



T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SARKAÇ TAŞIYAN ELASTİK KOLUN BULANIK MANTIK TABANLI TİTREŞİM KONTROLÜ

Mustafa TINKIR

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim-2010
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SARKAÇ TAŞIYAN ELASTİK KOLUN BULANIK MANTIK TABANLI TİTREŞİM KONTROLÜ

Mustafa TINKIR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mete KALYONCU

2010, 104 Sayfa

Jüri
Prof.Dr. Şahin YILDIRIM
Prof.Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Prof.Dr. Ziya ŞAKA
Doç.Dr. Ramazan AKKAYA
Yrd. Doç. Dr. Mete KALYONCU

Yatay düzlemde dönen, uç noktasında basit sarkaç asılı olan elastik kol, bazı robot manipülatörler ve dönel vinç gibi sistemlerin modellenmesinde kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, yatay düzlemde dönen, uç noktasına basit sarkaç asılı olan elastik kolun konum ve uç noktası titreşim kontrolü ile asılı sarkacın salınım kontrolü yapılmıştır. Çalışma kapsamında, ele alınan sisteme ait deney düzeneği oluşturulmuştur. Sistemin dinamik modeli Lagrange hareket denklemi ve MATLAB®/Simulink® yazılımı ile Solidworks® programında oluşturulan katı model kullanılarak elde edilmiştir. Elastik kol konum ve titreşim kontrolü ile sarkaç salınım kontrolü için PID, hiyerarşik yapay sinir ağı tabanlı adaptif bulanık mantık ve yapay sinir ağı tabanlı adaptif aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcüler geliştirilmiştir. Geliştirilen kontrolcülerin her birinin kullanılması durumu için sayısal simülasyonlar ve deneysel ölçümler yapılarak elastik kol konum açısı, uç deplasmanı ve sarkaç salınım açıları elde edilmiştir. Sayısal simülasyon ve deneysel çalışmalar, kontrol uygulanmayan sistem için de yapılmıştır. Sistemin hareket denklemlerinin çözülmesinde ve değişik türde kontrolcülerin kullanılması durumlarına ait sayısal simülasyonlarda MATLAB®/Simulink® yazılımı kullanılmıştır. Oluşturulan dinamik modelin uygunluğu sayısal simülasyon ve deneysel ölçüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Sayısal simülasyon ve deneysel ölçüm çalışmalarında elde edilen sonuçların ışığında geliştirilen kontrolcülerin performansı mukayese edilerek değerlendirilmiş, geliştirilen kontrolcülerin performansı literatürde bulunan çalışmalara ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elastik kol, sarkaç, titreşim kontrol, salınım kontrol, yapay sinir ağı, bulanık mantık kontrol, PID, hiyerarşik kontrol, adaptif kontrol, aralık tip-2.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

FUZZY LOGIC BASED VIBRATION CONTROL OF ELASTIC ARM CARRYING PENDULUM

Mustafa TINKIR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Asist. Prof. Dr. Mete KALYONCU

2010, 104 Pages

Jury

Prof.Dr. Şahin YILDIRIM
Prof.Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Prof.Dr. Ziya ŞAKA
Assoc. Prof.Dr. Ramazan AKKAYA
Asist. Prof. Dr. Mete KALYONCU

An elastic arm, rotating in the horizontal plane can be used in modelling rotary cranes or some type of robot manipulators. In this study, angular position and tip vibration control of an elastic arm rotating in the horizontal plane, carrying a simple pendulum at the tip end is realized together with swing control of the pendulum. An experimental set up is constructed for considered system. Dynamic model of the system is obtained through the use of Lagrange's equation of motion and solid model which is obtained by using MATLAB®/Simulink® software and Solidworks® program. PID, hierarchical artificial neural network based adaptive fuzzy logic and artificial neural network based adaptive interval type-2 fuzzy logic controllers are developed to be used in angular position and tip vibration control of the elastic arm and swing control of the pendulum. In the case of each of the developed controllers, values of angular position and tip deflection of the elastic arm and swing angle of the pendulum are obtained by numerical simulations and experimental measurements. Numerical simulations and experimental solutions are performed for uncontrolled case as well. Solution of equations of motion are obtained for developed controllers by MATLAB ®/Simulink® software. Validation of the dynamic model is realized by comparing experimental and numerical simulation results. Performance of developed controllers are compared and evaluated by using numerical simulation and experimental measurement results. Obtained results are also compared with the results available in the literature.

Keywords: Elastic arm, pendulum, vibration control, swing control, artificial neural network, fuzzy logic control, PID, hierarchic control, adaptive control, interval type-2.

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca sürekli desteğini gördüğüm hocam Yrd.Doç.Dr. Mete KALYONCU'ya, bu tezin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı arkadaşlarım Arş.Gör. Ümit ÖNEN, Arş. Gör. Volkan ESKİZEYBEK ve Arş.Gör.Yusuf ŞAHİN'e, çalışmalarıma büyük bir özveri ile katlanan eşim Emine TINKIR ve aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Konya, 2010

Mustafa TINKIR

ÖZET

ABSTRACT

ÖNSÖZ

İÇİNDEKİLER

SİMGELER

1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI 7
3.TEORİK ESASLAR 21
3.1 Lagrange Formülasyonu 21
3.2 PID Kontrol ve Yapısı 22
3.3 Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık Kontrol 24
3.3.1 Hiyerarşik Bulanık Mantık Kontrol 28
3.3.1.1 Hızlı Alt Sistem Kararlaştırıcı 29
3.3.1.2 Yavaş Alt Sistem Bulanık Kontrolcü 30
3.3.2 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrol 30
3.3.2.1 Adaptif Yapay Sinir Ağı 31
3.3.2.2 Hibrit Öğrenme Algoritması 33
3.3.2.3 Durulaştırma İşlemi 35
3.3.3 Adaptif Ağ Tabanlı Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolcü 35
4. SARKAÇ TAŞIYAN TEK ELASTİK UZUVLU ROBOT MANİPÜLATÖRÜN DİNAMİK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU 38
4.1 Sistemin Dinamik Modelinin Oluşturulması 38
4.1 Elastik Kolun Kinetik Enerjisi 41
4.2 Elastik Kolun Potansiyel Enerjisi 42
4.3 Sarkacın Kinetik Enerjisi: 42
4.4 Sarkacın Potansiyel Enerjisi: 42
4.2 Katı modelleme programı (SolidWorks) kullanılarak sistemin dinamik modelinin oluşturulması 49
5. KONTROLCÜ TASARIMI 53
5.1. Hiyerarşik Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı 54
5.1.2 Yavaş Alt Sistem Bulanık Mantık Kontrolcü 56

5.1.3 Hızlı Alt Sistem Bulanık Mantık Kontrolcü 58
5.1.4 Durulaştırma İşlemi 60
5.2. Adaptif Ağ Tabanlı Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı 61
5.3. Performans Kriterlerinin Belirlenmesi 63
6. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖZELLİKLERİ 64
7. SAYISAL ÇÖZÜMLER VE SONUÇLARI 69
7.1. Sarkaçsız Sistemin Kontrolsüz ve Kontrollü Sayısal Çözümleri 70
7.2. Sarkaçlı Sistemin Kontrolsüz ve Kontrollü Sayısal Çözümleri 81
7.3. Görüntü İşleme İle Sarkaç Salınımının Bulunması 95
8. SONUÇ VE ÖNERİLER 97
9. KAYNAKLAR 99

SİMGELER

q	; Genelleştirilmiş koordinat
q_i	; Sistemin genelleştirilmiş koordinatı
$\dot{q}_i$	; Genelleştirilmiş koordinatın zamana göre birinci türevi
θ	; Elastik kolun yatay eksen ile yaptığı dönme açısı
η	; Elastik kolun uç noktasının yer değiştirmesi
φ	; Sarkacın Z-ekseni ile yaptığı açı
ϕ	; Sarkacın Y-ekseni ile yaptığı açı
α_L	; Sarkacın X-ekseni ile yaptığı açı
τ_i	; Genelleştirilmiş tork
L	; Lagrange formülasyonu
T	; Kinetik enerji
V	; Potansiyel enerji
i	; Serbestlik derecesi indisi
K_p	; Oransal etki kazanç parametresi
K_i	; İntegral etki kazanç parametresi
K_d	; Türev etki kazanç parametresi
e(t)	; Hata
m(t)	; PID kontrol çıkışı
(s)	; Laplace s-domeni
T_i	; İntegral etki zaman sabiti
T_d	; Türev etki zaman sabiti
P	; Oransal etki
I	; İntegral etki
D	; Türev etki
y(t)	; Bulanık mantık kontrolcünün çıkışı
y^*	; Bulanık mantık kontrolcünün yaklaşık çıkışı
A	; Bulanık küme
$\mu_A(x)$	; Üyelik fonksiyonu
x	; Bulanık küme üye elemanı
Z	; Sıfıra yakın sayıların bulanık kümesi

$\mu_z(x)$	; Sıfıra yakın sayılar kümesinin üyelik fonksiyonu
u_f	; Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcü çıkışı
$\bar{u}$	; Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcü çıkışı
e	; Konum izleme hatası
$\dot{e}$	; Konum izleme hatasının türevi
l	; Yapay sinir ağı katmanı
$O_{i,l}$	; Yapay sinir ağı katmanındaki düğümlerin çıkışı
$\mu_{A_i}(x)$	; Düğüm fonksiyonun A_i üyelik fonksiyonu
$\mu_{B_{i-2}}(y)$	; Düğüm fonksiyonun B_{i-2} üyelik fonksiyonu
w	; Yapay sinir ağının ağırlığı
$\{p_i, q_i, r_i\}$	; Yapay sinir ağının eğitim sürecinde belirlenen parametreleri
f	*;* Yapay sinir ağının çıkışı
X	*;* Yapay sinir ağının girişi
W	*;* Yapay sinir ağının ağırlık matrisi
Q	*;*LQR konrolcünün ağırlık matrisi
R	*;* LQR konrolcünün ağırlık matrisi
t_f	; LQR kontrolcünün performans indeksi için hesaplanan süre
J	*;* LQR kontrol performans indeksi
$x(k)$	*;* Durum değişkeni
$u(k)$	*;* LQR kontrolcü çıkışı
V_s	*;* Çizgisel hız
M_s	*;* Sarkacın kütlesi
J_{kol}	; Elastik kolun atalet momenti
K	*;*Yay sabiti
L	; Elastik çubuğun uzunluğu
h	; Elastik çubuğun boyu
d	; Elastik çubuğun kalınlığı
ρ	; Çubuğun doğrusal yoğunluğu
EI	; Çubuğun rijitliği
l	; Sarkaç ipinin uzunluğu
r	; Sarkaç uç kütlesinin yarı çapı
$U_{\theta hata}$	; Elastik kolun konum hatası

$U_{\eta hata}$; Elastik kolun titreşim hatası

z_i ; Sugeno tip bulanık mantık çıkış sabiti

N ; Bulanık mantık kural sayısı

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji, imalat kalitesi ve verimliliğin artırılması ihtiyacına paralel olarak robot kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu konudaki ilerlemeler endüstriyel reklamlarda ve bilim kurgu filmlerinde bile kendini göstermektedir. Robotlar konusunda önemli uygulamaların olduğu bir gerçektir. Nükleer attıkların yok edilmesi gibi tehlikeli ve insan gücünü aşan işlerde, fabrika otomasyonunda, uyduların geri çekilmesinde robot kullanımı tercih edilmekte veya gerekli olmaktadır. Robot teknolojisi sürekli gelişme gösterdiğinden, robot kontrolü önemli problemlerden biri olmayı sürdürmektedir. Robot sensörlerinde, tahrik elemanlarında ve bilgisayarlarında ne kadar çok ilerleme kaydedilse de, robotun hassas modellemesi ve hedefe uygun kontrolü yapılmadığı takdirde bu gelişmeler fazla anlam taşımaz.Robotlar konusundaki ilk araştırmalar, rijit robotlarla ilgili olup, rijit gövde dinamiği kullanılarak modelleme yapılmıştır. Bu kabul, günümüzde bile endüstriyel robot uygulamaları için hala geçerlidir.

Uzaydaki robot uygulamaları yaygınlaştıkça, robot ağırlığı da önemli bir parametre haline gelmiştir. Robotu uzaya yerleştirmenin maliyeti veya uzay mekiğinde olduğu gibi geri dönen uzay gemisindeki robotu taşımanın maliyeti, özellikle yakıt sarfiyatı yönünden robotların tasarımında önemli bir faktör haline dönüşmüş olan robot ağırlığıyla ilgili hale gelmiştir. Malzeme bilimindeki ilerlemelere rağmen, uzaya taşınacak yeterli hafiflikteki robotlar, doğal olarak elastik olmaktadır. Rijit gövde modelini esas alarak kullanılan kontrolörlerle, bu cihazları çok hassas kontrol etmek imkânsız olup, fazla ağırlıkla çok hızlı hareket ettirmek mümkün değildir.

Elastik robotlara olan ihtiyaç sadece uzaydaki uygulamalara mahsus değildir. Eğer endüstriyel robotlar, çok hızlı hareket ettirilmek isteniliyor ise çok hafif yapılmalı ve gerçeğe daha uygun olan elastik modelleme uygulanmalıdır. Bu şekilde yüksek hızlarda manipülatör uç noktasının konumunun, tam olarak belirlenebilmesi için gerçekçi bir modelleme sağlanmış olur. Bu açıklamaların ışığı altında elastik manipülatörün, rijit manipülatöre göre temel avantajları şu şekilde sıralanabilir :

- Daha küçük tahrik,
- Daha düşük güç sistemi,
- Daha yüksek çalışma hızı,
- Daha düşük maliyet,
- Manipülatör ataleti daha düşük olduğundan daha emniyetli çalışma,
- Daha düşük birleştirme mukavemeti,

- Hantal olmayan tasarım,
- Daha az hareketli kütle,
- Yükün, manipülatör kütlesine oranının daha fazla olması,
- Gerekli kalkış kuvvetinin düşüklüğü,
- Yapılan kabullerin fiziğin gerçeklerine daha yakın olması.

Bunlara karşılık olarak elastik uzuvlu manipülatörlerin en büyük dezavantajı uç efektörün hassasiyetinin kötü olmasıdır. Genellikle bu dezavantaj, rijitlik artırılarak azaltılır. Fakat kütlenin artmasına ve yukarıdaki avantajların yok olmasına sebebiyet verir. Buna alternatif olarak ise meydana gelen titreşimler kontrol edilerek gerekli hassasiyet sağlanabilir. Böyle bir kontrolün sağlanabilmesi için ise, elastik manipülatörün dinamik davranışının iyi belirlenmesi ve kontrolcü tasarımının iyi yapılması gerekmektedir. Bu sebeple son yıllarda elastik elemanlara sahip robot manipülatörlerin dinamik analizi ve kontrolü bir çok araştırmacının ilgisini çekmiştir (Benosman ve ark. 2002, Martins ve ark. 2002, Martins ve ark. 2003, Lin 2003, Wai ve ark. 2003) .

Robot manipülatörlerde elemanların elastikliğinden dolayı hem hareket sırasında hem de hareket sona erdikten sonra titreşimler oluşmaktadır. Bu durum, manipülatörün istenilen hareketi gerçekleştirirken belli miktarda pozisyon hatası yapmasına neden olmaktadır. Elastik elemanlara sahip olan robot manipülatörlerin hareketinin istenilen doğrulukta olmasını sağlamak üzere birçok kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu durum, robot manipülatörün elemanlarının elastikliğinden dolayı ortaya çıkabilecek pozisyon hatalarını azaltmak amacıyla robot manipülatörlerde titreşim kontrolünü önemli bir problem olarak ortaya çıkarmaktadır (Arısoy ve ark. 2005, Zhang ve ark. 2005, Feliu ve ark. 2005, Tian ve ark. 2005, Jnifener ve ark. 2005).Bu tip bir robot sistemin doğrusal olmayan bir hareket sergilemesi ve hareketindeki belirsizlikten dolayı klasik tabanlı kontrol teknikleri ile bu tip bir sistemi kontrol etmekte zayıf kalmaktadırlar (Surdhar ve ark. 2003, Kamalasadan ve ark. 2004).

Elastik uzuvlu robotların dinamiği konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalarda, kolun pozisyon ve uç noktanın titreşim hareketi incelenmiştir. Kolun dönme hareketi yatay ve düşey eksende olmak üzere incelenmiş, titreşim ve pozisyon kontrolü için farklı kontrolcü tasarımları yapılmıştır. Kaynak araştırması kısmında daha da geniş anlatılacağı gibi bugüne kadar yapılan çalışmalar elastik kolun düzlemsel hareketi ve kontrolü üzerine gerçekleştirilmiştir. Rijit ve elastik uzuva sahip robotların kullanım amaçları gün geçtikçe değişmiş ve birçok araştırmacı tarafından farklı alanlarda kullanılmıştır. Endüstri

faaliyetlerinde kullanılan vinçler yük taşıyan robotlar olarak düşünülmüş ve bu alanda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda robot kolu vinç sistemi olarak kabul edilmiş ve vincin taşıdığı yükü istenilen konuma yüksek hassasiyetle getirmesi amaçlanmıştır. Rijit ve elastik uzuvlu robotlar tek eksende yük taşıyabilen vinçler olarak kullanılmıştır. Vincin taşıdığı yük, robot kolunun ucuna asılmış çok elastik ip veya kablo ile bağlanmış sarkaç sistemleri olarak kabul edilmiştir. Bu tür sistemlerin konum, titreşim ve yük salınımlarının modellenmesi ve kontrolü robot sistemlerinin modellenmesi ve kontrolü ile özdeşleşmektedir. Bu tür sistemlerin kontrolü günümüzde birçok alanda kullanılan vinçlerin istenilen doğrulukta hareket ettirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca vinç hareketi ile taşıdığı yükte meydana gelen salınımların azaltılması hem yükün zarar görmemesi hem de vincin çalışma ortamının güvenli olması bakımından oldukça önemli bir problemdir. Bu konu ile ilgili kullanılan düşey ve yatay yönde hareket edebilen rijit veya elastik uzuvlu robot kollarının güvenli bir şekilde yük taşımaları gerekmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda yük taşıyan robot kollarının dinamiği, modellenmesi ve kontrolü amaçlanmıştır. Yapılan çalışmaların bir kısmı teorik ve simülasyon çalışmasından ibaret olup geri kalan çalışmalar ise deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada; yatay düzlemde hareket eden tek elastik uzuvlu bir robot manipülatörün uç noktasına sarkaç şeklinde yük asılmış ve belirlenen hedef doğrultusunda robotun ve sarkacın konum, uç deplasman ve salınım kontrolü yapılmıştır. Çalışma hem teorik hem de deneysel olarak yapılmış, sistemin dinamik modeli iki farklı yöntem kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin kontrollü ve kontrolsüz davranışını görmek amacıyla Lagrange formülasyonu kullanılmış ve hareket denklemleri bu yöntemle elde edilmiştir. Sistemin modellenmesinde ise üç boyutlu katı modelleme programı (SolidWorks) kullanılmış ve bu metot ile sistemin simülasyonları yapılmıştır. Her iki yöntem ile sistemin teorik olarak modellenmesi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Her iki modelleme metodu ile simülasyon çalışmalarında yüksek hız ve hassasiyette kontrol yapmak mümkün olmuştur. Ayrıca bu metotlardan elde edilen sistemin dinamik modeli deneysel uygulamalarda kontrol sistemi tasarımı için kullanılmıştır. Ele alınan problemde elastik kolun istenen konuma getirilmesi, kolun hareketi boyunca kola asılı olan yükün (sarkacın) salınımının minimuma indirgenmesi ve kolda meydana gelen titreşimlerin yok edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla PID kontrol, hiyerarşik yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrol ve daha önce yapılan benzer çalışmalarda hiç kullanılmamış olan yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrol simülasyonları ve deneysel uygulamaları yapılmış ve bu kontrolcülerin sistem üzerindeki performansları ***performans kriterleri*** doğrultusunda karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın literatürde yapılan benzer çalışmalara göre farklılığı ve özgün yönleri aşağıda verilmiştir:

1. Daha önce yapılan çalışmalarda elastik uzuvlu robot kolu sistemi yatay düzlemde yük taşıyan elastik uzuvlu bir vinç sistemi olarak düşünülmemiştir. Literatür araştırmasına göre bu çalışmaya benzer bir çalışma Çiçek ve Ertaş tarafından 2002 yılında yapılmıştır. Fakat bu çalışmada elastik uzuvlu uzun bir çubuğun ucuna sarkaç bağlanmış ve sarkacın hareket esnasında kolda meydana gelen titreşimleri sönümlemesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada sarkaç sistemi taşınan bir yük olarak değil titreşim sönümleyici olarak kullanılmış ve her hangi bir kontrolcü tasarımı yapılmamıştır. Bu tezde yapılan çalışmanın asıl amacı taşınan sarkacın salınımlarını minimuma indirgemek, kolda meydana gelen titreşimleri sönümlemek ve kolun istenilen konuma getirilmesini sağlamaktır. Bunun için kontrolcü tasarımları yapılmış, hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda kontrolcülerin performansları karşılaştırılıp istenilen sonuçlar elde edilmiştir.

2. Üç boyutlu katı modelleme programı kullanılarak bu türde bir sistemin modellenmesi ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiş ve modellemenin doğruluğu Lagrange formülasyonundan elde edilen teorik sonuçlarla ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp ispatlanmıştır (Tınkır ve ark. 2010).

3. Literatür araştırmasına göre yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 (interval type-2) bulanık mantık kontrol tekniği daha önceki çalışmalarda hiç kullanılmamıştır.

Bu çalışmanın sonunda ulaşılması beklenen hedefler;

- Elastik kolun istenilen konuma getirilmesi,
- Kol referans konuma ulaştığı zaman koldaki titreşimlerin sönümlenmesi,
- Kol hareket ederken sarkaç salınımlarının minimuma indirgenmesi ve kol durduktan sonra salınımların sönümlenmesi,

olarak söylenebilir. Ayrıca Tablo 1.1'de literatürdeki çalışmalar ile bu tezde yapılan çalışmaların karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1.1 Literatür çalışmalarının karşılaştırılması.

Araştırmacılar	Çalışma Amacı	Kontrol Yöntemi
Ertaş ve ark. (2000)	Doğrusal olmayan ucuna sarkaç bağlanmış elastik bir çubuğun titreşim analizi.	Sarkaç sistemi ile titreşim sönümleme.
Çiçek ve ark. (2002)	Uç kısmına sarkaç bağlanmış uzun elastik bir çubuk sisteminin modellenmesi.	Sarkaç sistemi ile titreşim sönümleme.
Maczynski ve ark. (2003)	Teleskopik mobil bir vinç sisteminin modellenmesi ve kontrolü	PID kontrol.
Masoud ve ark. (2003)	Konteynır taşıyan bir vincin konum ve yük kontrolü.	Gecikmeli geri beslemeli kontrol.
Li ve ark. (2005)	Hidrolik tahrikli elastik bir kolun modellenmesi ve kontrolü	Geri yayılım, kayan kipli ve kutup yerleştirme teknikleri ile kontrol.
Moustafa ve ark. (2005)	Elastik kablolu vincin sonlu elemanlar metodu kullanarak modellemesi.	PD kontrol
El-Raheb (2007)	Bir çubuğa elastik kablo ile bağlanmış sarkaç sisteminin modellenmesi	Kontrolsüz.
Chang ve Chiang (2008)	Köprülü tipi bir vincin konum ve vincin taşıdığı yükün salınım kontrolü.	Bulanık mantık kontrol.
Chwa (2009)	Değişken yüklerde bir köprülü vincin doğrusal olmayan yörünge kontrolü.	PD kontrol.
Tınkır (2010)	Sarkaç taşıyan elastik bir kolun titreşim kontrolü.	PID, hiyerarşik yapay sinir ağı tabanlı adaptif bulanık mantık ve yapay sinir ağı tabanlı adaptif aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü.

Çalışma safhaları ;

1. Çalışmanın amacı ve önemi,
2. Problemin tanımlanması,
3. Simülasyon çalışmaları,
    i. Sistemin matematiksel modelinin Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmesi,
    ii. Matematiksel modelin MATLAB/SIMULINK programında oluşturulması,
    iii. Simülasyon modeli üzerinde kontrolcü tasarımı yapılması,
    iv. Kontrol cevaplarının simülasyon modeli üzerinde irdelenmesi,

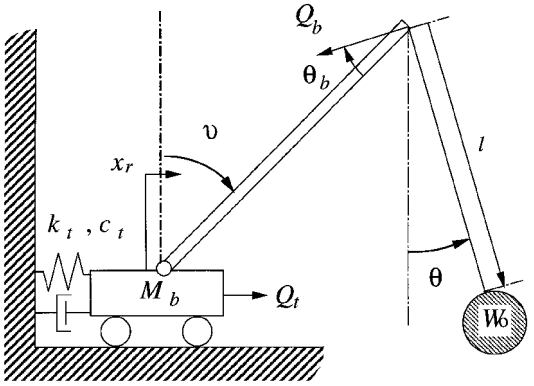
v. SolidWorks programı kullanılarak sistemin üç boyutlu katı modellenin elde edilmesi,
vi. Üç boyutlu modelin MATLAB/SimMechanics programı kullanılarak simule edilmesi,
vii. Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları ile üç boyutlu katı modelleme programı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ve irdelenmesi,
viii. Kontrolcü tasarımlarının yapılması ve simülasyon modellerine uygulanması, sonuçların karşılaştırılması,

4. Deneysel çalışmaların yapılması,
   i. Deney düzeneğinin kurulması,
   ii. Kontrolcü tasarımlarının deney düzeneğine uygulanması,
   iii. Elde edilen sonuçların simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması ve irdelenmesi.

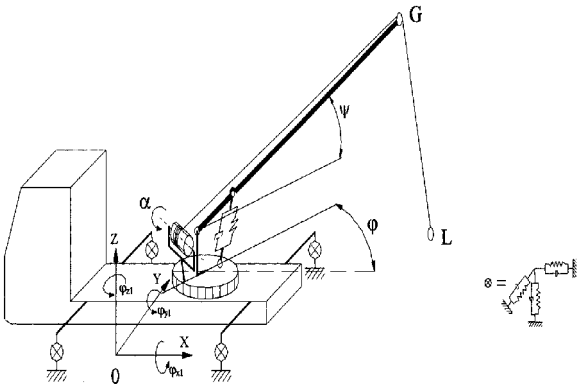
şeklinde sıralanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mühendisliğin çeşitli uygulama alanlarında elastik uzuvlu robotların kontrolü dikkati çeken önemli bir problemdir. Elastik elemanların avantajları doğrultusunda birçok alanda rijit elemanlar yerine elastik çubuklar kullanılmaktadır. Bu kullanım alanlarından biride elastik elamana sahip yük taşıyabilen vinçlerdir. Literatürde bu konuyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda rijit ve elastik uzuvdan oluşan vinçlerin konum, titreşim ve salınım kontrolü ele alınmıştır. Birçok araştırmacı vinci bir çubuğun uç kısmına bağlanan sarkaç sistemi olarak tanımlamış ve elastik çubuk istenilen konuma getirilirken sarkaç da meydana gelen salınımları sönümlemeye çalışmışlardır. Gerçek vinç sistemine yakın bir model kurmaya çalışan araştırmacıların amacı vinci istenilen konuma getirirken taşıdığı yükün salınımlardan etkilenmemesi ve çalışılan ortamın güvenli olmasıdır. Sarkaç sistemi olarak tanımlanan yükün salınımlarını azaltmak için farklı türde kontrol algoritması geliştirmişlerdir.



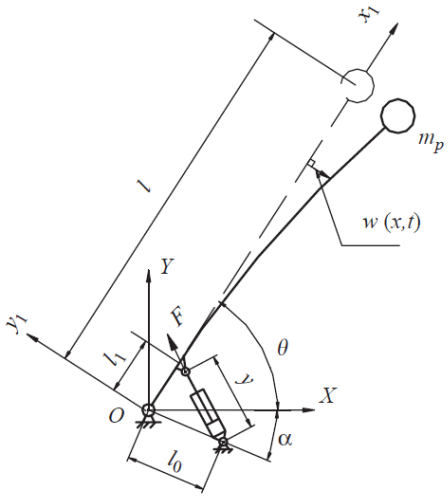
Şekil 1.1 (Kiyoshi ve ark. 2003)



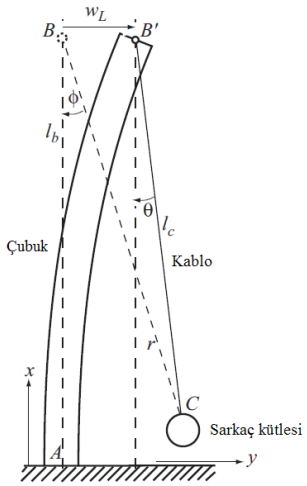
Şekil 1.2 (Maczynski ve ark.2003)

Literatürde bu konuyla ilgili yapılmış çalışmaları üç gruba ayırmak mümkündür. İlk grup araştırmacılar Şekil 1.1, Şekil 1.2, Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'de görüldüğü gibi (Kiyoshi ve ark. 2003, Maczynski ve ark. 2003, Li ve ark. 2005, El-Raheb 2007, Ertaş ve ark. 2000) kolu istenilen konuma getirmek ve hareket esnasında kolda meydana gelen titreşimleri ve sarkacın salınımlarını yok etmeyi amaçlamışlardır. Bu araştırmacılar kolun düşey konumda hareket ettiğini yani vinç yukarı doğru hareket ettirildiğinde taşıdığı yükün salınım kontrolünü incelemişlerdir. Bu konuda yapılan çalışmaların birçoğu nümerik simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. Vinç sisteminin matematiksel modelini elde ederken Euler-Bernoulli ve Lagrange formülasyonları kullanmışlardır. Vincin tahrik elemanı olarak elektrik motoru ve hidrolik silindir kullanmışlar ve bu eyleyicilerin dinamiğini de sistemlerinin modellenmesinde

kullanmışlardır. Çalışmalarda farklı tip kontrolcü tasarımları (Genetik algoritma tabanlı bulanık mantık kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü, yapay sinir ağı tabanlı kontrolcü, PID kontrolcü…vb) yapılmış ve bu sonuçları kontrollü ve kontrolsüz sistem cevabı üzerinde karşılaştırmışlardır. Bu çalışmalarda rijit ve elastik uzuvdan meydana gelen vinç sistemleri kullanılmıştır. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de görülen sistemlerin rijit uzuvdan meydana gelmesi kolun konum ve titreşim kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Şekil 1.3, Şekil 1.4 ve Şekil 1.5'de yapılan çalışmalarda sistemin elastik uzuvdan oluşması kontrol işlemini zorlaştırmaktadır.



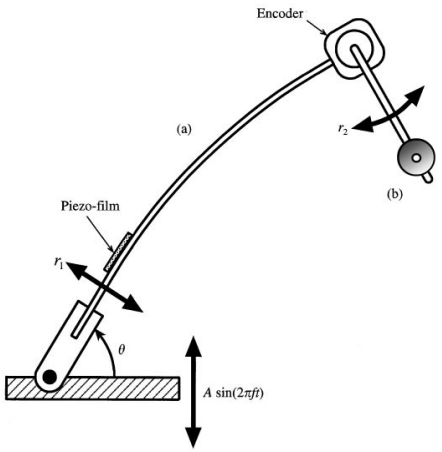
Şekil 1.3 (Li ve ark. 2005)



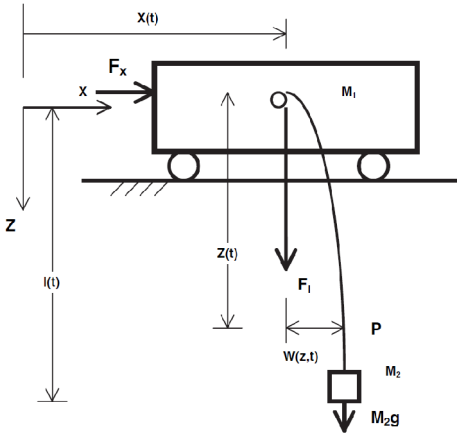
Şekil 1.4 (El-Raheb 2007)

İkinci grup araştırmacılar Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de görüldüğü gibi (Moustafa ve ark. 2005, Masoud ve ark. 2003), kayar köprülü vinç gibi çalışan sistemleri incelemişlerdir. Şekil 1.6'da görülen sistemde hareket eden bir arabaya elastik kablo ile bağlanmış yükün salınım ve titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Birinci grup araştırmacılar gibi sistemlerinin hareket denklemlerinin elde edilmesinde Euler-Bernoulli ve Lagrange formülasyonlarından yararlanmışlardır. Ayrıca bazı araştırmacılar sistemlerinin analizinde sonlu elemanlar metodunu kullanışlardır. Titreşim ve salınım kontrolüne ilave olarak hareket eden arabanın yer değiştirme kontrolünü de araştırmışlar, nümerik hesaplar ve simülasyonlarla çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir.

Üçüncü grup araştırmacılar Şekil 1.8'de görüldüğü gibi (Çiçek ve ark. 2002) elastik çubuğun yatay düzlemdeki hareketinde meydana gelen titreşimleri yok etmek amacıyla sarkaç tipi pasif sönümleyiciler kullanmışlardır. Yapılan çalışmaların bir kısmı deneysel olarak gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmalardaki amaç çubukta meydana gelen titreşimleri çubuk istenilen konuma getirilirken sarkacın yapmış olduğu salınım hareketinden faydalanılarak bu titreşimleri sönümlemektir.

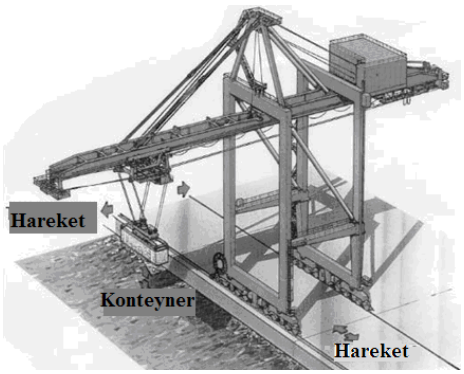


Şekil 1.5 (Ertaş ve ark. 2000)

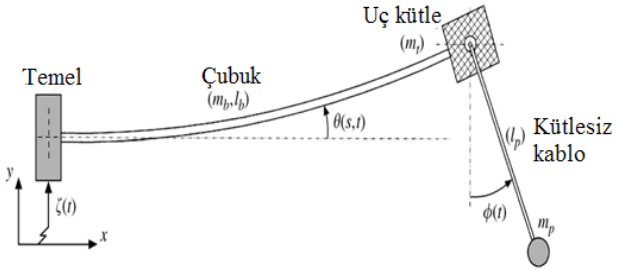


Şekil 1.6 (Moustafa ve ark.2005)

Bu konuda çalışan araştırmacılar her hangi bir kontrolcü tasarımı yapmayıp sarkacın çubuk hareketine 90^0 açıda hareket ettirilmesini sağlamışlardır. Ele aldıkları sistemin hareket denklemini çubuğun ankastre kiriş kabulü ile elde etmiş ve pasif sönümleyici için sönümleme bölgesini, iç frekans ve kütle oranını bulmuşlardır. Elastik bir çubuğu rezonans haline yakın bir etki altında çalıştırıp çubuğun farklı giriş sinyallerine karşı cevabını sarkaç sönümleyici ile düzeltmişlerdir.



Şekil 1.7 (Masoud ve ark. 2003)



Şekil 1.8 (Çiçek ve ark. 2002)

Aledhaibi (2000), doktora çalışmasında kalman filtreleme yöntemine göre bir robot manipülatörün adaptif kayan mod bulanık mantık kontrolünü gerçekleştirmiştir. Çalışmasında bir robot manipülatörün değişken parametrelere(farklı giriş sinyali, bozucu giriş etkisi, vb…) karşı kontrol edilmesi için adaptif hareket kontrol şemasını yapmıştır. Bu şema, Kalman filtreleme yöntemi ile kayan mod bulanık mantık kontrolün birleştirilmesi ile tasarlanmıştır.

Arısoy, Gökaşan ve Bogasyan (2005), çalışmalarında robotik yapılarda sabit ve hareketli hedeflerin izlemesi için kısmi geri besleme lineerleştirmeye dayanan bir kontrol yaklaşımı geliştirmişlerdir. Çalışmada yüksek hız ve yüksek hassasiyet gibi üstünlüklerinden

dolayı elastik uzuvlu bir robot kolu göz önüne alınmıştır. PD tabanlı kısmi geri besleme lineerleştirme konumlama ve izleme kontrolü için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları ile amaçlanan metodun etkinliği gösterilmiştir.

Bazzi (2004), yüksek lisans tezinde elastik uzuvlu robot manipülatörlerin kontrolü için bilgi tabanlı bulanık mantık ve bulanık-kayar mod kontrolcü tasarımını incelemiş ve her iki kontrolcünün sistem üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. İlk olarak sistemin matematiksel modelini elde etmiş ve daha sonra uygun kontrolcü tasarımı yapmıştır.

Benosman, Boyer, Vey ve Primault (2002), yapmış oldukları çalışmada daha önce yapılan çalışmalardan esinlenerek elastik uzuvlu manipülatörlerin modellenmesi ve kontrolünü incelemişler ve bu tür sistemlerle artan problemleri araştırmışlardır.Yapılan çalışmaları birbirleri ile karşılaştırmışlardır.

Chalhoub, Kfoury ve Bazzi (2006), tek uzuvlu bir robotik manipülatörün elastik ve rijit hareketlerini kontrol etmek amacı ile doğrusal olmayan bir gözlemci ile iki dayanıklı doğrusal kontrolcü tasarımında bulunmuşlardır. Kontrolcü ve gözlemci çubuğun ilk elastik modu için basit bir kol modeline dayanarak tasarlanmıştır. Kontrolcüler klasik bir kayar mod kontrolcü ve bir bulanık kayar mod kontrolcüden meydana gelmektedir. Dayanıklı gözlemci ise kayar mod metodolojisine dayanmaktadır.

Chang ve Chiang (2008), köprülü vincin konum ve vincin taşıdığı yükün salınım kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Sistemin kontrolünde bulanık mantık kontrolcü kullanmışlardır. Vincin matematiksel modelini ihmal ederek çalışmalarını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Vinci istenilen konuma hızlı bir şekilde getirmişler ve taşıdığı yükün salınımlarını uygulamış oldukları kontrol tekniği ile sönümlemeye çalışmışlardır.

Chwa (2009), değişken yüklerde bir köprülü vincin doğrusal olmayan yörünge kontrolü üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında vincin taşıdığı yükü sarkaç sistemi olarak düşünmüştür. Vincin konum ve sarkacın salınım kontrolü için PD kontrol tekniği kullanmıştır. Çalışmasını teorik olarak gerçekleştirmiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Chebolu (2004), birçok araştırmacının doğrusal olmayan hareketlere sahip olduğu için ilgi odağı olan döner ters sarkaç sisteminin denge kontrolü için MATLAB bilgisayar yazılım programı kullanarak bulanık mantık kontrolünü gerçekleştirmiştir. Sistemin bulanık mantık uygulaması ile elde edilen simülasyon sonuçları değerlendirmiş ve yorumlamıştır.

Chiou ve Huang (2005), beş serbestlik dereceli bir robotu kontrol etmek için model referans adaptif bulanık kayar mod kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Sistem kararlılığı için

Lyapunov kararlılık analizini kullanmışlar ve deneysel sonuçlarla bu tarz bir kontrolcünün beş serbestlik dereceli robot kontrolünde oldukça etkili olduğunu göstermişlerdir.

Çiçek ve Ertaş (2002), yapmış oldukları çalışmada uç kısmına sarkaç bağlanmış uzun elastik bir çubuk sisteminin hareketini ve dinamik davranışını incelemişlerdir. Çubuğa farklı giriş sinyalleri uygulayarak hem çubuğun hem de sarkacın hareketini deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Sarkaç hareketinin çubukta meydana gelen titreşimleri sönümlediği sonucuna ulaşmışlardır.

Çuvalcı (2000), çalışmasında elastik yapılar için pasif doğrusal olmayan titreşim kontrolcülerin etkinliğini hem teorik hem de deneysel olarak incelemiştir. Elastik bir çubuğu rezonans haline yakın bir etki altında çalıştırıp çubuğun cevabını sarkaç sönümleyici ile düzeltmiştir. Sistemin hareket denklemi çubuğun ankastre kiriş kabulü ile elde etmiş ve pasif sönümleyici için sönümleme bölgesini, iç frekans ve kütle oranını bulmuştur. Teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırıp yorumlamıştır.

Diaconescu (2000), elastik sistemlerin dinamiği ve kontrolü ile ilgili doktora tezi yapmıştır. Çalışmasında, elastik bir sistem olarak parametrik olarak uyarılmış döner bir çubuğun hareketini ele almıştır. Sistemi kontrol etmek için doğrusallaştırılmış ters bir modele dayanan kayar mod stratejisi kullanılmıştır. Kayar mod kontrolcü elastik titreşimleri yok etmiş fakat rijit cisim hareketinde bir etki meydana getirmiştir.Üç mod yaklaşımıyla ayrık doğrusal olmayan model kurulmuş ve bulanık mantık stratejisiyle bir kontrol sistemi tasarlanmıştır.

El-Raheb (2007), çalışmasında bir çubuğa elastik kablo ile bağlanmış sarkacın hareketini incelemiştir. Ele aldığı sistem, çubuğa etki eden kuvvetin oluşturduğu periyodik salınımları içermektedir. Düşey konumda bulunan çubuğu hareket ettirerek çubuğa bağlı olan sarkacın salınımları, çubuğun eğilme titreşimlerini ve sistemin mod şekillerini elde etmiştir.

Ertaş, Çuvalcı ve Ekwaro-Osire (2000), doğrusal olmayan elastik bir çubuğun titreşimlerini sönümlemek amacı ile sarkaç sönümleyici kullanmışlardır. Düşey konumda yerleştirilmiş tek serbestlik dereceli çubuğa sinüzoidal giriş uygulayıp ucuna takılmış olan sarkacın hareketi ile çubuğun titreşimlerini azaltmaya çalışmışladır. Çalışmalarının sonunda pasif titreşim sönümleyicilerin bu tür sistemler üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Feliu, Munoz, Roncero ve Lopez (2005), bu çalışmada tek elastik uzuvlu manipülatörlerin etkin kontrolü için yeni bir metot incelenmiştir. Bu tür kolların dinamik modelleri kütlelerinin uzuv boyunca yayılmasından dolayı karmaşıktır. Bu tür kollar için basit bir kontrolcü hedeflenmiştir ve tekrarlanan kontrol olarak adlandırılan yeni kontrol tekniğine

dayanmaktadır. Bu amaçla birkaç küçük kütle uzvun birkaç noktasına yerleştirilmiştir ve daha sonra tekrarlı kontrol uygulanmıştır.

Gomes, Rosa ve Albertini (2006), çalışmada titreşim yaratan sürtünmeleri yapay sinir ağları kullanarak çözümü amaçlanmıştır ve deneysel sonuçlardan oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Dişli eyleyicili doğrusal olmayan motor kullanılan elastik yapılar için aktif kontrol yasası kabul edilmiş çözümlerin dışında deneysel olarak kanıtlanan bir problemdir. Bundan dolayı tork içinde meydana gelen ölü bir bölge eyleyici de doğrusal olmayan sürtünmelere sebep olur.Kontrol yasası ile hesaplanmasına rağmen torkların bu titreşimleri azaltması gerekmektedir.

Ho ve Tu (2006), elastik uzuvlu bir manipülatörün uç pozisyon kontrolü için H_∞ oransal-integral-türev(PID) kontrol sentezi uygulamasını yapmışlardır. İlk olarak PID kontrol kapalı çevrim performansı incelenmiş fakat sonsuz boyutlu ve nonminimum faz sistemi olan elastik manipülatör sisteminin kontrolü için sisteme H_∞ optimal kontrol ilavesi yapılmıştır. Deneysel sonuçlarla H_∞ PID kontrolün sistem üzerindeki etkinliği gösterilmiştir.

Jenifener ve Andrews (2005), bulanık mantık ve yapay sinir ağı tabanlı aktif titreşim kontrolü tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Kontrolcü, iki serbestlik dereceli bir platform üzerinde bulunan tek elastik uzuvlu bir manipülatörün uç pozisyon titreşim kontrolünü yapmak için kullanılmıştır. Çalışmada bulanık mantık kurallarının ve yapay sinir ağı modelinin kurulması için açı değişimi ve uç pozisyon salınımı arasında ilişki dikkate alınmıştır. Bulanık mantık kontrolcünün uç pozisyon titreşimlerini yok ettiği deneysel sonuçlarla ortaya çıkmıştır.

Kamalasadan ve Ghandakly (2007), çalışmalarında yeni bir yaklaşım olan zeki denetleyici çevrim mantığını adı altında sinir ağı tabanlı bir zeki adaptif kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Kontrol şeması bir model referans adaptif kontrolcü ile paralel şekilde bağlanmış çevrim içi radyal temel fonksiyon bir sinir ağından oluşmaktadır. Bu radyal temel fonksiyon sinir ağı model referans adaptif kontrolcünün performansını artırmaktadır. Ayrıca bu sinir ağı kendi kendini adapte edebilmektedir. Tasarlamış oldukları bu kontrolcüyü doğrusal olmayan tek elastik uzuvlu robot manipülatörün yörünge kontrolünde kullanmışlar ve oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Kamalasadan, Ghandakly ve Al-Olimat (2004), tek elastik uzuvlu robotik manipülatörün konum kontrolü için bulanık mantık tabanlı çoklu referans model adaptif kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Bulanık mantık yaklaşımı model referans adaptif kontrol içinde çoklu referans modeller üretmek için kullanılmıştır. Bu tür bir yaklaşım dinamik referans model ve bulanık çoklu referans model adaptif kontrolcüyü meydana getiren bir yapı

oluşturmak için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda bu tür bir yaklaşımla çok etkili sonuçlar elde edilmiştir.

Kamimoto, Kawabe Ve Yoshida (2005), seri bağlanmış iki elastik sarkacın titreşim, denge ve salınım kontrolünü H_∞ kontrolcü kullanarak yapmışlardır. Sistemin kontrolünde ikinci sarkaçtan geri beslenen titreşim sinyallerini baz almışlardır. Sonuç olarak iki elastik çubuktan oluşan sistemin en düşük doğal frekansının sistemin denge konumuna ulaşmasında çok önemli olduğu kanısına varmışladır.

Kar, Seto ve Doi (2000), bir elastik yapının titreşimlerini sönümlemek amacı ile dayanıklı (robust) kontrol kullanmışlar ve çalışmalarını deneysel olarak incelemişlerdir. Geri besleme kontrolcüyü H_∞ tabanlı dayanıklı kontrol metodu kullanarak tasarlamışlardır. Çalışmalarında bir vinç ile bağlanmış elastik bir köprü kulenin titreşimlerini incelemişler ve statik durum geri beslemeli bir kontrolcü kullanarak sistemin ilk beş titreşim modunu kontrol etmişlerdir. Kontrolcü cevaplarını hem simülasyon hem de deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Karandikar ve Bandyopadhyay (2000), elastik uzuvlu bir robot manipülatörün kayar mod kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Manipülatörü kontrol etmek için son mafsal açısı civarında hem doğrusal hem de doğrusal olmayan model kullanmışlardır. Doğrusal olmayan model ile yörünge takibini, doğrusal model kullanarak da titreşimlerin sönümlenmesini amaçlamışlardır. Her iki model içinde kayar mod değişken yapılı kontrol uygulamışlardır.

Kovanen ve Heikki (2001), çalışmalarında hidrolik tahrikli elastik bir manipülatörün adaptif açık çevrim kontrolünü incelemişlerdir. Kullandıkları kontrol metodunun benzer sistemlerin kontrolünde kullanılan klasik açık çevrim kontrol tekniklerinden daha iyi olduğu kanısına varmışlardır. Oransal yön denetim valfi ile kontrol edilen bir vincin açık çevrim kontrolü için adaptif kontrol fonksiyonu oluşturmuşlardır. Manipülatörün dinamiğini, sistemin doğal frekansını bularak elde etmişlerdir. En düşük doğal frekans değerini adaptif algoritmayı seçmekte ve ayarlamakta kullanmışlardır. Test simülasyonları ile tasarlamış oldukları kontrolcüyü değerlendirmişler ve buna göre kontrolcünün manipülatördeki titreşimleri büyük oranda düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Li ve Khajepour (2004), hidrolik tahrikli elastik bir kolun hem elastik hem de rijit yapı titreşimlerini tasarlamış oldukları dayanıklı kontrolcü tekniği ile sönümlemeye çalışmışlardır. Belirsizlikler içeren doğrusal olmayan bu yapının kontrolünde geri yayılım, kayan kipli ve kutup yerleştirme tekniklerini kullanmışlardır. Kayan kipli kontrol tekniğini asimtotik mafsal açısını ve kolun ucuna yerleştiren yükün meydana getirdiği titreşimleri yok etmek amacı ile kullanmışlardır. Geri yayılım tekniğini ise hidrolik silindiri hareket ettiren yön denetim

valfinin sürgüsünü kontrolü etmek için kullanmışlardır. İstenilen konumda iyi bir dinamik davranış elde etmek için kayan düzlemin kutuplarını değiştirme yöntemini seçmişlerdir. Sonuç olarak kayan kipli kontrolcünün sistem cevabı üzerinde oldukça etkili olduğunu ve gürültüsüz bir hidrolik hareket sağladığını ortaya koymuşlardır.

Lin (2003), çalışmasında elastik yapıya sahip robotik manipülatörün uç kısmını sabit rijit objeler ile temas ettirmek için çoklu zaman ölçekli bulanık mantık kontrolcü tasarımı yapmıştır.Büyük ölçekli sistem tekil düzensizlik yaklaşımı ile sonlu sayıda indirgenmiş alt sisteme ayrılır. Hiyerarşik sıralanmış bulanık kurallar çıkarım motorunun büyüklüğünü azaltmak için kullanılır.Bulanık kontrolcülerin gerçek zamanlı uygulanması fazla sayıda kural yükünü hafifletmek için kullanılabilir. Belirli yüzey sınırları içinde son işlemcinin hareket ederken robot uç noktasının konum ve kuvvet kontrolü bu yaklaşımla iyi bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Maczynski ve Wojciech (2003), çalışmalarında teleskopik mobil bir vincin üç boyutlu modelini oluşturmuşlardır. Modelleme yaparken; modelin esnekliğini, sönümü ve serbestlik derecesi sayısını dikkate almışlardır. Vincin üst kısmının çevrilmesi için tahrik fonksiyonunun optimizasyon algoritmasını yapmışlardır. Optimizasyonun amacı çalışma alanı içinde yükün istenilen yere getirilmesi ve salınımların minimuma indirgenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla dijital PID kontrolcülü geri beslemeli kontrol sistemi kullanılmıştır.

Mallon, Wouw, Putra ve Nijmeijer (2006), çalışmalarında kontrollü tek uzuvlu bir robotun indirgenmiş gözlemci kullanarak sürtünme dengelenmesini incelemişlerdir. Sürtünmenin dengelenmesi için indirgenmiş bir gözlemci kullanarak hız tahmini yapmışlardır. Gerçek sürtünme modelini elde etmek için kontrolcü kurallarını ve gözlemci parametrelerini incelemişlerdir. Çalışmalarını hem teorik hem de deneysel olarak gerçekleştirmişler ve bu sonuçları karşılaştırmışlardır.

Martins, Botto ve Costa (2002), robot manipülatörlerde elastik uzuvların modellemesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Tek elastik uzuvlu bir düzlemsel manipülatörün matematiksel modelini elde etmişlerdir. Çalışmaların da genel doğrusallaştırmalar ve dinamik sınırlamalar yaparak güvenilir bir model elde etmişlerdir. Bu model üzerinde sistemin çözümünü gerçekleştirmişlerdir.

Martins, Mohamed,Tokhi, Costa ve Botto (2003), çalışmalarında elastik manipülatör sistemlerinin dinamik modellenmesinde farklı mekanik yapıları ve hareket ettirme mekanizmalarını incelemişlerdir. Sistemlerin dinamik modellerini kabul edilmiş modlar yöntemine göre elde etmişlerdir. Santrifüj kuvvetlerin etkilerini araştırmak için yavaş ve hızlı yörüngeler uygulanmıştır. Sistemin simülasyon ve deneysel sonuçlarının zaman ve frekans

grafikleri elde edilmiştir ve modelleme yaklaşım performanslarını değerlendirmek üzere sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Masoud ve Nayfeh (2003), çalışmalarında gerçek konteyner vincinin modellenmesini ve kontrolünü yapmışlardır. Sistemin kontrolünde gecikmeli geri beslemerli kontrolcü kullanmışlardır. Nümerik simülasyonları konteyner vincinin doğrusal olmayan modeli üzerinde gerçekleştirmişler ve elde ettikleri sonuçları yorumlamışlardır.

Masoud, Ali H. Nayfeh ve Nader A. Nayfeh (2005), yapmış oldukları çalışmada konteyner vincinin kaldırma mekanizmasının basit bir sarkaç modeli, elastik yada rijit kablo ile bağlanmış ağırlık taşıyan vinç modellerinden oldukça farklı olduğunu ortaya koymuşlardır. Çalışmalarında gerçek bir limanda çalışan konteyner vincinin modellemesini yapmışlar ve vinç yükünde meydana gelen salınımları minimuma indirgemek amacı ile gecikmeli geri beslemeli bir kontrolcü tasarımını gerçekleştirmişlerdir. 65 tonluk bir konteyner vincinin 1/10 ölçekli bilgisayar modelini oluşturmuşlar ve simülasyonlarını bu model doğrultusunda yapmışlardır.

Moustafa, Ismail, Gad ve El-Moneer (2005), çalışmalarında değişken uzunlukta elastik kablolu vincin sonlu elemanlar metodu kullanarak modellemesini ve kontrolünü incelemişlerdir. Doğrusal olmayan sistemi ayrıklaştırmak için değişken yapılı sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Sistemin konum kontrolü için oransal ve türev etkiye sahip PD kontrolcü tasarımı yapmışlar ve sonuçları nümerik simülasyonlar ile göstermişlerdir

Moustafa, Ismail, Gad ve El-Moneer (2006), elastik kablolu yükün aşağı sarkıtıldığı vinçlerin kontrol problemini incelemişlerdir. Çalışmalarının amacını, vinci istenilen konuma getirmek ve yükte meydana gelen salınım hareketlerini sönümlemek olarak tanımlamışlardır. Amaçladıkları kontrol stratejileri uzman bilgisine dayanan üç adet bulanık mantık kontrolcüden meydana gelmektedir. Nümerik simülasyonlarla bulanık mantık kontrolcülerin performanslarını göstermişlerdir.

Nguyen ve Morris (2007), iki elastik uzuvlu ve iki elastik mafsallı robot manipülatörün yörünge ve titreşim kontrolünü bir bulanık mantık kontrolcü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bulanık mantık kontrolcünün üyelik fonksiyonlarının genetik algoritma yardımıyla optimize etmişlerdir. Uzman bilgisine dayanan bulanık mantık kontrolcü ile genetik algoritma kullanılarak tasarlanan bulanık mantık kontrolcü sonuçlarını karşılaştırıp irdelemişlerdir.

Novel ve Coron (2000), elastik kablolu kayar üst vincin dengelenmesi konusunda çalışmışlardır. Doğrusal sınır geri besleme metodu kullanarak vincin konumunu ve asılı olan

yükün salınım açısını kontrol etmişler ve bu metodun ispatını simülasyon çalışmaları ile yapmışlardır.

Payo, Ramos, Cortazar ve Feliu (2005), çalışmalarında büyük salınımlara maruz kalan tek elastik uzuvlu manipülatörlerin birkaç yeni doğrusal olmayan modellerini incelemişler ve çok elastik yapılı tek uzuv için doğrusal olmayan dinamik modellerin deneysel geçerliliğini ele almışlardır. Bu modeller tüm ağırlığı uç konumda olan çok elastik kol kabulü ile geliştirilmişlerdir. Tipik doğrusal ve yeni bir doğrusal olmayan model olmak üzere iki model ele alınmış ve her iki modelinde geçerliliği deneysel olarak gösterilmiştir.

Piazzi ve Visioli (2001), çalışmalarında tek elastik uzvun optimal dinamik ters çevirme yoluyla uç pozisyon kontrolünü yapmışlardır. Bu yeni metot analitik olarak çıkış fonksiyonlarına uygulanan tam kararlı dinamik ters çevirme işlemine dayanmaktadır. Geçiş polinomlarının, hareket zamanını optimize etmeye olanak sağlayan çıkış fonksiyonu olarak seçilmesi motor hızının ve ivmesinin sınırlandırılması demektir. Bu teknik oldukça dayanıklı olup sistem kontrolünde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir.

Purwar, Kara ve Jha (2005), eyleyici kısıtları içinde hız ölçümü yapmaksızın bir robot manipülatörün yörünge takibi için kararlı bulanık bir adaptif kontrolcü tasarımını yapmış oldukları çalışmada incelemişlerdir. Kontrolcü sadece yapısal dinamik bilgisine ve uzuv pozisyonlarının ölçümlerine dayanmaktadır. Çalışmada, adaptif kontrolcü hız ölçümlerini yok etmek için filtreleme tekniğini kullanmakta ve bulanık mantık sisteminin kullanılmasında ki amaç ise yerçekimi torkunu tahmin etmekten ibarettir.

Sano, Ohishi, Kaneko, ve Mine (2010), konteynır taşıyan vincin salınım kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında meydana gelen salınımların sönümlenmesi için sensör gecikmelerini düzeltici gözlemci tasarımı yapmışlardır. Gözlemci tasarımlarının etkinliğini sayısal ve deneysel çözümler ile doğrulamışlardır.

Sawodny, Hildebrandt ve Schneider (2003), elastik uzuvlu bir robot manipülatörü düşeyde hareket eden bir vinç gibi düşenerek vincin taşımış olduğu yükün denge kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yörünge kontrol modülü, adaptif durum geri besleme çevrim tabanlı adaptif ileri besleme kontrolcüden oluşmaktadır. Sistem parametrelerini oluşturan yükün bağlı olduğu ipin uzunluğu, yükün atalet momenti ve kütlesi vinç operasyonlarında sürekli değiştiği için kullandıkları kontrolcü bu değişiklere karşı tamamen adapte olabilmektedir. Çalışmalarını deneysel olarak gerçekleştirmişler ve oldukça ilginç sonuçlar elde etmişlerdir.

Singhose, Kim ve Kenison (2008), köprü bir vince asılı yükü çift sarkaç sistemi gibi düşünerek ve bu sistemin şekil girişli kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Kontrolcünün farklı

çalışma frekanslarına karşı cevabının oldukça iyi olduğunu göstermişlerdir. Deneysel çalışmalar ile şekil girişli kontrol metodunun etkinliğini kanıtlamışlardır.

Sun, Zhang, Tang ve Zhang (2004), robot uç titreşimleri konum duyarlı dedektörler ile ölçülen elastik uzuvlu manipülatörün yörünge kontrolü için yapay sinir ağı + bulanık PD kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Tekil düzensizlik metoduna ve iki zaman ölçekli ayrışmaya göre elastik uzuvlu robot modeli, eşdeğer rijit uzvun yavaş bir alt sistemi ve elastik modun hızlı bir alt sistemi olmak üzere ikiye bölünmüştür. Konum duyarlı algılayıcı ile kullanılan bulanık PD kontrolcü robot kontrol işlemi boyunca meydana gelen titreşimleri sönümlerken bir yapay sinir ağı tabanlı adaptif kontrolcü de yavaş dinamiklerin açı konum kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılmıştır.

Surdhar ve White (2003), optik uç deplasman geri beslemeli bulanık mantık kontrollü yüksek derecede doğrusal olmayan tek elastik uzuvlu iki eksenli bir manipülatörün araştırmasını yapmışlarıdır. Kontrolcü PD kontrolcü türev terimi değiştiren ve kontrolcü girişleri olarak hata ve hatanın değişimini kullanan paralel bulanık bir denetleyici kullanmaktadır. Deneysel simülasyon sonuçları ile çalışmanın etkinliği ve kontrolcü performansı gösterilmiştir.

Takagi ve Nishimura (2003), kule tipi elastik bir yapıya monte edilmiş bir vincin kontrolünü ve modellenmesini yapmışlardır. Çalışmalarında kule tipi vince bağlı olan yükün salınım ve vincin titreşim kontrolünü amaçlamışlardır. Kontrol tekniği olarak vincin aşağı yukarı ve dönme hareketini kontrol eden merkezleştirilmiş kontrol sistemi kullanmışlardır. Bu kontrol sistemini merkezi olmayan kontrol sistemi ile karşılaştırmışlar ve elde ettikleri sonuçları değerlendirmişlerdir.

Tian ve Collins (2005), yapmış oldukları çalışmanın amacı değişken yüklerde elastik bir manipülatörün kontrolü için adaptif yapay-bulanık bir kontrol sistemi tasarımı yapmaktır. Kontrol sisteminde bulanık mantık kontrolcü geri beslemede, iki dinamik yinelenen yapay sinir ağı kontrolcü ise ileri besleme hattında kullanılmıştır.Dinamik yinelenen tanımlama sinir ağı manipülatör sisteminin çıkışının belirlenmesinde, dinamik yinelenen öğrenen sinir ağı bulanık mantık ağırlık faktörlerinin öğrenilmesinde kullanılmıştır.

Tian, Wang ve Mao (2004), elastik uzuvlu robot manipülatörlerin sınırlı hareketi esnasında kuvvet ve konum kontrolünü yinelenen yapay sinir ağı yaklaşımı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ilk olarak elastik uzvun titreşimleri için dinamik denklemler ve kısıtlı kuvvet elde edilmiştir. Yinelenen yapay sinir ağı kullanarak geliştirilen kontrol şeması manipülatör dinamiklerine uyum sağlayabilmektedir.Konum ve kuvvet yörünge takibi

simülasyon sonuçlarının oldukça iyi olması tasarlanan kontrolcü performansının etkili olduğunu göstermektedir.

Wai ve Lee (2004), bu çalışmada kalıcı mıknatıslı senkron bir servo motor tahriki ile hareket eden doğrusal olmayan bir elastik robot kolu için zeki optimal kontrol tasarımı ve özellikleri ele alınmıştır. İlk olarak uç kütleye sahip elastik uzuvlu bir robot kolunun dinamik modeli elde edilmiştir. Uç kütlenin rijit olmasından dolayı eğilme titreşiminin yanında burulma titreşimide göz önüne alınmıştır. Daha sonra periyodik hareket için motor mekanizma sistemini kontrol etmek için zeki optimal bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Zeki optimal kontrol sisteminde, optimal kontrol yasasında doğrusal olmayan bir fonksiyonu öğrenmek için bir bulanık yapay sinir ağı kontrolcü kullanılmıştır.

Wai, Duan, Wang ve Liu (2003), kalıcı mıknatıs senkron servo motor ile tahrik edilen doğrusal olmayan elastik bir robot kolunun zeki optimal kontrol tasarımını incelemişlerdir. Periyodik harekette motor mekanizmasını kontrol etmek için zeki optimal kontrol sistemi çalışmalarının amacı olmuştur. Çalışmada, optimal kontrol yasasında doğrusal olmayan bir fonksiyonun öğrenilmesi için bulanık yapay sinir ağı kontrolcü kullanılmıştır.

Wang ve Chen (2006), çalışmalarında tek elastik uzuvlu manipülatörün çıkış takip kontrolünü incelmişlerdir. Nonminimum faz sistemlerinin çıkış takip kontrolü için yeni bir tasarım işlemi uygulamışlardır.Bu yeni kontrolcü ters çevirme yaklaşımı ile gerçek zamanda verilen referans bir profilin kararlı takibini gerçekleştirmektedir.Daha sonra çalışmada H_∞ optimal kontrolcü kapalı çevrim sistemini stabilize etmek için kullanılmıştır.

Xu ve Cao (1999), çalışmalarında tek elastik uzuvlu manipülatörün doğrudan uç noktasının ayarlanması ve kontrol edilmesini ele almışlardır. Bu çalışmada mafsal açısının kontrolünün ve elastik uzuvda meydana gelen titreşimlerin yok edilmesinin doğrudan yapılması çalışmayı daha önce yapılan elastik manipülatörlerin uç dengeleme problemlerini dolaylı yoldan çözen çalışmalardan farklı kılmaktadır. Uç transfer fonksiyonun kararsız sıfırlarının ve ilk birkaç baskın elastik modunun olması, hiç sonlu sıfırı olmayan fakat tüm negatif gerçek kutuplara sahip aynı derecede bir referans model seçilmesini gerektirmiştir. Sistemin belirlenen referans modeli izlemesi için anahtarlama yüzeyi referans model tarafından türetilmiş bir değişken yapılı kontrolcü tasarlanmıştır.

Yaman ve Sen (2004), çalışmalarında düşey konumda hareket eden tek serbestlik dereceli elastik bir çubuğun sarkaç tipi titreşim sönümleyici kullanarak salınım kontrolünü yapmışlardır. Çalışmalarının esas amacını, farklı oryantasyonlarda bu tür bir sisteme eklenmiş sarkaç tipi sönümleyicinin etkinliği göstermek olarak tanımlamışlardır. Nümerik

simülasyonlarla elde ettikleri sonuçları literatürde deneysel olarak yapılan benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırıp yorumlamışlardır.

Yaman, Sen ve Çuvalcı (2002), ankastre kiriş kabulü ile ele aldıkları elastik bir çubuğun titreşimlerini sarkaç sönümleyici kullanarak sönümlemeye çalışmışlardır. Rezonans haline yakın bir durumda çubuğa sinüzoidal giriş uygulayıp pasif sönümleyici ile çubuğun titreşimlerini kontrol etmeye çalışmışlar ve sonlu elemanlar metodu kullanarak çözümleme yapmışlardır. Sonuç olarak sarkacın düşük doğal frekans değerlerinde elastik yapılarda pasif titreşim sönümleyici olarak kullanılabileceğini elde etmişlerdir.

Yang, Feng ve Ren (2004), sınırlı geri beslemeli doğrusal olmayan sistemler için dayanıklı adaptif yörünge kontrol problemi üzerine çalışmışlardır. Sistem belirsizlikleri tanımlamak için Takagi-Sugeno tipi bulanık mantık sistemleri kullanmışlardır. Çalışmalarında dayanıklı adaptif bulanık mantık ve kayan kipli bulanık mantık kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Kontrolcüleri dört ayrı doğrusal olmayan sistem üzerinde uygulamışlardır. Bu sistemler motor dinamiği eklenmiş sarkaç sistemi, tek rijit uzuvlu robot kolu, eyleyicili bir gemi makarasının dengelenmesi ve tek elastik uzuvlu robot kolu olarak belirlenmiştir. Çalışmalarını teorik olarak gerçekleştirmişler ve oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Yang, Krishnan ve Ang (2000), tek elastik uzuvlu robotların uç yörünge izleme kontrolünü çıkış tekrar tanımlama ile yapmışlardır. Çalışmada robotun uç kısmının istenilen yörüngeyi izlemesi problemi ele alınmıştır.Bu tür bir görev için mafsal tork girişinden uç pozisyon çıkışına transfer fonksiyonu nonmimimum fazda olduğu için çıkışın tekrar tanımlanması tekniği kullanılmıştır.Bu teknik yeni çıkış ile sistemin transfer fonksiyonun minimum fazda olmasını sağlamakta ve yörünge takibi için kontrolcü tasarımını kolaylaştırmaktadır.

Zhang, Jiang, Chen ve Zhao (2006), yapmış oldukları çalışmada doğrusal olmayan bir sistem için bulanık zaman değişken kayar mod kontrolcü tasarımı yapmışlardır. Uygun bulanık mantık kontrol zaman değişken kayar yüzeye uygulandığında kontrol herhangi bir başlangıç durumundan sisteminin durumu daima kayar yüzey üzerindedir. Sonuç olarak sistemin dış bozuculara ve parametre belirsizlerine karşın dayanıklı olduğu ortaya çıkmıştır. Tasarlanan kontrolcü etkinliğini göstermek amacı ile ikinci dereceden lineer belirsiz bir sisteme uygulanmıştır.

Zhang, Wenwei, Nair ve Chellaboina(2005), yapmış oldukları çalışmada iki elastik uzuvlu manipülatör için kısmi diferansiyel denklem modeli(PDE) ele alınmış ve kararlı kontrol tasarımlarının uygulanması için bu denklemler uygun bir forma dönüştürülmüştür. Bu

sonsuz boyutlu doğrusal olmayan iki elastik uzuvlu sistemin kararlı kontrolü Lyapunov tabanlı metot ile gerçekleştirilmiştir.

3.TEORİK ESASLAR

Elastik uzuva ait hareket denklemleri elde edilirken, uzuv için Euler-Bernoulli çubuğu kabülü yapılmış, fiziksel özelliklerinin çubuk boyunca üniform olduğu ve yer çekiminin dikkate alındığı Lagrange formülasyonu kullanılmıştır. Çubuğun tek eksende eğilme titreşimlerine maruz kaldığı düşünülmüştür. Çubuğa bağlı olan sarkacın hareket denklemleri de Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmiş ve elastik kol ve sarkacın kinetik ve potansiyel enerji terimleri birleştirilerek tüm sisteme ait hareket denklemleri bulunmuştur. Simülasyon çalışmaları, elastik kolun konum, titreşim ve sarkacın salınımı göz önüne alınarak yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında MATLAB ve SIMULINK yazılım programı kullanılmış, sistemin kontrolü için tasarlanan bulanık mantık kontrolcü ise MATLAB/Fuzzy Logic Toolbox'ı kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca simülasyon çalışmalarında, deneysel düzeneğin üç boyutlu tasarım yapabilen SolidWorks programında modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model MATLAB/SimMechanics programında kullanılmış, kolun ve sarkacın hareketleri gözlenmiştir. Deneysel çalışmalar öncesi yapılan simülasyon çalışmaları irdelenmiş ve deneysel uygulamalara ışık tutmuştur. Simülasyon çalışmalarında kullanılan kontrolcü türlerinin hepsi deneysel çalışmalarda da uygulanmış ve bu kontrolcülerin basamak ve sinüs giriş cevapları grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur. Kullanılan metotların güvenilirliği ve doğruluğu için,elde edilen sayısal sonuçlar diğer araştırmacıların elde ettikleri sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatörün matematiksel modeli oluşturulurken genelleştirilmiş koordinat olarak kolun dönme, elastik sapma ve sarkacın salınım açılarını ifade eden $q=[\theta,\eta,\varphi,\phi,\alpha]$ seçilmiştir. q değişkeni için farklı referans değerler seçilmiş ve sistemin kontrolü için bu referans değerler esas alınmıştır.

3.1 Lagrange Formülasyonu

Bir dinamik sistemin hareket denklemlerinin bulunması için genel bir yaklaşım olarak Lagrange formülasyonu kullanılır. Lagrangian 'L' ifadesi, sistemin toplam kinetik enerjisi '*T*' ve toplam potansiyel enerjisi '*V*' arasındaki fark olarak tanımlanır.

$$L = T - V \tag{3.1}$$

Sistemin hareket denklemleri;

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

i = 1,2,…. . ,n

Burada; q_i genelleştirilmiş koordinatı, $\dot{q}_i$ genelleştirilmiş koordinatın zamana göre birinci türevi, τ_i uygulanan genelleştirilmiş torku veya kuvveti simgelemektedir. Bu metot teorik olarak sisteminin dinamik davranışı bulmak amacı ile uygulanmaktadır.

3.2 PID Kontrol ve Yapısı

PID kontrol üç temel kontrol etkisinin (oransal, integral ve türev) birleşiminden meydana gelmiştir. PID kontrol organının çıkışı ve kontrol yasası

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{K_p}\int_0^t e(t)dt + \frac{K_d}{K_p}\frac{de}{dt} \tag{3.3}$$

veya

$$m(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_d\frac{de}{dt}\right) \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edilir ve buradan transfer fonksiyonu

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i.s} + T_d.s\right) \tag{3.5}$$

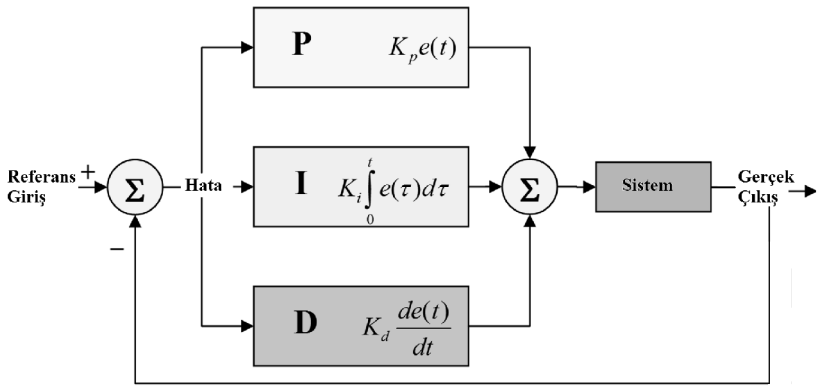
olarak ifade edilir.

PID kontrolcü kullanılması halinde kontrolcüye ait kazanç parametrelerindeki artışın sistem cevabına etkisi Tablo 3.1 ’de özetlenmektedir (Tınkır ve ark. 2010).

Tablo 3.1 PID Kontrol Kazanç Parametrelerinin Değişiminin Sistem Cevabına Etkisi (+ : Artma , - : Azalma , ≈ : Çok Fazla Değişmez)

Kapalı Çevrim Cevabı	Yükselme Zamanı	Maksimum Aşma	Yerleşme Zamanı	Sürekli Rejim Hatası
K_p	-	+	≈	-
K_i	-	+	+	-
K_d	≈	-	-	≈

PID kontrol, Şekil 3.1 de görüldüğü gibi üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini tek bir birim içinde birleştiren bir kontrol etkisidir. İntegral etki sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken türev etkide, yalnızca PI kontrol etkisi kullanılması haline göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını artırır. Buna göre PID kontrol organı sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar.



Şekil 3.1 PID kontrol yapısı.

PID kontrol organı P, PI ve PD kontrollere göre daha karmaşık yapıda olup o oranda pahalıdır. Burada K_p, K_i ve K_d parametrelerinin uygun bir ayarı ile iyi bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu katsayılar uygun bir şekilde belirlenmezse PID kontrolün sağlayacağı üstün özelliklerden yararlanılamaz.

Bir sistem için PID kontrolör tasarımı yapılmak istendiğinde, sistemden arzu edilen cevabın elde edilmesi için

- Sistemin açık çevrim cevabının bulunması ve sistem cevabın iyileştirilmesi için neyin gerektiğinin belirlenmesi
- Yükselme zamanının geliştirilmesi için sisteme orantı kontrol eklenmesi
- Maksimum aşama miktarının azaltılması için sisteme türev kontrol ilave edilmesi
- Kalıcı durum hatasının yok edilmesi için sisteme integral kontrol eklenmesi
- Uygun cevap bulununcaya kadar K_p, K_i ve K_d kazanç değerlerinin ayarlanması

gerekmektedir.

Son olarak da örneğin sistem için en uygun cevap PD kontrol ile sağlanıyorsa, sisteme integral etkinin ilave edilmesine gerek yoktur. Sistemin davranışını en iyi şekilde değiştiren kontrol o sistem için en iyi en ideal kontroldür.

Bir sistemin kontrolünde, kontrolörden iyi bir kontrol elde edebilmek için kontrol organının en uygun biçimde ayarlanması gerekir. Kontrol organının tipine bağlı olarak, orantı kazancı K_p'nin, integral kazancı K_i'nin ve türev kazancı K_d'nin en uygun şekilde ayarını sağlayan yöntemler mevcuttur. Kontrol edilen sistem karakteristiklerinin yaklaşık olarak bilinmesi halinde K_p, K_i ve K_d'nin ayarlanması gerektiği değerleri belirlenebilir. Bu parametrelerin nihai değerlerinin ayarı sistemin kalıcı durum ve dinamik davranışı arasında bir uyuşma sağlayacak şekilde saptanır.

Kontrol organı ayarında genelde analitik ve deneysel olmak üzere iki yol mevcuttur. Kontrol organının tipi, kontrol edilen sistem ve ölçme elemanı dinamik davranışlarının bilinmesi halinde, kontrol organı tipine göre mevcut bulunan K_p, K_i ve K_d parametrelerinin en uygun değeri analitik olarak hesaplanabilir. Bu hesaplamalarda bir takım optimizasyon ölçütleri kullanılır. Hesaplar teknik yönden mümkün olmakla beraber işlemler oldukça karışık ve zordur. Basit hallerde dahi bilgisayar çözümlerine gerek olmakta ve çeşidi sayısal veya analog hesap yöntemleri kullanılmaktadır.

Kontrol organı ayarında analitik yol fazla karmaşık ve uzun olduğundan uygulamalarda daha çok deneysel yöntemler kullanılır.

3.3 Bulanık Mantık ve Bulanık Mantık Kontrol

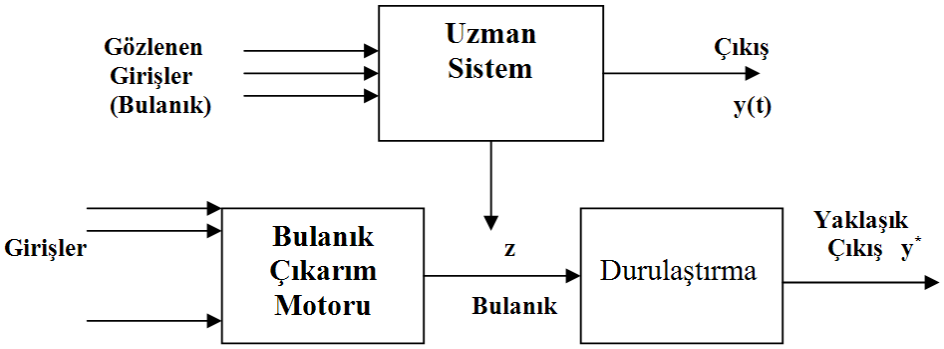
Bulanık küme kavramı ilk olarak 1965 yılında California Üniversitesi öğretim üyelerinden aslen Azerbaycan'lı Prof. Lotfi Zadeh tarafından bir makale ile ortaya atılmış ve hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çeken, araştırmaya açık yeni bir konu olmuştur. Bulanık küme teorisinin ortaya atılmasından sonra Zadeh 1973'te yayınladığı notlarında bulanık küme teorisinin en iyi yaklaşıklıkla insanın karar verme sistemini modelleyebilecek yapıda olduğu fikrini ileri sürmüştür. Geçen zaman içerisinde bulanık kontrolün dayandığı bulanık mantığın, insan düşünme yapısına ve dilsel değişkenlerine klasik mantıktan çok daha yakın olduğu kabul edilmiştir (Wang 1997). Prof. Zadeh tarafından kullanılan bulanık mantık, temelde çok değerli mantık, olasılık kuramı, yapay zeka ve yapay sinir ağları alanları üzerinde oturtulmuş olup olayların oluşum olasılığından çok olabilirliği ile ilgilenen bir kavramı tanımlamaktadır. Olasılık ve bulanık kavramları arasındaki en önemli farklılığın bir deterministik belirsizlik olmasıdır (Kaynak ve ark. 1995).

1965'te bulanık küme kavramı ve 1968'de bulanık algoritmalar, Zadeh ve 1970'te bulanık karar verme yöntemleri, Zadeh ve Bellman tarafından ortaya atılmıştır. 1973'te, Zadeh ''Kompleks Sistemlerin ve Karar Verme İşlemlerinin Analizine Yeni Bir Yaklaşım'' adıyla bulanık kontrolün temelini atan bir makale yayınlamıştır. Zadeh bu makalesinde dilsel değişkenleri ve insan bilgisini formüle etmek için EĞER-İSE kurallarını kullanmayı önermiştir.

1970'lerde gerçek sistemler için bulanık kontrocüler kullanılmıştır. Bulanık mantıkla kontrol, ilk olarak 1975'de Mamdani ve arkadaşları tarafından bir buhar makinesinin bulanık kural tabanlı kontrolü ile başlamıştır. Bu uygulama sonucunda, doğrusal olmayan kontrol problemleri için bulanık kontrolcülerin klasik kontrolcülere göre çok daha kolay geliştirildiği

ve oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. 1978'de ilk kez bir çimento fırınının kontrolü için bir bulanık kontrolcü geliştirilmiştir.

1980'lerde bulanık mantık teorisi çok yavaş gelişmiştir. Bu senelerde bulanık kontrolcüler, matematiksel model eksikliği nedeni ile geleneksel kontrol yöntemlerinin uygulanamadığı sistemlerde uygulanmaya başlanmıştır. Şekil 3.2'de örnek bir bulanık mantık kontrol yapısı verilmiştir. 1980'de Sugeno, Japonların ilk bulanık mantık uygulaması olan Fuji Electric su arıtma tesisinin kontrolünü gerçekleştirmiştir. 1983'de, komutlarla kendi kendine park eden bir araba olan bulanık kontrollü bir robot çalışmasına başlanmıştır. Yine bu arada Hitachi'den Miyamoto, Sendani metrosu için bulanık kontrol sistemi geliştirmeye başlamıştır. 1987'de bu proje bitirilmiş ve başarılı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Sendani metrosunun devreye alınmasından sonra, Temmuz 1987'de Tokyo'da ikinci uluslar arası bulanık sistemler konferansı yapılmıştır. Bu konferansta katılımcılara Sendani metrosu ve ayrıca iki boyutlu masa tenisi oynayabilen bir bulanık robot kolu da tanıtılmıştır (Wang 1997).



Şekil 3.2 Bulanık mantık kontrol yapısı.

Sendai metrosu uygulamasından sonra bulanık kontrol konusundaki çalışmalar yeni bir ivme kazanmış ve endüstriyel uygulama alanları hızla artmıştır. Çalışmaların uluslarası alanda koordinasyonu amacı ile Japonya'da 1989 yılında LIFE (Laboratory for International Fuzzy Enginering) adlı bir laboratuar kurulmuştur. Bu laboratuarda yapılan araştırma çalışmalarına aralarında Hitachi, Toshiba, Omron, Matsushita gibi ünlü Japon firmalarının yanı sıra IBM, NCR ve Thomson gibi Japonya dışı firmalarında aralarında bulunduğu 51 firma katılmıştır. LIFE laboratuarı üç ayrı laboratuardan oluşturuldu. İlk laboratuar, bulanık kontrol konusunda çalışma yapmak amacı ile, ikinci laboratuar bulanık akıllı bilgi işleme ve üçüncü laboratuar ise bulanık bilgisayarlar konusunda araştırma yapmak amacı ile kurulmuştur (Yen ve ark. 1995). Daha sonra Şubat 1992'de San Diego'da ilk olarak bulanık

sistemler üzerine IEEE uluslar arası konferansı yapılmıştır. Bu konferans bulanık mantık teorisinin, en büyük mühendislik organizasyonu IEEE tarafından kabul göstermektedir.

Bulanık sistemler bilgi tabanlı ve kural tabanlı sistemlerdir. Bulanık mantığın temeli EĞER-İSE kurallarından oluşmaktadır.

Literatürde bulanık mantık için iki şekilde açıklama yapılmaktadır (Wang 1997).

1. Gerçek dünya çok net ve açık tanımlamalar yapmak için fazlası ile komplikedir. Bundan dolayı bir yaklaşıklık yapmak zorunluluğu vardır.
2. Gerçek sistemler için önemli bilgiler iki kaynaktan elde edilir. Birinci kaynak; insan tecrübesi, diğer ise sensör ölçümleri ve fiziksel kanunlardan çıkarılan matematiksel modellerdir. Hedef, bu iki bilgi kaynağını kullanarak sistem dizaynını yapmaktır.

Bu kombinasyonu oluşturmak için insan tecrübesini ve bilgisini, matematiksel modele ve sensör ölçümlerine göre nasıl formüle edilebileceğini saptamak anahtar problemdir. Diğer bir deyişle sorun insan bilgisinin ve tecrübesinin nasıl formüle edileceğidir.

Klasik küme teorisinde bir elemanı ele aldığımızda bu elemanı iki farklı kategoride değerlendirmeye alırız (örneğin iyi-kötü, tek-çift, siyah-beyaz gibi). Ancak gerçek hayatta bu iki değerli mantık çoğu uygulamada yeterli değildir. Genellikle bu iki değer arasındaki kesin sınır belirgin değildir.

Eski bir Yunanlı düşünür tarafından ortaya atılan bir problem sorunun varlığını kanıtlamaktadır.

‘’…. . bir tek buğday bir yığın oluşturmaz, iki tane de, üç tane de …Diğer yandan 100 milyon buğdayın bir yığın oluşturacağını herkes kabul eder. Peki kesin sınır nedir? 325647 buğday bir yığın oluşturmazken 325648 bir yığın oluşturabileceğini söyleyebilir miyiz?’’

A kümesi U uzayında bir klasik küme olsun. Bu küme, bütün üye elemanları listeleyerek yada üye elemanların sağlayacağı özelliklerin belirlenmesi ile oluşturulabilir. Liste metodu sadece sonlu kümeler için kullanılır. Kural metodunda ise A şu şekilde ifade edilir.

$$A = \{\ x \in U \mid x \text{ bazı koşulları sağlar}\ \}$$

A kümesini belirlemek için diğer bir metot ise 0-1 üyelik fonksiyonunu gösteren üyelik metodudur. $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu olmak üzere :

$$\mu_A(x) = 1 \text{ eğer } x \in A \tag{3.6}$$

$$\mu_A(x) = 0 \text{ eğer } x \notin A \tag{3.7}$$

Bir bulanık küme, [0,1] arasında değerler alan üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$ tarafından tanımlanır. Bir klasik kümenin üyelik fonksiyonu sadece iki değer yani 0 ile 1 değerlerini

alabilirken, bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonu 0 ile 1 arasında herhangi bir değer alabilmektedir.

Örnek olarak Z sıfıra yakın sayıların kümesi olsun . Z için mümkün olan üyelik fonksiyonu ;

$$\mu_z(x) = e^{-x^2} \tag{3.7}$$

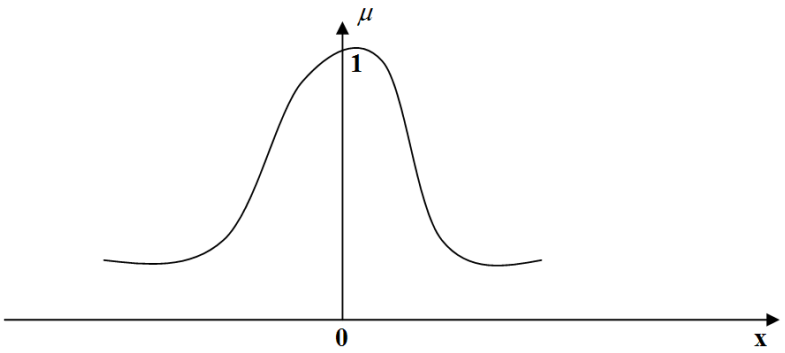
Bu gaussian fonksiyon sıfıra yakınlık üyelik fonksiyonu $\mu_z(0) = e^0 = 1.$ Üyelik fonksiyonunu şu şekilde de tanımlayabiliriz.

$\mu_z(x) =$ 0 , eğer x < -1 (3.8)

$\mu_z(x) =$ x + 1, eğer $-1 \le x < 0$ (3.9)

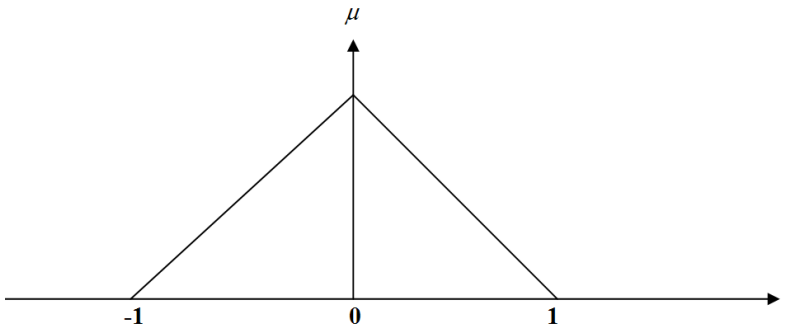
$\mu_z(x) =$ 1 – x , eğer $0 \le x < 1$ (3.10)

$\mu_z(x) =$ 0, eğer $1 \le x$ (3.11)



Şekil 3.3 Sıfıra yakın olan sayılar için gaussian üyelik fonksiyonu.

μ_z üyelik fonksiyonuna göre -1 ve 1 arasındaki sayılar 0 ve 1 arasında üyelik derecesine sahiptir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 ’de sırası ile seçilen üyelik fonksiyonlarının grafiksel ifadesi görülmektedir (Şaka 1999).



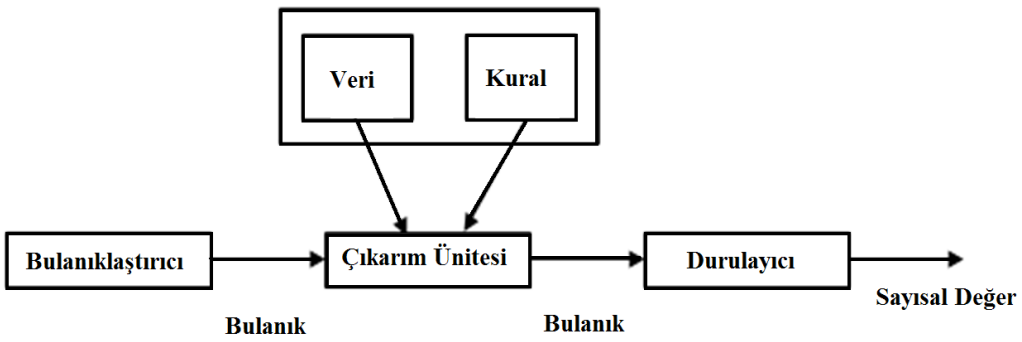
Şekil 3.4 Sıfıra yakın olan sayılar için üçgen üyelik fonksiyonu.

Verilen bu örnekten üç önemli sonuç çıkmaktadır.

1. Örnekte sıfıra yakın olan sayıları tesbit ederken kesin bir tanım yoktur. Bundan dolayı problemi çözerken farklı üyelik fonksiyonları tanımlanabilir. Bununla birlikte üyelik fonksiyonları tek başlarına kesin matematiksel fonksiyonlardır. Bir bulanık problem için üyelik fonksiyonu belirlendiği zaman bulanıklık durumu ortadan kalkar.
2. Bulanık bir problemi çözerken nasıl bir üyelik fonksiyonu tanımlamalıyız? Bunun için iki yöntem söz konusudur. Birinci yöntem; üyelik fonksiyonlarını belirlerken insan tecrübesi ve bilgisinden yararlanmaktır. İkinci yöntem ise; çeşitli sensörler aracılığı ile toplanan bilgilerden yararlanarak üyelik fonksiyonlarını oluşturmaktır.
3. Bir bulanık küme üyelik fonksiyonu ile bire bir ilişkiye sahiptir. Yani bir bulanık küme ile ilgili sadece bir üyelik fonksiyonu olmalıdır.

3.3.1 Hiyerarşik Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık sistem ve kontrol endüstriyel süreç kontrolünde pratik uygulamalar sayesinde büyük ilerlemeler kaydetmiştir. Bulanık sistemler kapalı çevrim kontrolcüler olarak kullanılabilirler. Bu durumda bulanık sistem süreç çıkışlarını ölçerek sürekli olarak kontrol eylemi gerçekleştirmektedir. Bulanık kontrolcü sisteme uygulanan kontrol kuvvetinin bilgi tabanına dayanan çıkarım şeması ile kesin olmayan bir bilginin(bulanık girişler) ölçme şeklini kullanarak çalışmaktadır (Payo ve ark. 2005).



Şekil 3.5 Bulanık sistemin temel yapısı.

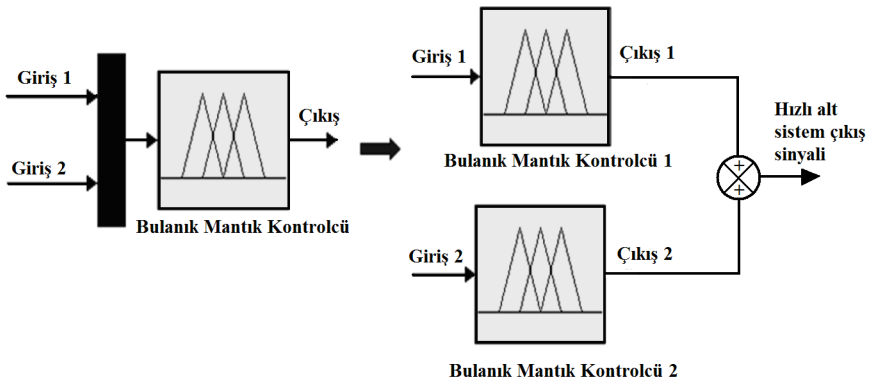
Bu ölçmenin avantajı, bulanık takımların küçük, orta ve büyük vb. dilsel ifadeler ile gösterilmesidir. Bulanık kontrol uzman bilgisine dayanarak bir dilsel kontrol stratejisini bir otomatik kontrol stratejisine dönüştürmektedir. Mantıksal kontrolcü dört ana işlemden meydana gelmektedir : (1) Bulanıklaştırma; (2) bulanık EĞER-İSE kurallarını ve üyelik fonksiyonlarını içeren bilgi tabanı; (3) Bulanık düşünme; (4) Durulaştırma (Wai ve ark. 2004,

Sun ve ark. 2004, Chebolu 2004, Bazzi 2004, Chiou ve ark. 2005, Purwa ve ark. 2005, Payo ve ark. 2005). Bulanık sistemin bulanıklaştırma ve durulaştırma ile temel yapısı Şekil 3.5'de verilmiştir.

Bu bölümde bulanık kontrol sistemi için hiyerarşik kavram incelenmiştir. Hiyerarşik bulanık kontrolün amacı büyük ölçekli bir sistem için çıkarım motorunun büyüklüğünü azaltmaktır. Büyük ölçekli bir sistem için bir bulanık kontrolcü tasarlandığında(örneğin elastik yapılar), sık sık ölçülebilen çıkış ve tahrik giriş değişkenleri dikkate alınmalıdır. n sistem değişkenlerinin sayısını göstermek üzere, her bir değişken l^n' e eşit olan toplam kural sayısını ifade eden sonlu sayıda l dilsel isimler ile ifade edilir. Elastik uzuvlu robot kolu için hiyerarşik düzende tasarlanan bulanık mantık kontrolcü ile büyük ölçekli sistem sonlu sayıda indirgenmiş alt sistemler haline getirilerek büyük boyutlu çıkarım motoruna olan gereksinim ortadan kalkmaktadır (Lin 2003, Kalyoncu ve ark. 2008).

3.3.1.1 Hızlı Alt Sistem Kararlaştırıcı

Elastik uzuvlu robot kolu kontrol şeması hem rijit cisim hareketini kontrol edebilmeli hem de kolda meydana gelen titreşim hareketini sönümlemelidir. Bu çalışmada hızlı alt sistem bulanık kontrolcü kolda meydana gelen tüm titreşimleri yok etmek amacı ile tasarlanmıştır. Standart dinamik programlamalarda olduğu gibi önemli büyüklükte her hangi bir sisteme bulanık kontrol uygulanması olumsuz bir boyutluluk ile sonuçlandığı çok açıktır. Bu yaklaşımla fiziksel imkan ve birleştirmenin yapılabilirliğini veya bulanık kontrolcüye (çıkarım motoruna) beslenmeden önce algılamalı sinyallerin (değişkenlerin) ayrıştırılması araştırılmaktadır (Tian ve ark. 2004). Çıkarım motorunun büyüklüğünün indirgenmesi ile kural tabanının büyüklüğü azaltılabilir. Uygun dinamik modelli sistem için tek elastik mod seçilmiştir. Amaçlanan hiyerarşik bulanık kontrol yapısında, birinci kısım kurallar birinci kısım hiyerarşiyi meydana getirmek için bir araya getirilen birinci elastik mod şekli içindir.

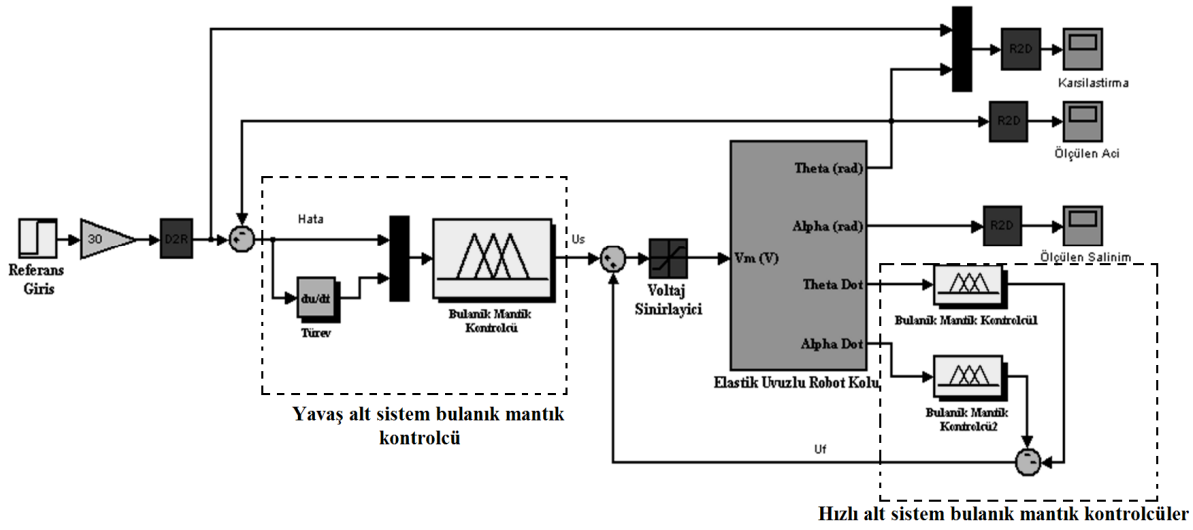


Şekil 3.6 Hızlı alt sistem için bulanık mantık kontrolcü kural tabanının indirgenmesi.

Birinci mod türevi ikinci kısım hiyerarşi girişi olarak seçilir. İki değişkenli ($\dot{\theta},\dot{\alpha}$) ve yedi bulanık dilsel ifadesi olan bir bulanık sistem için kural sayısı $7^2 = 49$ dan $7^1 = 7$ indirilir ve %85,71 azalma elde edilir. Sonuç olarak ne kadar elastik mod ele alınırsa alınsın kural tabanının indirgenmesi farklı şekilde yapılabilir. Bulanık mantık kontrolcünün kural tabanının bu tür bir yaklaşımla azaltılması Şekil 3.6' da verilmiştir.

3.3.1.2 Yavaş Alt Sistem Bulanık Kontrolcü

Yavaş alt sistem bir bulanık kontrolcü konum hatası (e) ve hatanın değişimi ($\dot{e}$) kullanılarak tasarlanır. Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcünün çıkışı ise U_S olarak tanımlanan kontrol sinyalidir. Tek elastik uzuvlu robot kolu için iki zaman ölçekli bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı Şekil 3.7 'de verilmiştir (Kalyoncu ve ark. 2007).

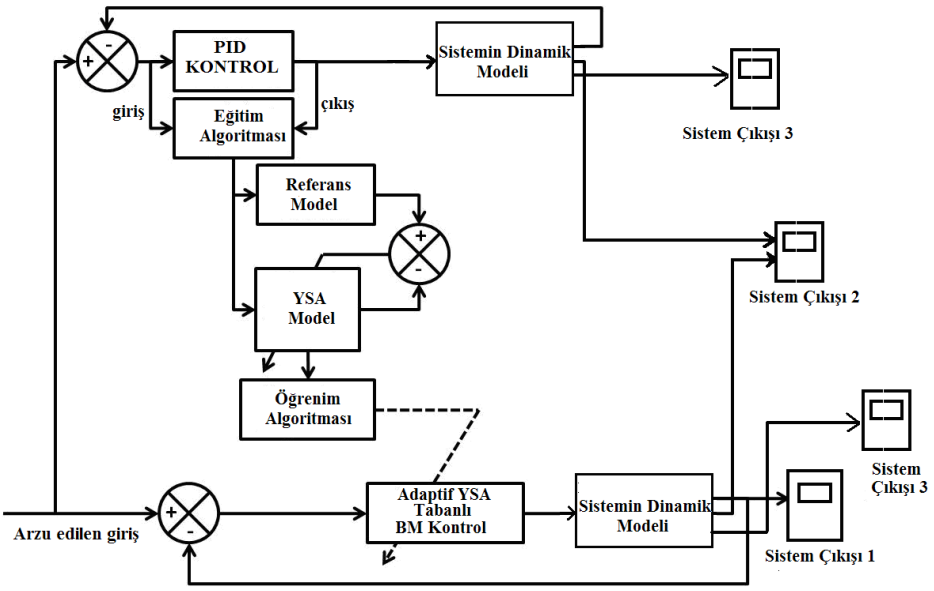


Şekil 3.7 Elastik uzuvlu robot kolunun hiyerarşik bulanık mantık kontrollü blok diyagramı.

3.3.2 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrol

Bulanık mantık kontrolcü tiplerinden biride adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcüdür. Bir bulanık mantık kontrolcü tasarımında, üyelik fonksiyonlarının şekli ve kural tabanının oluşturulması büyük önem taşımaktadır. Bu tür kontrol tekniğinde, kontrolcünün giriş ve çıkış parametreleri yapay sinir ağında eğitilerek bu giriş ve çıkışlara göre bulanık mantık kontrolcünün üyelik fonksiyonları ve kural tabanı oluşturulur. Kontrolcü giriş ve çıkışlarına göre eğitilen üyelik fonksiyonlarının şekli ve sayısı kullanıcı tarafından, üyelik fonksiyonlarının hangi aralıkta nasıl yerleştirileceği ise yapay sinir ağından elde edilen bilgiler ışında yapılır. Kontrolcünün adaptif olarak tanımlanması ise farklı giriş ve çıkış değerlerine kendini ayarlayabilir olmasından gelmektedir. Adaptif yapay sinir ağı tabanlı

bulanık mantık kontrol tekniğinde kontrolcünün çıkışları klasik bulanık mantık kontrolcülerin çıkışları gibi dilsel değişkenler ile ifade edilmez. Kontrolcünün yapısı Sugeno tip bulanık mantık yapısı içerdiği için kontrolcü çıkışları ya sabit yada doğrusal artış gösteren değerlerden meydana gelmektedir. Bunun sebebi ise giriş çıkış ilişkisini en az hata oranında bulmaya çalışan kontrolcünün yapay sinir ağı tabanından gelmektedir. Yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi Sugeno tip bulanık mantık çıkarım sisteminin parametrelerini belirlemek için hibrit öğrenim algoritması kullanır. Bu yöntem yapay sinir ağına verilen eğitim verilerini hesaplamak ve üyelik fonksiyonlarının paremetrelerini bulmak için en küçük kareler metodu ve geri yayılım algoritmasını kullanır. Bu türde kontrolcüler sistemin dinamik davranışı elde ediltikten sonra, sistemin farklı giriş değerlerindeki cevabına göre eğitilir. Bir başka eğitim yolu ise sistem üzerinde performansı istenilen şekilde olmayan farklı kontrol(PID, LQR ve klasik bulanık mantık kontrolcü...vb gibi) tiplerinin giriş ve çıkış verilerini kullanarak yapmaktır. Bu şekilde tasarlanan adaptif yapay sinir ağı tabanlı kontrolcünün uygulama örneği Şekil 3.8'de verilmiştir (Tınkır ve ark. 2010).

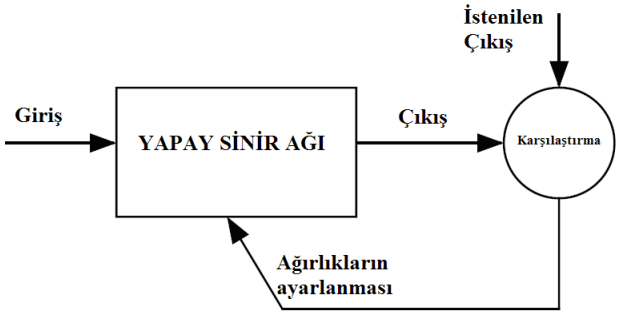


Şekil 3.8 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcü blok diyagramı.

3.3.2.1 Adaptif Yapay Sinir Ağı

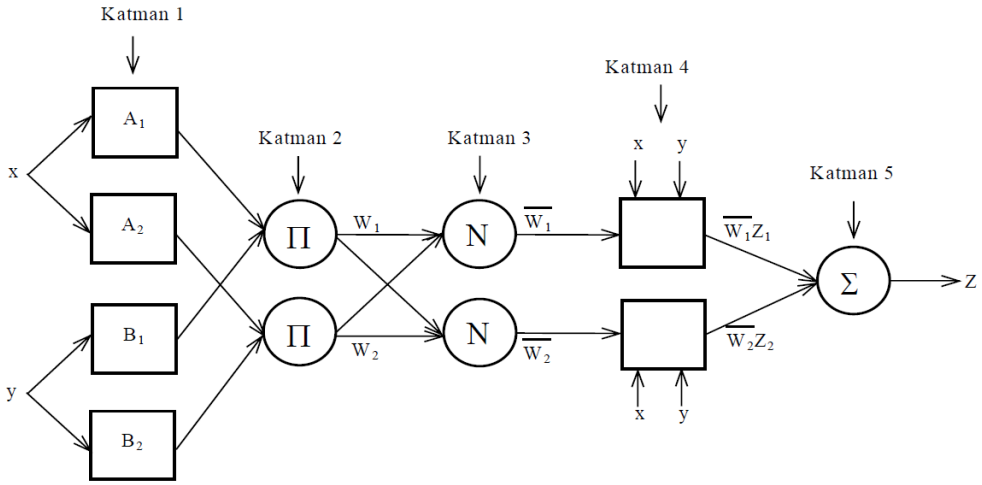
Sinir ağları, biyolojik sinir sistemleri elemanlarının paralel işlevlerinden meydana gelmektedir. Doğadaki gibi, ağın işlevi bu elamanlar arasındaki iletişim ile belirlenir. Belirli bir fonksiyonu gerçekleştirmek için, bu elemanlar arasındaki bağlantı değerlerini (ağırlıklar) ayarlayarak bir sinir ağını eğitmek mümkündür. Genellikle sinir ağları ayarlanabilir yada eğitilebilir böylelikle belirli bir giriş ile istenilen çıkış elde edilebilir. Şekil 3.9'da bir sinir ağının yapısı gösterilmektedir. Burada istenilen çıkış değeri ile ağın çıkış değeri

karşılaştırılarak ağ eğitilir. Bu işlem ağ çıkış değeri ile istenilen çıkış değeri eşitleninceye kadar devam eder.



Şekil 3.9 Yapay sinir ağı yapısı.

Genelde bu türde pek çok giriş / hedef çiftleri bir ağı eğitmek için gerekmektedir. Sinir ağları görüntü tanıma, tanımlama, sınıflandırma, konuşma, görme ve kontrol sistemleri gibi çeşitli alanlarda karmaşık işlevleri gerçekleştirmek amacı ile kullanılmaktadır. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi 5 katmandan oluşur. Her katmandaki düğümlerin çıkışları $O_{i,l}$ ile tanımlanır. Burada l katmanı i ise o katmandaki düğümü ifade etmektedir (Tınkır ve ark. 2010).



Şekil 3.10 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık çıkarım sistemi yapısı.

Katman 1: Üyelik derecelerinin oluşturulması

Birinci katmandaki her bir düğüm aşağıda verilen bir düğüm fonksiyonunu kullanır. Burada $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_{i-2}}(y)$ herhangi bir bulanık üyelik fonksiyonuna uyumlandırılabilir.

$$O_{i,l} = \mu_{A_i}(x), \; i = 1,2 \tag{3.12}$$

yada

$$O_{i,1} = \mu_{B_{i-2}}(y)\,,\ i = 3,4 \tag{3.13}$$

Burada x ve y düğüm girişlerini, A_i ve B_{i-2} bulanık kümenin bu düğümler olan ilişkisini ifade etmektedir.

Katman 2: Bu katmandaki her bir düğüm, kuralların çarpımı ile elde edilen ağırlığı

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{Ai}(x) \times \mu_{Bi}(y)\,,\ i = 1,2 \tag{3.14}$$

şeklinde hesaplar.

Katman 3: Bu katmandaki i'nci düğüm, i'nci kuralın ağırlığının tüm ağırlıkların toplamına oranını aşağıdaki şekilde belirler.

$$O_{3,i} = \overline{w_i} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}\,,\ i = 1,2 \tag{3.15}$$

Burada $\overline{w_i}$ normalize edilmiş ağırlık olarak adlandırılır.

Katman 4: Bu katmanda, her bir i düğümü aşağıdaki fonksiyona sahiptir: $\{p_i, q_i, r_i\}$

$$O_{4,i} = \overline{w}_i f_i = \overline{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \tag{3.16}$$

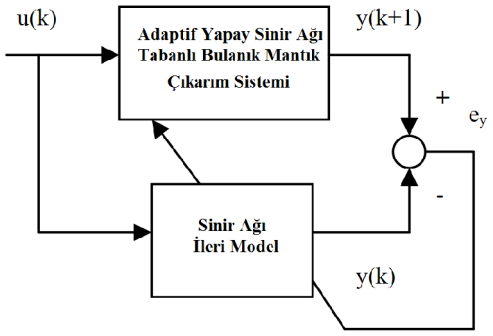
Burada $\overline{w_i}$ üçüncü katmanın çıkışıdır ve {pi, qi, ri}parametre setidir. Bu katmandaki parametreler, lineer parametreler olarak bilinir.

Katman 5: Bu katmanda tek bir düğüm, gelen bütün işaretlerin toplamı olan genel çıkışı aşağıda ifade edildiği gibi hesaplar:

$$O_{5,1} = \sum_i \overline{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f}{\sum_i w_i} \tag{3.17}$$

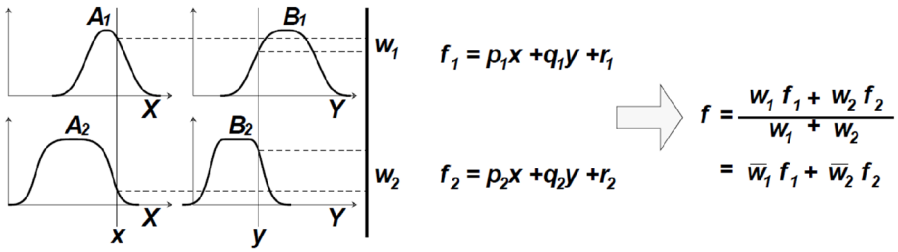
3.3.2.2 Hibrit Öğrenme Algoritması

Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcünün sinir ağında ileri hibrit öğrenme algoritması kullanılır. Şekil 3.11'de ileri hibrit öğrenme algoritmalı yapay sinir ağının eğitim gösterilmektedir. İleri hibrit öğrenme algoritmasında düğüm çıkışları katman 4'e kadar iletilir ve ağ sonucu en küçük kareler metodu kullanılarak belirlenir. Öncül parametre değerleri ayarlandığında genel çıkış sonucu, parametrelerin bir lineer kombinasyonu olarak ifade edilebilir.



Şekil 3.11 İleri hibrit öğrenme algoritmalı yapay sinir ağının eğitimi.

Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık çıkarım sisteminin yapısını ifade etmek için birinci derece Takagi-Sugeno modelden oluşan iki bulanık eğer-ise kuralları kullanılır. İki giriş ve iki kuraldan oluşan Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemi Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12. İki giriş ve iki kuraldan oluşan Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemi.

Kural 1: Eğer (x = A_1) ve (y = B_1) ise ($f_1 = p_1x + q_1y + r_1$).

Kural 2: Eğer (x = A_2) ve (y = B_2) ise (f 2 = $p_2x + q_2y + r_2$).

Burada x ve y girişleri, A_i ve B_i bulanık kümeleri, f_i bulanık kurallar tarafından belirlenen bulanık bölge içindeki çıkışları, p_i , q_i ve r_i eğitim sürecinde belirlenen tasarım parametrelerini ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1+w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1+w_2} f_2 \\ &= \overline{w_1} f_1 + \overline{w_2} f_2 \\ &= \left(\overline{w_1} x\right) p_1 + \left(\overline{w_1} y\right) q_1 + \left(\overline{w_1}\right) r_1 + \left(\overline{w_2} x\right) p_2 + \left(\overline{w_1} y\right) q_2 + \left(\overline{w_1}\right) r_2 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Bu denklemde p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 and r_2 doğrusal sonuç parametreleridir (Tınkır ve ark. 2010).

$$f = \begin{bmatrix} \overline{w}_1 x & \overline{w}_1 y & \overline{w}_1 & \overline{w}_2 x & \overline{w}_2 y & \overline{w}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \\ r_1 \\ p_2 \\ q_2 \\ r_2 \end{bmatrix} = XW \tag{3.19}$$

Burada X giriş matrisini, W her kuralın ağırlık vektörünü ifade etmektedir.

Teorem 1: Eğer X matrisi kare matris ise o zaman X matrisinin tersi X^{-1} dir. Bu durumda $f = XW$ denklemine göre $W = X^{-1} f$ eşit olur.

Teorem 2: Eğer X matrisi kare matris değilse o zaman $f = XW$ denkleminde W'u elde etmek için X'in sahte tersi olan $X^* = \left(X^T X\right)^{-1} X^T$ kullanılır. Bu durumda $W = X^* f$ olarak hesaplanır.

3.3.2.3 Durulaştırma İşlemi

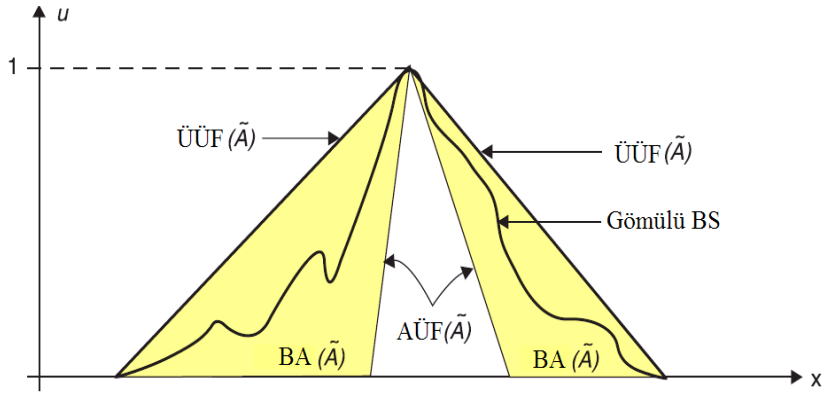
Bir bulanık mantık kontrolcüde kural tabanındaki doğru olan kurallar çalışır. Durulaştırma prosesi doğru üyelik fonksiyonlarından yararlanarak kontrol yüzeyini oluşturur. Durulaştırma işlemi kontrol sinyalini gerçek kontrol çıkışına dönüştürür. Sugeno tip bulanık mantık kontrolcünün tasarımında ***ağırlıkların ortalaması*** veya ***ağırlıkların toplamı*** durulaştırma metotları kullanılır. Doğrusal olmayan sistemlerin adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolünde genellikle ağırlıkların ortalaması durulaştırma metotu kullanılır. Bu metotun matematiksel ifadesi ise şu şekildedir.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i z_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \tag{3.20}$$

3.3.3 Adaptif Ağ Tabanlı Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolcü

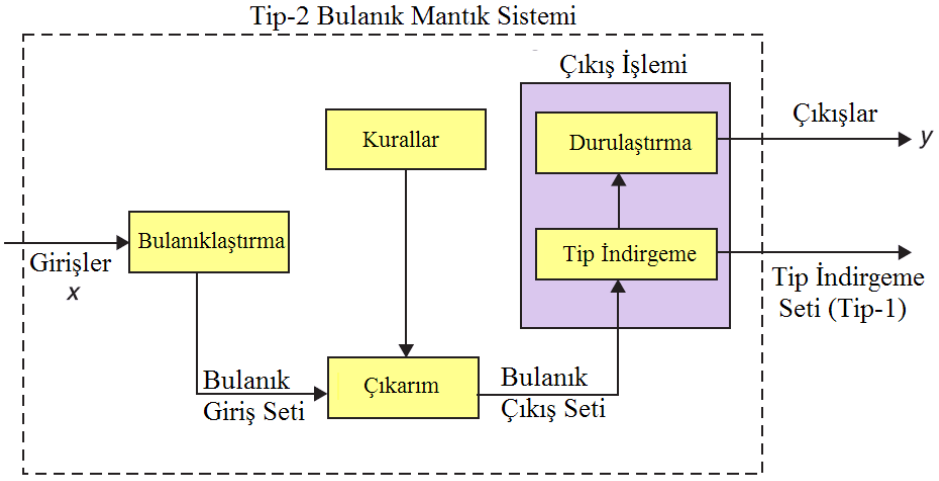
Son yıllarda bulanık mantık kontrol uygulamalarında yeni bir yöntem olarak "***aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü***" (interval type-2 fuzzy logic controller) tasarımları gerçekleştirilmiştir (Tınkır ve ark. 2010). Tip-2 bulanık mantık çıkarım sistemi belirsizliklerin olduğu kontrol uygulamalarında kullanılır. Bu türde bir bulanık mantık çıkarım sistemi ilk olarak Zadeh tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır. Çıkarım sisteminin temelini klasik tip-1 bulanık mantık çıkarım sisteminin üyelik fonksiyonları oluşturmaktadır (Zadeh 1988, 1989). Tip-2 bulanık mantık sisteminin en gelişmiş hali Mendel ve Liang tarafından ele alınmıştır

(Mendel 2001, Liang ve ark. 2000). Bu çıkarım sisteminin genel mantığı iki üyelik fonksiyonunun tek bir dilsel değişkende kullanılmasıdır. İki üyelik fonksiyonu arasındaki bölge "belirsizlik alanı" olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.13'de Tip-2 bulanık mantık çıkarım sisteminin üyelik fonksiyonlarının yerleştirilmesi gösterilmiştir. Şekil 3.13'de görüldüğü gibi iki üçgen üyelik fonksiyonu birlikte kullanılmış, birinci üyelik fonksiyonu ***üst üyelik fonksiyonu (ÜÜF)***, ikinci üyelik fonksiyonu ise ***alt üyelik fonksiyonu (AÜF)*** şeklinde tanımlanmıştır. İki üyelik fonksiyonu arasındaki bölge "***belirsizlik alanı" (BA)*** olarak gösterilmiştir. İki üyelik fonksiyonu arasında çizilen eğri ise "***gömülü bulanık sistemi"*** ifade etmektedir.



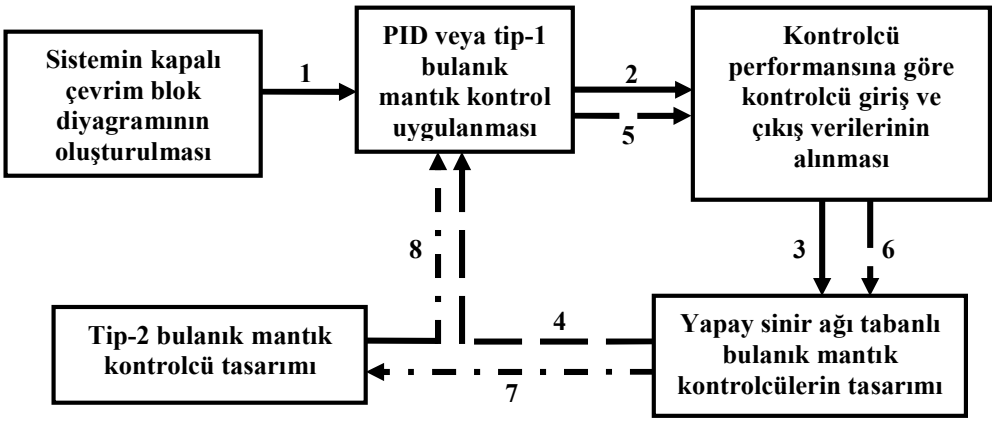
Şekil 3.13 Tip-2 bulanık mantık çıkarım sisteminin üyelik fonksiyonlarının tanımlanması.

Tip-2 bulanık mantık sisteminin yapısı ve işleyişi Şekil 3.14 'de verilmiştir. Bu sistemde, Tip-1 bulanık mantık sisteminin üyelik fonksiyonlarının farklı şekilde kullanılması ile indirgeme işlemi gerçekleştirilmektedir. Daha sonra durulaştırma işlemi ile gerçek çıkışlar elde edilmektedir. Bu türde bir bulanık mantık çıkarım sistemi hem ***Mamdani*** hem de ***Sugeno*** tipinde oluşturulabilir.



Şekil 3.14 Tip-2 bulanık mantık çıkarım sisteminin yapısı ve işleyişi.

Adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü önceden ayarlanmış iki adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcünün birleştirilmesinden meydana gelmektedir. Bu kontrol tekniğinin tasarımı için ilk olarak sistemin kontrollü kapalı çevrim blok diyagramı oluşturulur. Sistemin kontrolü için tasarlanan kontrolcülerin (örneğin PID veya tip-1 bulanık mantık kontrol vb…) performansları irdelenir. Uygulanan kontrolcülerin giriş ve çıkış verileri toplanarak yeni bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirilir. Buradaki amaç başlangıçta kullanılan kontrolcülerin performanslarını artıran bir kontrolcü geliştirmektir. Kontrolcülerden elde edilen veriler ışığında MATLAB/ANFIS yazılımı kullanılarak yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcü tasarımı yapılır. Aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcünün oluşturulması için gerekli olan alt ve üst üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi için farklı üyelik fonksiyonları şekilleri kullanılarak oluşturulan yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcüler kullanılır. Bu amaçla yapısında iki farklı ağ tabanlı kontrolcü performansını içeren yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş olur. Bu şekilde tasarlanan tip-2 bulanık mantık kontrolcünün yapısı ***Sugeno*** tipinde olup kural tabanı iki farklı yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcünün kurallarının birleştirilmesinden meydana gelir. Durulaştırma işleminde ise ***ağırlıkların ortalaması*** veya ***ağırlıkların toplamı*** durulaştırma metotları kullanılır. Şekil 3.15'de adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcünün oluşturulması gösteren adımlar numara sırası ile verilmiştir. Bu türde bir kontrolcünün tasarımı için sekiz işlem adımı gerekmektedir. Sekizinci adım sonunda tasarlanan tip-2 bulanık mantık kontrolcü sistemin kapalı çevrim blok diyagramında kullanılır ve kontrolcü performansına göre işlem adımları tekrarlanabilir.



Şekil 3.15 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcünün oluşturulması.

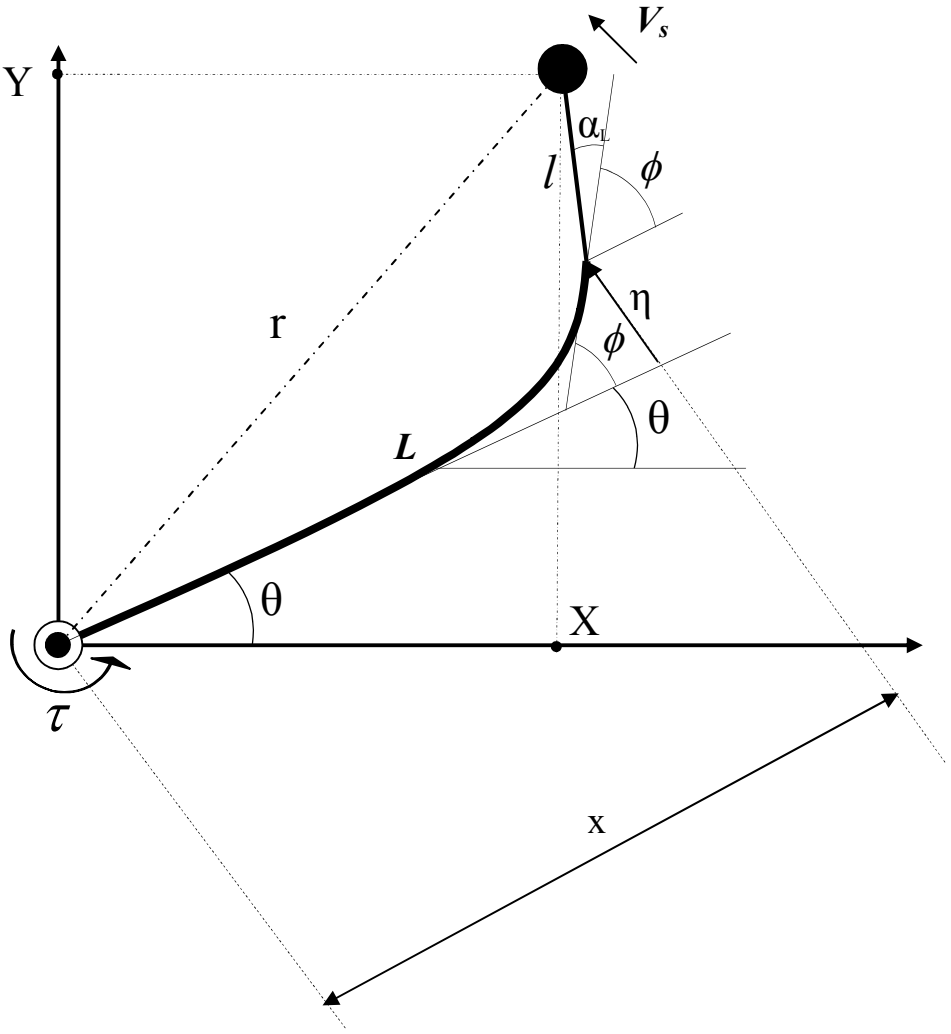
4. SARKAÇ TAŞIYAN TEK ELASTİK UZUVLU ROBOT MANİPÜLATÖRÜN DİNAMİK MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin simülasyonu MATLAB/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarındaki amaç uygulanan kontrol tekniklerinin sistem üzerindeki performansını belirlemek ve deneysel çalışmalarda karşılaşılacak problemleri analiz etmektir. Simülasyon çalışmaları için sistemin dinamik modeli oluşturulmuştur. Sistemin dinamik modelinin oluşturulmasında iki ayrı yöntem uygulanmıştır. Birinci yöntemde Lagrange formülasyonu kullanılarak sistemin hareket denklemleri elde edilmiştir. İkinci yöntemde ise katı modelleme programı (SolidWorks) kullanılarak sistemin dinamik davranışı tespit edilmiştir. Daha sonra her iki modelleme tekniğini karşılaştırılmıştır ve simülasyon çalışmaları için bu modelleme teknikleri kullanılmıştır. Sistemin doğrusal olmayan hareket denklemlerinin ve katı modelleme programından elde edilen modelin çözülmesinde **Runge-Kutta (4,5)** metodu kullanılmıştır. Bu metot MATLAB/Simulink programında yer alan *ode45* komutu kullanılarak uygulanmıştır. Bu metodun kullanılmasındaki amaç ise doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerin çözülmesine oldukça uygun olmasıdır. Simülasyon sonuçlarına göre kolun taşıdığı sarkaçın kol hareket ederken ve durduktan sonraki salınım hareketi incelenmiş ve kola uygulanan motor kuvvetinin nasıl olması gerektiği analiz edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında farklı türde kontrol teknikleri uygulanmış ve aynı teknikler deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.

4.1 Sistemin Dinamik Modelinin Oluşturulması

Bu çalışmada ele alınan sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin fiziksel konfigürasyonu Şekil 4.1'de görülmektedir. Robot manipülatör elastik bir çubuktan meydana gelmektedir. Elastik uzuv tabanına uygulanan motor etkisi ile yatay yönde dönme hareketi gerçekleştirmektedir. Çubuğun hareket etmesi ile X-ekseni ile yapmış olduğu açı θ, kolun elastikiyetliğinden kaynaklanan uç deplasmanı ise η ile ifade edilmektedir. Çubuğun toplam boyu x ile gösterilmiş ve ağırlık merkezinin çubuğun orta noktasında olduğu kabul edilmiştir. Manipülatörün uç kısmına asılan sarkacın dönme hareketi ile X-Y-Z eksenleri ile yapmış olduğu açılar α, ϕ , φ olarak tanımlanmıştır. Sarkaç sisteminin ağırlık merkezinin uç kısmında olduğu kabul edilmiş ve kütlesi M_s ile ifade edilmiştir.

Lagrange formülasyonuna göre ilk olarak hem elastik kolun hem de sarkacın kinetik ve potansiyel enerjileri bulunmuştur. Sarkacın kinetik enerjisini bulmak için ilk olarak sarkacın çizgisel hız ifadesi olarak tanımlanan V_s bulunmuştur. Şekil 4.1'e göre hız denklemini elde etmek için sistemin geometrisi yardımıyla sarkaç konumunu belirten X-Y-Z koordinatları kullanılmıştır. Denklem 4.17 'de sadeleştirilmiş hız denklemi V_s verilmiştir. Daha sonra bulunan toplam kinetik ve potansiyel enerji denklemleri Lagrange formülasyonuna göre düzenlenmiş ve tüm sistemi ifade eden beş hareket denklemi elde edilmiştir.



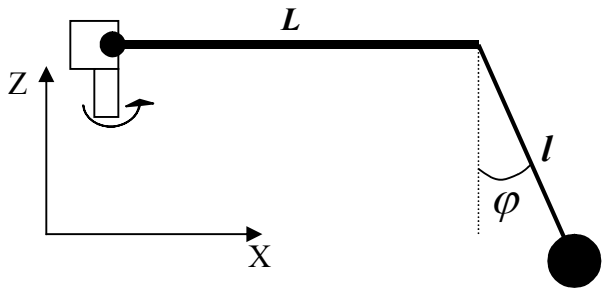
Şekil 4.1 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatörün yapısı.

Hız denklemi V_s'nin bulunması için X, Y ve Z konum denklemleri sırası ile elde edilmiştir. Şekil 4.1'den,

$$X = x\cos\theta - \eta\sin\theta - \bar{l}\cos(\alpha_L + \phi) \tag{4.1}$$

$$Y = x\sin\theta + \eta\cos\theta + \bar{l}\sin(\alpha_L + \phi) \tag{4.2}$$

şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 4.2 Sistemin yandan görünüşü.

Z konumunun belirlenmesi için sistemin yandan görünüşünü ifade eden Şekil 4.2 kullanılmıştır. Buna göre;

$$Z = -l.\cos\varphi \tag{4.3}$$

şeklinde ifade edilmiştir.

$$\alpha_L = \frac{d\eta}{dx} \tag{4.4}$$

$$\eta = f(x,t) \tag{4.5}$$

$$\alpha_L = f(L,t) \tag{4.6}$$

$$\phi = f(L,t) \tag{4.7}$$

$$\theta = f(t) \tag{4.8}$$

$$\bar{l} = l.\sin\varphi \tag{4.9}$$

Denklem 4.9'a göre $\bar{l}$ ifadesi denklem 4.1 ve denklem 4.2'de yerine yazılmıştır.

$$V_s^{\,2} = \dot{X}^2 + \dot{Y}^2 + \dot{Z}^2 \tag{4.10}$$

Denklem 4.10'daki hız ifadesini bulmak için $\dot{X}, \dot{Y}$ ve $\dot{Z}$ ifadeleri elde edilmiş ve denklem 4.11, denklem 4.12 ve denklem 4.13'de verilmiştir.

$$\dot{X} = -x\dot{\theta}\sin\theta - \dot{\eta}\sin\theta - \eta\dot{\theta}\cos\theta - l\dot{\varphi}\cos\varphi\cos(\alpha_L + \phi) + l\sin\varphi.(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi})\sin(\alpha_L + \phi) \tag{4.11}$$

$$\dot{Y} = x\dot{\theta}\cos\theta + \dot{\eta}\cos\theta - \eta\dot{\theta}\sin\theta + l\dot{\varphi}\cos\varphi\sin(\alpha_L + \phi) + l\sin\varphi(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi})\cos(\alpha_L + \phi) \tag{4.12}$$

$$\dot{Z} = l\dot{\varphi}\sin\varphi \tag{4.13}$$

Denklem 4.11, 4.12 ve 4.13'e göre $\dot{X}^2, \dot{Y}^2$ ve $\dot{Z}^2$ ifadeli bulunmuş ve denklem 4.10'da yerlerine yazılarak denklem 4.14 elde edilmiştir.

$$
\begin{aligned}
V_s{}^2 &= (x^2+\eta^2)\dot{\theta}^2+\dot{\eta}^2+(\dot{\varphi}^2+\dot{\alpha}_L{}^2+\dot{\phi}^2)l^2+2x\dot{\theta}\dot{\eta}+2l^2\dot{\alpha}_L\dot{\phi}-(\dot{\phi}^2+\dot{\alpha}_L{}^2+2.\dot{\alpha}_L.\dot{\phi})l^2(\cos\varphi)^2 \\
&+2(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi})[\eta\sin(\alpha_L+\phi)+x\cos(\alpha_L+\phi)][l\cos\theta\sin\varphi]+2(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi})[\cos\theta\cos(\alpha_L+\phi) \\
&+\sin\theta\sin(\alpha_L+\phi)][\dot{\eta}l\sin\varphi]+2(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi})[x\sin(\alpha_L+\phi)-\eta\cos(\alpha_L+\phi)][\dot{\theta}\sin\theta l\sin\varphi] \\
&+2(x\dot{\theta}+\dot{\eta})[\sin\theta\cos(\alpha_L+\phi)+\cos\theta\dot{\varphi}\sin(\alpha_L+\phi)][l\cos\varphi]-2.[\sin\theta\sin(\alpha_L+\phi) \\
&+\cos\theta\cos(\alpha_L+\phi)][\eta\dot{\theta}l\dot{\varphi}]
\end{aligned}
\tag{4.14}
$$

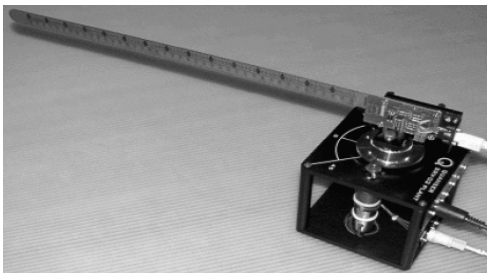
Denklem 4.14 sadeleştirilirse;

$$
\begin{aligned}
V_s{}^2 &= (x^2+\eta^2)\dot{\theta}^2+\dot{\eta}^2+2x\dot{\theta}\dot{\eta}+[\dot{\varphi}^2+(1-\cos^2\varphi)(\dot{\phi}+\dot{\alpha}_L)^2]l^2+[2(\dot{\phi}+\dot{\alpha}_L)l\sin\varphi][\sin\theta\sin(\alpha_L+\phi) \\
&+\cos\theta\cos(\alpha_L+\phi)]\dot{\eta}+[\eta\sin(\alpha_L+\phi)+x\cos(\alpha_L+\phi)]\cos\theta+[x\sin(\alpha_L+\phi)-\eta\cos(\alpha_L+\phi)]\dot{\theta}\sin\theta] \\
&+2(x\dot{\theta}+\dot{\eta})[\sin\theta\cos(\alpha_L+\phi)+\cos\theta\dot{\varphi}.\sin(\alpha_L+\phi)][l.\cos\varphi]-2[\sin\theta\sin(\alpha_L+\phi)+\cos\theta cos(\alpha_L+\phi)][\eta\dot{\theta}l\dot{\varphi}]
\end{aligned}
\tag{4.15}
$$

sarkacın kinetik enerjisi için çizgisel hız ifadesi bulunmuş olur.

4.1 Elastik Kolun Kinetik Enerjisi

Şekil 4.3' de SRV02 sistemine bağlanmış olan elastik uzuv modülü görülmektedir. Modül SRV02 yük dişlisine iki vida ile bağlanmış durumdadır. Elastik kol modülün üs kısmını yerleştirilmiştir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi strain gage kolun başlangıç kısmında yer almaktadır. Gage uç salınımın her 1 inçine 1 çıkış voltu uygulamak suretiyle kalibre edilmektedir.



Şekil 4.3 Elastik kol modülü.

Kolun uç noktasının kontrolünde uç noktasının hareketini gösteren basit bir model kullanmak yeterlidir. Şekil 4.4'de kolun basitleştirilmiş modeli verilmiştir.

Şekil 4.4'den döner yayın denklemi;

$$J_{kol}\ddot{\eta} = -K\eta \tag{4.16}$$

Salınım sistemi için,

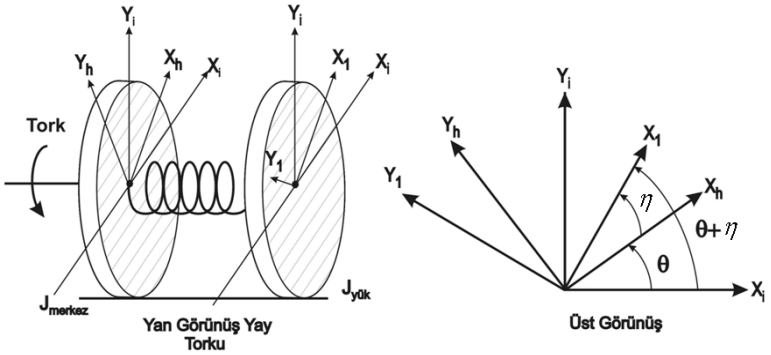
$$\ddot{\eta} = -\omega_c{}^2\eta \tag{4.17}$$

ifadesi yazılabilir. Denklem 4.17'i, denklem 4.16' da yazılırsa;

$$K = \omega_c{}^2 J_{kol} \tag{4.18}$$

elde edilir. Elastik kol, atalet momenti ile z ekseni etrafında dönen bir çubuk gibi modellenebilir.

$$J_{kol} = \frac{ML^2}{3} \tag{4.19}$$



Şekil 4.4 Basit elastik kol modeli.

Sistemin dinamik denklemleri Euler-Lagrange formülasyonu kullanılarak elde edilmiştir.

$$\Sigma T_{çubuk} = T_{merkez} + T_{kol} = \frac{1}{2} J_{merkez} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_{kol} (\dot{\theta} + \dot{\eta})^2 \tag{4.20}$$

4.2 Elastik Kolun Potansiyel Enerjisi

Elastik kolun potansiyel enerjisi;

$$V_{çubuk} = V_{yay} = \frac{1}{2} K \eta^2 \tag{4.21}$$

şeklinde tanımlanır.

4.3 Sarkacın Kinetik Enerjisi:

$$V_{sarkaç} = 0.5 M_s V_s{}^2 \tag{4.22}$$

4.4 Sarkacın Potansiyel Enerjisi:

Sarkacın potansiyel enerjisi denklemini Şekil 4.2 kullanılarak;

$$V_{sarkaç} = M_s g l (1 - \cos\varphi) \tag{4.23}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Sistemin Toplam Kinetik Enerjisi ;

$$T = T_{çubuk} + T_{sarkaç} \tag{4.24}$$

$$T = \frac{1}{2} J_{merkez} \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_{kol} (\dot{\theta} + \dot{\eta})^2 + \frac{1}{2} M_s V_s{}^2 \tag{4.25}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Sistemin Toplam Potansiyel Enerjisi;

$$V = \frac{1}{2} K\eta^2 + M_s gl(1-\cos\varphi) \tag{4.26}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Lagrange Formülasyonu:

$$L = T - V \tag{4.27}$$

$$L = \frac{1}{2} J_{merkez}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_{kol}(\dot{\theta}+\dot{\eta})^2 + \frac{1}{2} M_s {V_s}^2 - \frac{1}{2} K\eta^2 - M_s gl(1-\cos\varphi) \tag{4.28}$$

Genelleştirilmiş koordinatlar ; $[\theta, \eta, \varphi, \phi, \alpha_L]$ şeklinde tanımlanmıştır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = T_Ç - B.\dot{\theta} \tag{4.29}$$

4.29'daki denkleme göre $T_Ç$ sisteme uygulanan tahrik torkunu, B ise sistemdeki sönüm katsayısını ifade etmektedir.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \eta} = 0 \tag{4.30}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \tag{4.31}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = 0 \tag{4.32}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_L}\right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_L} = 0 \tag{4.33}$$

Denklem 4.29'dan ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = T_Ç - B.\dot{\theta} \tag{4.34}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = {} & J_{merkez}.\dot{\theta} + J_{kol}.(\dot{\theta}+\dot{\eta}) + \frac{1}{2} M_s.[2.(x^2+\eta^2)\dot{\theta} + 2.x.\dot{\eta} + 2.(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi})l.\sin\varphi.[x.\sin(\alpha_L+\phi) \\ & - \eta.\cos(\alpha_L+\phi)].\sin\theta + 2.x.[\sin\theta.\cos(\alpha_L+\phi) + \cos\theta.\dot{\varphi}.sin(\alpha_L+\phi)].l.\cos\varphi \\ & - 2.[\sin\theta.\sin(\alpha_L+\phi) + \cos\theta.\cos(\alpha_L+\phi)].\eta.l.\dot{\varphi}\end{aligned} \tag{4.35}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \theta} &= 2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).l.\sin\varphi.\left[\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}-\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\sin\theta\right.\\ &+\left.\left[\mathrm{x}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\cos\theta\right]+2.\left(x.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right).\left[\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\cos\varphi\\ &-2.\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\end{aligned} \tag{4.36}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) &= J_{merkez}.\ddot{\theta}+J_{kol}.\left(\ddot{\theta}+\ddot{\eta}\right)+\frac{1}{2}M_s.\left[4.\eta.\dot{\eta}.\dot{\theta}+2.\left(x^2+\eta^2\right).\ddot{\theta}+2.x.\ddot{\eta}+\left[\left[2.l.\left(\ddot{\alpha}_L+\ddot{\phi}\right).\sin\varphi+\right.\right.\right.\\ &+2.l.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\varphi.\dot{\varphi}\left.\left.\left.\right].\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\sin\theta\right]+\left[\left[2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).l.\sin\varphi\right].\left[\left[x.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right.\right.\\ &-\left.\left.\left[\dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\sin\theta+\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta.\dot{\theta}\right]\right.\\ &+2.x.\left[\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\left[-\dot{\theta}.\sin\theta.\dot{\varphi}+\cos\theta.\ddot{\varphi}\right].\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ &+\left.\left.\cos\theta.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\cos\varphi-2.x.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\dot{\varphi}.\sin\varphi\right.\\ &-\left.2.\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\dot{\theta}.\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\eta.l.\dot{\varphi}\right.\\ &+\left.2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\left[\ddot{\eta}.\dot{\varphi}+\eta.\ddot{\varphi}\right]\right.\end{aligned} \tag{4.37}$$

şeklinde elde edilir.

Denklem 4.30'dan ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \eta}=0 \tag{4.38}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}} &= J_{kol}\left(\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)+\frac{1}{2}.M_s\left[2.\dot{\eta}+2.x.\dot{\theta}+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).l.\sin\varphi.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right.\\ &+\left.2.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\cos\varphi\right]\end{aligned} \tag{4.39}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \eta} &= -K_{rj}.\eta+\frac{1}{2}.M_s\left[2.\dot{\theta}^2.\eta+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).l.\sin\varphi\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\left(\alpha_L+\phi\right).\dot{\theta}.\sin\theta\right]\right.\\ &-\left.2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right]\end{aligned} \tag{4.40}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}}\right) &= J_{kol}.\left(\ddot{\theta}+\ddot{\eta}\right)+\frac{1}{2}.M_s.\left[2.\ddot{\eta}+2.x.\ddot{\theta}+\left[2.l.\left(\ddot{\alpha}_L+\ddot{\phi}\right).\sin\varphi+2.l.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\varphi.\dot{\varphi}\right]\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ &+\left.\left.\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).l.\sin\varphi.\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ &+\left.\left.\sin\theta.\dot{\theta}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right]+2.\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ &+\left.\left.\left[-\sin\theta.\dot{\theta}.\dot{\varphi}+\cos\theta.\ddot{\varphi}\right].\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\left[\cos\theta.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right].l.\cos\varphi\right.\\ &-\left.\left.\left[\sin\theta.cos\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)+\cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\dot{\varphi}.\sin\varphi\right]\right.\end{aligned} \tag{4.41}$$

şeklinde elde edilir.

Denklem 4.31'den ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \varphi}=0 \tag{4.42}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{2} M_s \left[2.l^2.\dot{\varphi} + 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right) l.\cos\varphi.\cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - 2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right] \eta.\dot{\theta}.l. \right] \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \varphi} = & -M_s.g.l.\sin\varphi + \frac{1}{2}.M_s.\left[2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right)^2.l^2.\cos\varphi.\sin\varphi + 2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right) l.\cos\varphi.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right.\right. \\ & \left. + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta \\ & \left. - 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right)\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right] l.\sin\varphi \right] \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right) = & \frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\ddot{\varphi} + \left[2.\left(x.\ddot{\theta} + \ddot{\eta}\right) l.\cos\varphi - 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right) l.\sin\varphi.\dot{\varphi}\right]\left[\cos\theta.sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right]\right. \\ & + \left[2.\left(\mathrm{x}.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right) l.\cos\varphi\right]\left[-\sin\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right] \\ & - 2.\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right. \\ & \left.\left. - cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\eta.l.\dot{\theta} - 2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\left[\dot{\eta}.\dot{\theta}.l + \eta.\ddot{\theta}.l\right]\right] \end{aligned} \quad (4.45)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem 4.32'den ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = 0 \quad (4.46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} = & \frac{1}{2}.M_s.\left[l^2.\left(1 - \cos^2\varphi\right).2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right) + 2.l.\sin\varphi.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta}\right. \\ & \left. + \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + .x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right] \end{aligned} \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \phi} = & \frac{1}{2}.M_s.\left[\left[2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right) l.\sin\varphi\right]\left[\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta\right.\right. \\ & \left. + \left[\mathrm{x}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) + \eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right] + 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right)\left[-\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\varphi.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right] l.\cos\varphi \\ & \left. - 2.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right] \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right) = & \frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\left[2.\sin\varphi.\cos\varphi.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right) + \left(1 - \cos^2\varphi\right).\left(\ddot{\alpha}_L + \ddot{\phi}\right)\right]\right. \\ & + 2.l.\cos\varphi.\dot{\varphi}.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta\right. \\ & + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right] + 2.l.\sin\varphi.\left[\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right)\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right.\right. \\ & \left. - \sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\ddot{\eta} \\ & + \left[\dot{\eta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \eta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - x.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta \\ & - \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\sin\theta.\dot{\theta} + \dot{\theta}.\sin\theta.\left[x.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right. \\ & \left.\left. + \eta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right] + \left[\ddot{\theta}.\sin\theta + \dot{\theta}^2.\cos\theta\right]\left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right]\right] \end{aligned} \quad (4.49)$$

şeklinde elde edilir.

Denklem 4.33'den ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_L}\right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_L} = 0 \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_L} = \frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right) + 2.l.\sin\varphi.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right]\right] \quad (4.51)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial \alpha_L} = \frac{1}{2} M_s \Big[&2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).l.\sin\varphi.\left[\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right.\right. \\ &\left. - x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta + \left[x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) + \eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\Big] + 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right).\left[\sin.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right. \\ &\left. + \cos\theta.\dot{\varphi}.cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\left[l.\cos\varphi\right] - 2.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\left[\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right]\end{aligned} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_L}\right) = &\frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\left(\ddot{\alpha}_L + \ddot{\phi}\right) + 2.l.\dot{\varphi}.\cos\varphi.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta}\right.\right. \\ &+ \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\Big] \\ &+ 2.l.\sin\varphi\left[\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right)\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right.\right. \\ &\left. - \cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} + \left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\ddot{\eta} \\ &+ \left[\dot{\eta}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \eta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - x.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta \\ &- \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta + \left[x.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right. \\ &\left.\left. + \eta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\left[\ddot{\theta}.\sin\theta + \dot{\theta}^2.\cos\theta\right]\right]\end{aligned} \quad (4.53)$$

şeklinde elde edilir.

Sistemin birinci hareket denklemi ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = T_Ç - B.\dot{\theta} \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned}&\left[J_{merkez}.\ddot{\theta} + J_{kol}.\left(\ddot{\theta} + \ddot{\eta}\right) + \frac{1}{2}M_s.\left[4.\eta.\dot{\eta}.\dot{\theta} + 2.\left(x^2 + \eta^2\right).\ddot{\theta} + 2.x.\ddot{\eta} + \left[\left[2.l.\left(\ddot{\alpha}_L + \ddot{\phi}\right).\sin\varphi + \right.\right.\right.\right. \\ &+ 2.l.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\varphi.\dot{\varphi}\left].\left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\sin\theta\right] + \left[\left[2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).l.\sin\varphi\right].\left[\left[x.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right]\right.\right. \\ &- \left[\dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\sin\theta + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\cos\theta.\dot{\theta}\Big] \\ &+ 2.x.\left[\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \left[-\dot{\theta}.\sin\theta.\dot{\varphi} + \cos\theta.\ddot{\varphi}\right].\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right.\right. \\ &\left.\left. + \cos\theta.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].l.\cos\varphi - 2.x.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].l.\dot{\varphi}.\sin\varphi \\ &- 2.\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \dot{\theta}.\sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\eta.l.\dot{\varphi} \\ &\left.\left. + 2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + \cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].l.\left[\ddot{\eta}.\dot{\varphi} + \eta.\ddot{\varphi}\right]\right]\right] - \\ &\left[\begin{array}{l}2.\left(\dot{\alpha}_L + \dot{\phi}\right).l.\sin\varphi.\left[\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\eta} - \left[\eta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) + x.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\sin\theta\right. \\ \left. + \left[x.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \eta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\dot{\theta}.\cos\theta\right] + 2.\left(x.\dot{\theta} + \dot{\eta}\right).\left[\cos\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L + \phi\right)\right].l.\cos\varphi \\ - 2.\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L + \phi\right) - \sin\theta.\cos\left(\alpha_L + \phi\right)\right].\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\end{array}\right] = T_Ç - B.\dot{\theta}\end{aligned} \quad (4.55)$$

şeklinde bulunmuştur.

Sistemin ikinci hareket denklemi ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\eta}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \eta}=0 \tag{4.56}$$

$$\begin{bmatrix} J_{kol}.\left(\ddot{\theta}+\ddot{\eta}\right)+\frac{1}{2}.M_s.\left[2.\ddot{\eta}+2.x.\ddot{\theta}+\left[2.l.\left(\ddot{\alpha}_L+\ddot{\phi}\right).\sin\varphi+2.l.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\varphi.\dot{\varphi}\right]\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right. \\ \left.+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)l.\sin\varphi.\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right. \\ \left.+\sin\theta.\dot{\theta}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right]+2.\left[\dot{\theta}.\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right. \\ \left.+\left[-\sin\theta.\dot{\theta}.\dot{\varphi}+\cos\theta.\ddot{\varphi}\right].\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\left[\cos\theta.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right].l.\cos\varphi \\ \left.-.\left[\sin\theta.cos\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)+\cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\dot{\varphi}.\sin\varphi\right] \end{bmatrix}- \\ \begin{bmatrix} -K_{rj}.\eta+\frac{1}{2}.M_s\left[2.\dot{\theta}^2.\eta+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)l.\sin\varphi\left[\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\left(\alpha_L+\phi\right).\dot{\theta}.\sin\theta\right]\right. \\ \left.-2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right] \end{bmatrix}=0 \tag{4.57}$$

şeklinde bulunmuştur.

Sistemin üçüncü hareket denklemi ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \varphi}=0 \tag{4.58}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\ddot{\varphi}+\left[2.\left(x.\ddot{\theta}+\ddot{\eta}\right)l.\cos\varphi-2.\left(x.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)l.\sin\varphi.\dot{\varphi}\right]\left[\cos\theta.sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right. \\ +\left[2.\left(\mathrm{x}.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)l.\cos\varphi\right]\left[-\sin\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right] \\ -2.\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right. \\ \left.\left.-cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\eta.l.\dot{\theta}-2.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\left[\dot{\eta}.\dot{\theta}.l+\eta.\ddot{\theta}.l\right]\right] \end{bmatrix}- \\ \begin{bmatrix} -M_s.g.l.\sin\varphi+\frac{1}{2}.M_s.\left[2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)^2.l^2.\cos\varphi.\sin\varphi+2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)l.\cos\varphi.\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right. \\ \left.+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta+\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta \\ \left.-2.\left(x.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\dot{\varphi}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\sin\varphi\right] \end{bmatrix}=0 \tag{4.59}$$

Sistemin dördüncü hareket denklemi ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \phi}=0 \tag{4.60}$$

$$\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\left[2.\sin\varphi.\cos\varphi.\dot{\varphi}.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)+\left(1-\cos^2\varphi\right)\left(\ddot{\alpha}_L+\ddot{\phi}\right)\right]\right.\\ +2.l.\cos\varphi.\dot{\varphi}.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta\right.\\ \left.+\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right]+2.l.\sin\varphi.\left[\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ \left.\left.-\sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\ddot{\eta}\right.\\ +\left[\dot{\eta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\eta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-x.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta\\ -\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\sin\theta.\dot{\theta}+\dot{\theta}.\sin\theta.\left[x.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\\ \left.\left.+\eta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right]+\left[\ddot{\theta}.\sin\theta+\dot{\theta}^2.\cos\theta\right].\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right]\right]\end{array}\right]-$$

$$\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2}.M_s.\left[\left[2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)l.\sin\varphi\right].\left[\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta\right.\right.\\ \left.+\left[\mathrm{x}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)+\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\right]+2.\left(x.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)\left[-\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\varphi.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].l.\cos\varphi\\ \left.-2.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right]\end{array}\right]=0 \quad (4.61)$$

şeklinde bulunmuştur.

Sistemin beşinci hareket denklemi ;

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial\dot{\alpha}_L}\right)-\frac{\partial L}{\partial\alpha_L}=0 \quad (4.62)$$

$$\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2}.M_s.\left[2.l^2.\left(\ddot{\alpha}_L+\ddot{\phi}\right)+2.l.\dot{\varphi}.\cos\varphi.\left[\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}\right.\right.\\ +\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta+\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\left.\right]\\ +2.l.\sin\varphi\left[\left[\cos\theta.\dot{\theta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\sin\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\sin\theta.\dot{\theta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\\ \left.\left.-\cos\theta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\sin\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\cos\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\ddot{\eta}\right.\\ +\left[\dot{\eta}.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+\eta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-x.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta\\ -\left[\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)+x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta+\left[x.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\dot{\eta}.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\\ \left.\left.+\eta.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right).\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta+\left[x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)-\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\left[\ddot{\theta}.\sin\theta+\dot{\theta}^2.\cos\theta\right]\right]\end{array}\right]-$$

$$\left[\begin{array}{l}\frac{1}{2}M_s\left[2.\left(\dot{\alpha}_L+\dot{\phi}\right)l.\sin\varphi.\left[\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\eta}+\left[\eta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\right.\right.\\ \left.\left.-x.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\cos\theta+\left[x.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)+\eta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\dot{\theta}.\sin\theta\left.\right]+2.\left(x.\dot{\theta}+\dot{\eta}\right)\left[\sin.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right.\\ \left.\left.+\cos\theta.\dot{\varphi}.cos\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\left[l.\cos\varphi\right]-2.\left[\sin\theta.\cos\left(\alpha_L+\phi\right)-\cos\theta.\sin\left(\alpha_L+\phi\right)\right].\left[\eta.\dot{\theta}.l.\dot{\varphi}\right]\right]\end{array}\right]=0 \quad (4.63)$$

şeklinde bulunmuştur.

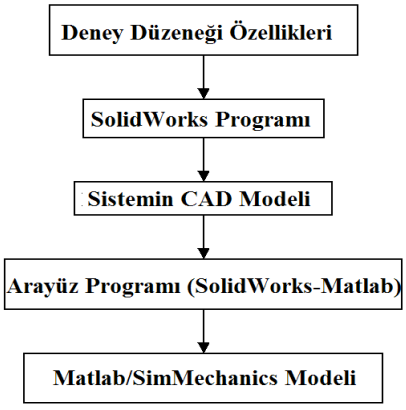
4.2 Katı modelleme programı (SolidWorks) kullanılarak sistemin dinamik modelinin oluşturulması

Bu bölümde sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatörün dinamik modelinin farklı bir modelleme tekniği kullanılarak yapılması anlatılmaktadır. Sistemin dinamik modeli SolidWorks ve MATLAB (Simulink/Simmechanics) programları birlikte kullanılarak yapılmıştır. Bu türde bir yöntem kullanılmasındaki amaç sistemi oluşturan elastik kol ve sarkacın fiziksel özelliklerinin simülasyon çalışmalarındaki etkisini gözlemlemektir. Bu metodun kullanılması ile karmaşık şekillere sahip sistemler matematiksel denklemler kullanmadan modellenebilmektedir. SolidWorks programı fiziksel sistemlerin üç boyutlu katı modelini oluşturmakta kullanılmaktadır. İlk olarak sarkaç taşıyan elastik uzuvlu robot manipülatör sistemini oluşturan parçalar deney düzeneğine göre birebir boyutlarda katı modeli oluşturulmuştur (Tınkır ve ark. 2010). Daha sonra parçaların malzemeleri belirlenmiş ve buna göre çizimler tamamlanmış ve sistemin montajı yapılmıştır. Sistemin montaj resmi yapılırken deneysel düzenek esas alınmıştır.

Tablo 4.1.

Sistemin fiziksel ve geometrik karakteristikleri

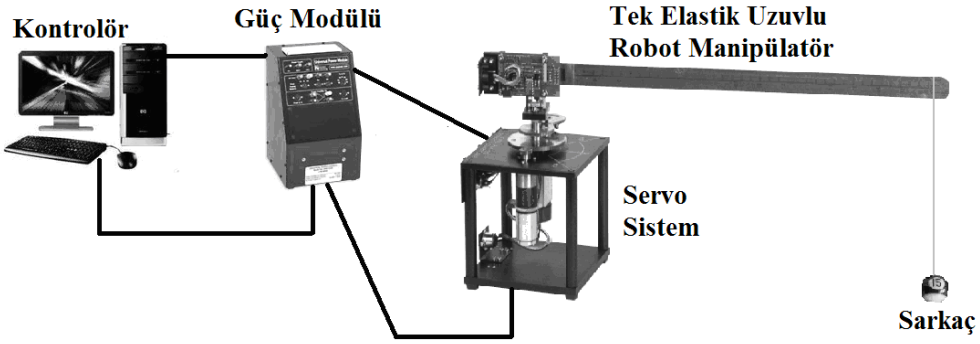
Sembol	Parametre	Değer	Birim
J_h	Elastik Çubuğun Ataleti	0.0050	$kg.m^2$
L	Elastik Çubuğun Uzunluğu	0.300	m
h	Elastik Çubuğun Boyu	0.0200	m
d	Elastik Çubuğun Kalınlığı	0.0008	m
ρ	Çubuğun Doğrusal Yoğunluğu	0.1333	kg/m
EI	Çubuğun Rijitliği	0.1621	$N.m^2$
l	Sarkaç İpinin Uzunluğu	0.15	m
m	Sarkaç Uç Kütlesi	0.011	kg
r	Uç Kütlenin Yarı Çapı	0.015	m



Şekil 4.5 Katı modelleme çalışma aşamaları.

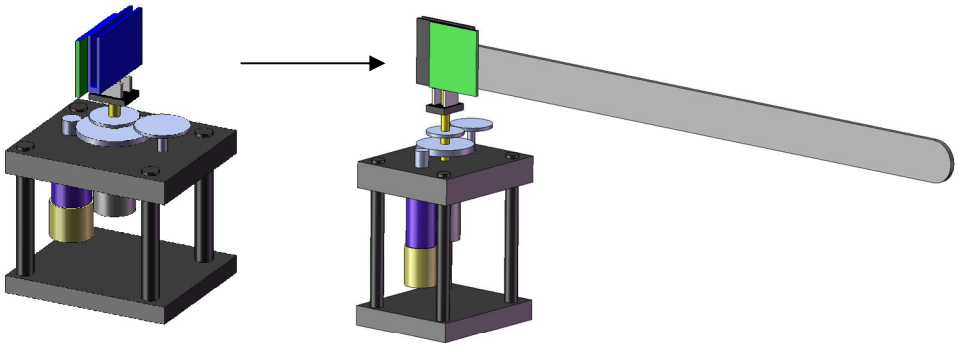
Sistemin fiziksel ve geometrik karakteristikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Solidworks ve MATLAB programları kullanılarak yapılan dinamik modelleme çalışmasının planı Şekil 4.5'de görülmektedir. Şekil 4.6'da sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin deney düzeneği görülmektedir. Deney düzeneğine göre ilk olarak tek elastik uzuvlu robot manipülatörün üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Katı modellemede servo sistemi oluşturan dişliler modellemede dikkate alınmamış sadece kolun elastikliği ve taşıdığı sarkacın fiziksel ve geometrik özellikleri kullanılmıştır. Oluşturulan model MATLAB/SimMechanics yazılımı kullanılarak simüle edilmiş ve sonuçlar Lagrange

denklemlerinden elde edilen dinamik model ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır.



Şekil 4.6 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin deney düzeneği.

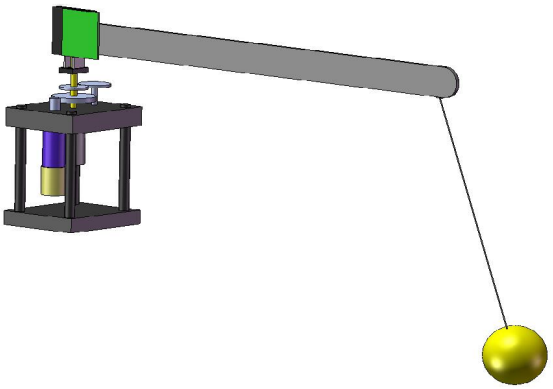
Tek elastik uzuvun modellenmesinden sonra kolun uç kısmına asılan sarkaç sisteminin üç boyutlu katı modeli oluşturulmuş ve sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin katı modeli elde edilmiştir.



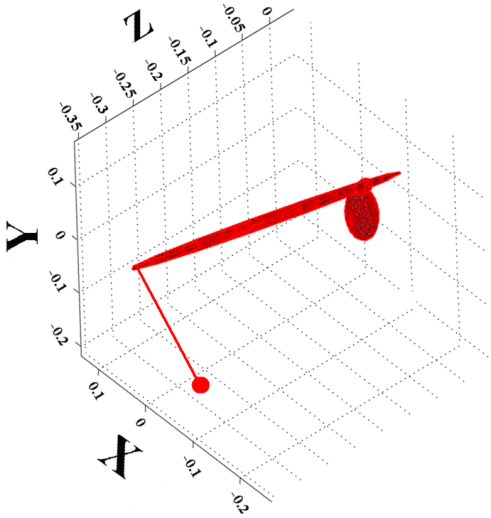
Şekil 4.7 Tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin katı modeli.

Şekil 4.7'de tek elastik uzuvlu robot manipülatörün üç boyutlu katı modeli verilmiştir. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi, bu modele ilave olarak uç kısmına sarkaç bağlanmış tüm sistemin üç boyutlu katı modeli elde edilmiştir. Deney düzeneğine göre katı modeli çizilen sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sistemi SolidWorks programında .xml dosyası olarak kayıt edildikten sonra bir arayüz programı(SolidWorks to MATLAB convertor) kullanılarak MATLAB programına atılmıştır. MATLAB/SimMechanics programında açılan bu dosya sistemin simulasyon modelini oluşturmuştur. Sistemin simülasyon için hazırlanan modeli Şekil 4.9'da verilmiştir.

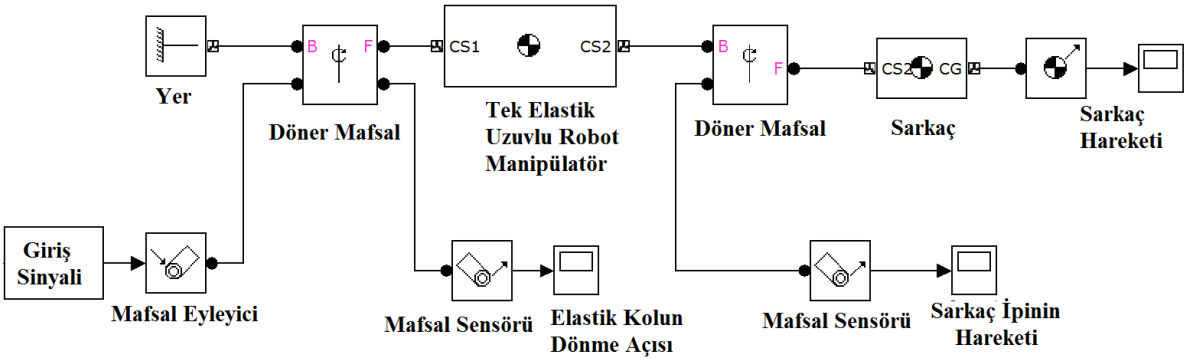
Fiziksel ve geometrik karakteristiklerine göre oluşturulan sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin üç boyutlu MATLAB/SimMechanics modeli kontrolcü tasarımları için kullanılmıştır. MATLAB/Simulink programında sistemin kapalı çevrim blok diyagramı oluşturulmuştur. Şekil 4.10'da sistemin katı modelleme programından elde edilen dinamik modeli verilmiştir.



Şekil 4.8 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin katı modeli.



Şekil 4.9 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin MATLAB/SimMechanics modeli.



Şekil 4.10 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin Simulink/SimMechanics dinamik modeli.

5. KONTROLCÜ TASARIMI

Bu bölümde elastik kolun konum, sehim ve sarkaç salınımının kontrolü için gerçekleştirilen kontrolcü tasarımları anlatılmaktadır. Teorik esaslar kısmında çalışmada kullanılan ve birbirleri ile karşılaştırılan kontrolcülerin genel özellikleri ve uygulama yöntemleri anlatılmıştır. Kapalı çevrim kontrol sisteminde kullanılan kontrolcülerin performansları, literatürde yapılan benzer çalışmalara göre belirlenen ***performans kriterleri*** doğrultusunda karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır. Sistemin kontrolü için PID kontrolcü, yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcü ve adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü tasarlanmış, simülasyon ve deneysel çalışmalarda bu kontrolcülerin referans girişe karşılık vermiş oldukları kontrol cevapları grafik ve tablolar halinde verilmiştir.

Bu kontrolcülerden PID kontrolcü tasarımı bulanık mantık kontrolcülerin tasarımlarına göre daha kolay ve basittir. PID kontrol tekniği bilindiği gibi oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) etkinin bir arada kullanıldığı ve referans giriş ile gerçek çıkış arasındaki hataya etki eden üç parametreden meydana gelmektedir. PID kontrolcü kazanç parametrelerinden oransal etki K_p'nin artırılması sistemin referans konuma ulaşmasında yükselme zamanını azaltmaktadır. Yükselme zamanının azaltılması ile sistem referans değere hızlı bir şekilde ulaşmakta fakat sistemin bu hızlı cevabı referans değeri geçtiği için maksimum aşma miktarını artırmaktadır. Oransal etkinin artırılmasındaki bir başka avantaj ise sistemin kontrol cevabında kalıcı durum hatasının azaltılması olarak söylenebilir. İntegral etki K_i'nin artırılması ise yine yükselme zamanını ve kalıcı durum hatasını azaltır. Oransal ve integral etkinin birlikte kullanılması (PI) ile sistemin kontrol cevabında maksimum aşma ve yerleşme zamanında artış gerçekleşir. Maksimum aşma miktarının ve yerleşme zamanının azaltılması amacı ile her iki etki türev etki K_d ile birlikte (PID) kullanılır. Oransal (P) K_p , integral (I) K_i ve türev (D) K_d kazanç parametrelerinin birlikte kullanılması ve sistem cevabına göre seçilmeleri PID kontrolcü performansını iyileştirmektedir. Çalışmada kullanılan PID kontrolcünün kazanç parametrelerinin belirlenmesi teorik esaslar kısmında verilen Tablo 3.1'e göre gerçekleştirilmiştir.

Yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcülerin tasarımında farklı yollar izlenmiştir. Sistemin kontrolü için kullanılan hiyerarşik bulanık mantık ve aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcülerin tasarımında yapay sinir ağı tabanı kullanılmıştır. Aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü kullanılması ile yapay sinir ağı tarafından önceden belirlenen farklı tip üyelik fonksiyonlarının kullanılması mümkündür. Yapısında hem üçgen hem de gauss tipinde

üyelik fonksiyonun yer alması kontrolcü girişlerinin değişimine karşılık kontrolcü çıkışını ayarlamakta ve kontrolcünün adaptifliğini artırmaktadır. Yapay sinir ağının bulanık mantık kontrolcülerin tasarımında kullanılması tasarımcıya bazı avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar;

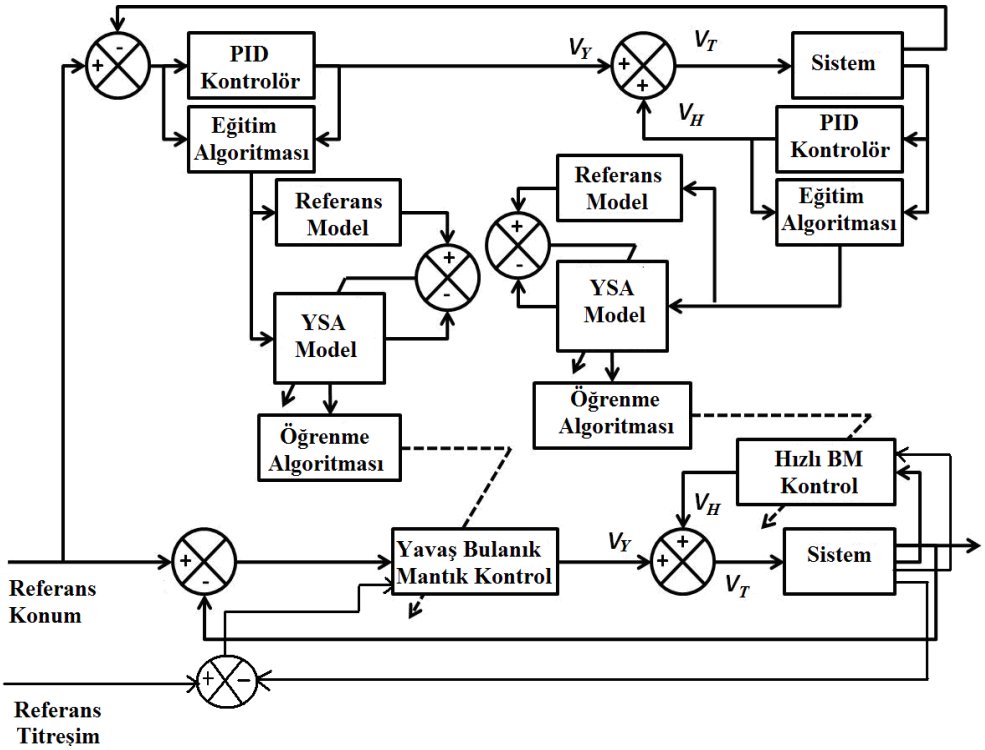
- Üyelik fonksiyonlarının sayısının belirlenmesi,
- Üyelik fonksiyonlarının şeklinin (üçgen, gauss…vb) belirlenmesi,
- Kontrolcü giriş ve çıkışlarına göre üyelik fonksiyonlarının hangi aralıkta yerleştirilmesi gerektiği,
- Kontrolcü giriş ve çıkışına göre kuralların oluşturulması,
- Kural sayısının belirlenmesi

şeklinde sıralanabilir.

5.1. Hiyerarşik Adaptif Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

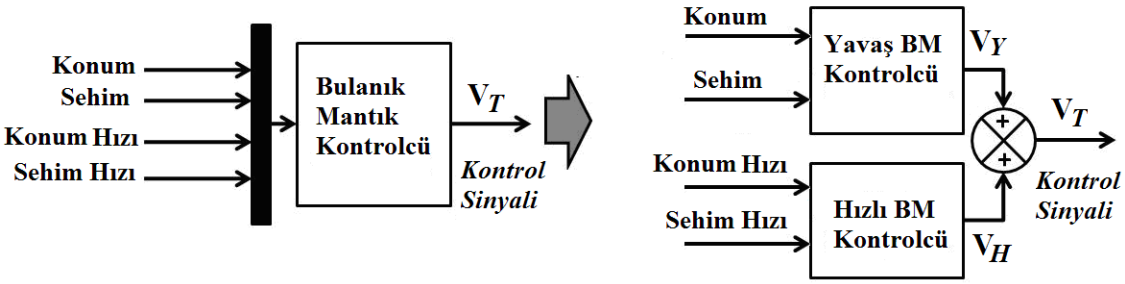
Hiyerarşik adaptif bulanık mantık kontrol tekniği adaptif bulanık mantık kontrolcülerin sistemin kapalı çevrim blok diyagramında hem ileri beslemede hem de geri beslemede kullanılmasıdır. Hiyerarşik mantığı ise kontrolcülerin yavaş ve hızlı alt sistem kontrolcüler halinde düzenlenmesi ve bu kontrolcülerin kontrol hedeflerine göre sıralanmasıdır. Bu tür kontrolcü uygulamasında iki farklı adaptif bulanık mantık kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Adaptif bulanık mantık kontrolcünün yapısı teorik esaslar kısmında ayrıntılı alarak anlatılmıştır. Bu türde kontrolcünün en önemli özelliği yapısında yapay sinir ağı kullanması ve belirlenen kontrolcü giriş ve çıkışlarına göre bulanık yapıyı adapte olabilir bir yapıya çevirmesidir. Böyle bir kontrolcü tasarımında MATLAB/Anfis/ Fuzzy Logic Toolbox'ı kullanılmıştır (Kalyoncu ve ark. 2008). MATLAB/Anfis yazılımının genel özelliği ise kontrolcü giriş çıkış verilerine bir yapay sinir ağı oluşturmasıdır. Anfis Toolbox'nın açılımı adaptif sinir ağı tabanlı bulanık çıkarım sistemi olarak tanımlanmaktadır. Kontrolcünün giriş ve çıkış sayısına göre belirlenen ağ, giriş ve çıkış parametreleri arasında ilişkiyi kullanıcının vermiş olduğu veriler doğrultusunda gerçekleştirmektedir. Bu veriler kontrolü yapılmak istenen sisteme daha önce uygulanmış başka türde bir kontrol tekniğinin giriş ve çıkış verileri olabilmektedir. Bu çalışmada yapılan kontrolcü tasarımında sisteme uygulanmış olan hiyerarşik PID (Oransal+İntegral+Türev) kontrolün giriş ve çıkış verileri kullanılmıştır. Şekil 5.1'de sisteme uygulanan hiyerarşik adaptif bulanık mantık kontrolcünün blok diyagramı verilmiştir. Blok diyagramından da görüldüğü gibi sisteme uygulanan hiyerarşik PID kontrol tekniğinin hem ileri beslemede hem de geri besleme hattında

kullanılmaktadır. İki ayrı PID kontrolcünün giriş ve çıkış sinyal verileri, adaptif bulanık mantık kontrolcülerin yapay sinir ağı tabanını eğitmekte ve kontrolcüler için model teşkil etmektedir.



Şekil 5.1 Hiyerarşik bulanık mantık kontrol şeması.

Hiyerarşik olarak kontrolcülerin ayrılması ve kullanılmasındaki amaç kontrolcü işlem sürecini azaltmak ve bulanık mantık kural tabanlarının daha az kuraldan oluşmasını sağlamaktır. Yavaş ve hızlı olarak adlandırılan kontrolcülerin iki girişi tek çıkışı bulunmaktadır. Hiyerarşik kontrol yapısının oluşturulması Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.2'de dört girişten oluşan bir bulanık mantık kontrolcünün iki ayrı kontrolcüye dönüştürülmesi anlatılmaktadır. Konum, sehim ve bunların zamana göre değişimi (hızları) girişler, kontrolcü çıkışları ise V_Y ve V_H kontrol sinyalleri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.2 Hiyerarşik kontrolcü yapısı.

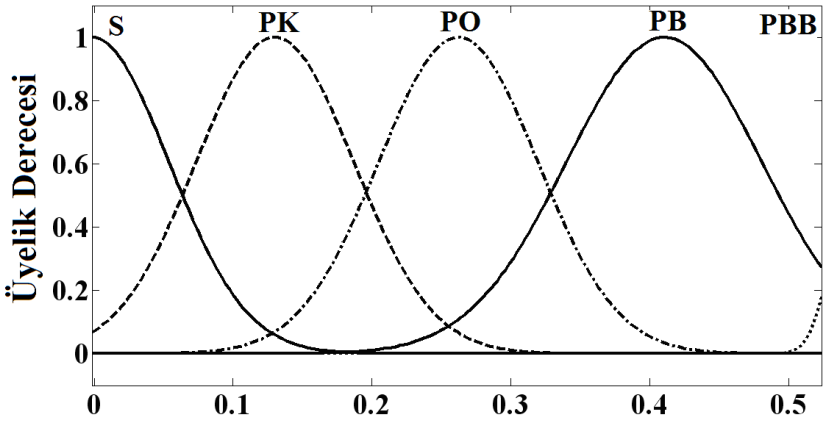
Dört değişken ve beş dilsel değişkene göre oluşturulacak kural tabanı $5^4 = 625$ olarak hesaplanır. Bu amaçla kontrolcüler ayrılmış ve giriş sayıları indirgenerek kural sayısı azaltılmıştır. Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcünün girişleri (θ_{hata}, η_{hata}) konum ve sehim hatası (uç deplesman) olarak belirlenmiş ve her iki giriş için beş dilsel değişken kullanılmıştır. Böylelikle yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcünün kural tabanı 5^1x2 = 10 kuraldan oluşmaktadır. Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcünün girişleri $(\dot{\theta},\dot{\eta})$ konumun ve sehimin zaman göre değişimleri (açısal hızları) olarak belirlenmiş ve her iki giriş için üç dilsel değişken kullanılmıştır. Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcünün kural tabanı $3^2 = 9$ kuraldan meydana gelmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi bu kontrolcülerin yapay sinir ağı tabanlarının oluşturulmasında hiyerarşik PID kontrolcülerin giriş ve çıkış verileri kullanılmıştır. 2000 veriden 1500'ü eğitim için geri kalan 500 veri ise ağı test etmek amacı ile kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonlarının sayısı ve şekli kullanıcı tarafından belirlenmiştir. Hem yavaş hem de hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcüde Gauss tipi üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Eğitim algoritması olarak hibrid eğitim algoritması seçilmiş ve ağın eğitimi 50 epok sonunda tamamlanmıştır.

5.1.2 Yavaş Alt Sistem Bulanık Mantık Kontrolcü

Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcünün çıkış sinyali V_Y olarak belirlenmiştir. Kontrolcünün girişleri ise konum ve sehim hatası olarak tanımlanmıştır. Bu türde bir kontrolcü çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) bir kontrolcü olarak adlandırılır. Kontrolcünün hata girişleri şu şekilde tanımlanmıştır;

$U_{\theta hata}$ = Konum Hatası = (İstenilen – Gerçekleşen) (5.1)

$U_{\eta hata}$ = Titreşim Hatası = (İstenilen – Gerçekleşen) (5.2)



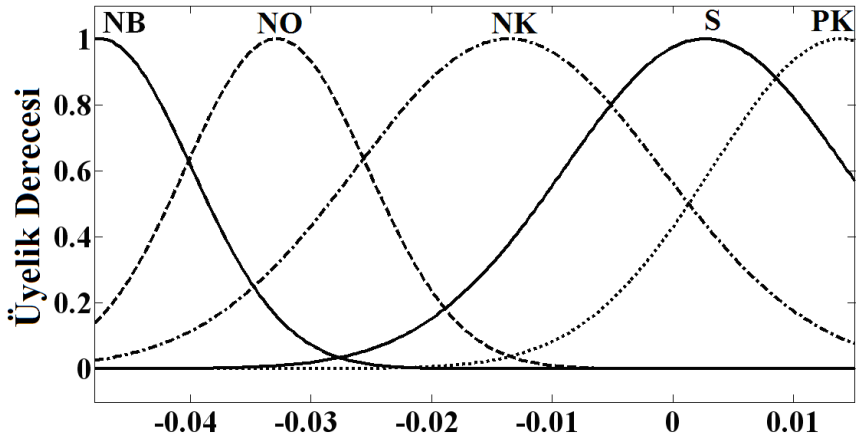
Şekil 5.3 Konum hatası girişi için üyelik fonksiyonları.

Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcü girişleri için belirlenen üyelik fonksiyonları Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'de verilmiştir. Her iki hata girişi için beş dilsel değişken ifadesi kullanılmıştır. Dilsel değişkenler *sıfır (S), pozitif küçük (PK), pozitif orta (PO), pozitif büyük (PB)* ve *pozitif büyük büyük (PBB)* şeklinde ifade edilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının dağılımı yapay sinir ağı ile belirlenmiş olup, sayısı ve şekli kontrolcü performansına göre kullanıcı tarafından seçilmiştir.

Tablo 5.1'de yavaş alt sistem kontrolcü için hazırlanan kural tabanı görülmektedir. Kural sayısı 10 olarak tespit edilmiştir.Ancak Sugeno tipinde bir yapıya sahip olan kontrolcünün çıkışları üyelik fonksiyonları şeklinde değil sabit değerler olarak hesaplanmıştır. Çıkış değerlerinin tespitinde yapay sinir ağı tabanı kullanılmıştır. Kurallardan bir kısmı şu şekilde açıklanabilir:

Eğer $U_{\theta hata}$ = sıfır (S) ise o zaman çıkış = V_{Y1}'dir. (5.3)

Eğer $U_{\eta hata}$ = negatif büyük (NB) ise o zaman çıkış = V_{Y6}'dır. (5.4)



Şekil 5.4 Sehim hatası girişi için üyelik fonksiyonları.

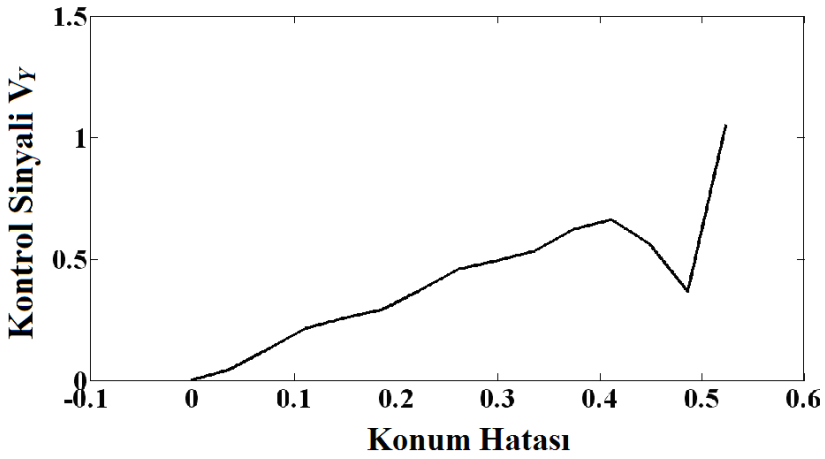
Tablo 5.1 Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcü kural tabanı.

	Konum Hatası ($U_{\theta hata}$)				
	S	**PK**	**PO**	**PB**	**PBB**
Kontrol Sinyali (V_Y)	V_{Y1}	V_{Y2}	V_{Y3}	V_{Y4}	V_{Y5}

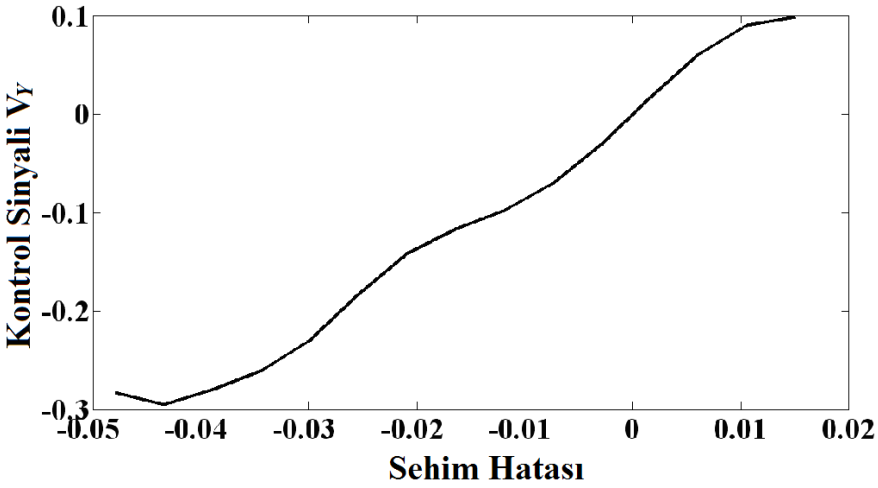
	Sehim Hatası ($U_{\eta hata}$)				
	NB	**NO**	**NK**	**S**	**PK**
Kontrol Sinyali (V_Y)	V_{Y6}	V_{Y7}	V_{Y8}	V_{Y9}	V_{Y10}

Hiyerarşik mantığının bulanık kontrolcünün kural tabanını indirgemesi ile işlem süreci azalmış ve kuralların yeni verilere göre değiştirilmesi daha kolay olmuştur. Yavaş alt sistem bulanık mantık kontrolcünün girişlerine karşılık çıkışların değişimi Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da

verilmiştir. Kontrolcü çıkışı direk olarak elastik kolun servo motoruna etki ettiği için kontrolcü çıkışı voltaj olarak alınmıştır. Son olarak bulanık mantık kontrolcünün durulaştırma metoduna karar verilmiştir. Ağırlıkların ortalaması durulaştırma metodu ile bulanık girişler durulaştırılmıştır.



Şekil 5.5 Konum hatası ile kontrol sinyalinin (V_Y) değişimi.

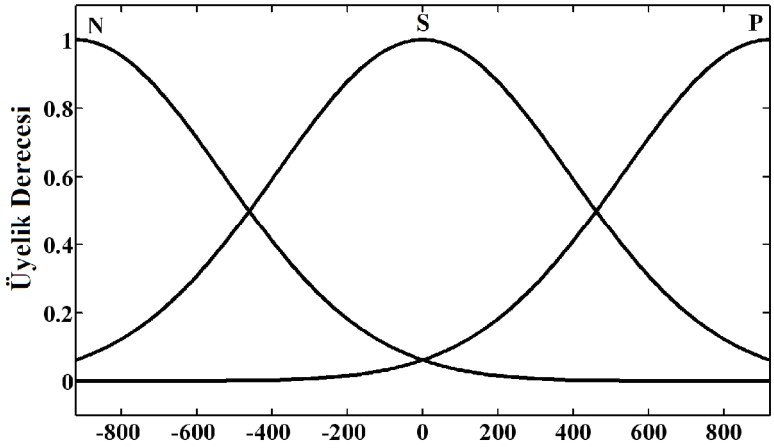


Şekil 5.6 Sehim hatası ile kontrol sinyalinin (V_Y) değişimi.

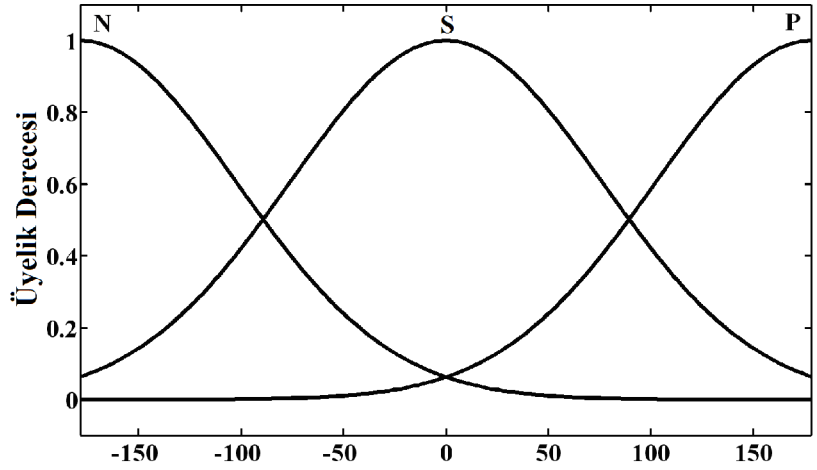
5.1.3 Hızlı Alt Sistem Bulanık Mantık Kontrolcü

Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcü de yavaş alt sistem kontrolcü gibi çok giriş tek çıkışlı (ÇGTÇ) bir kontrolcüdür. Bu kontrolcünün çıkış sinyali V_H olarak adlandırılmıştır. Her iki kontrolcünün çıkışları toplanmış toplam kontrol sinyali V_T elde edilmiştir. Böylelikle her iki kontrolcünün etkisi sistem cevabına yansımaktadır. Hızlı alt sistem kontrolcünün en önemli özelliği kontrol şemasında geri besleme hattında kullanılmasıdır. Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcü girişleri için belirlenen üyelik fonksiyonları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'de verilmiştir. Her iki giriş için üç dilsel değişken ifadesi kullanılmıştır. Dilsel değişkenler *negatif (N), sıfır (S)* ve *pozitif (P)* şeklinde ifade edilmiştir. Üyelik fonksiyonlarının dağılımı

yapay sinir ağı ile belirlenmiş olup, sayısı ve şekli kontrolcü performansına göre kullanıcı tarafından seçilmiştir.



Şekil 5.7 Konum açısal hız $(\dot{\theta})$ girişi için üyelik fonksiyonları.



Şekil 5.8 Sehim açısal hız $(\dot{\eta})$ girişi için üyelik fonksiyonları.

Hızlı alt sistem kontrolcü için belirlenen kural tabanı Tablo 5.2'de verilmiştir. Kontrolcü performansına göre dokuz kural belirlenmiştir. Kontrolcü çıkışları yavaş alt sistem kontrolcü çıkışları gibi sabit voltaj değerleridir.

Tablo 5.2 Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcü kural tabanı.

		Konum Açısal Hızı $(\dot{\theta})$		
		N	**S**	**P**
Sehim Açısal Hızı $(\dot{\eta})$	**N**	V_{H1}	V_{H2}	V_{H3}
	S	V_{H4}	V_{H5}	V_{H6}
	P	V_{H7}	V_{H8}	V_{H9}

Kurallardan bir kısmı şu şekilde açıklanabilir:

Eğer $\dot{\theta}$ = sıfır (S) ve $\dot{\eta}$ = negatif (N) ise o zaman çıkış = V_{H2}'dır. (5.5)

5.1.4 Durulaştırma İşlemi

Bulanık mantık kontrolcü kullanıldığında kontrolcüyü oluşturan tüm kurallardan doğru olanlar ateşlenir. Durulaştirma işlemi doğru çıkış üyelik fonksiyonlarını kullanarak kontrol çıkış yüzeyini belirler. Durulaştırma kontrol sinyalini gerçek kontrolcü çıkışına dönüştürür. Yani bulanık girişlere karşılık gelen çıkışları durulaştırır. Sugeno tip bulanık mantık kontrolcüde ağırlıkların ortalaması (wtaver) ve ağırlıkların toplanması (weighted sum) olarak ifade edilen iki türde durulaştırma metodu kullanmak mümkündür. Sugeno tip bulanık mantık sisteminde kural şu şekilde tanımlanır:

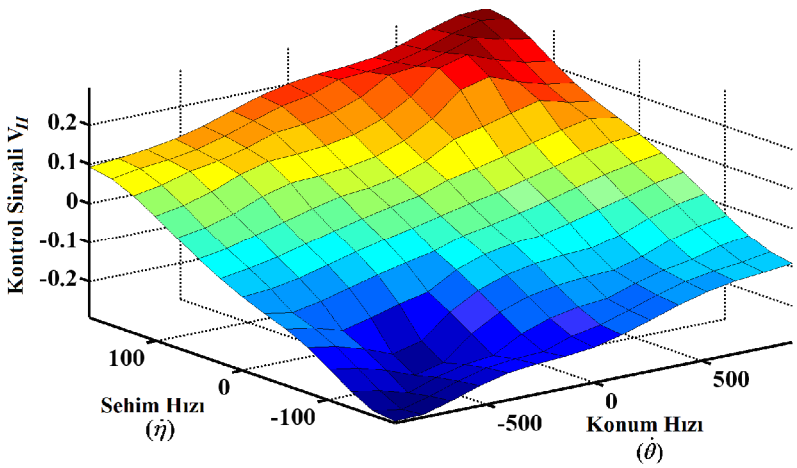
"*Eğer Giriş1 x ve Giriş 2 y ise o zaman Çıkış z = ax + by + c*" şeklindedir.

Sıfır düzey sugeno modelde çıkış z sabit değerdir. (a = b = 0). Her kuralın çıkışı z_i, kuralın ateşleme kuvveti w_i ile ağırlıklaştırılır. Örneğin "VE" ile oluşruluşmuş iki girişli bir kuralda ateşleme kuvveti w_i şu şekilde ifade edilir;

$w_i = VE\ Methot\ (F1(x), F2(y))$ (5.6)

Burada $F_{1,2}(.)$ girişlerin üyelik fonksiyonudur. Kontrolcü çıkışı ise tüm kural çıkışlarının ağırlıklarının ortalamasıdır. Bu ise aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{N} w_i z_i}{\sum_{i=1}^{N} w_i} \quad (5.7)$$



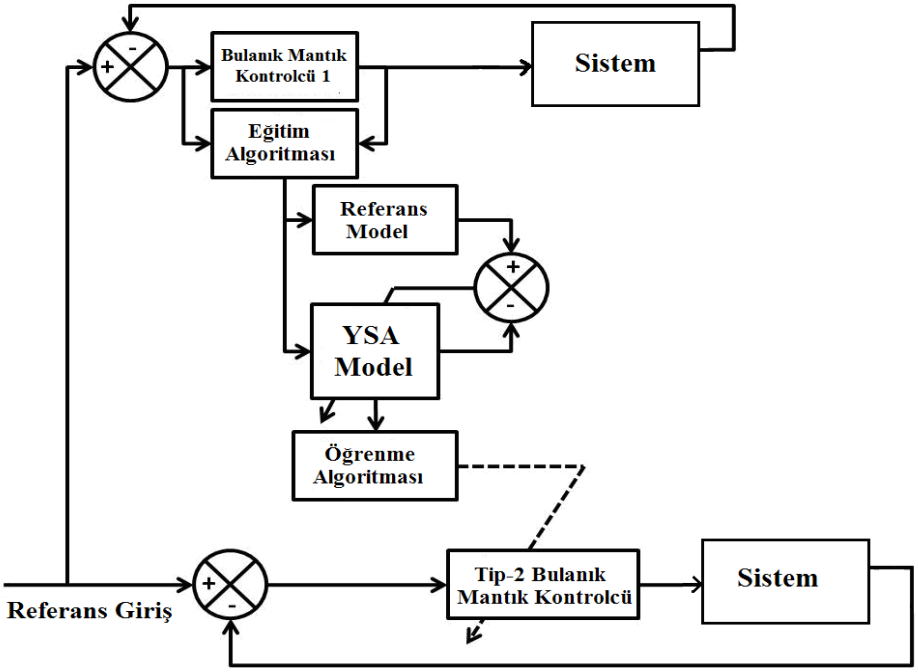
Şekil 5.9 Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcü kontrol yüzeyi.

Bu denklemde u gerçek çıkışı, N kural sayısını ifade etmektedir. Hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcüde yavaş alt sistem kontrolcüde ki gibi ağırlıkların ortalaması

(wtaver) durulaştırma metodu kullanılmıştır. Hızlı alt sistem kontrolcünün ağrılıkların ortalaması durulaştırma metodu ile elde edilen kontrol yüzeyi Şekil 5.9'da verilmiştir.

5.2. Adaptif Ağ Tabanlı Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı

Sistemin kontrolü için tasarlanan kontrolcülerden bir diğeri ise adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcüdür. Bu kontrolcü tasarımından dolayı farklı bir yapıya sahiptir. İki ayrı adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcünün birleştirilmesi ile elde edilen adaptif ağ tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü ***MATLAB/ANFIS*** yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.

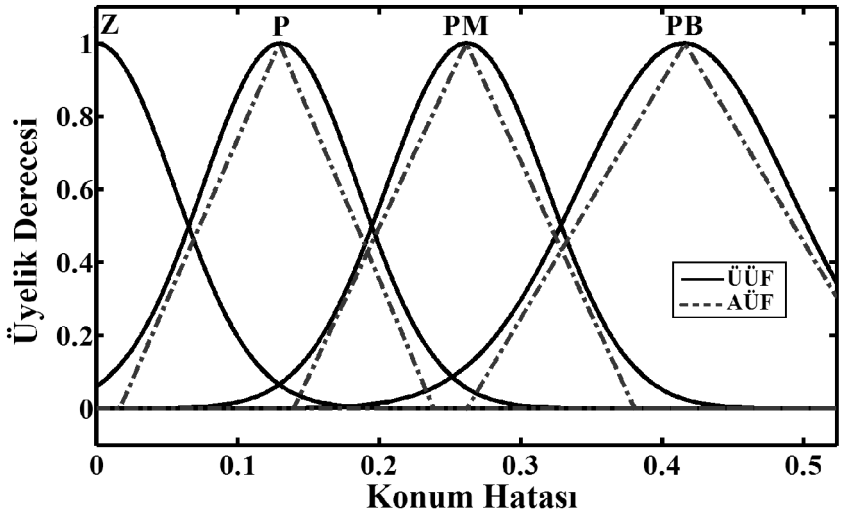


Şekil 5.12 Adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrol şeması.

İlk olarak ***ANFIS*** yazılımı ile Sugeno tipinde iki bulanık mantık kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Bu kontrolcülerin üyelik fonksiyonlarının şekli üçgen ve gauss olarak belirlenmiştir. Öncelikle üçgen tipi üyelik fonksiyonlu bulanık mantık kontrolcü tasarlanmış ve sistemin kontrolünde kullanılmıştır. Bu kontrolcü önceki bölümde anlatılan hiyerarşik mantığında ileri besleme hattında kullanılan PID kontrolcünün giriş çıkış verileri kullanılarak tasarlanmıştır. Gauss tipinde üyelik fonksiyonuna sahip bulanık mantık kontrolcü ise birinci bulanık mantık kontrolcünün giriş çıkış verelerine göre tasarlanmıştır. Her iki kontrolcünün üyelik fonksiyonları ***MATLAB/Fuzzy Logic*** yazılımında düzenlenmiş ve daha sonra tek bir kontrolcü elde edilmiştir. Yeni tasarlanan kontrolcü Sugeno tipinde bir yapıya sahip olup ***aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü*** olarak adlandırılmıştır. Kontrolcünün en önemli

özelliği hem üçgen hem de gauss tipinde üyelik fonksiyonlarına sahip olması ve her iki kontrolcünün de fiziksel özelliklerine sahip olmasıdır. Şekil 5.12'den görüldüğü gibi aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcü sistemin kontrolünde hiyerarşik mantığından farklı olarak ileri besleme hattında kullanılmıştır.

Adaptif yapay sinir ağı tabanlı aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcünün girişi konum hatası olarak belirlenmiştir. Şekil 5.13'de kontrolcünün üyelik fonksiyonları ve dilsel değişken ifadeleri verilmiştir. Kullanılan dilsel değişkenler sırası ile *sıfır(S), pozitif(P), pozitif orta (PO)* ve *pozitif büyük (PB)* şeklinde tanımlanmıştır. Şekil 5.13'de görüldüğü gibi üst üyelik fonksiyonlarının şekli gauss, alt üyelik fonksiyonlarının şekli ise üçgen olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.13 Konum hatası girişi için üyelik fonksiyonları.

Tip-2 bulanık mantık kontrolcünün kural tabanında bulunan kurallar ;

Eğer konum hatası ($U_{\theta hata}$) sıfır (S) ise o zaman kontrol voltajı çıkışı CV_1'dir.

Eğer konum hatası ($U_{\theta hata}$) pozitif 1(P_1) veya pozitif 2 (P_2) ise o zaman kontrol voltajı çıkışı CV_2'dir.

Eğer konum hatası ($U_{\theta hata}$) pozitif orta 1(PO_1) veya pozitif orta 2 (PO_2) ise o zaman kontrol voltajı çıkışı CV_3'dür.

şeklindedir.

Bu kurallarda CV_i *(i = 1,2...)* sabit çıkış değerleridir. *Pozitif (P), pozitif orta (PO)* ve *pozitif büyük (PB)* dilsel değişken ifadeleri her iki üyelik fonksiyonunu aktif etmek için iki kısma bölünmüştür. Örnek olarak *pozitif* = $P=[P_1\ P_2]$ şeklindedir. Uyarlamalı (adaptif) tip-2 bulanık mantık kontrolcüde hiyerarşik kontrolcüde ki gibi ağırlıkların ortalaması (wtaver) durulaştırma metodu kullanılmıştır.

5.3. Performans Kriterlerinin Belirlenmesi

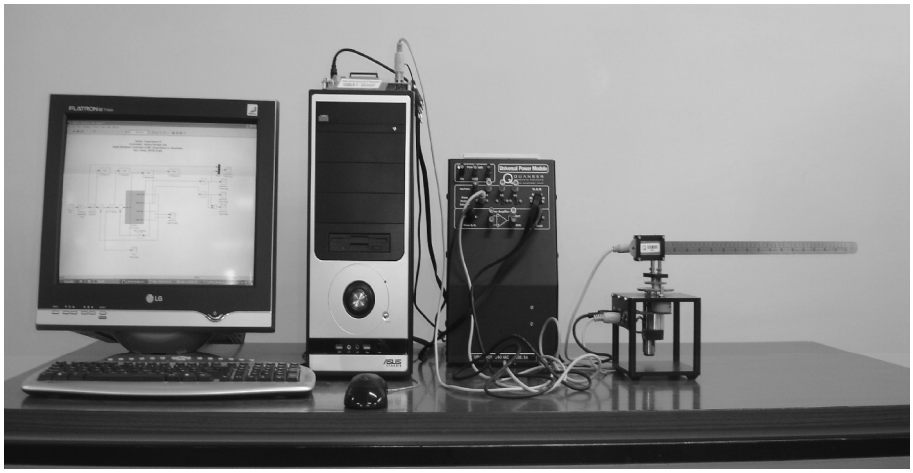
Geliştirilen kontrolcülerin kullanılması durumunda sistem performansını değerlendirmek amacı ile performans kriterleri belirlenmiştir. Performans kriterleri literatürde bulunan benzer çalışmalara ait sonuçlar kullanılarak elde edilmiştir. Hem elastik uzuvlu robot kolu hem de taşımış olduğu sarkacın salınımı için literatürdeki kaynaklardan yararlanılarak oluşturulan performans kriterleri Tablo 5.3'de verilmiştir. Tabloya göre konum ve sehim hatası değerleri elastik uzuvlu sistemlerin kontrolü üzerine yapılan çalışmalardan elde edilmiştir (Arısoy ve ark. 2005, Zhang ve ark. 2005, Feliu ve ark. 2005, Tian ve ark. 2005,Surdhar ve ark. 2003, Kamalasadan ve ark. 2004). Sarkaç salınım açıları ise kaynak araştırması kısmında verilen rijit ve elastik uzuvlu kolların ucuna asılmış sarkaç türü sistemlerden elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir (Çiçek ve ark. 2002, Yaman ve ark. 2003, Takagi ve ark. 2003, Maczynski ve ark.2003, Çuvalcı 2000, Chang ve ark. 2008).

Tablo 5.3 Performans Kriterleri.

Referans Konum Hatası (θ_{hata})	$\theta_{hata} = 0^0$
Referans Sehim Hatası (η_{hata})	$\eta_{hata} = \pm 1^0$
Referans Sarkaç Salınım Açıları, (α, ϕ, φ)	$\alpha \le 0^0, \phi \le 3^0, \varphi \le 3^0$

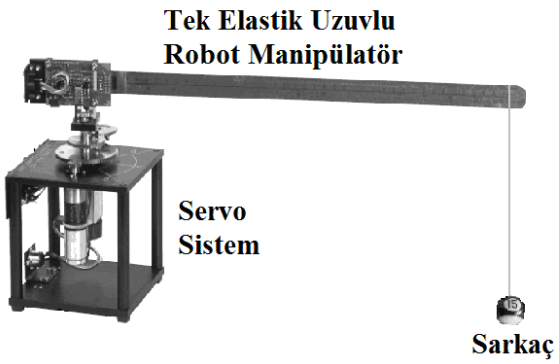
6. DENEY DÜZENEĞİ VE ÖZELLİKLERİ

Çalışmada ilk olarak sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin simülasyonları gerçekleştirilmiş daha sonra simülasyonlardan elde edilen bilgiler ışığında aynı işlemler deney düzeneği kurularak tekrarlanmıştır. Simülasyonların yapılmasında ki amaç elastik kolun ve sarkacın hareketlerini tespit etmek ve uygulanacak kontrollerin sistem üzerindeki etkisini, karşılaşılacak problemleri deneysel çalışmalardan önce tayin etmektir. Böylelikle tasarlanan kontrolcülerin performanslarına göre deneysel çalışmalar hız kazanmıştır. Simülasyonların gerçekliliği ise deneysel çalışmalar ile doğrulanmış, farklılıklar ortaya konulmuştur. Sarkaç hareketinin simülasyonlarla önceden tespit edilmesi gerçek sistemin kontrolünde oldukça faydalı olmuştur. Deneysel sistemde sarkacın nasıl hareket ettiği bilgisi ve kontrolcüye geri beslemesi olmadığı için sistemin salınım kontrolünü yapmak zorlaşmaktadır. Gerçek sistemde kullanılan kontrolcülere sarkaç hareketinin geri beslemesi yapılmadığı için kolun dönme ve durma esnasında sarkaç hareketinin oldukça fazla olması istenilen hedeflere ulaşılmasında engel teşkil etmektedir. Deneysel çalışmalarda sarkaç salınımları, görüntü işleme metodu tespit edilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 6.1 Tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin deney düzeneği.

Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin deney düzeneği Quanser firmasına ait deney düzeneği kullanılmıştır (Tınkır ve ark. 2007). Şekil 6.1'de söz konusu deney düzeneği görülmektedir. Daha sonra elastik kolun uç noktasına bir tel ile bağlanmış ucunda seramik malzemeden yapılmış bir top bulunan sarkaç sistemi oluşturulmuştur. Şekil 6.2'de gerçek sarkaç taşıyan elastik kol sistemi görülmektedir.



Şekil 6.2 Sarkaç taşıyan elastik kol sistemi.

Deney düzeneğinde yer alan elastik kol ince paslanmaz çelikten imal edilmiş ve kolda meydana gelen titreşimler çubuğun uç kısmına yerleştirilmiş olan sensör (strain gage) ile ölçülmektedir. Sensör sinyali çıkışı analog olup doğrudan çubuğun uç salınımı yani titreşimi ile orantılıdır. Sensör uç salınımının her bir inçine (1 inch = 2.54 cm.) karşılık bir volt çıkış sinyali ile kalibre edilmektedir. Elastik kol bir DC servo motor (Quanser SRV02-ET) bağlı olup motor etkisi ile yatay düzlemde dönme hareketi sergilemektedir. Servo düzeneği ile motorun açısal hızı ve konumu kontrol edilebilmektedir. Servo sisteme gönderilen sinyaller ve servo sistemden geri beslenen sinyaller Quanser UPM 2405 güç modülü ile sağlanmaktadır. Daha sonra bu sinyaller dijital sinyale dönüştürülmekte ve sistemin kontrolünü sağlayan bilgisayara Quanser MultiQ PCI kartı ile aktarılmaktadır. Sistemin online kontrolü bilgisayar üzerinden MATLAB/Simulink yazılımı gerçekleştirilmektedir. MATLAB/Simulink yazılımı ile online kontrolün gerçekleştirilmesi ise yine Quanser firması tarafından gerliştirilen WinCon yazılımı ile yapılmaktadır.

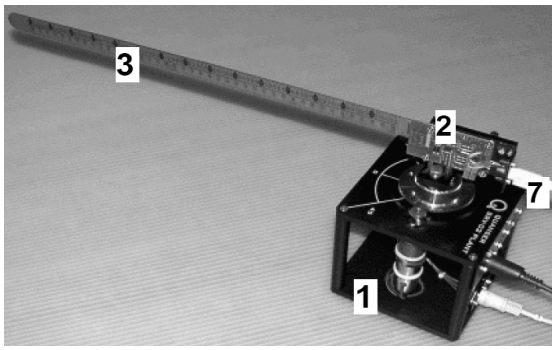
Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör deney düzeneğini oluşturan parçalar ;

- Bilgisayar, MATLAB/Simulink ve Quanser WinCon yazılımı.
- Quanser UPM 2405/1503 güç modülü.
- Quanser MultiQ PCI/MQ3 kartı.
- Quanser SRV02-E(T) servo sistemi.
- Quanser FLEXGAGE– Döner elastik kol modülü ve sarkaç sistemi.

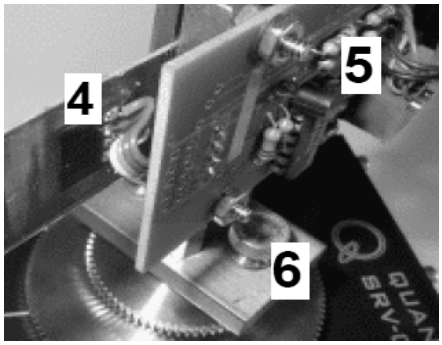
şeklindedir. Quanser SRV02-E(T) servo sistemi ve Quanser FLEXGAGE– döner elastik kol modülü sistem özellikleri Tablo 6.1, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’ de verilmiştir. Tablo 6.2’de bu modüllerdeki parçaların özellikleri verilmiştir.

Tablo 6.1 Sistem elemanları.

1	Quanser SRV02-E(T) servo sistemi	**5**	Sensör (Strain gage) devresi
2	Quanser FLEXGAGE– Döner elastik kol modülü	**6**	Kanatlı vida
3	Elastik kol	**7**	Sensör bağlayıcı
4	Sensör (Strain gage)		



Şekil 6.3 Elastik kol modülü.



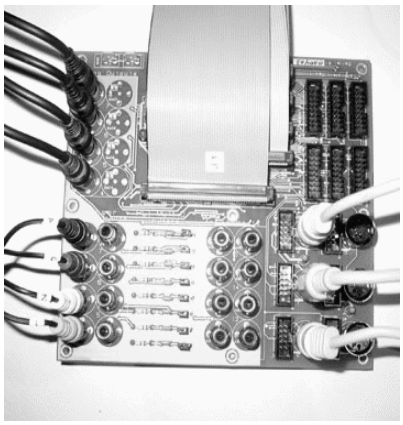
Şekil 6.4 Starin gage modülü.

Tablo 6.2 Modül elemanlarının özellikleri.

Özellikler	**Değer**	**Birimi**
Modül boyutları	48x2	cm^2
Elastik kol uzunluğu	30	cm.
Strain gage gücü	±12	Volt
Strain gage ölçüm aralığı	±5	Volt
Strain gage kalibrasyon kazancı	1	Volt/İnç
Elastik kol ağırlığı	0.065	kg.
Elastik kol ataleti	0.005	kgm^2
Kol rijitliği	0.5	Nm/rad.
Doğal frekansı	3.2	Hz.



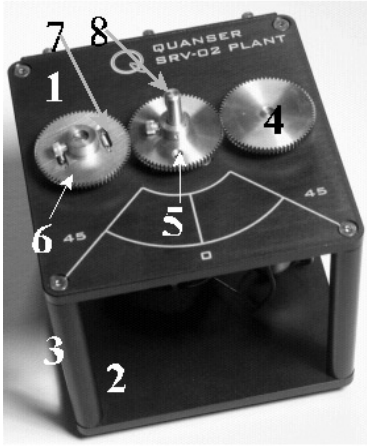
Şekil 6.5 UPM 2405/1503 güç modülü.



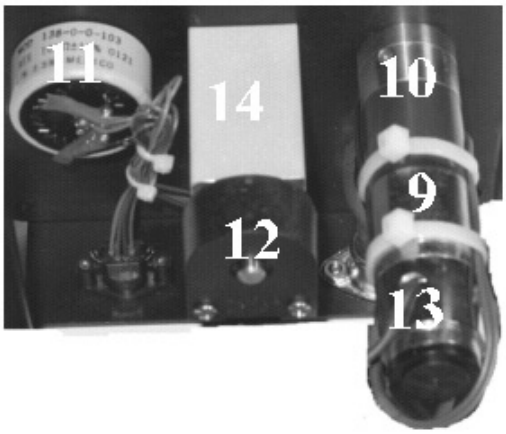
Şekil 6.7 MultiQ PCI/MQ3 kartı.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.7'de deney düzeneğinde kullanılan UPM 2405/1503 güç modülü ve MultiQ PCI/MQ3 kartı görülmektedir. Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da SRV02-E(T) servo

sisteminin farklı açıdan görünüşleri verilmiştir. Servo sistem üzerindeki elemanlar numaralandırılmış ve Tablo 6.3'de isimleri açıklanmıştır.



Şekil 6.8 SRV02-E(T) servo sistemi.

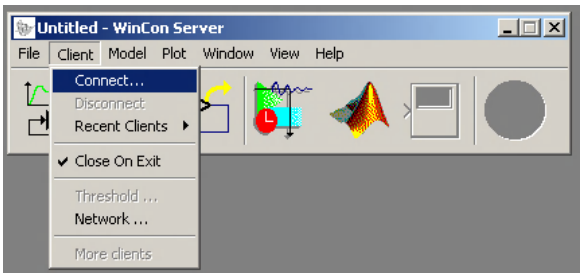


Şekil 6.9 SRV02-E(T) servo sistem (alt görünüş).

Tablo 6.3 SRV02-E(T) servo sistem elemanları.

1	Üst tabla	**9**	Motor
2	Alt tabla	**10**	Dişli kutusu
3	Destekler	**11**	Potansiyometre
4	Standart motor dişlisi-72	**12**	Enkoder
5	Çıkış dişlisi	**13**	Takometre
6	Potansiyometre karşıt dişlisi	**14**	Rulman bloğu
7	Karşıt yaylar	**15**	Potansiyometre bağlayıcı
8	Çıkış mili/yük mili		

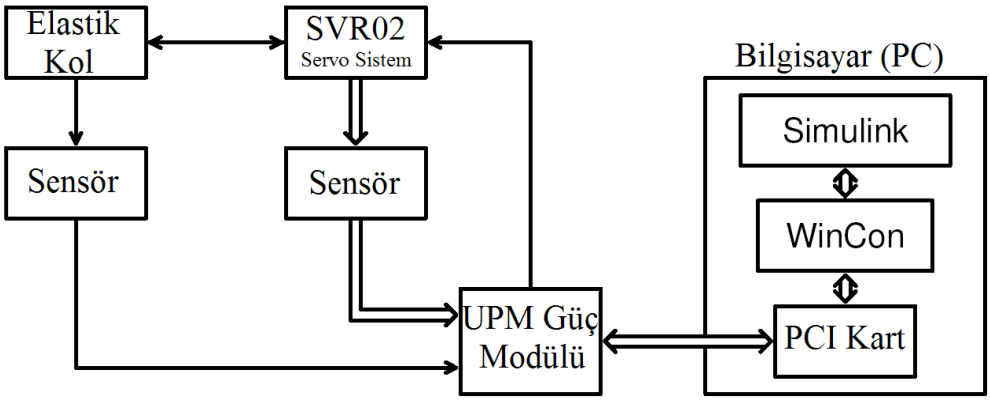
Şekil 6.10'da WinCon arayüz programından bir görünüm verilmiştir. MATLAB/Simulink yazılımında kurulan kontrol şeması ile WinCon yazılımı birlikte çalıştırılarak sistemin kontrolü gerçekleştirilmektedir. İlave edilen veya çıkartılan kontrol blokları WinCon yazılımı ile sisteme tanıtılarak birçok uygulama yapılabilmektedir.



Şekil 6.10 WinCon arayüz programı.

Şekil 6.11'de sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör deney düzeneğinin sinyal akış şeması verilmiştir.Bu şemaya göre sistemin kontrolü bir bilgisayar ile sağlandıktan

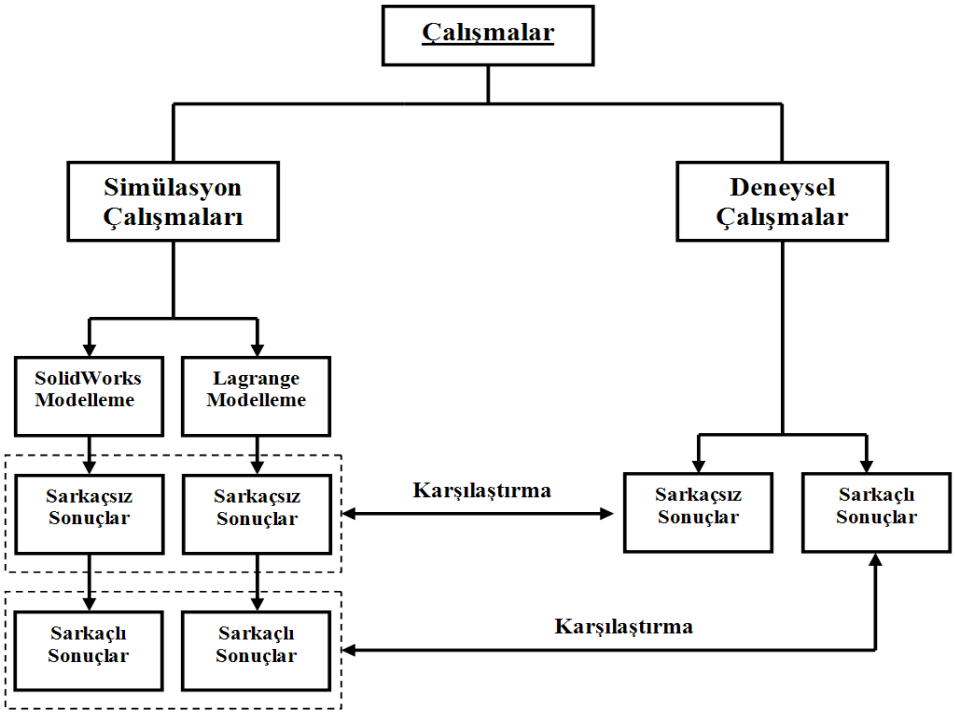
sonra PCI kartı aracılığı ile dijital sinyaller UPM güç modülüne aktarılmaktadır. Güç modülünde bulunan D/A dönüştürücü ile bu sinyaller analog sinyale çevrilmekte ve SRV02 servo sisteme aktarılmaktadır. Motorun tahrik edilmesi ile birlikte motora bağlı olan sarkaç taşıyan elastik kol sistemi hareket etmektedir. Strain gage, enkoder, potansiyometre ve takometre ile uç salınım miktarı, konum ve hız parametreleri ölçülerek UPM güç modülüne geri beslenir. Bu sinyaller A/D dönüştürücüde dijital sinyale dönüştürüldükten sonra PCI karta aktarılır. PCI karttan bilgisayara gönderilen bilgiler ile kontrolcü hatayı tespit eder ve düzeltme sinyali uygulayarak çevrimi tekrarlar. Böylelikle sistemin kapalı çevrim kontrolü gerçekleştirilmiş olur. Kapalı çevrim hata sıfıra gelinceye kadar devam eder.



Şekil 6.11 Deney düzeneği sinyal akış şeması.

7. SAYISAL ÇÖZÜMLER VE SONUÇLARI

Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sistemin konum, sehim ve sarkacın salınımlarının kontrolü için farklı türde kontrolcü tasarımları yapılmış ve bu kontrolcülerin simülasyon ve deneysel uygulamalarına yönelik performansları incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan önce yapılan simülasyon çalışmaları, sistemin hareketi ve kontrolcü performansları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Simülasyon çalışmalarının gerçekliliği deneysel çalışmalar ile doğrulanmış olup, gerçek sistemin kontrolünde faydalı model olarak kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında sistemin dinamik modelinin elde edilmesi için SolidWorks ve Lagrange modelleme teknikleri kullanılmış ve deneysel çalışmaların sonuçları ile bu modelleme tekniklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

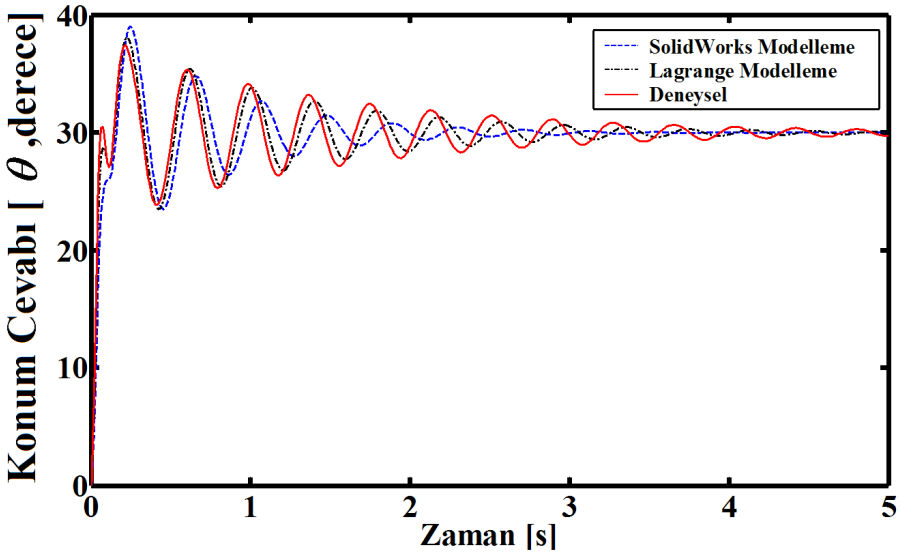


Şekil 7.1 Çalışma aşamaları

Sistemin kontrolünde PID, hiyerarşik adaptif bulanık mantık (HABM) ve tip-2 bulanık mantık (T2BM) kontrolcüler kullanılmıştır. Her kontrolcü farklı türde olup hepsinin amacı sistemin istenilen konuma getirilmesi, kolda meydana gelen sehimin sıfırlanması ve sarkaç salınımlarının minimuma indirgenmesidir. Belirlenen hedefler ve performans kriterleri doğrultusunda kontrolcülerin konum, sehim ve salınım kontrol cevapları MATLAB programı kullanılarak elde edilmiş ve şekiller ile gösterilmiştir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda izlenen safhalar Şekil 7.1'de verilmiştir.

7.1. Sarkaçsız Sistemin Kontrolsüz ve Kontrollü Sayısal Çözümleri

Çalışmada ilk olarak tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz ve kontrollü konum, uç deplasman cevapları elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin dinamik modeli Lagrange formülasyonu ve SolidWorks modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin deney düzeneği üzerinde yapılan çalışmalarla simülasyon çalışmalarından elde edilen kontrollü ve kontrolsüz konum ve uç deplasman sonuçları karşılaştırılmıştır. Daha sonra çalışmanın esas konusu olan sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrollü ve kontrolsüz davranışı yine aynı modelleme teknikleri kullanılarak simüle edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.2 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz konum cevabı. (Referans Konum = 30^0) (Sarkaçsız)

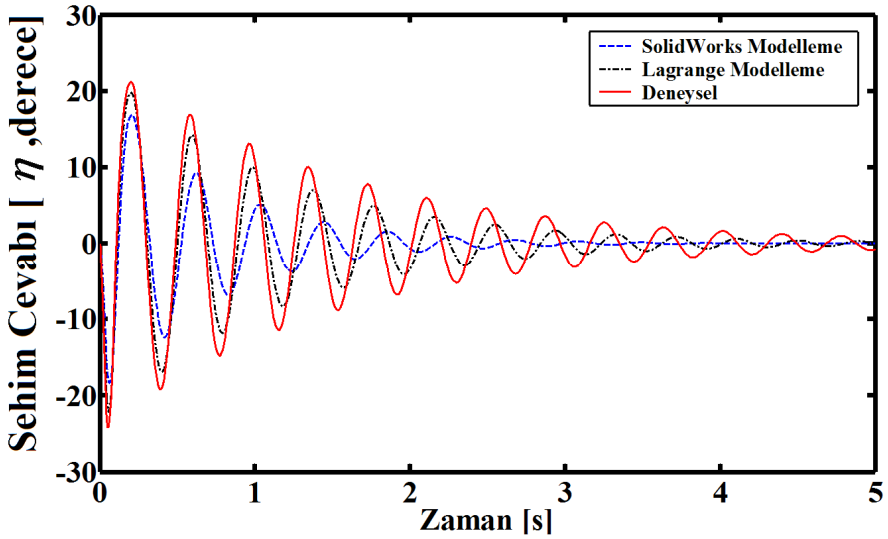
Şekil 7.2'de tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin θ için kontrolsüz kapalı çevrim konum cevabı verilmiştir. Sistemin SolidWorks modelleme ve Lagrange formülasyonu kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon ve deneysel olarak yapılan kontrolsüz konum cevabı sonuçları aynı şekil üzerinde karşılaştırılmıştır. Referans konum giriş olarak $\theta = 30^0$ basamak girişi uygulanmış ve robot kolunun herhangi bir kontrolcü etkisi olmadan gerçekleştirdiği hareket 5 saniyelik simülasyon ile ve deneysel olarak ile incelenmiştir. Şekil 7.2'de sistemin 30^0'lik konumu aştığı ve kapalı çevrim etkisi altında referans konum değerine ulaşmaya çalıştığı görülmektedir. Modelleme tekniklerine göre yapılan simülasyonların deneysel çalışmadan elde edilen sonuca yakın çıkması modelleme tekniklerinin doğruluğunu göstermektedir. Tablo 7.1'de sistemin kapalı çevrim kontrolsüz konum cevabına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Modelleme tekniklerine göre

yapılan simülasyon sonuçlarının birbirine yakın çıktığı gözlenmiştir. Deneysel olarak yapılan çalışmada ise sistemin maksimum aşma miktarının simülasyon sonuçlarına göre daha az çıktığı fakat sistemin oturma zamanı ve kalıcı durum hatasının arttığı belirlenmiştir.

Tablo 7.1 Kapalı çevrim kontrolsüz konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Kullanılan Teknikler	Maksimum Aşma Miktarı	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
SolidWorks Modelleme	9^0	0.2 sn.	3.8 sn.	0^0
Lagrange Formülasyonu	7^0	0.1 sn.	4.9 sn.	0^0
Deneysel	6^0	0.1 sn.	> 5 sn.	$> 0^0$

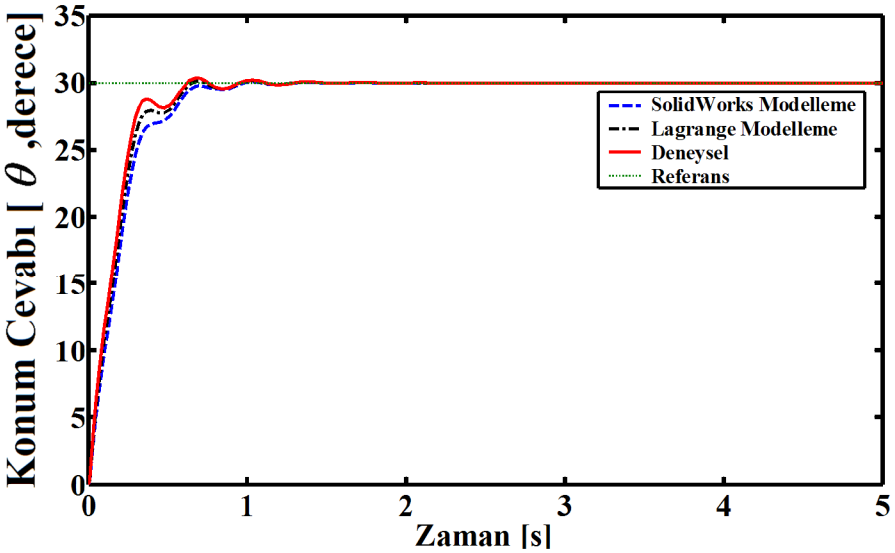
Şekil 7.3'de tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin η için kontrolsüz kapalı çevrim sehim cevabı verilmiştir. Modelleme teknikleri ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile deneysel olarak bulunan sehim sonucunun birbirine yakın olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre elastik kolda meydana gelen sehimin 5 saniye sonra sistem istenilen konuma geldiğinde sıfırlandığı titreşimlerin sönümlendiği gözlenmiştir. Deneysel yapılan çalışmada ise sistemdeki titreşimlerin azalan genlikler ile devam ettiği söylenebilir.



Şekil 7.3 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz sehim cevabı. (Sarkaçsız)

Simülasyon ve deneysel olarak yapılan çalışmada, tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kapalı çevrim konum ve sehim cevaplarına göre sistem üzerinde kontrolcü

tasarımının yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlardan sistemin konum ve sehim hatasının zamanla azaldığı görülse de başlangıçta meydana gelen konum hatası ve titreşim genliklerinin oldukça fazla olması sistemin zarar görmesini istenilen hedefleri ve kriterleri sağlamadığını göstermektedir. Bu amaçla daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi sistem üzerinde PID, hiyerarşik adaptif bulanık mantık (HABM) ve tip-2 bulanık mantık (T2BM) kontrolcülerin uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. İlk olarak PID kontrolcünün sistem üzerinde etkisi incelenmiştir. Sistemin konum ve sehim cevaplarına göre elde edilen en uygun PID kazanç parametreleri $K_p = 15$, $K_i = 2$ ve $K_d = 5$ olarak belirlenmiştir. Aynı parametreler hem simülasyon çalışmalarında hem de deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Bunu amacı ise PID kontrolcü etkisinin simülasyon ve deneysel çalışmalar üzerindeki performansını göstermektir. Aynı kazanç parametrelerinin kullanılması ile modelleme teknikleri ile elde edilen sistemin dinamik modeli ile sistemin deney düzeneği arasındaki benzerlikler ve farklılıklar belirlenmiştir. Tasarlanan PID kontrolcünün simülasyon modelleri ile gerçek sistem modeli üzerindeki performansı bu şekilde analiz edilmiş ve yorumlanmıştır.



Şekil 7.4 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin PID kontrollü konum cevabı. (Sarkaçlı)

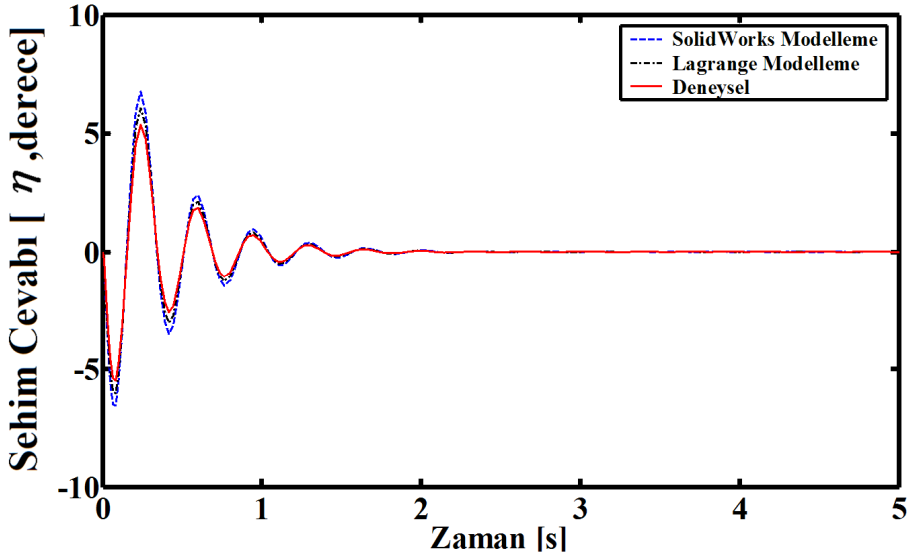
Tek elastik uzuvlu robot kolunun simülasyon ve deneysel olarak elde edilen PID kontrollü konum cevabı Şekil 7.4'de verilmiştir. PID kontrolcünün SolidWorks ve Lagrange modelleme tekniklerine göre yapılan simülasyonlar da ve deneysel çalışmada oldukça etkili olduğu görülmektedir. Deneysel olarak gerçekleştirilen PID kontrol uygulamasında sistemin yükselme zamanının oldukça iyi olduğu fakat sistemin hızlı hareket etmesi sonucu referans konumu simülasyon sonuçlarına göre geç yakaladığı ve başlangıçta meydana gelen konum hatalarının 1.8 saniye sonra sıfırlandığı gözlenmiştir. Sistemin PID kontrollü konum cevabı

(Şekil 7.2) kontrolsüz konum cevabı (Şekil 7.4) ile karşılaştırıldığında PID kontrolcü performansının sistem üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 7.2'de sistemin PID kontrollü konum cevabına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Bu sonuçlara göre deneysel çalışmada maksimum aşma miktarının simülasyon sonuçlarına göre daha fazla olduğu fakat yükselme zamanının azaldığı görülmektedir. Sistemin oturma zamanının modelleme tekniklerine göre yapılan simülasyon çalışmaları ile aynı olması modelleme tekniklerinin doğruluğunu göstermektedir. Kalıcı durum hatasının hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda sıfır olması ise PID kontrolcünün kararlılığını ifade etmektedir.

Tablo 7.2 PID kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

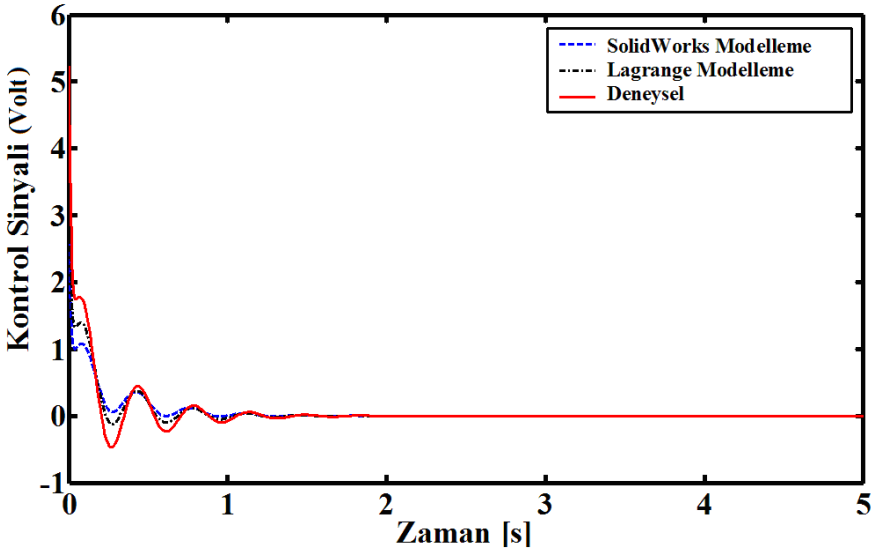
Kullanılan Teknikler	**Maksimum Aşma Miktarı**	**Yükselme Zamanı**	**Oturma Zamanı**	**Kalıcı Durum Hatası**
SolidWorks Modelleme	0^0	0.5 sn.	1.3 sn.	0^0
Lagrange Formülasyonu	0^0	0.5 sn.	1.4 sn.	0^0
Deneysel	0.2^0	0.4 sn.	1.8 sn.	0^0

Şekil 7.5'de sistemin simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen PID kontrollü sehim cevapları verilmiştir. Şekil 7.3 ile karşılaştırıldığında PID kontrol etkisi altında kolda meydana gelen titreşimlerin oldukça azaldığı ve robot kolu istenilen konuma geldiğinde titreşimlerin sönümlendiği gözlenmiştir.



Şekil 7.5 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin PID kontrollü sehim cevabı. (Sarkaçlı)

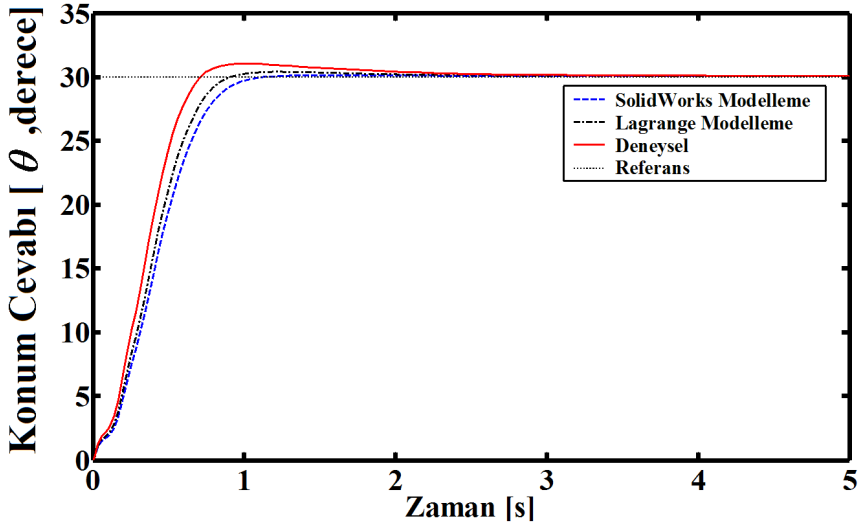
Deneysel çalışmada kolda meydana gelen sehim miktarının maksimum 5.1^0 olduğu ve sistemin kontrolcü etkisi olmadan sergilediği maksimum titreşim genliği ile arasında 14.9^0 fark olduğu söylenebilir. Simülasyon ve deneysel sonuçların sehim grafiği üzerinde aynı çok yakın çıkması simülasyon çalışmalarının deneysel çalışmalara benzerliğini göstermektedir. Şekil 7.6'da simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılan PID kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyali-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre deneysel çalışmada kullanılan PID kontrolcünün sistemi istenilen konuma getirmesi için uygulamış olduğu kontrol sinyali daha fazladır.



Şekil 7.6 PID kontrolcünün kontrol sinyali-zaman grafiği. (Sarkaçsız)

Sistemin PID kontrollü konum ve sehim cevaplarına göre PID kontrolcü performansının iyi olduğu fakat konum hatalarının ve titreşim genliklerinin azaltılması için farklı bir kontrolcü tasarımının yapılması gerekmektedir. Bu amaçla PID kontrolcü performansına göre hiyerarşik adaptif bulanık mantık (HABM) kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Sistemin HABM kontrollü konum cevabı Şekil 7.7'de verilmiştir. PID kazanç parametreleri değiştirilmeden HABM kontrolcünün yapay sinir ağı tabanı eğitilmiş ve buna göre HABM kontrolcü performansı irdelenmiştir. Bu şekilde kullanılan HABM kontrolcüden beklenen hedefler sistemin PID kontrollü konum ve sehim cevaplarını iyileştirmesidir. PID kontrolcü gibi HABM kontrolcüde hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda değiştirilmeden kullanılmıştır. Şekil 7.7'e göre sistemin konum cevabı grafiklerinde maksimum aşma miktarının PID kontrollü konum cevabına göre artış gösterdiği görülmektedir. HABM kontrollü sistemin istenilen konuma PID konrolcü performansına göre daha geç ulaştığı fakat konum hatalarında dalgalanmaların olmadığı tespit edilmiştir. Deneysel yapılan çalışmada

HABM kontrolcünün Şekil 7.4 ile karşılaştırıldığın da sistemin referans konum etrafında salınım yapmadığı bunun nedeninin ise Şekil 7.8'de verilen sistemin sehim cevabında meydana gelen titreşim genliklerinin azalması olarak söylenebilir. Tablo 7.3'de HABM kontrollü sistemin konum cevabına göre simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 7.7 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin HABM kontrollü konum cevabı. (Sarkaçsız)

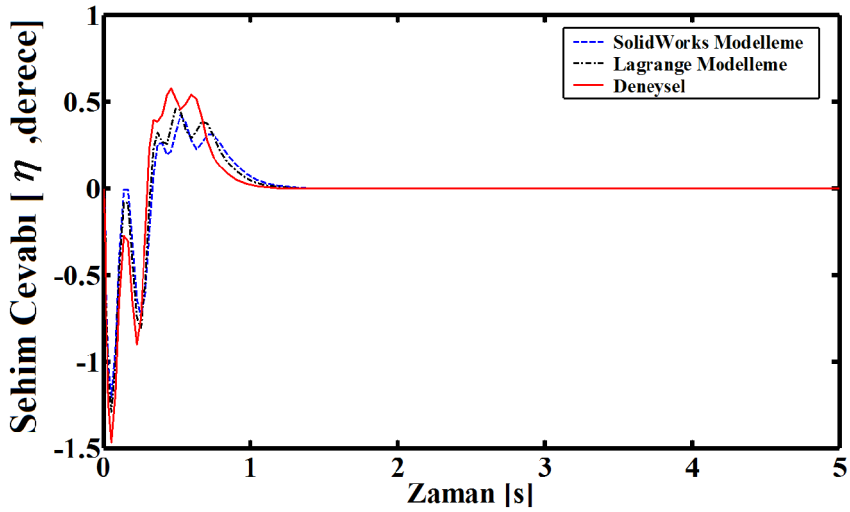
Tablo 7.3'e göre HABM kontrollü sistemin PID kontrollü konum cevabına göre oturma zamanının yükseldiği görülmektedir. Simülasyon ve deneysel çalışmalarda HABM kontrolcünün sistemin yükselme zamanını 0.1 saniye artırdığı görülmektedir.

Tablo 7.3 HABM kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Kullanılan Teknikler	Maksimum Aşma Miktarı	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
SolidWorks Modelleme	0.05^0	0.6 sn.	2.8 sn.	0^0
Lagrange Formülasyonu	0.8^0	0.6 sn.	2.9 sn.	0^0
Deneysel	1.8^0	0.5 sn.	3.1 sn.	0^0

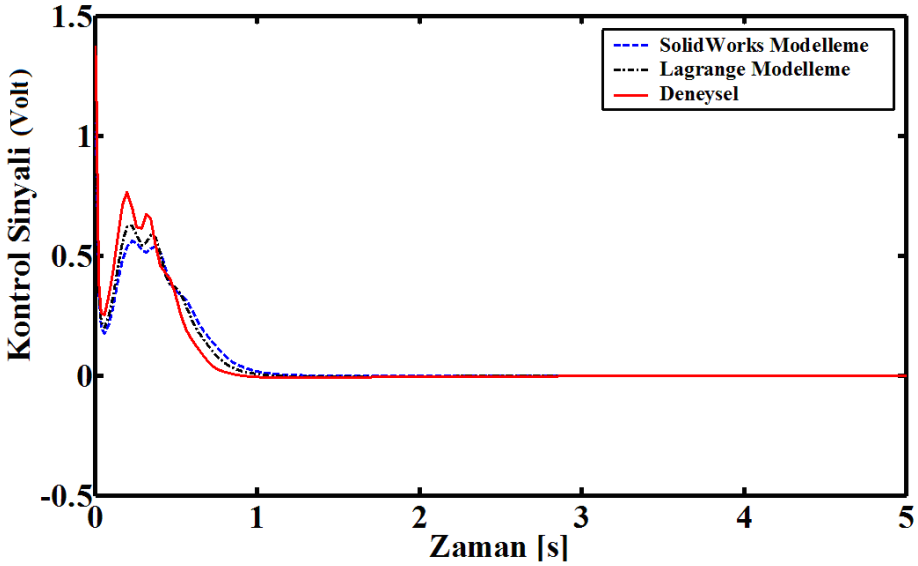
HABM kontrolcünün konum cevabı üzerindeki performansının PID kontrolcü performansına göre daha yüksek değerler sergilemesi hızlı alt sistem HABM kontrolcünün sistemin sehim cevabında oldukça etkili olduğunu göstermektedir. Yavaş ve hızlı alt sistem

olmak üzere iki ayrı bulanık mantık kontrolcünün birleşmesinden meydana gelen HABM kontrolcü sistemin sehim cevabında daha etkili performans göstermektedir.



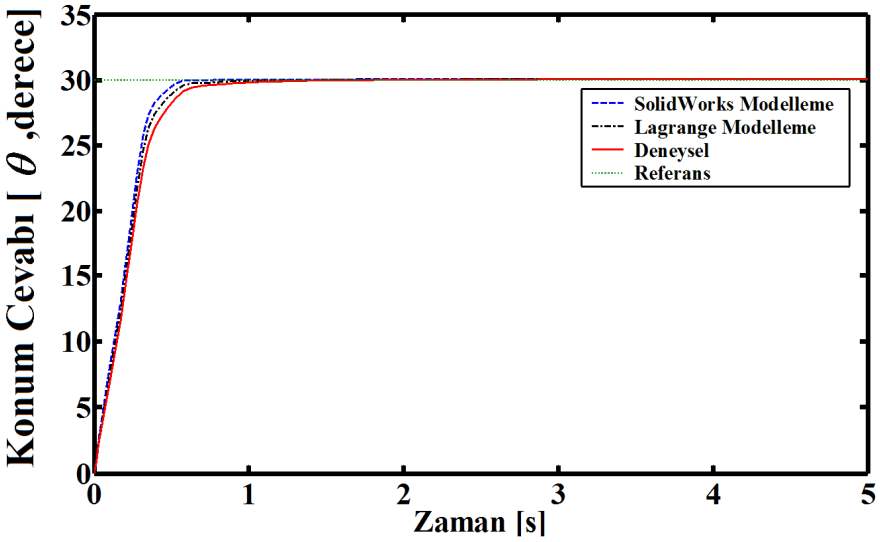
Şekil 7.8 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin HABM kontrollü sehim cevabı. (Sarkaçsız)

Şekil 7.8'de HABM kontrollü sistemin sehim cevabı grafikleri verilmiştir. Şekil 7.8'e göre elastik kolda meydana gelen sehim 0.6^0 ile -1.5^0 arasında değişen maksimum genlikte gerçekleşmektedir. PID kontrollü sehim cevabı ile HABM kontrollü sehim cevabı karşılaştırıldığında HABM kontrolcünün kolda meydana gelen titreşimleri dolayısıyla sehim miktarını oldukça düşürdüğü görülmektedir. Simülasyon ve deneysel olarak yapılan çalışmalarda HABM kontrolcünün titreşimleri yaklaşık 1.5 saniye sonra sönümlediği söylenebilir. Kolda meydana gelen titreşim genliklerinin küçük olması kolun konum kontrolünde konum hatasını düşürmüş ve kalıcı durum hatalarını yok etmiştir.



Şekil 7.9 HABM kontrolcünün kontrol sinyali-zaman grafiği. (Sarkaçsız)

Şekil 7.9'da simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılan HABM kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyali-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre çalışmalarda kullanılan HABM kontrolcünün sistemi istenilen konuma getirmesi için uygulamış olduğu kontrol sinyali PID kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyalinden daha küçüktür. HABM kontrolcünün sistemin konum ve titreşim kontrolündeki performansı PID kontrolcü performansına göre daha başarılıdır. Özellikle sistemin sehim kontrolünde HABM kontrolcünün oldukça etkili olduğu ve kolda meydana gelen titreşimleri büyük oranda azalttığı ve daha kısa zamanda sönümlediği gözlenmiştir. Deneysel yapılan çalışmada HABM kontrolcünün sistemin konum cevabında maksimum aşma miktarını artırması Tip-2 bulanık mantık (T2BM) kontrolcü uygulamasının gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. PID kontrol verilerine göre tasarlanan T2BM kontrolcünün sistemin konum kontrolü üzerindeki simülasyon ve deneysel performansı Şekil 7.10'da verilmiştir. Tek elastik uzuvlu robot kolunun T2BM kontrollü konum cevabının sistemin HABM ve PID kontrollü konum cevaplarına göre çok daha iyi olduğu görülmektedir. Şekil 7.10'a göre hem simülasyon hem de deneysel yapılan çalışmalarda T2BM kontrolcünün robot kolunu kısa sürede hedef konuma ulaştırdığı, maksimum aşma miktarının sıfır olduğu ve kolun salınımsız hareket sergilediği gözlenmiştir.



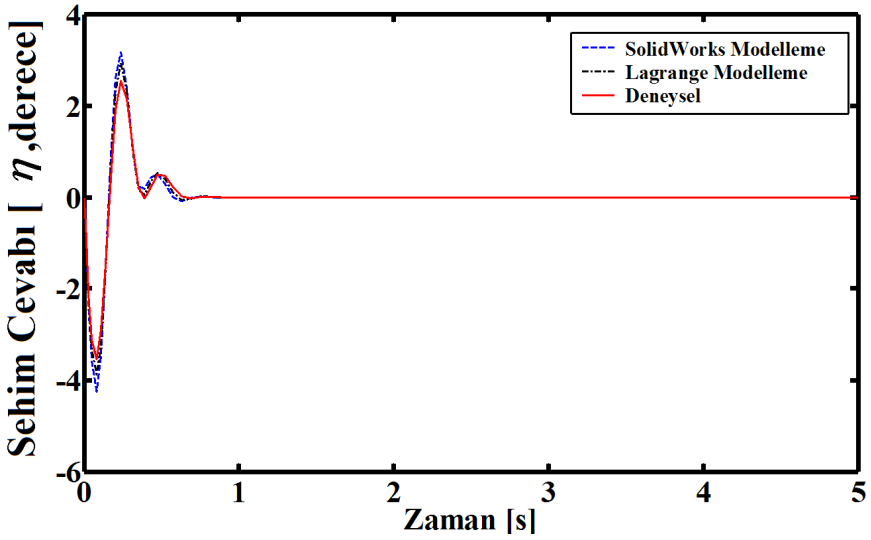
Şekil 7.10 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin T2BM kontrollü konum cevabı. (Sarkaçsız)

Tablo 7.4'de T2BM kontrollü sistemin konum cevabına göre simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Bu tabloya göre T2BM kontrolcü HABM ve PID kontrolcülere göre sistemin yükselme zamanını ile oturma zamanını büyük oranda düşürmüştür.

Tablo 7.4 T2BM kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Kullanılan Teknikler	Maksimum Aşma Miktarı	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
SolidWorks Modelleme	0^0	0.5 sn.	0.8 sn.	0^0
Lagrange Formülasyonu	0^0	0.5 sn.	1 sn.	0^0
Deneysel	0^0	0.55 sn.	1.2 sn.	0^0

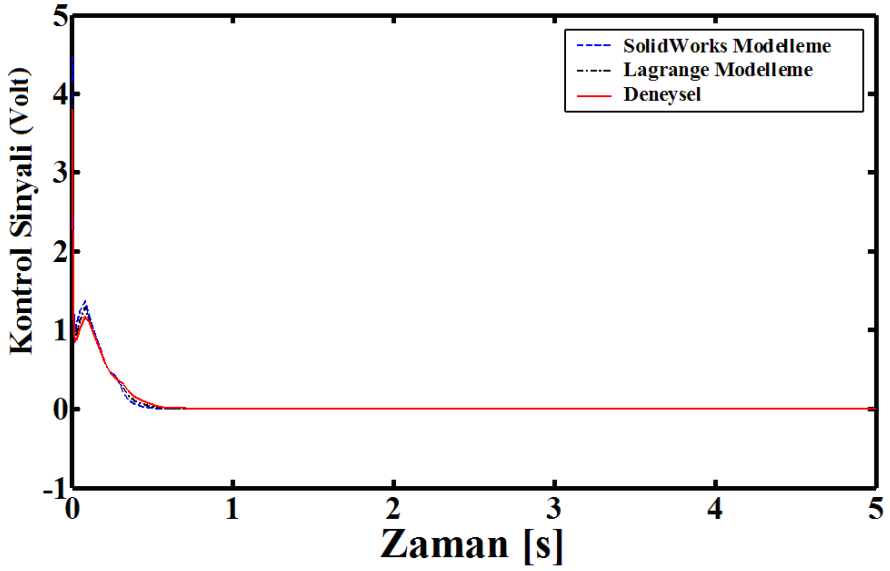
Şekil 7.11'de T2BM kontrollü sistemin sehim cevabı grafikleri verilmiştir. Şekil 7.11'e göre elastik kolda meydana gelen sehim 3.5^0 ile -4^0 arasında değişen maksimum genlikte gerçekleşmektedir. Sistemin T2BM kontrollü sehim cevabında başlangıçta kol istenilen konuma gelirken meydana gelen titreşimlerin HABM kontrolcüye göre daha yüksek genlikte olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise kolun çok hızlı bir şekilde hedef konum 30^0'ye gelmesidir. Fakat T2BM kontrolcü meydana gelen titreşimleri HABM kontrolcüye göre daha kısa zamanda sönümlemiştir. T2BM kontrolcü titreşimleri yaklaşık 0.9 saniye sonra sönümlerken HABM kontrolcüde bu zaman 1.5 saniye olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7.11 Tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin T2BM kontrollü sehim cevabı. (Sarkaçsız)

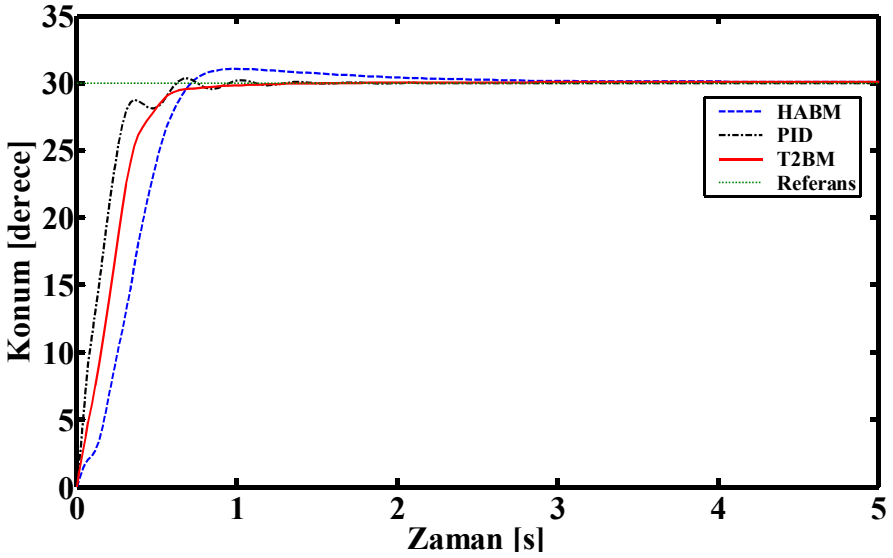
Şekil 7.12'de simülasyon ve deneysel çalışmalarda kullanılan T2BM kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyali-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafiğe göre çalışmalarda kullanılan T2BM kontrolcünün sistemi istenilen konuma getirmesi için uygulamış olduğu kontrol sinyali PID kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyalinden daha küçük ama HABM

kontrolcünün üretmiş olduğu kontrol sinyalinden daha büyüktür. T2BM kontrolcünün sistemin konum ve titreşim kontrolündeki performansı PID ve HABM kontrolcü performansına göre daha başarılıdır. Özellikle sistemin konum kontrolünde T2BM kontrolcünün oldukça etkili olduğu ve kolda meydana gelen titreşimleri büyük oranda azalttığı ve daha kısa zamanda sönümlediği gözlenmiştir.



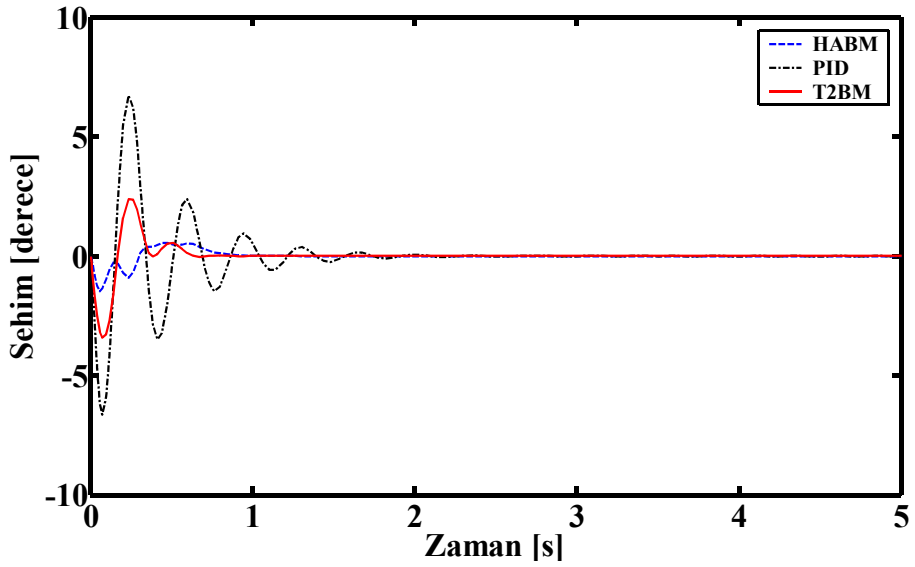
Şekil 7.12 T2BM kontrolcünün kontrol sinyali-zaman grafiği. (Sarkaçsız)

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'de tek elastik uzuvlu robot kolu deney düzeneği üzerinde uygulanan kontrolcülerin konum ve sehim grafikleri verilmiştir. Şekil 7.13'de verilen sistemin konum cevabına göre deney düzeneği üzerinde T2BM kontrolcünün PID ve HABM kontrolcülere göre oldukça iyi olduğu görülmektedir.



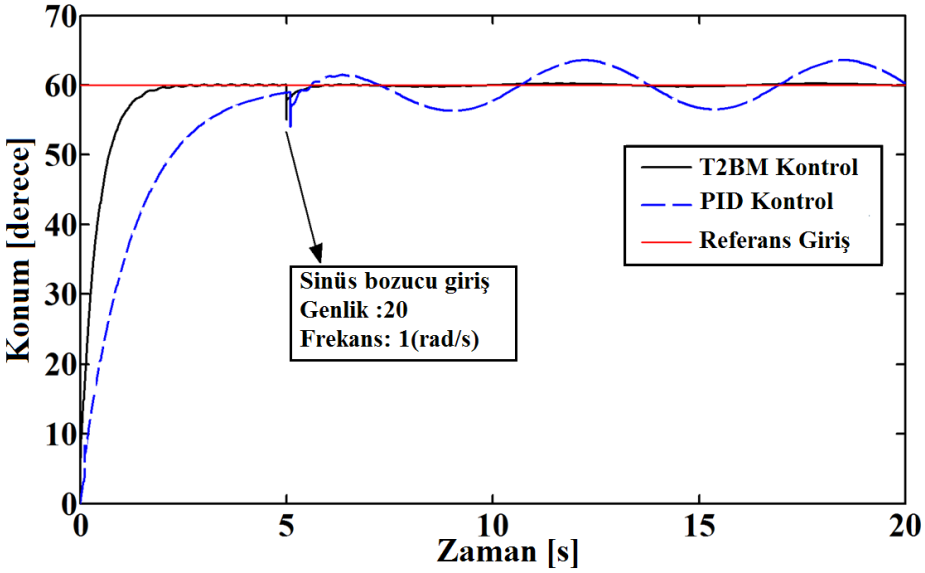
Şekil 7.13 Deneysel konum kontrolünde kontrolcülerin karşılaştırılması. (Sarkaçsız)

Şekil 7.14 elastik kolda meydana gelen titreşimlerin sönümlenmesinde HABM ve T2BM kontrolcülerin PID kontrolcüye göre daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. HABM kontrolcünün sistem üzerindeki titreşim genliklerini büyük oranda düşürdüğü fakat titreşimlerin sönümlenmesi için geçen zamanın T2BM kontrolcü performansına göre daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 7.14 Deneysel sehim kontrolünde kontrolcülerin karşılaştırılması. (Sarkaçsız)

T2BM kontrolcünün farklı giriş sinyallerine karşılık adapte olma kabiliyetini göstermek amacı ile referans konum giriş sinyali değiştirilmiş ve sisteme sinüs bozucu giriş sinyali uygulanmıştır. Referans konum sinyali 60^0 olarak belirlenmiştir. Sinüs bozucu giriş sinyali sistem harekete başladıktan 5 saniye sonra etki edecek şekilde ayarlanmıştır. Genliği 20, frekansı ise 1 (rad/s) olan sinüs bozucu giriş sinyali seçilmiştir. Şekil 7.15'de bozucu girişe ve referans konum değişikliğine karşılık T2BM kontrolcü ile PID kontrolcünün konum cevabı grafikleri verilmiştir. Buna göre T2BM kontrolcünün elastik kolu 60^0'lik konuma 1 saniye sonra getirdiği fakat PID kontrolcünün önceki simülasyon grafiklerine bakıldığında oturma zamanının değiştiği görülmektedir. Sisteme 5. saniyede bozucu giriş sinyali uygulandıktan sonra T2BM kontrolcünün yaklaşık 1 saniye sonra sistemi tekrar referans konuma getirdiği görülmektedir. PID kontrolcünün ise bozucu giriş etkisi altında konum cevabının bozulduğu ve sinüs dalgası şeklinde kalıcı durum hatası meydana getirdiği tespit edilmiştir.



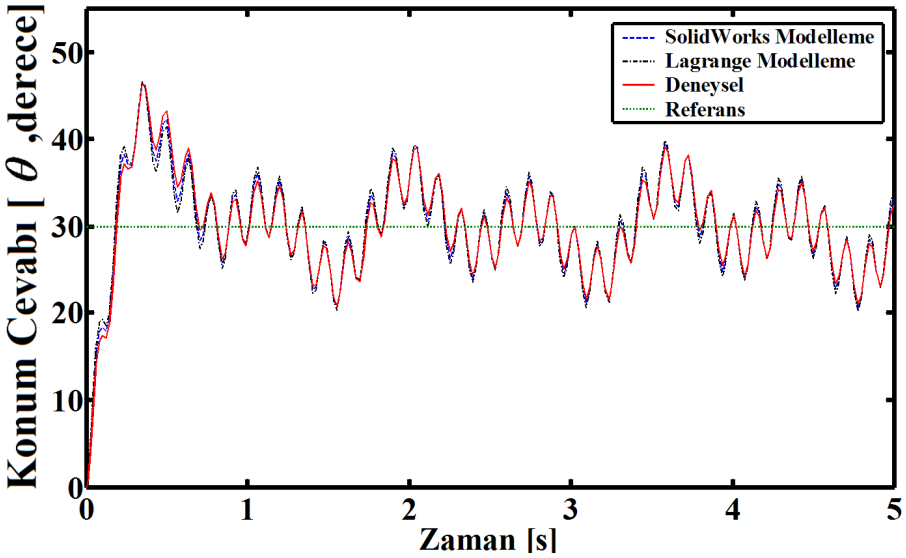
Şekil 7.15 Sistemin bozucu girişe karşılık deneysel konum kontrolü.

Çalışmanın ilk aşamasında tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz, PID, HABM ve T2BM kontrollü simülasyonları ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmalara ait sonuçlar şekil ve tablolar ile ifade edilmiş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında ise bu tezin esas konusu olan sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin simülasyonları ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yine aynı şekilde simülasyon çalışmalarında SolidWorks ve Lagrange modelleme teknikleri kullanılmış ve bu modelleme tekniklerinin sistemin kontrolsüz ve kontrollü konum, sehim ve sarkaç salınım grafikleri deneysel çalışmalardan elde edilen grafiklerle karşılaştırılıp irdelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında birinci aşamada olduğu gibi ilk olarak sistemin kontrolsüz cevapları elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Daha sonra sistem üzerinde uygulanan PID, HABM ve T2BM kontrol uygulamaları yapılmış ve kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır.

7.2. Sarkaçlı Sistemin Kontrolsüz ve Kontrollü Sayısal Çözümleri

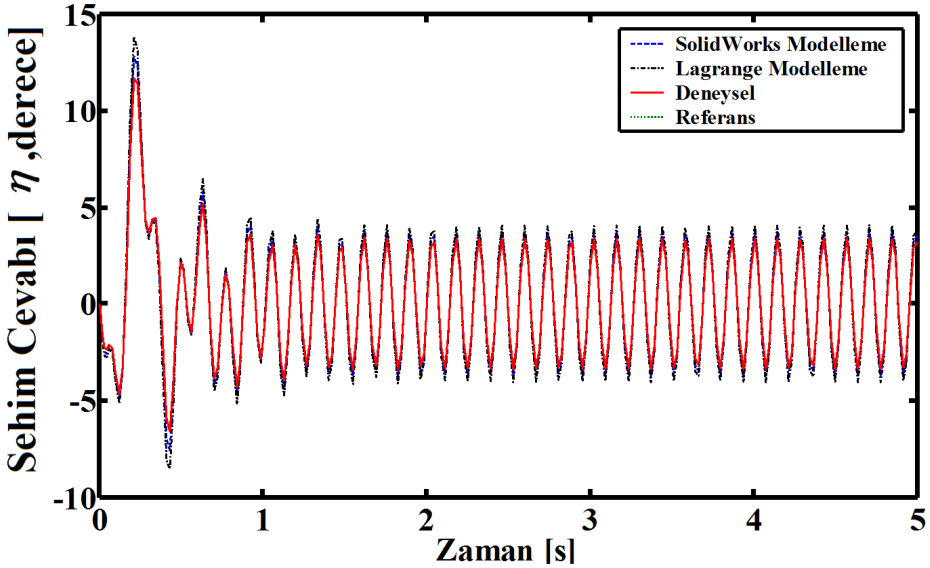
Şekil 7.16'da sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot manipülatör sisteminin simülasyonlar ve deneysel çalışmalarla yapılan kontrolsüz kapalı çevrim konum cevabı verilmiştir. Sistemde herhangi bir kontrolcü etkisi olmadan konum cevabının oldukça kötü olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise kolun uç kısmına takılan sarkacın atalet kuvvetlerinin etkisi altında düzensiz salınımlar yapmasıdır. Şekil 7.2'de ki sarkaçsız sistemin kontrolsüz konum cevabının sisteme sarkaç takıldıktan sonra oldukça değiştiği, kararsız bir şekilde sistemin referans konum değerine ulaşmaya çalıştığı görülmektedir. Referans konum etrafında meydana gelen konum hataları oldukça fazla çıkmış ve sistemin kararlılığını

bozmaktadır. Simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucunda kalıcı durum hatalarının yüksek genlikte devam ettiği sistemin kontrolcü etkisine ihtiyaç duyduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.16 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz konum cevabı.

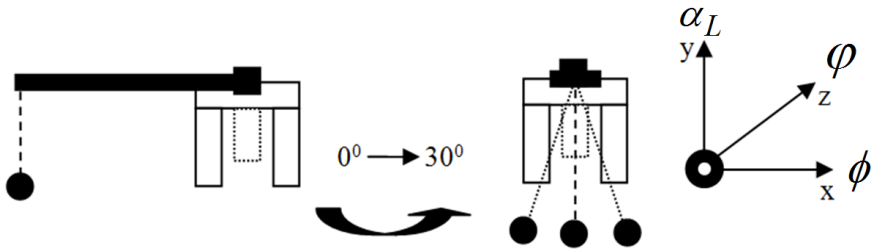
Şekil 7.17'de kontrolsüz sistemde meydana gelen titreşimler ve sistemin sehim cevabı verilmiştir. Modelleme teknikleri ile yapılan simülasyon çalışmalarında titreşim genliklerinin deneysel çalışmalara göre yakın olduğu görülmektedir. Sehim hatasının yüksek çıkmasının nedeni ise sistemin referans konum değerini yüksek hızda ulaşmaya çalışması ve koldaki titreşimlerin ve sarkaç salınımlarının bunun etkisi altında artmasıdır.



Şekil 7.17 Sarkaç taşıyan tek elastik uzuvlu robot kolu sisteminin kontrolsüz sehim cevabı.

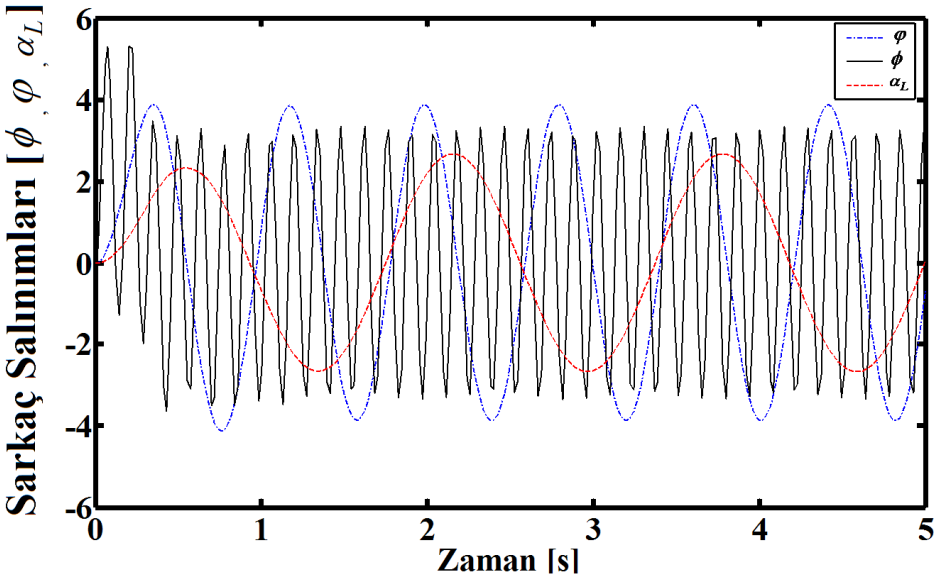
Sarkaç salınımları sistemin modelleme kısmında anlatıldığı gibi üç farklı açı ile tanımlanmıştır. Bu açılar sarkacın x-ekseni ile yapmış olduğu açı "ϕ", y-ekseni ile yapmış olduğu açı "α_L" ve z-ekseni ile yapmış olduğu açı "φ" olarak ifade edilmiştir. Simülasyon

çalışmalarında bu üç açının sarkaç hareketi ile değişimi elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda ise sadece sarkacın x-ekseni ile yapmış olduğu açı "ϕ" gösterilmiştir. Sarkaç salınımın en fazla x-ekseni boyunca olduğu ve dolayısı ile ϕ'nin kontrol edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda görüntü işleme metodu ile ϕ'nin değişimi analiz edilmiş ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 7.18'de elastik kolun uç kısmına takılan sarkacın kolun 30^0'lik dönme hareketi yaptığında meydana gelen salınım hareketleri gösterilmiştir.

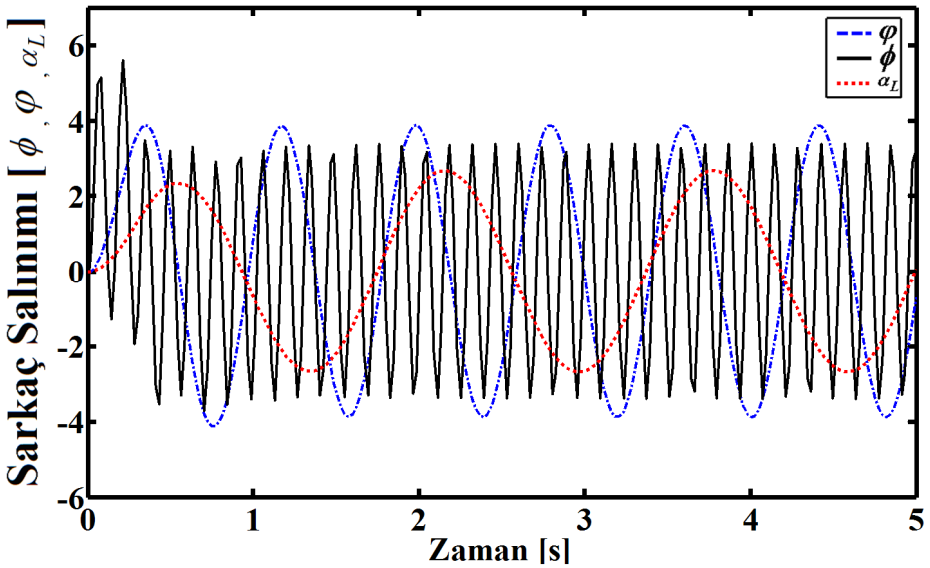


Şekil 7.18 Kolun dönmesi ile meydana gelen sarkaç hareketi.

Şekil 7.19'da ve Şekil 7.20'de SolidWorks ve Lagrange modelleme teknikleri ile yapılan simülasyon çalışmalarından elde edilen sarkaç salınımları verilmiştir. Şekil 7.19'a göre maksimum sarkaç salınımının x-ekseni etrafında olduğu ve yaklaşık olarak ϕ açısının 5^0 olduğu görülmektedir.

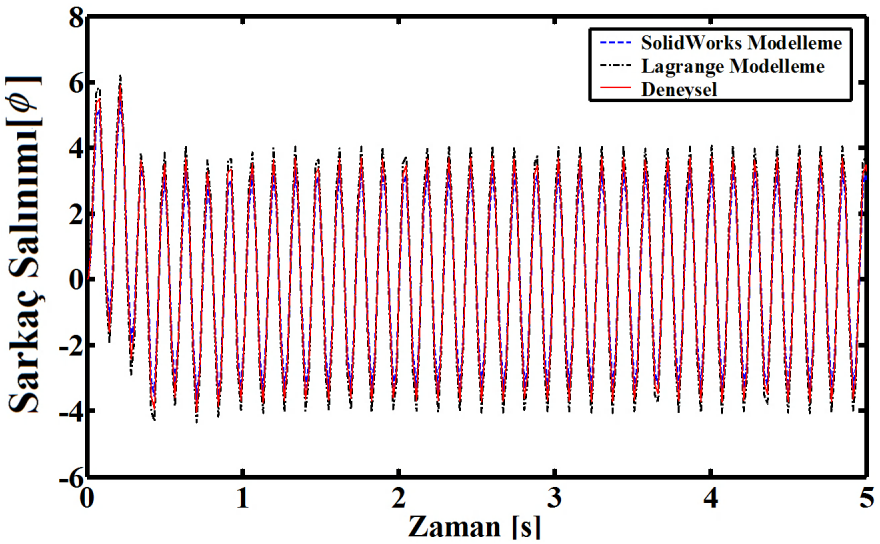


Şekil 7.19 SolidWorks modelleme ile sarkaç salınımlarının simülasyonu.(Kontrolsüz)



Şekil 7.20 Lagrange modelleme ile sarkaç salınımlarının simülasyonu.(Kontrolsüz)

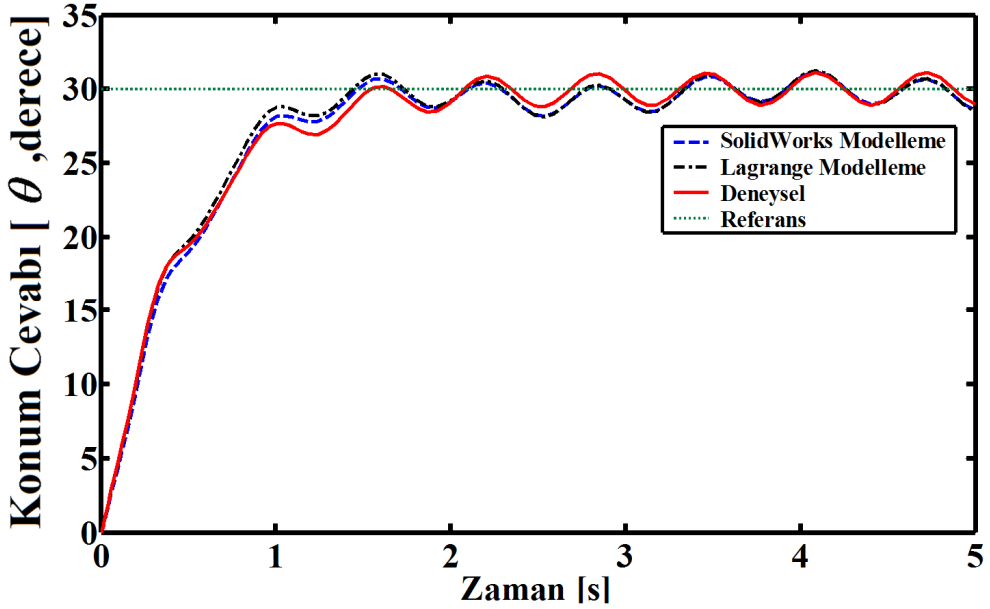
Şekil 7.20'de Lagrange modelleme ile yapılan simülasyon çalışmasından elde edilen sarkaç salınımları verilmiştir. Bu grafikten de görüldüğü gibi an fazla sarkaç salınımının x-ekseni boyunca olduğu ve ϕ açısının yaklaşık 5.8^0'ye yaklaştığı tespit edilmiştir. Lagrange modelleme ile SolidWorks modelleme tekniği karşılaştırıldığında sarkaç salınımlarının Lagrange modellemede daha fazla olduğu ancak açıların salınım yönlerinin aynı çıktığı görülmektedir. Şekil 7.21'de deneysel çalışmalardan görüntü işleme metodu ile elde edilen ϕ açısının simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 7.21 Kontrolsüz sistemde kritik salınım açısı ϕ 'nin karşılaştırılması.

Bu grafiğe göre simülasyon ve deneysel çalışmalarda sarkaç salınım açısı ϕ 'nin çok yakın çıktığı görülmektedir. Kritik salınım açısı ϕ 'nin sönümlenmediği ve değişken

genliklerde salınımın devam ettiği tespit edilmiştir. Sistemin kontrolsüz konum, sehim ve sarkaç salınımı grafiklerine göre sisteme kontrol uygulanmasına karar verilmiştir. Sarkaçsız sistemde olduğu gibi ilk olarak PID kontrol tasarımı yapılmıştır. Sisteme sarkaç etkisinin sistemin konum ve sehim cevabını bozduğu düşünülerek PID kontrol kazanç parametreleri değiştirilmiştir. Buna göre K_p = 30, K_i = 12 ve K_d = 15 olarak belirlenmiştir. Aynı parametreler hem simülasyon çalışmalarında hem de deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.



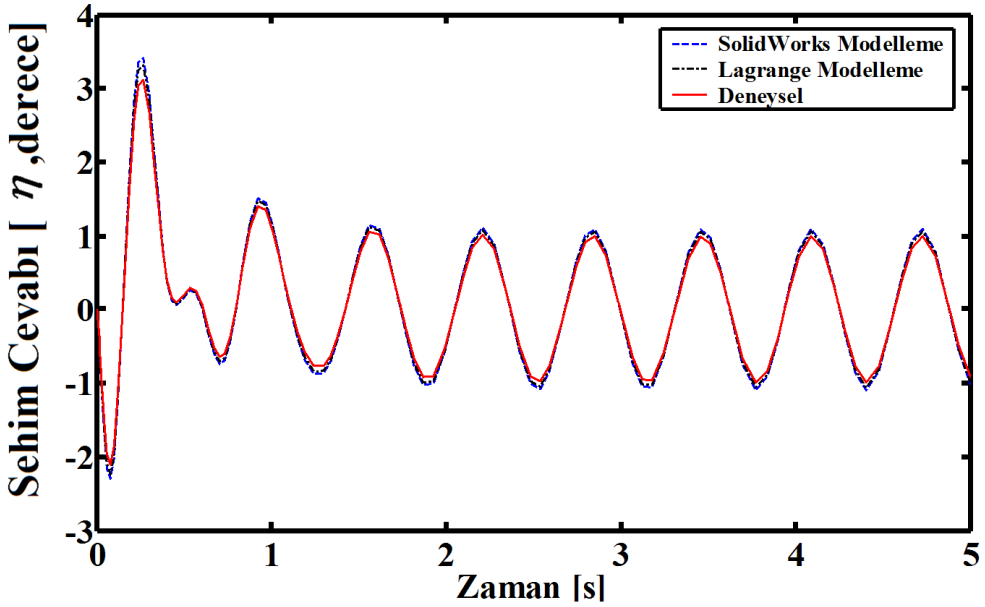
Şekil 7.22 Sistemin PID kontrollü konum cevabı.

Şekil 7.22'de sistemin PID kontrollü konum cevabı grafikleri verilmiştir. Aynı şekil üzerinde SolidWorks, Lagrange modelleme ile deneysel elde edilen sistemin konum cevabı gösterilmiştir. PID kontrol etkisi altında sistemin referans konuma ulaştığı ancak sarkaç salınımlarının sistemde konum hatası ve kalıcı durum hatası meydana getirdiği görülmektedir.

Tablo 7.5 PID kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

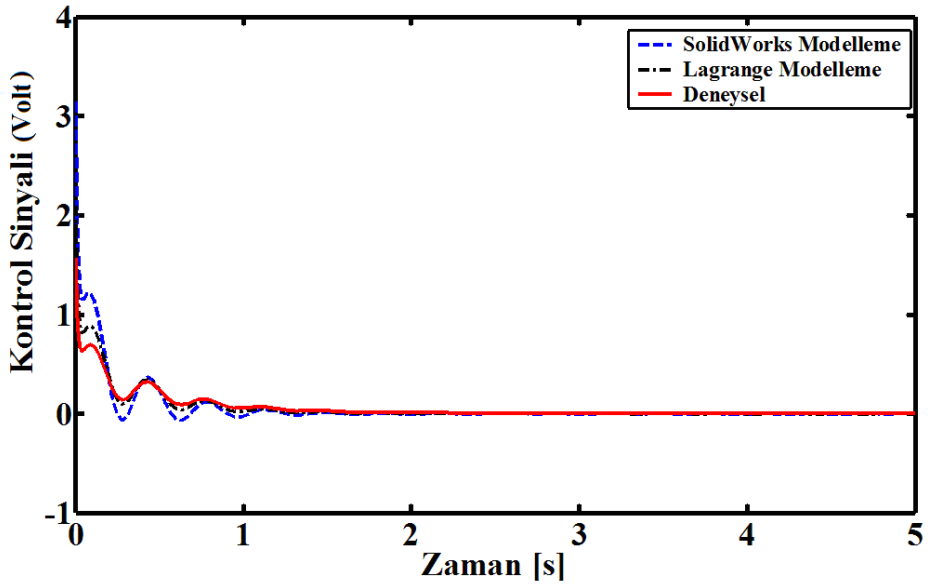
Kullanılan Teknikler	Maksimum Aşma Miktarı	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
SolidWorks Modelleme	0.8^0	0.8 sn.	∞	0.9^0
Lagrange Formülasyonu	0.9^0	0.8 sn.	∞	0.9^0
Deneysel	0.9^0	0.8 sn.	∞	1.2^0

Tablo 7.5'de sistemin PID kontrollü konum cevabına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Bu sonuçlara göre deneysel çalışmada maksimum aşma miktarının simülasyon sonuçlarına göre daha fazla olduğu fakat yükselme zamanının aynı olduğu görülmektedir. PID kontrollü sistemin referans konum etrafında salınım yaptığı dolayısı ile sistemin 30^0'lik konuma gelmediği ve kalıcı durum hatalarının devam ettiği gözlenmiştir. Şekil 7.23'de sistemin PID kontrollü sehim cevabı verilmiştir. PID kontrolcünün kolda meydana gelen titreşimleri büyük oranda azalttığı fakat sönümlemediği, ayrıca simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarının çok yakın çıktığı görülmüştür.

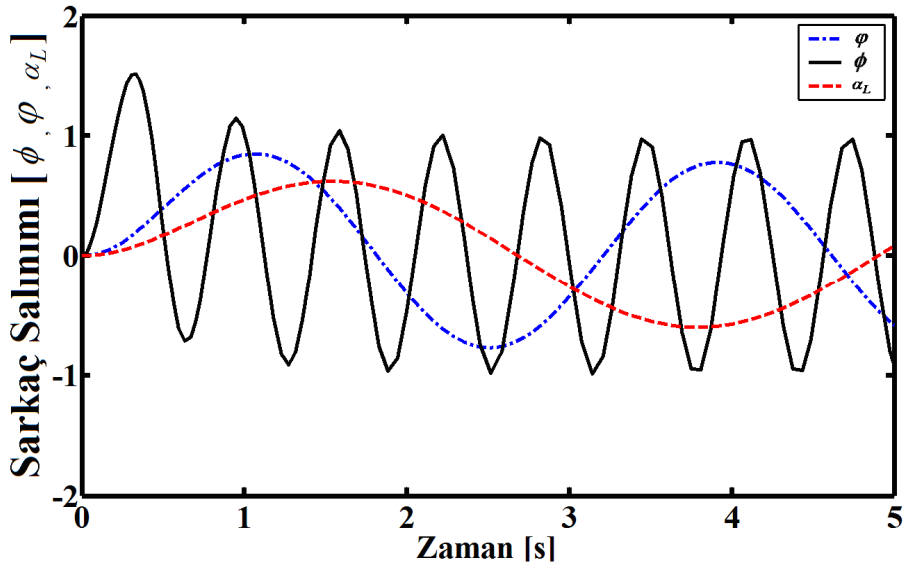


Şekil 7.23 Sistemin PID kontrollü sehim cevabı.

Şekil 7.24'de PID kontrolcünün simülasyon ve deneysel çalışmalarda sisteme uyguladığı kontrol sinyali grafikleri verilmiştir.

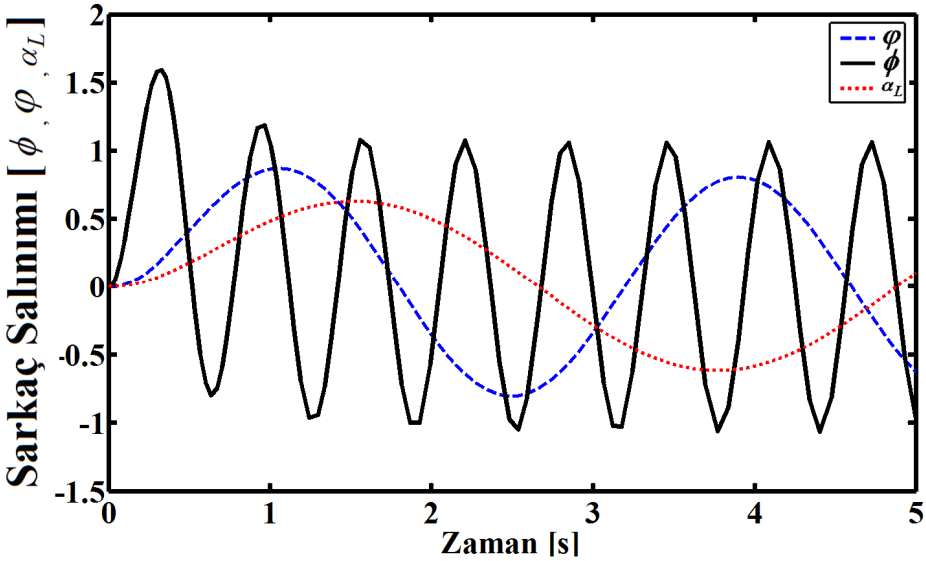


Şekil 7.24 PID kontrolcünün kontrol sinyali-zaman grafiği.



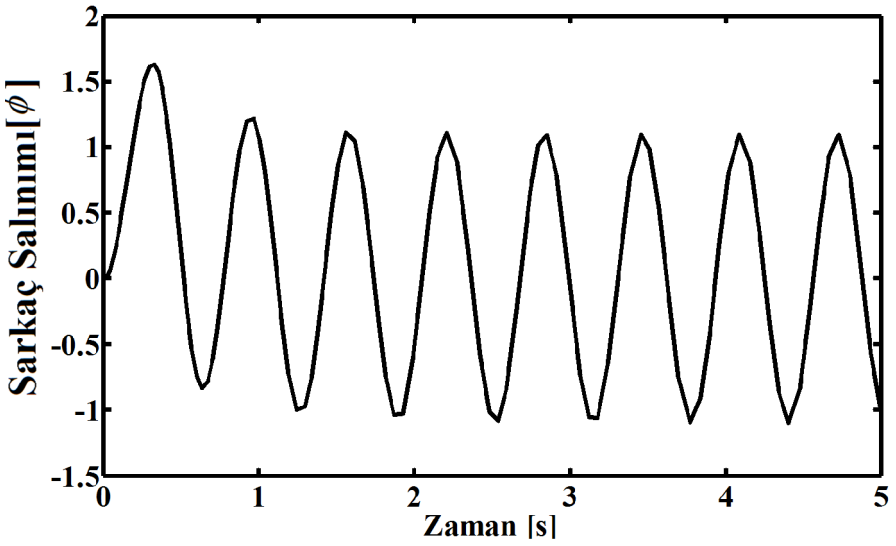
Şekil 7.25 SolidWorks modelleme ile sarkaç salınımlarının PID kontrollü simülasyonu.

Şekil 7.25'de ve Şekil 7.26'da SolidWorks ve Lagrange modelleme teknikleri ile yapılan PID kontrollü sistemin simülasyon çalışmalarından elde edilen sarkaç salınımları verilmiştir. Şekil 7.25'e göre maksimum sarkaç salınımının yine x-ekseni etrafında olduğu ve yaklaşık olarak ϕ açısının 1.5^0 olduğu görülmektedir. Kontrolsüz sarkaç salınımları ile karşılaştırıldığında PID kontrolcünün sarkaç salınımlarını oldukça düşürdüğü ve modelleme teknikleri sonuçlarının birbirine yakın çıktığı tespit edilmiştir. Sarkacın y ve z ekseni ile yapmış olduğu "α_L , φ " açılarının küçük salınımlarla devam ettiği ve sönümlenmediği görülmüştür. Fakat bu açıların sistemin konum ve sehim cevabına etkilerinin çok az olduğu özellikle ϕ açısının sistemin kontrollünde kritik açı olarak ele alınması gerektiği anlaşılmaktadır.



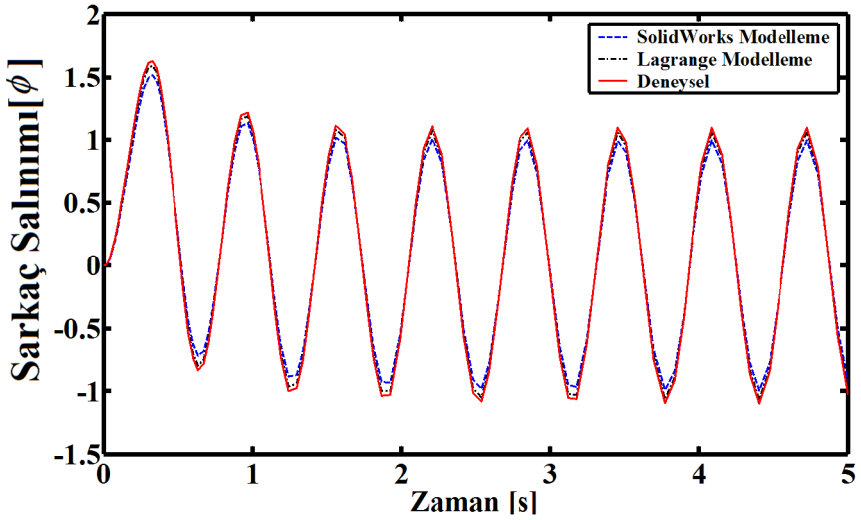
Şekil 7.26 Lagrange modelleme ile sarkaç salınımlarının PID kontrollü simülasyonu.

Şekil 7.27'de deneysel çalışmalardan elde edilen ϕ açısının görüntü işleme metodu ile analizi verilmiştir. Kontrolsüz sarkaç salınımı Şekil 7.21 ile Şekil 7.27 karşılaştırıldığında PID kontrolcünün deney düzeneği üzerinde de oldukça başarılı olduğu fakat sarkaç salınımlarının devam ettiği sönümlenmediği görülmektedir.



Şekil 7.27 Deneysel PID kontrollü sarkaç salınım açısı ϕ 'nin değişimi.

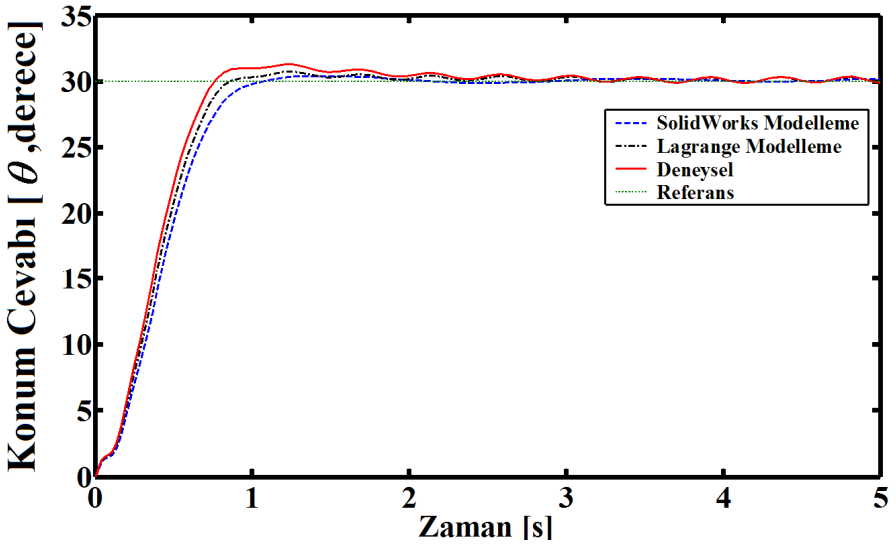
Şekil 7.28'de PID kontrollü sistemin simülasyon ve deneysel çalışmalardan elde edilen kritik salınım açısı ϕ 'nin karşılaştırılması verilmiştir. Buna göre deneysel elde edilen ϕ açısının simülasyon sonuçlarına yakın çıktığı görülmektedir.



Şekil 7.28 PID kontrollü sistemde kritik salınım açısı ϕ 'nin karşılaştırılması

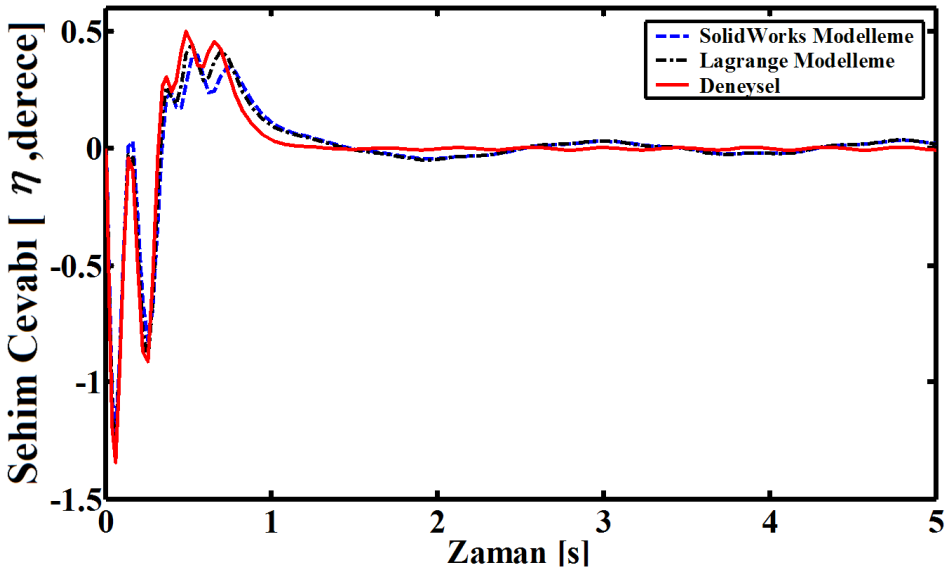
Sisteme PID kontrol uygulaması elde edilen konum, sehim ve sarkaç salınımı sonuçlarından PID kontrolcünün sistem üzerindeki performansının beklenen hedefleri

karşılayamadığı sonucuna varılmış ve PID kontrolcü verilerine göre tasarlanan HABM kontrolcünün sisteme uygulanmasına karar verilmiştir. Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da HABM kontrollü sistemin konum ve sehim cevabı görülmektedir.



Şekil 7.29 Sistemin HABM kontrollü konum cevabı.

HABM kontrolcünün PID kontrolcüye göre sistemin konum kontrolünde çok daha iyi performans sergilediği ve konum hatalarını büyük oranda düşürdüğü ve sarkaç salınımlarının sistemin konum cevabı üzerindeki etkisini azalttığı tespit edilmiştir.



Şekil 7.30 Sistemin HABM kontrollü sehim cevabı.

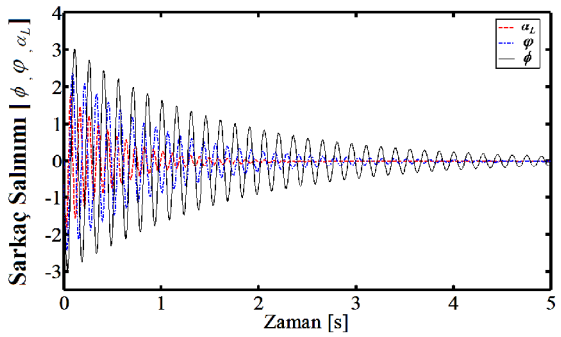
Elastik kol durduktan sonra sarkaç salınımlarının etkisi referans konum etrafında küçük salınımlar gerçekleştirmektedir. Sarkaç salınımlarının sönümlenmesi ile sistemin istenilen konuma getirilmesi mümkündür. Şekil 7.30'da sistemin HABM kontrollü sehim cevabı görülmektedir. HABM kontrolcünün kolda meydana gelen titreşimleri büyük oranda

azalttığı ancak çok küçük titreşim genliklerinde salınımların devam ettiği ettiği sonucuna varılmıştır. PID kontrolcünün sehim cevabı ile karşılaştırıldığın HABM kontrolcü performansının daha iyi olduğu söylenebilir.

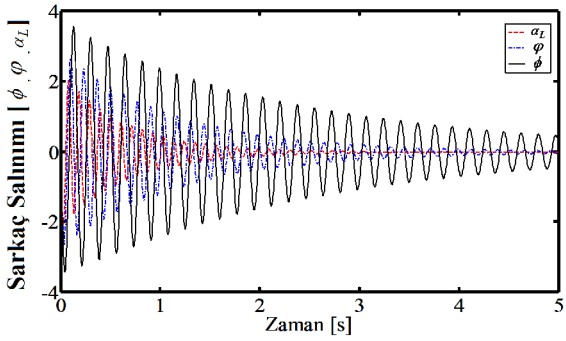
Tablo 7.6 HABM kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Kullanılan Teknikler	**Maksimum Aşma Miktarı**	**Yükselme Zamanı**	**Oturma Zamanı**	**Kalıcı Durum Hatası**
SolidWorks Modelleme	0.4^0	0.6 sn.	∞	0.01^0
Lagrange Formülasyonu	0.6^0	0.6 sn.	∞	0.03^0
Deneysel	1.2^0	0.5 sn.	∞	0.1^0

Tablo 7.6'da sistemin HABM kontrollü konum cevabına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel olarak gerçekleştirilen HABM kontrol uygulamasında ise kalıcı durum hatasının ve titreşimlerin azaldığı görülmektedir. Şekil 7.31 ve Şekil 7.32'de SolidWorks ve Lagrange modelleme tekniklerine göre gerçekleştirilen HABM kontrollü sarkaç simülasyonları verilmiştir.

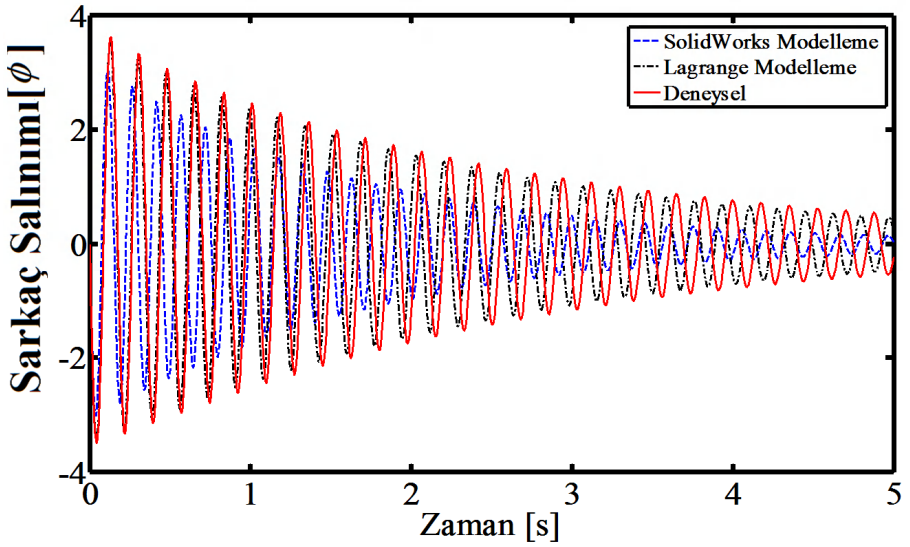


Şekil 7.31 HABM Kontrollü sarkaç salınımları. (SolidWorks Modelleme)



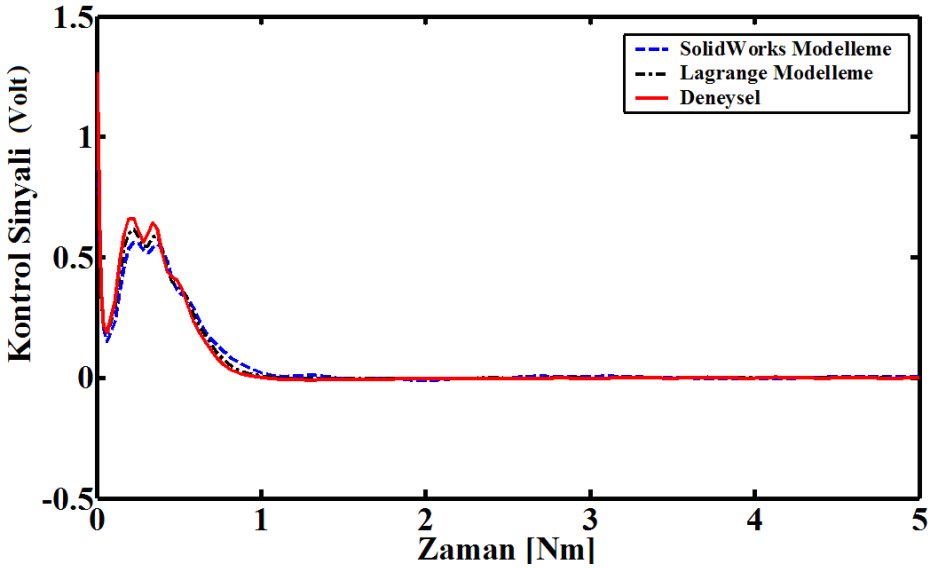
Şekil 7.32 HABM Kontrollü sarkaç salınımları. (Lagrange Modelleme)

Bu grafiklere göre HABM kontrolcü her iki modelleme tekniği ile yapılan simülasyon çalışmalarında da sarkaç salınım açılarını azaltmıştır. Özellikle salınımların sistem referans konuma geldikten sonra giderek düştüğü tespit edilmiştir. Şekil 7.33'de HABM kontrollü sistemde kritik salınım açısı ϕ 'nin simülasyon ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarından kritik salınım açısı ϕ 'nin azaldığı ama sönümlenmediği görülmektedir. Şekil 7.34'de HABM kontrolcünün simülasyon ve deneysel çalışmalarda sisteme uyguladığı kontrol sinyali grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.33 HABM kontrollü sistemde kritik salınım açısı ϕ 'nin karşılaştırılması

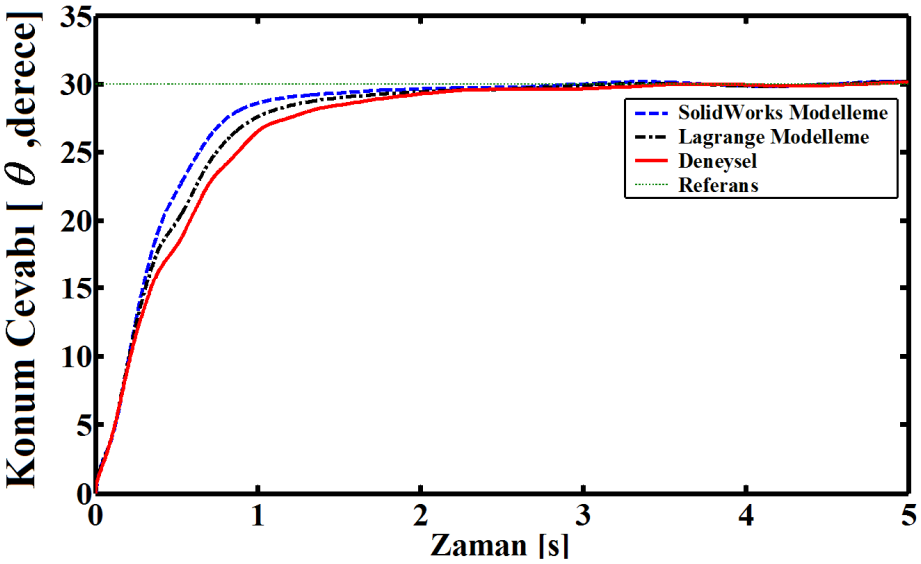
HABM kontrolcünün sistemin konum, sehim ve sarkaç salınımlarının kontrolünde PID kontrolcüye nazaran daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni ise HABM kontrolcü yapısında bulunan hızlı alt sistem bulanık mantık kontrolcünün sistemin açısal hızını kontrol etmesidir. Kontrol zamanı içinde HABM kontrolcü performansının oldukça iyi olduğu fakat geliştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu amaçla sisteme T2BM kontrol uygulaması yapılmıştır. Şekil 7.35'de T2BM kontrollü sistemin konum cevabı grafikleri verilmiştir.



Şekil 7.34 HABM kontrolcünün kontrol sinyali-zaman grafiği

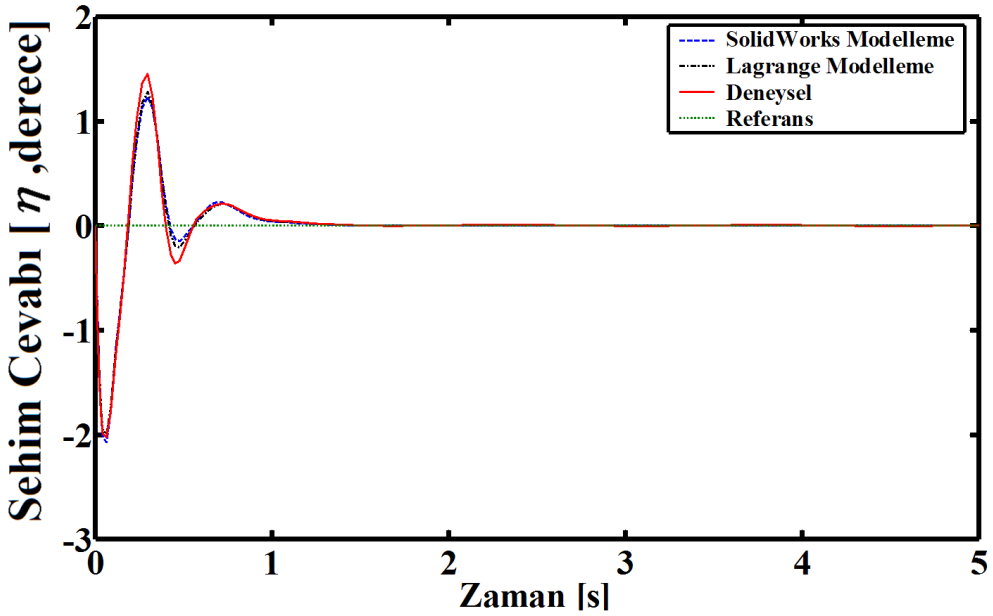
HABM kontrol verilerine göre tasarlanan T2BM kontrolcünün sistemin konum kontrolünde HABM kontrolcüye göre çok daha iyi olduğu görülmüştür. T2BM kontrolcü ile konum hataları ve kalıcı durum hatası sıfırlanmış ve sistem referans konuma yaklaşık 4 saniye

sonra gelmiştir. T2BM kontrolcü performansının bu derece iyi olmasının nedeni ise yapısında iki ayrı adaptif yapay sinir ağı tabanlı kontrolcünün olmasıdır.



Şekil 7.35 Sistemin T2BM kontrollü konum cevabı.

Şekil 7.36'da T2BM kontrolcünün sistemin sehim kontrolündeki performansı verilmiştir. T2BM kontrolcünün elastik kolda meydana gelen titreşimleri azalttığı ve 1.6 saniye sonra tamamen sönümlediği görülmektedir. Sarkaç salınımlarını sönümleyerek titreşimleri ve koldaki sehim miktarını yok etmiştir. Simülasyon ve deneysel sonuçların yakın çıkması T2BM kontrolcünün hem teorik olarak hem de deneysel olarak başarılı bir kontrol tekniği olduğunun bir göstergesidir.



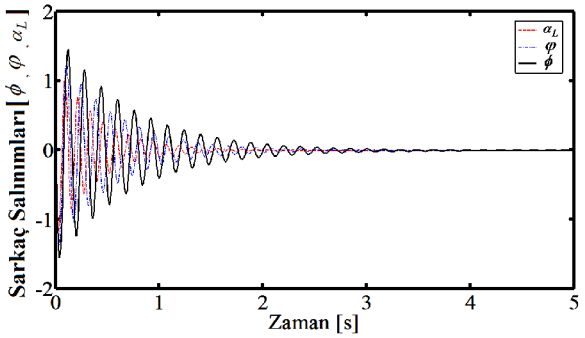
Şekil 7.36 Sistemin T2BM kontrollü sehim cevabı.

Tablo 7.7'de sistemin HABM kontrollü konum cevabına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.

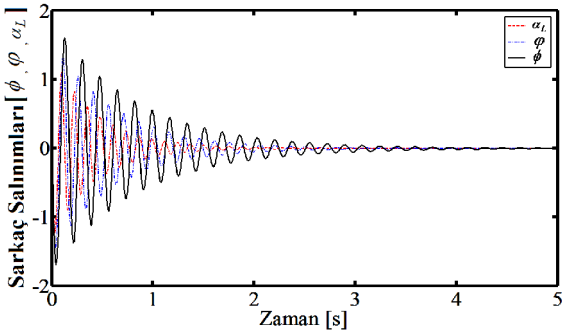
Tablo 7.7 T2BM kontrollü konum cevaplarına göre simülasyon ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Kullanılan Teknikler	Maksimum Aşma Miktarı	Yükselme Zamanı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası
SolidWorks Modelleme	0.01^0	0.8 sn.	4.2 sn.	0^0
Lagrange Formülasyonu	0^0	0.8 sn.	3.6 sn.	0^0
Deneysel	0.01^0	0.9 sn.	4.5 sn.	0^0

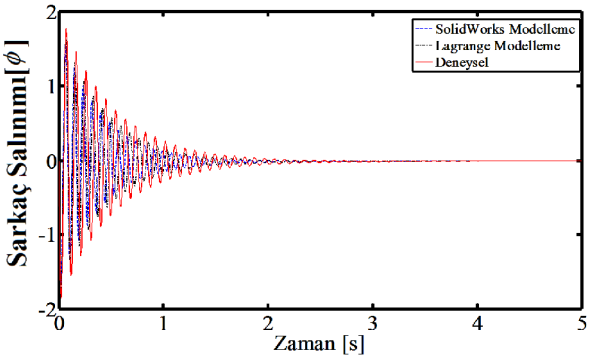
Şekil 7.37 ve Şekil 7.38'de SolidWorks ve Lagrange modelleme tekniklerine göre gerçekleştirilen T2BM kontrollü sarkaç simülasyonları verilmiştir. Bu grafiklere göre T2BM kontrolcü her iki modelleme tekniği ile yapılan simülasyon çalışmalarında da sarkaç salınımlarını sönümlemiştir. Özellikle salınımların sistem referans konuma geldikten sonra giderek düştüğü ve sonra sönümlendiği tespit edilmiştir.



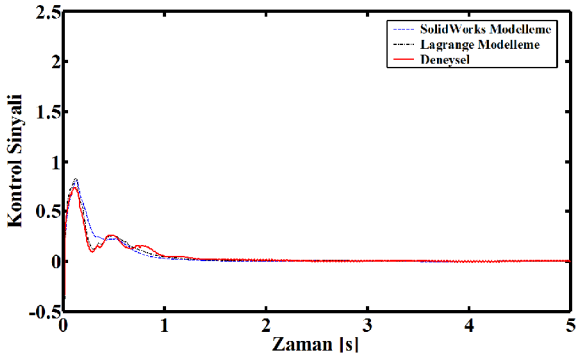
Şekil 7.37 T2BM Kontrollü sarkaç salınımları. (SolidWorks Modelleme)



Şekil 7.38 T2BM Kontrollü sarkaç salınımları. (Lagrange Modelleme)



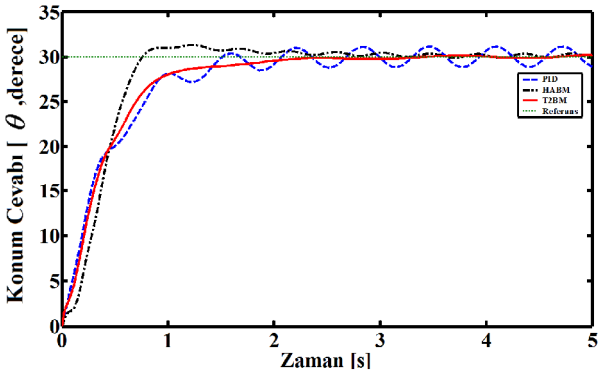
Şekil 7.39 T2BM kontrollü ϕ karşılaştırılması.



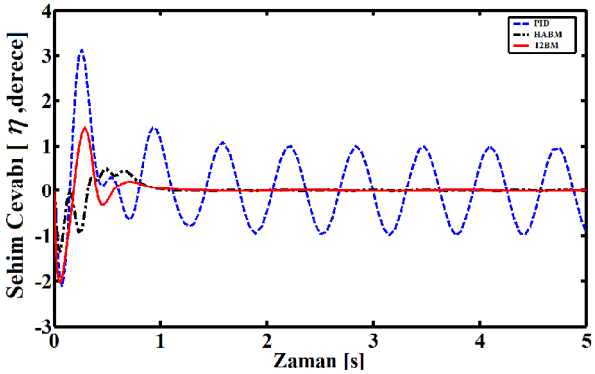
Şekil 7.40 T2BM kontrolcü kontrol sinyali.

Şekil 7.39'da T2BM kontrollü sistemde kritik salınım açısı ϕ'nin simülasyon ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçlarından kritik salınım açısı ϕ'nin sönümlendiği ve sonuçların çok yakın çıktığı görülmektedir. Şekil

7.40'da T2BM kontrolcünün simülasyon ve deneysel çalışmalarda sisteme uyguladığı kontrol sinyali grafikleri verilmiştir. Şekil 7.41 ve Şekil 7.42'de deneysel sistem üzerinde uygulanan PID, HABM ve T2BM kotrolcülerin konum ve sehim kontrolü üzerindeki performansları verilmiş ve karşılaştırılmıştır. T2BM kontrolcünün elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlara göre başlangıçta belirlenen performans kriterlerini sağladığını söylemek mümkündür. Özellikle deneysel uygulamada PID ve HABM kontrolcülere göre daha iyi performans sergilemesi kontrolcü tasarımı bakımından önemlidir.

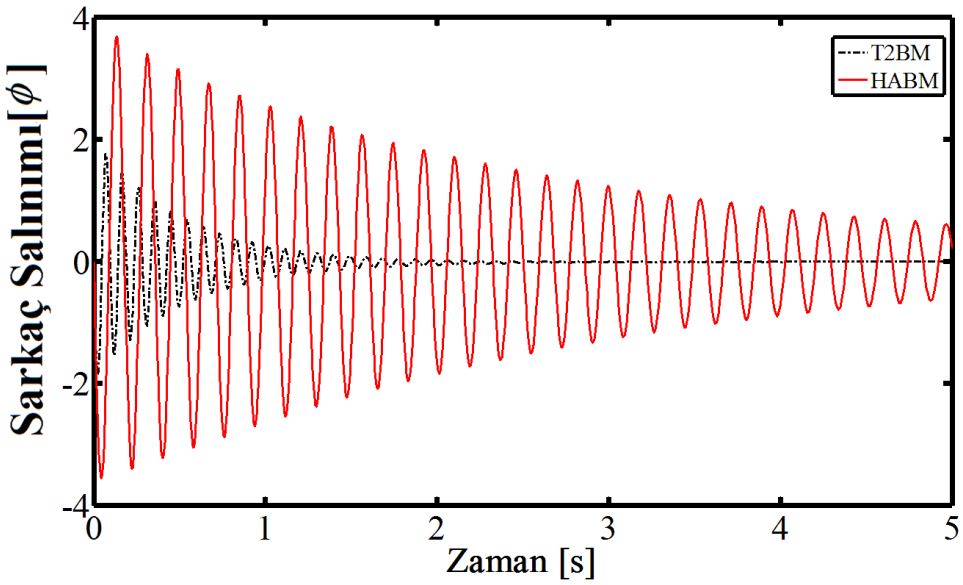


Şekil 7.41 Kontrolcülerin karşılaştırılması (Deneysel konum cevabı)



Şekil 7.42 Kontrolcülerin karşılaştırılması (Deneysel sehim cevabı)

Şekil 7.43'de deneysel çalışmalardan elde edilen kritik sarkaç salınım açısı ϕ 'nin HABM ve T2BM kontrolcülerin etkisi altında değişim grafiği verilmiştir. Her iki bulanık mantık kontrolcünün deney düzeneği üzerindeki performansı kritik salınım açısına göre karşılaştırılmış ve T2BM kontrolcünün sarkaç kontrolünde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.43 Kontrolcülerin deney düzeneği üzerinde performanslarının karşılaştırılması.

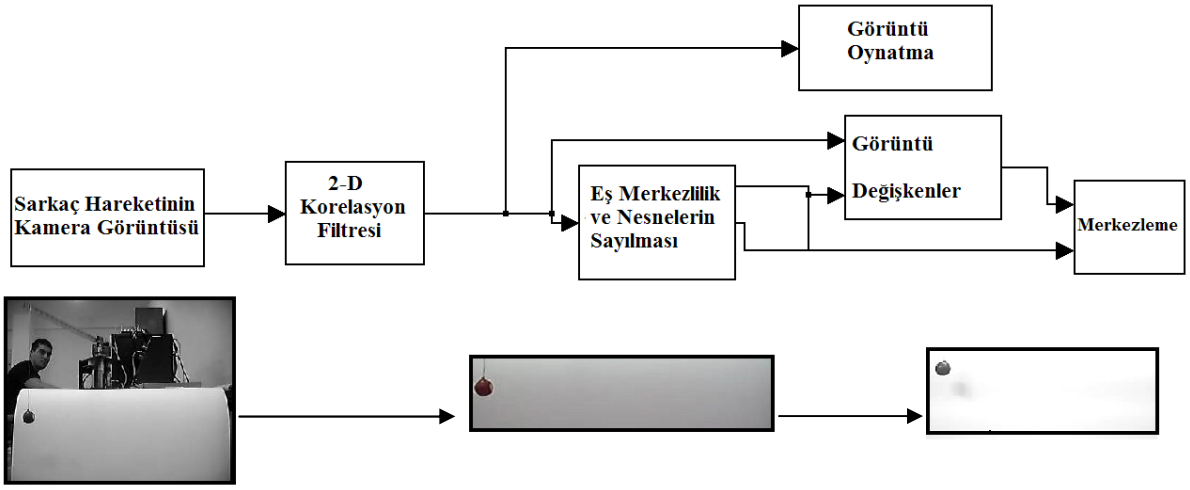
T2BM kontrolcünün simülasyon ve deneysel çalışma sonuçlarına göre sistem üzerindeki konum, sehim ve sarkaç salınımı kontrolündeki performansı ile literatür çalışmalarına göre belirlenen performans kriterleri karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 7.8'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre T2BM kontrolcünün performans kriterlerini sağladığı görülmektedir.

Tablo 7.8 Sonuçların Performans Kriterleri İle Karşılaştırılması.

Referans Değerler	Performans Kriterleri	Tez Çalışmasının Sonuçları
Referans Konum Hatası (θhata)	θhata = 0^0	θhata = 0^0
Referans Sehim Hatası (ηhata)	ηhata = ±10	ηhata = 0^0
Referans Sarkaç Salınım Açıları, (α,ϕ,φ)	$\alpha \le 0^0, \phi \le 3^0, \varphi \le 3^0$	$\alpha \le 0^0, \phi \le 0^0, \varphi \le 0^0$

7.3. Görüntü İşleme İle Sarkaç Salınımının Bulunması

Sistemin 30^0'lik basamak girişi için PID, HABM ve T2BM kontrollü konum ve titreşim cevapları deneysel sistem üzerinde bulunan konum ve titreşim ölçer (encoder ve straşin gage) ile elde edilmiştir. Sarkaç hareketinin analizi ise görüntü işleme metodu ile gerçekleştirilmiştir. Görüntü işleme için x düzlemine dik konumda sistemin karşısına yerleştirilen bir kamera kullanılmıştır. Sarkaç hareketinin kamera ile analizi için beyaz bir alan oluşturulmuş ve çekilen görüntülerden sarkaç salınımları incelenmiştir. Tüm bu işlemlerin işlenmesi için MATLAB/Image Processing Toolbox'ı kullanılmıştır.



Şekil 7.44 Görüntü işleme blokları.

Şekil 7.44'de MATLAB/Simulink programında gerçekleştirilen görüntü işleme bloğu verilmiştir. Görüntü işleme için ilk önce sarkaç hareketinin kamera görüntüsü alınmış, görüntünün netleştirilmesi için korelasyon filtresi ve karakteristik özelliklerin ayrılması yapılmıştır. Daha sonra sakacın merkez noktasının bulunmasını ve nesnelerin sayılması işlemi için eş merkezlilik uygulanmıştır. Son olarak sarkacın merkez noktasının işaretlenmesi (+) yapılmış ve çekilen görüntüye göre sarkaç salınımları incelenmiştir. Sarkaçta kola bağlı meydana gelen yer değiştirme miktarı ve salınımı hareket görüntüsünden elde edilen pikseller vasıtasıyla bulunmuştur.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, sarkaç taşıyan elastik kol sisteminin konum, uç deplasman ve salınım kontrolü için farklı türde kontrolcü tasarımları yapılmış, sistemin kontrol ve kontrol uygulanmayan durumlarına ait sayısal simülasyonlar ve deneysel ölçümler elde edilmiştir. Literatürde benzer sistemler üzerinde birçok teorik çalışma ve simülasyonlar yapılmıştır. Yapılan diğer çalışmalar için deney düzenekleri kurulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bu çalışmada ele alınan sistem literatürde kullanılan sistemlerden özellik ve kontrol bakımından farklı bir sistemdir. Bu farklılıklar; literatür çalışmalarının bir çoğunda düşey düzlemde hareket eden hidrolik silindir tahrikli elastik kolun konum, titreşim ve sarkaç salınımlarının incelenmesi, kolun bir arabanın hareketi ile denge konumuna getirilmesi, sarkacın kolda meydana gelen titreşimleri sönümlemesi amacı ile kullanılması şeklinde sıralanabilir. Ayrıca literatürde kullanılan kontrolcü türleri ve sistemin modellenmesinde kullanılan yöntemler bu çalışmadan farklıdır. Bu çalışmanın en önemli özelliği sistemin modellenmesinde SolidWorks katı modelleme programının ve daha önce bu türde bir çalışmada kullanılmamış olan hiyerarşik ve tip-2 adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık (HABM ve T2BM) kontrolcünün kullanılmasıdır.

Çalışmada sarkaç taşıyan elastik kol, yatay düzlemde hareket eden ve aynı zamanda uç kısmına asılmış yükü taşıyan elastik bir vinç sistemi olarak düşünülmüştür. Elastik bir vincin istenilen hedefleri karşılaması için konum, titreşim ve salınımlarının kontrolünün yapılması gerekmektedir. Bu amaçla elastik kol sisteminin deney düzeneği kurulmuş ve sistemin uç kısmına vinçteki yükü temsil eden sarkaç bağlanmıştır. Deneysel çalışmalara ışık tutması amacı ile tüm sistemin matematiksel modellemesi yapılmış ve bu model üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmalarında sistemin davranışını gösteren dinamik model iki ayrı yöntem kullanılarak elde edilmiştir. Birinci yöntemde Lagrange formülasyonu, ikinci yöntemde ise sistemin üç boyutlu katı modelleme programı kullanılmış, sistemin dinamik modeli ve hareket denklemleri bu yöntemler ile bulunmuştur. Üç boyutlu katı modelleme programı kullanılarak yapılan modelleme yeni bir yöntemdir. Bu yöntem ile karmaşık diferansiyel denklemler kullanılmadan sistemin dinamik modeli bilgisayar ortamında elde edilmiş ve yöntemin gerçekçiliği deneysel ve Lagrange Formülasyonu çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılıp doğrulanmıştır.

Simülasyon çalışmalarının gerçekleştirilmesi ile elastik kolun konum, titreşim ve sarkacın salınımları incelenmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan kontrolcülerin tasarımları için bu bilgiler kullanılmıştır. Sistemin hem deneysel hem de simülasyon çalışmalarında kullanılan kontrolcü türleri PID (Oransal+İntegral+Türev) ve farklı türde tasarlanan hiyerarşik adaptif bulanık mantık (HABM) ve tip-2 bulanık mantık (T2BM) kontrolcülerdir. Kontrolcülerin sistem üzerindeki performansının karşılaştırılması için literatürdeki çalışmalara göre belirlenen performans kriterleri kullanılmıştır. Sistemin deney düzeneğinde sarkaç salınımlarının ölçülmesi için herhangi bir ölçme cihazı kullanılmamıştır. Sarkaç hareketinin incelemek ve analiz etmek için sistemin simülasyon modeli kurulmuştur. Bu amaçla simülasyon çalışmalarından sistemi kontrollü ve kontrolsüz konum, titreşim ve salınım cevapları elde edilmiş ve deneysel çalışmalardan önce sarkacın hareket bilgisi kontrolcü çıkışlarına eklenmiştir. Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar belirlenen kriterlere göre yorumlanmış ve bu sonuçlara göre deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmış ve simülasyonların doğruluğu kanıtlanmıştır. Deneysel çalışmalarda sarkaç salınımlarının analizi ve incelenmesi için görüntü işleme metodu kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolcüler içerisinden aralık tip-2 bulanık mantık kontrolcünün PID ve hiyerarşik bulanık mantık kontrolcülerle karşılaştırıldığında performans kriterlerini sağladığı ve sistemin kontrolünde oldukça etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Simülasyon modelinden elde edilen sarkaç hareketinin analizi deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Çalışma sonucunda başlangıçta koyulan hedeflere ulaşılmış ve deneysel olarak yapılan çalışmalarla bu hedeflerin gerçek sistemler üzerinde de etkili olabileceği gösterilmiştir. Günümüzde endüstriyel vinçlerin konum, titreşim ve yük salınımları birçok firma ve araştırmacının ilgi odağı olmuş ve olacaktır. Endüstride, atölyelerde, inşaat sektöründe, limanlarda ve gemiler kullanılan vinçlerde karşılaşılan problemlerin çözülmesi pratik uygulamalar açısından oldukça yararlıdır. İleride yapılacak olan çalışmalarda sarkaç kütlesi ve kolun uzunluğu gibi sistem parametreleri değiştirilerek kontrolcülerin adaptifliği ve kontrol performansları incelenebilir. Ayrıca farklı tipte kontrol algoritmaları geliştirilerek gerçekte kullanılan kule, köprü, liman tipi vinçlerin yük salınımlarının kontrolü yüksek hassasiyette gerçekleştirilebilir.

9. KAYNAKLAR

Aledhaibi A. 2000. Design Of Adaptive Sliding Mode Fuzzy Control For Robot Manipulator Based On Extended Kalman Filter. Ph.D.Thesis Old Dominion University.

Arısoy, A., Gökaşan, M., Bogasyan, O. S. 2005 ‘’Partial Feedback Linearization Control of A Single Flexible Link Robot Manipulator’’, IEEE 0-7803-8977-8/05.

Bazzi, B. A. 2004 ‘’Implementation of A Knowledge-Based Fuzzy Logic Controller And A Fuzzy-Sliding Mode Controller to Control Flexible Robotic Manipulators’’, Master Thesis, Wayne State University, Detroit, Michigan.

Benosman, M., Boyer, F.,Vey, G. L., Primault, D. 2002 ‘’Flexible Links Manipulators: from Modelling to Control’’, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 34: 381–414.

Chalhoub, N.G., Kfoury, G.A., Bazzi, B. A. 2006 ‘’Design of robust controllers and a nonlinear observer for the control of a single-link flexible robotic manipulator’’, Journal of Sound and Vibration 291,437–461.

Chang, Y. C., Chiang, K.H. 2008 “Fuzzy Projection Control Law and Its Application to The Overhead Crane”, Mechatronics, Vol.18., pp. 607-615.

Chwa, D. 2009 “Nonlinear Tracking Control of 3-D Overhead Cranes Against the Initial Swing Angle and the Variation of Payload Weight” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 17, No. 4, pp. 876-883.

Chebolu, S. 2004 ‘’Fuzzy Control of A Rotary Inverted Pendulum Swing-Up Using Matlab and Simulink’’, Master Thesis, College of Graduate Studies Texas A&M University-Kingsville.

Chiou, K.C., Huang, S. J. 2005 ‘’An adaptive fuzzy controller for robot manipulators’’, Mechatronics 15,151–177.

Çiçek, İ., Ertaş, A. 2002 “Experimental Investigation of Beam-Tipmass And pendulum system under random Excitation”, Mechanical Systems And Signal Processing, 16(6), 1059–1072.

Çuvalcı, O. 2000 “The Effect Of Detuning Parameters On The Absorption Region For A Coupled System: A Numerıcal And Experimental Study’’, Journal Of Sound And Vibration, 229(4), 837-857.

D'Andre Ha-Novel, B., Coron, J.M. 2000 “Exponential stabilization of an overhead crane with flexible cable via a back-stepping approach, ‘’ Automatica 36 587-593.

El-Raheb, M. 2007 “Effect Of Cable Flexibility On Transient Response Of A Beam–Pendulum System’’, Journal Of Sound And Vibration, 307, 834–848.

Ertas, A., Cuvalçı, O., Ekwaro-Osıre, S. 2000 “Performance Of Pendulum Absorber For A Nonlinear System Of Varying Orientation”, Journal Of Sound And Vibration, 229 (4), 913-933.

Feliu, V., Munoz, I.,Roncero, P. L., Lopez, J.J. 2005 ‘’Repetitive Control for Single Link Flexible Manipulators’’, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation Barcelona, Spain, April.

Ho, M. T., Tu, Y. W. 2006 ‘’Position control of a single-link flexible manipulator using H∞-based PID control’’, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 153, No. 5, September.

Gomes, S. C. P., Rosa, V. S., Albertini, B. C. 2006 ‘’Active Control to Flexible Manipulators’’, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.11, No.1, February.

Jnifener, A., Andrews, W. 2005 ‘’Experimental Study on Active Vibration Control of a Single-Link Flexible Manipulator Using Tools of Fuzzy Logic and Neural Networks’’, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,Vol.54,No.3, June.

Kamal, A. F. M., Ismail, M. I. S., Gad, E. H., El-Moneer, A. M. A. 2006 “Fuzzy control of flexible cable overhead cranes with load hoisting’’, Transactions of the Institute of Measurement and Control 28, 4, pp. 371-386.

Kamal, A.F. M., Gad, E. H., El-Moneer, A. M. A., Ismail, M. I. S. 2005 ’’ Modelling and control of overhead cranes with flexible variable-length cable by finite element method ‘’, Transactions of the Institute of Measurement and Control 27, 1 ,pp. 1-20.

Kamalasadan, S.,Ghandakly, A. A.,Al-Olimat, K. S. 2004 ‘’A Fuzzy Multiple Reference Model Adaptive Control Scheme for Flexible Link Robotic Manipulator’’, IEEE lnternational Conference on Computational lntelligencc for Measurement Sptcms and Applications Boston, MA, USA, 14-16 July.

Kamalasadan, S., Ghandakly, A. A. 2007 “A Neural Network Parallel Adaptive Controller for Dynamic System Control’’ IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Vol. 56, No. 5, October.

Kamimoto, K., Kawabe, H., Yoshida, K. 2005 “The H∞ Control for an Inverted Double Pendulum System Consisting of Elastic Links Connected in Series’’, JSME International Journal, Series C, Vol. 48,No.3.

Kalyoncu, M., Tınkır, M. 2008, “Hierarchical adaptive network based fuzzy logic controller design for a single flexible link robot manipulator’’, EPE-PEMC,POLONYA-Poznan,1-3 Eylül.

Kalyoncu, M., Tınkır, M. 2007 "Tek Elastik Uzuvlu Robot Kolu Hareketi İçin Hiyerarşik Bulanık Mantık Kontrolcü Tasarımı', 13. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, Cumhuriyet Ün., Sivas, 405-413, 7-9 Haziran 2007.

Kalyoncu, M., Tınkır, M. 2008 ‘’ Vibration And Position Control Of A Single Flexible Link Robot Manipulator With Using Hierarchical Adaptive Network Based Fuzzy Logic Controllers’’, Intelligent Manufacturing Systems(IMS),Sakarya Ünv.

Kar, I. N., Seto, K., Doi, F. 2000 ‘’ Multimode Vibration Control of a Flexible Structure Using H_∞-Based Robust Control’’, IEEE/Asme Transactions On Mechatronics, Vol. 5, No. 1, March.

Karadağ, B.,H. 2005. “Deprem Etkisi Altındaki Yapıların Dinamik Modellenmesi ve Kontrolü”Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
Kaynak O., Armağan, G. 1992 “Süreç Denetiminde Yeni Bir Yaklaşım Bulanık Mantık”, Otomasyon Dergisi, Temmuz-Ağustos.

Kovanen, J., Haudroos, H. 2001 “Adaptive Open-Loop Control Method for a Hydraulically Driven Flexible Manipulator” IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings 8-12 July Como, Italy.

Li, G., Khajepour, A. 2005 ‘’ Robust control of a hydraulically driven flexible arm using backstepping technique’’, Journal of Sound and Vibration 280, 759–775.

Lin, J. 2003 ‘’Hierarchical fuzzy logic controller for a flexible link robot arm performing constrained motion tasks’’, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 150, No. 4, July.

Maczynski, A., Wojciech, S. 2003 “Dynamics of a Mobile Crane and Optimisation of the Slewing Motion of Its Upper Structure”, Nonlinear Dynamics 32: 259–290.

Martins, J., Botto, M. A., Costa, J. S. D. 2002 ‘’Modeling of Flexible Beams for Robotic Manipulators’’, Multibody System Dynamics, 7: 79–100.

Mallon, N., Wouw, N., Putra, D., Nijmeijer, H. 2006 “Friction Compensation in a Controlled One-Link Robot Using a Reduced-Order Observer, IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 14, No. 2, March.

Martins, J., Mohamed, Z., Tokhi, M. O., Costa, J. S. D., Botto, M. A. 2003 ‘’Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator systems’’, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 150, No. 4, July.

Masoud, Z. N., Nayfeh, A. H. 2003 “Sway Reduction on Container Cranes Using Delayed Feedback Controller”, Nonlinear Dynamics 34: 347–358.

Masoud, Z. N., Nayfeh, A. H., Nayfeh, A. N. 2005 “Sway Reduction on Quay-side Container Cranes Using Delayed Feedback Controller: Simulations and Experiments”, Journal of Vibration and Control, 11(8): 1103–1122.

Mendel, J. 2001, “Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions” NJ: Prentice-Hall.

Nguyen, V. B., Morris, A. S. 2007 “Genetic Algorithm Tuned Fuzzy Logic Controller for a Robot Arm with Two-link Flexibility and Two-joint Elasticity’’, J. Intell Robot Syst. 49:3–18 DOI 10.1007/s10846-006-9097-6.

Payo, I., Ramos, F., Cortazar, O. D., Feliu,V. 2005 ‘’Experimental Validation of Nonlinear Dynamic Models for Single-Link Very Flexible Arms’’, Proceedings of the 44th IEEE

Conference on Decision and Control, and the European Control Conference Seville, Spain, December 12-15.

Purwa, S.,Kara, I. N.,Jha, A. N. 2005 ‘’Adaptive control of robot manipulators using fuzzy logic systems under actuator constraints’’, Fuzzy Sets and Systems 152,651–664.

Sano, H., Ohishi, K., Kaneko, T., Mine, H. 2010 “Anti-Sway Crane Control Based on Dual State Observer With Sensor-Delay Correction” Advanced Motion Control, 2010 11th IEEE International Workshop, Nagaoka, Niigata, 21-24 March, pp. 679 – 684.

Sawodny, O., Hildebrandt, A., Schneider, K. 2003 “Control Design for the Rotation of Crane Loads for Boom Cranes’’ Proceedings of the IEEE International ConnrPnee OR Robotics & Automation Taipei, Taiwan, September 14-19.

Singhose, W., Kim, D., Kenison, M. 2008 “Input Shaping Control of Double-Pendulum Bridge Crane Oscillations”, J. Dyn. Sys., Meas., Control, Vol. 130, Issue 3, doi:10.1115/1.2907363

Sun, F., Zhang, L., Tang, Y., Zhang, J. 2004 ‘’Neural Network plus Fuzzy PD Control of Tip Vibration for Flexible-link Manipulators’’, Proceedings of 2004 IEEE/RS.J International Conference on Intelligent Robots end Systems Sendal, Japan, September 28-October 2.

Surdhar, J. S., White, A. S. 2003 ‘’A parallel fuzzy-controlled flexible manipulator using optical tip feedback’’, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 19,273–282.

Şaka, S. 1999. Bulanık Kontrol ve Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bil. Enst.

Takagi, K., Nishimura, H. 2003 ‘’ Control of a Jib-Type Crane Mounted on a Flexible Structure’’IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 11, No. 1, January.

Tınkır, M., Kalyoncu, M. 2007 “Tek Elastik Uzuvlu Robot Kolu Hareketi İçin PD Kontrol Kazanç Parametrelerinin Bulanık Mantık Yaklaşımı İle Belirlenmesi’’, Machinery MakineTek Dergisi, Sayfa 90-97, Sayı 116,Haziran.

Tınkır, M., Önen, Ü., Kalyoncu, M., Şahin, Y. 2010 “Adaptive Network Based Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller Design For A Single Flexible Link Carrying A Pendulum”, 2. International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Singapur, 26-28 Şubat.

Tınkır, M., Önen, Ü., Kalyoncu, M. 2010 “Modeling of Neuro-Fuzzy Control of A Flexible Link”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I Journal of Systems and Control Engineering.

Tınkır, M., Önen, Ü., Kalyoncu, M., Botsalı, M. F. 2010 “Pid and Interval Type-2 Fuzzy Logic Control of Double Inverted Pendulum System”, 2. International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Singapur, 26-28 Şubat.

Tian, L., Wang, J., Mao, Z. 2004 ‘‘Constrained Motion Control of Flexible Robot Manipulators Based on Recurrent Neural Networks’’, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B:Cybernetics,Vol.34, No.3, June.

Tian, L., Collins, C. 2005 ‘’Adaptive neuro-fuzzy control of a flexible manipulator’’, Mechatronics 15,1305–1320.

Q. Liang and J. Mendel, “Interval type-2 fuzzy logic systems: Theory and design,” IEEE Transactions Fuzzy Systems, vol. 8, pp. 535–550, 2000.

Wai, R. J., Duan, R. Y., Wang, W. H.,Liu, L. W. 2003 ‘’Implementation of Artificial Intelligent Control in Single-Link Flexible Robot Arm’’, Proceedings 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Antomation Kobe, Japan, July 16-20.

Wai, R. J., Lee, M. C. 2004 ‘’Intelligent Optimal Control of Single Link Flexible Robot Arm’’, IEEE Transactions on Industrial Electronics,Vol.51,No. 1, February.

Wang, X., Chen, D. 2006 ‘’Output Tracking Control of a One-Link Flexible Manipulator via Causal Inversion’’, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol.14,No.1, January.

Wang, L.X. 1997. A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice Hall, Hong Kong Univ. of Science and Technology, Hong Kong.

Yaman, M., Şen, S. 2004 “The Analysis Of The Orientation E!Ect Of Non-Linear Flexible Systems On Performance Of The Pendulum Absorber”, International Journal Of Non-Linear Mechanics 39, 741-752.

Yaman, M., Şen, S., Çuvalcı, O. 2002 “Finite Element Analysis Of Non Linear Coupled Oscillator’’, Engineering Structures, 24, 577–586.

Yang, Y., Feng, G., Ren, S., Ren, J. 2004 ‘’A Combined Backstepping and Small-Gain Approach to Robust Adaptive Fuzzy Control for Strict-Feedback Nonlinear Systems’’IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics—Part A: Systems And Humans, Vol. 34, No. 3, May.

Yen, J., Langari, R., Zadeh L. 1995. Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. IEEE Pres Marketing, New York.

Zadeh, L.A., “Fuzzy Logic,” Computer, Vol. 1, No. 4, pp. 83-93, 1988.

Zadeh, L.A., “Knowledge representation in fuzzy logic,” IEEETransactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 1, pp. 89-100,1989.

Zhang, J., Jiang, K., Chen, Z., Zhao, Z. 2006 ‘’Global robust fuzzy sliding mode control for a class of non-linear system’’, Transactions of the Institute of Measurement and Control pp. 219_227, 28, 3.

Zhang, X., Wenwei, X., Nair, S. S., Chellaboina, V. 2005 ‘’PDE Modeling and Control of a Flexible Two-Link Manipulator’’, IEEE Transactions on Control Systems Transactions on Control Systems Technology,Vol.13, No.2, March.