



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İKİ TEKERLEKLİ ROBOT İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLCÜ TASARIMI VE ARI ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMİZASYONU

Muhammed Arif ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2014
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ TEKERLEKLİ ROBOT İÇİN BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLCÜ TASARIMI VE ARI ALGORİTMASI KULLANARAK OPTİMİZASYONU

Muhammed Arif ŞEN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mete KALYONCU

2014, 77 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Doç. Dr. Mete KALYONCU
Yrd. Doç. Dr. Mustafa TINKIR

Bu çalışmada; iki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen birbirinden bağımsız iki elektrik motoru ile tahrik edilen bir robotun tasarımı ve bulanık mantık tabanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana hedefi, robotun herhangi bir yörüngede hareket ederken kendi kendini dengede tutabilmesidir. Çalışma kapsamında robotun matematiksel modeli elde edilmiş ve kontrolü için bulanık mantık (Fuzzy Logic) tabanlı kontrolcü kullanılmıştır. Ön tasarımı yapılan bulanık mantık tabanlı kontrolcü parametreleri Arı Algoritması (AA) kullanılarak optimize edilmiştir. Optimize edilmiş olan bulanık mantık tabanlı kontrolcünün etkinliğinin görülmesi amacıyla, robot için ayarlanan LQR kontrolcünün ve optimize edilmiş olan bulanık mantık tabanlı kontrolcünün performansları MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyon çalışmalarında karşılaştırılmış ve sonuçlar grafikler şeklinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Arı Algoritması, Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolcü, Dengeleme, İki Tekerlekli Kendi Kendini Dengeleyebilen Robot, Optimizasyon.

ABSTRACT

MS THESIS

DESIGN AND OPTIMISATION OF A FUZZY LOGIC BASED CONTROLLER FOR A TWO-WHEELED ROBOT BY USING THE BEES ALGORITHM

Muhammed Arif ŞEN

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mete KALYONCU

2014, 77 Pages

Jury
Prof. Dr. Fatih Mehmet BOTSALI
Assoc. Prof. Dr. Mete KALYONCU
Assist. Prof. Dr. Mustafa TINKIR

In this study, design and optimisation of a fuzzy logic-based controller for a two-wheeled self-balancing robot, whose wheels are independently driven by two electric motors, is carried out. The main goal of the study is the self-balance stability of the robot while it is moving at any trajectory. The mathematical model of the robot has been obtained in the scope of the work and a fuzzy logic controller is used to control the robot. The parameters of the pre-designed fuzzy logic controller are optimized by using the Bees Algorithm. In order to find out the efficiency of the optimized fuzzy logic-based controller, it's performance is compared to the performance of a LQR controller which is set according to the robot in the study. The results of MATLAB/Simulink simulation are presented with graphics.

Keywords: The Bees Algorithm, Fuzzy Logic Based Controller, Balancing, Two-Wheeled Self-Balancing Robot, Optimization.

ÖNSÖZ

İki tekerlekli robotik sistemler, karasız ve doğrusal olmayan yapısı ile kontrol alanında yaygın çalışma konularından birisi olmakla birlikte bireysel ulaşım ve/veya yük taşıma aracı olarak kullanılan Segway gibi araçların teorik altyapısını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, kontrol teorisi açısından eğitici yönü fazla iki tekerlekli robotik bir sistem incelenmiş ve güncel bir optimizasyon yöntemi olan Arı Algoritması optimizasyonu ile Bulanık Mantık Kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir

Tez çalışması süresince, engin azmi ve hoşgörüsü ile her zaman desteğini yakından hissettiğim, karşılaştığım güçlük ve sorunlarda tecrübesini esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Mete KALYONCU' ya, ilgilerini ve yardımlarını eksik etmeyen sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa TINKIR ve sayın Arş. Gör. Yusuf ŞAHİN hocalarıma, hayatım boyunca maddi ve manevi olarak sürekli beni destekleyen, ilgilerini her an hissettiğim çok sevdiğim annem, babam ve kardeşlerime, içtenlik ve samimiyetle teşekkür ederim.

Muhammed Arif ŞEN
KONYA-2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **viii**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Tezin Amacı 1
1.2. Tezin Önemi 1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

3. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTİK SİSTEM (2TRS) **12**

3.1. Fiziksel ve Matematiksel Modeli 12
3.2. Durum Uzay Modeli 16

4. LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) KONTROL **19**

4.1. LQR Kontrolcü Tasarımı 20
4.2. LQR Kontrol Sisteminin MATLAB/Simulink ile Modellenmesi 22

5. BULANIK MANTIK VE KONTROLÜ **25**

6. ARI ALGORİTMASI (AA) **29**

6.1. Sezgisel Yöntemler Ve Sürü Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları 29
6.2. Arı Algoritması (AA) 31

7. ARI ALGORİTMASI OPTİMİZASYON UYGULAMALARI **38**

7.1. LQR Kazanç Sabitlerinin Optimizasyonu 38
7.2. Arı Algoritması optimizasyonu ile Fuzzy-PID kontrolcü tasarımı 39

8. SAYISAL UYGULAMALAR **45**

8.1. Daire Yörüngeye ait Sonuçlar 46
8.2. Kare Yörüngeye ait Sonuçlar 51
8.3. Üçgen Yörüngeye ait Sonuçlar 56

9. SONUÇ VE ÖNERİLER **63**

10. KAYNAKLAR **67**

ÖZGEÇMİŞ **77**

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ψ	:	Sistemin denge (yunuslama/sarkaç) açısı (pitch)
ϕ	:	Sistemin sola/sağa dönüş açısı (yaw)
θ	:	Sol ve sağ teker açılarının ortalaması
K_f	:	LQR kontrolcü kazanç katsayı matrisi
K_ff	:	Optimize LQR kontrolcü kazanç katsayı matrisi
k_i	:	İntegral kazanç sabiti
k_ii	:	Optimize integral kazanç sabiti
k_phi	:	Dönüş açısal hızının oransal kazanç sabiti
u	:	Sistemin giriş matrisi
x_1	:	Birinci durum uzay modeli değişken matrisi
x_2	:	İkinci durum uzay modeli değişken matrisi
x_b	:	Üst gövde ağırlık merkezinin x koordinat konumu
x_m	:	Sistem ağırlık merkezinin x koordinat konumu
$x_{sol/sağ}$	:	Sol/sağ tekerin x koordinat konumu
y_b	:	Üst gövde ağırlık merkezinin y koordinat konumu
y_m	:	Sistem ağırlık merkezinin y koordinat konumu
$y_{sol/sağ}$	:	Sol/sağ tekerin y koordinat konumu
z_b	:	Üst gövde ağırlık merkezinin z koordinat konumu
z_m	:	Sistem ağırlık merkezinin z koordinat konumu

Kısaltmalar

2TRS	:	İki Tekerlekli Robotik Sistem
AA	:	Arı Algoritması
AS	:	Arı Sistemi
BMK	:	Bulanık Mantık Kontrolcü
FLC	:	Fuzzy Logic Control
LQR	:	İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici
Mak.	:	Maksimum
Min.	:	Minimun
NB	:	Negatif Büyük
NO	:	Negatif Orta
O-LQR	:	Optimize LQR Kontrolcü
PB	:	Pozitif Büyük
PO	:	Pozitif Orta
S	:	Sıfır

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmada; İki tekerlekli robotik bir sistemin, dikey durumda kendi kendini dengede tutarak, belirli bir yörüngede hareket kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin önemi ve literatür çalışmaları, matematiksel modeli ve kontrol teorisi ana başlıklar altında incelenmektedir.

Bu tezin amacı: İki tekerlekli robotik bir sistem için Bulanık Mantık Kontrolcü (BMK)-Fuzzy Logic Controller (FLC) tasarımı gerçekleştirerek, temel kontrol teorisi olan LQR-(Lineer Quadratic Regulator)-(doğrusal kuadratik düzenleyici) kontrolcü ile karşılaştırmak ve genel olarak iki tekerlekli robotik sistemleri anlamaktır.

Bu tezin önemli bir parçasını, gelişmiş ve güncel bir optimizasyon yöntemi olan Arı Algoritmasının (AA) detaylı olarak incelenmesinin yanı sıra Bulanık Mantık Kontrolcü parametrelerinin ve LQR kontrolcünün performansını iyileştirmeye yönelik olarak LQR kontrolcü kazançlarının Arı Algoritması ile optimize edilmesi oluşturmaktadır.

Ayrıca sistemin kontrol uygulamalarının; sinyal işleme yöntemlerinin blok diyagramlarla temsil edilmesini sağlayan ve kolayca görselleştirmeye izin vererek karmaşık kontrol algoritmalarının tasarımını kolaylaştıran MATLAB/Simulink ortamında tasarlanarak, benzetim çalışmalarının yapılması tezde önemli yer tutmaktadır.

1.2. Tezin Önemi

Bu tezde; literatürdeki ismi ‘Two-Wheeled Inverted Pendulum’ ve ‘Self Balancing Robot’ olan, genel olarak iki tekerlek ve bir gövdeden oluşan, dairesel ve/veya doğrusal hareket yapabilen, kendi kendini dengede tutarak hareket edebilmesi amaçlanan sistemin matematiksel modeli verilerek kontrolü gerçekleştirilmiştir.

İki tekerlekli robotik sistemler son yıllarda, fiziksel modeli itibariyle iki ayağı üzerinde dengede duran insan modeline benzemesi nedeniyle, robot teknolojisi ile otomotiv sektörü arasındaki etkileşimin açık örneklerinden biri haline gelmiştir.

İki tekerlekli robotik sistemlerin, karasız bir yapıya sahip olması, deney düzeneğinin kolay kurulması, üzerinde birçok farklı kontrolcünün uygulanabilmesi ve hakkında yapılan akademik çalışmaların, makalelerin oldukça fazla ve etkin olması nedeniyle, kontrol teorisi açısından oldukça popüler bir konudur.

İki tekerlekli robotik bir sistemin dinamikleri ile benzetim yapılarak, birçok robotik sistemin denge ve hareket kontrolü yapılabilmektedir. Mesela iki tekerlekli robotik bir sistemin hareketi; bir robot kolunun hareketi, konteynır ucuna bağlı bir kutunun salınım hareketi veya itme kuvvetinin uzun bir cismin altından uygulandığı (roket/füze güdümleri gibi) sistemlerin hareketi ile ilişkilendirilebilir.

Kontrol teorisinin, öğretici yönü ve uygulanabilirliği açısından önemli bir konusu haline gelen iki tekerlekli robotik sistemler üzerine; birçok yüksek lisans ve doktora tezi yazılmış, birçok yayın kaleme alınmıştır. Bu çalışmaların etkili sonuçlar vermesi; İki tekerlekli, elektrik ile çalışan, kendi kendini dengeleyebilen kişisel ulaşım araçlarının (Segway gibi) üretilmesinin önünü açmış, bu araçların ticarileşmesiyle dünya çapında ciddi bir sektör oluşmuştur.

İki tekerlekli robotik sistemlerin ticari uygulamalarının en önemli örnekleri; Şekil 1.1. 'deki kişisel bir ulaşım aracı olan *SEGWAY HT* ve Şekil 1.2. 'deki uzaktan konferans robotu olarak kullanılan *Teleprence* olmuştur.



Şekil 1.1. Kişisel ulaşım aracı SEGWAY HT



Şekil 1.2. Uzaktan konferans robotu (Teleprence)

Bu araçlar; yüksek manevra kabiliyetleri, küçük dönüş yarıçapları ve hızlı tepki verme özelliklerine sahip olmaları nedeniyle güvenli ve etkin bir ulaşım sağlayabilmektedirler. Ayrıca boyutlarının küçük olması, dar mekânlarda kullanıma imkân vermektedir. Bu sebeple, birçok alanda insan/yük taşımada kullanılan bir araç haline gelmiştir. Fabrika, alışveriş merkezi, havaalanı, spor sahası gibi ortamlarda, şehir içi ulaşımda kullanımı oldukça yaygın kullanılmaktadır.

Özellikle güvenlik birimleri tarafından, çeviklik ve konforu bir arada sağlaması açısından tercih sebebi olmuştur. Dünyanın dört bir köşesindeki güvenlik kuruluşları, görevlilerin daha görülebilir olmalarını ve suç mahalline veya acil durumlara daha çabuk ulaşmalarını sağlayan bu araçları, kampus ve alışveriş merkezi gibi güvenlik gerektiren alanlarda kullanmaktadırlar.

Mekatronik sistem olarak ciddi bir teknolojiye sahip bu araçlar; kullanıcıya güvenli ve konforlu bir ulaşım sunmasının yanı sıra çevreye de duyarlıdır. Petrol ürünleri tüketen araçların aksine elektrik ile çalışan bu araçlar küresel karbon emisyonu ve enerji tasarrufu noktasında çevreye ve ekonomiye ciddi kazanç sağlamaktadır. Yakıt ihtiyacı olmaksızın kolaylıkla şarj edilebilen piller sayesinde işletme ve bakım masrafları çok az olan bu araçlar, oldukça geniş bir kullanıcı kitlesine hitap edebilmektedir.

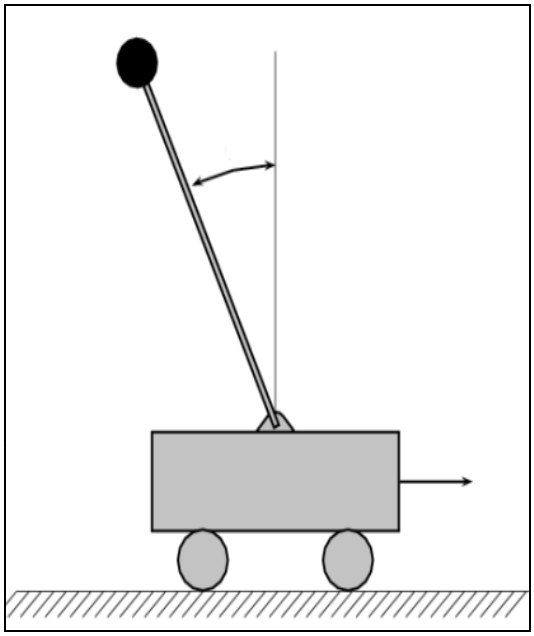
İnsanın duruş pozisyonunu bir robotik sistem üzerinde kontrollü şekilde gerçekleştirmeye yönelik çalışmalar başarılı sonuçlar verdikçe, iki tekerlekli dengede çalışan mobil robot teknolojisi yaygınlaşacak ve maliyeti düşecektir, böylece bu tür robotların günlük hayatta kullanım alanları ve verimliliği de hızla artacaktır. Dahası bu tür sistemler, insanın duruş pozisyonunu sürekli kontrol eden merkezi sinir sisteminin yerini alabilecek kadar gelişirse, insansı robotlar yaygınlaşacaktır.

Bu tez kapsamında incelenen iki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen robotik sistem, yukarıda bahsedilen araçların küçük bir modelini oluşturmakta ve aynı mantıkla çalışmaktadır. Sistemin kontrol teorilerinin araştırması ve geliştirmesi bu tür ticari ürünlerin daha da yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır, ayrıca hali hazırda üretilen bu tür araçların fiziksel ve matematiksel modelinin geliştirmesine katkı sağlayabilecektir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İki tekerlekli kendini dengeleyebilen robotik sistemler, kontrol teorisinin temel bir konusu olan 'Ters Sarkaç' kontrolü tabanlı geliştirilerek iki binli yılların başlarında literatüre girmiş ve son on yılda gelişerek popülerliğini artırmıştır. Bu sebeple iki tekerlekli robotik sistemlerin incelenmesinde ters sarkaç sistemi ve kontrolü önemli yer tutmaktadır.

Ters sarkaç (Inverted Pendulum); yatay yönde doğrusal hareket yapabilen bir araba üzerine, dairesel hareket edebilecek şekilde mesnetli bir çubuktan (sarkaçtan) oluşan fiziksel bir sistemdir (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Ters sarkaç modeli

İki tekerlekli robotik sistemlerin temelini oluşturan ve kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ters sarkaç sistemi literatürde geniş yer tutmaktadır. Ters sarkaç modeli ve kontrol teorisi, iki tekerlekli robotik sistemlerin tasarımının ve kontrolünün geliştirilmesinde ilham kaynağı olmuştur. Ters sarkaç ile ilgili literatürdeki temel çalışmalardan öne çıkanlar kısaca şöyledir.

Ji Lei ve Kin (1997) çalışmalarında, ters sarkaç sisteminde sarkacın ters, evrik duruma getirilmesi ve dengelenmesi için geliştirdikleri bulanık mantık denetleyicisinin benzetim sonuçlarını sunmuşlardır.

Bugeja (2003) çalışmasında, sarkacın yükseltilmesi için sistem enerjisinin de dikkate alındığı geri beslemeli doğrusallaştırma tekniğini ve sarkacın dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini inceleyerek melez bir yaklaşım kullanmıştır.

Nundrakwang ve ark. (2005) çalışmalarında, sarkacın yükseltilmesi için PD konum kontrolcüsünü ve dengelenmesi için ise durum geri besleme yöntemlerini kullanmışlardır.

Muskinja ve Tovornik (2006) çalışmalarında, tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemi üzerinde bulanık mantık ve enerji tabanlı kontrol yöntemlerini sarkacın yükseltilmesi için uygulamışlardır. Uyarlamalı-durum kontrolcü yapısını ise sarkacın dengelenmesi için önermişlerdir. Benzetim ve deneysel sonuçlarında, bulanık denetçinin enerji tabanlı kontrolcüye göre avantajları olduğunu gözlemlemişlerdir.

Literatürdeki çalışmaları dikkate alarak, Ters Sarkaç sistemlerini fiziksel yapısı ve uygulanan kontrol yöntemleri açısından iki grupta incelemek mümkündür.

Yapısal açıdan ters sarkaç sistemleri;

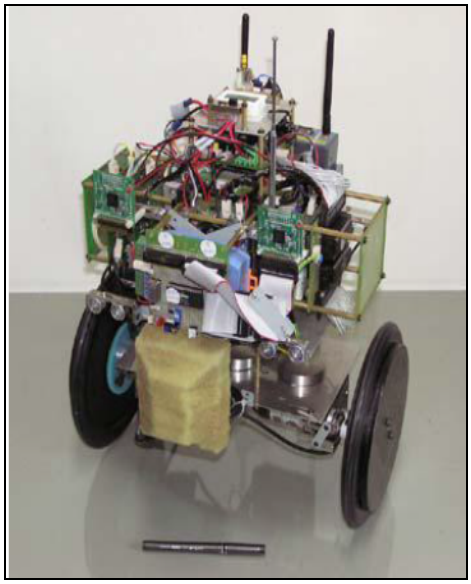
- Tek çubuklu arabalı ters sarkaç sistemleri (Muskinja ve Tovornik, 2006)
- Çift çubuklu arabalı ters saraç sistemleri (Zhong, 2001)
- Tek ve çift çubuklu dönel ters sarkaç sistemleri (Krishen, 2006)
- Kuvvetin, çubuğun ucuna bağlı olan bir tekerin dönmesi sonucu elde edilerek uygulandığı sarkaç sistemleri (Spong, 2001)
- Gezgin ters sarkaç sistemleri (iki tekerlekli robotik sistemler) (Grasser, 2002).

Uygulanan kontrol yöntemleri açıdan ters sarkaç sistemleri;

- PID ve durum geri besleme gibi doğrusal yöntemler (Nundrakwang, 2005)
- Enerji tabanlı kontrol yapan yöntemler (Aström, 2000)
- Bulanık mantık tabanlı kontrol yapan yöntemler (Ji Lei ve Kin, 1997)
- Yapay sinir ağları ile kontrol yapan yöntemler (Bugeja, 2003)

Bir gezgin ters sarkaç modeli olan iki tekerlekli mobil sistemler alanında yapılan ilk çalışma; 2001 yılında **Dean Kamen** tarafından icat edilen, SEGWAY HT adlı iki tekerlekli bireysel ulaşım aracıdır. Bu araç bu alanda yapılan çalışmalara öncülük etmiştir.

İki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen robotik sistemler literatürde; robotik mobil platformlar (Şekil 2.1.) ve daha büyük boyuttaki iki tekerlekli robotik elektrikli taşıyıcılar/araçlar (Şekil 2.2.) olarak iki başlıkta incelenebilir.



Şekil 2.1. İki tekerlekli robot (Chiu ve Peng, 2006)



Şekil 2.2. İki tekerlekli taşıyıcı (Choi ve Oh, 2008)

Grasser (2002), Ooi (2003), Ho (2005), Grep (2009) çalışmalarında küçük boyutlardaki robotik mobil platformlar kullanmıştır. Salerno ve Angeles (2004), Lin (2007), Morrell ve Field (2007), Tsai (2008), Nawawi (2008), Becker (2008), Zhou (2008) ise çalışmalarında daha büyük boyuttaki robotik mobil platform tercih etmişlerdir.

Tirmant (2002), Burkert (2004), Zhou (2008), Gocmen (2011) 'ın taşıyıcı araç formunda çalışmaları mevcuttur. Taşıyıcı araçlarda hız ve yön kontrolü yarı otomatiktir; şase ve çubuktan (handlebar) oluşan bir aracın üzerindeki sürücü, öne/geriye/sağa/sola eğilerek aracı yönlendirebilmektedir.

Solis (2009), Butler (2008), Hu (2007), Li (2007), Pannil (2008), Hu (2010) robotik mobil platform çalışmalarında kişisel bir bilgisayardan (PC) gönderilen ve bir bluetooth modülü veya radyo alıcısı üzerinden algılanan komutlar ile uzaktan kullanıcı kontrollü kumanda yöntemi kullanmışlardır.

Gans ve Hutchinson (2006), Searock (2004) yaptığı çalışmalarda, bünyesindeki bir kamera sayesinde çevreyi algılayabilen ve tamamen otomatik yol planı yapabilen sistemler geliştirmişlerdir.

Sasaki (2005), Jean ve Wang (2009), Lin (2009), Goher ve Tokhi (2010) SEGWAY'i referans alarak, mevcut sistemin maliyetini ve toplam ağırlığını azaltmaya yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Bu tür araçları daha kolay taşınabilir ve daha yaygın kullanılır hale getirmeyi hedeflemişlerdir

Taşıyıcı araçların kullanım amacı bireysel ulaşımla sınırlıdır. Ancak robotik sistemler kullanım alanı ve kullanım amacı oldukça geniştir. Vallius ve Röning (2007) bir telekonferans aracı olarak kullanılan Telepresence'ı geliştirmişlerdir. Searock (2004)'un futbol oynayan robot şeklinde uygulaması literatürde yer almaktadır. Butler ve Bright (2008) ise robotik sistemlerini yük taşıma amaçlı dizayn etmişlerdir.

Bu tür iki tekerlekli robotik sistemlerin, gerekli bileşenlerin eklenmesiyle, hibrit sisteme dönüştürülmesi örnekleri vardır. Jeong ve Takahashi (2007), Acar (2008) kol ve/ya gövde ekleyerek iki tekerlekli insansı hibrit robot geliştirmişlerdir.

İki tekerlekli sistemlerin yanı sıra; Huang (2010) tek teker üzerinde, Kumaga ve Ochiai (2009) bir küre üzerinde kendi kendini dengeleyen sistemlerle çalışmışlardır.

Kontrolcü tasarımı için sistemin matematiksel modelinin elde edilmesi gerekmektedir. Matematiksel model oluşturmak amaçlı çoğunlukla Lagrange metodu kullanılmıştır. Chi (2005), Acar (2008) 'ın çalışmaları Lagrange metodu ile modellemeye, Nawawi (2008), Becker (2008)'ın çalışmaları ise Newton Yasası ile modellemeye örnek verilebilir. Matematiksel model için gerekli olan atalet momenti parametresini Burkert (2004) ve Zhou (2008) teorik olarak, Chi (2005) deneysel olarak belirlemişlerdir.

Ho (2005), Nawawi (2008) çalışmalarında sistemin durumunu; hareket yönündeki doğrusal yer değiştirme ve doğrusal hız, eğim açısı ve açısal oranı değişkenleri cinsinden tanımlamışlardır. Aström (2000), Tsai (2008), Lin (2009) ise eğim açısındaki ve açısal orandaki sapmayı dikkate almışlardır.

Sistemin en kritik bölümü kontrolcü tasarımıdır. Kendi kendini dengede tutabilme kararlığını kontrolcü sağlamaktadır. Sistem doğrusal olmamasına rağmen, doğrusal hale getirildikten sonra daha az karmaşık ve daha ucuz doğrusal denetleyiciler kullanılabilmektedir. Çalışmalar çoğunlukla sistemin kendi kendini dengede tutabilmesi (oto-kontrol) yönündedir. Ancak Goher ve Tokhi (2010) çalışmalarında, oto-kontrolün yanı sıra 'tracking kontrol' amaçlı kontrolcü de geliştirmişlerdir.

Temel amaç, sistemin eğim açısını kararlı duruma getirerek dengeyi sağlamaktır. Bu sebeple, gerekli veriler sensörlerden elde edilmelidir. Gövdenin açısını ve açısal oranını ölçmek üzere, ivmeölçer(accelerometer) ve jiroskop (gyroscopes) kullanılmıştır.

Birçok çalışmada bu sensörler beraber kullanılmıştır. Li (2007), Sasaki (2005) bu iki sensörü beraber, Grepl (2009) yalnız ivmeölçeri, Jeong ve Takahashi (2007) yalnız jiroskopu kullanmışlardır. Genellikle ivmeölçer gürültülü veri verir ve jiroskop verilerinde sapmalara neden olur. Bu nedenle Butler ve Bright (2008) çalışmalarında, daha doğru veri elde etmek için, bu iki sensörü bütünleyici bir filtre ile birleştirmişlerdir. Grasser (2002) kalman filtresini, eğimölçer ve jiroskop birleştirmesi işleminde kullanmıştır.

Takita (2009), Hu (2007), Solis (2009), Grepl (2009), Zhou (2008) çalışmalarında işlemleri, ucuz ve kolay programlanabilir olması sebebiyle, gömülü mikro denetleyiciler tarafından gerçekleştirmişlerdir. Genellikle Mikrochip ve Atmel markalı mikro işlemciler tercih edilmiştir.

Tsai (2008), Nawawi (2008) Dijital Sinyal İşleme (DSP) yöntemiyle gerçek zamanlı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, Li (2007) tek board bilgisayar (PC104) ile Matlab kodları kullanarak gerçek zamanlı bir çalışma yapmıştır.

Nagarajan (2009) çalışmasında, ivmeölçer ve jiroskop içeren, filtre edilmiş veri veren Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU) kullanmıştır. Choi ve Oh (2008), Olis (2009) sistemin doğrusal yer değiştirmesini ve doğrusal hızını ölçmek için ise enkoder kullanmışlardır.

Ünlütürk ve ark. (2013) oluşturdukları küçük boyutlu iki tekerlekli robotik bir sistemin kontrolünü, PID kontrolcü ile deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Hız ve ivme değerlerini, üç eksende veri verebilen Ataletsel Ölçüm Birimi (IMU)'dan elde ederek, kalman filtresi ile filtre etmişlerdir.

Bu sistem içi birçok doğrusal kontrol algoritması ve kontrolcü tasarımı çalışılmıştır. Bu sistemde daha başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle genellikle LQR kontrolcü kullanılmış. Chee (2006), Li (2007), Becker (2008), Goher ve Tokhi (2010) PID kontrolcü; Solis (2009) PD kontrolcü; Salerno ve Angeles (2004), Chi (2005), Grepl (2009), Takita (2009) LQR kontrolcü tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

İki tekerlekli robot kontrolü üzerine, Model Öngörülü Kontrol (*Model Predictive Control*–MPC) çalışmaları, güncel bir kontrol yaklaşımdır. Nakpong ve Yamamoto (2012) iki tekerlekli bir robot üzerinde, kablosuz bağlantı ile online veri alış verişi sağlayarak, Model Öngörülü Kontrol uygulamışlardır. Azimi ve ark. (2013), Grasser 'in 2002 yılında tasarladığı mobil ters sarkaç (JOE) çalışmasını referans alarak, bozucu giriş altındaki sisteme Model Öngörülü Kontrol tasarımı gerçekleştirmişlerdir.

Hu (2007), Butler ve Bright (2008) Matlab/Simulink ortamında sistemin benzetim çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Grepl (2009) sistemin dinamik olarak modellenmesinde Matlab'ın SimMechanics arabirimini kullanmıştır.

Wei ve Yangmin (2013) Segway'i referans alarak tasarladıkları iki tekerli taşıyıcı bir aracın kontrolü için klasik kontrol yöntemleri olan LQR kontrolcü ve PID kontrolcü tasarlamışlar, Matlab/Simulink yazılımıyla simülasyon çalışmaları yaparak kontrolcüleri karşılaştırmışlardır.

İki tekerlekli robotik sistemler üzerine yapılan güncel çalışmalarda, sistemin fiziksel modeli ve hareket kontrolü üzerine farklı yaklaşımlar mevcuttur. Rahman ve ark.(2013), çift çubuklu arabalı ters sarkaç sistemini referans göstererek, iki tekerlekli robotik sitem modelini geliştirmek amacıyla üzerine bir sarkaç daha eklemiş ve sistemin serbestlik derecesini artırmıştır. Sistemin hareket kontrolünün gerçekleştirildiği çalışmalarda genellikle düz bir yol profili seçilirken; Huei ve Hashimoto (2012) çalışmalarında robotun basamaklı bir profilde hareket kontrolünü, Jian-Xin ve ark. (2014) robotun eğimli bir yüzeyde hareket kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Yang ve ark. 2014 yılında, sistemin hareket ve denge kontrolü için Yapay Sinir Ağı (Neural Network) tabanlı kontrolcü gelişirmişlerdir.

Jamil ve ark. (2014) sistemin kinematik modelini geliştirmeye yönelik; Cong ve ark. (2013) sistemin matematiksel modelindeki hataları azaltmaya yönelik çalışmalarıyla sistemin denge kontrolünü iyileştirmeyi hedeflemişlerdir.

Bu tez kapsamında incelenen iki tekerlekli robotik sistemlerin Bulanık Mantık kontrolü, yörünge takibi ve optimizasyon uygulamaları ile ilgili literatürdeki öne çıkan çalışmalar kısaca şöyledir:

İki tekerlekli robotik sistemler için Bulanık Mantık Kontrolcü (Fuzzy Logic Controller) uygulamaları arasında; Tirmant (2002), Saifizul (2006), Hladek (2007), Wu Wei (2010), Junfeng Wu (2011), Chia-Hong Chen (2011), Qian Hao (2011) çalışmaları literatürde öne çıkmaktadır.

Shi (2004), iki tekerlekli robot üzerinde akıllı bir bulanık kontrol tekniği uygulamıştır. Maravall (2005), sarkacın başlangıçta kararsız noktada dengede olduğu ters sarkaç sistemine PD ve Bulanık Mantık Kontrolcülerini içeren hibrit (melez) bir kontrol sistemi tasarlamıştır. Bu çalışmayı Saifizul (2006) geliştirerek Matlab/ANFİS ortamında yapay sinir tabanlı yeni bir bulanık mantık kontrolcü tasarlayarak sarkacın kararlı denge noktasından kararsız denge noktasına yükselmesini ve bu noktada kontrolünü sağlamıştır.

Hladek (2007), futbol oynayan robot için bulanık tabanlı uzman bir sistem tasarlamış ve uygulamıştır. Astudillo (2006), mobil robot için tork ve hareket kontrolünü de içeren bulanık mantık tabanlı bir yörünge takip kontrolcüsü geliştirmiştir.

Yan-Hou ve ark. (2013) iki tekerlekli bir aracın denge kontrolü için ayrı ayrı Bulanık Mantık Tabanlı kontrolcü ve PID kontrolcü tasarlayarak, kontrolcülerin birbirlerine göre performanslarını değerlendirmişleridir.

İki tekerlekli robotik sistemler üzerine yapılan bulanık mantık çalışmalarında, tüm durum değişkenleri sadece bulanık mantık kontrolcü ile kontrol edilmemiştir. Junfeng Wu ve Wanying Zhang (2011) yaptığı çalışmada sistemin Newton metoduyla hareket denklemlerini elde ederek, sistemin kontrolü için Fuzzy-PID kontrolcü tasarlamışlardır. Sistemin konum kontrolü için bulanık kontrolcü, denge kontrolü için ise PID kontrolcü tasarlayarak, uygulamışlardır. 2012 yılındaki çalışmalarında ise Fuzzy-PD kontrolcü tasarımı gerçekleştirerek, bu tür sistemler için bulanık mantık tabanlı kontrol uygulamaların araştırmaya değer olduğunu belirtmişlerdir.

Pelter (2012) tez çalışmasında, iki tekerlekli robotik bir sistemin dinamik parametrelerini ve matematiksel modelini geniş kapsamlı incelemiştir. Sistemin denge kontrolünün yanı sıra, yörünge takip kontrolünü de gerçekleştirmiştir.

Xiaogang ve ark. (2012) çalışmalarında, sistemin kinematik parametrelerini gerçek zamanlı ölçülen konum hata değerine göre kalibre ederek, yörünge takip kontrolü gerçekleştirmişlerdir.

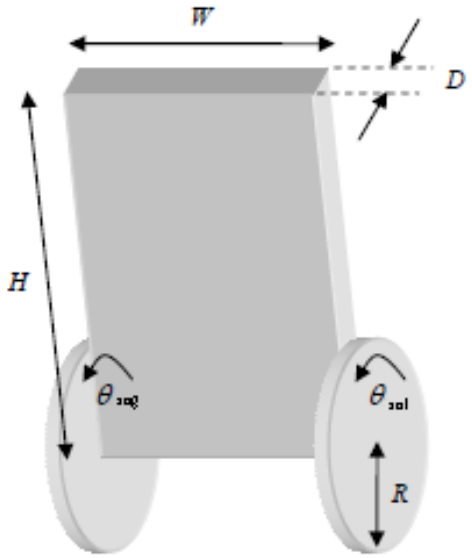
Goher ve Tokhi (2010) 'nin iki tekerlekli robotik bir sistemin kontrolü üzerine genetik algoritma tabanlı optimizasyon çalışması bulunmaktadır. 2011 yılındaki çalışmalarında ise sistemin konum ve denge kontrolünü için PD ve Bulanık Mantık kontrolcüleri uygulamışlardır. PD ve Bulanık Mantık kontrolcülerinin performanslarını karşılaştırmışlardır.

Literatürde, İki tekerlekli robotik sistemler üzerine Bulanık Mantık Kontrolcü tabanlı çalışmaların yaygınlaştığını ancak yörünge takibi çalışmalarının ve özellikle sürü tabanlı optimizasyon uygulamalarının oldukça az ve güncel bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

3. İKİ TEKERLEKLİ ROBOTİK SİSTEM (2TRS)

3.1. Fiziksel ve Matematiksel Modeli

İki tekerlekli robotik sistem modeli Şekil 3.1. 'de görülmektedir. Sistemin fiziksel boyutları ve DC motor parametreleri Tablo 3.1. 'de verilmiştir.

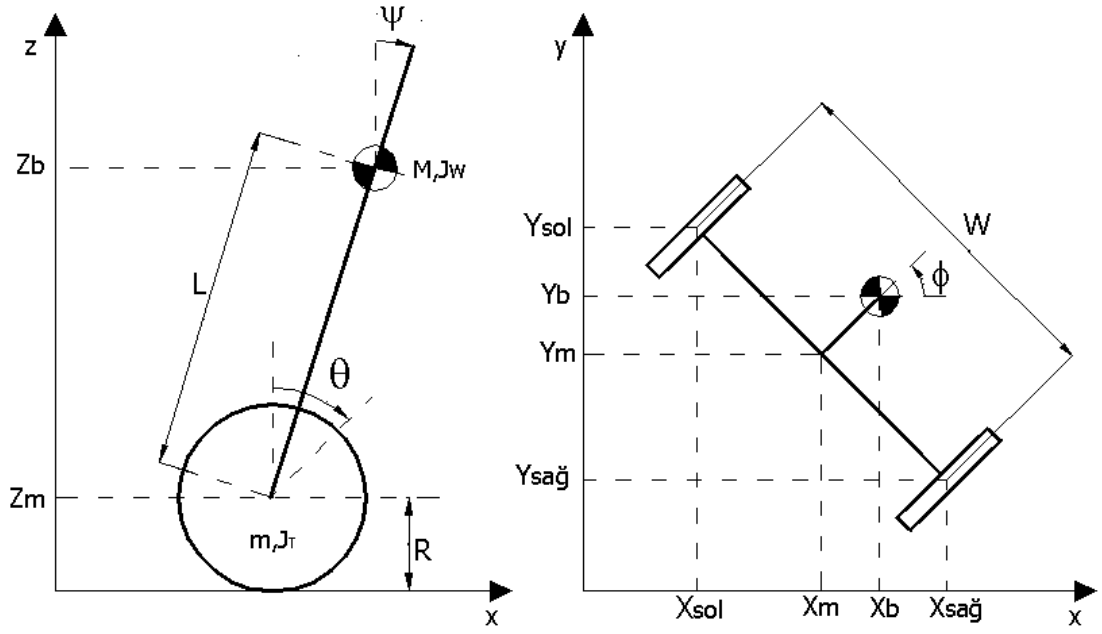


Şekil 3.1. İki tekerlekli robotik sistem (2TRS)

Tablo 3.1 Sisteme ait parametreler

Sembolü - değeri	**Açıklama - birimi**
g = 9.81	Yer Çekimi Sabiti [m / sn ^{2}]
m = 0.03	Tekerlek Ağırlığı [kg]
R = 0.045	Tekerlek Yarı Çapı [m]
$J_T = mR^2/2$	Tekerlek Atalet Momenti [kgm^2]
M = 1.6	Toplam Ağırlık [kg]
W = 0.18	Model Genişlik [m]
D = 0.1	Model Derinlik [m]
H =0.3	Model Boy [m]
L = H/2	Teker ile Gövde Merkezi Arasındaki Mesafe [m]
$J_\psi = ML^2/3$	Yunuslama Atalet Momenti [kgm^2]
$J_\phi = MW^2 + D^2)/12$	Dairesel Hareket Atalet Momenti [kgm^2]
$J_m = 48.10^{-5}$	DC Motor Atalet Momenti [kgm^2]
$R_m = 9$	DC Motor Direnci [ohm]
$K_b = 0.32$	DC Motor EMF sabiti [V.sn / rad]
$K_t = 0.646$	DC Motor Tork Sabiti [Nm/A]
n=29	DC Motor Çevrim Oranı
$f_m = 0.0025$	Gövde ile DC motor Arasındaki Sürtünme Katsayısı
$f_w = 0.001$	Tekerlek ile Zemin Arasındaki Sürtünme Katsayısı

Sistemin yandan ve üstten görünüşü Şekil 3.2. ’de ki koordinat sisteminde belirtilmiştir Sistem doğrusal hareket ve sağa/sola dönüş hareketi yapabilmektedir.



Şekil 3.2. Sistemin yandan ve üstten görünümü

Şekil 3.2.’de görülen koordinat sisteminde;

θ **(theta)** **;** Sol ve sağ teker açılarının ortalaması,
ψ **(psi)** **;** Sistemin denge (yunuslama/sarkaç) açısı (pitch),
ϕ **(phi)** **;** Sistemin sağa/sola dönüş açısı (yaw) ‘dır.

Sistemin hareket denklemlerinde kullanılan değişkenler ve koordinatlar şöyledir;

$$(\theta, \phi) = \left[\frac{1}{2}(\theta_{sol} + \theta_{sağ}),\ \frac{R}{W}(\theta_{sol} - \theta_{sağ}) \right] \tag{3.1}$$

$$(x_m, y_m, z_m) = \left[\int \dot{x_m}\, dt,\ \int \dot{y_m}\, dt,\ R \right] \tag{3.2}$$

$$(\dot{x_m},\ \dot{y_m}) = (R\dot{\theta}\cos\phi, R\dot{\theta}\sin\phi) \tag{3.3}$$

$$(x_{sol}, y_{sol}, z_{sol}) = \left[x_m - \frac{W}{2}\sin\phi,\ y_m + \frac{W}{2}\cos\phi,\ z_m \right] \tag{3.4}$$

$$(x_{sağ}, y_{sağ}, z_{sağ}) = \left[x_m + \frac{W}{2}\sin\phi,\ y_m - \frac{W}{2}\cos\phi,\ z_m \right] \tag{3.5}$$

$$(x_b, y_b, z_b) = \left[x_m + L\sin\psi\cos\phi,\ y_m + L\cos\psi\sin\phi,\ z_m + L\cos\psi \right] \tag{3.6}$$

Sistemin hareket denklemleri Lagrange Metodu kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Sisteme ait kinetik enerjiler (3.7), (3.8) ve potansiyel enerjisi (3.9);

$$T_1 = \frac{1}{2}m\left[(\dot{x}_{sol})^2 + (\dot{y}_{sol})^2 + (\dot{z}_{sol})^2\right] + \frac{1}{2}m\left[(\dot{x}_{sağ})^2 + (\dot{y}_{sağ})^2 + (\dot{z}_{sağ})^2\right] + \frac{1}{2}m\left[(\dot{x}_b)^2 + (\dot{y}_b)^2 + (\dot{z}_b)^2\right] \tag{3.7}$$

$$T_2 = \frac{1}{2}J_{teker}(\dot{\theta}_{sol})^2 + \frac{1}{2}J_T(\dot{\theta}_{sağ})^2 + \frac{1}{2}J_\psi(\dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}J_\phi(\dot{\phi})^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_{sol}-\dot{\psi})^2 + \frac{1}{2}n^2J_m(\dot{\theta}_{sag}-\dot{\psi})^2 \tag{3.8}$$

$$U = mgz_{sol} + mgz_{sağ} + mgz_b \tag{3.9}$$

şeklinde yazılır. Burada ,

T1 **;** Sistemin doğrusal hareket kinetik enerjisi,

T2 **;** Sistemin dairesel hareket kinetik enerjisi,

U **;** Sistemin potansiyel enerjisidir.

Lagrangian (L),

$$L = T_1 + T_2 - U \tag{3.10}$$

şeklinde olur. Lagrange denklemleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_\theta \tag{3.11}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} = F_\psi \tag{3.12}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = F_\phi \tag{3.13}$$

Lagrange denklemlerinin çözülüp, düzenlenmesi ile sistemin genel hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_\theta = \left[(2m+M)R^2 + 2J_T + 2n^2J_m\right]\ddot{\theta} + (MLR\cos\psi - 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MLR^2(\dot{\psi})^2\sin\psi \tag{3.14}$$

$$F_\psi = (MLR\cos\psi - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MgL\sin\psi - ML^2(\dot{\phi})^2\sin\psi\cos\psi \tag{3.15}$$

$$F_\phi = \left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_T + n^2J_m) + (ML^2\sin^2\psi)\right]\ddot{\phi} + 2ML^2\dot{\psi}\dot{\phi}\sin\psi\cos\psi \tag{3.16}$$

DC motor torku ve sürtünmeler göz önüne alınarak sistemin genelleştirilmiş kuvvetleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$(F_\theta, F_\psi, F_\phi) = \left(F_{sol} + F_{sağ}, F_\psi, \frac{W}{2R}(F_{sol} - F_{sağ})\right) \tag{3.17}$$

$$F_{sol} = nK_t i_{sol} + f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sol}) - f_w\dot{\theta}_{sol} \tag{3.18}$$

$$F_{sağ} = nK_t i_{sağ} + f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sağ}) - f_w\dot{\theta}_{sağ} \tag{3.19}$$

$$F_\psi = -nK_t i_{sol} - nK_t i_{sağ} + f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sol}) - f_m(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sağ}) \tag{3.20}$$

Burada $i_{sağ/sol}$ DC motor akımıdır. Sistemde voltaj kontrolü yapabilmek için, DC motor denklemlerini kullanarak voltaj ile akım arasında bir bağıntı bulunmalıdır. Motor içi sürtünmeler ihmal edilirse DC motor denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$L_m i_{sol,sağ} = v_{sol,sağ} + K_b(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sol,sağ}) - R_m i_{sol,sağ} \tag{3.21}$$

Motor endüktansı ihmal edilerek, yaklaşık sıfır alındığında akım ile voltaj arasındaki ilişkiyi veren denklem (3.22)' deki gibidir.

$$i_{sol,sağ} = \frac{v_{sol,sağ} + K_b(\dot{\psi} - \dot{\theta}_{sol,sağ})}{R_m} \tag{3.22}$$

(3.17)'de verilen genelleştirilmiş kuvvetler, denklem (3.22)' ye göre motor voltajına bağlı olarak aşağıdaki gibi tekrar düzenlenmiştir.

$$F_\theta = \alpha(v_{sol} + v_{sağ}) - 2(\beta + f_w)\dot{\theta} + 2\beta\dot{\psi} \tag{3.23}$$

$$F_\psi = -\alpha(v_{sol} + v_{sağ}) + 2\beta\dot{\theta} - 2\beta\dot{\psi} \tag{3.24}$$

$$F_\phi = \frac{W}{2R}\alpha(v_{sol} - v_{sağ}) - \frac{W^2}{2R^2}(\beta + f_w)\dot{\phi} \tag{3.25}$$

$$\alpha = \frac{nK_t}{R_m}, \qquad \beta = \frac{nK_tK_b}{R_m} + f_m \tag{3.26}$$

3.2. Durum Uzay Modeli

Sistem hareket denklemleri doğrusal hale getirilerek, standart durum uzay modeli formunda düzenlenmesi sistemin kontrolü için gereklidir. Bu sebeple, $\psi \cong 0$ kabul edilirse $\sin\psi \cong \psi$, $\cos\psi \cong 1$, $\dot{\psi} \cong 0$, $\left(\dot{\psi}\right)^2 \cong 0$, olur. Denklemler düzenlenip tekrar yazılırsa doğrusal hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$F_\theta = \left[(2m + M)R^2 + 2J_T + 2n^2J_m\right]\ddot{\theta} + (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\psi} \tag{3.27}$$

$$F_\psi = (MLR - 2n^2J_m)\ddot{\theta} + (ML^2 + J_\psi + 2n^2J_m)\ddot{\psi} - MgL\psi \tag{3.28}$$

$$F_\phi = \left[\frac{1}{2}mW^2 + J_\phi + \frac{W^2}{2R^2}(J_T + n^2J_m)\right]\ddot{\phi} \tag{3.29}$$

θ ve ψ değişkenlerini içeren (3.27) ve (3.28) numaralı doğrusal hareket denklemleri matris formunda (3.30) denklemde görüldüğü gibi tekrar düzenlenmiştir.

$$E\begin{bmatrix}\ddot{\theta}\\ \ddot{\psi}\end{bmatrix}+F\begin{bmatrix}\dot{\theta}\\ \dot{\psi}\end{bmatrix}+G\begin{bmatrix}\theta\\ \psi\end{bmatrix}=H\begin{bmatrix}v_{sol}\\ v_{sağ}\end{bmatrix} \tag{3.30}$$

(3.30) numaralı denklemde; E, F, G matrisleri şöyledir,

$$E=\begin{bmatrix}(2m+M)R^2+2J_T+2n^2J_m & MLR-2n^2J_m\\ MLR-2n^2J_m & ML^2+J_\psi+2n^2J_m\end{bmatrix}$$

$$F=\begin{bmatrix}\beta+f_w & -\beta\\ -\beta & \beta\end{bmatrix}\quad G=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -MgL\end{bmatrix}\quad H=\begin{bmatrix}\alpha & \alpha\\ -\alpha & -\alpha\end{bmatrix} \tag{3.31}$$

Benzer şekilde, ϕ değişkenini içeren (3.29) numaralı denklem tekrar düzenlenirse,

$$I\ddot{\phi}+J\dot{\phi}=K(v_{sağ}-v_{sol}) \tag{3.32}$$

şeklinde olur. Buradaki I, J, K ifadeleri aşağıdaki gibidir;

$$I=\frac{1}{2}mW^2+J_\phi+\frac{W^2}{2R^2}(J_T+n^2J_m)$$
$$J=\frac{W^2}{2R^2}(\beta+f_w)\quad K=\frac{W}{2R}\alpha \tag{3.33}$$

Sistem, **'x_1'** ve **'x_2'** olmak üzere iki tane durum değişkeni matrisi ve bir giriş matrisi **'u'** olarak ifade edilmiştir.

$$x_1=\begin{bmatrix}\theta & \psi & \dot{\theta} & \dot{\psi}\end{bmatrix}^T \tag{3.34}$$

$$x_2=\begin{bmatrix}\phi & \dot{\phi}\end{bmatrix}^T \tag{3.35}$$

$$u=\begin{bmatrix}v_{sol} & v_{sağ}\end{bmatrix}^T \tag{3.36}$$

İki tekerlekli robotik sistemin, bir doğru boyunca hareketini ifade eden durum uzay modeli (3.37) ve dairesel hareketini ifade eden durum uzay modeli (3.38) aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + B_1 u$$
$$y_1 = C_1 x_1 + D_1 u \tag{3.37}$$

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + B_2 u$$
$$y_2 = C_2 x_2 + D_2 u \tag{3.38}$$

Yukardaki durum uzay modellerinin A_1, B_1, A_2, B_2 ve C_1, D_1, C_2, D_2 matrisleri aşağıdaki gibidir;

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & A_1(3,2) & A_1(3,3) & A_1(3,4) \\ 0 & A_1(4,2) & A_1(4,3) & A_1(4,4) \end{bmatrix} \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ B_1(3) & B_1(3) \\ B_1(4) & B_1(4) \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{J}{I} \end{bmatrix} \qquad B_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{K}{I} & \frac{K}{I} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} A_1(4,2) &= gMLE(1,1)/\det(E) \\ A_1(3,3) &= -2\left[(\beta + f_w)E(2,2) + \beta E(1,2)\right]/\det(E) \\ A_1(4,3) &= 2\left[(\beta + f_w)E(1,2) + \beta E(1,1)\right]/\det(E) \\ A_1(3,4) &= 2\beta\left[E(2,2) + E(1,2)\right]/\det(E) \\ A_1(4,4) &= -2\beta\left[E(1,1) + E(1,2)\right]/\det(E) \\ B_1(3) &= \alpha\left[E(2,2) + E(1,2)\right]/\det(E) \\ B_1(4) &= -\alpha\left[E(2,2) + E(1,2)\right]/\det(E) \\ \det(E) &= E(1,1)E(2,2) - E(1,2)^2 \end{aligned} \tag{3.39}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

4. LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) KONTROL

İkinci Dereceden Doğrusal Düzenleyici, Lineer Quadratic Regulator (LQR) en uygun kontrol girdisini hesaplamak için performans indeksi ve durum değişkenlerini kullanarak yapılan hesaplamalarla tasarlanan bir kontrol yöntemidir. Hesaplamalar yapılmadan önce sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olduğundan emin olunmalıdır (Anderson, 1898).

Bir optimal kontrol problemi, performans kriteri veya amaç fonksiyonunu en aza indiren optimum bir kontrolün bulunmasıdır. LQR kontrol, optimal kontrol sistemleri olarak sınıflandırılmış tasarımlardır Tasarımın amacı istenilen çalışma performansını sağlayacak pratik bileşenler ile bir sistemi gerçekleştirmektir. İstenilen performans zaman alanı, performans indisleri açısından ifade edilebilir. Örneğin, bir basamak giriş için maksimum aşım ve yükselme zamanı, zaman alanı indisleridir (Oral, 2010).

LQR, $\dot{x} = Ax + Bu$ şeklinde ifade edilen bir sisteme $u = Fx$ formunda, durum geri beslemeli denetimi amacı ile tasarlanır. "F" in değeri geçici durum cevabı ile denetim başarısı arasındaki dengeyi kurmaya dayanır. Optimal Kontrol yaklaşımında bu denge durumu performans indeksi veya amaç fonksiyonu ile tanımlanır ve bu indeksi minimize edecek $u = Fx$ aranır. Performans indeksinin genel hali,

$$J = \int_0^\infty \left[x^T(t)\, Qx(t) + u^T(t)\, Ru(t) \right] dt$$

şeklindedir.

Burada, **Q** simetrik, yarı kesin pozitif ve **R** simetrik, kesin pozitif matrislerdir. Performans indeksi **J**'yi minimize edecek $u_{(t)} = Fx_{(t)}$ 'nin bulunması için sistem koşullarının ve J'nin durumlarının net ifade edilmesi ayrıca düzenleyicisi tasarlanan sistemin kontrol edilebilir ve gözlemlenebilir olması gereklidir. Q ve R pozitif, reel ve hermisyen matrislerdir. R matrisi Q 'dan daha büyük seçilirse, sistem küçük bir eforla durum vektörü sıfıra yaklaşır fakat sistemin cevap suresi uzar. Eğer R matrisi Q 'dan küçük olursa, sistem daha büyük bir efor harcayarak, daha hızlı cevaba ulaşacaktır. İşte bu iki durum arasında denge LQR tasarımındaki esastır. Öte yandan, R ve Q değerleri büyüdükçe hata azalır ve sistem hızlanır (Anderson-1898).

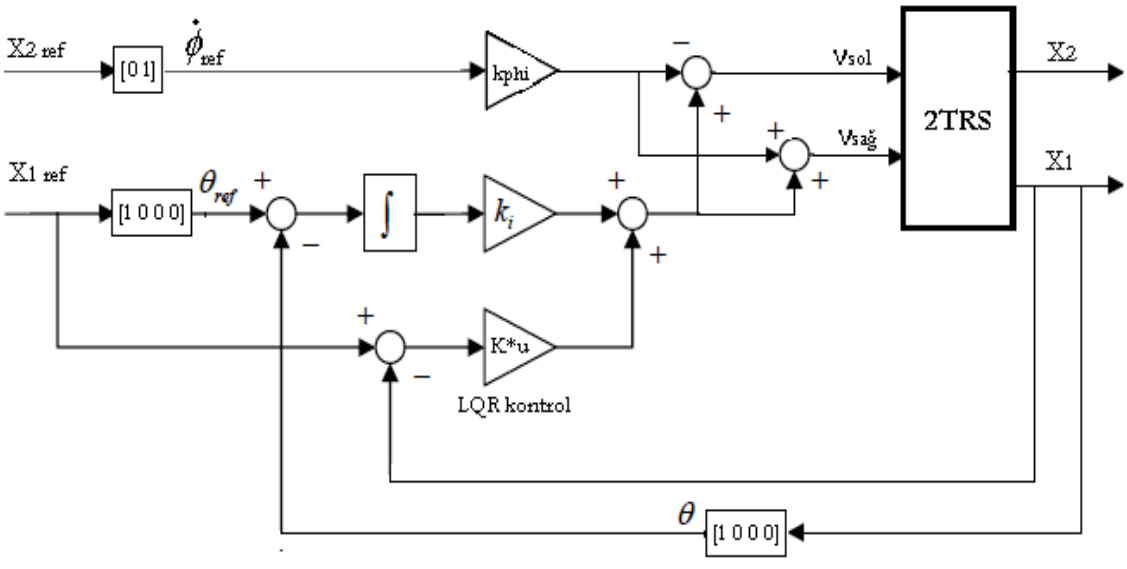
4.1. LQR Kontrolcü Tasarımı

İki tekerlekli robotik sistemin kontrol performans kriteri; kendi kendini dengede tutarak, referans girişlerle (θ , $\dot{\phi}$) belirlenen bir yörüngede hareket edebilmesidir.

LQR kontrolcü, birden fazla durum değişkenin birbirlerine göre kontrolcü çıkışındaki ağırlıklarının, sistemin cevabına göre ayarlanabildiği optimum bir kontrolcüdür. Bu sebeple birden fazla durum değişkeni olan, iki tekerlekli bir robot gibi çok serbestlik dereceli sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, **Y.Yamamoto**' un 2008 yılında ticari bir ürün olan LEGO Mindstorms NXT isimli iki tekerlekli bir robotun kontrolü için tasarladığı LQR kontrolcü referans alınarak robotun denge kontrolünü iyileştirmeye yönelik Arı Algoritması Optimizasyonu ile yeni kontrolcüler tasarlanmıştır.

Şekil 4.1. 'de verilen LQR kontrol blok şemasında görüleceği gibi; sistemin doğrusal hareket ve denge kontrolünü sağlayan LQR kontrol kazancı (K*u)' ya ilave θ 'ın integral kazancı (k_i) eklenerek, çıkış sol ve sağ motora voltaj değeri olarak pozitif yönlü verilmiştir. Sistemin dairesel (sola/sağa dönüş) hareket kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla x_2 durum değişkenlerinden $\dot{\phi}$ (dairesel hareket hızı) oransal bir kazançla (k_phi) çarpılarak; sol motora negatif, sağ motora pozitif voltaj değeri olarak verilmiştir. Böylece sistemin doğrusal hareket ve denge kontrolünün yanı sıra dairesel hareket kontrolü de sağlanmaktadır.



Şekil 4.1. 2TRS 'in LQR kontrol blok şeması

Sistemin denge kontrolü ve doğrusal hareket kontrolü birbirine bağımlı (x_1), dairesel hareket kontrolü (x_2) ise bunlardan bağımsız olarak tasarlandı. LQR kontrolcü tasarımında robotun dengesi (ψ ve türevi) öncelikli göz önüne alındı. Bu sebeple, doğrusal hareket kontrolü iyileştirmek için θ 'ın integral kazancı (k_i) eklendi. k_i integral kazanç sabiti Q ağırlık matrisinin bir bileşeni olarak hesaplanırken, k_phi kazanç sabiti deneme/yanılma yöntemiyle, sistemin benzetim sonuçları değerlendirilerek belirlendi. Daha iyi bir kontrolcü tasarımına yönelik olarak bu kazançların optimize edilmesi sistem cevabında olumlu etki yapacaktır.

LQR kontrolcü tasarımında Q ve R matrisleri, kontrolcü çıkış değişkenlerinin ağırlıklarına göre belirlenir. Yamamoto (2008)'un LEGO Mindstorms NXT isimli iki tekerlekli bir robotun kontrolü için tasarladığı LQR kontrolcüde, belirlediği Q ve R matrisleri aşağıda verilmiştir.

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6x10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4x10^2 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

$$R = \begin{bmatrix} 10^3 & 0 \\ 0 & 10^3 \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

A_Bar = [A1, zeros(4, 1); C1(1, :), 0];
B_Bar = [B1; 0, 0];

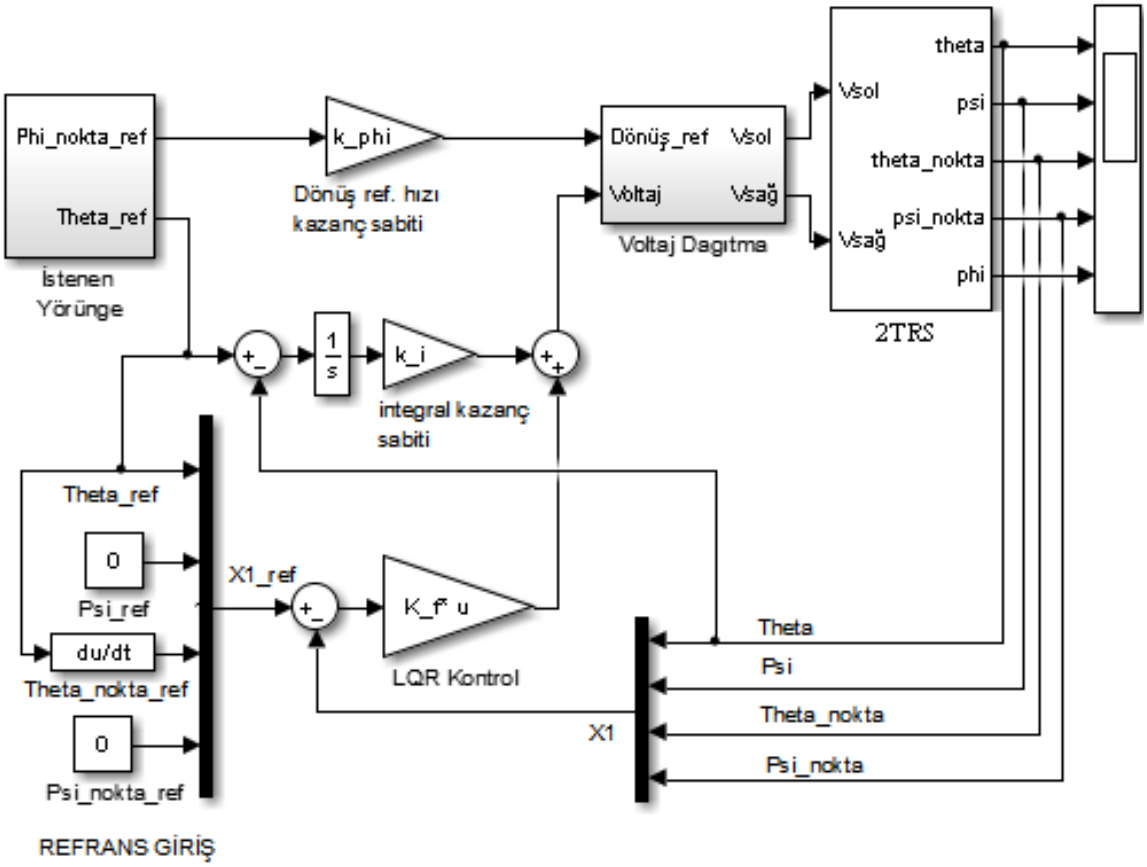
KK kazanç matrisi;

KK = lqr (A_Bar, B_Bar, QQ, RR) şeklinde hesaplanarak,

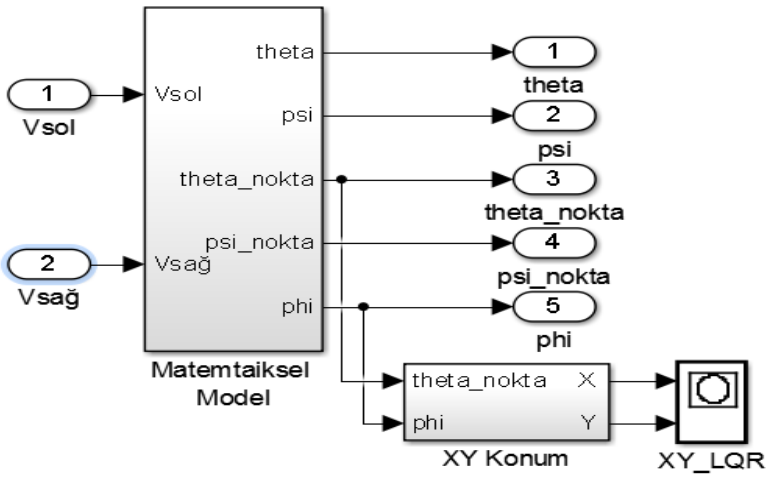
K_f = KK(1, 1:4) = [-0.918, -109.425, -1.171, -17.941],
k_i = KK(1, 5) = [- 0.4472] olarak bulundu.
k_phi = [0.645] olarak deneme-yanılma yöntemiyle belirlendi.

4.2. LQR Kontrol Sisteminin MATLAB/Simulink ile Modellenmesi

Sistemin simülasyonu için önceki bölümlerde elde edilen matematiksel ifadeleri, Matlab' ın Simulink ara birimine aktarılarak Şekil 4.2.'de görülen kontrol sistemi oluşturulmuştur. Kontrol sisteminin bölümleri aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.

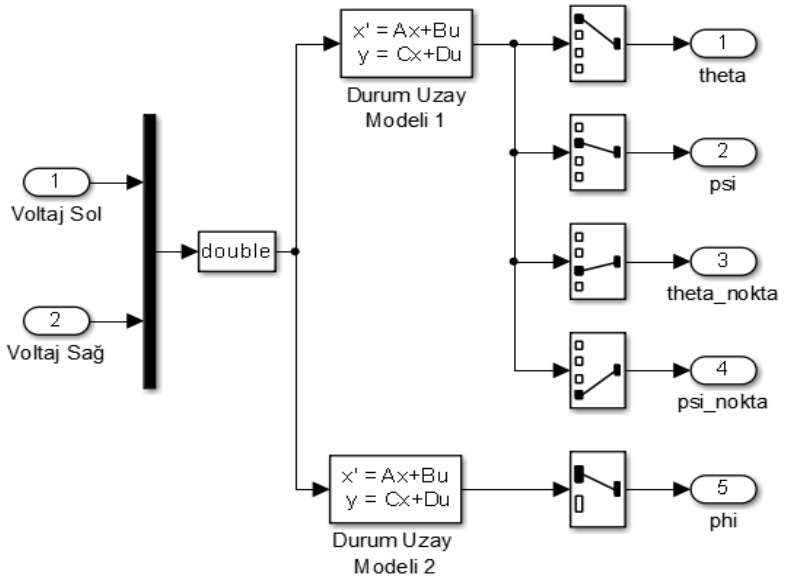


Şekil 4.2. LQR kontrol simulink modeli



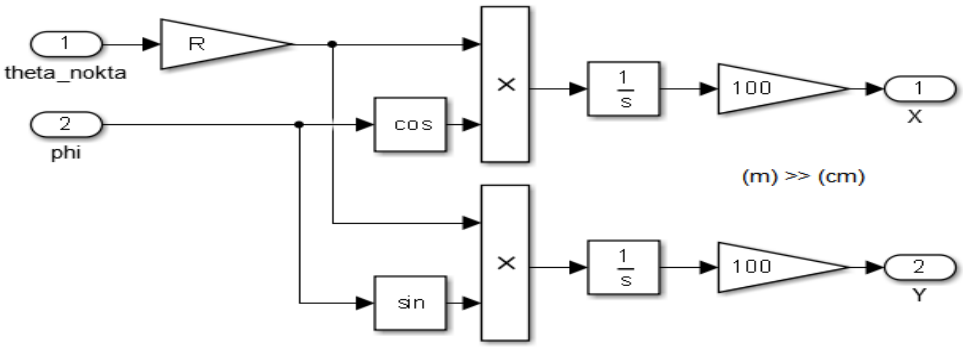
Şekil 4.3. 2TRS bloğu

Şekil 4.3. de verilen ‘2TRS bloğu’ sistemin ‘Matematiksel Model’ bloğunu ve sistemin x-y düzleminde konumunun hesaplandığı ‘XY Konum’ bloğunu içermektedir. Bölüm 3.2. de elde edilen sistemin durum uzay modelleri (x_1 ve x_2) simulink bloğu formumda ‘Matematiksel Model’ bloğunda Şekil 4.4. ‘deki gibi ifade edilmiştir. Burada; giriş $[u]$ sol ve sağ motor voltajı, çıkışların ise birinci durum uzay modelinden $\left[\theta\ \psi\ \dot{\theta}\ \dot{\psi}\right]$ ve ikinci durum uzay modelinden $[\phi]$ olduğu görülmektedir.



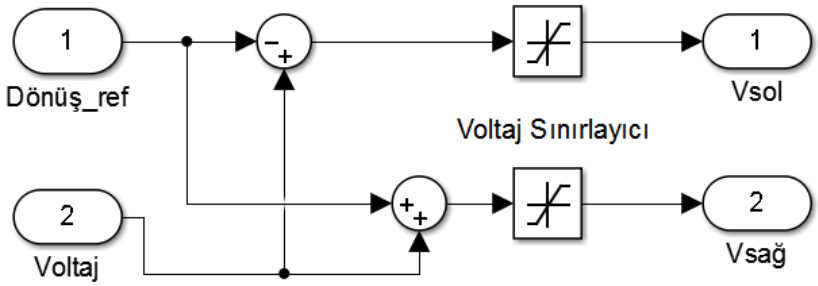
Şekil 4.4. Matematiksel model bloğu

‘XY Konum’ bloğunda ise $\dot{\theta}$ ve ϕ değişkenleri ile sistemin x-y düzlemindeki konumunu veren (3.3) numaralı denklem simulink blokları ile ifade edilerek sistemin x ve y deki konumu hesaplanmıştır (Şekil 4.5.).



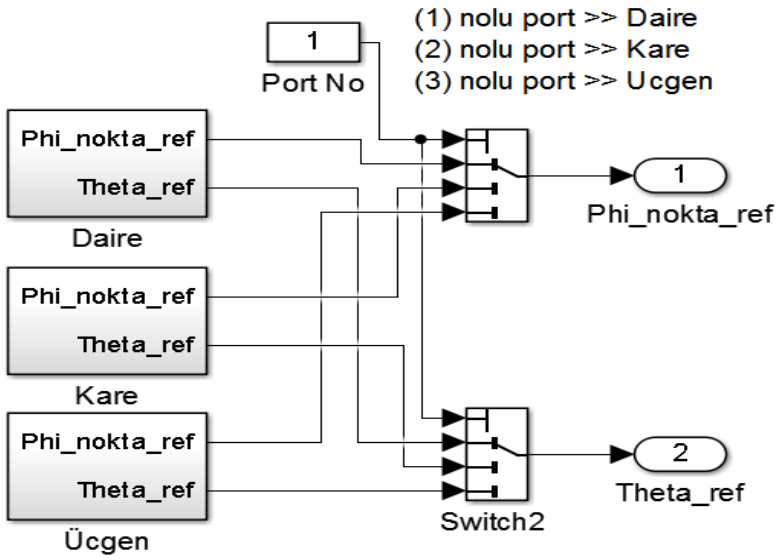
Şekil 4.5. XY konum bloğu

'Voltaj Dağıtma' bloğu sistemin dairesel (sola/sağa dönüş) hareketini düzenlemektedir. Kontrolcüden gelen voltaj değeri her iki motora da pozitif yönlü, dönüş referans girişi ($\dot{\phi}$) sol motora negatif, sağ motora pozitif yönlü verilerek, sistemin dairesel hareketini gerçekleşir. Sol/sağ motor voltajı, sınırlayıcı blok ile sınırlandırılmıştır (max.12V,min-12V). Dairesel hareketin kontrolü ise dönüş referans. hız kazanç sabiti (k_phi) ile açık çevrim olarak sağlanmıştır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Voltaj dağıtma bloğu

'İstenen yörünge' bloğunda sistemin daire, kare ve üçgen şeklinde bir yörüngede hareket etmesi için gerekli $\dot{\phi}$ ve θ değerleri hesaplanıp referans giriş olarak girilmekte ve sistemin bu yörüngelere uygun hareket etmesi hedeflenmektedir. Burada birebir yörüngeyi takibi şekilde bir konum kontrolü yapılmamaktadır. Aşağıda görüldüğü gibi port numarası ile yörünge seçimi yapılabilmektedir (Şekil 4.7.).



Şekil 4.7. İstenen yörünge bloğu

5. BULANIK MANTIK VE KONTROLÜ

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Prof. Lotfi A.Zadeh 'in bu konu üzerinde ilk makalelerini yayınlamasıyla duyuldu. Bulanık Mantığın denetim sistemlerine uygulanması ilki Mamdani ve ark. (1974) tarafından gerçekleştirilmiş ve daha sonra bu alanda olukça önemli adımlar atılmaya başlanmıştır. Önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş katı bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi istatistikte ve olasılık kuramında, belirsizliklerle değil kesinliklerle çalışılır ama insanın yaşadığı ortam daha çok belirsizliklerle doludur. Bu yüzden insanoğlunun sonuç çıkarabilme yeteneğini anlayabilmek için belirsizliklerle çalışmak gereklidir (Altaş,1999).

İsminin insanlarda çağrıştırdığının aksine bulanık mantık belirsiz ifadelerle yapılan, belirsiz işlemler değildir. Gelişmiş bir olasılık hesaplama yöntemi de değildir. Aslında, modelleme aşamasında değişkenler ve kuralların esnek belirlenmesidir. Bu esneklik asla rastgelelik ya da belirsizlik içermez. Bir lastiğin içinde bulunduğu duruma göre şeklini değiştirirken bütünlüğünü ve yapısını koruyabildiği gibi, bir bulanık mantık modeli de değişen koşullara değişen cevaplar verirken özündeki yapıyı muhafaza eder.

Bilgi tabanlı sistemler (Knowledge Based Systems) günümüz karmaşık sistemlerinin denetlenmesinde de önemlerini arttırmışlardır. Matematiksel modellerin çıkartılmasını gerektirmeyen bilgi tabanlı sistemler bu özellikleri sebebiyle birçok farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Bulanık mantık ise sayısal değerlerin sözsel ifadelerinden yola çıkarak bilgi tabanlı denetleyiciler arasında insan düşünce yapısına yakınlaşmayı sağlamıştır. Bu tür sistemler tek başlarına kullanılabildikleri gibi diğer modern veya klasik sistemlerle de kullanılabilmektedir.

Bulanık Mantık insanların her gün kullandığı ve davranışlarının yorumlandığı yapıya ulaşılmasını sağlayan matematiksel bir disiplindir. İnsanlar günlük hayatta; tam olarak tanımlanmamış ve nümerik olmayan dilsel niteleyiciler (soğuk, hafif soğuk, ılık, sıcak, çok sıcak vb. gibi) kullanarak kararlar verir ve problemlerini çözerler.

Bulanık Mantık Temeli, *Bulanık Küme Kuramı*'na dayanır (Zadeh,1965). *Geleneksel mantık* sistemi yalnızca 1 ve 0 üzerine kuruludur. Doğru veya yanlış vardır. Bu ikisinin arası yoktur. Belirsiz bir problemin çözümü güçtür. Bulanık Mantık sisteminde de 1 ve 0 değerlerinin yanı sıra 0 ile 1 arasındaki değerler de kullanılır. Doğru ya da yanlışın ne kadar doğru ya da ne kadar yanlış olduğu belirlenebilir.

Bulanık küme kuramı

Klasik küme kuramında, bir X kümesindeki A altkümesi, kendisine ait karakteristik fonksiyonu olan χ_A ile ifade edilir. Karakteristik fonksiyon, X in elemanlarını {0,1} kümesine dönüştürür,

$$\chi_A : X \longrightarrow \{0,1\}$$

Bu dönüşüm, X in her elemanı için bir sıralı ikili kümesiyle ifade edilebilir. Bir sıralı ikililerin ilk elemanı, X in bir elemanı ve sıralı ikilinin ikinci elemanı ise {0,1} kümesinin bir elemanıdır. 'Sıfır' değeri ait olamamayı temsil ederken 'Bir' değeri ise aitliği gösterir.

"x, A nın içindedir"

şeklindeki bir önermenin doğruluğu (ya da yanlışlığı), (x, χA(x)) sıralı ikilisiyle belirlenir. Eğer sıralı ikilinin ikinci elemanı 1 ise önerme doğru, 0 ise önerme yanlıştır. Benzer şekilde, X kümesinin bir altkümesi olan A bulanık kümesi, sıralı ikililer kümesi ile ifade edilebilir. Bir sıralı ikilinin ilk elemanı, X in bir elemanı iken bu sefer ikilinin ikinci elemanı ise [0, 1] aralığında bir değerdir. Böylece, X in her elemanı bir sıralı ikili ile ifade edilmiş olur. Aslında bu, X in her elemanı ile [0, 1] aralığı arasında bir dönüşüm, μ_A, tanımlar. 'Sıfır' değeri tam olarak ait olmamayı tanımlarken, 'Bir' değeri tam üye olma anlamına gelir, diğer değerler ise ara üyelik değerlerini gösterir. A bulanık kümesi için X kümesi evrensel kümedir. μ_A dönüşümü, genellikle, A 'nın üyelik fonksiyonu olarak tanımlanır.

"x, A nın içindedir"

gibi bir önermenin doğruluk derecesi, $(x,\mu_A(x))$ sıralı ikililerinin ikinci elemanı aracılığı ile belirlenir. Burada üyelik fonksiyonu ile bulanık küme terimleri kendi aralarında değişebilecek şekilde kullanılır.

A kümesi,

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

şeklinde tanımlanır ve genellikle μ_A yerine kısaca A(x) yazılır. X={x_1, x_2, … , x_n} sonlu kümesindeki A bulanık kümesi çoğunlukla

$$A = \frac{\mu_1}{x_1} + \frac{\mu_2}{x_2} + \ldots + \frac{\mu_n}{x_n}$$

şeklinde gösterilir. Bu ifadede, A kümesinin elemanı x_i (i = 1, 2 , … , n) için üyelik derecesi değeri μ_i ile gösterilirken toplama işareti birleşimi ifade eder.

Bulanık Kümeler; Klasik Kümelerin sıfır(0) ile bir(1) değerleri arasında da değerler alabilen üyelik derecelerine sahip bir genellemesidir. Yani klasik kümelerde bir eleman, bir kümeye ya tamamen dâhildir (üyelik derecesi "bir") ya da tamamen hariçtir ("sıfır" üyelik derecesi). Ancak bulanık kümelerde bir eleman, üyelik fonksiyonlarında belirlenen derecelerle bir kümeye dâhildir. Örneğin, klasik kümelerle bir arabayı sadece pahalı arabalar kümesine yerleştirebiliriz. Ancak, bulanık kümelerle gösterildiğinde 0.8 değeriyle (ki bu değeri denetleyiciyi tasarlayan belirler) pahalı arabalar kümesine dahil iken, 0.2 değeriyle ekonomik arabalar kümesinde de tanımlanabilir. Sayılar içinse alt ve üst limit arasındaki değerler NB(Negatif Büyük), Negatif Orta(NO), Sıfır(SR), Pozitif Orta(PO) ve Pozitif Büyük(PB) gibi bulanık kümeleri kullanılmaktadır.

Kontrol Kuralları; Modellenmesi karmaşık, zor veya imkansız olan sistemlerde sözsel kurallar kullanılarak tanımlanan Bulanık Mantık Sistemlerinin (BMS) önemli bir kısmını oluştururlar. Denetlenecek sistemle ilgili bilgilerin toplandığı bir veri tablosundan ibarettir. Burada sistemle ilgili bilgiler sistem giriş ve çıkışını *'' if .... then .... else ....''* biçimine sahip koşul cümleleriyle birbirine bağlar.

Bu koşul cümlelerinin her biri bir 'kural' olarak isimlendirilir. Aşağıdaki örneği verilen kural tabanı, doğrudan denetleyicinin yerini alacak olan bir BMS için oluşturulabileceği gibi, diğer bir denetleyicinin parametrelerini kontrol eden bir yönetici BMS için de oluşturulabilir.

Eğer oda sıcaklığı "yüksek" ise ısıtıcıyı "kapat".

Eğer oda sıcaklığı "ılık" ve dışarıda hava mutedil ise ısıtıcıyı "biraz" kapat.

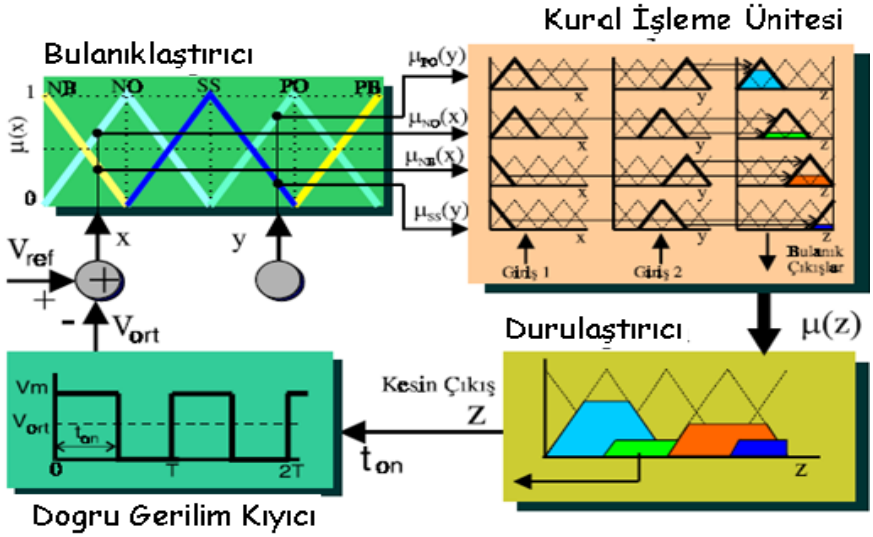
Eğer oda sıcaklığı "iyi" ise ısıtıcıyı "ayarlama".

Eğer oda sıcaklığı "düşük" ve dışarıda hava soğuk ise ısıtıcıyı "aç".

Eğer oda sıcaklığı "çok düşük" ise ısıtıcıyı "çok aç".

Bulanık Mantık Sistemlerin Genel Yapısı

BMS' lerin genel yapısı Şekil (5.1.) gösterilmiştir. Oranlama ve Bulandırma aşamalarında ölçülen veya tahmin edilen fiziksel değerler bulanık mantık kümelerine çevrilir (0.1/NB, 0.2/NO, 1.0/SR, 0.0/PO, 0.0/PB gibi). Çıkarım mekanizmasında ise kurallar dikkate alınarak sistem çıktılarının bulanık mantıkla gösterimi sağlanır. Bu kural tabanı denetleyicinin en önemli kısmıdır. Burada veri tabanını oluşturacak uzman bilginin toplanması, özellikle çok değişkenin kullanıldığı karmaşık sistemlerde oldukça zordur. Bu işlem için geliştirilen yöntemler arasında genetik algoritmalar, öğrenebilen yapay sinir ağlarını sıralanabilir.



Şekil 5.1. Bulanık mantık tabanlı bir denetçinin genel yapısı (Altaş,1999).

Kural tabanının tam, tutarlı ve en önemlisi doğru olması için karmaşık sistemlerde yardımcı yöntemlerin kullanılması kaçınılmazdır. Hangi kuralların nasıl birleştirileceği durulama aşamasında belirlenir ve son aşama olan oranlamada ise bu çıktılar fiziksel değerlere çevrilip uygun çarpanlarla oranlanır.

Bulanık mantığın avantajları; İnsan düşünme tarzına yakın olması, matematiksel modele ihtiyaç duymaması, yazılımın basit dolayısıyla ucuz olması ve eksik tanımlı problemlerin çözümü için uygun olması olarak sayılabilir.

Bulanık mantığın dezavantajları ise; Uygulamada kullanılan kuralların oluşturulmasının uzmana bağlı olması, üyelik fonksiyonlarının deneme-yanılma yolu ile bulunmasından dolayı uzun zaman alabilmesi, kararlılık analizinin zorluğu, öğrenemez/öğretilemez olmasıdır.

6. ARI ALGORİTMASI (AA)

6.1. Sezgisel Yöntemler Ve Sürü Tabanlı Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon; en iyileme anlamına gelmektedir. Bir problem için, verilen şartlar altında tüm çözümler arasından en iyi çözümü elde etme işidir. Belirli sınırlamaları sağlayacak şekilde, bilinmeyen parametre değerlerinin bulunmasını içeren herhangi bir problem, optimizasyon problemi olarak adlandırılabilmektedir (Murty, 2003).

Günümüzde karmaşık optimizasyon problemlerinin modellenmesi ve çözülmesinde doğal benzetimlerin kullanımına yönelik bir eğilim vardır. Bunun sebebi klasik optimizasyon algoritmalarının büyük boyutlu kombinatoryel, tam sayılı ve doğrusal olmayan matematiksel programların çözümünde yeterli olmamasıdır.

Klasik optimizasyon algoritmalarının çözüm stratejileri genellikle amaç fonksiyonu ve kısıtların türüne (doğrusal, doğrusal olmayan vb.) ve modellemede kullanılan değişkenlerin türüne (tamsayı, gerçek sayı vb.) bağlıdır. Bahsedilen algoritmaların verimliliği ise çözüm alanının boyutuna, modellemede kullanılan değişken ve kısıt sayısına ve çözüm alanının yapısına (konveks, konkav vb.) bağlıdır. Diğer taraftan klasik optimizasyon algoritmaları farklı tipte değişkenler, amaç fonksiyonu ve kısıtlar içeren problem formülasyonlarına uygulanabilecek genel bir çözüm stratejisi sunmamaktadır (Baykasoğlu, 2006).

Ancak birçok optimizasyon problemi aynı formülasyon içinde farklı tiplerde değişkenler, amaç fonksiyonları ve kısıtlar içermektedir. Dolayısıyla klasik optimizasyon teknikleri bu tür problemlerin çözümü için yeterli olmamaktadır. Araştırmacılar çeşitli optimizasyon problemlerini klasik optimizasyon yöntemlerine uyarlamak için oldukça çaba göstermişlerdir. Ancak bir gerçek problemi belli bir çözüm yöntemine uyacak şekilde modellemek genellikle pek kolay değildir. İşte klasik optimizasyon tekniklerinin bu yetersizliklerini aşabilmek için problemden ve modelden bağımsız olan, doğadan esinlenmiş **sezgisel optimizasyon algoritmaları** önerilmektedir. Bu teknikler hem etkin hem de daha esnek olup belirli problem gereksinimlerine göre uyarlanabilmektedir (Baykasoğlu, 2001).

Sezgisel yöntemler, klasik yöntemlerden farklı olarak her zaman kesin sonuç vermese de, kısa sürede istenilene çok yakın sonuç verebilir. Örneğin, bir topluluktaki insanların sayısını tek tek sayarak belirlemek yerine, sezgisel olarak tahmini bir değerle ifade etmek daha etkili bir çözüm sunar.

Gerçek hayattaki optimizasyon problemlerinin birçoğu matematiksel formül geliştirilerek çözülemeyecek kadar karmaşıktır. Klasik yöntemleri kullanarak böyle bir problem çözülmeye çalışıldığında, istenilen kesin sonuç elde edilir ancak optimizasyon performansı açısından bakıldığında çözüm süresi oldukça uzun olacaktır.

Probleme daha kısa sürede ve istenen sonuca daha yakın çözüm aranırken sezgisel (heuristic) yöntemler geliştirilmiş ve en iyi sonuca ulaşılmaya çalışılmıştır. Sezgisel yöntemler, bir problemi çözmek için, çeşitli çözüm hareketlerinden en iyi olanına karar vermek için tanımlanan yöntemler olarak bilinmektedir (Gülcü, 2006).

Ayrıca sezgisel yöntemlerin çözüm zamanının kısa olması ve değişik problemlere uygulanabilmesi tercih edilme nedenleri arasındadır. Ancak bu yöntemlerin çözümü garanti edememesi ve çok parametrenin uygun şekilde tasarlanmasının gerekliliği, bu yöntemlerin dezavantajı olarak nitelendirilmektedir (Özsağlam, 2009).

Hesaplama teorisinde, bazı problemlerin çözümünde kullanılan en etkili algoritmaların, çalışma süresinin girilen verinin değerine göre bir polinom cinsinden bağlı olduğu bilinmektedir. Buna polinomal (P) zamanda çalışan algoritma adı verilmektedir (Özsağlam, 2009). Eğer bir problemin çözümlenmesi zor ise (NP) olarak adlandırılmaktadır (Biroğul, 2005).

Sezgisel yöntemlerin çok çeşitli alanlardaki problemlere uyarlanabilmeleri ilgi uyandırmıştır. NP kategorisindeki problemlerin çözümünde Genetik Algoritmalar (GA) (Çivril, 2009), Tavlama Benzetimi (SA), Tabu Arama (TS), Evrimsel Hesaplama (EC), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi algoritmalar kullanılmış ve başarılı çözümler elde edilmiştir (Blum ve Sampels, 2004).

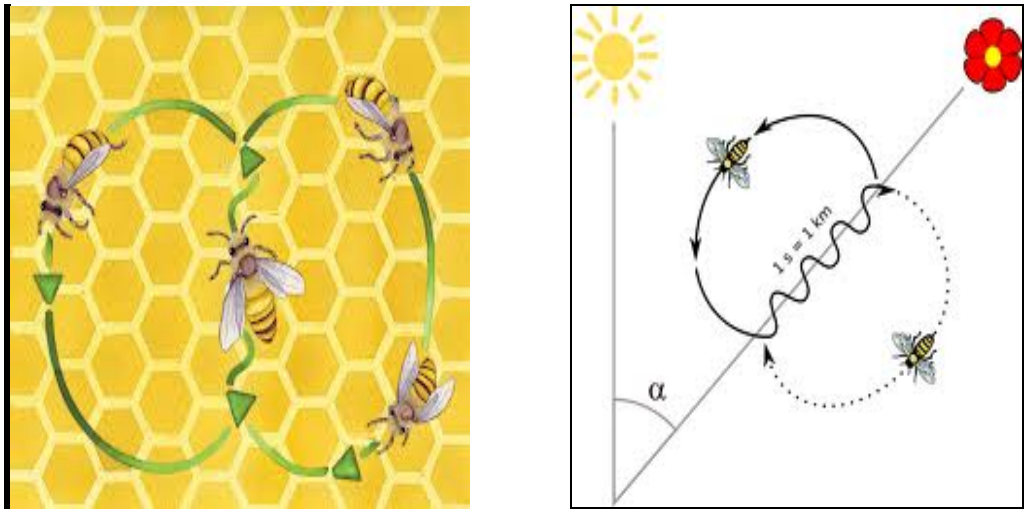
Genetik algoritmalar, doğal olaylara dayandırılarak geliştirilen algoritmalar, araştırmacıların başka doğa olaylarını da inceleyerek bunların modellenmesi hususunda ilham kaynağı olmuşlardır. Sürü halinde yaşayan varlıkların gösterdikleri zeki davranışlar bu doğa olaylarındandır. Bazen tek başlarına hiçbir iş yapamayan varlıklar, toplu hareket ettiklerinde çok zekice davranışlar sergileyebilmektedir. Bir topluluğa ait bireyler, en iyi bireyin davranışından ya da diğer bireylerin davranışlarından ve kendi deneyimlerinden yararlanarak yorum yapmakta ve bu bilgileri ileride karşılaşacakları problemlerin çözümleri için bir araç olarak kullanmaktadırlar. Örneğin, bir canlı sürüsünü oluşturan bireylerden birisi bir tehlike sezdiğinde bu tehlikeye karşı tepki verir ve bu tepki tüm bireylerin tehlikeye karşı ortak bir davranış sergilemesini sağlar. Canlıların sürü içerisindeki bu hareketleri gözlemlenerek sürü zekâsı tabanlı optimizasyon algoritmaları geliştirilmiştir (Akyol ve Alataş, 2012).

Sürü zekası tabanlı geliştirilen algoritmalara örnek olarak; Sürülerin hayatta kalma içgüdüleri ile yiyecek arama davranışlarının problemlere uyarlanması ile geliştirilen ve karıncaların yem kaynağı ile yuvası arasındaki yolu minimum seviyeye indirgeme amacına dayalı *Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO)* (Dorigo, 1991) ve Karaboğa tarafından geliştirilen, arı topluluklarının yiyecek arama davranışlarını örnek alan *Yapay Arı Kolonisi (ABC)* algoritması verilebilir (Karaboga, 2005).

6.2. Arı Algoritması (AA)

Doğadan esinlenen algoritmaların yeni bir dalı olan sürü zekâsı yaklaşımı, böceklerin içgüdüsel problem çözme becerilerini kullanan etkili meta sezgisel yöntemler geliştirebilmek için böcek davranışlarının modellenmesine odaklanmıştır.

Böcekler arasındaki etkileşimin bir sonucu olan kolektif zekânın en önemli parçalarından biri ise bireysel böcekler arasındaki bilgi paylaşımıdır. Bu tür etkileşimli davranışa örnek olarak, bal arılarının buldukları kaynağın (nektar, su vs.) kalitesi hakkındaki bilgiyi paylaştıkları, 'salınım dansı' verilebilir (Şekil 6.1.). Bu dans aracılığıyla kaliteli bir kaynağı bulan arılar, bu kaynak hakkındaki yön, uzaklık ve nektar miktarı bilgilerini diğer arılarla paylaşır. Bu başarılı mekanizma sayesinde koloni, kaliteli kaynakların olduğu bölgelere yönlendirilebilmektedir (Tapkan, 2008).



Şekil 6.1. Bal arısı salınım dansı

Baykasoğlu ve ark. (2007) tarafından da ifade edildiği gibi arı kolonisi temelli algoritmalarda temelde üç tip arı sınıfı tanımlanmaktadır:

Kâşif Arılar: Arı sistemi içerisinde tamamen bağımsız davranarak yeni kaynakları herhangi bir bilgi kullanmadan arayan arı grubudur.
Takipçi Arılar: Kaynağına ulaşmış ve kaynaktan kovana dönerek kaynağa ilişkin bilgileri (yön, uzaklık, kaynağının kalitesi vb.) diğer arılarla paylaşmak üzere salınım dansını gerçekleştiren arılardır.
İzci Arılar: Görevli arıların salınım dansını izleyerek kaynaklar hakkında bilgi edinen ve sonra bu bilgiye göre hareket ederek, bu kaynaklara ulaşan arılardır.

Arıların kaynak (nektar, su vb.) arama davranışları, öğrenme, hatırlama ve bilgi paylaşma özellikleri sürü zekâsının en ilgi çekici araştırma alanlarından birisidir. Bal arılarının davranış özellikleri temel alınarak geliştirilmiş algoritmaların bir sınıflandırması ve geniş bir yazın araştırması Baykasoğlu ve ark. (2007) tarafından yapılmıştır. Bu araştırmaya göre bal arılarının kaynak arama davranışına dayalı optimizasyon algoritmaları ile ilgili literatürdeki çalışmalar şöyledir.

Lucic ve Teodorovic (2001, 2002, 2003a) ve Lucic (2002) karmaşık ulaştırma problemlerinin çözümünde kolektif arı zekâsı uygulamalarını araştırmışlar ve önerdikleri Arı Sistemi (AS) algoritmasını gezgin satıcı problemine uygulamışlardır. Lucic (2002), Lucic ve Teodorovic (2003b) stokastik araç rotalama problemine iyi çözümler üretebilmek için AS ile bulanık mantık yaklaşımını birleştirmişlerdir. Teodorovic ve Dell'Orco (2005) AS algoritmasını genelleştirerek deterministik ve stokastik kombinatorye problemleri çözebilen Arı Koloni Optimizasyonu (AKO) algoritmasını önermişlerdir. Wedde (2004) telekomünikasyon ağında rotalama için arı davranışlarına dayalı bir rotalama protokolü sunmuştur. Chong (2006) atölye tipi çizelgeleme problemini çözmek için bal arılarının kaynak arama davranışını kullanan yeni bir yaklaşım getirmiştir. Quijano ve Passino (2007) kaynak paylaştırma problemi için bal arılarının kaynak arama davranışları üzerine kurulu bir algoritma geliştirmişlerdir. Baştürk ve Karaboğa (2006), Karaboğa ve Baştürk (2007), Yang (2005), Pham ve ark. (2006a) sürekli optimizasyon problemlerinin çözümü için farklı algoritmalar önermişlerdir.

Bu tez kapsamında incelenen Arı Algoritması (AA), ilk olarak Pham ve ark. (2006a) tarafından önerilmiş olup, bal arılarının kaynak arama davranışını taklit eden popülasyon tabanlı bir arama algoritmasıdır. AA görüntü tanıma için yapay sinir ağlarının eğitimi (Pham ve ark., 2006b, 2006c, 2006d, 2006e, 2006b-e, 2007a), üretim hücrelerinin biçimlendirilmesi (Pham ve ark., 2007b), bir üretim makinesinde işlerin çizelgelenmesi (Pham ve ark., 2007c), bir tasarım problemine çoklu uygun çözümler bulma (Pham ve ark., 2007d), veri kümeleme (Pham ve ark., 2007e), mekanik bileşen tasarımının optimizasyonu (Pham ve ark., 2007f), çok amaçlı optimizasyon (Pham ve Ghanbarzadeh, 2007) gibi değişik problemlere son yıllarda başarıyla uygulanmıştır. Pham ve M.Kalyoncu, esnek uzuvlu bir robot kolunun kontrolü için tasarladıkları; PID kontrolcü kazanç katsayılarının optimizasyonunda (2008) ve ön tasarımı yapılmış Bulanık Mantık Kontrolcü parametrelerinin optimizasyonunda (2009) Arı Algoritması optimizasyon yöntemini başarıyla uygulamışlardır. Fahmy ve Kalyoncu (2012) arı algoritmasının karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümündeki etkinliğini ölçmek amacıyla, ters kinematik modelini yapay sinir ağı ile elde ettikleri eklemli bir robot kolunun kontrolü için hiyerarşik PID kontrolcü kazançlarını arı algoritması ile optimize etmişlerdir. Optimizasyonun sonuçlarına göre, Arı Algoritması ile optimizasyon yönteminin standart PID kazançları ayarlama yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Fahmy (2012) çalışmasında rüzgar türbini jeneratörlerinin optimum hız parametrelerini Arı Algoritması ile optimize ederek seçmiştir. Yuce ve ark. (2013) çalışmalarında, Pham tarafından geliştirilen temel Arı Algoritması ile optimizasyon yöntemini detaylı olarak tanıtmışlar ve temel arı algoritması ile gelişmiş versiyonlarını çeşitli fonksiyonların çözümü için uygulayarak, işlevsel performanslarını karşılaştırmışlardır. Temel arı algoritmasının diğer optimizasyon yöntemlerine göre avantajlı olduğunu belirtmişlerdir. Pham ve arkadaşlarının 2014 yılındaki çalışmaları, Arı Algoritması ile diğer doğadan ilham alınarak geliştirilen akıllı optimizasyon yöntemlerinin performanslarının karşılaştırıldığı güncel bir çalışmadır.

Arı Algoritmasının Genel Yapısı

Arı algoritmasının temel adımları şöyledir (Tapkan, 2008);

1- Rastgele çözümlerle başlangıç arı popülasyonunu oluştur,
2- Popülasyonunun uygunluğunu değerlendir,
3- Tekrarla,
4- Elit arıları seç,
5- Komşuluk araması için bölgeleri seç,
6- Arıları seçilen bölgelere gönder ve uygunluklarını değerlendir,
7- Her bir bölgedeki en iyi uygunluk değerine sahip arıyı seç,
8- Kalan arıları rastgele arama için ata ve uygunluklarını değerlendir,
9- Durdurma kriteri sağlanana kadar devam et.

Pham ve ark. (2006a)'da bahsedildiği gibi temel Arı Algoritması birçok parametre içermektedir. Bunlar: kâşif arı sayısı (n), ziyaret edilen n nokta içinden seçilen bölge sayısı (m), seçilen m bölge içindeki en iyi bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen arı sayısı (nep), kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı (nsp), bölge boyutu (ngh) ve durdurma kriteridir. Bu parametreler ve neyi ifade ettikleri tablo şeklinde aşağıda verilmiştir (Tablo 6.1.).

Tablo 6. 1. Temel arı algoritması parametreleri

AA Parametresi	Açıklama
n	Kâşif arı sayısı
m	Ziyaret edilen 'n' nokta içinden seçilen bölge sayısı
e	Seçilen 'm' bölge içindeki en iyi bölge sayısı (elit bölge)
nep	En iyi 'e' bölgeye gönderilen arı sayısı
nsp	Kalan (m-e) bölgeye gönderilen arı sayısı
ngh	Komşuluk araması boyutu
itr	Durdurma kriteri (iterasyon sayısı)

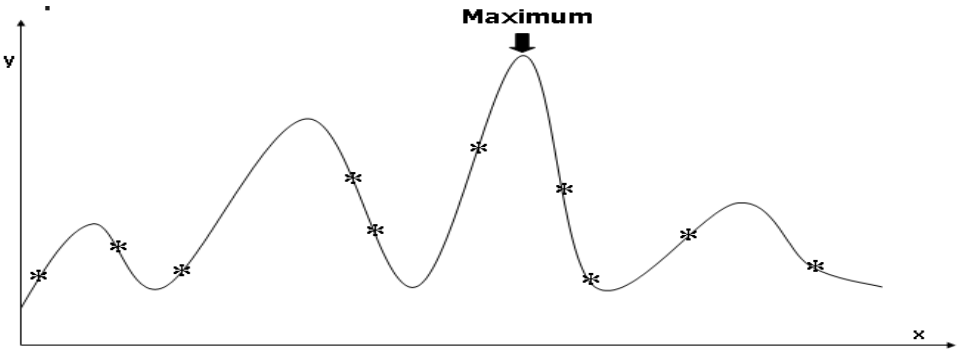
Pham ve ark.(2006a,b)'de temel AA akış şeması Şekil 6.2. deki gibi gerçekleşir;



Şekil 6.2. Temel arı algoritması akış şeması

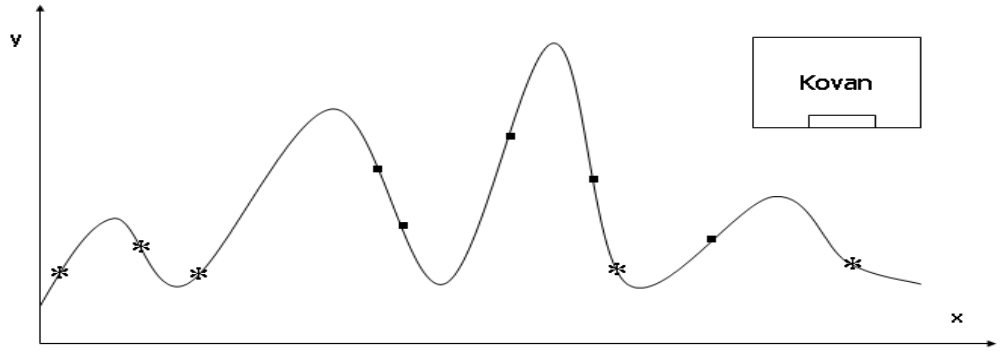
Arı Algoritma Optimizasyonu basit bir örnek üzerinden adım adım aşağıda izah edilmiştir.

1.adım: Algoritma *n=10* adet kâşif arının araştırma uzayına rastgele yerleştirilmesi ile başlar (Şekil 6.3.).



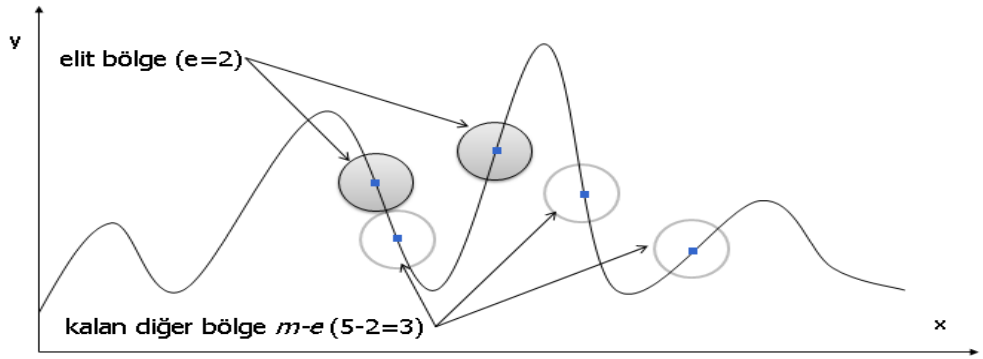
Şekil 6.3. Arı Algoritması optimizasyonunun 1.adımı

2. ve 3. adım: Kâşif arılarca ziyaret edilen noktaların birbirlerine göre uygunlukları değerlendirilerek diğerlerine göre daha uygun sahip bölgeler (*m=5*) seçilir (Şekil 6.4.).



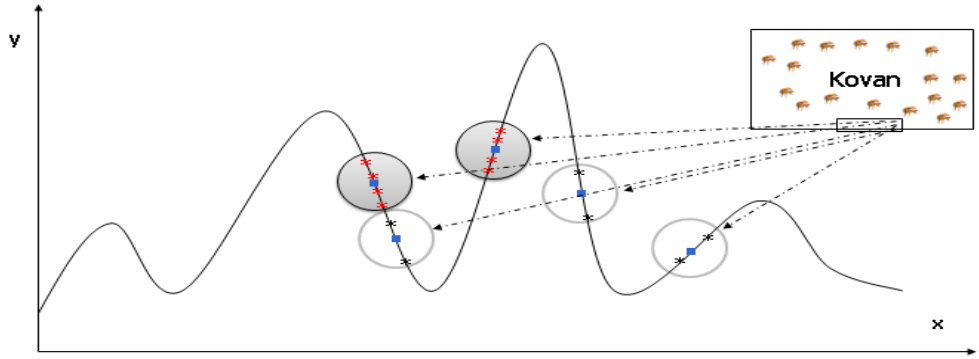
Şekil 6.4. Arı Algoritması optimizasyonunun 2. ve 3.adımı

4.adım: En iyi uygunluk değerine sahip elit bölgeler (*e=2*) ve geriye kalan bölgeler (*m-e=3*) seçilir. Bu bölgelerin komşuluk araması boyutu (*ngh*) belirlenir (Şekil 6.5.).



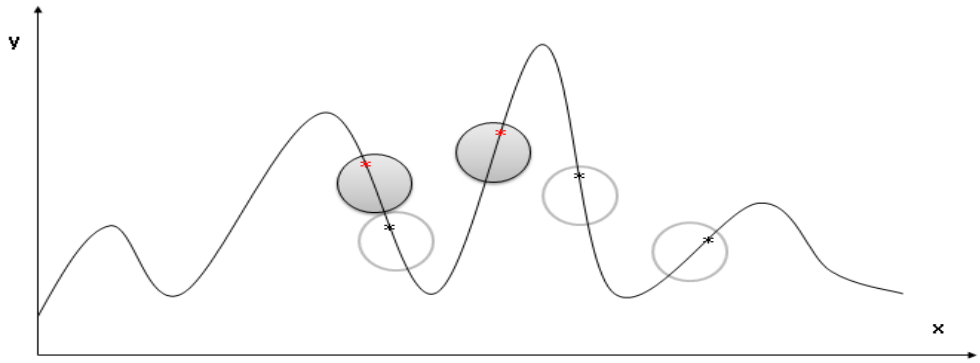
Şekil 6.5. Arı Algoritması optimizasyonunun 4.adımı

5. ve 6. adım: Seçilen bölgelerde komşuluk araştırması (bölge içinde daha uygun noktaların araştırılması) için, daha umut verici çözümleri temsil eden en iyi *e* bölgeye seçilen diğer bölgelere göre daha fazla takipçi arı (*nep*), diğer bölgelere daha az takipçi arı (*nsp*) gönderilerek, detaylı arama yapılır (Şekil 6.6.).



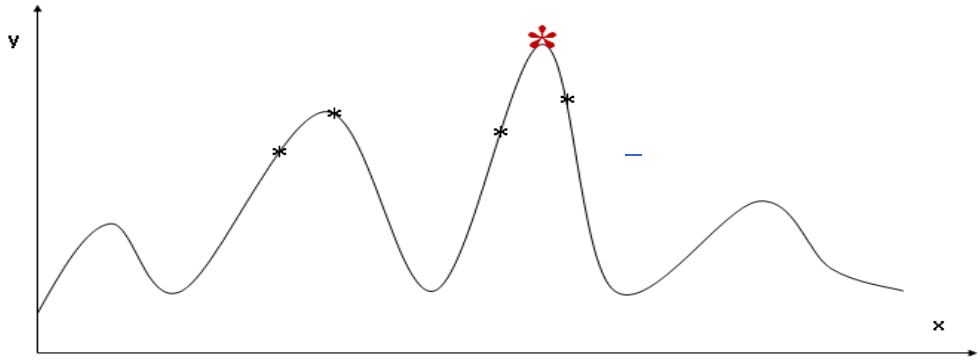
Şekil 6.6. Arı Algoritması optimizasyonunun 5. ve 6.adımı

7. adım: Yeni popülasyon için her bölgedeki en uygun değere sahip arı seçilir. Bölgelerdeki diğer arılar araştırma uzayından ayrılır (Şekil 6.7.).



Şekil 6.7. Arı Algoritması optimizasyonunun 7.adımı

8.adım: Popülasyondaki diğer arılar (*n-m=10-5=5*) yeni potansiyel çözümler elde etmek için tekrar rastgele olarak araştırma uzayına yerleştirilirler. Her bir iterasyonun sonunda yeni popülasyon iki parçadan oluşacaktır: seçilen her bir bölgenin temsilcileri ve rastgele arama yapan kâşif arılar (Pham vd., 2006a,b). Optimizasyon durdurma kriteri sağlanana kadar devam ettirilir (Şekil 6.8.).



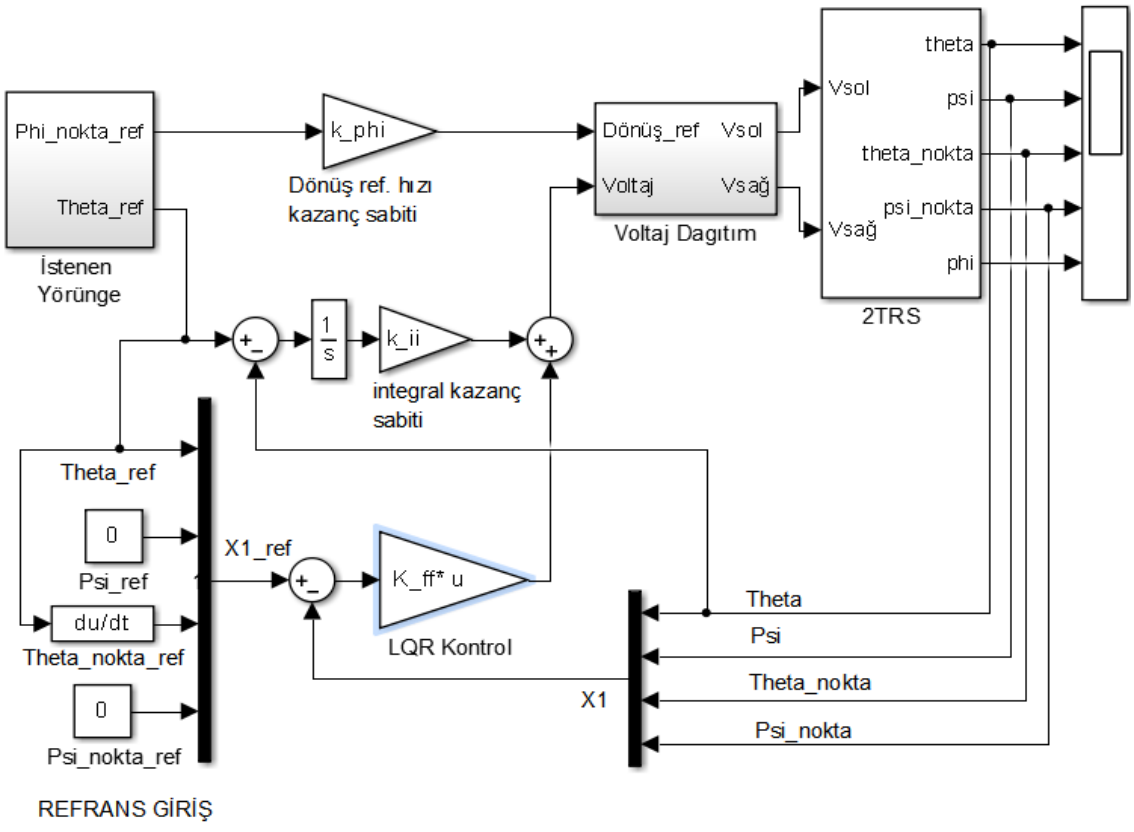
Şekil 6.8. Arı Algoritması optimizasyonunun 8.adımı

7. ARI ALGORİTMASI OPTİMİZASYON UYGULAMALARI

Bu bölümde, robotun kontrolünü iyileştirmeye yönelik Arı Algoritması optimizasyon uygulamaları anlatılmaktadır. Optimizasyon parametrelerinin belirlenmesinde **D.T.Pham** ve **M.Kalyoncu** 'nun çalışmaları (Cardiff Ünv., 2009) referans alınmıştır. Optimizasyonda öncelikli olarak, sistemin kendi kendini dengeleyerek belirli yörüngelerde hareket edebilmesi ve yunuslama açısının (ψ) minimize edilmesi amaçlanmıştır.

7.1. LQR Kazanç Sabitlerinin Optimizasyonu

LQR kontrolde, kazanç sabitleri Q ve R ağırlık matrisleriyle hesaplanmaktadır. Bu matrisler genellikle deneme-yanılma ile belirlenmektedir. 4. Bölümde verilen LQR kontrol kazanç matrisi ve integral kazancı (K_f ve k_i) arı algoritması ile optimize edilerek, LQR kontrolcünün iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Optimizasyon sonrası elde edilen yeni kazanç matrisi ve integral kazancı (K_ff ve k_ii) 'Optimize LQR (O-LQR) kontrol simulink modelin' de gösterilmiştir (Şekil 7.1.).



Şekil 7.1. Optimize LQR (O-LQR) kontrol simulink modeli

LQR kontrolcü kazanç katsayılarının optimizasyonu için belirlenen Arı Algoritması parametreleri aşağıdaki tablodaki belirtilmiştir (Tablo 7.1.).

Tablo 7.1. LQR optimizasyonu için AA parametreleri

n	m	e	nep	nsp	ngh	itr
50	30	15	10	5	0.001	50

LQR optimizasyon amaç fonksiyonu, sistemin x_1 durum değişkenlerinin hata değerlerine bağlı bir fonksiyon olarak,

$$\text{Toplam hata} = \max\left[\left|e_\theta\right| + \left|e_\psi\right| + \left|e_{\dot{\theta}}\right|^2 + \left|e_{\dot{\psi}}\right|^2\right]$$

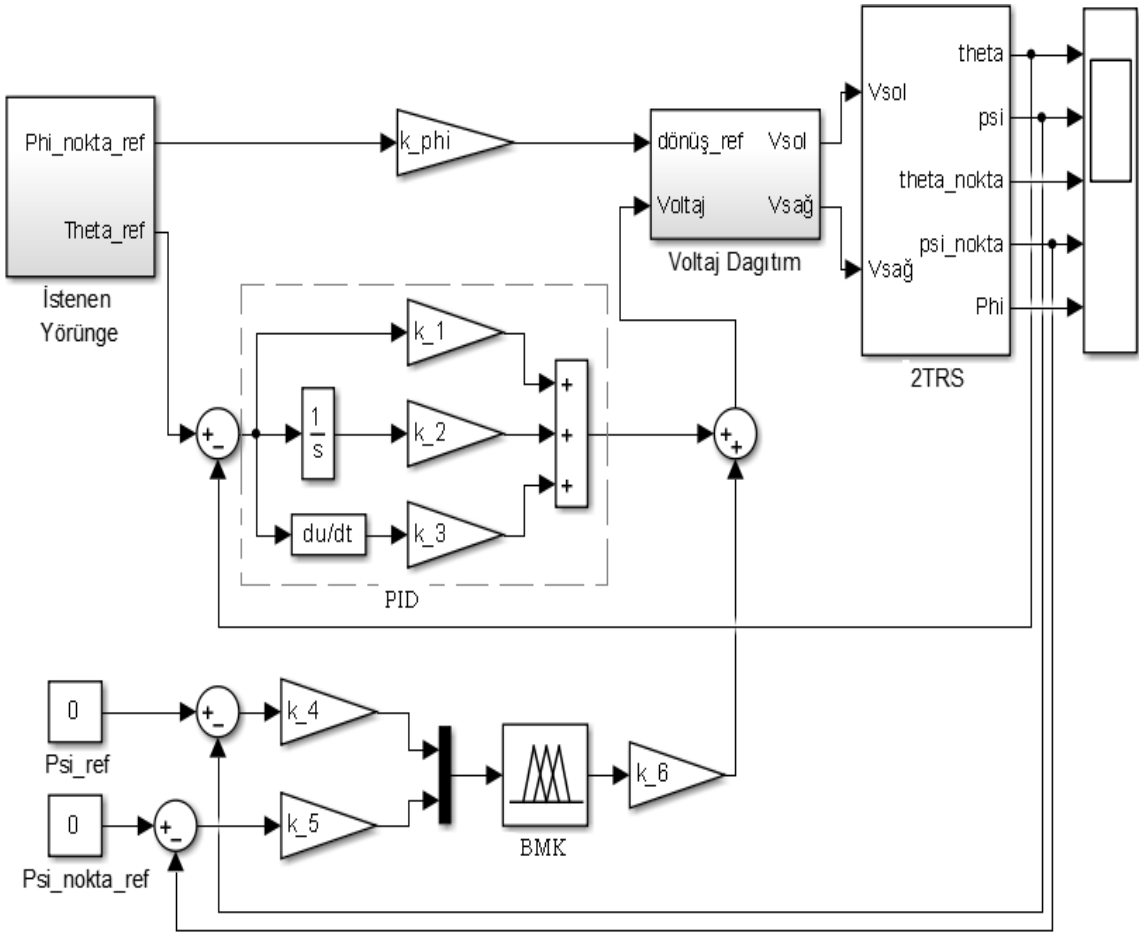
şeklinde belirlenmiştir. Amaç fonksiyonunun belirlenmesinde yörünge takibi dikkate alınmamıştır. Toplam hatanın minimize edilmesine yönelik optimizasyon uygulamasından sonra O-LQR kazanç katsayı matrisi ve integral kazanç katsayısı,

K_ff = [-15.359, -965.393, -14.531, -194.316] , **k_ii** = [-0.052]

olarak bulunmuştur. Optimize LQR kontrolcünün simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılarak, sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

7.2. Arı Algoritması optimizasyonu ile Fuzzy-PID kontrolcü tasarımı

İki tekerlekli robotik sistemin kontrolünde, robotun kendi kendini karalı bir şeklide dengede tutabilmesi ve bu karalılığı sürdürerek hareket edebilmesi birbirine bağılı kontrol kriterleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalarında bu iki kriter sağlamak için Bulanık mantık kontrolcü ve PID kontrolcü beraber kullanılmış ve kontrolcü çıkışları toplanarak tek bir giriş olarak sisteme verilmiştir. Benzer şeklide bu çalışmada da, sistemin denge kontrolü ve doğrusal hareket kontrolü için iki ayrı kontrolcü tasarlanmıştır. Yunuslama açısı ve türevinin (ψ , $\dot{\psi}$) kontrolü için Bulanık Mantık kontrolcü, iki tekerin ortalama açısının (θ) kontrolü için PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fuzzy-PID kontrol simulink modeli Şekil 7.2.'de verilmiştir.



Şekil 7.2. Fuzzy-PID kontrol simulink modeli

Şekil 7.2. 'de görüldüğü gibi, iki giriş ve bir çıkış BMK kazancı ile PID kontrol çıkışı toplanıp, voltaj değeri olarak sisteme girilmektedir. Burada, k_1 (P), k_2 (I), k_3 (D) PID kontrol kazanç parametrelerini, k_4, k_5 bulanık mantık kontrolcü giriş ölçek katsayılarını ve k_5 çıkış ölçek katsayısını oluşturmaktadır.

Toplam 6 adet katsayı ile Bulanık Mantık Kontrolcü giriş-çıkış üyelik fonksiyonlarının parametreleri (3x5x3=45) birlikte Arı Algoritması ile optimize edilerek elde edilmiştir.

Fuzzy-PID kontrolcü katsayılarının ve üyelik fonksiyonları parametrelerinin optimizasyonu için belirlenen Arı Algoritması parametreleri aşağıdaki tablodaki verilmiştir (Tablo 7.2.).

Tablo 7.2. Fuzzy - PID optimizasyon AA parametreleri

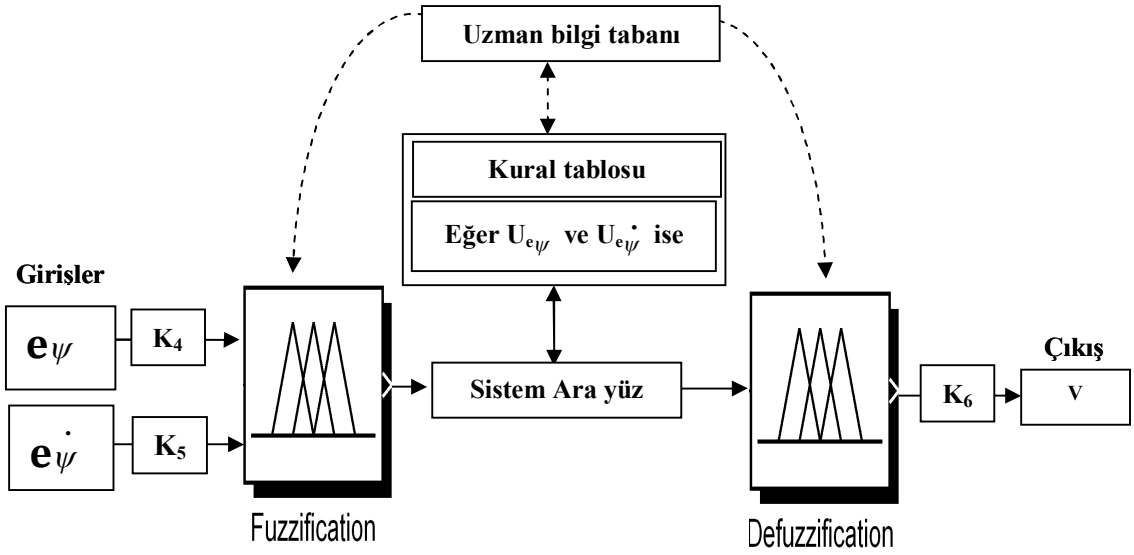
n	m	e	nep	nsp	ngh	itr
20	10	5	10	7	0.001	20

LQR katsayılarının optimizasyonunda belirlenen amaç fonksiyonuna benzer şekilde, Fuzzy-PID kontrolcü tasarımındaki optimizasyonda da amaç fonksiyonu, sistemin x_1 durum değişkenlerinin hata değerlerine bağlı bir fonksiyon olarak,

$$\text{Toplam hata} = \max\left[\left|e_\theta\right|\times 4.5 + \left|e_\psi\right|\times 3 + \left|e_{\theta}^{.}\right|\times 6 + \left|e_{\psi}^{.}\right|\times 3\right]$$

şeklinde belirlenmiştir. Toplam hatanın minimize edilmesine yönelik optimizasyon uygulamasından sonra yeni k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 ve k_6 katsayıları;

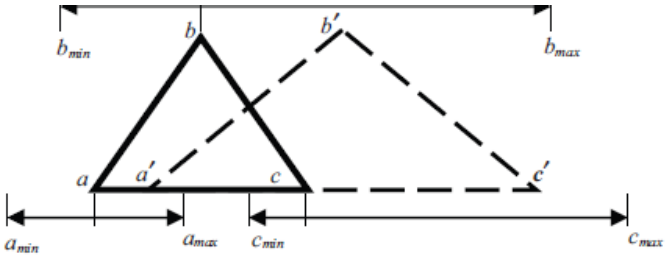
k_1= [-15.359]
k_2= [-0.0212]
k_3= [-1.842]
k_4= [-1.326]
k_5= [-1.197]
k_6= [10.994] olarak bulunmuştur.



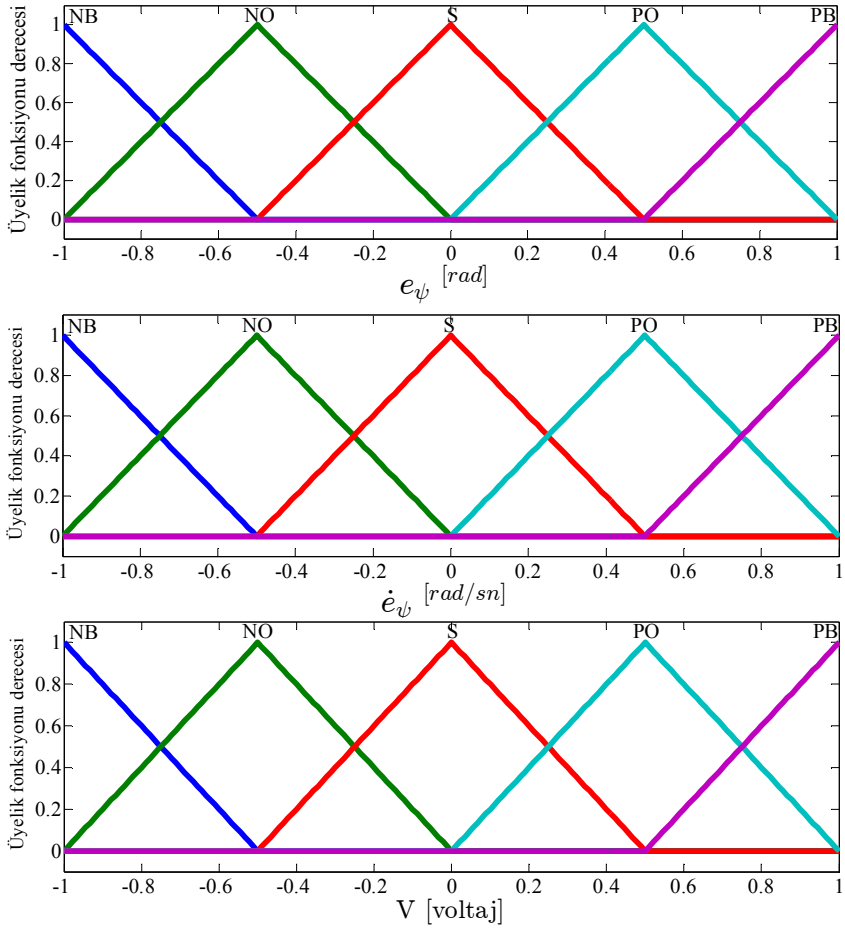
Şekil 7.3. Bulanık mantık kontrolcünün genel yapısı

Bulanık Mantık Kontrolcünün genel yapısı Şekil 7.3.'de verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi girişler, denge (yunuslama) açısı (ψ) ve türevinin ($\dot{\psi}$) hata değerleri, çıkış ise voltajdır. Girişler k_3 ve k_4 ölçek katsayıları ile çarpılarak bulanık mantık bloğuna girmekte, kural tablosuna göre işlenip çıkış ölçek katsayısı k_5 ile çarpılarak çıkmaktadır.

Bulanık Mantık Kontrolcüde, her giriş ve çıkış için 5 er adet olmak üzere toplamda 15 adet üçgen üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Her bir üyelik fonksiyonu üç adet parametre (a, b, c) ile ifade edilir. Ön tasarımı yapılan üyelik fonksiyonlarının her bir parametresi, belirlenen aralıklarda (a_{max}-a_{min}, b_{max}-b_{min}, c_{max}-c_{min},), Arı Algoritması ile optimize edilerek, her parametre için amaç fonksiyonunu sağlayacak en uygun değer aranmıştır. (Şekil 7.4.). Optimizasyon sonunda bulunan yeni a′, b′, c′ değerleri ile a, b, c değerleri yer değiştirilerek, yeni üyelik fonksiyonları elde edilmiştir. Şekil 7.5.'de optimizasyon öncesi giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları verilmiştir.

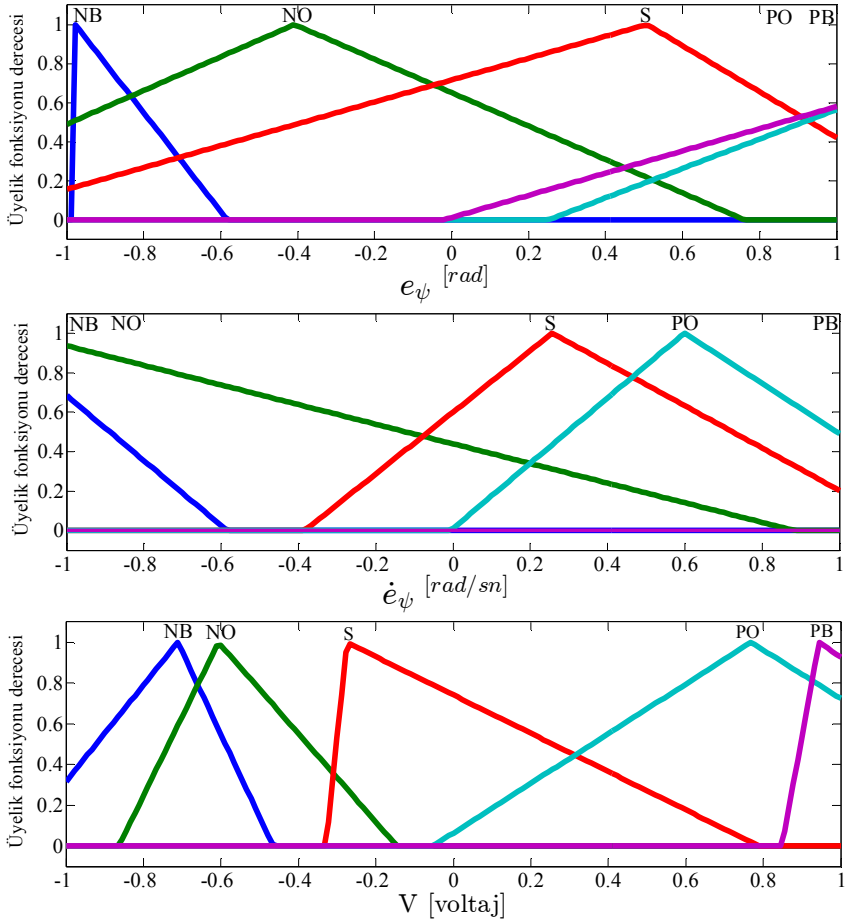


Şekil 7.4. Üçgen üyelik fonksiyonu parametreleri ve optimizasyon aralıkları



Şekil 7.5. Optimizasyon öncesi Bulanık Mantık Kontrolcü üyelik fonksiyonları

Optimizasyon sonrası Bulanık Mantık Kontrol üyelik fonksiyonları Şekil 7.6.'deki gibi oluşmuştur. Bulanık Mantık Kontrolcü kural tablosu Tablo 7.3. 'de belirtildiği şekilde oluşturmuştur.

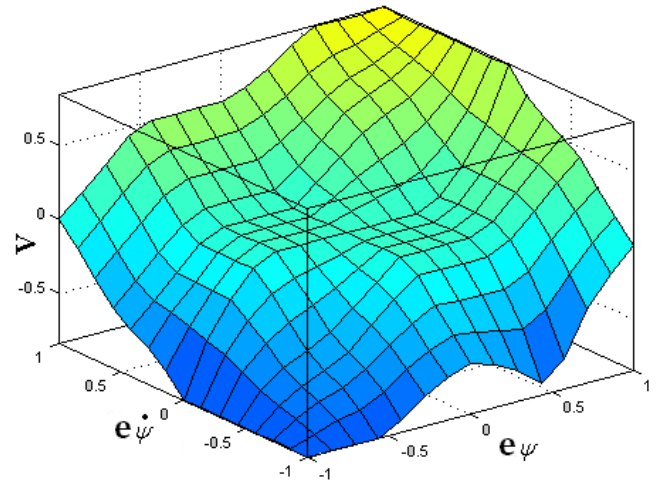


Şekil 7.6. Optimizasyon sonrası Bulanık Mantık Kontrolcü üyelik fonksiyonları

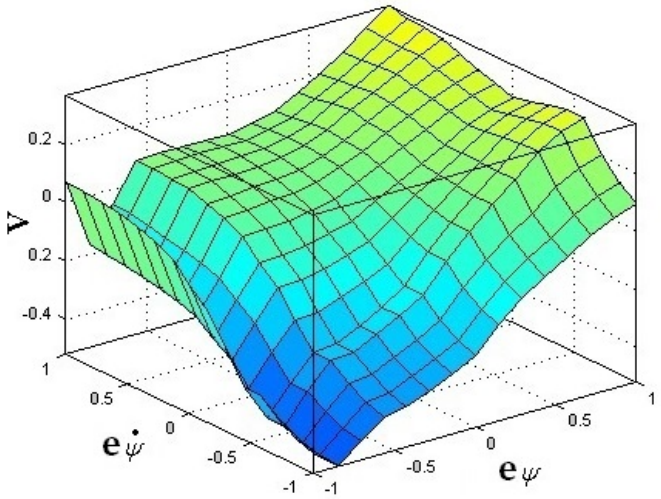
Tablo 7.3. Bulanık Mantık Kontrolcü kural tablosu

	$\dot{e}_\psi$				
e_ψ	**NB**	**NO**	**S**	**PO**	**PB**
NB	NB	NB	NB	NO	S
NO	NB	NO	S	S	PO
S	NO	S	S	S	PO
PO	NB	S	S	PO	PB
PB	S	PO	PB	PB	PB

Optimizasyon öncesindeki ve optimizasyon sonrası oluşan, Bulanık Mantık Kontrolcünün giriş ve çıkışlarının değişimi gösteren üç boyutlu BMK yüzey grafikleri aşağıda verilmiştir (Şekil 7.7. ve Şekil 7.8.).



Şekil 7.7. Optimizasyon öncesi Bulanık Mantık Kontrolcü yüzey grafiği



Şekil 7.8. Optimizasyon sonrası Bulanık Mantık Kontrolcü yüzeyi grafiği

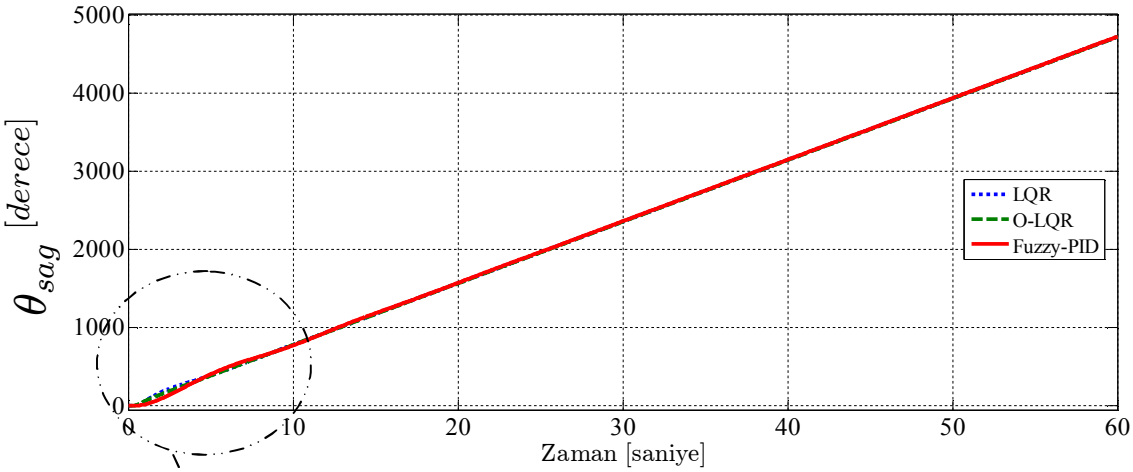
8. SAYISAL UYGULAMALAR

İki tekerlekli robotik sistemin kontrolü için; LQR kontrol, O-LQR kontrol, ve Fuzzy-PID kontrol olmak üzere üç farklı kontrolcü tasarlanmıştır. Kontrol sistemleri Matlab'ın Simulink ara yüzünde modellenerek, simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

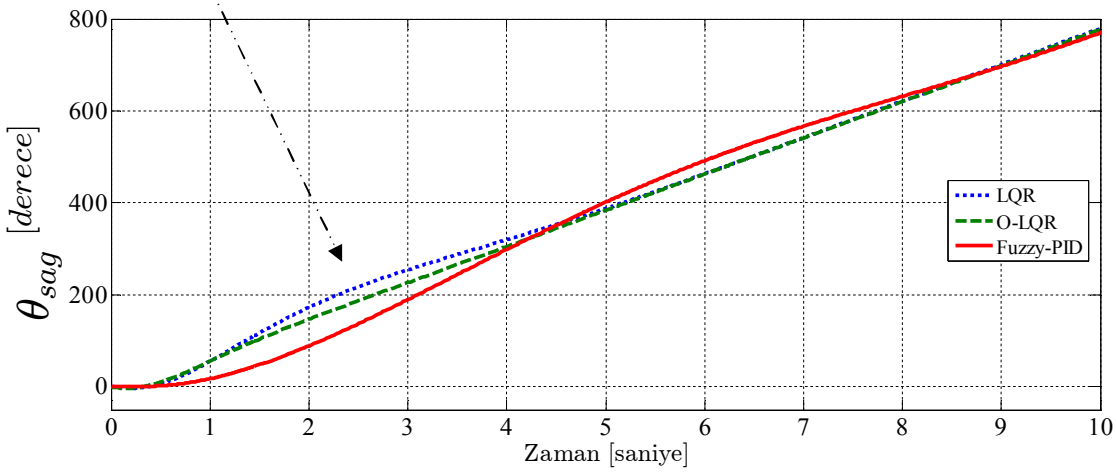
Robotun, kendi kendini dengede tutabilmesi ve denge kontrolünü sürdürerek belirli bir yörüngede hareket etmesi hedeflenmiştir. Robotun hareket kabiliyetini değerlendirmek amacıyla, üç temel yörünge olan 'Daire, Kare ve Üçgen' şekillerindeki yörüngeler referans yörüngeler olarak seçilmiştir. Sistemi bu yörüngelerdeki hareketini sağlamak için gereken, θ ve $\dot{\phi}$ durum değişkenleri belirlenip, referans sinyal olarak sisteme girilmiştir.

Her bir yörüngedeki hareket, tasarlanan her üç kontrolcü için eş zamanlı simüle edilmiştir. Kontrolcülerin sistemin durum değişkenleri değişimi üzerindeki etkileri aynı grafikte belirtilerek, kontrolcülerin birbirlerine göre cevapları incelenmiştir. Arı Algoritması ile optimize edilerek tasarlanan O-LQR ve Fuzzy-PID kontrolcülerin LQR kontrolcüye göre performansları karşılaştırarak, Arı Algoritması ile optimizasyon yönteminin başarısı değerlendirilmiştir.

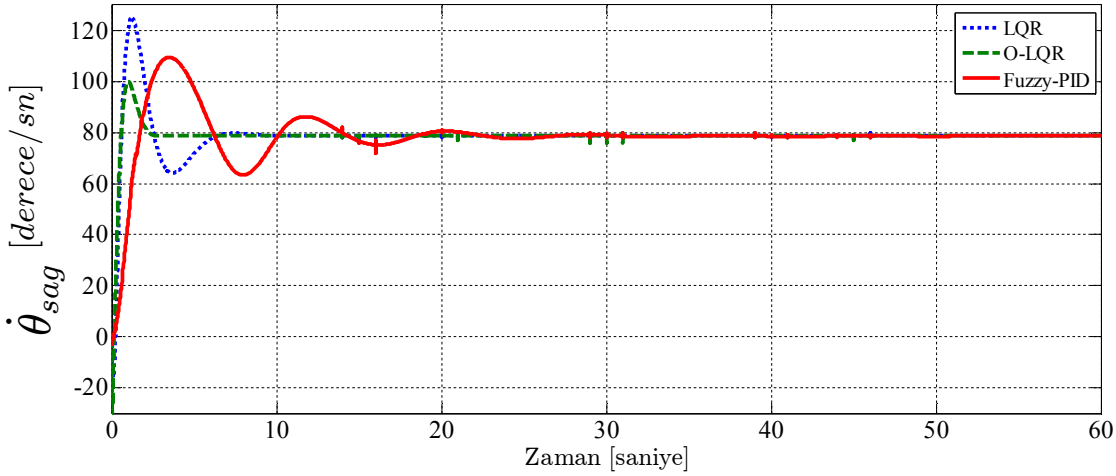
8.1. Daire Yörüngeye ait Sonuçlar



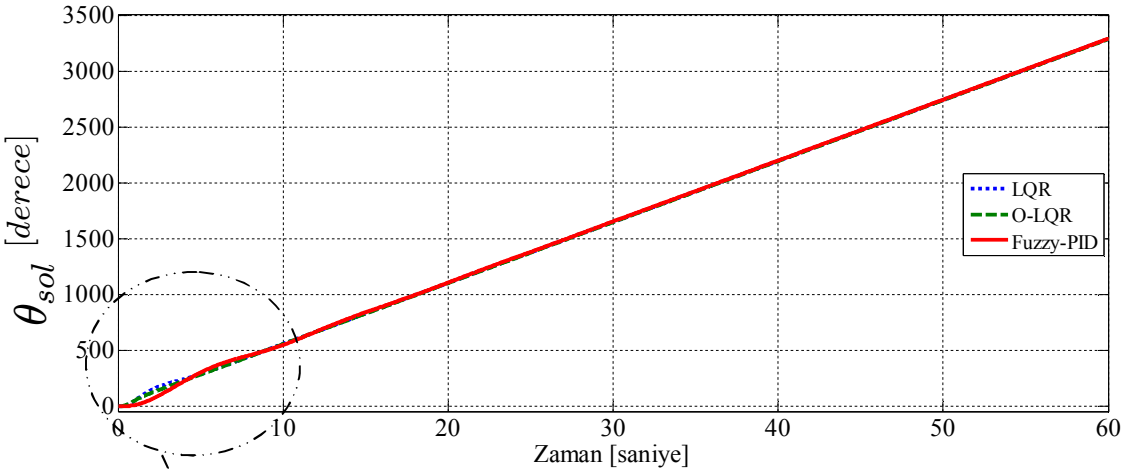
Şekil 8.1. Daire yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği



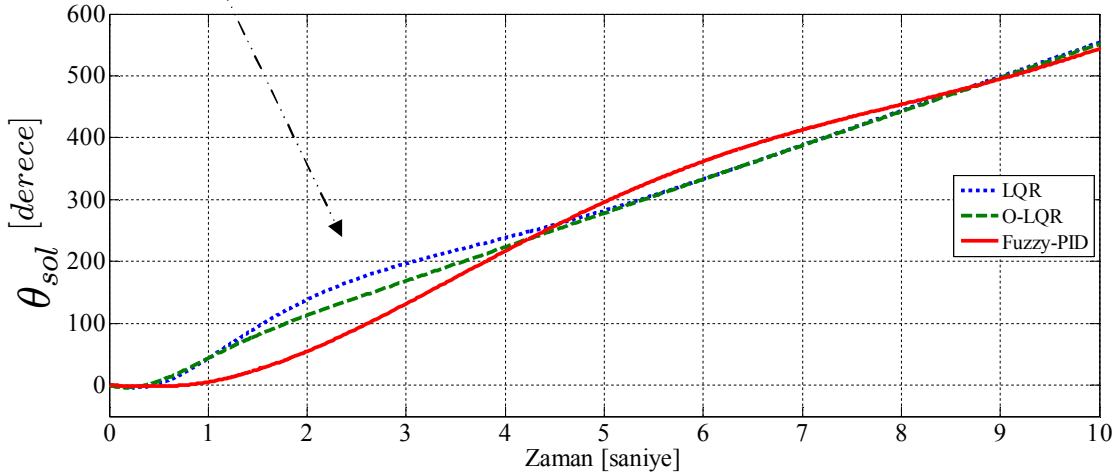
Şekil 8.1-a. Daire yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



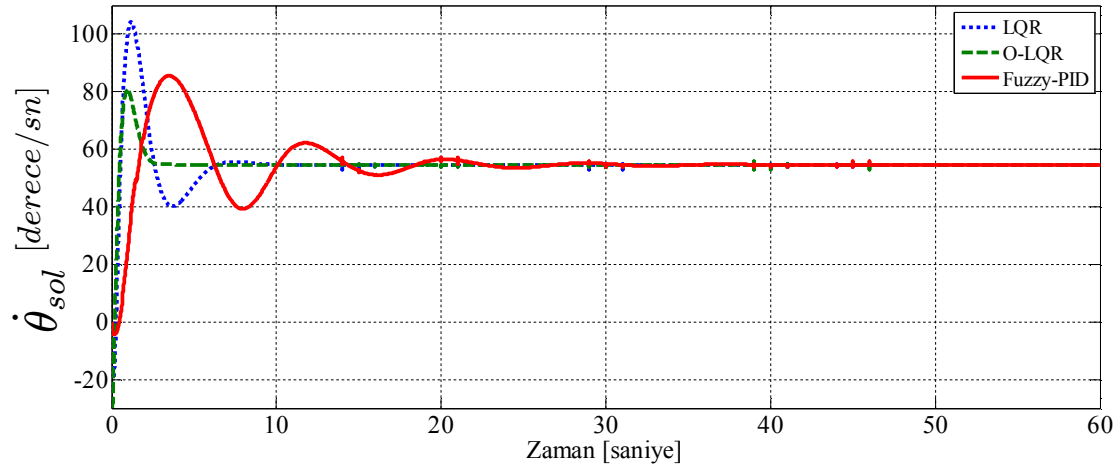
Şekil 8.2. Daire yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sağ}$ açısal hız değişim grafiği



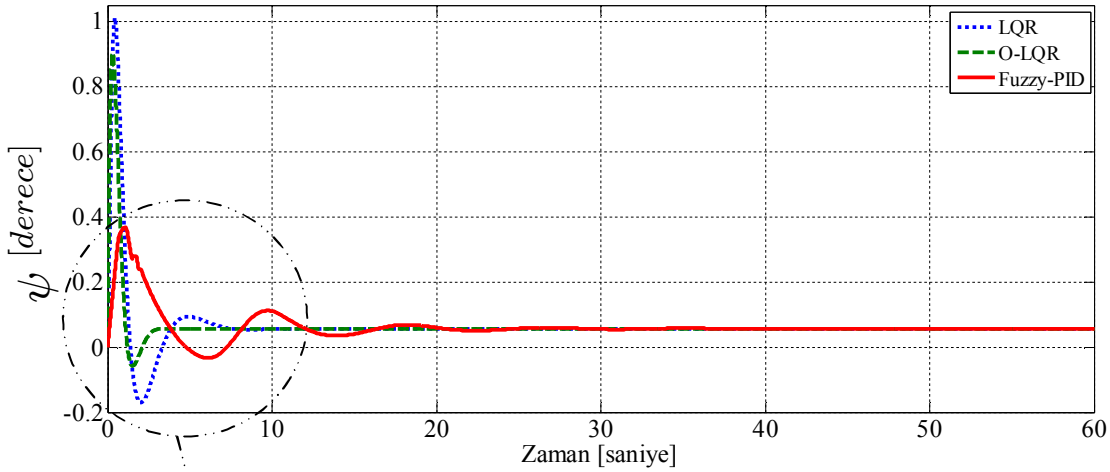
Şekil 8.3. Daire yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği



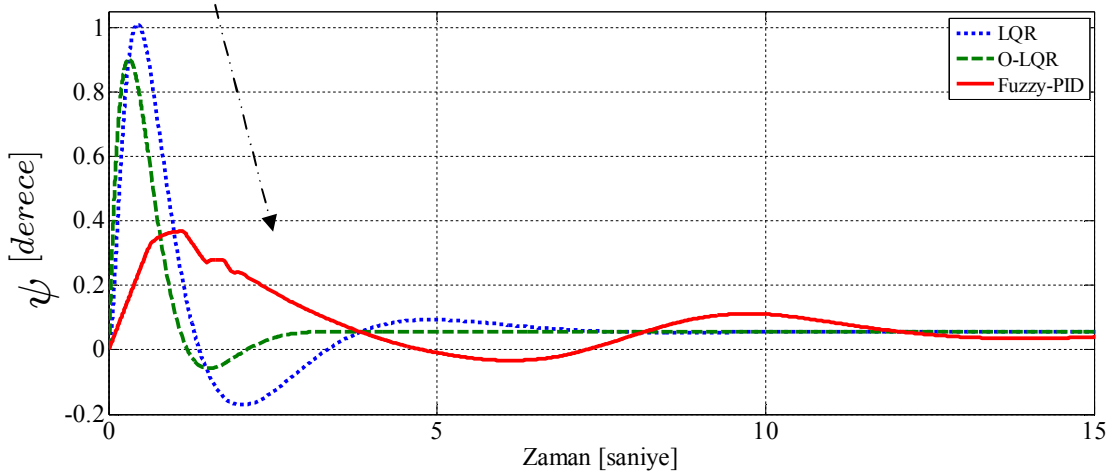
Şekil 8.3-a. Daire yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



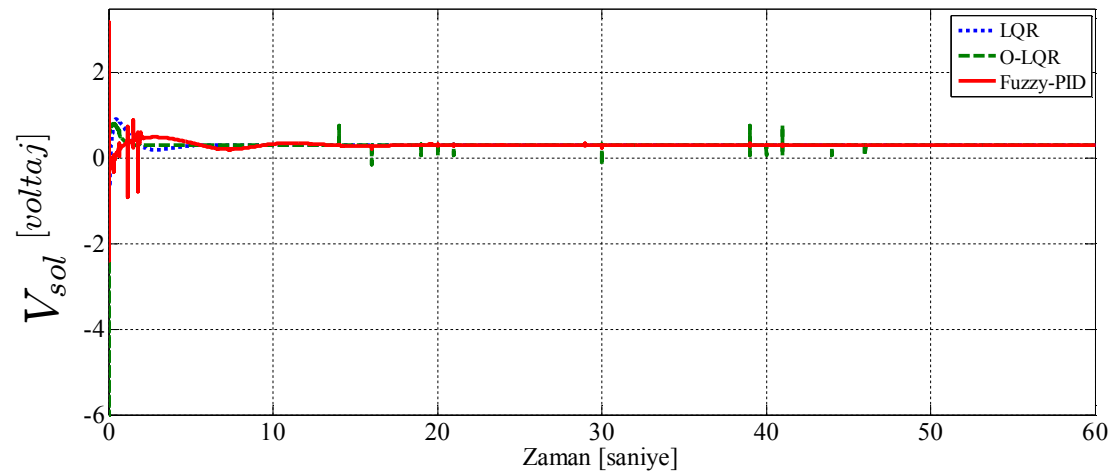
Şekil 8.4. Daire yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sol}$ açısal hız değişim grafiği



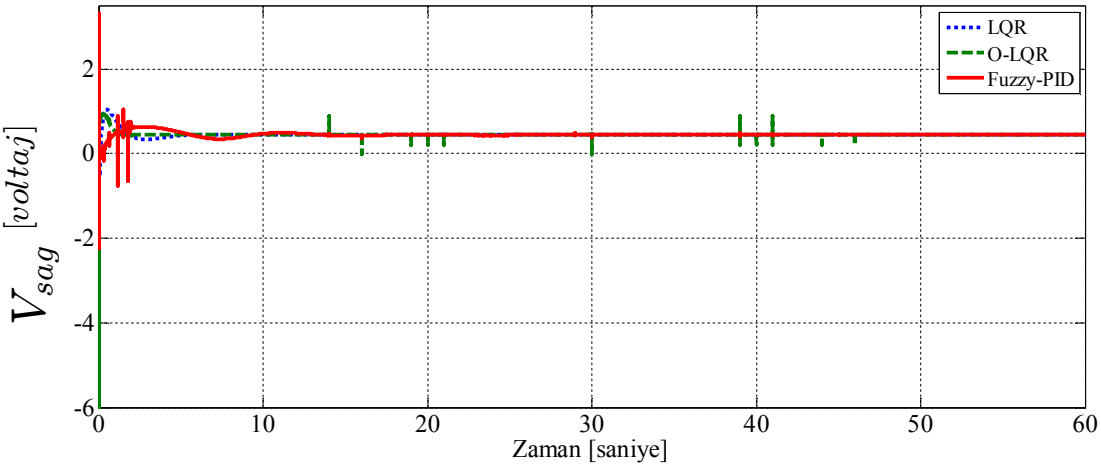
Şekil 8.5. Daire yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği



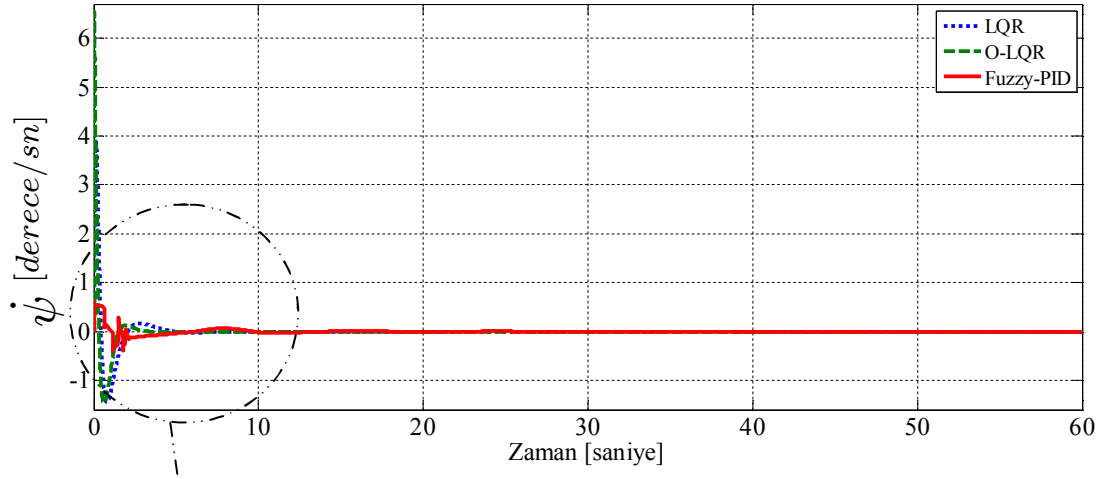
Şekil 8.5-a. Daire yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği (0-15 sn.)



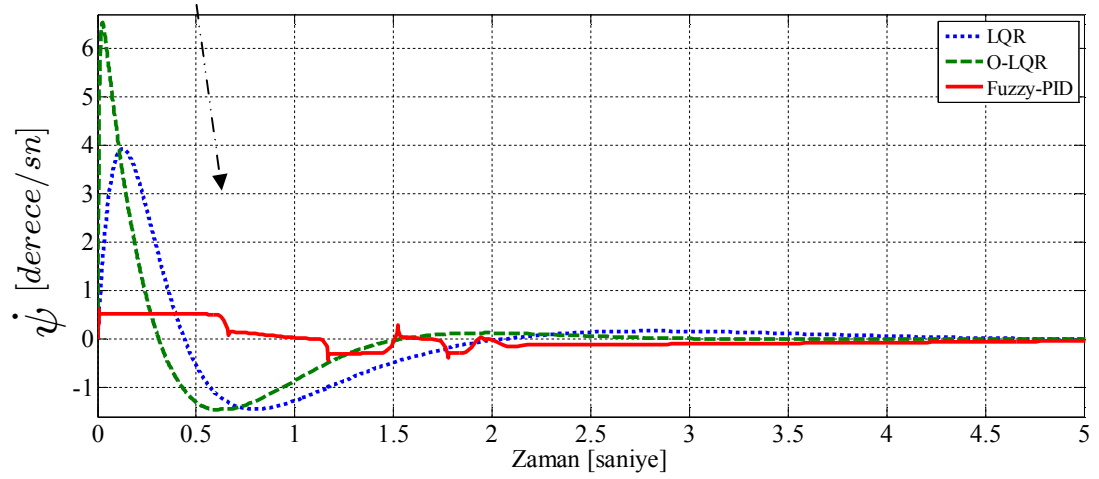
Şekil 8.6. Daire yörüngeye ait sol motor voltaj grafiği



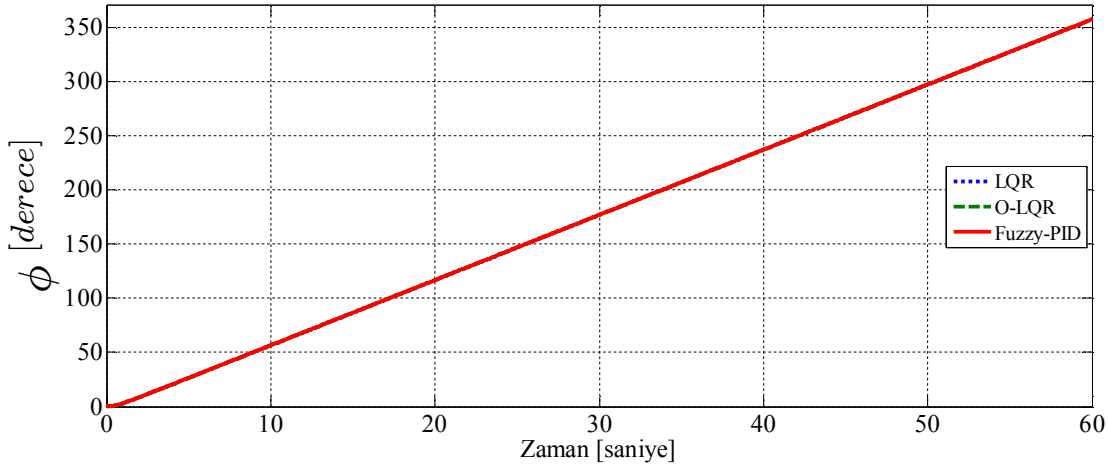
Şekil 8.7. Daire yörüngeye ait sağ motor voltaj grafiği



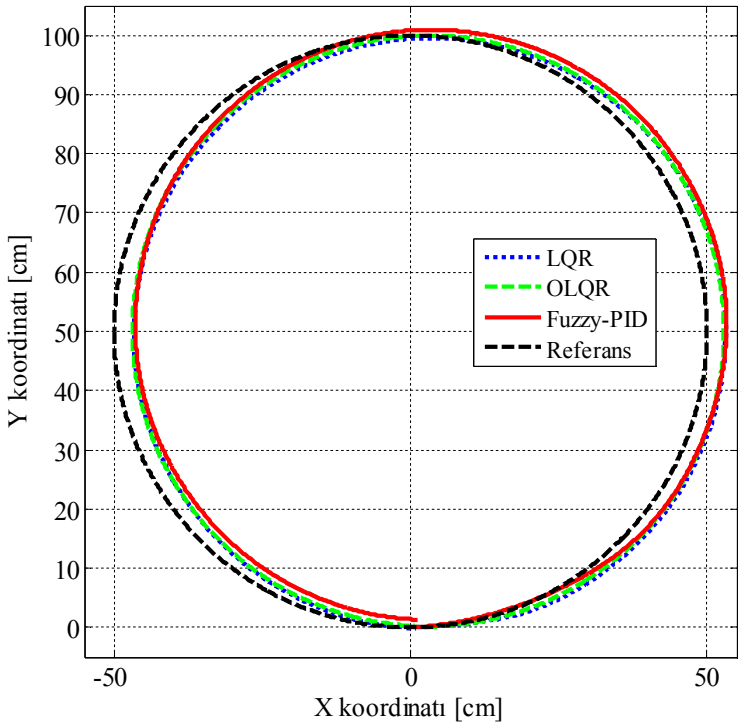
Şekil 8.8. Daire yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği



Şekil 8.8-a. Daire yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği (0-5 sn.)

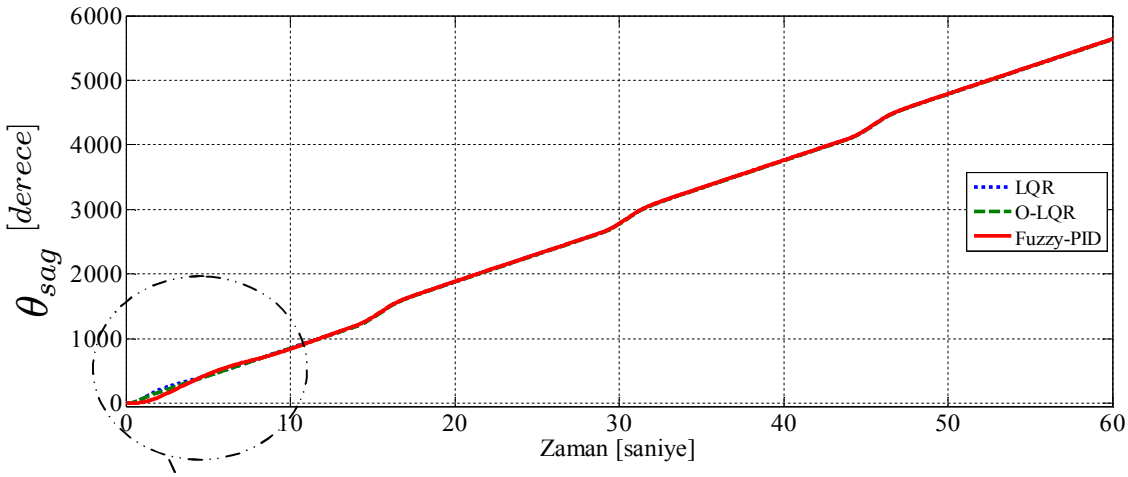


Şekil 8.9. Daire yörüngeye ait ϕ açısal konum değişim grafiği

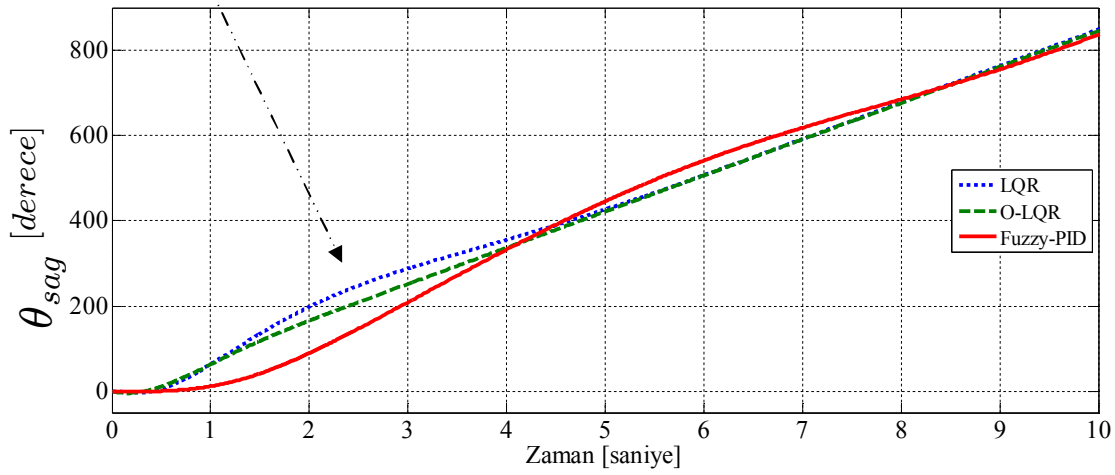


Şekil 8.10. Robotun daire yörüngede hareketinin konum grafiği

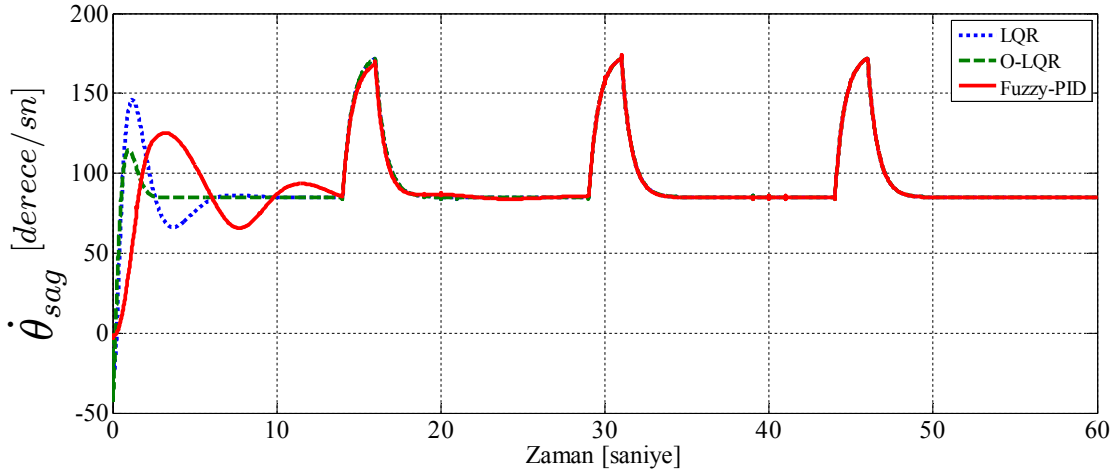
8.2. Kare Yörüngeye ait Sonuçlar



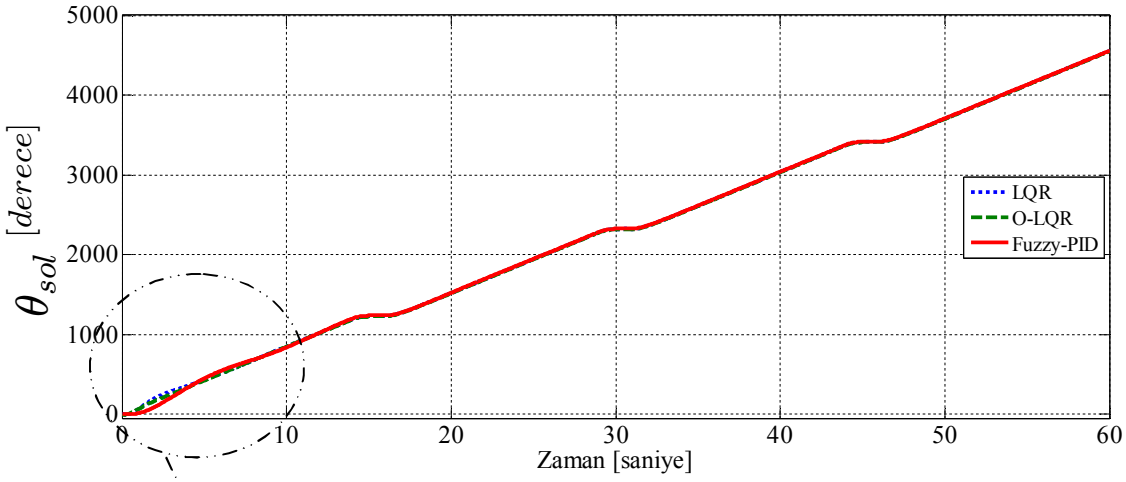
Şekil 8.11. Kare yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği



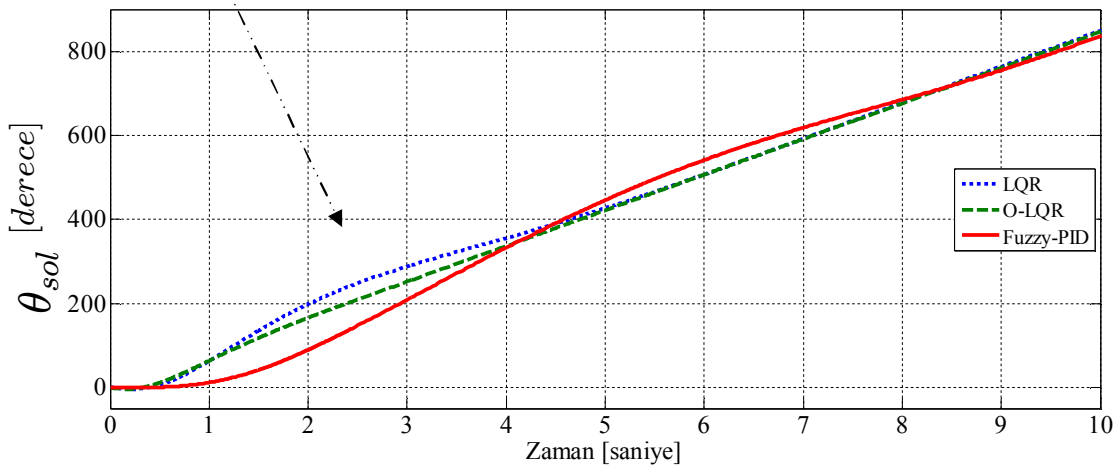
Şekil 8.11-a. Kare yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



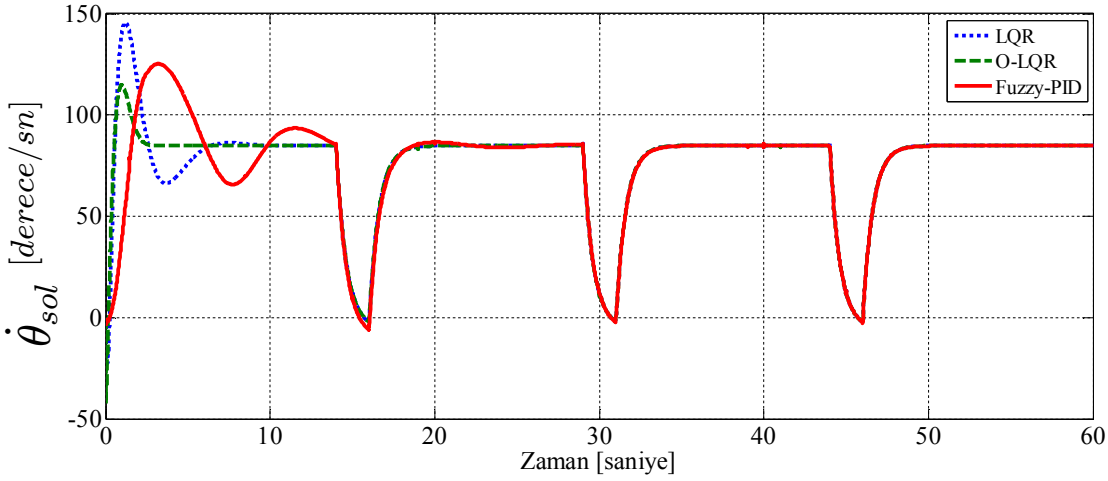
Şekil 8.12. Kare yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sağ}$ açısal hız değişim grafiği



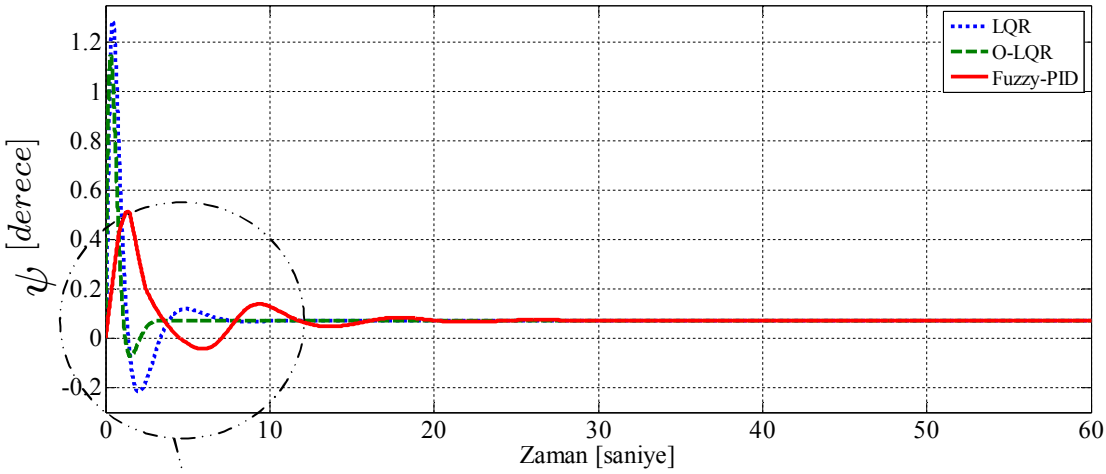
Şekil 8.13. Kare yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği



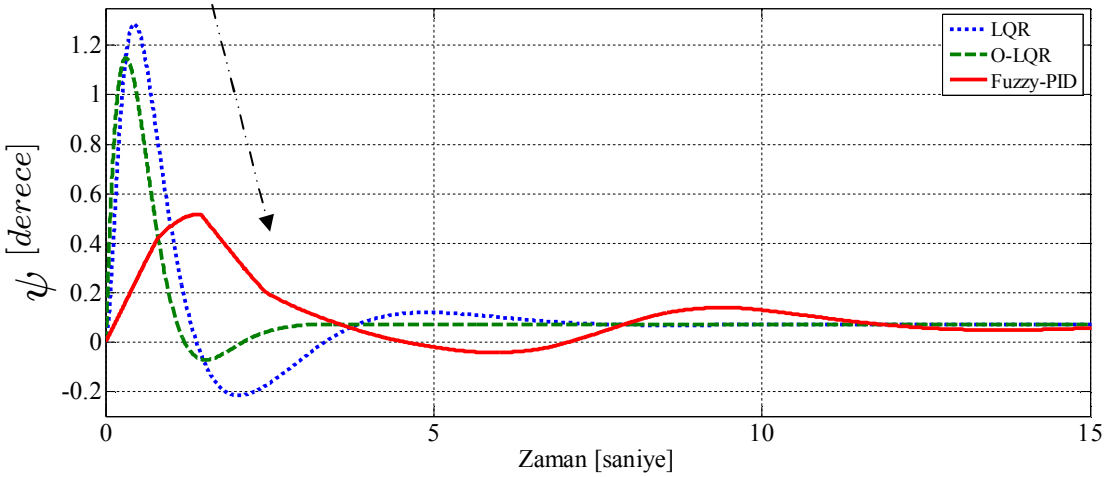
Şekil 8.13-a. Kare yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



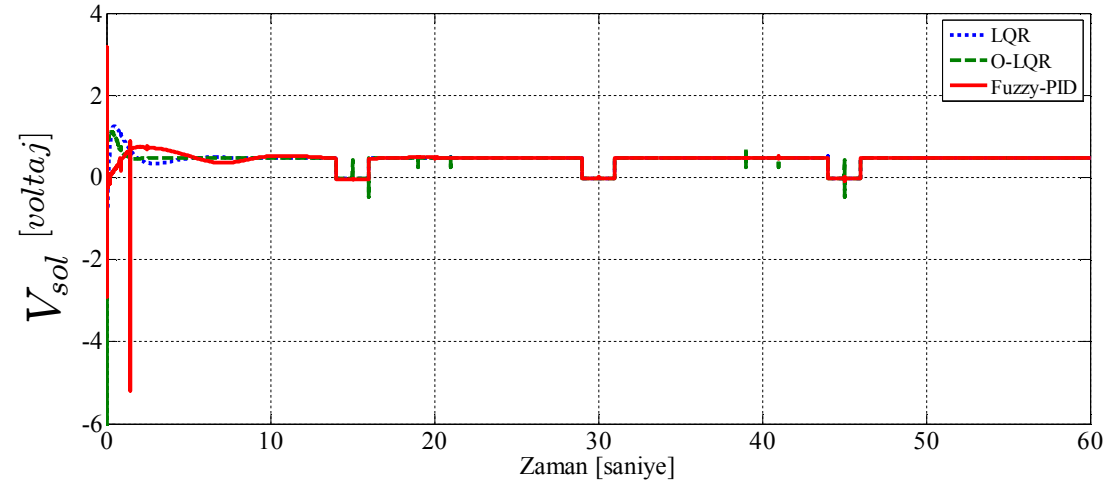
Şekil 8.14. Kare yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sol}$ açısal hız değişim grafiği



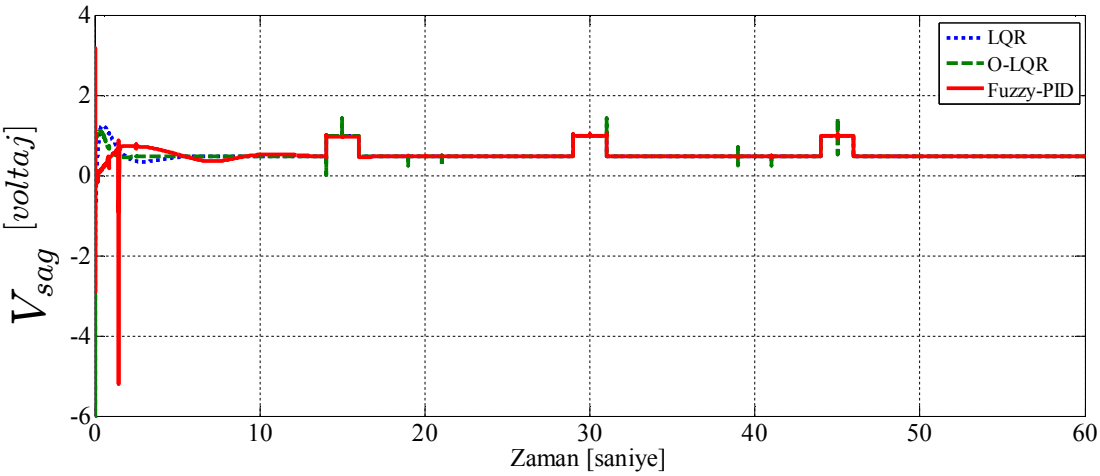
Şekil 8.15. Kare yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği



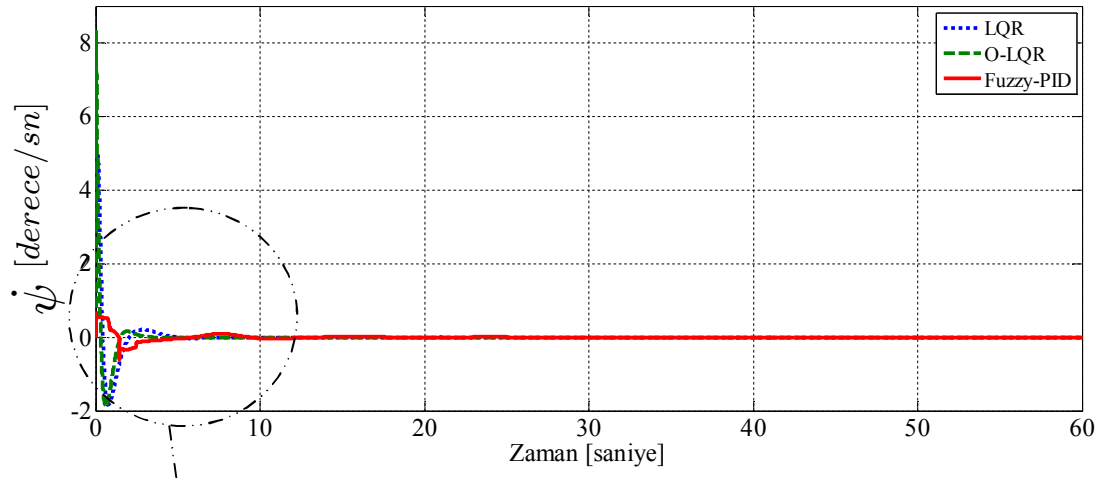
Şekil 8.15-a. Kare yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği (0-15 sn.)



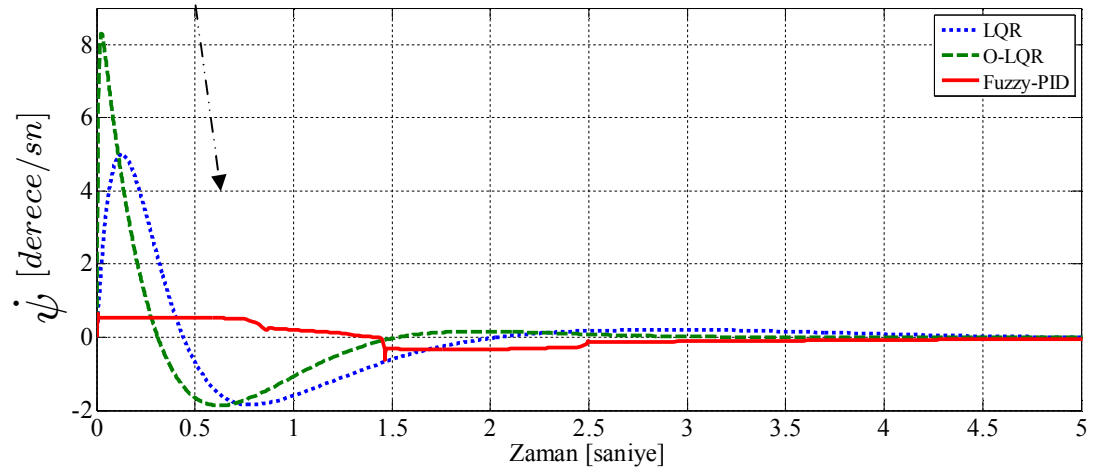
Şekil 8.16. Kare yörüngeye ait sol motor voltaj grafiği



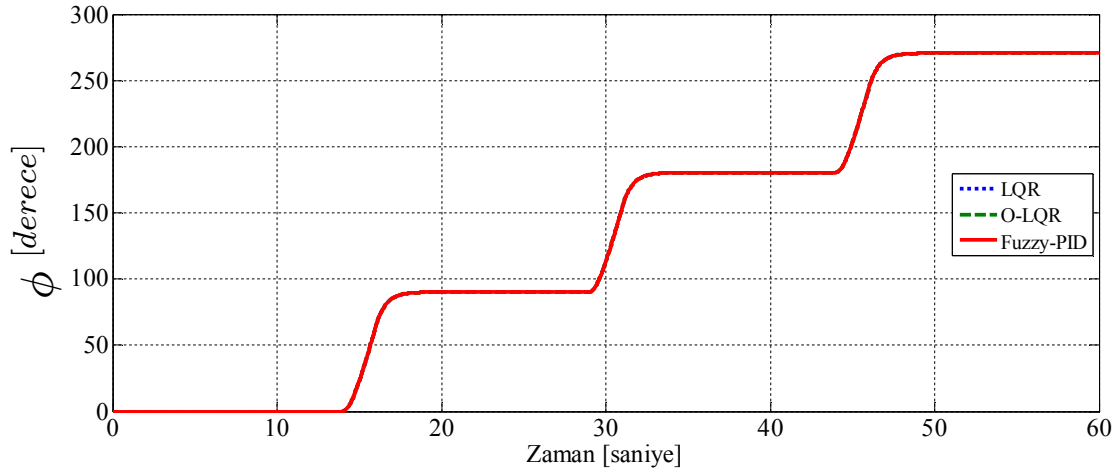
Şekil 8.17. Kare yörüngeye ait sağ motor voltaj grafiği



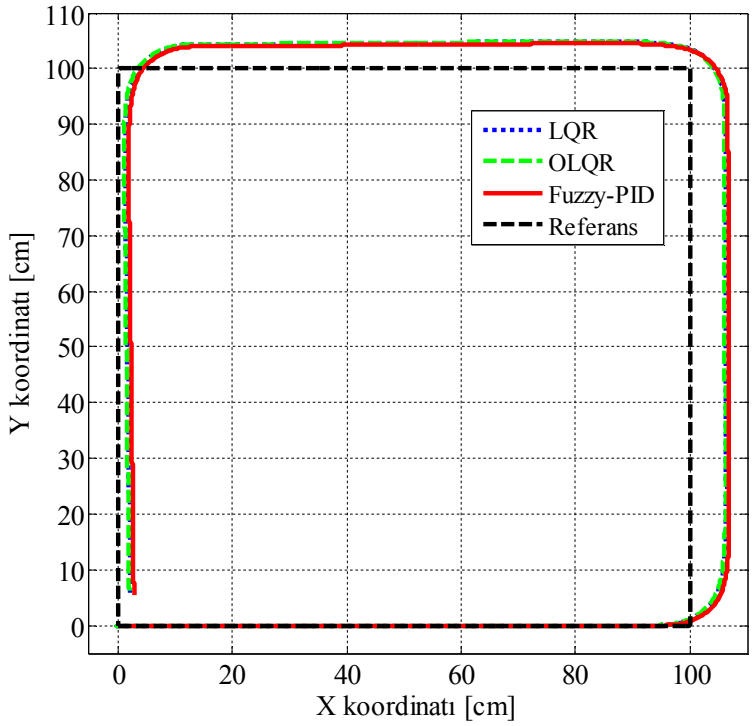
Şekil 8.18. Kare yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği



Şekil 8.18-a. Kare yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği (0-5 sn.)

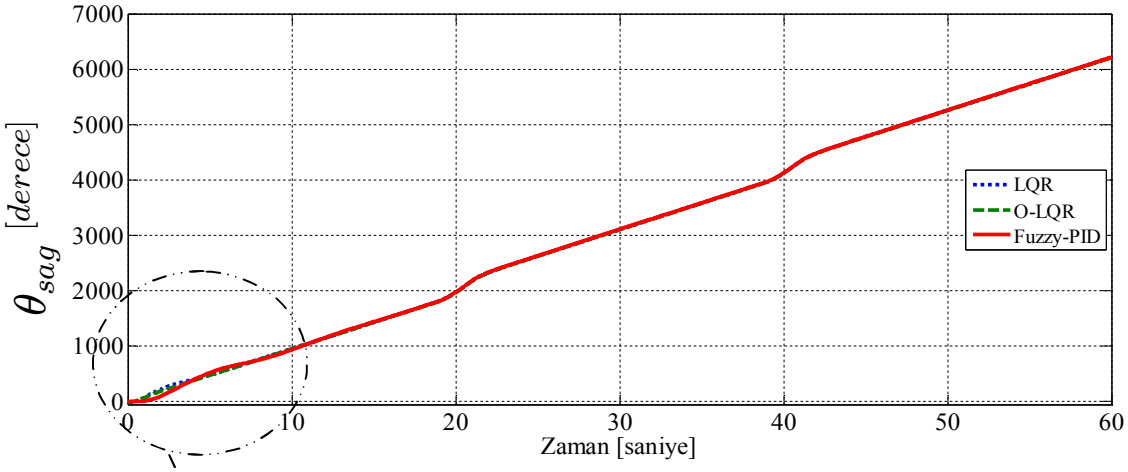


Şekil 8.19. Kare yörüngeye ait ϕ açısal konum değişim grafiği

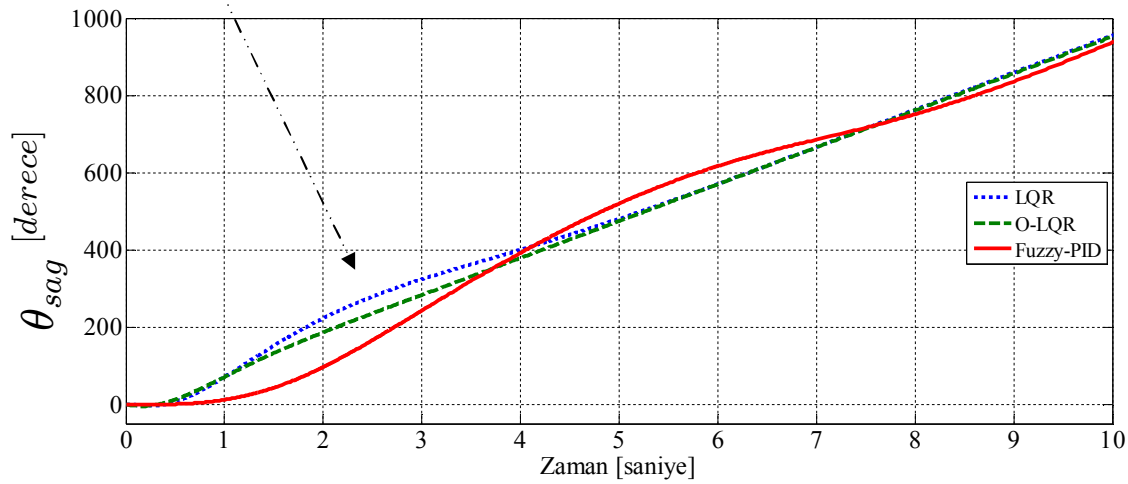


Şekil 8.20. Robotun kare yörüngede hareketinin konum grafiği

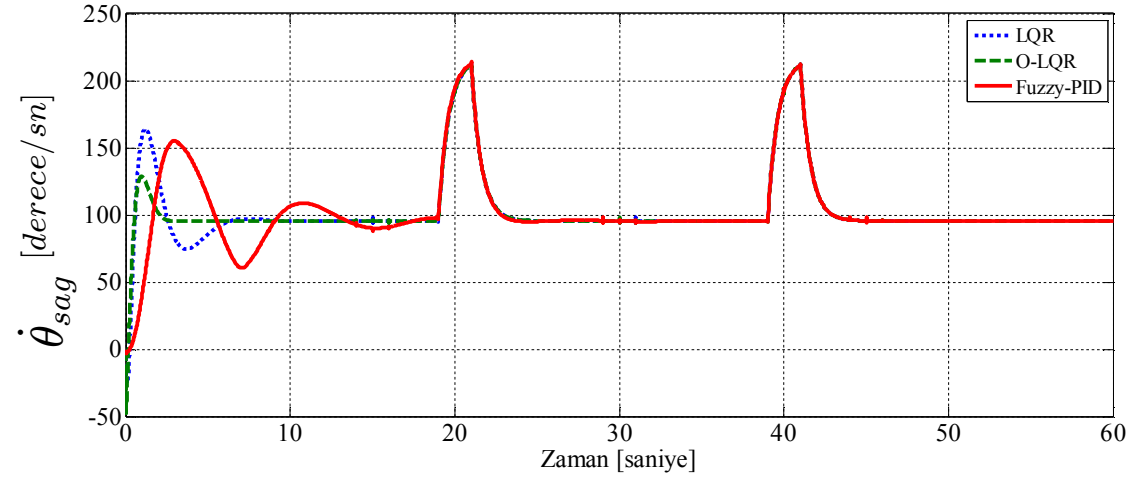
8.3. Üçgen Yörüngeye ait Sonuçlar



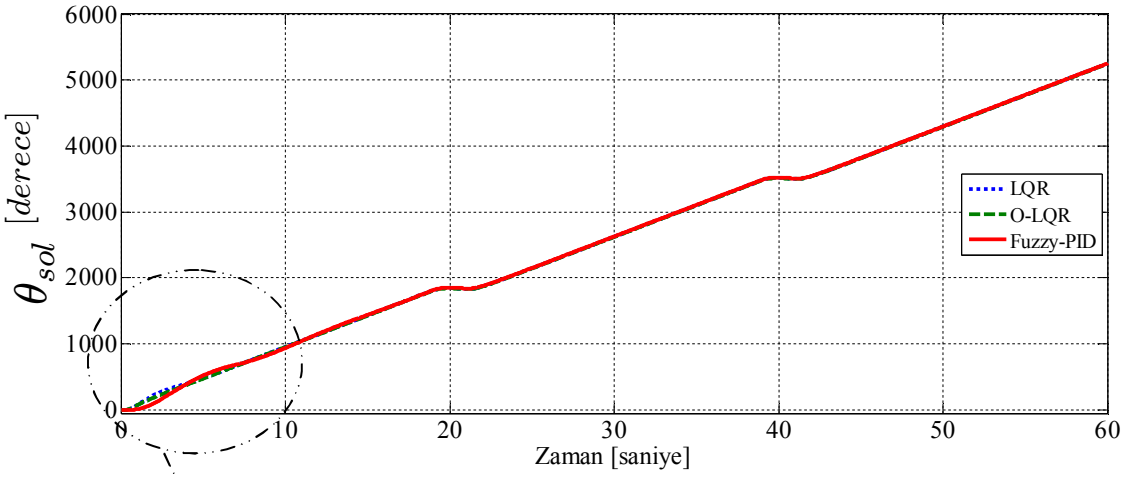
Şekil 8.21. Üçgen yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği



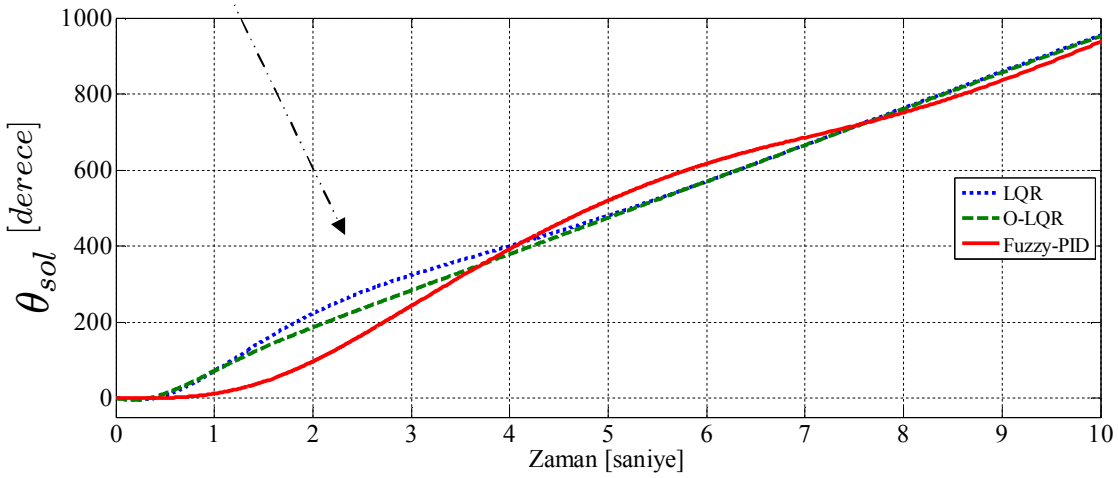
Şekil 8.21-a. Üçgen yörüngeye ait $\theta_{sağ}$ açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



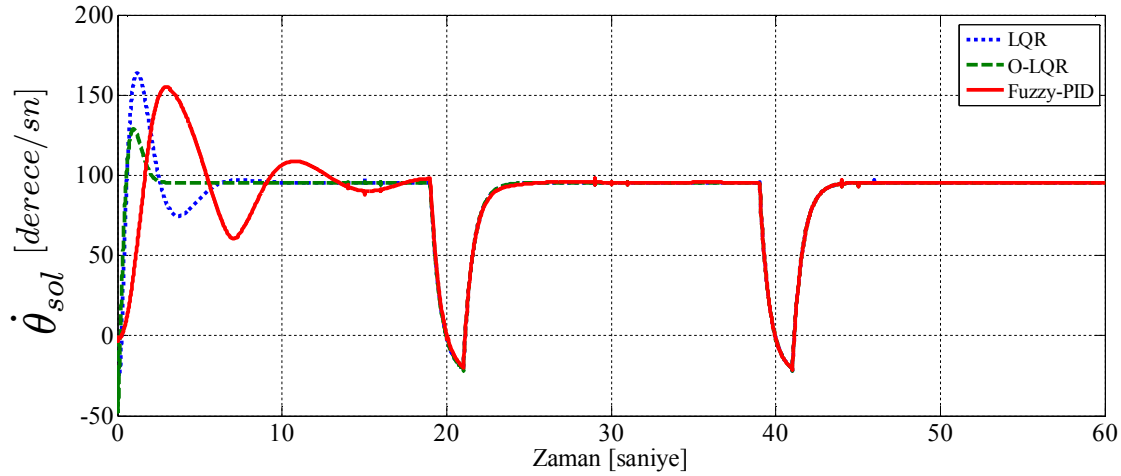
Şekil 8.22. Üçgen yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sağ}$ açısal hız değişim grafiği



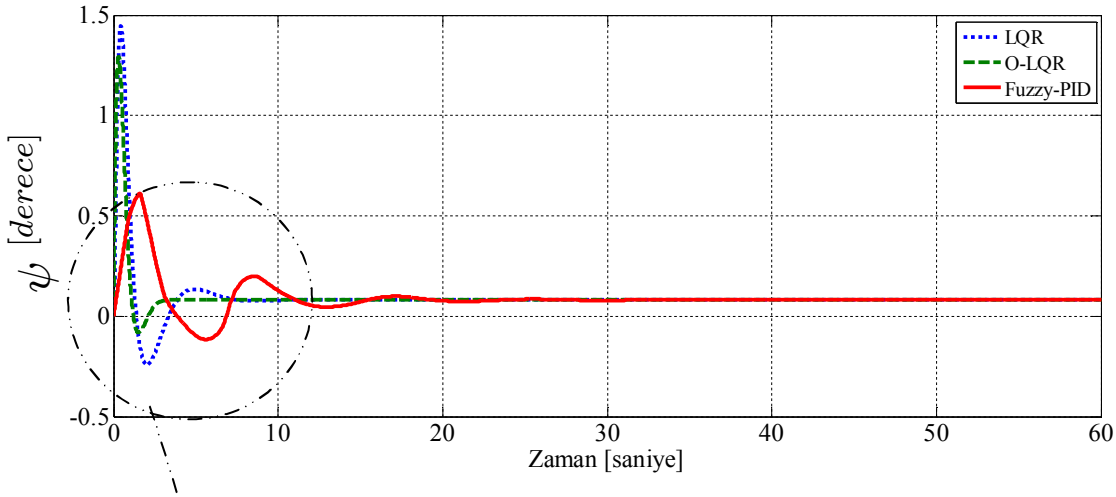
Şekil 8.23. Üçgen yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği



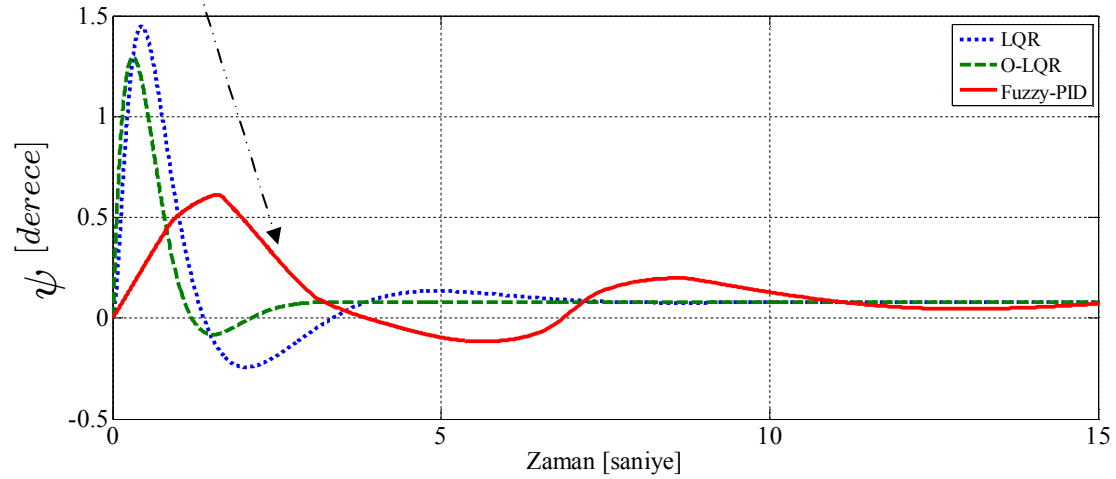
Şekil 8.23-a. Üçgen yörüngeye ait θ_{sol} açısal konum değişim grafiği (0-10 sn.)



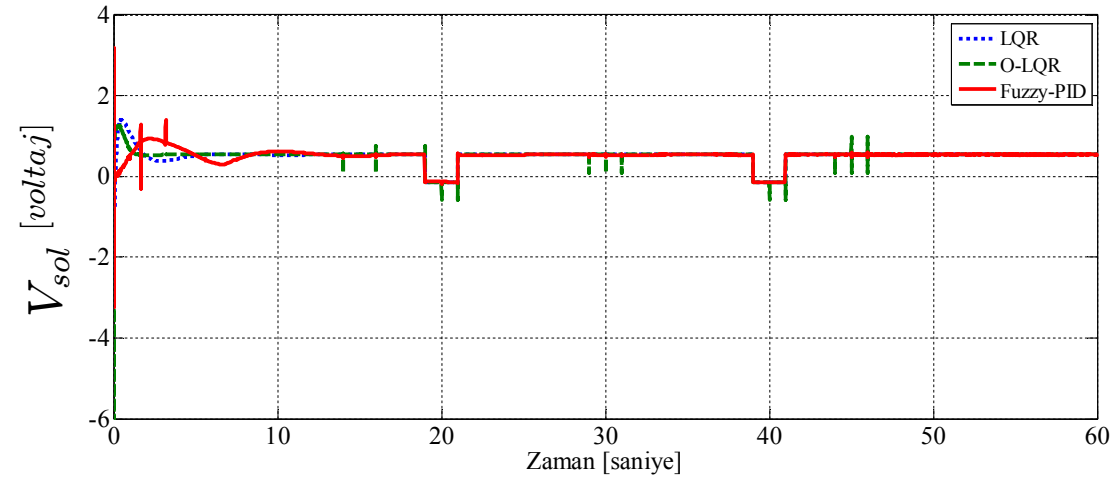
Şekil 8.24. Üçgen yörüngeye ait $\dot{\theta}_{sol}$ açısal hız değişim grafiği



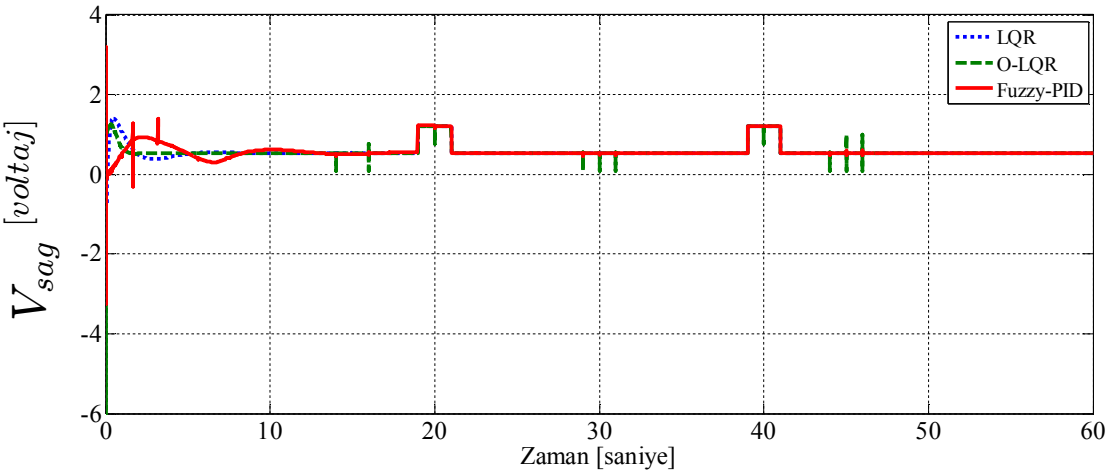
Şekil 8.25. Üçgen yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği



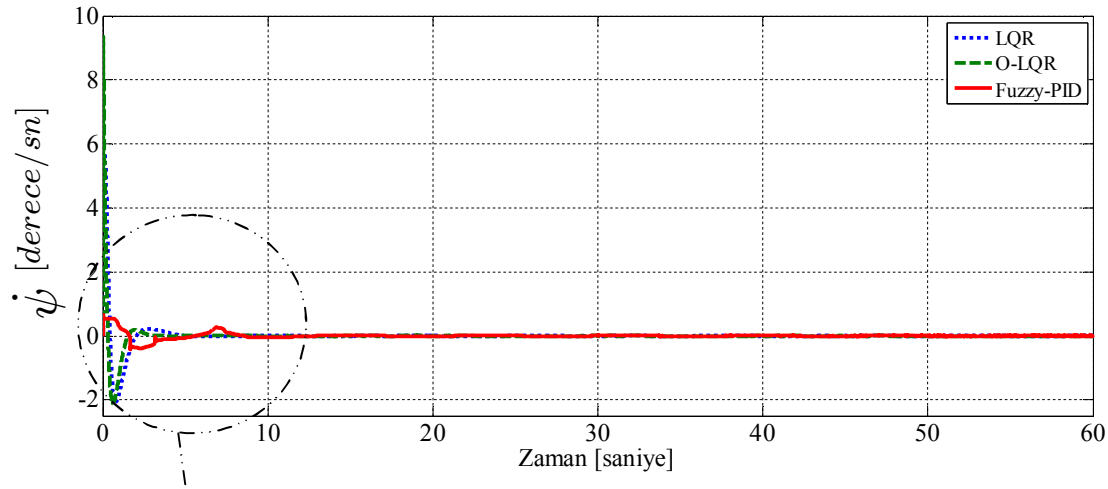
Şekil 8.25-a. Üçgen yörüngeye ait ψ açısal konum değişim grafiği (0-15 sn.)



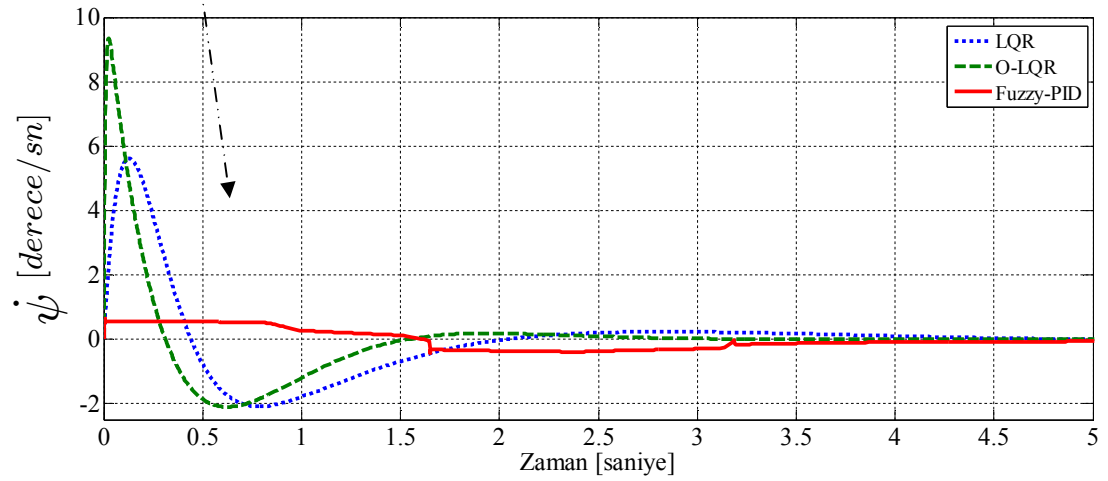
Şekil 8.26. Üçgen yörüngeye ait sol motor voltaj grafiği



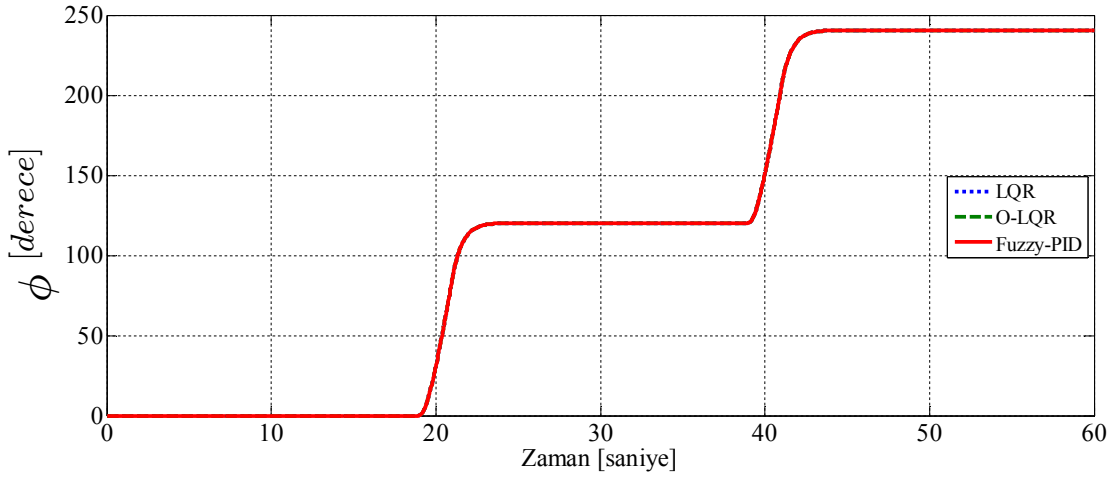
Şekil 8.27. Üçgen yörüngeye ait sağ motor voltaj grafiği



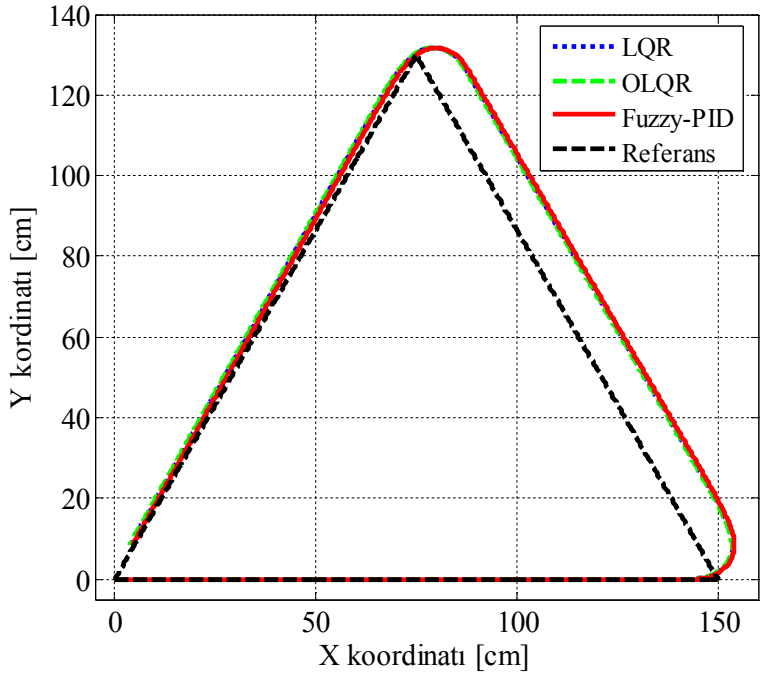
Şekil 8.28. Üçgen yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği



Şekil 8.28-a. Üçgen yörüngeye ait $\dot{\psi}$ açısal hız değişim grafiği (0-5 sn.)



Şekil 8.29. Üçgen yörüngeye ait ϕ açısal konum değişim grafiği



Şekil 8.30. Robotun üçgen yörüngede hareketinin konum grafiği

Simülasyon sonuçlarına bakıldığında her bir kontrolcünün, robotun daire, kare ve üçgen yörüngedeki hareketinde benzer eğilimde sonuçlar verdiği ancak kontrolcülerin birbirlerine göre sistem değişkenleri üzerinde farklı etki gösterdiği görülmektedir.

Şekil 8.1, Şekil 8.11 ve Şekil 8.21. 'de $\theta_{sağ}$ 'ın değişim grafikleri, Şekil 8.1-a., Şekil 8.11-a. ve Şekil 8.21-a. 'da ise detay görünümleri verilmiştir. Şekil 8.3, Şekil 8.13 ve Şekil 8.23. 'de θ_{sol} 'ın değişim grafikleri, Şekil 8.3-a., Şekil 8.13-a. ve Şekil 8.23-a. 'da ise detay görünümleri verilmiştir. $\theta_{sağ/sol}$'ın değişimine baktığımızda üç kontrolcünün de birbirine yakın davranış gösterdiği görülmüştür.

Şekil 8.2, Şekil 8.12 ve Şekil 8.22 'de verilen $\dot{\theta}_{sağ}$ 'ın değişim grafiklerine ve Şekil 8.4, Şekil 8.14 ve Şekil 8.24 'de verilen $\dot{\theta}_{sol}$ 'ın değişim grafiklerine bakıldığında, O-LQR kontrolcünün daha az maksimum aşmayla ve daha kısa sürede yerleşme sağlayarak, diğer iki kontrolcüye göre daha yüksek kontrol performansı gösterdiği görülmektedir.

Kontrolcü tasarımının en önemli kriteri olan sistemin denge açısı (yunuslama açısı) ψ 'in değişim grafikleri Şekil 8.5, Şekil 8.15 ve Şekil 8.25 'de, detay görünümleri ise Şekil 8.5-a., Şekil 8.15-a. ve Şekil 8.25-a. 'da verilmiştir. Grafiklerden de görülebileceği gibi, Fuzzy-PID kontrolcüdeki maksimumun aşma oranı, LQR ve O-LQR kontrolcülerine göre iki kattan fazla azalmış ancak yerleşme süresi artmıştır.

Sistemin denge açısıal hızı $\dot{\psi}$ 'in değişim grafiklerini Şekil 8.8., Şekil 8.18. ve Şekil 8.28 'de, detay görünümleri Şekil 8.8-a., Şekil 8.18-a. ve Şekil 8.28-a.'da verilmiştir. Denge açısına benzer şekilde, açısal hızda da Fuzzy-PID kontrolcü, LQR ve O-LQR kontrolcülere göre maksimum aşmada ciddi oranda azalma sağlayarak diğer iki kontrolcüye kıyasla daha karalı bir denge kontrolü sağlamıştır.

Şekil 8.6., Şekil 8.16. ve Şekil 8.26. 'da sol motor voltaj değeri değişim grafikleri, Şekil 8.7., Şekil 8.17. ve Şekil 8.27. 'de ise sağ motor voltaj değeri değişim grafikleri verilmiştir. Fuzzy-PID kontrolcüde voltaj değerlerinin, LQR ve O-LQR kontrolcü voltaj değerlerine göre daha gürültülü olduğu görülmektedir.

Şekil 8.9., Şekil 8.19. ve Şekil 8.29. ’da verilen sistemin sola/sağa dönüş açısı ϕ ’ın değişim grafiklerinde, üç kontrolcüde de dairesel hareket kontrolü aynı kazanç değeriyle (k_phi) açık çevrim olarak gerçekleştirildiği için, beklendiği şekilde kontrolcü cevapları birebir aynı olmuştur.

Robotun şekil 8.10. ’da daire yörüngede, Şekil 8.20. ’de kare yörüngede, Şekil 8.30 ’da üçgen yörüngede hareketinin x-y düzlemindeki konum grafikleri verilmiştir. Grafiklerde; LQR, O-LQR ve Fuzzy_PID kontrolcülerinin, referans değerden belli oranda sapma göstererek, birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. $\theta_{sağ/sol}$ ve $\dot{\theta}_{sağ/sol}$ ‘da geçekleşen maksimum aşmaların ve yerleşme süresinin etkisiyle referans yörüngeden sapmaların gerçekleştiği anlaşılmıştır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; iki tekerlekli kendi kendini dengeleyebilen birbirinden bağımsız iki elektrik motoru ile tahrik edilen bir robotun tasarımı ve bulanık mantık tabanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana hedefi, robotun herhangi bir yörüngede hareket ederken kendi kendini dengede tutabilmesidir. Çalışma kapsamında robotun matematiksel modeli elde edilmiş ve kontrolü için bulanık mantık (Fuzzy Logic) tabanlı kontrolcü kullanılmıştır. Ön tasarımı yapılan bulanık mantık tabanlı kontrolcü parametreleri Arı Algoritması (AA) kullanılarak optimize edilmiştir. Optimize edilmiş olan bulanık mantık tabanlı kontrolcünün etkinliğinin görülmesi amacıyla, robot için ayarlanan LQR kontrolcünün ve optimize edilmiş olan bulanık mantık tabanlı kontrolcünün performansları MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyon çalışmalarında karşılaştırılmış ve sonuçlar grafikler şeklinde sunulmuştur.

İki tekerlekli robotik sisteme (2TRS) ait matematiksel model Lagrange Hareket Denklemi kullanılarak elde edilmiştir. Robotun doğrusal ve dairesel hareketi için iki ayrı durum-uzay modeli oluşturulmuştur. Robotun kontrolü için Y.Yamamoto ’un 2008 yılında ticari bir ürün olan LEGO Mindstorms NXT isimli iki tekerlekli mobil bir sistemin kontrolü için tasarladığı LQR kontrolcüde, belirlediği Q ve R matrisleri referans alınarak LQR kontrolcü tasarlanmıştır. LQR kontrolcüyü iyileştirmeye yönelik olarak LQR kontrolcü kazançları güncel bir optimizasyon yöntemi olan Arı Algoritması (AA) ile optimize edilerek, Optimize LQR kontrolcü (O-LQR) elde edilmiştir. Bulanık mantık üyelik fonksiyon parametrelerinin, bulanık mantık ölçek katsayılarının ve PID kontrol kazançlarını aynı algoritma içerisinde Arı Algoritması ile optimize edilerek elde edildiği Fuzzy-PID kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fuzzy-PID kontrolcü tasarımında, literatürdeki benzer çalışmalar göz önüne alınarak, sistemin denge kontrolü için bulanık mantık kontrolcü, konumu kontrolü için PID kontrolcü uygulanmış, toplam kontrolcü çıkışı voltaj olarak sisteme girilmiştir. Geliştirilen üç kontrolcü için, robotun üç farklı (daire, kare, üçgen) yörüngedeki hareketi Matlab/Simulink ortamında simüle edilerek, kontrolcülerin performansları karşılaştırılmıştır.

İki tekerlekli robotik sistemin kontrolünde, sistemin kendi kendini dengede dengeleyebilmesi ve dengede kalarak belirli bir yörüngede hareket edebilmesi birbirine bağılı kontrol kriterleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple Arı Algoritması optimizasyonu uygulamasında, bu iki kriterin amaç fonksiyonundaki ağırlıkları sistem kontrol cevabını doğrudan etkilemektedir.

O-LQR ve Fuzzy-PID kontrolcülerin optimizasyonunda, robotun kendi kedini dengeleyerek hareket edebilmesi öncelikli olarak hedeflenmiş, her iki optimizasyonda da amaç fonksiyonunda (toplam hata değerinde) denge (yunuslama) açısının ve açısal hızının hata değerine ağırlık verilmiştir. Robotun konumunun referans yörüngeye göre hata değeri amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir, diğer bir ifadeyle yörünge takibi kontrolcü tasarımda dikkate alınmamıştır. Arı Algoritması optimizasyon parametrelerinin belirlenmesinde, D.T.Pham ve M.Kalyoncu 'nun 2008 ve 2009 yılarında elastik uzuvlu bir robot kolunun kontrolü için PID ve Bulanık Mantık kontrolcü tasarımında uyguladıkları optimizasyon parametreleri referans alınmıştır.

Çalışma kapsamında iki tekerlekli robotik sistemin kontrolü için tasarlanan LQR, Optimize LQR (O-LQR) ve Bulanık Mantık kontrolcü ile PID kontrolcünü beraber kullanıldığı kontrolcü (Fuzzy-PID) performansları birbirlerine göre karşılaştırıldığında,

- Her üç kontrolcünün de, robotun kendi kendini dengede tutma kararlılığını sürdürerek; daire, kare ve üçgen yörüngede hareket kontrolünü başarılı bir şekilde gerçekleştirebildiği,
- Her bir kontrolcünün, robotun üç farklı yörüngedeki hareketi üzerinde de benzer eğilim gösterdiği ancak kontrolcülerin birbirlerine göre sistem değişkenleri üzerinde farklı performans gösterdiği,
- Kontrolcülerin sağ/sol teker açısal konumu üzerinde benzer eğilimde etki gösterdiği, ancak sağ/sol teker açısal hız geçici rejim cevabına bakıldığında; O-LQR kontrolcünün maksimum aşma, yerleşme zamanı, ve yükselme zamanı açısından diğer iki kontrolcüye göre daha iyi bir performans gösterdiği, Fuzzy-PID kontrolcünün LQR kontrolcüye göre maksimum. aşma değerinde bir miktar azalma sağlarken, yerleşme zamanının uzadığı,
- Fuzzy-PID kontrolcünün sistemin öncelikli kontrol kriteri olan denge açısının minimize edilmesine yönelik yüksek performans gösterdiği, LQR ve O-LQR kontrolcüye göre yerleşme zamanında bir miktar artış göstersede maksimum aşma değerinde yaklaşık 2,5 kat azalma sağladığı, aynı şekilde O-LQR kontrolcünün LQR kontrolcüye göre geçici durum cevapları üzerinde iyileşme sağladığı ve kontrolcülerin kalıcı durum hata değerlerinin aynı gerçekleştiği,

- Fuzzy-PID kontrolcü, denge açısı üzerindeki etkisine benzer şekilde, açısal hızında da diğer iki kontrolcüye göre çok daha yüksek kontrol performansı ile maksimum aşma değerinde ciddi oranda azalma sağladığı, Q-LQR kontrolcünün LQR kontrolcüye göre yükselme zamanında iyileşme sağlarken maksimum aşma değerinde bir miktar artış gösterdiği,
- Fuzzy-PID kontrolcünün sağ/sol motor voltaj değerleri üzerinde etkine bakıldığında, LQR ve O-LQR kontrolcüye göre beklendiği şeklide daha gürültülü bir voltaj değişimi gösterdiği
- Kontrolcülerin, robotun yörüngelerdeki hareketinde benzer etki göstererek x-y düzlemindeki konum cevaplarının birbirlerine yakın gerçekleştiği ve optimizasyon amaç fonksiyonunda yörünge takibi ve/veya konum hata değeri dikkate alınmadı için referans yörüngeyi belirli değerde hata ile takip ettiği,
- Arı Algoritması ile; LQR ve PID kontrolcü kazanç katsayılarının, özellikle BMK üyelik fonksiyonu parametrelerinin başarılı bir şeklide optimize edilebildiği ve kontrol cevabında iyileşme sağlayabildiği,
- Arı Algoritması ile optimizasyon tekniğinin, farklı sistemler için geliştiren mevcut kontrolcülerin iyileştirilmesinde ve/veya yeni kontrolcü tasarımlarında kullanılması, her sistemde farklı etki gösterebilmesine rağmen genel olarak kontrol performansı üzerinde olumlu etki yapabileceği,

sonucuna varılmıştır.

Sistemin matematiksel modelinin doğrusallaştırılmasından ve sistemin doğrusal hareketi ile dairesel hareketinin birbirinden bağımsız kabul edilmesinden kaynaklanan kayıpların, tasarlanan kontrolcülerin davranışı üzerindeki etkilerini inceleyebilmek amacıyla, sistemin gerçek modeli üzerinde deneysel çalışmalar yapılarak, deneysel sonuçlar ve bilgisayar simülasyonu sonuçları karşılaştırılabilir.

Sistemin matematiksel modeli; Newton metodu, Hamilton metodu gibi nümerik yöntemlerle ve/veya *ADAMS, Simmechanics* gibi dinamik modelleme yazılımları ile sistem giriş ve çıkışları farklı olabilecek şeklide modellenebilir, sistemin kontrolü için farklı kontrolcü tasarımları gerçekleştirilerek, uygulanabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda; Arı Algoritma optimizasyon parametrelerinin daha uzman bir yaklaşım ile belirlenmesi, amaç fonksiyonunun sağlanmasında (toplam hata değerinin minimize edilmesinde) daha etkin sonuç vererek O-LQR ve Fuzzy-PID kontrolcülerin performansları üzerinde olumlu etki yapacaktır.

Amaç fonksiyonunun belirlenmesinde yörünge takibi dikkate alınarak, robotun konum hata değerini minimize etmeye yönelik optimizasyon uygulamalarıyla kontrolcülerin yörünge takip performansları iyileştirilebilir veya tamamen robotun konum kontrolünü amaçlayan yeni bir kontrolcü tasarlanabilir.

Bu çalışma, kontrol teorisi açısından eğitici yönü yüksek olan iki tekerlekli robotik sistemlerin kontrolü üzerine yapılacak çalışmalara katkı sağlayacaktır. Ayrıca bu çalışma kapsamında anlatılan, literatürde oldukça güncel bir konu ve başarılı bir optimizasyon yöntemi olan Arı Algoritması optimizasyonu ile kontrolcü tasarımı, bundan sonraki benzer çalışmalara kaynak oluşturacaktır.

10. KAYNAKLAR

Acar, C., 2008, A Robust Control of Two-Wheeled Mobile Manipulator with Underactuated Joint by Nonlinear Backstepping Method, M.Sc. Thesis, *Keio University Graduate School of Science and Technology School of Integrated Design Engineering,* Japan.

Akyol, S., Alataş, B., 2012, Güncel Sürü Zekâsı Optimizasyon Algoritmaları *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi 1* , 36-50.

Altaş, H., 1999**,** Bulanık Mantık:Bulanık Denetim**,** *Enerji, Elektromekanik-3e*, Eylül, Sayı 64, Sayfalar:76-81, Bilesim Yayıncılık A.Ş., İstanbul.

Anderson, B. D. O., Moore, J. B., 1989, Optimal Control – Linear Quadratic Methods, *Prentice Hall*, ISBN: 0 – 13 – 638651 – 2.

Aström, K.J., Furuta, K., 2000, Swinging up a pendulum by energy control, *Automatica 36:287–295.*

Azimi, M.M., Koofigar, H.R., 2013, Model Predictive Control for a Two Wheeled Self Balancing Robot, *Proceeding of the 2013 RSIIISMInternational Conference on Robotics and Mechatronics*, February 13-15, 2013, Tehran, Iran, 152 – 157.

Baştürk, B., Karaboğa, D., 2006, An Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Numeric Function Optimization, *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Indianapolis,Indiana, USA.

Baykasoğlu, A., 2001, Goal Programming Using the Multiple Objective Tabu Search, *Journal of Operational Research Society*, 52(12), 1359-1369.

Baykasoğlu, A., 2006, Applying the Multiple Objective Tabu Search to Continuous Optimization Problems with a Simple Neighborhood Strategy, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 65, 406-424.

Baykasoğlu, A., Özbakır, L., Tapkan, P., 2007, Artificial Bee Colony Algorithm and its Application to Generalized Assignment Problem *Swarm Intelligence: Focus on Ant and Particle Swarm Optimization*, Hazırlayanlar: Chan, F.T.S., Tiwari, M.K., I-Tech Education and Publishing,Vienna, Austria, 113-144.

Becker, A. T., 2008, Mobile Robot Motion-Planning Using Wireless Signals For Localization, M.Sc., *Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign*, USA.

Biroğul, S., 2005, Genetik Algoritma Yaklaşımıyla Atölye Çizelgeleme, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, 95s, Ankara.

Bugeja, M., 2003, Non-Linear Swing-Up and Stabilizing Control of an Inverted Pendulum System, *EUROCON Ljubljana*, Slovenia.

Burkert, M., Groll, T., Lai, T., McCoy, T. and Smith, D., 2004, Segway Design Project, Project Report, *Grand Valley State University The Padnos School of Engineering*, USA.

Butler, L. J. and Bright, G., 2008, Feedback Control of a Self-balancing Materials Handling Robot, *10th Intl. Conf. on Control, Automation, Robotics and Vision,* 17–20 December 2008, pp. 274-278, Hanoi, Vietnam.

Chee, Y. O. and Abidin, M. S. Z., 2006, Design and Development of Two Wheeled Autonomous Balancing Robot, *Student Conference on Research and Development*, June 27-28 2006, pp. 169-172, Shah Alam, Selangor, Malaysia.

Chi, G., Hausbach, J. and Hunter, B., 2005, Segbot, *Senior Design Project, University of Illinois at Urbana-Champaign*, USA.

Chia-Hong, Chen, Jean, J.-H., Dao-Xiang, Xu, 2011, Application of fuzzy control for self-balancing two-wheel vehicle, *Machine Learning and Cybernetics*.

Chih, Hui C.; Chun, Chieh C., 2010, Wheeled inverted pendulum control based on model-free fuzzy control strategy, *SICE Annual Conference.*

Chiu, C. H. and Peng, Y. F., 2006, "Design and Implement of the Self-Dynamic Controller for Two-Wheel Transporter", *2006 IEEE International Conference on Fuzzy Systems,* July 16-21 2006, pp. 480-483, Vancouver, BC, Canada.

Choi, D. and Oh, J. H., 2008, Human-friendly Motion Control of a Wheeled Inverted Pendulum by Reduced-order Disturbance Observer, *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 19-23 2008, pp. 2521-2526, Pasadena, CA, USA.

Cong, H. N., Kien, N., V. and Du, H., D., 2013, Applying order reduction model algorithm for balancing control problems of two-wheeled mobile robot, *8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Melbourne, VIC, 1302 – 1307.

Fahmy, A. A., 2012, Using the Bees Algorithm to select the optimal speed parameters for wind turbine generators, *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences (2012) 24*, 17–26.

Fahmy, A. A., Kalyoncu, M. and Castellani, M., 2012, Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Journal of Systems and Control Engineering,* Part I, 226(4), 497-508 (April 2012).

Gans, N. R. and Hutchinson, S. A., 2006, Visual Servo Velocity and Pose Control of a Wheeled Inverted Pendulum through Partial-Feedback Linearization, *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 9-15 2006, pp. 3823-3828, Beijing, China.

Gocmen, A., 2011, Desıgn Of Two Wheeled Electrıc Vehıcle, M.Sc Thesis, *Atılım University*, Ankara.

Goher, K. M. and Tokhi, M. O., 2010, Development, Modeling and Control of a Novel Design of Two-Wheeled Machines, *Cyber Journals Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Robotics and Control (JSRC*), December Edition.

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)*, December Edition.

Goher, K.M., and Tokhi, M.O., 2011, Dynamıc modelıng and control of a two wheeled Robotıc vehıcle wıth a vırtual payload, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences,* Vol. 6, No. 3, March 2011.

Grasser, F., Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, A.C., 2002, JOE: a mobile, inverted pendulum", *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 49, Issue 1, Feb* 2002 Page(s):107 – 114.

Grasser, F., D'arrigo, A., Colombi, S. and Rufer, A., 2002, Joe: A Mobile, Inverted Pendulum, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 49, pp. 107-114.

Grepl, R., 2009, Balancing Wheeled Robot: Effective Modelling, Sensory Processing And Simplified Control, *Engineering Mechanics*, Vol. 16, No: 2.

Gülcü, A., 2006, Yapay Zeka Tekniklerinden Genetik Algoritma ve Tabu Arama Yöntemlerinin Eğitim Kurumlarının Haftalık Ders Programlarının Hazırlanmasında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Ü. FBE,* İstanbul.

Hladek, D., 2007, Multi-agent fuzzy control of the robotic soccer, *Proceedings of the 5th Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, Popard, Slovakia.

Ho, K. C. R., 2005, Balancing Wheeled Robot, Research Project, *University of Southern Queensland*, Australia.

Hu, J. S., Tsai, M. C., Hu, F. R. and Hori, Y., 2010, Robust Control For Coaxıal Two-Wheeled Electrıc Vehıcle, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 172-180.

Hu, T., Zhang, H., Dai, X., Xai, X., Liu, R. and Qiu, B., 2007, Design and Implementation of Self-Balancing Coaxial Two Wheel Robot Based on HSIC, *Proceeding of SPIE,* Volume 6794, 6794H-1-9.

Huang, C. N., 2010, The Development of Self-Balancing Controller for One-Wheeled Vehicles, *Scientific Research Journals of Engineering*, pp.212-219.

Huei, E.Y. and Hashimoto, S., 2012, Development of a stair traversing two wheeled robot, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 7-12, Vilamoura, Algarve, Portugal, 3125 – 3131.

Jamil, O., Jamil, M., Ayaz, Y., Ahmad, K., 2014, Modeling, control of a two-wheeled self-balancing robot, *2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE)*, 191 - 199

Jean, H.J. and Wang, C.K., 2009, Design And Implementatıion Of A Balancing Controller for Two-Wheeled Vehicles Using A Cost-Effective MCU, *Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, July 12-15 2009, pp. 3329-3334, Baoding, China.

Jeong, S. and Takahashi, T., 2007, Wheeled Inverted Pendulum Type Assistant Robot: Inverted Mobile, Standing, and Sitting Motions, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* Oct 29 - Nov 2 2007, pp. 1932-1937, San Diego, CA, USA.

Ji, C.W., Lei, F., Kin, K., 1997, Fuzzy logic controller for an inverted pendulum system, *ICIPS'97, 1997 IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, Volume 1, pp. 185 - 189.

Jian-Xin Xu, Tong Heng Lee, 2014, Design and Implementation of Integral Sliding-Mode Control on an Underactuated Two-Wheeled Mobile Robot, IEEE Transactıons on Industrıal Electronıcs, Vol. 61, No. 7.

Junfeng, W., Wanying, Z., 2011, Design of Fuzzy Logic Controller for Two-wheeled Self-balancing Robot, *The 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST),* 1266 – 1270.

Junfeng, W., Wanying, Z., and Shengda, W., 2012, A Two-Wheeled Self-Balancing Robot with the Fuzzy PD Control Method, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume*, Article ID 469491.

Junfeng, W., Wanying, Z., 2011, Design of fuzzy logic controller for two-wheeled self-balancing robot, Strategic *Technology (IFOST)*.

Karaboga, D., 2005, An Idea Based On Honey Bee Swarm For Numerical Optimization. Technical, Report-TR06, *Erciyes University Engineering Faculty Computer Engineering Department,* Kayseri.

Karaboga, D., Akay, B., 2009, A Survey: Algorithms Simulating Bee Swarm Intelligence, *Artificial Intelligence Review*, vol. 31 no., 1-4, 61-85.

Karaboğa, D., 2011, Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Dağıtım.

Karaboğa, D., Baştürk, B., 2007, A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.

Krishen, J., Becerra V.M., *2006*, Efficient Fuzzy Control of a Rotary Inverted Pendulum Based on LQR Mapping, *IEEE International Symposium on Intelligent Control,* pp. 2701 – 2706, Germany.

Kumaga, M. and Ochiai, T., 2009, Development of a Robot Balanced on a Ball, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* Japan.

Li, J., Gao, X., Huang, Q., Du, Q. and Duan, X., 2007, Mechanical Design and Dynamic Modeling of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, August 18 – 21 2007, pp. 1614-1619, Jinan, China.

Lin, S.C., Tsai, C.C and Huang, H.C., 2009, Nonlinear Adaptive Sliding-Mode Control Design for Two-Wheeled Human Transportation Vehicle, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics,* October 2009, pp.1965-1970, San Antonio, TX, USA.

Lin, S.C., Tsai, C.C. and Lou, W.L., 2007, Adaptive Neural Network Control of a Self-balancing Two-wheeled Scooter, *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Nov. 2007, pp. 868-873, Taipei, Taiwan.

Mamdani, E.H. and Assilian, S., 1975, An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *Int. J. Man-Machine Studies* 7, pp. 1-13.

Mamdani, E.H., 1976, Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers, *Int. J. Man-Machine Studies,* 8, pp.669-678.

Mamdani, E.H., 1974, Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. Iee*, Vol.121, No.12, December 1974, pp. 1585-1588.

Maravall, D., Zhou C. and Alonso, J., 2005, Hybrid fuzzy control of the inverted pendulum via vertical forces,. *International Journal of Intelligent Systems*, Volume 20 Issue 2, pp.195 - 211.

Morrell, J.B. and Field, D., 2007, Design of a Closed Loop Controller for a Two Wheeled Balancing Transporter, *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 29 – November 2 2007, pp. 4059-4064, San Diego, USA.

Murty, K.G., 2003, Optimization Models For Decision Making, Internet Edition, Chapter 1: Models for Decision Making, vol. 1,1-18.

Muskinja, N., Tovornik, B., 2006, Swinging Up and Stabilization of a Real Inverted Pendulum, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, pp.631 - 639.

Nagarajan U., Mampetta A., Kantor G. A. and Hollis R. L., 2009, State Transition, Balancing, Station Keeping, and Yaw Control for a Dynamically Stable Single Spherical Wheel Mobile Robot, *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation,* May 12-17 2009, pp. 998-1003, Japan.

Nakpong, N., Yamamoto, S., 2012, Just-In-Time Predictive Control for a Two-Wheeled Robot, 2012 *Tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering*, 95 – 98.

Nawawi, S.W., Ahmad ,M.N. and Osman, J.H.S., 2008, Real-Time Control of a Two-Wheeled Inverted Pendulum Mobile Robot, *World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 39*, pp. 214-220.

Nundrakwang, S., Benjanarasuth, T., Ngamwiwit, J., Komine, N., 2005, Hybrid PD - Servo State Feedback Control Algorithm for Swing up Inverted Pendulum System, *ICCAS2005*, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea.

Ooi, R.C., 2003, Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot, Final Year Thesis, The *University of Western Australia School of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Mathematical Sciences University of Western Australia*, Australia.

Oral, Ö., Çetin, L. ve Uyar, E., 2010, A Novel Method on Selection of Q And R Matrices In The Theory Of Optimal Control, *International Journal of Systems Control*, Cilt.1, No:2, s: 84-92.

Özbakir, L., Baykasoğlu, A., Tapkan, P., 2009, Bees Algorithm for Generalized Assignment Problem, *Applied Mathematics and Computation*, 2009.11.18.

Özsağlam, M.Y., 2009, Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritmasının Gezgin Satıcı Problemine Uygulanması ve Performansının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 119s, Konya.

Pannil, P., Klaeoyotha, A., Ukakimaparn, P., Trisuwannawat, T., Tirasesth, K. and Kominet, N., 2008, Development of Inverted Pendulum System at KMITL, *2008 International Symposium on Communications and Information Technologies*, pp. 389 – 393.

Pham D.T., Castellani M., Le-Thi, H.A., 2014, Nature-Inspired Intelligent Optimisation using The Bees Algorithm, *Transactions on Computational Intelligence XIII*, Volume 8342, 2014, pp 38-69.

Pham, D.T. and Kalyoncu, M., 2009, Optimisation of a Fuzzy Logic Controller for a Flexible Single-Link Robot Arm Using the Bees Algorithm, *Cardiff CF24 3AA,* Cardiff University, UK, 2009 IEEE.

Pham, D.T., Afify, A., Koç, E., 2007b, Manufacturing Cell Formation Using the Bees Algorithm, *Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference*, Cardiff, UK.

Pham, D.T., Castellani, M., Ghanbarzadeh, A., 2007d, Preliminary Design Using the Bees Algorithm, *8th International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance*, Euspen, UK, 420-429.31.

Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., 2007, Multi-Objective Optimisation Using the Bees Algorithm, *Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference*,Cardiff, UK.

Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., Otri, S., 2006e, Application of the Bees Algorithm to the Training of Radial Basis Function Networks for Control Chart Pattern Recognition, *5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Ischia, Italy, 711-716.

Pham, D.T., Koç, E., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., 2006c, Optimisation of the Weights of Multi-Layered Perceptrons Using the Bees Algorithm, *5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey, 38-46.

Pham, D.T., Koç, E., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., Rahim,S., Zaidi, M., 2006a, The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, *2nd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems*, 454-461.

Pham, D.T., Koç, E., Kalyoncu, M., Tınkır, M., 2008, Hierarchical PID Controller Design for a Flexible Link Robot Manipulator Using the Bees Algorithm, *Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey, Ekim 14-16, 757-765.

Pham, D.T., Koç, E., Lee, J.Y., Phrueksanant, J., 2007c, Using the Bees Algorithm to Schedule Jobs for a Machine, *8th International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance*, Euspen, UK, 430-439.

Pham, D.T., Muhamad, Z., Mahmuddin, M., Ghanbarzadeh,A., Koç, E., Otri, S., 2007a, Using the Bees Algorithm to Optimise a Support Vector Machine for Wood Defect Classification, *Innovative Production Machines and Syst. Virtual Conference*, Cardiff, UK.

Pham, D.T., Otri, S., Afify, A., Mahmuddin, M., Al-Jabbouli, H., 2007e, Data Clustering Using the Bees Algorithm, *40th CIRP International Manufacturing Syst. Seminar*, UK.

Pham, D.T., Otri, S., Ghanbarzadeh, A., Koç, E., 2006b, Application of the Bees Algorithm to the Training of Learning Vector Quantisation Networks for Control Chart Pattern Recognition, *International Conference on Information and Communication Technologies,* Damascus, Syria, 1624-1629.

Pham, D.T., Soroka, A.J., Ghanbarzadeh, A., Koç, E.,Otri, S., Packianather, M., 2006d, Optimising Neural Networks for Identification of Wood Defects Using the Bees Algorithm, *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Singapore.

Pham, D.T., Soroka, A.J., Koç, E., Ghanbarzadeh, A., Otri, S., 2007f, Some Applications of the Bees Algorithm in Engineering Design and Manufacture, *International Conference on Manufacturing Automation*, Singapore.

Qian, H., Peng L., Yun, Z. C., Feng, Y., 2011, The fuzzy controller designing of the self-balancing robot, *2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE)*, V3-16 - V3-19.

Quijano, N., Passino, K.M., 2007, Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation Theory and Application, *Conference of American Control*, UK.

Rahman, M.T.A., Ahmad, S. , Akmeliawati, R., 2013, Integrated modeling and analysis of an extendable double-link two-wheeled mobile robot, *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Wollongong, Australia, July 9-12, 1798 – 1803.

Saifizul, A.A., Zainon, Z., Abu, Osman N.A., Azlan, C.A. and Ungko Ibrahim, U.F.S., 2006, Intelligent control for self erecting inverted pendulum via adaptive neuro-fuzzy inference system, *American Journal of Applied Sciences*.

Salerno, A. and J., Angeles, 2004, The Control of Semi- Autonomous Two-Wheeled Robots Undergoing Large Pay load-Variations, *Proceedings of the 2004 IEEE lntarnatlonal Conference on Robotics and Automation,* April 2004, pp. 1740-1745, New Orleans, LA.

Sasaki, M., Yanagihara, N., Matsumoto, O. and Komoriya, K., 2005, Steering Control of the Personal Riding-type Wheeled Mobile Platform (PMP), *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* pp.1697.

Searock, J., Browning, B. and Veloso, M., 2004, Turning Segways into Robust Human-Scale Dynamically Balanced Soccer Robots, *In Proceedings of the Eighth RoboCup International Symposium*, July, 2004.

Shi, E.X., Huang, W.E. and Ling, Y.Z., 2004, Fuzzy predictive control of wheeled mobile robot based on multi-sensors, *Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, China.

Solis, J., Nakadate, R., Yoshimura, Y., Hama, Y. and Takanishi A., 2009, Development of the Two-Wheeled Inverted Pendulum Type Mobile Robot WV-2R for Educational Purposes, *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,* October 11-15 2009, pp. 2347, St. Louis, USA.

Spong, M.W., Corke, P., Lozano, R., 2001, Nonlinear control of the inertia wheel pendulum, *Automatica, 37, 2001, 1845-1851*.

Takita, Y., Date, H. and Shimazu, H., 2009, Competition of Two-wheel Inverted Pendulum Type Robot Vehicle on MCR Course, *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* October 11-15 2009,St. Louis, USA.

Tapkan, P., Özbakır, L., Baykasoğlu, A., 2008, Arı Algoritması Ve Genelleştirilmiş Atama Problemi: Farklı Komşuluk Yapılarının Karşılaştırılması *Endüstri Mühendisliði Dergisi YA/EM 2008 Özel Sayısı*, Cilt: 21 Sayi: 2 Sayfa: (2-13).

Teodorovic, D., Dell'Orco, M., 2005, Bee Colony Optimization - A Cooperative Learning Approach to Complex Transportation Problems, *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, 51-60.

Tirmant, H., Baloh, M., Vermeiren, L., Guerra, T.M. and Parent, M., 2002, B2, An Alternative Two Wheeled Vehicle for an Automated Urban Transportation System, *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, June 17-2 2002, pp. 594-603.

Tsai, C.C., Chan, C.K. and Fan, Y.H., 2008, Planned Navigation of a Self-balancing Autonomous Service Robot, *IEEE International Conference on Advanced Robotics and Its Social Impacts,* Aug. 23-25 2008, Taipei, Taiwan.

Unluturk, A., Aydogdu, O., Guner, U., 2013, Design and PID control of two wheeled autonomous balance robot, *2013 International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO),* Ankara, Turkey, 260 – 264.

Vallius, T. and Röning, J., 2007, Embedded Object Concept: Case Balancing Two-Wheeled Robot, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 6764.

Wedde, H.F., Farooq, M., Zhang, Y., 2004, BeeHive: An Efficient Fault-Tolerant Routing Algorithm Inspired by Honey Bee Behavior, *Ant Colony, Optimization and Swarm Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 3172, Springer Berlin, 83-94.

Wei A. and Yangmin L., 2013, Simulation and Control of a Two-wheeled Self-balancing Robot, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO) Shenzhen*, China, 456 – 461.

Wu, W., Ma, X., Wang, J., 2010, Intelligent control in two-wheel self-balanced robot Computer, *2010 International Conference on* Mechatronics Control and Electronic Engineering (CMCE), 470 – 473.

Xiaogang R., Yalei L., Xiaoqing Z., 2012, Kinematic Parameter Calibration of Two-wheeled Robot, *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 5 - 8, Chengdu, China, 81 – 86.

Yamamoto, Y., 2008, NXTway-GS Model-Based Design-Control of self-balancing two-wheeled robot, *built with LEGO Mindstorms NXT. Cybernet Systems Company, Ltd.*

Yang, C., Li, Z., Cui, R., Xu, B., 2014, Neural Network-Based Motion Control of an Underactuated Wheeled Inverted Pendulum Model, *Neural Networks and Learning Systems*, IEEE Transactions on (Volume:PP, Issue: 99).

Yan-Hou, W., Yu-Sheng, L., Yih-Guang, L., 2013, Design and implementation of the balance of two-wheeled robots, *2013 International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems*, May 31 – June 2, Tainan, Taiwan, 130 – 134.

Yuce B., Packianather M.S., Mastrocinque E., Pham D.T. and Lambiase A., 2013, Honey Bees Inspired Optimization Method: The Bees Algorithm, *Insects 2013 4(4)*, ISSN 2075-4450, 646-662.

Zadeh (Ed.) and Yen, L., 1995, Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems, *IEEE*.

Zhong, W., Röck, H., 2001, Energy and passivity based control of the double inverted pendulum on a cart, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA '01)*, 896 – 901.

Zhou, W., 2008, Platform for Ergonomic Steering Methods Ġnvestigation of "Segway-Style" Balancing Scooters, M.Sc. Thesis, *University of Waikato*, New Zealand.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Muhammed Arif ŞEN
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	KONYA - 1987
Telefon	**:**	0505 492 50 21
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	marifsen@selcuk.edu.tr

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Muhittin Güzel Kılınç Lisesi Meram/KONYA	2005
Üniversite	:	Selçuk Ü. Müh. Mim. Fak. Makine Müh. Böl. Selçuklu/KONYA	2010
Yüksek Lisans	:	Selçuk Ü. Fen Bilimleri Enst. Makine A.B.D. Selçuklu/KONYA	
Doktora	:	**-**	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2010-2012	Yılmaz Kardeş Damper A.Ş.	Makine Mühendisi
2012-2013	Niğde Ü. Mekatronik Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi
2013-	Selçuk Ü. FBE Makine Müh. Böl.	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Otomatik Kontrol, Optimizasyon, Mekatronik Sistemler, Mekanik Titreşimler, Robotik, CAD/CAM Tasarım

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR