



**DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN  
İKİNCİ DERECEDE  
KAYAN KIPLI  
DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ**

**Sadrettin GÖLCÜGEZLİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Ahmet DURLU**

**2022  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN İKİNCİ DERECEDEN KAYAN  
KİPLİ DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ**

**Sadrettin GÖLCÜGEZLİ**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet DUMLU**

**Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği**

**Erzurum**

**2022**

**Her hakkı saklıdır**

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

17 / 06 / 2022

Sadrettin GÖLCÜGEZLİ

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLERİN İKİNCİ DERECEDEN KAYAN KİPLİ DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ

Sadrettin GÖLCÜGEZLİ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ahmet DURLU

Tez çalışmasında endüstri tesislerinde kullanılan akışkan seviye tank sisteminin tipik uygulaması olan İkili-Tank sistemi ve elektromekanik sistemlerden doğru akım (DC) motor sistemine kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak kontrolü incelenmiştir. DC motor ve İkili-Tank sisteminin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerin dinamik denklemleri, kayan kipli kontrol ile birleştirilerek tasarlanmıştır. Tez çalışmasında araştırmacı tarafından kayan kipli kontrol (SMC), parametre değişimlerine ve bozulmalara karşı sağlamlığı nedeniyle tercih edilmiştir. Tez çalışmasında SMC yönteminin olumsuz yönü olan istenmeyen çatırdama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır. Kayan kipli kontrol için kontrol işareti, anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin toplamı olacak şekilde hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin transfer fonksiyonu, Taylor serisi doğrusallaştırma yöntemiyle hesaplanmıştır. İkili-Tank uygulanan kayan kipli kontrol ile başka bir kontrol şekli olan ileri beslemeli PI denetleyicisi (FF-PI), DC motor sistemi PI kontrol denetleyicisiyle karşılaştırılmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) uygulanarak tasarlanan sistemlerin MATLAB-Simulink simülasyon ortamında ölçülen değer ile referans değerinin takibi ve ölçülen değer ile istenilen değer arasındaki hata tespiti dalga formlarına göre incelenmiş ve hata fonksiyonları (IAE, ISE, ITAE, ITSE) kullanılarak karşılaştırılmıştır. Kayan kipli kontrol (SMC) ile tasarlanan sistemlerin diğer kontrol yöntemlerine göre hata değerlerinin daha az olduğu ve çatırdama etkisi ikinci dereceden SMC yöntemiyle giderilebildiği ispatlanmıştır.

**Yıl 2022, 66 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Kayan kipli kontrol, dc motor, sıvı seviye sistemleri, doğrusal olmayan kontrol, ileri beslemeli PI, PI

## **ABSTRACT**

MS. Thesis

### **CONTROL WITH SECOND DEGREE SLIDING MODE CONTROLLER OF NONLINEAR SYSTEMS**

Sadrettin GÖLCÜGEZLİ

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet DURLU

In the thesis study, the Coupled-Tank system, which is the typical application of the fluid level tank system used in industrial facilities, and the control of the electromechanical systems by applying the sliding mode control (SMC) to the direct current (DC) motor system are examined. The mathematical model of the DC motor and Coupled -Tank system has been drawn. Dynamic equations of nonlinear systems are designed by combining them with sliding mode control. In the thesis study, the sliding mode control (SMC) was preferred by the researcher due to its robustness against parameter changes and distortions. The control signal for the sliding mode control is calculated as the sum of the switching control signal and the equivalent control signal. The transfer function of the nonlinear Coupled -Tank system was calculated by the Taylor series linearization method. Coupled -Tank applied sliding mode control and feedforward PI controller (FF-PI), another form of control, is compared with the DC motor system PI control controller. The monitoring of the measured value and the reference value in the MATLAB-Simulink simulation environment of the systems designed by applying the sliding mode control (SMC) and the error detection between the measured value and the desired value were examined according to the waveforms and compared using the error functions (IAE, ISE, ITAE, ITSE). It has been proven that systems designed with sliding mode control (SMC) have less error values compared to other control methods and the chattering effect can be eliminated by the second order SMC method.

**2022, 66 page**

**Keywords:** Sliding mode control, dc motor, liquid level systems, nonlinear control, feedforward PI, PI

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ders aldığım Erzurum Teknik Üniversitesi akademisyenlerine teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışmam süresince yönlendirmeleri, bilgi ve birikimleriyle tarafıma katkı sağlayan danışmanım sayın Doç. Dr. Ahmet DURLU'ya şükranlarımı sunarım.

Desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme minnettarım.

**Sadrettin GÖLCÜGEZLİ**

**Haziran 2022**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                             | <u>Sayfa</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>ÖZET</b> .....                                                           | i            |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                                       | ii           |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                                       | iii          |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                                    | iv           |
| <b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....                                 | vi           |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                                                | viii         |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                              | x            |
| <b>1. GİRİŞ</b> .....                                                       | 1            |
| 1.1. Endüstriyel Sistemlerde DC Motor .....                                 | 1            |
| 1.1.1. PID .....                                                            | 2            |
| 1.1.2. Genetik algoritma.....                                               | 3            |
| 1.1.3. Parçacık sürü optimizasyonu .....                                    | 3            |
| 1.1.4. Bulanık mantık kontrol (FLC) .....                                   | 5            |
| 1.1.5. Kesirli mertebeden kontrol .....                                     | 5            |
| 1.2. Endüstriyel Tank Sistemi .....                                         | 6            |
| 1.3. Kayan Kipli Kontrol.....                                               | 8            |
| <b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....                                             | 12           |
| <b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....                                          | 18           |
| 3.1. DC Motor.....                                                          | 18           |
| 3.1.1. Elektriksel kısım .....                                              | 18           |
| 3.1.2. Mekanik kısım .....                                                  | 19           |
| 3.1.3. DC Motor transfer fonksiyonu.....                                    | 21           |
| 3.1.4. DC motor SMC kontrol yöntemi matematiksel modelleme ve tasarımı..... | 22           |
| 3.1.5. DC motor PI kontrol yöntemi .....                                    | 25           |
| 3.2. İkili-Tank Sistemi .....                                               | 27           |
| 3.2.1. İkili-Tank matematiksel modelleme.....                               | 28           |
| 3.2.2. İkili-Tank sistem transfer fonksiyonu .....                          | 29           |
| 3.2.3. İkili-Tank SMC kontrol tasarımı.....                                 | 35           |
| 3.2.4. Tank 1 SMC kontrol denetleyici tasarımı .....                        | 36           |
| 3.2.5. Tank 2 SMC kontrol denetleyici tasarımı .....                        | 37           |
| 3.2.6. Tank 2 geleneksel SMC kontrol tasarımı .....                         | 37           |
| 3.2.7. Tank 2 ikinci dereceden SMC yöntemi.....                             | 39           |

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.8. İkili-Tank FF-PI .....                                      | 41        |
| 3.3. Hata Fonksiyonları .....                                      | 42        |
| <b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>                    | <b>44</b> |
| 4.1. DC Motor Benzetim Sonuçları .....                             | 44        |
| 4.2. İkili-Tank Benzetim Sonuçları.....                            | 51        |
| 4.2.1. Tank 1 benzetim sonuçları.....                              | 51        |
| 4.2.2. Tank 2 benzetim sonuçları.....                              | 53        |
| 4.3. İkili-Tank Hata Değerleri .....                               | 55        |
| 4.3.1 Tank 1 basamak yanıtı.....                                   | 55        |
| 4.3.2 Tank 2 basamak yanıtı.....                                   | 56        |
| 4.3.3. İkili-Tank kare ve sinüzoidal dalga benzetim sonuçları..... | 56        |
| 4.4. SMC Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....              | 57        |
| <b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>                                   | <b>60</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                              | <b>62</b> |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <b><u>Simgeler</u></b> | <b><u>Açıklama</u></b>      |
|------------------------|-----------------------------|
| $A$                    | Kesit alanı                 |
| $cm$                   | Santimetre                  |
| $e$                    | Hata                        |
| $g$                    | Yerçekimi ivmesi            |
| $M_p$                  | Maksimum tepe aşım değeri   |
| $l$                    | Akışkan seviyesi            |
| $q$                    | Akışkan debisi              |
| $t_s$                  | Yerleşme süresi             |
| $T$                    | Tork                        |
| $u$                    | Sistem kontrol işareti      |
| $u_{eq}$               | Eşdeğer kontrol işareti     |
| $u_{sw}$               | Anahtarlama kontrol işareti |
| $v_p$                  | Pompa gerilimi              |
| $w$                    | Açısal hız                  |
| $\tau$                 | Zaman sabiti                |

### **Kısaltmalar**

|       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| CT    | Coupled Tank                      |
| D     | Derivative                        |
| DC    | Direct Current                    |
| EMK   | Elektromotor Kuvvet               |
| FF-PI | Feedforward proportional integral |
| FLC   | Fuzzy Logic Controller            |
| GA    | Genetic Algorithm                 |
| HOSM  | Higher Order Sliding Mode         |
| I     | Integral                          |
| IAE   | Integral of Absolute Error        |
| ISE   | Integral of Square Error          |

|       |                                               |
|-------|-----------------------------------------------|
| ITAE  | Integral of Time Weighted Absolute Error      |
| ITSE  | Integral of Time Weighted Squarred Error      |
| KVL   | Kirchhoff's Voltage Law                       |
| P     | Proportional                                  |
| PI    | Proportional Integrative Controller           |
| PID   | Proportional Integral Orantılı-İntegral-Türev |
| PSO   | Particle Swarm Optimization                   |
| SM    | Sliding mode                                  |
| SMC   | Sliding Mode Control                          |
| VSS   | Variable structure system                     |
| 2-SMC | Second Order Sliding Mode Control             |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1. PID denetleyici tasarımı .....              | 2  |
| Şekil 1.2. PSO konum değişimi.....                     | 4  |
| Şekil 1.3. Endüstriyel tank sistemleri .....           | 6  |
| Şekil 1.4. İkili-Tank .....                            | 7  |
| Şekil 1.5. Çatırdama etkisi .....                      | 10 |
| Şekil 3.1. DC motor sistemi .....                      | 18 |
| Şekil 3.2. DC motor SMC tasarımı .....                 | 25 |
| Şekil 3.3. DC motor PI tasarımı .....                  | 26 |
| Şekil 3.4. DC motor $K_p$ ve $K_i$ .....               | 26 |
| Şekil 3.5. İkili-Tank sistem şeması.....               | 27 |
| Şekil 3.6. Kontrol akış diyagramı.....                 | 35 |
| Şekil 3.7. İkili-Tank SMC denetleyici tasarımı.....    | 41 |
| Şekil 3.8. Tank 1 FF-PI tasarımı .....                 | 41 |
| Şekil 3.9. Tank 2 FF-PI tasarımı .....                 | 42 |
| Şekil 3.10. Hata fonksiyon tasarımı.....               | 43 |
| Şekil 4.1. DC motor kare dalga referans takibi.....    | 44 |
| Şekil 4.2. DC motor SMC-PI hata.....                   | 45 |
| Şekil 4.3. DC motor sinüzoidal dalga formu yanıtı..... | 46 |
| Şekil 4.4. DC motor hata.....                          | 46 |
| Şekil 4.5. DC motor PI-referans .....                  | 47 |
| Şekil 4.6. DC motor SMC-referans .....                 | 48 |
| Şekil 4.7. DC motor SMC-PI testere dalga .....         | 48 |
| Şekil 4.8. DC motor SMC-PI hata.....                   | 49 |
| Şekil 4.9. DC motor basamak yanıtı.....                | 50 |
| Şekil 4.10. Tank 1 kare dalga FF-PI, SMC.....          | 51 |
| Şekil 4.11. Tank 1 kare dalga hata .....               | 52 |
| Şekil 4.12. Tank 1 sinüzoidal dalga yanıtı.....        | 52 |
| Şekil 4.13. Tank 1 sinüzoidal dalga hata .....         | 53 |
| Şekil 4.14. Tank 2 kare dalga yanıt .....              | 53 |
| Şekil 4.15. Tank 2 kare dalga hata .....               | 54 |
| Şekil 4.16. Tank 2 sinüzoidal dalga takibi .....       | 54 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.17.</b> Tank 2 sinüzoidal dalga hata ..... | 55 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Tank 1 basamak yanıtı.....         | 55 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Tank 2 basamak yanıtı.....         | 56 |
| <b>Şekil 4.20.</b> 2-SMC, 1-SMC kare dalga .....      | 58 |
| <b>Şekil 4.21.</b> 1-SMC kontrol işareti.....         | 58 |
| <b>Şekil 4.22.</b> 2-SMC kontrol işareti.....         | 59 |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 3.1. İkili-Tank sistem değişkenleri ve sabitleri ..... | 28 |
| Çizelge 4.1. DC motor basamak yanıtı benzetim sonuçları.....   | 50 |
| Çizelge 4.2. DC motor kare dalga yanıtı.....                   | 50 |
| Çizelge 4.3. DC motor sinüzoidal dalga yanıtı .....            | 50 |
| Çizelge 4.4. Tank 1 basamak yanıtı benzetim sonuçları.....     | 55 |
| Çizelge 4.5. Tank 2 basamak yanıtı benzetim sonuçları.....     | 56 |
| Çizelge 4.6. Tank 1 kare dalga hata değerleri.....             | 56 |
| Çizelge 4.7. Tank 2 kare dalga hata değerleri.....             | 56 |
| Çizelge 4.8. Tank 1 sinüzoidal dalga hata değerleri.....       | 56 |
| Çizelge 4.9. Tank 2 sinüzoidal dalga hata değerleri.....       | 57 |
| Çizelge 4.10. Transfer fonksiyonu 1 benzetim sonuçları .....   | 58 |
| Çizelge 4.11. Transfer fonksiyonu 2 benzetim sonuçları .....   | 58 |

### 1. GİRİŞ

Doğrusal olmayan sistemlerden; endüstriyel tesislerde kullanılan proses işlemlerinden biri olan akışkan seviye tank sistemi ile elektromekanik sistemlerden doğru akım (DC) motor sistemi mühendislik alanında kontrol açısından önem arz eden ve mühendisler tarafından ilgiyle takip edilen çalışmalar haline gelmiştir.

#### 1.1. Endüstriyel Sistemlerde DC Motor

DC motor, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren bir güç aktüatörüdür. DC motor, geniş hız aralıklarının gerekli olduğu birçok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmıştır. Yüksek performanslı motor tahriklerinin geliştirilmesi, endüstriyel, çelik haddehaneler, elektrikli trenler ve robotik gibi diğer amaçlı uygulamalarda çok önemlidir (Bansal and Narvey 2013). DC motorların avantajı hız kontrolü olabilir. Hız kontrolü terimi, otomatik ve manuel olarak gerçekleştirilen hız değişimi anlamına gelir. DC motorlar, geniş aralıklı hız kontrolü için en uygundur ve bu nedenle birçok ayarlanabilir hız sürücüsünde kullanılmıştır (Kushwah and Patra 2014). Hız, armatür voltajıyla doğru orantılı ve kutuplar tarafından üretilen manyetik akı ile ters orantılı olduğundan ve armatür voltajının ve/veya alan akımının ayarlanması rotor hızını değiştirecektir (Kushwah and Patra 2014).

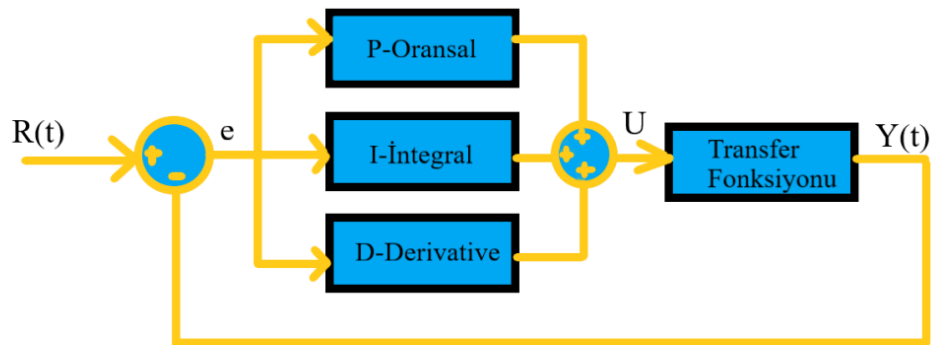
Genel olarak, yüksek performanslı bir motor sürücü sistemi, görevi yerine getirmek için iyi bir dinamik hız komut takibine ve yük düzenleyici yanıtı sahip olmalıdır. DC sürücüler, basitlikleri, uygulama kolaylıkları, yüksek güvenilirlikleri, esneklikleri ve uygun maliyetleri nedeniyle, motorun hız ve konum kontrolünün gerekli olduğu endüstriyel uygulamaların, robot manipülatörlerinin ve ev aletlerinin uzun süredir bel kemiği olmuştur (Bansal and Narvey 2013). DC motorlar, ayarlanabilir hızlı makineler olarak uzun bir kullanım geleneğine sahiptir ve bu amaç için çok çeşitli seçenekler geliştirilmiştir. Bu uygulamalarda motorun istenilen performansı vermesi için hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Çeşitli görevleri yerine getirmek için DC motorun hızını kontrol etmek amacıyla tasarlanan hız kontrolörleri, birkaç geleneksel ve sayısal kontrolör tipindedir. Kontrolörler şunlar olabilir: orantısız integral (PI), orantılı integral türevi (PID), Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO),

## 1. GİRİŞ

Kesirli Mertebeden Kontrol, Bulanık Mantık Denetleyicisi (FLC) veya bunların kombinasyonu: Bulanık-Sinir Ağları, Bulanık-Genetik Algoritma, Bulanık-Karınca Kolonisi, Bulanık-Swarm (Allaoua et al. 2009).

### 1.1.1. PID

Orantılı-İntegral-Türev (PID) kontrolör, proses kontrol uygulamaları için endüstrilerde yıllardır kullanılmıştır. Aynı zamanda PID denetleyicinin bazı dezavantajları da vardır; istenmeyen hız aşımı ve yük torkundaki ani değişimden kaynaklanan yavaş tepki ve kontrolöre olan hassasiyet  $K_i$  ve  $K_p$ 'yi kazanır. Bu kontrolörün performansı, sistem modellerinin ve parametrelerinin doğruluğuna bağlıdır. Kontrolör, proses kontrol girişini ayarlayarak hatayı en aza indirmeye çalışır. PID denetleyici hesaplaması (algoritması), orantısal (P), integral (I) ve türev (D) değerleri olarak adlandırılan üç sabit parametreyi içerir, bu değerler zaman açısından yorumlanabilir. P mevcut hataya, I geçmiş hatanın birikimine bağlıdır ve D, mevcut değişim oranına dayalı olarak gelecekteki hatanın bir tahminidir. Bu üç eylemin ağırlıklı toplamı, bir kontrol vanasının konumu veya bir ısıtma elemanına sağlanan güç gibi bir kontrol elemanı aracılığıyla süreci ayarlamak için kullanılır. PID kontrol parametrelerinin ayarlanması çok zordur, sağlamlık zayıftır bu nedenle fiili üretimde saha koşulları altında optimal duruma ulaşmak zordur (Arulmozhiyal and Kandiban 2012).



R(t): referans, e: hata fonksiyonu, u: kontrol işareti, Y(t): ölçülen değer

Şekil 1.1. PID denetleyici tasarımı

### 1.1.2. Genetik algoritma

Genetik Algoritma veya kısaca GA, doğal seleksiyon ve genetik ilkelerine dayanan stokastik bir algoritmadır. Genetik Algoritmalar (GA'lar), doğal evrim sürecini taklit eden stokastik bir küresel arama yöntemidir. GA, doğal seçim mekanizmalarına dayanan, stokastik bir küresel uyarlanabilir arama optimizasyon tekniğidir (Thomas and Poongodi 2009). GA, sistem parametrelerini temsil eden bir dizi kodlanmış kromozomu manipüle etmek için genetik operatörleri kullanarak bir parametre uzayında paralel bir arama gerçekleştirir. Başka bir deyişle, tek bir aramada tek bir yol yerine, genetik arama her yinelemede birden çok yolla gelir (Huang 1998). GA'nın çalışması, genetik operatörün uygulanacağı sayıların tabanına (çaprazlama, mutasyon, üreme, elitizm) bağlı olarak biraz değişir. Temel olarak GA üç ana aşamadan oluşur: seçim, çaprazlama ve mutasyon (Chambers 2000).

### 1.1.3. Parçacık sürü optimizasyonu

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), kuş sürüsünün sosyal davranışından esinlenen popülasyona dayalı stokastik bir optimizasyon tekniğidir. Bir grupta yaşayan doğal canlıların incelenmesinden kaynaklanan Sürü Zekası'na (SI) aittir. Her birey çok az bilgeliğe sahiptir veya hiç bilgeliğe sahip değildir ancak birbirleriyle veya çevredeki çevreyle etkileşime girerek grup olarak çok karmaşık görevleri yerine getirebilirler (Zhu et al. 2011).

PSO, hayali bir senaryoda iyi açıklanabilir: Bir grup kuş yiyecek aramak için bir alanda uçuyor ve bu alanda yalnızca bir parça yiyecek var. Gruptaki her kuş, yiyeceğin tam yerini bilmiyor, ancak yiyecekle kendileri arasındaki mesafenin farkındalar. Bu şekilde yiyeceği bulmanın en kolay yolu, yiyeceğe en yakın olanı takip etmektir (Zhu et al. 2011).

PSO algoritması söz konusu olduğunda, her biri bir konum ve hız ile ilişkilendirilmiş rastgele parçacıklardan oluşan bir popülasyonun başlatılmasıyla başlar. Hızlar, arama uzayında uçarken her parçacığın ve komşularının tarihsel davranışına göre ayarlanır. Pozisyonlar, mevcut pozisyona ve bir sonraki adımda hızlara göre güncellenir.





### 1.1.4. Bulanık mantık kontrol (FLC)

Literatürde doğrusal olmayan yapıya sahip Bulanık Mantık Kontrollerin (FLC) yüksek performans sağlayan, parametre değişimlerine karşı dayanıklı ve tasarım parametreleri iyi ayarlandığında bozulmalardan daha az etkilenen kontrol tekniklerinden biri olduğu gösterilmiştir. Ancak, geleneksel FLC'nin tasarım süreci, uzman bilgisine göre gerçekleştirildiğinden, sağlanan bilginin doğruluğu ve doğru uygulanması, FLC'nin tasarımı sırasında karşılaşılan önemli sorunlardır (Öztürk ve Çelik 2012). Bu nedenle, uzman tarafından sağlanan bilgilerin kontrolör performansı üzerinde önemli bir etkisi vardır (Öztürk ve Çelik 2012). Ayrıca bu tür geleneksel tasarım yaklaşımlarında tasarım süreci uzun zaman alır ve optimum kontrol garanti edilemez. Bu dezavantajlar FLC'lerin uygulama alanlarını sınırlar (Öztürk ve Çelik 2012).

### 1.1.5. Kesirli mertebeden kontrol

Kesirli mertebeden kontrol sistemleri, kesirli mertebeden diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Kesirli hesap, diferansiyel ve integrasyon operatörünün hem gerçek hem de karmaşık sayı güçlerini gerçekleştirme olasılığını inceleyen bir matematik dalıdır (Khubalkar et al. 2016). Kesirli hesabın temel tanımları entegratör ve türevlerin yaklaşıklığı literatürde açıklanmıştır (Monje et al. 2010; Das 2011; Petráš 2011; Mitkowski and Oprzedkiewicz 2015).

DC motorlar, ayarlanabilir hızlı makineler olarak uzun bir kullanım geleneğine sahiptir ve çok çeşitli seçenekler gelişmiştir. Bu uygulamalarda motorun istenilen performansı vermesi için hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerekir (Kushwah and Patra 2014). Genel olarak, gerçek bir DC motorun doğrusal olmayan doğru bir modelini bulmak zordur ve sistem tanımlamasından elde edilen parametre yalnızca yaklaşık değerler olabilir (Tipsuwan and Chow 1999). Tez çalışmasında DC motor sisteminin kontrolü için ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yöntemi tercih edilmiştir.

### 1.2. Endüstriyel Tank Sistemi

Endüstriyel tesislerde kullanılan akışkan tank sistemlerinde genel olarak amaç akışkanı tanklarda depolamak ve ihtiyaca göre başka bir tanka aktarılmasıdır. Akışkan belirli bir seviyede tutulmalıdır. Akışkan seviyesi, gereksinim olarak belirli yükseklikte tutulamazsa, şirkete veya sektörlere zarar verilebilir. Proses endüstrilerinde yaygın bir kontrol sorunu, depolama tanklarındaki ve kimyasal harmanlamadaki akışkan seviyesini kontrol etmektir. Akışkanın tankın içine ve dışına akışı, akışkanın sabit bir oranda sağlanacağı için sabit bir istenen akışkan seviyesine ulaşacak şekilde düzenlenmelidir. Akışkan seviye kontrolün; gıda işleme, içecek, süt ürünleri, filtrasyon, atık arıtma, nükleer enerji üretim tesisleri, ilaç endüstrileri, su arıtma sistemleri, endüstriyel kimyasal işleme, sprey kaplama, otomatik akışkan dağıtım ve ikmal cihazları gibi endüstriyel uygulamaları vardır (Pan et al. 2005). Tank sistemlerine örnek tesis Şekil 1.3'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



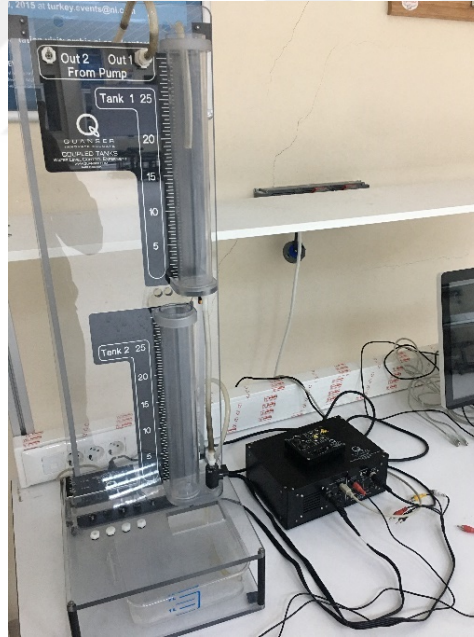
(d)

**Şekil 1.3.** Endüstriyel tank sistemleri

## 1. GİRİŞ

Akışkan seviye tank sisteminin tipik bir proses kontrol temsilcisi, İkili-Tank (Couple Tank, CT) akışkan seviye kontrol problemidir (Liang 2011). İkili-Tank, proses endüstrilerinde meydana gelen temel problemi temsil etmesi ve tasarlanan kontrolörlerin izleme performansını test etmek ve analiz etmek için bir kıyaslama problemi olması nedeniyle üzerinde çalışılması gereken önemli bir tesis modeli olarak kabul edilmiştir. Akışkan seviyesinin hassas bir şekilde kontrol edilmesi proses endüstrilerinde önemli bir görev olmuştur. Genellikle akışkanlar tanklara pompalanır, daha sonraki proses işlemleri için tanklarda depolanır ve birleştirilmiş tanklardan akar (Ramli et al. 2009).

Bu tez çalışmasında endüstriyel tesislerde kullanılan akışkan tank sisteminin tipik uygulaması olarak Quanser firmasının ürettiği Şekil 1.4’de gösterilen sistem kullanılmıştır. Kullanılan İkili-Tank sisteminde Tank 1 ve Tank 2’de istenilen akışkan seviyesine göre kontrol sağlanması ve istenilen seviyede akışkanın sabit tutulması amaçlanmıştır.



**Şekil 1.4.** İkili-Tank

Literatürde birçok çalışmada rapor edilen ikili tank sistemlerine çok sayıda doğrusal olmayan kontrol yöntemi uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında kontrol yöntemi olarak kayan kipli kontrol (SMC) tercih edilmiştir.

Tez çalışmasında ikinci dereceden SMC tekniği ile sistem için belirlenen kayma fonksiyonun türevi alınmıştır. Sistemin kontrol için önemli olan transfer fonksiyonu hesaplanmıştır. Kayan kipli kontrol için kontrol işareti, anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin toplamı olacak şekilde hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminin transfer fonksiyonu, Taylor serisi doğrusallaştırma yöntemi kullanılmıştır. Tez çalışmasında Tank 2 transfer fonksiyonu, sistemin giriş geriliminin akışkan seviyesine oranıyla belirlenmiştir. İkili-Tank sisteminin dinamik denklemleri, kayan kipli kontrol ile birleştirilerek sistem tasarlanmıştır.

### 1.3. Kayan Kipli Kontrol

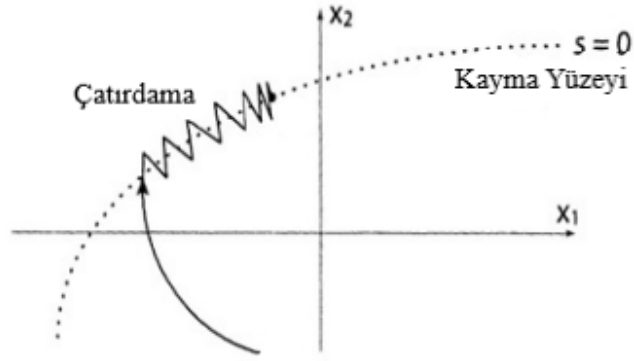
Fazla sayıda uygulaması bulunan doğrusal olmayan İkili-Tank sistemi ve DC motor için literatürde; geri adımlı kontrolör, bulanık mantık, kesirli derece, genetik algoritma gibi birçok farklı kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan DC motor ve İkili-Tank sistemi, kayan kipli kontrol (Sliding Mode Control, SMC) olarak bilinen geleneksel olmayan bir kontrol tekniği ile kontrol edilmiştir. Herhangi bir kontrol probleminin formülasyonunda, gerçek tesis ile kontrolör tasarımı için geliştirilen matematiksel model arasında tipik olarak farklılıklar olacaktır. Bu uyumsuzluk, modellenmemiş dinamik, sistem parametrelerindeki varyasyon veya karmaşık tesis davranışının basit bir modelle tahmin edilmesinden kaynaklanabilir. Mühendis, ortaya çıkan kontrolörün, bu tür tesis/model uyumsuzluklarına rağmen uygulamada gerekli performans seviyelerini üretme yeteneğine sahip olmasını sağlamalıdır (Edwards and Spurgeon 1998). Bu tez çalışmasında mühendisin model uyumsuzluğuna başa çıkması için kayan kipli kontrol önerilmiştir.

Kayan mod kontrolü, belirli bir değişken yapı kontrolü türüdür. Değişken yapı kontrol sistemleri, bir geri besleme kontrol yasaları paketi ve bir karar kuralı ile karakterize edilir. Anahtarlama fonksiyonu olarak adlandırılan karar kuralı, girdi olarak mevcut sistem davranışının bir ölçüsüne sahiptir ve çıktı olarak o anda kullanılması gereken belirli geri besleme kontrolörünü üretir (Edwards and Spurgeon 1998). Sonuç, her bir alt sistemin sabit bir kontrol yapısına sahip olduğu ve sistem davranışının belirli bölgeleri için geçerli olduğu alt sistemlerin bir kombinasyonu olarak görülebilecek değişken bir yapı sistemidir. Bu ek karmaşıklık sistemde dahil etmenin avantajlarından

biri, sistemin bileşik yapılarının her birinin faydalı özelliklerini birleştirme yeteneğidir. Ayrıca sistem, tek başına kompozit yapıların hiçbirinde mevcut olmayan yeni özellikleri işlemek üzere tasarlanabilir. Kayan kipli tasarım yaklaşımı iki bileşenden oluşur. Birincisi, kayma hareketinin tasarım özelliklerini karşılaması için bir anahtarlama fonksiyonunun tasarımını içerir. İkincisi, anahtarlama fonksiyonunu sistem durumuna çekici kılacak bir kontrol yasasının seçimi ile ilgilidir. Kayan kipli kontrol, Makine Mühendisliği, Robotik, Elektrik Mühendisliği, Kontrol Sistemleri, Ağ Mühendisliği vb. gibi Mühendisliğin çeşitli dallarında uygulamalara sahiptir (Azar and Zhu 2015). SMC'nin önemli yönü, sistem durumlarının kayma yüzeyinde kalmasını sağlayan bir anahtarlama işlevi kullanarak dış bozuculara veya belirsizliklere maruz kalan doğrusal olmayan bir dinamik sistemi kontrol etmektir (Edwards and Spurgeon 1995).

Kayan kipli kontrol, parametre değişimlerine ve bozulmalara karşı sağlamlığı, sürekli durum geri besleme yasaları ile kararlı hale getirilemeyen bazı doğrusal olmayan sistemleri kararlı hale getirme olasılığı gibi avantajlara sahiptir (Perruquetti and Barbot 2002). Ayrıca, kayan kipli kontrol (SMC) modelleme ve performans arasındaki ödünleşimlerin basit bir şekilde ölçülmesine izin vererek, tüm tasarım sürecini aydınlatılabilir (Azar and Zhu 2015). Tez çalışmasında kayan kipli kontrolcü sahip olduğu avantajlardan dolayı tercih edilmiştir.

SMC'nin birçok avantajının yanında istenmeyen çatırdama etkisi vardır. Çatırdama etkisi, SMC kontrol yönteminde kullanılan anahtarlama kontrol işaretinin sonucunda meydana gelen yüksek frekanslı dalgalanma SMC yönteminin dezavantajı olarak bilinmektedir. Çatırdama etkisinin ya da kontrol işaretindeki dalgalanmayı oluşturan başlıca neden, özellikle gerçek sistemlerde mevcut olan ve matematiksel olarak modellenemeyen belirsizliklerdir. Çatırdama etkisini azaltmak ya da ortadan kaldırmak için literatürde; sınırlı tabaka yöntemi, adaptif kazanç, gözlemci tabanlı çözüm, bozucu reddetme prosedürü, alçak geçişli frekans filtreleme, süper büküm (super twisting) gibi çeşitli yöntemler önerilmiştir. Çatırdama etkisi Şekil 1.5'de gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Çatırdama etkisi

Tez çalışmasında istenmeyen çatırdama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden SMC tekniği kullanılmıştır.

Kayan kipli kontrol için literatürde farklı tipte SMC teknikleri vardır. Bu çalışma kapsamında araştırmacı tarafından SMC tekniği olarak, ikinci dereceden kayan kipli kontrol tekniği kullanılarak sistem tasarlanmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel modeli çıkarılmıştır. Dinamik denklemler, kayan kipli kontrol ile birleştirilerek sistem tasarlanmıştır. Sistemin matematiksel modellenmesi, dinamik denklemlerinin çıkarımı, kontrol şemasının tasarlanması araştırmacı tarafından yapılmıştır ayrıca kayan kipli kontrol için parametreler ve kayma yüzeyi fonksiyonu araştırmacı tarafından belirlenmiştir. İkili-Tank sistemi için başka bir kontrol şekli olan ileri beslemeli PI denetleyicisi (FF-PI) ile sistem karşılaştırılmıştır.

Kayan kipli kontrol uygulanarak MATLAB-Simulink ortamında tasarlanmış olan doğrusal olmayan sistemlerin simülasyon ortamında ölçülen değer ile referans değer takibi ve ölçülen değer ile istenilen değer arasındaki hata tespiti incelenmiştir. Araştırmacı tarafından ikinci dereceden kayan kipli kontrol tekniği ile tasarlanmış olan sistemin ne ölçüde kontrol edilebildiği grafikler neticesinde gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında doğrusal olmayan sistemler için uygulanacak kontrol tekniği, kontrol şeması, dinamik denklemlerin çıkarımı, sistemlerin parametrelerinin belirlenmesi ve sistemin modellenmesi neticesinde elde edilen sonuçlar grafiksel incelenmiştir. Ayrıca tercih edilen ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yönteminin çatırdama etkisini ne ölçüde azaltabildiği grafiksel olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde, tercih edilen DC motor ve İkili-Tank sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca literatürde bu iki sistem üzerinde kullanılmış kontrol yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Tez çalışmasında kullanılmış olan SMC kontrol yöntemi ve neden tercih edildiği açıklanmıştır. SMC kontrol yönteminin avantajları ve dezavantajı olan çatırdama etkisinden kaçınılması için tercih edilen ikinci dereceden kontrol yöntemi hakkında bilgiler verilmiştir.

İkinci bölümde literatürde geçen kayan kipli kontrolün nasıl geliştiği, kullanılan sistemlerdeki etkisi, avantajları, tarihçesi, hangi sistemlerde kullanıldığı ve kullanılan kontrol yönteminde oluşan çatırdama etkisi için hangi kontrol yöntemlerinin tercih edildiğinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde İkili-Tank ve DC motor sistemlerinin matematiksel denklemlerinin nasıl çıkarıldığı, sistemlerinin çalışma prensibi, sistem parametreleri, kullanılan SMC kontrol yönteminin nasıl tasarlandığı, tercih edilen ikinci dereceden kayan kip yönteminin nasıl yapıldığı, SMC kontrol yönteminin farklı kontrol yöntemleri ile karşılaştırılabilmesi için FF-PI ve PI kontrol yöntemleri hakkında ve kontrol yöntemlerinin nasıl tasarlandığı hakkında açıklamalı bilgiler verilmiştir. Ayrıca elde edilen matematiksel denklemler ile sistem parametreleri dahil edilerek Matlab/Simulink ortamında tasarlanan iki sistemin modeli gösterilmiştir.

Dördüncü bölümde araştırmalar neticesinde iki sisteminin elde edilen kontrol sistemi grafiksel olarak incelenmiştir. SMC kontrol yöntemi ile FF-PI ve PI kontrol yöntemleri karşılaştırılmıştır. Sistemlerin hatası incelenmiştir. Ek olarak çatırdama etkisine ve bu etkinin giderilme durumu benzetim sonuçlarından elde edilen grafikler neticesinde incelenmiştir.



### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Kayma modu (SM) kontrolü kavramını tanıtan en eski yayınlanmış çalışmalar 1930'lara kadar izlenebilir ve SM kontrolünün en eski biçimleri gemi rota kontrolü ve DC jeneratörlerin kontrolü için uygulanmıştır (Utkin et al. 1999). Aslında, SM kontrolünün teori ve uygulamalarının geliştirilmesi ilk olarak Rus mühendisler tarafından başlatılmıştır ve 1950'lerde, daha sonra SM kontrolünün yaygın uygulamalarını kolaylaştıran teorik çerçeve Rus literatüründe bildirilmiştir (Utkin 1992; Edwards and Spurgeon 1998; Utkin et al. 1999).

Çalışma daha sonra Rusya dışında Itkis (1976) ve Utkin (1977) tarafından İngilizce yazılı el yazmalarında dağıtılmıştır. O zamandan beri, SM kontrol teorisi, dünya çapında kontrol teorisyenlerinden ve uygulamalı mühendislerden çok fazla ilgi uyandırmıştır. En basit ifadeyle, SM kontrolü, öncelikle değişken yapı sistemlerinin kontrolü için geliştirilmiş bir tür doğrusal olmayan kontrol olduğu görüşüne varılmıştır (Slotine and Li 1991; Utkin 1992; Edwards and Spurgeon 1998; Utkin et al. 1999; Perruquetti and Barbot 2002).

SMC tekniğinin temel özelliği, kapalı döngü sisteminin istenen dinamik özelliklerine göre durum uzayının bir anahtarlama yüzeyinin seçilmesidir. Anahtarlama mantığı ve dolayısıyla kontrol yasası, durum yörüngelerinin yüzeye ulaşması ve üzerinde kalması için tasarlanmıştır (Tan et al. 2018).

SM kontrol özelliklerine sahip bir sistemin ana avantajı, parametre belirsizliklerine karşı garantili kararlılık ve sağlamlığa sahip olmasıdır (Utkin et al. 1999). Ayrıca, tasarım seçimlerinde yüksek derecede esnekliğe sahip bir kontrol yöntemi olan SM kontrol yönteminin uygulanması, diğer doğrusal olmayan kontrol yöntemlerine kıyasla nispeten kolaydır. Bu özellikler, SM kontrolünü doğrusal olmayan sistemlerdeki uygulamalar için oldukça uygun hale getirir ve endüstriyel uygulamalarda, örneğin elektrik sürücüler, otomotiv kontrolü, fırın kontrolü, vb. geniş kullanımları hesaba katılmıştır (Edwards and Spurgeon 1998). Konu birçok makalede (Bilalovic 1983; Garcia et al. 1996; Alarcon 2001; Chan 2007), anketlerde (Ahmed et al. 2003) veya kitaplarda (Bock 2001; Cortes and Alvarez 2002; Fossas and Ras 2002) ele alınmış olmasına

rağmen, birçok çalışmanın (teorik veya çeşitli uygulamalarla ilgili) konusu olmaya devam etmiştir.

Belirsizlik varlığında kontrol, modern kontrol teorisinin ana konularından biri olmuştur. Herhangi bir kontrol probleminin formülasyonunda, gerçek tesis dinamikleri ile kontrolör tasarımı için kullanılan matematiksel modeli arasında daima bir tutarsızlık vardır. Bu tutarsızlıklar (veya uyumsuzluklar) çoğunlukla harici rahatsızlıklardan, bilinmeyen sistem parametrelerinden ve parazit dinamiklerinden kaynaklanır (Shtessel et al. 2014). Bu bozulmaların/belirsizliklerin varlığında istenen kapalı döngü sistem performansını sağlayan kontrol yasalarını tasarlamak bir kontrol mühendisi için çok zorlu bir iş olmuştur. Bu sorunu çözmesi beklenen kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine yoğun ilgiye yol açmıştır.

Sağlam uyarlamalı kontrolün (Sastry and Bodson 1994),  $H_\infty$  kontrolünün (Chen 2000) ve geri adım atma (Krstic et al. 1995) tekniklerinin kapsamlı ve başarılı gelişimine rağmen, kayan mod kontrolü (SMC) muhtemelen sınırlı belirsizlikleri/bozuklukları ve parazit dinamikleri ele almada en başarılı yaklaşım olmaya devam etmiştir (Utkin 1992; Edwards and Spurgeon 1998; Utkin et al. 1999).

Tarihsel olarak kayan modlar, değişken yapı sistemlerinde (VSS) özel bir mod olarak keşfedilmiştir. Değişken Yapı Sistemleri (VSS), 1950'den sonra Sovyetler Birliği'nde Popovski'nin (1950) ve Filippov (1960) süreksiz ikinci elemanlı diferansiyel denklemler üzerindeki çalışmalarından sonra tanıtılmıştır. VSS, Neymark (1957), Emelyanov et al. (1970) ve Utkin (1972) tarafından süreksiz dinamik sistemleri kontrol etmek veya süreksiz girdileri kabul etmek için kullanılmıştır. Değişken yapı sistemlerin denetleyici parametreleri, belirli koşullar altında, sistemin evrimini önceden seçilen bir hiper yüzeyde faz uzayında sürdürmeye izin vererek değişebilir (Derbel et al. 2017). Kapalı döngü sistemi, dikkate alınan hiperyüzey üzerinde kayan modda gelişmiştir (Derbel et al. 2017). Bu durumda sistem, dış etkenlere ve sistem parametrelerinin varyasyonlarına karşı duyarsız hale gelir (Lopez and Nouri 2006). Bu tip kontrol hem stabilizasyon hem de yörünge izleme problemlerinde kendini kanıtlamıştır (Emelyanov 1967; Utkin 1978; Lopez and Nouri 2006). Bu sistemlerin, uygun sistem performansı elde etmek için gerçek zamanlı olarak yapılar arasında geçiş yapmak için kuralları olan çeşitli

yapıları içerirken, tek bir sabit yapı kullanmak kararsız olabildiği paylaşılmıştır (Shtessel et al. 2014).

Bir kayan kipte (kısmi dinamik çöküş olarak adlandırılan) dengelenmiş sistemin indirgenmiş mertebeden dinamiğine ulaşmak da kayma kiplerinin çok önemli bir kullanışlı özelliği haline gelmiştir. Bu konuda İngilizce olarak yayınlanan ilk kitaplardan biri Flugge (1953)'dir. Literatüre bakıldığında bu fikirlerin gelişiminin 1950'lerin sonlarında Sovyetler Birliği'nde başladığı çıkarımı yapılmıştır.

SMC fikri, kayan değişken adı verilen "özel olarak tasarlanmış" bir fonksiyonun tanıtımına dayandırılmıştır. Düzgün tasarlanmış kayma değişkeni sıfıra eşit olur olmaz, kayma manifoldunu (veya kayma yüzeyini) tanımlamıştır (Shtessel et al. 2014). Kayan değişkenin uygun tasarımı, sistem yörüngeleri kayan manifolda aitken, uygun kapalı döngü sistem performansı sağladığı ileri sürülmüştür. SMC'nin fikri, sistemin yörüngesini uygun şekilde seçilmiş kayan manifolda yönlendirmek ve daha sonra kontrol vasıtasıyla manifold üzerinde hareketi sürdürmek, böylece kayan modun ana özelliklerinden yararlanılmıştır: kontrol ile eşleşen dış ve iç bozulmalara karşı duyarsızlığı, nihai doğruluk ve kayan değişkenlerin sıfıra sonlu zamanlı yakınsaması olduğu paylaşılmıştır (Shtessel et al. 2014).

Literatüre bakıldığında SMC hakkında İngilizce olarak iyi atıf yapılan ilk metin Itkis'e aittir ve 1976'da yayınlanmıştır (Itkis 1976). 1980 yılına gelindiğinde, SMC teorisindeki ana katkılar tamamlanmış ve daha sonra Utkin'in 1981 monografisinde (Rusça) ve müteakip İngilizce versiyonunda Utkin (1992)'de rapor edilmiştir. Kapsamlı bir inceleme DeCarlo et al. (1988)'de yayınlanmıştır. Bu yayınlardan daha sonraki çalışmalarda (Edwards and Spurgeon 1998; Utkin et al. 1999) sunulan gelişmiş sonuçlar olmuştur.

SMC tasarımı için iki aşamalı prosedür açıkça belirtilmiştir. İlk adım, kayan manifold üzerindeki sistem hareketinin (kayma hareketi olarak adlandırılır) tasarım özelliklerini karşılaması için bir anahtarlama fonksiyonunun tasarımı içerdiğiidir. İkinci adım ise dış ve iç bozukluklar/belirsizliklerin varlığında kayan manifoldu sistem

durumuna çekici kılacak bir kontrol yasasının seçimi ile ilgilidir. Bu kontrol yasasının mutlaka süreksiz olmadığı bilgisi paylaşılmıştır (Shtessel et al. 2014).

Literatürde SMC tabanlı gözlemciler, bir gözlemci tarafından çevrimiçi olarak açıkça yeniden oluşturulabilen, bilinmeyen harici bozuklukların varlığında sistem durumlarının tahminine izin verdiğine değinilmiştir.

Kontrol çatırdaması, SMC uygulamasını engelleyen bir sorun olmaya devam etmiştir. Kontrol çatırdamasını ele almak, ikinci dereceden kayma olarak adlandırılan ortaya çıkan ana konu olmuştur. Böylece, zaten olgunlaşmış olan geleneksel SMC teorisi, 1980'lerin ortasında önemli bir destek almıştır: yeni "ikinci dereceden" fikirler ortaya çıktığında Levant (1993) ve ardından 2000'lerin başında "yüksek dereceli" kavramlar ortaya çıktığında tanıtılmıştır (Levant 2001). Bu yeni paradigmaların tanıtımı aşağıdaki nedenlerle dikte edilmiştir:

1. Geleneksel kayan kip tasarım yaklaşımı, sistemin göreceli derecesinin kayan değişkene göre bire eşit olmasını gerektirir. Bu, kayan değişkenin seçimini ciddi şekilde sınırlayabilir.

2. Ayrıca, çoğu zaman, kayan modlu bir kontrolör, kaçınılması veya hafifletilmesi zor olan çatırdama etkisine yol açan yüksek frekanslı anahtarlama kontrol eylemi sağlar.

Kayan kipli kontrolörlerde çatırdama problemi ortadan kaldırmak amacıyla, literatürde sınır tabaka yönteminde (Slotine and Sastry 1983; Burton and Zinober 1986), adaptif kazançlarda (Dávila et al. 2010), gözlemci tabanlı bir çözümde (Cruz et al. 2010; Bejarano and Fridman 2011; Chen et al. 2013; Huang et al. 2014; Li et al. 2015), bozucu reddetme prosedüründe (Acary et al. 2011), alçak geçişli frekans filtreleme (Tseng and Chen 2010) gibi çeşitli stratejiler önerilmiştir. Daha yakın zamanlarda, süper büküm algoritması önerilmiştir (Shtessel et al. 2014).

Çatırdama fenomenini sınırlamak ve orijinal kayan mod yaklaşımının (sağlamlık, basitlik ve sonlu zamanlı yakınsama) ana avantajlarını korumak için, ikinci dereceden SMC (2-SMC) olarak adlandırılan yeni bir SMC algoritması sınıfı algoritması,

önerilmiştir (Levant 1993; Bartolini et al. 1999). 2-SMC yaklaşımı, kısıtlama fonksiyonunun ikinci türevine etki eden süreksiz bir sinyalin kullanılmasıyla karakterize etmiştir. Bu tekniğin benimsenmesi, kayan mod koşulunun oluşturulmasına izin verir ve aynı zamanda kayan değişken sıfıra yakınsadıkça kontrol eyleminin sürekli bir sinyale (süreksiz türevli) yakınsamasına izin vermiştir (Levant 1993; Bartolini et al. 1999). 2-SMC yapısıyla içsel olarak bağlantılı olan bu son özellik, çatırdama azalmasına ana katkı olmuştur (Damiano 2004).

Geleneksel SMC'nin bu zorlukları, yalnızca kayan değişkeni değil, aynı zamanda  $k - 1$  ardışık türevlerini de ( $k$ 'ninci dereceden kayan mod) sıfıra sürebilen yüksek dereceli kayan mod (HOSM) kontrolörleri tarafından azaltılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrık zamanda uygulandığında, HOSM, örnekleme süresinin  $k$ 'ninci gücüyle orantılı kayma doğruluğu sağlar, bu da HOSM'yi gelişmiş bir doğruluk sağlam kontrol tekniği yapmıştır (Shtessel et al. 2014).

Kayan manifoldun yalnızca  $k$ 'ninci türevi, yüksek frekanslı anahtarlama kontrol sinyaliyle orantılı olduğundan, anahtarlama genliği kayan manifold seviyesinde iyi bir şekilde zayıflatılır, bu da çatırdamayı önemli ölçüde azalttığı çıkarımına varılmıştır (Shtessel et al. 2014).

Yaklaşımın benzersiz gücü, Lebesgue ile ölçülebilir giriş gürültülerinin varlığında performansın asimptotik olarak optimal olduğu kanıtlanmıştır. HOSM farklılaştırıcıları, gelişmiş HOSM tabanlı gözlemcilerde, gözlemciler tarafından çevrimiçi olarak yeniden oluşturulan, bilinmeyen harici bozulmaların varlığında sistem durumunun tahmini için kullanılmıştır. Ayrıca HOSM tabanlı parametre gözlemciler de geliştirilmiştir.

Bir HOSM kontrolörünün yukarıda bahsedilen HOSM tabanlı farklılaştırıcı ile kombinasyonu, sağlam ve kesin bir çıktı geri besleme kontrolörü üretmiştir. Sistemin ayrıntılı matematiksel modellerine ihtiyaç olmadığından bahsedilmiştir. Rastgele pürüzsüzlük SMC'si, sistemin nispi derecesi yapay olarak artırılarak, çatırtı etkisini önemli ölçüde azaltarak elde edilmiştir. Örneğin, sürekli kontrol fonksiyonu, kontrol türevi açısından sanal kontrol SMC açısından tasarlanırsa elde edilebilir. Bu durumda,

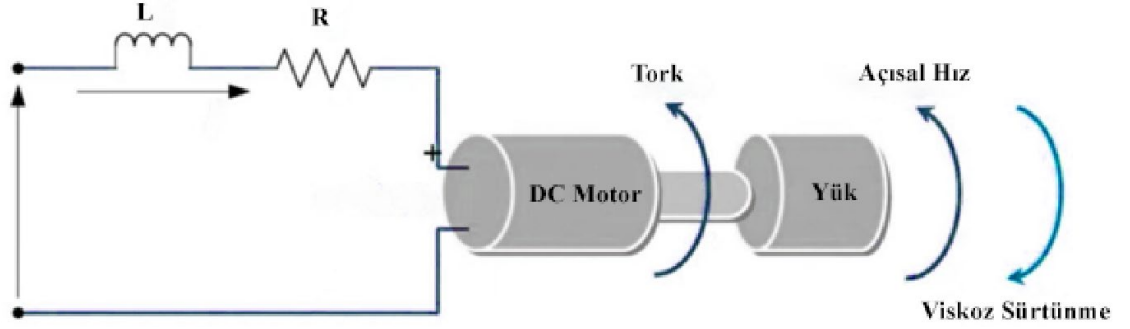
yüksek frekanslı anahtarlama fonksiyonunun integraline eşit olduğu için kontrol fonksiyonu sürekli olması gerekmiştir. Parazitik/modellenmemiş dinamikler durumunda, SMC işlevi daha düşük frekansla değişecektir. SMC'yi kontrol fonksiyonunun türevi cinsinden tasarlamak, çatırdama zayıflamasını sağlamıştır (Shtessel et al. 2014).

Geleneksel SMC ve HOSM kontrol ve gözlem tekniklerinin pratikliği, DC/DC ve AC/DC güç dönüştürücüleri, AC ve DC motorların ve jeneratörlerin kontrolü, uçak ve füze güdüm ve kontrolü ve robot kontrolünü içeren çok çeşitli uygulamalarla kanıtlanmıştır (Shtessel et al. 2014).



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. DC Motor



Şekil 3.1. DC motor sistemi

Elektriksel ve mekanik kısımdan oluşan DC motor sistemi Şekil 3.1’de verilmiştir.

DC motorun matematiksel modeli iki kısım üzerinden çıkarım yapılarak bulunmuştur.

Elektriksel kısımdan elde edilen ifade ile mekanik kısımda elde edilen akım ifadesi birleştirilerek transfer fonksiyonu hesaplanmıştır.

##### 3.1.1. Elektriksel kısım

DC motorun elektriksel kısmına Kirchhoff’un gerilim yasası (KVL) uygulanmıştır. Uygulanan KVL sonucunda denklem 3.1 çıkarılmıştır.

$$v_s(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} + emk(t) \quad (3.1)$$

DC motorun denkleminde  $emk$  zıt elektromotor kuvvet ( $emk$ ) olarak tanımlanmıştır. Zıt elektromotor kuvveti denklem 3.2’de verilmiştir.

$$emk = k_e w_m(t) \quad (3.2)$$

DC motor sistemin transfer fonksiyonunun hesaplanabilmesi için zamanla değişen akımın  $(\frac{di}{dt})$ , laplace dönüşümüne ihtiyaç duyulmuştur.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{e(t)}{L} - \frac{Ri(t)}{L} + \frac{v_s(t)}{L} \quad (3.3)$$

$$\frac{di}{dt} = -\frac{k_e w_m(t)}{L} - \frac{Ri(t)}{L} + \frac{v_s(t)}{L} \quad (3.4)$$

$$L\{\frac{di}{dt} = -\frac{k_e w_m(t)}{L} - \frac{Ri(t)}{L} + \frac{v_s(t)}{L}\} \quad (3.5)$$

Laplace dönüşümü yapılan denklem 3.4'te verilen akım değişiminin s düzlemindeki ifadesi denklem 3.6'da elde edilmiştir.

$$sI(s) = -\frac{k_e W_m(s)}{L} - \frac{RI(s)}{L} + \frac{V_s(s)}{L} \quad (3.6)$$

#### 3.1.2. Mekanik kısım

DC motor sisteminde hareketin sağlandığı mekanik kısmın tork ifadesi denklem 3.7'de verilmiştir.

$$T_e = k_f w_m(t) + \frac{Jdw_m}{dt} + T_L \quad (3.7)$$

Toplam tork ifadesinde  $k_f w_m$  sürtünme torku,  $\frac{Jdw_m}{dt}$  ise dönme torku olarak ifade edilmiştir.

DC motorun hareket elde edilebilmesi için sürtünme torku ( $k_f w_m$ ), dönme torku ( $\frac{Jdw_m}{dt}$ ) ve yük milini etkileyen ( $T_L$ ) torkun karşılanması gerekmektedir.



Toplam tork ( $T_e$ )  $i$  sabit bir vektörle sadece armatör akımıyla orantılı olduğu varsayılmıştır.

$$T_e = k_t i(t) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de verilen  $T_e$  tork ifadesi denklem 3.7’de yerine yazılmıştır. DC motor hız değişiminin Laplace dönüşümü alınmıştır.

$$\frac{dw_m}{dt} = i(t) \frac{k_t}{j} - \frac{k_f}{j} w_m(t) - \frac{T_L}{J} \quad (3.9)$$

$$L \left\{ \frac{dw_m}{dt} = i(t) \frac{k_t}{j} - \frac{k_f}{j} w_m(t) - \frac{T_L}{J} \right\} \quad (3.10)$$

$$sW_m(s) = I(s) \frac{k_t}{j} - \frac{k_f}{j} W_m(s) - \frac{T_L}{J} \quad (3.11)$$

S düzleminde elde edilen ifade denklem 3.12’de verilmiştir. Yük torku ( $T_L$ ) sıfır alınmıştır.

$$sW_m(s) = I(s) \frac{k_t}{j} - \frac{k_f}{j} W_m(s) \quad (3.12)$$

DC motor sisteminin mekanik kısmında yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilen akım ifadesi denklem 3.13’de verilmiştir.

$$I(s) = \frac{sW_m(s) + \frac{k_f W_m(s)}{j}}{\frac{k_t}{j}} \quad (3.13)$$

İki kısımdan oluşan DC motor sisteminin denklem 3.6’da elektriksel kısmında elde edilen ifade ile denklem 3.13’de mekanik kısımda elde edilen akım ifadesi birleştirilmiştir (denklem 3.14).

$$\left(s + \frac{R}{L}\right) \left( \frac{sW_m(s) + \frac{k_f W_m(s)}{j}}{\frac{k_t}{j}} \right) = -\frac{k_e}{L} W_m(s) + \frac{V_s(s)}{L} \quad (3.14)$$

### 3.1.3. DC Motor transfer fonksiyonu

DC motor sisteminin transfer fonksiyonu sistemin çıkışı yani DC motorun hızı ( $w_m$ ) ile sistemin girişi ( $v_s$ )' ye oranı ile hesaplanmıştır. Transfer fonksiyonun matematiksel işleminin elde edilebilmesi için elektriksel ve mekanik kısımda yapılan hesaplamalar neticesinde oluşturulan matematiksel model denklem 3.14 kullanılmıştır.

$$G(s) = \frac{W_m(s)}{V_s(s)} \quad (3.15)$$

Sistemin transfer fonksiyonu denklem 3.18'de ifade edilmiştir.

$$W_m(s)(S^2 L j + S L k_f + S R j + R k_f + k_e k_t) = V_s(s) k_t \quad (3.16)$$

$$\frac{W_m(s)}{V_s(s)} = \frac{k_t}{S^2 L j + S L k_f + S R j + R k_f + k_e k_t} \quad (3.17)$$

$$\frac{W_m(s)}{V_s(s)} = \frac{k_t}{S^2 L j + S(L k_f + R j) + R k_f + k_e k_t} \quad (3.18)$$

Denklem 3.18'deki transfer fonksiyonun paydasındaki  $Rj$ ,  $k_f L$ 'den ( $Rj \gg k_f L$ ) ve  $k_e k_t$ ,  $R k_f$ 'den ( $k_e k_t \gg R k_f$ ) matematiksel değer olarak çok büyük olduğundan  $R k_f$  ifadesi ile  $k_f L$  ifadesi önemsiz sayılmıştır.

$$G(s) = \frac{W_m(s)}{V_s(s)} = \frac{k_t}{S^2 L j + S R j + k_e k_t} \quad (3.19)$$

Transfer fonksiyonu elektriksel zaman sabiti ( $\tau_e = \frac{L}{R}$ ) ve mekanik zaman sabiti ( $\tau_m$ ) (denklem 3.23) oluşan ifade elde edilmesi için denklem 19'un pay ve paydası  $\frac{R}{k_e k_t} \frac{1}{R}$  ile çarpılmıştır.

$$\frac{R}{k_e k_t} \frac{1}{R} \quad (3.20)$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\frac{Rj}{k_e k_t} \frac{1}{R} S^2 + S \frac{Rj}{k_e k_t} + 1} \quad (3.21)$$

$$\tau_e = \frac{L}{R} \quad (3.22)$$

$$\tau_m = \frac{Rj}{k_e k_t} \quad (3.23)$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \tau_e S^2 + \tau_m S + 1} \quad (3.24)$$

#### 3.1.4. DC motor SMC kontrol yöntemi matematiksel modelleme ve tasarımı

Sistemin girişi  $v_s$  gerilimi,  $u_{eq}$  kontrol işaretine eşit olacak şekilde alınmıştır.

$$G(s) = \frac{\frac{1}{k_e}}{\tau_m \tau_e S^2 + \tau_m S + 1} = \frac{W_m(s)}{U(s)} = \frac{C_n}{S^2 + A_n S + B_n} \quad (3.25)$$

Eş değer kontrol işareti ( $u_{eq}$ ) elde edilebilmesi için ilk adım, denklem 3.25'deki ifade içler dışlar çarpımı olacak şekilde işlem yapılmıştır.

$$S^2 W_m(s) + A_n s W_m(s) + B_n W_m(s) = C_n U(s) \quad (3.26)$$

S düzlemindeki denklem 3.26 ifadesi zaman düzlemine dönüştürülmesi için ters Laplace dönüşümü yapılmıştır.

$$L^{-1}\{S^2W_m(s) + A_nsW_m(s) + B_nW_m(s) - C_nU(s)\} \quad (3.27)$$

$$w''(t) = -A_nw'(t) - B_nw(t) + C_nu(t) \quad (3.28)$$

Sistemin hatası, motorun referans açısal hızı ( $w_r(t)$ ) ile ölçülen açısal hızı ( $w_m(t)$ ) arasındaki fark olacak şekilde denklem 3.29'da verilmiştir.

$$e(t) = w_r(t) - w_m(t) \quad (3.29)$$

Literatür araştırmalarının neticesinde kayan kipli kontrol yönteminin en önemli aşamalarından biri kayma yüzeyinin belirlenmesidir. DC motor sistemi için kayma yüzeyi fonksiyonu sistemin hata fonksiyonu ve türevinden oluşacak şekilde denklem 3.30'da verilmiştir. Kayma yüzeyi ifadesindeki  $\lambda_c$  sabittir.  $\lambda_c$  ifadesi yazar tarafından benzetim sonuçlarından elde edilen çıktılar sonucunda belirlenmiştir.

$$s(t) = \left(\lambda_c + \frac{d}{dt}\right)^{n-1} e(t) \quad (3.30)$$

Kontrol işareti  $u$ , eş değer kontrol işareti ( $u_{eq}$ ) ile kayma yüzeyi fonksiyonundan oluşan anahtarlama kontrol işaretinin ( $u_{sw}$ ) toplamı olacak şekilde elde edilmiştir (denklem 3.31). Sistemin anahtarlama kontrol işareti ( $u_{sw}$ ) denklem 3.32'de verildiği gibi belirlenmiştir. Anahtarlama kontrol işareti  $k_{sc}$  sabiti, işaret fonksiyonu ve kayma yüzeyi fonksiyonu olacak şekilde belirlenmiştir.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (3.31)$$

$$u_{sw}(t) = \frac{k_{sc}}{c} \operatorname{sgn}(s(t)) \quad (3.32)$$

Sistemin çatırdama etkisini azaltmak için ikinci dereceden kayan kipli kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Tez çalışmasında önerilmiş olan ikinci dereceden kayan kipli yönteminin ilk aşaması kayma yüzeyi fonksiyonun türevi alınmıştır.

$$s(\dot{t}) = \lambda_c e(\dot{t}) + e(\ddot{t}) \quad (3.33)$$

Hata fonksiyonun ikinci dereceden türevi denklem 3.34’de verilmiştir.

$$e(\ddot{t}) = w_r(\ddot{t}) - w_m(\ddot{t}) \quad (3.34)$$

Denklem 3.35’deki ifade sistemin çıkışı yani DC motorun ölçülen motor hızıdır.

$$w_m(\ddot{t}) = w(\ddot{t}) = -A_n w(\dot{t}) - B_n w(t) + C_n u(t) \quad (3.35)$$

Denklem 3.34’deki ikinci dereceden hata fonksiyonu denklem 3.35 ile birleştirildiğinde denklem 3.36 elde edilmiştir.

$$e(\ddot{t}) = w_r(\ddot{t}) - \left( -A_n w(\dot{t}) - B_n w(t) + C_n u(t) \right) \quad (3.36)$$

Denklem 3.30’daki kayma yüzeyi fonksiyonunda, hata fonksiyonun yerine denklem 3.36’daki ifade yazıldığında denklem 3.37 elde edilmiştir.

$$s(\dot{t}) = \lambda_c e(\dot{t}) + w_r(\ddot{t}) - \left( -A_n w(\dot{t}) - B_n w(t) + C_n U(t) \right) \quad (3.37)$$

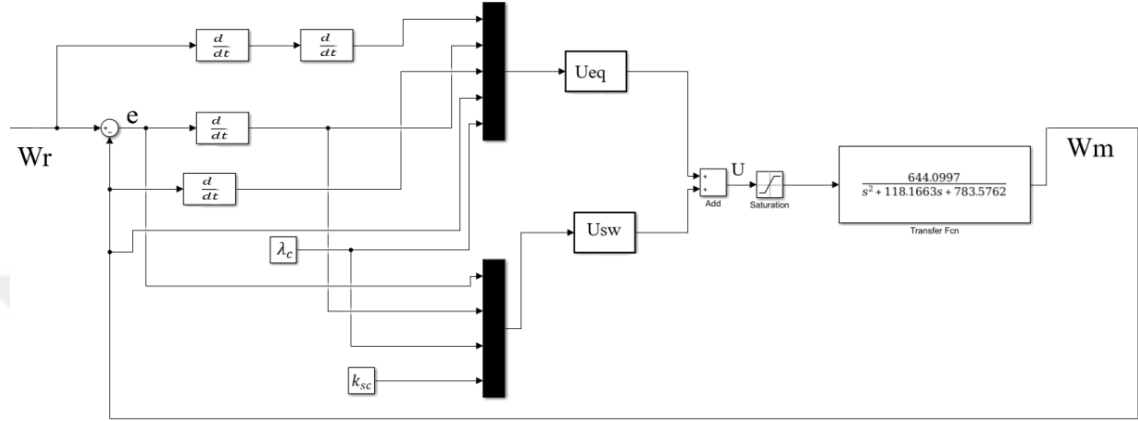
Sistemin hatasını sıfırlamak ya da sifıra yakın bir değer elde etmek için hata fonksiyonundan oluşan kayma yüzeyi ifadesi sifıra götürülmüştür.

$$0 = \lambda_c e(\dot{t}) + w_r(\ddot{t}) - \left( -A_n w(\dot{t}) - B_n w(t) + C_n u_{eq}(t) \right) \quad (3.38)$$

Eş değer kontrol işareti ( $u_{eq}(t)$ ) denklem 3.38’deki matematiksel ifadenin eşitliğin bir tarafında olacak şekilde denklem 3.39’de verildiği gibi elde edilmiştir.

$$u_{eq}(t) = \frac{1}{C_n} (w_r''(t) + A_n \dot{w}(t) + B_n w(t) + \lambda_c e(t)) \quad (3.39)$$

Matematiksel olarak sistemin elde edilen denklemler, sistemin modellenmesi için Matlab/Simülink ortamında kullanılmış ve tasarlanmıştır. Tasarlanan sistem Şekil 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.2. DC motor SMC tasarımı

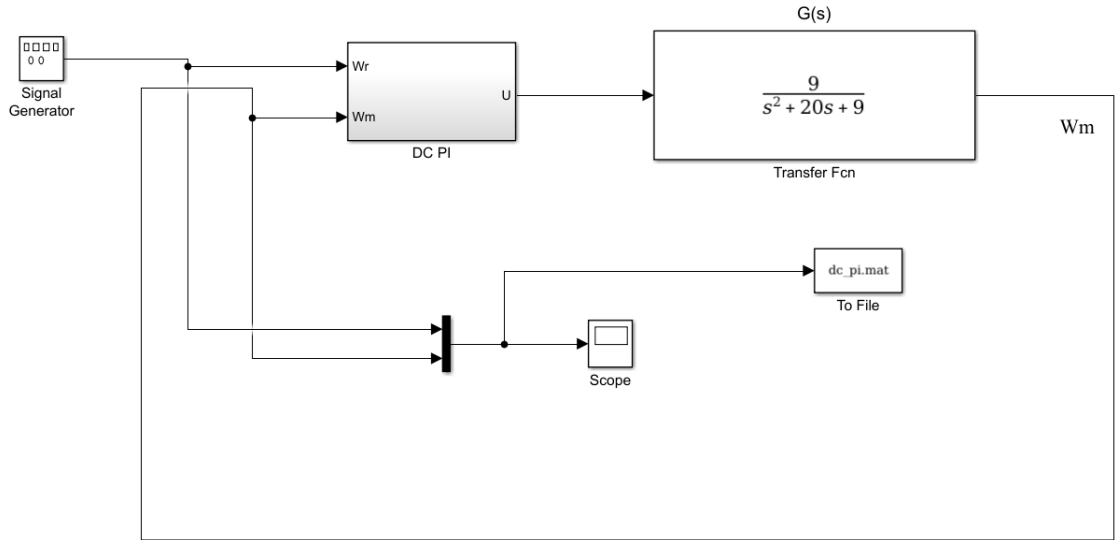
### 3.1.5. DC motor PI kontrol yöntemi

Tez çalışmasında DC motor sisteminde kullanılan SMC kontrol yöntemi ile yaygın kullanılan PI kontrol yöntemi karşılaştırılmıştır. Orantısal integral (PI) kontrol yönteminde oransal kazanç değeri  $K_p$  ile integral kazanç değeri  $K_i$  parametresi üzerinden gidilmiştir. Kontrol işareti  $u$ , denklem 3.40'da verilmiştir (Katsuhiko 2010).

$$U = k_i \int_0^t e(t) dt + k_p e(t) \quad (3.40)$$

Tasarlanan PI kontrol yöntemi Şekil 3.3'de verilmiştir. PI kontrol yöntemi için transfer fonksiyonu denklem 3.41 kullanılarak hesaplanmıştır (Katsuhiko 2010).

$$G(s) = \frac{W(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.41)$$

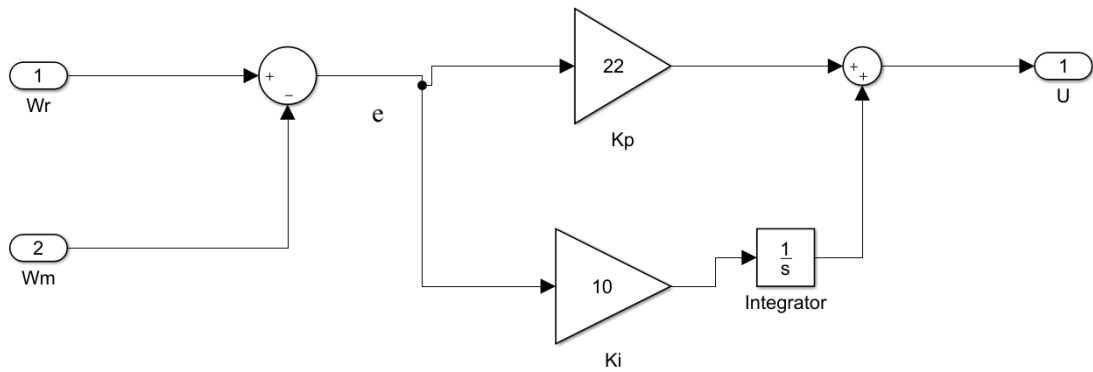


**Şekil 3.3.** DC motor PI tasarımı

Denklem 3.41'deki transfer fonksiyonunda  $\zeta$  sönüm oranını,  $\omega_n$  ise doğal frekansı temsil eder. Sistemin transfer fonksiyonu için  $\omega_n = 3$ ,  $\zeta = 3,33$  değerleri alınmıştır. Kullanılan değerler neticesinde transfer fonksiyonu denklem 3.42'de elde edilmiştir.

$$G(s) = \frac{9}{s^2 + 20s + 9} \quad (3.42)$$

Ayrıca sistemin oransal kazanç değeri  $K_p$  22 değeri, integral kazanç değeri  $K_i$  parametresi 10 değeri alınarak sistem kontrol edilmiştir.

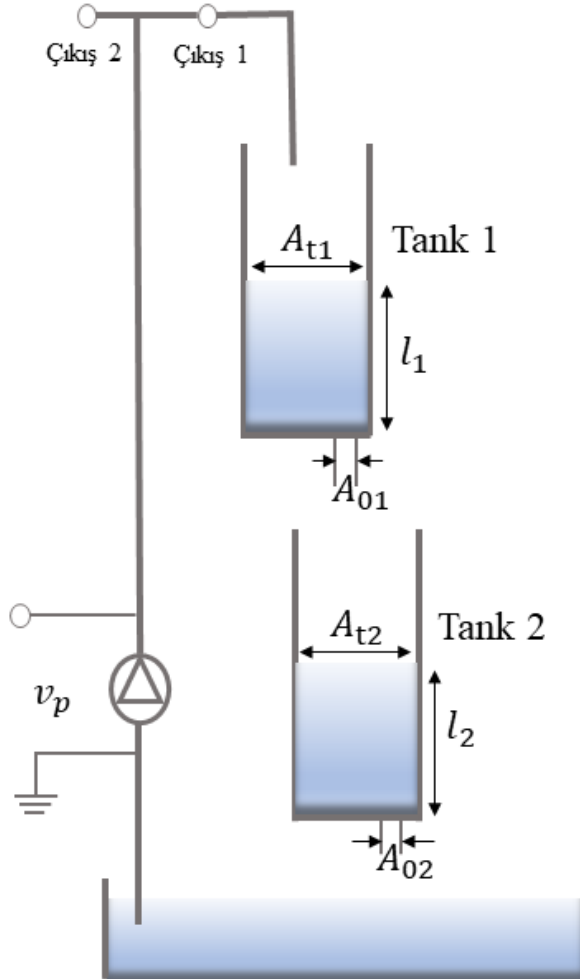


**Şekil 3.4.** DC motor  $K_p$  ve  $K_i$

#### 3.2. İkili-Tank Sistemi

Endüstri tesislerindeki akışkan seviye tank prosesinin tipik bir uygulaması olan İkili-Tank sistemi Şekil 3.5'deki gibidir. İkili-Tank sistemi bir pompa, iki tank ve bir depodan oluşur. İkili tank sistemi için Tank 1 ve Tank 2 olmak üzere 2 ayrı kontrole ihtiyaç duyulmuştur. Tank 1'in kontrolü, pompa vasıtasıyla Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması, Tank 2'nin kontrolü ise Tank 1 tarafından Tank 2'nin içerisine aktarılan akışkanın istenilen seviyede tutulması ile sağlanmıştır.

İkili tank sistemi için gerekli parametreler ve değerleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemin şeması Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. İkili-Tank sistem şeması



**Çizelge 3.1.** İkili-Tank sistem değişkenleri ve sabitleri

|           | Tanım                    | Değer    | Birim              |
|-----------|--------------------------|----------|--------------------|
| $v_p$     | Pompa Gerilimi           |          | V                  |
| $k_p$     | Pompa Sabiti             | 3,3      | $\frac{cm^3}{s.V}$ |
| $g$       | Yer Çekimi               | 981      | $cm/s^2$           |
| $l_{cs1}$ | Tank 1 Çalışma Seviyesi  | 15       | cm                 |
| $l_{cs2}$ | Tank 2 Çalışma Seviyesi  | 15       | cm                 |
| $l_1$     | Tank 1 Akışkan Seviyesi  | Değişken | cm                 |
| $l_2$     | Tank 2 Akışkan Seviyesi  | Değişken | cm                 |
| $A_{t1}$  | Tank 1 Kesit Alanı       | 15,5179  | $cm^2$             |
| $A_{t2}$  | Tank 2 Kesit Alanı       | 15,5179  | $cm^2$             |
| $A_{01}$  | Tank 1 Çıkış Kesit Alanı | 0,1781   | $cm^2$             |
| $A_{02}$  | Tank 2 Çıkış Kesit Alanı | 0,1781   | $cm^2$             |
| $q_{in1}$ | Tank 1 Giriş Debi        | Değişken | $cm^3/s$           |
| $q_{in2}$ | Tank 2 Giriş Debi        | Değişken | $cm^3/s$           |
| $q_{01}$  | Tank 1 Çıkış Debi        | Değişken | $cm^3/s$           |
| $q_{02}$  | Tank 2 Çıkış Debi        | Değişken | $cm^3/s$           |
| $v_{01}$  | Tank 1 Çıkış Hızı        | Değişken | cm/s               |
| $v_{02}$  | Tank 2 Çıkış Hızı        | Değişken | cm/s               |

**3.2.1. İkili-Tank matematiksel modelleme**

Tank sisteminde kullanılacak olan Tablo 1’de verilen  $l_{cs1}$  ve  $l_{cs2}$  için sistemden istenilen çalışma seviyesi olarak tanımlanmıştır. Hacimsel akış hızı olarak  $q$  harfi kullanılmıştır.

Tank 1 içerisine aktarılan akışkanın hızı denklem 3.43’de verilmiştir.

$$q_{in1}(t) = k_p v_p(t) \quad (3.43)$$

Tank 1 ve Tank 2’den çıkan akışkanın hız denklemi için Bernoulli denklemi kullanılmıştır. Tank 1 ve Tank 2’nin sırasıyla denklemleri denklem 3.44 ve denklem 3.45’de verilmiştir.

$$v_{01}(t) = \sqrt{2gl_1(t)} \quad (3.44)$$

$$v_{02}(t) = \sqrt{2gl_2(t)} \quad (3.45)$$

Denklem 3.44 ve denklem 3.45’de verilen Bernoulli denklemleri yardımıyla Tank 1 ve Tank 2’den çıkış yapan akışkanın debi denklemleri denklem 3.46 ve denklem 3.47’deki gibi elde edilmiştir.

$$q_{01}(t) = A_{01}\sqrt{2gl_1(t)} \quad (3.46)$$

$$q_{02}(t) = A_{02}\sqrt{2gl_2(t)} \quad (3.47)$$

Tank 1 ve Tank 2’deki akışkan seviyesinin değişimini veren denklemi elde etmek için süreklilik yasasından faydalanılmıştır. Burada akışkan sıkıştırılmaz (sabit yoğunluk) kabul edilmiştir. Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyesinin değişimi sırasıyla denklem (3.48) ve denklem (3.50)’de elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = \frac{q_{in1}(t) - q_{01}(t)}{A_{t1}} = \frac{k_p v_P(t)}{A_{t1}} - \frac{A_{01}\sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} \quad (3.48)$$

Tank 1’den çıkan akışkan debisi ile Tank 2’ye akan akışkanın debisi aynı olduğundan dolayı akışkanın debileri birbirine eşittir.

$$q_{01} = q_{in2} \quad (3.49)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = \frac{q_{in2}(t) - q_{02}(t)}{A_{t2}} = \frac{A_{01}\sqrt{2gl_1(t)}}{A_{t1}} - \frac{A_{02}\sqrt{2gl_2(t)}}{A_{t2}} \quad (3.50)$$

### 3.2.2. İkili-Tank sistem transfer fonksiyonu

Sistemlerin kontrol aşamalarından biri transfer fonksiyonun belirlenmesidir. Transfer fonksiyonu sistemin çıkışı ile girişin oranıyla bulunmuştur. İkili-Tank sistemi için Tank 1’in kontrolünde giriş pompa gerilimi, çıkış ise tutulması gereken akışkan

seviyesi olacak şekilde alınmıştır. Tank 2'nin kontrolü için giriş Tank 1'den Tank 2'ye aktarılan akışkan, çıkış ise Tank 2'de tutulması gereken akışkanın yüksekliği olacak şekilde belirlenmiştir. Bu çalışmada ek olarak Tank 2'nin transfer fonksiyonu giriş gerilimi ile Tank 2 akışkan seviyesinin oranıyla da belirlenmiştir.

Sistemin transfer fonksiyonu elde edebilmek için doğrusal olmayan tank sisteminin hareket denklemleri, durgun bir çalışma noktası etrafında karakterize ( $l_{cs}$ ) edilmiştir.

Doğrusal olmayan İkili-Tank sistemi, Taylor serisi yaklaşımıyla doğrusallaştırılabilir (Tijjani et al. 2017). Doğrusallaştırma yoluyla Tank 1 ve Tank 2 sistemlerinin denklemleri elde edilmiştir ve her iki tank için transfer fonksiyonu hesaplanmıştır.

Doğrusallaştırma denklem 3.51'de verilen Taylor serisi yardımıyla elde edilmiştir.

$$f(l) = f(l_0) + (l - l_0)f'(l_0) + \dots + \frac{(l - l_0)^n}{n!} \cdot f^n(l_0) \quad (3.51)$$

Denklem 3.51'de verilen  $l_0$  kararlı durum çalışma noktası olarak alınmıştır.

Denklem 3.48'de ve denklem 3.50'de elde edilen matematiksel hesabı kolaylaştırmak için sabitler sırasıyla denklem 3.52 ve denklem 3.53'deki gibi tanımlanmıştır.

$$x_1 = \frac{-A_{01}}{A_{t1}} \sqrt{2g}, y_1 = \frac{k_p}{A_{t1}} \quad (3.52)$$

$$x_2 = \frac{-A_{02}}{A_{t2}} \sqrt{2g}, y_2 = \frac{A_{01}}{A_{t2}} \sqrt{2g} \quad (3.53)$$

Denklem 3.52 ve denklem 3.53, sırasıyla denklem 3.48 ile denklem 3.50’de yerine yazıldığında Tank 1 sisteminin akışkan seviye değişimi denklem 3.54 ve Tank 2 sisteminin akışkan seviye değişimi denklem 3.55 elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1v_p(t) \quad (3.54)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)} \quad (3.55)$$

Denklem 3.51’de verilen Taylor denklemi Tank 1 ve Tank 2 için hesaplandığında sırasıyla denklem 3.56 ve denklem 3.57 elde edilmiştir.

$$\sqrt{l_1} \approx \sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1 - l_{cs1}) \quad (3.56)$$

$$\sqrt{l_2} \approx \sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2 - l_{cs2}) \quad (3.57)$$

Tank 1 ve Tank 2 akışkan seviyelerinin değişimleri, denklem 3.56 ve denklem 3.57’de elde edilen denklemler sırasıyla denklem 3.54 ve denklem 3.55’de yerine yazıldığında denklem 3.58 ve denklem 3.59 elde edilmiştir.

$$\frac{dl_1}{dt} = x_1\left(\sqrt{l_{cs1}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1})\right) + y_1v_p(t) \quad (3.58)$$

$$\frac{dl_2}{dt} = x_2\left(\sqrt{l_{cs2}} + \frac{1}{2\sqrt{l_{cs2}}}(l_2(t) - l_{cs2})\right) + y_2\sqrt{l_{cs1}} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}}(l_1(t) - l_{cs1}) \quad (3.59)$$

Kararlı durum şartları altında  $l_{cs1} = l_1$ ,  $l_{cs2} = l_2$  alınmıştır. Kararlı durumda denklem 3.58 ve denklem 3.59’ da  $l_{cs1} = l_1$ ,  $l_{cs2} = l_2$ ,  $v_{csp} = v_p$  yazıldığında denklem 3.60 ve denklem 3.61 elde edilmiştir.

$$0 = x_1\sqrt{l_{cs1}} + y_2v_{csp} \quad (3.60)$$

$$0 = x_2\sqrt{l_{cs2}} + y_2\sqrt{l_{cs1}} \quad (3.61)$$

Denklem 3.58'den, denklem 3.60 ve denklem 3.59'dan, denklem 3.61 matematiksel olarak çıkarma işlemi yapılmıştır. Yapılan çıkarma işlemi neticesinde Denklem 3.62 ve denklem 3.63 elde edilmiştir.

Denklem 3.62 ve denklem 3.63'de  $l'_1$ ,  $l'_2$  ve  $v'_p$  ifadeleri  $l'_1 = (l_1 - l_{cs1})$ ,  $l'_2 = (l_2 - l_{cs2})$ ,  $v'_p = (v_p - v_{csp})$  olarak alınmıştır.

$$\frac{dl'_1}{dt} = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}}l'_1(t) + y_1v'_p(t) \quad (3.62)$$

$$\frac{dl'_2}{dt} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}}l'_2(t) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}}l'_1(t) \quad (3.63)$$

Tank 1 için transfer fonksiyonu denklem 3.62 kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır.

$$L'_1(s)s = \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}}L'_1(s) + y_1V'_p(s) \quad (3.64)$$

$$G_1(s) = \frac{L'_1(s)}{V'_p(s)} = \frac{3,24}{15,237s + 1} \quad (3.65)$$

Tank 2 için transfer fonksiyonu denklem 3.63 kullanılarak Laplace dönüşümüyle hesaplanmıştır. Tank 2 sisteminin transfer fonksiyonu; çıkışın ( $l_2$ ) girişe ( $v_p$ ) oranı ile elde edilmiştir. İlk olarak denklem 3.63'ün türevi alınmıştır (denklem 3.66). Laplace dönüşümü yapılabilmesi için  $l'_1$  ifadesinin  $l'_2$  cinsinden çıkarımı yapılmıştır (denklem 3.68).

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} \frac{dl'_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} \frac{dl'_1}{dt} \quad (3.66)$$

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} \frac{dl'_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} \left( \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} l'_1(t) + y_1 v'_p(t) \right) \quad (3.67)$$

$$l'_1(t) = \frac{dl'_2}{dt} \frac{2\sqrt{l_{cs1}}}{y_2} - \frac{x_2}{y_2} l'_2(t) \quad (3.68)$$

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} \frac{dl'_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_{cs1}}} \left( \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} \left( \frac{dl'_2}{dt} \frac{2\sqrt{l_{cs1}}}{y_2} - \frac{x_2}{y_2} l'_2(t) \right) + y_1 v'_p(t) \right) \quad (3.69)$$

Denklem 3.68'deki  $l'_1$  ifadesinin  $l'_2$  cinsinden elde edilmiş hali denklem 3.67'de yerine yazıldığında denklem 3.70 elde edilmiştir.

$$\frac{d^2 l'_2}{dt^2} - \frac{dl'_2}{dt} \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} - \frac{dl'_2}{dt} \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} + \frac{x_1 x_2 l'_2(t)}{4l_{cs1}} = \frac{y_1 y_2 v'_p(t)}{2\sqrt{l_{cs2}}} \quad (3.70)$$

Denklem 3.70'deki ifadenin Laplace dönüşümü yapılmıştır. Dönüşüm neticesinde s düzleminde elde edilen ifadeden  $\frac{l'_2}{v'_p}$  oranı başka bir deyişle transfer fonksiyonu denklem 3.74'de elde edilmiştir.

$$s^2 L'_2(s) - L'_2(s) s \left( \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} + \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} \right) + \frac{x_1 x_2 L'_2(s)}{4l_{cs1}} = \frac{y_1 y_2 V'_p(s)}{2\sqrt{l_{cs2}}} \quad (3.71)$$

$$L'_2(s) \left( s^2 - \left( \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} + \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs2}}} \right) s + \frac{x_1 x_2}{4l_{cs2}} \right) = \frac{y_1 y_2 V'_p(s)}{2\sqrt{l_{cs2}}} \quad (3.72)$$

$$\frac{L'_2(s)}{V'_p(s)} = \frac{\frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_{cs2}}}}{s^2 - \left( \frac{x_2}{2\sqrt{l_{cs2}}} + \frac{x_1}{2\sqrt{l_{cs1}}} \right) + \frac{x_1 x_2}{4l_{cs1}}} \quad (3.73)$$

$$G_2(s) = \frac{L'_2(s)}{V'_p(s)} = \frac{13.9 \cdot 10^{-3}}{s^2 + 0,1313s + 4,31 \cdot 10^{-3}} \quad (3.74)$$

Tez çalışmasında Tank 2 sistemi, denklem 3.74'deki 2. dereceden analitik transfer fonksiyonundan farklı olarak 1. dereceden transfer fonksiyonu üzerinden de incelenmiştir. Tank sisteminin akışkan seviyeleri ( $l_2, l_1$ ); istenen denge seviyesindeki küçük seviye artışlarının ( $l_{21}, l_{11}$ ) toplamı olacak şekilde hesaplanmıştır (denklem 3.75, 3.76).

$$l_2(t) = l_{cs2} + l_{21}(t) \quad (3.75)$$

$$l_1(t) = l_{cs1} + l_{11}(t) \quad (3.76)$$

$$G_{21}(s) = \frac{L_{21}(s)}{L_{11}(s)} = \frac{K_2}{\tau_2 s + 1} \quad (3.77)$$

Denklem 3.77'de verilmiş olan transfer fonksiyonunda  $K_2$  DC kazanç,  $\tau_2$  zaman sabiti olarak alınmıştır.  $K_2$  DC kazanç denklem 3.78'de,  $\tau_2$  zaman sabiti denklem 3.79'da verilmiştir. Çizelge 3.1'de verilmiş olan veriler doğrultusunda hesaplamalar yapılmış, denklem 3.80'de verilmiş olan transfer fonksiyonu elde edilmiştir.

$$K_2 = \frac{A_{01}\sqrt{l_{cs2}}}{A_{02}\sqrt{l_{cs1}}} \quad (3.78)$$

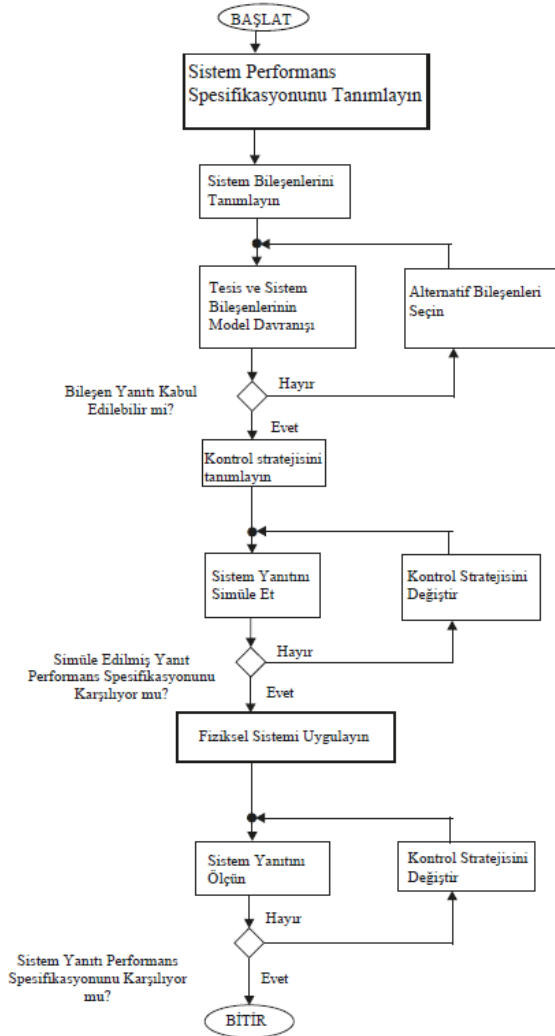
$$\tau_2 = \frac{A_{t2}\sqrt{2l_{cs2}}}{A_{02}g} \quad (3.79)$$

$$G_{21}(s) = \frac{1}{15.2368s + 1} \quad (3.80)$$

Her iki transfer fonksiyonu için sistem tasarlanmıştır. Bölüm 4’de tasarlanan sistemler karşılaştırılmıştır.

### 3.2.3. İkili-Tank SMC kontrol tasarımı

Kontrol sistemi tasarımı için tüm matematiksel denklemler ve bilgilerle geriye kalan tek şey sistemi tasarlamaktır. Özellikle sistemin dinamik özellikleri zamanla değişebileceğinden sabit bir kontrol stratejisi çalışmayacaktır. Kontrol sistemi için akış diyagramı Şekil 3.6.’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Kontrol akış diyagramı



Bu tez çalışmasında İkili-Tank akışkan seviye sisteminin kontrolü için kayan kipli kontrol uygulanmıştır. Kayan kipli kontrolde kayma yüzeyi fonksiyonu seçimi yapılmıştır. Ayrıca sistemin kontrolü için anahtarlama kontrol işareti ile eşdeğer kontrol işaretinin denklemi hesaplanmıştır. Sistemin kontrol işareti  $u$ , eşdeğer kontrol ile anahtarlama kontrol işaretinin toplamıdır (Eker 2010).

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (3.81)$$

#### 3.2.4. Tank 1 SMC kontrol denetleyici tasarımı

Kontrol tasarımında kayma yüzeyi ve hata fonksiyonu olmak üzere iki fonksiyon üzerinden gidilmiştir. Kayma yüzeyi sistemin derecesine göre hesaplanmıştır. Tank 1 için hata fonksiyonu, referans akışkan seviyesi ile ölçülen akışkan seviyesi arasındaki fark alınarak hesaplanmıştır.

$$e(t) = l_r(t) - l_1(t) \quad (3.82)$$

$$\dot{e}(t) = \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (3.83)$$

Kayan kipli kontrol için kayma yüzeyi fonksiyonu denklem 3.84' de belirlenmiştir.

$$s(t) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_c \right)^{n-1} \cdot e(t) \quad (3.84)$$

Sistemin hatasını sıfıra yaklaştırmak için kayma yüzeyi sıfıra götürülmüştür.

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.85)$$

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + \dot{l}_r(t) - \dot{l}_1(t) \quad (3.86)$$

Denklem 3.54’de verilen Tank 1 akışkan seviyesinin değişimi, denklem 3.86’ da yerine yazılmıştır.

$$s(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + l_r \dot{(t)} - (x_1 \sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (3.87)$$

$$y_1 v_p(t) = (\lambda_c \cdot e(t)) + l_r \dot{(t)} - x_1 \sqrt{l_1(t)} \quad (3.88)$$

Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti denklem 3.89’daki gibi hesaplanmıştır. Tank 1 için eşdeğer kontrol işareti ( $u_{eq1}$ ) sistemin girişi yani pompa gerilimine eşit olacak şekilde alınmıştır.

$$u_{eq1}(t) = \frac{(\lambda_c \cdot e(t)) + l_r \dot{(t)} - x_1 \sqrt{l_1(t)}}{y_1} \quad (3.89)$$

#### 3.2.5. Tank 2 SMC kontrol denetleyici tasarımı

Tez çalışmasında ikinci dereceden kayan kipli kontrol denetleyicisi (SMC) kullanılmıştır. Çalışmada önerilen bu yöntemin karşılaştırılması için geleneksel kayan kipli kontrol tasarımı da yapılmıştır. Geleneksel SMC kontrol 1-SMC olarak, ikinci dereceden SMC yöntemi 2-SMC olarak adlandırılmıştır. 2-SMC yönteminde çatırdama etkisinin giderilmesi amaçlanmıştır.

#### 3.2.6. Tank 2 geleneksel SMC kontrol tasarımı

Geleneksel SMC kontrol tasarımında kayma yüzeyinin türevi alınmadan işlem yapılmıştır. 1-SMC kontrol yöntemi kullanılarak kontrol işareti, denklem 3.84’de verilmiş olan kayma yüzeyi ifadesi ve hata fonksiyonu yardımıyla elde edilmiştir.

Denklem 3.90’da Tank 2 sisteminin hatası verilmiştir.

$$e(t) = l_r(t) - l_2(t) \quad (3.90)$$

$$\dot{e} = l_r(\dot{t}) - l_2(\dot{t}) \quad (3.91)$$

$$s(t) = e(\dot{t}) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.92)$$

Sistemin hatası sıfır olması arzulandığı ve kayma yüzeyi de hata fonksiyonundan oluştuğundan dolayı kayma yüzeyi sıfır olarak alınmıştır.

$$0 = e(\dot{t}) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.93)$$

$$0 = l_r(\dot{t}) - l_2(\dot{t}) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.94)$$

Denklem 3.55’de bulunan Tank 2 seviye değişimi denklemiyle denklem 3.93 birleştirildiğinde denklem 3.95 bulunmuştur.

$$0 = l_r(\dot{t}) - (x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)}) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.95)$$

Tank 2 sistemi için eşdeğer kontrol işaretinin elde edilebilmesi için  $\sqrt{l_1}$  ifadesi kullanılmıştır (denklem 3.96).

$$\sqrt{l_1(t)} = \frac{l_1(\dot{t}) - (y_1 u_{eq}(t))}{x_1} \quad (3.96)$$

$$0 = l_r(\dot{t}) - \left( x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2 \left( \frac{l_1(\dot{t}) - (y_1 u_{eq}(t))}{x_1} \right) \right) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.97)$$

Tank 2 sisteminin 1-SMC kontrol yönteminde kullanılmış olan eşdeğer kontrol işareti denklem 3.98’de verilmiştir.

$$u_{eq}(t) = \left( -\lambda_c \cdot e(t) - l_r(\dot{t}) + x_2\sqrt{l_2(t)} + \frac{y_2 l_1(\dot{t})}{x_1} \right) * \left( \frac{x_1}{y_1 y_2} \right) \quad (3.98)$$

**3.2.7. Tank 2 ikinci dereceden SMC yöntemi**

Tank 2 sistemi için ikinci dereceden kayan kipli denetleyici kullanılmıştır ve sistem bu doğrultuda tasarlanmıştır. Denklem 3.55’de verilen Tank 2 akışkan seviyesi, ikinci mertebeden türev olacak şekilde denklem 3.101’de elde edilmiştir.

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2(t)}} \cdot \frac{dl_2}{dt} + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot \frac{dl_1}{dt} \quad (3.99)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2}{2\sqrt{l_2}} \cdot (x_2\sqrt{l_2(t)} + y_2\sqrt{l_1(t)}) + \frac{y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot (x_1\sqrt{l_1(t)} + y_1 v_p(t)) \quad (3.100)$$

$$\frac{d^2 l_2}{dt^2} = \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \quad (3.101)$$

Giriş ve kaynak özetleri bölümünde anlatıldığı gibi çatırdama etkisinden kaçınmak için ikinci dereceden kayan kipli kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Sistem ikinci dereceden olacak şekilde modellendiğinden kayma yüzeyi ve hata fonksiyonlarının türevi alınmıştır.

$$e(t) = l_r(t) - l_2(t) \quad (3.102)$$

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda_c \cdot e(t) \quad (3.103)$$

$$s'(t) = \ddot{e}(t) + \lambda_c \cdot \dot{e}(t) \quad (3.104)$$

$$s(t) = \lambda_c \cdot \dot{e}(t) + \ddot{l}_r(t) - \ddot{l}_2(t) \quad (3.105)$$

Tank 2 sistemi için kayma yüzeyi ve hata fonksiyonlarından elde edilen ikinci dereceden denklemler, denklem 3.106’daki gibi birleştirilmiştir.

$$s(\dot{t}) = \lambda_c \cdot e(\dot{t}) + l_r(\ddot{t}) - \left( \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} + \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} \cdot v_p(t) \right) \quad (3.106)$$

İkinci dereceden Tank 2 sisteminin hatasını sıfır yapmak için kayma yüzeyinin türevi de sıfıra götürülmüştür.

$$v_p(t) \frac{y_1 y_2}{2\sqrt{l_1(t)}} = \lambda_c \cdot e(\dot{t}) + l_r(\ddot{t}) - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \quad (3.107)$$

Tez çalışmasının Tank 2 sisteminin ikinci derecen kayan kipli yönteminde (2-SMC) kullanılacak olan eşdeğer kontrol işareti denklem 3.109'de verilmiştir.

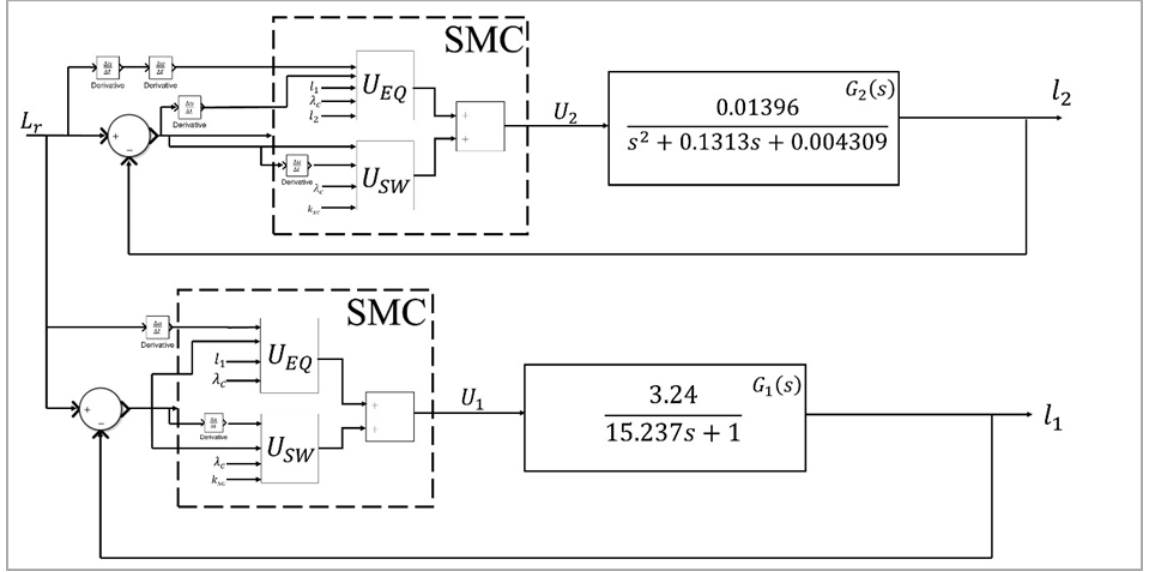
$$u_{eq2}(t) = \left( l_r(\ddot{t}) + (\lambda_c \cdot e(\dot{t})) - \frac{x_2 y_2 \sqrt{l_1(t)}}{2\sqrt{l_2(t)}} \right) \cdot \left( \frac{2\sqrt{l_1(t)}}{y_1 y_2} \right) \quad (3.108)$$

$$u_{sw}(t) = k_{sc} * sign(s(t)) \quad (3.109)$$

Tank 2 sisteminin kontrolünde kullanılmış olan diğer bir kontrol işareti denklem 109'da verilmiş olan anahtarlama kontrol işaretidir. Anahtarlama kontrolü için işaret fonksiyonu (*sign*) kullanılmıştır. İşaret fonksiyonu denklem 3.110'da verilmiştir.

$$sign(x) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x \geq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases} \quad (3.110)$$

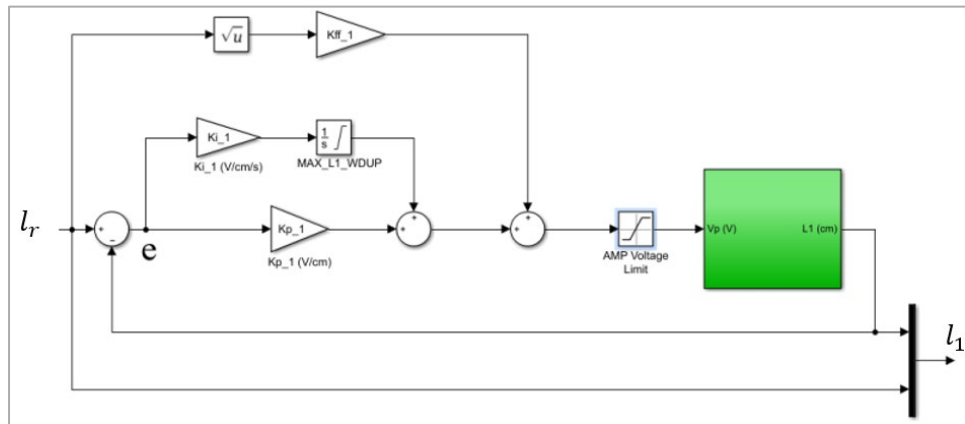
İkili-Tank sistemi elde edilen dinamik denklemler, matematiksel model, anahtarlama kontrol işareti, eşdeğer kontrol işareti ve transfer fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. İkili-Tank SMC denetleyici tasarımı

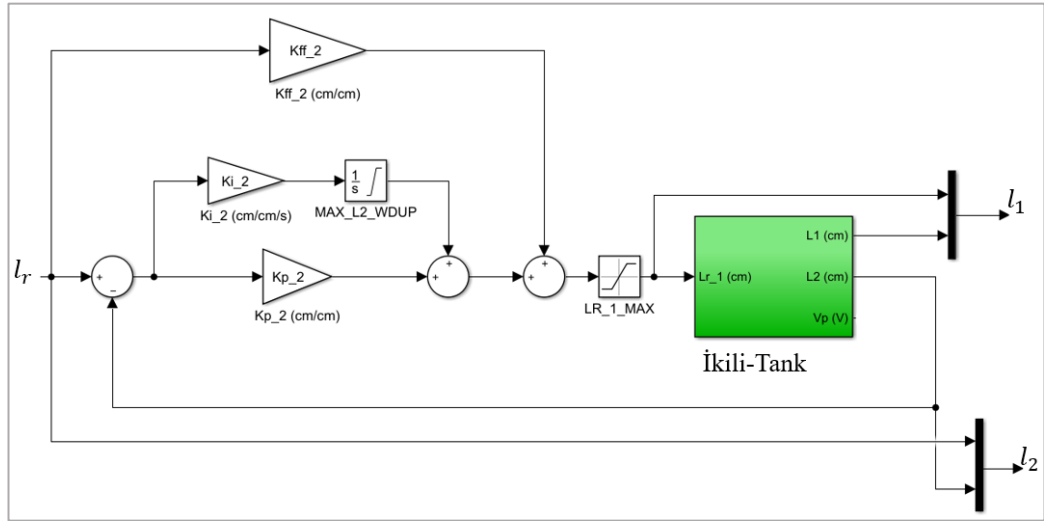
### 3.2.8. İkili-Tank FF-PI

İkili tank sisteminin kayan kipli kontrol yöntemi haricinde ileri beslemeli PI denetleyicisi ile karşılaştırılmıştır. İleri beslemeli PI kontrol yöntemi için Matlab/Simülink programında modellenen sistemin Tank 1 sisteminin tasarımı Şekil 3.8.'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Tank 1 FF-PI tasarımı

Tank 2 sistemi için kullanılan FF-PI model tasarımı Şekil 3.9.'da verilmiştir.



**Şekil 3.9. Tank 2 FF-PI tasarımı**

### 3.3. Hata Fonksiyonları

Sistemlerin kullanılan kontrol yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için hata fonksiyonları kullanılmıştır. Mutlak hataların toplamı (IAE), hataların karelerinin toplamı (ISE), ağırlıklı mutlak hataların toplamı (ITAE), ağırlıklı hataların karelerinin toplamı (ITSE) kriterlerine göre hata hesaplamaları yapılmıştır. Hata fonksiyonları denklem 3.111, denklem 3.112, denklem 3.113 ve denklem 3.114’de verilmiştir.

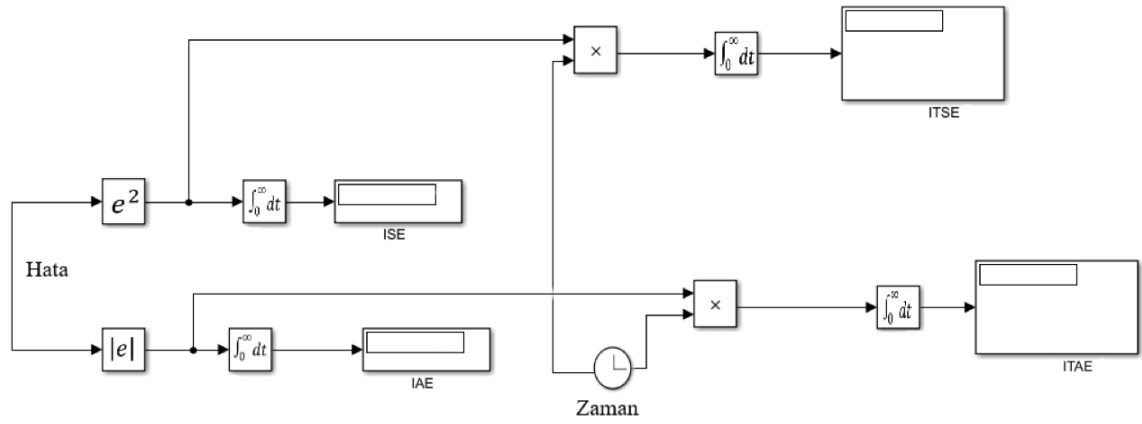
$$ISE = \int_0^\infty e^2 dt \quad (3.111)$$

$$IAE = \int_0^\infty |e| dt \quad (3.112)$$

$$ITSE = \int_0^\infty t e^2 dt \quad (3.113)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e|dt \quad (3.114)$$

Hata fonksiyonlarının simülasyon ortamında ölçülebilmesi için tasarlanan model Şekil 3.10.'da verilmiştir.



**Şekil 3.10.** Hata fonksiyon tasarımı

Tez çalışmasında SMC kontrol yöntemi ile tasarlanan DC motor ve İkili-Tank sistemi geleneksel kontrol yöntemlerinden oransal integral PI ve FF-PI kontrol yöntemleriyle bölüm 4'de dalga formlarına göre grafiksel olarak incelenmiş ve hata fonksiyonları kullanılarak kontrol yöntemleri her iki sistem dahilinde karşılaştırılması yapılmıştır.

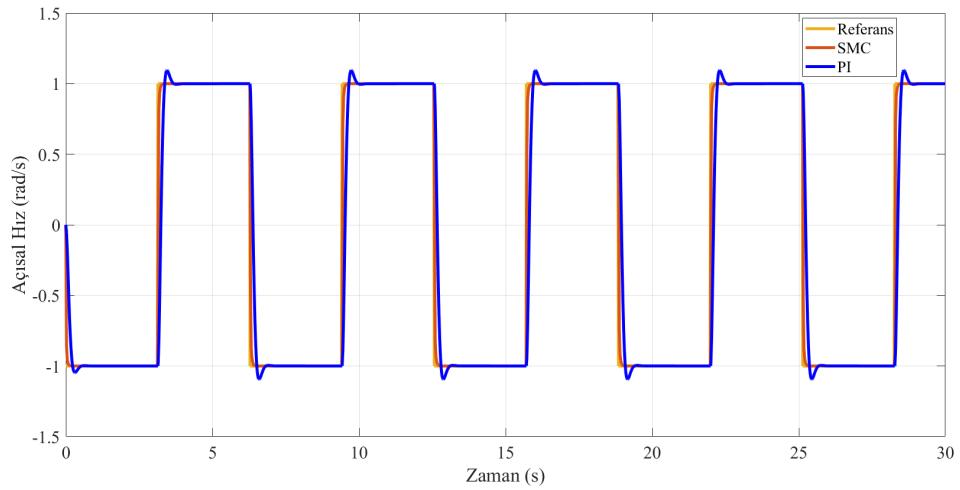


## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

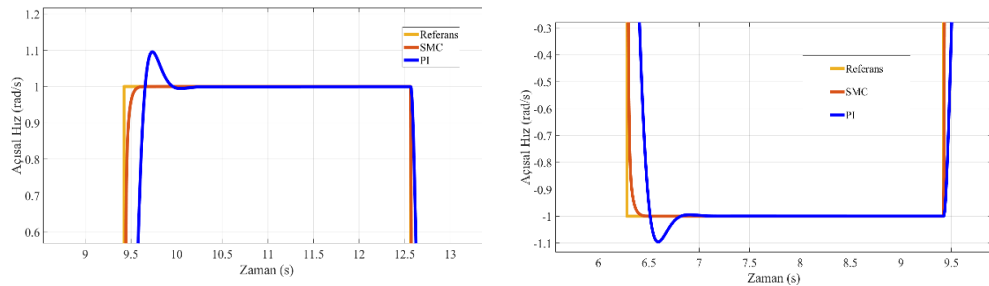
## 4.1. DC Motor Benzetim Sonuçları

DC motor sisteminin bu çalışma kapsamında elde edilen denklemler, matematiksel modellemeler, sistem parametreleri ve kontrol yöntemi olarak tercih edilen SMC kontrol ile tasarlanan sisteminin Matlab/Simulink ortamında ne kadar başarıyla sistemin kontrol edilebildiği grafiksel olarak farklı tipte dalga şekillerine göre incelenmiştir. Ayrıca sistem başka bir kontrol yöntemi olan PI denetleyiciyle karşılaştırılmıştır.

Sistemin kare dalga formuna göre referans hızın, SMC kontrol yöntemiyle sistemin çıktısı olan motor hızı ile PI kontrol yöntemiyle elde edilen motor hızının grafiksel sonucu Şekil 4.1.'de verilmiştir. Grafik neticesinde SMC kontrol yönteminin, PI yöntemine kıyasla referans sinyali daha iyi takip edebildiği sonucu çıkarılmıştır.



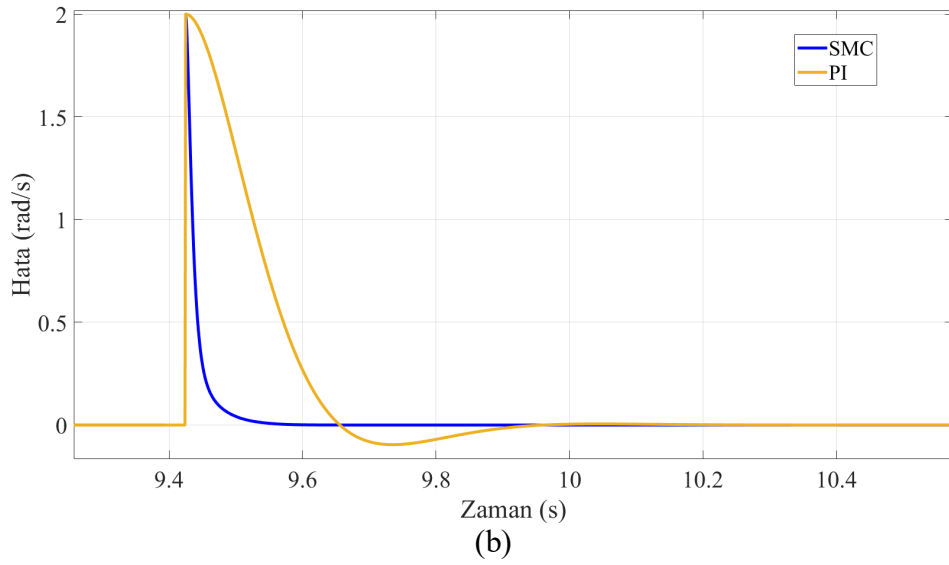
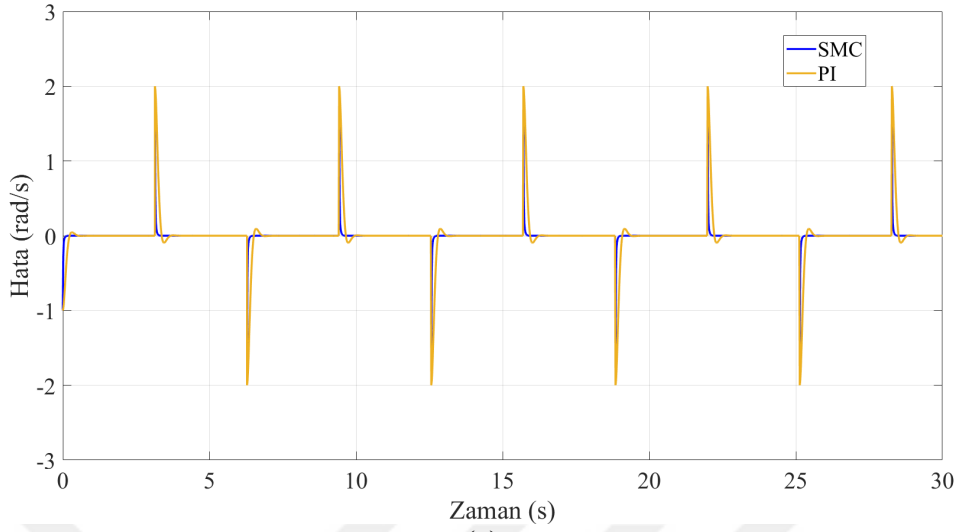
(a)



(b)

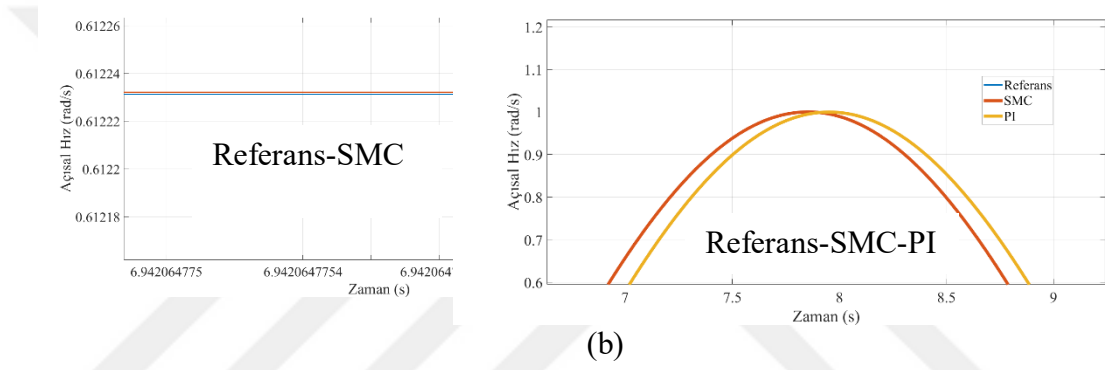
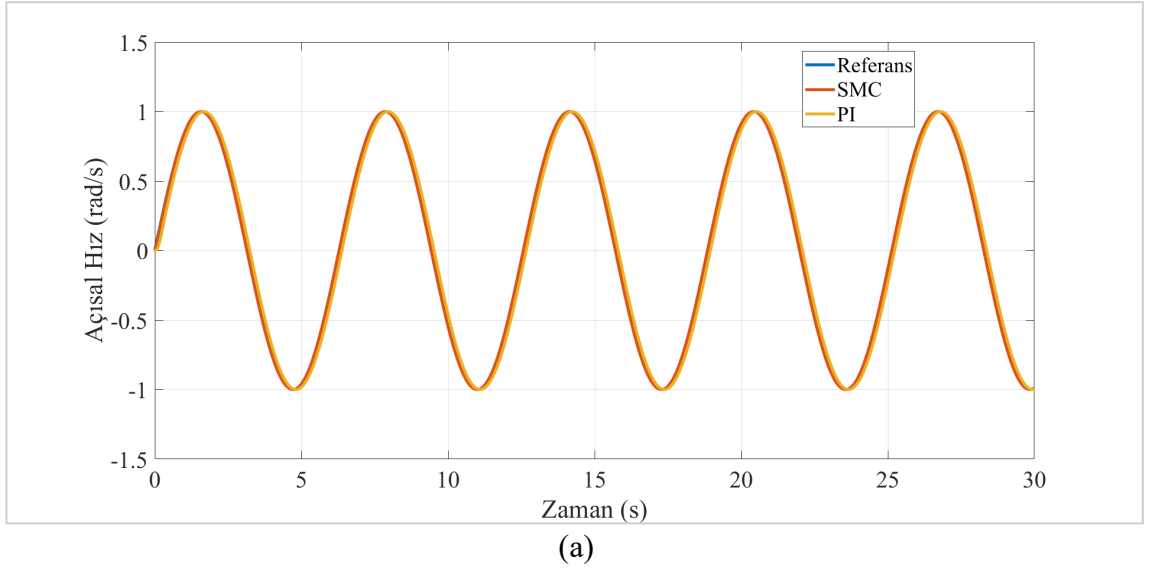
Şekil 4.1. DC motor kare dalga referans takibi

Sistem hatası her iki kontrol yöntemine göre Şekil 4.2’de verilmiştir.

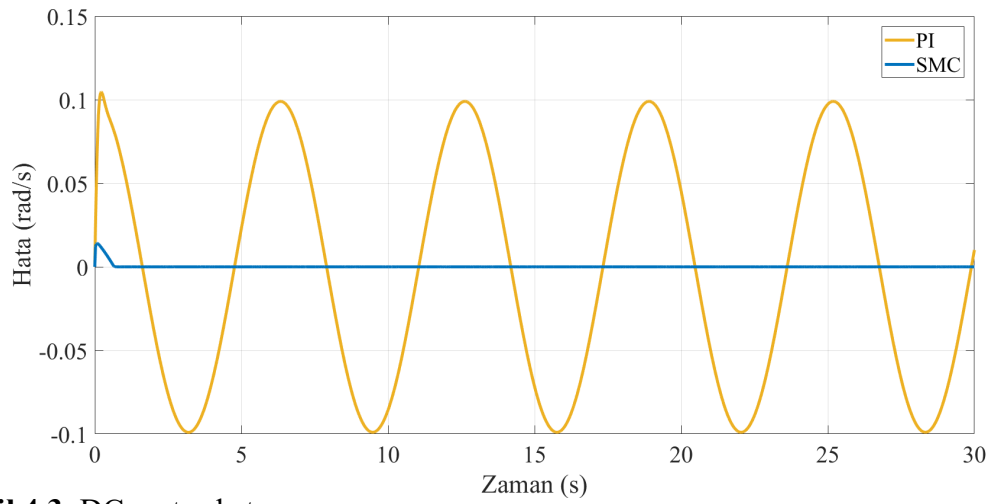


**Şekil 4.2.** DC motor SMC-PI hata

DC motor sisteminin sinüzoidal formuna göre yanıtı Şekil 4.3’de verilmiştir. Sistemi SMC kontrol yöntemi, PI kontrol yöntemine göre referans sinyali daha başarılı bir şekilde takip edebildiği sonucuna varılmıştır.

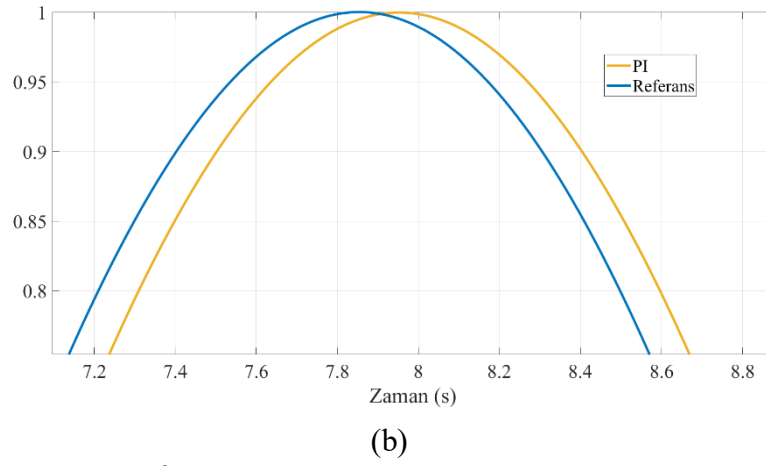
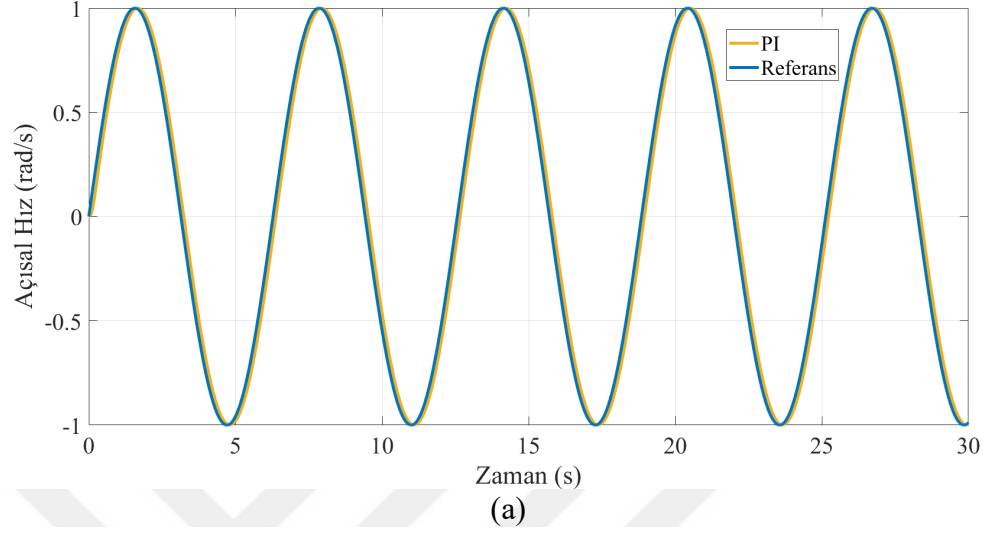


Şekil 4.4. DC motor sinüzoidal dalga formu yanıtı

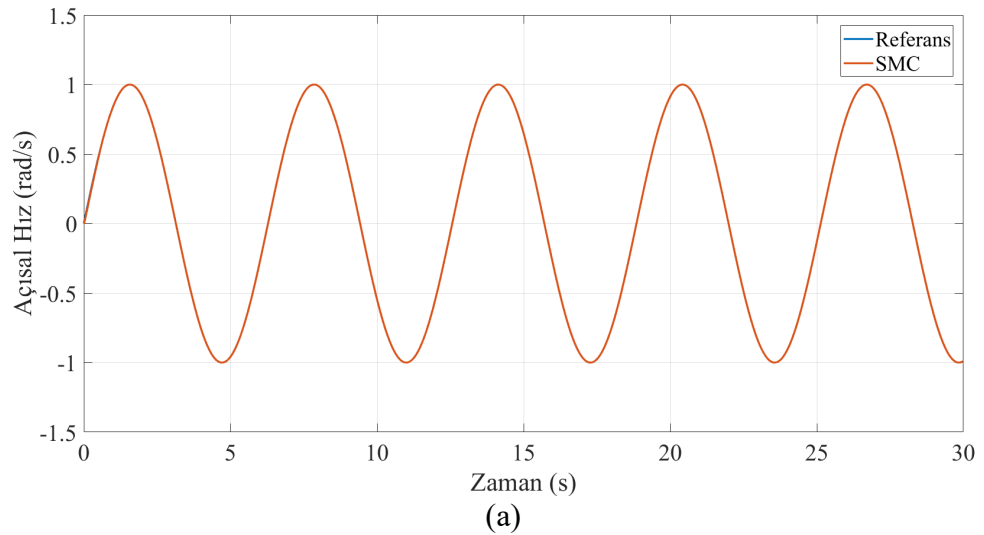


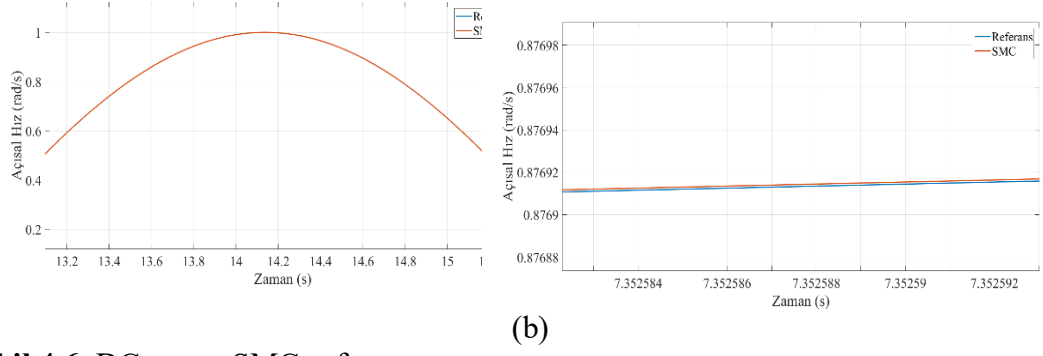
Şekil 4.3. DC motor hata

DC motor sisteminin kontrol yöntemlerine göre hatasız grafik olarak benzetim sonuçlarından Şekil 4.4'deki grafik elde edilmiştir. SMC kontrol yönteminde hata sıfırken, diğer kontrol yönteminde hata sıfırdan başka bir değer arasında değişmektedir.



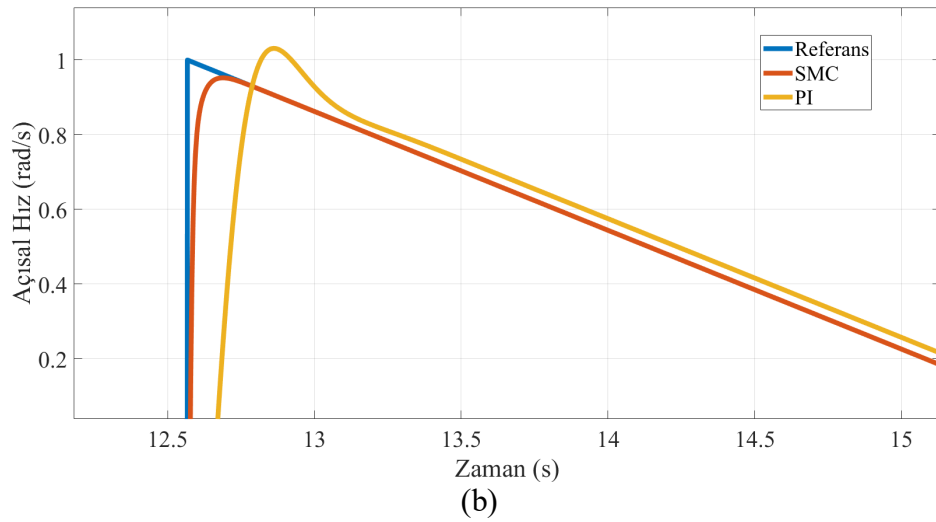
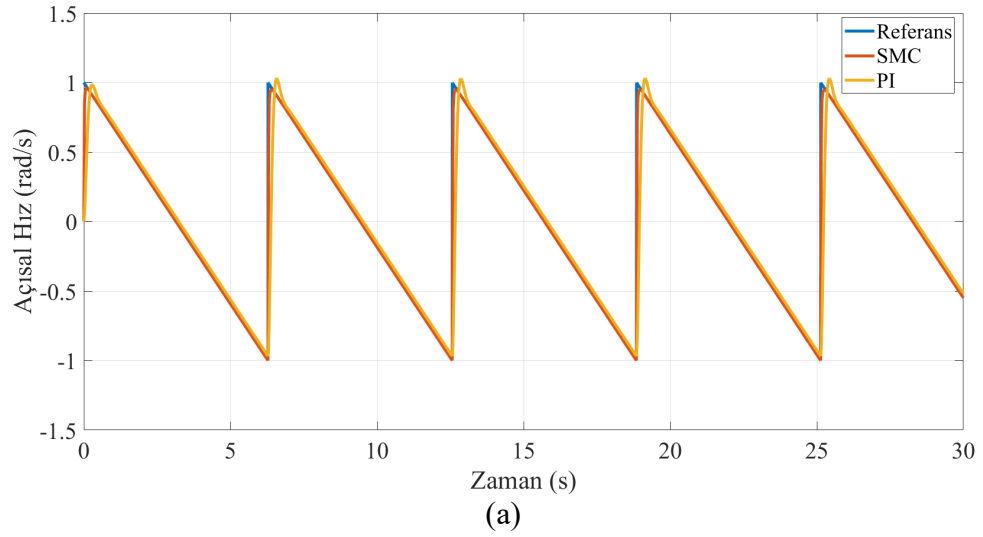
Şekil 4.5. DC motor PI-referans



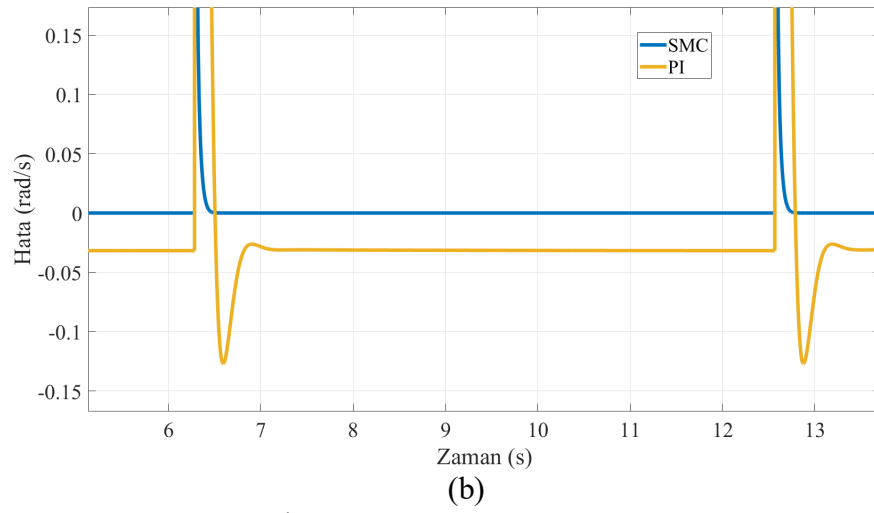
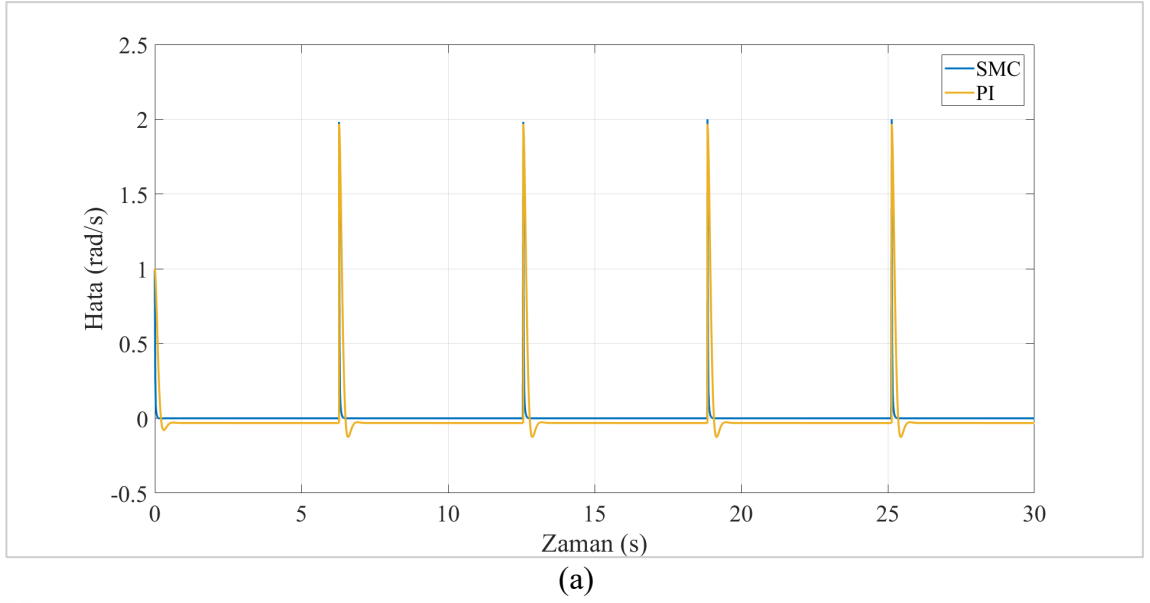


Şekil 4.6. DC motor SMC-referans

Sistem ayrıca başka bir dalga formu olan testere dişlisi dalga tipine göre incelenmiştir. Grafiksel olarak Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. DC motor SMC-PI testere dalga



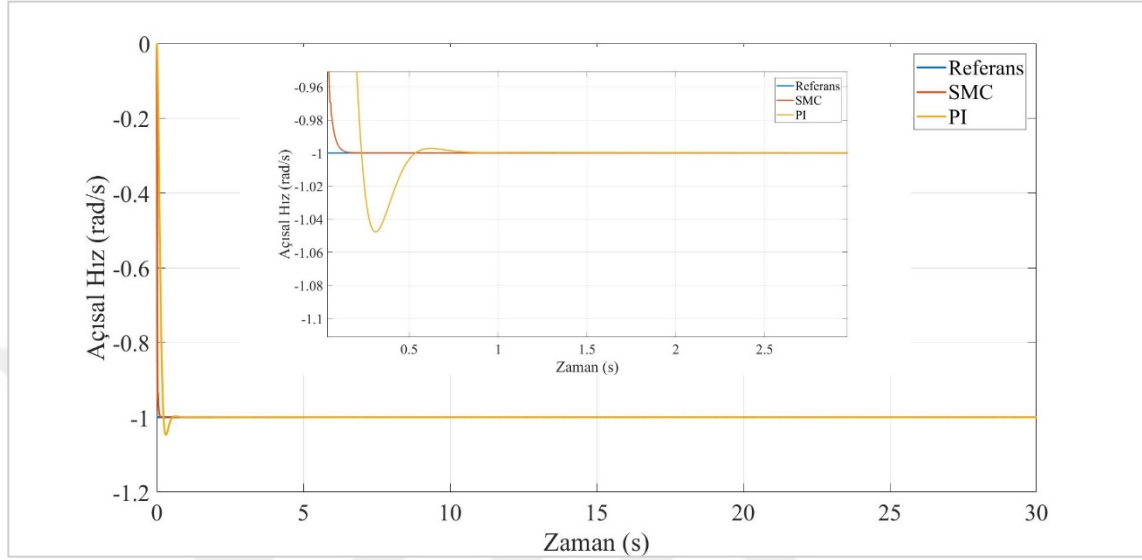
**Şekil 4.8.** DC motor SMC-PI hata

Sistemin testere dalga formuna göre tepkisinin, ne kadar hatayla kontrol altına alınabildiği Şekil 4.8’de verilmiştir.

DC motor sistemin de kullanılmış olan ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yöntemi ile PI kontrol yöntemi karşılaştırılması için hata fonksiyonları; mutlak hataların toplamı (IAE), hataların karelerinin toplamı (ISE), ağırlıklı mutlak hataların toplamı (ITAE), ağırlıklı hataların karelerinin toplamı (ITSE) kriterlerine ve yerleşim süresi ( $t_s$ ), maksimum tepe aşım değeri ( $M_p$ ) kullanılmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

İlk olarak sistemin basamak yanıtı tasarlanan SMC ve PI denetleyicilerine uygulanmıştır. Sistemin basamak yanıtına cevabı Şekil 4.9'da verilmiştir. Hata fonksiyonları, yerleşme süresi ve maksimum tepe aşım değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.9. DC motor basamak yanıtı

Çizelge 4.1. DC motor basamak yanıtı benzetim sonuçları

| Denetleyici | $t_s$ | $M_p$  | ITAE    | IAE     | ISE      | ITSE       |
|-------------|-------|--------|---------|---------|----------|------------|
| FF-PI       | 0,95  | 4,7686 | 0,01301 | 0,1153  | 0,07494  | 0,003744   |
| SMC         | 0,202 | 0,023  | 0,01934 | 0,01934 | 0,007014 | 0,00006659 |

DC motor sisteminde kullanılmış olan ikinci dereceden kayan kipli denetleyici ile PI kontrol yönteminin benzetim sonuçlarında elde edilen hata fonksiyon değerleri sinüzoidal dalga formu göre Çizelge 4.3'de, sisteme uygulanan kare dalga yanıtına göre Çizelge 4.2'deki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. DC motor kare dalga yanıtı

| Denetleyici | ITAE  | IAE    | ISE    | ITSE  |
|-------------|-------|--------|--------|-------|
| FF-PI       | 32,65 | 2,181  | 2,772  | 42,5  |
| SMC         | 6,274 | 0,4123 | 0,3794 | 5,847 |

Çizelge 4.3. DC motor sinüzoidal dalga yanıtı

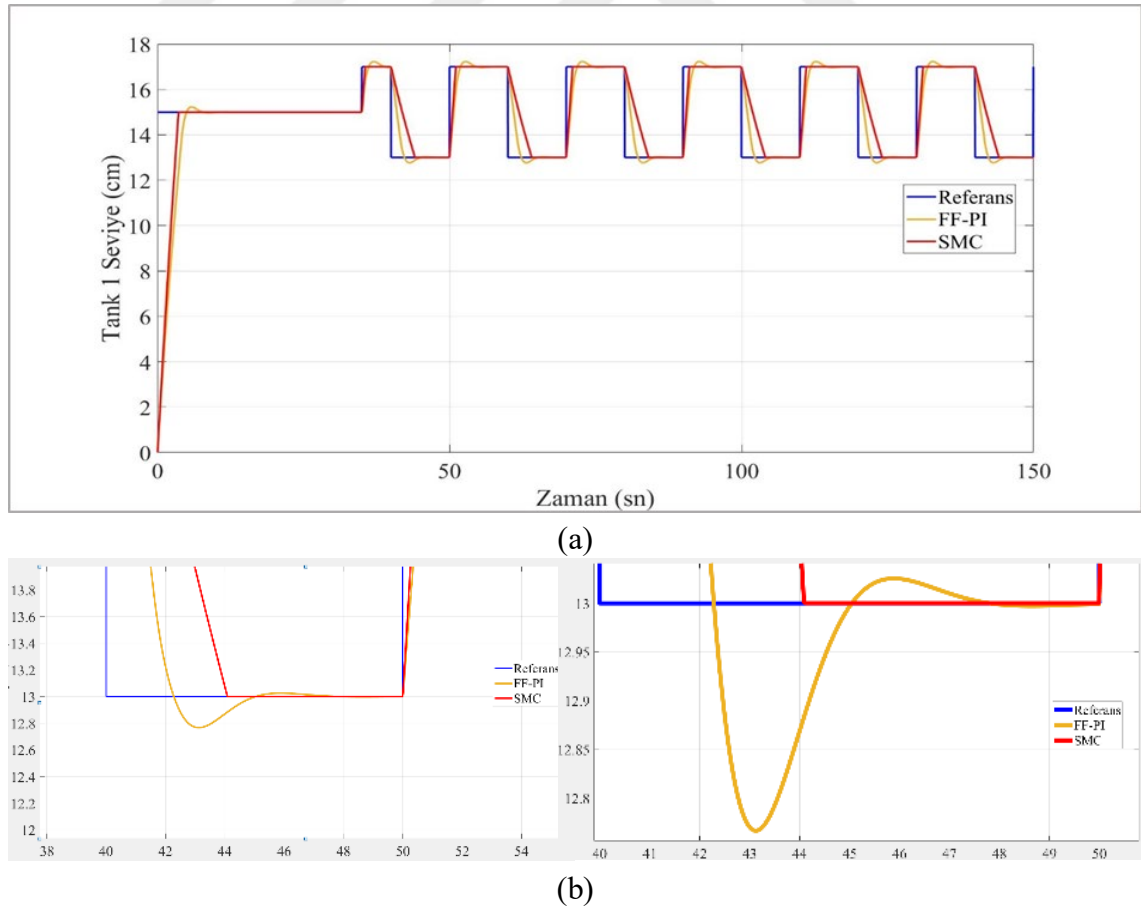
| Denetleyici | ITAE    | IAE      | ISE         | ITSE       |
|-------------|---------|----------|-------------|------------|
| FF-PI       | 28,17   | 1,882    | 0,1462      | 2,88       |
| SMC         | 0,07749 | 0,005161 | 0,000001382 | 0,00002076 |

## 4.2. İkili-Tank Benzetim Sonuçları

İkili-Tank sistemine uygulanan kayan kipli kontrol, Matlab/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçları ileri beslemeli PI kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. İkili-Tank sistemi için tasarlanan kayan kipli kontrol Tank 1 ve Tank 2 sistemleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Bu çalışmada kayan kipli kontrolün  $k_{sc}$  ve  $\lambda_c$  sabitleri benzetim sonuçlarından elde edilen sonuçlar neticesinde yazar tarafından belirlenmiştir. Belirlenmiş olan değerler sonucunda akışkan seviyesinin, referans sinyal takibi oldukça başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

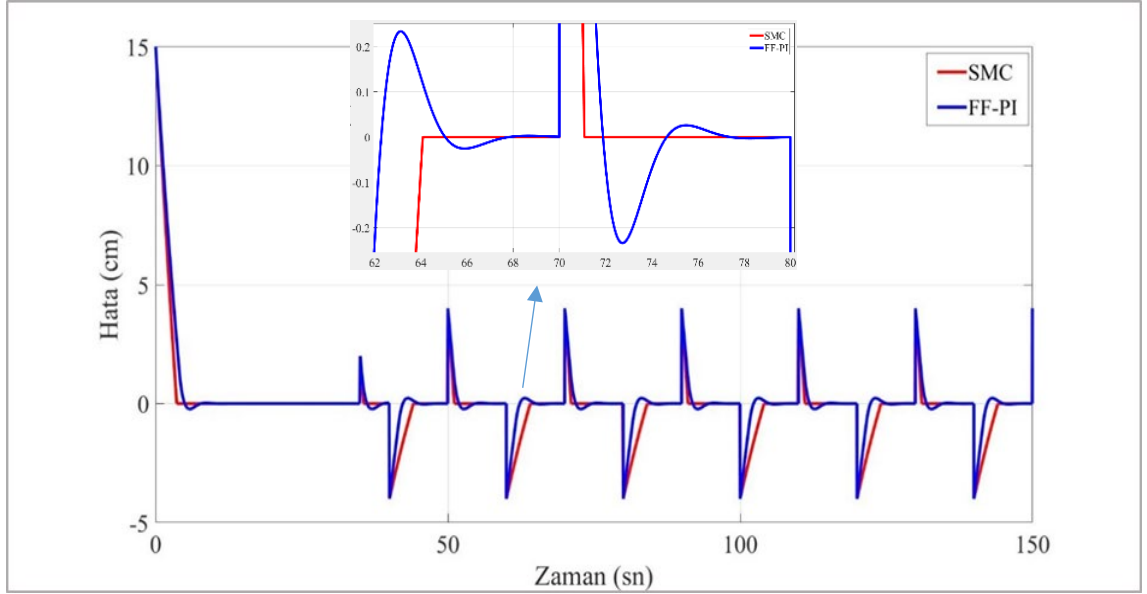
### 4.2.1. Tank 1 benzetim sonuçları

Kayan kipli kontrolcü ile tasarlanan Tank 1 sisteminin referans kare dalga sinyalini takibi ve ileri beslemeli PI kontrolcüyle tasarlanan sistemin benzetim sonuçları Şekil 4.10'da sistemin hatası Şekil 4.11'de verilmiştir.



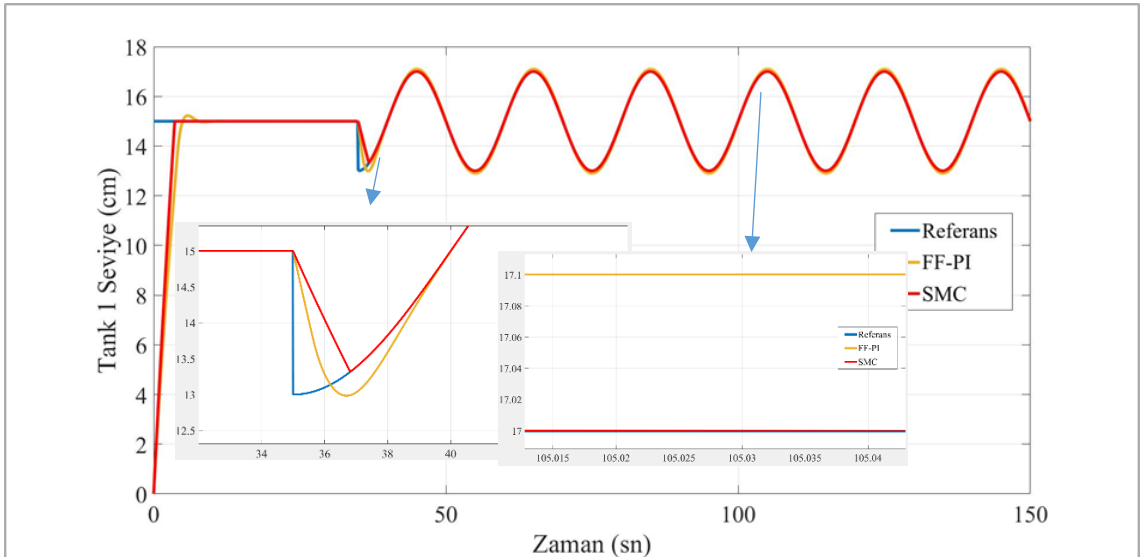
Şekil 4.10. Tank 1 kare dalga FF-PI, SMC



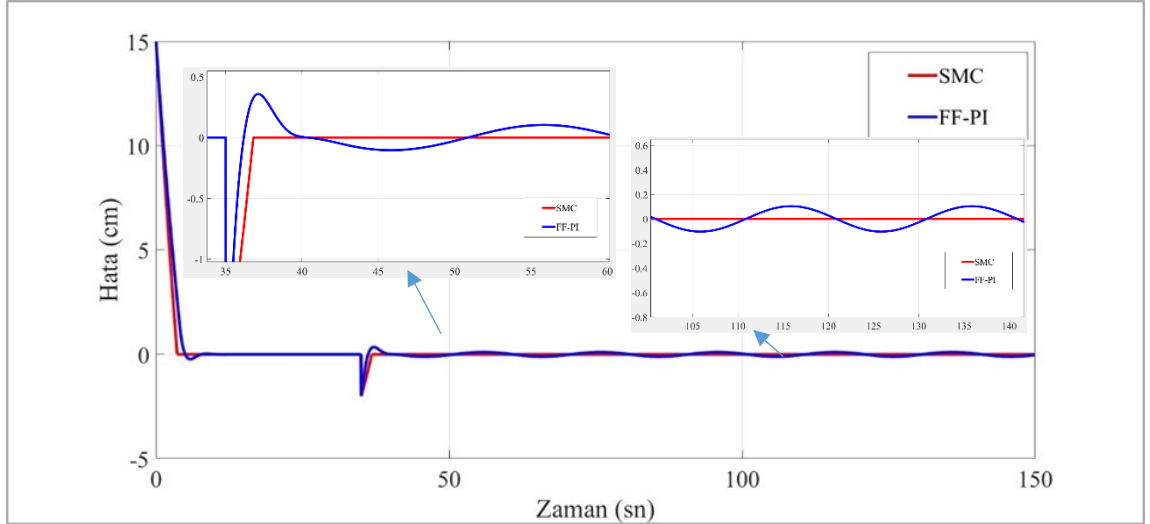


Şekil 4.11. Tank 1 kare dalga hata

Tank 1 sisteminin sinüzoidal dalga şekline göre yanıtı Şekil 4.12.'de elde edilmiştir. Kayan kipli kontrolün, ileri beslemeli PI kontrolcüyeye göre daha başarılı bir şekilde referans sinyalini takip ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.13.'de Tank 1 sistemin hatası grafiksel olarak incelenmiştir.



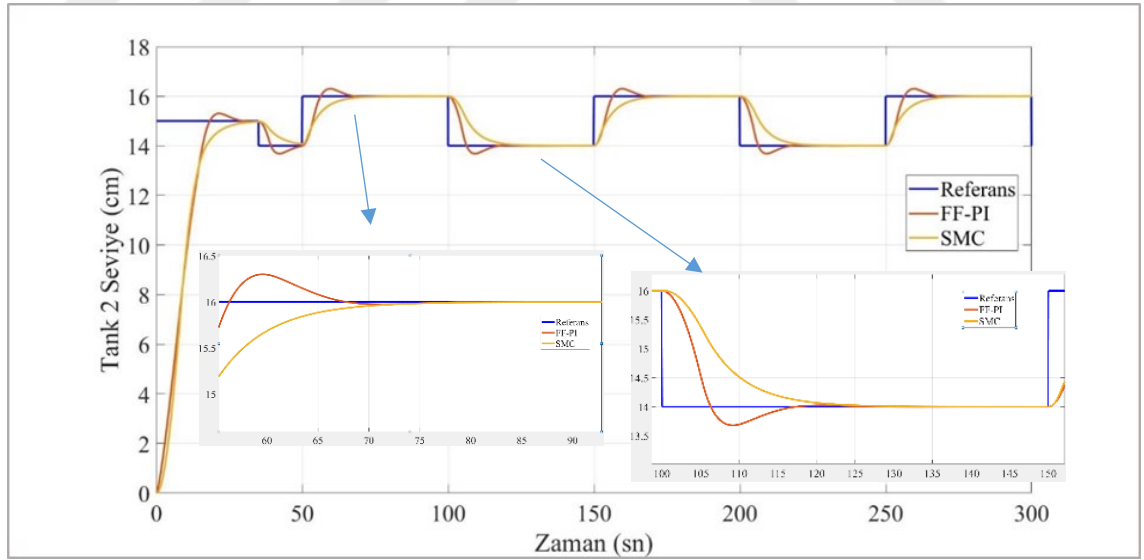
Şekil 4.12. Tank 1 sinüzoidal dalga yanıtı



Şekil 4.13. Tank 1 sinüzoidal dalga hata

#### 4.2.2. Tank 2 benzetim sonuçları

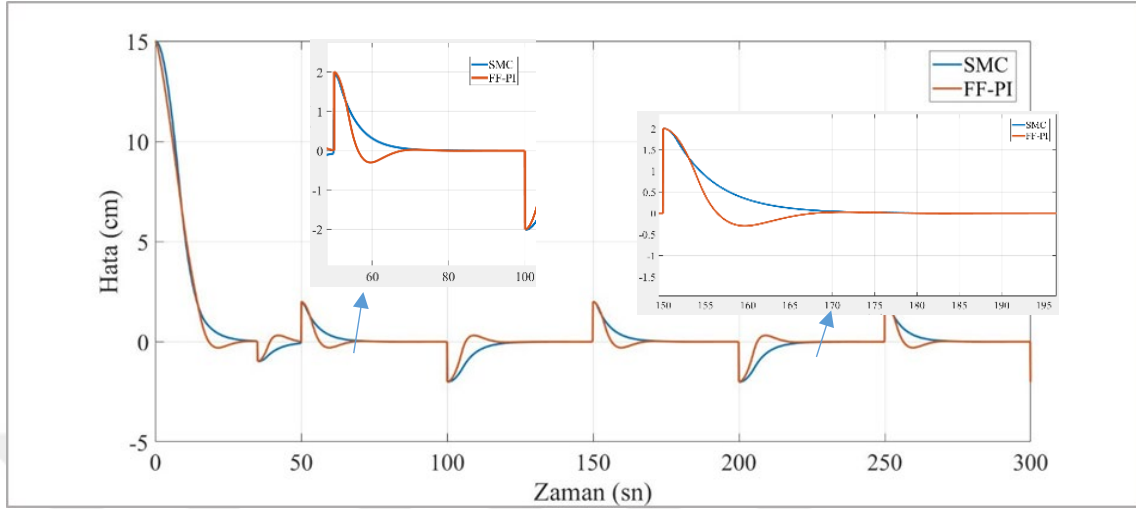
Tank 2 sistemi, ikinci dereceden kayan kipli kontrolcü olacak şekilde tasarlanmıştır. Simülasyon ortamında tasarlanan sistemin, referans kare dalga sinyal takibi Şekil 4.14'de verilmiştir. Tasarlanan sistemin hatası Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Tank 2 kare dalga yanıt

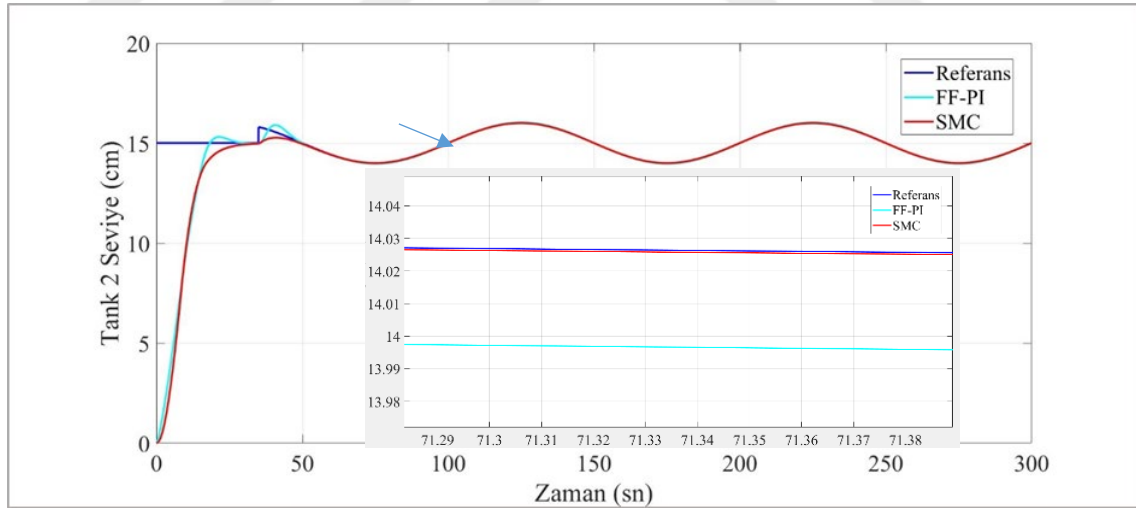
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada eşdeğer kontrol işaretini etkileyen  $\lambda_c$  değeri ve anahtarlama kontrol işaretini etkileyen  $k_{sc}$  değeri benzetim sonuçlarına göre belirlenerek sistem kontrolü iyileştirilmiştir.

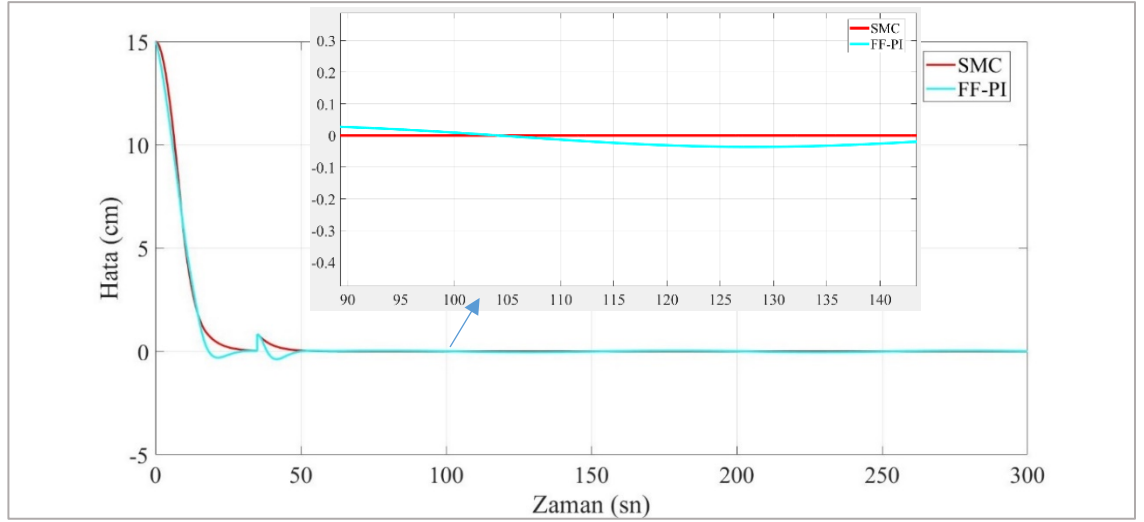


Şekil 4.15. Tank 2 kare dalga hata

Tank 2 sisteminin SMC ve FF-PI denetleyicisine göre sinüzoidal dalga takibi benzetim sonuçlarından elde edilen grafikler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16. Tank 2 sinüzoidal dalga takibi



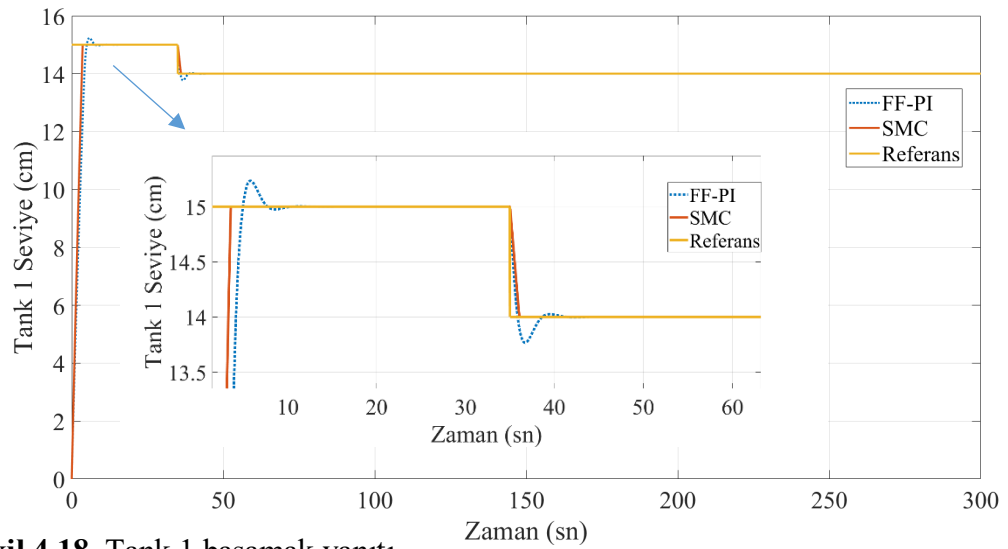
Şekil 4.17. Tank 2 sinüzoidal dalga hata

### 4.3. İkili-Tank Hata Değerleri

#### 4.3.1 Tank 1 basamak yanıtı

Çizelge 4.4. Tank 1 basamak yanıtı benzetim sonuçları

| Denetleyici | $t_s$  | $M_p$   | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|
| FF-PI       | 13,145 | 1,55866 | 77,54 | 32,8  | 301,6 | 331,7 |
| 2-SMC       | 3,607  | 0,00066 | 53,14 | 26,49 | 254,7 | 232,9 |

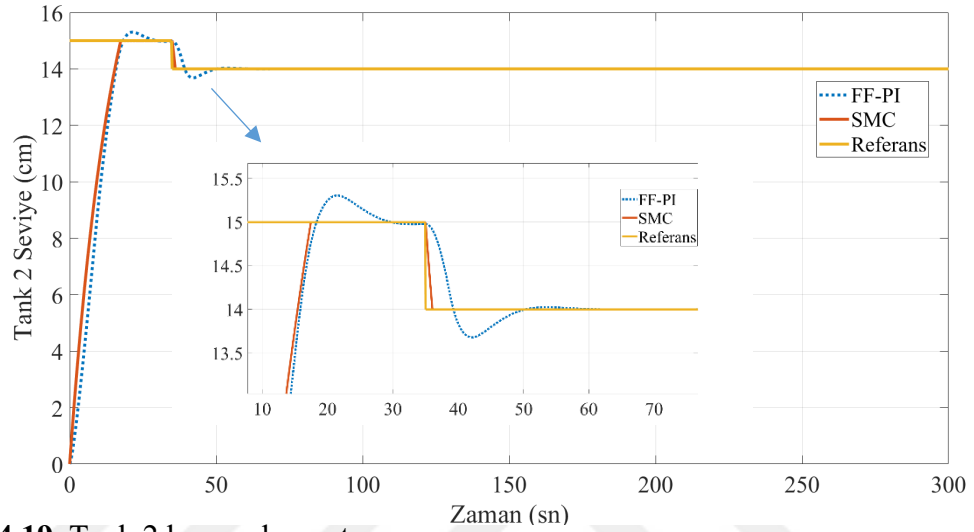


Şekil 4.18. Tank 1 basamak yanıtı

## 4.3.2 Tank 2 basamak yanıtı

Çizelge 4.5. Tank 2 basamak yanıtı benzetim sonuçları

| Denetleyici | $t_s$ | $M_p$  | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| FF-PI       | 62,45 | 2,03   | 930   | 133,5 | 1.309 | 5.355 |
| 2-SMC       | 17,63 | 0,0026 | 594,1 | 107,1 | 969,6 | 3.505 |



Şekil 4.19. Tank 2 basamak yanıtı

## 4.3.3. İkili-Tank kare ve sinüzoidal dalga benzetim sonuçları

Çizelge 4.6. Tank 1 kare dalga hata değerleri

| Denetleyici | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| FF-PI       | 6.014 | 68,6  | 334,6 | 5.760 |
| SMC         | 895,2 | 32,08 | 262,1 | 1.345 |

Çizelge 4.7. Tank 2 kare dalga hata değerleri

| Denetleyici | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE   |
|-------------|-------|-------|-------|--------|
| FF-PI       | 8.268 | 180,9 | 1.369 | 14.480 |
| 2-SMC       | 3.483 | 127,5 | 1.013 | 7.301  |

Çizelge 4.8. Tank 1 sinüzoidal dalga hata değerleri

| Denetleyici | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| FF-PI       | 1.544 | 41,46 | 302   | 392,7 |
| SMC         | 37,88 | 26,06 | 254,4 | 222,4 |

**Çizelge 4.9.** Tank 2 sinüzoidal dalga hata değerleri

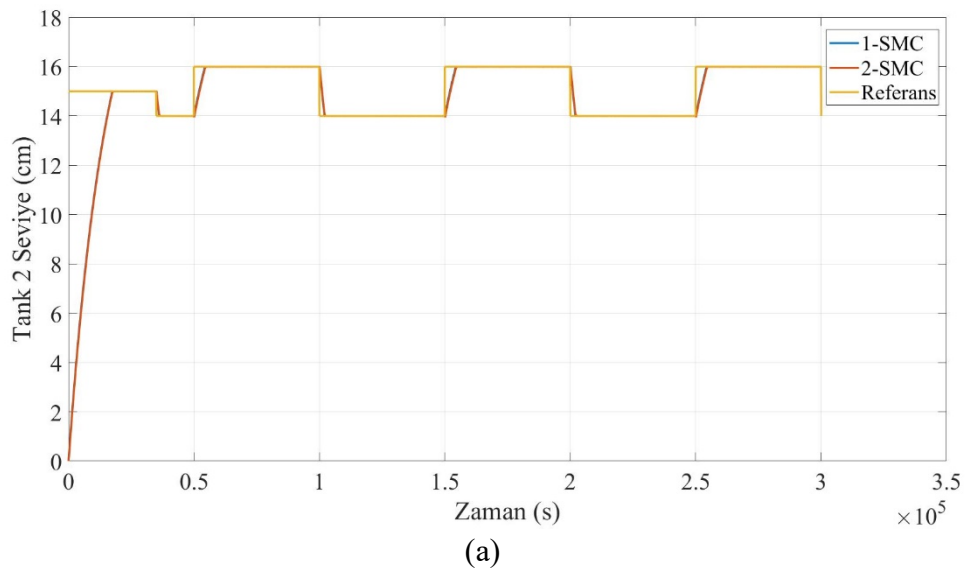
| Denetleyici | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| FF-PI       | 1.892 | 138,5 | 1.308 | 5.353 |
| 2-SMC       | 767,6 | 109,7 | 989   | 3.605 |

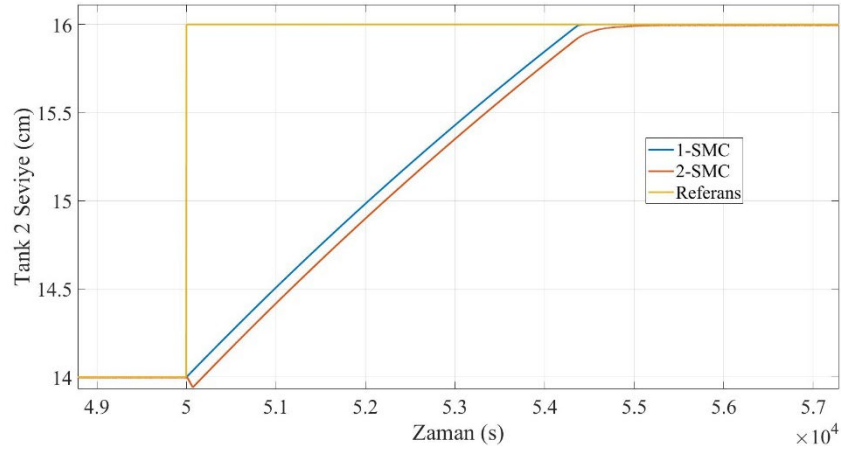
#### 4.4. SMC Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Tez çalışmasında SMC kontrol doğrusal olmayan İkili-Tank sisteminde ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yöntemi tercih edilerek tasarlanmıştır. Sistemler denklem 3.74’de ve denklem 3.80’de verilen transfer fonksiyonları kullanılarak kontrol altına alınmıştır. Kullanılan transfer fonksiyonları iki sistem arasında karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2’de bahsedilen literatürde geçen ikinci dereceden SMC yöntemi çatırdama etkisini azaltabileceğinden dolayı tercih edilmiştir. Yöntemin çatırdama etkisini ne ölçüde azaltabildiğini gözlemleyebilmek için Tank 2 sistemi ikinci dereceden kayan kipli kullanılmadan yani kayma yüzeyi fonksiyonunun türevi alınmadan sistem tasarlanıp ikinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanıldığı sistemle karşılaştırılmıştır.

İkinci dereceden SMC yönteminin kullanıldığı sistem 2-SMC, ikinci dereceden SMC yönteminin kullanılmadığı sistem 1-SMC olarak adlandırılmıştır.





(b)

Şekil 4.20. 2-SMC, 1-SMC kare dalga

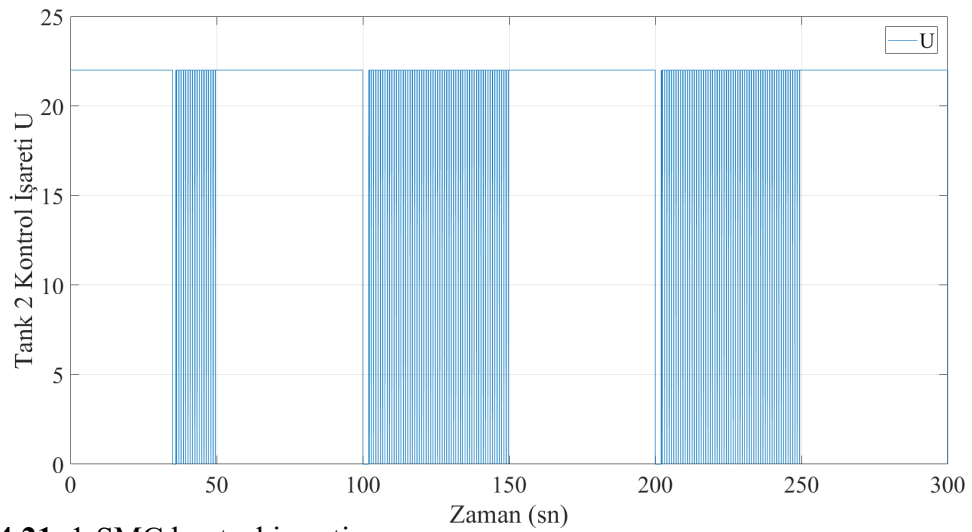
Her iki sistem için denklem 3.80'deki transfer fonksiyonu kullanılarak elde edilen kare dalga yanıtı Şekil 4.20'de verilmiştir.

Çizelge 4.10. Transfer fonksiyonu 1 benzetim sonuçları

| Denetleyici | ITAE  | IAE   | ISE   | ITSE  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 1-SMC       | 3.092 | 123,6 | 991,1 | 6.757 |
| 2-SMC       | 3.483 | 127,5 | 1.013 | 7.301 |

Çizelge 4.11. Transfer fonksiyonu 2 benzetim sonuçları

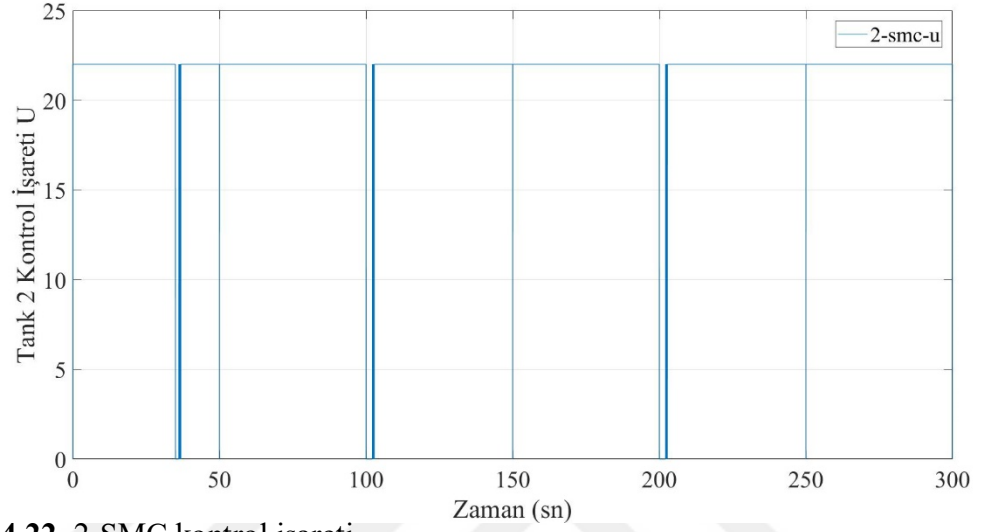
| Denetleyici | ITAE   | IAE   | ISE   | ITSE   |
|-------------|--------|-------|-------|--------|
| 1-SMC       | 11.190 | 207,2 | 1.511 | 17.910 |
| 2-SMC       | 11.480 | 210,3 | 1.530 | 18.570 |



Şekil 4.21. 1-SMC kontrol işareti

İkinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanılmadığı (1-SMC) sistemin kontrol işareti Şekil 4.21’de verilmiştir. Sistemde çatırdamaların olduğu gözlemlenmiştir.

İkinci dereceden kayan kipli denetleyici ile tasarlanan sistemin kontrol işareti Şekil 4.22’de verilmiştir. Çatırdamaların giderildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. 2-SMC kontrol işareti



### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

DC motor ve İkili-Tank sisteminden elde edilen benzetim sonuçları neticesinde yerleşim süresi ( $t_s$ ), maksimum tepe aşım değeri ( $M_p$ ) ve mutlak hataların toplamı (IAE), hataların karelerinin toplamı (ISE), ağırlıklı mutlak hataların toplamı (ITAE), ağırlıklı hataların karelerinin toplamı (ITSE) kriterlerine göre ikinci dereceden kayan kipli kontrolün tez çalışmasında kullanılan diğer kontrol yöntemlerine kıyasla her iki sistemi daha iyi kontrol edebildiği sonucuna varılmıştır.

Tank 2 sisteminde kullanılan transfer fonksiyonların benzetim sonuçlarından elde edilen hata fonksiyonları değerleri Çizelge 4.10 ile Çizelge 4.11 değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma neticesinde kontrol sistemlerinde seçilen denetleyicinin haricinde elde edilen transfer fonksiyonun da sistemin kontrol edilebilmesi açısından önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

İkili-Tank prosesinde benzetim sonuçlarından elde edilen hata fonksiyonları kriterleri açısından 1-SMC yöntemi 2-SMC yöntemine göre incelendiğinde hata değerleri arasındaki fark değerleri az da olsa 1-SMC yöntemi sistemi daha iyi kontrol edebilmiştir. Tez çalışmasında çatırdama etkisinin giderilmesi açısından ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yöntemi önerilmiştir. İkili-Tank prosesinin Tank 2 sisteminde kayan kipli denetleyicisinin, ikinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanılmadığı (1-SMC) sistemin benzetim sonuçlarından elde edilen kontrol işareti incelendiğinde çatırdamaların var olduğu gözlemlenmiştir. İkinci dereceden kayan kipli yönteminin kullanıldığı (2-SMC) Tank 2 sisteminde kontrol işaretindeki çatırdamaların giderilebildiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.22).

DC motor ve İkili-Tank sistemlerinin benzetim sonuçlarından elde edilen hata değerleri ve çıktılarına bakıldığında ikinci dereceden kayan kipli denetleyici yönteminin doğrusal olmayan sistemler üzerinde başarılı olduğu görüşüne varılmıştır. Ayrıca SMC yönteminde kontrol işaretinde oluşan çatırdama etkisinin ikinci dereceden kayan kipli yöntemiyle giderilebildiği benzetim sonuçlarıyla doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasında elde edilen veriler ışığında gelecek çalışmalarımda söz konusu kontrol tekniği gerçek zamanlı olarak uygulanması planlanmaktadır. Sistem modellemesi daha karmaşık olan robotik manipülatörlerin konum, hız ve kuvvet kontrollerinde parametre değişimlerine duyarlı adaptif kayan kipli kontrol tekniği uygulanması hedeflenmektedir.



## KAYNAKLAR

- Acary, V., Brogliato, B., Orlov, Y. V. 2011. Chattering-free digital sliding-mode control with state observer and disturbance rejection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 57(5), 1087-1101.
- Ahmed, M., Kuisma, M., Silventoinen, P., Pyrhonen, O. 2003. Effect of implementing sliding mode control on the dynamic behavior and robustness of switch mode power supply (buck converter), In *The Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS-2003)*, 17-20 November, IEEE, Vol 2, 1364-1368, Singapore.
- Alarcon, E., Romero, A., Poveda, A., Porta, S., Martinez-Salamero, L. 2001. Sliding-mode control analog integrated circuit for switching DC-DC power converters, *The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS-2001)*, 06-09 May, IEEE, Vol 1, 500-503, Sydney, NSW, Australia.
- Allaoua, B., Laoufi, A., Gasbaoui, B., Abderrahmani, A. 2009. Neuro-fuzzy DC motor speed control using particle swarm optimization. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 15, 1-18.
- Arulmozhiyal, R., Kandiban, R. 2012. Design of Fuzzy PID controller for Brushless DC motor, *2012 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI-2012)*, 10-12 January, IEEE, 1-7, Coimbatore, India.
- Azar, A. T., Zhu, Q. 2015. Adaptive Sliding Mode Control of the Furuta Pendulum, In: *Advances and applications in sliding mode control systems*. Springer International Publishing, 6-9, Switzerland.
- Bansal, U. K., Narvey, R. 2013. Speed control of DC motor using fuzzy PID controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(9), 1209-1220.
- Bartolini, G., Ferrara, A., Levant, A., Usai, E. 1999. On second order sliding mode controllers, In: *Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control*. Springer, 329-350, London.
- Bejarano, F. J., Fridman, L. 2011. State exact reconstruction for switched linear systems via a super-twisting algorithm. *International Journal of Systems Science*, 42(5), 717-724.
- Bilalovic, F., Sabanovic, A., Music, O., 1983. Buck converter regulator operating in the sliding mode, In *Proceedings of Seventh International Conference on Power Conversion (PCI-7)*, January, 331-340, Geneva.
- Bock, S. A., Pinheiro, J. R., Grundling, H., Hey, H. L., Pinheiro, H. 2001. Existence and stability of sliding modes in bi-directional DC-DC converters, In *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 01CH37230)*, 17-21 June, IEEE, Vol 3, 1277-1282, Vancouver, BC, Canada.

- Burton, J. A., Zinober, A. S. 1986. Continuous approximation of variable structure control. *International Journal of Systems Science*, 17(6), 875-885.
- Chambers, L. D. 2000. *The practical handbook of genetic algorithms: applications*. Chapman and Hall/CRC, 544, New York.
- Chan, C. Y. 2007. A nonlinear control for DC–DC power converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(1), 216-222.
- Chen, B. M. 2000. *Robust and H control*. Series: Communication and Control Engineering. Springer, 446, London.
- Chen, M., Wu, Q. X., Cui, R. X. 2013. Terminal sliding mode tracking control for a class of SISO uncertain nonlinear systems. *ISA Transactions*, 52(2), 198-206.
- Cortes, D., Alvarez, J. 2002. Robust sliding mode control for the boost converter, VIII IEEE International Power Electronics Congress (CIEP-2002), 24-24 October, IEEE, 208-212, Guadalajara, Mexico.
- Cruz-Zavala, E., Moreno, J. A., Fridman, L. 2010. Uniform second-order sliding mode observer for mechanical systems, 11th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS), 26-28 June, IEEE, 14-19, Mexico City, Mexico.
- Damiano, A., Gatto, G. L., Marongiu, I., Pisano, A. 2004. Second-order sliding-mode control of DC drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(2), 364-373.
- Das, S. 2011. *Functional fractional calculus*. Springer, 612, Heidelberg.
- Dávila, A., Moreno, J. A., Fridman, L. 2010. Variable gains super-twisting algorithm: A Lyapunov based design, *Proceedings of the 2010 American Control Conference*, 30 June - 02 July, IEEE, 968-973, Baltimore, MD, USA.
- DeCarlo, R. A., Zak, S. H., Matthews, G. P. 1988. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 76(3), 212-232.
- Derbel, N., Ghommam, J., Zhu, Q. 2017. *Applications of sliding mode control*. Springer, 363, Singapore.
- Edwards, C., Spurgeon, S. 1998. *Sliding mode control: theory and applications*. Crc Press, 237, UK.
- Edwards, C., Spurgeon, S. K. 1995. Sliding mode stabilization of uncertain systems using only output information. *International Journal of Control*, 62(5), 1129-1144.
- Eker, I. 2010. Second-order sliding mode control with experimental application. *ISA transactions*, 49(3), 394-405.
- Emelyanov, S. V. 1967. *Variable Structure Control Systems*. Nauka, 336, Moscow.

- Emelyanov, S. V., Utkin, V. I., Taran, V. A., Kostyleva, N. E., Shubladze, A. M., Ezerov, V. B., Dubrowskii, E. N., 1970. Theory of Variable Structure Systems. Nauka, 336, Moscow.
- Filippov, A. 1960. Equations différentielles à second membre discontinu. Journal de mathématiques, 51(1), 99–128.
- Flugge-Lotz, I. 1953. Discontinuous Automatic Control. Princeton University Press, 178, New Jersey.
- Fossas, E., Ras, A. 2002. Second-order sliding-mode control of a Buck converter, Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 10-13 December, IEEE, Vol 1, 346-347, Las Vegas, NV, USA.
- Garcia, P. D., Cortizo, P. C., De Menezes, B. R., Mendes, M. S. 1996. Sliding mode control for current distribution in DC-to-DC converters connected in parallel, 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC Record), 23-27 June, IEEE, Vol 2, 1513-1518, Baveno, Italy.
- Huang, S. J. 1998. A genetic-evolved fuzzy system for maintenance scheduling of generating units. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 20(3), 191-195.
- Itkis, U. 1976. Control Systems of Variable Structure. Wiley, 214, New York.
- Katsuhiko, O. 2010. Transient and steady-state response analyses, In: Modern control Engineering. Pearson Education, 161-173, USA.
- Khubalkar, S., Chopade, A., Junghare, A., Aware, M., Das, S. 2016. Design and realization of stand-alone digital fractional order PID controller for Buck converter fed DC motor. Circuits, Systems, and Signal Processing, 35(6), 2189-2211.
- Krstic, J.M., Kanellakopoulos, I., Kokotovic, P. 1995. Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley, 576, New York.
- Kushwah, M., Patra, A. 2014. Tuning PID controller for speed control of DC motor using soft computing techniques-A review. Advance in Electronic and Electric Engineering, 4(2), 141-148.
- Levant, A. 1993. Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. International Journal of Control, 58(6), 1247-1263.
- Levant, A. 2001. Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence. IEEE Transactions on Automatic Control, 46(9), 1447-1451.
- Li, F., Wu, L., Shi, P., Lim, C. C. 2015. State estimation and sliding mode control for semi-Markovian jump systems with mismatched uncertainties. Automatica, 51, 385-393.

- Liang, L. 2011. The application of fuzzy PID controller in coupled-tank liquid-level control system, International Conference on Electronics Communications and Control (ICECC), 09-11 September, IEEE, 2894-2897, Ningbo, China.
- Lopez, P. Nouri, A. S. 2006. Théorie élémentaire et pratique de la commande par les régimes glissants Mathématiques et applications. Springer, 356, Berlin.
- Latawiec, K. J., Łukaniszyn, M., Stanisławski, R. 2015. Tuning of the half-order robust PID controller dedicated to oriented PV system, In: Advances in Modelling and Control of Non-integer-Order Systems. Springer, 145-157, Germany.
- Monje, C. A., Chen, Y., Vinagre, B. M., Xue, D., Feliu-Batlle, V. 2010. Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications. Springer Science Business Media, 415, London.
- Neymark, Y. I. 1957. On sliding modes in relay control systems. *Automatiks i Telemekhanika*, 18(1), 27-33.
- Öztürk, N., Çelik, E. 2012. Speed control of permanent magnet synchronous motors using fuzzy controller based on genetic algorithms. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 43(1), 889-898.
- Pan, H., Wong, H., Kapila, V., de Queiroz, M. S. 2005. Experimental validation of a nonlinear backstepping liquid level controller for a state coupled two tank system. *Control Engineering Practice*, 13(1), 27-40.
- Perruquetti, W., Barbot, J. P. (Eds.) 2002. Sliding mode control in Engineering. Marcel Dekker, 409, New York.
- Petráš, I. 2011. Fractional-order nonlinear systems: modeling, analysis and simulation. Springer Science Business Media, 218, Heidelberg.
- Popovski, A. M. 1950. Linearization of sliding operation mode for a constant speed controller. *Automatiks i Telemekhanika*, 11(3), 161–163.
- Ramli, M. S., Ahmad, M. A., Ismail, R. M. T. R. 2009. Comparison of Swarm Adaptive Neural Network Control of a Coupled Tank Liquid Level System, International Conference on Computer Technology and Development, 13-15 November, IEEE, Vol 1, 130-135, Kota Kinabalu, Malaysia.
- Ri, S., Huang, J., Wang, Y., Kim, M., An, S. 2014. Terminal sliding mode control of mobile wheeled inverted pendulum system with nonlinear disturbance observer. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-8.
- Sastry, S., Bodson, M. 1994. Adaptive Control: Stability Convergence and Robustness. Prentice Hall, 400, New Jersey.
- Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A. 2014. Sliding mode control and observation. Springer, 356, New York.

- Slotine, J. J. E., Li, W. 1991. Sliding control, In: Applied Nonlinear Control. Prentice Hall, 276-307, New Jersey.
- Slotine, J. J., Sastry, S. S. 1983. Tracking control of non-linear systems using sliding surfaces, with application to robot manipulators. *International journal of control*, 38(2), 465-492.
- Tan, S. C., Lai, Y. M., Tse, C. K. 2018. Sliding mode control of switching power converters: techniques and implementation. CRC Press, 301, Florida.
- Thomas, N., Poongodi, D. P. 2009. Position control of DC motor using genetic algorithm based PID controller, In Proceedings of the world congress on Engineering (WCE 2009), 1-3 July, Imperial College London, International Association of Engineers, Vol 2, 1-3, London.
- Tijjani, A. S., Shehu, M. A., Alsabari, A. M., Sambo, Y. A., Tanko, N. L. 2017. Performance analysis for coupled-tank system liquid level control using MPC PI and PI-plus-Feedforward Control Scheme. *Journal of Robotics and Automation*, 1(1), 42-53.
- Tipsuwan, Y., Chow, M. Y. 1999. Fuzzy logic microcontroller implementation for DC motor speed control, In IECON'99 Conference Proceedings 25th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No. 99CH37029), 29 November-03 December, IEEE, Vol 3, 1271-1276, San Jose, CA, USA.
- Tseng, M. L., Chen, M. S. 2010. Chattering reduction of sliding mode control by low-pass filtering the control signal. *Asian Journal of Control*, 12(3), 392-398.
- Utkin, V. 1977. Variable structure systems with sliding modes. *IEEE Transactions on Automatic control*, 22(2), 212-222.
- Utkin, V. 1978. Application of equivalent control method to the systems with large feedback gain. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 23(3), 484-486.
- Utkin, V., Guldner, J., Shi, J. 1999. Sliding Mode Control in Electromechanical Systems. CRC Press, 328, Padstow.
- Utkin, V. 1992. Sliding Modes in Control Optimization. Springer, 286, Berlin.
- Zhu, H., Wang, Y., Wang, K., Chen, Y. 2011. Particle Swarm Optimization (PSO) for the constrained portfolio optimization problem. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 10161-10169.