce sıfıra zorlananlardır.

2.2.3.5.1. Kararlık Analizi

Denklem (2.86) ile bilinmektedir ki,

$$\dot{V}_3 = -s_3\eta\text{sign}(s_3) - ks_3^2 \leq 0 \quad (2.88)$$

Her iki tarafın integralini alınırsa,

$$\int_0^t \dot{V}_3 d\tau = \int_0^t (-\eta|s_3| - ks_3^2) d\tau \quad (2.89)$$

$$V_3(t) = V_3(0) - \int_0^t (\eta|s_3| + ks_3^2) d\tau \geq 0 \quad (2.90)$$

Sonra, elde edebilirizki

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t (\eta|s_3| + ks_3^2) d\tau \leq V_3(0) < \infty \quad (2.91)$$

bulunur. Burada,

$$0 \leq \int_0^\infty (\eta|s_3|) d\tau < \infty \quad (2.92)$$

$$0 \leq \int_0^\infty (ks_3^2) d\tau < \infty \quad (2.93)$$

olduğu açıktır. Eğer kaskat kayan kipli kontrolün parametreleri Denklem 2.75'i sağlarsa,

$$0 \leq V_1 \leq V_2 \leq V_3 \quad (2.94)$$

$$\int_0^{\infty} V_2 \, d\tau < \int_0^{\infty} V_3 \, d\tau \quad (2.95)$$

elde edilir. Buradan,

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{2} (c_2 x_3 + s_1)^2 \, d\tau \leq \int_0^{\infty} \frac{1}{2} s_3^2 \, d\tau \quad (2.96)$$

$$\int_0^{\infty} (c_2^2 x_3^2 + 2c_2 x_3 s_1 + s_1^2) \, d\tau \leq \int_0^{\infty} s_3^2 \, d\tau < \infty \quad (2.97)$$

olarak elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldığında yüzeylerin asimptotik kararlılığının sağlandığı görülür [28,29,30].

Burada,

i : motor akımı,

R : elektrik direnci,

L : motor endüktansı,

k_e : motor hız sabiti,

ω : açısal hız,

u : besleme voltajı,

B : sönüm sabiti,

I_m : atalet momenti,

l : sarkaç çubuğunun kütle merkezine kadar boyu,

m : sarkacın kütlesi,

θ : sarkaç açısı,

K_t : ise motor tork sabitidir.

Durum değişkenlerini aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$\theta = x_1 \ \& \ \omega = x_2 \ \& \ i = x_3 \quad (3.3)$$

Sistemimizin durum uzayındaki modeli,

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.4)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K_t}{I_m} x_3 + \frac{lmg}{I_m} \sin x_1 - \frac{B}{I_m} x_2 \quad (3.5)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{K_e}{L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u \quad (3.6)$$

halini alır. Durum değişkenleri matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{lmg}{I_m} \sin x_1 & -\frac{B}{I_m} & \frac{K_t}{I_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (3.7)$$

Basit ters sarkacın sarkacının kontrolü sırasında sarkaç açısı sıfır derece civarında küçük açılar yaptığı kabul edilerek $\sin\theta \approx \theta$ olduğu kabul edilebilir. Bu durumda sistemin doğrusallaştırılmış modeli,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{mg}{I_m} & -\frac{B}{I_m} & \frac{K_t}{I_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (3.8)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{mg}{I_m} & -\frac{B}{I_m} & \frac{K_t}{I_m} \\ 0 & -\frac{K_e}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \& \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Sistemin parametreleri Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu parametreler çeşitli yöntemlerle deneysel olarak elde edilmiştir [33].

Tablo 3.1. Basit Ters Sarkaç Parametreleri

| | |
|----------|-----------|
| $Ke=Kt$ | 0.065633 |
| R_m | 5.138648 |
| L | 0.1509 |
| m | 0.076 |
| B_{te} | 0.0041 |
| L_m | 0.0099446 |
| I_m | 0.002386 |

Denklem 2.14’teki dönüşüm için, sistemin kontrol edilebilirlik matrisi ve köklerinden oluşan T matrisi

$$T = (b, Ab, \dots, A^{n-1}b) \begin{bmatrix} a_2 & a_3 & \dots & a_n & 1 \\ a_3 & a_4 & \dots & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

elde edilir. T Dönüşüm matrisiyle $Ty = x$ dönüşümü gerçekleştirilirse sistem

$$\dot{y} = T^{-1}ATy + T^{-1}bu \quad (3.11)$$

Halini alır ve sistemin dinamiği

$$\dot{\mathbf{y}}_1 = (\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12}\mathbf{C})\mathbf{y}_1 \quad (3.12)$$

ifadesiyle belirlenir. Burada $(\mathbf{A}_{11} - \mathbf{A}_{12}\mathbf{C})$ denklemi sistemin davranışını belirler ve bu denklemin özdeğerleri arzu edilen negatif köklerin yerleştirilmesiyle kayma yüzeyinin parametreleri \mathbf{C} belirlenir. Sistemimiz için kökler $p_1 = [-37.8, -22.]$ olarak seçilmiştir ve durum uzayında yüzey matrisi (Bkz. EK-4),

$$\mathbf{C}_D = [0.3177 \quad 0.0210 \quad 0.0099] \quad (3.13)$$

olarak elde edilmiştir. Durum değişkenlerinden oluşan kayan yüzeyin,

$$s(x) = \mathbf{C}_D \mathbf{x} \quad (3.14)$$

türevi sıfıra eşitlenerek eşdeğer kontrol sinyali,

$$\dot{s}(x) = \mathbf{C}_D \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{C}_D (\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b} u_{eq}) = 0 \quad (3.15)$$

$$u_{eq} = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (3.16)$$

elde edilir. Toplam kontrol sinyali,

$$u = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} - k \text{sign}(s) \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Yüksek kontrol aktivitesine sebep olmasından dolayı anahtarlama sinyalinde sign yerine tanh kullanılarak,

$$u = -(\mathbf{C}_D \mathbf{b})^{-1} \mathbf{A} \mathbf{x} - k \tanh(s/\delta) \quad (3.18)$$

toplam kontrol sinyali elde edilir.

Eğer motor endüktansının yeterince küçük olduğu kabul edillirse ($L \ll 0$) modelde basitleştirmeye gidilebilir ve $L \cong 0$ alınabilir, bu durumda 3.1 ve 3.2 denklemleri

$$iR + k_e \omega = u \quad (3.20)$$

$$B\omega + I_m \frac{d\omega}{dt} - l \sin \theta mg = K_t i \quad (3.21)$$

halini alır ve,

$$\theta = x_1 \quad \& \quad \omega = x_2 \quad (3.22)$$

kabulüyle sistemin,

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.23)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{lmg}{I_m} \sin x_1 + \left(-\frac{kt^2}{RI_m} - \frac{B}{I_m} \right) x_2 + \frac{K_t}{RI_m} u \quad (3.24)$$

basitleştirilmiş modeli elde edilir. İkinci mertebeden bu sistem için kayma yüzeyi aşağıdaki gibi yazılabilir.

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

Burada $e = x_1 - x_{1r}$ olup kayma modu yüzeye teğet gerçekleştiğinden,

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} = 0 \quad (3.26)$$

olmalıdır.

$$\dot{s} = (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_{1r}) + \lambda(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1r}) = 0 \quad (3.27)$$

Denklem 3.24, denklem 3.27'de yerine yazılırsa,

$$\frac{lmg}{I_m} \sin x_1 + \left(-\frac{kt^2 B}{RI_m} - \frac{B}{I_m} \right) x_2 + \frac{K_t}{RI_m} u + \lambda x_2 - \ddot{x}_{1r} - \lambda \dot{x}_{1r} = 0 \quad (3.28)$$

$$u_{eq} = -\frac{lmg R_m}{k_t} \sin x_1 + \left(k_t B + \frac{BR}{k_t} \right) x_2 - \lambda \frac{RI_m}{K_t} x_2 + \frac{RI_m}{K_t} \ddot{x}_{1r} + \lambda \frac{RI_m}{K_t} \dot{x}_{1r} \quad (3.29)$$

olarak elde edilir. Toplam kontrol sinyali

$$u = u_{eq} - k \tanh(s/\delta) \quad (3.30)$$

halini alır.

Kayma yüzeyi denkleminde integral terimi eklenirse,

$$s = \dot{e} + \lambda e + k_i \int e dt \quad (3.31)$$

halini alır. Kayma modunda,

$$\dot{s} = \ddot{e} + \lambda \dot{e} + k_i e = 0 \quad (3.32)$$

$$= (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_{1r}) + \lambda(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1r}) + k_i(x_1 - x_{1r}) = 0 \quad (3.33)$$

olur. Denklem 3.24, denklem 3.33’de yazılırsa,

$$\frac{mg}{I_m} \sin x_1 + \left(-\frac{kt^2 B}{RI_m} - \frac{B}{I_m} \right) x_2 + \frac{K_t}{RI_m} u + \lambda x_2 + k_1 x_1 - \ddot{x}_{1r} - \lambda \dot{x}_{1r} - k_1 x_{1r} = 0 \quad (3.34)$$

$$u_{eq} = -\frac{mg R_m}{k_t} \sin x_1 + \left(k_t B + \frac{BR}{k_t} \right) x_2 - \frac{\lambda RI_m}{K_t} x_2 - \frac{k_1 RI_m}{K_t} x_1 + \frac{RI_m}{K_t} \ddot{x}_{1r} + \frac{RI_m}{K_t} \dot{x}_{1r} + \frac{RI_m}{K_t} x_{1r} \quad (3.35)$$

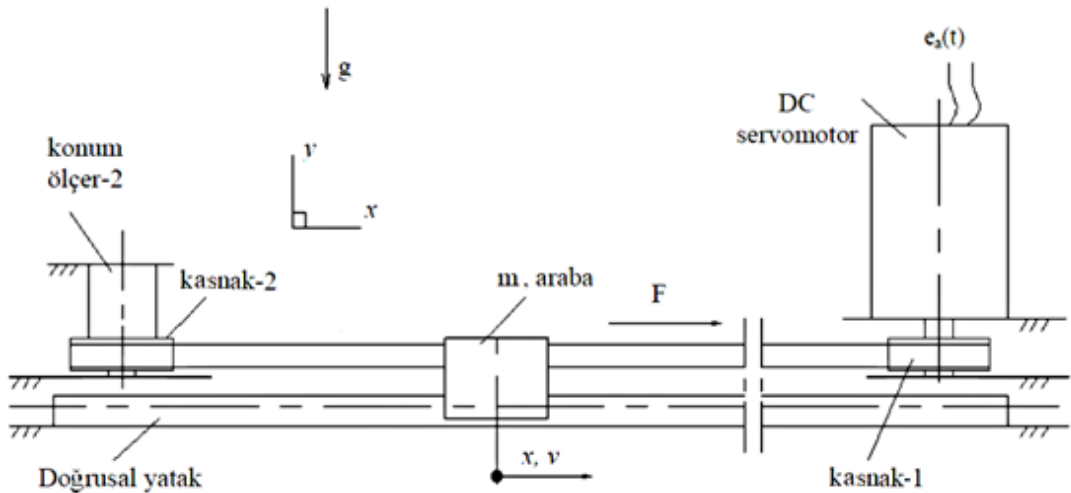
eşdeğer sinyal, elde edilir. Toplam kontrol sinyali ise,

$$u = u_{eq} - k \tanh(s/\delta) \quad (3.36)$$

halini alır.

3.2. DC Motor Tahrikli Araba Sistemi

Arabalı ters sarkaç deney düzeneğinin sarkaçsız hali “doğru akım (DC) motoru tahrikli araba sistemi” deney düzeneği olarak kullanılmıştır (Şekil 3.2). Böylece sarkaçtan kaynaklanan doğrusal olmayan yapı içinde bulunmayan tek giriş tek çıkışlı (CNC tezgah tek eksenli benzeri) kolaylıkla yaklaşık doğrusal olarak modellenebilecek bir sistem elde edilmiştir.



Şekil 3.2. DC Motor Tahrikli Araba Sistemi [34]

Şekil 3.2.'de görülen DC motorun elektrik kısmının dinamik davranışı,

$$e_a(t) = L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + K_m \omega \quad (3.37)$$

olup, motorun dönel mekanik kısmının hareket denklemi,

$$M_{el} - M_{sist} = J_{ge} \dot{\omega} + B_m \omega \quad (3.38)$$

şeklinde yazılabilir. Motorun dinamiği ötelemeli mekanik eşdeğere indirgenirse,

$$M_{el} - M_{sist} = 0 \quad (3.39)$$

elde edilir. Burada,

$$M_{el} = K_t i_m \quad (3.40)$$

ve

$$M_{sist} = R_g F \quad (3.41)$$

moment ifadeleri;

R_g :kasnak yarıçapı, F : çelik tel tarafından arabaya uygulanan kuvvettir. Ötelemeli mekaniğin dinamiği,

$$F = m_e \ddot{x} + B_e \dot{x} + F_b(t) \quad (3.42)$$

olarak yazılır. Toplam hareket denklemi,

$$K_t i_m = R_g m_e \ddot{x} + R_g B_e \dot{x} + R_g F_b(t) \quad (3.43)$$

olarak elde edilir. Durum değişkenleri aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$x = x_1 \ \& \ v = x_2 \ \& \ i = x_3 \quad (3.44)$$

Denklem 3.37 ve 3.43 düzenlenerek sistemin durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.45)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{B_e}{m_e} x_2 + \frac{K_t}{m_e R_g} x_3 \quad (3.46)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{K_e}{R_g L} x_2 - \frac{R}{L} x_3 + \frac{1}{L} u \quad (3.47)$$

Durum uzayı formunda yazılırsa,

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_e}{m_e} & \frac{K_t}{m_e R_g} \\ 0 & -\frac{K_e}{R_g L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u \quad (3.48)$$

elde edilir. Burada;

K_t : motorun tork sabiti, (N.m/A)

L_m : motorun bobin endüktansı, (H)

R_m : motorun bobin iç direnci, (Ω)

B_e : motorun viskoz sönüm sabiti, (N.s/m)

i_m : motor bobinlerinden geçen akım, (A)

Sistemin parametreleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu parametreler çeşitli yöntemlerle deneysel olarak elde edilmiştir [34].

Tablo 3.2. DC Motor Tahrikli Araba Parametreleri

| | |
|----------|-------------|
| $Ke=Kt$ | 0.141 |
| R_m | 3 |
| m_e | 1.222 |
| B_{te} | 28.60020352 |
| L_m | 0.01596 |
| R_g | 0.027 |

Bölüm 3.1’de bahsi geçen kayma kip yüzeyleri aynı şekilde bu sistem için de seçilebilir ve benzer şekilde kontrol kuralları elde edilmiştir.

Şekil 3.3'de görülen arabalı ters sarkaç sisteminin hareket denklemlerini Lagrange yöntemiyle elde ederiz. Lagrange denklemi,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F - F_s \quad (3.49)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = M - M_s \quad (3.50)$$

olarak yazılır. Burada,

$$\begin{aligned} L & : \text{Lagrange fonksiyonu} \\ L & = L(t, x, \dot{x}; \theta, \dot{\theta}) = T - V \quad (3.51) \\ T & : \text{Toplam kinetik enerji, N.m} \\ V & : \text{toplam potansiyel enerji, N.m} \\ x & : \text{arabanın konumu, (m)} \\ \theta & : \text{sarkacın açısal konumu (rad)} \\ F & : \text{arabaya etkiyen dış kuvvet, (N)} \\ F_s & : \text{arabaya etkiyen kum sürtünme kuvveti, (N)} \\ M & : \text{sarkaca etkiyen dış moment, (N.m)} \\ M_s & : \text{sarkaca etkiyen kuru sürtünme momenti, (N.m)} \end{aligned}$$

Arabanın konumu,

$$L(t, x, \dot{x}; \theta, \dot{\theta}) = T - V \quad (3.52)$$

Arabanın Konumu

$$\vec{r}_c^T = (x, 0, 0) \quad (3.53)$$

ek kütlelerin ağırlık merkezinin konumu,

$$\vec{r}_a^T = (x + L_a \sin\theta, L_a \cos\theta, 0) \quad (3.54)$$

ve sarkacın ağırlık merkezinin konumu

$$\vec{r}_p^T = (x + L_p \sin\theta, L_p \cos\theta, 0) \quad (3.55)$$

vektörleri ile gösterilerek sistemin geometrisi tanımlanabilir. Böylece sarkaç elemanlarının hızları bu vektörlerin zamana göre türevleri olup, hızların karesi ise,

$$v_c^2 = \dot{\vec{r}}_c^T \vec{r}_c^T, \quad v_a^2 = \dot{\vec{r}}_a^T \vec{r}_a^T \quad \text{ve} \quad v_s^2 = \dot{\vec{r}}_s^T \vec{r}_s^T \quad (3.56)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan, öteleme hareketi kinetik enerjisi (T_T),

$$T_T = \frac{m_c v_c^2}{2} + \frac{m_a v_a^2}{2} + \frac{m_s v_s^2}{2} \quad (3.57)$$

Dönel hareket kinetik enerjisi (T_R) ise,

$$T_R = \frac{J_{sp} \dot{\theta}^2}{2} + \frac{J_{sp}}{2} \left(\frac{\dot{x}}{R_{g2}} \right)^2 + \frac{J_{gm}}{2} \left(\frac{\dot{x}}{R_{g1}} \right)^2 \quad (3.58)$$

olarak yazılabilir.

Burada,

m_c : araba ve kayışın toplam kütlesi, kg

m_s : sarkacın kütlesi, kg

m_a : yeri ayarlanabilen ek kütle, kg

m_c : sarkaç, yatay mili ve konum ölçer-1

Milinin sarkaç ağırlık merkezine taşınmış toplam kütle atalet momenti, kg.m^2

J_{sp} : dişli-2 ve konum ölçer-2 milinin toplam kütle atalet momenti, kg.m^2

J_{gp} : dişli-1, motor rotoru ve milinin motor toplam eşdeğer kütle atalet momenti, kg.m^2

R_{g1}, R_{g2} : dişli-1 ve 2'nin yarıçapı,

$$R_{g1} = R_{g2} = R_g \quad \& \quad J_{ge} = J_{ge} + J_{gm} \quad (3.59)$$

Sistemin toplam potansiyel enerjisi ($g=9.81 \text{ m/s}^2$ alınarak) aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V = m_a g L_a \cos\theta + m_s g L_s \cos\theta \quad (3.60)$$

Buradan, (3.57), (3.58) ve (3.60) ifadeleri

$$L = (T_T + T_R) - V \quad (3.61)$$

Lagrange fonksiyonu ifadesinde yerine konulursa sistemin hareket denklemleri,

$$a\ddot{x} + b\ddot{\theta}\cos\theta - b\dot{\theta}^2\sin\theta = F - F_s \quad (3.62)$$

$$c\ddot{\theta} + b\dot{x}\cos\theta - bg\sin\theta = M - M_s \quad (3.63)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadelerde kullanılan a , b ve c kısaltmaları aşağıda verilmiştir.

$$a = m_c + m_a + m_s + \frac{J_{ge}}{R_g^2} \quad (3.64)$$

$$b = m_a L_a + m_s L_s \quad (3.65)$$

$$c = m_a L_a^2 + m_s L_s^2 + J_{sp} \quad (3.66)$$

Sistem doğru akım servomotoru tarafından üretilen

$$M_{el} = K_t i_m \quad (3.67)$$

motor momenti ile tahrik edilmektedir. Motora uygulanan voltaj,

$$e_a(t) = L_m \frac{di_m}{dt} + R_m i_m + K_m \omega \quad (3.68)$$

motorun hareket denklemi,

$$M_{el} - M_{sist} = J_{ge} \dot{\omega} + B_m \omega \quad (3.69)$$

sistemden motor üzerine gelen moment yükü,

$$M_{sist} = R_g F \quad (3.70)$$

ve motor mili dönüş hızı

$$\omega = \dot{x} / R_g \quad (3.71)$$

olarak yazılabilir. (3.68)-(3.71) ifadeleri birlikte değerlendirilip araba üzerine etkiyen F dış kuvveti için çözümlerse,

$$F = \frac{1}{R_g} \left(-\frac{J_{ge}}{R_g} \ddot{x} - B_m \dot{x} + K_t i_m \right) \quad (3.72)$$

bulunur. Burada,

servomotora ait parametreler:

K_t : motorun tork sabiti, (N.m/A)

K_m : motorun endüksiyon sabiti, (N.m.s/rad)

L_m : motorun bobin endüktansı, (H)

R_m : motorun bobin iç direnci, (Ω)

B_m : motorun viskoz sönüm sabiti, (N.s/m)

i_m : motor bobinlerinden geçen akım, (A)

(14) denkleminde F değeri (3.62) denkleminde ve $M = Mb(t)$ (bozucu giriş) alınara (3.63) denkleminde yerlerine konulursa, (3.68) denklemi ile birlikte tüm sistemin davranış denklemlerini veren ifadeler elde edilmiş olur.

$$(bcos\theta)\ddot{x} + (c)\ddot{\theta} + (-bgsin\theta) = M_b(t) - M_s \quad (3.73)$$

$$a + \frac{J_{ge}}{R_g}\ddot{x} + (bcos\theta)\ddot{\theta} + \left(\frac{B_m}{R_g}\right)\dot{x} + (-bsin\theta)\dot{\theta}^2 = \left(\frac{K_t}{R_g}\right)i_m - F_s \quad (3.74)$$

$$\frac{di_m}{dt} = \left(\frac{-K_m}{L_m R_g}\right)\dot{x} + \left(\frac{-R_m}{L_m}\right)i_m + \left(\frac{1}{L_m}\right)e_a(t) \quad (3.75)$$

(3.73) ve (3.74) denklemleri sadeleştirilerek aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$a_{11}\ddot{x} + a_{12}\ddot{\theta} = R_{11} \quad (3.76)$$

$$a_{21}\ddot{x} + a_{22}\ddot{\theta} = R_{21} \quad (3.77)$$

Burada,

$$R_{11} = M_b(t) - M_s + bgsin\theta \quad (3.78)$$

$$R_{21} = \frac{K_t}{R_g}i_m - F_s + \frac{B_m}{R_g}\dot{x} + (bsin\theta)\dot{\theta}^2 \quad (3.79)$$

$$a_{11} = bcos\theta \quad a_{12} = c \quad (3.80)$$

$$a_{21} = a + J_{ge}/R_g \quad a_{22} = bcos\theta \quad (3.81)$$

Wronskian determinanı,

$$W = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} \quad (3.82)$$

olmak üzere, (3.76) ve (3.77) denklemleri \dot{x} ve $\dot{\theta}$ için çözülür ve durum değişkenleri

$$\begin{aligned} x_1 &= x & x_2 &= \dot{x} \\ x_3 &= \theta & x_4 &= \dot{\theta}; & x_5 &= \dot{i}_m \end{aligned} \quad (3.83)$$

alınarak denklemler yeniden düzenlenirse, kontrol edilecek olan sistemin durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir [34].

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.84)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \left(\frac{cB_m}{R_g W} \right) x_2 + \left(\frac{b^2 g}{W} \sin x_3 \cos x_3 \right) + \left(\frac{-bc \sin x_3}{W} \right) x_4^2 + \left(\frac{-cK_t}{R_g W} \right) x_5 \\ &+ \left(\frac{-bc \cos x_3}{W} \right) M_s + \frac{c}{W} F_s + \left(\frac{bc \cos x_3}{W} \right) M_b(t) \end{aligned} \quad (3.85)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3.86)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \left(\frac{-bB_m \cos x_3}{R_g W} \right) x_2 + \left(\frac{b^2 \sin x_3 \cos x_3}{W} \right) x_4^2 + \left(\frac{-abgR_g^2 - bgJ_{ge}}{R_g^2 W} \right) \sin x_3 \\ &+ \left(\frac{bK_t \cos x_3}{R_g W} \right) x_5 + \left(\frac{-bc \cos x_3}{W} \right) F_s + \left(\frac{aR_g^2 + J_{ge}}{R_g^2 W} \right) [M_s - M_b(t)] \end{aligned} \quad (3.87)$$

$$\dot{x}_5 = \left(\frac{-K_m}{L_m R_g} \right) x_2 + \left(\frac{-R_m}{L_m} \right) x_5 + \left(\frac{1}{L_m} \right) e_a(t) \quad (3.88)$$

Bu denklemler kontrol edilecek olan sistemin dinamiğini tanımlamakta olup, $e_a(t)$ sistemin kontrol girişi, $M_b(t)$ ise bozucu giriştir. Görüldüğü gibi, sistem, son derecede doğrusal olmayan, birbirine bağlı ve kararsız bir dinamik yapıya sahiptir. Uygun kontrol teknikleri ile bir tek kontrol girişi olan $e_a(t)$ değiştirilerek araba vasıtasıyla dolaylı olarak tahrik edilen sarkacın dengelenmesi ve kontrolü gerekmektedir. Hatta hem arabanın konum kontrolü hem de sarkacın dengelenmesi aynı anda söz konusu olduğunda böyle bir sistemin kontrolünün daha da güç olacağı kolayca tahmin edilebilir [34]. Sistemin, Bölüm 3.1'deki gibi endüktans ihmal edilerek 4. mertebeden matematiksel modeli elde edilmiş ve eşdeğer sinyal isteyen kontrol tekniklerinde bu modelden yararlanılmıştır.

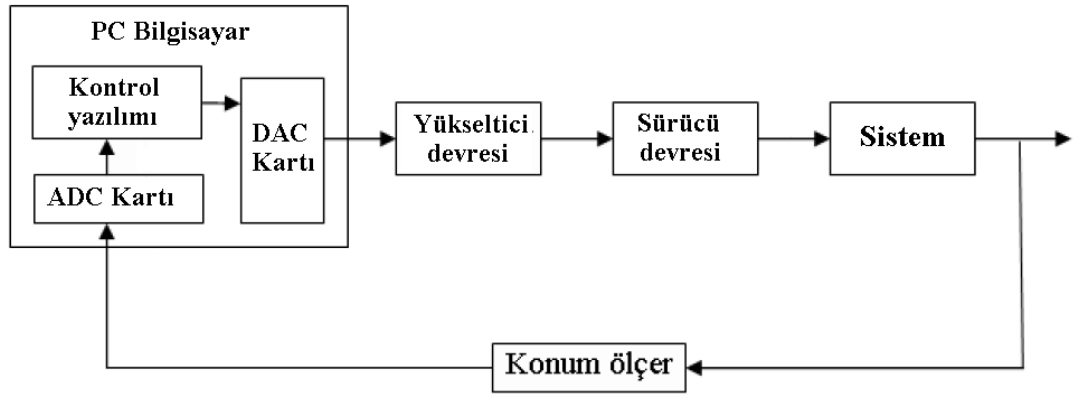
Sistemin parametreleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Bu parametreler çeşitli yöntemlerle deneysel olarak elde edilmiştir [34].

Tablo 3.3. Arabalı Ters Sarkacın Parametreleri

| | |
|-------------|-------------|
| $K_e = K_t$ | 0.141 |
| R_m | 3 |
| m_c | 1.222 |
| B_{te} | 28.60020352 |
| L_m | 0.01596 |
| R_g | 0.027 |
| M_s | 0.000776 |
| J_{ge} | 1.4462e-4 |
| J_{sp} | 0.011771446 |
| l_s | 0.22 |
| B_m | 0.03 |
| m_s | 0.2142 |

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Simülasyon çalışmaları Delphi 7 programlama dili ve Matlab'de yapılmıştır. Sistemin diferansiyel denklemleri çözülmüş, sistemin kontrollü cevap şekilleri elde edilmiştir. Şekil 4.2. de simülasyon gerçekleştirilirken kullanılan delphi arayüzü yer almaktadır.



Şekil 4.1. Bilgisayar Kontrollü Sistemlerin Blok Diyagramı

Deney düzeneği kontrol sinyalini üreten bir bilgisayar ve yazılım, veri iletişimini sağlayan veri toplama kartı (data acquisition card), Voltaj ve güç yükseltici (servo yükseltici) devre ve sarkacın açılış bilgisini ve arabanın konum bilgisini geri besleme olanağı sağlayan potansiyometrik açısal konum ölçerlerden oluşur(Şekil 4.1.). Bilgisayarın özellikleri: Intel Pentium 3, 500Mhz ve 64MB Sdram, veri toplama kartının özellikleri: Advantech PCL-818HG, 16 analog giriş, bir analog çıkış, 100000 okuma/saniye, 12 bitlik çözünürlük, ∓ 1 bit hassasiyet sarkaçların açılışını ölçen direnç tipi potansiyometrenin özellikleri: Gefran, Lin. ∓ 0.05 , 4.7ohm, 340° , arabanın konumunu ölçen direnç tipi potansiyometre: 20kohm, Lin. ∓ 5 ve güç kaynaklarının özellikleri: 2 adet Yıldırım CY-306, 30 Volt, 6 Amper Ayarlı Güç Kaynağı olarak sıralanabilir

Bilgisayar yardımıyla üretilen kontrol sinyali veri toplama kartının analog çıkış kanalı aracılığıyla analog sinyale dönüştürülür. Veri toplama kartının analog çıkış aralığı 0-5Volt aralığındadır ve analog çıkış fark alıcı devreyle ∓ 2.5 voltaja

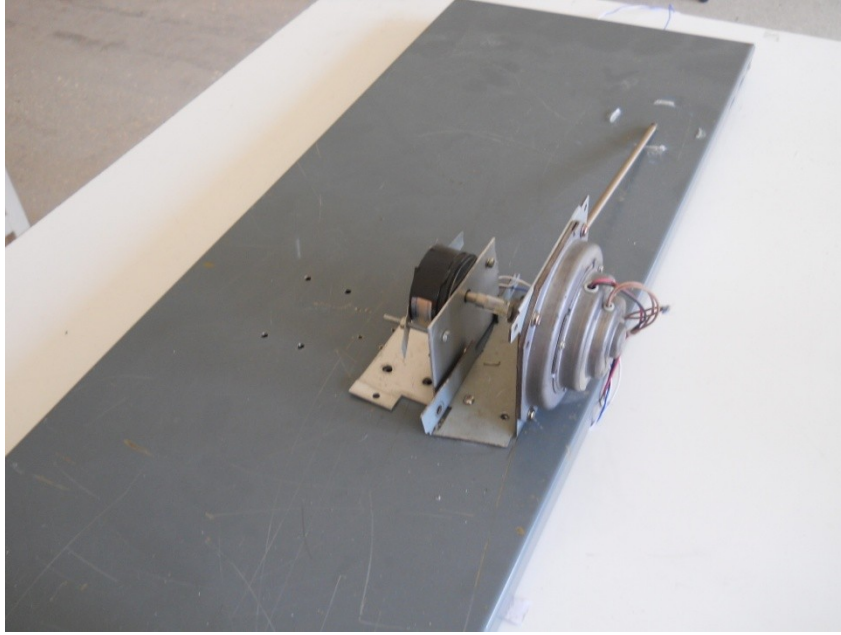
dönüştürülür. Voltaj yükseltici devreden geçer ve ± 20.5 Volt aralığında akıllı sinyal elde edilir. Kontrol sinyali, sistemlere iletilmeden önce güç yükseltme işleminden geçer. Basit ters sarkaç sistemi ve ters sarkacın açılı bilgisi potansiyometre ile geri beslenir. Potansiyometre ± 5 Volt ile beslenmiştir ve toplamda 340° 'lik açığa tekabül etmektedir. Arabanın konumunu belirleyen potansiyometre 10 turludur ve ± 5 Volt ile beslenmiştir. Açılı bilgisi veri toplama kartının analog girişine iletilir ve dijital sinyale dönüşür. Kontrol yazılımına girdiğimiz referans değeri ve geri beslemeden gelen açılı bilgisi kullanılarak kontrol algoritmaları ile kontrol sinyali üretilerek sistemin kontrolü gerçekleştirilmiş olur.

Kontrol yazılımı Delphi görsel programlama dili ile yazılmış olup programın arayüzü şekil 4.2'de verilmiştir. Yazılımda ölçüm sayısı, kayıt özellikleri, kontrol türleri ve parametreleri, referans girişler ve parametreleri gibi verileri kolay değiştirerek deneyleri yineleme basit hale gelmiştir. Böylelikle deney düzeneği için uygun parametreler kolay ve hızlı olarak belirlenir.

Şekil 4.2. Delphi 7 Simülasyon Ve Deneysel Kontrol Arayüzü



Şekil 4.3. Arabalı Ters Sarkaç Sistemi [34]



Şekil 4.4. Basit Ters Sarkaç Sistemi

Arabalı ters sarkaç deney düzeneği Şekil 4.3' te ve basit ters sarkacın deney düzeneği Şekil 4.4' te verilmiştir.

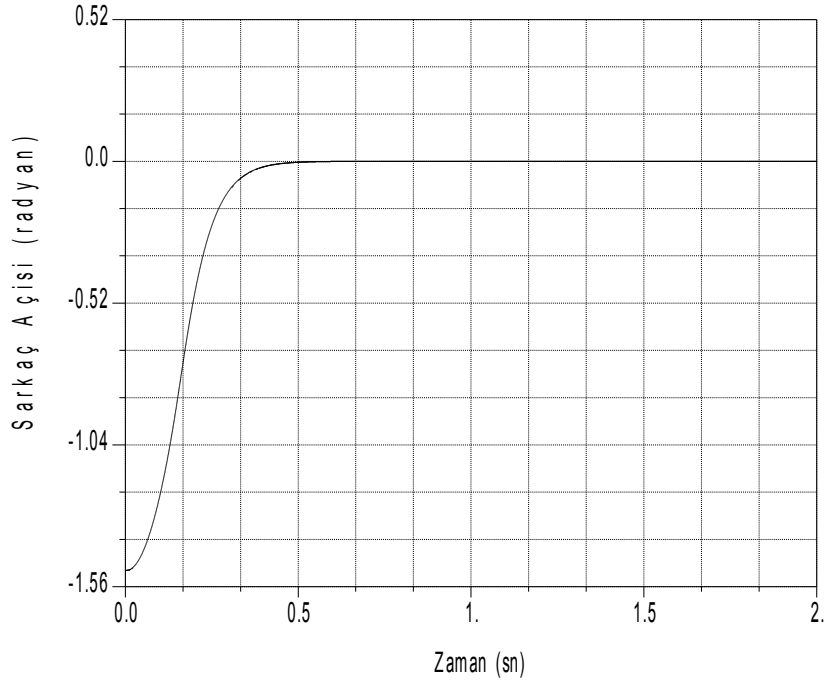
4.1. Basit Ters Sarkacın Kontrolü

Bu bölümde basit ters sarkaca teorik ve deneysel olarak uygulanan çeşitli kontrol türlerinin grafikleri başlıklar halinde verilmiş ve bu sistem için değerlendirme yapılmıştır.

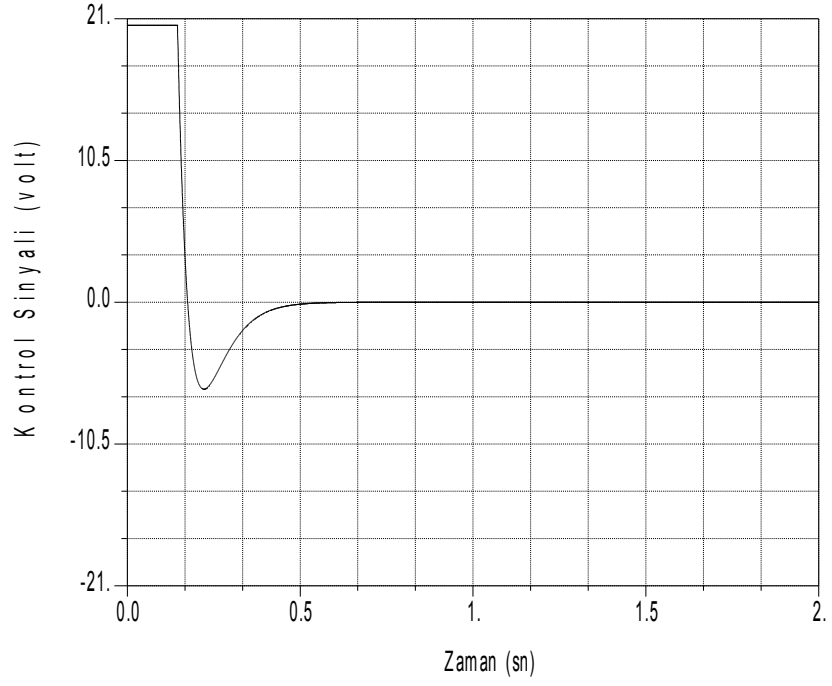
4.1.1. PID Kontrol

PID kontrol simülasyon çalışmasında sistemin doğrusal olmayan modeli (Denklem 3.7) kullanılmıştır. Başlangıç olarak klasik bir kontrol tekniği olan PID kontrol tekniği sisteme uygulanmıştır. Denklem 2.1.'deki PID kontrol yapısı kullanılmıştır.

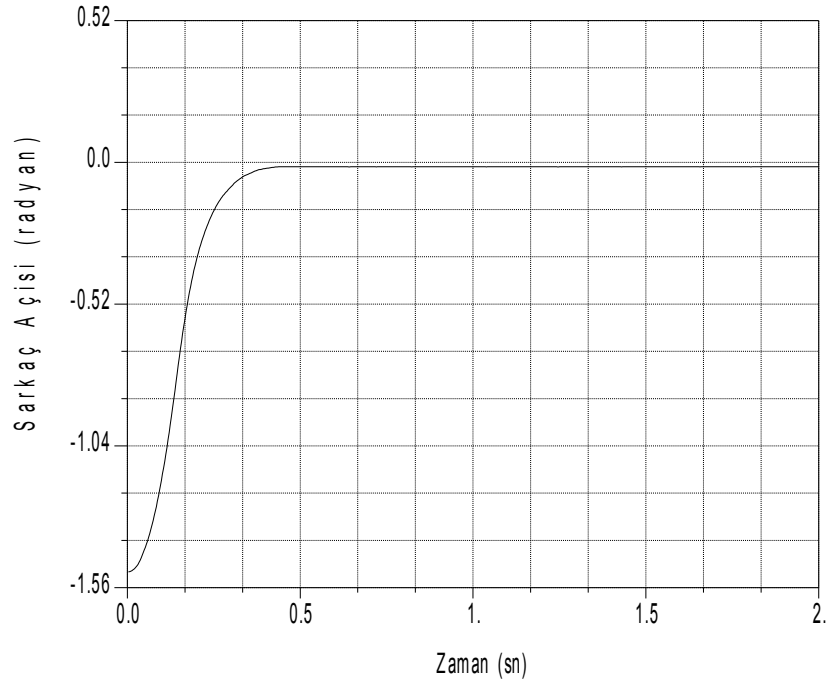
PID kontrol için kontrol katsayıları $K_p=9.5$, $K_i=0.00025$ ve $K_D=0.0842$ olarak belirlenmiş, verilen kontrol katsayılar ile simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir.



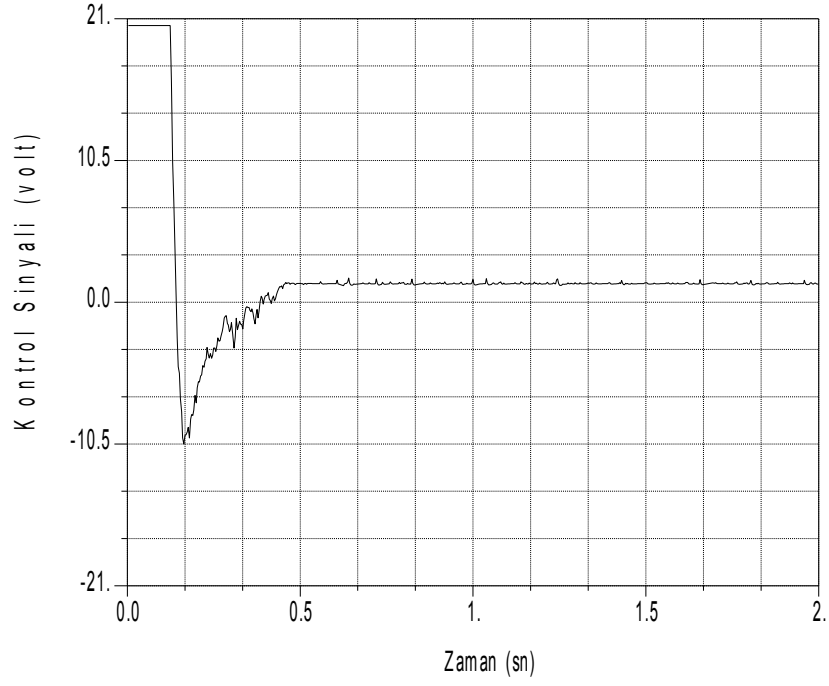
Şekil 4.5. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı(Simülasyon) (PID, P:9.5, I :0.00025, D:0.0842)



Şekil 4.6. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabının Kontrol Sinyali (Simülasyon) (PID, P:9.5, I:0.00025, D:0.0842)



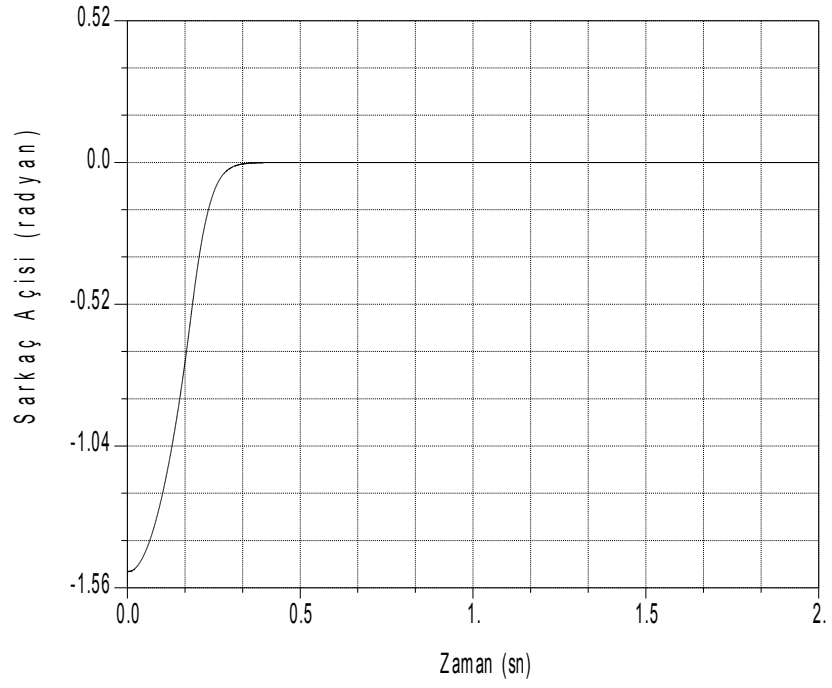
Şekil 4.7. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (PID, P:9.5, I :0.00025, D:0.0842)



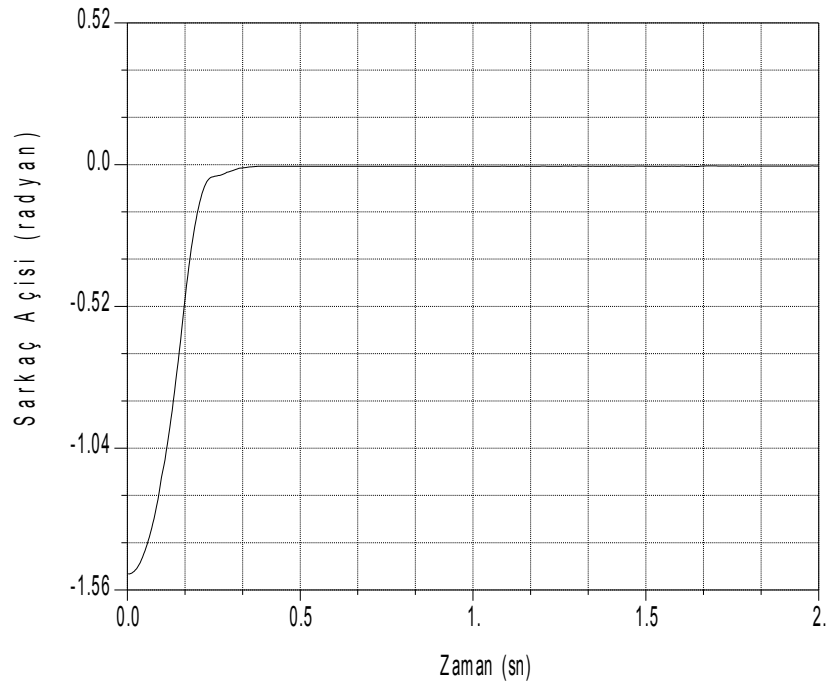
Şekil 4.8. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabının Kontrol Sinyali (Deneysel)
(PID, P:9.5, I :0.00025, D:0.0842)

4.1.2. Kayan Kipli Kontrol

Sistemin kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için, Denklem 3.25'teki kayan yüzey seçilmiş ve sisteme sadece $u = u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. Kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 18.31$ ve $\delta = 1.79$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.

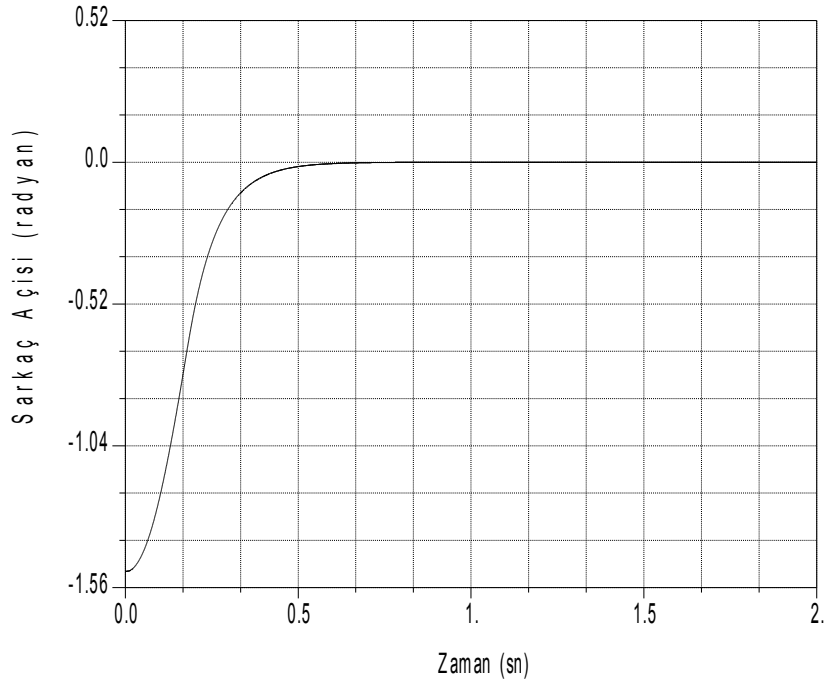


Şekil 4.9. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:18.31$ ve $\delta:1.79$)

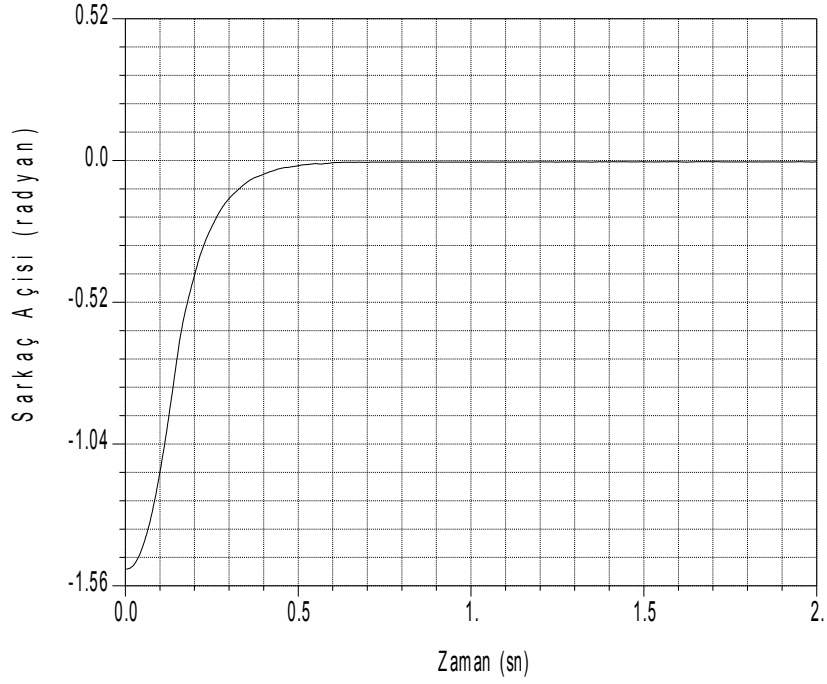


Şekil 4.10. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:18.31$ ve $\delta:1.79$)

Sistemin kayan kipli kontrolünü eşdeğer sinyal ile uygulamak için Denklem 3.25'teki kayan yüzey seçilmiş ve sisteme $u = u_{eq} + u_{sw}$ toplam kontrol sinyali uygulanmıştır. Kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 11.81$ ve $\delta = 1.28$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



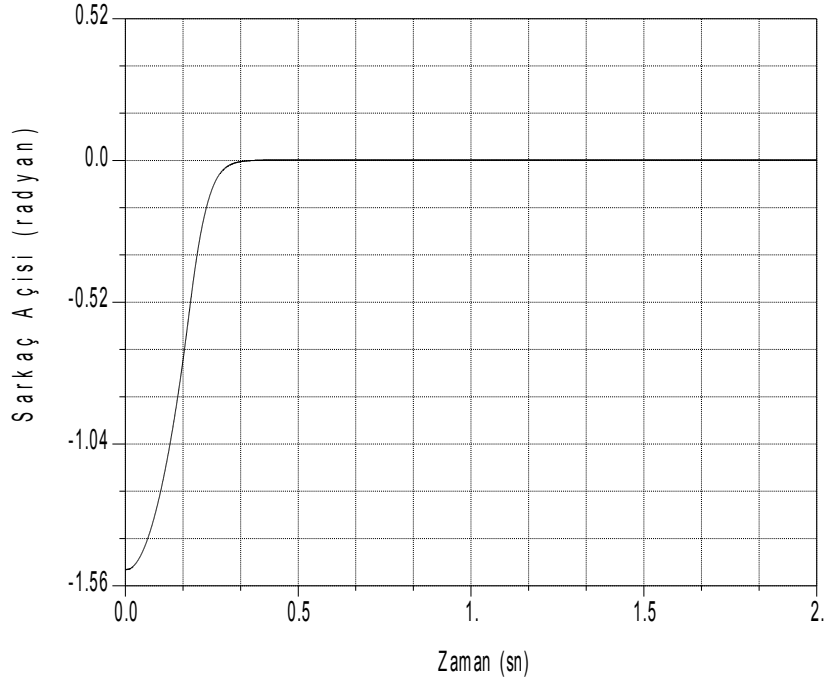
Şekil 4.11. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:11.81$ ve $\delta:1.28$)



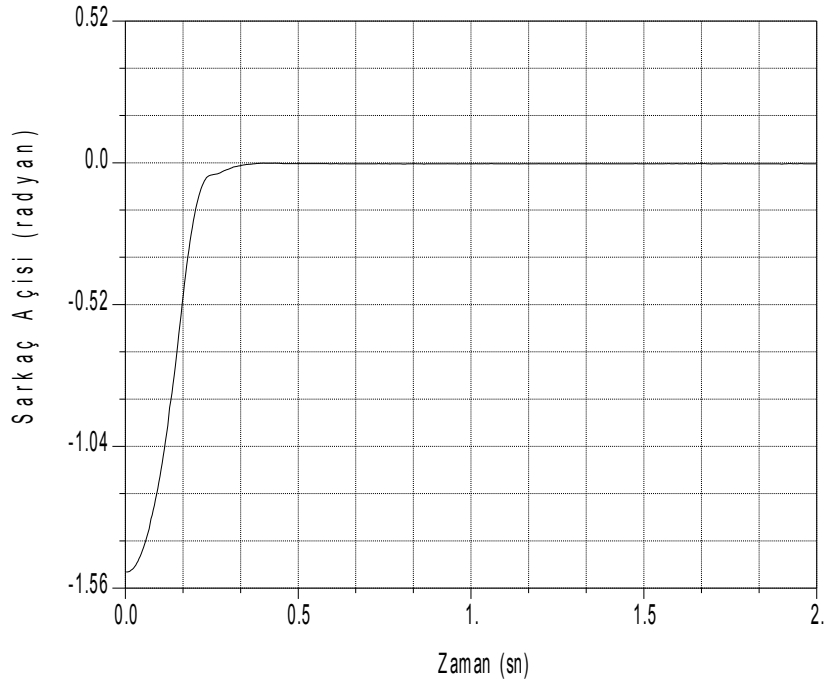
Şekil 4.12. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:11.81$ ve $\delta:1.28$)

4.1.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol

Sistemin integral kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek Denklem 3.31'deki integral kayan yüzey seçilmiş ve sisteme sadece $u = u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. İntegral kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 18.31$, $k_i = 0.1$ ve $\delta = 1.79$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.

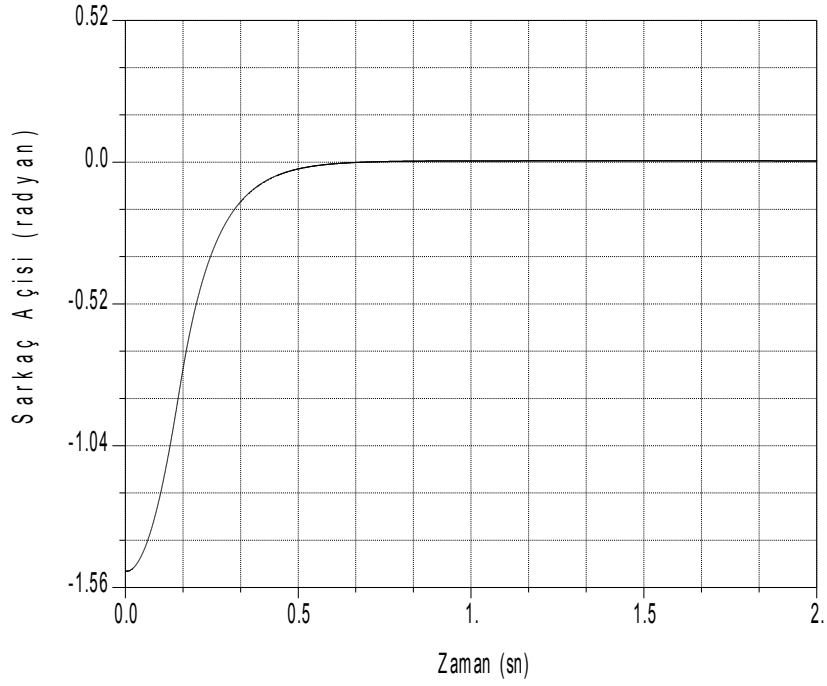


Şekil 4.13. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:18.31$, $k_i:0.1$ ve $\delta:1.79$)

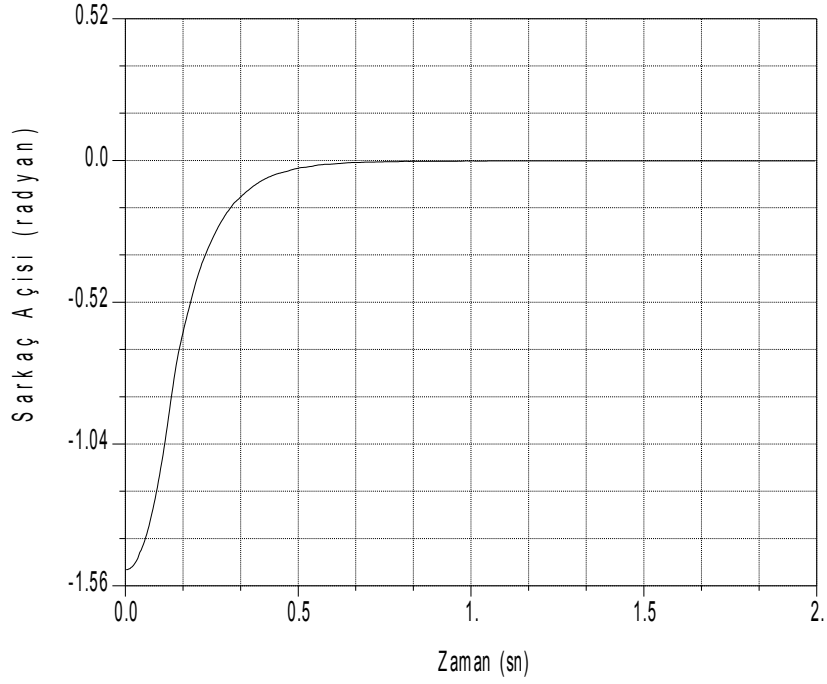


Şekil 4.14. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:18.31$, $k_i:0.1$ ve $\delta:1.79$)

Sistemin integral kayan kipli kontrolünü eşdeğer sinyal ile uygulamak için Denklem 3.31'deki integral kayan yüzey seçilmiş ve sisteme $u = u_{eq} + u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. İntegral kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 9.81$, $k_i = 0.16$ ve $\delta = 1.14$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



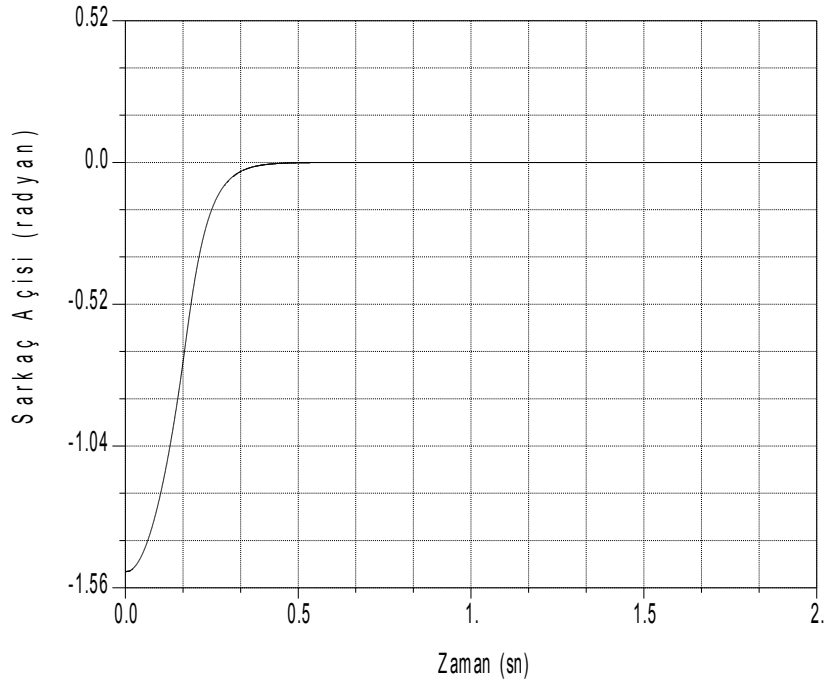
Şekil 4.15. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:9.81$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.14$)



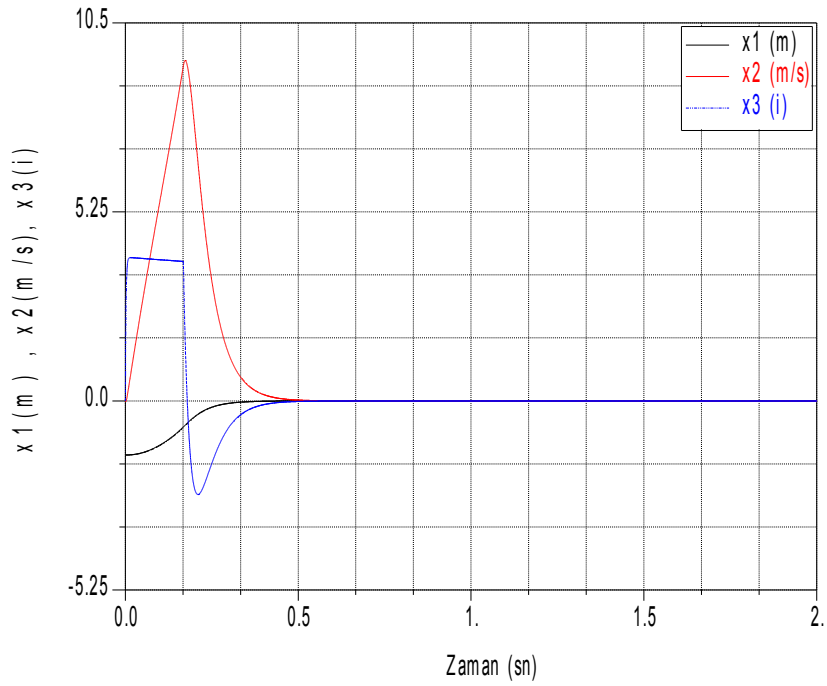
Şekil 4.16. Sarkaç açısının basamak referansa cevabı (Deneysel) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:9.81$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.14$)

4.1.4. Gözlemleyici ile Kayan Kipli Kontrol

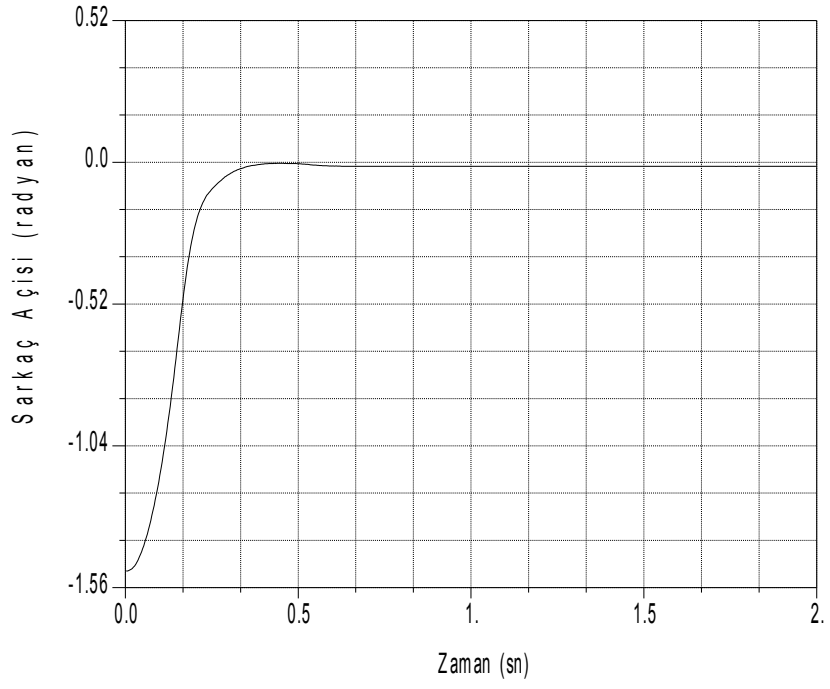
Sistemin gözlemleyici ile kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 3.14 'teki yüzey seçilmiş ve denklem 3.13'teki katsayılar kullanılmıştır. Gözlemleyici kazancı $L=[250 \ 8000 \ 1000]$ olarak seçilmiştir. Kayan kipli kontrol için $\delta = 1.14$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



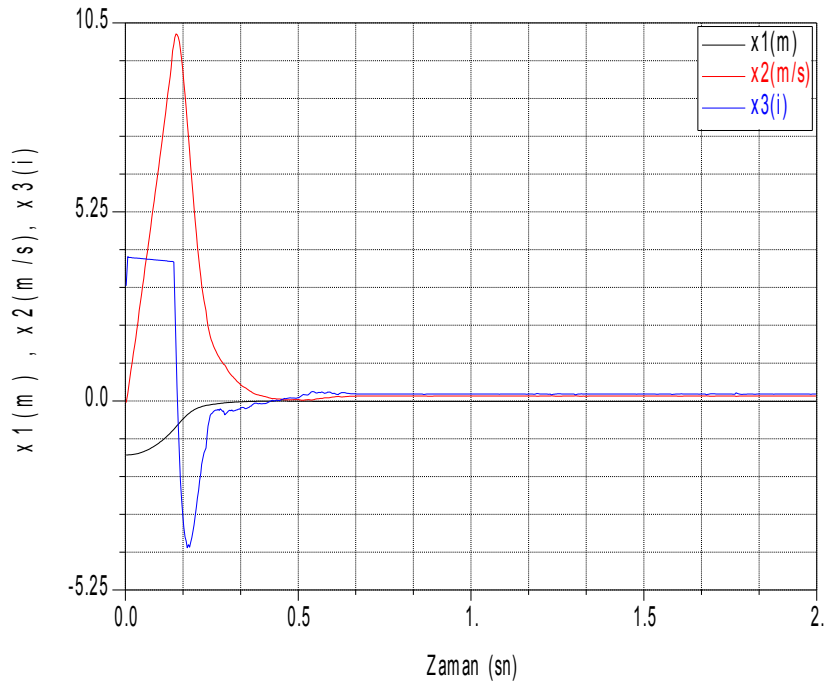
Şekil 4.17. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)



Şekil 4.18. Durum Değişkenleri (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)



Şekil 4.19. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$, $\delta:1.14$)



Şekil 4.20. Durum Değişkenleri (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C_D = [0.3177 \ 0.0210 \ 0.0099]$ ve $\delta:1.14$)

4.1.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Basit ters sarkaç tek giriş-tek çıkışlı bir sistem olup doğrusal olmayan bir sistemdir. Basit ters sarkaçın parametreleri çeşitli yöntemlerle deneysel olarak ölçülmüş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Bkz. EK-1). Kayan kipli kontrol tekniklerinin performans deneyleri yapılmıştır (Şekil 4.9-4.20). Karşılaştırma için PID kontrol de sisteme uygulanmıştır (Şekil 4.5-4.8). Kontrolcülerin kazançları deneysel uygulamalarda belirlenmiş aşma olmaksızın sistemin yerleşme zamanını küçük tutacak katsayılar seçilmiştir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen sistem parametreleri ile kök yerleştirme yapılmış ve sistem hem simülasyonda hem de deneylerde aynı kontrol kazançları ile kontrol edilmiştir.

Tablo 4.1. Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu

| Kontrolcü | Aşma (%) | Yerleşme Zamanı (sn) | Kalıcı Hata (Radyan) |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| PID | 0.0 | 0.44 | 0.015 |
| SMC Anahtarlama | 0.0 | 0.4 | 0.006 |
| SMC Toplam Sinyal | 0.0 | 0.5 | 0.005 |
| ISMC Anahtarlama | 0.0 | 0.4 | 0.004 |
| ISMC Toplam Sinyal | 0.0 | 0.6 | 0.002 |
| SMC Gözlemleyici | 0.0 | 0.4 | 0.015 |

Deneysel sonuçların ışığında kayan kipli kontrol'ün PID kontrole göre performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kayan kipli kontrol'ün sadece anahtarlama fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlarda, yüzeyin sistemin yaklaşık modeline göre seçilmiş olmasına rağmen, ulaşma zamanının ve kalıcı hatanın PID kontrol'e nazaran daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 4.1).. Yüzeye hatanın integralinin eklenmesi ile sistemin kalıcı hatasının azaldığı gözlemlenmiştir. Sistemin yaklaşık modeline göre oluşturulan bu yüzeylerde,

kontrole eşdeğer sinyalin katılmasının sistemin yerleşme zamanını artırdığı gözlemlenmiştir.

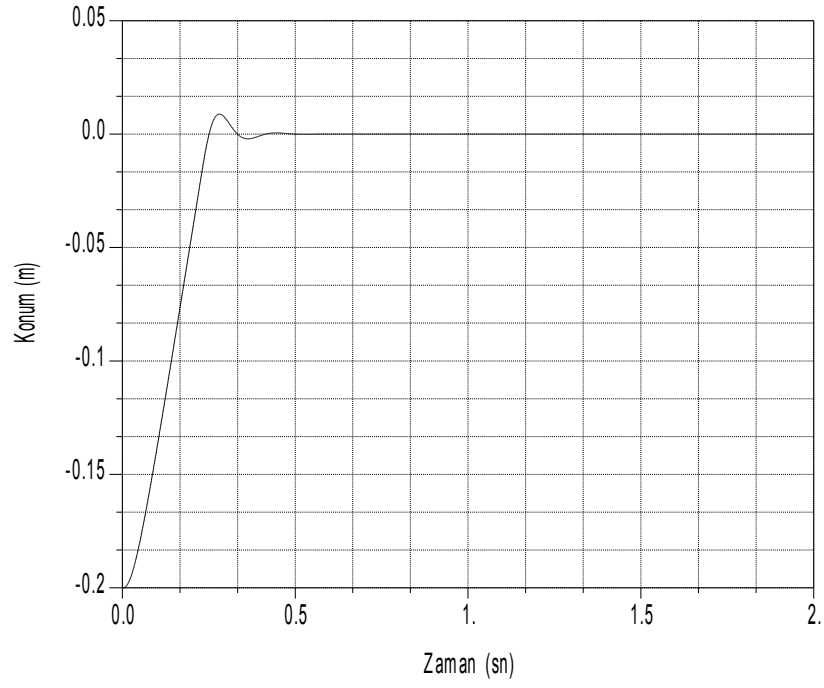
Kök yerleştirme ile elde edilen kazançlarla kayan kipli kontrol uygulanabilmesi için sistemin tüm durum değişkenlerinin ölçülüyor olması gerekmektedir. Ancak sistemde yalnızca sarkaç açısal konum bilgisi geribeslenmektedir ve hatanın dinamiğinden oluşan daha önceki yüzeylerde açısal konumun sayısal türevi alınarak hatanın türevleri elde edilmişti. Tüm durum değişkenlerinin deneysel ortamda kestirim ile elde edilebilmesi için tam mertebe Luenberg gözlemleyici tasarlanmıştır. Basit ters sarkaçta modellenmeyen dinamiklerin, belirsiz doğrusallığı bozan durumların ve bozucu etkilerin az oluşu gözlemleyicinin başarısını artırmıştır. Kök yerleştirme ile yapılan kontrolde hem anahtarlama hem de eşdeğer sinyal kullanılmış ve kontrolün iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

4.2. DC Motor Tahrikli Araba Sisteminin Kontrolü

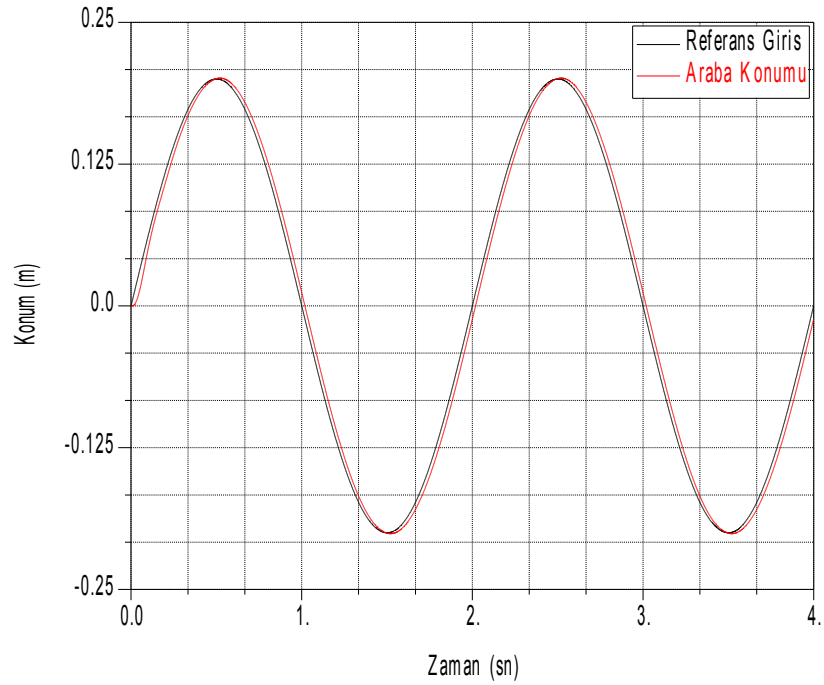
Bu bölümde DC Motor Tahrikli Araba Sistemine teorik ve deneysel olarak uygulanan çeşitli kontrol türlerinin grafikleri başlıklar halinde verilmiş ve bu sistem için değerlendirme yapılmıştır.

4.2.1. PID Kontrol

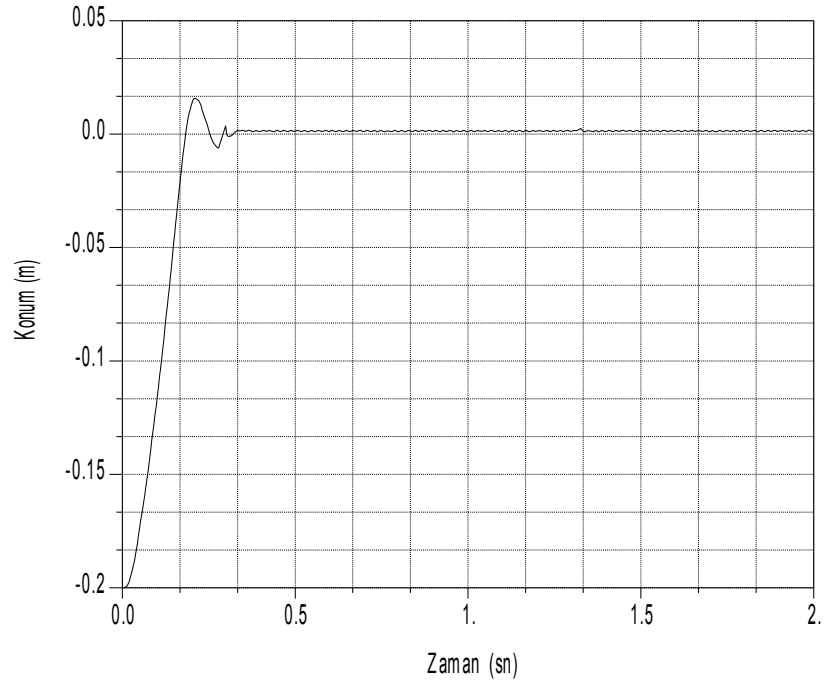
Sistemin PID kontrolü için kontrol katsayıları $K_p = 133$, $K_i = 7.51 \times 10^{-5}$ ve $K_D = 0.0067$ olarak belirlenmiş, simülasyon sonuçları aşağıda verilmiştir. Sinüs referanslarda alınan genlik değere 0.2m ve frekans 0.5h olarak seçilmiştir.



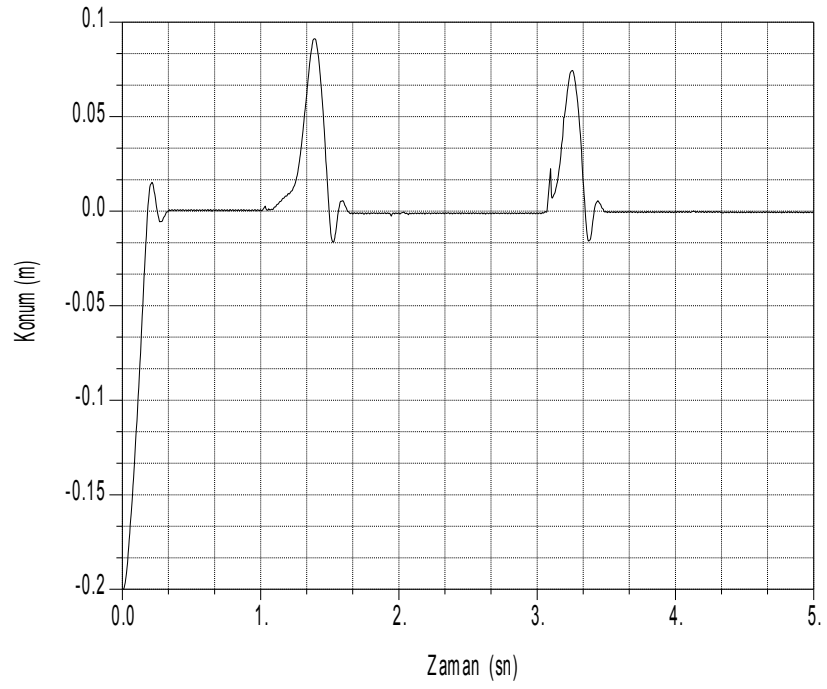
Şekil 4.21. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (PID, P:133, I :0.0000751, D:0.0067)



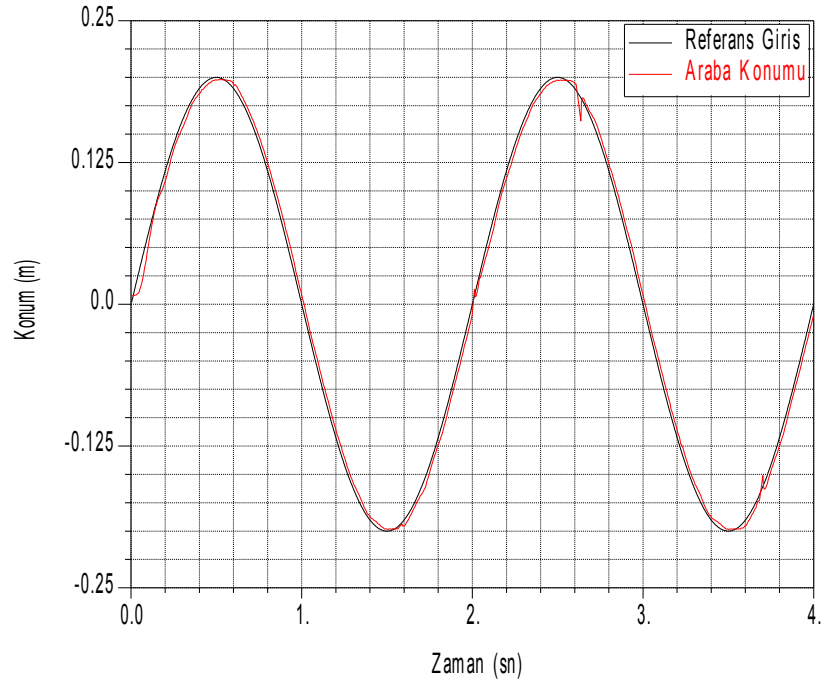
Şekil 4.22. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)



Şekil 4.23. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)



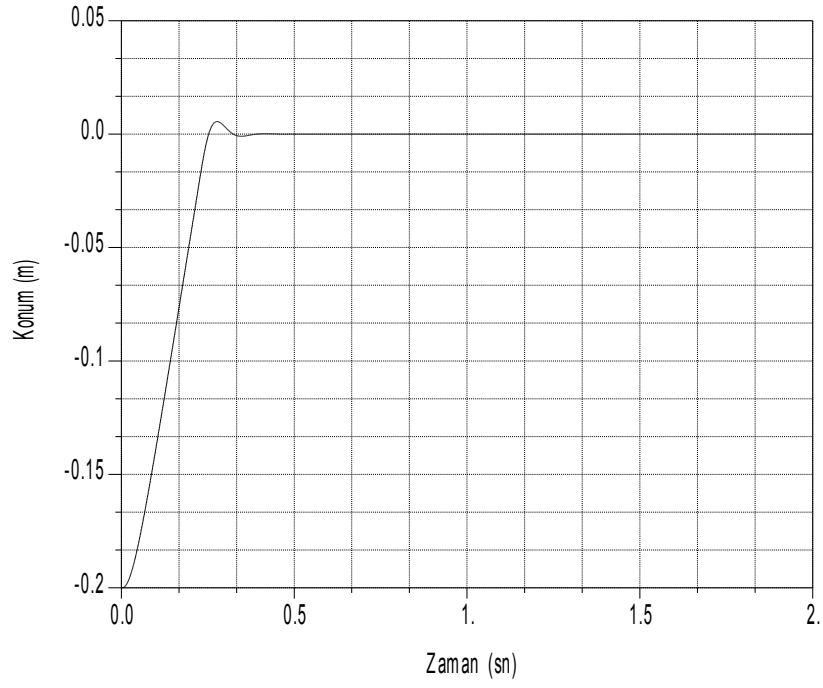
Şekil 4.24. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)



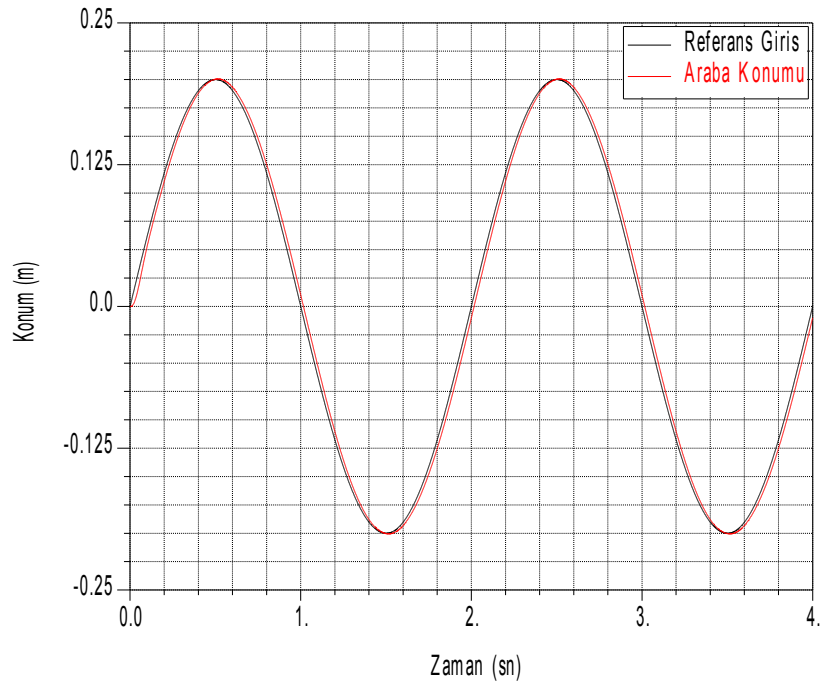
Şekil 4.25. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (PID, P:133, I:0.0000751, D:0.0067)

4.2.2. Kayan Kipli Kontrol

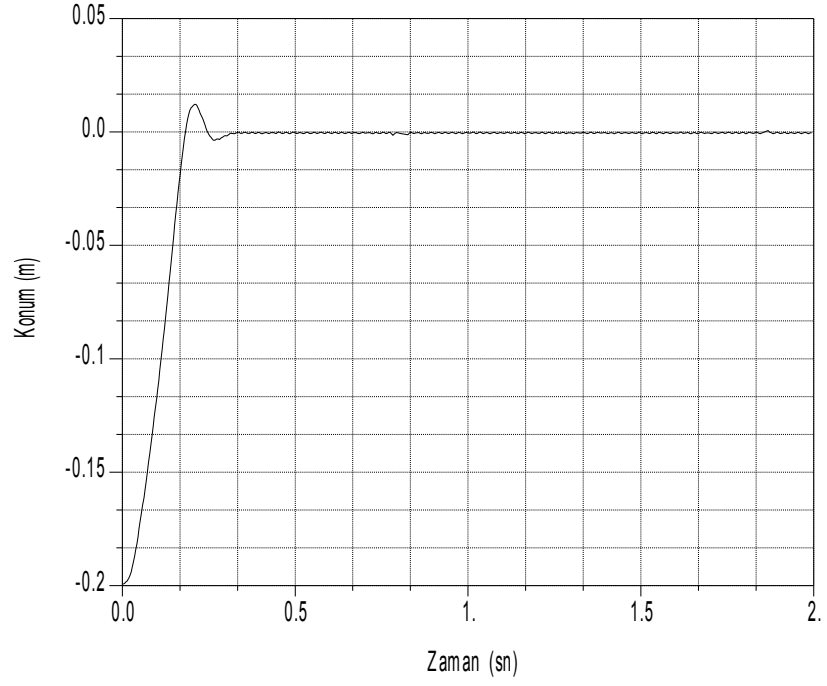
Sistemin kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 3.25'teki kayan yüzey seçilmiş ve sisteme sadece $u = u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. Kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 88$ ve $\delta = 1.1$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



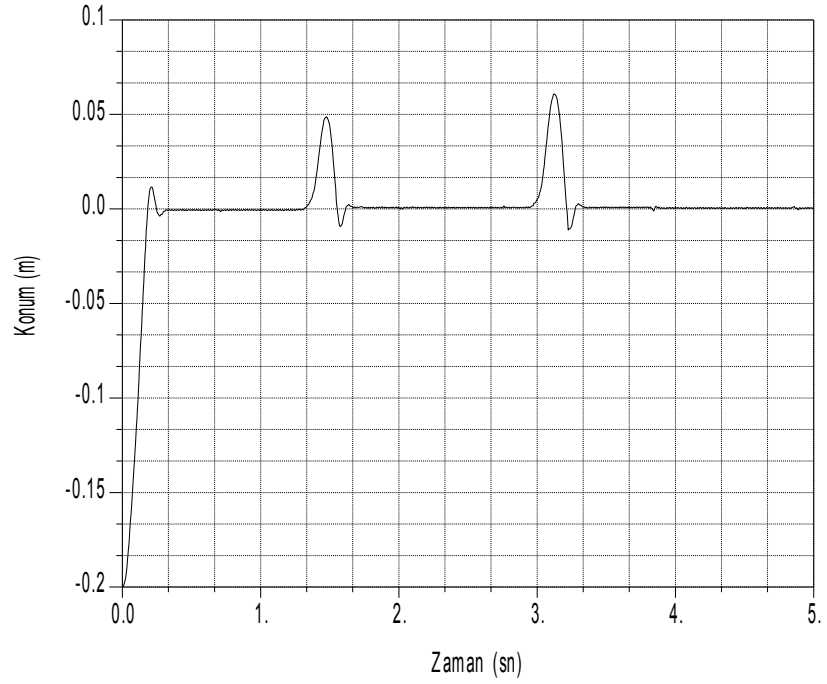
Şekil 4.26. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)



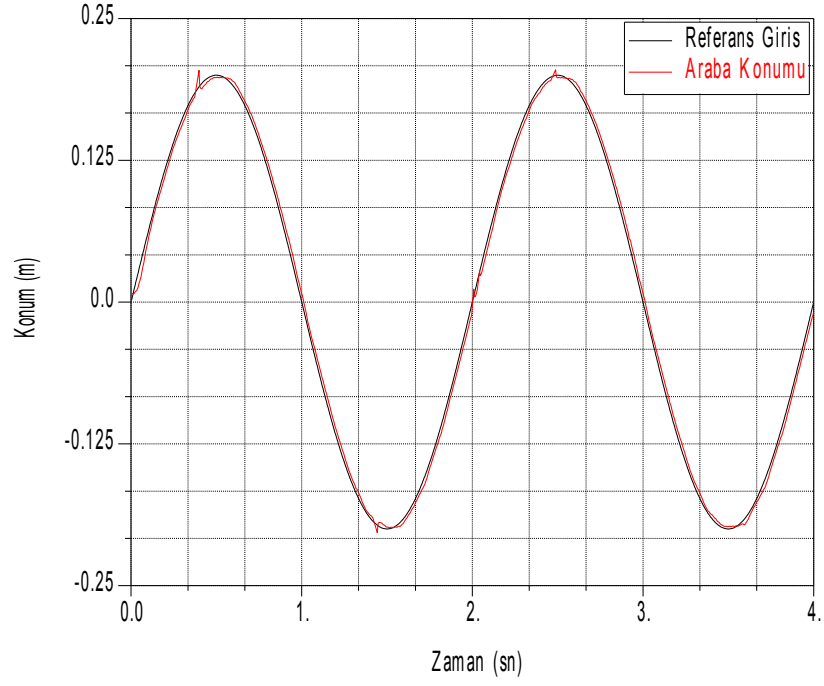
Şekil 4.27. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)



Şekil 4.28. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)

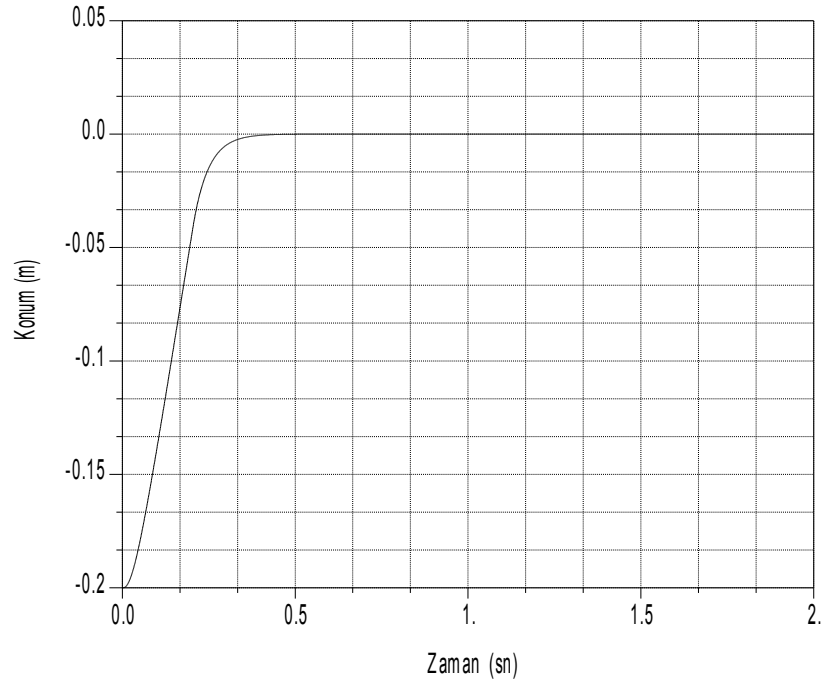


Şekil 4.29. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)

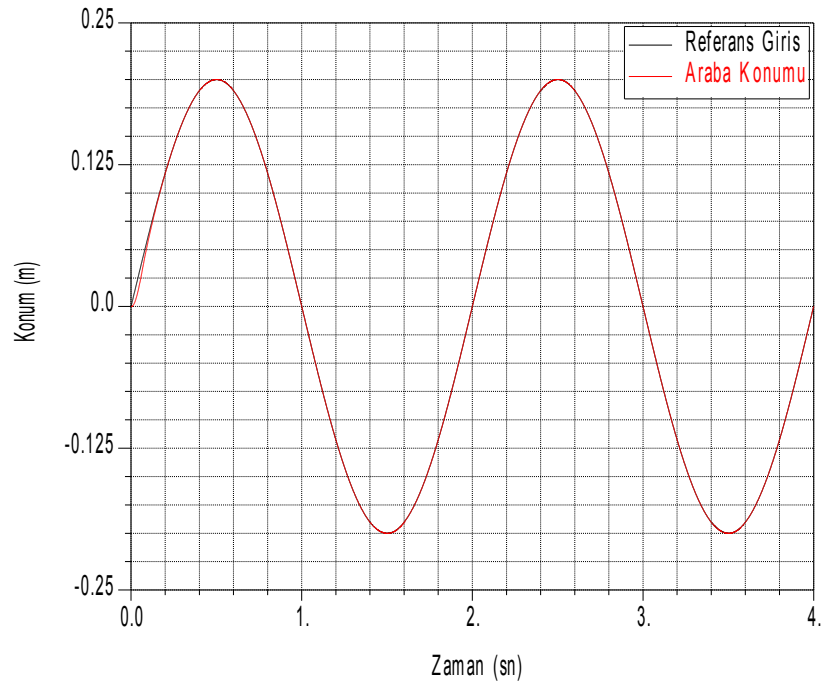


Şekil 4.30. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)

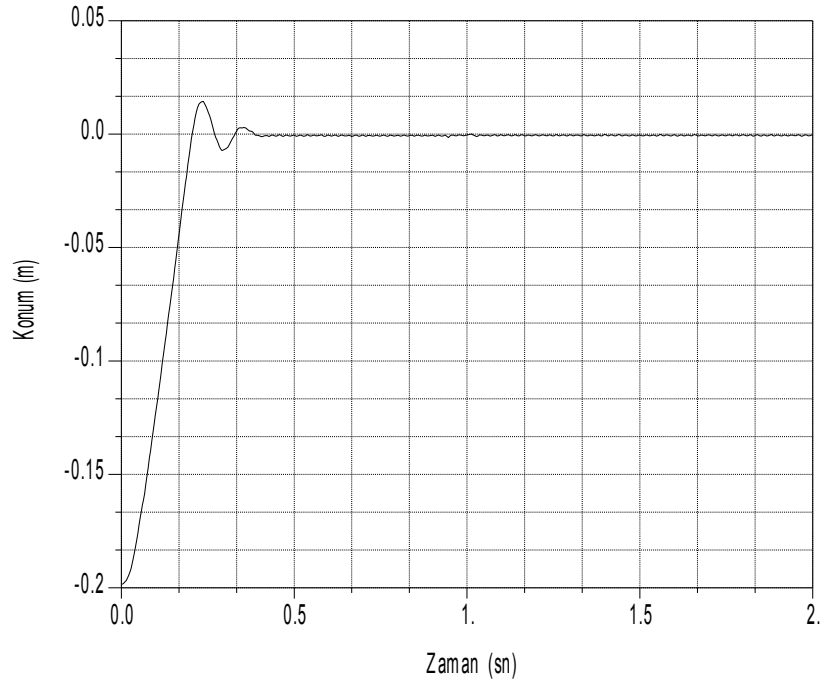
Sistemin kayan kipli kontrolünü eşdeğer sinyal ile uygulamak için Denklem 3.25'teki kayan yüzey seçilmiş ve sisteme $u = u_{eq} + u_{sw}$ toplam kontrol sinyali uygulanmıştır. Kayan kipli kontrol katsayıları simülasyonda $\lambda = 22$ ve $\delta = 0.1$, deneyde $\lambda = 88$ ve $\delta = 1.1$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



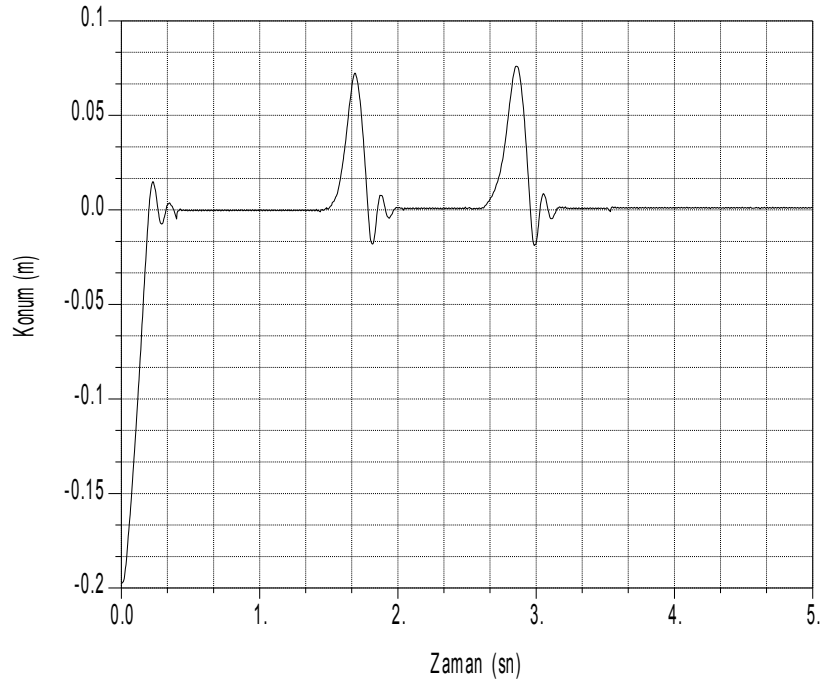
Şekil 4.31. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:22$ ve $\delta:0.1$)



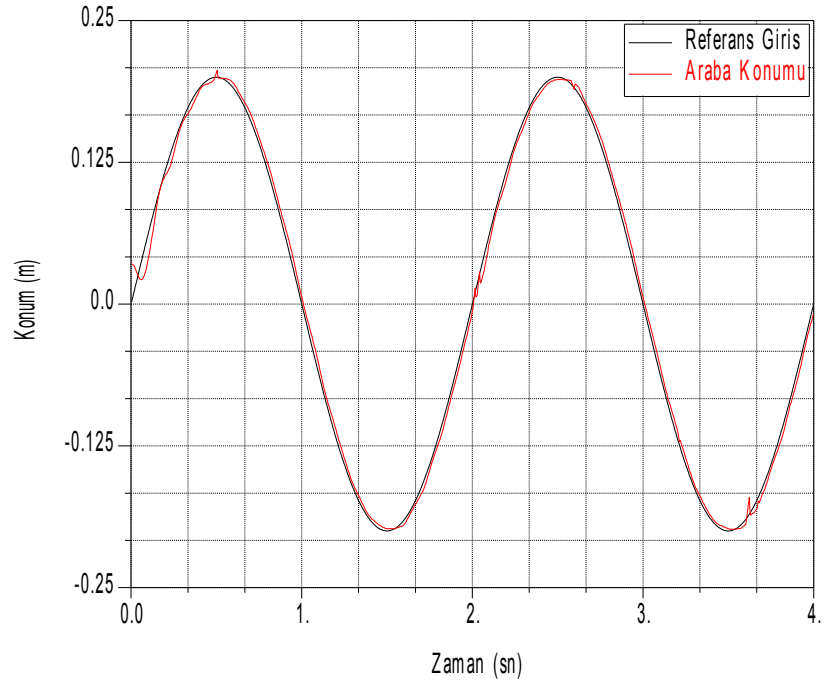
Şekil 4.32. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:22$ ve $\delta:0.1$)



Şekil 4.33. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)



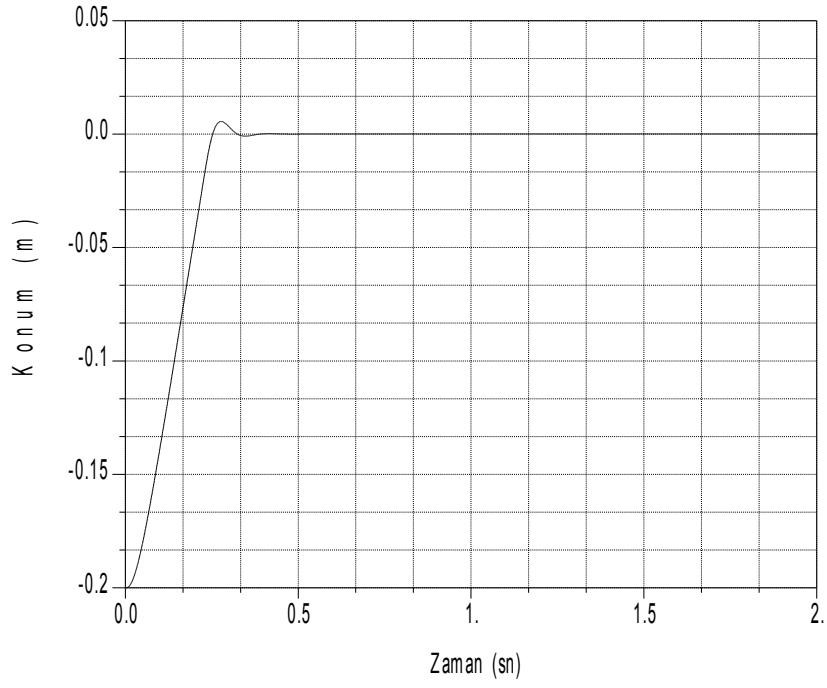
Şekil 4.34. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)



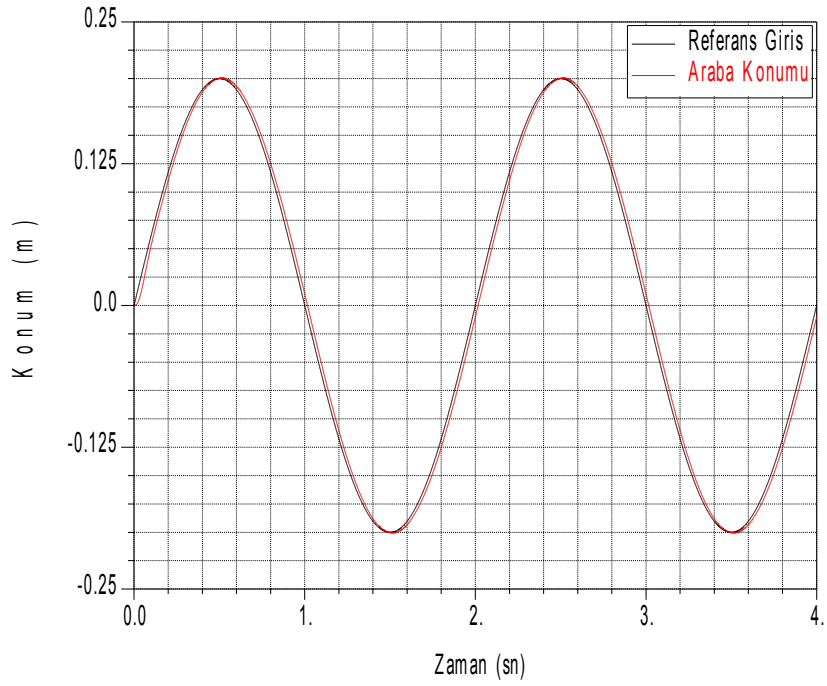
Şekil 4.35. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$ ve $\delta:1.1$)

4.2.3. İntegral Kayan Kipli Kontrol

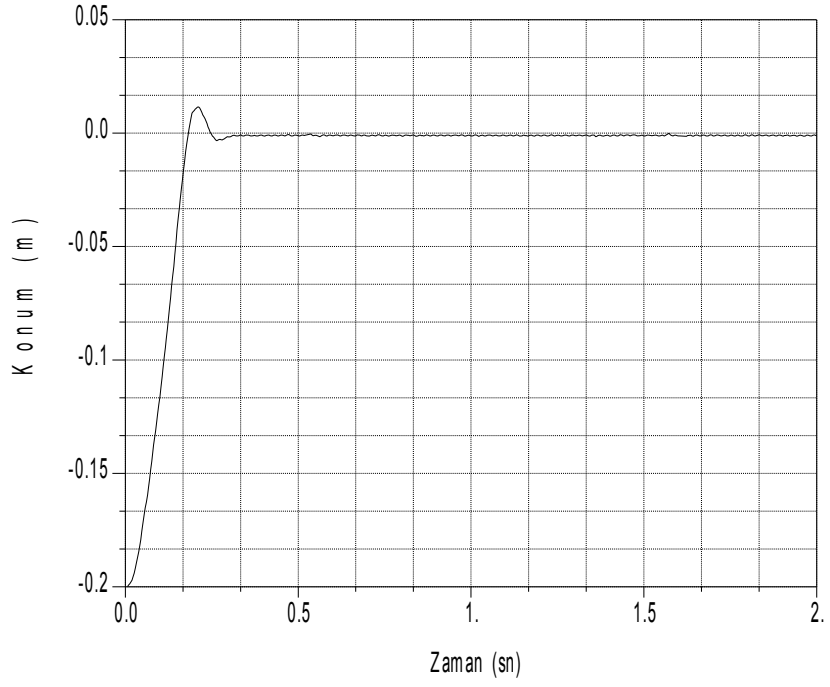
Sistemin integral kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 3.31'deki integral kayan yüzey seçilmiş ve sisteme sadece $u = u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. İntegral kayan kipli kontrol katsayıları $\lambda = 88$, $k_i = 0.16$ ve $\delta = 1.1$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



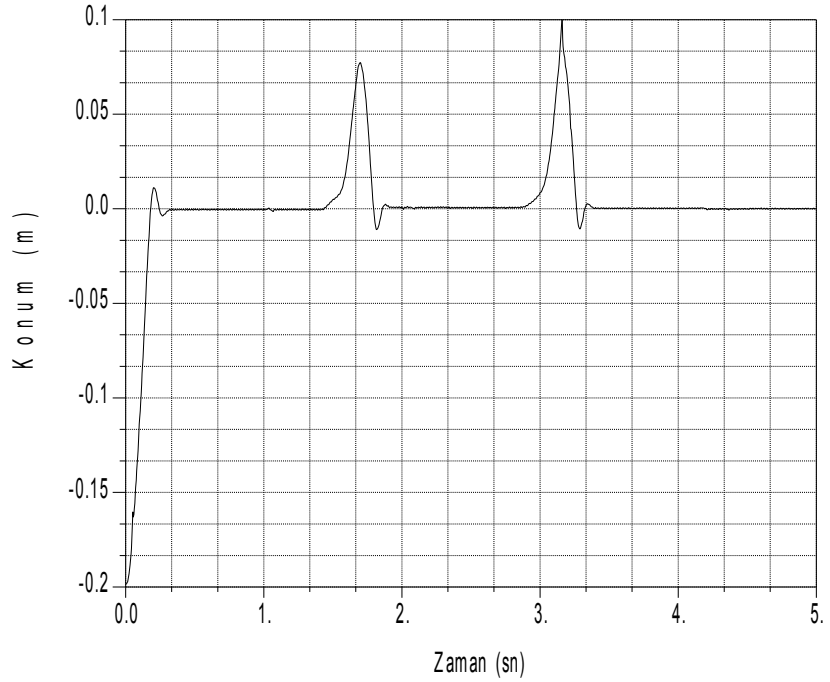
Şekil 4.36. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)



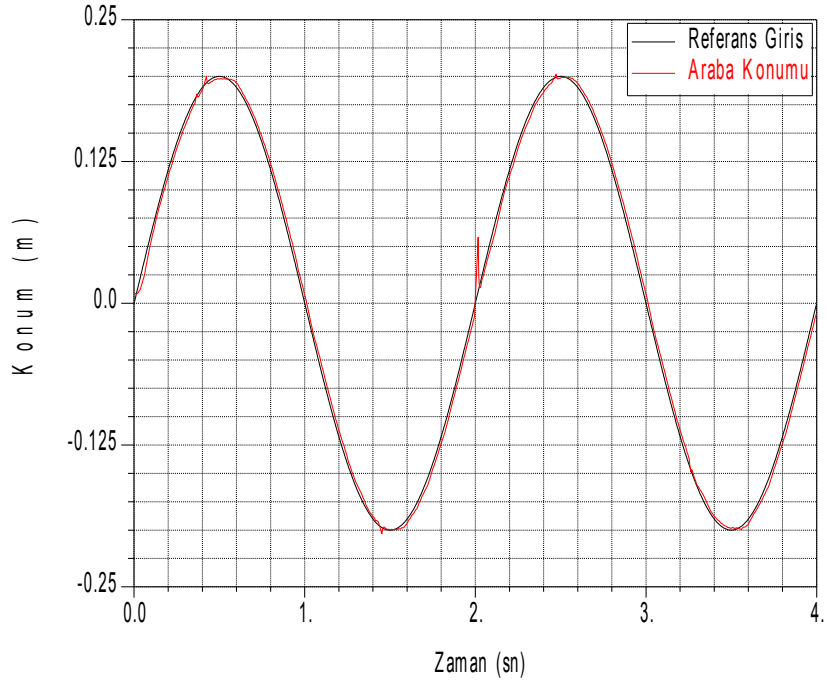
Şekil 4.37. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)



Şekil 4.38. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)

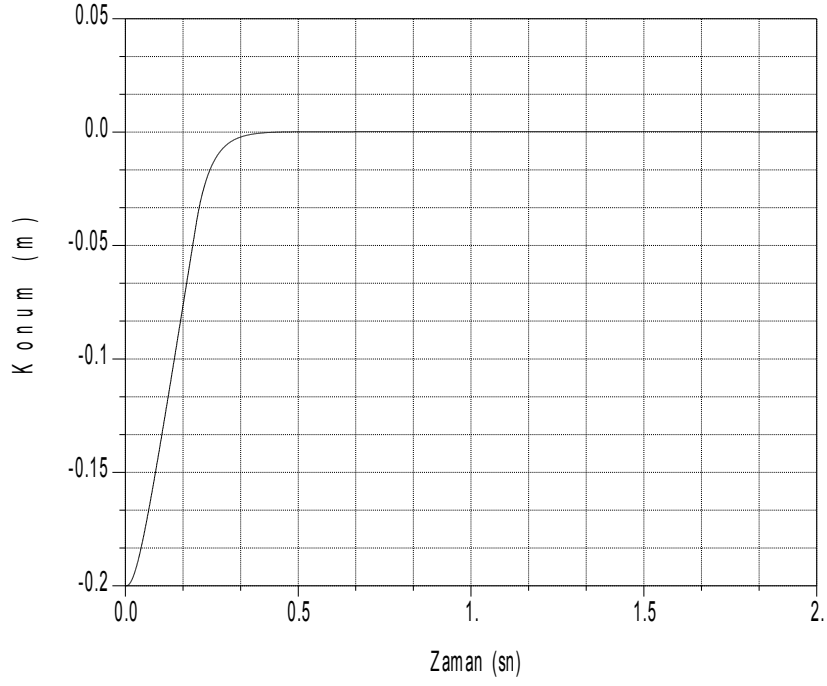


Şekil 4.39. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)

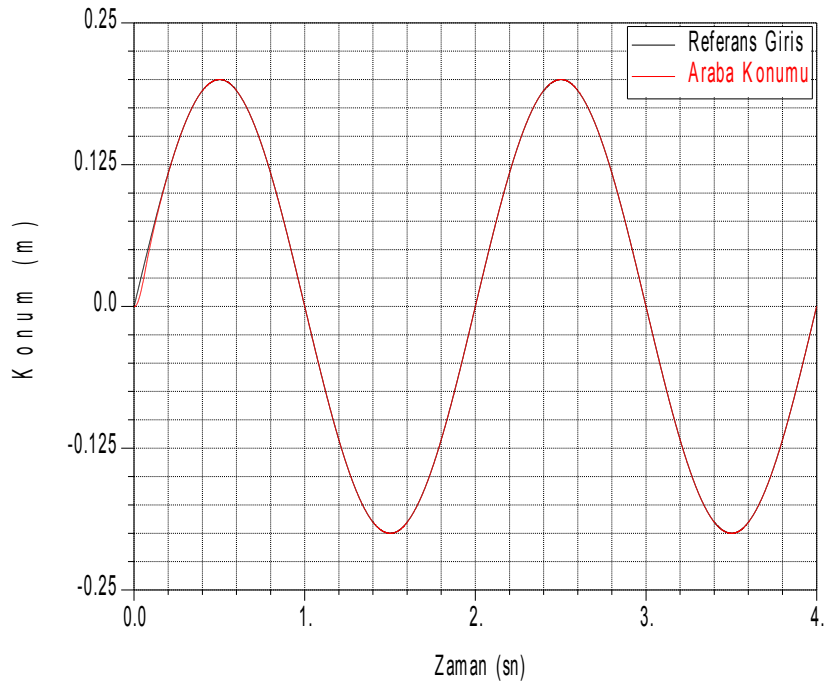


Şekil 4.40. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)

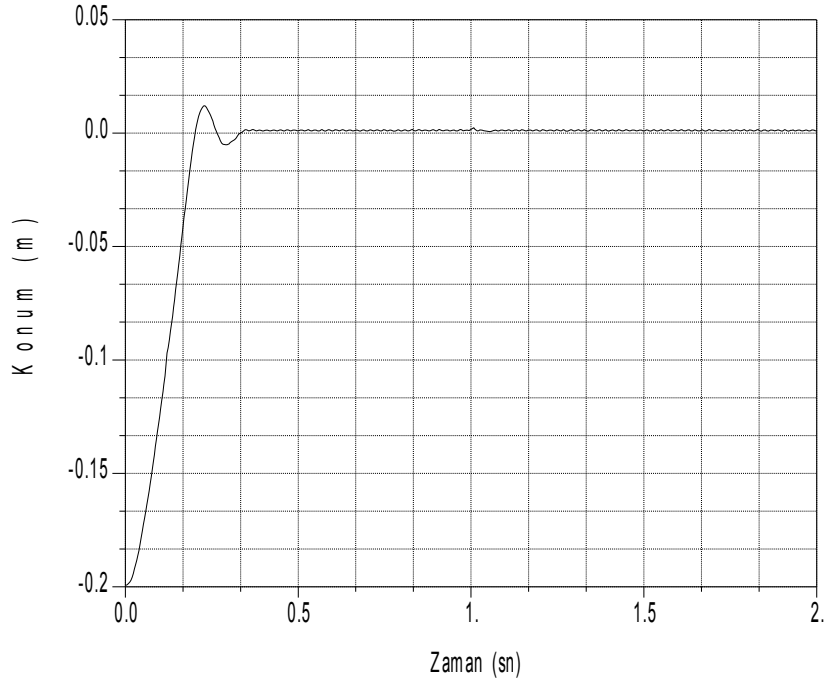
Sistemin integral kayan kipli kontrolünü eşdeğer sinyal ile uygulamak için Denklem 3.31'deki integral kayan yüzey seçilmiş ve sisteme $u = u_{eq} + u_{sw}$ kontrol sinyali uygulanmıştır. İntegral kayan kipli kontrol katsayıları simülasyonda $\lambda = 22$, $k_i = 0.16$ ve $\delta = 0.1$, deneyde $\lambda = 88$, $k_i = 0.16$ ve $\delta = 1.1$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



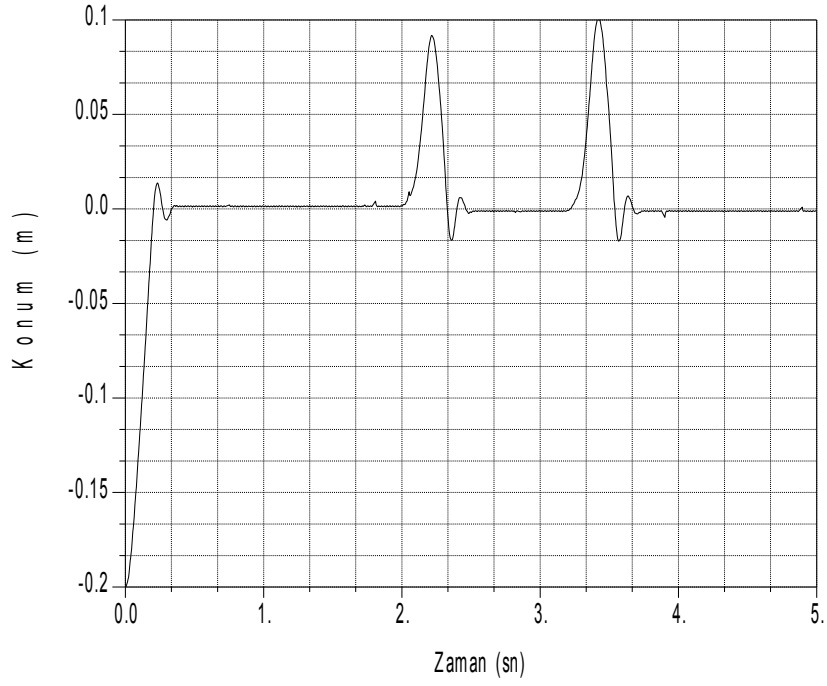
Şekil 4.41. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Simülasyon) (ISM anahtarlama ile, $\lambda:22$, $k_i:0.16$ ve $\delta:0.1$)



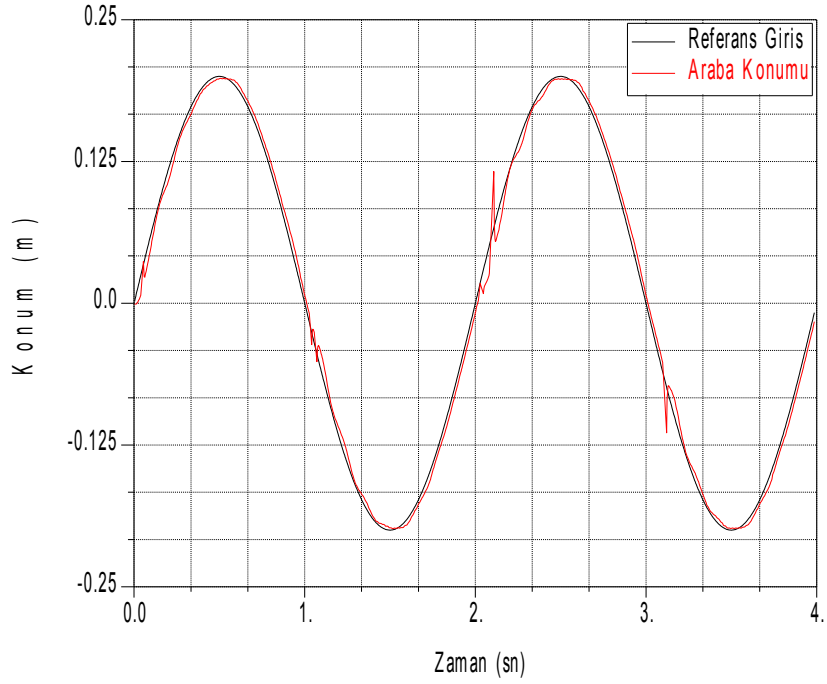
Şekil 4.42. Sistemin sinüs konum referansına cevabı (Simülasyon) (ISM toplam sinyal ile, $\lambda: 22$, $k_i: 0.16$ ve $\delta: 0.1$)



Şekil 4.43. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)



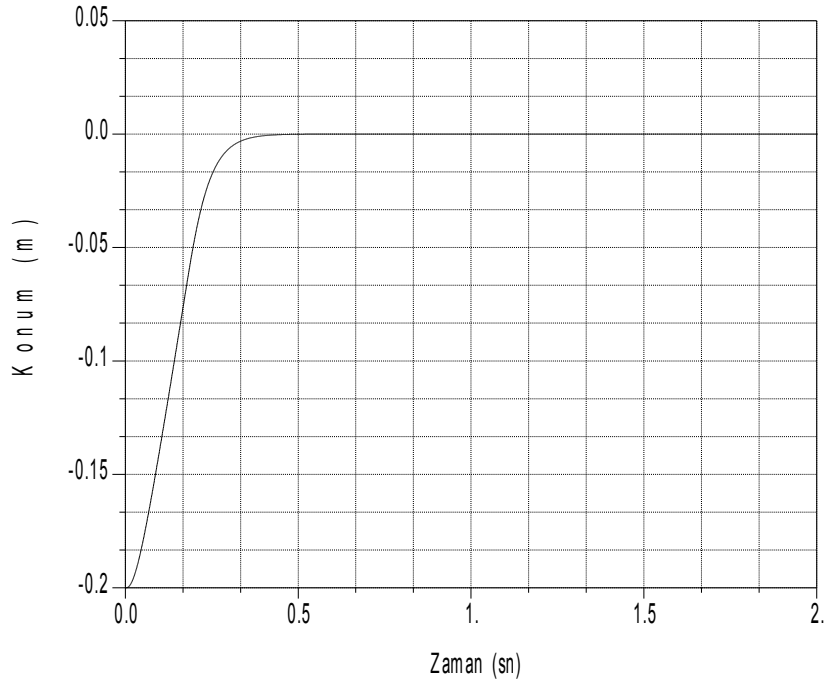
Şekil 4.44. Sistemin Basamak Konum Referansına Cevabı (Deneysel, bozucu etkili) (ISMC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)



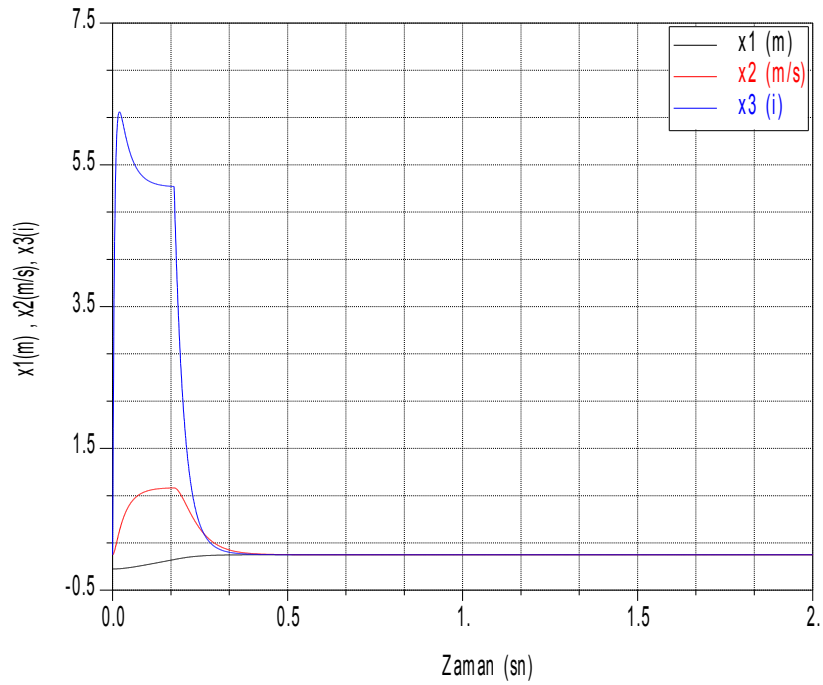
Şekil 4.45. Sistemin Sinüs Konum Referansına Cevabı (Deneysel) (ISMTC toplam sinyal ile, $\lambda:88$, $k_i:0.16$ ve $\delta:1.1$)

4.2.4. Gözlemleyici ile Kayan Kipli

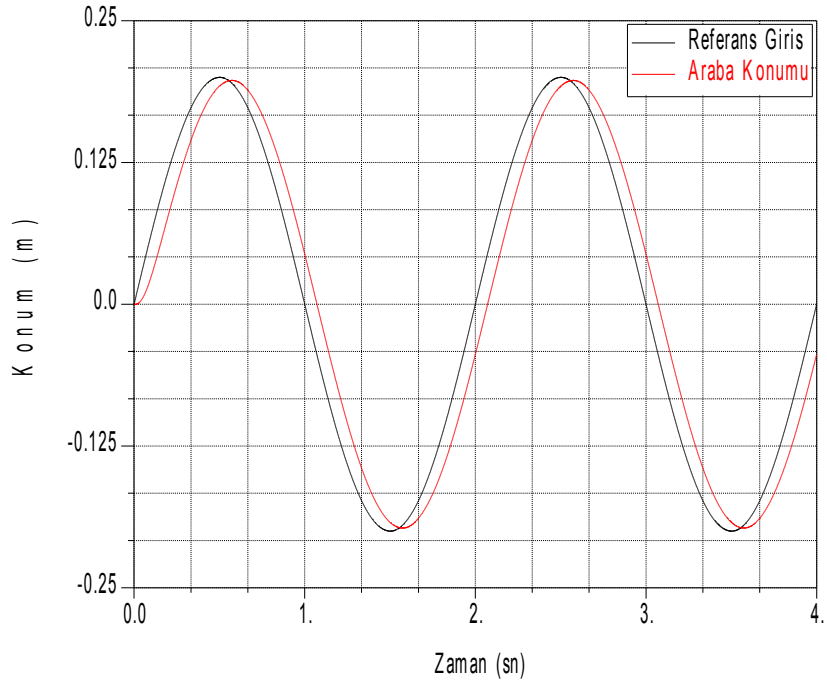
Sistemin gözlemleyici ile kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 3.14'teki yüzey seçilmiş, Bölüm 3.1'deki kökler için $\mathbf{C}_D = [3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$ ve $\delta = 0.004$ katsayılar kullanılmıştır. Gözlemleyici kazancı $\mathbf{L}=[100 \ 18000 \ 1000]$ olarak seçilmiştir. Kayan kipli kontrol için $\delta = 0.004$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



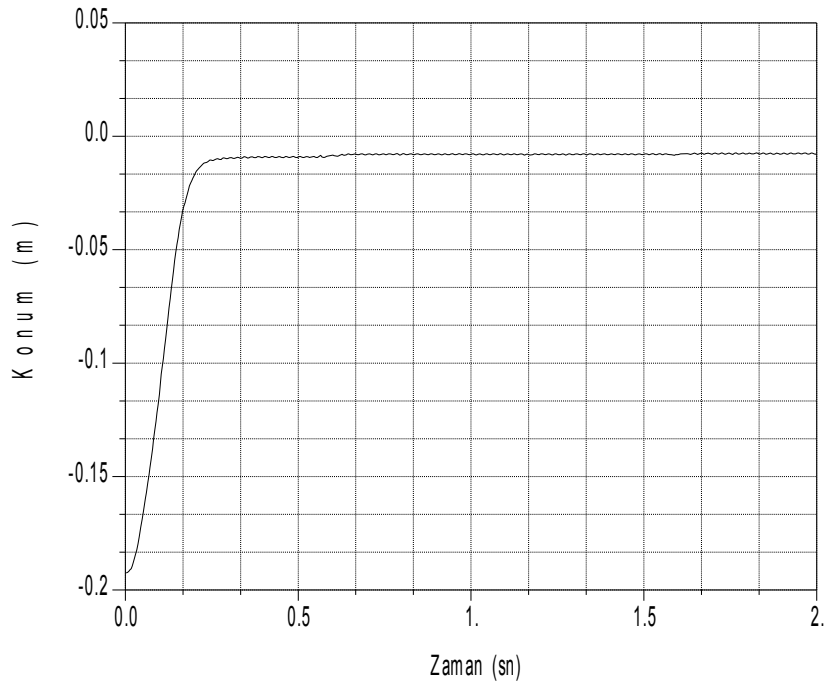
Şekil 4.46. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)



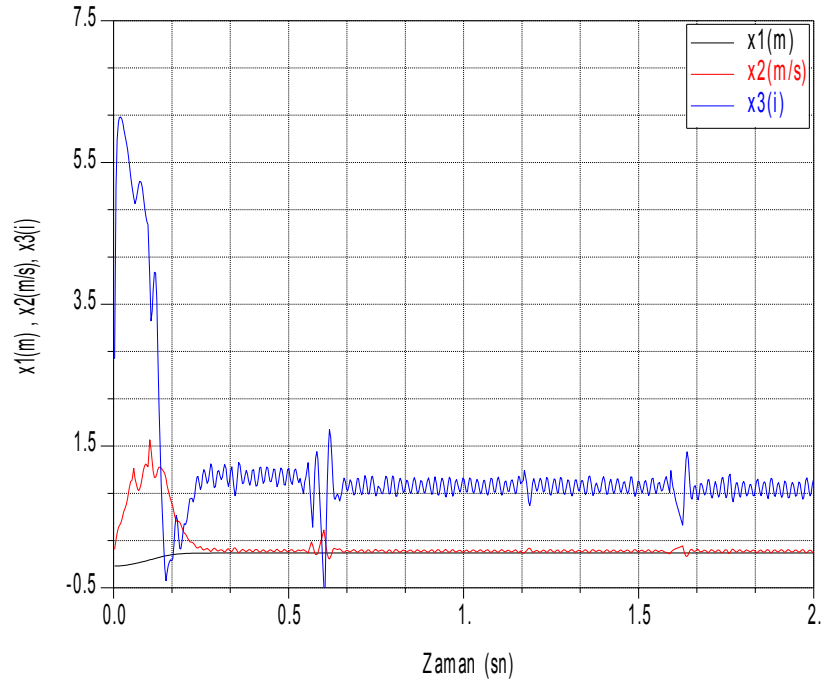
Şekil 4.47. Durum Değişkenleri (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)



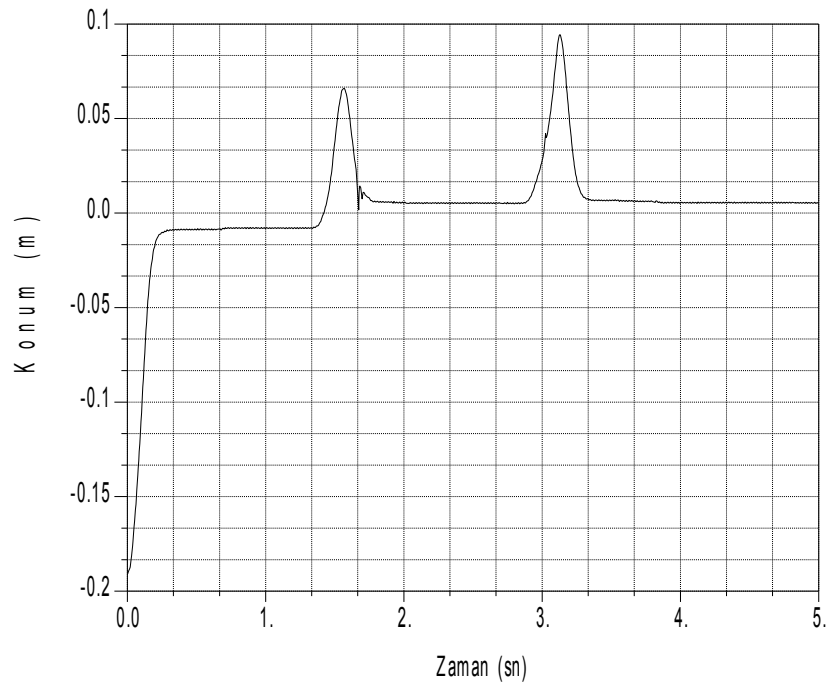
Şekil 4.48. Sarkaç Açısının Sinüs Referansa Cevabı (Simülasyon) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)



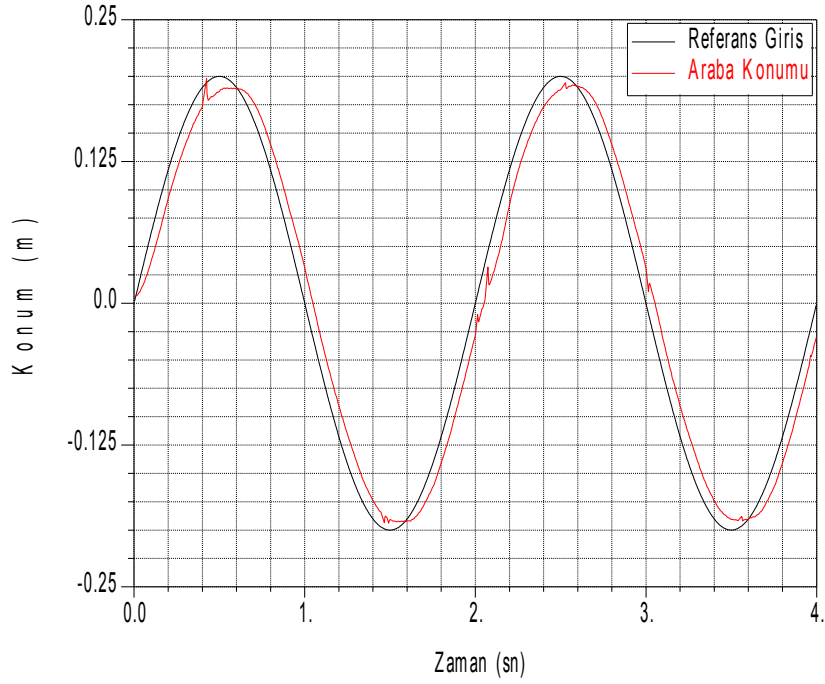
Şekil 4.49. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)



Şekil 4.50. Durum Değişkenleri (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057$ 0.1359 $0.0099]$, $\delta:0.004$)



Şekil 4.51. Sarkaç Açısının Basamak Referansa Cevabı (Deneysel, bozucu ile) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057$ 0.1359 $0.0099]$, $\delta:0.004$)



Şekil 4.52. Sarkaç Açısının Sinüs Referansa Cevabı (Deneysel) (SMC toplam sinyal ile, $C=[3.1057 \ 0.1359 \ 0.0099]$, $\delta:0.004$)

4.2.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Doğru akım motoru tahrikli araba sistemi yaklaşık doğrusal ve tek giriş-tek çıkışlı bir sistemdir. Sistemin parametreleri çeşitli yöntemlerle ölçülmüş ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Bkz. EK-2). Karşılaştırma için PID kontrol sisteme uygulanmış ve kontrol tekniklerinin performansları teorik ve deneysel olarak gözlemlenmiştir (Şekil 4.21-4.25).

Basit ters sarkaçta olduğu gibi kontrolcülerin kazançları deneysel uygulamalarda belirlenmiş, aşma olmaksızın sistemin yerleşme zamanı küçük tutacak katsayılar seçilmiştir. Ancak sistem az sönümlü olmasından dolayı sistemin yerleşme zamanını azaltmak ve referans izleme başarımını artırmak için bir nebze aşmaya müsaade edilmiştir (Şekil 4.26-4.45). Deneysel olarak elde edilen sistem parametreleri ile kök yerleştirme yapılmış ve sistem hem simülasyonda hem de deneysel olarak aynı kontrolcü kazançları ile kontrol edilmiştir (Şekil 4.46-4.52).

Tablo 4.2. Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu

| Kontrolcü | Aşma (%) | Yerleşme Zamanı (sn) | Kalıcı Hata (cm) |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------|-------------------------|
| PID | 8.0 | 0.34 | 0.15 |
| SMC Anahtarlama | 6.1 | 0.32 | 0.05 |
| SMC Toplam Sinyal | 7.2 | 0.41 | 0.07 |
| ISMC Anahtarlama | 5.7 | 0.32 | 0.05 |
| ISMC Toplam Sinyal | 6.0 | 0.35 | 0.12 |
| SMC Gözlemleyici | 0.0 | 0.25 | 0.75 |

Deneysel sonuçların ışığında kayan kipli kontrol'ün PID kontrole göre performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kayan kipli kontrol'ün sadece anahtarlama fonksiyonu kullanılarak elde edilen sonuçlarda yüzey sistemin yaklaşık modeline göre seçilmiş olmasına rağmen, ulaşma zamanının ve kalıcı hatanın PID kontrole nazaran daha düşük olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 4.2). Ayrıca referans izleme başarımının ve bozucu girişlere cevabının da daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yüzeye hatanın integralinin eklenmesi ile sistemin kalıcı hatasının azaldığı gözlemlenmiştir.

DC motor tahrikli araba sisteminde modellenmeyen dinamiklerin, belirsiz doğrusallığı bozan durumların ve bozucu etkilerin basit ters sarkaç sistemine göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle eşdeğer sinyal ile yapılan kontrollerde anahtarlama sinyali baskın tutulmuştur. Ayrıca deneysel ve simülasyon çalışmalarında, deneysel olarak seçilen kontrolcü parametreleri, eşdeğer sinyalle yapılan uygulamalarda simülasyondakinden farklı seçilmiştir. Kök yerleştirme ile yapılan kontrolde hem anahtarlama hem de eşdeğer sinyal kullanılmış ancak modellenemeyen dinamikler, parametre belirsizlikleri ve bozucu etkilerden dolayı kontrolün performansının yeterli olmadığı gözlemlenmiştir.

Bilyalı doğrusal yataklama sisteminin arabası üzerine düşey olarak önemli derecede yük uygulandığında çok daha kolay kaydığı, bilya sirkülasyonunun daha hızlı gerçekleştiği, dolayısı ile bu yataklama sisteminin sarkaç deney düzeneği için çok uygun düşmediği, yüksüz durumda homojen olmayan davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. bu modellenemeyen sürtünme dinamiğinin sistem davranışında çok etkili olduğu farkedilmiştir. Bilyalı sirkülasyonlu bu tür yataklama yerine yanlardan makaralı türden yataklamanın çok daha iyi sonuçlar verebileceği sonucuna varılmıştır.

Diğer tam modellenemeyen dinamik ise öteleme hareketini elde etmekte kullanılan çelik telin gerginliğidir. Deneyler yapıldıkça zamanla ayarı değişebilen tel gerginliğinin de yine sürtünme dinamiğini etkilemesinden dolayı sistemin davranışı üzerinde çok etkisi olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak çok daha hassas toleranslı parça imalatı ile deney düzeneklerinin oluşturulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Ancak bu durumlar dikkate alınarak karşılaştırma ve sonuç çıkarma çalışmaları yapılmış, geleceğe dönük uygulama bilgi birikimi sağlamıştır.

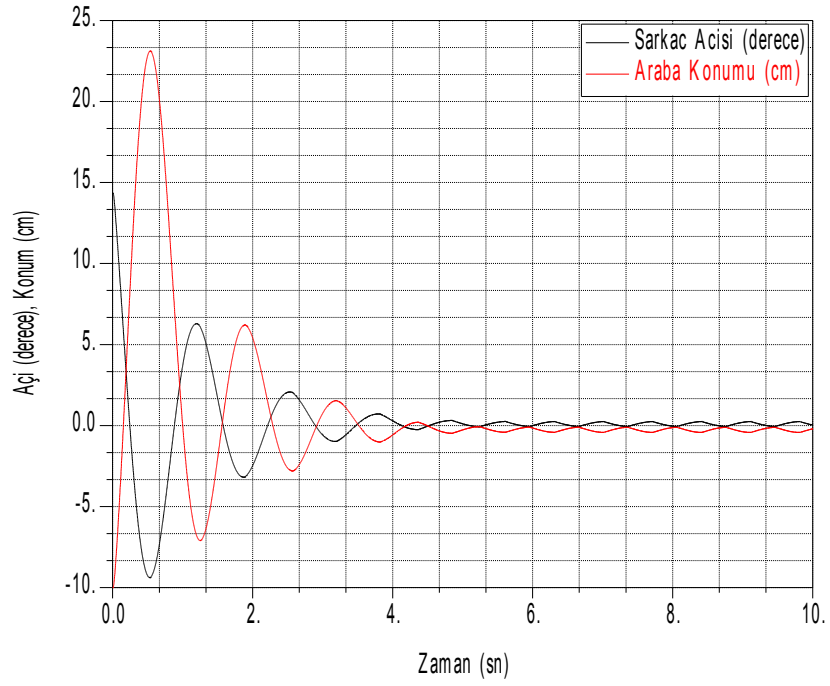
Yukarıda bahsedilen olumsuz sürtünme durumları giderildiğinde daha az motor torku yeterli olacağından, rotor atalet momenti biraz daha küçük motor ile aynı sonuçlar alınabilir, hatta böylece düşük atalet momentinden dolayı daha iyi frekans cevabı ve daha kıvrak izleme özelliği elde edilmiş olur.

4.3.Arabalı Ters Sarkacın Kontrolü

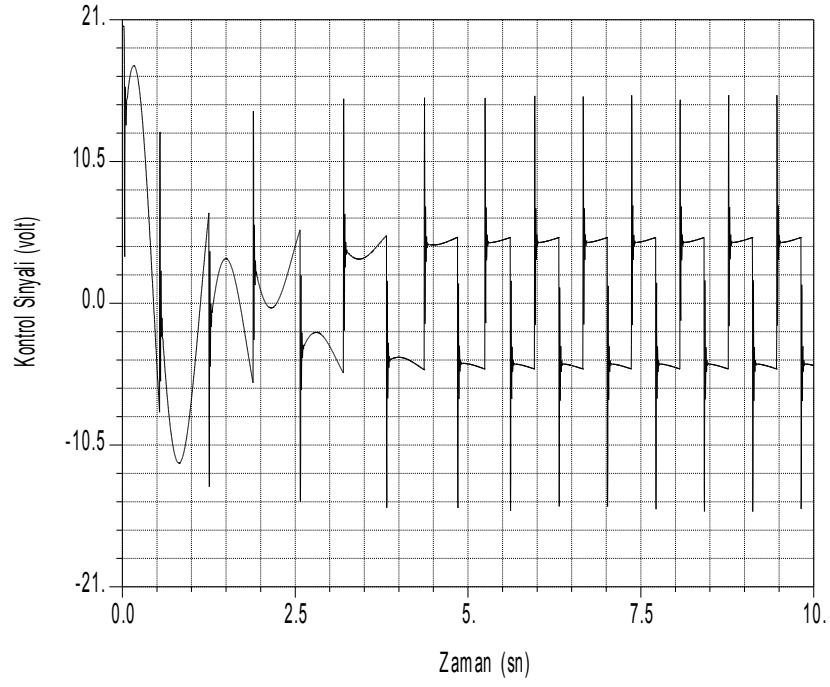
Bu bölümde arabalı ters sarkaç sistemine teorik ve deneysel olarak uygulanan çeşitli kontrol türlerinin grafikleri başlıklar halinde verilmiş ve bu sistem için değerlendirme yapılmıştır.

4.3.1. Kayan Kipli Kontrol

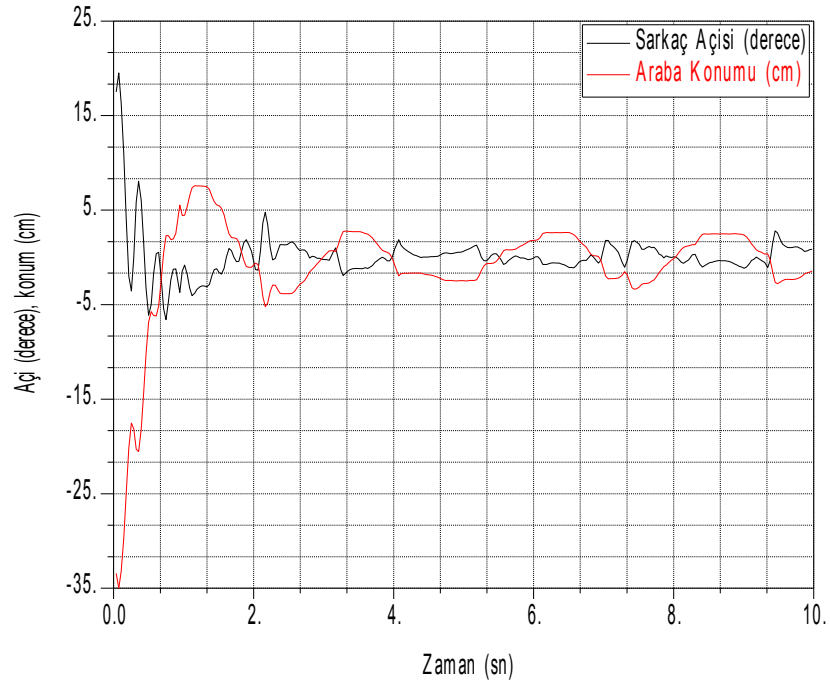
Sistemin kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 2.22 'deki yüzey seçilmiş ve kayan kipli kontrol katsayıları simülasyonda $C_D = [39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$ ve $\delta = 0.5$, deneyde ise $C_D = [47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$ ve $\delta = 4.4$ olarak belirlenmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır. Simülasyon ve deneyler sadece anahtarlama sinyali gerçekleştirilmiştir.



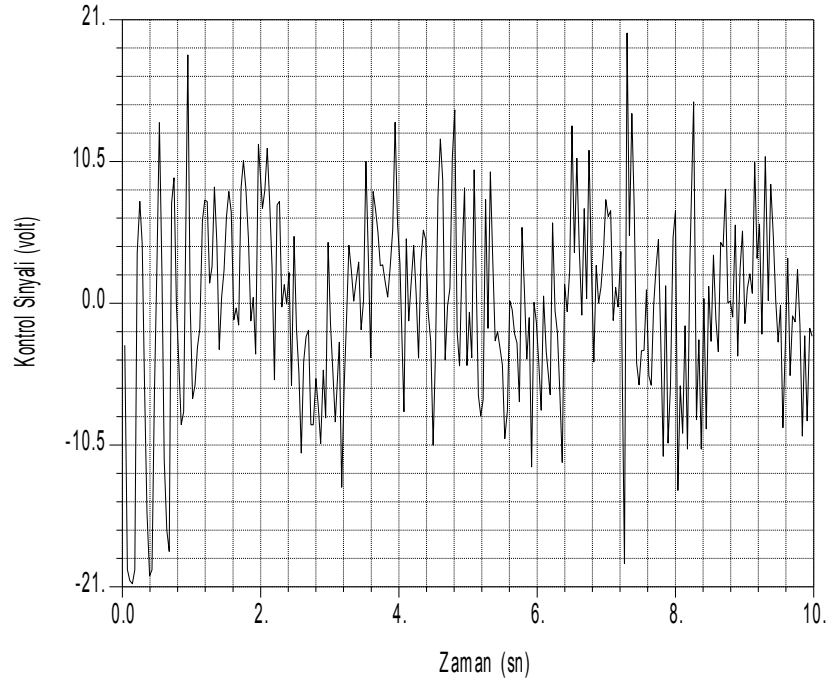
Şekil 4.53. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$)



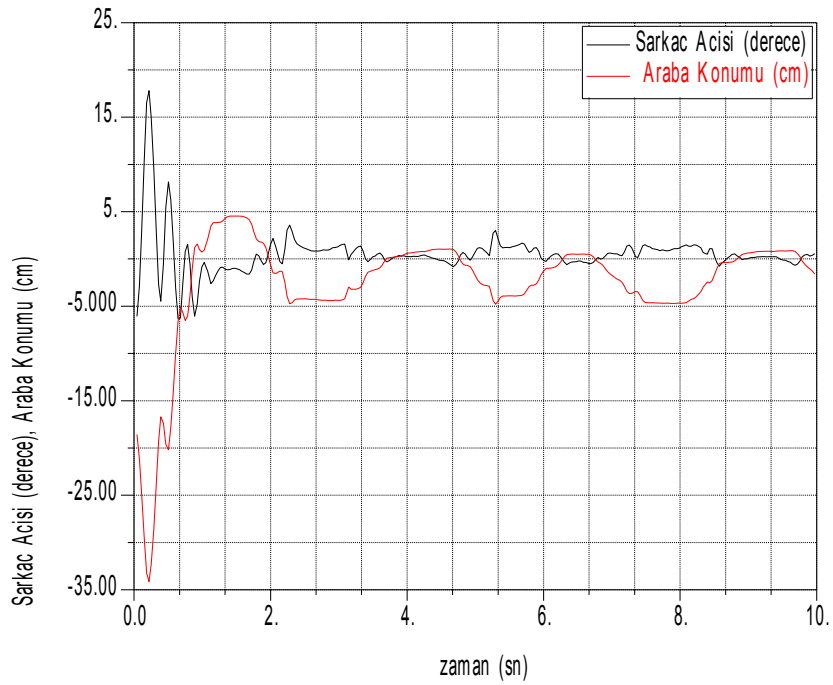
Şekil 4.54. Kontrol Sinyali (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$)



Şekil 4.55. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)



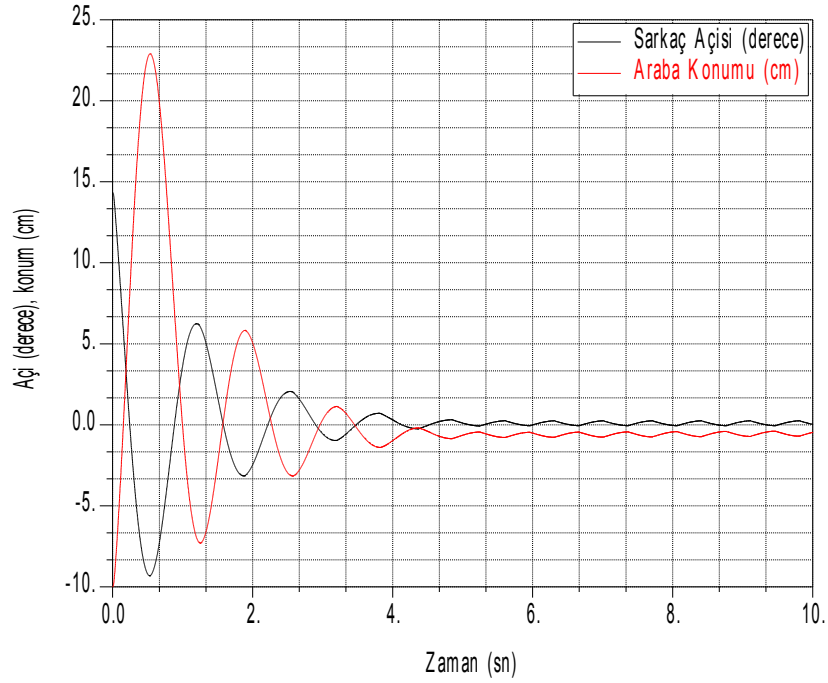
Şekil 4.56. Kontrol Sinyali (Simülasyon) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)



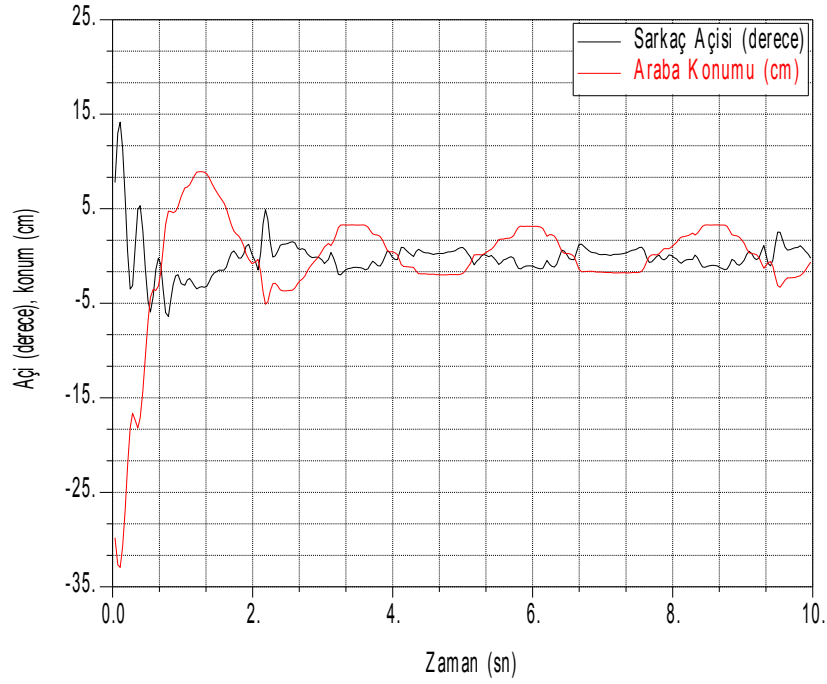
Şekil 4.57. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (SMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$)

4.3.2. İntegral Kayan Kipli Kontrol

Sistemin integral kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 2.22'deki yüzeye araba konumunu ve sarkaç açısını integralleri eklenerek sisteme integral kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Kayan kipli kontrol katsayıları simülasyonda $C_D = [39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta = 0.5$ ve integral katsayıları $k_{is} = 0.1$ ve $k_{ia} = 1$, deneyde ise $C_D = [47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta = 4.4$ ve integral katsayıları $k_{is} = 0.01$ ve $k_{ia} = 0.1$ olarak seçilmiş olup sistemin simülasyon ve deneysel sonuçları aşağıdadır.



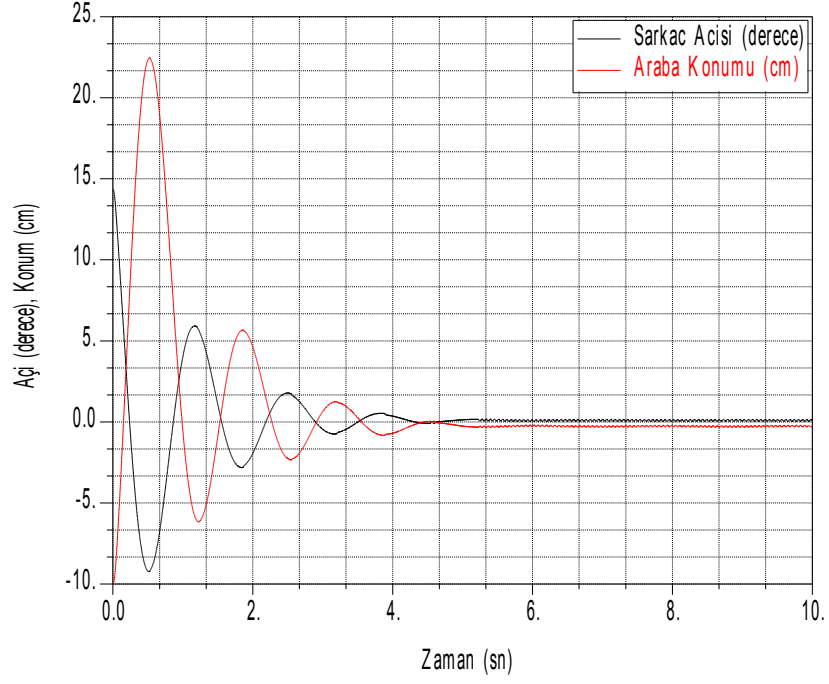
Şekil 4.58. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (İSMC anahtarlama ile, $C=[39.475 \ 18.569 \ 24.6251 \ 20.4297]$, $\delta:0.5$, $k_{is}:0.1$, $k_{ia}:1$)



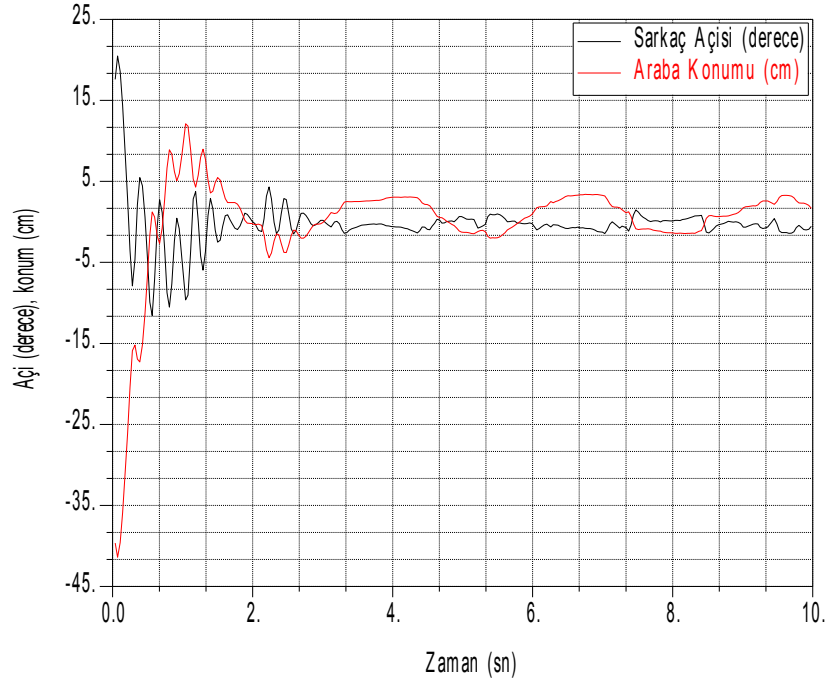
Şekil 4.59. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (İSMC anahtarlama ile, $C=[47.54 \ 3.33 \ 26.14 \ 13.07]$, $\delta:4.4$, $k_{is}:0.01$, $k_{ia}:0.1$)

4.3.3. Hiyerarşik Kayan Kipli Kontrol

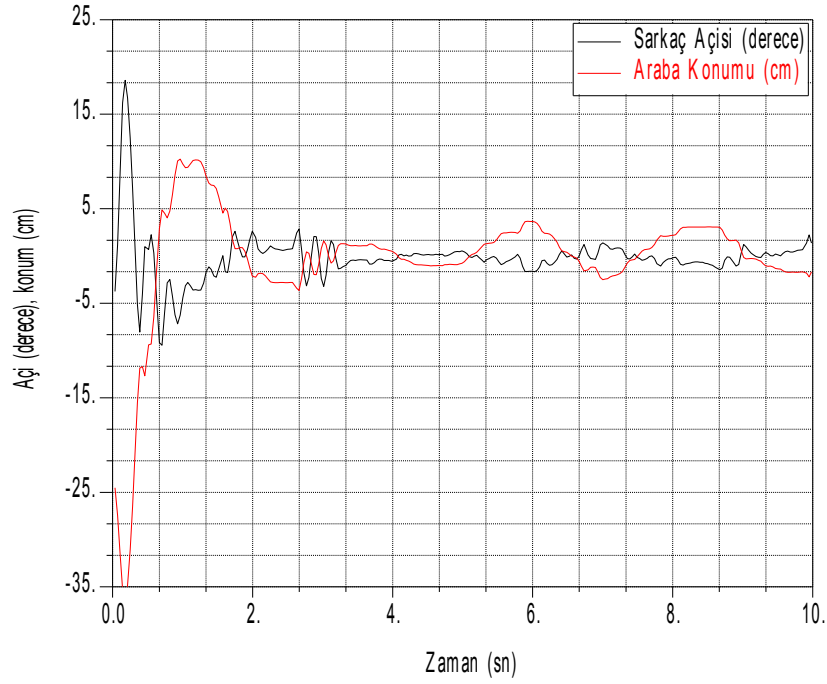
Sistemin hiyerarşik kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 2.65’de yer alan kontrol sinyali kullanılmıştır. Kontrolcü katsayıları simülasyon $c_1=2.125$, $c_2=1.205$, $\alpha =0.908$, $\eta_2=8$ ve $k_2=11$ olarak seçilmiştir. Deney uygulamalarında sadece Denklem 1.58 denkleminde anahtarlama kısmı kullanılmış ve ‘sign’ anahtarlama yerine ‘tanh’ anahtarlama tercih edilmiş ayrıca yüzey sınır tabaka ile kontrol edilmiştir. Kontrolcü katsayıları deney için $c_1=14.31$, $c_2=2$, $\alpha =0.254$, $\eta_2=20.5$ ve $k_2=0.5$ ve sınır tabaka kalınlığı $\eta =4.9$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.60. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (Hiyerarşik SMC toplam sinyal ile, $c_1:2.125$, $c_2:1.205$, $\alpha:0.908$, $\eta_2:8$ ve $k_2:11$)



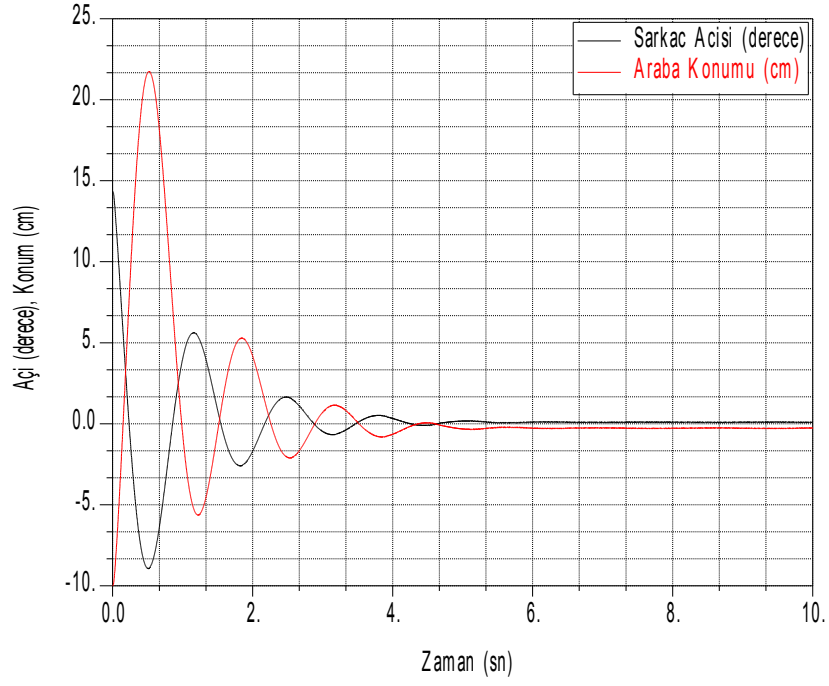
Şekil 4.61. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (Hiyerarşik SMC anahtarlama ile, $c_1:14.31$, $c_2:2$, $\alpha:0.254$, $\eta_2:20.5$, $k_2:0.5$ ve $\eta:4.9$)



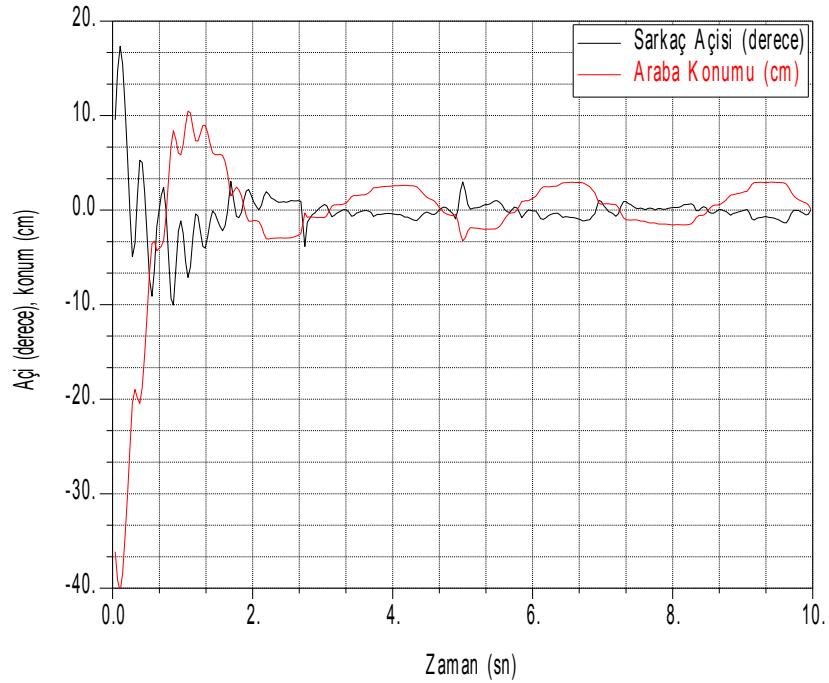
Şekil 4.62. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (Hiyerarşik SMC anahtarlama ile, $c_1:14.31$, $c_2:2$, $\alpha :0.254$, $\eta_2:20.5$ ve $k_2:0.5$ ve $\eta :4.9$)

4.3.4. Kaskat Kayan Kipli Kontrol

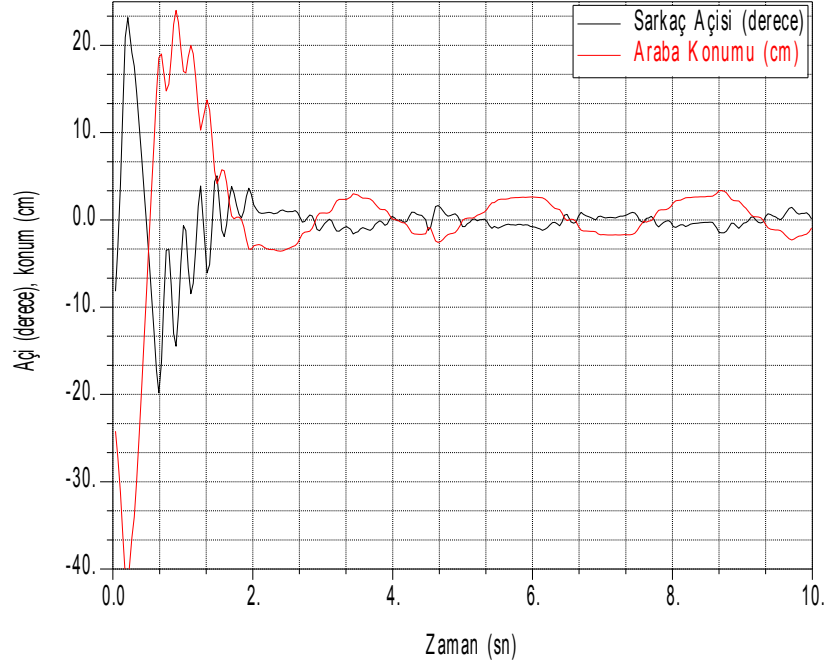
Sistemin kaskat kayan kipli kontrolünü gerçekleştirebilmek için Denklem 2.84 ve 2.85’de yer alan kontrol sinyalleri kullanılmıştır. Kontrolcü katsayıları simülasyon için $c_1= 2.16$, $c_2= 1.33$, $c_3= 1.11$, $\eta= 20.5$ ve $k =13$ ’dür. Deney uygulamalarında sadece denklem 1.77 denklemini kullanılmış ve ‘sign’ anahtarlama yerine ‘tanh’ anahtarlama kullanılmış ve yüzey sınır tabaka ile kontrol edilmiştir. Kontrolcü katsayıları deney için $c_1= 14.27$, $c_2=7.84$, $c_3= 7.84$, $\eta= 20.5$, $k =0.5$ ve sınır tabaka kalınlığı $\eta_1= 4.9$ olarak seçilmiştir.



Şekil 4.63. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Simülasyon) (Kaskat SMC toplam sinyal ile, $c_1: 2.16$, $c_2: 1.33$, $c_3: 1.11$, $\eta: 20.5$ ve $k: 13$)



Şekil 4.64. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu (Deneysel) (Kaskat SMC anahtarlama ile, $c_1: 14.27$, $c_2: 7.84$, $c_3: 7.84$, $\eta: 20.5$, $k: 0.5$ ve $\eta_1: 4.9$)



Şekil 4.65. Sarkaç Açısı ve Araba Konumu(Deneysel, sarkaç açısı ve araba konumunun aynı yönde olma durumu) (Kaskat SMC anahtarlama ile, $c_1: 14.27$, $c_2:7.84$, $c_3: 7.84$, $\eta: 20.5$, $k :0.5$ ve $\eta_1: 4.9$)

4.3.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Arabalı ter sarkaç sistemi doğrusal olmayan, ve tek giriş-çok çıkışlı ve dolaylı tahrikli bir sistemdir. Kontrolde amaç sistemin çıkışlarının tek kontrol sinyali ile aynı anda kontrolünün sağlanmasıdır. Sistem DC motorun dinamiği ihmal edilmeksizin modellenmiştir. Çeşitli yöntemler kullanılarak önceden elde edilmiş ve gerek görüldüğünde güncellenmiş gerçek sistem parametreleri ile sistemin simülasyonu gerçekleştirilmiştir (Bkz EK-3).

Tablo 4.3. Kontrol Tekniklerinin Karşılaştırma Tablosu

| Kontrolcü | Aşma (Sarkaç) (%) | Aşma (Araba) (%) | Kalıcı Hata (Sarkaç) (°) | Kalıcı Hata (Araba) (cm) |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| SMC Anahtarlama | 34.2 | 22.6 | ±2.0 | ±2.5 |
| ISMC Anahtarlama | 72.0 | 32.05 | ±2.0 | ±2.5 |
| Hiyerarşik SMC Anahtarlama | 55.5 | 30.0 | ±2.0 | ±2.0 |
| Kaskat SMC Anahtarlama | 90.0 | 27.7 | ±2.0 | ±2.0 |

Simülasyonlarda sarkaç açısının $\pm 0.5^\circ$ ve araba konumu ± 0.5 cm hassasiyetinde kontrolü gerçekleştirilmiş. Test edilen kontrol algoritmaları ile de aynı anda iki değişkenin kontrolü sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda ise sarkaç açısının $\pm 2^\circ$ ve araba konumu ± 2.0 cm hassasiyetinde kontrolü gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.53-4.65). Simülasyonda ve deneysel olarak görülen durum değişkenlerindeki düzensiz dalgalanmaların araba yataklama sisteminde mevcut olan Bölüm 4.2.1’de bahsedilen tam modellenemeyen sürtünme dinamiğinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ters sarkaç sistemlerinde motorun dinamiğinin ihmal edilerek geliştirilen kontrol algoritmalarının, motorun dinamiklerinin ihmal edilemeyeceği durumlarda yeterli performans gösteremedikleri gözlemlenmiştir. Ayrıca sistemlerdeki modellenemeyen dinamikler ve bozucu etkilerin de gözlemlenip kontrol dinamiklerine katılmasının kontrol performansını iyileştireceği düşünülmektedir. Bu kapsamda daha iyi sonuçlar almak için son zamanlarda belirsizlikler ve modellenemeyen dinamikleri dikkate almaya çalışan çalışmaların neden arttığı daha iyi anlaşılmıştır. Bunlar, ayrıca yapılması gereken başlı başına detaylı bilimsel çalışmalar olup bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

SONUÇ

Bu çalışmada basit ters sarkaç, dc motor tahrikli araba sistemi ve arabalı ters sarkaçın modellenmiş, çok sayıda yaygın kayan kipli kontrol tekniği ile kontrolleri hem teorik hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiş, PID kontrol her türlü durumda uygulanmış, hem PID kontrol ile hemde yapıları uygunsa kendi aralarında karşılaştırma yapılmış, faydalı sonuçlar çıkarılmış ve geleceğe dönük önerilerde bulunulmuştur.

Basit ters sarkaç ve dc motor tahrikli araba sistemleri doğrudan tahrikli ve tek giriş-tek çıkışlı sistemlerdir. Bu sistemlere öncelikle PID kontrol uygulanmış ve sonuçlar alınmıştır. Sistemin mertebesi düşük yaklaşık modeli elde edilerek kayma yüzeyleri belirlenmiş ve kontrol gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler genelde istenilen hatanın dinamiğine göre oluşturulmuş ve kullanılan tekniklerle sistemlerin yörünge izleme kabiliyetlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzey tasarımlarında integral terimi eklenerek sistemlerin davranışlarında iyileşme olduğu ve özellikle kalıcı hataları azalttığı gözlemlenmiştir.

Basit ters sarkaç sistemi modelleme hatalarının ve bozucu etkilerin az olduğu bir sistemdir. Kayan yüzeyin dinamikleri sistemin durum değişkenlerinden oluşturulduğunda, tam sistem modelleri kullanılarak, sisteme kök yerleştirme ile kontrol yapılmıştır. Bu nedenle sistemin kök yerleştirme ile kontrolü tasarlanan gözlemleyici ile istenilen sonuçları vermiştir. Ancak, her ne kadar doğrusal bir sistem olsa da, dc motor tahrikli araba sisteminde modellenemeyen dinamikler ve bozucu etkilerin fazlalığı tasarlanan gözlemleyici için olumsuz etki oluşturmuştur. Bu sebeple kontrolden sonuçlar istenildiği gibi elde edilememiştir. Ayrıca kayma yüzeyinin hatanın dinamiklerinden oluşmuyor olmasının sistemin yörünge izleme kabiliyetinin düşük olmasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Basit ters sarkaç ve dc motor tahrikli araba sisteminin ikisinde de kayan kipli kontrol hiperbolik tanjant yumuşatma fonksiyonu kullanılarak sadece anahtarlama kontrol sinyali ile gerçekleştirilmiş ve oldukça olumlu sonuçlar alınmıştır. Sistemin mertebesinin basitleştirildiği durumda elde edilen eşdeğer sinyalin, durum değişkeninin ulaşma zamanını geçiktirdiği gözlemlenmiştir. Durum değişkenlerinin tümünü kullanarak oluşturulan kayma yüzeyi ile yapılan kontrollerde hem

anahtarlama hem de eşdeğer sinyal ile kontrol gerçekleştirilmiş ve simülasyonda olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Doğru akım motoru tahrikli araba sisteminde daha önce bahsedildiği gibi modellenemeyen dinamikler ve bozucu etkilerden dolayı kontroller istenilen performansı sağlayamamıştır. Sistem modeline, sisteme kontrol girişini sağlayan dc motorun dinamikleri de katılmıştır. Sisteme klasik kayan kipli kontrolün yanı sıra integral kayan kipli kontrol, hiyerarşik kayan kipli kontrol ve kaskat kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda sarkaç açısı ve arabanın konumunun aynı anda kontrolü gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda sarkaç açısının $\pm 0.5^\circ$ ve araba konumu ± 0.5 cm hassasiyetinde kontrolü gerçekleştirilmiş. Test edilen kontrol algoritmaları ile de aynı anda iki değişkenin kontrolü sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sarkaç açısının $\pm 2^\circ$ ve araba konumu ± 2 cm hassasiyetinde kontrolü gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda ve deneylerde cevap eğrilerinde görülen düzensizliklerin belirsizliklerden ve tam modellenemeyen sürtünme dinamiğinden kaynaklandığı anlaşılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi bölümlerinde bahsedilen olumsuzlukları giderecek şekilde düzenlemelerle daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir.

Sonuç olarak, “kayan kipli kontrol tekniklerinin teorik ve deneysel olarak incelenmesi” çalışması ile, farklı türden gerçek sistemler üzerinde yaygın olarak kullanılan kayan kipli kontrol teknikleri ile kontroller hem teorik hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiş, elde edilen çok sayıda simülasyon ve deney sonuçları değerlendirilerek karşılaştırmalar yapılmış, faydalı olabilecek sonuçlar çıkarılmış, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

KAYNAKLAR

1. Utkin V.I., Variable Structure Systems With Sliding Modes. IEEE Transactions on Automatic Control , 22(2): p. 212–222, 1977.
2. Utkin, V.I., Sliding Mode Control In Mechanical Systems. In: IEEE Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON '94, 20th International Conference,s. 1429-1431, 1994.
3. Nguyen, D., Sliding-Mode Control: Advanced Design Techniques, Doctoral Thesis, University of Technology, Sydney, 2001.
4. Susperregui, A., Tapia, G., Y, Tapia, A., Application of Two Alternative Sliding-Mode Control Approaches to DC Servomotor Position Tracking. IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 4, pp. 611-621, 2007.
5. Eker İ., Sliding Mode Control with PID Sliding Surface and Experimental Application to an Electromechanical Plant, ISA Transaction, Vol. 45, no. 1, pp. 109-18, Turkey, 2005.
6. Brandtstädter, H., Buss, M., Control of Electromechanical Systems Using Sliding Mode Techniques, IEEE Conference on Decision and Control, Spain, 2005.
7. Park, T., Park, K., Sliding Mode Control Based on Pole-Placement Method for Position Control of Linear Stage, ICCAS- SICE, pp. 5127-5130, Japan, 2009.
8. Nafa, F., Labiod, S., Chekireb, H., A Structured Sliding Mode Controller for a Class of Underactuated Mechanical Systems, 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and Their Applications (WOSSPA), Algeria, 2011.
9. Rao, S. et al., Sliding Mode Control in Mechanical Systems with Electric Actuators, In Proceedings of the 8th International Workshop on Variable Structure Systems, Spain, 2004.
10. Shin, S. Y., et al, Decoupled Fuzzy Adaptive Sliding Mode Control For Under-Actuated Systems With Mismatched Uncertainties, Proc. IEEE Int'l Conf. on Information and Automation, pp. 599-604, Harbin, 2010.
11. Qian, D., et al., Hierarchical Sliding Mode Control For Series Double Inverted Pendulums System , IEEE Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 4977-4982, Beijing, 2006.

12. Hao, Y., Yi, J., Zhao, D., Qian, D., Robust control Using Incremental Sliding Mode For Underactuated Sysytems With Mismatched Uncertainties, Proceedings of 2008 American Control Conference, p. 532-537, 2008.
13. Åström, K. J., Hägglund, T., PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, s.343, Instruments Society of America, USA, 1995.
14. Ang, K.H., Chong, G., Li, Y., PID Control System Analysis, Design, And Technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 13, Issue 4, pp. 559-576, 2005.
15. X. Yu and J.-X. Xu (Eds.): Variable Structure Systems: Towards the 21st Century, LNCIS 274, s. 1–32, 2002.
16. Utkin, V.I., Variable Structure Systems with Sliding Modes, IEEE Transactions on Automatic Control., Vol.AC-22. No.2.,pp.212-222, 1977.
17. Li, Y., High Precision Motion Control Based on a Discrete-time Sliding Mode Approach, Doctor Of Philosophy, KTH Royal Institute of Technology, Sweden, 2001.
18. Slotine J. J. E., Li W., Applied Nonlinear Control, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991.
19. Utkin, V. I., Guldner, J., Shi, J., Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, Taylor & Francis, Padstow, England, 1999.
20. Utkin V.I., Sliding Modes IN Control Optimization, Communication and Control Engineering Series, Springer-Verlag, USA, 1992.
21. Perruquetti W., Barbot J. P., Sliding Mode Control in Engineering, CRC, (2002).
22. Tokat S., Eksin I., Guzelkaya M., Sliding Mode Control Using A Nonlinear Time-Varying Sliding Surface, Proceedings of the 10th Mediterranean Conference on Control and Automation - MED2002 Lisbon, Portugal, 2002.
23. D1 Ogata, K., Modern Control Engineering. Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, New Jersey, Fourth Edition, 2002.
24. Lopez-Martinez M., Acosta J.A ., Cano J.M., Brief Paper Non-linear Sliding mode Surfaces for a Class of Underactuated Mechanical Systems, IET Control Theory Appl., Vol. 4, Iss. 10, pp. 2195–2204, 2010.

25. Wang W, et al., Design of a Stable Sliding-Mode Controller for a Class of Second-Order Underactuated Systems, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 151, No. 6, 2004.
26. Qian D.,Yi J.,Zhao.D, Hierarchical Sliding Mode Control to Swing up a Pendubot, Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York City, USA, 2007.
27. Qian, D., et al., Hierarchical Sliding Mode Control for Series Double Inverted Pendulums System, International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing. China, 2006.
28. Hao, Y., et al, Proposal of Incremental Sliding Mode Control, Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Beijing,2006.
29. Hao, Y., et al, Robust Control Using Incremental Sliding Mode for underactuated Systems with Mismatched Uncertainties, American Control Conference, Seattle, Washington, USA,2008.
30. Wang, W., et al, Design of Cascade Fuzzy Sliding-Mode Controller, American Control Conference, pp. 4649–4654, USA, 2005.
31. Strah, B., Tovomik, B., Kuljaca O.,Mathematical Modeling of Inverted Pendulum, Electronics in Marine - Elmar '97, 39th International Symposium Proceedings, s.220-225, Zadar ,1997.
32. Yiğit, İ., Bir Arabalı Ters Sarkaç Sisteminin Tasarımı, İmalatı Ve Darbe Eni Modüleli Kayan Kipli Kontrolü, UMTS2007 Sempozyumu, Sivas, Haziran 2007.
33. Yiğit, İ., Dönel Ters Sarkaç Sisteminin Modellenmesi ve Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi,TOK2010, Otomatik Kontrol Ulusal Kongresi, Gebze, 2010.
34. Yiğit, İ., Arabalı Ters Sarkaç Sisteminin Modellenmesi ve Parametrelerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi, ,TOK2010, Otomatik Kontrol Ulusal Kongresi, Gebze, 2010.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Çankırı’da doğan Mehmet Buğrahan KALAYCI, ilköğrenimi Gazi İlkokulunda, orta ve lise öğrenimini ise Çankırı Anadolu Lisesinde tamamlamıştır. 2004 yılında kazandığı Erciyes Üniversitesi Yozgat Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2009 yılında başarıyla bitirmiştir

2009 yılında yüksek lisans eğitimine Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında başlamıştır. Yrd.Doç.Dr.İlhami YİĞİT danışmanlığında hazırladığı “Kayan Kipli Kontrol Tekniklerinin Teorik Ve Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı teziyle 2013 yılında mezun olmuştur.

İletişim Bilgileri

Adres : Şeyh Osman Mah. Mezbahane Cad. Şahin Sitesi F-Blok No:2

66100 YOZGAT

Telefon: (544) 263 48 28

E-posta: mbugrak@gmail.com

EKLER

Ek 1. Basit Ters Sarkaç Simülasyon Yazılımı (Delphi 7 Görsel Programı Kaynak Kodu)

```
...
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
label 2,3,ilkatla,22,32,ilkatla2,atla3;

var i : longint;
    j,k,l : byte;

Procedure Sistem;
begin
ff[1]:= xv[2];
ff[2]:= a[2,1]*sin(xv[1])+a[2,2]*xv[2]+a[2,3]*xv[3]
ff[3]:= a[3,2]*xv[2]+a[3,3]*xv[3]+b[3]*eat;
end;

begin
assignfile(out1, dizin +'CIKTI'+outFilename1 ); rewrite(out1);
assignfile(out2, dizin +'CIKTI'+outFilename2 ); rewrite(out2);
Rm:= 5.138648677;
Lm:=0.0099446108;
Ke:= 0.065633;
Kt:= Ke;
Je:= 0.002386;
Be:= 0.0041 ;
Kte:= 0.03;
l1:=0.1509;
me:=0.076;
Ky:= 1; Kh:= 1;
//-----oooooooo-----
a[2,1]:= (l1*me*9.81/Je);a[2,2]:=(-Be/Je);a[2,3]:= (1/Je)*Kt;
b[2]:= (1/Je);a[3,2]:= (-Ke/Lm);a[3,3]:= (-Rm/Lm);b[3]:= (1/Lm);
c1:= (l1*me*9.81/Je);
c2:= -(Kt*kt/Rm/Je)-(Be/Je);
```

Ek 1. Devam

```
c3:=(kt/Rm/je);
A1:=Je*Lm;A2:=Je*Rm+Be*Lm;A3:=Be*Rm+l1*me*9.81*Lm+Kt*kt;
//-----00000000-----
ipid:=0;ismc:=0;ismc2:=0;ismc3:=0;

if RadioButton8.Checked then ipid:=1;if RadioButton9.Checked then ismc:=1;
if RadioButton10.Checked then ismc2:=1;if RadioButton11.Checked then ismc3:=1;
if RadioButton12.Checked then ismc4:=1;

//başlangıç değerleri
aa:=0;ed:=0;edb:=0;x1rd:=0;x1rdd:=0;ee:=0;edd:=0;ei:=0;te:=0;Tbt:=0;
x[2]:=x20;x[3]:=x30;x[4]:=x40;x[5]:=0;x[1]:=x10;
iss[0]:=0;iss[1]:=0.5;iss[2]:=0.5;iss[3]:=1;

//sistem mertebesi
sm:=3;
//runge-kutta 4 başlangıç değerleri sıfırlama
for j:=1 to 4 do xr2[j]:=x[j]; for j:=1 to sm2 do xv[j]:=0;
u:=0;
for i:=1 to sm2 do
begin
for j:=1 to sm2 do
begin
kk[i,j]:=0;
end;
end;

if sys=1 then
begin
FOR i:= round(0/h) TO round(tf/h) DO
BEGIN
t:=h*i;
if RadioButton3.Checked then x1r:= xr;
if RadioButton4.Checked then x1r:= Ar*t;
if RadioButton5.Checked then x1r:= xsr + xsg*sin(2*pi*fre*t);
```

Ek 1. Devam

```
e:= x[1]-x1r;
eh:= Kh*e;    { volt }
ei:= ei+h*eh;                               // e nin integrali
if i=0 then goto ilkatla;
ed:=(eh-ee)/h; ee:= eh;                     // e nin türevi
edd:=(ed-edb)/h; edb:= ed;
ilkatla:

u:= Kp*(eh + (Ki)*ei + Td*ed);

upid:= -8.74*u;    { volt,elektronik yükselteç 8.74 }

//Luenberger observer
if t<0.001 then x1o:=x[1];
f1o:=x2o + k6 *(x[1]-x1o);
f2o:= 47.152139145*sin(x[1])+(-1.718357083*x2o)+27.507544007*x3o+ k7 *(x[1]-x1o);
f3o:= -6.599856075*x2o+(-516.726977088)*x3o +100.556977051*eat+ k8 *(x[1]-x1o);
x1o:= x1o + h*f1o;
x2o:= x2o + h*f2o;
x3o:= x3o + h*f3o;

// 1.mertebeden smc + ueq veya ueq suz
s:= ed + Lam*eh;

if s<=-del then usw:= 20.5;
if (s>-del) and (s<del) then usw:=-20.5*tanh(s/del);
if s>=del then usw:= -20.5;

ueq:=-(c1/c3)*sin(x[1])-(c2+lam)*x[2]/c3 ;
usmc:= ueq*1+usw;

// 1.mertebeden ismc + ueq veya ueq suz
s2:= ed + k1*eh + k2*ei;

if s2<=-del2 then usw2:= 20.5;
```

Ek 1. Devam

```
if (s2>-del2) and (s2<del2) then usw2:= -20.5*tanh(s2/del2);
  if s2>=del2 then usw2:= -20.5;

ueq2:=-k2/c3*eh-(c1/c3)*sin(x[1])-(c2+k1)*x[2]/c3;
usmc2:= ueq2*1+usw2;

//// gözlemleyici ile smc + ueq
s3:=k3*x1o+kk4*x2o+k5*x3o;
  ueq3:=-(k3*x2o+kk4*47.152139145*sin(x1o)+kk4*(-1.718357083)*x2o
  +kk4*27.507544007*x3o+k5*(-6.599856075)*x2o
  +k5*(-516.726977088)*x3o)/(k5*100.556977051);

usw3:= ueq3-20.5*tanh(s3/del3);
usmc3:=ueq3*1+usw3;

u:= ipid*upid + ismc*usmc + ismc2*usmc2+ismc3*usmc3;
if u>+20.5 then u:=+20.5;
if u<-20.5 then u:=-20.5;
eat:=u;

//runge-kutta 4 n. Mertebeden genelleştirilmiş çözüm
for k:=0 to 3 do
begin
  for j:=1 to sm do xv[j]:=x[j]+kk[k,j]*iss[k];
  sistem; for j:=1 to sm do kk[k+1,j]:=h*ff[j]; end;
for j:=1 to sm do x[j]:=x[j] + (kk[1,j]+2*kk[2,j]+2*kk[3,j]+kk[4,j]) /6;

ni:= tf/h/ss;
if (round(tf/h)>ss) and (round(t/h)<>round(ni*round(t/h/ni))) then goto 2;
writeln(out1, t:18:9,x[1]:18:9);
writeln(out2, t:18:9, u:15:6);
2:

END;
```


Ek 2 DC Motor Tahrikli Araba Simülasyon Yazılımı (Delphi 7 Görsel Programı Kaynak Kodu)

```
...
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
label 2,3,ilkatla,22,32,ilkatla2,atla3;
var i : longint;
    j,k,l : byte;

Procedure Sistem;
begin
ff[1]:= xv[2];
ff[2]:= a[2,2]*xv[2]+a[2,3]*xv[3];
ff[3]:= a[3,2]*xv[2]+a[3,3]*xv[3]+b[3]*eat;
end;

begin

//=====

assignfile(out1, dizin +'CIKTI'+outFilename1 ); rewrite(out1);
assignfile(out2, dizin +'CIKTI'+outFilename2 ); rewrite(out2);

//basit sarkaç model parametreleri ve kısaltmaları

Rm:= 3;
Lm:= 0.01596;
Ke:= 0.141;
Kt:= Ke;
Rg:=0.027;
Be:= 28.60020352;
Ky:= 8.74; Kh:= 1;
me:=1.222;
//-----oooooooo-----

a[2,2]:=(-Be/me);a[2,3]:=(Kt/me/Rg);
```

Ek 2. Devam

```
a[3,2]:=(-Ke/Rg/Lm);a[3,3]:=(-Rm/Lm);b[3]:=(1/Lm);
c1:=0;
c2:=a[2,2]-a[2,3]*a[3,2]/a[3,3];
c3:=-a[2,3]*b[3]/a[3,3];
A1:=Je*Lm;A2:=Je*Rm+Be*Lm;A3:=Be*Rm+l1*me*9.81*Lm+Kt*kt;
//-----oooooooo-----

ipid:=0;ismc:=0;ismc2:=0;ismc3:=0;
if RadioButton8.Checked then ipid:=1;if RadioButton9.Checked then ismc:=1;
if RadioButton10.Checked then ismc2:=1;if RadioButton11.Checked then ismc3:=1;
if RadioButton12.Checked then ismc4:=1;

//başlangıç değerleri
aa:=0;ed:=0;edb:=0;x1rd:=0;x1rdd:=0;ee:=0;edd:=0;ei:=0;te:=0;Tbt:=0;
x[2]:=x20;x[3]:=x30;x[4]:=x40;x[5]:=0;x[1]:=x10;
iss[0]:=0;iss[1]:=0.5;iss[2]:=0.5;iss[3]:=1;
//sistem mertebesi
sm:=3;
//runge-kutta 4 başlangıç değerleri
for j:=1 to 4 do xr2[j]:=x[j]; for j:=1 to sm2 do xv[j]:=0;
u:=0;
for i:=1 to sm2 do
begin
for j:=1 to sm2 do
begin
kk[i,j]:=0;
end;
end;
//observer x1o:=x[1];x2o:=0;x3o:=0;

FOR i:= round(0/h) TO round(tf/h) DO
BEGIN
```

Ek 2. Devam

```
t:=h*i;

if RadioButton3.Checked then x1r:= xr;
if RadioButton4.Checked then x1r:= Ar*t;
if RadioButton5.Checked then x1r:= xsr + xsg*sin(2*pi*fre*t);

e:= x[1]-x1r;

eh:= Kh*e;    { volt }
ei:= ei+h*eh;                               // e nin integrali
if i=0 then goto ilkatla;
ed:=(eh-ee)/h; ee:= eh;                       // e nin türevi
edd:=(ed-edb)/h; edb:= ed;
x1rd:=(x1r-x1rb)/h; x1rb:=x1r;                 // ref girişin türevi
x1rdd:=(x1rd-x1rdb)/h; x1rdb:=x1rd;           // ref girişin 2. türevi
ilkatla:

u:= Kp*eh + (Ki)*ei + Td*ed;
upid:= -8.74*u;    { volt,elektronik yükselteç 8.74 }

//Luenberger gözlemleyici
if t<0.001 then x1o:=x[1];
f1o:=x2o + k6 *(x[1]-x1o);
f2o:= (-23.404421866)*x2o+4.273504274*x3o+ k7 *(x[1]-x1o);
f3o:= -327.206906154*x2o+(-187.969924812)*x3o +62.656641604*eat+ k8 *(x[1]-x1o);
x1o:= x1o + h*f1o;
x2o:= x2o + h*f2o;
x3o:= x3o + h*f3o;

// 1.mertebeden smc + ueq veya ueq suz
s:= ed + Lam*eh;

if s<=-del then usw:= 20.5;
```

Ek 2. Devam

```
if (s>-del) and (s<del) then usw:=-20.5*tanh(s/del);
if s>=del then usw:= -20.5;

ueq:=-c2*ed/c3 -(lam)*ed/c3+x1rdd/c3;
usmc:= ueq*1+usw;
usmc:=usmc;

//// 1.mertebeden ,smc + ueq veya ueq suz
s2:= ed + k1*eh + k2*ei;

if s2<=-del2 then usw2:= 20.5;
if (s2>-del2) and (s2<del2) then usw2:= -20.5*tanh(s2/del2);
if s2>=del2 then usw2:= -20.5;

ueq2:=-k2/c3*eh-c2*x[2]/c3-(+k1)*ed/c3+x1rdd/c3;

usmc2:= ueq2*1+usw2;

// gözlemleyici ile smc + ueq

s3:=k3*eh+kk4*x2o+k5*x3o;

ueq3:=-k3*x2o+kk4*(-23.404421866)*x2o
+kk4*4.273504274*x3o+k5* (-327.206906154)*x2o
+k5*(-187.969924812)*x3o)/(k5*62.656641604);

usw3:= -20.5*tanh(s3/del3);
usmc3:=ueq3*1+usw3;

u:= ipid*upid + ismc*usmc + ismc2*usmc2+ismc3*usmc3+ismc4*usmc4;

if u>+20.5 then u:=+20.5;
if u<-20.5 then u:=-20.5;
eat:=u;
```

Ek 2. Devam

```
//runge-kutta 4, n. Mertebeden genelleştirilmiş çözüm
for k:=0 to 3 do
begin
  for j:=1 to sm do xv[j]:=x[j]+kk[k,j]*iss[k];
  sistem; for j:=1 to sm do kk[k+1,j]:=h*ff[j]; end;
  for j:=1 to sm do x[j]:=x[j] + (kk[1,j]+2*kk[2,j]+2*kk[3,j]+kk[4,j]) /6;

  ni:= tf/h/ss;
  if (round(tf/h)>ss) and (round(t/h)<>round(ni*round(t/h/ni))) then goto 2;

  writeln(out1, t:18:9, x1r:18:9, x[1]:18:9);
  writeln(out2, t:18:9, u:15:6);
2:
  Application.ProcessMessages;
  if GetKeyState(VK_Escape) and 128 =128 then goto 3;
  if aa=1 then goto 3;
end;
3:
END;
```

Ek 3 Arabalı Ters Sarkaç Simülasyon Yazılımı (Delphi 7 Görsel Programı Kaynak Kodu)

```
...
Procedure Sistem;      // Ters sarkaç doğrusal olmayan 5. Mertebeden modeli
begin
aa11:=bb*cos(xv[1]);
aa12:=cc;
aa21:=aa+Jge/Rg;
aa22:=bb*cos(xv[1]);
w:=aa11*aa22-aa12*aa21;
if xv[4]>0 then Fs:=(-8.378+28.6*xv[4]);
if xv[4]<0 then Fs:=(8.378+28.6*xv[4]);

ff[1]:= xv[2];
ff[2]:=(-bb*bm*cos(xv[1])/Rg/w)*xv[4]+(bb*bb*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2]
+ (-aa*bb*g*rg*rg-bb*g*jge)/Rg/Rg/w*sin(xv[1])+bb*kt*cos(xv[1])/Rg/w*xv[5]+
(-bb*cos(xv[1])/w)*Fs+(aa*Rg*Rg+jge)/Rg/Rg/w*ms;
ff[3]:=xv[4];
ff[4]:=(cc*Bm/Rg/w)*xv[4]+ bb*bb*g*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w
+(-bb*cc*sin(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2]+ (-cc*kt/Rg/w)*xv[5]+(-bb*cos(xv[1])/w)*ms
+cc/w*Fs;
ff[5]:=(-Kt/Lm/Rg)*xv[4]+(-Rm/Lm)*xv[5]+1/Lm*eat;

//sistem_4m de yer alan 4. mertebeye indirgenmiş sistemin değerleri
g1:=(0.023511606*cos(xv[1]))*xv[4]+(-0.074787362*sin(xv[1])*cos(xv[1]))*xv[2]*xv[2]
+ 25.448175658*sin(xv[1]) + 1.587033394*(Fs) +(-0.042717637);
b1:=-2.762613359 ; //-2.76261394095;
g2:=-0.011045688*xv[4]+(-0.733664018)*sin(xv[1])*cos(xv[1])
+(0.035134899*sin(xv[1]))*xv[2]*xv[2]+(0.001231538*cos(xv[1]))
+(-0.745583961)*(Fs)+(-6.777757077)*xv[4];

b2:=1.297868377; //1.29786849623;

end;
```

Ek 3. Devam

```
Procedure Sistem_4m; // 4.mertebeden endüktans ihmali ile ters sarkaç
begin
aa11:=bb*cos(xv[1]);
aa12:=cc;
aa21:=aa+Jge/Rg;
aa22:=bb*cos(xv[1]);
w:=aa11*aa22-aa12*aa21;
if xv[4]>0 then Fs:=(-8.378+33.75*xv[4]);
if xv[4]<0 then Fs:=(8.378+33.75*xv[4]);

ff[1]:= xv[2];
ff[2]:=(-bb*bm*cos(xv[1])/Rg/w)*xv[4]+(bb*bb*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2]
+ (-aa*bb*g*rg*rg-bb*g*jge)/Rg/Rg/w*sin(xv[1])+
(-bb*cos(xv[1])/w)*(8.378*0+33.75*xv[4])+(aa*Rg*Rg+jge)/Rg/Rg/w*ms
+(bb*kt*cos(xv[1])/Rg/w)*(-Kt/Rm/Rg)*xv[4]+((bb*kt*cos(xv[1])/Rg/w)/Rm)*eat;
ff[3]:=xv[4];
ff[4]:=(cc*Bm/Rg/w)*xv[4]+ bb*bb*g*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w
+(-bb*cc*sin(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2] +(-bb*cos(xv[1])/w)*ms
+cc/w*(8.378*0+33.75*xv[4])+ (-cc*kt/Rg/w)*(-Kt/Rm/Rg)*xv[4]+((-
cc*kt/Rg/w)/Rm)*eat;

g1:=(-bb*bm*cos(xv[1])/Rg/w)*xv[4]+(bb*bb*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2]
+ (-aa*bb*g*rg*rg-bb*g*jge)/Rg/Rg/w*sin(xv[1])+
(-bb*cos(xv[1])/w)*(Fs)+(aa*Rg*Rg+jge)/Rg/Rg/w*ms;
b1:=((bb*kt*cos(xv[1])/Rg/w)/Rm) ;

g2:=(cc*Bm/Rg/w)*xv[4]+ bb*bb*g*sin(xv[1])*cos(xv[1])/w
+(-bb*cc*sin(xv[1])/w)*xv[2]*xv[2] +(-bb*cos(xv[1])/w)*ms
+cc/w*(Fs)+ (-cc*kt/Rg/w)*(-Kt/Rm/Rg)*xv[4];
b2:=((-cc*kt/Rg/w)/Rm);
end;
```

Ek 3. Devam

```
begin
assignfile(out1, dizin +'CIKTI'+outFilename1 ); rewrite(out1);
assignfile(out2, dizin +'CIKTI'+outFilename2 ); rewrite(out2);

kt:=0.141;Rm:=3;Lm:=0.01596;Ms:=0.000776;mc:=1.0236;Rg:=0.027;
g:=9.81;jge:=1.4462*power(10,-4);Jsp:=0.0117714467;ls:=0.22;Bm:=0.03;
aa:=mc+0.2142+Jge/Rg/Rg;
bb:=0.2142*ls;
cc:=0.2142*Ls*Ls+Jsp;
x1i:=0;x3i:=0;
//-----oooooooo-----
a[2,1]:=(-Kte/Je);a[2,2]:=(-Be/Je);a[2,3]:=(1/Je)*Kt;
b[2]:=(1/Je);a[3,2]:=(-Ke/Lm);a[3,3]:=(-Rm/Lm);b[3]:=(1/Lm);
iss[0]:=0;iss[1]:=0.5;iss[2]:=0.5;iss[3]:=1;
ei:= 0; ee:= 0; te:= 0; Tbt:=0;sm:=3;sm2:=5;
//-----oooooooo-----
ipid:=0;ismc:=0;ismc2:=0;ismc3:=0;

if RadioButton8.Checked then ipid:=1;if RadioButton9.Checked then ismc:=1;
if RadioButton10.Checked then ismc2:=1;if RadioButton11.Checked then ismc3:=1;
if RadioButton12.Checked then ismc4:=1;
aa:=0;
ed:=0;edb:=0;x1rd:=0;x1rdd:=0;
edd:=0;
x[1]:=x10;x[2]:=x20;x[3]:=x30;x[4]:=x40; x[5]:=0;

for j:=1 to 4 do xr2[j]:=x[j]; for j:=1 to sm2 do xv[j]:=0;
u:=0;
for i:=1 to sm2 do
begin
for j:=1 to sm2 do
begin
kk[i,j]:=0;
```


Ek 3. Devam

end;

end;

FOR i:= round(0/h) TO round(tf/h) DO

BEGIN

t:=h*i;

if RadioButton3.Checked then x1r:= xr;

if RadioButton4.Checked then x1r:= Ar*t;

if RadioButton5.Checked then x1r:= xsr + xsg*sin(2*pi*fre*t);

e:= x[1]-x1r;

e2:=(x[3]-x1r);

eh:= Kh*e;

ei:= ei+h*eh;

if i=0 then goto ilkatla2;

ed:=(eh-ee)/h;

e2d:=(e2-e2e)/h; // e nin türeleri

ilkatla2:

ee:= eh; e2e:= e2; edb:= ed;

upid:= Kp*(eh + Ki*ei + Td*ed);

//Kayan Kipli Kontrol

s:= k1*x[1] + k2*x[2] + k3*x[3]+ kk4*x[4];

usw:= 20.5*tanh(s/del2);

usmc:=usw;

//Kaskat Kayan Kipli Kontrol

s21:=k5*x[1]+x[2];

s22:=k6*x[3]+s21;

Ek 3. Devam

```
s23:=k7*x[4]+s22;

s2:=s23;

usw2:=-(k8*sign(s2)+del*s2)/((b2*k7)+b1);
ueq2:=-(k7*g2+k6*x[4]+k5*x[2]+g1)/((b2*k7)+b1);
usmc2:= usw2+ueq2;

//integral kayan kipli kontrol
x1i:= x1i+h*x[1];
x3i:= x3i+h*x[3];

s3:= k1*x[1] + k2*x[2]+k9*x1i + k3*x[3]+ k4*x[4]+k10*x3i;

sw3:= umax*tanh(s3/del3);

usmc3:=usw3;

//Hiyerarşik Kayan Kipli Kontrol
s41:= K13*x[1]+x[2];
s42:= K14*x[3]+x[4];

S4:= K15*s41+s42;

ueq41:=(K13*x[2]+g1)/(-b1);
ueq42:=(K14*x[4]+g2)/(-b2);

usmc4:= ((K15*b1*ueq41+b2*ueq42-del4*sign(s4)- lam*S4)/(K15*b1+b2) );

u:= ipid*upid + ismc*usmc + ismc2*usmc2+ismc3*usmc3+ismc4*usmc4;
if u>+umax then u:=+umax;
if u<-umax then u:=-umax;
eat:= u;

//runge-kutta 4, n. Mertebeden genelleştirilmiş çözüm
```

Ek 3. Devam

```
for k:=0 to 3 do
begin
for j:=1 to sm2 do xv[j]:=x[j]+kk[k,j]*iss[k];
Sistem; for j:=1 to sm2 do kk[k+1,j]:=h*ff[j];
end;
for j:=1 to sm2 do x[j]:=x[j] + (kk[1,j]+2*kk[2,j]+2*kk[3,j]+kk[4,j]) /6;
//*****
ni:= tf/h/ss;
if (round(tf/h)>ss) and (round(t/h)<>round(ni*round(t/h/ni))) then goto 22;

writeln(out1, t:15:6, ', x[1]*360/2/3.14:18:9, ',x[3]*100:18:9 );
writeln(out2, t:15:6, eat:18:9 );
22:
Application.ProcessMessages;
if GetKeyState(VK_Escape) and 128 =128 then goto 32;
if aa=1 then goto 32;
END;
32:
```

Ek 4 Kök Yerleştirme Yazılımı (MATLAB Kaynak Kodu)

```
A=[0 1 0 ;  
47.152139145 -1.718357083 27.507544007;  
0 -6.599856075 -516.726977088 ];  
B=[0;0;100.556977051];  
%C=[1 0 0];  
%D=0;  
  
CC=[B A*B A*A*B] ;  
kok=poly(A);  
  
W=[kok(3) kok(2) 1;  
kok(2) 1 0;  
1 0 0];  
T=CC*W;  
clc  
A1=inv(T)*A*T;  
  
A111=[A1(1) A1(4) ;A1(2) A1(5)];  
A112=[A1(7);A1(8)];  
  
A121=[A1(3) A1(6)];A122=[A1(9)];B1=inv(T)*B;  
pl=[-37.8,-22.];  
C2=place(A111,A112,pl);  
  
C22=[C2(1) C2(2) 1];  
C3=C22*inv(T)
```