



**T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOĞRUSAL ARABALI TERS SARKACIN DENGELENMESİ İÇİN
YAPAY SİNİR AĞI TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLÇÜ
TASARIMI**

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
AĞUSTOS-2014**



T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUSAL ARABALI TERS SARKACIN DENGELENMESİ İÇİN
YAPAY SİNİR AĞI TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLCÜ
TASARIMI**

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**HATAY
AĞUSTOS-2014**

T.C.
MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞRUSAL ARABALI TERS SARKACIN DENGELENMESİ İÇİN YAPAY
SİNİR AĞI TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLCÜ TASARIMI**

HASAN HÜSEYİN BİLGİÇ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Doç. Dr. Ahmet YAPICI danışmanlığında hazırlanan bu tez **05/08/2014** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ahmet YAPICI
Başkan

Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU
Üye

Yrd. Doç. Dr. Yakup KUTLU
Üye

Kod No: 742

Prof. Dr. İsmail Hakkı KARAHAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

05/08/2014

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

İmza

Hasan Hüseyin BİLGİÇ

ÖZET

DOĞRUSAL ARABALI TERS SARKACIN DENGELENMESİ İÇİN YAPAY SİNİR AĞI TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLCÜ TASARIMI

Kararsız ve doğrusal olmayan matematiksel model yapısı ile ters sarkaç sistemi, üzerinde birçok kontrol teorisinin çalışılmasına olanak sağlayan klasik bir kontrol düzeneğidir. Uygulamalı bir kontrol çalışması olan bu çalışmada, kontrol teorisinin klasik problemlerinden biri olan gerçek zamanlı doğrusal arabalı ters sarkacın denge kontrolü sunulmaktadır. Ters sarkacın denge kontrolünü iyileştirmeye yönelik klasik kontrol uygulamalarından farklı olarak Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün performansını belirlemek üzere karşılaştırma amacıyla Linear Quadratic Regulator (LQR) kontrolcü tasarımı da yapılmıştır. Sistemin matematiksel modeli ve uygulanabilecek kontrol teknikleri detaylı olarak incelenmiştir. Sistemin kontrolünde yaygın olarak kullanılan LQR kontrol verileri MATLAB programının ANFIS Toolbox modülünde yapay sinir ağı tabanlı olarak eğitilerek elde edilen bulanık mantık kontrolcü ve LQR kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır. İncelenen kontrol teknikleri MATLAB/Simulink ortamında tasarlanarak Quanser doğrusal ters sarkaç deney cihazında uygulanmıştır. Kontrolcülerin gerçek sistem ve simülasyon cevapları değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler grafik olarak sunulmuştur.

2014, 76 sayfa

Anahtar kelimeler: Doğrusal ters sarkaç sistemi, tam durum geri besleme, LQR kontrol, ANFIS

ABSTRACT

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK BASED FUZZY LOGIC CONTROLLER DESIGN FOR BALANCING OF LINEAR CART-INVERTED PENDULUM

Inverted pendulum system with unstable and non-linear mathematical model structure is classical control mechanism, which allows the study of many on the classical control theory. A control study which is applied in this study, it is offered balance control of the real-time linear cart-inverted pendulum which is one of the classical control problem. To improve the balance control of the inverted pendulum, Artificial Neural Network-Based Fuzzy Logic controller was designed as different than classical control application. In order to compare the performance of the controller for determining the Quadratic Linear Regulator (LQR) controller design has been done. Mathematical models of the system and control techniques can be applied are examined in detail. LQR control, widely used in the system control, data were trained by artificial neural network based fuzzy logic on ANFIS Toolbox module of MATLAB program and fuzzy logic controller obtained and LQR controller performance is compared. The control techniques studied was designed in MATLAB/Simulink environment and was used on Quanser linear inverted pendulum experiment device. Simulation and actual system response of controller is evaluated. Assessments are presented in the chart.

2014, 76 pages

Key Words: Linear inverted pendulum system, full state feedback, LQR control, ANFIS

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim sırasında ve tez çalışmalarım boyunca büyük bir titizlik ve özveriyle bana yol gösteren ve iyi bir bilimsel ortam hazırlayan danışman hocam sayın Doç. Dr. Ahmet YAPICI' ya her türlü destek ve yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım ve çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, Mühendislik Fakültesi Dekanı sayın Prof. Dr. Ertuğrul BALTACIOĞLU' na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında değerli görüş, bilgi ve katkılarını esirgemeyen sayın Doç. Dr. Mete KALYONCU' ya, Yrd. Doç. Dr. Mustafa TINKIR' a ve Arş. Gör. Muhammed Arif ŞEN' e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Çağlar CONKER' e ve Arş. Gör Hüseyin Turan ARAT' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım süresince desteğini hiç esirgemeyen, hayatımın her aşamasında bana destek olan ve her türlü fedakarlıkta bulunan çok kıymetli eşime ve aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	11
3.1. Materyal	11
3.1.1. Tek Çubuklu Arabalı Ters Sarkaç Deney Düzenegi.....	11
3.2. Yöntem	15
3.2.1. Ters Sarkaç Sisteminin Matematik Modeli.....	15
3.2.2. Matematik Modelin Doğrusallaştırılması	18
3.2.3. Transfer Fonksiyonları	19
3.2.4. Durum Uzayı Modeli	21
3.2.5. Kontrol Yöntemleri	23
3.2.5.1. Açık Çevrim Kontrolü	23
3.2.5.2. Kapalı Çevrim Kontrolü	24
3.2.5.2.1. Tam Durum Geri Beslemesi ile Kontrol	25
3.2.5.2.2. Linear Quadratic Regulator (LQR) Kontrolcü.....	26
3.2.5.2.3. Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) Kontrolcü	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	40
4.1. LQR Kontrolcü Tasarımı	41
4.2. YBM Kontrolcü Tasarımı	49
4.3. YBM ve LQR Kontrolcü Cevapları.....	61
4.3.1. Simülasyon Cevapları	61
4.3.2. Gerçek Sistem Cevapları.....	65
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	68
5.1. Sonuç	69
5.2. Öneriler	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Basit sarkaç	2
Şekil 1.2.	Ters sarkaç fiziksel modeli	3
Şekil 2.1.	Segway: Tekerlekli insan taşıma aracı (Younis, 2009).	6
Şekil 2.2.	Telepresence: Uzaktan konferans robotu (Anonymous, 2014).	6
Şekil 2.3.	Kararlı yürüyüş yapabilen insan modeli (Kajita, 2010).	7
Şekil 3.1.	Tek çubuklu arabalı ters sarkaç deney düzeneği	12
Şekil 3.2.	İki kanallı kontrol kartı	13
Şekil 3.3.	Yükseltici	14
Şekil 3.4.	Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemi serbest cisim diyagramı	15
Şekil 3.5.	Açık çevrim kontrolü blok diyagramı	24
Şekil 3.6.	Kapalı çevrim kontrolü blok diyagramı	24
Şekil 3.7.	Bulanık sistem çalışma yapısı	29
Şekil 3.8.	Yapay sinir hücresi yapısı	31
Şekil 3.9.	YBM çıkarım sistemi yapısı.	32
Şekil 3.10.	Hibrit öğrenme algoritmali yapay sinir ağının eğitimi	35
Şekil 3.11.	İki giriş ve iki kuraldan oluşan Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemi	36
Şekil 3.12.	ANFIS Editor yapısı	38
Şekil 4.1.	Basamak giriş için açık çevrim cevabı-sarkaç açısı	40
Şekil 4.2.	Basamak giriş için açık çevrim cevabı-arabanın konumu	40
Şekil 4.3.	LQR kontrolcü için MATLAB/Simulink blokları	43
Şekil 4.4.	LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı-sarkaç açısı	45
Şekil 4.5.	LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı-arabanın konumu	45
Şekil 4.6.	LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı-motor voltajı	46
Şekil 4.7.	LQR kontrolcünün performans sonuçları-araba konumu	47
Şekil 4.8.	LQR kontrolcünün performans sonuçları-sarkaç açısı	47
Şekil 4.9.	LQR kontrolcünün performans sonuçları-motor voltajı	48
Şekil 4.10.	Eğitim verilerinin bilgisayara kayıt edildiği MATLAB/Simulink blokları	51
Şekil 4.11.	YBM kontrolcü için MATLAB/Simulink blokları	52
Şekil 4.12.	ANFIS eğitimi test sonuçları	53
Şekil 4.13.	Bulanık mantık üyelik fonksiyonları	54
Şekil 4.14.	Oluşturulan ANFIS yapısı.	54
Şekil 4.15.	Geliştirilen YBM kontrol için FIS mimarisi	55
Şekil 4.16.	Motor voltajı için spesifik değer çıktısı gösterimi.	55
Şekil 4.17.	Yüzey gösterimleri	56
Şekil 4.18.	YBM Kontrolcü için basamak cevabı-sarkaç açısı	57
Şekil 4.19.	YBM Kontrolcü için basamak cevabı-arabanın konumu	57
Şekil 4.20.	YBM Kontrolcü için basamak cevabı-motor voltajı	57
Şekil 4.21.	YBM kontrolcünün performans sonuçları-araba konumu	58
Şekil 4.22.	YBM kontrolcünün performans sonuçları-sarkaç açısı	59
Şekil 4.23.	YBM kontrolcünün performans sonuçları-motor voltajı	59
Şekil 4.24.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları- arabanın konumu	61

Şekil 4.25.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (3-6 saniye)–arabanın konumu	62
Şekil 4.26.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları–sarkaç açısı	62
Şekil 4.27.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (3.5-5.5 saniye)–sarkaç açısı	63
Şekil 4.28.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları–motor voltajı.....	63
Şekil 4.29.	YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (5-6 saniye)–motor voltajı	64
Şekil 4.30.	YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–arabanın konumu.....	65
Şekil 4.31.	YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–sarkaç açısı	65
Şekil 4.32.	YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–motor voltajı.....	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Quanser doğrusal ters sarkaç deney setine ait gerekli parametreler (Quanser, 2012)	14
Çizelge 4.1. Kontrolcü performansları için sarkaç açıları	67
Çizelge 4.2. Kontrolcü performansları için motor voltajları.....	67

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

l	: Sarkaç uzunluğu (m)
x	: Sarkaç arabasının yatay eksenindeki konumu (m)
α	: Sarkaç açısı (Derece)
m	: Sarkaç ağırlığı (kg)
M	: Sarkaç arabasının ağırlığı (kg)
F	: Sarkaç arabasını hareket ettiren kuvvet (N)
g	: Yerçekimi sabiti (m/sn ²)
I	: Sarkacın atalet momenti (kgm ²)
b	: Sarkaç arabasının eşdeğer viskoz sönüm oranı (N m sn/rad)
K_{ep}	: Sarkaç enkoder hassasiyeti (rad/tur)
f_{maks}	: Maksimum motor giriş voltaj frekansı (Hz)
I_{maks}	: Maksimum motor giriş akımı (A)
ω_{maks}	: Maksimum motor hızı (rad/sn)
$\dot{\alpha}$	: Sarkacın açısal hızı (rad/sn)
$\ddot{\alpha}$	: Sarkacın açısal ivmesi (rad/sn ²)
$\dot{x}$	: Sarkaç arabasının doğrusal hızı (m/sn)
$\ddot{x}$	: Sarkaç arabasının ivmesi (m/sn ²)
P	: Sarkacın bağlantı noktasına etkiyen dikey kuvvet (N)
N	: Sarkacın bağlantı noktasına etkiyen yatay kuvvet (N)
t	: Zaman domeni
s	: Laplace domeni
X	: Durum vektörü
A	: Giriş vektörü
U	: Kontrol vektörü
Y	: Çıkış vektörü
A	: Sistem matrisi
B	: Giriş matrisi
C	: Çıkış matrisi
D	: Doğrudan iletim matrisi
K	: Kazanç matrisi
J	: Performans indeksi
Q	: Durum-değer matrisi
R	: İndex matrisi
$\mu_{Ai}(x)$	: Üyelik fonksiyonu
O_{il}	: Düğüm çıkışları
i	: Düğüm sayısı
$\overline{w_i}$	: Normalize edilmiş ağırlık

KISALTMALAR

LQR	: Linear Quadratic Regulator
YBM	: Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık
FIS	: Fuzzy Interference System
ANFIS	: Adaptive Network Based Fuzzy Interference System
k	: Küçük
o	: Orta
b	: Büyük
AÇK	: Açık çevrim kutupları
YSA	: Yapay sinir ağı
RMSE	: Root Mean Square Error

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, doğrusal olmayan ters sarkaç sistemi matematiksel modelinin doğrusallaştırılması ve sarkacın dikey denge durumunda kontrol edilmesi tartışılmaktadır. Sisteme ait hareket denklemleri ve sistem dinamiklerinin teorik analizleri, kullanılan deney cihazı, kontrol yöntemleri, benzetim ve deneysel uygulamalar incelenmektedir. Çalışmanın amacı; doğrusal arabalı ters sarkaç sisteminin matematik modelini elde etmek, elde edilen matematik model üzerinde tasarlanan kontrolcülerini uygulanmak ve genel olarak doğrusal arabalı ters sarkaç sisteminin dinamiklerini anlamaktır.

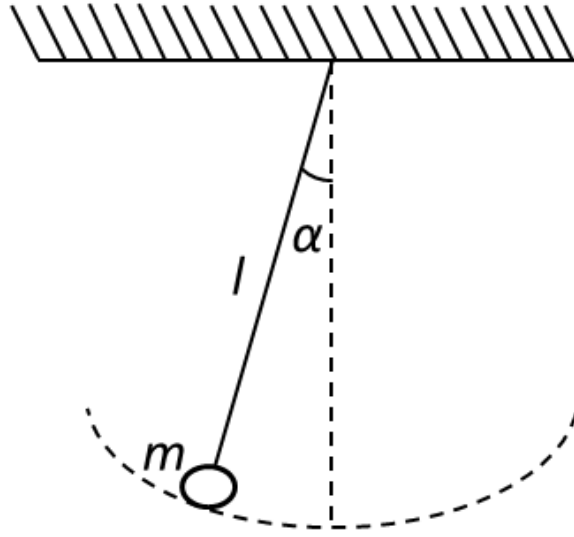
Çalışmanın büyük bir bölümü MATLAB programının Simulink modülünde gerçekleştirilmiştir. MATLAB/Simulink sistemlerin matematik modeli elde edildikten sonra sinyal işleme yöntemlerinin blok diyagramlarla temsil edilmesini sağlar, kolayca görselleştirilmesine izin verir ve karmaşık kontrol algoritmalarının tasarımını kolaylaştırır (Kızır, 2008). Çalışmanın uygulama kısmı da Quanser doğrusal ters sarkaç deney setinde gerçekleştirilmiştir.

Bilim insanları için bir sistemin dışarıdan müdahale gerektirmeden kontrol edilebilmesi her zaman ilgi çekici bir alan olmuştur. Bu bağlamda teknolojinin gelişmesi sistemlerin modellenmesinin ve denetlenmesinin önemini gitgide artırmaktadır. Kontrol sistemleri uzay teknolojisinden tutun da gündelik ve sosyal hayattaki mühendislik uygulama alanlarının çoğunda hayatımızın vazgeçilmezi konumuna gelmiştir.

Bir kalem veya bir çubuk, parmağımızın ucunda dikey olarak denge tutulmaya çalışıldığı düşünülürse; kalemin dik olarak dengede durabilmesi için elimizin pozisyonunun sürekli ayarlanması gerekir. Ancak bu şekilde kalem dengede durabilir. Ters sarkaç sistemi de basit olarak aynı işlemi yapar fakat bunu yaparken de elimiz tüm yönlere hareket edebilirken, ters sarkaç sadece tek doğrultuda hareket etmektedir. Dengede tutmaya çalıştığımız kalem gibi ters sarkaç sistemi de kararsız bir sistemdir. Sarkacın dengede tutulması için kuvvetin uygun bir şekilde uygulanması gerekir ve bu aşamada kontrol sistemleri devreye girer.

Çoğu araştırmacılar ters sarkaç sistemini tasarladıkları kontrolcülerin performanslarını izlemek ve geçerliliklerini test etmek amacıyla veya mevcut kontrol sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik, test aracı olarak kullanmaktadırlar.

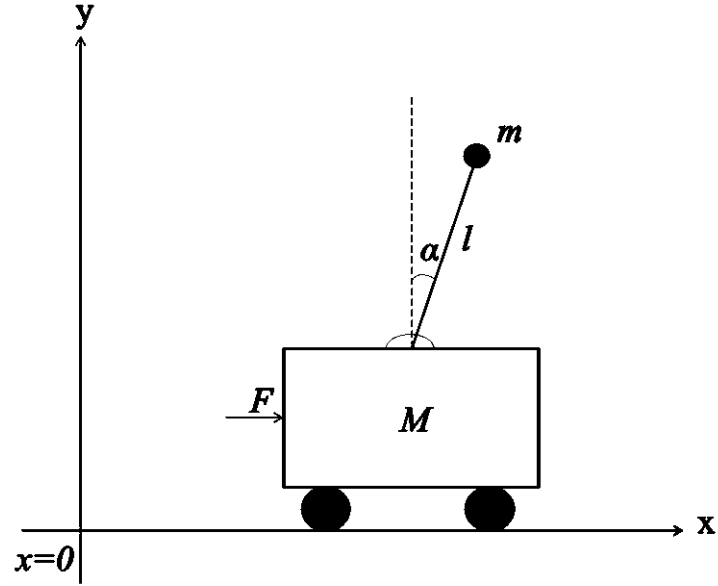
Ters sarkaç sisteminden önce basit bir sarkacın tanımını yapacak olursak; l uzunluğundaki bir ip veya çubuğun, bir ucunda m kütlesi bağlı olan diğer ucu ise serbestçe hareket edebileceği bir yere mesnetlenmiş bir sistemdir. Kütle serbest bırakıldığında sistem denge konumunda değilse sarkaç salınımlar yaparak sürtünmenin de etkisi ile yavaşlar ve denge konumuna gelerek belli bir süre sonra durur (Şekil 1.1.).



Şekil 1.1. Basit sarkaç

Basit sarkacın salınımı üzerine ilk çalışma onuncu yüzyılda İbn-i Yusuf tarafından yapılmış ve bu alanda yeni çalışmalara ışık tutmuştur. Sonrasında Galileo zamanı ölçmek için basit sarkacın salınım hareketinden yararlanmıştır. XVII. yüzyıl fizikçilerinden Huygens, Newton, Hooke ve Galileo'nun gözlemleri ve çalışmaları ışığında sarkaç salınım hareketi konusunda çeşitli çalışmalar yapmıştır (Artman, 1998). Bilimin gelişmesinde çok önemli rol oynayan sarkaç sistemi ile yapılan çalışmalar temel alınarak ilerleyen zamanlarda ters sarkaç probleminin öneminin fark edilme süreci hızlanmıştır.

Araba üzerindeki ters sarkaç sistemi ise temelde M kütleli bir araba ve araba üzerinde serbest durumda döner hareket yapabilecek şekilde bağlanmış m kütleli ve l boyundaki bir sarkaçtan oluşur. Sarkacın iki denge noktası vardır: Bunlardan biri sarkaç açısının π olduğu kararlı denge noktasıdır ki sarkaç burada dışarıdan müdahale gerektirmeksizin dengede durur. Diğeri ise sarkaç açısının sıfır olduğu kararsız denge noktasıdır. Dışarıdan en ufak bir bozucu giriş sarkacın kararsız denge noktasından uzaklaşmasına neden olur. Çalışmanın amacı, sarkacı kararsız denge noktasına getirmek ve burada dengede tutmaktır. Bunu gerçekleştirmek için de arabaya bir kontrol girişi “ F ” kuvveti uygulanmaktadır ve sürekli aktif olarak kontrol gerekmektedir (Şekil 1.2.).



Şekil 1.2. Ters sarkaç fiziksel modeli

Tez kapsamında tek çubuklu arabalı ters sarkaç probleminin modellenmesi, transfer fonksiyonları ve durum uzayı modelinin elde edilmesi, elde edilen durum uzayı modeli üzerinden sarkacın denge problemlerini iyileştirmeye yönelik kapalı çevrim kontrolü uygulamaları ele alınmıştır. Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sisteminin denge problemi için klasik kontrol yöntemlerinden farklı olarak Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Yine YBM kontrolcü performansını izlemek üzere Linear Quadratic Regulator (LQR) kontrolcü tasarımı da yapılmıştır. Tasarlanan kontrolcüler simülasyon üzerinde uygulanmış ve kontrolcü

performansları karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda Mühendislik Fakültesi Laboratuvarında bulunan Quanser marka doğrusal ters sarkaç deney düzeneğinde de uygulaması yapılan kontrolcü performansları irdelenmiştir. Elde edilen sistem davranışlarını gösteren grafikler yorumlanmıştır.

Doğrusal olmayan hareket denklemlerinden yola çıkarak normal sistem davranışlarının incelenmesi, sistemin durum uzayı modeline göre modellenmesi, gerçek sistem ve simülasyon davranışları arasındaki farklılıkların gözlemlenmesi ve YBM kontrolcü tasarımı için mevcut verilerle eğitiminin gerçekleştirilmesi tezde izlenen hedeflerdendir.

Tez kapsamında ilk olarak ters sarkaç sistemi ile ilgili daha önce ele alınmış çalışmalar hakkında literatür araştırması yapılmıştır. Yapısal ve kontrol sistemine göre iki kategoriye ayrılarak incelenen ters sarkaç sistemi ile ilgili daha önce yapılmış çalışmaların kısa bir değerlendirmesi sunulmuştur.

Literatür taraması yapıldıktan sonra deneyin yapılacağı deney düzeneği tanıtılmış ve deney düzeneği ile ilgili teknik bilgilere yer verilmiştir. Sonrasında tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemin matematik modelinin oluşturulması, hareket denklemleri yardımı ile oluşturulan matematik modeli üzerinden, transfer fonksiyonları, durum uzay modelinin elde edilme aşamaları gösterilmiştir. Kontrol sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir, uygulaması yapılan YBM ve LQR kontrol yöntemleri için teorik esaslar irdelenmiştir.

Çalışma hakkında gerekli teorik bilgiler verildikten sonra sarkacın denge problemi için MATLAB/Simulink ortamında önce Linear Quadratic Regulator (LQR) kontrolcü tasarımı yapılmış ve gerçek sistemde uygulaması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra LQR kontrolcünün uygulaması ile elde edilen gerçek sistem verileri ve simülasyon verileri yardımıyla eğitimi yapılan YBM kontrolcü tasarım aşamaları anlatılmıştır. Tasarlanan YBM kontrolcü için gerçek sistem ve simülasyon performansı izlenmiştir. Tasarlanan kontrolcülerin aynı bozucu bir girişe karşı gösterdikleri sistem davranışları gerçek sistem ve simülasyonlar için ayrı ayrı ele alınmıştır.

Son olarak yapılan çalışmalar hakkında kısa bir özet ve bundan sonra yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Geçmişten beri araştırmacıların ilgisini çeken bir problem olan ters sarkaç problemi, doğrusal olmayan ve kanonik¹ yapısı ile gerek klasik gerekse modern kontrol tekniklerinin tasarımında çok önemli bir test aracıdır. Ters sarkacın dengeleme problemi 20. yüzyılın son çeyreğinde yapılan çalışmalarla ivme kazanmıştır. Günümüzde, iki tekerlekli mobil sistemlerde, bir robot kolun dinamiklerinin benzetiminde, ayakta duran hareketsiz insan modelinde, uyduların ek motorlarında, uçak veya helikopterler gibi hava araçlarının iniş sistemlerinde, gemilerde kabinlerin dengelenmesinde, uçakların hava türbülansına girdiğinde dengelenmesinde, iki ayaklı hareket sistemlerinin ve reaktörlerdeki nükleer yakıt çubuklarının dengelenmesindeki gibi birçok dengeleme uygulamasında kullanılan bir modeldir.

Kontrol mühendisliği alanındaki öneminden dolayı, bu alanında çalışan araştırmacılar için ters sarkaç sistemi modelinin analiz edilmesi ve PID, LQR gibi klasik kontrol yöntemine göre bir doğrusal denetleyici tasarımları kaçınılmaz bir hale gelmiştir. Kararsız bir sistem olması sebebi ile ters sarkaç sisteminin dinamiklerinin incelenmesi ve kontrolünün gerçekleştirilmesi çok yaygın kontrol problemlerinden biri olmuştur (Kizir, 2008).

Kontrol teorisinin eğitici-öğretici yönü ve uygulanabilirliği açısından önemli bir konusu haline gelen ve ters sarkaç sistemi temeline dayanan iki tekerlekli mobil sistemler üzerine birçok çalışma yapılmıştır ve yapılan çalışmalar sonucunda problem günlük yaşamda kullanılan iki tekerlekli, elektrikli, kendi kendini dengeleyebilen, doğrusal ve döner hareket yapma kabiliyetine sahip bir ulaşım aracı olan ve Şekil 2.1.' de görüldüğü üzere Segway gibi kişisel ulaşım araçlarının doğuşunu sağlamış ve bu alanda dünya çapında ciddi bir sektör oluşmuştur (Younis, 2009).

Yine iki tekerlekli mobil sistem uygulamalarının önemli örneklerinden olan ve Şekil 2.2.' de görülen uzaktan konferans robotu Telepresence ticari alandaki gelişmeler sonucunda üretilen ve günlük hayatı kolaylaştıran sistemlere örnek olarak verilebilir.

¹ Herhangi bir matematiksel denklemde tüm değişkenlerin en küçük bilinmeyenlerine kadar türetilmesi



Şekil 2.1. Segway: Tekerlekli insan taşıma aracı (Younis, 2009)



Şekil 2.2. Telepresence: Uzaktan konferans robotu (Anonymous, 2014)

Ters sarkaç sistemi üzerinde yapılan çalışmalarla ilerleyen yıllarda şekil 2.3.' de görülen insansı robotlar yapılmıştır (Kajita, 2010). Doğrusal ters sarkaç modeli esas alınarak yapılan insansı robotlar kararlı bir şekilde yürüyebilme merdiven çıkabilme ve dışarıdan bozucu bir etkiye karşı dengede durabilme yeteneklerine sahiplerdir. Bu alandaki çalışmalar hala araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir.



şekil 2.3. Kararlı yürüyüş yapabilen insan modeli (Kajita, 2010)

Kontrol alanında çalışan araştırmacılar için önemli bir yere sahip olan ters sarkaç, mühendislik uygulayıcıları tarafından üzerinde yoğun uğraşlar verilen temel konu başlıkları arasında yer almaktadır. Ters sarkaç problemi ile ilgili geçmişten günümüze çok fazla çalışma yapılmıştır. Tüm alışmaları kapsayacak şekilde bir literatür araştırması yapılmak yerine konu ile daha bağlantılı ve parametreleri konu üzerinde yakınlışma sağlayan geçmiş çalışmalar literatürden ayırt edilerek; önceki çalışmalar bölümü oluşturulmuştur. Bu bağlamda; ters sarkaç sistemi, yapısal ve kontrol yöntemine göre iki sınıfa ayrılabilir.

Yapısal olarak ters sarkaç sistemleri; tek ubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri (Muskinja ve Tovornik, 2006; Vinodh ve Jerome, 2013; Gawvthrop ve Wang, 2005), ift ubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri (Sun ve ark., 2014; Inoue ve ark., 2005), döner

ters sarkaç sistemleri (Spong ve ark., 2001; Nath ve Mitra, 2014), gezgin ters sarkaç sistemleri (Wu ve Zhang, 2011; Grasser ve ark., 2002) olarak sınıflandırılabilir.

Kontrol yöntemine göre ters sarkaç sistemleri ise; PID ve durum geri besleme gibi doğrusal yöntemler (Nundrakwang ve ark., 2005; Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2005;), yapay sinir ağları (Wu ve Zhang, 2011; Şen, 2014), bulanık mantık (Muskinja ve Tovornik, 2006; Wu ve Zhang, 2011; Wu ve ark., 2012; Goher ve Tokhi, 2011), enerji tabanlı (Aström ve ark., 2005; Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2008), genetik algoritmalarla parametre tayini (Sun ve ark., 2014; Goher ve Tokhi, 2010), kayan kipli denetim (Inoue ve ark., 2006) olarak sınıflandırılabilir.

Şen (2014) çalışmasında iki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen birbirinden bağımsız iki elektrik motoru ile tahrik edilen robotik bir sistem için bulanık mantık tabanlı bir kontrolcü tasarımı gerçekleştirmiştir. Bulanık mantık kontrolcü parametrelerini literatüre yeni giren arı algoritması yöntemini kullanarak belirlemiştir. Benzetim çalışmalarına yer verilen araştırmasında sonuçların etkinliği değerlendirilmiştir.

Vinodh ve Jerome (2013) çalışmalarında, sarkacın yükselme problemi için PV ve LQR kontrol yöntemlerini, sarkacın denge problemi içinse tam durum geri beslemesi ve LQR kontrol yöntemini önermişlerdir. Benzetim ve deneysel çalışmalarının sonuçlarına göre sarkacın yükselme ve denge problemlerinin her ikisi için de LQR kontrolcünün daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir.

Wu ve Zhang (2011) ters sarkaç sistemini temel alan mobil sistemler üzerinde yaptıkları bulanık mantık çalışmalarında, Newton hareket denklemleri ile sistemin matematik modelini oluşturmuşlar ve sistem için Fuzzy-PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Sistemin konum kontrolü için bulanık kontrolcü, sistemin denge kontrolü için ise PID kontrolcü tasarlayarak sisteme uygulamışlardır. Wu ve ark.(2012) yılındaki çalışmalarında ise Fuzzy-PD kontrolcü tasarımı gerçekleştirerek bu sistemler için bulanık mantık uygulamaların önemli ve araştırmaya değer olduğunu belirtmişlerdir.

Goher ve Tokhi (2010) çalışmalarında iki tekerli mobil sistem kontrolü üzerine genetik algoritma tabanlı optimizasyon üzerine çalışmışlardır. Sistemin kontrolü için

genetik algoritmalar yöntemiyle parametrelerin tayin edilmesi yöntemi belirlenmiştir. Goher ve Tokhi (2011) çalışmalarında ise sistemin konum ve denge kontrolünü için PD ve bulanık mantık kontrolcileri uygulamıştır. PD ve bulanık mantık kontrolcülerinin performanslarını karşılaştırmışlardır.

Yazıcı ve Karamancıoğlu (2008) çalışmalarında, ters sarkacın yükselme problemi için doğrusal olmayan programlama yaklaşımını sunmuşlardır. Sarkacın yükselme problemine her ne kadar enerji tabanlı kontrolör ile yaklaşımda bulunsalar da kontrol problemini uygun amaç ve kısıt fonksiyonları kullanarak doğrusal olmayan programlama modeline dönüştürmüşlerdir. Doğrusal olmayan programlama modeli ile amaç fonksiyonunu enerjinin artırımını hedeflerken, sisteme ait fiziksel sınırlamaları kısıtlar ile modellemişlerdir. Sonuç olarak önerdikleri modelin herhangi bir doğrusal olmayan kısıt tarifinde de kullanılabileceğini göstermişlerdir. Çalışmalarını, tasarladıkları modelin doğruluğunu gösteren benzetim sonuçlarıyla da desteklemişlerdir.

Muskinja ve Tovornik (2006) çalışmalarında, tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemi üzerinde çalışmışlardır. Sarkacın yükselme problemi için bulanık mantık ve enerji tabanlı kontrol yöntemlerini kullanmışlardır. Sarkacın denge problemi içinse uyarlamalı durum kontrolör yapısını önermişlerdir. Benzetim ve deneysel sonuçlarla desteklenen çalışmalarında bulanık denetçinin enerji tabanlı kontrolöre göre daha avantajlı olduğunu belirtmişlerdir.

Nundrakwang ve ark. (2005) yaptıkları araştırmada, sarkacın yükselme problemi için PD konum kontrollü bir denetleyici, sarkacın denge problemi içinse durum geri besleme yöntemlerini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarını deneysel ve benzetim sonuçları ile desteklemişlerdir.

Grasser ve ark. (2002) yaptıkları deneysel çalışmalarda, iki tekerlekli mobil platform üzerinde ters sarkacın dengeleme problemine kutup yerleştirme yaklaşımı ile tasarladıkları kontrolcüyü uygulamışlardır.

Bu çalışmada ise kararsız ve doğrusal olmayan matematiksel model yapısı ile üzerinde birçok kontrol teorisinin çalışılmasına olanak sağlayan, klasik bir kontrol düzeneği olan ters sarkaç sistemi incelenmiştir. Uygulamalı bir kontrol çalışması olan bu çalışmada, kontrol teorisinin klasik problemlerinden biri olan gerçek zamanlı

doğrusal arabalı ters sarkacın kontrolü sunulmaktadır. Ters sarkacın denge problemini iyileştirmeye yönelik klasik kontrol teorilerinden farklı olarak Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kontrolcünün performansını belirlemek üzere karşılaştırma amacıyla Linear Quadratic Regulator (LQR) kontrolcü tasarımı da yapılmıştır. Sistemin matematiksel modeli ve uygulanabilecek kontrol teknikleri detaylı olarak incelenmiştir. Sistemin kontrolünde yaygın olarak kullanılan LQR kontrol verileri MATLAB programının ANFIS Toolbox modülünde yapay sinir ağı tabanlı olarak eğitilerek elde edilen bulanık mantık kontrolcü ve LQR kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır. İncelenen kontrol teknikleri MATLAB/Simulink ortamında tasarlanarak Quanser doğrusal ters sarkaç deney cihazında uygulanmıştır. Kontrolcülerin gerçek sistem ve simülasyon cevapları değerlendirilmiş ve grafik olarak sunulmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışma kapsamında öncelikle doğrusal arabalı ters sarkacın fiziksel modeli yardımı ile sistemin matematiksel modeli elde edilmiştir. Sonrasında, elde edilen matematiksel model denklemleri MATLAB/Simulink programında blok diyagramları yardımı ile modellenerek üzerinde doğrusal ve klasik kontrol yöntemlerinden olan LQR kontrolcü tasarımı yapılmıştır. LQR kontrol uygulama verileri MATLAB programının ANFIS Editor modülünde yapay sinir ağı tabanlı olarak eğitilerek daha çok doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde kullanılan Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) Kontrolcü tasarımı yapılmıştır. MATLAB/Simulink ortamında simülasyonlarda tasarlanan kontrolcüler gerçek sistem için de gerçekleştirilmiştir.

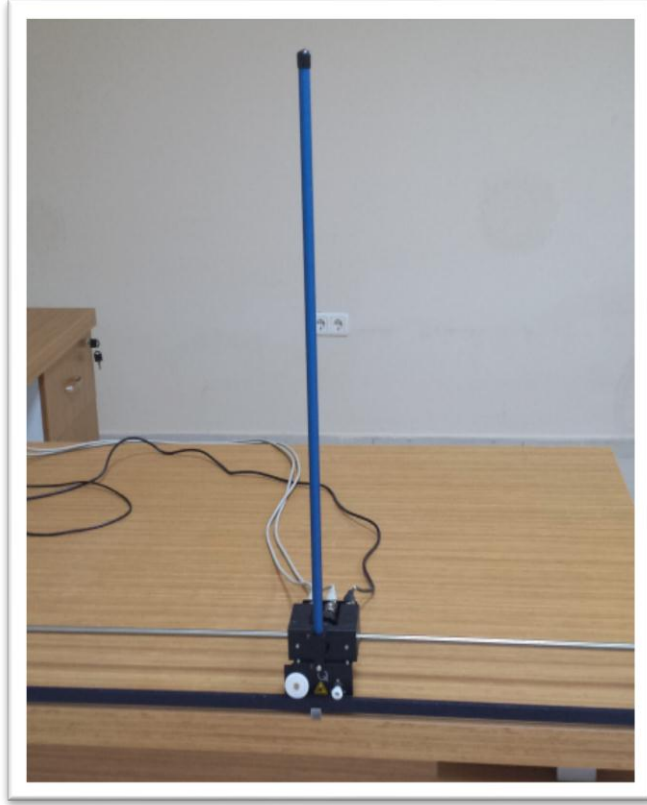
3.1. Materyal

Ters sarkaç sistemleri, genellikle gerçek sistemler için uygun kontrolcü tasarlanması amacıyla üzerlerinde farklı kontrolcülerin test edildiği sistemler olarak kullanılmaktadır. Bu sebeple simülasyon ve deneysel olarak iki kısımda gerçekleştirilen bu çalışmanın deneysel kısımları için Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarında bulunan Quanser firmasının doğrusal ters sarkaç deney seti kullanılmıştır.

3.1.1. Tek Çubuklu Arabalı Ters Sarkaç Deney Düzeneği

Deneysel çalışmalar için kullanılan Quanser firmasının doğrusal ters sarkaç deney seti Şekil 3.1.' de görülmektedir. Literatürde Quanser firmasının doğrusal ters sarkaç deney seti tercih edilerek yayınlanmış birçok makale bulunmaktadır (Kumar ve Jerome, 2013; Gawthrop ve Wang, 2005).

Yüksek hassasiyet ve MATLAB/Simulink ile eş zamanlı kullanımı bu deney setinin seçilmesinde önemli etkenlerdir. MATLAB/Simulink ile eş zamanlı çalışabilen deney seti aynı zamanda sistemden aldığı verileri bilgisayara kaydedebilmektedir.



Şekil 3.1. Tek çubuklu arabalı ters sarkaç deney düzeneği

Deney setini basit olarak tanıtmak gerekirse: Sistem, kramayer dişli üzerinde hareket eden bir araba, arabaya bağlı ve serbest bir şekilde bağlı olduğu nokta etrafında dönebilen alüminyum bir çubuktan oluşmaktadır. Araba, DC servo motorun miline bağlı dişlinin kramayer dişli üzerinde dönmesi ile doğrusal olarak hareket etmektedir. Sarkacın araç üzerinde dönme noktasına bağlı olan ve 4096/tur oranına sahip artırılmış kodlayıcı (incremental encoder) yardımı ile sarkacın açısı ölçülebilmektedir. Sarkacın açısı ve arabanın konumu sistemden direkt olarak, sarkacın açısal hızı ve arabanın doğrusal hızı ise sarkaç açısının ve arabanın konumunun türevi alınarak elde edilmektedir.



Şekil 3.2. İki kanallı kontrol kartı

Sistemin diğer bileşenleri kontrol kartı, yükseltici (amplifier) ve bilgisayardır. Kontrol kartı bilgisayarla mekanik sistem arasında bulunmaktadır. Kontrol kartının ana görevleri şöyle sıralanabilir;

- Ölçümlerin bilgisayara aktarılmasını sağlamak,
- Hesaplanan kontrol sinyalinin değerlendirmesini sağlamak,
- Yükseltici yardımı ile sürücü motora uygulanmasını sağlamaktadır.

Kontrol kartı Quanser firmasının iki kanallı Q2 modelidir. Kart, 16 bit çözünürlüktedir ve 500kS/sn örnekleme hızına kadar çıkabilmektedir.



Şekil 3.3. Yükseltici

Çalışmada kullanılan doğrusal ters sarkaç deney düzeneğine ait parametreler Çizelge 3.1.' de verilmiştir.

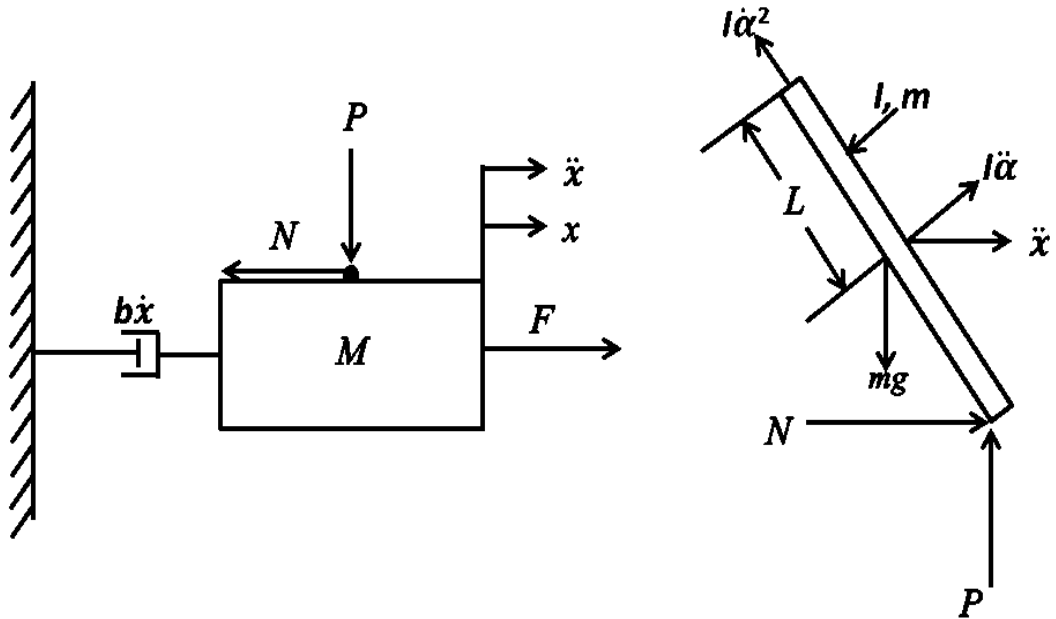
Çizelge 3.1. Quanser doğrusal ters sarkaç deney setine ait gerekli parametreler (Quanser, 2012)

Parametre	Açıklama	Değer	Birim
g	Yer çekimi sabiti	9.81	m/sn ²
M	Sarkaç arabasının arabanın ağırlığı	0.75	kg
m	Sarkacın ağırlığı	0.230	kg
I	Sarkacın atalet momenti	$7.88 \cdot 10^{-3}$	kgm ²
l	Sarkacın uzunluğu	0.643	m
b	Sarkaç arabasının eşdeğer viskoz sönüm oranı	5.4	N m sn/rad
K_{ep}	Sarkaç encoder hassasiyeti	0.0015	rad/tur
f_{maks}	Maksimum motor giriş voltaj frekansı	50	Hz
I_{maks}	Maksimum motor giriş akımı	1	A
ω_{maks}	Maksimum motor hızı	628.3	rad/sn

3.2. Yöntem

3.2.1. Ters Sarkaç Sisteminin Matematik Modeli

Fiziksel bir sistemin modellenmesi kavramı ilk olarak Zadeh tarafından kullanılmıştır ve Zadeh bu kavramı “Bir sistemin giriş ve çıkışını belirlemek” şeklinde tanımlamıştır (Zadeh, 1962). Fiziksel bir sistemin matematik modelinin bulunması sistemin ileriki dinamik davranışlarını büyük ölçüde tahmin etmemize yardımcı olur. Matematik modeli bilinen bir fiziksel sistemin analizi yapılabilir veya değişik girişlere karşı, çıkışlar tahmin edilebilir. Modellenen sistemler üzerinde yapılan çalışmalarda sistem davranışları hakkında fikir edinilmesi sistem modellemenin önemini hızla artırmaktadır.



Şekil 3.4. Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemi serbest cisim diyagramı

Şekil 3.4.' de tek çubuklu arabalı ters sarkaç sisteminin serbest cisim diyagramı görülmektedir. Sarkacın bağlı olduğu arabaya etki eden kuvvetler; uygulanan F kuvveti,

sarkacın bağılı olduğu noktadan arabaya etki eden yatay N ve dikey P kuvvetleri ile arabanın tekerler üzerinde dönüşünden kaynaklanan dönel sönümleyici elemanın etkisiyle oluşan $b\dot{x}$ ' dir. Buradan da görüldüğü üzere sistem zorlanmış bir kütle damper sistemi olarak modellenenbilmektedir.

Sarkaca ve arabaya etki eden kuvvetleri Newton'un hareket kanunlarına göre ayrı ayrı değerlendirilip gerekli işlemler yapılmıştır. Sarkaç arabası F kuvveti etkisiyle yatay eksen üzerinde hareket ettiği için Newton'un hareket kanununa göre araba üzerine etki eden net kuvvet aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$F = M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + N \quad (3.1)$$

Sarkaç arabasının hareketi sarkaç üzerinde bir tepki kuvveti oluşturur. Bu tepki sarkacın denge noktasından uzaklaşmasına sebep olan kuvvettir. Benzer şekilde Newton'un hareket kanunlarına göre sarkaç üzerine etki eden tepki kuvveti aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$N = m \frac{d^2 x}{dt^2} + mL \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \cos \alpha - mL \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \sin \alpha \quad (3.2)$$

Newton'un hareket kanunlarına göre arabanın yatayda yaptığı hareket ve sarkacın yataydaki kuvvet analizi denklemlerinin ortak çözümü için Denklem (3.1)' de N yerine Denklem (3.2)' yi koyarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$F = (M + m) \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + mL \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \cos \alpha - mL \left(\frac{d\alpha}{dt} \right)^2 \sin \alpha \quad (3.3)$$

Sarkacın düşey yöndeki kuvvet analizi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$P \sin \alpha + N \cos \alpha - mg \sin \alpha = mL \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \cos \alpha - m \frac{d^2 x}{dt^2} \cos \alpha$$

(3.4)

P ve N terimlerinden kurtulmak için sarkacın merkezindeki momenti hesaplamamız gerekir. Burada P : Sarkaca etki eden dikey kuvvet, N : Sarkaca etki eden yatay kuvvettir. Sarkacın merkezindeki momenti veren ifade aşağıdaki gibidir;

$$-PL \sin \alpha - NL \cos \alpha = I \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$$

(3.5)

Sarkacın düşey yöndeki kuvvet analizi ve sarkacın merkezinde oluşan moment denklemlerinin ortak çözümü için Denklem (3.4) L çarpanı ile genişletilerek Denklem 3.5 ile taraf tarafa toplanarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$(I + mL^2) \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + mgL \sin \alpha = -mL \frac{d^2 x}{dt^2} \cos \alpha$$

(3.6)

Elde edilen ikinci. dereceden diferansiyel denklem olan (3.7) ve (3.8) nolu denklemler aşağıdaki gibi de gösterilebilir;

$$F = (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + mL\ddot{\alpha} \cos \alpha - mL\dot{\alpha}^2 \sin \alpha$$

(3.7)

$$(I + mL^2)\ddot{\alpha} + mgL \sin \alpha = -mL\ddot{x} \cos \alpha \quad (3.8)$$

3.2.2. Matematik Modelin Doğrusallaştırılması

Analiz ve kontrol teknikleri doğrusal sistemlerin kontrolleri için geçerlidir ve elde edilen hareket denklemlerinin doğrusallaştırılmaları gerekmektedir. Aynı zamanda sisteme ait transfer fonksiyonlarının elde edilebilmesi için de yine hareket denklemlerinin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Bu işlem için ilk olarak denklemlerdeki sinüs ve cosünüs terimlerinin ve ardından denklemini doğrusal olmaktan çıkaran $\dot{\alpha}^2$ teriminin yok edilmesi gerekmektedir.

Bunun için sarkaç açısındaki değişimin çok küçük olduğunu varsayarak aşağıdaki kabulleri uygulayabiliriz;

$$\alpha = \pi + \phi$$

$$\sin \alpha = \sin(\pi + \phi) \approx -\phi$$

(3.9)

$$\cos \alpha = \cos(\pi + \phi) \approx -1$$

$$\dot{\alpha}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0$$

Yukarıdaki kabullere göre sarkacın düşeyle yaptığı açının çok küçük olduğu kabul edilmiştir. Açı çok küçük olduğundan farkının cosünüsünün -1' e sinüsünün de kendisine eşit olduğu kabul edilir.

Denklem (3.7) ve denklem (3.8)' e (3.9)' daki kabullerimizi uygulayarak doğrusallaştırılmış iki denklem elde ederiz.

$$(I + mL^2)\ddot{\phi} - mgL\phi = mL\ddot{x} \quad (3.10)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - mL\ddot{\phi} = u \quad (3.11)$$

3.2.3. Transfer Fonksiyonları

Transfer fonksiyonu; doğrusal bir sistemin başlangıç koşulları sıfır iken sistemin çıkış değişkeninin Laplace dönüşümünün, giriş değişkeninin Laplace dönüşümüne oranıdır. (3.10) ve (3.11) numaralı doğrusallaştırılmış sistem denklemlerinin transfer fonksiyonlarını elde etmek için, başlangıç koşullarını sıfır kabul ederek denklemlerin Laplace dönüşümü alınır.

$$(I + mL^2)\Phi(s)s^2 - mgL\Phi(s) = mLX(s)s^2 \quad (3.12)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - mL\Phi(s)s^2 = U(s) \quad (3.13)$$

(3.11) nolu transfer fonksiyonu giriş çıkış formatında yazarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$X(s) = \left[\frac{I + mL^2}{mL} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) \quad (3.14)$$

(3.14) nolu transfer fonksiyonunu (3.13) nolu transfer fonksiyonunda yerine yazarsak aşağıdaki denklemi elde ederiz;

$$(M + m) \left[\frac{I + mL^2}{mL} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s)s^2 + b \left[\frac{I + mL^2}{mL} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s)s - mL\Phi(s)s^2 = U(s) \quad (3.15)$$

(3.15) nolu denklemi düzenlersek;

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{mL}{q} s^2}{s^4 + \frac{b(I + mL^2)}{q} s^3 - \frac{(M + m)mgL}{q} s^2 - \frac{bmgL}{q} s} \quad \left[\frac{rad}{N} \right] \quad (3.16)$$

$$q = [(M + m)(I + mL^2) - (mL)^2] \quad (3.17)$$

(3.16) nolu transfer fonksiyonunda başlangıçta hem kutup hem de sıfır vardır. Sıfırını iptal edip gerekli düzenlemeler yapılarak, sarkacın açısının çıkış olduğu (3.18) transfer fonksiyonu elde edilir;

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{mL}{q} s}{s^3 + \frac{b(I + mL^2)}{q} s^2 - \frac{(M + m)mgL}{q} s - \frac{bmgL}{q}} \quad \left[\frac{rad}{N} \right] \quad (3.18)$$

Benzer şekilde hesaplanan arabanın pozisyonunun çıkış olduğu (3.19) transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{(I + mL^2)s^2 - gmL}{q}}{s^4 + \frac{b(I + mL^2)}{q}s^3 - \frac{(M + m)mgL}{q}s^2 - \frac{bmgL}{q}s} \quad \left[\frac{m}{N}\right] \quad (3.19)$$

Arabalı ters sarkaç sisteminde sarkacın arabasına uygulanan kuvvet ile sarkacın denge konumuna gelmesi istenmektedir. Buna göre sisteme giriş olarak kuvvet uygulanmakta ve sistemden çıkış olarak sarkaç açısı elde edilmektedir. Yine arabaya uygulanan kuvvet sarkaç arabasını istenilen konuma getirmektedir. Böylece sistemin diğer transfer fonksiyonu için giriş olarak kuvvet uygulanmakta, çıkış olarak arabanın konumu elde edilmektedir.

3.2.4. Durum Uzayı Modeli

Ters sarkaç sisteminin dinamiğini tanımlayan bir diğer gösterim şekli de sistemin durum uzayı modelidir. Durum uzayı modeli; sistemin dinamik davranışlarını tanımlayan ve durum denklemleri olarak adlandırılan birinci derece denklemlerden oluşan bir denklem takımıdır. Durum denklemleri matris ve vektör biçimleri kullanılarak ifade edilir. Durum uzayı modeli ile herhangi bir anda bir sistemin dinamik davranışı o sistemin durum değişkenleri cinsinden tanımlanabilmektedir.

Genel olarak r girişli, m çıkışlı bir sistemin durum denklemleri ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU\end{aligned}\tag{3.20}$$

Burada;

X: Durum vektörü (n elemanlı sütun vektörü)

U: Kontrol vektörü (r elemanlı sütun vektörü)

Y: Çıkış vektörü (m elemanlı sütun vektörü)

A: Sistem matrisi ($n \times n$ elemanlı matris)

B: Giriş matrisi ($n \times r$ elemanlı matris)

C: Çıkış matrisi ($m \times n$ elemanlı matris)

D: Doğrudan iletim matrisi ($n \times r$ elemanlı matris)

olarak adlandırılır.

Sistemin matris formundaki durum-uzay gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I + mL^2)}{I(M + m) + MmL^2} & \frac{m^2gL^2}{I(M + m) + MmL^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mLb}{I(M + m) + MmL^2} & \frac{mgL(M + m)}{I(M + m) + MmL^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \alpha \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I + mL^2}{I(M + m) + MmL^2} \\ 0 \\ \frac{mL}{I(M + m) + MmL^2} \end{bmatrix} u\tag{3.21}$$

Durumlarımız;

x : Arabanın konumu,

$\dot{x}$: Arabanın yatay eksenindeki doğrusal hızı,

α : Sarkacın düşey eksenle yaptığı açı,

$\dot{\alpha}$: Sarkacın açısal hızıdır.

3.2.5. Kontrol Yöntemleri

Matematiksel modeli belirlenen sistemlerin kontrolleri için kullanılabilecek yöntemler temel olarak iki gruba ayrılırlar. Bunlar;

1. Açık çevrim kontrol yöntemleri
2. Kapalı çevrim kontrol yöntemleri

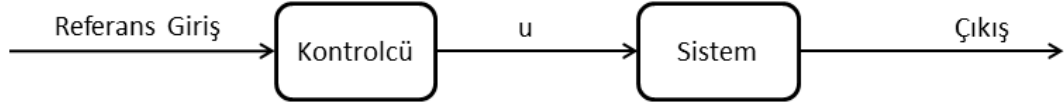
Bu yöntemlerin amaçları;

- Süreçlerdeki fiziksel çıkış büyüklüğünü istenilen seviyede tutmak,
- Süreçle ilgili fiziksel çıkışların belli bir değişim formunu izlemelerini sağlamak,
- Ardışık lojik mantığına sahip süreçlerin kontrolünü gerçekleştirmektir (BOLTON, 1998).

3.2.5.1. Açık Çevrim Kontrolü

Açık çevrim kontrolünde kontrol işareti çıkış işaretinden etkilenmez. Açık çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 3.5.' de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi açık çevrim kontrol sistem parametrelerindeki değişiklikler ya da

sisteme etki eden bozucu girişler nedeniyle sistem çıkışında oluşabilecek değişiklikler algılanamaz (Paraskevopoulos, 2002).

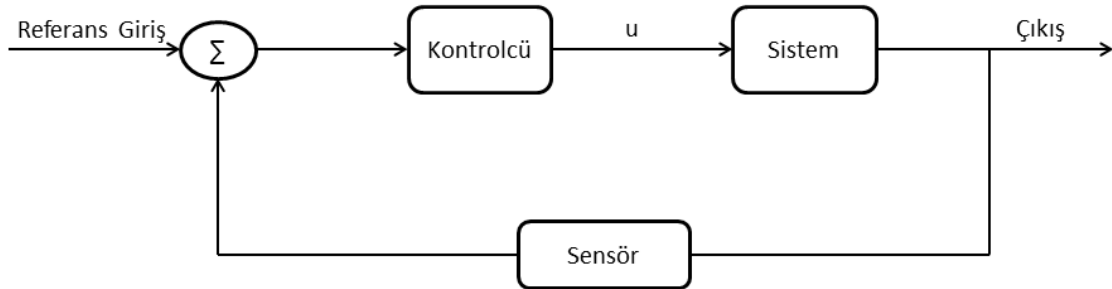


Şekil 3.5. Açık çevrim kontrolü blok diyagramı

Açık çevrim kontrolü, kontrol edilecek sistem yapısının ve sisteme etki eden diğer girişlerin önceden çok iyi bilindiği uygulamalarda kullanılır. Bir anahtarla lambanın kumandası açık çevrim kontrolüne örnek olarak verilebilir.

3.2.5.2. Kapalı Çevrim Kontrolü

Kapalı çevrim kontrolünde sistem için kontrol işareti üretilirken sistem çıkışı da göz önüne alınır. Şekil 3.6.' da blok diyagramları ile de gösterildiği şekilde sistem çıkışı çoğu zaman bir sensör yardımı ile değerlendirilerek kontrol işareti üretilir.



Şekil 3.6. Kapalı çevrim kontrolü blok diyagramı

Kapalı çevrim kontrolü, kontrol edilecek sistem yapısının tam bilinmediği veya sisteme anlık bozucu girişlerin olabileceği durumlarda tercih edilen bir yöntemdir. Kontrol yöntemlerinin birçoğu kapalı çevrim kontrol içerisine girmektedir. Tez kapsamında tam durum geri beslemesi ile kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden LQR ve YBM kontrol sarkacın denge problemi için kullanılmış ve mukayeseleri yapılmıştır.

3.2.5.2.1. Tam Durum Geri Beslemesi İle Kontrol

Kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden olan tam durum geri beslemesi ile kontrol yönteminde sistem içerisindeki tüm durumlar göz önüne alınır. Sistem üzerinden ölçülen durum değişkenlerinin istenilen referans değeri ile olan farkı hesaplanarak kontrolcü tarafından bu değeri referans değere getirecek kontrol sinyali üretmesi sağlanır. Bu şekilde tüm durumlar referans değerine çekilmeye çalışılır.

Çalışmada tüm durum değişkenlerinin değeri sıfıra getirilmeye çalışıldığı için hata ölçülen durum değişkeninin negatif işaretlisi şeklindedir. Eğer arabanın konumunu belli bir noktaya getirmeye veya sarkacın açısını sıfırdan farklı bir değerde tutmaya çalışsaydık referans olarak istediğimiz değeri vermemiz gerekirdi (Özbey, 2006).

$$\dot{X} = A X + B U \quad (3.22)$$

şeklinde doğrusal bir sistemde tam durum geri beslemesi uygulandığında kontrol komutu;

$$U = K X \quad (3.23)$$

şeklindedir. Bu durumda ise sistem;

$$\dot{X} = (A + B K) X \quad (3.24)$$

şeklini alır ve kontrol edilen sistem davranışlarını $A+BK$ matrisinin kutupları yani özdeğerleri belirler.

3.2.5.2.2. Linear Quadratic Regulator (LQR) Kontrol

Bu kısımda Linear Quadratic Regulator (LQR) yöntemi ile sistemin geri besleme katsayılarının elde edilmesi teorik olarak incelenmiştir.

LQR en uygun kontrol girdisini hesaplamak için performans indeksi ve durum değişkenlerini kullanarak yapılan hesaplamalarla tasarlanan bir kontrol yöntemi olup hesaplamalar yapılmadan önce sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olduğundan emin olunmalıdır (Anderson, 1898).

Optimal bir kontrol problemi, performans kriteri veya amaç fonksiyonunu en aza indiren optimum kontrolün bulunmasıdır. LQR kontrol, optimal kontrol sistemleri olarak sınıflandırılmış tasarımlardır ve kontrol mühendisliği için önemli bir fonksiyondur. İstenilen çalışma performansını sağlayacak pratik bileşenler ile bir sistemin tasarlanması amaçlanmıştır. Arzu edilen performans zaman alanı, performans indisleri ile ifade edilebilir. Örneğin, bir basamak giriş için maksimum aşma ve yükselme zamanı, zaman alanı indisleridir (Oral, 2010).

LQR, $\dot{X}=AX+BU$ şeklinde ifade edilen bir sisteme $U=K X$ şeklinde, durum geri beslemeli denetim amacı ile tasarlanan “K” denetimin başarısını gösterir. En uygun kontrol için performans indeksi veya amaç fonksiyonu ile bu indeksi minimize edecek $U=K X$ aranır. Performans indeksinin genel hali;

$$J = \int_0^{\infty} \left[x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t) \right] dt \quad (3.25)$$

şeklindedir.

Burada, Q , simetrik, yarı kesin pozitif ve R , simetrik, kesin pozitif matrislerdir. Performans indeksi J 'yi minimize ederek $u(t) = Kx(t)$ 'nin bulunması için sistem koşullarının ve J 'nin durumlarının tam ifade edilmesi ayrıca düzenleyicisi tasarlanan sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması gereklidir. Q ve R pozitif, reel ve hermisyen matrislerdir. R matrisi Q matrisinden daha büyük seçilirse, sistem az bir güçle durum vektörünü sifıra yaklaştırır fakat sistemin cevap süresi uzar. Eğer R matrisi Q matrisinden küçük olursa, sistem daha büyük bir güç harcayarak, hızlı bir şekilde cevaba ulaşacaktır. İşte bu iki durum arasında denge LQR tasarımıdaki esastır. Diğer bir yandan, R ve Q değerleri büyüdükçe hata azalır ve sistem hızlanır. (Anderson-1898).

Performans indeksi belirlendikten sonra yapılması gereken işlem girişe bağlı olarak bu indeksi minimize etmektir. Bunu giriş kontrol vektörünün indeks matrisini minimum yapacak değerde seçerek yapmaktayız. Bu giriş değerleri optimaldir. Eğer performans indeksi değişecek olursa optimal girişlerde beraberinde değişecektir. Optimal kontrol tasarımı, kontrol sisteminin davranışı kabul edilebilir değerlere ulaşana kadar performans indeksinin değiştirilmesine dayanmaktadır. Quadritik optimal şemasının kullanılmasının avantajı sistem dizaynının çok özel durumlar hariç stabil olmasıdır (Ogata, 1994)

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_1 \end{bmatrix}, \quad R = r_i \quad (3.26)$$

LQR kontrolde anlatılan bilgiler ışığında kullanıcının tanımladığı q_i ve r_i katsayılarına bağlı olarak performans indeksi minimize edecek “ U ” sistem girdisi bulunur.

Kontrol edilecek sistem $\dot{X} = A X + B U$ şeklinde ve $U=K X$ olarak kabul edilirse; $K=R^{-1}B^TP$ olup P ise aşağıdaki Ricatti Eşitliğinin çözümünden bulunan simetrik matristir.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3.27)$$

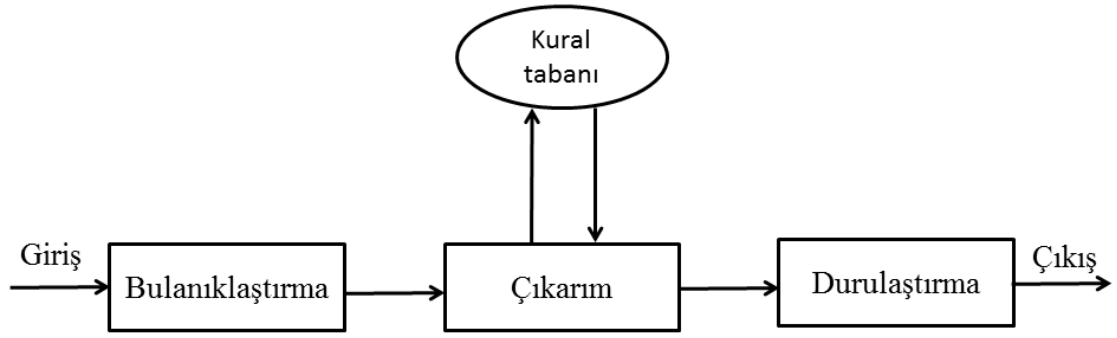
Bu eşitlik nümerik olarak birçok program yardımı ile hesaplanabildiği gibi bu eşitliği hesaplayan programlardan biri de MATLAB’ dır. Ağırlık matrisleri Q , R , sistem matrisi A ve giriş matrisi B bilindiğinde K geri besleme matrisi MATLAB programının komut penceresine yazılan “lqr” komutu ile bulunabilmektedir.

3.2.5.2.3. Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) Kontrolcü

İlk olarak 1965 yılında California Üniversitesi öğretim üyelerinden aslen Azerbaycanlı Prof. Lotfi Zadeh tarafından ‘Bulanık Kümeler’ isimli makalesi ile “Information and Control” dergisinde ortaya atılan bulanık küme kavramı hızla gelişerek birçok bilim adamının ilgisini çekmiş, araştırmacılar için yeni bir çalışma konusu olmuştur.

Bulanık küme kavramının tanımlanmasından sonra 1970’lerde bulanık kontrolcüler gerçek sistemler için kullanılmıştır. İlk olarak 1975’ te, Mamdani ve arkadaşları tarafından bir buhar makinesinin bulanık kural tabanlı kontrolü ile bulanık mantıkla kontrol ile başlamıştır ve bu uygulama sonucunda, doğrusal olmayan kontrol problemleri için bulanık kontrolcülerin klasik kontrolcülere göre çok daha kolay geliştirildiği ve oldukça iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Gelişmeler sonucunda bulanık mantığın ilk önemli endüstriyel uygulaması 1978’de Danimarka’da bir çimento fabrikasında çimento fırınının kontrolü için bir bulanık mantık kontrolcü geliştirilmiştir. Değirmen içerisinde hassas bir denge ile oranlanması gereken sıcaklık ve oksijen ayarı uygun bir şekilde ayarlanmıştır (Jario, 2000). Şekil 3.7.’ de bulanık mantık sisteminin çalışma yapısı görülmektedir.



Şekil 3.7. Bulanık sistem çalışma yapısı

Yapay sinir ağı biyolojik sinir ağına benzer şekilde belirli bir performans karakteristiğine sahip bilgi işleme sistemidir. YSA temelde giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşmaktadır. Bu katmanların her birinde ağırlıklar, bağlantılar ve nöronlar bulunmaktadır. Bu üç bileşenle ağın yapısı oluşturulduktan sonra eldeki veriler eğitim ve test aşaması olarak bilinen matematiksel test aşamasında kullanılır (Faussett, 1994).

YSA' nın önemli bir karakteristiği biyolojik sinir sisteminde olduğu gibi iki çeşit hata tolerans özelliğine sahiptir. Birincisi daha önce karşılaşılan sinyallerden farklı bir sinyal ile karşılaşıldığında bunun fark edilmesidir (Narendra, 1997). Diğeri meydana gelen zararın tolere edilmesidir. Zarar durumunda kaybedilen hücrelerin fonksiyonunu diğer hücreler üstlenmektedir. YSA' lar küçük zararları karşılayabilecek şekilde tasarlanabilmekte veya büyük zararlar karşısında YSA tekrar edebilmektedir (Chen, 1992).

Genel olarak YSA biyolojik sinir sisteminin işlevini taklit ederek insan beyninin modellenmesi için tasarlanmış sistemlerdir ve öğrenme, genelleme yapabilme, doğrusal olmama, gürültüye karşı tolerans, paralel işlem yapabilme ve uyarlanabilirlik gibi önemli karakteristik özelliklere sahiplerdir (Zorlu, 2004; Kaplan, 2000).

Yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık, yapay sinir ağlarının paralel hesaplayabilme ve öğrenme kabiliyeti ile bulanık mantığın uzman bilgisini kullanarak sonuç çıkarabilme özelliklerinin birleşiminden oluşur. Sonuçta sinirsel bulanık sistemler sayesinde yapay sinir ağları daha anlaşılır hale gelir (Jang, 1993).

Jang' ın geliştirdiği ANFIS yöntemi doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde ve kaotik zaman sinirlerinin tahmininde kullanılmıştır.

MATLAB/ANFIS Editor aracılığı ile yöntem araştırmacıların kullanımına sunulmuştur (Jang, 1993; Kalyoncu, 2008).

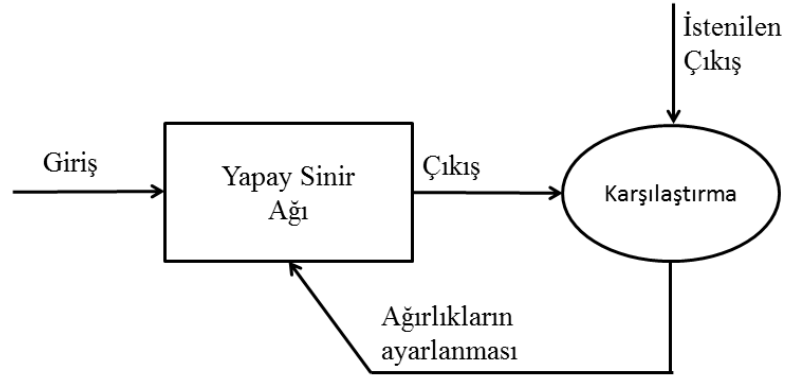
MATLAB/ANFIS ile kontrolcü tasarlarken aşağıdaki adımlar takip edilebilmektedir (Jang, 1995).

- Kontrol edilecek sistem için veri toplamak: Bu verileri ANFIS' in kullanabileceği şekilde arabirime yüklemek.
- Uygun yapıyı oluşturmak: Bunun için, önceden hazırlanmış veya boş bir yapı kullanabiliriz. Boş yapıda giriş-çıkış ilişkisinin nasıl belirleneceğini gösteren iki yöntem vardır. Bunlar: Grid Partitioning ve Subtractive Clustering. Bu aşamada giriş ve çıkış üyelikleri ile ilgili tanımlamalar da yapılabileceği gibi optimizasyon da yaptırılabilir. Yalnız, çıkıştaki üyelik sayısını, dolayısıyla kural sayısını belirlemek veya bir kısıtlama getirmek mümkün değildir. ANFIS bunları kendisi otomatik belirler.
- Ağı eğitmek: Burada eğitim hatasının sıfır olması istenilir. Eğitimde hatanın yayılması iki şekilde olur: ya sadece geri yayılım kullanılır ya da hibrit bir metot kullanılır.
- Sonuç olarak meydana gelen fışmat yapısının performansı kontrol verisi yardımıyla belirlenerek grafik olarak kullanıcıya sunulur.

YBM kontrolcü tasarımında kontrolcünün giriş ve çıkış parametreleri YSA' da eğitilir ve bulunan giriş ve çıkışlara göre YBM kontrolcünün üyelik fonksiyonları ve kural tabanı oluşturulur. Kontrolcü girişlerine ve çıkışlarına göre üyelik fonksiyonlarının sayısı ve şekli kullanıcı tarafından veya MATLAB gibi paket programlar ile, üyelik fonksiyonlarının hangi aralıkta ve nasıl yerleştirileceği YSA' dan elde edilen bilgilerle yapılır. YBM kontrol tekniğinde kontrolcü çıkışları klasik bulanık mantık kontrolcü çıkışları gibi dilsel ifadelerle değil, kontrolcü Sugeno tip bulanık mantık yapısı içerdiğinden ya sabit ya da doğrusal artış gösteren değerlerden meydana gelmektedir. YBM kontrolü Sugeno tipi bulanık çıkarım sisteminin parametrelerini belirlemek için hibrit öğrenme algoritması kullanır. Bu yöntem YSA' ya verilen eğitim verilerini hesaplamak ve üyelik fonksiyonu parametrelerini bulmak için geri yayılım algoritması ve en küçük kareler metodunu kullanır. Bu yolla sistem, farklı giriş

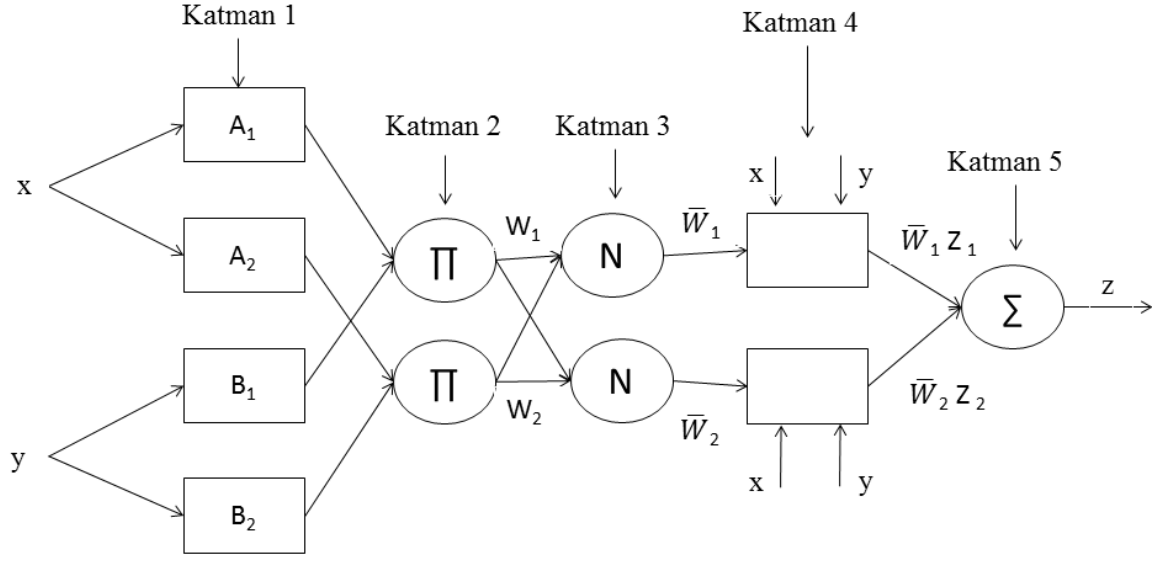
değerlerindeki cevaplara göre eğitilir. Bir başka eğitim yolu ise LQR gibi klasik kontrolcü tiplerinin giriş ve çıkış verileri kullanılarak yapılmaktadır (Çakan, 2013).

Şekil 3.8.' de görülen yapay sinir hücresinde istenilen çıkış değeri gerçek çıkış değeri karşılaştırılarak ağ eğitilir. Ağ çıkış değeri ile istenilen çıkış değeri ağırlıkların ayarlanması ile istenilen değere ulaşana kadar devam eder.



Şekil 3.8. Yapay sinir hücresi yapısı

YBM çıkarım sisteminde, bulanık mantığın belirsiz bilgileri işleme ve yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneği birlikte kullanılmaktadır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının birleştirilmeleri birbirlerinin dezavantajlarını örtmektedir (Jogle, 2004). Eğer sistemlerin matematik modelleri biliniyorsa sistemin analizi yapılabilir veya belirli girişlere karşı çıkışlar kestirilebilir. Fakat gerçek uygulamalarda sistemlerin matematik modellerini belirlemek genellikle çok zordur. Basit bir sistem için Newton yöntemleri kullanılarak model üretilebilirken karmaşık sistemlerde bu yöntem yeterli olmamaktadır (Andreos, 2003). YBM çıkarım sistemi Şekil 3.9.' da görüldüğü gibi 5 katmandan oluşmaktadır. Her katmandaki düğümlerin çıkışları O_{il} ile tanımlanmaktadır. Burada l katmanı i ise o katmandaki düğüm sayısını ifade etmektedir.



Şekil 3.9. YBM çıkarım sistemi yapısı

Bulanık sistemlerde bilgi tabanı bulanık kurallar ile sağlanmaktadır ve bu bulanık kurallar sistem girişleri ve çıkışları arasındaki ilişkilerden oluşmaktadır. Üyelik fonksiyonlarının şekilleri, grup parametrelerine ve bu parametrelerin değişimine bağlıdır. Kullanıcı tecrübe ve bilgisinin bulanık çıkarım sistemlerinin model yapısına ve kural tabanına çevrilebilmesi için standart bir yöntem yoktur. Bu sebeple uyarlamalı ağ yapıları kullanılmaktadır. Uyarlamalı bir ağ tipi mimari girişlerin, giriş üyelik fonksiyonlarını birleştiren parametrelerin ve çıkış üyelik fonksiyonlarını birleştiren parametrelerin haritasını çıkarmaktadır. Aynı katmanların benzer fonksiyonlara sahip oldukları kabul edilmiştir (Akkaş, 2006).

Şekil 3.9.' da görülen YBM çıkarım sistemi yapısının işleyişinde görüldüğü üzere; x , y giriş değişkenlerinin ve z çıkış değişkeninin bilinmesi çok önemlidir. Öğrenme algoritması hem giriş hem de çıkış değişkenlerini optimize etmektedir. Öğrenme işlemi gerçekleşirken ANFIS, melez öğrenme algoritmasını kullanılmaktadır. Melez öğrenme algoritması, en küçük kareler yöntemi ile geri yayımlı öğrenme algoritmasının bir arada kullanılmasından oluşmaktadır.

x ve y girişleri ifade etmektedir. Giriş katmanı olarak adlandırılan bu katmandaki her düğümden alınan giriş sinyalleri katman 1' e aktarılır.

Katman 1: Üyelik derecelerinin oluşturulması. Bulanıklaştırma katmanı olarak da adlandırılan birinci katmandaki her bir düğüm için, aşağıda verilen bir düğüm fonksiyonunu kullanılır. Burada $\mu_{A_i}(x)$ ve $\mu_{B_{i-2}}(y)$ herhangi bir bulanık mantık üyelik fonksiyonuna uyumlandırılabilir.

$$O_{i,l} = \mu_{A_i}(x), \quad i=1,2 \quad (3.28)$$

ya da

$$O_{i,l} = \mu_{B_{i-2}}(y), \quad i=3,4 \quad (3.29)$$

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

Katman 2: Diğer ismi de kural katmanı olan bu katmandaki her bir düğüm, kuralların çarpımı ile elde edilen ağırlığı

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y), \quad i=1,2 \quad (3.30)$$

şeklinde hesaplar.

Katman 3: Diğer ismi normalizasyon katmanı olan bu katmandaki her bir düğüm, katman 2'den gelen tüm düğümleri giriş değeri olarak kabul etmektedir. Bu katmandaki i' nci düğüm, i' nci kuralın ağırlığının tüm ağırlıkların toplamına oranını aşağıdaki şekilde belirler.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (3.31)$$

Burada $\bar{w}_i$ normalize edilmiş ağırlık olarak adlandırılır.

Katman 4: Bu katman arındırma katmanıdır. Bu katmanda her bir düğümde verilen bir kuralın ağırlıklandırılmış sonuç değerleri hesaplanmaktadır. Her bir i düğümü aşağıdaki fonksiyona sahiptir.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (3.32)$$

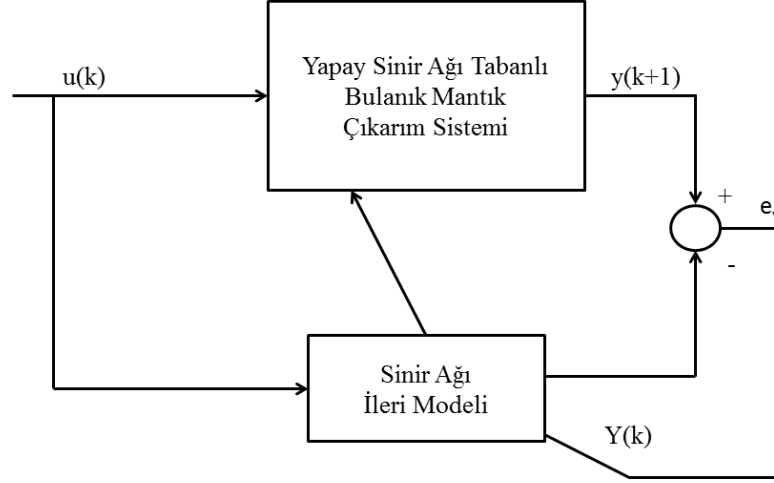
Burada $\bar{w}_i$ üçüncü katmanın çıkışıdır ve $\{p_i, q_i, r_i\}$ değişkenleri i . kuralın sonuç parametreleri kümesidir. Bu katmandaki parametreler, lineer parametreler olarak bilinir.

Katman 5: Toplam katmanında olarak da adlandırılan bu katmanda tek bir düğüm vardır ve $\sum$ işareti ile etiketlenilmiştir. Bu katmanda önceki katmandan gelen her bir düğümün çıkış değeri toplanarak elde edilen genel çıkış aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanır:

$$O_{5,l} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (3.33)$$

Hibrit Öğrenme Algoritması: Adaptif yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık kontrolcünün öğrenme algoritmasıdır. Hibrit öğrenme algoritmalı yapay sinir ağının eğitimi Şekil 3.10.' da gösterilmiştir. Hibrit öğrenme algoritmasında düğüm çıkışları katman 4'e kadar iletilir. Ağ sonucu ise en küçük kareler yöntemi ile belirlenir. Öncül

parametreler ayarlandığında genel çıkış sonucu, parametrelerin doğrusal bir kombinasyonu olarak ifade edilebilir.



Şekil 3.10. Hibrit öğrenme algoritmalı yapay sinir ağının eğitimi

Yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık çıkarım sisteminin yapısını ifade etmek için birinci derece Takagi-Sugeno modelden oluşan iki bulanık eğer-ise kurallarının kullanıldığı, iki giriş ve iki kuraldan oluşan Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemi Şekil 3.11.' de görülmektedir.

Sinirsel bulanık denetim sistemi ile bir kontrol noktası kurmak için sistemin Takagi-Sugeno tipinde olması gerekmektedir çünkü Takagi-Sugeno ile sistemlerinde hesaplamalar daha az karmaşık olduğundan sistem daha hızlı çalışmaktadır (Erkal, 2009). Takagi-Sugeno tipi bulanık modelin avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır (Saraç, 2012). Bunları özetlemek gerekirse;

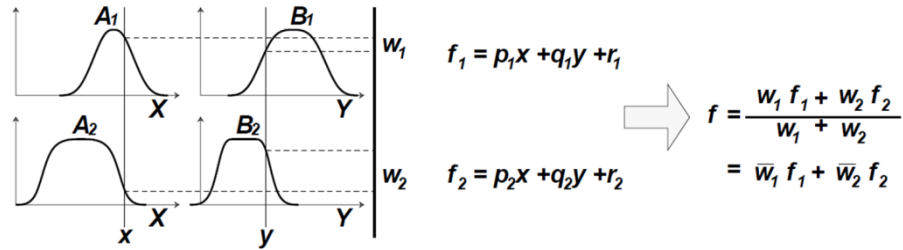
Takagi-Sugeno tipi bulanık modelin avantajları;

- Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü için doğrusal teknikler kullanılabilir.
- Optimizasyon ve uyarlanabilir teknikler ile birlikte iyi çalışmakta ve çıktı parametrelerini optimize ederek sonuçları iyileştirmektedir.
- Çıktı uzayında sürekliliği garantilemektedir.

- Matematiksel analiz için uygundur.
- Hesaplama için çok uygundur.

Takagi-Sugeno tipi bulanık modelin dezavantajları;

- Yüksek derecelerde Takagi-Sugeno tipi bulanık modelleme kullanıldığında oldukça karmaşık bir yapı ortaya çıkmaktadır.
- Girdi ve alt küme sayılarının artması verilerin eğitilmesini zorlaştırmakta ve sonuçların elde edilmesi için belirlenmesi gereken soncul parametrelerin sayısını artırmaktadır.



Şekil 3.11. İki giriş ve iki kuraldan oluşan Takagi-Sugeno bulanık çıkarım sistemi

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

Kural 2: Eğer (x is A_2) ve (y is B_2) ise ($f_2 = p_2x + q_2y + r_2$).

Kurallarda görülen 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.

$$\begin{aligned}
f &= \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \\
&= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2
\end{aligned} \tag{3.34}$$

$$= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2$$

Denklem 3.28’de p_1, q_1, r_1, p_2, q_2 , ve r_2 doğrusal sonuç parametreleridir.

$$f = \begin{bmatrix} \bar{w}_1 x & \bar{w}_1 y & \bar{w}_1 & \bar{w}_2 x & \bar{w}_2 y & \bar{w}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \\ r_1 \\ p_2 \\ q_2 \\ r_2 \end{bmatrix} = XW \tag{3.35}$$

Denklem 3.29’ da X giriş matrisidir, W ise her kuralın ağırlık vektörünü ifade etmektedir.

W ’nın hesaplandığı iki teorem vardır;

Teorem 1: Eğer X matrisi kare matris ise o zaman X matrisinin tersi X^{-1} dir. Bu durumda $f = XW$ denkleminde $W = X^{-1}f$ e 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 $X^* = (X^T X)^{-1} X^T$ kullanılır. Bu durumda $W = X^* f$ olarak hesaplanır.

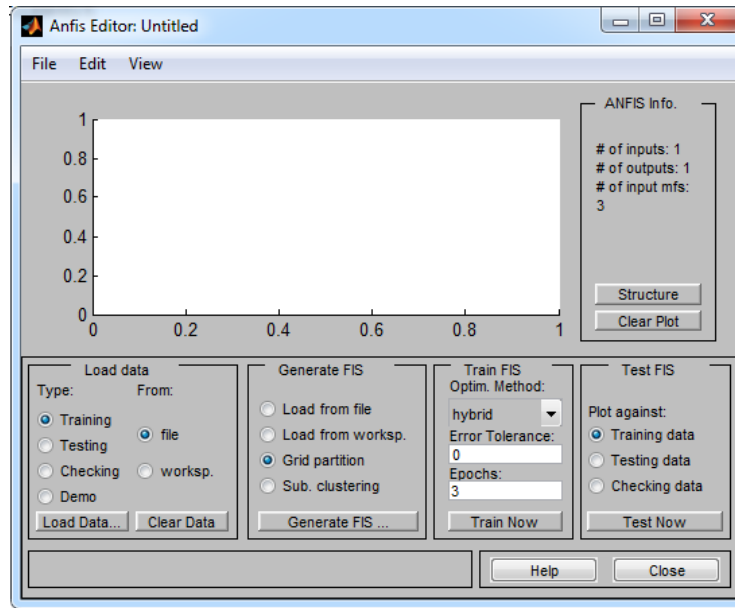
Yapay bulanık mantık kontrolcü için eğitim aşaması MATLAB programının Fuzzy Logic Toolbox modülünde yer alan ANFIS Editor modülü kullanılan paket programlardan birisidir.

Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık Çıkarım Sistemi (ANFIS) ele alınan sistemdeki bir problem için oluşturulan yapıya göre olası tüm kuralları atayabilmektedir veya kuralların veriler yardımıyla uzman tarafından atanmasına olanak vermektedir. ANFIS’ in kural oluşturabilmesi veya kural oluşturulmasına olanak sağlaması uzman

görüşlerinden faydalanması anlamına gelmektedir. Bu sebeple birçok tahmin probleminde yapay sinir ağlarına uzman görüşlerinden faydalanma imkanı tanıdığı için ortalama hata kareler kriterine göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Saraç (2012) tarafından bildirildiğine göre, ANFIS’ in öğrenme algoritması tanımı, en küçük kareler yöntemi ile geri yayımlı öğrenme algoritmasının bir arada kullanılmasından oluşan melez öğrenme algoritmasıdır (Hocaoğlu, 2005).

Eğitim verileri için aşağıdaki aşamalar takip edilmektedir

1. Veri setleri MATLAB’ a yüklenir.
2. MATLAB programında komut penceresine yazılan “anfisedit” komutu ile ANFIS Editör modülü görüntülenir (Şekil 3.12).



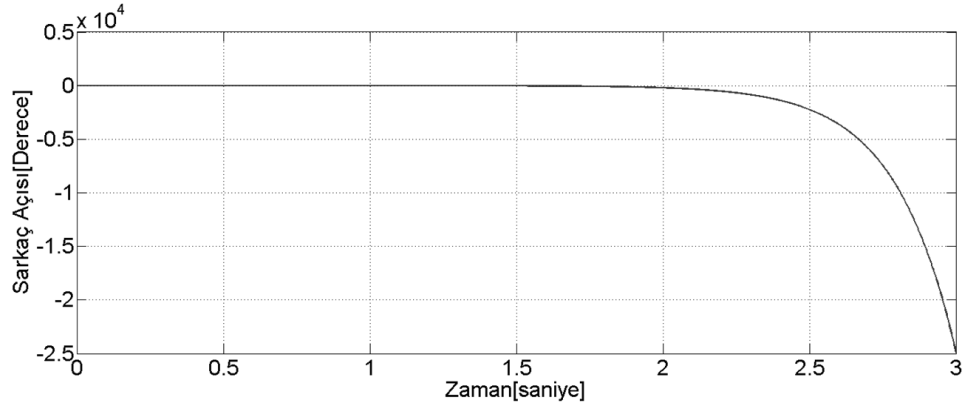
Şekil 3.12. ANFIS Editor yapısı

3. “Load data” alanında “Type” kısmı için “Training”, “From” kısmı için “workspace” seçilir.
4. “Load data” butonuna tıklanır.
5. Açılan “Load from workspace” penceresinde istenen “input variable name” için MATLAB’ da veri setine tanımlanan isim girilir.
6. Girilen veri seti ANFIS editör alanında görüntülenir.

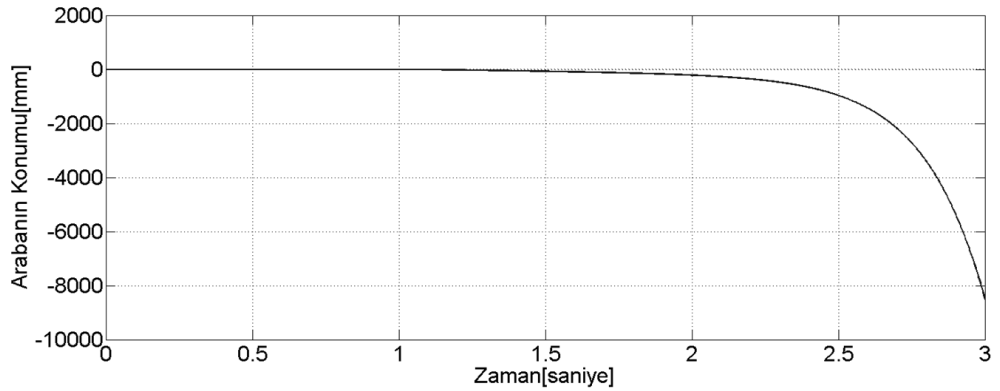
7. “Generate FIS” alanından “Subtractive clustering (Azaltımlı kümeleme)” seçilerek “Generate FIS” butonuna tıklanır.
8. “Parameters of clustering” penceresine gerekli değerleri girilir ve “OK” butonuna tıklanır.
9. “Train FIS” alanının “Optimization Method” kısmından “hybrid” , “Error Tolerance” kısmında “0” ve “Epoch” kısmına da istenilen iterasyon değeri girilerek “Train Now” butonuna tıklanır.
10. Elde edilen FIS dosyası kaydedilir ve MATLAB/Simulink’ de “Fuzzy Logic Controller” bloğuna yüklenerek kontrolcü tasarımı tamamlanır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kontrolcü tasarım aşamalarına geçmeden önce sistemin açık çevrim cevabının incelenmesi daha doğru olacaktır. Bunun için sisteme basamak giriş şeklinde bir konum girişi verilerek açık çevrim cevabı için sarkaç açısı ve sarkaç arabasının konumunun zamana bağlı değişim grafikleri aşağıdaki gibi elde edilir.



Şekil 4.1. Basamak giriş için açık çevrim cevabı-sarkaç açısı



Şekil 4.2. Basamak giriş için açık çevrim cevabı-arabanın konumu

Şekil 4.1. ve 4.2.' de de görüldüğü üzere sarkaç açısı ve arabanın konumu zamanla negatif yöne doğru artmaktadır. Bu sistem cevabının yetersiz olduğunu göstermektedir. Grafikte sarkaç açısı ve arabanın konumunun zamanla artmasındaki neden sistemin kontrolsüz olmasıdır. Genliklerin negatif olması da transfer fonksiyonlarının pay

kısımlarının negatif çıkmasıdır. Sonuç olarak sistem cevabı yetersiz olduğu için sistemin açık çevrimde kararsız olduğu söylenebilir.

Sistemin durum uzayı modeli kullanılarak elde edilen kontrolcü tasarımlarında ilk adım; sistemin açık çevrim kutuplarını belirlemektir. Sistemin açık çevrim kutupları; $AÇK = [-16.26, -4.56, 4.84, 0]$ olarak bulunmuştur.

Buna göre açık çevrim kutupları hem sağ yarı düzlemde hem de sol yarı düzlemde dirler. Bir kutbun sol yarı düzlemde olması sistemin kararsız olduğunu göstermektedir.

4.1. LQR Kontrolcü Tasarımı

Durum darbe cevaplarının minimize edilmesini amaçlayan LQR kontrol doğrusal optimal durum geri besleme kontrol olarak da adlandırılabilir. Çok düzenli bir sentez sürecine sahip olan LQR kontrol aynı zamanda da yüksek seviyede dayanıklı kararlılığa sahiptir (Kashani, 2003). Bu sebeple sonraki bölümde tasarlanan Yapay Sinir Ağı Tabanlı Bulanık Mantık (YBM) kontrolcü performansı LQR kontrolcü performansı ile karşılaştırılmıştır.

Bu kısımda, sistemin matematiksel modeli yardımı ile elde edilen durum uzay modeli MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Tasarlanan LQR kontrolcünde dört giriş ve bir çıkış bulunmaktadır. Girişler: Sarkaç açısı, arabanın konumu, sarkacın açısal hızı ve arabanın doğrusal hızıdır. Arabanın konumu ve sarkacın açısı sistemden doğrudan elde edilmiş, arabanın doğrusal hızı ve sarkacın açısal hızı ise araba konumunun ve sarkaç açısının türevi alınarak bulunmuştur. Tüm durumların geri beslenmesi ile tam durum geri beslemeli kontrol uygulanmıştır. LQR kontrolcü MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmış, sistemin matematik modeli üzerine sarkaç açısı, arabanın konumu, sarkacın açısal hızı, arabanın açısal hızı geri beslemeleri yapılarak kontrolcünün performansı irdelenmiştir.

LQR kontrolcü için simülasyon ve gerçek sistem sonuçlarının tartışıldığı bu bölümde, oluşturulan durum uzayı modeli ve tasarlanan kontrolcünün görüldüğü MATLAB/Simulink blok diyagramları Şekil 4.3.' deki gibidir.

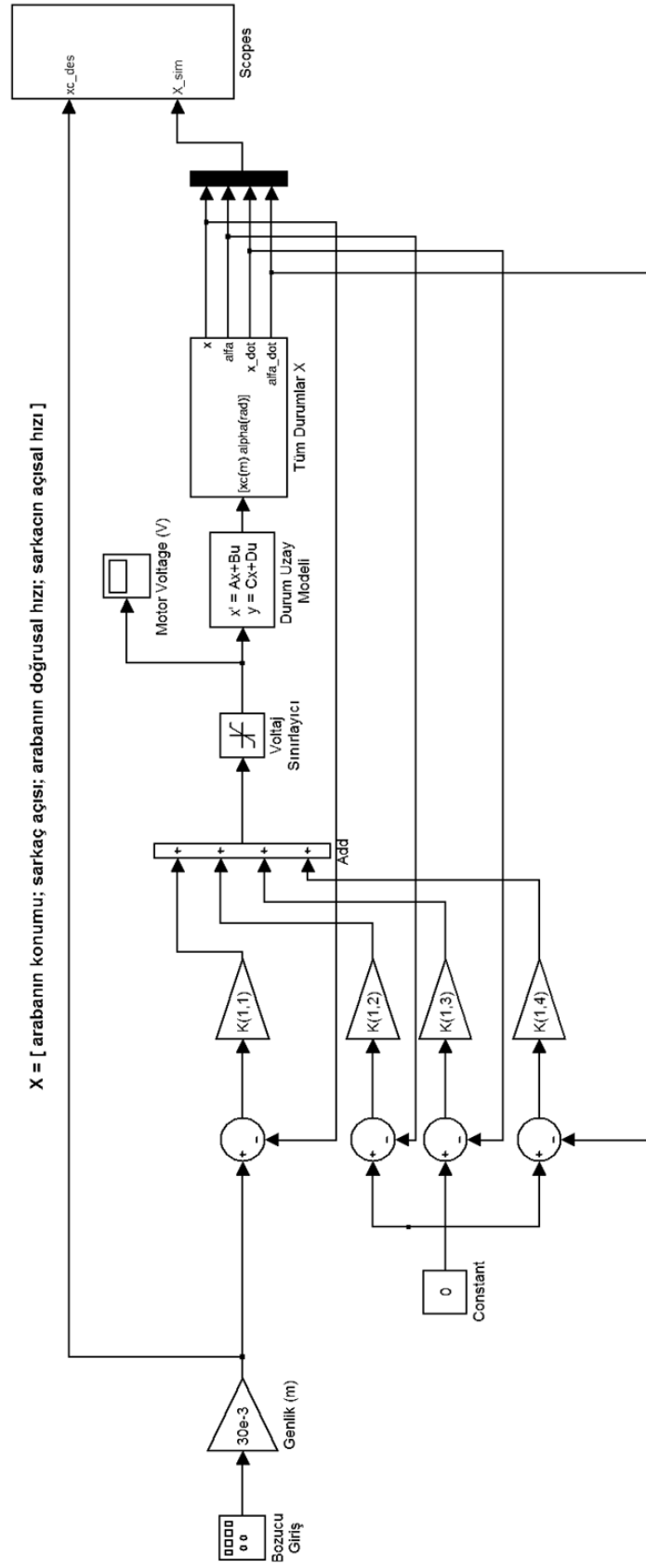
Şekil 4.3.' de MATLAB/Simulink blok diyagramları ile gösterilen sisteme konum girdisi olarak genliği 1, frekansı 0.1 Hertz olan ve $30e-3$ çarpanı ile genişletilmiş bir bozucu giriş oluşturulmuştur. Sarkaç açısının başlangıçta sıfır olduğu kararsız denge durumu, bozucu giriş etkisiyle kararlı denge durumuna doğru bir eğilim göstererek kararsız denge noktasından uzaklaşacaktır.

Sarkaç açısı, arabanın doğrusal hızı ve sarkacın açısal hızının sisteme geri beslemesinde, bu durumları referans değerleri olan sıfıra getirmeye çalışan kontrol sinyali üretilmektedir. Blok diyagramlarından da görüldüğü gibi üç durum değişkeninin değeri, referans değer olan sıfıra getirilmeye çalışıldığı için hata; ölçülen durum değişkeninin negatif işaretlisi şeklindedir. Sarkaç arabası için referansımız ise kare dalga şeklindeki bozucu konum girişidir. Sarkaç arabası için bozucu giriş referans alınarak bu girişe ulaşılmaya çalışılmaktadır. Örnekleme zamanının 0.002 olarak alındığı sistemimizde saniyede 500 verinin geri beslemesi yapılmaktadır. Bu da sistem cevaplarını alırken daha doğru sonuçlar almamıza yardımcı olmaktadır. Voltaj sınırlayıcı sistemdeki DC servo motora gidebilecek yüksek voltaj değerlerini fark edip sisteme giden yüksek voltajın durdurulmasını sağlamaktadır.

Kontrolcü performansının değerlendirilmesi için sarkaç açısı, arabanın konumu ve motor voltajı değerleri gözlemlenmiş, gerçek sistem ve simülasyon cevaplarının değerlendirmesi yapılmıştır.

LQR Kontrolcü tasarım ölçütleri;

Sarkacın azami sapma açısı	: ± 10 derece
Azami motor voltajı	: $\pm 10V$
Arabanın azami hareket sınırı	: $\pm 300mm$



Şekil 4.3. LQR kontrolcü için MATLAB/Simulink blokları

Sisteme giren motor voltajına karşı sarkacın açısal hızının ve sarkaç arabasının doğrusal hızının hesaplandığı “Tüm Durumlar” bloğu da Şekil 4.3.’ de gösterilmiştir. Sisteme geri beslemesi yapılan sarkaç arabasının doğrusal hızı ve sarkacın açısal hızı sarkaç açısının ve arabanın konumunun türevleri alınarak, tam durum geri beslemesi yapılabilmesi için tüm durumlar elde edilmiştir.

Şekil 4.3.’ de görülen MATLAB/Simulink “Scopes” bloğunda metre olarak hesaplanan arabanın x eksenindeki konumu milimetreye çevrilmiş ve referans girişle karşılaştırılmıştır. Ayrıca radyan olarak hesaplanan sarkaç açısı ise uygun bloklar yardımıyla dereceye çevrilmiş ve her iki çıkış gözlemlenmiştir.

Kontrolcü tasarlanırken sarkaç açısının “0” derece olması ve sarkacın bağlı olduğu arabanın yatay eksenindeki referans noktasında olması amaçlanmıştır. Kontrol yöntemi sistem değişkenlerinin hata değerlerinin geri beslemesi yoluyla uygulanmıştır. Önceki bölümde de anlatıldığı gibi performans indeksini minimize edebilecek Q ve R için aşağıdaki değerler seçilmiştir.

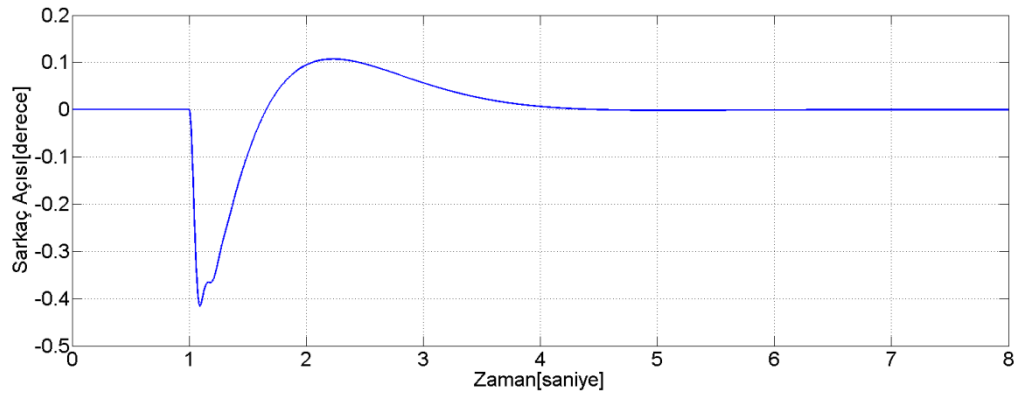
$$Q = \begin{bmatrix} 35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 350 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, \quad R = 0.02$$

Elde ettiğimiz Q ve R matrisleri ile sistem matrisi A ve giriş matrisi B MATLAB programının komut penceresinde, “lqr” komutu yardımı ile K geri besleme matrisi;

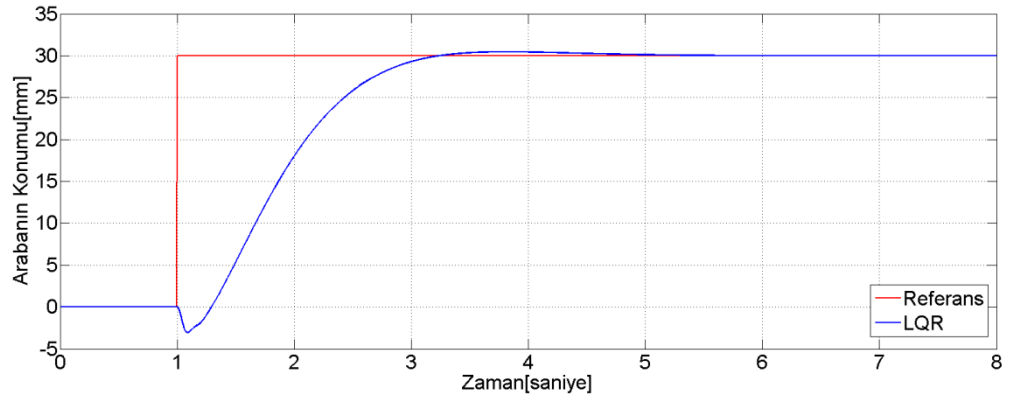
$K[-41,8330 \ 182,7171 \ -46,5589 \ 25,9586]$ olarak bulunmuştur.

Durum uzayı üzerinden geri beslemesi yapılan sarkaç açısı, arabanın konumu, sarkacın açısal hızı ve arabanın doğrusal hızları elde edilen “ K ”, geri besleme matrisi ile değerlendirilerek sistem için kontrol sinyali üretilmesi yoluyla LQR kontrolcü tasarımı yapılmıştır.

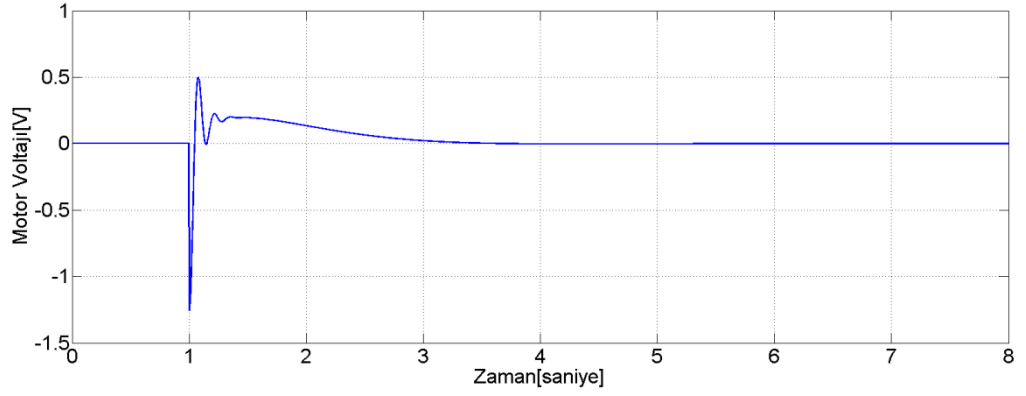
Sistem simülasyonu için sarkaç açısı, arabanın konumu ve motor voltajının zamana bağlı grafiklerinin verilerek tartışıldığı LQR kontrolcü cevapları aşağıdadır.



Şekil 4.4. LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı–sarkaç açısı



Şekil 4.5. LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı–arabanın konumu

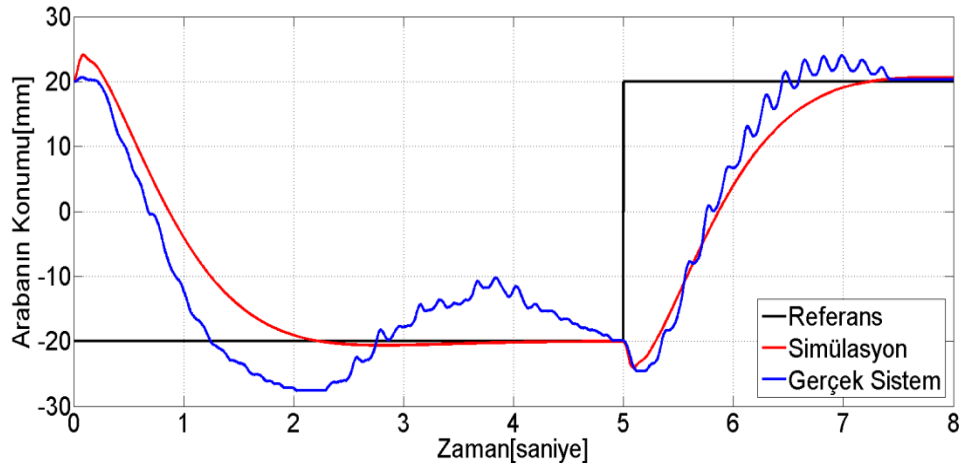


Şekil 4.6. LQR Kontrolcü için simülasyon basamak giriş cevabı–motor voltajı

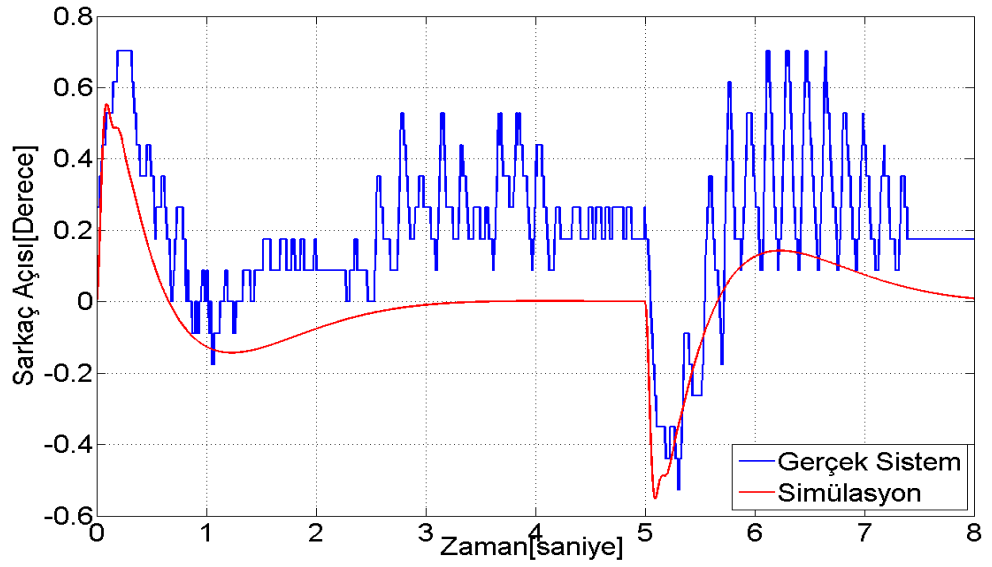
Şekil 4.4’ de sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı LQR kontrolcünün zamana göre sarkaç açısı değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere sarkaç açısı 0.1 derecelik maksimum aşma yaparak 5. saniyeden itibaren kararlı denge duruma geçmektedir.

Şekil 4.5’ de sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı LQR kontrolcünün zamana göre sarkaç arabasının konumunun değişimi görülmektedir. Görüldüğü üzere arabanın konumu ufak bir maksimum aşma ile 5. saniyeden itibaren denge durumuna geçmiştir.

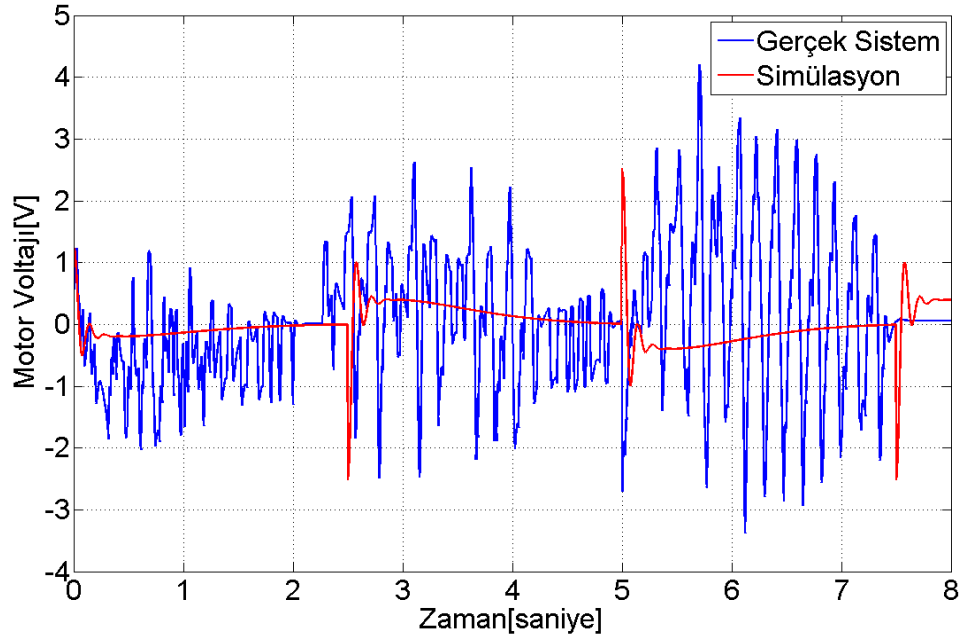
Şekil 4.6’ da sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı LQR kontrolcünün zamana göre motor voltajındaki basamak girişi elde edebilmek için önce negatif gerilim ile basamak giriş elde edilmiştir daha sonra kontrolcünün sarkaç açısını 0 dereceye çekme arzusu ile motor voltajı 0.5V’ a kadar çıkmış ve ardından dördüncü saniyenin sonunda sarkaç kararsız denge konumuna getirilerek motor voltajı sıfıra düşmüştür.



Şekil 4.7. LQR kontrolcünün performans sonuçları–araba konumu



Şekil 4.8. LQR kontrolcünün performans sonuçları–sarkaç açısı



Şekil 4.9. LQR kontrolcünün performans sonuçları–motor voltajı

Şekil 4.7.’ de sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde LQR tasarlanan kontrolcü uygulanmış, grafikte görülen referans girişe karşı zamana göre araba konumunun değişim sonuçları elde edilmiştir. Görüldüğü üzere gerçek sistem cevabı simülasyon cevabına benzer sonuçlar verse dahi yer yer farklı davranışlar görülmüştür. Bu durum doğrusal sistem davranışının doğrusal olmayan sistem davranışından farklı olduğunun bir kanıtıdır.

Şekil 4.8.’ de sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde LQR kontrolcünün Şekil 4.7’de görülen referans konum girdisine karşı zamana göre sarkaç açısı değişimi görülmektedir. Gerçek sistem sarkaç açısı maksimum 0,75 derece sapma yaparak kontrolcü tasarım kriterleri yakalanmıştır. Yine simülasyon sonuçlarının gerçek sistem sonuçlarından yer yer farklı olması doğrusal sistem davranışının doğrusal olmayan sistem davranışından farklı olduğunun kanıtıdır.

Şekil 4.9.’ da sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde LQR kontrolcünün Şekil 4.7’ de görülen referans konum girdisine karşı zamana göre motor voltajının değişimi görülmektedir. Kontrolcü tasarım kriterlerinde belirtilen ve azami motor voltajı değeri olan 10V değeri yakalanmış fakat simülasyon sonuçlarına göre sapma fazla olmuştur.

Şekillerde de görüldüğü gibi gerçek sistem ve simülasyon cevapları arasında farklar gözlemlenmiştir. Bunun temel sebepleri; sistem değişkenlerinin kesin olarak belirlenememesi, gerçek sisteme dışarıdan etki eden rüzgar, gürültü vb. bozucu girişler olabileceği gibi, doğrusal sistemlerin kontrolü için uygulanan LQR kontrolcünün aslında belli çalışma aralıklarında doğrusallaştırılmış sisteme uygulanmasıdır.

4.2. YBM Kontrolcü Tasarımı

Bu kısımda, önceki bölümde tasarlanan LQR kontrolcünün giriş ve çıkış değerleri ile yapılan eğitimde, MATLAB/Simulink/ANFIS Toolbox kullanılarak yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık (YBM) kontrolcü tasarlanmıştır. Sistemin matematiksel modeli üzerine sarkaç açısı, arabanın konumu, sarkacın açısal hızı, arabanın açısal hızı geri beslemeleri yapılarak kontrolcünün performansı irdelenmiştir. Buna göre YBM kontrolcü dört giriş bir çıkıştan meydana gelmektedir. Kontrolcü girişleri LQR kontrolcünde olduğu gibi sarkaç açısı, arabanın konumu, sarkaç açısal hızı ve arabanın doğrusal hızıdır. Yine LQR kontrolde olduğu gibi kontrolcü çıkışı motor voltajıdır.

Önceki bölümde durum uzayı modelinde belirtildiği gibi, $\dot{x} = A x + B u$ olan doğrusal sistemimizde $u = K x$ şeklindedir. Burada K kazanç matrisidir ve YBM kontrolcüyü tasarlarken kazanç matrisinin optimizasyonu ANFIS ortamında yapılmıştır. Optimizasyonun yapılması için eğitim MATLAB programının bir modülü olan Fuzzy Logic Toolbox modülünde yer alan ANFIS Editor kullanılmıştır.

Kare dalga ve basamak giriş şeklindeki konum girdisi için ayrı ayrı tasarlanan YBM kontrolcü için Gauss tip üyelik fonksiyonları belirlenmiştir. Üyelik fonksiyonlarının dilsel değişkenleri sırası ile küçük (k), orta (o) ve büyük (b) şeklinde tanımlanmıştır. Kare dalga şeklinde konum girdisi için tasarlanan kontrolcü her bir giriş değişkeni için üç üyelik fonksiyonuna sahiptir.

ANFIS ortamında eğitim yapılabilmesi için giriş-çıkış veri setine ihtiyaç duyulmaktadır ve bunun için LQR kontrolcünün giriş çıkış verileri kullanılmıştır. Giriş-çıkış verilerini elde etmek ve bilgisayara kaydetmek için MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan blok diyagramları Şekil 4.10.' da gösterilmiştir.

YBM kontrolcü için simülasyon ve gerçek sistem sonuçlarının tartışıldığı bu bölümde, oluşturulan durum uzay modeli ve tasarlanan kontrolcünün görüldüğü MATLAB/Simulink blok diyagramları Şekil 4.11.' de gösterilmiştir.

LQR kontrolde olduğu gibi, Şekil 4.11.' de MATLAB/Simulink blok diyagramlarında da görüldüğü üzere sisteme konum girdisi olarak genliği 1, frekansı 0.1 Hertz olan ve $30e-3$ çarpanı ile genişletilmiş bir bozucu giriş oluşturulmuştur. Sarkaç açısının başlangıçta sıfır olduğu kararsız denge durumu bozucu giriş etkisiyle kararsız denge durumu, bozucu girişin etkisi ile kararlı denge durumuna doğru bir eğilim göstererek kararsız denge noktasından uzaklaşacaktır. Burada LQR kontroldeki gibi tüm durumlara kazanç matrisi uygulanarak sisteme kontrol sinyali üretmek yerine, geri beslemesi yapılan tüm durumlar ANFIS' te eğitilen eğitim verilerine göre YBM bloğunda değerlendirilerek sisteme kontrol sinyali gönderilir.

Yine LQR kontrolde olduğu gibi sarkaç açısı, arabanın doğrusal hızı ve sarkacın açısal hızının sisteme geri beslemesinde, referans değerleri olan sıfıra getirilmeye çalışılarak kontrol sinyali üretilmektedir.

Kontrolcü performansının değerlendirilmesi için sarkaç açısı, arabanın konumu ve motor voltajı değerleri gözlemlenmiş, gerçek sistem ve simülasyon cevaplarının değerlendirmesi yapılmıştır. LQR kontrolcü için belirlenen tasarım ölçütleri YBM kontrolcü içinde aynı değerler olacak şekilde seçilmiştir.

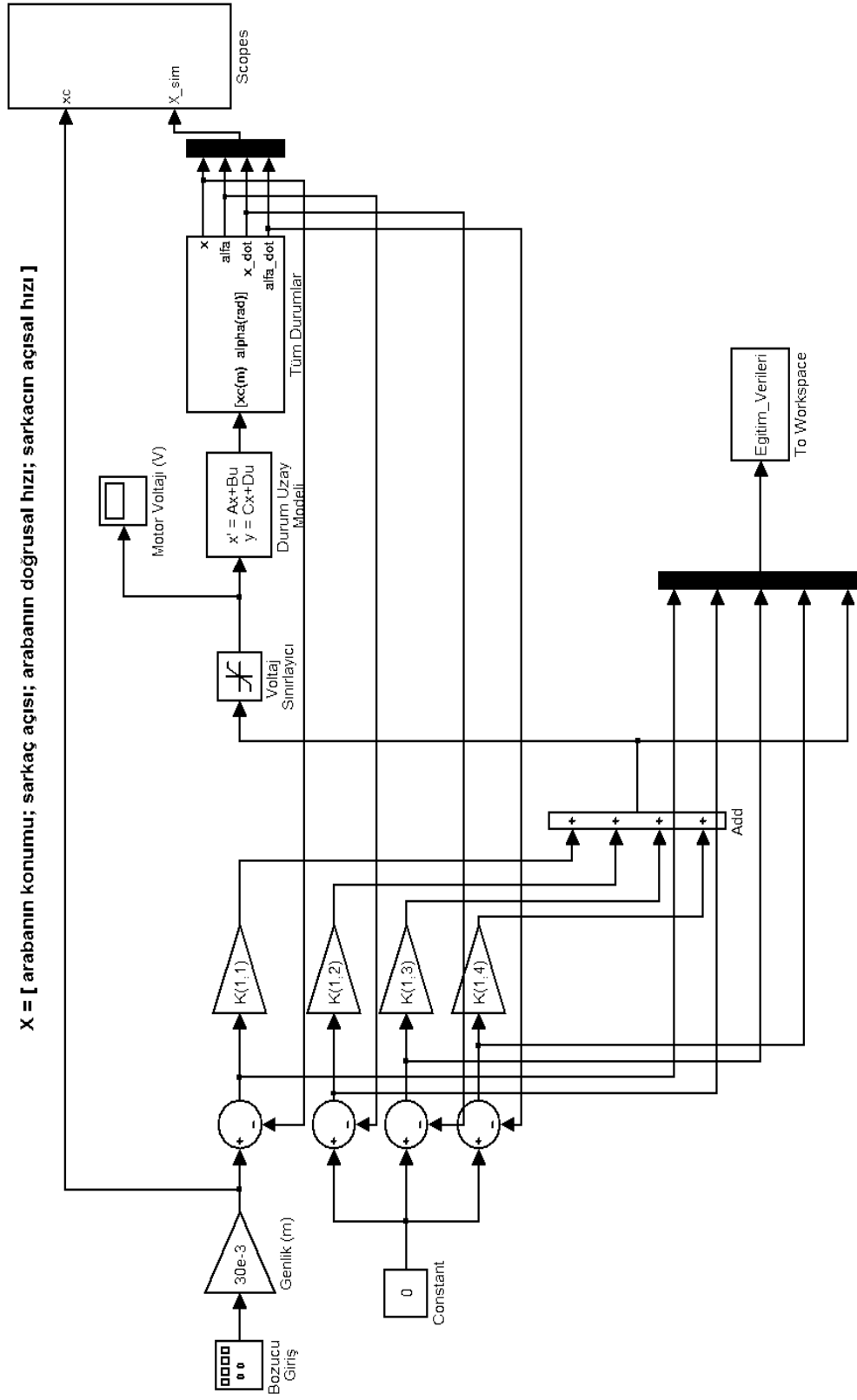
YBM Kontrolcü tasarım ölçütleri;

Sarkacın azami sapma açısı : ± 10 derece

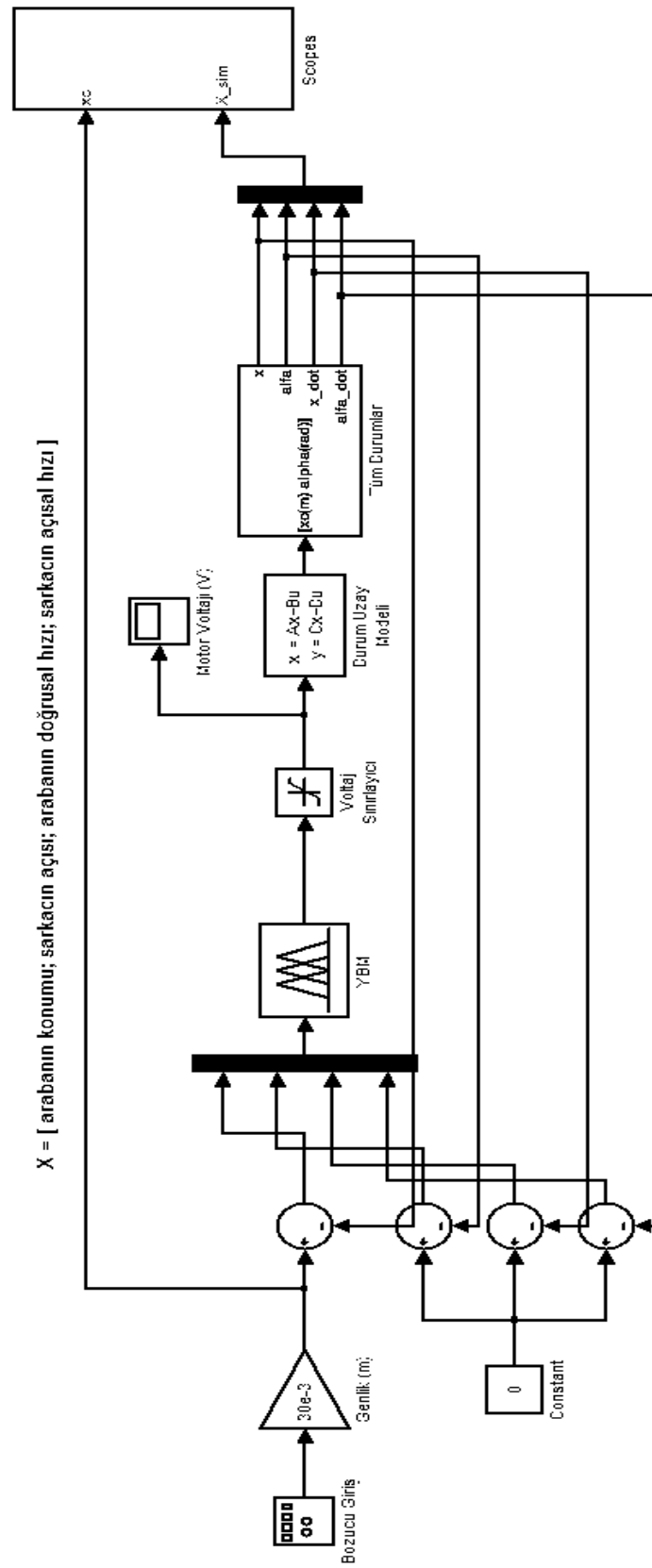
Azami motor voltajı : $\pm 10V$

Arabanın azami hareket sınırı : $\pm 300mm$

olarak belirlenmiştir.

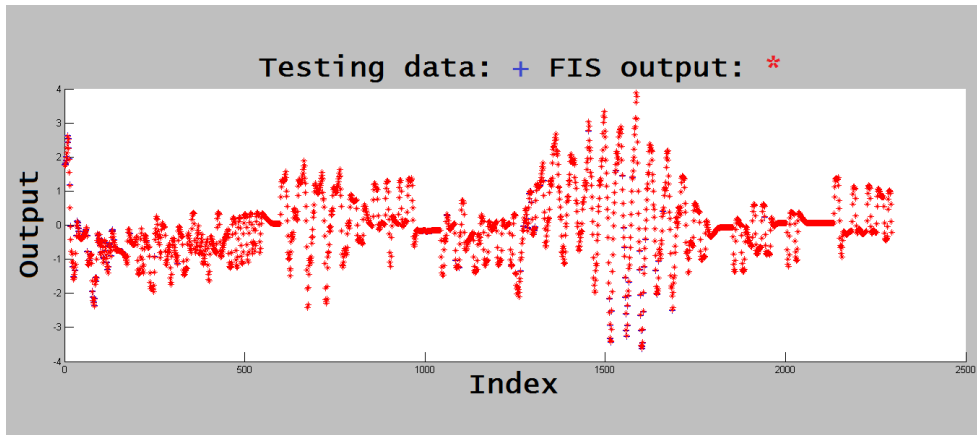


Şekil 4.10. Eğitim verilerinin bilgisayara kayıt edildiği MATLAB/Simulink blokları



Şekil 4.10. Şekil 4.11. YBM kontrolcü için MATLAB/Simulink blokları

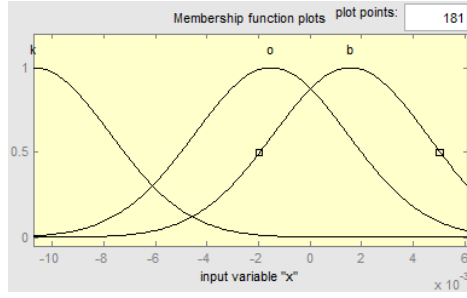
Gerçek sistemden elde edilen eğitim verileri ANFIS Editor' e yüklenmiştir. Eğitim için 2449, test için 2294 verinin kullanıldığı ANFIS eğitimi, test sonuçları ile desteklenmiş ve Şekil 8' de gösterilmiştir. Yapılan eğitim sonucunda RMSE (istatistiksel hata) değeri 0.00035524 olarak hesaplanmış, eğitim ve test verilerinde de büyük bir oranda örtüşme olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda kullanılan veri sayısının ANFIS eğitimi için yeterli olduğu söylenebilir.



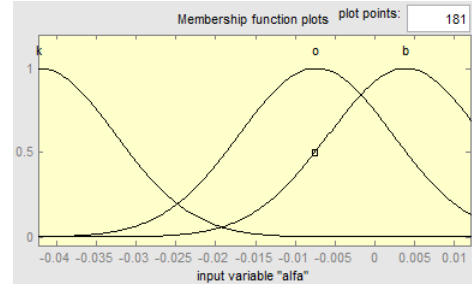
Şekil 4.12. ANFIS eğitimi test sonuçları

Farklı üyelik fonksiyonu tipleri denenmiş ve en uygun olan üyelik fonksiyonu tip olan Gauss üyelik fonksiyonu ANFIS/Editor optimizasyonu ile belirlenmiştir.

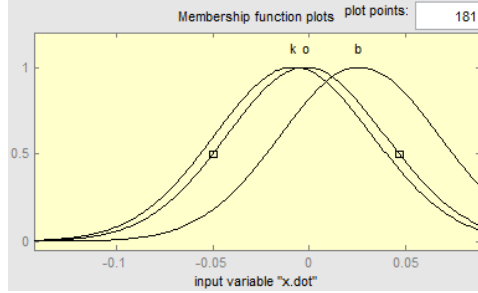
Kontrolcü girişleri olan araba konumu, sarkaç açısı, araba doğrusal hızı ve sarkaç açısal hızına ait üçer adet üyelik fonksiyonu ve üyelik fonksiyonlarının konumlandırılmaları Şekil 4.13.' de gösterilmiştir.



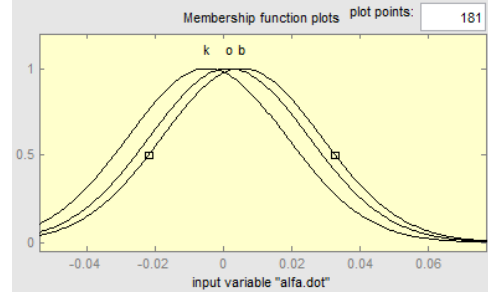
(a) Araba konumu üyelik fonksiyonları



(b) Sarkaç açısı üyelik fonksiyonları



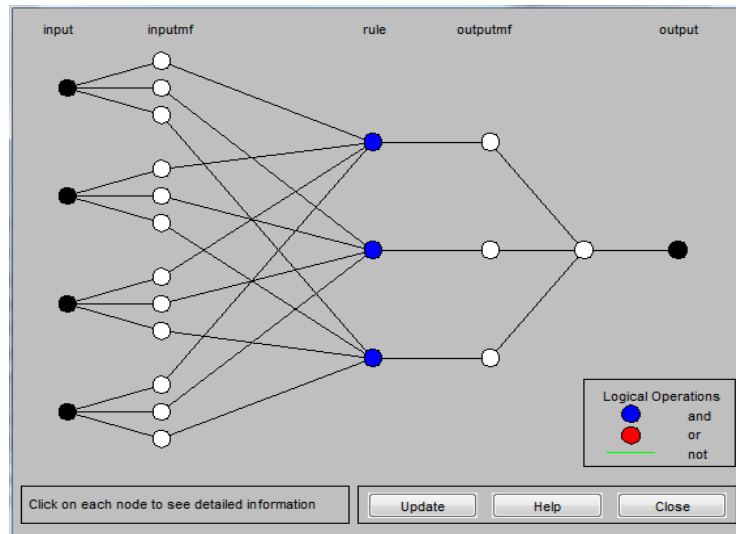
(c) Araba hızı üyelik fonksiyonları



(d) Sarkaç açısal hızı üyelik fonksiyonları

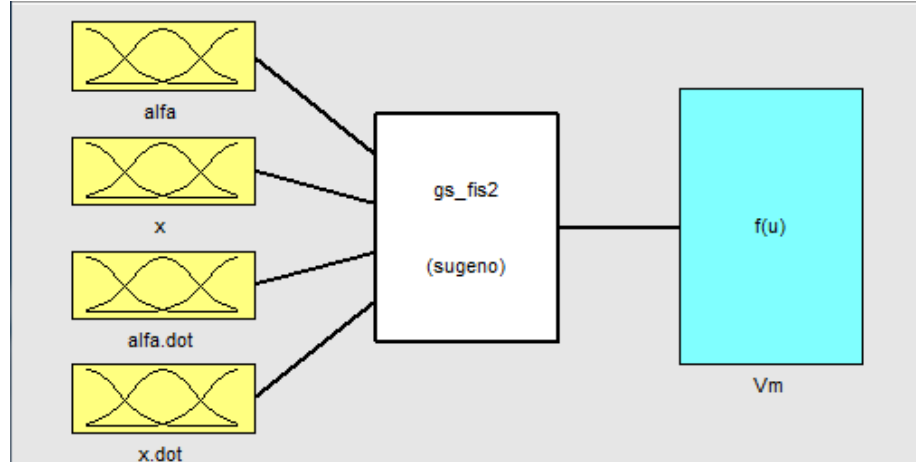
Şekil 4.13. Bulanık mantık üyelik fonksiyonları

Üyelik fonksiyonlarının ve adedinin belirlenmesinden sonra hibrit öğrenme algoritması kullanılarak veri setimiz eğitilmiştir. Şekil 4.14.' de dört giriş, her giriş için 3 üyelik fonksiyonunun tanımlandığı, üç kuralın ve çıkış üyelik fonksiyonlarının bulunduğu ANFIS yapısı görülmektedir.



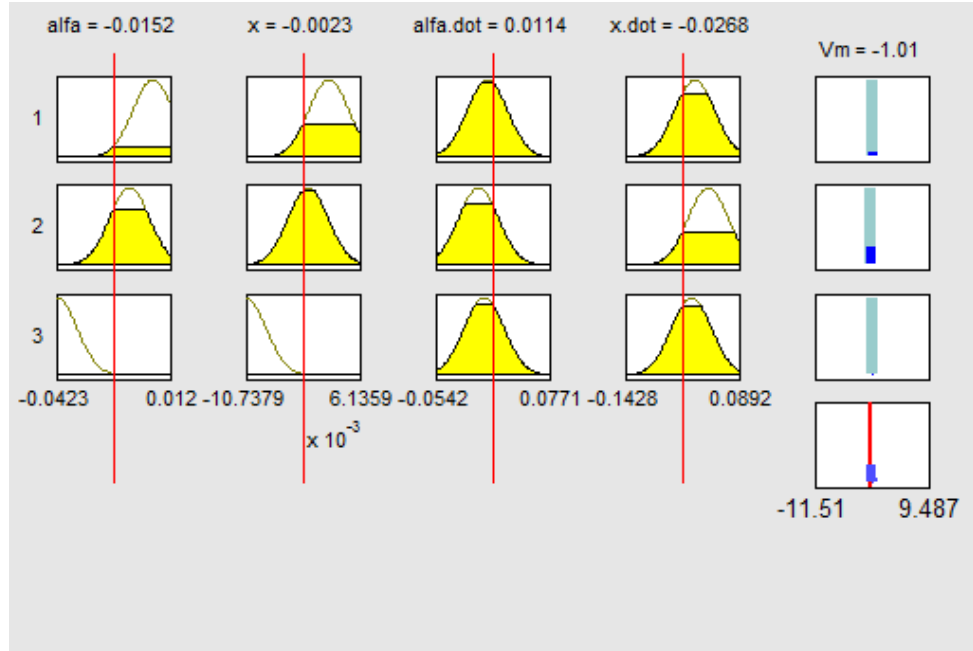
Şekil 4.14. Oluşturulan ANFIS yapısı

Geliştirilen FIS mimarisi Şekil 4.15.' de gösterilmiştir. Dört girişe karşılık bir çıkışı olan FIS mimarisinde sugeno tipi bulanık moelleme yöntemi kullanılmıştır.



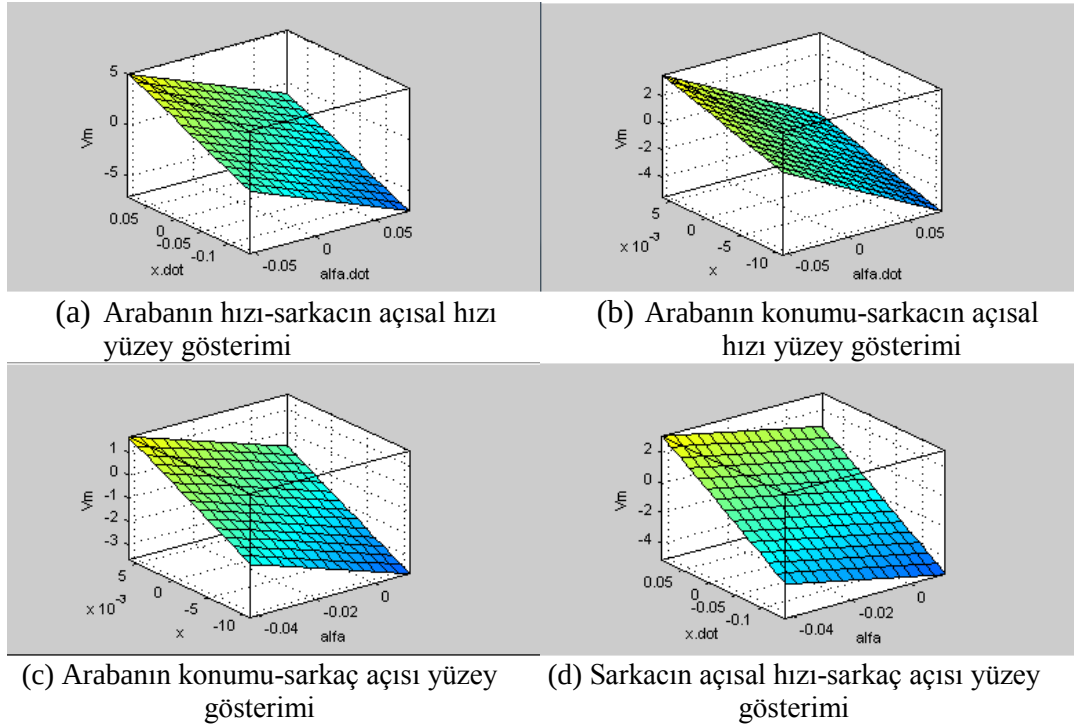
Şekil 4.15. Geliştirilen YBM kontrol için FIS mimarisi

Eğitim sonrasında bulanık kümelerle göre motor voltajının spesifik değer çıktıları elde edilebilir (Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. Motor voltajı için spesifik değer çıktısı gösterimi

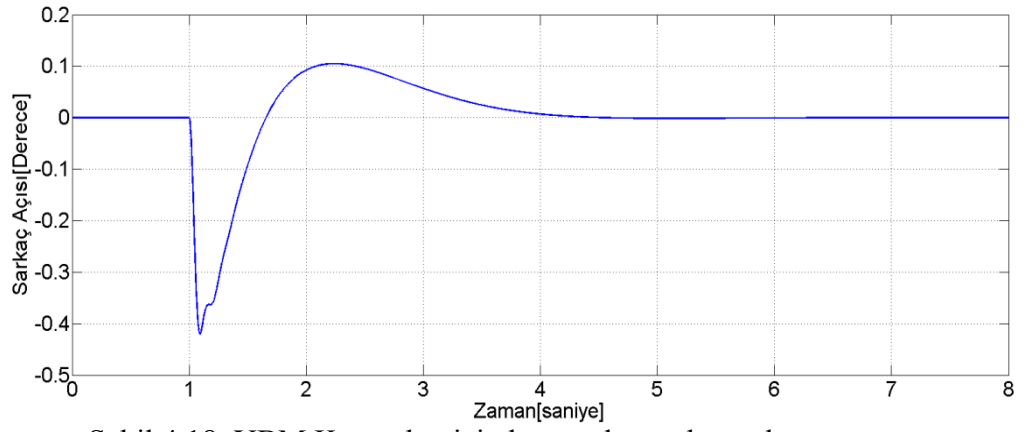
Eğitim sonucunda elde edilen arabanın hızı-sarkacın açısal hızı, arabanın konumu-sarkacın açısal hızı, arabanın konumu-sarkaç açısı, arabanın konumu-sarkaç açısına ait yüze gösterimleri Şekil 4.17.' de görülmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere tüm yüzey gösterimleri için çıkış olarak elde edilen motor voltajı için grafik doğrusaldır. Klasik bulanık mantık yüzey yapısından farklı olan bu sonuç ANFIS' in çıkışları doğrusal olarak elde etmesindendir.



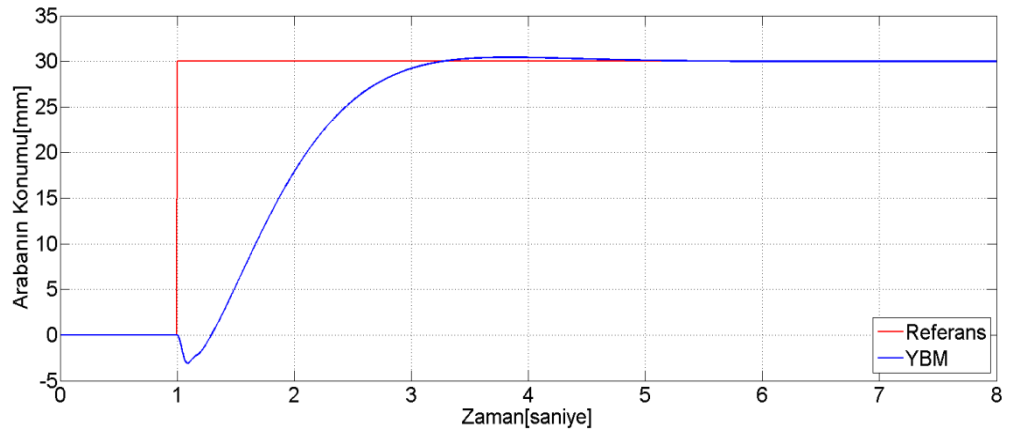
Şekil 4.17. Yüzey gösterimleri

YBM kontrolcü tasarımında sırası ile aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

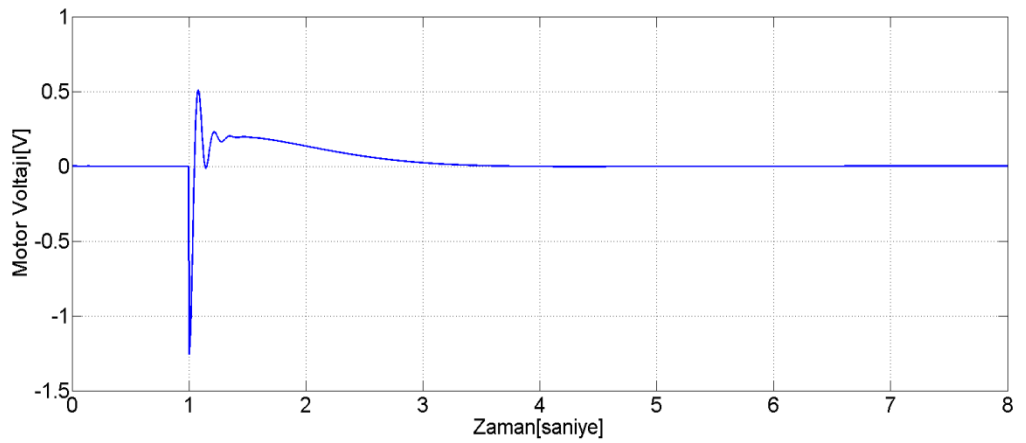
1. Eğitim verilerinin elde edilmesi,
2. Eğitim verilerinin ANFIS ortamına yüklenmesi,
3. Optimasyon metodunun belirlenmesi,
4. Eğitimin yapılması,
5. Yapılan eğitim sonrası elde bulunan farklı verilerle doğrulamanın yapılması,
6. Yapılan eğitimin sonucu tasarlanan kontrolcünün simülasyonda ve gerçek sistemde uygulanmasıdır.



Şekil 4.18. YBM Kontrolcü için basamak cevabı–sarkaç açısı



Şekil 4.19. YBM Kontrolcü için basamak cevabı–arabanın konumu

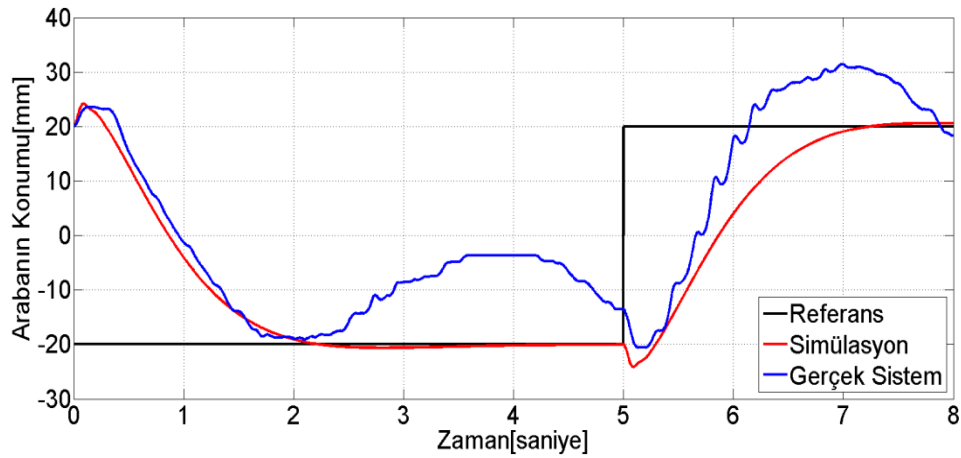


Şekil 4.20. YBM kontrolcü için basamak cevabı–motor voltajı

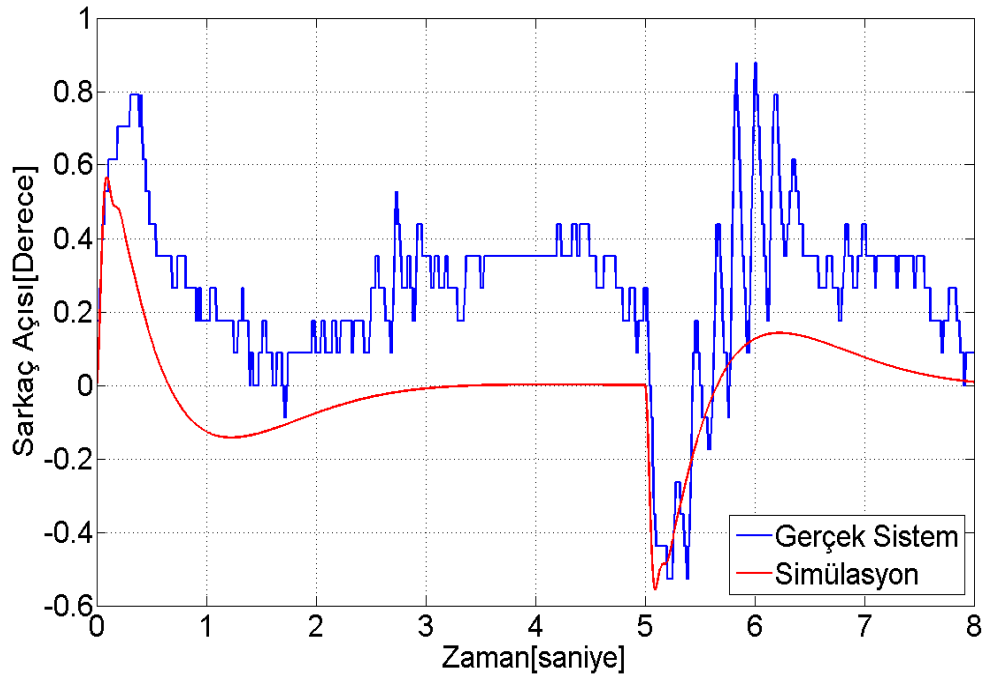
Şekil 4.18.' de sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı YBM kontrolcünün zamana göre sarkaç açısı değişimi görülmektedir. 8 saniye boyunca gözlemlenen sarkaç açısı 0.1 derecelik maksimum aşma yaparak 5. saniyeden itibaren kararlı denge duruma geçmektedir.

Şekil 4.19.' da sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı YBM kontrolcünün zamana göre sarkaç arabasının konumunun değişimi görülmektedir. Yine 8 saniye boyunca gözlemlenen arabanın konumu, ufak bir maksimum aşma ile 5. Saniyeden itibaren denge durumuna geçmiştir.

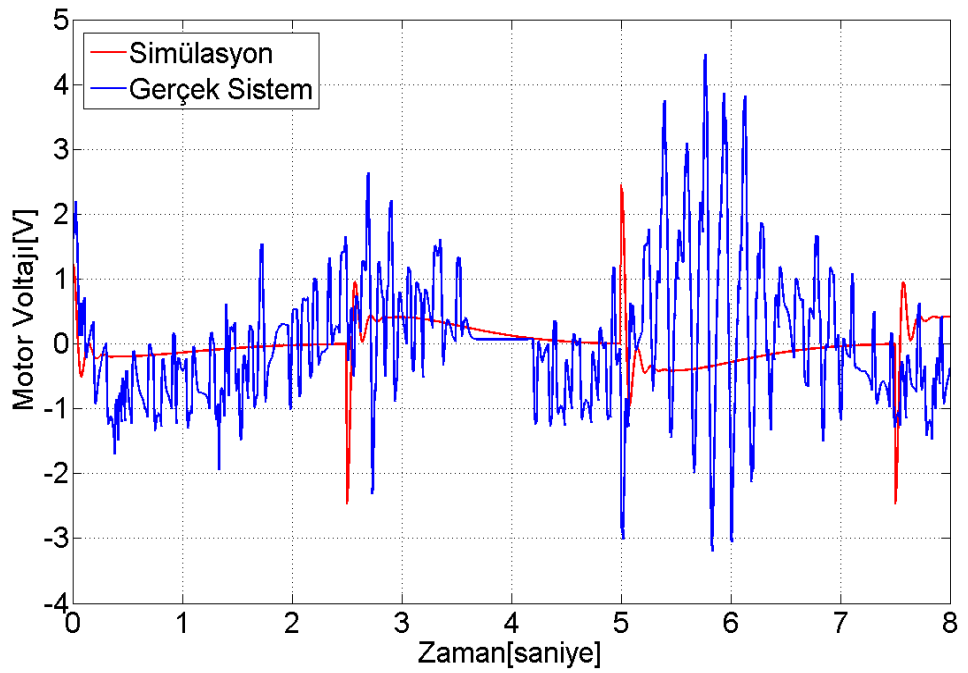
Şekil 4.20.' de sistemin simülasyonu üzerinde basamak girişe karşı YBM kontrolcünün zamana göre motor voltajındaki basamak girişi elde edebilmek için önce negatif gerilim ile basamak giriş elde edilmiştir daha sonra kontrolcünün sarkaç açısını 0 dereceye çekme arzusu ile motor voltajı 0.5V' a kadar çıkmış ve ardından dördüncü saniyenin ortalarında sarkaç kararsız denge konumuna getirilerek motor voltajı 0' a düşmüştür.



Şekil 4.21. YBM kontrolcünün performans sonuçları-araba konumu



Şekil 4.22. YBM kontrolcünün performans sonuçları–sarkaç açısı



Şekil 4.23. YBM kontrolcünün performans sonuçları–motor voltajı

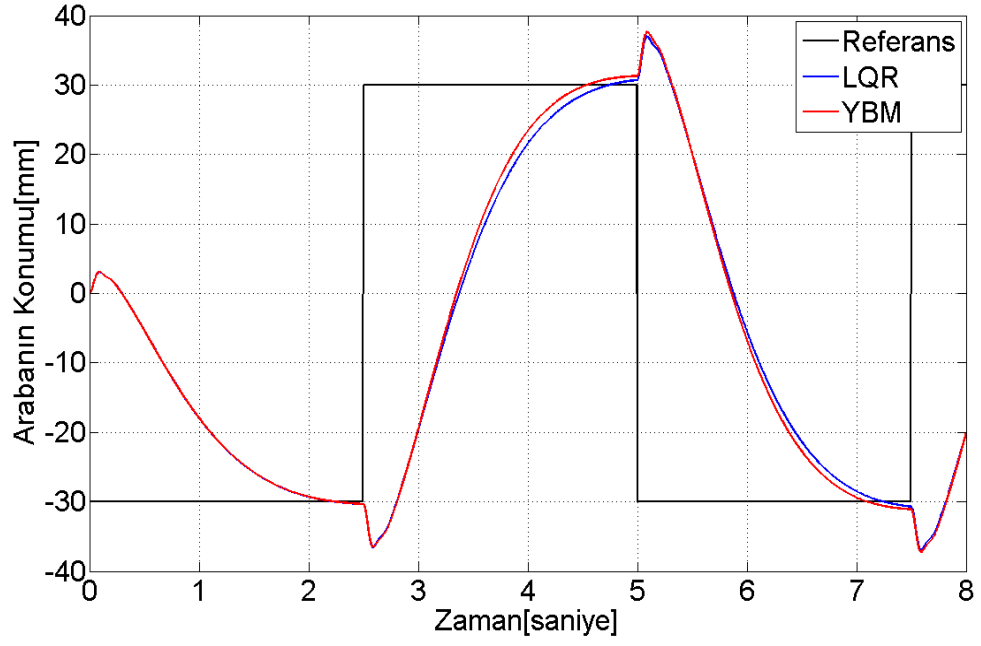
Şekil 4.21.' de sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde tasarlanan YBM kontrolcü uygulanmış, grafikte görülen referans girişe karşı zamana göre araba konumunun değişim sonuçları elde edilmiştir. Görüldüğü üzere gerçek sistem cevabı simülasyon cevabına benzer sonuçlar verse dahi, yer yer farklı davranışlar görülmüştür. Bu durum doğrusal sistem davranışının doğrusal olmayan sistem davranışından farklı olduğunun bir kanıtıdır.

Şekil 4.22.' de sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde tasarlanan YBM kontrolcünün Şekil 4.21.' de görülen referans konum girdisine karşı zamana göre sarkaç açısı değişimi görülmektedir. Gerçek sistem sarkaç açısı maksimum 0.84 derece sapma yaparak kontrolcü tasarım kriterleri yakalanmıştır. Yine simülasyon sonuçlarının gerçek sistem sonuçlarından yer yer farklı olması doğrusal sistem davranışının doğrusal olmayan sistem davranışından farklı olduğunun kanıtıdır.

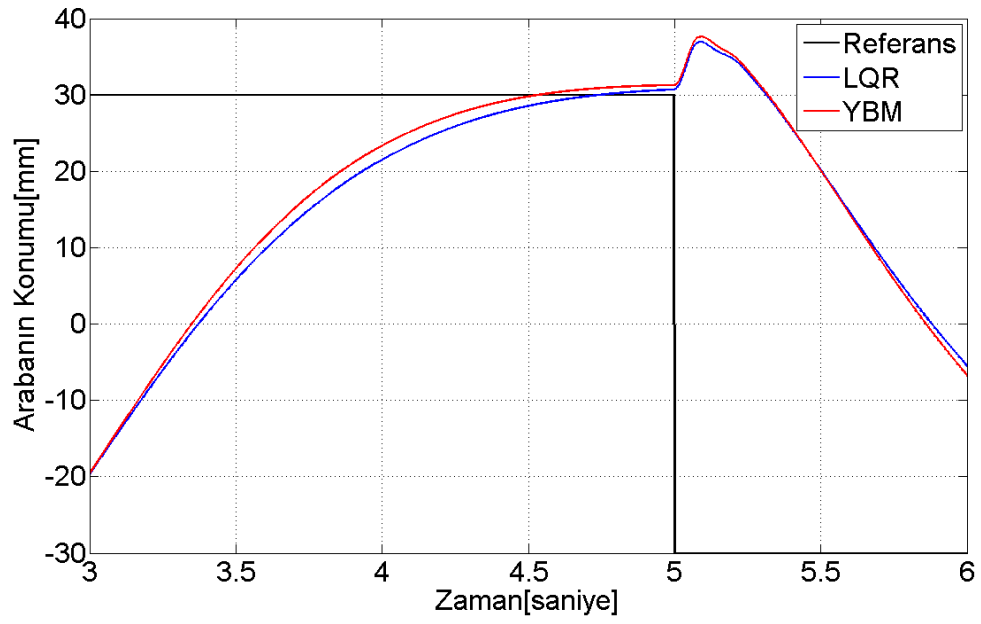
Şekil 4.23.' de sistem simülasyonu ve gerçek sistem üzerinde YBM kontrolcünün Şekil 4.21.' de görülen referans konum girdisine karşı zamana göre motor voltajının değişimi görülmektedir.

4.3. YBM ve LQR Kontrolcü Cevapları

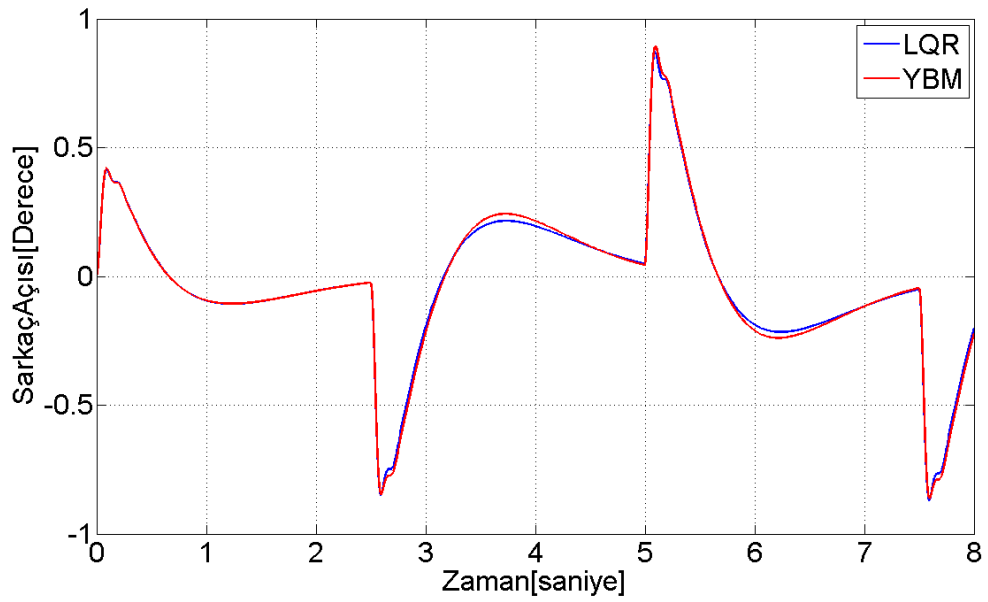
4.3.1. Simülasyon Cevapları



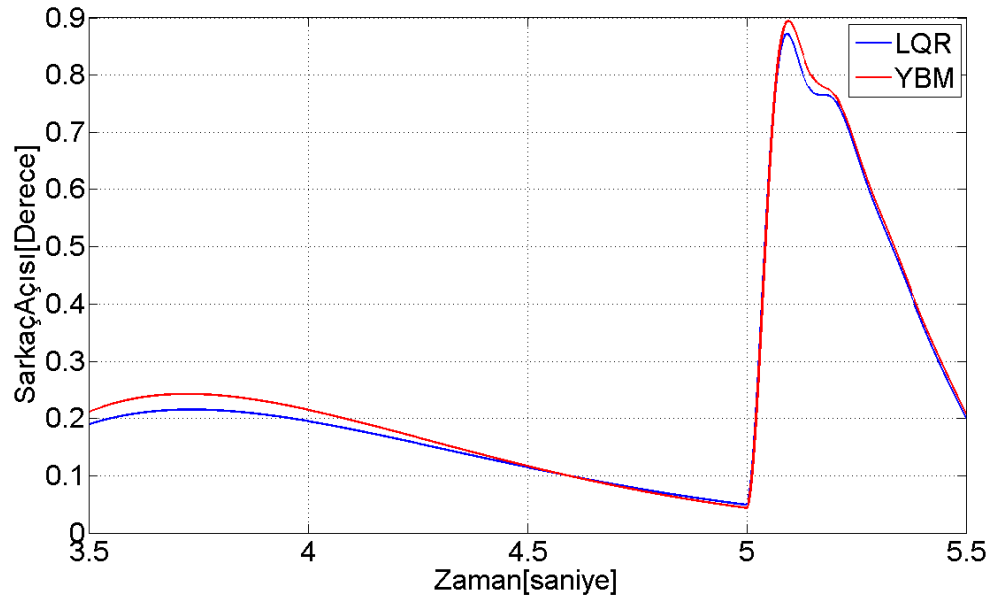
Şekil 4.24. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları–arabanın konumu



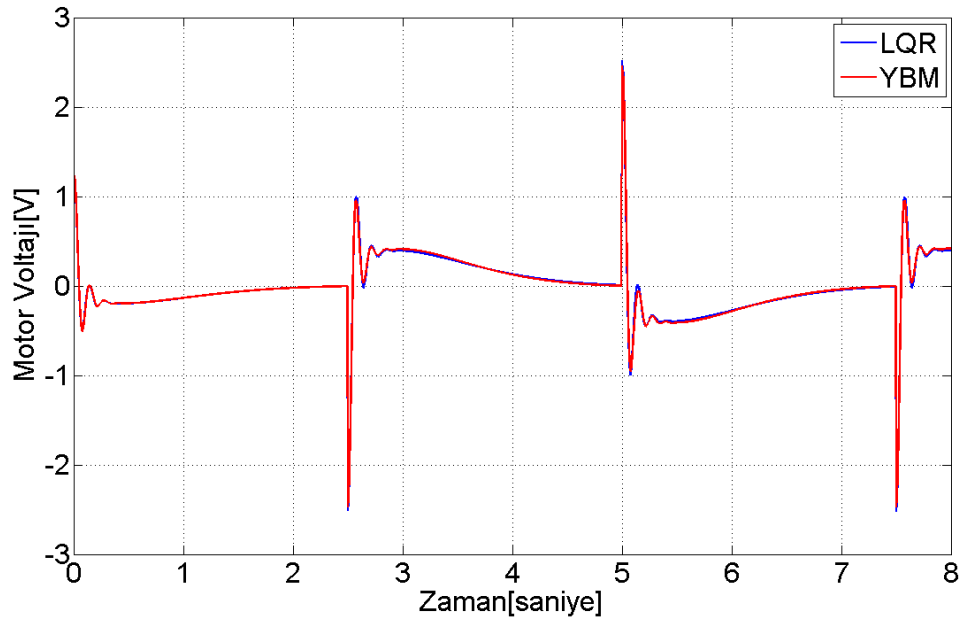
Şekil 4.25. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (3-6 saniye)–arabanın konumu



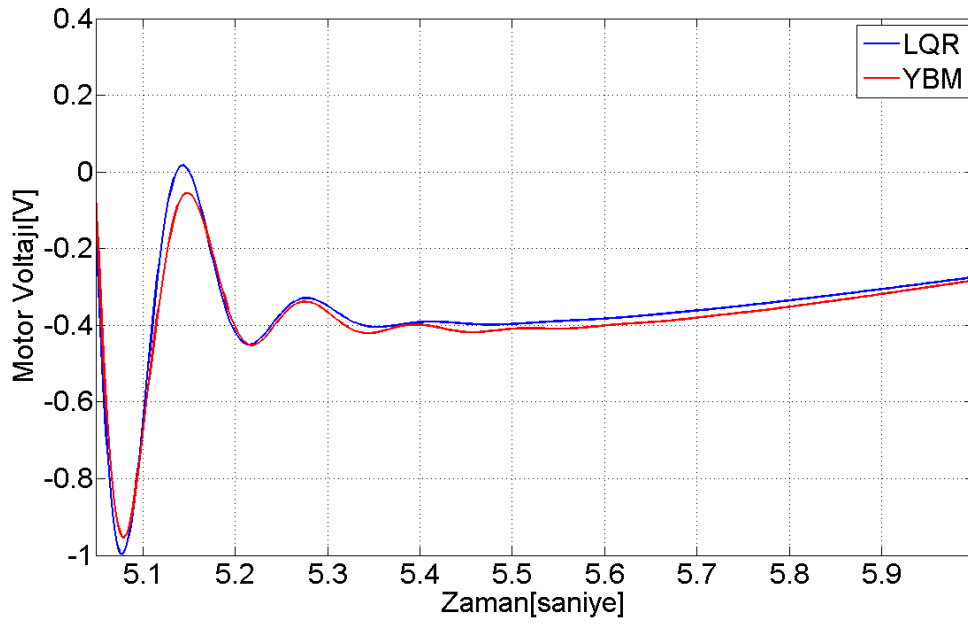
Şekil 4.26. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları–sarkaç açısı



Şekil 4.27. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (3.5-5.5 saniye)–sarcak açısı



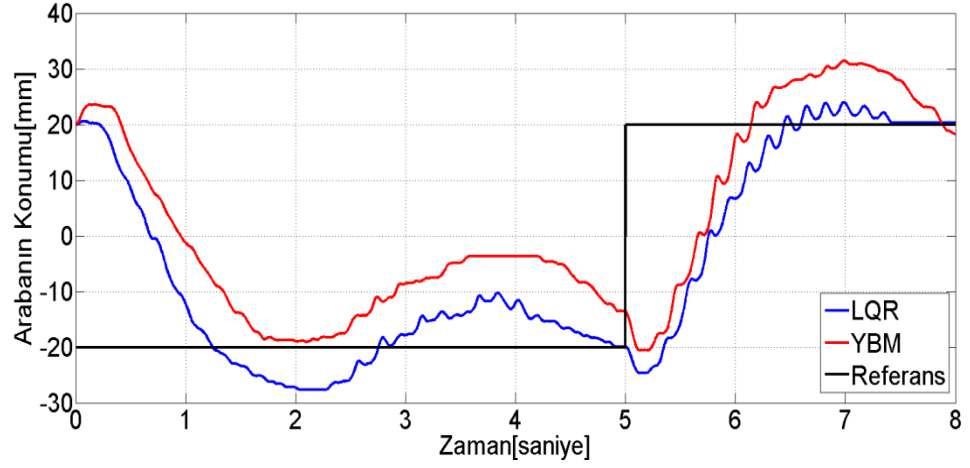
Şekil 4.28. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları–motor voltajı



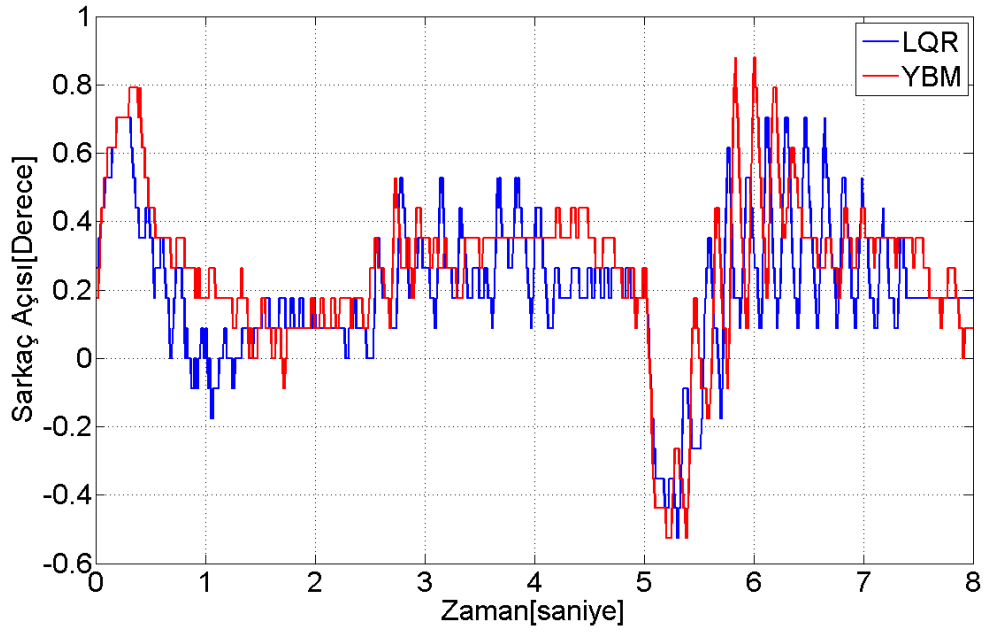
Şekil 4.29. YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyon performans sonuçları (5-6 saniye)– motor voltajı

YBM ve LQR kontrolcülerin simülasyonları için performans sonuçları Şekil 4.24. , 4.26. , 4.28.’de gösterilmiştir. Sonuçların detayları Şekil 4.25. , 4.27. ve 4.29.’ da mevcuttur. Simülasyonlarda sistemin kare dalga şeklinde konum girişine verdiği cevaplar görülmektedir.

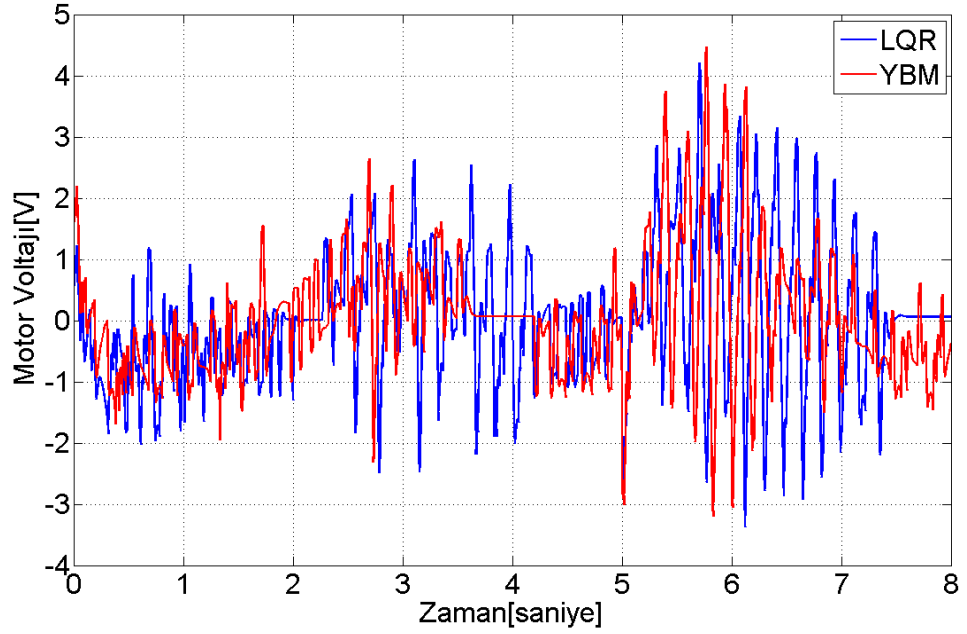
4.3.2. Gerçek Sistem Cevapları



Şekil 4.30. YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–arabanın konumu



Şekil 4.31. YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–sarkaç açısı



Şekil 4.32. YBM ve LQR kontrolcülerin gerçek sistem performans sonuçları–motor voltajı

Şekil 4.30.’ da YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için sarkacın bağlı olduğu arabanın konumunun zamana bağlı değişim grafiği görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere YBM kontrolcü için arabanın konumu LQR kontrolcü ile elde edilen sonuçlara benzer bir eğilim göstermiştir. YBM kontrolcünün LQR kontrolcüye göre daha az gürültüye sahip olduğunun söylenebileceği gibi LQR kontrolcünün de maksimum aşma değerine göre daha avantajlı olduğu görülmektedir.

Şekil 4.31.’ de YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için sarkaç açısının zamana bağlı değişim grafiği görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü benzer eğilimler göstermesinin yanı sıra YBM kontrolcü cevabında belli aralıklarda maksimum aşma daha az gözlenmiştir. Ayrıca LQR kontrolcüye göre daha az gürültülü bir sonuç verdiği anlaşılmaktadır. LQR kontrolcü ise YBM kontrolcüye göre oturma süresi açısından daha avantajlıdır.

Şekil 4.32.’ de YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için motor voltajının zamana bağlı grafiği görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere YBM kontrolcü için motor voltajı LQR kontrolcü motor voltajına göre daha dar bir aralıkta değişmektedir ve YBM kontrolcünün motor voltajı daha gürültülüdür. Aslında bu istenmeyen bir durumdur

ancak sarkaç açısını daha hızlı denge noktasına getirilmesi kontrolcünün esas amacı olduğu için gürültü göz ardı edilebilmektedir.

Çizelge 4.1. Kontrolcü performansları için sarkaç açıları

Kontrolcüler	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	α değişim
LQR gerçek	-0.5273°	0.7031°	1.2304°
LQR simülasyon	-0.8514°	0.8722°	1.7236°
YBM gerçek	-0.5273°	0.8789°	1.4062°
YBM simülasyon	-0.8630°	0.8944°	1.7574°

Çizelge 4.2. Kontrolcü performansları için motor voltajları

Kontrolcüler	$V_{\min}$	$V_{\max}$	V değişim
LQR gerçek	-3.3364V	4.2054V	7.5418V
LQR simülasyon	-2.5174V	2.5217V	5.0391V
YBM gerçek	-3.1893V	4.4656V	7.6549V
YBM simülasyon	-2.4699V	2.4568V	4.9267V

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

İki ayaklı hareket sistemlerinde, uçak ve helikopterlerin iniş sistemlerinde, füze fırlatma rampalarında ve daha birçok alanda kullanılan, kararsız ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olan ters sarkaç sistemi, üzerinde birçok kontrol teorisinin çalışılmasına olanak sağlayan klasik bir kontrol düzeneğidir.

Bu çalışmada ters sarkaç sisteminin denge probleminin iyileştirilmesine yönelik, kontrol teorisinin klasik problemlerinden biri olan gerçek zamanlı doğrusal arabalı ters sarkacın kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ters sarkacın denge problemini iyileştirmesi amacıyla klasik kontrol tiplerinden farklı olarak yapay sinir ağı tabanlı bulanık mantık (YBM) kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiş, kontrolcünün performansını belirlemek üzere karşılaştırma amacıyla Linear Quadratic Regulator (LQR) kontrolcü tasarımı da yapılmıştır.

Sistemin matematiksel modeli ve kontrol teorisi detaylı olarak incelenmiştir. Sistemin kontrolünde yaygın olarak kullanılan LQR kontrol verileri MATLAB programının ANFIS Toolbox modülünde yapay sinir ağı tabanlı olarak eğitilerek elde edilen bulanık mantık kontrolcü ve LQR kontrolcü performansları karşılaştırılmıştır. İncelenen kontrol teorileri MATLAB/Simulink ortamında tasarlanarak Quanser Doğrusal Ters Sarkaç Deney Setinde uygulanmıştır. Kontrolcülerin gerçek sistem ve simülasyon cevapları değerlendirilmiştir. Yapılan değerlendirmeler grafik olarak sunulmuştur.

Çalışma kapsamında, Newton hareket kanunlarından yararlanılarak elde edilen sistemin matematik modeli MATLAB programının Simulink modülü kullanılarak oluşturulmuş, uygulanan yöntemlerin blok diyagramlarla temsil edilmesi sağlanmıştır. MATLAB/Simulink programı kullanılarak teorik olarak performansı izlenen kontrolcülerin performanslarının deneysel olarak gerçekleştirilmesi amacıyla da Quanser doğrusal ters sarkaç deney seti kullanılmıştır.

5.1. Sonuç

Deney setinin parametreleri kullanılarak yapılan çalışmalarda sarkaç açısı başlangıçta sıfır olduğunda kontrolcü devreye girmiş ve sarkacı kararsız denge noktasında dengede tutma karallılığını sürdürürken arabayı da referans girişe uygun şekilde kararlı tutmaya çalışmıştır. YBM ve LQR kontrolcüler için sarkacın açısı, arabanın konumu ve motor voltajının zamana bağlı değişim grafikleri hem simülasyon hem de gerçek sistem için verilmiştir.

Tasarlanan kontrolcülerin referans girişe verdikleri cevaplar değerlendirilirken maksimum aşma, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve gürültü gibi performans kriterleri esas alınarak değerlendirme yapılmıştır.

Çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirilen ve uygulaması yapılan YBM ve LQR kontrolcülerin performansları karşılaştırıldığında;

- YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için sarkaç açısı cevapları benzer eğilimler göstermesinin yanı sıra YBM kontrolcü cevabında belli aralıklarda maksimum aşma daha az gözlenmiştir. Ayrıca LQR kontrolcüye göre daha az gürültülü bir sonuç verdiği anlaşılmaktadır bu da gerçek sistemler için YBM kontrolcünün daha hızlı cevap verdiğini göstermektedir. LQR kontrolcü ise YBM kontrolcüye göre oturma süresi açısından daha avantajlıdır. Sarkaç açısındaki değişim için YBM kontrolcü LQR kontrolcüye iyi bir alternatiftir.
- YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için sarkacın bağlı olduğu arabanın konum cevapları genliklerindeki farklılıklara rağmen benzer karakteristik özellik göstermektedir. YBM kontrolcünün LQR kontrolcüye göre daha az gürültüye sahip olduğu söylenebileceği gibi LQR kontrolcünün de maksimum aşma ve yükselme zamanı değerlerine göre daha avantajlı olduğu söylenebilmektedir. Arabanın konumundaki değişim için YBM kontrolcü LQR kontrolcüye iyi bir alternatiftir.
- YBM kontrolcü ve LQR kontrolcü için motor voltajı cevapları incelendiğinde YBM kontrolcü için motor voltajı LQR kontrolcü motor voltajına göre daha dar bir aralıkta değişmektedir ve YBM kontrolcünün motor voltajı daha

gürültülüdür. Aslında bu istenmeyen bir durumdur ancak sarkaç açısını daha hızlı denge noktasına getirilmesi kontrolcünün esas amacı olduğu için bu aşamada gürültü göz ardı edilebilmektedir.

sonuçlarına varılmıştır.

Sonuç olarak MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan kontrol blok diyagramları deney cihazı ile eş zamanlı olarak çalıştırılmış YBM ve LQR kontrolcüler karşılaştırılmıştır. LQR kontrolcü bütün sistem değişkenlerini birlikte değerlendirilirken YBM kontrolcü ile sarkacın açısı ve arabanın konumu minimize edilerek tasarım yapılmıştır. Sonuç olarak sistem davranışları hakkında bilgi sahibi olunduğu zaman YBM kontrolcü işlevsel bir kontrolcü olarak kabul edilebileceği ve sistemimizi için YBM kontrolcünün LQR kontrolcüye alternatif bir kontrolcü olarak uygulanabileceği görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada tek serbestlik dereceli arabalı doğrusal ters sarkaç sisteminin denge problemini iyileştirmeye yönelik olarak tasarlanan YBM ve LQR kontrolcülerin performansları MATLAB/Simulink ortamında yapılan bilgisayar simülasyonları ve Quanser Doğrusal Ters Sarkaç Deney Setinde yapılan uygulamalarla incelenmiştir.

Sistemin matematiksel modeli, Newton metodu, Hamilton metodu gibi nümerik yöntemlerle ve/veya ADAMS, SIMMECHANİCS ve benzeri dinamik modelleme programları yardımı ile sistem giriş ve çıkışları farklı olabilecek şekilde modellenebilir. Sonuçlara göre sistemin kontrolü için farklı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilerek, uygulamaları gerçekleştirilebilir.

Ayrıca literatürde çok yeni bir konu olan Arı Algoritması yöntemi veya genetik algoritmalarla parametre tayini kullanılmak suretiyle kontrolcü kazançları optimize edilebilir. Bu sayede mevcut kontrolcüler iyileştirilebileceği gibi yeni kontrolcülerde tasarlanabilir.

Çalışma kapsamında tasarlanan kontrolcülerin davranışlarından yola çıkarak benzer matematik modele sahip tepe vinçleri gibi sistemlerde tasarlanabilecek benzer kontrolcüler rahatlıkla uygulanabilir.

KAYNAKLAR

- Akkaş, N., 2006. Tozaltı köşe kaynağında yapay zeka teknolojileri kullanılarak dikiş geometrisinin modellenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Anderson, B.D. and Moore, J.B., 2007. Optimal control: linear quadratic methods. **Courier Dover Publications.**
- Anonymous, 2014. Telepresence: Uzaktan konferans robotu. <http://www.fastcompany.com/1664886/test-drive-working-remotely-anybots-telepresence-robot>. Erişim tarihi: 16.07.2014
- Artman, S.S., 1998. The simple pendulum is not so simple. **Society for industrial and applied Math.**, 4, p.927-930
- Aström, K.J., Aracil, J., and Gordillo, F., 2005. A new family of smooth strategies for swinging up a pendulum. **Proceedings of the 16th IFAC World Congress.** Elsevier.
- Bolton, W., 1998. Newnes control engineering pocket book. **Newnes.**
- Chen, S., and Billings, S.A., 1992. Neural networks for nonlinear dynamic system modeling and identification. **International J. Control**, 2, p.319- 346.
- Çakan, A., 2013. Karayolu taşıtları süspansiyon sisteminde aktif titreşim kontrolü. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Erkal, B., 2009. Eğitim amaçlı sinirsel bulanık denetimine dayalı bir manyetik askı sisteminin tasarlanması ve simulink ortamında benzetimi. **5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu.**
- Faussett, L.V., 1994. Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms, and applications. **Prentice-Hall.**
- Gawthrop, P.J. and Wang, L. 2005. Intermittent predictive control of an inverted pendulum. **Control Engineering Practice**, 14 p.1347-1356.
- Goher, K.M., Tokhi, M.O. and Siddique, N.H., 2011. Dynamic modeling and control of a two wheeled robotic vehicle with a virtual payload. **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, 6 p.7-41.
- Goher, K.M. and Tokhi, M.O., 2010. Modeling and control of a two wheeled machine:a genetic algorithm-based optimization. **Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC)**

- Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A.C., 2002. JOE: a mobile, inverted pendulum. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 49.
- Inoue, A., Deng, M. and Tanabe, T., 2006. Practical swing-up control system design of cart-type double inverted pendulum. **Chinese Control Conference**, 25,p.2141-2146
- Jang, J.S., 1993 ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. **IEEE Trans. On System, Man and Cybernetics**, 23 p.665-685.
- Jang, J. R. and Gulley N., 1995. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide. **The Mathworks, Inc.**
- Jario, J., 2000. A fuzzy identification method for nonlinear system. **Turk J. Elec.** Vol. 8.
- Kajita, S., Morisawa, M., Miura, K., Nakaoka, S., Harada, K., Kaneko, K., Kanehiro, F. and Yokoi, K., 2010. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking. **In Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference.** 4489-4496
- Kalyoncu, M. and Tinkır, M., 2008. Hierarchical adaptive network based fuzzy logic controller design for a single flexible link robot manipulator, **The 13th International Power Electronics and Motion Control Conference.** 13, 989-996
- Kaplan, A., 2000. Nümerik tabu arama algoritması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi.
- Kashani, R., 2003. Active vibration damping using optimal control techniques.
- Kizir, S., 2008. Doğrusal olmayan ters sarkaç sisteminin tasarımı ve kontrolü. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- Muskinja, N. and Tovornik, B., 2006. Swinging up and stabilization of a real inverted pendulum. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on.**, 53 p.631-639
- Narendra, K.S. and Mukhopadhyay, S., 1997. Adaptive control using neural networks and approximate models. **Neural Networks IEEE Trans. On.**, 8, 475-485
- Nath, V. and Mitra, R., 2014. Swing-up and control of rotary inverted pendulum using pole placement with integrator. **Engineering and Computational Sciences (RAECS),Recent Advances in. IEEE.** 1-5
- Nundrakwang, S., Benjanarasuth, T., Ngamwiwit, J. and Komine, N., 2005. Hybrid pd - servo state feedback control algorithm for swing up inverted pendulum system. **Proceedings of the ICCAS.** 5, p690-693

- Nürnberg, A., 2002. A hierarchical recurrent neuro-fuzzy model for system identification. **International Journal of Approximate Reasoning**, 32, 153–170.
- Ogata K., 1994. O. designing linear control systems with matlab prentice hall.
- Oral, Ö., Çetin, L., and Uyar, E., 2010. A novel method on selection of q and r matrices in the theory of optimal control. **International Journal of Systems Control**. 2, p.84-92
- ÖZBEY, A., 2006. Ters ikili ters sarkacın modelleme ve kontrolü. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- Paraskevopoulos, P.N., 2002. Modern control engineering. **Marcel Dekker**, Inc.
- Quanser, 2012. Inverted pendulum plant manual. **Quanser**, Inc., Canada.
- Saraç, E., 2012. Bir çağrı merkezindeki projelerin anfis metodu ile değerlendirilmesi ve seçimi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi
- Spong, M.W., Corke, P. and Lozano, R., 2001. Nonlinear control of the inertia wheel pendulum. **Automatica**. 37, p1845-1851.
- Sun, Z., Wang, N., and Bi, Y., 2014. Type-1/Type-2 fuzzy logic systems optimization with RNA genetic algorithm for double inverted pendulum. **Applied Mathematical Modelling**.
- Şen., M. A., 2014. İki tekerlekli robot için bulanık mantık tabanlı kontrolcü tasarımı ve arı algortiası kullanarak optimizasyonu. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.
- Vieira, J., Dias, F.M. and Mote A., 2004. Artificial neural networks and neuro-fuzzy systems for modelling and controlling real systems: a comparative study. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**. 17, p.265–273.
- Vinodh, K., E., and Jerome, J., 2013. Robust lqr controller design for stabilizing and trajectory tracking of inverted pendulum. **Procedia Engineering**, 64, p169-178.
- Wu, J. and Jia, S., 2011. TS adaptive neural network fuzzy control applied in two-wheeled self-balancing robot. **Strategic Technology (IFOST), 6th International Forum on.**, 2 p.1023-1026.
- Wu, J., Zhang, W. and Wang, S., 2012. A two-wheeled self-balancing robot with the fuzzy pd control method. **Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering**.

- Wu, J. and Zhang, W., 2011. Design of fuzzy logic controller for two-wheeled self-balancing robot. **Strategic Technology (IFOST), 6th International Forum on.**, 2 p.1266-1270
- Yazıcı A., Karamancıoğlu A., 2005. Structured robust stability analysis of an inverted pendulum system with a fixed feedback. **Journal of Engineering and Architectural Faculty of Eskişehir Osmangazi University**, 18, p55-70
- Yazıcı, A., Karamancıoğlu A., 2008. A nonlinear programming approach for the swing-up control problem. **Journal of Engineering and Architectural Faculty of Eskişehir Osmangazi University**. 2, p.107-122
- Younis, W. and Abdelati, M., 2009. Design and implementation of an experimental segway model. **In intelligent systems and automation: 2nd Mediterranean Conference on Intelligent Systems and Automation**, 1107, p350-354
- Zadeh, L.A., 1962. From circuit theory to system theory. **Proceeding of the IRE**, 50, p.856-865.
- Zorlu, H., 2004. Doğrusal olmayan sistemlerin yapay sinir ağları kullanılarak modellenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

Yazar 1987 yılında Kırıkkale’ de doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Liseyi Kırıkkale’de tamamladı. Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nü 2005 yılında kazandı. Üniversiteden 2011 yılında “Makina Mühendisi” unvanı ile mezun oldu. Aynı yıl Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2012 yılında Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak işe başladı ve Yüksek Lisans eğitime de Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde devam etti. Halen Mustafa Kemal Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.