

**KAYMA KIPLİ KONTROLÖRLERDE KAYMA YÜZEYİ
TASARIMI YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE
SINIFLANDIRILMASI**

Pamukkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Seçil AYDIN

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Sezai TOKAT

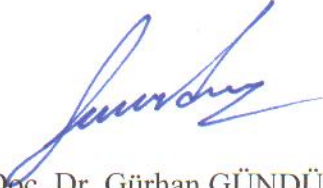
**Eylül, 2008
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Seçil AYDIN tarafından Yrd. Doç. Dr. Sezai TOKAT yönetiminde hazırlanan “**Kayma Kipli Kontrolörlerde Kayma Yüzeyi Tasarım Yöntemlerinin İncelenmesi ve Sınıflandırılması**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr. Sezai TOKAT
Jüri Başkanı(Danışman)



Yrd. Doç. Dr. Gürhan GÜNDÜZ
Jüri Üyesi



Doç. Dr. Serdar İPLİKÇİ
Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..../..../.... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza :

ÖĞrenci Adı Soyadı Seçil AYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Yüksek Lisans Tezi Onay Formu.....	i
Bilimsel Etik Sayfası.....	ii
Teşekkür.....	iii
Özet.....	iv
Abstract.....	v
İçindekiler.....	vi
Şekiller Dizini.....	viii
Tablolar Dizini.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Kayma Kipli Kontrol.....	2
1.2.Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	3
1.3.Amaç, Kapsam ve Katkılar.....	5
1.4.Çalışmanın Genel Akışı.....	6
2. KAYMA KIPLİ KONTROL VE KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	7
2.1. Kayma Kipli Kontrol.....	7
2.2. Kayma Kipli Sistemlere Ait Temel Kavramlar.....	9
2.2.1.Anahtarlama yüzeyi.....	10
2.2.2.Kayma yüzeyi.....	10
2.2.3.Kayma kipi.....	11
2.2.4.Ulaşma koşulu.....	11
2.2.5.Ulaşma kipi.....	12
2.2.6.Ulaşma zamanı.....	12
2.3. Kayma Kipinde Çözümün Varlığı ve Tekliği.....	12
2.3.1. Eşdeğer kontrol yöntemi.....	13
2.4. Kayma Kipli Kontrol Tasarımı.....	15
2.4.1.Ulaşma fonksiyonu yaklaşımı.....	16
2.4.2.Kontrol kuralının elde edilmesi.....	18
2.4.2.1.Lyapunov yöntemi.....	19
2.4.3.Kontrol kuralı bileşenleri.....	19
2.5. Belirsizlikler ve Bozucularla Başa Çıkma.....	22
2.6. Başarım İyileştirme Yöntemleri.....	23
2.7. Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	27
2.7.1.Doğrusal kayma yüzeyi tasarımları.....	28
2.7.1.1.İkinci merteye sistemler.....	28
3. İKİLİ TANK SİSTEMİ İÇİN YENİ BİR KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	39
3.1. Genel Bilgi.....	39
3.2. Sistem Yapısı.....	40
3.3. İkili Tank Sisteminde Geleneksel Kayma Kipli Kontrol.....	45
3.4. İkili Tank Sistemi İçin Durum Bilgisi ile Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	47
4. TERS SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN ZAMANLA DEĞİŞEN KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	57
4.1.Genel Bilgi.....	57
4.2.Ters Sarkaç Sistemi.....	58
4.3.Ters Sarkaç Sistemi İçin Zamanla Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78

5.1. Sonuçlar.....	78
5.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	88

ÖZET

KAYMA KIPLİ KONTROLÖRLERDE KAYMA YÜZEYİ TASARIM YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE SINIFLANDIRILMASI

Aydın, Seçil
Yüksek Lisans Tezi, Bilgisayar Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. Sezai TOKAT

Eylül 2008, 88 Sayfa

Kayma kipli kontrol, yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süreksiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir kontrol yöntemidir. Bu çalışmada kayma kipli kontrolörlerde önemli bir yere sahip olan kayma yüzeyi tasarım yöntemleri incelenmiştir. Bu incelemeler ile ikili tank sistemi ve ters sarkaç sistemi olmak üzere iki farklı sistem ele alınıp sistem modelleri incelendikten sonra her bir sisteme özgü kayma yüzeyi tasarımları geliştirilmiştir. İkili tank sistemi için kayma kipli kontrolör tasarımında kayma yüzeyi parametresinin durumlara bağlı olarak tasarlanması üzerinde durulmuştur. İkili tank sisteminde geliştirilen yeni tasarım yönteminde, kayma yüzeyi parametresi tanklardaki su yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir. Böylece durumlara bağlı değişken kayma yüzeyi kullanılarak yeniden bir parametre ayarlamadan farklı başlangıç koşulları için performansta iyileşme sağladığı görülmüştür. Geleneksel ve güncel birçok kontrol yönteminin sınanması ve geliştirilmesi için kullanılan önemli bir denektaşı problemi olan ters sarkaç sistemi için sabit parametrelere sahip kayma kipli kontrol yapısında parametrelerin sistem başarımı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda ters sarkaç sisteminde zamanla değişen parametreler kullanılmıştır. Her iki sistemde kullanılan kayma kipli kontrolör tasarımları ile sistem başarımları iyileştirilmeye çalışılmış, sonuçlar koşturulan benzetimler yardımı ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayma Kipli Kontrol, Lyapunov Yöntemi, Durum Bilgisi ile Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı, İkili Tank Sistemi, Zamanla Değişen Parametrelerle Kayma Yüzeyi Tasarımı, Ters Sarkaç Sistemi

Doç Dr. Serdar İPLİKÇİ
Yrd. Doç. Dr. Sezai TOKAT
Yrd. Doç. Dr. Gürhan GÜNDÜZ

ABSTRACT**ANALYZING AND CLASSIFYING OF SLIDING SURFACE DESIGN
METHODS IN SLIDIG MODE CONTROL**

Aydın, Seçil
M. Sc. Thesis in Computer Engineering
Supervisor: Asst.. Prof. Dr. Sezai TOKAT

September 2008, 88 pages

Sliding mode control is a deterministic, nonlinear, robust control method that is obtained by switching discontinuously on time on a predetermined sliding surface with a high speed, nonlinear feedback. Sliding surface design methods are one of the significant problems in sliding mode control and have been analyzed in this thesis. Two different special sliding surface designs have been developed for the coupled tank system and inverted pendulum system separately. A special sliding surface design approach for the coupled tank system is developed. In this design, a state dependent moving algorithm for the control of the coupled tank system where the state variables are defined as the liquid levels of the tanks is used. Thus, sliding mode controller with a state varying sliding surface parameter has a better performance without adjusting any parameters even when the system initial conditions of the error phase plane are varied. Inverted pendulum is one of the most important systems in the control literature used in testing and developing new control methods. In this system, sliding mode control with constant parameters is used for different parameter values to determine the effect of the constant parameters in performance of the system. Instead of the constant parameters time varying ones are then used. Simulation results show that performances of systems have been improved with two different sliding surface designs.

Keywords: Sliding Mode Control, Tank System, Lyapunov Method, Sliding Surface Design with State Varying Parameters, Coupled Tank System, Sliding Surface Design with Time Varying Parameters, Inverted Pendulum

Assoc. Prof. Dr. Serdar İPLİKÇİ
Asst. Prof. Dr. Sezai TOKAT
Asst. Prof. Dr. Gürhan GÜNDÜZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

Yüksek Lisans Tezi Onay Formu.....	i
Bilimsel Etik Sayfası.....	ii
Teşekkür.....	iii
Özet.....	iv
Abstract.....	v
İçindekiler.....	vi
Şekiller Dizini.....	viii
Tablolar Dizini.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1.Kayma Kipli Kontrol.....	2
1.2.Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	3
1.3.Amaç, Kapsam ve Katkılar.....	5
1.4.Çalışmanın Genel Akışı.....	6
2. KAYMA KIPLİ KONTROL VE KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	7
2.1. Kayma Kipli Kontrol.....	7
2.2. Kayma Kipli Sistemlere Ait Temel Kavramlar.....	9
2.2.1.Anahtarlama yüzeyi.....	10
2.2.2.Kayma yüzeyi.....	10
2.2.3.Kayma kipi.....	11
2.2.4.Ulaşma koşulu.....	11
2.2.5.Ulaşma kipi.....	12
2.2.6.Ulaşma zamanı.....	12
2.3. Kayma Kipinde Çözümün Varlığı ve Tekliği.....	12
2.3.1. Eşdeğer kontrol yöntemi.....	13
2.4. Kayma Kipli Kontrol Tasarımı.....	15
2.4.1.Ulaşma fonksiyonu yaklaşımı.....	16
2.4.2.Kontrol kuralının elde edilmesi.....	18
2.4.2.1.Lyapunov yöntemi.....	19
2.4.3.Kontrol kuralı bileşenleri.....	19
2.5. Belirsizlikler ve Bozucularla Başa Çıkma.....	22
2.6. Başarım İyileştirme Yöntemleri.....	23
2.7. Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	27
2.7.1.Doğrusal kayma yüzeyi tasarımları.....	28
2.7.1.1.İkinci merteye sistemler.....	28
3. İKİLİ TANK SİSTEMİ İÇİN YENİ BİR KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	39
3.1. Genel Bilgi.....	39
3.2. Sistem Yapısı.....	40
3.3. İkili Tank Sisteminde Geleneksel Kayma Kipli Kontrol.....	45
3.4. İkili Tank Sistemi İçin Durum Bilgisi ile Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	47
4. TERS SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN ZAMANLA DEĞİŞEN KAYMA YÜZEYİ TASARIMI.....	57
4.1.Genel Bilgi.....	57
4.2.Ters Sarkaç Sistemi.....	58
4.3.Ters Sarkaç Sistemi İçin Zamanla Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı.....	63
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	78

5.1. Sonuçlar.....	78
5.2. Öneriler	79
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1	Bir anahtarlama yüzeyi üzerindeki farklı sistem yörüngeleri	11
Şekil 2.2	Eşdeğer kontrolün geometrik yorumu	15
Şekil 2.3	Lyapunov kararlılık yönteminin gösterilimi	16
Şekil 2.4	Farklı c_1 değerleri için elde edilen durum uzayı yanıtları	28
Şekil 2.5	Döndürme işlemi sonucunda kayma yüzeyinin hareketi	29
Şekil 2.6	Kayma yüzeylerinin döndürülmesinde kullanılan parametreler	31
Şekil 2.7	Öteleme işlemi sonucunda kayma yüzeyinin hareketi	32
Şekil 3.1	İkili tank sistemi	40
Şekil 3.2	$h_{2d}=6$ için α_p davranışı	52
Şekil 3.3	$h_{2d}=6$ için hata faz düzlemi davranışları	53
Şekil 3.4	$h_{2d}=6$ için h_2 seviyesi değişimleri	54
Şekil 3.5	$h_{2d}=5$ için hata faz düzlemi davranışları	54
Şekil 3.6	$h_{2d}=7$ için hata faz düzlemi davranışları	55
Şekil 3.7	Farklı h_{2d} değerleri için tank2 sıvı seviye değişimleri	55
Şekil 3.8	$h_{2d}=6$ cm için on-off valfinin debisi	56
Şekil 4.1	Ters Sarkaç Sisteminin Şematik Yapısı	59
Şekil 4.2	Farklı c_2 değerleri ile θ için performans ölçümleri	64
Şekil 4.3	Farklı c_2 değerleri ile x için performans ölçümleri	65
Şekil 4.4	Farklı φ_2 değerleri ile θ için performans ölçümleri	65
Şekil 4.5	Farklı φ_2 değerleri ile x için performans ölçümleri	66
Şekil 4.6	φ_2 parametresinin zamana göre değişimi	67
Şekil 4.7	c_2 parametresinin zamana göre değişimi	67
Şekil 4.8	Farklı kayma yüzeyi tasarımları ile θ değişimleri	69
Şekil 4.9	Farklı kayma yüzeyi tasarımları ile x değişimleri	69
Şekil 4.10	Hata faz düzleminde farklı kayma yüzeyi tasarımları	70
Şekil 4.11	Farklı başlangıç koşullarında performans ölçümleri	72
Şekil 4.12	PC ve ters sarkaç sistemi	72
Şekil 4.13	DC motor ve bağlantı arabirimi	73
Şekil 4.14	Sarkaç mekanik birimi	74
Şekil 4.15	Simulink ara yüzü	74
Şekil 4.16	Sarkacın kararsız durumu	75
Şekil 4.17	Feedback DAC blok tasarımı	75
Şekil 4.18	Feedback Encoder blok tasarımı	76
Şekil 4.19	Stabilizing Controller Bloğu	76
Şekil 4.20	Sistem verilerinin osiloskopta gösterimi	77

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 3.1 İkili tank sistemi parametreleri	41
Tablo 3.2 Farklı h_{2d} değerleri için performans kriterleri.....	56
Tablo 4.1 Sisteme ait parametre değerleri.....	68
Tablo 4.2 Önerilen kontrole ait sabit parametreler	68
Tablo 4.3 Kayma yüzeylerinin başarımlar ölçütleri.....	71

1. GİRİŞ

Bilim ve teknoloji dünyasında pek çok sistem tasarımında kontrol mekanizması kullanılmış ve verilen referanslara göre sistemin otomatik olarak işlemesi sağlanmıştır. Günümüzde, mekatronik sistemlerin yaşantımıza yoğun bir şekilde girmesiyle birlikte, otomatik kontrol sistemleri her alanda kullanılmaya başlanmıştır. Merdiven ışıklarının yakıldıktan belli bir süre sonra kendi kendine sönmesini sağlayan merdiven otomatığinden otomatik çamaşır makinelerine, üretimde kullanılan bilgisayar kontrollü tezgâhlardan, uzay taşıtlarına, otomatik kontrol sistemleri gittikçe yaygınlaşan geniş bir alanı içine almaktadır (WEB_1 2007). Otomatik kontrol sistemlerinin temelini geri besleme düşüncesi oluşturur. Geri besleme bilgisi sayesinde ilgili sisteme ait verilerin eksik ve kusurlu olması durumunda da sistemin denge noktasını koruması sağlanır. Geri beslemeli kontrol düşüncesinin ortaya çıkışı teknoloji tarihindeki önemli ilerlemelere olanak sağlayan konulardan birisidir.

Gelişen teknoloji ile birlikte giderek daha karmaşık bir yapıya bürünen dinamik sistemlerin kontrolünü sağlamak için daha karmaşık modeller kullanılmaya başlanmış, böylece daha gelişmiş kontrolörler tasarlanmış ve kontrol kuramı bugünkü şeklini almaya başlamıştır. Fakat bazı durumlarda tasarlanan model sisteme karşılık veremez. Bunların başlıca nedenleri matematiksel modelin karmaşıklığı, mertebesinin büyüklüğüdür. Bunların haricinde sisteme etki eden ve bilgisine ulaşamadığımız pek çok etken vardır. Bu durumda uygulanan kontrol kuralı yetersiz kalır ve sistem istenen referans değere ulaşamaz. Bu yüzden sistemler üzerinde kontrol mekanizmasını kurabilmemiz için sistemleri basitleştirmek adına farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Sistemdeki model belirsizlikleri, yapısal ve yapısal olmayan belirsizlikler olarak ikiye ayrılır:

- Yapısal belirsizlikler modelde bulunan terimlere ait hatalardan kaynaklanır. Sistem dinamiklerinin yapısı hakkında diferansiyel modelin mertebesi, model terimlerinin sürekliliği, durum türevlerine göre doğrusallık, kontrol işlevleri gibi belirli miktarda bilgi vardır. Ancak bu bilgiler tam değildir. Sistem parametre değerlerinin kesin doğrulukla ölçümü mümkün olmayabilir ya da parametreler zaman içerisinde değişim gösterebilir. Bu yüzden bu tür model belirsizlikleri parametre belirsizliği olarak da adlandırılabilir.

- Yapısal olmayan belirsizlikler ise sistem yapısının kestirimi sırasında, bazı sistem dinamiklerinin göz ardı edilmesi ya da fiziksel yapıdaki bilgi yetersizliği gibi nedenlerden dolayı yapılan basitleştirilmeler sonucunda modelde yer almayan terimlerden kaynaklanır. Sistem dinamiklerinin buldukları ortam ile yaptıkları etkileşim birçok bilinmeyen faktörü içerir ve bunlar dış bozucular olarak adlandırılır.

Parametre belirsizlikleri ve dış bozucular kontrol başarımını olumsuz yönde etkileyen olgulardır ve bu yüzden de kararsızlık kaynağı olarak ele alınırlar. Literatüre bakıldığında, bu tip belirsizlik ve bozucuların olumsuz etkilerini yok etmek ya da hiç değilse azaltmak için tasarlanmış çok sayıda geri beslemeli kontrol çalışması bulunmaktadır (Tokat 2003).

1.1 Kayma Kipli Kontrol

Kayma kipli kontrol, değişken yapıli sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkmıştır (Edwards ve Spurgeon 1998). Yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda sürekli olmayan bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir kontrol yöntemidir (Utkin, 1983). Literatürde çokça yer bulmasının ve değişik alanlara uygulanmasının nedeni, kullanım kolaylığı (Young vd 1999) ve dış bozucular ve parametre belirsizlikleri ile başa çıkmadaki becerisidir (Zinober 1994).

Kayma kipli kontrolör tasarım süreci iki adımlı bir yordam olarak düşünülebilir (Hung vd 1993). Bu adımlar sırasıyla; istenen kararlı dinamiklere karşı düşen bir kayma

yüzeyinin belirlenmesi ve belirlenen kayma yüzeyine ulaşmayı sağlayan bir kontrol kuralının elde edilmesidir (Hung vd 1993). Kayma kipli kontrole sahip bir sisteme ilişkin faz yörüngesi iki ayrı bölümde ele alınabilir. Kayma yüzeyi dışında bulunan herhangi bir başlangıç koşulundan başlayan sistem yörüngeleri kayma yüzeyine ulaşma eğilimindedir. Kayma yüzeyine ulaşmak için geçen süre ulaşma zamanı ve faz yörüngesinin bu bölgesi ise ulaşma kipi olarak adlandırılır. Ulaşma kipinde sistem, parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarlıdır (Edwards ve Spurgeon 1998). Kayma yüzeyine ulaşıldığı zaman kayma kipi başlar ve kayma kipi boyunca yörüngeler parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara karşı duyarsızdır (Slotine ve Sastry 1983). Bu özellikten dolayı ulaşma kipini kısaltarak ya da tamamen ortadan kaldırarak sistem duyarlılığını azaltmak ya da tamamen yok etmek için literatürde önerilmiş birçok değişik yöntem bulunmaktadır (Chang ve Hürmüzlü 1993).

Kayma kipli kontrol sistemleri sürekli ve ayırık zamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Kontrol yapısının ayırık zaman anlarında değiştiği anahtarlama ayırık zamanlı, sistem yörüngelerinin kayma yüzeyinde anahtarıldığı herhangi bir anda değiştiği anahtarlama ise sürekli zamanlı kayma kipli kontrolü oluşturur (Sarptürk vd 1987, Gao vd 1995).

1.2 Kayma Yüzeyi Tasarımı

Sürekli kontrol kuralına sahip sistemlerin tasarım problemi, genellikle kayma yüzeyi parametrelerinin seçilmesi problemine indirgenebilir ve bu parametreler ilgili sistemin başarımını tamamen belirlemektedir (Utkin 1978). Bu yüzden kayma kipli kontrolör başarımının iyileştirilmesi ile ilgili hem ayırık zamanlı hem de sürekli zamanlı kayma kipli kontrolörler için literatürde sunulan uyarlamalı stratejilerin birçoğu kayma yüzeyi tasarımı ile ilgilidir. Kayma yüzeyi tasarımı için en sık kullanılan yöntem, geleneksel kayma kipli kontrole ait sabit ve doğrusal kayma yüzeyi için başarımı iyileştirecek şekilde zamanla değişen bir düzen geliştirmektir. Doğrusal kayma yüzeyi, döndürme veya öteleme işlemleri kullanılarak izleme davranışını iyileştirecek şekilde durum uzayında hareket ettirilebilir. Utkin (1978), çok girişli durumda izleme kontrolü sırasında kayma kipini elde etmek için, yörüngenin önceki tüm kayma yüzeylerinin kesişiminde yer aldığı varsayımı altında durum uzayında tanımlı zamanla değişen

kayma yüzeylerini bir doğrusal kayma yüzeyi kümesi için kontrol kuralını türeterek tanıtmıştır.

Choi vd' nin (1993) yaptığı dikkat çekici çalışmada ikinci mertebeden sistemler için öteleme ve döndürme düzenlerini tanımlamışlar ve zamanla değişen doğrusal kayma yüzeyi için kayma kipinin varlığını diferansiyel geometriden yararlanarak ispatlamışlardır. Hareketli doğrusal kayma yüzeyi düşüncesi daha sonra yüksek mertebeye sistemler için genelleştirilmiştir (Roy ve Olgac 1997, Park ve Choi 1999). Choi vd (1993) tarafından elde edilen sonuçlardan yola çıkarak öteleme ve kayma düzenine sahip kayma kipli kontrolör tasarımı için bulanık mantıklı bir ayarlama yaklaşımı önermiştir. Hareketli doğrusal kayma yüzeyi düşüncesindeki önemli bir olumsuzluk, bekleme sürelerinden dolayı bozuculara karşı oluşan duyarlılıktır. Bekleme süresi, hesaplanan bir doğrusal kayma yüzeyinden bir başka doğrusal yüzeye geçiş aşamasında geçen zaman dilimidir. Bartoszewicz (1995) bu süreksizlik etkisi üzerinde durmuş ve Choi vd. (1994) tarafından önerilen hareketli kayma yüzeyinin sürekli bir eşdeğerini elde etmiştir.

Kayma yüzeyleri doğrusal bir biçimde oluşturulduğunda, sistem durumlarını kayma yüzeyi üzerinde tutmak için gerekli kontrol işaretinin genliği genellikle izleme hatasının genliği ile birlikte artış gösterir (Jabbari vd 1990). Ayrıca, doğrusal kayma yüzeyinin sahip olduğu doğrusal dinamikler her zaman için kontrol edilen sistemin global dinamik özellikleri için uygun olmayabilir (Chu ve Tomizuka 1996). Literatürde, bu olumsuzlukları azaltmak için önerilen alternatif bir kayma yüzeyi tasarım yöntemi doğrusal olmayan kayma yüzeyleri kullanılmasıdır. Kayma kipli kontrolör tasarımında doğrusal olmayan kayma yüzeyi kullanıldığı zaman daha fazla sayıda sentez yapılabileceği için tasarım alternatifleri de doğrusal kayma yüzeyine göre daha fazladır (Su ve Stepanenko 1994). Örnek bir uygulama Jabbari vd (1990) tarafından en düşük zamanlı kontrol elde etmek için kullanılan parabolik kayma yüzeyleridir. Shtessel (1995) kayma yüzeyini doğrusal olmayan bir dinamik operatör olarak tasarlamıştır. Takahashi vd (1999), sinüzoidal bir gerilim kaynağı için genlik ve frekans referans değerlerinde değişiklikler olduğu durumda sinüzoidal referans işaretinin daha hızlı izlenmesini sağlayan elipsoidal bir kayma yüzeyi elde etmiştir. Başarımda iyileşmeye rağmen bu çalışmalarda doğrusal olmayan işlevlerin bulunması analitik açıdan zorluklar içermektedir ve doğrusal olmayan işlevlere ait parametrelerin tanımlanması da

karmaşıktır. Ayrıca, klasik kayma kipli kontrolör ve hareketli doğrusal kayma kipli kontrolör ile karşılaştırıldığında doğrusal olmayan kayma yüzeyine bağlı kontrol kuralının elde edilmesi de daha zordur.

Yukarıda özetlendiği gibi, uyarlamalı doğrusal kayma yüzeyi tasarımları kolay fakat doğrusal olmayan yöntemlere göre başarımlı olumsuzluklarına sahiptir. Doğrusal olmayan kayma yüzeyleri uygun şekilde tasarlandığında kayma başarımlı artırılabilir ve sistem için en iyileştirme koşulları sağlanabilir (Chu ve Tomizuka 1996). Fakat kayma yüzeyi denklemlerindeki doğrusal olmama özelliği kontrolör tasarımını karmaşıktır. Sürekli zamanlı kayma kipli kontrolörler için verilen kayma yüzeyi tasarım yöntemlerine benzer çalışmalar ayrık zamanlı kayma kipli kontrolörler için de yapılmıştır (Bartoszewicz 1997). Tez çalışmasında, uygulama alanında yapılan tasarımlarda da doğrusal olmayan kayma yüzeylerinden faydalanılmaktadır.

1.3 Amaç, Kapsam ve Katkılar

Bu çalışmanın amacı, sabit kayma yüzeyine sahip geleneksel bir kayma kipli kontrolörle çalıştırılan ikili tank sistemi ve ters sarkaç sisteminde başarımlı iyileştirmek üzere kayma yüzeyi tasarımlarına farklı yaklaşımlar sunmaktır. İkili tank sistemi için sistem durumlarına bağlı kayma yüzeyi parametresi tasarımı gerçekleştirilmiş, farklı referans değerleri ile sistem çalıştırılarak başarımlı iyileştirilmiştir. Ters sarkaç sisteminde ise zamana bağlı parametreler yardımıyla performansta iyileşme sağlanmış, geleneksel yöntemde meydana gelen salınımlar giderilmiştir. Her bir sistem için yapıya uygun tasarlanan kayma yüzeyleri geleneksel kayma kipli kontrole ve parametreleri iyileştirilerek kullanılan geleneksel kayma kipli kontrole göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

Yapılan benzetimler ile tasarlanan yeni yöntemlerin analizleri yapılmıştır. Önerilen yöntemlerin ulaşma zamanının azaltılması, bozuculara karşı dayanıklılık ve sistem performansında artış gibi olumlu iyileştirmeler sağladığı gözlenmiştir.

1.4 Çalışmanın Genel Akışı

Tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde kayma kipli kontrol tanıtılmıştır. Kayma kipli kontrolörün özellikleri, tasarım adımları ve belirsizliklerle başa çıkabilme yeteneği üzerinde durulmuş ve kayma kipli kontrolör tasarımı ele alınmıştır. Üçüncü bölümde ikili tank sistemi tanıtılmış, sistem özgü durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi tasarımı ele alınmıştır. Dördüncü bölümde ters sarkaç sistemi anlatılmış, geleneksel kayma kipli kontrole zamanla değişen parametreler eklenerek düzenlenen kontrolör tasarımı anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise yapılanlar kısaca özetlenerek elde edilen sonuçlar hakkında bilgi verilmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar üzerinde durulmuştur.

2. KAYMA KIPLİ KONTROL VE KAYMA YÜZEYİ TASARIMI

2.1 Kayma Kipli Kontrol

Sistem ve kontrol mühendisleri her zaman için sistem belirsizliklerine karşı duyarsız olan kontrolörler tasarlamayı amaçlar. Tüm endüstriyel süreçlere baktığımızda öz ısı değişimler, mekanik gerilmeler, mekanik yorulmalar, genleşme ve sürtünme gibi kontrol edilen sürecin yapısına bağlı olarak oluşabilecek çeşitli nedenlerden dolayı sistem parametrelerinde değişikliklerin olması söz konusudur. Benzer şekilde ölçme hataları, çevresel ısı değişimleri gibi etkenlerle söz konusu sistemlerin kendilerinden kaynaklanmayan dış bozuculardan etkilendikleri de görülür (Tokat 2003).

Kontrol kuramında kontrolörün tasarlanması için sistem modellerinden yararlanılır. Ancak, yeterli ön bilginin elde edilememesi, doğrusal olmayan ve zamanla değişen karakteristiklerden dolayı gerçek hayatta karşımıza çıkan karmaşık endüstriyel süreçlerin kesin matematik modellerinin elde edilmesi zordur. Bu yüzden, modellerin belirlenmesinde bazı yaklaşımlar yapılabilir. Ayrıca, doğrusal olmayan modellerin elde edilmesi durumunda geleneksel doğrusal kontrol yöntemlerinin uygulanabilmesi için belirli bir çalışma noktası civarında doğrusallaştırmaya da gidilebilir (Tokat 2003).

Yukarıda belirtilen parametre değişiklikleri, dış bozucular ve modelleme belirsizlikleri sistem başarımını düşüren etmenlerdir. Dinamik bir sistem üzerindeki belirsizliklere ve dış bozuculara ait istatistiksel bilgiler elde edilemiyor fakat bu büyüklüklerin sınır değerlerine ulaşılabilir ise bu özel durum için kullanılabilir en uygun doğrusal olmayan kontrol çözümü değişken yapıli sistemlerden yararlanılmasıdır. Böylelikle, sistemin kararsız durumları kararlı hale getirilmeye çalışılır. Kayma kipli kontrol, değişken yapıli sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkmıştır.

Yüksek hızlı, doğrusal olmayan bir geri besleme ile önceden belirlenen bir kayma yüzeyi üzerinde zamanda süreksiz bir şekilde anahtarlama yapılarak elde edilen, belirgin, doğrusal olmayan, dayanıklı bir kontrol yöntemidir.

Belirsizliklerin ve bozucuların sınırları bilindiği sürece dayanıklı bir kontrol sağlar. Kontrol sinyali bir değerden başka bir değere sonsuz hızda anahtarlama yaptığı için gerçek zamanlı uygulamalarda buna ayak uydurmak oldukça zor olduğu için çatırtı meydana gelmektedir. Çatırtı, sistemin modellenemeyen dinamiklerini ortaya çıkarır. Bu yüzden hedeflenen minimum çatırtı ile kontrol algoritmasını geliştirmektir. Kayma kipli kontrolün asıl amacı kaçınıcı dereceden olursa olsun sistemin davranışını birinci dereceye indirgeyecek kontrol girişini belirleyerek sistemi birinci derecede gibi davranmaya zorlamaktır. Böylece bozucu girişler ve modellenmemiş parametrelerin etkisinin görüldüğü durumlarda bile kararlı ve dayanıklı bir kontrolün elde edilmesi sağlanır. Literatürde çokça yer bulmasının ve değişik alanlara uygulanmasının nedeni, kullanım kolaylığı ve dış bozucular ve parametre belirsizlikleri ile başa çıkmadaki becerisidir.

Kayma kipinin önemli özellikleri şöyle sıralanabilir:

- 1) Kayma kipi, değişken yapılı sisteme ait verilen yapılar dışında yeni bir yörüngede oluşabilir. Bir başka ifadeyle, kayma kipi sistem yörüngelerinden bağımsızdır (Hung vd 1993).
- 2) Kayma kipi yörüngesi sisteminin mertebesinden daha düşük boyutlu kayma yüzeyi ile sağlanmaktadır. Bu ise basitleştirme ve bağlanmış sistemleri birbirinden ayırma (decoupling) tasarım yordamlarına izin verir.
- 3) Herhangi bir sistem yörüngesi, bir kümenin içerisinde seçilen başlangıç koşulları için tüm geçmiş ve gelecek zamanda yine o küme içerisinde kalıyor ise o kümeye değişimsiz (invariant) küme denir. Eğer değişken yapılı kontrol sistemine ait kayma kipi sarsım ve dış bozuculardan etkilenmiyorsa, o halde kayma kipi sarsım ve dış bozuculara değişimsizdir denir. Açıkçası, değişimsizlik özelliği gürbüzlük, uyarlanırlık özelliklerinden daha güçlü bir özelliktir (Hung vd 1993). Çünkü diğerlerinde beklenmedik değişiklikler karşısında sistemin değişimsiz olması değil, kontrol edilebilir ve beklenir bir davranış göstermesi amaçlanır. Geleneksel kayma

kipi sırasında sistem dinamiklerini etkileyen tek parametre hata vektörü çarpanıdır. Bu yüzden sistem dinamikleri değişimsizdir. Bu özellik kayma kipli kontrolörlerin en önemli özelliğidir (Hung vd 1993).

- 4) Orijin noktası sistemin denge noktasına karşı düşmektedir. Bu yüzden denge noktasına ulaşılan kadar, kayma kipi sırasındaki sistem davranışı, sisteme ait geçici hal davranışının bir parçasıdır (Hung vd 1993).
- 5) Süreksiz kontrole ait giriş, sıfıra çok yakın olduğunda bile çıkışı sonlu değerler alır. Yani süreksiz kontrol işareti yüksek -teorik olarak sonsuz- kazançlı bir kontrolör çıkışı gibi düşünülebilir, bu ise geleneksel anlamda sistem davranışındaki belirsizlik ve bozucuları bastırma özelliğini açıklamaktadır. Sürekli kontrol sistemlerinden farklı olarak, değişimsizlik sonlu kontrol işareti ile elde edilmektedir.

2.2 Kayma Kipli Sistemlere Ait Temel Kavramlar

Kayma kipli sistemler hakkında genel bilgi edindikten sonra, kayma kipli kontrolör tasarımına giriş yapabilmek ve konuyu daha iyi anlamak için bazı temel kavram ve ölçütlerin tanımının yapılması uygun olacaktır. Doğrusal olmayan yapıları da içeren en genel durum denklemini ifadesi;

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad 2.1$$

şeklinde verilebilir. Burada

$$\mathbf{x}(t) \stackrel{\Delta}{=} [x_1(t) \quad x_2(t) \quad \dots \quad x_n(t)]^T \in \mathfrak{R}^{n \times 1} \quad 2.2$$

$$\mathbf{u}(t) \stackrel{\Delta}{=} [u_1(t) \quad u_2(t) \quad \dots \quad u_m(t)]^T \in \mathfrak{R}^{m \times 1}$$

sırası ile durum ve giriş vektörleridir. Sistem $\mathbf{u}(t)$ giriş vektörüne göre doğrusal olduğunda ilginlik (affine) özelliği geçerlidir ve 2.1 sistemi

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = g_0(\mathbf{x}, t) + \sum_{i=1}^m u_i(t) \mathbf{g}_i(\mathbf{x}, t) \quad 2.3$$

şeklinde iki ayrı parçada yazılabilir (Sontag ve Sussmann 1996). Bu durumda, bozucuların ve belirsizliklerin göz ardı edilip modellenmediği bir sisteme ait en genel durum denklemi ifadesi

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t) \quad 2.4$$

olarak verilebilir (Fossen ve Foss 1991). Burada $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \in \mathfrak{R}^{n \times 1}$ ve $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ sistem dinamiklerini belirleyen fonksiyonlardır. Bu fonksiyonların doğrusal olup olmamasına göre farklı yapılar elde edilebilir. Kayma kipli kontrol kuramı bu en genel yapı üzerinde tanıtılmaya çalışılacaktır.

2.2.1 Anahtarlama yüzeyi

Örnek bir sistem olan

$$s(\mathbf{x}) = x_2 + c_1 x_1 \quad 2.5$$

için kullanılan anahtarlama fonksiyonu, m giriş için vektörel olarak

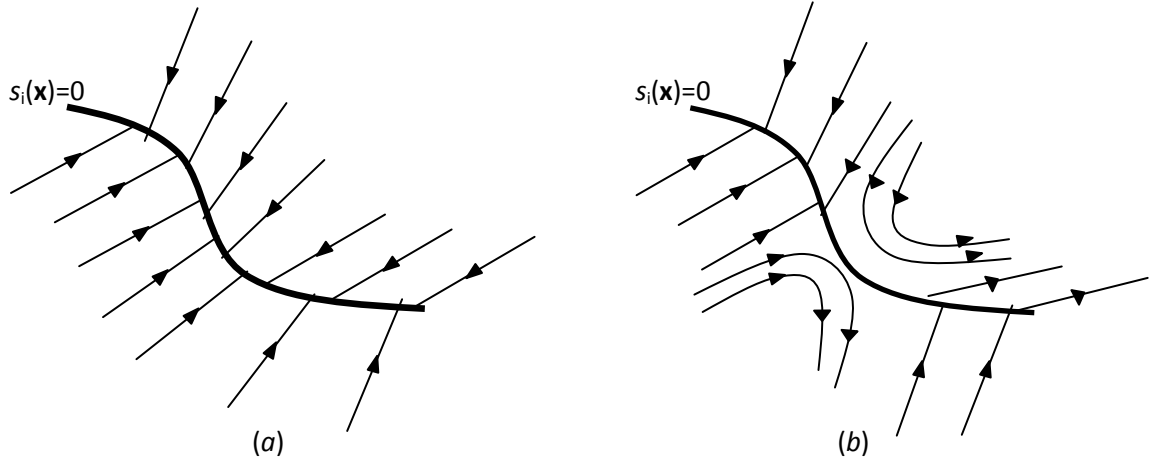
$$\mathbf{s}(\mathbf{x}) = [s_1(\mathbf{x}) \quad s_2(\mathbf{x}) \quad \dots \quad s_m(\mathbf{x})]^T \quad 2.6$$

şeklinde tanımlanır. Burada, $s_i(\mathbf{x})$ değeri $i=1, \dots, m$ olmak üzere i . kontrol kuralına ait anahtarlama fonksiyonudur. Kontrol kuralında $s_i(\mathbf{x})=0$ üzerinde bir süreksizlik olduğu ve bu yüzden kontrol kuralı işaret değiştirdiği için $s_i(\mathbf{x})=0$ eşitliği i . kontrol kuralına ait anahtarlama yüzeyi olarak adlandırılır (Hung vd 1993).

2.2.2 Kayma yüzeyi

Eğer anahtarlama yüzeyinin her iki tarafındaki sistem yörüngeleri yüzeye doğru yönelmiş ise, yani $\mathbf{x}(t)$ bir kayma kipi oluşturuyorsa, elde edilen anahtarlama yüzeyine kayma yüzeyi ya da kayma manifoldu adı verilir (Hung vd 1993). Anahtarlama yüzeyi

sistem yörüngelerinden seçildiği takdirde her zaman bir kayma yüzeyi oluşturmaktadır. Ancak, kayma kipli kontrolör tasarımında sisteme ait durum yörüngeleri dışında bir anahtarlama yüzeyi de seçilebilirse her zaman kayma kipini sağlamayabilir. Örnek olarak Şekil 2.1a'da verilen anahtarlama yüzeyi bir kayma yüzeyi tanımlarken Şekil 2.1b'deki anahtarlama yüzeyi ise kayma yüzeyi tanımına uymamaktadır.



Şekil 2.1 Bir anahtarlama yüzeyi üzerindeki farklı sistem yörüngeleri.

2.2.3 Kayma kipi

$x=0$ denge noktasından geçen herhangi bir anahtarlama yüzeyi $s(\mathbf{x})$ olsun. Eğer t_0 anında $s(\mathbf{x})=0$ ise ve $\forall t > t_0$ için $s(\mathbf{x})=0$ ise $\mathbf{x}(t)$ yörüngesi sistemin kayma kipi ya da kayma fazıdır denir (Hung vd 1993).

2.2.4 Ulaşma koşulu

Kayma kipinin varlığı en azından $s(\mathbf{x})$ yüzeyinin belirli bir civarında yüzeye yönelen durum yörüngelerinin kararlı olmasını gerektirir. Bu ise sistem durumlarının en azından asimptotik olarak yüzeye yaklaşması anlamına gelir. Kayma kipine ulaşmayı ve orada kalmayı belirleyen yeterlilik ölçütlerine ulaşma koşulu denir (Edwards ve Spurgeon 1998). Ulaşma koşulunun gerçekleştiği en büyük $s(\mathbf{x})$ komşuluğuna ise çekim bölgesi (region of attraction) denir.

2.2.5 Ulaşma kipi

Kayma kipine ulaşana kadar olan tüm $\mathbf{x}(t)$ durum yörüngeleri sistemin ulaşma kipi ya da ulaşma fazı olarak adlandırılır(Edwards ve Spurgeon 1998).

2.2.6 Ulaşma zamanı

Kayma kipine girinceye kadar geçen ve sistemin parametre belirsizlikleri ve dış bozuculara duyarlı olduğu süre ulaşma ya da vuru zamanı olarak adlandırılır(Edwards ve Spurgeon 1998). Ulaşma zamanı tek girişli durum için (2.7) tanımlanabilir. Burada “inf” fonksiyonu en büyük alt sınırı ifade eder.

$$t_{\text{ulasma}} = \inf\{t | s(\mathbf{x})=0, \forall t \geq t_{\text{ulasma}}\} \quad 2.7$$

2.3 Kayma Kipinde Çözümün Varlığı ve Tekliği

Bir diferansiyel denklem çözümünün varlık ve teklik koşulu, verilen bir başlangıç koşulunu sağlayan bir diferansiyel denklemin sadece bir çözümü olduğunu anlamamızı sağlar (Murray vd 1994). Eğer (2.5) diferansiyel denklemi için

$$|g(x_1, u) - g(x_2, u)| \leq \ell |x_1 - x_2|, \quad x_1, x_2 \in \mathfrak{R} \quad 2.8$$

koşulu sağlanacak biçimde pozitif Lipschitz sabiti olarak adlandırılan bir ℓ sabiti varsa, $g(x, u)$ fonksiyonu x değişkenine göre Lipschitz koşulunu sağlıyor denir.

$g(x, u)$ fonksiyonu, kenarları x ve u eksenlerine paralel kapalı bir W dikdörtgen bölge üzerinde sürekli olsun ve Lipschitz koşulunu sağlasın. Eğer (x_0, u_0) noktası W bölgesinin bir iç noktası ise, başlangıç değer probleminin $|x - x_0| \leq h$ aralığı üzerinde bir ve yalnız bir çözümü olacak biçimde bir $h > 0$ sayısı vardır (Güngör 2000).

Kayma kipli kontrolde ve daha genel olarak değişken yapılı sistemlerde kullanılan kontrol işareti süreksizlikler içerir. Bu durumda $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t)$ fonksiyonu da (2.1)'deki durum vektörüne göre süreksizlik gösterir. Sağ tarafları süreksizlik içeren denklemler için ise (2.8) koşulu ile verilen geleneksel diferansiyel denklem kuramına ait varlık ve teklik koşulu geçerli değildir. Bu yüzden alternatif bir yaklaşım elde edilmelidir.

Kayma kipli sistemlerde ideal kayma hareketinin oluşması gecikmeler, histerez ve modellenmemiş sistem dinamiklerinden dolayı mümkün değildir. Dolayısıyla, bu tip kusurların olmadığı durumlarda elde edilen sınırlı bir çözüm ideal kayma hareketi olarak düşünülebilir (Edwards ve Spurgeon 1998). Bu sayede, kayma kipindeki harekete ait dinamikler tanımlanarak kayma yüzeyindeki hareketin hangi koşullar altında gerçekleştiği ile ilgili analitik bilgiler saptanabilir. Eşdeğer kontrol yöntemi, ideal kayma kipindeki hareketi inceleyerek kayma kipinin varlığı ve tekliğini biçimsel olarak ele alan önemli çalışmalardan biridir.

2.3.1 Eşdeğer kontrol yöntemi

İdeal kayma denkleminin elde edilmesi amacı ile Utkin (1977) tarafından biçimsel bir yordam verilmiştir. Utkin (1977), öncelikle tüm anahtarlama yüzeylerinin kesişimini oluşturan $\mathbf{s}(\mathbf{x})=0$ kayma kipine ulaşıldığını varsaymıştır. Daha sonra durum vektörünün başlangıç koşulları altında $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ kayma yüzeyi vektörünün zamana göre türevinin sıfıra özdeş olmasını sağlayacak sürekli bir kontrol bulmaya çalışmıştır. Bunun sebebi

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = 0 \quad 2.9$$

koşulunun durum vektörünün kayma yüzeyi üzerinde kalabilmesi için gerekli bir koşul olmasıdır. Burada (2.9) denklemi, (2.4) sistemi kullanılarak açılırsa

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \right) \dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}_{eq}(t) = 0 \quad 2.10$$

elde edilir. Buradan $\mathbf{u}_{eq}(t)$ değeri çekilecek olursa

$$\mathbf{u}_{eq}(t) = -\left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \quad 2.11$$

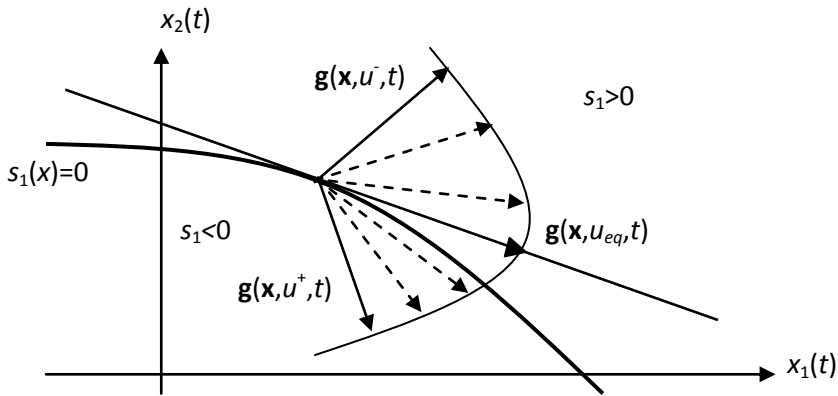
bulunur. Matris tersi alma işleminin geçerli olması için $(\partial \mathbf{s} / \partial \mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)$ değerinin tekil olmaması gereklidir. Bu koşul $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ kayma yüzeyine ait tasarım parametrelerinin uygun şekilde seçilmesi ile sağlanabilir. Elde edilen (2.11) çözümü eşdeğer kontrol olarak adlandırılır. Bu kontrol kuralının doğrudan (2.4) sistem denkleminde yerine konulması ile

$$\dot{\mathbf{x}} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \left(\frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \right)^{-1} \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \right) \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) \quad 2.12$$

elde edilir ve sistem durumları kayma yüzeyi üzerinde olmaya zorlandığında oluşan kapalı çevrim sistem dinamiklerini verir (Phillips 2000). (2.4) sisteminin doğrusal olması durumunda, zorlanmış (2.12) dinamik sisteminin $\mathbf{s}(\mathbf{x})=0$ denkleminin sağlanmasından dolayı oluşan m adet sıfır özdeğeri vardır. Diğer $(n-m)$ adet özdeğer zorlanmış sistemin dinamiklerini belirler ve bu özdeğerlerin kararlılığı $\mathbf{s}(\mathbf{x})$ tasarım parametresinin uygun seçilmesi ile garanti edilir. Bu şekilde $(n-m)$ dinamik kip tarafından tanımlanan zorlanmış dinamik sistem değişken yapıli sistem literatüründe "*indirgenmiş mertebeden sistem*" olarak adlandırılır. Sistem dinamiklerinin bu yolla elde edilmesine ise eşdeğer kontrol yöntemi adı verilir. (2.4)'de kontrol kuralı ile sistem çıkışı arasında bulunan ilişki yerine (2.12) denklemi kullanılarak sistem çıkışı ve kayma yüzeyi arasında yeni bir ilişki elde edilmiştir ve bu yüzden kayma hareketi, kayma yüzeyi parametrelerinin seçimine bağlı, kontrol kuralından bağımsız serbest bir harekettir (Edwards ve Spurgeon 1998b). Kayma kipli kontrolördeki kontrol kuralının amacı, sistem durum yörüngelerini kayma yüzeyine doğru yönelmeye zorlamak ve daha sonra da orada kalmasını sağlayarak kayma hareketinin oluşmasını garanti etmek olduğu için bu ilişki oldukça anlamlıdır.

Geometrik bakış açısından ise, eşdeğer kontrol yöntemi anahtarlama bölgesindeki tanımlanmamış süreksiz kontrol değerinin sistem durum uzayındaki hız vektörünü anahtarlama yüzeylerinin kesişimine doğru yönlendiren sürekli bir kontrol ile yer değiştirmesi anlamına gelir (Utkin 1992). Örneğin Şekil 2.2'de olduğu gibi tek

anahtarlama yüzeyi bulunan bir sistem söz konusu ise eşdeğer kontrolü bulmak için kontrol işareti $[u^-; u^+]$ aralığında değiştirilir. (2.1) sistem durumlarının kayma yüzeyi üzerinde buldukları noktadan çizilen teğet ile kontrol işaretinin sınır değerler arasında değiştirilmesi ile oluşan $g(x, u, t)$ yer eğrilerinin kesişimi eşdeğer kontrol değerini verir (Utkin 1992).



Şekil 2.2. Eşdeğer kontrolün geometrik yorumu (Utkin 1992).

2.4 Kayma Kipli Kontrol Tasarımı

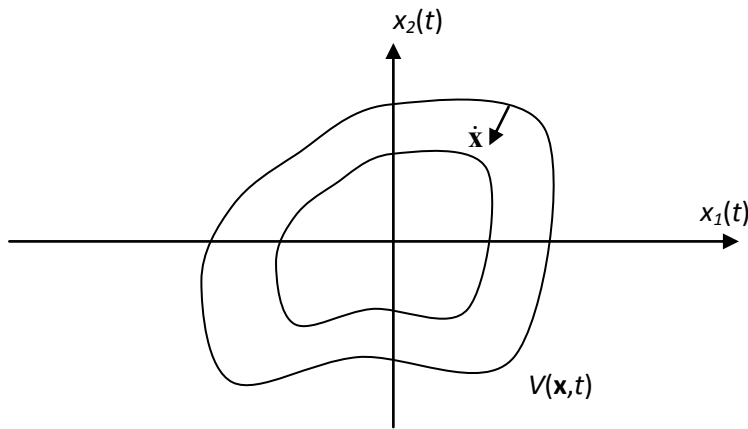
Kayma kipli kontrolör; kayma yüzeyinin her iki tarafında farklı yapılaraya sahip olan, gürbüz kontrol davranışına ulaşmayı amaçlayan, doğrusal olmayan bir kontrolördür. Bu özelliklere sahip bir kayma kipli kontrolör genel olarak ele alındığında üç temel bileşenden oluşur (Tokat 2003). Bunlar:

- kayma yüzeyinin belirlenmesi
- ulaşma koşulu ölçütünün seçilmesi
- kontrol kuralının elde edilmesi

olarak sıralanabilir. Öncelikle, verilen sistemden daha düşük boyutta olan bir kayma yüzeyinin elde edilmesi gerekir. Elde edilen kayma yüzeyi ile; kayma kipi sırasında kararlılık, belirli başarımlı ölçütlerinin iyileştirilmesi, merteye düşürme gibi tasarım amaçlarının yerine getirilmesi beklenir.

2.4.1 Ulaşma koşulu yaklaşımı

Kayma yüzeyine ulaşma koşulunun belirlenmesi de kayma kipli kontrolör tasarımıda önemli bir tasarım adımındır. Ünlü matematikçi Aleksandr M. Lyapunov (1857-1918) tarafından 1893 yılında yayınlanan çalışmada doğrusal olmayan diferansiyel denklemler kümesinin kararlılığını ispatlamak için genelleştirilmiş enerji düşüncesi kullanılmış ve sistemin enerjisindeki değişim hızı ile kararlılık belirlenmiştir. 1960'lı yıllara kadar gereken ilgiyi bulamayan Lyapunov yöntemi sistem kararlılığı ile ilgili çalışmalarla birlikte önem kazanmıştır ve bir diferansiyel denklemin açık çözümünü elde etmeksizin sistemin kararlılık özelliklerini elde edebilmek amacı ile kullanılmaktadır. Lyapunov kararlılık için iki farklı yöntem geliştirmiştir. Birincisi dolaylı yöntemdir ve orijinal sisteme ait yerel kararlılık bilgisini elde etmek için doğrusallaştırma yapılmasına dayanır. İkincisi ise doğrudan yöntemdir. Bu yöntemde denge noktasının kararlı olması için, durum uzayında, Şekil 2.3'teki gibi durum değişkenlerinin türevinin her zaman seviye eğrilerinin iç tarafına doğru yöneldiği ve seviye eğrilerinin denge noktasını çevrelediği bir gerçek değerli fonksiyon bulunabilmelidir (Aström ve Wittenmark 1989).



Şekil 2.3 Lyapunov kararlılık yönteminin gösterilimi

Şekil 2.3'te $V(\mathbf{x},t)$ ile gösterilen seviye eğrileri Lyapunov fonksiyonu olarak adlandırılır. $V(\mathbf{x},t)$ orijini de içine alan bir uzayda tanımlı sürekli olarak türevi bulunan skaler bir fonksiyondur. Bu fonksiyonun pozitif tanımlı olması için

$$\forall \mathbf{x},t \text{ için } V(0,t)=0 \text{ ve } V(\mathbf{x},t)>0 \text{ (} \mathbf{x} \neq 0 \text{)}$$

2.13

olması gerekir. Negatif tanımlı olması için ise

$$\forall x, t \text{ için } V(0, t) = 0 \text{ ve } V(\mathbf{x}, t) < 0 \text{ (} x \neq 0 \text{)} \quad 2.14$$

olması gerekir. Düzgün asimtotik kararlılık için $V(\mathbf{x}, t)$ 'nin pozitif tanımlı ve türevinin negatif tanımlı olması yeterli bir koşuldur (Aström ve Wittenmark 1989). Düzgün kararlılık, başlangıç anının farklı seçilmesi durumunda da denge noktasının kararlılığını kaybetmediği anlamına gelir.

Kararlılık testi için kullanılan Lyapunov doğrudan yönteminden, ulaşma koşulu ölçütü olarak yararlanmak amacı ile durum yörüngesinin kayma yüzeyine olan hareketini karakterize eden genelleştirilmiş bir Lyapunov fonksiyonu, yüzeyin kendisi cinsinden ifade edilir. Her bir anahtarlamalı kontrol yapısı için, Lyapunov fonksiyonuna ait terimler öyle seçilir ki Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı olur. Böylece durum yörüngesinin yüzeye olan hareketi garanti edilir. Ulaşma koşulu elde etmek için bir aday Lyapunov fonksiyonu

$$V(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T(\mathbf{x}) \mathbf{M} \mathbf{s}(\mathbf{x}) > 0 \quad 2.15$$

olarak seçilebilir. Burada $\mathbf{M} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ pozitif tanımlı simetrik matristir ve birim matris olarak seçilebileceği gibi farklı anahtarlama yüzeylerine farklı ağırlık değerleri vermek için değişik değerlerde de seçilebilir. Kolay anlaşılması için $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ alırsak,

$$V(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T(\mathbf{x}) \mathbf{I} \mathbf{s}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T(\mathbf{x}) \mathbf{s}(\mathbf{x}) \quad 2.16$$

elde edilir. (2.16) zamana göre türetilirse ulaşma koşulu

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{s}^T(\mathbf{x}) \dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) < 0, \quad (\mathbf{s}(\mathbf{x}) \neq 0) \quad 2.17$$

olmasına bağlıdır. (2.17) koşulu durumların kayma yüzeyine olan uzaklığının karesinin tüm sistem yörüngeleri boyunca azalması anlamına gelir. Bu ulaşma koşulu ile de doğrudan anahtarlama fonksiyonunda olduğu gibi sonlu ulaşma zamanı garanti edilemez. Çünkü asimtotik kararlılık zaman sonsuza giderken tanımlıdır. Sonlu ulaşma zamanının her zaman elde edilmesi için

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) < -\varepsilon, \quad (s(\mathbf{x}) \neq 0) \quad 2.18$$

olması yeterlidir (Hung vd 1993). (2.18)'de ε kesin pozitif gerçek bir sayıdır. Bu ulaşma koşulu anahtarlama yüzeylerinin kesişiminde sonlu ulaşma zamanını garanti eder (Hung vd 1993). Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile elde edilen ulaşma koşulu ölçütünde anahtarlama düzeni tüm kayma yüzeylerinin kesişiminde kabul edilmektedir. Tek girişli durum için Lyapunov ulaşma koşulu olarak sıkça kullanılan bir başka ölçüt ise

$$\dot{V}(\mathbf{x}, t) \leq -\mu |s(\mathbf{x})| \quad 2.19$$

şeklindedir ve bu koşul literatürde μ -ulaşma koşulu olarak adlandırılır (Edwards ve Spurgeon 1998). Ulaşma kipi boyunca $s(\mathbf{x}) \neq 0$ olduğundan $\mu|s(\mathbf{x})|$ ifadesi ulaşma zamanı boyunca her zaman kesin pozitifdir ve bu da sistem durumlarının kayma yüzeyine olan hareketini sağlar.

2.4.2 Kontrol kuralının elde edilmesi

Kayma yüzeyi belirlendikten ve ulaşma koşulunu belirleyen ölçüt saptandıktan sonraki adım, $\mathbf{u}: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$ şeklinde bir anahtarlama geri besleme kontrol kuralının (2.4) sistemi için elde edilmesidir. Kontrol kuralı için hangi ulaşma ölçütlerinin kullanılacağı ve ideal kayma kipine ait dinamiklerin nasıl belirleneceği önemlidir. Çok girişli sistemler için ($m > 1$) farklı ulaşma ölçütlerinin seçilmesi ile farklı kayma kipleri elde edileceği yukarıda gösterilmiştir. Tek girişli sistemler için ise zaten tek bir yüzey tanımlı olduğu ve yüzeylerin kesişimi diye bir durum söz konusu olmadığı için böyle bir farklılık oluşmaz.

2.4.2.1 Lyapunov yöntemi

Literatürde kayma kipli kontrolör tasarımı en çok kullanılan yöntemlerden birisi de Lyapunov ulaşma ölçütünden yararlanılarak kontrol kuralının elde edilmesidir. Bu durumda tüm anahtarlama yüzeylerinin kesişiminin kayma yüzeyi olduğu anahtarlama düzeni elde edilir. Bu amaçla (2.3) denklemini (2.17) koşulunda yerine koyulursa

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} = \mathbf{s}^T \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(t)) < 0 \quad 2.20$$

elde edilir. Buradan $\mathbf{u}(t)$ değeri çözümlenerek kontrol kuralı elde edilmiş olur. Yine tek girişli durum için özel olarak (2.19) koşulu eşitlik durumunda çözümlerse,

$$\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(t)) = -\mu \frac{|s|}{s} = -\mu \text{sign}(s) \quad 2.21$$

elde edilir. Buradan kontrol işareti çekilecek olursa

$$\mathbf{u}(t) = -\left(\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \right)^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mu \text{sign}(s) \right) \quad 2.22$$

kontrol işareti elde edilir.

2.4.3 Kontrol kuralı bileşenleri

Bazı durumlarda, kayma kipli kontrolöre ait yapının önceden belirlenmesi ve daha sonra istenilen ulaşma kuralını sağlayacak şekilde kontrolör kazanç değerlerinin belirlenmesi daha uygundur (Hung vd 1993). Bu şekilde önceden belirlenen en basit kontrol yapısı

$$u_i(t) = \begin{cases} u_i^+, & \text{eger } s_i(\mathbf{x}) > 0 \\ u_i^-, & \text{eger } s_i(\mathbf{x}) < 0 \end{cases}, \quad i=1, \dots, m \quad (u_i^+ \neq u_i^-) \quad 2.23$$

biçiminde verilen yapıdır. Burada u_i^+ , u_i^- ve $s_i(\mathbf{x})$ sürekli fonksiyonlardır ve (2.33) kontrol kuralı anahtarlama (relay) kontrol kuralı olarak adlandırılır. Önceden belirlenen yapıya sahip ve literatürde sıkça kullanılan diğer bir yöntem ise eşdeğer kontrolden yararlanılarak elde edilir. (2.11)'de verilen eşdeğer kontrol, sistemin kayma kipindeki dinamiklerini tanımlayan faydalı bir çalışmadır. Fakat başlangıçta sistem durumları kayma yüzeyi üzerinde değilse sadece \mathbf{u}_{eq} değerini kullanarak sistemi kayma kipine ulaştırmak mümkün değildir. Çünkü (2.11) eşdeğer kontrolü $\mathbf{s}(\mathbf{x})=0$ varsayımı ile elde edilmiştir ve ulaşma koşulu ölçütlerini yerine getirmez. Bu yüzden sistem durumlarının kayma yüzeyi üzerinde bulunmadığı durumları ele almak için eşdeğer kontrole yeni bir kontrol eklenerek

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{eq}(t) + \mathbf{u}_N(t) \quad 2.24$$

şeklinde iki bileşenden oluşan yeni bir toplam kontrol kuralı elde edilir. Birinci terim olan $\mathbf{u}_{eq}(t)$ eşdeğer kontrol olarak bilinen, kestirilmiş sistem parametreleri cinsinden sürekli bir kontroldür ve sistemin istenmeyen kestirilmiş dinamiklerini dengeler. Eşdeğer kontrole eklenen yeni kontrol değeri olan ikinci terim $\mathbf{u}_N(t)$ ise hata durum yörüngesi ve kayma yüzeyinin kesişiminde sonsuz anahtarlama neden olan süreksiz veya anahtarlama bir fonksiyon olabilir. Böylece, $\mathbf{u}_{eq}(t)$ kullanılarak sistem yörüngesi sürekli kayma yüzeyine doğru harekete zorlanırken, $\mathbf{u}_N(t)$ sayesinde ise yörüngenin kayma yüzeyi üstünde kalması sağlanır (Edwards ve Spurgeon 1998). (2.24) kontrol kuralı (2.4) sisteminde yerine koyulursa,

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) &= \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(t)) \\ &= \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}_{eq}(t)) + \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}_N(t) \end{aligned} \quad 2.25$$

elde edilir. Birinci terim (2.9) denkleminde $\mathbf{s}(\mathbf{x})=0$ için sıfıra eşittir. Eğer $\mathbf{u}_N(t)$ değeri $\mathbf{s}(\mathbf{x})=0$ olduğunda sıfıra eşit olarak seçilirse ideal kayma kipi dinamiklerini etkilemez. Çünkü,

$$\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{s}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}_N(t) = 0 \quad 2.26$$

olmaktadır. İdeal kayma kipinde olunmadığı durumda yani $\mathbf{s}(\mathbf{x}) \neq 0$ iken, $\mathbf{u}_N(t)$ değeri sistem durumlarını kayma yüzeyine yöneltecek bir değerde seçilir. Bunun seçilmesi ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır (DeCarlo vd 1988). Sık kullanılan yöntemlerden birisi $\mathbf{u}_N(t)$ için süreksiz bir fonksiyon olarak

$$\mathbf{u}_N(t) = [-k_1 \text{sign}(s_1) \quad -k_2 \text{sign}(s_2) \quad \dots \quad -k_m \text{sign}(s_m)]^T \quad 2.27$$

biçiminde bir ifade kullanılmaktadır. Burada k_i ($i=1,2,\dots,m$) değeri, m giriş sayısı olmak üzere kesin pozitif gerçekteki sayılardır ve sabit seçilebileceği gibi durum değişkenlerine bağlı olarak da tasarlanabilir. (2.27) kullanılarak elde edilen yöntem anahtarlamalı kontrol kuralı olarak adlandırılır ve matris biçiminde

$$\mathbf{u}_N(t) = -\mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}) \quad 2.28$$

yazılabilir. Burada süreksiz kontrol kazancı olan \mathbf{K} matrisi, elemanları (2.27)'de geçen k_i ($i=1,\dots,m$) değerleri olan köşegen matristir. Bu kontrol kuralı ile i . yüzeye ait

$$s_i(\mathbf{x}) \dot{s}_i(\mathbf{x}) = -s_i(\mathbf{x}) \left(\frac{\partial s_i}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}(\mathbf{x})) \right) < 0 \quad 2.29$$

şeklindeki ulaşma koşulunun sağlanması gerekir. Böylece önceden belirlenen kontrolör yapısına ait \mathbf{K} parametreleri ayarlanarak (2.29) koşulu sağlanabilir. Özel olarak $(\partial \mathbf{s} / \partial \mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{I}$ seçilirse $\dot{\mathbf{s}}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_N(t)$ olacağından ulaşma koşulu

$$s_i(\mathbf{x}) \dot{s}_i(\mathbf{x}) = -k_i s_i(\mathbf{x}) \text{sign}(s_i(\mathbf{x})) < 0 \quad 2.30$$

şeklinde yazılabilir.

Eşdeğer kontrol kullanılarak elde edilen kontrol kuralında ulaşma koşulu olarak doğrudan ulaşma koşulu kullanılmaktadır. Bu durumda sabit sıralı ya da ilk ulaşılan ilk

anahtarların tipi bir anahtarlama olması düşünülür. Fakat, eşdeğer dinamikler bütün anahtarlama yüzeylerinin kesişiminde tanımlı olduğu için tüm yüzeylerin kesişimi dışında anahtarlama olup olmayacağı kesin değildir.

2.5 Belirsizlikler ve Bozucularla Başa Çıkma

Kayma kipli kontrolörlerin en önemli özelliği parametre değişikliklerine ve dış bozuculara karşı gösterdikleri gürbüzlük özelliğidir. Bu özellik ise kayma kipini belirleyen diferansiyel denklemlerin değişimsiz olması anlamına gelir. Bu yüzden tasarım sırasında bu durumun incelenmesi gerekir. Genel bir sisteme ait durum denklemi (2.4)'de verilmiştir. Belirsiz parametrelili ve dış bozucuların bulunduğu yapı için bu denklem tekrar yazılacak olursa, yeni denklem (Hung vd 1993),

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = (\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{f}_h(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t)) + (\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{B}_h(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t))\mathbf{u}(t) + \mathbf{d}(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t) \quad 2.31$$

şeklinde verilebilir. Burada $\mathbf{x} \in \mathcal{R}^n$, $\mathbf{u} \in \mathcal{R}^m$ ($n > m$) olmak üzere, $\mathbf{f}_h(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t)$ ve $\mathbf{B}_h(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t)$ zamanla değişen belirsizliklerdir ve sistemdeki herhangi bir parametre belirsizliğine ya da doğrusal olmayan özelliğe karşı düşer. Belirsiz parametre vektörü \mathbf{h} değeri ile temsil edilmiştir. Dış bozucular ise $\mathbf{d}(\mathbf{x}, \mathbf{h}, t)$ ile gösterilmiştir. Durumları $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]$ ile tanımlı ikinci mertebeden

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= ax_2(t) + u(t) \end{aligned} \quad 2.32$$

sistemi ele alınsın. (2.22) Lyapunov yöntemine göre kontrol kuralı elde edilir ve kontrolör parametreleri $\mu=5$, $c_1=2$, dış bozucular ise $d(t)=4\sin(3\pi t)$ şeklinde modellenerek benzetimler yapılırsa, kayma kipi başladığı andan sonra sinüzoidal bozucuların etkisinin kaybolduğu görülür.

2.6 Başarım İyileştirme Yöntemleri

Kayma kipli kontrolör başarımını iyileştirmek, daha gürbüz ve/veya daha iyi geçici hal yanıtına sahip sistemler elde etmek için kontrolöre ait bazı parametrelerin ya da doğrudan kontrolör yapısının değiştirilmesi yoluna gidilir.

Geleneksel kayma kipli kontrolde belirsizlik ve bozucuların uyumluluk koşulunu sağladıkları varsayılmıştır. Bu varsayım altında kayma kipli kontrol değişimsizlik özelliği gösterir. Fakat sarsımlar uyumluluk koşulunu sağlamıyorsa istenen izleme hassaslığının geleneksel kayma kipli kontrol yapısı ile her zaman elde edilmesi sağlanamayabilir. Bunun için kayma yüzeyiyle belirlenen dinamik başarım üzerinde etkili uyumsuz belirsizliklerin etkisini azaltmak için kontrol stratejisi geliştirilmiştir (Spurgeon ve Davies 1993).

Büyük kazanç değerleri kullanmadan gürbüzlüğü sağlayabilmek için Huh ve Lee (1995) tarafından kontrol kuralına ek bir terim olarak kayma yüzeyinin kendisini de eklenmiştir. Bu terim sistem sınır katmandan uzaklaştığında büyük değerler alacağı için bozucuların etkisini azaltmaktadır.

Bu bölümde üzerinde durduğumuz geleneksel kayma kipli kontrol düzenlerini tasarlamak için parametre belirsizlikleri ve dış bozucuların üst sınırlarına ait bilgiye gereksinim duyulmaktadır. Oysa gerçek hayattaki çoğu kontrol sisteminde, kontrol edilen sistem dinamiklerinin belirsizlik ve/veya doğrusal olmayan özelliklerine ait istatistiksel karakteristikler genel olarak elde edilemezler ya da elde edilmeleri ekonomik açıdan zorluk çıkarır (Zak ve Hui 1993). Bu durumda, kontrol kuralı için düşünülen en kötü durum genel olarak oluşmadığından, gereksiz ve ekonomik olmayan şekilde büyük kontrol işaretleri kullanılmış olur (Denker ve Ohnishi 1996). Bu gereksinimi ortadan kaldırmak için sarsımların sınır değerlerini elde etmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır (Seraji, 1989, Yoo ve Chung 1992). Ayrıca sarsım kestirimi yaparak, sarsımların üst sınırları bilgisine gerek duymadan sadece sarsım kestirim hatası bilgisi ile kontrol sağlayan bir yöntem önerilmiştir (Elmali ve Olgac 1992, 1996).

Kayma kipli kontrolör tasarımında eşdeğer kontrolün hesaplanması için sistem modelinden yararlanılır. Fakat daha önce belirtildiği gibi, sistem dinamiklerine ait bilgi her zaman kesin olarak elde edilemez. Bu yüzden eşdeğer kontrolün elde edilmesinde zorluklar ortaya çıkar. Bu zorluktan kurtulmanın bir yolu durum gözleyicileri tasarlamaktır (Slotine ve Li 1991). Böylece, durum kestirimlerine dayanan bir eşdeğer kontrol kestirimi elde edilir. Gözleyici uygun şekilde belirlenirse sistem durumları istenen yörüngeye ulaşır.

Kayma kipli sistemler, kapalı çevrim sisteme ait istenen sistem davranışını sağlayabilmek için oldukça hızlı bir anahtarlama mekanizması kullanır. Bu anahtarlama sonucunda oluşan sonlu genlik ve frekansa sahip sönümsüz salınımlar alçak ve yüksek frekanslı bileşenleri olan darbe genişlikli genlik modülasyonlu işaretlerdir (Denker ve Kaynak 1994). Kayma kipinde oluşan bu salınım olayına çatırtı adı verilir. Kayma kipli kontrol için yukarıda anlatılan tüm yöntem ve algoritmaların doğrudan uygulanması ile bir çatırtı oluşması söz konusudur. Birçok elektronik sistem için çatırtı bir sorun olmasa da genel olarak bazı fiziksel sistemler ile bir arada kullanılırlar ve bu fiziksel sistemler ise genel olarak geleneksel kayma kipli kontrolör çıkışındaki süreksizlikle uyumlu değildirler ve böyle bir çatırtı ile baş edemeyebilirler (Bartoszewicz 2000).

Çatırtı sorununun oluşma nedenleri ikiye ayrılabilir (Young 1999). Bunlardan ilki, fiziksel olarak ideal anahtarlamanın gerçekleşmemesi sonucu anahtarlama cihazlarının kullanıldığı analog, sayısal ya da mikroişlemci tabanlı tüm uygulamalarda ortaya çıkan zaman gecikmesi ve zaman sabitleri gibi nedenlerdir. İkinci neden modellenmemiş dinamiklerin varlığıdır. Bu dinamikler anahtarlama ideal kabul edilse bile kayma yüzeyinin komşuluğunda çatırtı oluşmasına neden olurlar. Bu parazit dinamikler kontrol edilen süreçteki eyleyici, algılayıcı ve diğer yüksek frekanslı kiplerin hızlı dinamiklerine karşı düşer. Eğer bu dinamiklerle ilişkili kutuplar iyi sönümlü ve geribeslemeli kontrol sisteminin bant genişliğinin dışında ise kontrol tasarımı için kullanılan açık çevrim sistem modelinde genellikle bu dinamikler ihmal edilir ve modellenmezler. Fakat, kayma kipli kontrol sisteminde, kontrol işaretindeki süreksizliğe bağlı olarak parazit dinamikler ve anahtarlama terimi arasındaki etkileşimler çatırtıya neden olur. Hatta, süreksiz kontrol kazancının büyük seçildiği durumlarda çatırtı, sistemin kararsızlığa gitmesine neden olabilir (Park vd 1996). Ayrıca sürekli

anahtarlama daha fazla kontrol çabası gerektirir ve düşük kontrol doğruluğuna, elektrik güç devrelerinde yüksek ısı kayıplara, hareketli mekanik parçalarda aşınmaya neden olur (Utkin 1993). Bu nedenlerden dolayı, çatırtı kayma kipli kontrolörün daha geniş kullanım alanına sahip olmasını engelleyen bir sorun olarak görülmüştür. Literatürde çatırtının etkilerini gidermek için yapılan çalışmalar ayrı bir çalışma sahası oluşturmaktadır.

İlk akla gelebilecek yöntem kazanç ayarlama yöntemidir. Çatırtıya neden olan süreksiz kontrol işaretinin sistem kayma yüzeyine yaklaştığında küçülmesini ve böylece çatırtının etkisini azaltmayı amaçlayarak gradyan düşüm algoritmasına dayanan bir yöntem önerilmiştir (Ertugrul vd 2000).

İyi bilinen bir başka yöntem süreksiz kontrol değerinde yumuşatma sağlamaktır. Yumuşatma için bir yöntem sınır katmanlı (boundary layer) kontrol yöntemidir. Kayma yüzeyi etrafında bir sınır katmanı oluşturulur ve süreksiz kontrol işaretinde

$$\text{sat}(s, \phi) = \begin{cases} \text{sign}(s) & \text{eğer } |s|/\phi \geq 1 \\ s/\phi & \text{eğer } |s|/\phi < 1 \end{cases} \quad 2.33$$

şeklinde tanımlı doyum fonksiyonu kullanılır ve ϕ genişliğine sahip sınır katmanlı bölgede doğrusal bir geribesleme anahtarlama kazancı sağlar (Slotine ve Li 1991). Böylece kontrol işaretinin sürekli olması sağlanarak çatırtı önlenmeye çalışılır. Bu sürekli kontrol kuralının kullanılması sonucunda, sonlu zamanda kayma yüzeyine ulaşma özelliği sağlanmaz ve asimtotik olarak kayma yüzeyine erişilir. Bu yüzden bu sürekli kontrol kuralı düzeneğine sahip kayma kipli kontrolörler asimtotik kayma kipli kontrolör olarak da adlandırılır (Brown 2001). Slotine ve Sastry (1983) doyum fonksiyonuna ait sınır katman genişliğini ayarlayarak çatırtıyı daha da azaltmaya çalışmıştır. Bu durumda sınır katmanı dışındaki noktalarda

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq (\dot{\phi}(t) - \eta)|s| \quad 2.34$$

sağlanması gerekir. (2.34) incelenirse, sınır katmanı küçülürken ($\dot{\phi} < 0$) bu ulaşma koşulunun sağlanmasının, büyürken ($\dot{\phi} > 0$) sağlanmasından daha zor olduğu görülür (Slotine ve Coetsee 1986).

Sürekli işareti ortadan kaldırmak için (2.33)'te verilen doyum fonksiyonu dışında başka fonksiyonlar da tanımlanabilir. Young (1978) tarafından doğrusal fonksiyon ve Ertugrul vd (1996) tarafından tek katlı, teğetlik yayı, ötelenmiş sigmoid ve arctanjant fonksiyonları doyum fonksiyonu yerine kullanılarak sürekli işaretin ortadan kaldırılması önerilmiştir. Edwards ve Spurgeon (1998) ise üstel kural yaklaşımı yöntemi ile doyum fonksiyonunu

$$\text{sat}(s, \phi) = \begin{cases} \text{sign}(s) & \text{eğer } \frac{|s|}{\phi} \geq 1 \\ \frac{s}{\phi^{1-q}|s|^q} & \text{eğer } \frac{|s|}{\phi} < 1 \\ 0 & \text{eğer } \frac{|s|}{\phi} = 0 \end{cases} \quad 2.35$$

şeklinde üstel fonksiyonlar yardımı ile tanımlamıştır. Burton ve Zinober (1986) ise basit bir oransal yaklaşım ile doyum fonksiyonunu

$$\text{sat}(s, \phi) = \frac{s}{|s| + \phi} \quad 2.36$$

şeklinde tanımlamıştır. Doyum fonksiyonu, belirsizlik ve bozucuların yüksek frekanslı bileşenlerini zayıflatır fakat çatırtıya ait salınım frekansını değiştirmez. Bu amaçla, Olgaç ve Iragavarapu (1992), ölü kuşak (dead band) eklenmiş doyum fonksiyonu kullanarak bozucu frekanslarını değiştirmiş ve daha yumuşak bir kontrol işareti elde etmiştir.

Kachroo ve Tomizuka (1996) ise katman genişliğini sabit değerli alarak sistem dinamiklerine bağlı tümlev eylemi içeren alçak geçiren bir filtre tasarlayarak başarımla iyileştirmesi sağlamış ve daha sonra analizini yapmıştır (Kachroo 1999).

Çatırtıyı azaltmaya yönelik bir başka yöntem modellenmemiş yüksek frekanslı dinamiklerle aynı aralıktaki frekans bileşenlerinin bastırılmasını sağlayacak bir alçak geçiren filtre tasarlanmasıdır (Young ve Özgüner 1993).

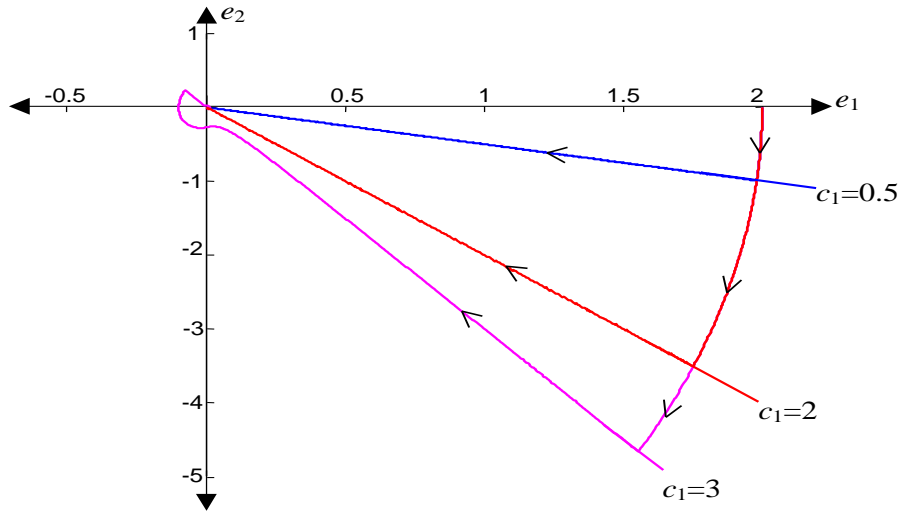
Yukarıda verilen başarımla iyileştirme çalışmaları genel olarak başlangıç koşullarından bağımsız sabit ve doğrusal kayma yüzeyleri ile tasarlanmıştır. Kayma kipli kontrol tasarımında kullanılan zamanla değişken veya doğrusal olmayan kayma yüzeyleri ve başlangıç koşullarına bağlı durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyleri diğer başarımla iyileştirme yöntemlerindedir. Tezin ana konusunu oluşturan bu çalışmalar sonraki bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştır.

2.7 Kayma Yüzeyi Tasarımı

Sistem durumlarının kayma yüzeyinde oluşturdukları kayma hareketi sırasında sistem dış bozuculara ve parametre belirsizliklerine karşı daha gürbüzdür. Sistem durumları başlangıçta kayma yüzeyi üzerinde bulunmadığı için ulaşma kipi sırasında bu özellik geçerli değildir. Bu yüzden ulaşma zamanını kısaltmak ve böylece bozucu etkisini azaltmak için temel bir yöntem (2.28)'de tanımlanan süreksiz kontrol kazancının genliğinin artırılmasıdır. Süreksiz kontrol kazancı arttırıldığında modellenmemiş sistem dinamiklerine karşı aşırı duyarlılık, eyleyicinin doyuma ulaşması ve istenmeyen yüksek genlikli çatırtı gibi olumsuzluklar ortaya çıkabilir (Choi vd 1993). Bu yüzden, sistemin dinamik başarımla iyileştirmek için kontrol yapısının üzerinde anahtarlandığı kayma yüzeyine ait parametrelerin değiştirilmesi yoluna gidilir. (2.32) sisteminde, kayma yüzeyi hata parametresi farklı değerler aldığı anda hata faz düzlemindeki değişim Şekil 2.4'te verilmiştir.

Küçük c_1 değerleri için ulaşma zamanı daha kısa olmakta fakat sistem yavaş hareket bölgesinde bulunmaktadır. Büyük c_1 değerleri için ise sistem yanıtı hızlı fakat ulaşma zamanı uzun olmaktadır (Bartoszewicz 1996). Bunlar sistemin fiziksel özelliklerine bağlı olan modellenmemiş en küçük yapısal kipe ait frekans değeri, eyleyici üzerindeki sınırlardan kaynaklanan modellenmemiş en büyük zaman gecikmesi ve eldeki

hesaplama ve teknolojik güce bağlı olarak belirlenen örnekleme hızıdır (Slotine ve Li 1991).



Şekil 2.4 Farklı c_1 değerleri için elde edilen durum uzayı yanıtları

Kayma yüzeyi eğimine ait üst sınır, bu üç faktöre ait sınırlardan en küçüğü olarak seçilir. Kayma yüzeyine ait alt sınır değeri ise küçük c_1 değerleri daha uzun izleme sürelerine neden olacağından izin verilen izleme süresi değerine bağlıdır (Ha ve diğ., 1999).

2.7.1 Doğrusal kayma yüzeyi tasarımları

2.7.1.1 İkinci mertebe sistemler

Kayma yüzeyi tasarımı ile sistem başarımını iyileştirmek için olası bir yaklaşımlar:

- 1) Ulaşma zamanını azaltmak için başlangıçta küçük kayma yüzeyi katsayısı kullanımı
- 2) Sürekli hal hatasının olabilecek en küçük değeri alması için büyük kayma yüzeyi katsayıları kullanmak

İki farklı yaklaşımın bir arada kullanılması ancak geleneksel yapıdaki doğrusal ve sabit kayma yüzeyleri yerine yine doğrusal olan fakat zamanla değişen kayma yüzeyleri kullanmaktır. Bu tip kayma yüzeyleri durum uzayında zamanla değişen doğrusal

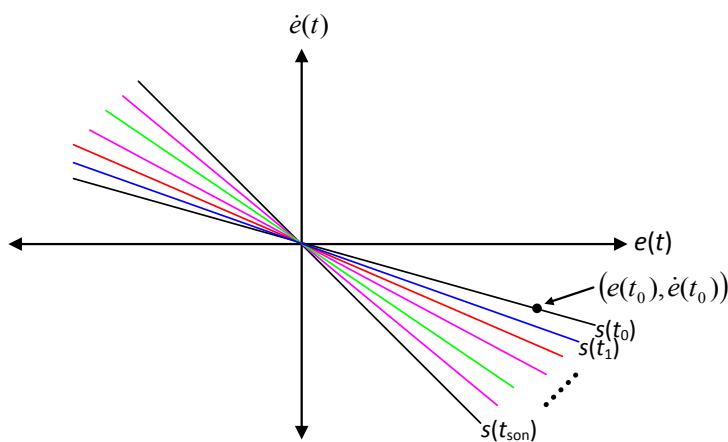
biçimde olmalarına rağmen sistem davranışı açısından karakteristik olarak doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir (Lee vd 1998). Choi vd (1993), sistem hareketinin başlangıç kısmındaki hareketini yani ulaşma kipini, kontrol kuralını ya da başka diğer parametreleri değiştirerek kısaltarak bozucuların sistem üzerinde etkili olduğu süreyi indirgemiş ve tüm sistemin bozuculara daha az duyarlı olması sağlamışlardır. Döndürme ve öteleme düzenlerini ikinci mertebeli sistemlerde izleme problemi için gerçekleştirmek amacı ile kayma yüzeyi

$$s(t) = \dot{e}(t) + c(t)e(t) - \alpha(t) = 0 \quad 2.37$$

olarak tanımlanır (Choi vd 1993). Kararlı bölgelerde $\alpha(t) = 0$ alınarak $c(t)$ ayarlanır ve dönme işlemi gerçekleşir. Kararsız bölgelerde ise $c(t)$ geleneksel kayma kipli kontrolördeki sabit değerinde alınarak, $\alpha(t)$ ayarlanır ve böylece öteleme işlemi gerçekleşir. Hata durum uzayında Şekil 2.5'te olduğu gibi $s(t_0)$ kayma yüzeyinin $t=t_0$ anında sistemin bulunduğu temsilci noktadan (TN) geçmesini sağlamak için

$$c(t_0) = -\frac{\dot{e}(t_0)}{e(t_0)} \quad 2.38$$

seçilmelidir (Choi ve diğ., 1993).



Şekil 2.5. Döndürme işlemi sonucunda kayma yüzeyinin hareketi

Döndürme hareketi daha sonra şu şekilde düzenlenir (Choi vd 1993)

- Kayma yüzeyi her $\Delta\tau$ süresinde bir hareket ettirilir. Yeni $c(t)$ değeri

$$|\dot{e}(t_0) + c(t_0 + \Delta\tau)e(t_0)| = \delta_{fr} \quad 2.39$$

mutlak eşitliği çözülerek bulunur.

- Dönme yönünü $c(t_0)$ değeri ve hedef kayma yüzeyini belirleyen sabit c_{son} değeri belirler. Hedef kayma yüzeyi olarak geleneksel kayma kipli kontrolöre ait kayma yüzeyi değeri alınmıştır (Choi vd 1993). Eğer $c(t_0) < c_{son}$ ise saat yönünde, eğer $c(t_0) > c_{son}$ ise ters saat yönünde dönme işlemi gerçekleştirilir.
- (2.39)'da $c(t_0 + \Delta\tau)$ için iki çözüm bulunmaktadır. Eğer saat yönünde dönme söz konusu ise bu çözümlerden büyük olanı, ters-saat yönünde dönme söz konusu ise küçük olanı seçilir. Benzer şekilde herhangi bir n . adımdaki kayma yüzeyi değeri

$$|\dot{e}(t_{n-1}) + c(t_{n-1} + \Delta\tau)e(t_{n-1})| = \delta_{fr} \quad 2.40$$

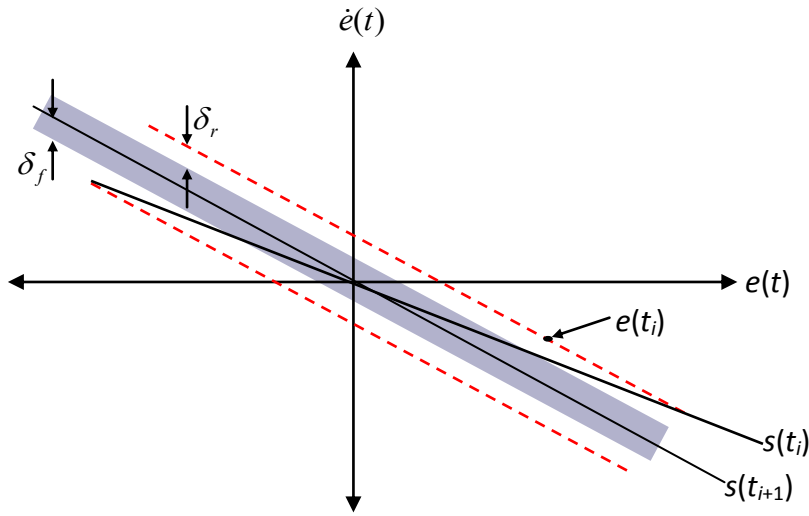
mutlak eşitliği çözülerek bulunur.

- Döndürme işlemine son verme koşulu olarak, saat yönünde dönme durumunda eğer her hangi bir n . adımda $c(t_n) \leq c_{son}$ ise $c(t) = c_{son}$ olarak sabitlenir. Ters-saat yönünde ise eğer $c(t_n) \geq c_{son}$ ise $c(t) = c_{son}$ olarak sabitlenir. Kayma yüzeyinin dönme miktarını belirleyen δ_{fr} değeri

$$\delta_{fr} = \delta_f + \delta_r \quad 2.41$$

şeklindedir ve bu tasarım parametreleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir (Choi vd 1993).

Burada δ_f değeri zaman gecikmesi, histerez gibi ideal olmayan koşullara bağlı olarak belirlenen ve Şekil 2.6'da gösterildiği gibi yüzeyin yakın komşuluğunu belirleyen bir büyüklüktür. Bundan dolayı bu yöntem yakın komşuluk yöntemi olarak da adlandırılabilir. Diğer parametre olan δ_r değeri yüzeyin döndürülmesi için gerekli uygun bir sabit olarak seçilir ve sistem gürbüzlüğünün iyileştirilmesinde önemli bir konuma sahiptir (Choi vd 1993).



Şekil 2.6. Kayma yüzeylerinin döndürülmesinde kullanılan parametreler

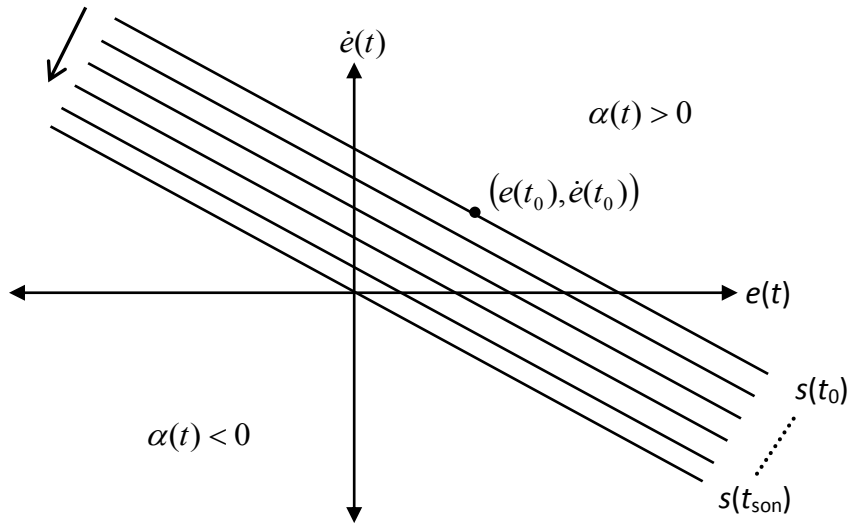
Kararsız bölgede tanımlanan döndürme işlemi ulaşma zamanının olumsuz etkilenerek uzamasına neden olmaktadır. Bu sorunu önlemek için Choi vd. (1993) kararsız bölgelerde uygulanmak üzere öteleme işlemini önermiştir. Ötelemeli kayma yüzeyi

$$s_{\bar{o}}(t) = c_{\text{son}} e(t) + \dot{e}(t) - \alpha(t) \quad 2.42$$

şeklinde tanımlanmıştır. Kayma yüzeyinin herhangi bir $t=t_0$ başlangıç koşulundan geçmesini sağlayacak uygun bir $\alpha(t_0)$ öteleme parametresi, (2.42) denklemi sıfıra eşitlenerek

$$\alpha(t_0) = c_{\text{son}} e(t) + \dot{e}(t) \quad 2.43$$

şeklinde elde edilir. Böylece kayma yüzeyinin başlangıç koşullarına göre ötelenmesi sağlanır. Öteleme işlemi Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Koordinat düzleminin 2. Ve dördüncü bölgesinde $\alpha(t)$ parametresi sıfırdan farklı değerler alır. $\alpha(t)$ 'nin sıfıra ulaşacağı bölgeler 2. ve 4. bölgelerdir. Çünkü bu bölgeler kararlı bölgelerdir.



Şekil 2.7. Öteleme işlemi sonucunda kayma yüzeyinin hareketi

- Kayma yüzeyi her $\Delta\tau$ saniyede bir ötelenir. Yeni $\alpha(t)$ değeri

$$|\dot{e}(t_0) + c_{\text{son}}e(t_0) - \alpha(t_0 + \Delta\tau)| = \delta_{fs} \quad 2.44$$

mutlak eşitliği çözülerek bulunur.

- Öteleme yönünü başlangıç koşullarına bağlı olan $\alpha(t_0)$ değeri belirler. Eğer $\alpha(t_0) < 0$ ise yukarı yönde, eğer $\alpha(t_0) > 0$ ise Şekil 2.7'de olduğu gibi aşağı yönde öteleme işlemi gerçekleştirilir.

- (2.44) denkleminde $\alpha(t_0 + \Delta\tau)$ için iki çözüm bulunmaktadır. Eğer yukarı yönde öteleme söz konusu ise bu çözümlerden büyük olanı, aşağı yönde ise küçük olanı seçilir. Benzer şekilde n . adımdaki kayma yüzeyi değerine ait öteleme miktarı

$$|\dot{e}(t_{n-1}) + c_{\text{son}}e(t_{n-1}) - \alpha(t_n)| = \delta_{fs} \quad 2.45$$

mutlak eşitliği çözülerek bulunur.

- Öteleme işlemine son verme koşulu olarak, yukarı yönde ötelenme durumunda eğer her hangi bir n adımında $\alpha(t_n) \geq 0$ ise $\alpha(t_n) = 0$ olarak sabitlenir ve öteleme sona

erdirilir. Benzer şekilde eğer aşağı yönde ötelenme söz konusu ise ve $\alpha(t_n) \leq 0$ elde edilirse $\alpha(t_n) = 0$ olarak sabitlenir ve öteleme sona erdirilir.

Dış bozucuların bulunduğu ikinci mertebeden doğrusal olmayan sistemler için Choi vd (1993) tarafından elde edilen döndürme ve öteleme düzenleri daha sonra dış bozucuların yanı sıra parametre belirsizliklerinin de bulunduğu ikinci mertebeye sistemler için gerçekleştirilmiştir (Choi vd 1994).

Döndürme ve öteleme düzenlerinin olumlu tarafı bekleme süreleri boyunca kayma yüzeyi sabit kabul edildiği için kayma yüzeyi parametresine ait türevin hesaplamalar sırasında söz konusu olmamasıdır. Bu sayede geleneksel kayma kipli kontrolör için elde edilen kontrol kuralı herhangi bir değişikliğe gerek duyulmaksızın kullanılabilir.

Döndürme ve öteleme düzenleri ile elde edilen değişken yapılı sistemin olumsuzluğu ise hesaplanan bir sonraki yüzeye geçene kadar belirli bir $\Delta\tau$ bekleme süresince bir önceki yüzeyin göz önüne alınmasıdır. Bu durumdan kaynaklanan süreksizlik etkisi bozuculara karşı duyarlılık oluşmasına neden olur.

Döndürme ve öteleme düzenlerindeki bekleme sürelerini ortadan kaldırmak ve daha hızlı izleme başarımı elde etmek için ikinci mertebeye sistemlerde geçerli bulanık bir ayarlama algoritması geliştirilmiştir (Ha vd 1999). Bu yöntemde bulanık mantık kontrolör girişi olarak sadece hata değeri alınmıştır. Çıkış olarak kararlı bölgeler için kayma yüzeyi eğimi, kararsız bölgeler için ise öteleme miktarı üretilmiştir. Buna rağmen, tek giriş olarak sadece hatanın kullanılması nedeni ile dönme işlemi tüm faz düzlemine uygulanamaz ve yalnızca eğimin artma yönünde dönme işlemi gerçekleştirilir. Hata ve hatanın değişimi bilgilerini giriş olarak alan ve böylece TN'nin faz düzlemindeki konumuna göre her iki yönde de dönme işlemi sağlayan bir bulanık yöntem önerilmiştir (Chun ve Choi 2001). Temeltaş (1998) ise, kayma yüzeyini döndürmek ve süreksiz kontrol kazancını ayarlamak için iki adet tek girişli bulanık mantık kontrolör kullanarak bir tasarım gerçekleştirmiştir.

Yine döndürme ve öteleme düzenlerindeki bekleme süreleri Bartoszewicz (1995) tarafından ikinci mertebe sistemler için ele alınmış ve hareketli kayma yüzeyleri zamanda sürekli olarak ötelenmiştir. Bu amaçla (2.37)'de verilen kayma yüzeyi $c(t)$ ve öteleme parametresi $\alpha(t)$ zamana bağlı değişkenler olarak

$$\begin{aligned} c(t) &= a_1 t + a_2 \\ \alpha(t) &= b_1 t + b_2 \end{aligned} \quad 2.46$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada a_1, a_2, b_1, b_2 sabit gerçekte sayılardır ve uygun şekilde ayarlanarak dönme ve öteleme hareketleri sağlanmaktadır. Kararlı bölgelerde $b_1=b_2=0$ seçilirken, a_1 ve a_2 parametreleri ise kararlı bölgeye girildiği t_k anında eğimi sıfır değerinden başlatıp, t_{son} anında değişken kayma yüzeyinin önceden belirli son eğim değeri olan c_{son} değerine sahip olmasını sağlayacak şekilde

$$\begin{aligned} c(t_k) &= a_1 t_k + a_2 = 0 \\ c(t_{son}) &= a_1 t_{son} + a_2 = c_{son} \end{aligned} \quad 2.47$$

yazılarak hesaplanır. (2.47) denklemlerinden a_1 ve a_2 değerleri çekilecek olursa

$$\begin{aligned} a_1 &= -\frac{c_{son}}{t_k - t_{son}} \\ a_2 &= \frac{c_{son}}{t_k - t_{son}} t_k \end{aligned} \quad 2.48$$

elde edilir. Kararsız bölgelerde ise $c(t)=c_1$ olarak sabit seçilir. Burada $c_1 < c_{son}$ kararsız bölgeler için seçilen kayma yüzeyi eğimidir. Geleneksel kayma yüzeyi eğimi olan c_{son} değerinden daha küçük bir c_1 eğim değeri seçilerek kararsız bölgelerde kontrol kuralının daha küçük genlikli olmasını sağlamak ve böylece başarıyı iyileştirmek amaçlanmıştır. Kararsız bölge için kullanılan c_1 değerinin başarımda sağladığı fayda sürekli döndürme ile sağlanan fayda ile birlikte ele alınmıştır.

Kararsız bölgedeki b_2 parametresi başlangıç $t=0$ anında ötelenmiş yüzeyin TN'den geçmesini sağlayacak şekilde

$$b_2 = c_1 e(0) + \dot{e}(0) \quad 2.49$$

olarak seçilmiştir. (2.46)'deki diğer parametre olan b_1 değeri ise

$$b_1 t_k + b_2 \leq 0 \quad 2.50$$

eşitsizliği sağlanacak şekilde seçilir ve zamana bağlı öteleme miktarını belirler.

Sürekli ve yumuşak harekete sahip kayma yüzeyi tasarımı ile ilgili bir başka çalışmada kayma yüzeyi

$$s(t) = c_1 e(t) + \dot{e}(t) + \begin{cases} a_1 t + a_2, & t \leq t_b \\ 0, & t > t_b \end{cases} \quad 2.51$$

olarak tanımlanmış ve kararlı bölge için tanımlı kayma yüzeyi öteleme miktarı zamanla doğru orantılı seçildiği için (2.51) kayma yüzeyi sabit hızlı kayma yüzeyi olarak adlandırılmıştır (Bartoszewicz 1996). Başlangıç $t=0$ anında TN'nin kayma yüzeyi üzerinde olması sağlanmıştır. Yapılan yenilik kayma yüzeyinin bir t_b anına kadar zamana bağlı olarak sürekli zamanda ötelenmesidir. Burada $t_b > 0$, c_1 , a_1 ve a_2 kontrolör başarımını belirleyen sabit tasarım parametreleridir. Benzer şekilde

$$s(t) = c_1 e(t) + \dot{e}(t) + \begin{cases} a_1 t^2 + a_2 t + a_3, & t \leq t_b \\ 0, & t > t_b \end{cases} \quad 2.52$$

şeklinde bir kayma yüzeyi tasarlanmıştır. Böylece geleneksel kayma yüzeyine zamanda hızlanan, sabit ivmeli bir öteleme hareketi ile yaklaşılması sağlanmıştır. Bu zamana göre hızlanma özelliğinden dolayı (2.52) sabit ivmeli kayma yüzeyi olarak adlandırılmıştır (Bartoszewicz 1996). Doğrusal durum geribeslemeli ve anahtarlamalı kontrol kazancına sahip bir değişken yapıli kontrolör 16 bit mikrokontrolör yardımı ile gerçekleştirilmiştir (Betin vd 2002). Böylece, hız ve konum durumları için (2.52)'de verilen sabit ivmeli kayma yüzeyinden yararlanılarak geleneksel kayma kipli kontrolöre göre başarımla iyileştirilmesi sağlanmıştır (Betin vd 2002).

İkinci mertebeden doğrusal olmayan sistemler için (2.51) ve (2.52)'de verilen ve geleneksel kayma yüzeyine zamana bağlı bir fonksiyon eklenerek elde edilen kayma yüzeyleri Park ve Tsuji (1999) tarafından

$$s(\mathbf{x}, t) = \dot{e}(t) + c_1 e(t) - (\dot{v}(t) + c_1 v(t)) \quad 2.53$$

şeklinde genelleştirilmiştir. Burada $v(t)$ fonksiyonu ilk koşullarda (2.53) kayma yüzeyi üzerinde olmayı sağlayacak ikinci mertebeden türevi alınabilir $[0, +\infty)$ aralığında tanımlı zamana bağlı sürekli bir fonksiyondur. Özel olarak

$$v(t) = \begin{cases} a_0 t^3 + a_1 t^2 + a_2 t + a_3, & t \leq t_b \\ 0, & t > t_b \end{cases} \quad 2.54$$

şeklinde bir kübik polinom seçilerek tasarım yapılmıştır (Park ve Tsuji 1999).

Lee vd (1998), ikinci mertebeden tek girişli (2.4) sistemini bozucuların da bulunduğu durumda ele alarak, sistemin kontrol edilebilir kanonik biçimde olduğu varsayımı ile sürekli zamanda değişen bir kayma yüzeyini kararlı bölgeler için (2.37) olarak tasarlamıştır. Değişken kayma yüzeyine ait $c(t)$ değeri

$$c(t) > 0, \quad 1 + c^2(t) > \dot{c}(t) \quad 2.55$$

koşullarını sağlayacak şekilde seçilmiş ve c_{son} değerine doğru döndürülmüştür. Kararsız bölgelerde ise kayma yüzeyi

$$s = \dot{e} - \beta(t) \quad 2.56$$

olarak alınmış ve hata düzlemine paralel olarak zamanla $\beta(t) = 0$ olacak şekilde ötelenmiştir (Lee vd 1998).

Lee vd (1995), kayma yüzeyine ait tek bir katsayıyı özel bir fırçasız doğru akım motoruna ait hız düzeneç problemi için çıkışa bağlı olarak

$$c_1 = a_1 \left(1 - \frac{|y - y_d|}{a_2} \right) \quad 2.57$$

şeklinde tanımlamıştır. Burada a_1 en son elde edilen kayma yüzeyi katsayısı, $a_2 > \max(|y - y_d|)$ ise çıkış hatasının mutlak değerinin kestirimine ait maksimum değerdir. Böylece kontrol periyodunun başlangıcında çıkış hatası $y - y_d$ büyük olacağı için (2.57)'daki c_1 değeri küçük değerler alır. Kararlı halde ise hata küçüktür bu durumda c_1 değeri yaklaşık olarak a_1 değerine eşittir ve alabileceği en büyük değere ulaşır (Lee vd 1995). Bu sayede, sisteme ait çıkış hatasına bakılarak kayma yüzeyi sürekli zamanda değişken yapılmıştır. Verilen örnek motor modeli üçüncü mertebeden ve iki girişli olmasına karşın elde edilen yöntemde özel olarak tek bir katsayı bulunduğu ve yüzeylerden sadece birisi zamanla değişken yapıldığı için genel olarak tek girişli ikinci mertebe sistem modellerine uygulanabilecek biçimdedir.

Doğrusal hiper düzlemler kullanılarak elde edilen tasarımlar sonucunda PD-tipi yapılar elde edilmektedir (Cao ve Stepanenko 1993). Sınır katmanlı kayma yüzeyi kullanıldığında kararlı hal konum hatası oluşur. Bunu ortadan kaldırmak için ve PID tipi bir yapı elde etmek amacı ile ilk kez Slotine ve Spong (1985), kayma yüzeyi terimine bir integral terimi ekleyerek

$$s = k_d \dot{e} + k_p e + k_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad 2.58$$

biçiminde integral kayma kipli kontrolörü $k_d=1$ olarak önermiştir. (2.58) için k_d sıfır olarak ayarlanamaz. Çünkü bu durumda kayma yüzeyi nedensel bir giriş çıkış ilişkisi oluşturmaz; yani $u(t)$ kontrol işareti $s(t)$ fonksiyonunun türevinde bulunmaz ve bu durumda ulaşma koşulunun sağlanması için uygun kontrol işareti elde edilemez (Cho 1994). Ayrıca, büyük başlangıç hataları nedeni ile oluşabilecek aşımı önlemek için integral teriminin farklı bir kontrol kuralı kullanılarak sadece sistem belirli bir bölgeye girince devreye sokulduğu bir kayma yüzeyi Stepanenko vd (1998) tarafından önerilmiştir. Wai (2000) ise sınır katmanlı kayma yüzeyi kullanılmasından kaynaklanan sorunla değil, doğrudan ulaşma süresinin ortadan kaldırması konusu ile ilgilenmiş ve integral terimini bu amaçla kullanmıştır.

Hem integral teriminden hem de doğrusal bir geribesleme kazancından yararlanılarak $\dot{x} = (a + \Delta a)x + (b + \Delta b)u + d(t)$ biçiminde parametre belirsizlikleri ve bozuculara sahip doğrusal bir sistem için üstel kararlılığa sahip yeni bir kayma yüzeyi

$$s = a_1 \left(x(t) - \int_0^t (a + bk)x(\tau) d\tau - x(0) \right) \quad 2.59$$

şeklinde tasarlanmıştır (Shyu ve Shieh 1996). Burada a_1 pozitif sabit tasarım parametresidir. Sistemin eşdeğer dinamikleri $s = \dot{s} = 0$ için $\dot{x} = (a + bk)x$ olur. Böylece k geribesleme kazancı ile kutuplar istenen şekilde belirlenerek üstel kararlılık sağlanır. (2.59)'deki $x(0)$ terimi başlangıçta $s=0$ olmasını ve böylece ulaşma zamanının indirgenmesini sağlar.

3. İKİLİ TANK SİSTEMİ İÇİN YENİ BİR KAYMA YÜZEYİ TASARIMI

3.1 Genel Bilgi

Süreç kontrol yöntemleri, bir süreci sürekli denetlemek ve süreçteki kararsızlığı yaratan koşulları belirlemede kullanılan yöntemlerden oluşur. Sürecin yüksek kalitede, yeterlilik seviyesinde ve düşük maliyetlerle ilerlemesini sağlar.

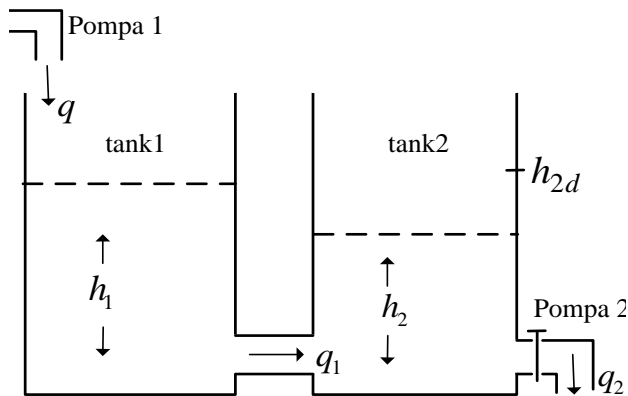
Sıvı seviye kontrol mekanizmaları ticari ve endüstriyel alanda kullanılan süreç kontrol yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde, sıvının tanka pompalanması, tankta depolanması ve sıvının tanka akış süreci kontrol edilir. Sıvı seviye kontrol mekanizmalarından tank sistemleri, kimyasal alanda, özellikle ilaç sektöründe, reaksiyon kapları ile yapılan çalışmalarda önemi büyüktür (Shinsky 1997). Bununla birlikte sıvı seviye ve akış kontrol konuları ile petrokimyasal, kağıt üretimi, oto-yakıt sistemleri, akaryakıt istasyonları, su sektörü ve biyokontrol sistemleri gibi pek çok alanın ilgi odağı olmuştur. Uygulamaya örnek verilecek olursa, Opet firmasına ait tanker dolum otomasyonunda gemilerden alınan petrol ürünlerinin depolandığı tanklar ile satış tankları ve dolum adalarını kapsayan 1000'den fazla giriş ve çıkış kullanılmakta, 100 adet vana ve 50 adet pompa ile izleme ve kontroller yapılarak hatasız çalışması sağlanmaktadır (WEB_2 2008). Bir başka örnek ise Çevik Elektronik için üretilen arıtma tesisi pompa ve tank sistemidir. Bu sistemde amaç sıcaklık ve seviye bilgisinin izlenmesini sağlamaktadır (WEB_2 2008).

Tank sistemlerinin uygulamada ikili, üçlü, dörtlü olmak üzere farklı sayıda tanklardan oluşan çeşitleri mevcuttur. Bunlardan ikili tank sistemi, birbiri arasında su geçiş kanalının bulunduğu iki dikey tanktan oluşan, su giriş ve çıkış vanaları ile dengenin sağlandığı bir sistemdir (Aydın ve Tokat 2008). Genellikle su arıtma mekanizmalarında, kimyasal ve biyokimyasal işlemlerde, otomatik sıvı dağıtımlarında,

yiyecek ve içecek sektöründe (Pana vd 2005), eczacılık sektöründe (Guigues vd 2007) kullanılmaktadır. Uygulanan kontrol yöntemi ile birtakım kısıtlar altında, tankların su seviyesi ve su yüksekliğinin istenilen değere göre değişimi ve performans ölçümü yapılır. Her bir tanktaki sıvı miktarı yine tanklardaki su seviyesine bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyondan oluşur. Literatürde, ikili tank sistemi sıvı seviye kontrol yöntemleri olarak PID kontrolör (Tunyasrirut vd 2006), bulanık mantık (Delavari ve Noiey 2007) ve genetik algoritmalar (Tan ve Li 2001) ile yapılan pek çok çalışma bulunmaktadır. İkili tank sisteminin doğrusal olmayan durum denklemleri, fiziksel yapısından kaynaklanan parametre çeşitliliği ve sıvı seviyesini hassasiyetinden kaynaklanan ve tüm sistemi etkileyen dış bozuculardan dolayı kayma kipli kontrol için uygun bir uygulama alanıdır (Almutairi ve Zribi 2006, Khan ve Spurgeon 2006) Bu yüzden literatürde bu tür sistemler üzerine yapılan çalışmalarda kayma kipli kontrolör de kullanılmıştır.

3.2 Sistem Yapısı

Şekil 3.1'de gösterilen ikili tank sistemi birbirine ortadan bir olukla bağlanmış iki dikey tanktan oluşur. Sisteme giren sıvı birinci pompadan sağlanırken sıvı çıkışı ikinci pompadan sağlanır.



Şekil 3.1 İkili tank sistemi

Sistemde yer alan,

(q); birinci pompadan sisteme giriş yapan sıvının debisi,

(q_1) ; iki tank arasındaki oluktan geçen sıvı debisi,

(q_2) ; ise sistemden çıkan sıvı debisi

anlamına gelir. Birinci tankı tank1, ikinci tankı tank2 olarak kabul edersek, $\mathbf{h}=[h_1, h_2]$ tank1 ve tank2 sıvı seviyeleri, h_{2d} 'de hedeflenen tank2 sıvı seviyesi olarak ifade edilir.

İkili tank sisteminde sistemin girişi q , çıkışı h_2 olarak kabul edilir. Sisteme etki eden kontrolün amacı tank2 sıvı seviyesini (h_2) hedeflenen değere (h_{2d}) ulaşacak şekilde ayarlamaktır. Bununla birlikte, $h_1 - h_2$ değeri de belli bir sabite eşit olmalıdır. Sistem girişi (q) on-off valfi tarafından tank1'e doğru tek taraflı olarak sağlandığı için $q \geq 0$ olmalıdır.

Tank1 ve tank2 arasında sıvı akışının sağlanabilmesi için ($h_1 \geq h_2$) olması gerekir. h_1 ve h_2 değerleri birbirine eşit ise, tanklar birbirinden ayrılmış (decoupled) gibi davranır. Bu durum, tank2'den su çıkışı veya tank1'e su girişi ile h_1 su seviyesi h_2 su seviyesinden büyük olmadıkça devam eder (Almutairi ve Zribi 2006). Sistemde tanklar bitişik (coupled) ve ayrıken (decoupled) etki eden kontrol kuralı farklı hesaplanır. Sisteme ait parametrelerin değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 İkili tank sistemi parametreleri

$h_1(t)$	birinci tankın su seviyesi,
$h_2(t)$	ikinci tankın su seviyesi,
$q(t)$	sisteme giren su miktarı,
$q_1(t)$	birinci tanktan ikinci tanka geçen su miktarı,
$q_2(t)$	sistemden çıkan su miktarı,
g	yerçekimi sabiti, 981 cm/s^2
C	tankların taban alanı, 208.2 cm^2
c_{12}	iki tank arasındaki oluk alanı, 0.58 cm^2
c_2	ikinci tanktaki su çıkışı oluk alanı, 0.24 cm^2

Bu durumda tanklardaki sıvı debilerine ait Bernoulli denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{C}(-q_1 + q); \quad 3.1$$

$$\dot{h}_2 = \frac{1}{C}(q_1 - q_2); \quad 3.2$$

Bernoulli denklemlerine ve sistem parametrelerine bağlı olarak sistemdeki valfların debisi aşağıdaki gibidir.

$$q_1 = c_{12}\sqrt{2g(h_1 - h_2)}; \quad 3.3$$

$$q_2 = c_2\sqrt{2gh_2}; \quad h_2 > 0 \quad 3.4$$

Doğrusal olmayan ikili tank sisteminin dinamikleri;

$$\dot{h}_1 = -a_2\sqrt{(h_1 - h_2)} + \frac{1}{C}u \quad 3.5$$

$$\dot{h}_2 = a_2\sqrt{(h_1 - h_2)} - a_1\sqrt{h_2} \quad 3.6$$

şeklinindedir. (3.5) ve (3.6) denklemlerinden de anlaşılacağı gibi kontrol işareti birinci tanka uygulandığı için h_1 yüksekliğini direk etkiler. h_2 yüksekliği ise kontrol işaretinin tank1'e uygulanması sonucu, h_1 seviyesinin artmasından dolayı etkilenir. Yani h_2 , kontrol işaretinden dolayı olarak etkilenir. (3.5) ve (3.6) denklemlerinde yer alan a_1 ve a_2 parametreleri sistem parametrelerine bağlı olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$a_1 = \frac{c_2\sqrt{2g}}{C} \quad a_2 = \frac{c_{12}\sqrt{2g}}{C} \quad 3.7$$

(3.3), (3.5) ve (3.6) denklemlerinde de anlaşılacağı gibi sistem ($h_1 \geq h_2$) varsayımı üzerine kurulmuştur. Sistem istenen duruma ulaşıp denge noktasına geldiğinde $\dot{h}_1 = \dot{h}_2 = 0$ olur (Almutairi ve Zribi 2006). Sistem bu durumda kararlılığını devam ettirdiğinde ise h_2 değeri, h_{2d} sabitine, $h_1 - h_2$ değeri ise $a_1^2 h_{2d} / a_2^2$ sabitine eşit olmalıdır.

Sistemde hedeflenen h_2 yüksekliğinin referans değere ulaşmasını sağlamaktır. Yani sistem h_2 yüksekliği üzerine odaklıdır. Bunun için formüllerde birtakım dönüşümler yapmamız gereklidir. (3.8)'deki dönüşüm formüllerinden görüldüğü gibi h_2 ayrı (h_1-h_2) ayrı ele alınmıştır. Çünkü sistem denge konumuna geldiğinde h_2 , h_{2d} referans değerine, (h_1-h_2) değeri de $a_1^2 h_{2d} / a_2^2$ değerine ulaşacaktır (Almutairi ve Zribi 2006).

$$\begin{aligned} z_1 &\hat{=} h_2 \\ z_2 &\hat{=} h_1 - h_2 \\ z &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \\ u &\hat{=} q \end{aligned} \tag{3.8}$$

(3.3) ile (3.6) denklemlerini dönüşüm formüllerine uyarladığımızda sistemin dinamik modeli,

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -a_1 \sqrt{z_1} + a_2 \sqrt{z_2} \\ \dot{z}_2 &= a_1 \sqrt{z_1} - 2a_2 \sqrt{z_2} + \frac{1}{C} u \\ y &= z_1 \end{aligned} \tag{3.9}$$

şekline dönüşür (Almutairi ve Zribi 2006). Sistemi, girişleri $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, çıkışları y olan ve

$x_2 = \dot{x}_1$ kabul edilen bir sistem haline sokmak istediğimizde sistemin dinamik modeli (3.10) denklemlerinde olduğu gibidir.

$$\begin{aligned} x_1 &= z_1 \\ x_2 &= \dot{x}_1 = -a_1 \sqrt{z_1} + a_2 \sqrt{z_2} \\ \dot{x}_2 &= \frac{a_1 a_2}{2} \left(\frac{\sqrt{z_1}}{\sqrt{z_2}} - \frac{\sqrt{z_2}}{\sqrt{z_1}} \right) + \frac{a_1^2}{2} - a_2^2 + \frac{a_2}{2C} \frac{1}{\sqrt{z_2}} u \\ y &= x_1 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Böylelikle sistemi h_2 yüksekliği üzerine kurmuş oluruz. Yani $x_1 = h_2$ olarak düşünebiliriz.

İkili tank sisteminde kontrol mekanizması olarak on-off valfi kullanılmıştır. On-off valflarla kurulan devreler genellikle önceden belirlenen parametrelere uygun olarak çalışan sayısal açık çevrim sistemlerdir. Geleneksel elektro hidrolik sistemlerde, yön, basınç veya debi gibi hidrolik büyüklükler, elektrik sinyallerinin tetiklenmesi ile değiştirildiğinde şok ve basınç artışları olur bu da aşınmaya yol açar (Özcan 1999). Kontrolün süreksizliğinden dolayı oluşan çatırtı, kayma kipli kontrolün kullanılmasına elverişli bir ortam yaratır. Ayrıca kullanım kolaylığı ve ekonomik olması nedeniyle on-off valfi tercih edilmektedir. İkili tank sistemine uygulanan kontrol işaretini $u(t)$, on-off valfi sağlamaktadır. On-off valfi “on” durumunda iken sisteme belli bir miktarda sıvı pompalanır. “off” durumunda iken pompa çalışmaz yani sıvı iletimi söz konusu değildir. Kontrol işaretindeki kısıtlama (3.11) ‘de verilmiştir.

$$u_{min} \leq u(t) \leq u_{max} \quad 3.11$$

Tank sisteminin fiziksel yapısının sınırları belli olduğu için kontrol işareti üzerindeki (3.11) kısıtlamasından farklı olarak tank2 sıvı seviyesindeki değişimine de bir kısıtlama getirilmiştir. Çünkü belli zaman aralığında tank2’deki sıvı değişimi belli bir miktarın üzerine geçemez. Sistemde, tank2 sıvı seviyesinin (h_2) değişimi \dot{h}_2 ile gösterilir ve \dot{h}_2 ‘nin çıkabileceği en büyük değere (3.12)’de görüldüğü gibi bir kısıtlama getirilmiştir. Bu kısıtlar altında ikili tank sistemine uygulanan farklı kayma kipli kontrolör tasarımları karşılaştırılmıştır.

$$\dot{h}_{2max} \leq 0.15 \quad 3.12$$

Dinamik sistemleri verilen ikili tank sisteminin geleneksel kayma kipli kontrol yöntemiyle ve önerilen yeni yöntem ile kontrolü alt bölümlerde ele alınmıştır

3.3 İkili Tank Sisteminde Geleneksel Kayma Kipli Kontrol

Geleneksel kayma kipli kontrolünü belirgin yapan yöntemlerden ayıran, kayma yüzeyi tasarımında, hata vektörü çarpanının sabit alınmasıdır. Bu yöntemde kontrol kuralının elde edilmesi diğer yöntemlere göre daha kolaydır. İkili tank sistemi üzerinde kayma kipli kontrol ile yapılan çalışmalarda, geleneksel kayma kipli kontrol ve farklı denklemlerle oluşturulmuş dinamik kayma kipli kontrolörler çalıştırılmıştır.

Şekil 3.1 Şekil 3.1'deki ikili tank sisteminde hedeflenen, tasarlanan kayma kipli kontrol ile tank2 sıvı seviyesini istenilen değere ulaştırabilmektir. Sistem üzerine uygulanan geleneksel kayma kipli kontrole ait kayma yüzeyi denklemi;

$$s_c(\mathbf{e}) = \alpha_c e_1(t) + e_2(t) = \alpha_c (x_1 - x_{1d}) + (x_2 - x_{2d}) \quad 3.13$$

şeklinde. Burada bahsedilen $x_{1d} = h_{2d}$ ve $x_{2d} = \dot{x}_{1d} = 0$ sistemin sabit referans değerleri olup e_1 sistem durumlarında oluşan hata, e_2 ise bu hatanın türevidir. α_c ise kayma yüzeyi hata parametresi olup sabit bir değerdir. İkili tank sistemi geleneksel kayma kipli kontrol ile çalıştırıldığında farklı referans değerler için α_c parametresinin yeniden ayarlanması gerekmektedir. Özellikle referans değerinin (h_{2d}) artması sonucu, sistem, bu isteğe karşılık verememiştir. Büyük referans değerlerinde sistem kayma yüzeyine sınırlı benzetim süresi sonunda ulaşamamıştır. Bunun sebeplerinden biri kontrol işaretinin sistemi beslemede yetersiz kalmasıdır. Bu sorun, sistemdeki kontrol işaretinin maksimum sınırı (u_{max}) artırılarak çözülmüştür. Fakat referans değer arttıkça kayma yüzeyi hata faz düzleminde \dot{h}_2 seviyesinde meydana gelen değişimler artmıştır.

İkili tank sistemi üzerine uygulanan geleneksel kayma kipli kontrolde kontrol işareti $h_1 \neq h_2$ (coupled) iken ayrı $h_1 = h_2$ (decoupled) iken ayrı hesaplanmaktadır. $h_1 \neq h_2$ iken (3.10)'daki sistem durumları ele alınır. (3.13)'teki kayma yüzeyi formülünün türevinden yararlanılarak kontrol işareti hesaplanır.

$$\dot{s}_c(e) = \alpha_c \dot{e}_1(t) + \dot{e}_2(t) = \alpha_c \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad 3.14$$

$$\dot{s}_c(e) = 0 \quad 3.15$$

$h_1 \neq h_2$ durumunda, (3.15) denklemini (3.14) denklemine uyarladığımızda elde ettiğimiz kontrol kuralı;

$$u(t) = k_1 \left[-\frac{a_1 a_2}{2} \left(\frac{\sqrt{z_1}}{\sqrt{z_2}} - \frac{\sqrt{z_2}}{\sqrt{z_1}} \right) - \frac{a_1^2}{2} + a_2^2 - \alpha_s (-a_1 \sqrt{z_1} + a_2 \sqrt{z_2}) - k_2 \text{sign}(s) \right] \quad 3.16$$

$$k_1 = \frac{2C\sqrt{z_2}}{a_2}$$

$$u_N = -k_1 k_2 \text{sign}(s) \quad 3.17$$

şeklinindedir. k_1 ise sistem parametrelerine bağlı sabit bir değerdir. k_2 süreksiz kontrol kazancı olup Lyapunov kuralından elde edilir. $h_1 = h_2$ iken tank1 ve tank2 ayrıymış(decoupled) gibi düşünülür. Bu durumda sisteme ait (3.5) ve (3.6) durum denklemleri;

$$\dot{h}_1 = \frac{1}{C} u \quad 3.18$$

$$\dot{h}_2 = -a_1 \sqrt{h_2} \quad 3.19$$

şeklini alır. Bu durumda (3.10)'daki dönüşüm formülleri de bu değişimden etkilenecek, (3.20) haline gelecektir.

$$\dot{x}_2 = \frac{a_1^2}{2} + \frac{a_2}{2\sqrt{z_2}} \left(\frac{u}{C} + a_1 \sqrt{z_1} \right) \quad 3.20$$

Dolayısıyla hesaplanan kontrol kuralı (3.16)'dan farklı olacaktır. (3.14)'teki kayma yüzeyi formülünün türevinden ve dönüşüm formüllerinden elde edilen kontrol işareti (3.21) gibi olacaktır.

$$u(t) = -Ca_1 \sqrt{z_1} - k_1 k_2 \text{sign}(s) \quad 3.21$$

Her iki kontrol kuralında süreksiz kontrol kuralı $u_N = -k_1 k_2 \text{sign}(s)$ dir. k_2 açılımı bir sonraki bölümde ele alınacaktır. u_N süreksiz kontrol kuralı sayesinde hata faz düzleminde yörüngeyi kayma yüzeyi üzerinde kalması sağlanır. İkili tank sistemi üzerinde geleneksel yöntem ile yalpan benzetim sonuçları 5. bölümde verilecektir.

3.4 İkili Tank Sistemi İçin Durum Bilgisi ile Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı

Literatürde sıvı seviye kontrol mekanizmaları ile ilgili pek çok farklı kontrol stratejileri kullanılmıştır. Bunlardan PID kontrolörler (Tunyasirut vd 2006), bulanık mantık tabanlı uygulamalar (Delavari ve Noiey 2007) ve genetik algoritmalar (Tan ve Li 2001) en sık uygulanan metotlardır. İkili tank sistemi doğrusal olmayan durum denklemlerine sahip bir sistemdir. Ayrıca fiziksel yapısı itibariyle parametre belirsizlikleri ve dış bozuculardan dolayı kayma kipli kontrol mekanizmasına uygun yapısından dolayı literatürdeki bazı çalışmalarda kayma kipli kontrol kullanılmıştır (Almutairi ve Zribi 2006, Khan ve Spurgeon 2006).

Kayma kipli kontrolde kayma yüzeyi tasarımında hata parametresi sabit olarak ele alınırsa bu tip kontrolörlere geleneksel kayma kipli kontrol denir. Bu tip kontrolörde farklı sistem referans değerleri için farklı sabit parametreler kullanılıp sistem performansı iyileştirilmeye çalışılır. Geleneksel kayma kipli kontrolde başarıyı artırmak için literatür hareketli kayma kipli kontrol tasarımına yönlendirilmiştir. Bartoszewicz (1998)'in yaptığı çalışmada, kayma yüzeyi parametresi kararlı bölgelerde zamana bağlı bir öteleme fonksiyonu kullanılarak değişken olarak tasarlanmıştır.

İkili tank sistemi için tasarlanan durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrolde, kayma yüzeyi hata parametresi, zamandan bağımsız fakat sistem durumlarına bağlı bir fonksiyon olarak ele alınmış olup aynı zamanda farklı başlangıç koşullarına uyum sağlayabilmektedir. Böylelikle sistem durumları ile değişen bir düzen elde edilip sistemin geleneksel yöntemle göre referans değere ulaşımındaki performans artırılmıştır. Tank sistemine uygulanan kontrolörün kayma yüzeyi hata parametresi, sistemin durumları ile birlikte sistem referans değerine (h_{2ref}) bağlı olarak da değişken tasarlanması kayma yüzeyi performansını garantilemiştir. Böylelikle kayma yüzeyi hata

parametresi ayarlanabilir hale getirilmiştir. Kayma yüzeyi doğrusal olmayan bir yapıya büründüğü için ikili tank sistemi üzerine uygulanan durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrol, geleneksel kayma kipli kontrollerden daha iyi performans sergilemiştir.

Şekil 3.1'deki ikili tank sisteminde hedeflenen, tasarlanan kayma kipli kontrol ile tank2 sıvı seviyesini istenilen değere ulaştırabilmektir. Sistem üzerine uygulanan geleneksel kayma kipli kontrole ait kayma yüzeyi denklemi (3.13)'de verildiği gibidir. İkili tank sistemi geleneksel kayma kipli kontrol ile farklı referans değerler için çalıştırıldığında α_c parametresinin yeniden ayarlanması gerekmektedir.

Durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrolde, geleneksel yöntemde kullanılan α_c parametresi (3.13) sistem durumlarına göre değişken tasarlanmıştır. Bu tasarım ile kayma yüzeyini yeniden düzenleyecek olursak;

$$s_p(\mathbf{e}) \hat{=} \alpha_p(\mathbf{h})e_1(t) + e_2(t) \quad 3.22$$

elde edilir. (3.22) denkleminde yer alan kayma yüzeyi hata katsayısı;

$$\alpha_p(\mathbf{h}) \hat{=} \alpha_{p1} + \alpha_{p2} \left((h_1 - h_2) - (a_1^2 h_{2d} / a_2^2) \right); \quad \alpha_{p1} = w_1 \frac{\dot{h}_{2\max}}{h_{2d}^2} + w_2 \quad 3.23$$

şeklinde sistem durumlarına bağlı değişken tasarlanmıştır. Bu tasarımda yer alan α_{p1} parametresi, sistemin başlangıç değerine (h_{2d}), h_2 değişiminin alabileceği maksimum değere ($\dot{h}_{2\max}$) ve başlangıçta belirlenen sabit parametrelere (w_1 ve w_2) bağlı tasarlanmıştır. Sistem, referans değere ulaştığı denge noktasında, (3.23)'deki $\alpha_{p1} = \alpha_c$ ve $\alpha_{p2} = 0$ olarak alındığında, geleneksel yöntemde çalışıyormuş gibi davranır. Bunun için (3.23)'de h_{2d} ve $\dot{h}_{2\max}$ sistemin başlangıç koşullarına bağlı sabit değerler olduğu için w_1 ve w_2 parametreleri de buna göre ayarlanmıştır. Bu yöntemde farklı başlangıç koşulları için yeniden ayarlama yapmaya gerek kalmamıştır. Sistemin referans değere ulaştığı denge noktasında (3.23) denkleminde $\alpha_{p2} \left((h_1 - h_2) - (a_1^2 h_{2d} / a_2^2) \right) = 0$ olacağı için denklemin yeni hali;

$$\alpha_p(\mathbf{h}) = \alpha_{p1} \quad 3.24$$

olarak değişecektir. Bu durumda,

$$\alpha_{p1} = \alpha_c \quad 3.25$$

olacak şekilde ayarlandığında durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi ile geleneksel kayma yüzeyi birbirine eşit olacaktır. (3.8) denklemlerinde verilen dönüşüm formülleri 3.23 denklemindeki $\alpha_p(h)$ 'ın türevine uygulanırsa;

$$\dot{\alpha}_p(\mathbf{h}) \hat{=} \alpha_{p2} \dot{z}_2 = \alpha_{p2} \left(a_1 z_1 - 2a_2 \sqrt{z_2} + \frac{1}{c} u \right) \quad 3.26$$

elde edilir. Bu durumda 3.22'deki kayma yüzeyi denkleminin türevi 3.27'deki gibi yazılır.

$$\dot{s}_p = \dot{\alpha}_p(\mathbf{h})e_1 + \alpha_p \dot{e}_1 + \dot{e}_2 \quad 3.27$$

Kayma yüzeyi hata durumları ve türevlerini yerine koyarak ve $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_{1d} = \dot{h}_{2d} = 0$ ve $\dot{x}_{2d} = 0$ alarak elde ettiğimiz kayma yüzeyi türevi;

$$\dot{s}_p = \dot{\alpha}_p(\mathbf{h})(x_1 - h_{2d}) + \alpha_p(\mathbf{h})x_2 + \dot{x}_2 = 0 \quad 3.28$$

şeklindedir. (3.10)'daki sistem denklemleri ve (3.26)'deki durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi parametresi, (3.28) denkleminde yerine konulacak olursa;

$$\begin{aligned} \dot{s}_p &= \alpha_{p2} \left(a_1 z_1 - 2a_2 \sqrt{z_2} + \frac{1}{c} u \right) (z_1 - h_{2d}) + \alpha_p(\mathbf{h})x_2 \\ &+ \frac{a_1 a_2}{2} \left(\frac{\sqrt{z_1}}{\sqrt{z_2}} - \frac{\sqrt{z_2}}{\sqrt{z_1}} \right) + \frac{a_1^2}{2} - a_2^2 + \frac{a_2}{2C} \frac{1}{\sqrt{z_2}} u = 0 \end{aligned} \quad 3.29$$

elde edilir. Bu denklemde gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldığı takdirde elde edilen kontrol işareti;

$$u = k_1[-\alpha_{p2}(z_1 - h_{2d})(a_1\sqrt{z_1} - 2a_2\sqrt{z_2}) - \alpha_p(\mathbf{h})x_2 - \frac{a_1a_2}{2}\left(\sqrt{\frac{z_1}{z_2}} - \sqrt{\frac{z_2}{z_1}}\right) - \frac{a_1^2}{2} + a_2^2 - k_2\text{sign}(s_p)] \quad 3.30$$

şeklindedir. Kontrol işaretindeki k_1 parametresi;

$$k_1 = \frac{2c\sqrt{z_2}}{2\alpha_{p2}\sqrt{z_2}(z_1 - h_{2d}) + a_2} \quad 3.31$$

değerine eşit olup sistem durumlarına, kayma yüzeyi parametresine ve istenen referans değere bağlıdır. Sistem belirsizliği olarak $a_1 = a_1 + \Delta_1$ olarak kabul ettiğimizde Lyapunov kuralından elde edilen k_2 parametresi;

$$k_2 = \alpha_{p2}\Delta_1 z_1(z_1 - h_{2d}) + \frac{a_2\Delta_1}{2}\left(\sqrt{\frac{z_1}{z_2}} + \sqrt{\frac{z_2}{z_1}}\right) + \frac{2a_1\Delta_1 + \Delta_1^2}{2} + d \quad 3.32$$

Sistem $h_1 = h_2$ durumunda iken tanklar birbirinden ayrıymış gibi düşünülür. Sistem denklemleri değişir ve (3.20) kullanılır. Kayma yüzeyi hata parametresi türevi 3.26'dan farklı olacaktır.

$$\dot{\alpha}_p(h) \hat{=} \alpha_{p2}\dot{z}_2 = \alpha_{p2}\left(a_1z_1 + \frac{1}{c}u\right) \quad 3.33$$

Dolayısıyla geleneksel yöntemde olduğu gibi kontrol işareti yeniden hesaplanır. Tanklar birbirinden ayrı iken kontrol işareti;

$$u(t) = -ca_1\sqrt{z_1} - k_1k_2\text{sign}(s_p) \quad 3.34$$

şeklindedir. Bu kontrol işaretindeki süreksiz kontrol kuralı;

$$u_N = -k_1 k_2 \text{sign}(s_p) \quad 3.35$$

şeklindedir. Geleneksel yöntemde 3.16 ve 3.21 denklemlerindeki kontrol işaretlerine bakılacak olursa durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyindeki süreksiz kontrol kuralı denklemleri ile aynı olduğu görülmektedir.

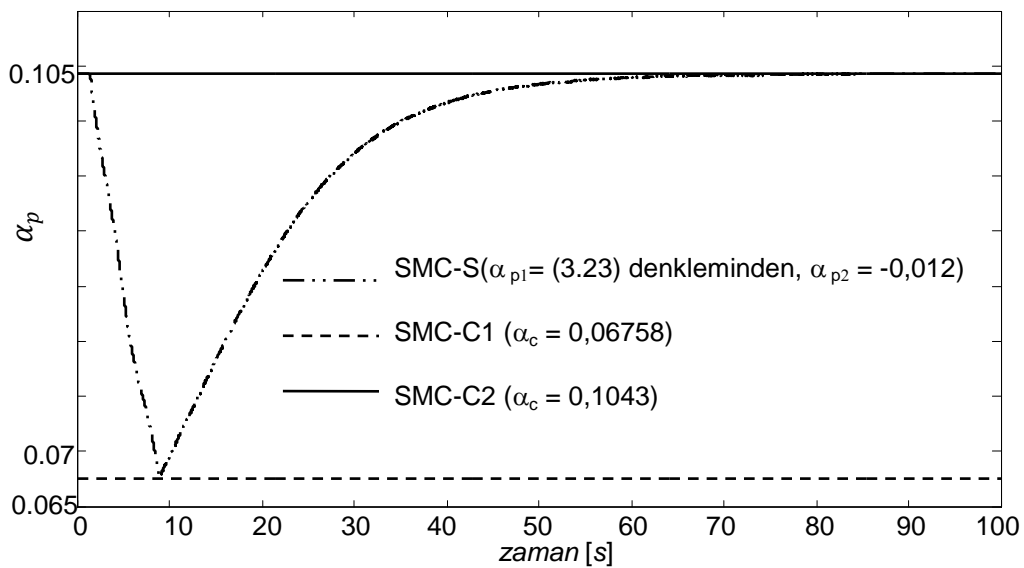
Endüstriyel alanda yapılan pek çok çalışmada düzenli üretim kalitesinin sağlanabilmesi için tankların sıvı seviyelerinin ani değişimleri engellenmiştir. Bu yüzden sisteme (3.12) kısıtlaması getirilmiştir. Bu çalışmada, durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyinde, sistem durumlarına ve ilk koşullarla göre tasarlanan kayma yüzeyi hata parametresi α_{p1} 'in ulaşacağı değer geleneksel kayma yüzeyi parametresinin değerine eşit olacak şekilde ayarlanmıştır ve farklı referans değerleri için yeniden ayarlanması söz konusu değildir. Diğer kayma yüzeyi parametresi α_{p2} ise sistem denge konumuna gelene kadar durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi parametresinin ($\alpha_p(\mathbf{h})$) geleneksel yöntemdeki kayma yüzeyi parametresini (α_c) geçmeyecek şekilde ve sistem denge konumunda iken bu parametreye eşit olacak şekilde ayarlanmıştır.

İkili tank sistemi, Matlab ve Simulink ortamında geleneksel kayma kipli kontrol ve tasarlanan durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrol ile çalıştırılmış, benzetim sonuçları grafikler ile gösterilmiştir. Grafikte, geleneksel kayma kipli kontrol ile çalıştırılan sistem SMC-C ile durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrol ile çalıştırılan sistem SMC-S ile gösterilmektedir. Kontrol kuralının maksimum ve minimum değerleri $u_{min} = 0$ [cm^3/s] ve $u_{max} = 150$ [cm^3/s] olarak seçilmiştir. (3.23) denkleminde α_{p1} hesaplanmasında kullanılan \dot{h}_2 değerinin alabileceği maksimum değer $\dot{h}_{2max} = 0.15$ [cm/s] olarak seçilmiştir. İkili tank sistemine ait parametreler (Almutairi ve Zribi 2006); yerçekimi ivmesi $g = 981$ cm/s^2 , tank1 ve tank2 taban alanı $C = 208.2$ cm^2 , ara oluk alanı $c_{12} = 0.58$ cm^2 , çıkış oluğunun alanı $c_2 = 0.24$ cm^2 , süreksiz kontrol kuralı katsayısı $k_2 = 10$ şeklindedir. Benzetimler, [0:100] arasında 0.01s zaman aralığında çalıştırılarak elde edilmiştir. h_{2d} değerleri değiştirilerek çalıştırılan benzetimlerde, farklı başlangıç koşullarının etkisi gözlemlenmiştir. Tasarlanan durum bilgisi ile değişen kayma kipli kontrolde, w_1 , w_2 , α_{p2} kayma yüzeyi parametreleri hedeflenen farklı su seviyeleri için sadece bir kere seçilir ve tekrar ayarlamaya gerek duyulmaz.

Bununla birlikte α_{p1} parametresi başlangıç koşullarına bağlı tasarlandığı için kendini her defasında yeniler. Bozucu etkisi olarak kontrol işaretine direk etki yapan sinüs dalgası kullanılmıştır.

$$d(t) = 20\sin(0.5\pi t) \quad (3.36)$$

Hedeflenen her su seviyesi için SMC-C geleneksel kayma kipli kontrolü SMC-C1 ve SMC-C2 olmak üzere farklı iki durum için çalıştırılmıştır. SMC-C1’de, α_c parametresi, hedeflenen her farklı sıvı seviyesi için hata faz düzlemindeki hata türevinin ($e_2(t)$) \dot{h}_{2max} ’ı aşmayacak şekilde ayarlanmıştır. Geleneksel yöntemin tasarlanan kontrolörle aynı parametre değeri kullanılarak ($\alpha_c = \alpha_{p1}$) göstermiş olduğu performans SMC-C2 ile gösterilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi SMC-C1 ve SMC-C2 ‘deki α_c parametresi (3.23)’de $\alpha_{p2} = 0$ ve $\alpha_{p1} = \alpha_c$ seçilerek elde edilebilmektedir. $h_{2d} = 6 \text{ cm}$ ’de SMC-C1, SMC-C2 ve SMC-S için α_c ve α_p parametrelerin değişimi Şekil 3.2’de verilmiştir.

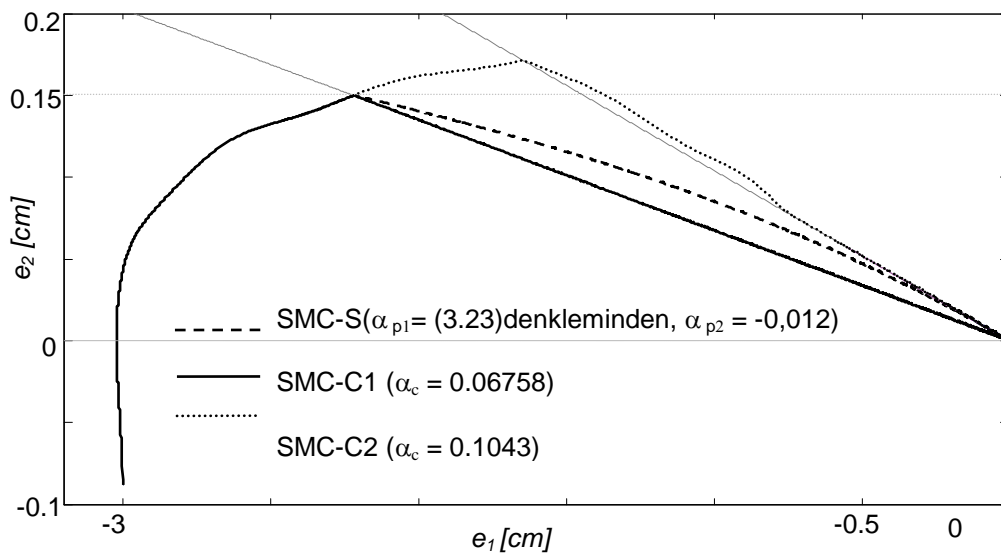


Şekil 3.2 $h_{2d} = 6$ için α_p davranışı

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi geleneksel kayma yüzeyinde kullanılan katsayıların biri, tasarlanan yeni kayma yüzeyi katsayısının minimum değerine (SMC-C1) diğeri maksimum değerine (SMC-C2) eşit alınmıştır. Bunda hedeflenen adil bir karşılaştırma

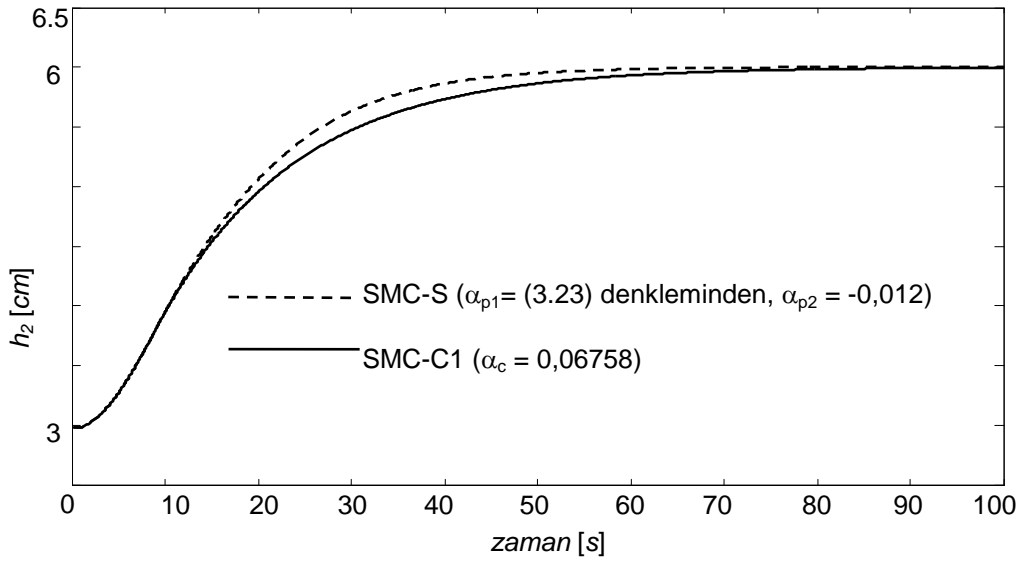
yapmaktır. SMC-S ise sistem durumlarına bağlı tasarlandığı için benzetim süresince sabit ilerlememektedir.

$h_{2d} = 6 \text{ cm}$ için hata faz düzlemi Şekil 3.3'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi SMC-C1 ve SMC-S 'de hata faz düzlemi \dot{h}_{2max} 'a yaklaşmış ve daha sonra kayma moduna girmiştir. SMC-C2 ise \dot{h}_{2max} değerini geçtikten sonra kayma moduna doğru yönelmiş, \dot{h}_{2max} için getirilen (3.12)'deki kısıtlamaya uymamıştır. Bu yüzden Şekil 3.4'te yapılan karşılaştırmaya dahil edilememektedir. Bununla birlikte hata faz düzlemindeki SMC-S hareketi, kayma modunda, doğrusal olmayan yapıda iken SMC-C1 and SMC-C2 doğrusal yolda ilerlemişlerdir.



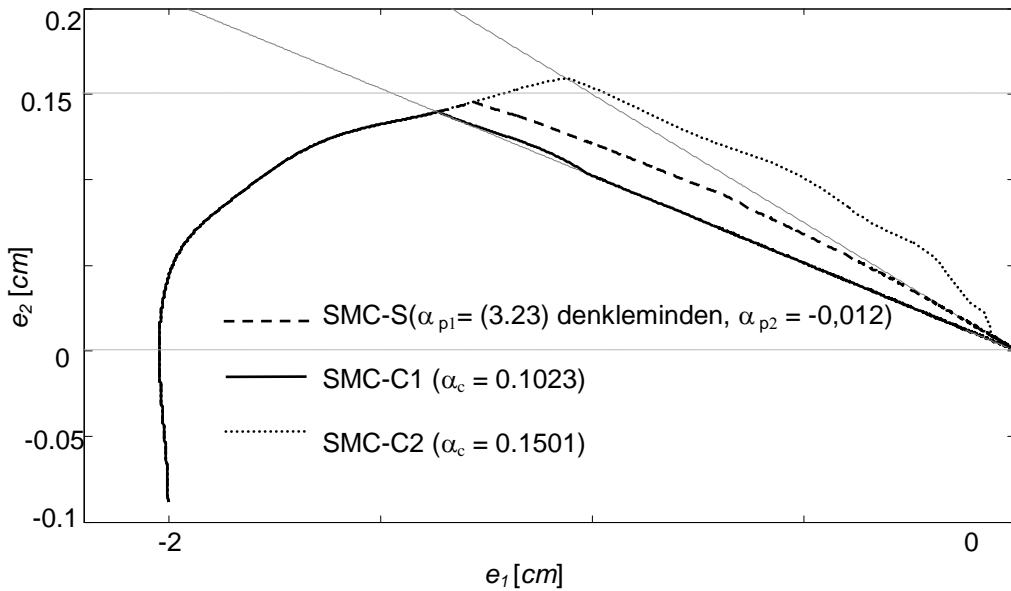
Şekil 3.3 $h_{2d} = 6$ için hata faz düzlemi davranışları

SMC-S 'in koordinat düzlemindeki doğrusal olmayan ilerlemesi hata faz düzleminin kararlı bölgelerinden olan 4. bölgesinde meydana gelmektedir. Sistem, hata faz düzleminde koordinat düzleminin kararsız bölgelerinden olan 3. bölgeden hızlıca ayrılıp kararlı bölgeye (4. Bölge) geçiş yapmak ister. Burada sistem yörüngeleri yavaş fakat emin adımlarla ilerler. Bu bölgede ne kadar fazla kalırsa başarımları o kadar iyileşir. Her 3 tasarım kararsız bölgeden aynı zaman aralığında ayrılmış fakat SMC-S diğer tasarımlara göre kararlı bölgede daha çok kalmıştır. Dolayısıyla başarımları diğerlerinden daha iyidir.



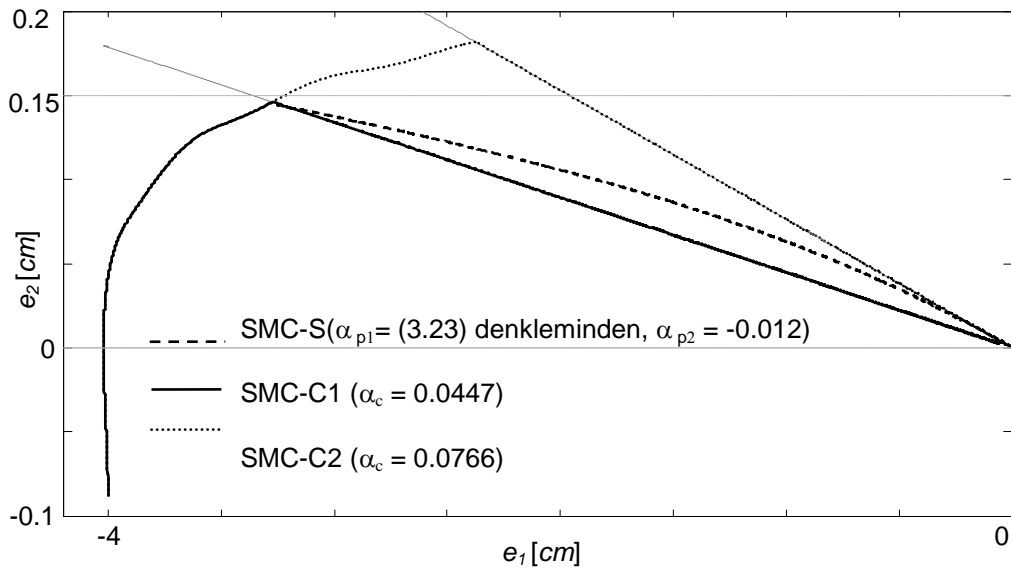
Şekil 3.4 $h_{2d}=6$ için h_2 seviyesi değişimleri

Şekil 3.5 ve 3.6'da hedeflenen su seviyesinin farklı değerleri ($h_{2d} = 5, h_{2d} = 7$) için SMC-C1, SMC-C2 ve SMC-S'in etkisi hata faz düzleminde verilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi SMC-S h_{2d} değişimlerinden en az etkilenendir ve bunu parametrelerinde hiçbir değişiklik yapmadan başarmıştır.



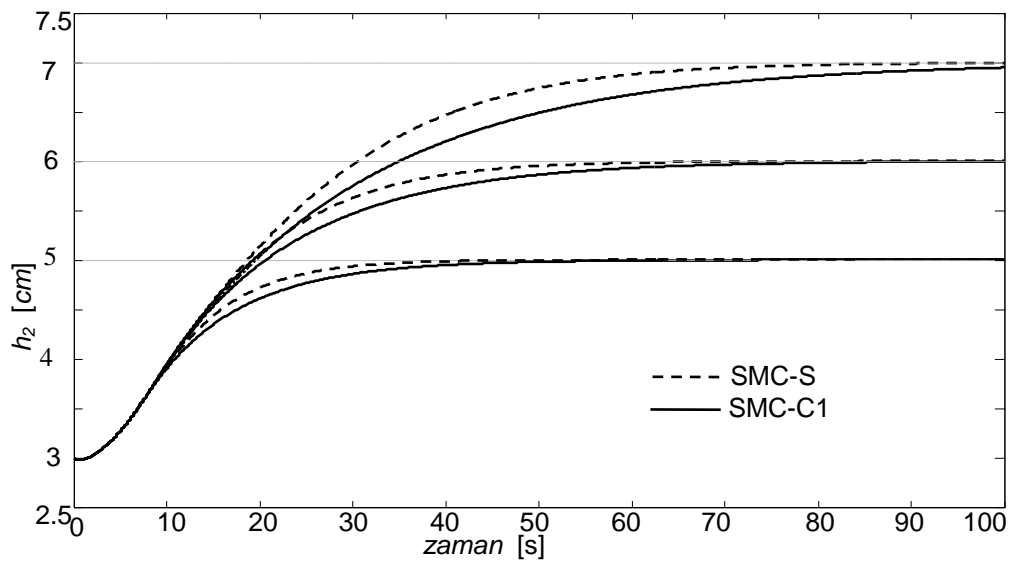
Şekil 3.5 $h_{2d}=5$ için hata faz düzlemi davranışları

Bununla birlikte SMC-S, her farklı h_{2d} değeri için \dot{h}_{2max} kısıtlamasını sağlamaktadır. Her h_{2d} değeri için α_p hareketleri Şekil 3.2'deki gibi olduğu için tekrar çizilmemiştir.



Şekil 3.6 $h_{2d}=7$ için hata faz düzlemi davranışları

Tasarlanan kayma kipli kontrolün tank sistemine katmış olduğu iyileşmeyi görebilmek için tank2 su seviyesinin 3 farklı h_{2d} değerinde SMC-C1 ve SMC-S'in performansları Şekil 3.7'de verilmiştir. h_{2d} değeri artmaya başladıkça her iki kayma yüzeyi ile çalıştırılan sistem geç oturmaya başlamıştır. Bu yüzden sistemin referans değere ulaştığını görebilmek için benzetim süresi arttırılmalıdır.



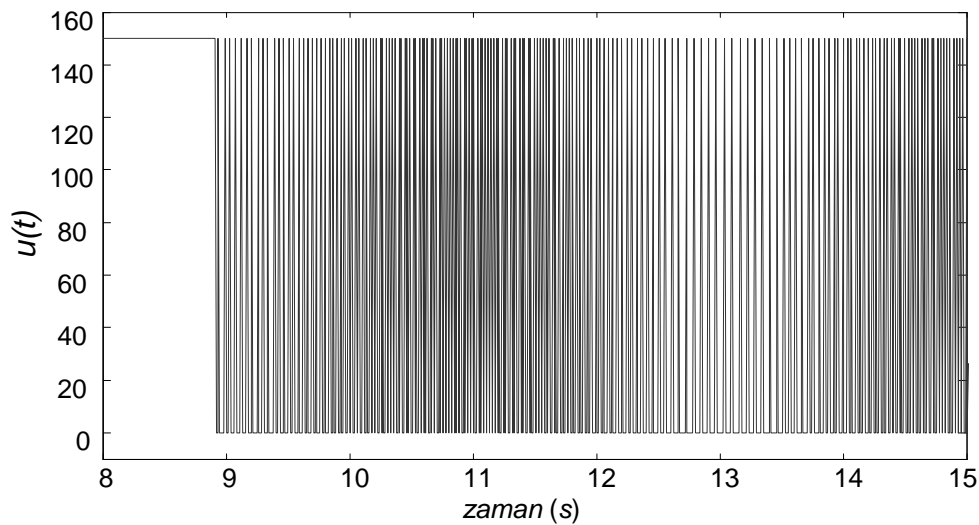
Şekil 3.7 Farklı h_{2d} değerleri için tank2 sıvı seviye değişimleri

Daha önceki bölümlerde bahsedilen yerleşme zamanı t_s (settling time), mutlak hata integrali (IAE: Integral of Absolute Error), mutlak hata ile zaman çarpımının integrali (ITAE: Integral of Time Absolute Error), hata karesi ile zaman çarpımının integrali (ITSE: Integral of Time Squared Error) ve hata karesi integrali (ISE: Integral of Squared Error) performans ölçütlerine göre SMC-C1 ve SMC-S karşılaştırıldığında elde edilen değerler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3-2 Farklı h_{2d} değerleri için performans kriterleri

	$h_{2d}=5$		$h_{2d}=6$		$h_{2d}=7$	
	SMC-C1	SMC-S	SMC-C1	SMC-S	SMC-C1	SMC-S
t_s	55.55	42.49	87.88	65.04	100.00	92.60
IAE	27.64	24.88	57.32	51.33	104.40	90.50
ISE	35.13	33.61	104.34	99.79	242.10	226.30
ITSE	208.18	180.43	870.74	748.91	2860.4	2293.00
ITAE	288.69	213.70	874.40	633.11	2251.0	1532.50

Tabloda görüldüğü gibi tasarlanan durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi, geleneksel yönteme göre daha iyi performansa sahiptir. $h_{2d}=6cm$ için SMC-S kayma yüzeyi tasarımında kontrol kuralının on-off yapısı göstermek adına $u(t)$ kontrol sinyali Şekil 3.8’de verilmiştir. Sistem kayma yüzeyine ulaştığı andan itibaren on-off valfi çatırdamaya başlar ve (3.11) kısıtlamasına uyarak tank2’nin istenen referans değerinde kalmasını sağlar.



Şekil 3.8 $h_{2d}=6 cm$ için on-off valfinin debisi([8:15] s aralığında)

4. TERS SARKAÇ SİSTEMİ İÇİN ZAMANLA DEĞİŞEN KAYMA YÜZEYİ TASARIMI

4.1 Genel Bilgi

Uzunluğu sınırlandırılmış bir platform ve platformun üzerinde ileri geri hareket edebilen küçük bir arabaya bağlı sarkaçtan meydana gelen ters sarkaç sistemi modeli, doğrusal olmayan yapısı, kısıtları (under-actuated) ve kararsızlığı nedeniyle kontrol literatüründe oldukça sık kullanılmaktadır. Uygulama alanı olarak pek çok robot sistemlerinde (Springer vd 1998), roketlerin hızlanma ve yavaşlama hareketlerinde, biyomekanik sistemlerde (Shuuji ve Kazuo 1996) ve tekerlekli hareket (Pathak vd 2005) ve denge mekanizmalarında (Hsu 1992) kullanılmaktadır (El-Hawwary vd 2006).

Ters sarkaç sistemini kısıtlar ve belirsizlikler altında denge konumuna getirebilmek için pek çok farklı kontrol mekanizması uygulanmıştır. Yapılan çalışmalarda genellikle doğrusal kontrol teknikleri (Iordanou ve Surgenor 2001), PID, yapay sinir ağları (Mohandas ve Paritala 2006), bulanık mantık (Lo ve Kuo 1998, El-Hawwary vd 2006) kinetik ve potansiyel enerji ile enerji kontrolü (Ortega vd 2002) ve kayma kipli kontrol (Mohandas ve Paritala 2006, Lo ve Kuo 1998, El-Hawwary vd 2006) kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmaların çoğunda sistem, sadece sarkacın yaptığı açıdan oluşuyormuş gibi düşünülmüştür (Lo ve Kuo 1998). Bununla birlikte sistemde yer alan çubukların elastik yapısı, platform üzerindeki arabanın sürtünmesi, arabanın yapabileceği ani hareketi gibi etmenler sistemde bozucu etkisi yaratmakta bu nedenle de ölçümler tam olarak yapılamamaktadır (El-Hawwary vd 2006).

Ters sarkaç sistemi, sarkaç alt sistemi ve araba alt sistemi olmak üzere iki alt sistemde ele alınmaktadır. Lo ve Kuo, 1998'de yaptıkları çalışmada ters sarkaç modeli için ayrıık bulanık kayma kipli kontrolü önermiştir. Ters sarkaç sisteminin denklemleri

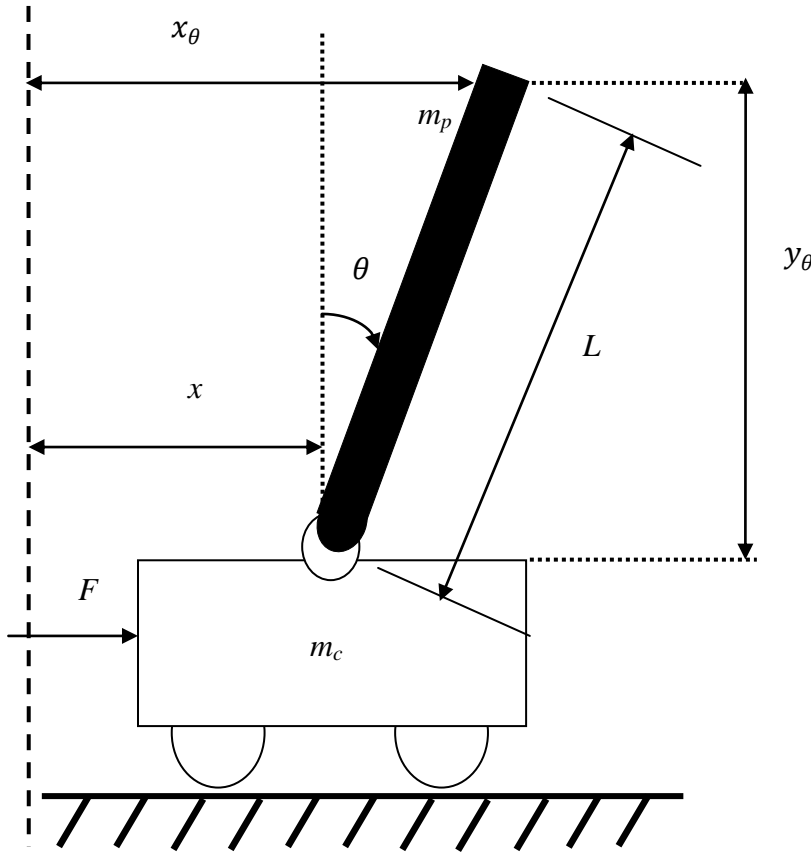
kanonik formda olmadığı için sarkaç alt sistemi ve araba alt sistemi için ayrı kayma yüzeyleri tasarlanmıştır. Her birinden elde edilen kontrol işareti diğer alt sistemi kontrol edemediği için araba alt sistemi kayma yüzeyinden bir ara parametre (z) oluşturulup sarkaç alt sisteminin kayma yüzeyine eklenerek iki alt sistem birbiriyle ilişkilendirilmiştir (Lo ve Kuo 1998).

Bunun nedeni pozisyonda meydana gelecek değişimin açığa olan etkisinin açının pozisyona olan etkisinden daha büyük olmasıdır. Sistem çıkışı sarkacın yapmış olduğu açığa eşit olduğu için yapılan çalışmada bulanık mantık kuralları arttırılmadan araba alt sistemine ait kayma yüzeyi saturasyon fonksiyonundan geçirilerek sarkaç alt sisteminin kayma yüzeyine eklemiştir. Böylelikle sarkaç alt sisteminin kayma yüzeyinden elde edilen kontrol işareti her iki alt sistemi de kontrol edebilmektedir (Lo ve Kuo 1998).

Tez çalışmasında, ters sarkaç sistemi üzerine uygulanan ilişkilendirilmiş kayma kipli kontrolün parametreleri zamana bağlı tasarlanarak iyileşme sağlanmış, sarkaç açısının yaptığı salınımlar giderilmiştir. Araba pozisyon kontrolü belli sınırlar arasında iyileştirilmiş, git-gel hareketleri azaltılmıştır.

4.2 Ters Sarkaç Sistemi

Şekil 4.1’de şematik yapısı verilen ters sarkaç sistemi, sarkacın yaptığı açı ve arabanın platform üzerindeki pozisyonu olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır. m_p sarkaç ağırlığı, m_c araba ağırlığı olup $m_t = m_p + m_c$ toplam kütedir. L sarkaç uzunluğu, g yerçekimi ivmesidir. Arabanın yer aldığı platform sınırlı uzunluğa sahiptir. Sarkaç, platformun üzerinde ileri geri hareket edebilen arabaya bağlı olup 360 derece dönebilmektedir. Sisteme uygulanan kontrolün ana amacı sarkacın yaptığı açığı sıfıra eşitlemek yani çubuğu tepe ($\theta=0$) noktasında tutmaktır. Bununla birlikte eş zamanlı olarak benzetim sonucunda arabayı tekrar orijine getirmek yani arabanın pozisyonun değerini sıfıra ($x=0$) eşitlemektir.



Şekil 4.1 Ters Sarkaç Sisteminin Şematik Yapısı

Sisteminin dinamik denklemleri farklı yöntemlerle elde edilebilir (Khalil 2002). Bu yöntemlerden birisi enerji tabanlı Lagrange yönteminden yararlanılmasıdır (Bloch vd 2001). Uç değerlerde yumuşak bir fonksiyonun türevinin sıfıra gitmesine dayanan bu yöntemde sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi hesaplanır. Daha sonra kinetik enerjiden potansiyel enerji çıkarılarak Lagrange mekaniği denklemleri elde edilir. Bu denklemlerin türevlerinden ise hareket denklemleri elde edilir. Sistemin kinetik enerjisi arabanın ve sarkacın enerjilerinin toplamından oluşur. Sistemin potansiyel enerjisi ise kütlesi ihmal edilen sarkacın yüksekliğinden kaynaklanan enerjidir (Bloch vd 2001). Araba için kinetik enerji denklemi

$$E_{ka} = \frac{1}{2}(m_c)\dot{x}^2 \quad 4.1$$

şeklinde yazılabilir. Sarkaç için ise

$$E_{ks} = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}_\theta^2 + \dot{y}_\theta^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad 4.2$$

şeklinde ötelenme ve dönme hareket enerjilerinden oluşur. x_θ ve y_θ değerleri x , θ ve L cinsinden trigonometrik büyüklükler yardımı ile yazabilir. Bu durumda sistemin toplam kinetik enerjisi (4.1) ve (4.2) denklemlerinden yazılırsa;

$$E_k = E_{ka} + E_{ks} = \frac{1}{2} [m_c \dot{x}^2 + J \dot{\theta}^2 + m_p (\dot{x}^2 + 2\dot{x}\dot{\theta}L \cos \theta + L^2 \dot{\theta}^2)] \quad 4.3$$

elde edilir. Sistemin potansiyel enerjisi ise sarkacın y_θ yüksekliğinden kaynaklanan bir enerjidir ve

$$E_{ps} = mgy_\theta = mgL \cos \theta \quad 4.4$$

olarak yazılabilir. Hareket denklemlerine ait Lagrange ifadesi;

$$\mathcal{L} = E_k - E_p = E_{ka} + E_{ks} - E_{ps} \quad 4.5$$

şeklinde yazılabilir. Durum denklemleri x ve θ olduğuna göre Lagrange denklemleri;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} &= F - f_a \\ \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\theta}} \right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \theta} &= -f_s \end{aligned} \quad 4.6$$

şeklinde yazılabilir. Burada f_a ve f_s sırasıyla arabaya ve sarkaca etkiyen sürtünme kuvvetleridir. Bir mekanik sisteme çeşitli dinamik ve statik sürtünme kuvvetleri etki eder. Hareket halindeyken oluşan sürtünme dinamik, hareketsiz haldeyken oluşan sürtünme statik sürtünmedir. Bu sistemde sürtünme kuvveti olarak statik sürtünme ele alınmıştır. Bu durumda sürtünme kuvvetleri;

$$\begin{aligned} f_a &= B_x \dot{x} \\ f_s &= B_\theta \dot{\theta} \end{aligned} \quad 4.7$$

şeklindedir. Bu durumda Lagrange denklemlerinden elde edilen ters sarkaç sistemi durum denklemleri;

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_1 + b_1 + d \end{aligned} \quad 4.8$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\dot{x}_4 = f_2 + b_2 u + d$$

şeklinde yazılabilir (Lo ve Kuo 1998). Burada yer alan x_1, x_2, x_3, x_4 parametreleri;

$$x_1 = \theta \quad ; \text{sarkacın dikey eksenle yaptığı açı}$$

$$x_2 = \dot{\theta} \quad ; \text{açının türevi}$$

$$x_3 = x \quad ; \text{arabanın pozisyonu}$$

$$x_4 = \dot{x} \quad ; \text{pozisyonun türevi}$$

$$u \quad ; \text{arabayı hareket ettiren kuvvet}$$

olup (4.8)'de yer alan f_1, b_1, f_2, b_2 parametreleri ise;

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{m_t g \sin x_1 - m_p L \sin x_1 \cos x_1 x_2^2}{L \left(\frac{4}{3} m_t - m_p \cos^2 x_1 \right)} \\ b_1 &= \frac{\cos x_1}{L \left(\frac{4}{3} m_t - m_p \cos^2 x_1 \right)} \end{aligned} \quad 4.9$$

$$f_2 = \frac{-\frac{4}{3}m_p L x_2^2 \sin x_1 + m_p g \sin x_1 \cos x_1}{\frac{4}{3}m_t - m_p \cos^2 x_1} \quad 4.10$$

$$b_2 = \frac{4}{3 \cdot \left(\frac{4}{3}m_t - m_p \cos^2 x_1\right)}$$

şeklindedir. Ters sarkaç sistemindeki θ ve x 'e bağlı alt sistemlere ait geleneksel kayma yüzeyleri aşağıda verilmiştir.

$$s_1 = c_1(\theta - z) + \dot{\theta} \quad 4.11$$

$$s_2 = c_2 x + \dot{x}$$

(4.11)'de yer alan kayma yüzeylerinde, c_1 ve c_2 parametreleri sabit alınıp z parametresi s_2 ile orantılı bir fonksiyon olarak tasarlanmış, s_1 kayma yüzeyine eklenmiştir (Lo ve Kuo 1998). Böylelikle iki alt sistem birbiriyle ilişkilendirilmiştir. z ara parametresi s_2 ve belli sabit parametrelerden oluşan bir formulasyona sahiptir. Dolayısıyla s_2 ile doğru orantılıdır. Eğer $s_2 < 0$ ise araba platformda orijinin sol tarafında demektir. Arabayı orijine itmek için pozitif bir kuvvet uygulanmalıdır. Böylelikle s_2 arttığı için z ara parametresi de artar. Eğer $s_2 > 0$ ise araba platformda orijinin sağ tarafında demektir. Bu durumda negatif bir kuvvet uygulanmalıdır. Böylelikle s_2 azaldığı için z ara parametresi de azalır. Bu doğrultuda $sign(z) = sign(s_2)$ diyebiliriz. (4.12)'de verilen z ara parametresinde φ_2 ve z_u parametreleri sabit olup $z_u < 1$ olduğu sürece azalan bir osilasyon sinyali gibi davranacaktır. s_2 sıfıra eşit olduğunda z değeri de sıfır olacağı için θ 'nın ulaşacağı tepe noktası $\theta = 0$ açısı olacaktır (Lo ve Kuo 1998).

$$z = sat(s_2/\varphi_2)z_u, \quad 0 < z_u < 1 \quad 4.12$$

(4.13)'de görüldüğü gibi kontrol işareti sarkaç açısına(θ) ait kayma yüzeyi (s_1) türevinden elde edilir. Çünkü sistemden beklenen, öncelikle θ açısını denge konumuna ($\theta(t_{final}) = 0$) getirmektir. Bununla birlikte z ara parametresinin s_1 etkisiyle her iki alt

sistemi de eş zamanlı kontrol eder. Sarkaç açısını tepe noktasında dengede tutarken sarkacın bağlı olduğu arabayı orijine geri getirmeye çalışır. s_2 ise arabanın orijinden ne kadar uzaklıkta olduğuna dair bilgi verir.

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= 0 \\ u_{eq} &= \frac{-c_1\dot{\theta} - f_1}{b_1} \end{aligned} \quad 4.13$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2}s^2(x) \\ \hat{u} &= -Ksat(s(x)b(x)/\varphi_1), \quad K, \varphi_1 > 0 \end{aligned} \quad 4.14$$

$$u = u_{eq} + \hat{u} = \frac{-c_1\dot{\theta} - f_1}{b_1} - Ksat(s_1b_1/\varphi_1)$$

(4.14)'deki süreksiz kontrol kuralında işaret fonksiyonu yerine saturasyon fonksiyonundan yararlanılmıştır. Bunun nedeni işaret fonksiyonunun sebep olduğu yüksek frekanslı anahtarlamadan kaynaklanan çarptırıcıdır. Bunu önlemek için φ_1 değeri ve saturasyon fonksiyonu yardımıyla sınırlama getirilmiş, oluşabilecek çarptırıcının önüne geçilmiştir (El-Hawwary vd 2006).

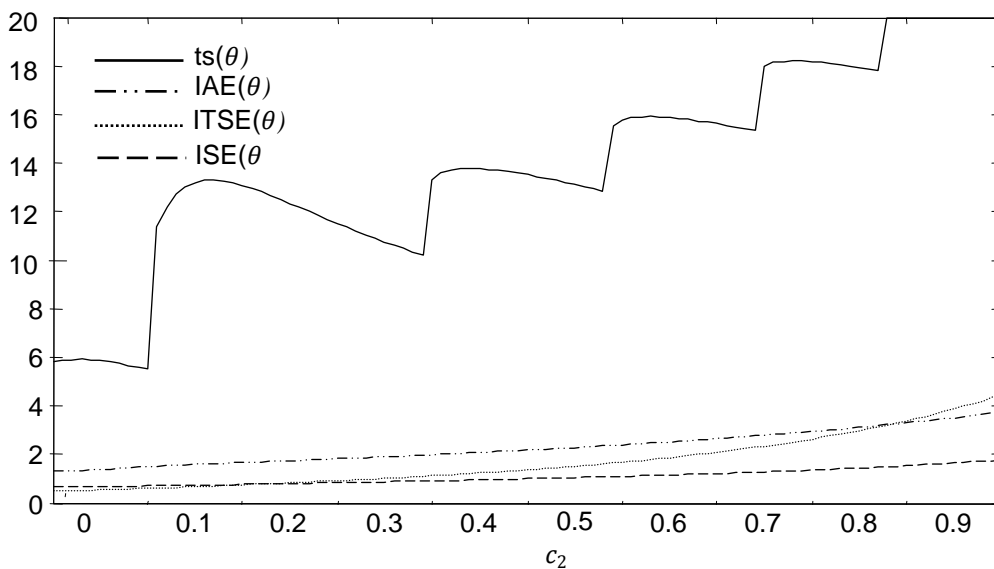
Hiyerarşik yapıda iki alt sistemin kayma yüzeylerinin birbirini etkilemesiyle oluşturulan kontrolün, değerinde meydana gelen değişiklik hem s_1 'i hem s_2 'yi sıfıra götürmek içindir. Kontrol algoritmasında sırasıyla; $s_2 \rightarrow 0$ ise $z \rightarrow 0$ dolayısıyla $x_1 \rightarrow 0$ ve $s_1 \rightarrow 0$ gerçekleştiğinde ters sarkaç kontrolü asıl hedefine ulaşmış olacaktır (Lo ve Kuo 1998).

4.3 Ters Sarkaç Sistemi İçin Zamanla Değişen Kayma Yüzeyi Tasarımı

Zamanla değişen parametrelerin elde edilmesi amacıyla ters sarkaç sistemine uygulanan (4.11)'deki kayma yüzeyinde ve (4.12)'deki z ara parametresinde bulunan sabit değerlerde yapılan değişiklikler sonucu sistem analiz edilmiştir. Değişiklik yapılabilecek sabit parametreler c_1 , c_2 , φ_2 ve z_u parametreleridir. Yapılan çalışmalarda

c_1 ve z_u parametrelerin sistemi iyileştirmek adına fark edilebilir etkiler yaratmadıkları görülmüştür. Bu çalışmada özel olarak c_2 ve φ_2 parametrelerinin sistem başarımı etkisi üzerinde durulmuştur.

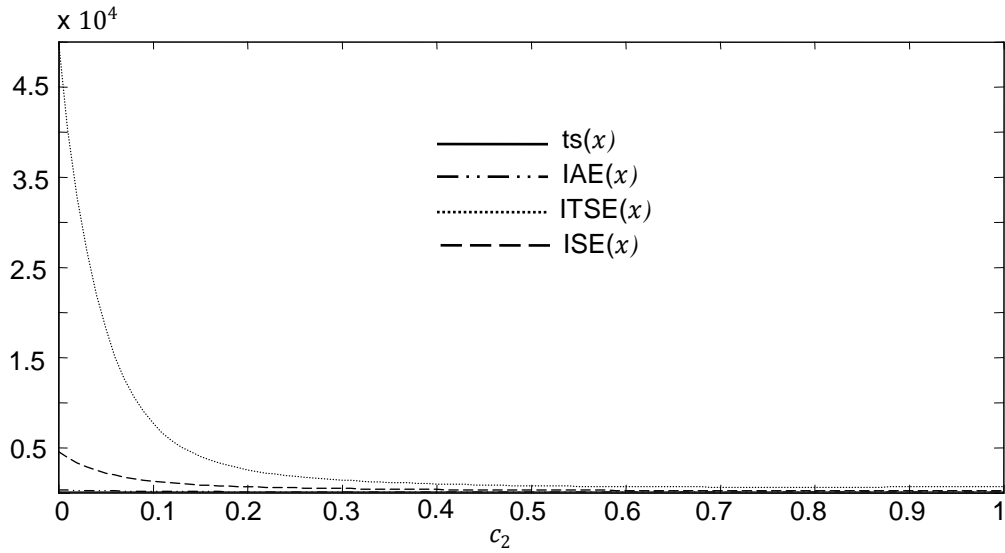
Lo ve Kuo 1998’de verilen hiyerarşik yöntem diğer parametrelerin değeri değiştirilmeden c_2 ve φ_2 parametrelerinin farklı değerleriyle çalıştırılmıştır. Bu değişimlerin sisteme olan etkileri, t_s (settling time), IAE (integral of absolute error), ISE (Integral of squared error), ITSE (Integral of time squared error) gibi bazı başarıım ölçütleri ile incelenmiştir. t_s değerleri % 5 aralığında ölçülmüştür.



Şekil 4.2 Farklı c_2 değerleri ile θ için performans ölçümleri

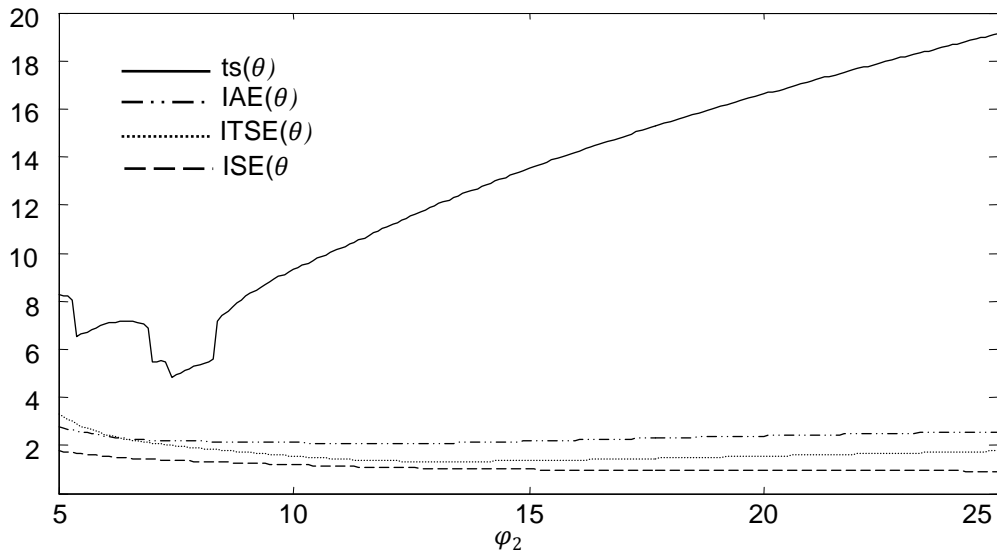
Lo ve Kuo 1998’deki yöntemde 0,5 değerinde alınan c_2 parametresi [0:1] arasında 0,01 adım aralığı ile çalıştırıldığında θ için en iyi başarıım sonucu Şekil 4.2’de görüldüğü gibi $c_2 = c_{2mn} = 0.1$ civarında sağlandığı görülmüştür.

Şekil 4.3’te verilen grafikte x için $c_2 = c_{2max} = 0.4$ ’ten itibaren başarıım sonuçları minimum değerlerini almaya başlamıştır. Lo ve Kuo 1998’de verilen yöntemde çalıştırılan sistem incelendiğinde θ ve x ’in ulaşma modunda çok salınım yaptığı, kayma moduna yaklaşırken x ’in θ ’ya göre daha çok ancak azalarak salınımlarının devam ettiği görülmüştür. c_2 değişimlerinin θ ve x ’i farklı şekilde etkilemesinden dolayı bu parametrede zamanla değişen bir düzen geliştirilmiştir.



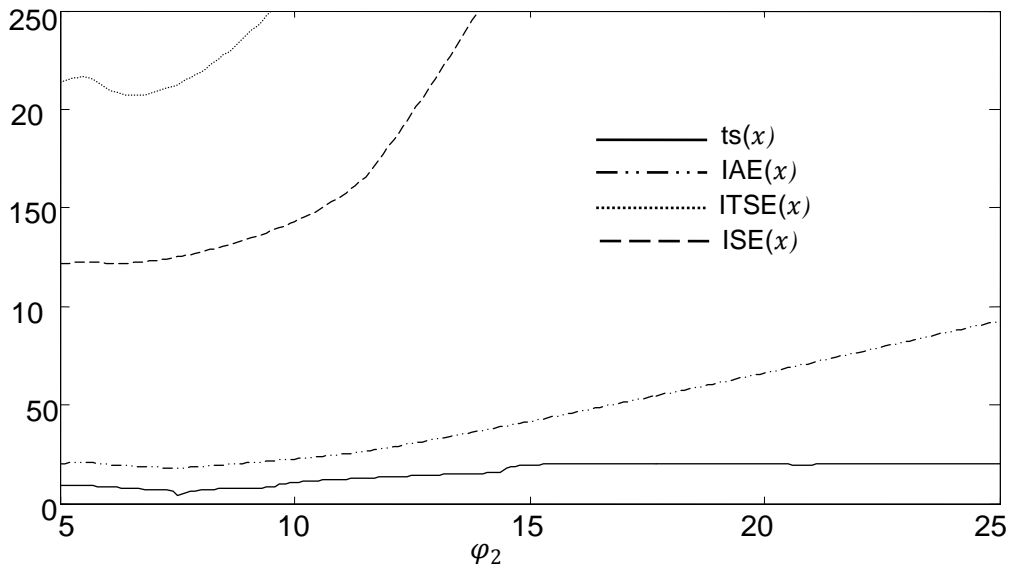
Şekil 4.3 Farklı c_2 değerleri ile x için performans ölçümleri

Zamanla değişen bu düzende c_2 , c_{2max} değerinden başlayıp θ 'nın ulaşma modunda yapacağı salınımları azaltmak için çok kısa bir süre (a_1) sonra c_{2mn} değerini almaktadır. Daha sonra c_2 parametresi, kayma moduna yaklaşırken x 'in yapacağı salınımları azaltmak için c_{2max} değerine doğru belli bir süreye (a_2) kadar ilerler ve sistem denge noktasına oturduğunda bu değerde kalır. φ_2 parametresinin θ ve x üzerindeki etkisini görmek adına Lo ve Kuo 1998'de verilen yöntemde 15 değerinde alınan φ_2 parametresi [5:25] arasında 0.1 adım aralığı ile çalıştırılmıştır.



Şekil 4.4 Farklı φ_2 değerleri ile θ için performans ölçümleri

Şekil 4.4 ve 4.5'te görüldüğü gibi θ ve x için en iyi yerleşme zamanı $\varphi_2 = d_1 = 7$ 'dedir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi θ için en iyi IAE, ITSE ve ISE sonuçları $\varphi_2 = d_2 = 12$ 'dedir.



Şekil 4.5 Farklı φ_2 değerleri ile x için başarımların ölçümleri

Buna göre iki farklı φ_2 değeri arasında zamanla değişen bir düzen geliştirilmiştir. Bu düzende φ_2 , d_1 değerinden başlayıp çok kısa bir sürede (a_1) d_2 değerine çıkmaktadır. Bunun sebebi, Şekil 4.4'teki grafikte ulaşma modundaki IAE, ITSE ve ISE artışlarını azaltmaktır. Daha sonra, φ_2 parametresi kayma moduna yaklaşırken hem x 'in hem θ 'nın yapacağı salınımları azaltmak için çoğu başarımların ölçümlerinin minimum değerinde olduğu d_1 değerine doğru belli bir süreye (a_2) kadar ilerler ve sistem denge noktasına oturduğunda bu değerde kalır. Dolayısıyla en iyi başarımları elde etmek için c_2 ve φ_2 parametresi belli zaman aralıklarında zamanla değişen değerler almışlardır. Buna göre c_2 ve φ_2 değişimleri;

- $t \leq a_1$ iken;

$$\varphi_2 = d_1 + \frac{(d_2 - d_1) * t}{a_1}$$

$$c_2 = c_{2mx} - \frac{(c_{2mx} - c_{2mn}) * t}{a_1}$$

- $a_1 < t \leq a_2$ iken;

$$\varphi_2 = d_2 - \frac{(d_2 - d_1) * (t - a_1)}{a_2 - a_1}$$

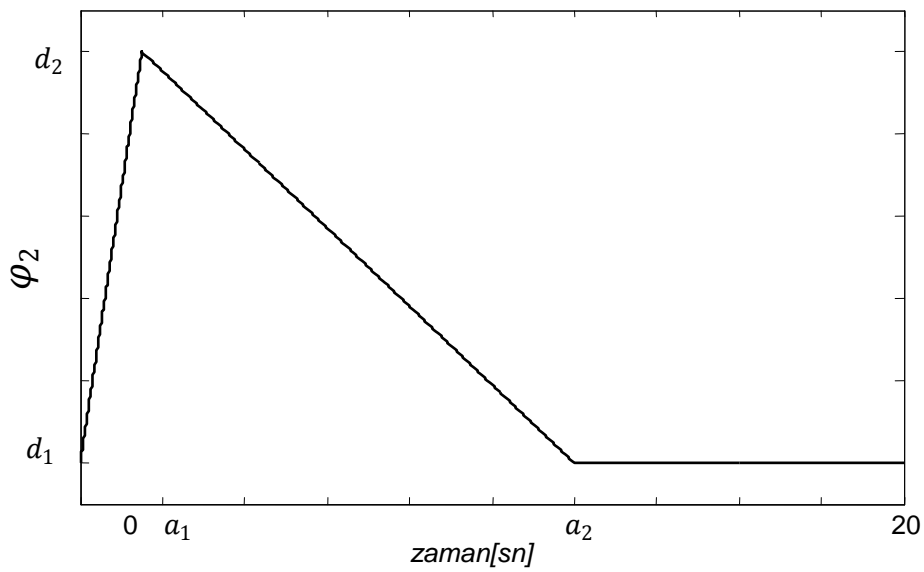
$$c_2 = c_{2mn} + \frac{(c_{2mx} - c_{2mn}) * (t - a_1)}{a_2 - a_1}$$

- $t > a_2$ iken;

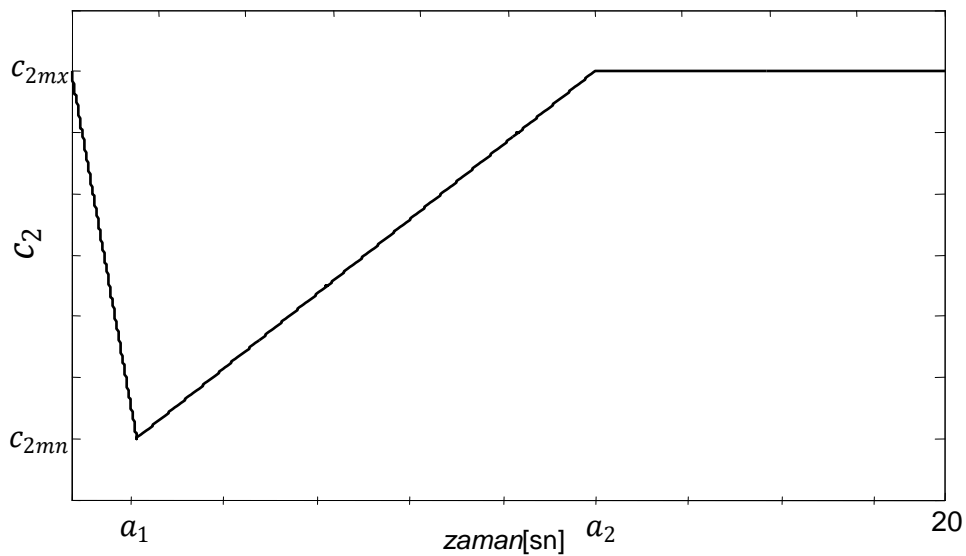
$$\varphi_2 = d_1$$

$$c_2 = c_{2mx}$$

şeklini alır. φ_2 ve c_2 parametrelerinin zamanla değişimleri Şekil 4.6 ve 4.7'de verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi φ_2 ve c_2 'nin θ ve x üzerindeki eşzamanlı etkileri a_1 ve a_2 olmak üzere aynı zaman aralıklarında değişerek gerçekleşmektedir.



Şekil 4.6 φ_2 parametresinin zamana göre değişimi



Şekil 4.7 c_2 parametresinin zamana göre değişimi

Ayarlanan parametreler ile elde edilen kontrol, Lo ve Kuo 1998’de yer alan yöntem ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte başarımlar ölçütlerine göre en iyi sonucu veren c_2 ve φ_2 parametreleri Lo ve Kuo 1998’deki yöntemde tekrar çalıştırılarak karşılaştırmalara eklenmiştir. Sonuç olarak zamanla değişen parametreler ile tasarlanan kayma yüzeyi diğer tasarımlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 4.1’de şematik yapısı verilen ve tanıtılan ters sarkaç sistemine ait sabit parametre değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Önerilen kontrole ait parametrelerin değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Sisteme ait parametre değerleri

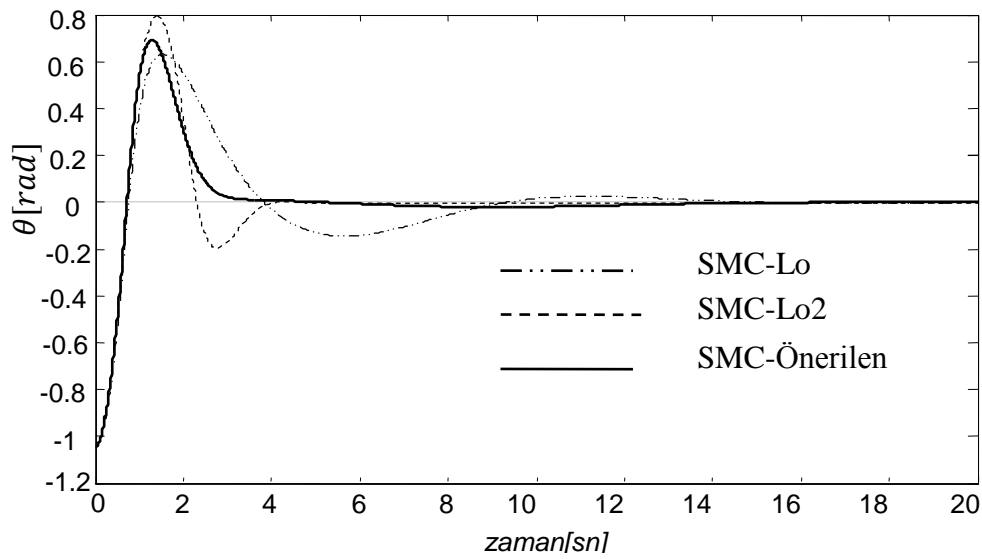
$m_p=0.05$ kg	Sarkaç ağırlığı
$m_c=1$ kg	Araba ağırlığı
$m_t = m_c + m_p$	Toplam ağırlık
$L=0.5$ m	Sarkaç uzunluğu
$g=9.81$ m/s ²	Yer çekimi ivmesi
t	Zaman
$c_1=5$	s_1 hata çarpanı
$z_u=0.9425$	z ara parametre sabiti
$ d =0.0873$	Bozucu
$K=10$	Kontrol işareti sabiti
$\varphi_1=5$	Kontrol işareti sabiti

Tablo 4.2 Önerilen kontrole ait sabit parametreler

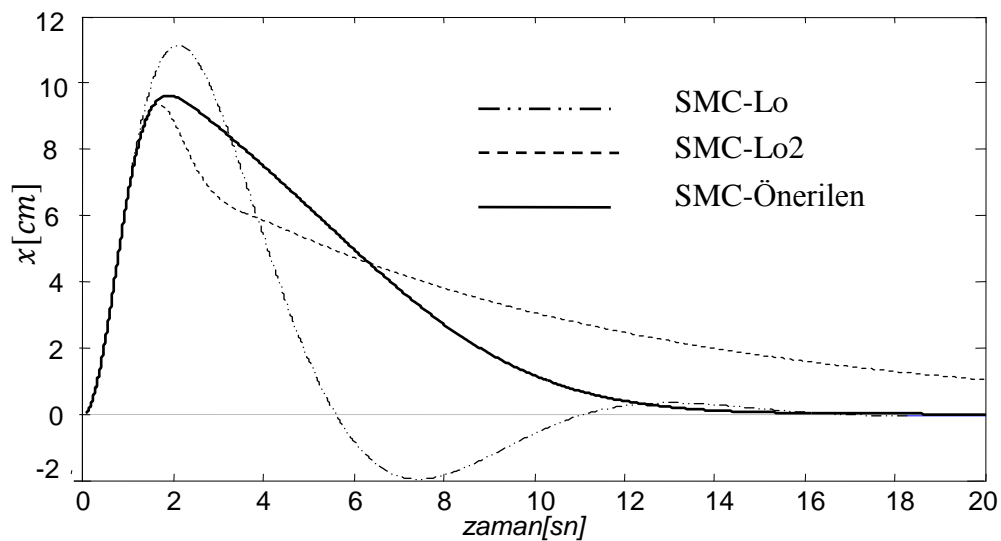
$c_{2mn} = 0.1$	c_2 ’nin alt sınırı
$c_{2mx} = 0.4$	c_2 ’nin üst sınırı
$d_1=7$	φ_2 ’nin alt sınırı
$d_2=12$	φ_2 ’nin üst sınırı
$a_1=1.5$ sn	c_2 ve φ_2 için zaman sabiti
$a_2=12$ sn	c_2 ve φ_2 için zaman sabiti

Ters sarkaç sisteminin benzetimi Matlab 7.4 Simulink ortamında 0.05 sn sabit zaman aralıklarında, Evler çözüm metodu ile gerçekleştirilmiştir. Sisteme bozucu olarak sınırlı genlikli bir işaret etki etmiştir. Sisteme ait benzetim sonuçlarının verildiği Şekil 4.8 ve 4.9’da θ ve x ’in 3 farklı kayma yüzeyi tasarımı ile zamanla değişimleri

verilmiştir. Ters sarkaç sistemi, $c_2=0,5$ ve $\varphi_2=15$ olduğu Lo ve Kuo 1998’de verilen kayma yüzeyi ile kontrol edildiğinde elde edilen başarımları SMC-Lo ile gösterilmiştir. Lo ve Kuo 1998’de verilen yöntemde c_2 ve φ_2 parametrelerinin farklı değerler ile çalıştırılarak elde edilen ve başarımları ölçütlerinde en iyi sonucu veren değerler $c_2=0,1$ ve $\varphi_2=7$ olmuştur. Bu değerler ile sistem Lo ve Kuo (1998)’deki yöntem ile tekrar çalıştırıldığında elde edilen θ ve x sonuçları SMC-Lo2 ile verilmiştir. Şekil 4.6 ve 4.7’de verilen c_2 ve φ_2 parametreleri, zamanla değişen düzende ele alındığında elde edilen θ ve x sonuçları SMC-Önerilen’de verilmiştir.

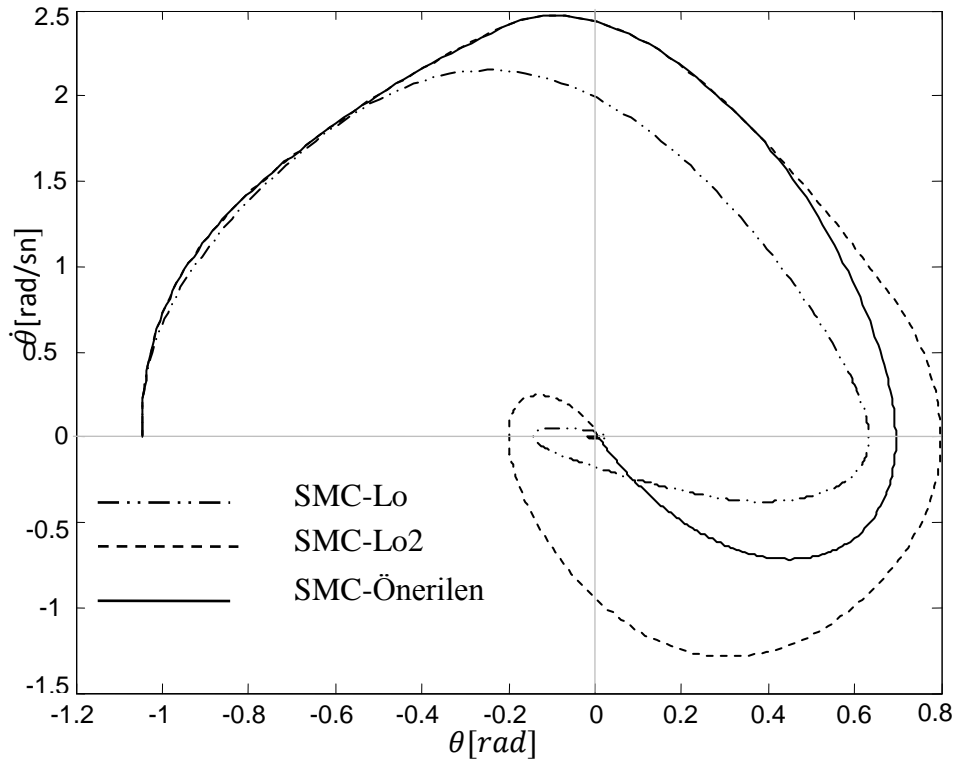


Şekil 4.8 Farklı kayma yüzeyi tasarımları ile θ değişimleri



Şekil 4.9 Farklı kayma yüzeyi tasarımları ile x değişimleri

Yapılan karşılaştırmalara göre ters sarkaç sistemini en hızlı referans değere ulaştıran tasarım zamanla değişen parametrelerle çalıştırılan kayma kipli kontrol (SMC-Önerilen) olmuştur (Şekil 4.8). Bununla birlikte zamanla değişen c_2 ve φ_2 parametrelerinin değişim aralıkları θ ve x değerlerinde meydana gelen salınımlara göre ayarlandığı için yeni modelde bu salınımlar giderilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.10 Hata faz düzleminde farklı kayma yüzeyi tasarımları

Şekil 4.10'da verilen grafikte, SMC-Lo, SMC-Lo2 ve SMC-Önerilen ile çalıştırılan sisteme ait hata faz düzlemleri verilmiştir. SMC-Lo ve SMC-Lo2 kararsız bölgelere birden çok giriş yaptığı için Şekil 4.8 ve 4.9'da görülen salınımlar ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni sistemin kararsız bölgelere giriş yaparak referans değerden uzaklaşmasıdır.

Tablo4.3'te farklı kayma yüzeyleri ile çalıştırılan ters sarkaç sistemine ait başarımlar ölçütleri verilmiştir. İlk hedefi θ 'yı en kısa zamanda referans değere ulaştırmak olan tasarımlardan önerilen kayma yüzeyi (SMC-Önerilen) bunu sağlamıştır.

Tablo 4.3 Kayma yüzeylerinin başarımlar ölçütleri

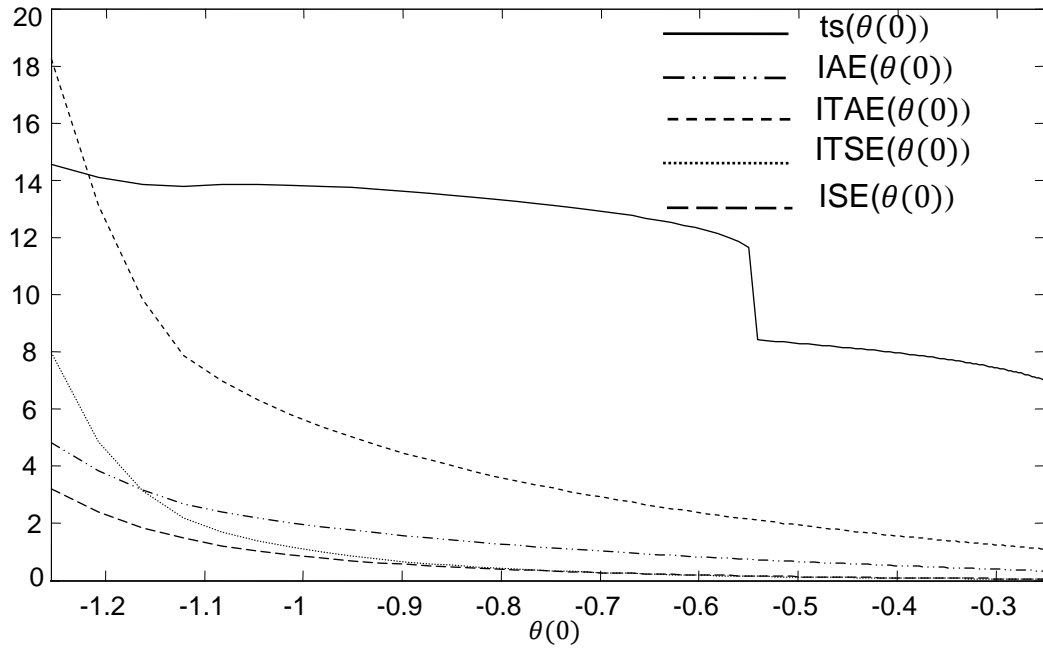
	θ			x		
	SMC-Lo	SMC-Lo2	SMC-Önerilen	SMC-Lo	SMC-Lo2	SMC-Önerilen
ts	8.15	3.56	2.71	19.43	20.0	15.2
IAE	2.16	1.52	1.39	41.63	69.3	54.5
ISE	0.99	0.93	0.79	294.36	334.0	354.8
ITSE	1.35	0.89	0.64	753.98	1625.4	1220.8

Tablo 4.3'te, IAE, ISE ve ITSE ölçütlerinde de minimum değerleri alarak diğer yöntemlere göre daha başarılı olmuştur. SMC-Önerilen ile x 'in yerleşme zamanı düşürülmüştür. x için yapılan diğer başarımlar ölçütlerinde SMC-Lo başarılı gözükmemektedir.

Ancak ters sarkaç sisteminde öncelikle θ 'nın performansını iyileştirmeyi hedeflediğimiz için IAE, ISE ve ITSE başarımlar ölçütlerinde SMC-Lo değerleri daha iyi çıkmış olsa bile θ için aynı başarımları gösteremediği için göz ardı edilir. SMC-Önerilen, parametreleri iyileştirilen Lo ve Kuo 1998'deki yöntemin x için göstermiş olduğu performans ölçümleri (SMC-Lo2) ile karşılaştırıldığında özellikle yerleşme zamanında yapmış olduğu iyileştirme ile başarımlarını korumuştur.

Şekil 4.11'de ise θ 'nın farklı başlangıç değerleri için sistemin göstermiş olduğu performans ölçütleri verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi sarkacın ilk açısı sıfıra yaklaştıkça performans ölçütleri iyileşmeye başlamıştır. Yani $\theta(0)$ başlangıçta ne kadar sıfıra yakınsa sistemi denge konumuna getirmek ($\theta(t_{final}) = 0$) o kadar kolay ve hızlı olacaktır.

θ 'nın farklı başlangıç koşulları ile birlikte ters sarkaç sistemine ait diğer parametreler ile optimizasyon teknikleri belirlenip sistem başarımlarını ölçülebilir.



Şekil 4.11 Farklı başlangıç koşullarında başarımleri

Ters sarkaç sistemi üzerinde geliştirilen kayma yüzeyi tasarımı, 2007FBE017 numaralı PAU-BAP yüksek lisans projesi kapsamında alınan masaüstü bilgisayar ve Feedback Ters Sarkaç mekanizmasında çalıştırılmıştır(Şekil 4.12).



Şekil 4.12 PC ve ters sarkaç sistemi

Masaüstü bilgisayar ile sarkaç sistemi arasında bağlantı;

1. PCI 1711 kart
2. Feedback SCSI adaptör

3. Dijital sarkaç kontrolü
4. Dijital sarkaç mekanik birimi

ile sağlanır. PCI 1711 kart ve SCSI adaptör ile sarkaç sistemi ve masaüstü bilgisayar arasında veri iletişimi sağlanır. Dijital sarkaç mekanik biriminde sarkacın ve arabanın hareketini sağlayan güç DC motor ile üretilir(Şekil 4.13).



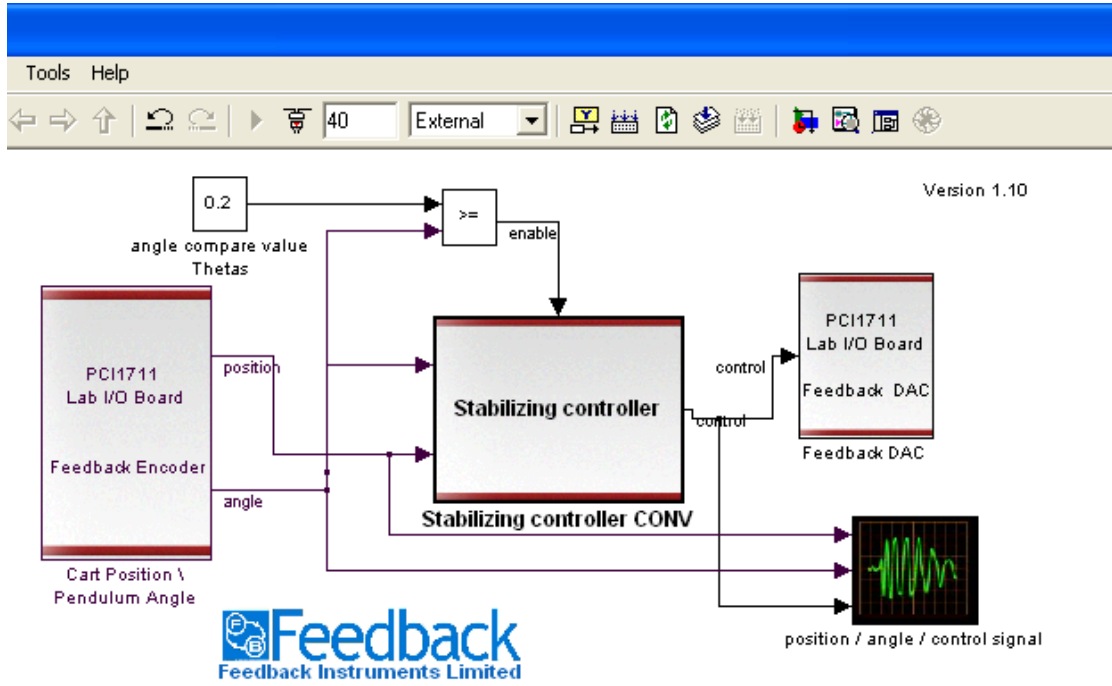
Şekil 4.13 DC motor ve bağlantı arabirimi

Düzenek üzerinde yer alan araba pozisyonu hakkında bilgi veren kodlayıcılar vardır. Araba hareketi, DC motorun bağlı olduğu kemerin hareket etmesi ile sağlanır. Araba rayının her iki tarafında araba tekerleklerinin dokunabileceği ve araba hareketini sonlandıran limit anahtarlar yer almaktadır. Araba üzerinde yer alan sarkaca ait açılı bilgisi, araba içinde yer alan optik kodlayıcı ile elde edilir. Hem araba hem sarkaç açısında çalışan bu kodlayıcılar, ışık kaynağı, ışık detektörü ve ikisi arasında yer alan uzun dar bir diskten oluşmaktadır. Sarkaç ve araba sistemi hareketine ait veriler ile bilgisayar ara yüzünde kontrol algoritmasında kullanılan her türlü bilgi birbirleri ile A/D ve D/A dönüştürücüler ile iletişim kurar.



Şekil 4.14 Sarkaç mekanik birimi

Ters sarkaç sisteminin kontrol biriminde, Advantech PCI 1711 kartlı masaüstü bilgisayar ve Matlab Simulink benzetim ortamı yer almaktadır(Şekil 4.14). Kontrol sinyali $-2,5V$ ve $2,5V$ arasında dönüştürülerek DC motora gönderilir.



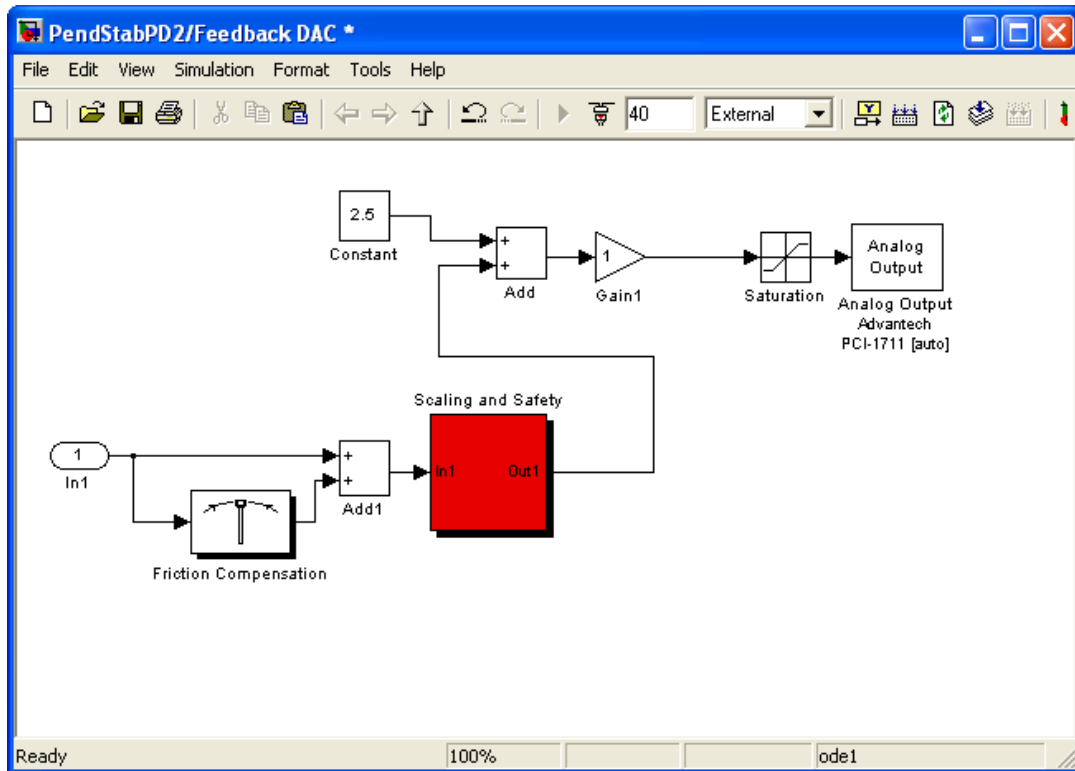
Şekil 4.15 Simulink ara yüzü

Şekil 4.15'te verilen ters sarkaç sistemi Simulink tasarımında PCI1711 Lab I/O Board bloğu sarkaç açısı ve araba pozisyon bilgisini sistemde aldığı sinyaller ile alır ve kontrolör tasarıma iletir. Sarkaç sistemin kontrolü iki kısımdan oluşur. Bunlar sarkacı

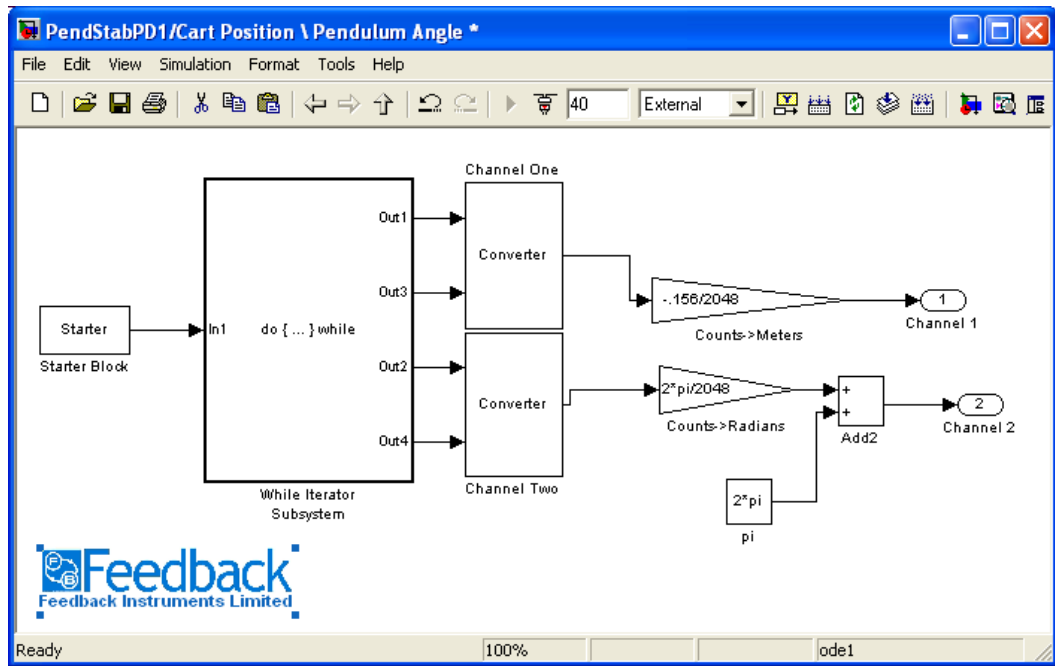
referans değere ulaştırmak için sallama (swing up) ve referans değere yakın yerde yapılan dengeleme (stabilizing) kontrolüdür. Bu projede tasarlanan kontrolör, sarkaç açısının sıfıra ($\theta=0$) yakın yerlerde yapılan dengeleme (stabilizing) kontrolü olup amacı sarkacı Şekil 4.16'daki gibi kararsız durumda tutabilmektir.



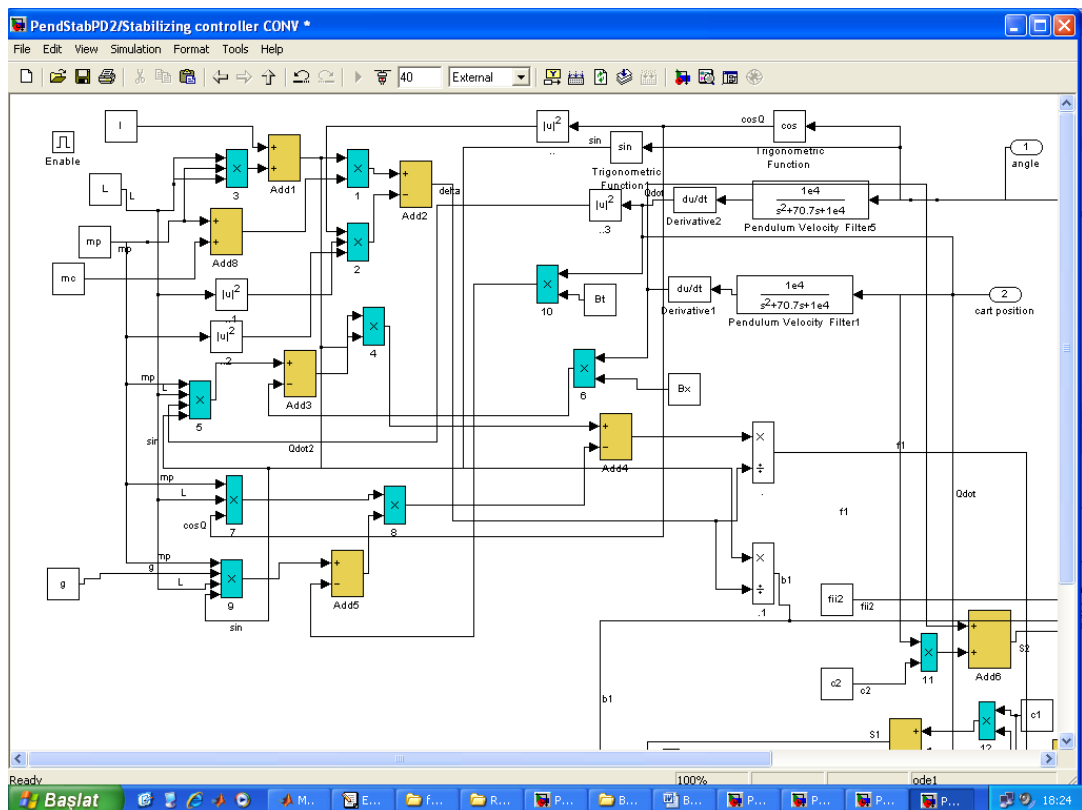
Şekil 4.16 Sarkacın kararsız durumu



Şekil 4.17 Feedback DAC bloğu tasarımı

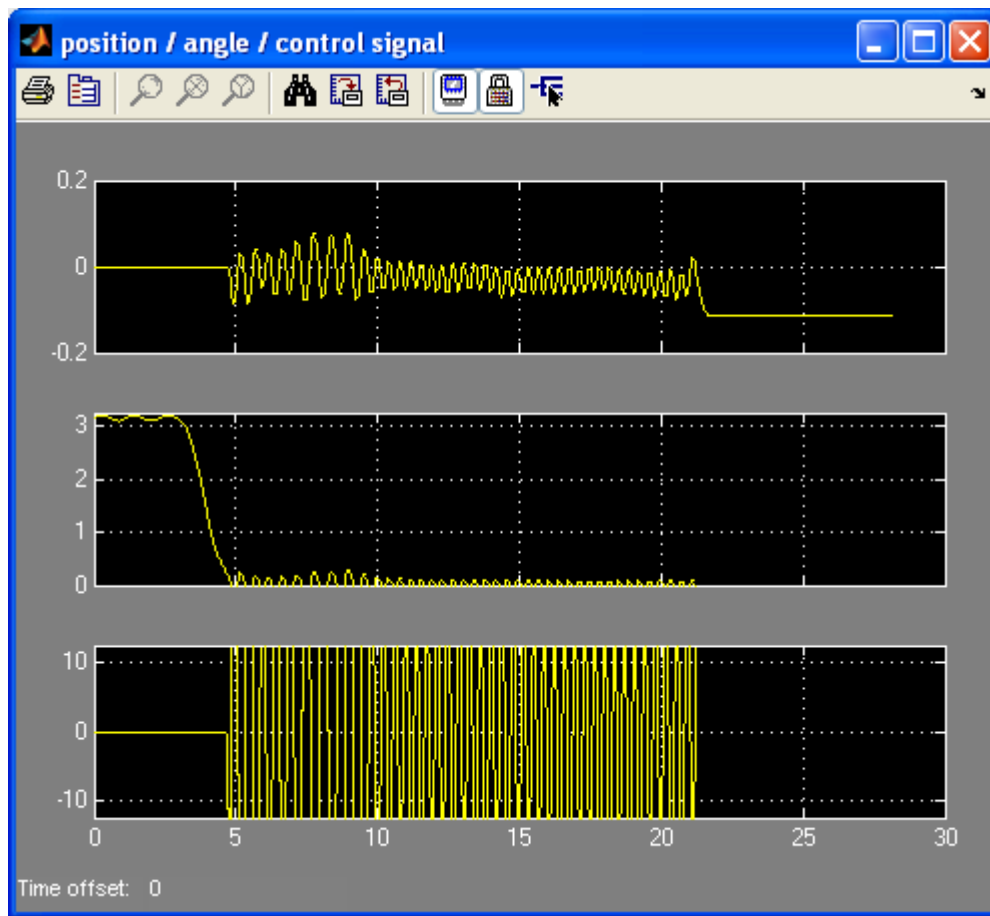


Şekil 4.18 Feedback Encoder bloğu tasarımı



Şekil 4.19 Stabilizing Controller Bloğu

Feedback ters sarkaç sisteminde kullanılan ara yüz bloklarından Şekil 4.17 dijital/analog dönüştürücü tasarımına, Şekil 4.18’de yer alan kontrolör bloğu ters sarkaç sistemine ait tasarlanan kayma kipli kontrolörüne aittir. Bu blokta (4.9)’da yer alan f_1 ve b_1 değerleri ile (4.11) ve (4.13) yer alan kayma yüzeyi formülleri tasarımları yer almaktadır. Şekil 4.19’da ise sisteme ait denklemler bloklar halinde hazırlanmış, blok çıkışı olarak pozisyon ve açı bilgisi verilmiştir. Bu tasarım sonucu sarkaç açısı, araba pozisyonu ve kontrolöre ait grafikler Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Sistem verilerinin osiloskopta gösterimi

Grafikte, ilk bölümde pozisyon bilgisi, ikinci bölümde açı bilgisi, üçüncü bölümde kontrol sinyali yer almaktadır. Görüldüğü gibi gerçek sistemde sarkaç açısı istenen referans değere ulaşip denge halinde kalamamakta salınımları az da olsa devam etmektedir. Bunun nedeni olarak modellenmemiş sistem dinamikleri, sürtünme ve daha pek çok bozucu etken gösterilebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu bölümde yapılan çalışmanın sonuçları ve devamında ileride yapılabilecek çalışmalar irdelenmiştir.

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, değişken yapılı sistemler kuramının bir alt sınıfı olarak ortaya çıkan kayma kipli kontrol incelenmiş, kayma yüzeyi tasarım yöntemleri ele alınmıştır. Uygulanacak sisteme özgü farklı kayma yüzeyi tasarımları ile performansta iyileşme sağlanabileceği görülmüştür. Benzetim ortamı olarak başlıca kontrol sistemlerinden; ikili tank sistemi ve ters sarkaç sistemi kullanılmıştır. Daha önce kayma yüzeyi ile yapılmış çalışmalar incelenmiş, tasarımlarda yapılabilecek değişiklikler ele alınmıştır.

İkili tank sisteminde, sistem durumlarına dayalı yeni bir yöntem kullanılarak ikili tank sistemi üzerinde doğrusal olmayan kayma yüzeyi tasarımı önerilmiştir. Doğrusal olmayan kayma yüzeyi için de bükülme miktarını belirleyen parametrenin durumlara bağlı ayarlanması ile sistem durumlarına göre değişken kayma yüzeyi elde edilmiştir. Bu tasarım ile ikili tank sistemi geleneksel kayma yüzeyi tasarımlarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Durum bilgisine bağlı tasarlanan yöntem, başlangıç koşullarının değişimlerinden ve sistemde yer alan bazı kısıt değerlerin değişimlerinden etkilenmeden, hedeflenen değere, geleneksel yöntemlere en hızlı ulaşan tasarım olmuştur. Hata faz düzleminde, kayma modunda, doğrusal olmayan yapıda ilerlemesiyle de etkili olmuştur. Farklı başlangıç koşulları ile çalıştırıldığında bile parametrelerde herhangi bir ayarlama yapmadan hedeflenen değere ulaşmayı ve bunu geleneksel yöntemlere göre daha iyi yapmayı başarmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, durum bilgisi ile değişen kayma yüzeyi tasarımındaki hata parametresinin minimum ve

maksimum değerleri alınarak geleneksel yöntemde alıştırılrsa bile ya performansı düşük kalmıştır ya da sistemde yer alan h_{2max} kısıdının dışına çıkmıştır. Böylelikle geleneksel yöntemdeki kayma yüzeyi hata parametresinin farklı değerlerle alıştırılrsa bile daha iyi performans sağlayamadığı görülmüştür.

Ters sarkaç sisteminde, sisteme ait bazı parametreler için zamanla değişen bir düzen geliştirilmiştir. Araba ve sarkaç alt sistemi olmak üzere iki alt sistemden oluşan ters sarkaç sisteminde bunu sağlarken geleneksel yöntemle çalıştırılan ter sarkaç sistemine ait bazı performans ölçütlerinden faydalanılmıştır. Bu performans ölçütlerinde yer alan değişimlere göre her iki alt sistem düşünülerek parametrelere minimum ve maksimum sınırlar belirlenmiştir. Parametrelerin sınır değerler arasında zamanla göstereceği değişimler için yine geleneksel yönteme ait grafiklerden yararlanılmıştır. Belli zaman aralıklarında sabit belli zaman aralıklarında artan ve azalan grafik çizen yeni parametrelerle ters sarkaç sisteminin performansı arttırılmıştır. Bununla birlikte geleneksel yöntemde ortaya çıkan salınımlar giderilmiş yerleşme zamanında oldukça iyileşme görülmüştür.

5.1 neriler

Yapılan tasarımlar üzerinde gelecekte yapılabilecek bazı çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

1) İekli tank sistemine ait kayma yüzeyinde sabit parametre ayarlamaları elle yapılmıştır. Parametrelerin sınır değerleri ile bazı parametrelerin değerleri ilk koşullara göre önceden belirlense de diğer parametrelerin nasıl seçildiği sistem başarımı açısından oldukça önemlidir. Başarımı daha da iyileştirmek için elle ayarlama yerine tüm parametreler bir optimizasyon yöntemi kullanılarak iyileştirilebilir. Bunun için uygun bir yaklaşım evrimsel arama algoritmalarından yararlanmaktır. Doğal seleksiyon, genetik, biyoloji ve evrim prensiplerinden yola çıkılarak oluşturulmuş, olasılık temeline dayalı bir uyarlamalı arama yöntemi olan evrimsel arama algoritmaları, o anki probleme çözüm olabilecek bilgi yapılarından oluşan bir popülasyon elde edilmesine dayanır (Tokat 2003).

2) Önerilen yöntemlerin test edilmesi bilgisayar ortamında yapılan çeşitli benzetimler ile sağlanmıştır. İkili tank sisteminde verilen örneklerde kayma kipine giriş anının daha iyi gözlenebilmesi açısından kontrol işaretindeki yüksek frekanslı çattırtı giderilmemiş ve şekillerde gösterilmiştir. Bunun için doyum fonksiyonu kullanılarak çattırtı kolayca giderilebilir. Bu sayede fiziksel sistemlerde kullanılacak çattırtının giderildiği uygun kontrol işareti üretilebilir. Önerilen yöntemlerin gerçek zamanlı sistemlere uygulanması yapılabilecek önemli bir çalışma konusudur.

3) Ters sarkaç sisteminde parametreleri düzgün ayarlayabilmek için performans ölçütlerin yanında optimizasyon yöntemlerinden faydalanılabilir. Bu yöntemle sisteme etkisi az olan sabit parametreler dahil edilerek daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

4) Ters sarkaç sisteminde, ikili tank sisteminde olduğu gibi sistemin başlangıç koşullarına bağlı ve sistem durumları ile değişen düzen geliştirilebilir.

5) Günümüzde kontrol mühendisliğinde yapay sinir ağlarından yararlanılması üzerinde kapsamlı çalışmalar bulunmaktadır. Bunun temel nedeni yapay sinir ağlarının sahip olduğu öğrenme yeteneği, doğrusal olmayan giriş/çıkış ilişkisi ve paralel işleme gibi özelliklerdir. Önerilen kayma yüzeyini döndürmek için kullanılan sigmoid fonksiyonu doğrudan bir yapay sinir ağı çıkışı olarak elde edilebilir. Böylece yapay sinir ağlarının eğitime ve öğrenme süreçlerinden yararlanılarak sistem başarımı iyileştirilebilecektir (Tokat 2003).

6) İkili tank sistemi için önerilen kayma yüzeyi her iki tankın yüksekliğini de kapsayacak şekilde tekrar tasarlanabilir. Böylelikle kayma yüzeyi, tüm sistem durumlarından faydalanabilir. Daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Almutairi N.B., and Zribi M. (2006) Sliding Mode Control of Coupled of Tanks, *Mechatronics*, 16: (7) 427–441.
- Aström, K.J., and Wittenmark, B. (1989) Adaptive Control, *Addison-Wesley Publishing Company*, USA, 592s.
- Aydın,S., and Tokat,S. (2008) “Sliding mode control of a coupled tank system with a state varying sliding surface parameter”, *10th IEEE International Workshop on Variable Structure Systems*, Antalya, Turkey.
- Bartoszewicz, A. (1995) A Comment on a Time Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second-Order Uncertain Systems, *Automatica*, 31: (12) 1893-1895.
- Bartoszewicz, A. (1996) Time-Varying Sliding Modes for Second Order Systems, *IEE Proceedings of the Control Theory and Applications*, 143: (5) 455-462.
- Bartoszewicz, A. (1997) “A new reaching law for discrete-time variable structure systems”, *Proceedings of the 36th IEEE Conference on Decision and Control*, San Diego, California, USA, s. 4044-4045.
- Bartoszewicz, A. (1998) “Design of a nonlinear time-varying switching line for second order systems”, *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida USA, s. 2404-2408.
- Bartoszewicz, A. (2000) On the Effect of Chattering In the Sliding Mode Control Systems, *Systems Science*, 26: (1) 29-42.
- Betin, F., Pinchon, D., and Capolino, G.A. (2002) A Time-Varying Sliding Surface for Robust Position Control of a DC Motor Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49: (2) 462-473.
- Bloch, A.M., Chang, D.E., and Leonard, N.E. (2001) Controlled Lagrangians and the Stabilization of Mechanical Systems II:Potential Shaping, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46: (10) 1556-1571.
- Brown, M.D.J. (2001) Continuous and smooth sliding mode control, PhD Thesis, *The School of Graduate Studies of The University of Alabama in Huntsville*, Alabama, USA, 105s.
- Burton, J.A., and Zinober, A.S.I. (1986) Continuous Approximation of Variable Structure Control, *International Journal of Systems Science*, 17: (6) 875-885.
- Cao, Y., and Stepanenko, Y. (1993) “A novel variable structure control scheme for an industrial robot: theory and experiments”, *Proceedings of the 2nd IEEE Int. Conference on Control Applications*, Vancouver, s. 723-728

- Chang, T.H., and Hürmüzlü, Y. (1993) Sliding Control Without Reaching Phase and Its Application to Bipedal Locomotion, *Journal of Dynamics, Systems, Measurement and Control*, 115: 447-455.
- Cho, D.D. (1994) “VSC of nonlinear systems: experimental case studies in variable structure and Lyapunov control”, *Lectures Notes in Control and Information Sciences*, s. 335-364.
- Choi, S.B., Cheong, C.C., and Park, D.W. (1993) Moving Switching Surfaces for Robust Control of Second Order Variable Structure, *International Journal of Control*, 58: (1) 229-245.
- Choi, S.B., Park, D.W., and Jayasuriya, S. (1994) A Time-Varying Sliding Surface for Fast and Robust Tracking Control of Second Order Uncertain Systems, *Automatica*, 30: (5) 899-904.
- Chu, V.K., and Tomizuka, M. (1996) “Sliding mode control with nonlinear sliding surfaces”, *Proceedings of the 13th IFAC Triennial World Congress*, San Fransisco, USA, s. 481-486.
- Chun, K., and Choi, B.Y. (2001) Fuzzy Moving Sliding Mode Control for Robotic Manipulators , *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, USA, 7: (7) 597-605.
- DeCarlo, R.A., Zak, S.H., and Matthews, G.P. (1988) Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems: A tutorial, *Proceedings of the IEEE*, 76: (3) 212-232.
- Delavari H., and Noiey A.R. (2007) “Genetic-based Fuzzy Sliding Mode Control of an Interconnected Twin-Tanks”, *The International Conference on Computer as a Tool*, s. 714-719.
- Denker, A., and Kaynak, O. (1994) Applications of VSC in Motion Control Systems, Variable Structure and Lyapunov Control, (Zinober, A.S.I. Eds.), *Springer-Verlag*, London, England. s365-387.
- Denker, A., and Ohnishi, K. (1996) Robust Tracking Control of Mechatronic Arms, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1: (2) 181-187.
- Edwards, C., and Spurgeon, S.K. (1998) Sliding Mode Control: Theory and Applications, *Taylor & Francis*, London, UK, 237 s.
- Edwards, C. and Spurgeon, S.K. (1998b) “A sliding mode control matlab toolbox”, *Department of Engineering Control Systems Research Laboratory Technical Report*, University of Leicester, United Kingdom. s. 98-99.
- El-Hawwary, M.I., Elshafei, A.L., Emar, H.M., and Fattah, H.A.A. (2006) Adaptive Fuzzy Control of the Inverted Pendulum Problem, *Control Systems Technology IEEE Transactions* , 14: (6) 1135 – 1144.

- Elmalı, H., and Olgaç, N. (1992) Sliding Mode Control with Perturbation Estimation (SMCPE): A New Approach, *International Journal of Control*, 56: (4) 923-941.
- Elmalı, H., and Olgaç, N. (1996) Satellite Attitude Control via Sliding Mode with Perturbation Estimation, *IEEE Proceedings- Control Theory and Applications*, 143: (3) 276-282.
- Ertugrul, M., Kaynak, O., and Kerestecioğlu, F. (2000) Gain Adaptation in Sliding Mode Control of Robotic Manipulators, *International Journal of Systems Science*, 31: (9) 1099-1106.
- Fossen, T.I., and Foss, B.A. (1991) "Sliding control of MIMO nonlinear systems", *Proceedings of the European Control Conference*, Grenoble, France, s. 1855-1860.
- Guigues, N., Berho, C., Foucher, J.-C., and Fouillac, A.M. (2007) The Use of Tank Experiments in Assessing the Performance of Emerging Tools in Optimizing Water Monitoring, *Trends in Analytical Chemistry*, 26: (4) 268-273.
- Güngör, F. (2000) Diferansiyel Denklemler, *Beta yayınları*, İstanbul, Türkiye, 278s.
- Ha, Q.P., Rye, D.C., and Durrant-Whyte, H.F. (1999) Fuzzy Moving Sliding Mode Control with Application to Robotic Manipulators, *Automatica*, 35: 607-616.
- Huh, U.Y., and Lee, J.H. (1995) "A modified sliding mode control scheme for AC servo motor", *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 2: 730-735.
- Hung, J.Y., Gao, W., and Hung, J.C. (1993) Variable Structure Control: a Survey, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40: (1) 2-22.
- Hsu, P. (1992) Dynamics and Control Design Project Offers Taste of Real World, *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 12: (3) 31-39.
- Jordanou, H. N., and Surgenor, B. W. (2001) Experimental Evaluation of the Robustness of Discrete Sliding Mode Control versus Linear Quadratic Control, *IEEE Trans. Contr. Syst. Technology*, 5: (2) 254-260.
- Jabbari, A., Tomizuka, M., and Sakaguchi, T. (1990) "Robust nonlinear control of positioning systems with stiction", *Proceedings of the 9th American Control Conference*, San Diego, California, USA, s. 1097-1102.
- Kachroo, P., and Tomizuka, M. (1996) Chattering Reduction and Error Convergence in the Sliding Mode Control of a Class of Nonlinear Systems, *IEEE Transactions on Automatic control*, 41: 1063-1068.
- Kachroo, P. (1999) Existence of Solutions to A Class of Nonlinear Convergent Chattering Free Sliding Mode Control Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 44: (8) 1620-1624.

- Khalil, H.K. (2002) Nonlinear Systems, *Prentice Hall, Englewood Cliffs*, 3rd Edition, 750 s.
- Khan, M.K., and Spurgeon S.K. (2006) Robust MIMO Water Level Control in Interconnected Twin-Tanks Using Second Order Sliding Mode Control, *Control Engineering Practice*, 14: (4) 375-386.
- Lee, C.K., Kwok, N.M., and Leung, T.P. (1995) A Brushless DC Motor Velocity Regulator Using a Variable Structure Controller with Varying Switching Surfaces, *Proceedings of the IEEE*, 1: 297-302.
- Lee, H., Kim, E., Kang, H.J., and Park M. (1998) Design of A Sliding Mode Controller with Fuzzy Sliding Surfaces, *IEEE Proceedings of the Control Theory and Applications*, 145: (5) 411-418.
- Lo,J.C., and Kuo, YH. (1998) Decoupled Fuzzy Sliding-Mode Control, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6: 3 426-435.
- Mohandas, K P, and Paritala, S. (2006) “Simulation of inverted pendulum using neural Networks for identification”, *Proceedings of the 4th FAE International Symposium*, European University of Lefke, North Cyprus, s. 621-627
- Murray, R.M., Li, Z., and Sastry, S.S. (1994) A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation, *CRC Press*, USA. 480s.
- Olgaç, N., and Iragavarapu, V.R. (1992) “An Improved Sliding Mode Control”, *Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control*, Tucson, Arizona, USA, s. 2398-2399.
- Ortega, R., Spong ,W., Estern, F. G., and Blankenstein G. (2002) Stabilization of a Class of Underactuated Mechanical Systems via Interconnection and Damping Assignment, *IEEE Trans. Autom. Contr.*, 47: (8) 1218–1233
- Özcan, F., (1999) ”Valf seçim kriterleri”*J. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi*, s. 29-35.
- Pana H., Wonga H., Kapilaa V.,and 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.
- Park, K.B., Shin, J.H., and Lee, J.J. (1996) Adaptive Variable Structure Controller with Decreasing Gain for Nonlinear Uncertain Systems, *Electronics Letters*, 32: (12) 1145-1147.
- Park, K.B., and Tsuji, T. (1999) Terminal Sliding Mode Control of Second-Order Nonlinear Uncertain Systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 9: 769-780.

- Pathak, K., Franch, J., and Agrawal, S. A. (2005) Velocity and Position Control of a Wheeled Inverted Pendulum, *IEEE Trans. Robot.*, 21: (3) 505–514.
- Phillips, J.M. (2000) Variable strategy model of the human operator, PhD Thesis, *Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburgh, Virginia, USA, 111s.
- Roy, R.G., and Olgaç, N. (1997) “Robust nonlinear control via moving sliding surfaces: n^{th} order case”, *Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control*, San Diego, California, USA, s. 943-948.
- Sarptürk, S.M., Istefanopulos, Y., and Kaynak, O. (1987) On the Stability of Discrete-Time Sliding Mode Control Systems, *IEEE Transsactions on Automatic Control*, 32: 930-932.
- Seraji, H. (1989) Simple Method for Model Reference Adaptive Control, *International Journal of Control*, 49: (1) 367-371.
- Shinsky F.G. (1997) Averaging Level Control, *Chemical Processing*, 60: (9) 58.
- Shtessel, Y.B. (1995) Nonlinear Output Tracking via Dynamic Sliding Manifolds, *Journal of the Franklin Institute*, 332: (6) 735-746.
- Shuuji, K., and Kazuo, T. (1996) Experimental Study of Biped Dynamic Walking, *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 16: (1) 13–20.
- Shyu, K.K., and Shieh, H.J. (1996) A New Switching Surface Sliding-Mode Speed Control for Induction Motor Drive Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11: (4) 660-667.
- Slotine, J.J.E., and Coetsee, J.A. (1986) Adaptive Sliding Controller Synthesis for Nonlinear Systems, *International Journal of Control*, 43: (6) 1631-1651.
- Slotine, J.J.E., and Li, W. (1991) Applied Nonlinear Control, *Prentice-Hall International, Englewood Cliffs*, New Jersey, USA, 461s.
- Slotine, J.J.E., and Sastry, S.S. (1983) Tracking Control of Nonlinear Systems Using Sliding Surfaces with Application to Robot Manipulators, *International Journal of Control*, 38: (2) 465-492.
- Sontag, E.D., and Sussmann, H.J. (1996) General Classes of Control Lyapunov Functions, in Stability Theory: *International Series of Numerical Mathematics* 121: 87-96.
- Springer, B., Kucers, L., and Mourad, S. (1998) Balancing of An Inverted Pendulum with a SCARA Robot IEEE/ASME *Trans. Mechatronics*, 3: (2) 91-97.

- Spurgeon, D.K., and Davies, R. (1993) A Nonlinear Control Strategy for Robust Sliding Mode Performance in the Presence of Unmatched Uncertainty, *International Journal of Control*, 57: (5) 1107-1123.
- Su, C.Y., and Stepanenko, Y. (1994) Adaptive Sliding Mode Control of Robot Manipulators: General Sliding Manifold Case, *Automatica*, 30: (9) 1497-1500.
- Stepanenko, Y., Cao, Y., and Su, C.Y. (1998) Variable Structure Control of Robotic Manipulator with PID Sliding Surfaces, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 8: 79-90.
- Tan K.C., and Li Y. (2001) Performance-Based Control System Design Automation via Evolutionary Computing, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14: (4) 473-486.
- Takahashi, R.H.C., Peres, P.L.D., and Barbosa, L.L.S. (1999) A Sliding Mode Controlled Sinusoidal Voltage Source with Ellipsoidal Switching Surface, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*, 46: (6) 714-721.
- Temeltaş H. (1998) "A fuzzy adaptation technique for sliding mode controllers", *Proc. of IEEE*, s. 110-115
- Tokat S. (2003) Koordinat dönüşümüne dayalı zamanla değişen kayma yüzeyi tasarım yöntemleri, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 163s.
- Tunyasrirut S., Suksri T., Numsomran A., Gulpanich S., and Tirasesth K. (2006) The Auto-Tuning PID Controller for Interacting Water Level Process, *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 12: 134-138.
- Utkin, V.I. (1977) Variable Structure Systems with Sliding Modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22: 212-222.
- Utkin, V.I. (1978) Sliding Modes and Their Application in Variable Structure Systems, *MIR Publishers*, Moskow, 257 s.
- Utkin, V.I. (1983) Variable Structure Systems, *Automatica*, 9: 5-25.
- Utkin, V.I. (1992) Sliding Modes in Control and Optimization, *Springer-Verlag*, Berlin, 286 s.
- Utkin, V.I. (1993) Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40: (1) 23-36.
- Yoo, D.S., and Chung, M.J. (1992) A Variable Structure Control with Simple Adaptation Laws for Upper Bounds on the Norms of the Uncertainties, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37: (6) 860-864.

- Young, D.K., and Özgüner, Ü. (1993) Frequency Shaping Compensator Design for Sliding Mode, *International Journal of Control*, 57: (5) 1005-1019.
- Young, D.K. (1978) Controller Design for A Manipulator Using Theory of Variable Structure Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 8: 210-218.
- Young, D.K. (1999) A tale of Two Discontinuities Variable Structure Systems, Sliding Mode and Nonlinear Control, Lectures Notes in Control and Information Science 247, (Young D.K., and Özgüner Ü. Eds.), *Springer-Verlag*, London, s351-361.
- Young, D.K., Utkin, V.I., and Özgüner, Ü. (1999) A Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control, *IEEE Transactions on Control System Technology*, 7: (3) 328-342.
- Wai, R.J. (2000) Adaptive Sliding Mode Control for Induction Servomotor Drive, *IEEE Proceedings of the Electric. Power Appl.*, 147: (6) 553-562.
- WEB_1 (2007) Kontrol Sistemleri, www.mekatronikkulubu.org/dosya/kontrol_sistemleri (27.12.2007).
- WEB_2 (2008) www.fultek.com.tr/index_dosyalar/uygulamalar.htm
- Zak, S.H., and Hui, S. (1993) On Variable Structure Output Feedback Controllers for Uncertain Dynamic Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 38: (10) 1509-1512.
- Zinober, A.S.I., (1994) Variable Structure and Lyapunov Control, *Springer-Verlag*, London, 401s.