

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR HİDROLİK ROBOTUN KİNEMATİK KOMPANZASYONU VE YAPAY
SİNİRSEL AĞ İLE İLERİ BESLEMELİ BULANIK MANTIK KONTROLU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Caner BEYKONT

Anabilim Dalı: Disiplinlerarası

Programı: Mekatronik Mühendisliği

HAZİRAN 2007

**BİR HİDROLİK ROBOTUN KİNEMATİK
KOMPANZASYONU VE YAPAY SİNİRSEL AĞ İLE İLERİ
BESLEMELİ BULANIK MANTIK KONTROLU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Caner BEYKONT
(518041006)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2007**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Şeniz ERTUĞRUL
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ahmet KUZUCU (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Hakan TEMELTAŞ (İ.T.Ü.)**

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Bu çalışmada İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Otomatik Kontrol Laboratuvarında bulunan 6 eksenli hidrolik pnömatik bir boya robotunun yörünge hatalarını giderebilmek için akıllı kontrol sistemlerinin nasıl uygulanabileceği gösterilmeye çalışılmıştır.

Çalışmamda değerli bilgileri ile bana yol gösteren sayın hocam Doç. Dr. Şeniz ERTUĞRUL'a ve sayın hocam Prof. Dr. Ahmet KUZUCU'ya, laboratuvar çalışmalarında bana sonsuz yardımlarını sunan Teknisyen Ahmet SAVAŞ'a, fikirleriyle bana destek olan Arş. Gör. Hakan ERTUĞRUL ile Arş. Gör. İlker DELİCE'ye ve bana maddi ve manevi katkıda bulunan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Mayıs, 2007

Caner BEYKONT

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanıtılması	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Literatür Özeti	2
2. BR1 BOYA ROBOTU	4
2.1. Giriş	4
2.2. Hidrolik Elemanlar	5
2.2.1. Oransal valf ve hidrolik silindir denklemleri	8
2.3. Pnömatik Elemanlar	10
2.4. Ölçme Elemanları	12
2.5. Kinematik Analiz	12
2.5.1. Denavit-Hartenberg parametreleri	12
2.5.2. Düz kinematik çözüm	14
2.5.3. Ters kinematik çözüm	15
2.5.4. Jakobiyen matrisi	17
2.5.5. Ters jakobiyen	19
3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) VE BULANIK MANTIK KONTROL (BMK)	20
3.1. YSA	20
3.1.1. Öğrenme	21
3.1.2. Hatanın geriye yayılımı algoritması	22
3.2. Bulanık Mantık Kontrol	24
3.2.1. Bulanık mantık temeli	24
3.2.2. Bulanık kümeler üzerindeki işlemler	25
3.2.3. Bulanık kontrolör tasarımı	26
3.2.3.1. Bulanıklaştırıcı	27
3.2.3.2. Kural tabanı	27
3.2.3.3. Çıkarım motoru	27
3.2.3.4. Durulaştırıcı	27

3.2.3.5. Ölçeklendirme	28
4. BR1 BOYA ROBOTU BİLGİSAYAR ARAYÜZ YAZILIMI VE DONANIMI	29
4.1. Fieldpoint Sistemi	29
4.2. Labview Programı	31
4.3. Bulanık Mantık Yazılımı	33
5. BR1 BOYA ROBOTUNUN GERÇEK ZAMANDA KONTROLU	36
5.1. Çalışma Şartları	36
5.1.1. Çalışma basıncı seçimi	36
5.1.2. Hidrolik yağ sıcaklığı	38
5.1.3. Çalışma alanı	38
5.1.4. Yörünge planlaması	39
5.1.5. Hız hesaplama algoritmaları	42
5.1.6. Açık çevrim cevapları	45
5.2. Bağımsız PI+D Kontrol	47
5.3. Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol	52
6. YAPAY SİNİRSEL AĞ İLE İLERİ BESLEME VE KİNEMATİK KOMPANZASYON	56
6.1. Kinematik Kompanzasyon	56
6.2. YSA ile İleri Besleme	57
6.3. YSA ile İleri Beslemeli PI+D Kontrol	61
6.4. YSA ile İleri Beslemeli Artımsal Bulanık Mantık Kontrolü	65
6.5. Hata Kriterleri	69
6.6. Kontrolörlerin Hata Kriterleri ile Karşılaştırılması	71
6.7. Değişik Yörünge Profilleri için YSA ile İleri Beslemeli Artımsal Bulanık Mantık Kontrolü Sonuçları	73
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
7.1. Sonuçlar	81
7.2. Öneriler	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	86

KISALTMALAR

YSA	: Yapay Sinir Ağı
HGY	: Hatanın Geriye Yayınımı
BMK	: Bulanık Mantık Kontrol
G/Ç	: Giriş/Çıkış
GİHHA	: Geliştirilmiş İzlemeli Hız Hesaplama Algoritması
ETD	: Enhanced Tracking Differentiator
ABMK	: Artımsal Bulanık Mantık Kontrol
HKTK	: Hataların Karelerinin Toplamının Karekökü

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Denavit Hartenberg Parametreleri	16
Tablo 4.1. BMK Kural Tablosu.....	23
Tablo 6.1. Bağımsız PI+D Kontrol Hata Değerleri.....	24
Tablo 6.2. Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol Hata Değerleri.....	24
Tablo 6.3. YSA+PI+D ve YSA+ABMK Kontrol Hata Değerleri	26

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : BR1 Boya Robotu.....	4
Şekil 2.2 : Pnömatik Sistem.....	4
Şekil 2.3 : Hidrolik Devre Şeması	5
Şekil 2.4 : Oransal Valf.....	6
Şekil 2.5 : Oransal Valf Kısmı Kesit Görünüşü	6
Şekil 2.6 : Oransal Valf Debi-Kumanda Voltajı Diyagramı.....	7
Şekil 2.7 : Oransal Valf-Silindir Modeli.....	8
Şekil 2.8 : Pnömatik Devre Şeması.....	11
Şekil 2.9 : DSR 32-180 P Pnömatik Motor.....	11
Şekil 2.10 : Optik Ölçme Sistemi.....	12
Şekil 2.11 : BR1 Hidrolik Robotunun Eksen Takımları.....	13
Şekil 2.12 : Eklem Açılarının Koordinat Eksenlerinde Gösterimi.....	17
Şekil 3.1 : YSA Genel Yapısı.....	21
Şekil 3.2 : Denetimli Öğrenme.....	22
Şekil 3.3 : Denetimsiz Öğrenme.....	22
Şekil 3.4 : Giriş Çıkış ve Saklı Tabakalar.....	23
Şekil 3.5 : Üyelik Fonksiyonları.....	25
Şekil 3.6 : Bulanık Mantık Kontrolörü.....	27
Şekil 4.1 : Sistemin Donanımı ve Fieldpoint Bağlantıları.....	30
Şekil 4.2 : Sinyal Şartlandırıcı Devre.....	31
Şekil 4.3 : Labview Arayüzü.....	32
Şekil 4.4 : Hata Üyelik Fonksiyonları.....	33
Şekil 4.5 : Hata Türevi Üyelik Fonksiyonları.....	33
Şekil 4.6 : Çıkış Üyelik Fonksiyonları.....	33
Şekil 4.7 : Bulanık Mantık Kontrol Yüzeyi.....	35
Şekil 5.1 : BR1 En Açık Konum.....	37
Şekil 5.2 : Hidrolik Yağ Sıcaklığının Artış Grafiği.....	38
Şekil 5.3 : Güvenli Çalışma Alanı.....	38
Şekil 5.4 : Yamuk Hız Profili.....	39
Şekil 5.5 : S-Profil.....	40
Şekil 5.6 : S-Profil ve Diğer Yörünge Değişkenleri.....	41
Şekil 5.7 : Eşkenar Dörtgen Yörünge.....	42
Şekil 5.8 : Kare Yörünge.....	42
Şekil 5.9 : Çembersel Yörünge.....	42
Şekil 5.10 : GİHHA ve Sayısal Türev Karşılaştırması.....	43
Şekil 5.11 : GİHHA ve Gerçek Hız Simülasyonu (Eşkenar Dörtgen Yörüngesi).....	44
Şekil 5.12 : GİHHA Hız Hataları (Eşkenar Dörtgen Yörüngesi).....	44
Şekil 5.13 : GİHHA ve Gerçek Hız Simülasyonu (Çembersel Yörünge).....	45
Şekil 5.14 : GİHHA Hız Hataları (Çembersel Yörünge).....	45
Şekil 5.15 : Arka Piston Hızının Ön Piston Hızına Etkisi.....	46

Şekil 5.16	: Ön Piston Hızının Arka Piston hızına etkisi.....	46
Şekil 5.17	: Ön Piston Hızının Voltaj Değerleri ile Değişimi.....	47
Şekil 5.18	: Bağımsız PI+D Kontrol Çevrimi.....	48
Şekil 5.19	: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Konum Grafiği.....	48
Şekil 5.20	: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Konum Grafiği.....	49
Şekil 5.21	: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Hız Grafiği.....	49
Şekil 5.22	: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Hız Grafiği.....	49
Şekil 5.23	: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Konum Hataları.....	50
Şekil 5.24	: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Konum Hataları.....	50
Şekil 5.25	: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Hız hataları.....	50
Şekil 5.26	: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Hız hataları.....	51
Şekil 5.27	: Bağımsız PI+D Kontrol x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi.....	51
Şekil 5.28	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Çevrimi (V+PI).....	52
Şekil 5.29	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Konum Grafiği.....	52
Şekil 5.30	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Konum Grafiği.....	53
Şekil 5.31	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Hız Grafiği.....	53
Şekil 5.32	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Hız Grafiği.....	53
Şekil 5.33	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Konum Hataları.....	54
Şekil 5.34	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Konum Hataları.....	54
Şekil 5.35	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Hız Hataları.....	54
Şekil 5.36	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Hız Hataları.....	55
Şekil 5.37	: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi.....	55
Şekil 6.1	: BR1 Üzerindeki Kinematik Üçgenler.....	56
Şekil 6.2	: Veri Toplanan Yörünge.....	58
Şekil 6.3	: YSA Giriş Çıkış Değişkenleri.....	58
Şekil 6.4	: YSA Yapısı.....	59
Şekil 6.5	: YSA Test Sonuçları.....	60
Şekil 6.6	: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol Blok Diyagramı.....	60
Şekil 6.7	: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol x Eksen Hız Grafiği.....	61
Şekil 6.8	: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol y Eksen Hız Grafiği.....	61
Şekil 6.9	: YSA+PI+D Kontrol Blok Diyagramı.....	62
Şekil 6.10	: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Konum Grafiği	62
Şekil 6.11	: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Konum Grafiği.....	63
Şekil 6.12	: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Hız Grafiği.....	63
Şekil 6.13	: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Hız Grafiği.....	63
Şekil 6.14	: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Konum Hataları.....	64
Şekil 6.15	: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Konum Hataları.....	64
Şekil 6.16	: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Hız Hataları.....	64
Şekil 6.17	: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Hız Hataları.....	65
Şekil 6.18	: YSA+PI+D x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi.....	65
Şekil 6.19	: YSA+ABMK Kontrol Blok Diyagramı.....	66
Şekil 6.20	: YSA+ABMK x Eksen Konum Grafiği	66
Şekil 6.21	: YSA+ABMK y Eksen Konum Grafiği.....	67
Şekil 6.22	: YSA+ABMK x Eksen Hız Grafiği.....	67

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 6.23 : YSA+ABMK y Eksenî Hız Grafiği.....	67
Şekil 6.24 : YSA+ABMK x Eksenî Konum Hataları.....	68
Şekil 6.25 : YSA+ABMK y Eksenî Konum Hataları.....	68
Şekil 6.26 : YSA+ABMK x Eksenî Hız Hataları.....	68
Şekil 6.27 : YSA+ABMK y Eksenî Hız Hataları.....	69
Şekil 6.28 : YSA+ABMK x-y Eşkenar Dörtgen Yörünge.....	69
Şekil 6.29 : YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksenî Konum Grafiği.....	73
Şekil 6.30 : YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksenî Konum Grafiği.....	73
Şekil 6.31 : YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksenî Hız Grafiği.....	74
Şekil 6.32 : YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksenî Hız Grafiği.....	74
Şekil 6.33 : YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksenî Konum Hataları.....	74
Şekil 6.34 : YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksenî Konum Grafiği.....	75
Şekil 6.35 : YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksenî Hız Hataları.....	75
Şekil 6.36 : YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksenî Hız Hataları.....	75
Şekil 6.37 : YSA+ABMK x-y Kare Yörünge.....	76
Şekil 6.38 : YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksenî Konum Grafiği.....	76
Şekil 6.39 : YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksenî Konum Grafiği.....	77
Şekil 6.40 : YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksenî Hız Grafiği.....	77
Şekil 6.41 : YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksenî Hız Grafiği.....	77
Şekil 6.42 : YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksenî Konum Hataları.....	78
Şekil 6.43 : YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksenî Konum Hataları.....	78
Şekil 6.44 : YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksenî Hız Hataları.....	78
Şekil 6.45 : YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksenî Hız Hataları.....	79
Şekil 6.46 : YSA+ABMK x-y ÇemberYörünge.....	79

SEMBOL LİSTESİ

A, B	: Oransal valf bağlantı hatları
P_s	: Besleme basıncı
P_e	: Tank basıncı
x_v	: Oransal valf makarası yerdeğişimi
Q1,Q2	: Giriş-Çıkış debileri
A1,A2	: Piston sonu silindir alanları
P1,P2	: Piston ön ve arka basınçları
C_q	: Valf akış katsayısı
δ	: Hidrolik yağ yoğunluğu
α	: Valfin alan gradyanı
P_L	: Yük basıncı
u	: Valf kumanda voltajı
K_{v1}	: Valf sabiti
θ₁,θ₂,θ₃,...	: Eklem açıları
S₁₂	: $\sin(\theta_1 + \theta_2)$
C₁₂	: $\cos(\theta_1 + \theta_2)$
Q₂₃₄	: $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4$
w11,w22,...	: YSA nöron ağırlıkları
μ	: Üyelik fonksiyonuna ait olma derecesi
$\hat{q}$	: Tahmin edilen pozisyon
$\dot{\hat{q}}$	: Tahmin edilen hız
T	: Örneklem zamanı
R,a₀,n,m,a₁	: Tasarım parametreleri
q_{ref}	: Referans açı vektörü
q	: Açı vektörü
$\dot{q}$	: Açısal hız vektörü
q₁	: Pistonlar arası açı
q₂	: Arka piston ile yer düzlemi arasındaki açı
L₁,L₂	: Piston boyları
a,b,g,d	: Kinematik üçgen uzunlukları
$\dot{L}_1,\dot{L}_2$	: Piston hızları
u_{ysa}	: YSA kontrol voltajı
u_{BMK}	: BMK kontrol voltajı
u_{PI}	: PI kontrol voltajı
Δu	: Artımsal kontrol voltajı
x_{ref},y_{ref}	: Referans uç nokta konumu
V_{xref},V_{yref}	: Referans uç nokta hızı

BİR HİDROLİK ROBOTUN KİNEMATİK KOMPANZASYONU VE YAPAY SİNİRSEL AĞ İLE İLERİ BESLEMELİ BULANIK MANTIK KONTROLÜ

ÖZET

Endüstride, hızlı ve en iyi kalitede üretim ihtiyacıyla bilgisayar destekli otomasyon sistemleri yaygınlıkla kullanılmaktadır. Özellikle monoton işlerin sıklıkla tekrarlandığı, insan gücünün yetmediği veya insan sağlığının olumsuz olarak etkilendiği durumlarda çalışma veriminin yetersiz kaldığı gözlemlenmiş ve otomasyon sistemlerinin son örneklerinden olan robotların bu alanlarda kullanılması yaygınlaşmıştır. Ağır sanayi işlemlerinden spreyci boyama; işçilerin sağlığı için olumsuz şartlar oluşturan boya malzemeleri ile yapılmaktadır. Özellikle spreyci işlemi sırasında havaya karışan boya zerrecikleri soluma yoluyla işçinin sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca işçinin çalışma performansına bağlı olarak kullanılan boya, verim düştükçe israf olmaktadır. Spreyci boyama işlemlerinde kullanılan boya tabancasının boyanan yüzeye dik ve belli bir mesafede tutulması, ayrıca istenen boya kalınlığı için tabancanın sabit hızla hareket ettirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı hidrolik ve pnömatik devre elemanlarıyla spreyci boyama için tasarlanmış 6 serbestlik dereceli bir boya robotunun 2. ve 3. hidrolik eksenlerinin referans yörünge takibinin en az hatayla gerçekleştirilmesi için değişik kontrolörlerin denenmesi ve karşılaştırılmasıdır.

Şekil 1’de görülen BR1 boya robotunun hidrolik eksenleri 2 adet Rexroth Hidropar kompakt hidrolik silindir ve 1 adet Rexroth MZ60 hidrolik döner motor ile hareket ettirilmekte, kumandaları ise Abex Denisson oransal hidrolik valfleri ile yapılmaktadır. Oransal hidrolik valflere $\pm 5V$ analog sinyal ile kumanda edilmektedir.



Şekil 1.1: BR1 Boya Robotu

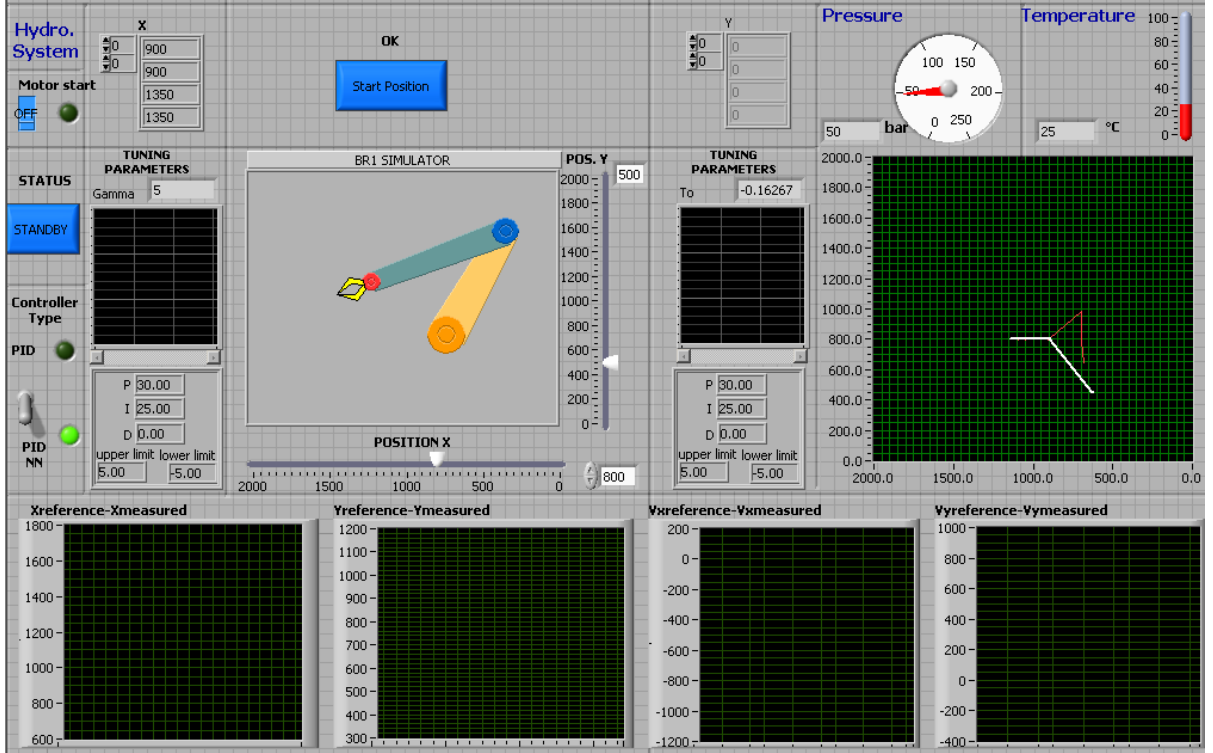


Şekil 1.2: Pnömatik Sistem

Şekil 2’de görülen pnömatik sistem altı adet solenoid (FESTO MSFNG-24 DC 24V) ve bunlarla tetiklenen altı adet pnömatik valf (FESTO BMNH-2-3-M5 0-7 bar) ile bu

valflerin pnömatik enerjisini hareket enerjisine dönüştüren üç adet pnömatik motordan oluşmuştur.

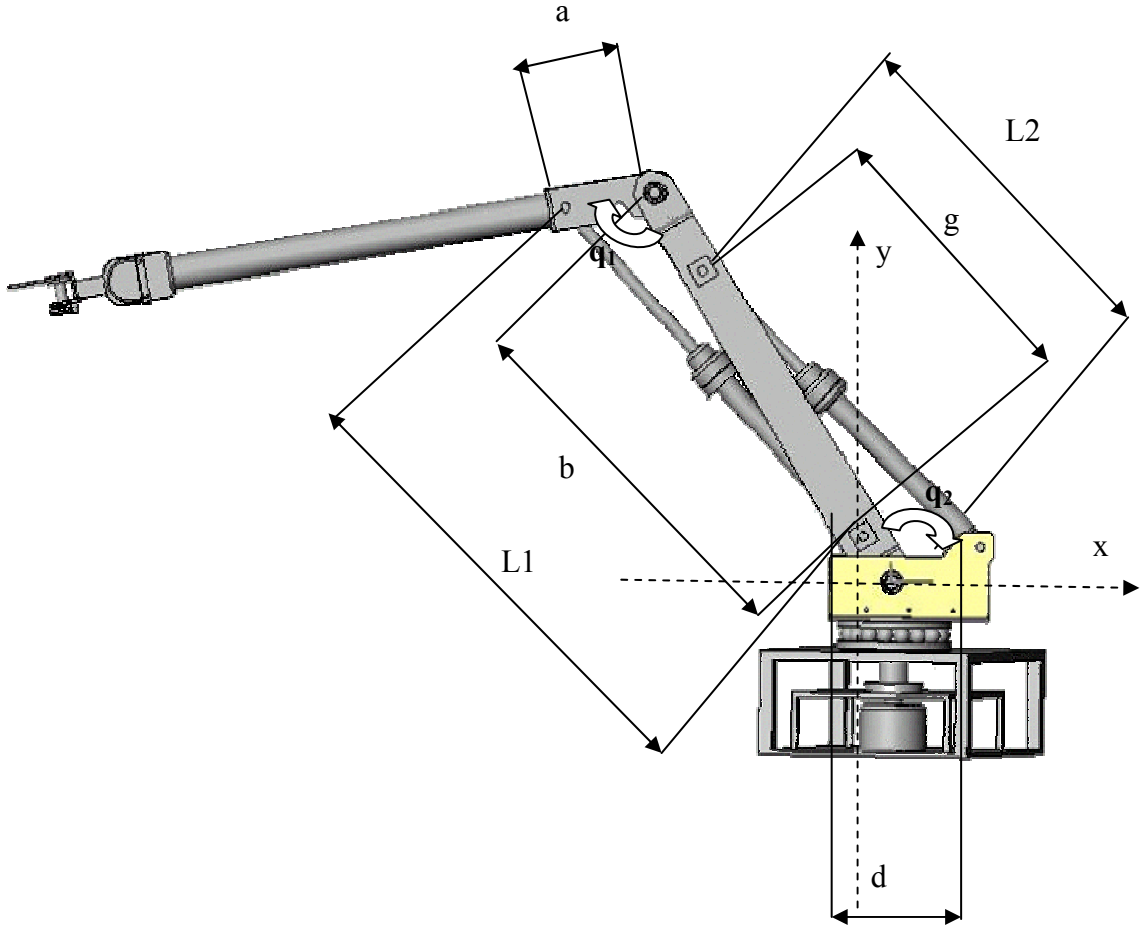
BR1 boya robotunun bilgisayar arayüz yazılım ve donanımı NI firmasının ürettiği Fieldpoint terminal sistemi ile analog giriş-çıkış modülleri, şartlandırıcı devre ve yine NI firmasının geliştirdiği LabVIEW 7.0 Express yazılımından oluşmaktadır.



Şekil 1.3: Labview Kullanıcı Arayüzü

Bu arayüz BR1 robotunun iki hidrolik eklemine kontrolü için hazırlanmıştır. Şekil 3’de robot uç noktasının takip ettiği konum ve hız ile PID kontrol katsayıları ve kumanda düğmeleri görülmektedir. Robotun çalışması esnasında takip etmesi gereken konum ortadaki iki eklemli simülasyon ekranında görülmektedir. Sağ üst köşede çalışma anındaki basınç ve sıcaklık değerleri görülmektedir. Sol alt köşedeki seçenek ile de istenen kontrolör seçimi yapılabilmektedir.

BR1 boya robotunun uç nokta hızının kontrol edilebilmesi için 2. ve 3. serbestlik derecelerindeki eksenlerin kinematik analizinin yapılması gereklidir. Bu serbestlik derecelerinde kol ile piston konumları ve hızları arasında doğrusal olmayan bağıntılar vardır. Bu bağıntılar kol ile piston arasında oluşan kinematik üçgenlerin incelenmesiyle bulunabilir.



Şekil 1.4: BR1 Üzerindeki Kinematik Üçgenler

Şekil 1.4'e göre L_1 birinci piston boyu, L_2 ikinci piston boyu, q_1 iki kol arasındaki açı ve q_2 arkadaki kolun yer ile yaptığı açı olduğuna göre:

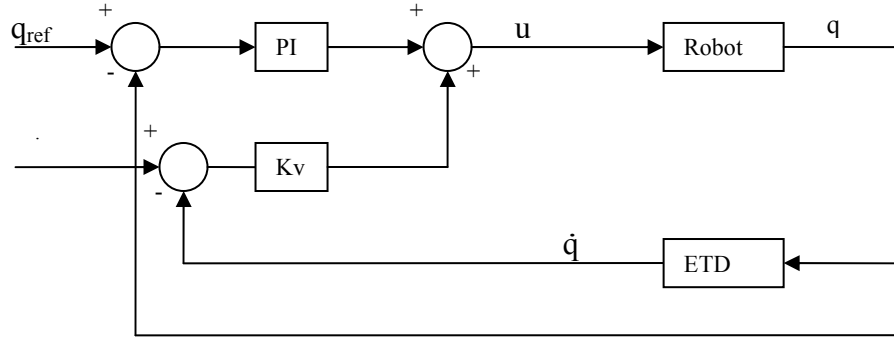
$$L_1^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(q_1)$$

$$L_1 \dot{1} = \frac{ab}{L_1} \sin(q_1) \dot{q}_1$$

$$L_2^2 = g^2 + d^2 - 2gd \cos(q_2)$$

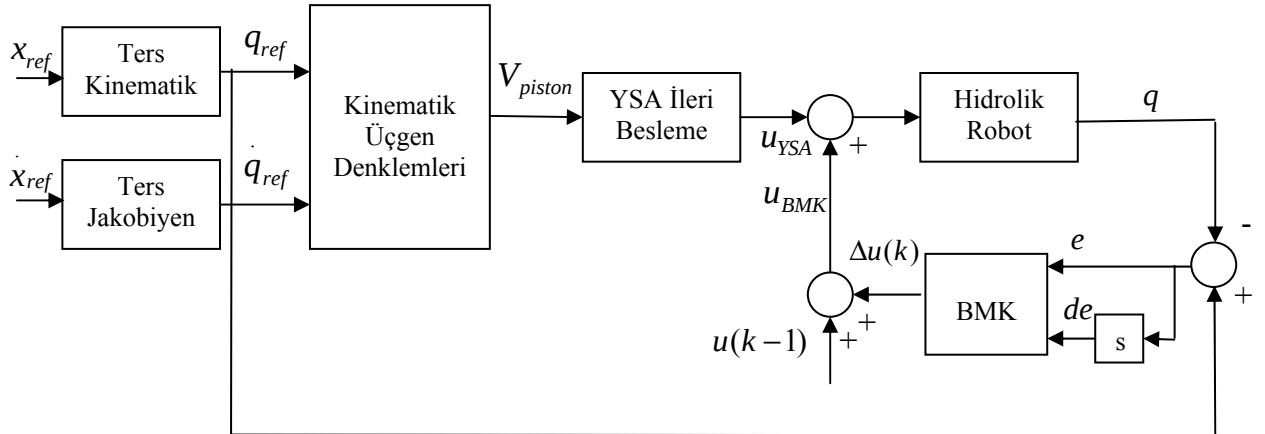
$$L_2 \dot{2} = \frac{dg}{L_2} \sin(q_2) \dot{q}_2$$

yazılabilir. Denklemlerdeki $\dot{L}_1$, $\dot{L}_2$ piston hız değerleridir. $\dot{q}_1$ ve $\dot{q}_2$ açısal hız değerlerinin bulunabilmesi için Geliştirilmiş İzlemeli Hız Hesaplama Algoritması (Enhanced Tracking Differentiator, ETD) yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 1.5: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Çevrimi (PI+V)

Piston hızları ile valf voltajları arasındaki doğrusal olmayan ilişki oluşturulan bir YSA (Yapay Sinir Ağı) modeline öğretilmeye çalışılmıştır. YSA çıkışının referans sinyali ile arasındaki hatalar bir geri besleme BMK (Bulanık Mantık Kontrol) ile düzeltilmeye çalışılmıştır. Kurulan blok diyagram Şekil 1.5'te görülmektedir. Ayrıca hidrolik robot üzerinde Şekil 1.6'da görülen hız geri beslemeli PI kontrol çevrimi de gerçekleştirilmiştir. Bu iki çevrimin hata kriterleri yönünde karşılaştırılması Tablo 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.6: YSA+ABMK Kontrol Blok Diyagramı

Tablo 1.1: Kontrol Çevrimlerinin Sonuçları

<i>PI+V Kontrol</i>	X(mm)	Y(mm)	V_x(mm/s)	V_y(mm/s)
RMS Hatası	8.58	10.39	21.60	21.31
En Yüksek Hata (e_{max})	15.03	18.99	68.47	76.59
En Yüks. Radyal Konum Hatası (e_{rmax})	23.04			
En Yüks. Radyal Hız Hatası (e_{rmax})	96.27			
Ort. Radyal Konum Hatası (e_{rort})	12.50			
Ort. Radyal Hız Hatası (e_{rort})	18.24			

<i>YSA+ABMK Kontrol</i>	X(mm)	Y(mm)	V_x(mm/s)	V_y(mm/s)
HKTK Hatası	1.49	2.36	12.95	15.86
En Yüksek Hata(e_{max})	6.57	9.29	46.25	60.44
En Yüksek Radyal Konum Hatası (e_{rmax})	10.11			
En Yüksek Radyal Hız Hatası (e_{rmax})	72.96			
Ort.Radyal Konum Hatası (e_{rort})	2.19			
Ort. Radyal Hız Hatası (e_{rort})	14.33			

Tablodaki veriler incelendiğinde dikkat çeken en önemli sonuç, hız geri beslemeli PI kontrolü ile 12.5 mm olan ortalama radyal konum hatasının YSA+ABMK kontrol ile 2.19 mm'ye ve hız geri beslemeli PI kontrolde 18.24 mm/s olan ortalama radyal hız hatasının 14.33 mm/s'ye indirilmiş olmasıdır. Bu sonuçlar ile ortalama radyal konum hatası üzerinden %80 ve ortalama radyal hız hatası üzerinden %23 oranında iyileşme söz konusudur.

Hata kriterleri açısından bakıldığında akıllı sistemler ile ortaya çıkan sonuçların klasik kontrolörlerden daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Özellikle robotun kinematik kompanzasyonu, bir YSA'nın ileri beslemede kullanılması ile birlikte performansta büyük artışlar sağlanmıştır. Ayrıca hızlı bir cevap ile 1-2 mm'ye kadar düşen yörünge hataları elde edilmiştir. En son olarak çevrimi gerçekleştirilen YSA ileri beslemeli ABMK, konum hatası kriterleri açısından , YSA ileri beslemeli PI'dan da iyi sonuçlar vermiş, HKTK hız hataları ile ortalama radyal hız hata değerlerinde iyileşme görülmüştür.

KINEMATIC COMPANSATION AND FUZZY LOGIC CONTROL OF A HYDRAULIC ROBOT USING NEURAL NETWORKS IN THE FEEDFORWARD LOOP

SUMMARY

Computer aided automation is widely used in industry for rapid and reliable production. In some circumstances, where a monotonous work is repeated, human health is negatively effected or high human power is continously required efficiency decreases tremendously. Under these conditions, robots; one of the recent products of automation systems, are widely used. Spray painting process is carried out with small paint molecules which creates unhealthy and risky conditions for workers. Especially inhaling these small particles is very dangerous for health. In spray painting process the painting gun must be hold perpendicular to the surface to be painted at a particular distance. The gun must be moved with a constant velocity retaining its perpendicularity.

The aim of this theses is to minimize the trajectory errors of a 6 degree of freedom spray painting manipulator's hydraulic axis at the 2nd and 3rd DOF using different classical and intelligent controller schemes. The analysis and comparison of these controllers for different error criteria have been studied as well.

BR1 spray painting manipulator's hydraulic axis seen on Fig 1.1, are actuated with 2 Rexroth Hidropar compact hydraulic cylinder and 1 MZ60 hydraulic rotating motor. Proportional valves controlling the hydraulic cylinders are commanded with +/-5 volt analog voltage signal.



Figure 1.1: BR1 Spray-Painting Manipulator



Şekil 1.2: Pneumatic System

The pneumatic system on at the wrist seen on Figure 1.2 consists of 6 Festo solenoids, 6 Festo pneumatic valves and 3 pneumatic motors.

Control hardware includes NI Fieldpoint Terminal System together with analog input-output, counter, relay and thermocouple modules. The graphical user interface has been designed using NI LabVIEW 7.0 Express.

BR1 user interface seen on Fig. 1.3, is prepared for the control of hydraulic axis. The reference trajectory and real trajectory followed by the robot is monitored with graphs and the controller coefficients can be quickly updated. The simulator part is used for simulating different trajectory combinations first without sending them as a control signal to the manipulator. The pressure and temperature of the hydraulic oil is monitored from the right-top and the controller choice can be made from the left-bottom of the same figure.

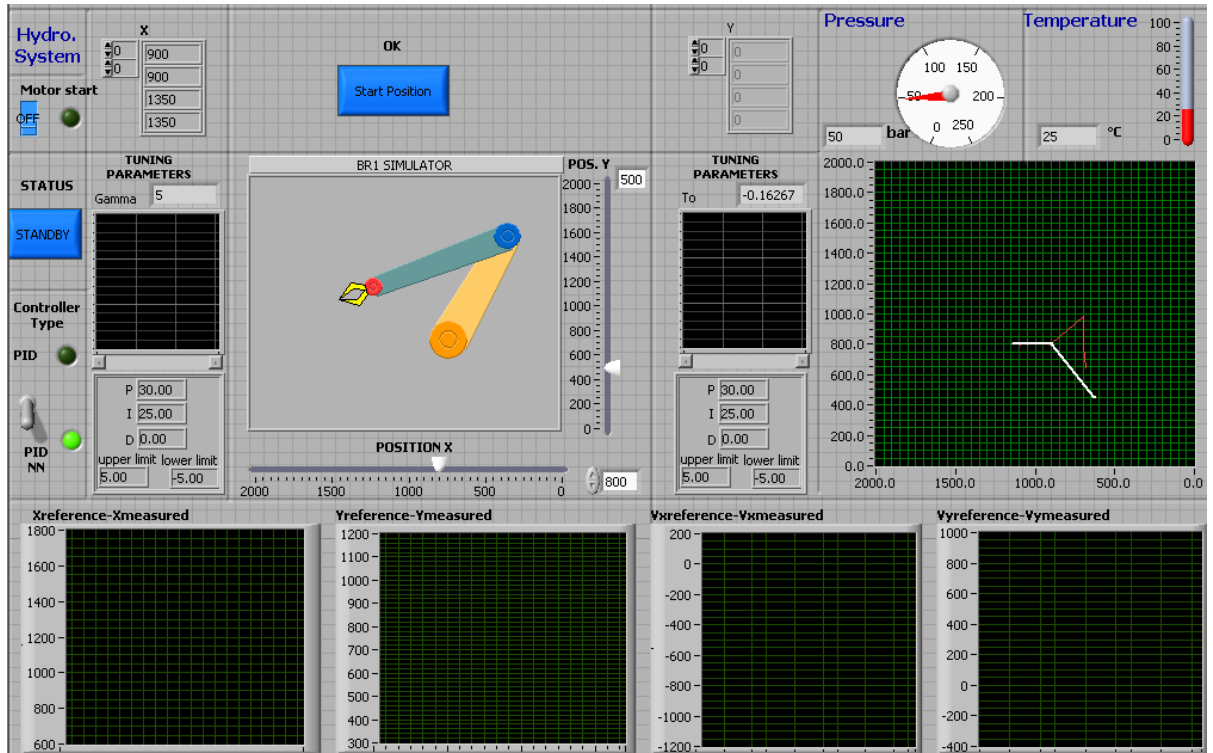


Figure 1.3: Labview User Interface

In order to follow a desired trajectory, the 2nd and 3rd links must be analyzed kinematically. At these links, there are nonlinear relationships between tip point velocity and piston velocity. Equations for these relations could be written by analyzing the kinematic triangles formed at these axis as seen in Fig 1.4.

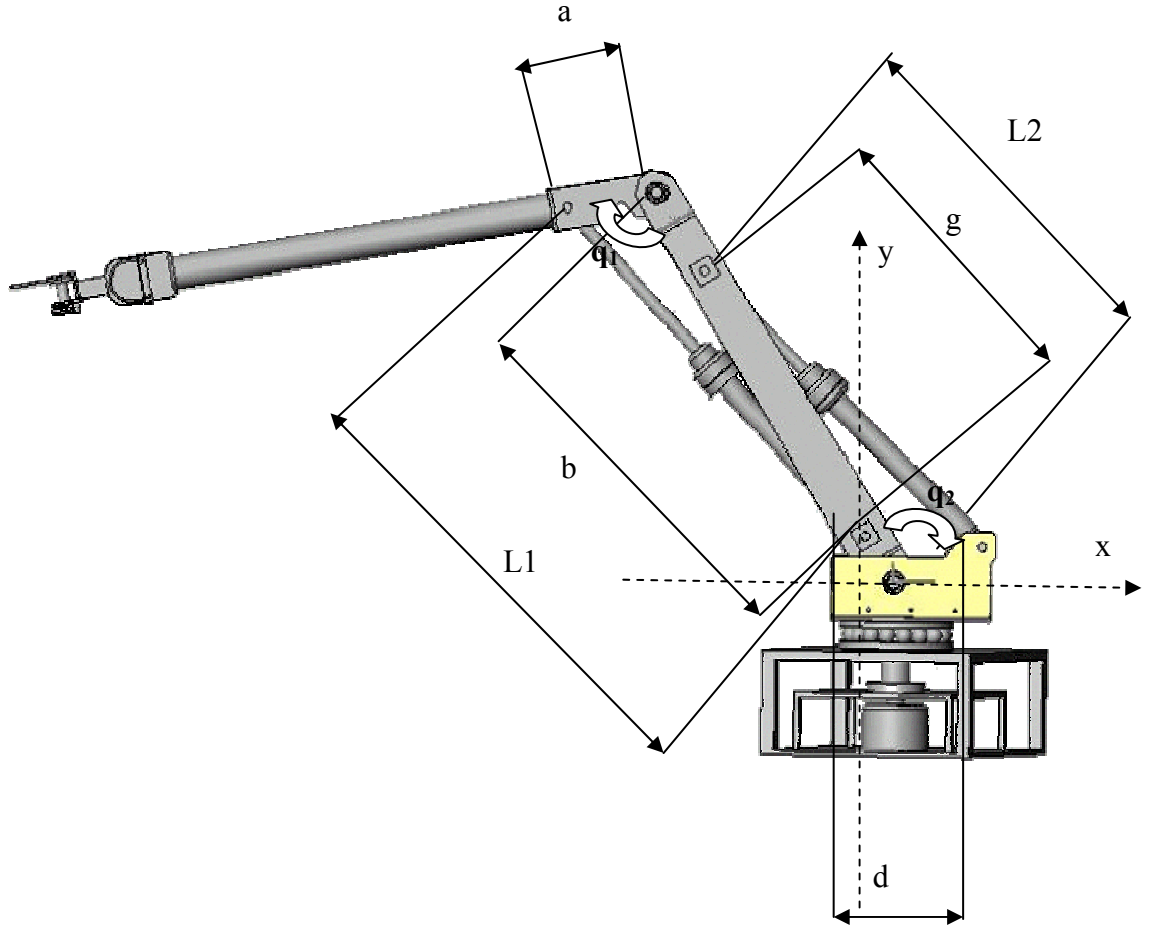


Figure 1.4: Kinematic Triangles on BR1

According to the Fig. 1.4 $L1$ is the 1st piston length, $L2$ is the 2nd piston length, q_1 is the angle between two links and q_2 is the angle between the 2nd link and reference x axis.

$$L1^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(q_1)$$

$$L1 \dot{1} = \frac{ab}{L_1} \sin(q_1) \dot{q}_1$$

$$L2^2 = g^2 + d^2 - 2gd \cos(q_2)$$

$$L2 \dot{2} = \frac{dg}{L_2} \sin(q_2) \dot{q}_2$$

where $L1, L2$ are the piston velocities. In order to calculate the angular velocities $\dot{q}_1$ and $\dot{q}_2$ from the position values, the ETD method; published from IEE Control System Technology Review dated on 2006, is used.

The nonlinear relations between the piston velocities and proportional valve voltages are trained with a neural network system (NN). The remaining small trajectory errors were removed by using incremental fuzzy logic controller (FLCinc) as seen on Fig. 1.5 Another controller implemented on the hydraulic robot is the velocity feedback PI control (PI+V) which can be seen on Figure 1.6.

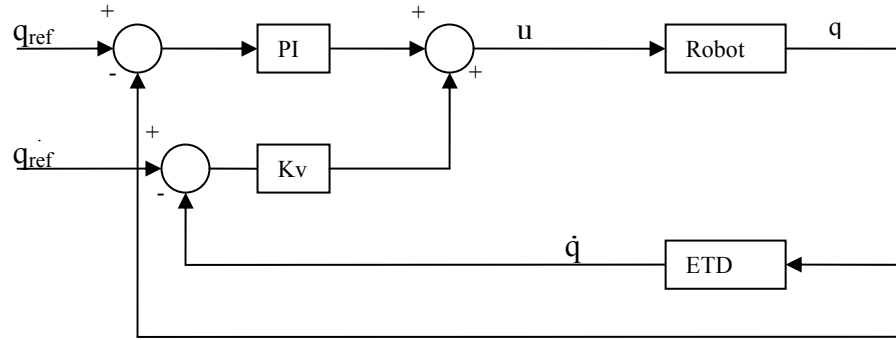


Figure 1.5: Independent Velocity Feedback PI Control (V+PI)

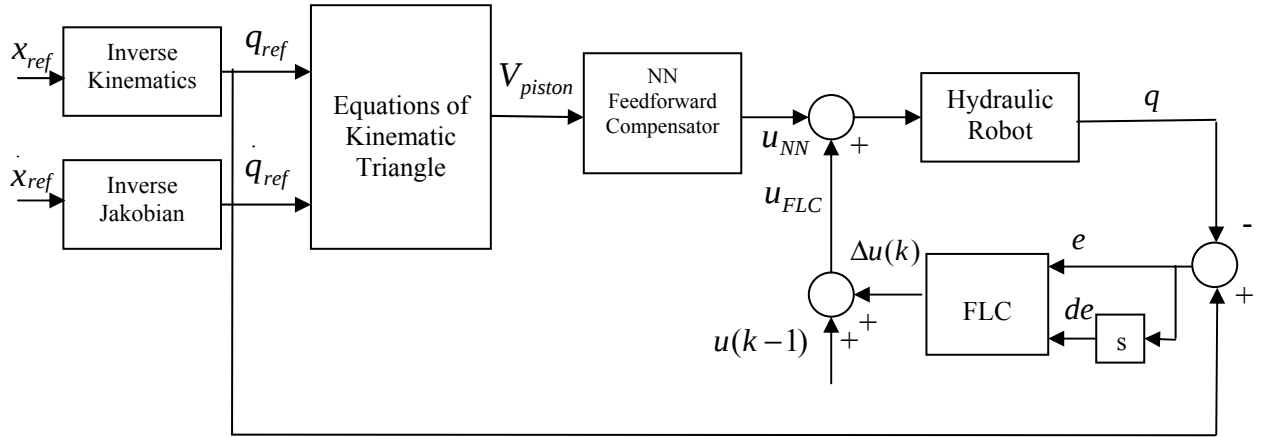


Figure 1.6: Neural Network(NN)+Incremental FLC (FLC_{inc}) Block Diagram

Both controllers have been compared against RMS and radial error criteria and the results are seen on Tables 1 and 2. Using PI controller with velocity feedback (PI+V) controller the average radial position and velocity error of the manipulator is 12.5mm and 18.24mm/s respectively. With the NN+FLC_{inc} controller the average radial position error is decreased to 2.19 mm with a %80 performance improvement and velocity error is decreased to 14.33 mm/s with a %23 performance improvement.

When the results are analyzed according to the error criteria the intelligent controller NN+FLC_{inc} has proven to give better results than PI+V controller. The kinematic compensation together with NN in the feedforward loop quickly provided the approximate valve voltages to follow the desired trajectory while FLC_{inc} removed the remaining errors.

Table 1.1: Control Results for Different Controllers

<i>PI+V Control</i>	X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
RMS Error	8.58	10.39	21.60	21.31
Maximum error ($e_{\max}$)	15.03	18.99	68.47	76.59
Max Radial Pos. Error ($e_{r\max}$)	23.04			
Max Radial Velocity Error ($e_{vr\max}$)	96.27			
Avg. Radial Pos. Error (e_{rort})	12.50			
Avg. Radial Velocity Error (e_{vrort})	18.24			

<i>NN+FLC_{inc} Control</i>	X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
RMS Error	1.49	2.36	12.95	15.86
Maximum error ($e_{\max}$)	6.57	9.29	46.25	60.44
Max Radial Pos. Error ($e_{r\max}$)	10.11			
Max Radial Velocity Error ($e_{vr\max}$)	72.96			
Avg. Radial Pos. Error (e_{rort})	2.19			
Avg. Radial Velocity Error (e_{vrort})	14.33			

For a comparison PI+D controller has also been used in the feedback loop instead of FLC_{inc} and it's also been observed that FLC_{inc} has given better results for RMS position error, radial position error and maximum radial velocity error values.

1. GİRİŞ

1.1. Problemin Tanıtılması

Endüstride, hızlı ve en iyi kalitede üretim ihtiyacıyla bilgisayar destekli otomasyon sistemleri yaygınlıkla kullanılmaktadır. Özellikle monoton işlerin sıklıkla tekrarlandığı, insan gücünün yetmediği ve insan sağlığının olumsuz olarak etkilendiği durumlarda çalışma veriminin yetersiz kaldığı gözlemlenmiş ve otomasyon sistemlerinin son örneklerinden olan robotların bu alanlarda kullanılması yaygınlaşmıştır. Endüstriyel robot üreticisi ve kullanıcılarından oluşan Amerikan Robot Enstitüsü (Robot Institute of America) robotları; çeşitli iş ve görevlerin istenen performansta sağlanabilmesi için tasarlanmış tekrar programlanabilen işlevsel manipülatörler olarak tanımlamıştır [18]. Günümüze kadar büyük bir ivmeyle kullanımı gittikçe artan robotların 3 temel özelliği sağlaması gerektiği kabul edilmiştir:

- 1)Manipulasyon: Cisimleri taşıma, üzerinde işlem yapabilme
- 2)Tekrar programlanabilme: Farklı işlemlerin aynı geometri düzeninde yapılabilmesi
- 3)Algılayabilme: Üzerindeki algılayıcılar ile çeşitli verilerin toplanıp bunlara göre yeni kararlar üretebilme.

Robotlar, tıp, askeri, film endüstrilerinde ve ağır sanayide kullanılmaktadır. Endüstriyel işlemler olarak boya, kaynak manipülatörleri, pres yüzey işleme ve paketlenme robotları örnek verilebilir.

Ağır sanayi işlemlerinden spreylere boyama; işçilerin sağlığı için olumsuz şartlar oluşturan boya malzemeleri ile yapılmaktadır. Özellikle spreylere işlemleri sırasında havaya karışan boya zerrecikleri solunum yoluyla işçinin sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca işçinin çalışma performansına bağlı olarak kullanılan boya, verim düştükçe israf olmaktadır. Spreylere boyama işlemlerinde kullanılan boya tabancasının boyanan yüzeye dik ve belli bir mesafede tutulması, ayrıca istenen boya kalınlığı için tabancanın sabit hızla hareket ettirilmesi gerekmektedir [21].

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı hidrolik ve pnömatik devre elemanlarıyla spreyci boyama için tasarlanmış bir boyacı robotunun referans yörünge takibinin en az hatayla gerçekleştirilmesi için değişik kontrolörlerin denenmesi ve karşılaştırılmasıdır. Yapay sinir ağı ile ileri beslemeli bulanık mantık kontrolü algoritması gibi akıllı kontrol sistemleriyle klasik kontrolörler arasında yapılan karşılaştırmalarda boyacı robotunun performansında ve veriminde hata kriterlerine göre büyük oranda artış sağlanmıştır.

1.3. Literatür Özeti

Elektrik motorlarıyla çalışan robotlarda uygulanan hesaplanmış moment yöntemi ile kontrol, adaptif kontrol ve dayanıklı kontrol metotları hidrolik robotlara da uygulanarak bu robotların kontrol performansı olumlu yönde artırılabilirken başarısız sonuçlar elde etmek de mümkün olmaktadır. Bunun nedeni elektriksel tahrik elemanları daha çok kuvvet kaynaklarına benzemesi fakat hidrolik tahrik elemanlarının (actuator) doğrusal olmayan hız kaynakları olarak düşünülmesi gerektiğidir ve sonuç olarak elektrik elemanlarına uygulanan kontrol metotları hidrolik çalışmalarda başarılı sonuçlar vermeyebilmektedir [1].

Literatürde hidrolik robot kontrolü hakkında az sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları sadece tek eklemler tahrik çalışmaları üzerinde yoğunlaşmışlardır [1]. S.R. Habibi ve A.A. Goldenberg, Workmaster adı verdikleri hidrolik robot üzerinde basınç geri beslemeli kontrol çalışmaları yapmışlar ve basitleştirilmiş hesaplanmış moment yöntemini uygulamışlardır [2]. Zhou ise Danimarka Üniversitesindeki hidrolik test manipülatörü üzerinde yaptığı çalışmalarda kinematik kompanzasyon üzerinde durmuş ve bu yöntemi hesaplanmış moment yöntemi ve genelleştirilmiş moment yöntemi ile karşılaştırmıştır [4]. Model tabanlı hidrolik robot kontrolü çalışmasında Honegger ve Corke, 4 serbestlik dereceli bir hidrolik manipülatörün dinamik ve kinematik modelleri üzerinden basınç geri beslemeli PD kontrol uygulamış ve kontrol sinyali ters dinamik denklemlerden çıkan ileri beslemeli başka bir kontrol sinyali eklemiştir [5]. Hidrolik robotlar üzerinde bulanık mantık uygulaması için T. Corbet N. Sepehri ve P.D. Lawrence 'ın çalışması örnek gösterilebilir. Bu çalışmada iki eklemlili bir hidrolik robotun bulanık

mantık ile yörünge kontrolü deneysel bir çalışmayla verilmiş ve kararlı hal hatalarını giderebilmek için hatanın integrali ile orantılı olan bir kontrol sinyali üretilerek hız hatasının sıfıra yakın olduğu yerlerde kontrol sinyaline eklenmiştir [3]. Bunun dışında hidrolik robot üzerinde bulanık mantık uygulamasına Zhao ve Virvalo'nun çalışmasında rastlanılabilir. Bu çalışmada hidrolik tahrik elemanının hızındaki değişimler bir bulanık mantık kural tabanına göre yorumlanmıştır. Yük dolaylı olarak aynı kural tabanına göre saptanmış ve kontrolör katsayıları değiştirilerek yük değişimlerine karşı hassasiyetin azaltılmasına çalışılmıştır. Kontrolör katsayıları çalışma esnasında değiştirilmiş ve birim basamak fonksiyon cevabı gösterilmiştir. [6]. Kontrol yönünden bakıldığında hidrolik robotlar doğrusal olmayan, karmaşık ve analizleri zor olan sistemlerdir [7].

2. BR1 BOYA ROBOTU

2.1. Giriş

İstanbul Teknik Üniversitesi, Otomatik Kontrol Laboratuvarında 3 eksenli hidrolik, 3 eksenli pnömatik olan 6 serbestlik dereceli bir boya robotu (BR1) bulunmaktadır. BR1 1980li yılların sonunda TÜBİTAK destekli bir boya robotu projesi olarak Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görüldüğü gibi imal edilmiştir.



Şekil 2.1: BR1 Boya Robotu

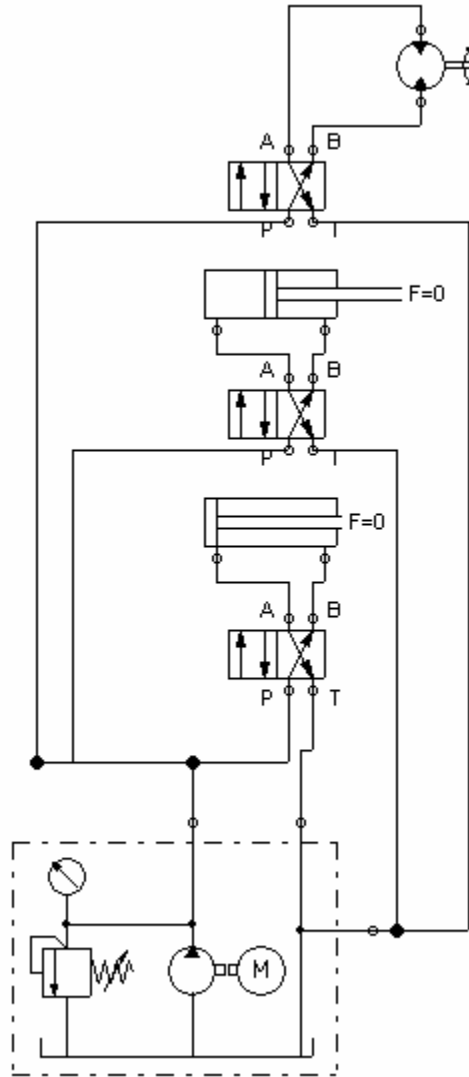


Şekil 2.2: Pnömatik Sistem

Şekil 2.1’de boya robotunun 3 hidrolik eksenli taban tasarımı ve kodlayıcılar ile hidrolik bağlantısı görülmektedir. Şekil 2.2’de ise robotun uç kısmındaki 3 serbestlik dereceli pnömatik sistemin daha yakın bir görüntüsü ve pnömatik sistem üzerindeki kodlayıcılar verilmiştir. Bundan sonraki kısımda hidrolik ve pnömatik sistem ayrı ayrı ele alınarak anlatılacaktır.

2.2. Hidrolik Elemanlar

Hidrolik eksenler 2 adet Rexroth Hidropar kompakt hidrolik silindir ve 1 adet Rexroth MZ60 hidrolik döner motor ile hareket ettirilmekte, kumandaları ise Şekil 2.4’de görülen Abex Denisson oransal hidrolik valfleri ile yapılmaktadır. Oransal hidrolik valflere $\pm 5V$ analog sinyal ile kumanda edilmektedir. Hidrolik sistemin devre şeması Şekil. 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3: Hidrolik Devre Şeması

Oransal valfın diğer özellikleri aşağıda verilmiştir:

Çalışma basıncı : P, A, B portu 7-245 bar, T portu 0-70 bar

Akışkan sıcaklığı : -18/+80°C

Maksimum çıkış debisi : 36 lt/dak

Pilot debisi (245 bar) : 1.2 lt/dak

Basınç kazancı : 70 bar/%1 komut

Besleme gerilimi : 12±0.5 VDC

Maksimum besleme akımı : 0.3 Amper

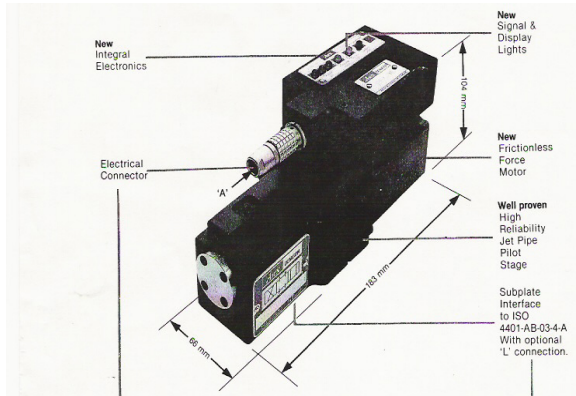
Maksimum güç tüketimi : 3.6 Watt

Kumanda sinyali : +/- 5 volt

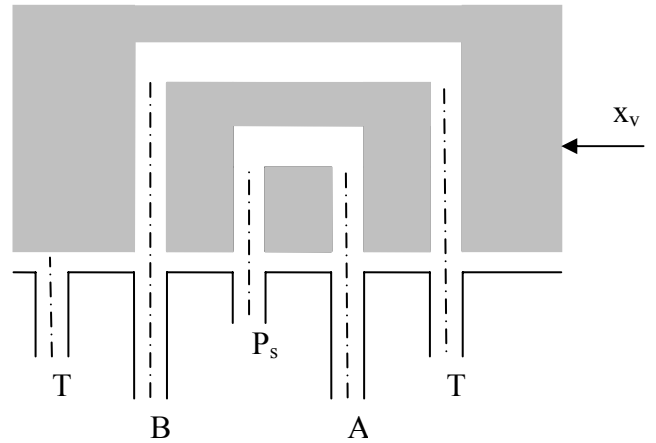
Histeresiz : <± %1

Eşik : < %0.25

Şekil 2.5’de görüldüğü gibi oransal hidrolik valf içinde A,B,P_s,T olmak üzere 4 hat mevcuttur. Bu hatlardan A ve B hattı silindirlere, Ps hattı ana basınç hattına ve T hattı tank tahliye hattına bağlıdır. Kumanda sinyalinin işaretine ve genliğine göre valf içindeki makara, çift etkili silindirlere A ve B hattı vasıtası ile çalışma basıncını veya tank basıncını sağlamaktadır.



Şekil 2.4: Oransal Valf

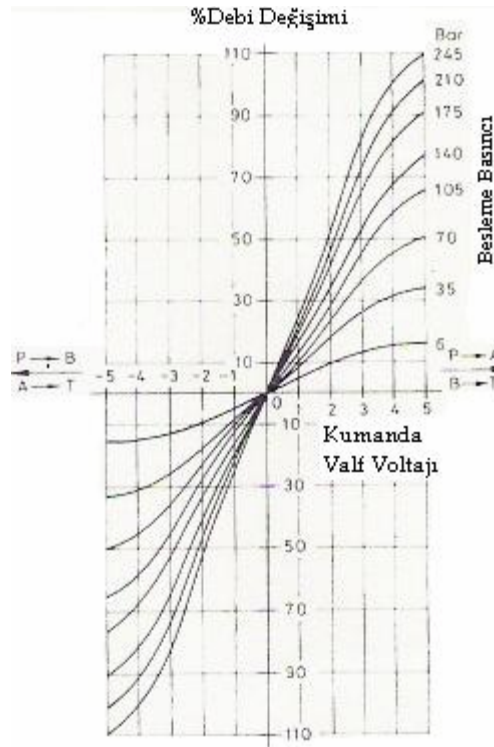


Şekil 2.5: Oransal Valf Kısmi Kesit Görünüşü

Şekilde 2.5’de görülen kurulum sayesinde makaranın ileri veya geri hareketiyle A ve B hatlarının bağlantıları aynı anda, basınç hattına bağlı olan tank hattına, tank hattına bağlı olan ise basınç hattına bağlanacak şekilde değiştirilebilmektedir. Kontrol sinyali olmadığı zaman ise makara merkezleme yayları ile merkezlenir.

Hidrolik devre şeması Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi devre içinde bulunun hidrolik valflerin ve hidrolik motorun tahliye ve basınç hatları birbirine bağlanmıştır. Bu yapı küçük hacimde büyük güç üretme prensibine iyi bir tasarım örneği gibi gözüktü de özellikle pozisyon ve hız kontrolü gibi uygulamalarda doğrusal olmayan davranışlara neden olmaktadır.

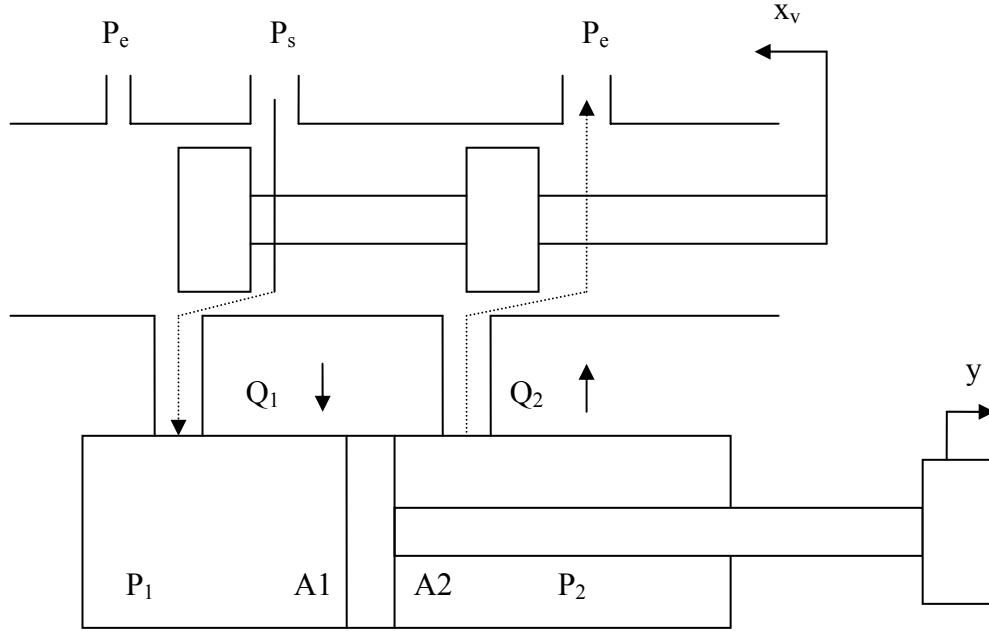
Şekil 2.6’da oransal valfin kumanda sinyali, çıkış debisi ve çalışma basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi yaklaşık 3 volt sonrasında debi değişimi ile kumanda voltajı arasındaki ilişki doğrusallığını kaybetmektedir.



Şekil 2.6: Oransal Valf Debi-Kumanda Voltajı Diyagramı

2.2.1 Oransal Valf ve Hidrolik Silindir Denklemleri:

Oransal valf ve silindir denklemlerinin yazılabilmesi için debi ve basınç değişkenleri silindir modeli üzerinde Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Oransal Valf-Silindir Modeli

Şekilde görülen Q_1, Q_2 giriş çıkış debileri ve P_s besleme basıncı olmak üzere oransal valf akış denklemleri şu şekilde yazılır [12 , 17]:

$$Q_1 = C_q a \sqrt{2 \frac{P_s - P_1}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$Q_2 = C_q a \sqrt{2 \frac{P_2 - P_t}{\rho}} \quad (2.2)$$

Eğer $P_s - P_1 = P_2$ seçilir, $Q_1 = Q_2$ kabulü yapılırsa ve $P_e = 0$ kabul edilirse: ($P_{\text{tank}} = 0$, atmosferik)

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{C_q a}{2} \left(\sqrt{\frac{2}{\delta} (\sqrt{P_s - P_1} + \sqrt{P_2})} \right) \quad (2.3)$$

$$P_s - P_1 = P_2 \quad (2.4)$$

$$Q = C_q a \sqrt{\frac{2}{\delta} \sqrt{P_s - P_1}} \quad (2.5)$$

şeklinde verilir.

P_L yük basıncını temsil ederse:

$$P_L = P_1 - P_2 \quad (2.6)$$

$$P_1 = P_L + P_2 \quad (2.7)$$

$$P_1 = P_L + (P_s - P_1) \quad (2.8)$$

$$P_1 = \frac{1}{2} (P_L + P_s) \quad (2.9)$$

$$P_s - P_1 = \frac{1}{2} (P_s + P_L) \quad (2.10)$$

Burada valf üzerindeki basınç düşümü çalışma basıncı ve yük basıncı cinsinden ifade edilmiş olmaktadır. Bu denklem, denklem 2.5'te yerine konursa;

$$Q = C_q a \sqrt{\frac{2}{\delta} \sqrt{\frac{P_s - P_L}{2}}} = A \frac{dy}{dt} \quad (2.11)$$

elde edilir.

Valflere gönderilmesi gereken kumanda voltajı

$$u = K_{v1} Q \quad (2.12)$$

denklemiyle hesaplanabilir. Bu denklemdeki Kv değeri Şekil 2.6'daki valfin debi-voltaj karakteristik eğrilerinden bulunabilir.

Oransal valf ve hidrolik silindir denklemleri gerçek sistem üzerinde karşılaşılan bazı sorunlardan dolayı kullanılamamaktadır.

Öncelikli olarak valfin makara sistemi zamanla kullanıma bağlı olarak kritik merkez noktasının dışına çıkmış ve karakteristik eğrilerine uymayan cevaplar verdiği görülmüştür. Ayrıca valf karakteristik eğrilerine bakıldığında çalışma basıncı olan 50 bar eğrisi üzerinde 3 voltluk değerden sonra doğrusal olmayan bir özellik görülmektedir. Bu yüzden bu voltajdan sonra değerlerin interpolasyon yoluyla bulunması gerekmektedir [21].

İkinci olarak silindir üzerinde herhangi bir basınç ölçüm veya debi ölçüm sensörü olmadığından debi hesaplanamamaktadır. Ayrıca yağ sıkıştırılmasından ve valf içindeki kaçak debilerden kaynaklanan düzensizliklerin modele eklenmesi ve bunların gözönünde bulunması gerekmektedir. Bunların dışında yağın ısınmasıyla beraber viskozitesinin değişmesi, borulardaki hidrolik basınç kayıpları ve tank dönüş hattındaki yağ basıncının 0 bar olmaması ile yüksek hızlarda tanka dönmeye çalışan akışkanın silindir üzerinde ters basınç etkisi yaratması hidrolik sistem üzerinde doğrusal olmayan durumların oluşmasına yol açan diğer etkiler olarak düşünülmektedir.

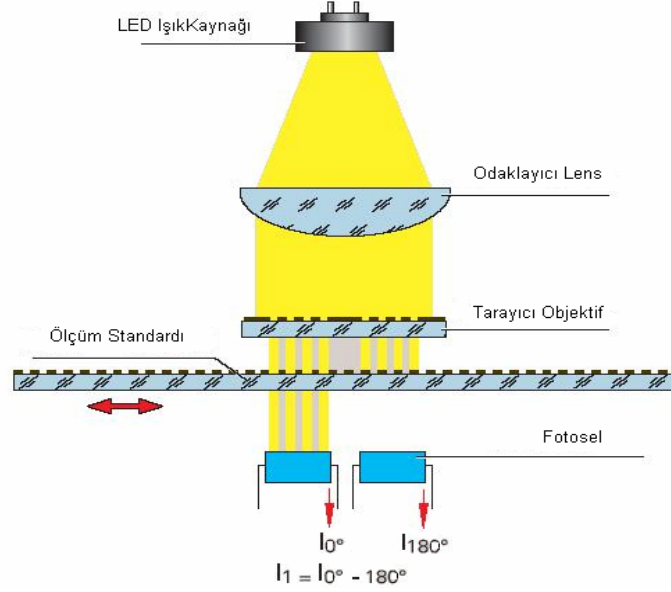
2.3. Pnömatik Elemanlar

BR1 robotunun ilk üç ekseninin hidrolik olmasına rağmen bilekte pnömatik tahriğin seçilmesinin nedeni bileğin, boya tabancası ve kendi ağırlığı dışında başka bir kuvvete karşı çalışmıyor oluşu ve yüksek tahrik kuvvetlerine ihtiyacı olmamasıdır. Ayrıca püskürtme anında hidrolik yağın tahrik elemanlarından sızması ve boyayla karışıp boyanın kimyasal özelliğini bozması ihtimali de vardır [22].

Pnömatik sistem altı adet solenoid (FESTO MSFNG-24 DC 24V) ve bunlarla tetiklenen altı adet pnömatik valf (FESTO BMNH-2-3-M5 0-7 bar) ile bu valflerin pnömatik enerjisini hareket enerjisine dönüştüren üç adet pnömatik motordan oluşmuştur. 4. eksenin bütün bilek mekanizmasını hareket ettirmesi gerektiğinden buraya DSR-32-180P, bundan sonraki iki ekleme ise DSR-25-180P pnömatik motorları seçilmiştir. Şekil 2.8'de pnömatik sistemin devre şeması verilmiştir

2.4. Ölçme Elemanları

BR1 robotunda pozisyon ölçümlerinin sağlanması için optik kodlayıcılar kullanılmıştır. Bunlar üç hidrolik ekseninde HEIDENHAIN RON-425 ve iki pnömatik ekseninde HEIDENHAIN MINIROD 420 ve HEIDENHAIN ROD 121 olmak üzere toplam 5 adettir. Kullanılan kodlayıcılar artımsal olarak çalışan döner optik kodlayıcılardır ve içlerinde 1024 yarık, ışık kaynağı ve optik sensörler içermektedir.



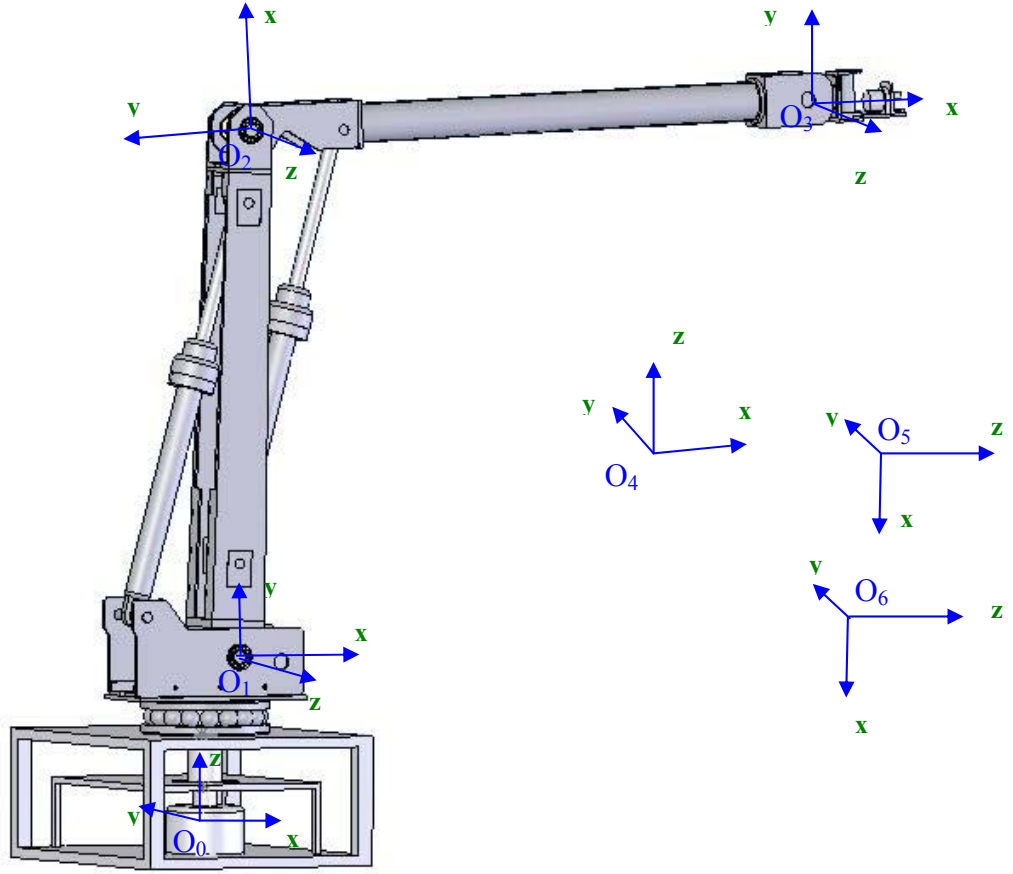
Şekil 2.10: Optik Ölçme Sistemi [27]

Şekil 2.10’da görüldüğü gibi yarık arkasında ışık kaynağından çıkan ışınlar yarığın dönüşüyle beraber sensör üzerine darbe dizisi olarak düşer. Bu darbe dizisinin bir elektronik sayıcı tarafından sayılmasıyla eksenlerdeki açısal değişimler ölçülebilmektedir. Şekilde görülen yanyana iki optik sensör kullanılması kodlayıcının dönüş yönünü belirlemek içindir. Dönme yönü değiştiğinde optik sensörlerin de ışık alma sırası değişmiş olacaktır

2.5 Kinematik Analiz

2.5.1 Denavit-Hartenberg Parametreleri

BR1 robotunun kinematik analizinin yapılabilmesi amacıyla Şekil 2.11’de görülen bütün eksen takımları için Denavit-Hartenberg parametreleri çıkartılmış ve daha sonra 6 serbestlik derecesi için düz ve ters kinematik hesaplara yer verilmiştir [22].



Şekil 2.11: BR1 Hidrolik Robotunun Eksen Takımları

Tablo 2.1: Denavit Hartenberg Parametreleri.

Eklemler	α_i	$a_i(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta_i(\text{rad})$
1	90	0	350	θ_1
2	0	1000	0	θ_2
3	0	1185	0	θ_3
4	-90	100	0	θ_4
5	90	100	0	θ_5
6	0	0	0	θ_6

2.5.2 Düz Kinematik Çözüm

Düz kinematik çözüm kol ucundaki eksen takımının taban eksen takımına göre konumunu ve dönme ve öteleme miktarını belirlemek için hesaplanır. Bunun için homojen dönüşüm matrislerinden yararlanılır. Homojen dönüşüm matrisi i. eksenin i-1. eksene göre olan dönme ve ötelenme miktarını matris formunda gösterir. En genel haliyle:

$${}^{i-1}_i A = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & P_i^{i-1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

olarak yazılır. Genel dönüşüm matrisi:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos \alpha_i & \sin \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \cdot \sin \alpha_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir. Buna göre Denavit Hartenberg parametreleri kullanılarak bütün eklemler için homojen dönüşüm matrisleri yazılabilir:

$$A_1^0(\theta_1) = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$A_2^1(\theta_2) = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$A_3^2(\theta_3) = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_3 C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & a_3 S_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$A_4^3(\theta_4) = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & a_4 C_4 \\ S_4 & 0 & C_4 & a_4 S_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$A_5^4(\theta_5) = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & a_5 C_5 \\ S_5 & 0 & -C_5 & a_5 S_5 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$A_6^5(\theta_6) = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Bulunan matrislerin çarpılmasıyla ileri yönlü robot kinematiği çıkarılır.

$$T_6^0 = A_1^0(\theta_1).A_2^1(\theta_2).A_3^2(\theta_3).A_4^3(\theta_4).A_5^4(\theta_5).A_6^5(\theta_6) \quad (2.21)$$

2.5.3 Ters Kinematik Çözüm

Ters kinematik, uç noktasının konum ve yönelim verileri ile eklem değişkenlerinin bulunması şeklinde ifade edilebilir. Ters kinematik problem çözümleri gerçek zamanlı kontrol, eklem torklarının hesaplanması ve yörünge planlaması gibi uygulamalar için çok önemli bir adımdır [14].

Denklem 2.21’de görülen T matrisi ileri yön kinematik matrisidir. Bu matrisi;

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

şeklinde yazarsak buradaki matrisin 1. kolonu uç işlevcisinin normal vektörünü, 2. kolonu kayma vektörünü , 3. kolonu kayma vektörünü ve 4. kolonu ise konumunu vermektedir.

$$\left[A_1^0(\theta_1) \right]^{-1} T_6^0 = A_2^1(\theta_2).A_3^2(\theta_3).A_4^3(\theta_4).A_5^4(\theta_5).A_6^5(\theta_6) \quad (2.23)$$

$$\left[A_1^0(\theta_1) \right]^{-1} T_6^0 = T_6^1 \quad (2.24)$$

Şeklindeki çarpım yapıldıktan sonra karşılıklı terimler eşitlenir ve düzenlenirse;

$$S_1 a_x - C_1 a_y = C_5 \quad (2.25)$$

$$S_1 p_x - C_1 p_y = -l_5 C_5 \quad (2.26)$$

eşitlikleri elde edilir. Bu eşitliklerin düzenlenmesiyle ise;

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{p_y + a_y.l_5}{p_x + a_x.l_5} \right] \quad (2.27)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikten birinci eklem değişkeni θ_1 bulunmuş olur. Denklem 2.24'deki gibi T_6^4 matrisi çarpım halinde bulunur ve karşılıklı terimler eşitlenirse:

$$\theta_{234} = \tan^{-1} \left[\frac{a_z}{C_1.a_x + S_1.a_y} \right] \quad (2.28)$$

$$PP_x = p_z - d_0 - S_{234}(l_5.C_5 + l_4) = S_{23}l_3 + l_2C_2 \quad P_L = P_1 - P_2 \quad (2.29)$$

$$PP_y = C_1.p_x + S_1.p_y - C_{234}(l_5.C_5 + l_4) = C_{23}l_4 + l_2C_2 \quad P_1 = P_L + P_2 \quad (2.30)$$

$$C_3 = \frac{PP_x^2 + PP_y^2 - l_2^2 - l_3^2}{2.l_2.l_3} \quad P_1 = P_L + (P_s - P_1) \quad (2.31)$$

$$S_3 = \sqrt{1 - C_3^2} \quad (2.32)$$

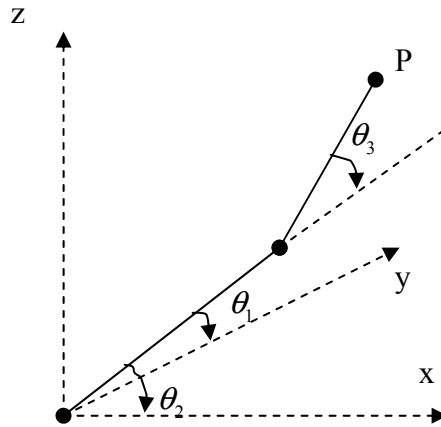
$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{S_3}{C_3} \right) \quad (2.33)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{PP_y(l_3.C_3 + l_2) - PP_x.l_3.S_3}{PP_y(l_3.C_3 + l_2) + PP_x.l_3.S_3} \right) \quad (2.34)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \quad (2.35)$$

2.5.4 Jakobiye Matrisi

Jakobiye herbir eklem hızının uç işlevcisinin hızına katkısını belirleyen eklem hızıyla uç işlevcisinin hızı arasında ilişki kuran bir büyüklüktür.



Şekil 2.12: Eklem Açılarının Koordinat Eksenlerinde Gösterimi

$$J \dot{q} = \dot{p} \quad (2.36)$$

Şekil 2.12'deki uç P noktasının x,y,z düzlemine göre koordinatları;

$$P_x = (l_1 C_2 + l_2 C_{23}) C_1 \quad (2.37)$$

$$P_y = (l_1 C_2 + l_2 C_{23}) S_1 \quad (2.38)$$

$$P_z = l_1 S_2 + l_2 S_{23} \quad (2.39)$$

şeklinde bulunur. Bu ifadelerin eklem değişkenlerine göre kısmi türevleri alınırsa

$$\frac{\delta P_x}{\delta \theta_1} = -S_1(l_1 C_2 + l_2 C_{23}) \quad (2.40)$$

$$\frac{\delta P_x}{\delta \theta_2} = -C_1(l_1 S_2 + l_2 S_{23}) \quad (2.41)$$

$$\frac{\delta P_x}{\delta \theta_3} = -l_2 S_{23} C_1 \quad (2.42)$$

$$\frac{\delta P_y}{\delta \theta_1} = -C_1(l_1 C_2 + l_2 C_{23}) \quad P_z = l_1 S_2 + l_2 S_{23} \quad (2.43)$$

$$\frac{\delta P_y}{\delta \theta_2} = -S_1(l_1 S_2 + l_2 S_{23}) \quad (2.44)$$

$$\frac{\delta P_y}{\delta \theta_3} = -l_2 S_{23} S_1 \quad (2.45)$$

$$\frac{\delta P_z}{\delta \theta_1} = 0 \quad (2.46)$$

$$\frac{\delta P_z}{\delta \theta_2} = l_1 C_2 + l_2 C_{23} \quad (2.47)$$

$$\frac{\delta P_z}{\delta \theta_3} = l_2 C_{23} \quad (2.48)$$

Bulunan bu ifadelerle jakobiyeen matrisi şu şekilde ifade edilir:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\delta P_x}{\delta \theta_1} & \frac{\delta P_x}{\delta \theta_2} & \frac{\delta P_x}{\delta \theta_3} \\ \frac{\delta P_y}{\delta \theta_1} & \frac{\delta P_y}{\delta \theta_2} & \frac{\delta P_y}{\delta \theta_3} \\ \frac{\delta P_z}{\delta \theta_1} & \frac{\delta P_z}{\delta \theta_2} & \frac{\delta P_z}{\delta \theta_3} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

2.5.5 Ters Jakobiyeen

BR1 boya robotunun çalışma esnasında uç noktasının belirli bir yörüngeyi sabit hızla takip etmesi istenecektir. Bu durumda uç noktasının hızı bilinmekte fakat eklem hızları bilinmemektedir. Eklem hızları;

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{p} \quad (2.50)$$

ifadesiyle bulunur. Bu durumda her örnekleme periyodunda jakobiyen matrisinin tersi bulunmalı ve bu matris bilinen uç noktası hız vektörleri matrisiyle çarpılıp eklem hız vektörleri bulunmalıdır. BR1 robotu için jakobiyen ve ters jakobiyen matris hesaplarının yapıldığı bir program Labview ortamında hazırlanmış olup aynı program döngüsü altında ters ve düz kinematik hesaplar da yapılabilmektedir.

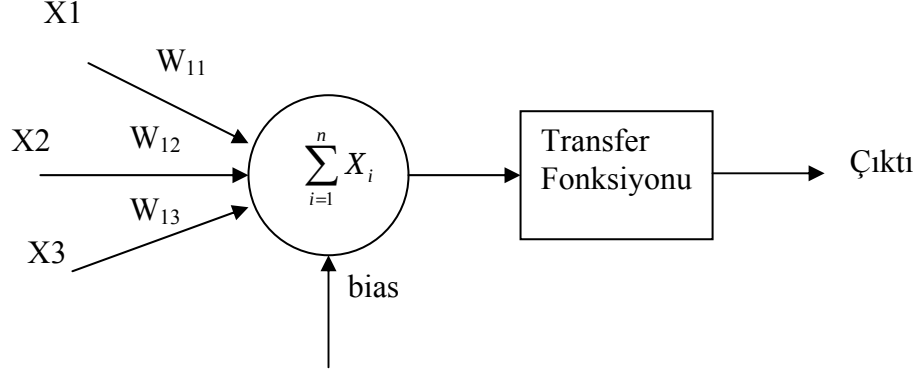
3. YAPAY SİNİR AĞLARI (YSA) VE BULANIK MANTIK KONTROL (BMK)

3.1. YSA (Neural Network)

YSA insan beyninin çalışma yöntemini model olarak tasarlanan ve çeşitli işlem elemanlarından oluşan sistematik bir yapıdır. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbiriyle bağlanarak çeşitli katmanlar şeklinde bir araya gelmesinden oluşur. Elektronik devre elemanlarıyla veya bilgisayar programlarıyla gerçekleştirilebilen YSA sistemlerindeki bir işlem elemanı 5 elemandan oluşmaktadır.

- **Girdiler:** Bilgi işlem elemanlarına ağ dışı kaynaktan veya ağın kendi elemanlarından sağlanabilir.
- **Ağırlıklar:** Doğru çıkışı elde etmek için her girdinin çıkış üzerindeki etkin olduğu değerdir. Ağırlıklar öğrenme sürecinde optimize edilerek en iyi sonuç elde edilmeye çalışılır.
- **Birleştirme Fonksiyonu:** Ağırlık kazanmış girdiler üzerinde uygulanan fonksiyondur. En çok toplama fonksiyonu kullanılır.
- **Aktivasyon Fonksiyonu:** Birleştirme fonksiyonunun sonucunu değerlendiren fonksiyondur. En yaygın kullanılanları tansig, logsig purelin ve step fonksiyonlarıdır.
- **Çıktılar:** Transfer fonksiyonu sonuçlarının ağ dışına veya bağlantılı olan işlem elemanlarına aktarıldığı kısımdır.

YSA robot kontrolünde, görüntü işlemede, havacılıkta, otomotivde, tıbbi araştırmalarda, telekomünikasyonda kullanılmaktadır. YSA sisteminin genel yapısı Şekil 3.1’de verilmiştir. Bu şekilde YSA’nın temel elemanı olan bir nöron üzerinde uygulanan işlemler, ağırlık fonksiyonları ve transfer fonksiyonu görülmektedir.



Şekil 3.1: YSA Sistemi Genel Yapısı

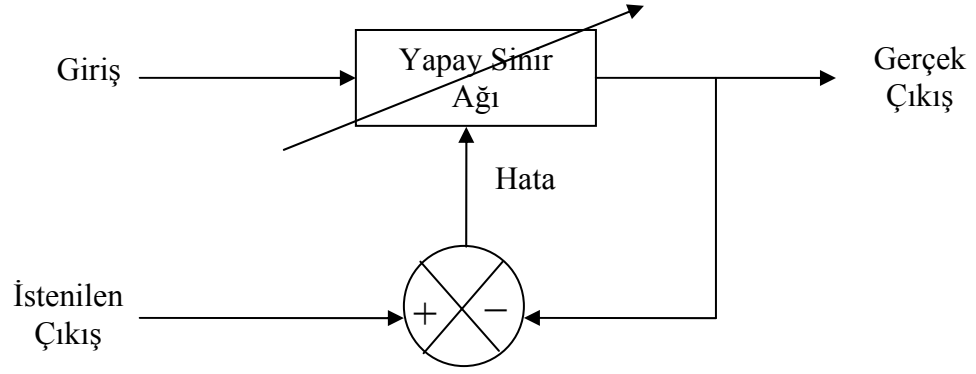
YSA sistemleri:

- Örneklerden öğrenme ile varolan girdi- çıktı ilişkisini kullanarak genelleme yapabilir.
- Ortamda veya sistemdeki bazı değişikliklere adapte olup organize olabilir ve yeni durumu öğrenebilirler.
- Örnekleri girdiler olarak alıp örneklerden oluşturduğu girdi-çıkı eşleşmelerini kullanarak karşılık gelen çıktıyı üretebilir [24].

3.1.1 Öğrenme

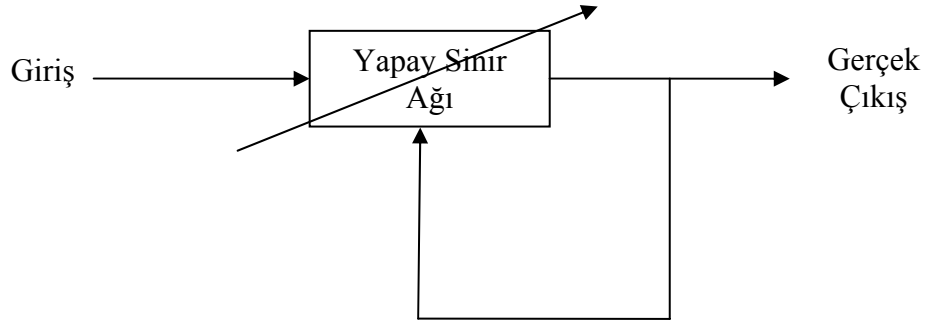
Bir YSA sisteminin öğrenmesi o sinir ağı modelinin uygulunan sistem için en uygun verileri oluşturacak optimum ağırlık değerlerini bulmaktır. Literatürde 3 tip öğrenme vardır:

- Denetimli öğrenme: Bu metotta öğretici ağı ne üretmesi gerektiğini söyler. Üretilmesi gereken değer ile ağı ürettiği değer karşılaştırılıp oluşan hatanın minimum seviyeye inmesi için optimum ağırlıklar hesaplanır. Denetimli öğrenme sisteminin yapısı Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2: Denetimli Öğrenme

- Denetimsiz Öğrenme: Bu öğrenme stratejisi kendi kendini organize eden ağlar olarak da adlandırılır. Burada bir öğretici yoktur, ağ girdi çıktı eşleşmesini yapabilmesi için kendi ölçütlerini kurar. Denetimsiz öğrenme sisteminin yapısı Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3: Denetimsiz Öğrenme

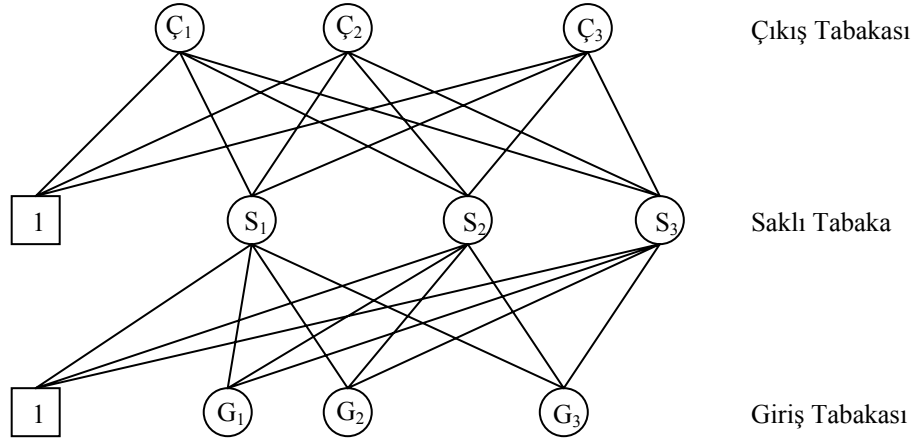
- Destekli(Takviyeli) Öğrenme: Bu öğrenme metodunda da bir öğretici vardır fakat çıkışta sadece ağa çıkışın doğruluğu ile ilgili bir kriter bilgisi verilir.

3.1.2 Hatanın Geriye Yayınımı (HGY)

Karmaşık modellerin çıkarımında kullanılan etkin YSA modellerinden birisi Werbos tarafından tasarlanmış ve daha sonra Parker, Rummelhart ve McClelland tarafından geliştirilmiş olan hatayı geriye yayma ağıdır (Back propagation network). HGY katmanlar arasında tam bağlantının bulunduğu denetimli ve çok katmanlı bir YSA

modelidir. Ağ çıkışındaki mevcut hatayı azaltmak için her bir tabakadaki ağırlıkların hata düzeyine göre yeniden ayarlandığı bu algorithmada temel seviyede 3 katman bulunur. Bunlar; giriş, çıkış ve saklı katmanlarıdır.

Şekil 3.4’de görülen ağ yapısında giriş çıkış ve saklı tabakalar görölmektedir.



Şekil 3.4: Giriş Çıkış ve Saklı Tabakalar

Şekil 3.4’de görülen giriş veri grupları, giriş veri sayısı ile aynı sayıda nöron içeren giriş katmanından ağa sunulur ve hiçbir işlem yapılmadan veriler saklı tabakaya geçer. Uygulamaya göre bu gizli katman sayısı birden fazla olabilir ve tabakadaki nöron sayısı ağ tasarımcısının tecrübesine kalmıştır. Gereğinden az nöron kullanılması giriş ve çıkış arasındaki bağıntının yüksek hassasiyetle öğrenilememesine, ve çok sayıda nöron kullanılması ise ağa sunulan yeni verilerin doğru olarak işlenmesinde zorlukların çıkmasına neden olur. Bu katmandan sonra veriler bu ağı kullandığı fonksiyonla işlenerek çıkış verisi sayısı kadar nöron içeren çıkış katmanına ilerler. Bu algorithmada aynı katman içindeki nöronlarda bir bağlantı yoktur ve veriler katman atlayarak diğer katmana geçemezler. Ağı çıkışında elde edilen verilerle istenen çıkışlar karşılaştırılır ve aradaki fark her katman içindeki düğüm noktalarına bir hata sinyali şeklinde hesaplanarak gönderilir ve her düğümdeki ağırlıklar gelen hataya göre tekrar hesaplanır. Böylece ara katmandaki düğümlerin herbiri toplam hatanın sadece hesaplanan bir kısmını içerir. Bu işlem çıkış katmanından giriş katmanına kadar her düğümdeki nöronlar için bütün giriş-çıkış verilerine göre hesaplanır ve ağı belli bir değere yakınsaması sağlanır. Ağ eğitimi tamamlandıktan sonra katmanlar arasındaki son oluşan ağırlık değerleri deneme aşaması için hafızada tutulur ve yeni veri değerlerine göre sınanır.

3.2 Bulanık Mantık Kontrol (Fuzzy Logic Control)

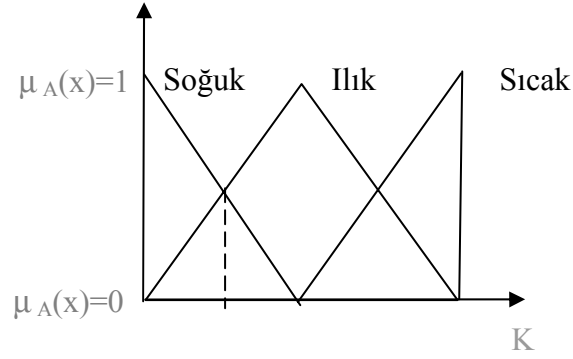
Bulanık mantık kavramı ilk olarak 1965 yılında California Üniversitesi öğretim üyelerinden Prof. Lotfi Zadeh tarafından yayınlanan “Fuzzy Sets” adlı makalede sunulmuştur. 1974 yılında Londra Üniversitesinden Ebrahim Mamdani’nin bulanık mantığı bir buhar makinasına uygulaması bu kavramın dönüm noktası olmuştur. İlk endüstriyel uygulama ise 1980 yılında Danimarkalı F.H. Smidth’in bir çimento fırının bulanık mantık kontrolünü gerçekleştirmesidir. Aynı sene içinde Japon Fuji Elektrik Firması bulanık mantıkla su ayrıştırma işlemini gerçekleştirmiş ve daha sonra Hitachi firması bulanık mantıkla çalışan otomatik tren kontrol sistemini kurmuştur [16].

Günlük hayatta kullanılan sıcak-soğuk veya uzun-kısa kavramları geleneksel küme teorisiyle açıklanamayacak kavramlardır. Örneğin ılık kavramının belli bir derecede sıcak ve belli bir derecede soğuk olduğu söylenebilir. Bu çeşit kavramlar kişiden kişiye değişebilen dilsel değişkenlerdir. Klasik küme teorisinde Venn diyagramlarıyla ifade edilemeyen bu tarz büyüklükler, bulanık mantık teorisinde üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilirler.

3.2.1 Bulanık Mantık Temeli

Klasik küme teorisinde bir öge bir kümenin elemanıdır veya değildir. Böyle kümeler keskin kümeler denmektedir (crisp set). Bulanık mantık teorisinde ise öğeler çeşitli kümelerin belli bir derecede veya aidiyet yüzdesinde elemanı olarak sayılır. Yukarda verilen sıcak-soğuk kümelerinde ılık kümesinin aidiyeti arandığında %50 sıcak kümesine, %50 soğuk kümesine ait olduğu söylenebilir.

Şekil 3.5’deki sıcak-soğuk-ılık üçgensel üyelik fonksiyonlarının 0-30 dereceleri arasında düzenlenişinin bir örneği görülmektedir. Bu yapıya göre 15 derece %100 ılıktır fakat 12.5 derece %50 soğuk %50 ılıktır. Böylece bu değer için ne sıcak ne soğuk demenin mümkün olmadığı ve bu durumun matematiksel olarak üyelik fonksiyonları yardımıyla anlatılabileceği görülmektedir. Şekil 3.5’deki üyelik fonksiyonları ile sıcaklık ve soğukluk evreni 3 değişik bölgeye ayrıldıysa da pratikte daha fazla daha fazla bölgeye ayırım ile daha hassas bir çalışma sağlanabilmektedir fakat bu durum beraberinde hesaplama zamanı gecikmesi getirmektedir.



Şekil 3.5: Üyelik Fonksiyonları

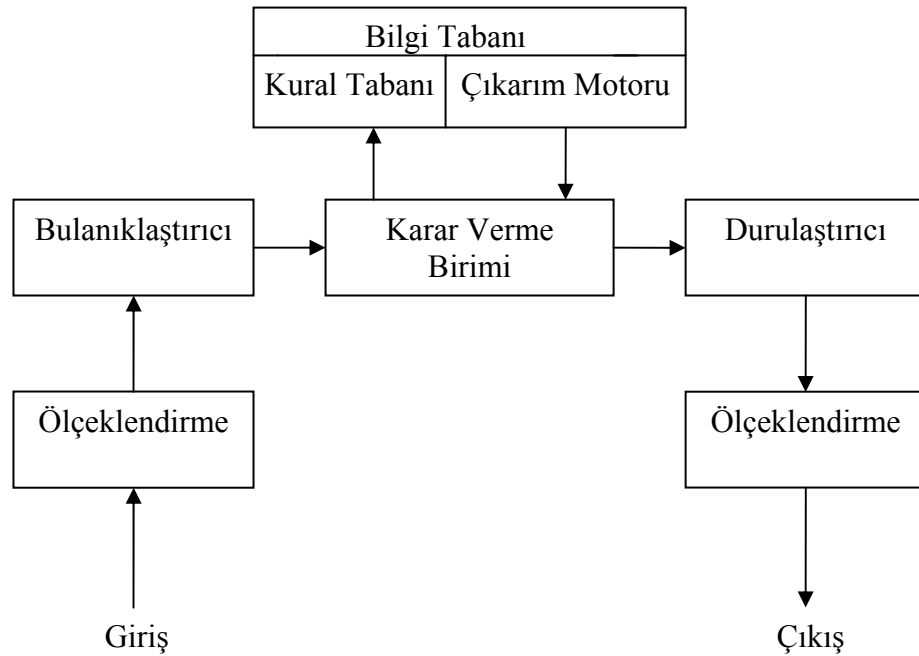
3.2.2 Bulanık Kümeler Üzerindeki İşlemler

- **Birleşim Kümesi:** E evrensel kümesi altında tanımlanan A ve B kümelerinin birleşimi $A \cup B$ şeklinde tanımlanır. Bu kümenin üyelik fonksiyonu şeklindeki matematiksel ifadesi: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B)$
- **Kesişim Kümesi:** E evrensel kümesi altında tanımlanan A ve B kümelerinin kesişimi $A \cap B$ şeklinde tanımlanır. Bu kümenin üyelik fonksiyonu şeklindeki matematiksel ifadesi: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B)$
- **Tümleyen:** E evrensel kümesi altında verilen bir A kümesinin üyelik fonksiyonunun tümleyeni: $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$
- **Alt Küme:** Eğer E evrensel kümesinin her bir elemanının A kümesindeki üyelik derecesi B kümesindeki üyelik derecesinden küçük veya eşit ise A kümesi B kümesinin alt kümesidir. : $\mu_{A(x)} \leq \mu_{B(x)}, x \in E$ ise $A \subseteq B$
- **Eşit Küme:** Eğer E evrensel kümesinin her bir elemanının A kümesindeki üyelik derecesi B kümesindeki üyelik derecesine eşit ise A kümesi B kümesine eşittir. : $\mu_{A(x)} = \mu_{B(x)}, x \in E$ ise $A = B$

3.2.3 Bulanık Kontrolör Tasarımı:

Bir bulanık mantık kontrolcüsü tasarlarken genel olarak şu adımlar takip edilmelidir:

- Sistemin durum değişkenleri, giriş, çıkış parametreleri tanımlanır.
- Her bir giriş ve çıkış parametresi için üyelik fonksiyonları tanımlanır. Bu fonksiyonların sayısı ve şekli tasarımcıya bağlıdır.
- Sistemin uzman dilsel kuralları tayin edilir ve bu şekilde giriş ve çıkış arasında Eğer-O halde şeklinde bir kural tablosu oluşturulur.
- Oluşturulan kural tablosu ile bazı örnek girişler için sistem çıkışları kontrol edilir. Uygulanan kurala göre sonuç tespit edilir.



Şekil 3.6: Bulanık Mantık Kontrolörü

Şekil 3.6’da bir bulanık mantık kontrolörün elemanları görülmektedir. Bulanık mantık kontrolörü bulanıklaştırıcı, kural tabanı, çıkarım motoru, durulaştırıcı ve ölçeklendirme elemanlarından oluşmaktadır.

3.2.3.1 Bulanıklaştırıcı:

Bulanıklaştırma işlemi kontrolöre giriş değerlerinin bulanık değerler kümesine dönüştürülmesi işlemidir. Üyelik fonksiyonları kullanılarak giriş değerleri 0-1 arasında üyelik fonksiyona aidiyet değerlerine dönüştürülür. Bu üyelik fonksiyonlarının en çok kullanılanları üçgensel, yamuk ve çan eğrisi fonksiyonlarıdır. Deneylerde giriş ve çıkış değerleri için 5x5 üçgensel fonksiyonlar kullanılmıştır.

3.2.3.2 Kural Tabanı:

Bulanık küme içinde girişler ve çıkışlar arasındaki bağıntılar kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır. Örneğin A ve B değişkenlerinin giriş, C değişkeninin çıkış olduğu bir sistem için ;

“EĞER x girişi A ve y girişi B ise z çıkışı C’dir.”

şeklindeki kural A ve B girişlerine göre C bulanık değerini belirler. Deneylerde toplam kural tabanı 25 kural içermektedir.

3.2.3.3 Çıkarım Motoru:

Burada bulanık mantık işlemleriyle eğer-o halde kuralları birleştirilerek giriş ve çıkış arasında bir bağlantı kurulur. Bu birleştirme veya çıkarım için 3 tane çok kullanılan metod vardır; bunlar Max-Min metodu, Max-Dot metodu ve Takagi-Sugeno metodudur [16].

3.2.3.4 Durulaştırıcı:

Bulanık çıkarımların sonucunda elde edilen bulanık kümelerin giriş değerleri gibi sayısal değerlere dönüştürülmesi gerekir. Durulandırma işleminde bulanık çıkarımdan gelen değerlerin sayısal değerlere dönüşmesi işlemi gerçekleştirilmektedir. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri

- Ağırlık merkezi
- Ağırlık Ortalaması

- Maksimumların en büyüğü

Deneylerde kullanılan ağırlık merkezi yönteminin denklemi şu şekildedir:

$$y^* = \frac{\int \mu_c(y) \cdot y dy}{\int \mu_c(y) dy} \quad (3.1)$$

3.2.3.5 Ölçeklendirme

Ölçeklendirme, bulanık kontrolörün giriş ve çıkış evrensel kümesini temsil eder. Kontrolöre giren her değer kontrolörün üyelik fonksiyonlarının sınırları içinde kalmalıdır. Ölçeklendirme faktörü bulanık kontrolörün sistem üzerindeki etkisini birinci dereceden etkiler. Her giriş değeri tasarımcı tarafından belirlenen ölçeklendirme katsayıları ile çarpılarak kontrolöre girer ve yine bir katsayıyla çarpılarak kontrolörden çıkar. Böylece kontrolörün belirli sınır değerler arasında çalışması ve bu sınır değerleri arasında sistemi kontrol etmesi sağlanır.

4. BR1 BOYA ROBOTU BİLGİSAYAR ARAYÜZ DONANIMI VE YAZILIMI

BR1 boya robotunun donanımı NI firmasının ürettiği Fieldpoint terminal sistemi ve analog giriş-çıkış modülleri, sinyal şartlandırıcı devre ve yine NI firmasının geliştirdiği LabVIEW 7.0 Express yazılımından oluşmaktadır. Ayrıca yörünge planlaması ve YSA eğitimi için Matlab programından Labview programına bilgi akışı sağlanmıştır.

Bulanık Mantık yazılımı için ise Labview yazılımı altında geliştirilmiş olan “PID and Fuzzy Logic Toolkit” kullanılmıştır.

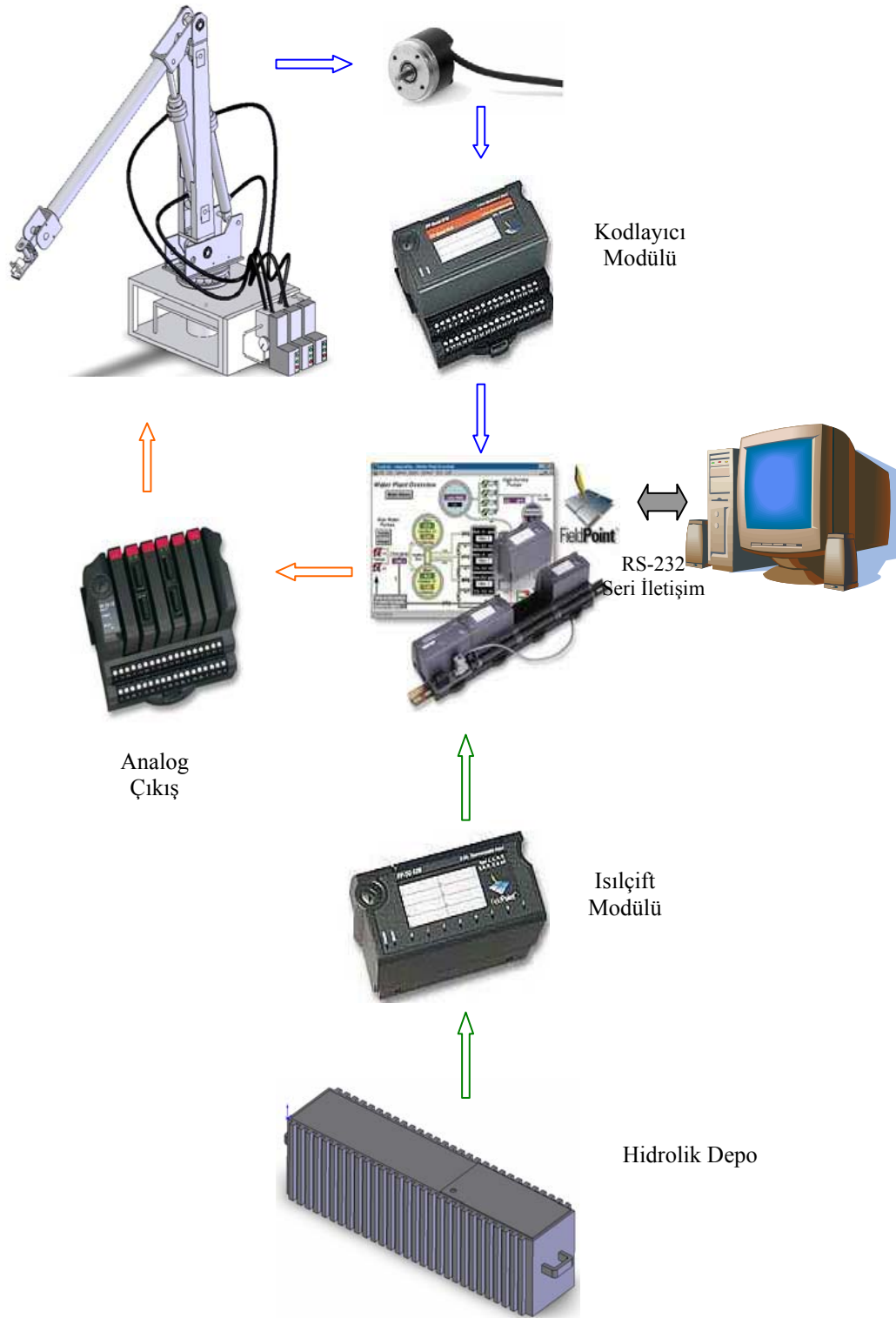
4.1. Fieldpoint Sistemi

Fieldpoint endüstriyel kontrol ve gözlem uygulamaları için kullanılan modüler ve dağıtık bir G/Ç sistemidir. Sistem kendi içinde çeşitli analog ve dijital modüller ile diğer sistemlere bağlantı sağlayan network modülleri ve üst seviye yazılım araçları içermektedir. Fieldpoint sistemi endüstriyel sahada sensör ve veri kaynaklarının yakınına yerleştirilerek veriler RS-232/RS-485 seri iletişim yoluyla veya ethernet üzerinden bilgisayardaki yazılıma aktarılır. Kontrol edilen sisteme gönderilmesi istenen veriler tekrar aynı yolla Fieldpoint ağı üzerinden istenen yerlere aktarılır.

Fieldpoint sistemi üzerine yerleştirilen modüller kodlayıcı sinyallerinin sayılması, röle anahtarlama veya sinyal gönderme ve okuma için kullanılabilir.

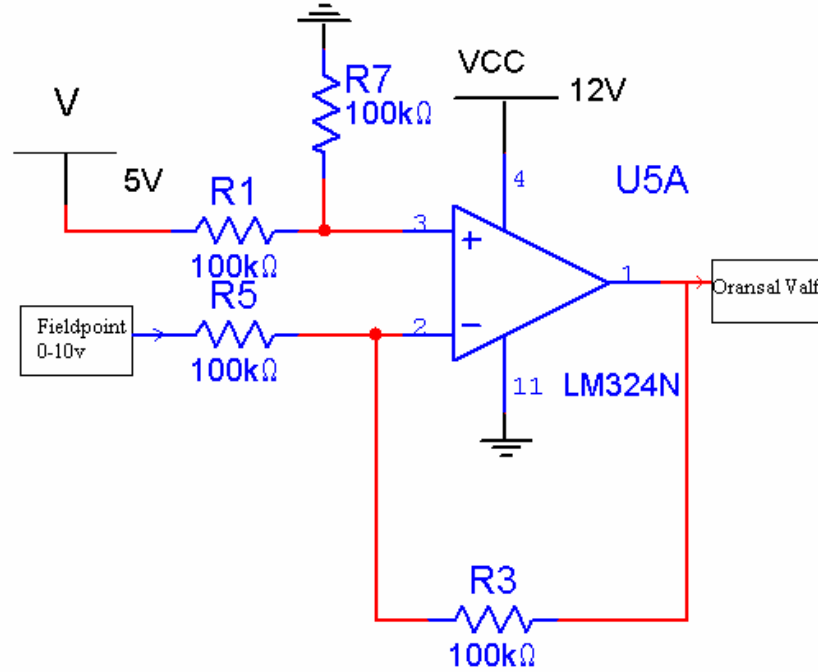
BR1 robotu üzerinde kullanılan Fieldpoint modülleri Şekil 4.1’de görülmektedir. Fieldpoint ağı üzerinde FP-1000 ana network modülü, FP-AO-10 0-10 volt analog çıkış modülü (2 oransal valf için 2 modül ve 2 şartlandırıcı devre), FP-Quad-510 kodlayıcı darbe sayıcı, FP-RLY-422 röle sürücüsü, FP-TC-120 ısı çift girişi modülü bulunmaktadır.

Fieldpoint analog çıkış modülleri 0-10 volt arası voltaj gönderebilmekte ancak valf -5,5 volt arasını kontrol edebilmektedir.



Şekil 4.1: Sistemin Donanımı ve Fieldpoint Bağlantıları

Fieldpoint çıkışı işe oransal valf girişi arasında Şekil 4.2’de görülen bir operasyonel kuvvetlendirici çıkarma devresi kurularak Fieldpoint çıkışından 5v çıkartılmış ve Fieldpoint çıkış aralığı oransal valf aralığına uyacak seviyeye getirilmiştir.



Şekil 4.2: Sinyal Şartlandırıcı Devre

Her iki valf için aynı entegre üzerinden 2 devre kurulmuş ve valflerle bağlantısı sağlanmıştır.

4.2. LabVIEW Programı

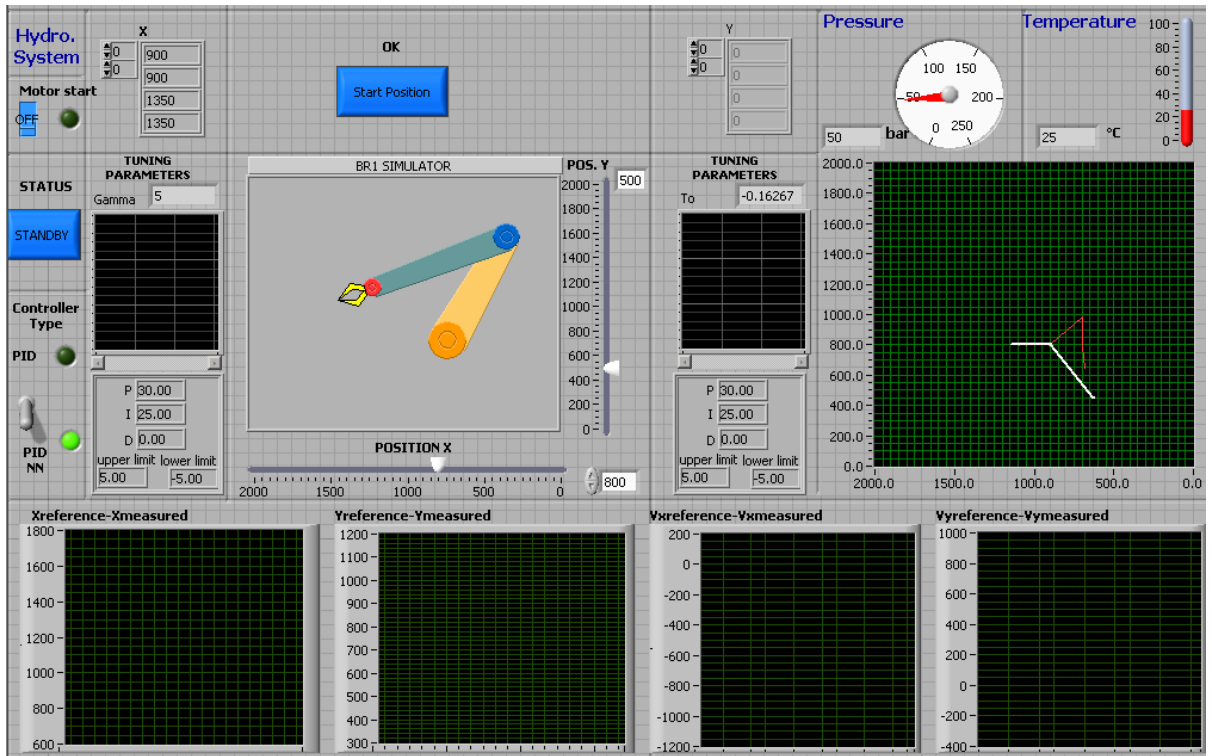
LabVIEW programı veri akışına bağlı olan bir programdır. Kullanıcı objelerin grafiksel arabirimlerini kullanarak çeşitli blokları data veriyolları ile birbirine bağlar ve yürütme işlemi bu bağlantılara göre olur. Birden fazla girişi olan bir blok çıkış üretmek için bütün girişlerindeki datanın hazır olmasını bekler ve bundan sonra çıkış üretir. Bu tarz programlama mantığı hem program hatalarının ayıklanmasında büyük kolaylık sağlar, hem de satır-satır işlem yapan programlara göre daha hızlıdır.

Veri yollarıyla bağlanan bloklar üzerindeki veri akışı görsel olarak grafiklerle izlenebilir ve bütün bu hazırlanan program .vi uzantısı ile bellekte saklanır.

Labview yazılımında blok diyagramlarının kuruluşu ve programın akış mantığı tamamen kullanıcıya aittir. Kullanıcı isterse C kodunda veya Matlab dilinde bir program yazabilir ve bunu Labview yazılımı içinde yürütebilir. Labview programı ile doğrudan .exe formatıyla yürütme dosyaları oluşturulup programın kurulu olmadığı bilgisayarlarda komut istemcisinden hazırlanan dosya yürütülebilir. Ayrıca hazırlanan bir .vi dosyayı başka bilgisayardan network bağlantısı ile çalıştırılarak sisteme uzaktan erişim sağlamak da mümkün olmaktadır.

Grafiksel arabirim kullanarak kurulan kontrol devreleri, çok yüksek programlayıcılık bilgisi gerektirmeden hızlı prototipleme ile yapılabilmekte görsel iletişim pencereleri hazırlanabilmektedir. Bu iletişim pencerelerinden BR1 için hazırlanan kontrol paneli Şekil 4.3’de görülmektedir.

BR1 boya robotu için çok çeşitli blok diyagramı hazırlanmıştır. Bu blok diyagramlarında değişik kontrol metotları uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.3: Labview Arayüzü

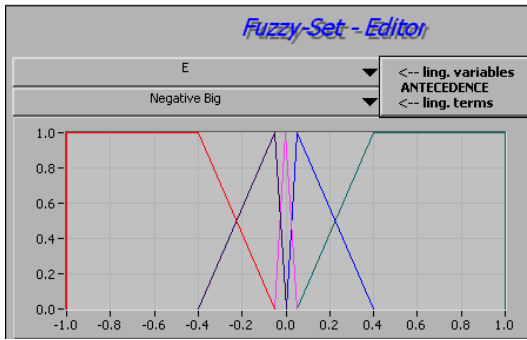
Şekilde BR1 robotu için hazırlanmış kontrol bloklarından bir tanesinin kullanıcı arayüzü görülmektedir. Bu arayüz BR1 robotunun iki hidrolik ekleminin kontrolü için hazırlanmıştır. Şekil üzerinde robot uç noktasının takip ettiği konum ve hız ile PID

kontrol katsayıları ve kumanda düğmeleri görülmektedir. Robotun çalışması esnasında takip etmesi gereken konum ortadaki iki eklemlili simülasyon ekranında görülmektedir. Sağ üst köşede çalışma anındaki basınç ve sıcaklık değerleri görülmektedir. İken sol alt köşede istenen kontrol seçimi için ayrı bir düğme bulunmaktadır.

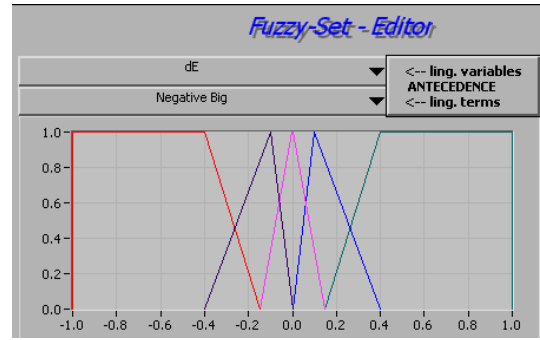
4.3. Bulanık Mantık Yazılımı

Labview programı içindeki “Fuzzy Logic Toolbox” kullanılarak bulanık mantık yazılımı sağlanmıştır.

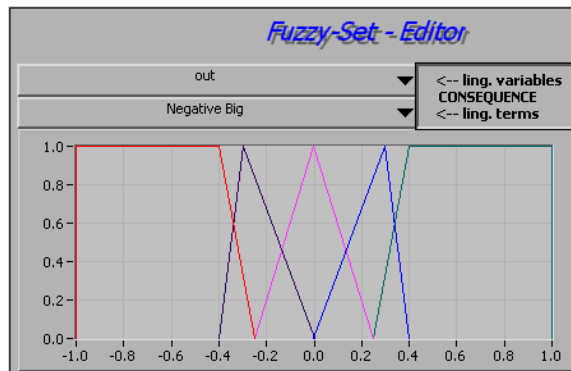
Giriş olarak BR1’in açılarındaki hatalar ile bu hataların türevi, çıkış olarak ise oransal valf kumanda voltajı alınmıştır. Üyelik fonksiyonları ile kural tabanı ve kontrol yüzeyi sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’de görülmektedir.



Şekil 4.4: Hata Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.5: Hata Türevi Üyelik Fonksiyonları



Şekil 4.6: Çıkış Üyelik Fonksiyonları

Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6’da görülen e açısı (rad), açısı hatasının türevi (rad/s) ve çıkış (v) için üyelik fonksiyonları 5’er bölgeye ayrılmış ve isimleri (NB,NS,Z,PS,PB) olarak verilmiştir. Hesap zamanını hızlandırmak için üçgensel üyelik fonksiyonları

oluşturulmuştur. Üyelik fonksiyon yapıları ve katsayılar deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir. Çıkış üyelik fonksiyonlarında ortadaki sıfır bölgesi arttırılarak yüksek voltaj değerlerinden kaçınılmış ve hassasiyet arttırılmıştır. E ve dE üyelik fonksiyonlarının ise sıfır bölgesi civarında toplanarak hatanın azaltılması amaçlanmıştır. Kontrol için oluşturulan kural tabanı şu şekilde planlanmıştır:

- Eğer hata negatif büyük (NB) ve hatanın türevi de negatif büyükse (NB) o halde negatif büyük (NB) kontrol sinyali uygula
- Eğer hata sıfır (Z) ve hatanın türevi de negatif küçük (NS) ise o halde sıfır (Z) kontrol sinyali uygula.

Üyelik fonksiyonu için kullanılan terimlerden:

NB=Negatif Büyük

NS=Negatif Küçük

Z=Sıfır

PS=Pozitif Küçük

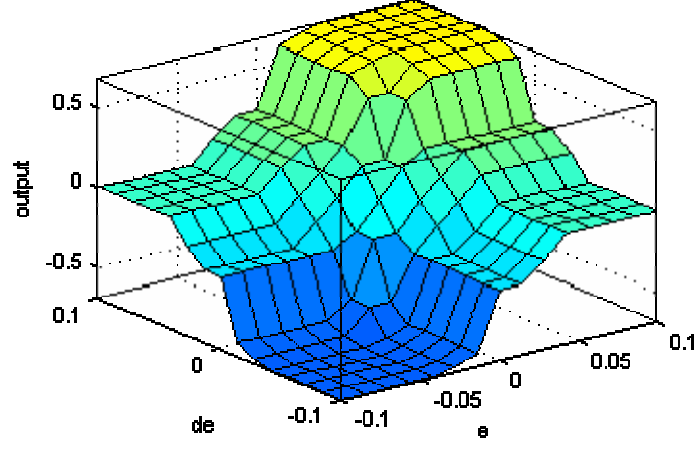
PB=Pozitif Büyük

olmasını ifade eder. Bütün kontrol sistemi için kural tablosu Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1: BMK Kural Tablosu

		Hata Türevi				
		NB	NS	Z	PS	PB
Hata	NB	NB	NB	NB	Z	PS
	NS	NB	NS	NS	Z	PS
	Z	NB	NS	Z	PS	PB
	PS	NS	Z	PS	PS	PB
	PB	NS	Z	PB	PB	PB

Şekil 4.7’de görülen bulanık mantık kontrolör yüzeyi Matlab Fuzzy Logic Toolbox’da hazırlanmıştır.



Şekil 4.7: Bulanık Mantık Kontrol Yüzeyi

5. BR1 BOYA ROBOTUNUN GERÇEK ZAMANDA KONTROLU

Robot kontrolünde temel problemlerden biri bir nesnenin bir yerden başka bir yere taşınmasıdır. Bu işlem için uygulanan kontrol metodu noktadan noktaya kontroldür. Burada istenen manipölatör uç noktasının istenen noktaya en uygun performansla (en iyi yükselme, aşım zamanı ve kararlı hal hatası ile) ulaşmasıdır. Bu tip robotlarda genelde ilk hareket anında robota açık çevrim kontrol uygulanır. Robot uç noktası belirli bir sınır değer noktasını geçtiği anda kapalı çevrim kontrole geçilerek uç noktanın istenen pozisyona istenen hassasiyetle gitmesi sağlanır [14].

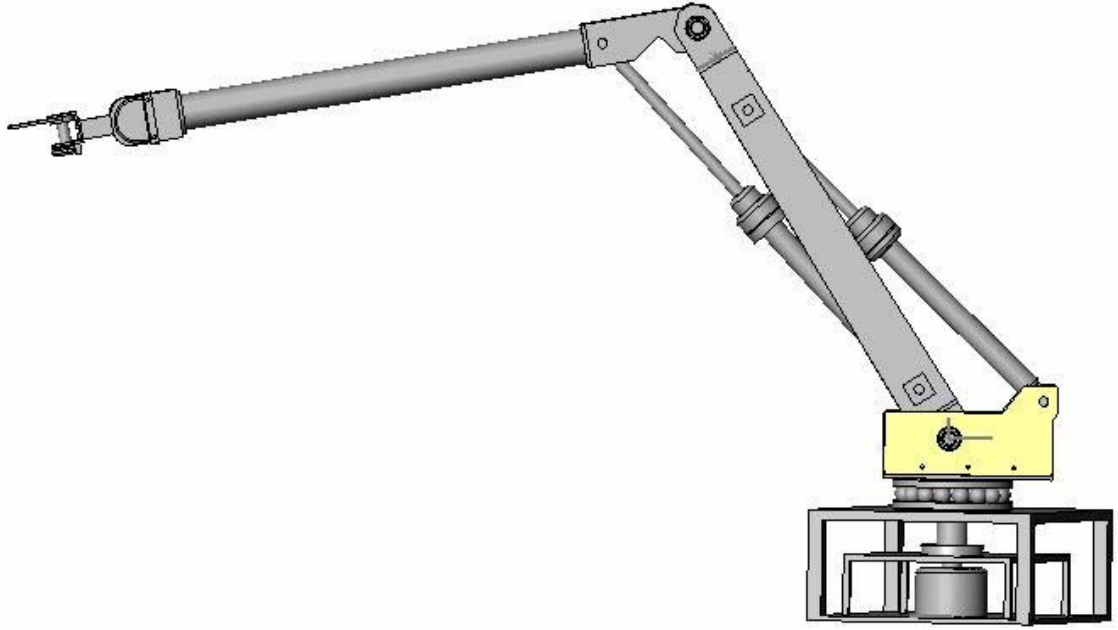
Robot kontrolü üzerindeki bir diğer temel problem ise robotun belirli bir yörüngeyi takip etmesidir. Yörünge takibi olabilmesi için robotun uç noktası istenen zamanda istenen yerde olmalıdır. Endüstride kaynak ve boya işlemlerini yapan robotlarda yörünge kontrolü kullanılarak aynı anda hız ve konum kontrolü yapılmaktadır [13].

BR1 boya robotu tasarım açısından püskürtme boya işlemleri için tasarlanmış ve imal edilmiştir. Eklem hareketleri hidrolik silindirlerle sağlanmakta ve bu nedenle sistemin zaman sabiti ve cevap verme süresi elektrik motorlarıyla hareket eden manipölatörler kadar hızlı değildir. Sistemin yavaş olması beraberinde çeşitli dinamik ve kararlılık sorunlarını getirmekle beraber [1] üzerinde uygulanan kontrol metodlarıyla bu sorunların aşılmasına çalışılmıştır.

5.1. Çalışma Şartları

5.1.1 Çalışma Basıncı Seçimi

Çalışma basıncı tayin edilirken robotun en kötü hal durumunda kendini harekete geçirebileceği en düşük basınç olarak düşünülmüştür. Robotun en kötü durumu iki kolun açık olduğu Şekil 5.1'deki durumdur.

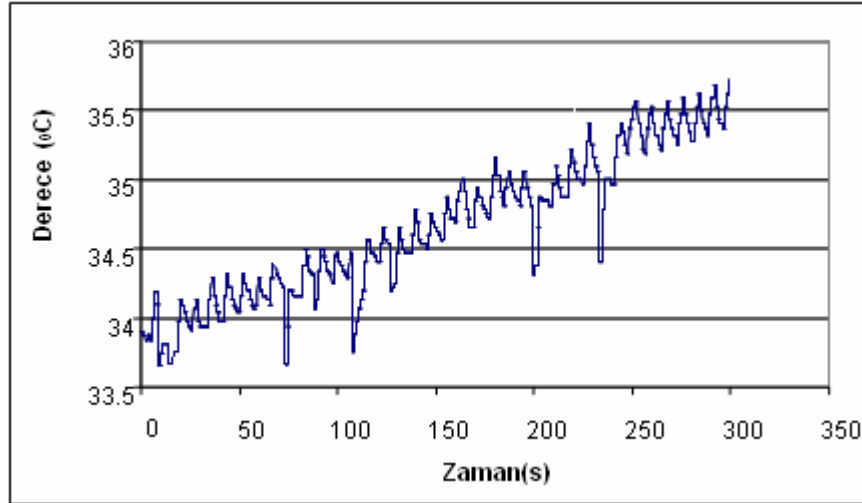


Şekil 5.1: BR1 En Açık Konum

BR1 robotunun arka pistonu, 50 bardan daha düşük basınçlarda çalışıldığı zaman, Şekil 5.1’de görülen pozisyondan kendini geriye çekmekte zorlanmaktadır. Özellikle düşük basınçlarda öndeki kol kapanmadan arkadaki kolun sistemi hareket ettirmesi mümkün olmamaktadır. Böyle bir durumun oluşmayacağı en uygun basınç olarak 50 bar seçilmiştir. Ayrıca bu basınçtan daha yüksek basınçlarda robot sert duruş kalkışlar yaparak titreşime neden olmaktadır.

5.1.2 Hidrolik Yağ Sıcaklığı

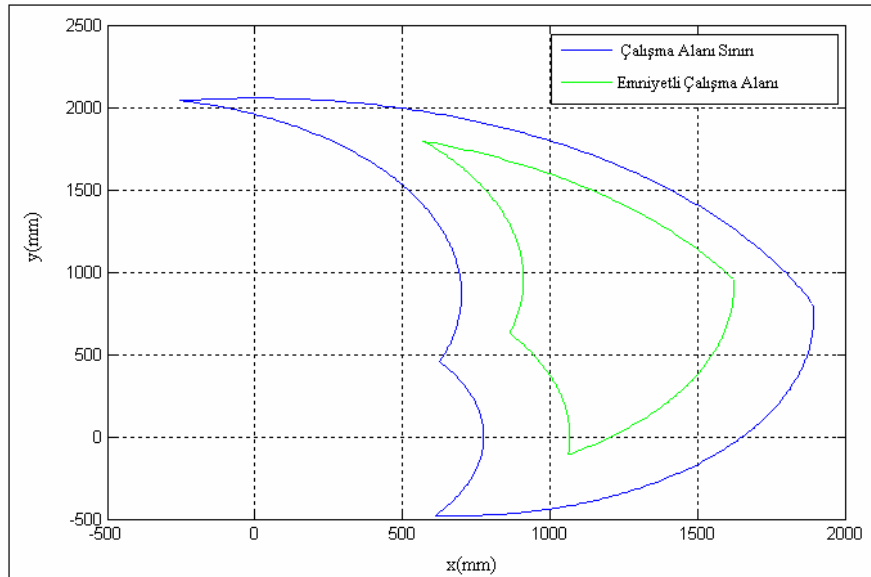
Yapılan deneylerde yağ sıcaklığının Şekil 5.2’deki gibi artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 5 dakika içinde yağ sıcaklığı 1.5 derece artmaktadır. Bu tarz bir yağ sıcaklığı artışı deney yapabilme süresini çok kısaltmaktadır. Ayrıca 35 derecenin üstündeki sıcaklıklarda arkadaki pistonun hareketinde titreşimler ve düzensizlikler olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı hidrolik deponun hacimsel olarak daha büyük bir depoyla değiştirilmesine karar verilmiş ve yağ sıcaklığının bu denli artışı engellenmiştir.



Şekil 5.2: Hidrolik Yağ Sıcaklığının Artış Grafiği

5.1.3 Çalışma Alanı

Robotun 2. ve 3. eksenlerinin başlangıç noktalarından sınır noktalarına kadar hareket ettirilmesiyle oluşan çalışma alanı Şekil 5.3’de görülmektedir.



Şekil 5.3: Güvenli Çalışma Alanı

Silindirlerin yastıklı silindir olmaları nedeniyle silindirlerin baş ve sonlarında 5’er cm güvenlik payları bırakılmış ve çalışma aralığı Şekil 5.3’de görülen emniyetli çalışma alanına indirilmiştir.

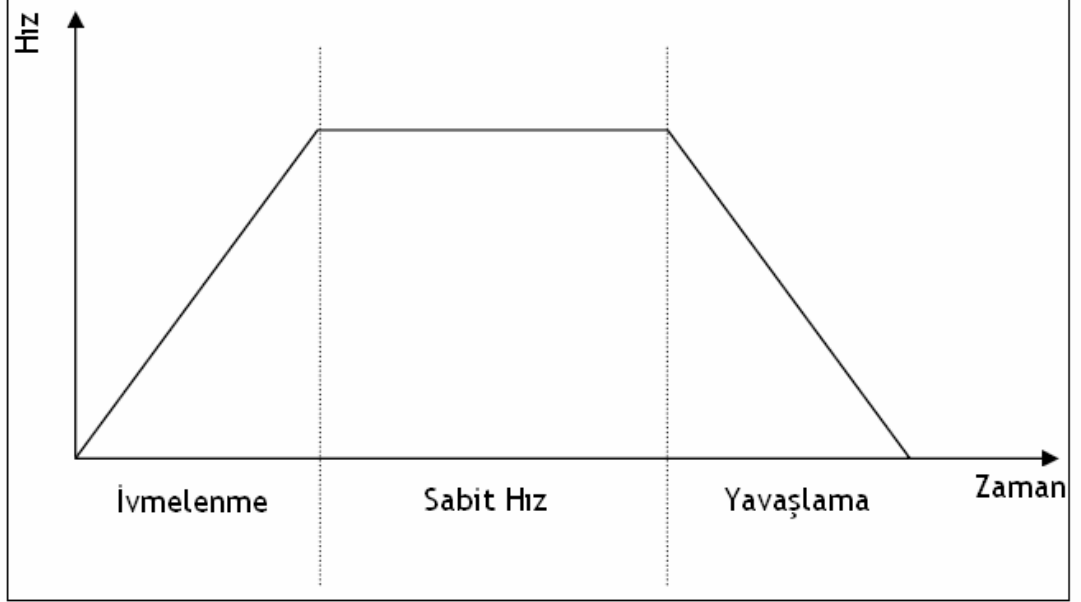
5.1.4 Yörünge Planlaması

Yörünge planlaması yapılırken robotun uç noktasının belirlenen bir konum-hız profiliyle istenilen bir alanı çizmesi sağlanır. Bunun için değişik hız profilleri üretmek mümkündür. (Yamuk Profil, S-Profil)

Cisimlerin hareket profillerini üretebilmek için gerekli olan değişkenler şunlardır:

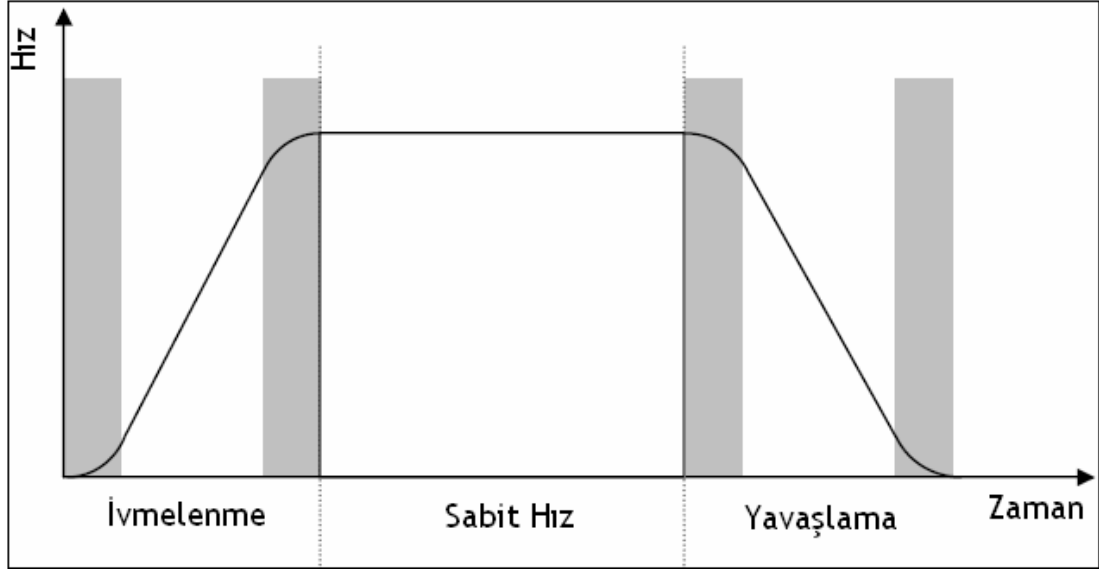
- Hız
- İvmelenme
- Yavaşlama
- İvme Türevi

Yamuk hız profilinde 3 faz bulunur. Bunlar ivmelenme, sabit hız ve yavaşlama fazlarıdır.



Şekil 5.4: Yamuk Hız Profili

Bu fazların bir örneği Şekil 5.4’de görülmektedir. İvmelenme-sabit hız ile sabit hız-yavaşlama geçişlerindeki keskin dönüşlerin yumuşatılması için kullanılan bir diğer hız profili Şekil 5.5’de görülen S-profildir.

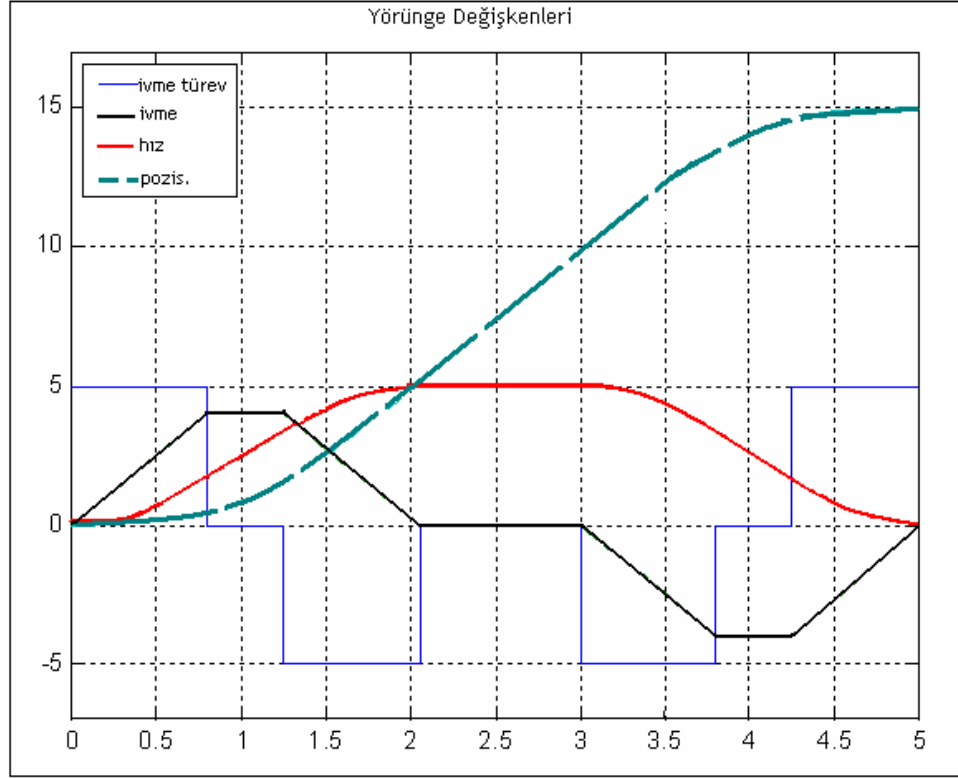


Şekil 5.5: S-Profil

S profilinde 3 hızlanma 3 yavaşlama ve 1 de sabit hız fazı olmak üzere toplam 7 faz bulunur. Bu profile yumuşak geçiş yapan hareket profili de denmektedir. Deneyler sırasında robota verilen hız profili bu profildir. Bu hız profilinin kullanılmasıyla ortaya çıkan diğer yörünge değişkenleri (pozisyon, hız vb.) Şekil 5.6’da görülmektedir.

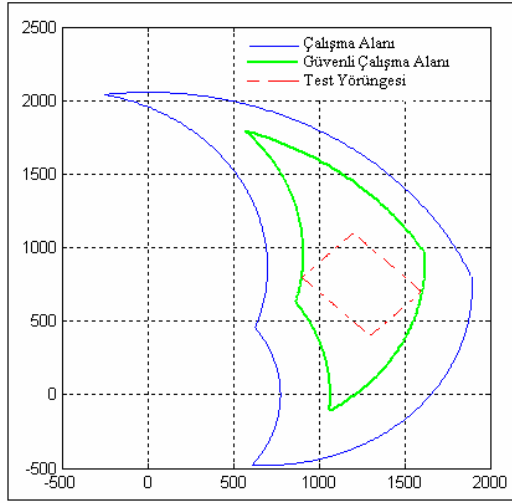
Kontrol algoritmalarının denenebilmesi için 3 adet test yörüngesi hazırlanmıştır. Bu yörüngeler Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9’de görülen eşkenar dörtgen yörünge, kare yörünge ve çembersel yörüngelerdir. BR1 robotunun uç noktasının bir S-hız profili çizerek kare yörünge üzerinde 120 mm/s sabit hızla hareket etmesi ve eşkenar dörtgen yörüngesi üzerinde 100 mm/s hızla hareket etmesi istenmektedir. Çembersel yörünge üzerindeki hız ise sinüsoidal olarak 125 mm/s ile – 125 mm/s arasında periodu 15 saniye olarak değişmektedir. Eşkenar dörtgen profilinde pistonlar aynı anda hareket ettiklerinden hızlarının birbirlerine olan etkisi daha belirgindir. Bu yüzden eşkenar dörtgen yörüngesi test yörüngesi olarak belirlenmiştir. Hız hatalarının hız hesaplama algoritması ile değiştiğini gösterebilmek amacıyla keskin dönüşler içermeyen çembersel yörünge üzerinde de deneyler yapılmış ve bu yörüngeyle ilgili sonuçlar da

bölüm 6’da verilmiştir. Kare yörüngede ise iki pistonun aynı anda hareket ettiği durumlar daha azdır, fakat bu yörünge arka pistonun x eksenini boyunca robotu harekete geçirmede zorlanması sebebiyle seçilmiştir.

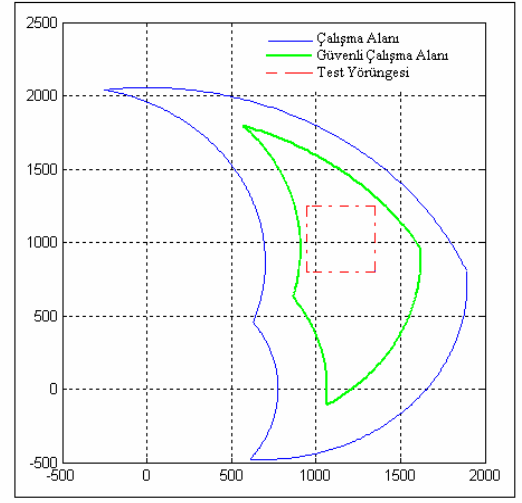


Şekil 5.6: S-Profil ve Diğer Yörünge Değişkenleri

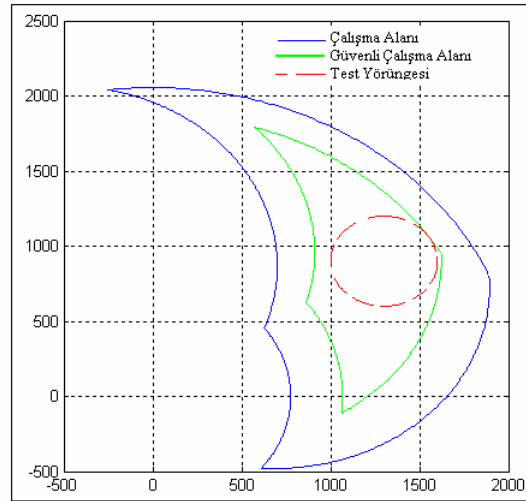
Test yörüngeleri ve robotun uç noktasının hareketleri güvenli çalışma alanı içinde tutulmaktadır. Ayrıca deneyler sırasında robotun, pompa kapalı iken bulunduğu ilk pozisyon yörüngeye dahil değildir. Pompa çalıştırıldığı anda test yörüngesi uygulanmadan önce robot referans olarak bir (X,Y) noktasına gönderilmekte ve robotun hareketine bu noktadan sonra başlayarak güvenli test bölgesi içinde çalışması sağlanmaktadır. Test yörüngesi uygulaması bitirildikten sonra robot tekrar başlangıç noktasına döndürülür ve daha sonra hareket öncesindeki konumuna götürülerek pompa ve motor kapatılır. Robot başlangıç pozisyonuna gönderilirken herhangi bir profil çizdirilmemekte sadece noktadan noktaya kontrol edilerek başlangıç konumuna ulaşması sağlanmaktadır.



Şekil 5.7: Eşkenar Dörtgen Yörünge



Şekil 5.8: Kare Yörünge



Şekil 5.9: Dairesel Yörünge

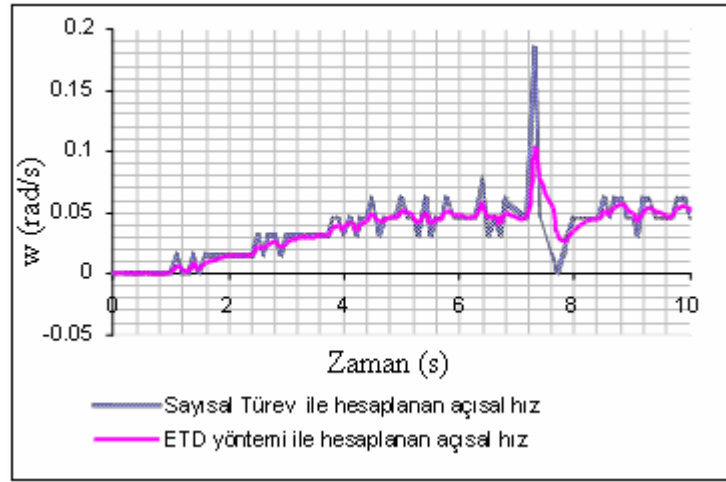
5.1.5 Hız Hesaplama Algoritmaları

Hız hesaplama algoritması olarak ayrık zamanda Euler metodunu (nümerik türev) kullanmak hız hesabında büyük sıralamalara neden olmaktadır. Bulunan açısal hız değerleri daha sonra uç noktası hesabı için jakobiyen matrisi ile çarpıldığında daha yüksek sıçrama değerleri ile karşılaşılacaktır. Bu hatayı giderebilmek için literatürde ETD (Enhanced Tracking Differentiator) denen “Geliştirilmiş İzlemeli Hız Hesaplama Algoritması” (GİHHA) kullanılmıştır. Su ve diğerleri (2006) tarafından önerilen GİHHA aşağıdaki gibi verilmektedir [11].

$$\hat{q}(k+1) = \hat{q}(k) + T\hat{\dot{q}}(k) \quad (5.1)$$

$$\hat{\dot{q}}(k+1) = \hat{\dot{q}}(k) + TR^2 \left[-\alpha_0 \varepsilon(k) - \alpha_1 (\varepsilon(k))^{n/m} - \alpha_1 \left(\frac{\hat{\dot{q}}}{R} \right)^{n/m} \right] \quad (5.2)$$

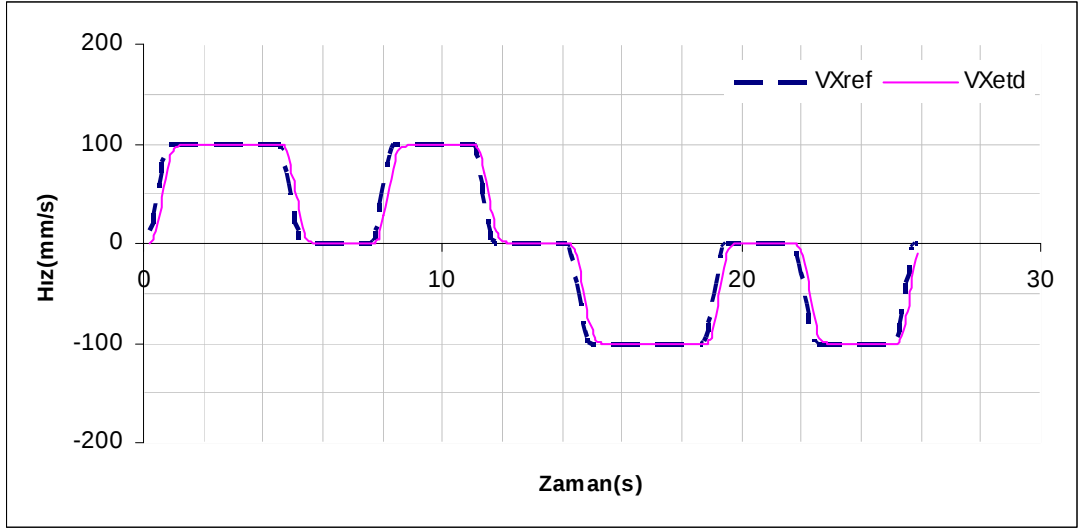
Burada $q = [\theta_1 \ \theta_2]^T$, $\hat{q}(k)$ tahmin edilen pozisyon, $\hat{\dot{q}}(k+1)$ hız, T örnekleme zamanı, $\varepsilon(k) = \hat{q}(k) - q(k)$ pozisyon tahmin hatası ve $R, \alpha_0, \alpha_1, n, m$ tasarım parametreleridir. GİHHA yöntemi ve nümerik türev yöntemlerinin karşılaştırılması Şekil 5.10'da verilmiştir.



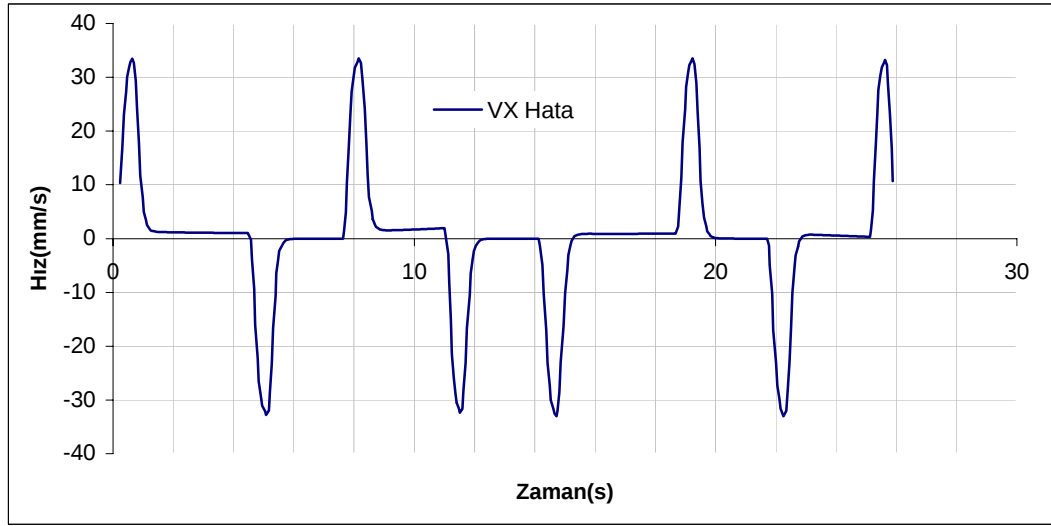
Şekil 5.10: GİHHA ve Sayısal Türev Karşılaştırması

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, yüksek sıçrama noktaları ETD yöntemi kullanıldığında daha yumuşatılmış ve keskin iniş-çıkışlar ortadan kaldırılmıştır.

GİHHA yöntemiyle yapılan simülasyon çalışmalarında S-profil üzerindeki dönüş noktalarında hesap hataları olduğu görülmüştür. Bunun için referans olarak verilen konum değerleri GİHHA'ya giriş olarak kullanılmış ve Şekil 5.11 ve 5.12'deki grafikler çıkartılmıştır. GİHHA'nın hatalarını test edebilmek için simülasyon çalışmaları hem eşkenar dörtgen yörünge üzerinde S-Profil ile hızlanma hem de çembersel yörünge üzerinde sinüs hızlanma profili ile yapılmıştır.

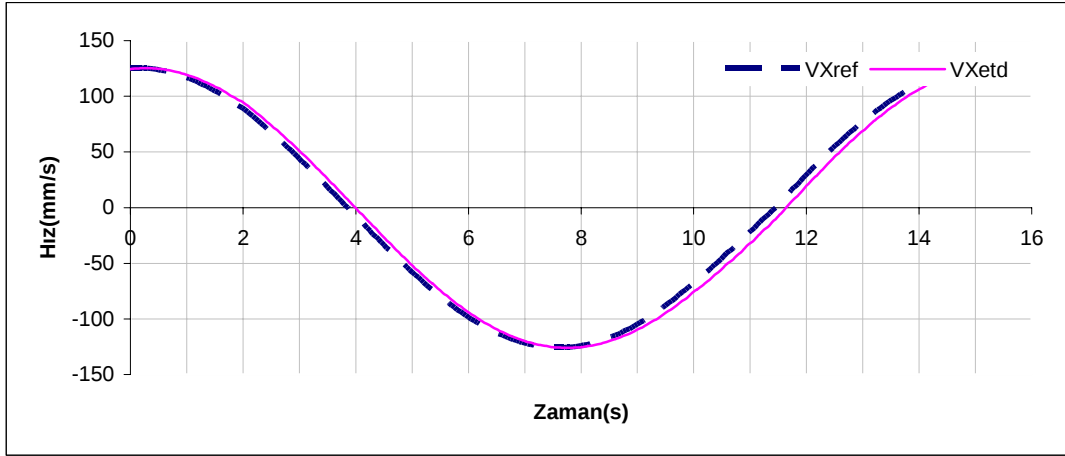


Şekil 5.11: GİHHA ve Gerçek Hız Simülasyonu (Eşkenar Dörtgen Yörüngesi)

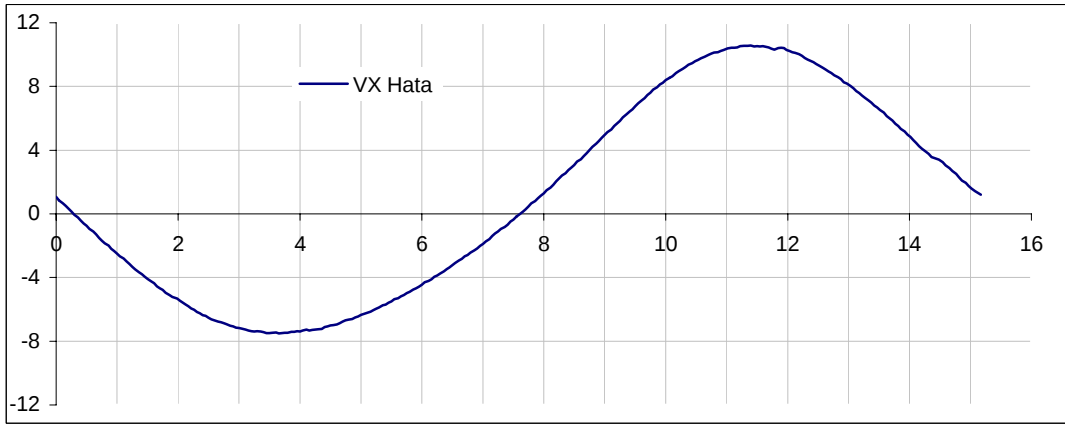


Şekil 5.12: GİHHA Yöntemi'nin Hız Hataları (Eşkenar Dörtgen Yörüngesi)

Şekil 5.11 ve 5.12'den de görüldüğü gibi hesap hataları keskin dönüş noktalarında artış göstermektedir. Ayrıca değişik referans sabit hız değerleri için bu değerler ile orantılı farklı bir hata grafiği çıkmaktadır. Örneğin X ekseninde 100mm/s sabit bir hız ölçümündeki hata 32mm/s ile -32mm/s arasında değişirken 50mm/s'lik bir hız için 16mm/s ile -16mm/s arasında değişmektedir. Hazırlanan bir çember yörünge üzerinde yapılan simülasyon çalışmasında hesaplanan hatalar Şekil 5.13 ve 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.13: GİHHA ve Gerçek Hız Simülasyonu (Çembersel Yörünge)



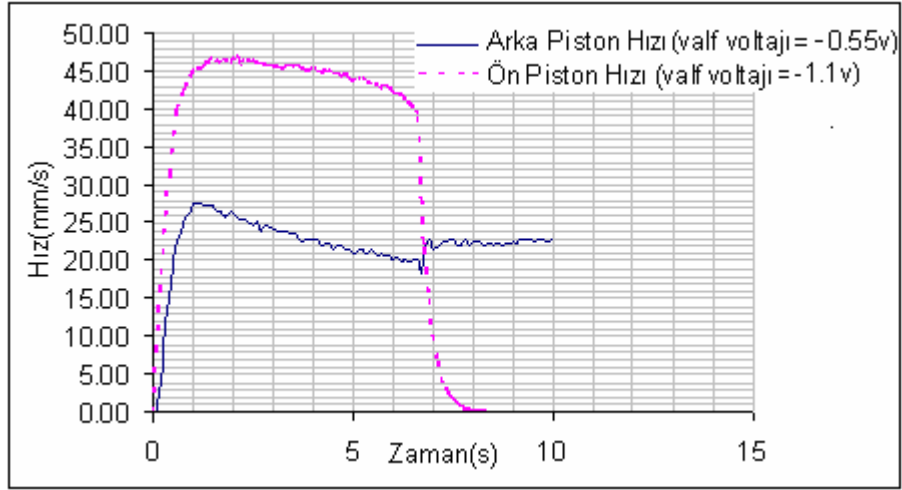
Şekil 5.14: GİHHA Hız Hataları (Çembersel Yörünge)

Şekil 5.13 ve 5.14’de görüldüğü gibi hız hesaplama hataları sinüs yörüngesi üzerinde 12mm/s’nin altına düşmüştür.

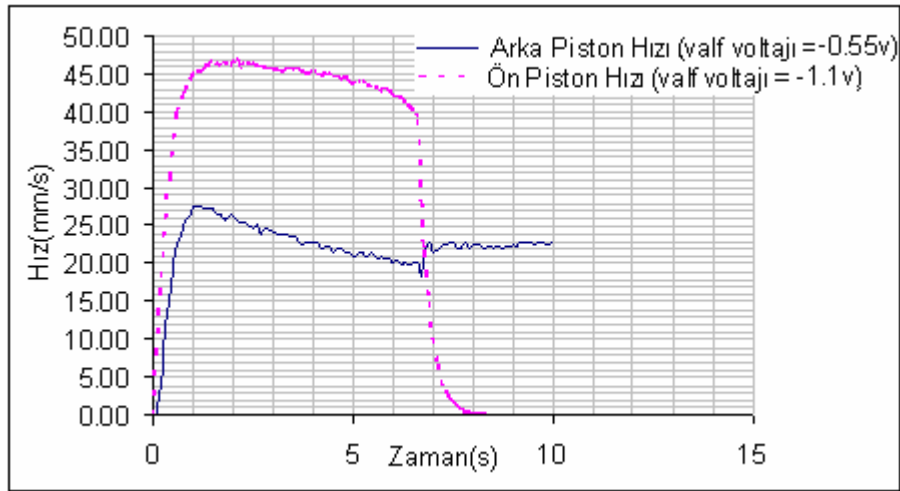
5.1.6 Açık Çevrim Cevapları

BR1 robotu üzerinde kontrol algoritmaları denenmeden önce açık çevrim cevapları incelenmiştir. Burdaki amaç silindir hızlarının birbirlerine olan etkisini incelemektir. Ayrıca değişik sabit voltajlarda silindir hızlarındaki değişim gözlenmiştir.

İlk olarak öndeki pistonun oransal valfine sabit -1.1 volt diğer valfe ise -0.55 volt gerilim verilmiş ve piston hızları Şekil 5.15 ve 5.16’deki gibi bulunmuştur.



Şekil 5.15: Ön Piston Hızının Arkadaki Piston Hızına Etkisi



Şekil 5.16: Arkadaki Piston Hızının Öndeki Piston Hızına Etkisi

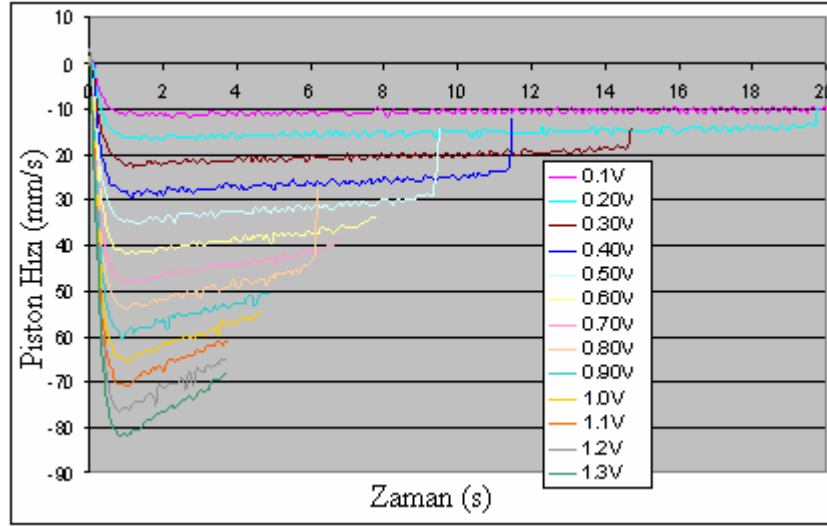
Şekil 5.15 dikkatle incelenirse arkadaki piston sabit voltajda yaklaşık 27 mm/s hıza ulaştıktan sonra yavaşlamaya başlamış fakat öndeki piston sınır noktaya gelip durduğu zaman (7. saniye civarında) arkadaki piston tekrar hızlanmıştır.

Burada öndeki silindirin hızının arkadaki silindir hızına olan etkisi görülmektedir. Ayrıca arkadaki ve öndeki silindirlerin hareket süreleri esnasında konumları değiştikçe hızları da doğrusal kalmamaktadır. Bu da silindirlerin bulunduğu konumlarının da kendi hızlarına olan etkisini göstermektedir.

Şekil 5.16 incelendiğinde arkadaki piston hızının belirli bir değere ulaştıktan sonra konum değiştirmesi ile hızındaki azalma görülmektedir. 7. saniye civarında arkadaki piston durduğu sırada öndeki pistonunun hızında artış olmuş ve böylece arkadaki silindirin hızındaki değişimin öndeki piston hızını etkilediği görülmüştür. Bu

sebeplerden ötürü sabit voltaj değerlerine karşılık gelen değişik hız formları çıkmıştır.

BR1 üzerinde açık çevrimde incelenen bir diğer özellik ise Şekil 5.17’de görüldüğü gibi değişik valf voltajlarına karşılık gelen silindir hızlarını ve hız formlarını gözlemlemektir.

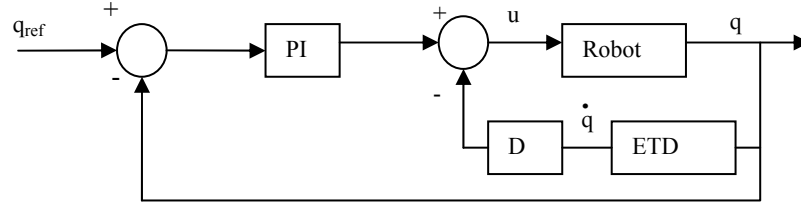


Şekil 5.17: Ön Piston Hızının Voltaj Değerleri ile Değişimi

Oransal valf kumanda voltaj değerleri arttıkça piston hızında belli bir noktaya kadar artan hız daha sonra sabit kalmamakta ve hızda yavaşlama görülmektedir. Ayrıca voltajın artmasıyla bu düşüşlerin formları aynı kalmamakta ve keskinleştiği gözlemlenmektedir. Böylece sabit bir voltaja hareket süresince karşılık gelen sabit bir piston hızının bulunmadığı görülmektedir.

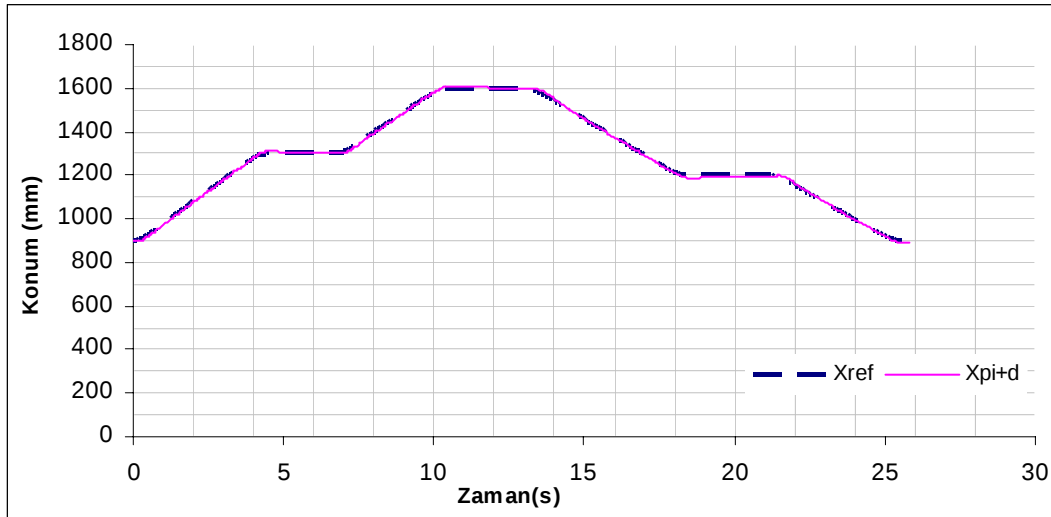
5.2. Bağımsız PI+D Kontrol

Bu metod ile kontrol edilen manipülatörlerde eklemler birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir. Kontrol sinyalinin sadece kendi eklemi üzerindeki ölçülen değişkenler ile referans değerler arasındaki hataya bağlı olması ve diğer eklemlerle bir bağlantısının bulunmaması bu kontrol metodunun uygulanmasını çok kolay kılmaktadır. Ayrıca hesaplamalar herhangi karmaşık ve doğrusal olmayan ters dinamik denklemleri içermediğinden çok basittir [13].

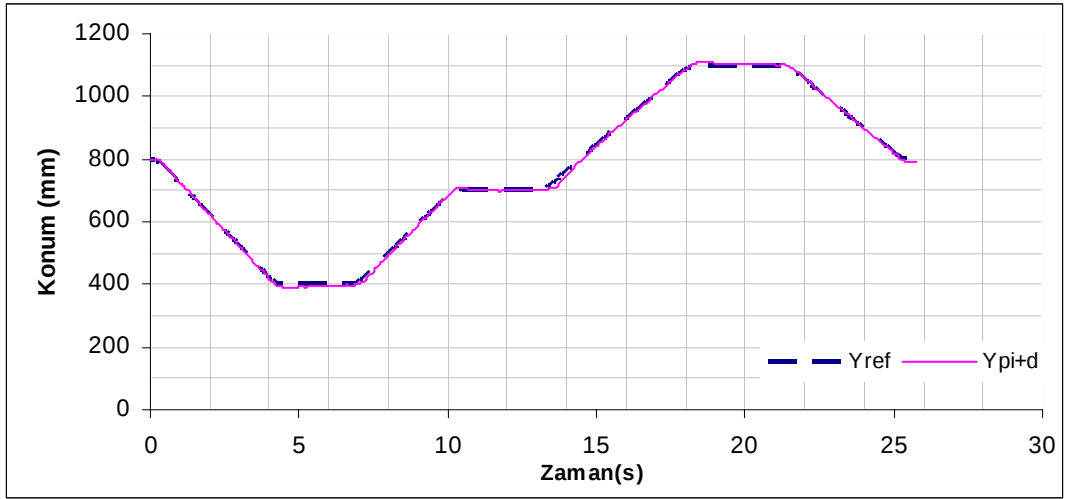


Şekil 5.18: Bağımsız PI+D Çevrimi

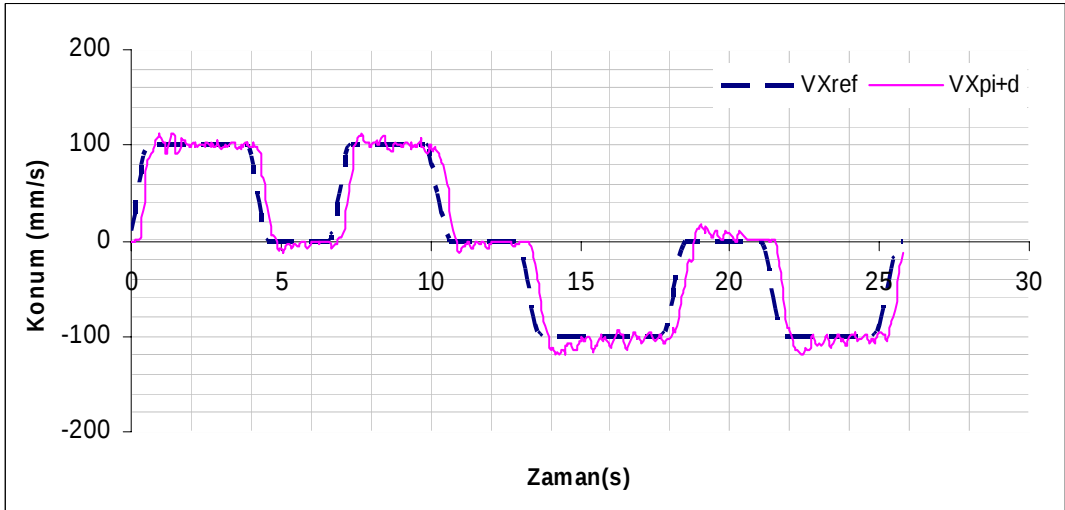
Kontrol blok diyagramı Şekil 5.18'deki gibi olan bu yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar eşkenar dörtgen yörüngesi için sonuçlar Şekil 5.19 - 5.27'de gösterilmiştir. PI+D kontrolcüsünde türev alma işlemi robotun çıkışından bir geri besleme ile yapılarak girişte türevin yüksek basamak değişikliklerine tepki vermesi önlemlenmiştir [26]. Girişte türev operatörünün kullanılması anlık türev değerlerinde yüksek iniş çıkışlar oluşturduğu için kolda titreşimlere sebep olmaktadır. Grafiklerden de anlaşılabileceği gibi türev operatörünün geri beslemesi kullanılması ile kol ucunda konum etrafında herhangi bir titreşim oluşmamaktadır. Burada ETD algoritmasının yumuşatıcı etkisinin titreşimleri önlediği söylenebilir. Grafiklerde gösterilen hız algoritması daha önce bölüm 5.1.4'te bahsedilen S-profil olup sabit hız değeri 100 mm/s ile -100 mm/s'dir.



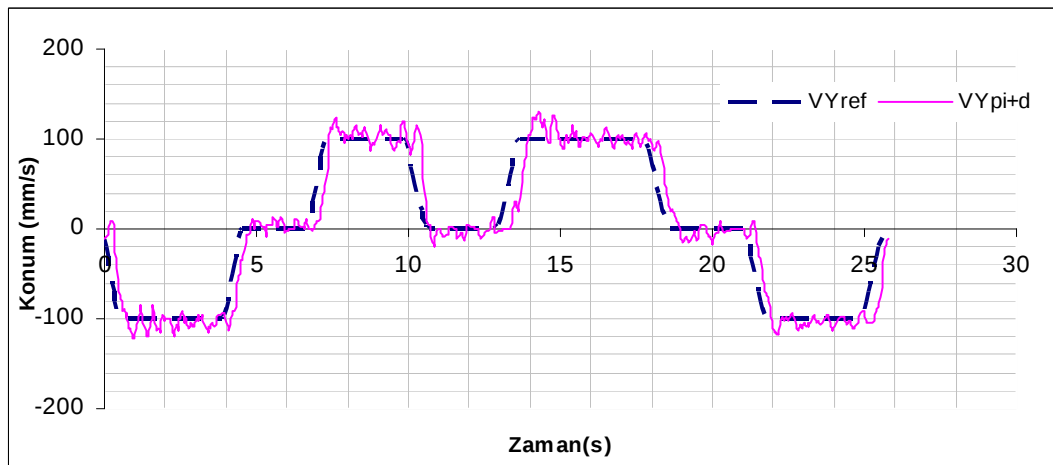
Şekil 5.19: Bağımsız PI+D Kontrol x Ekseni Konum Grafiği



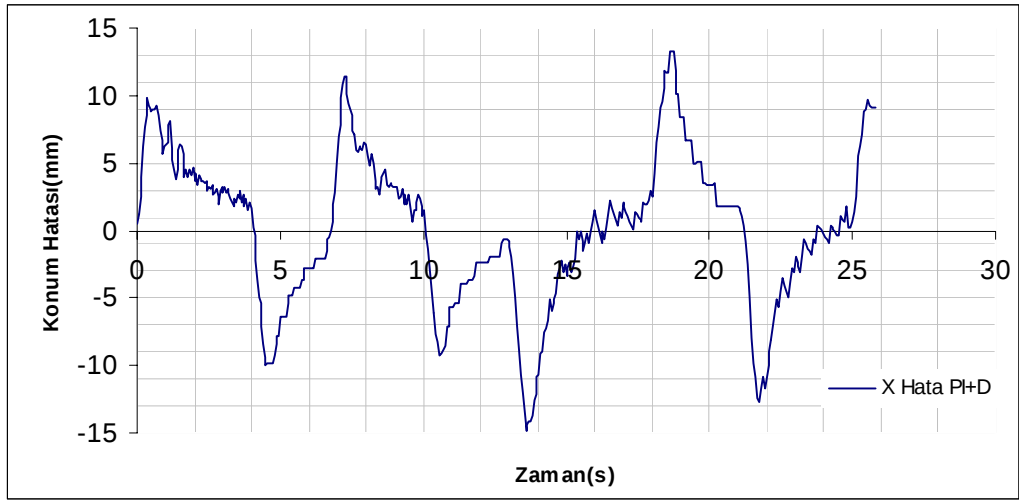
Şekil 5.20: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Konum Grafiği



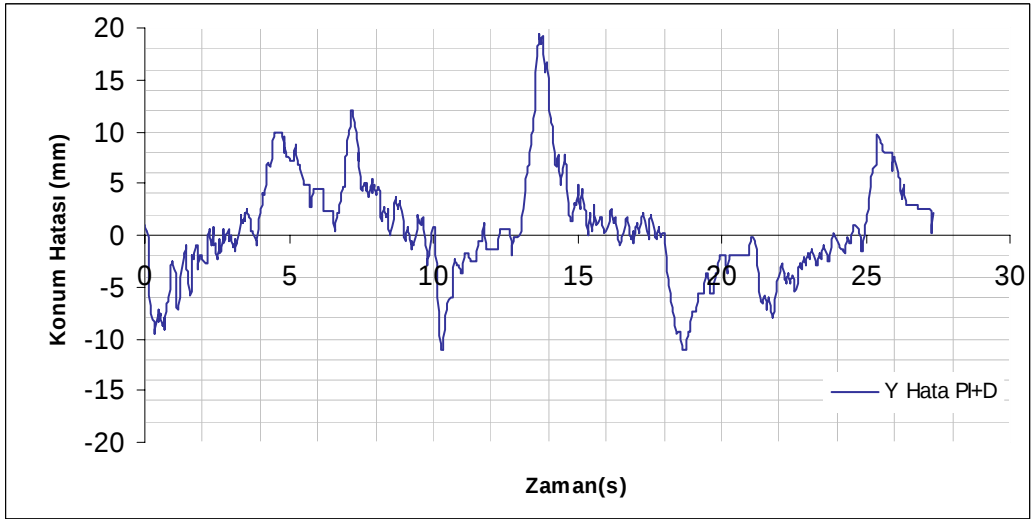
Şekil 5.21: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Hız Grafiği



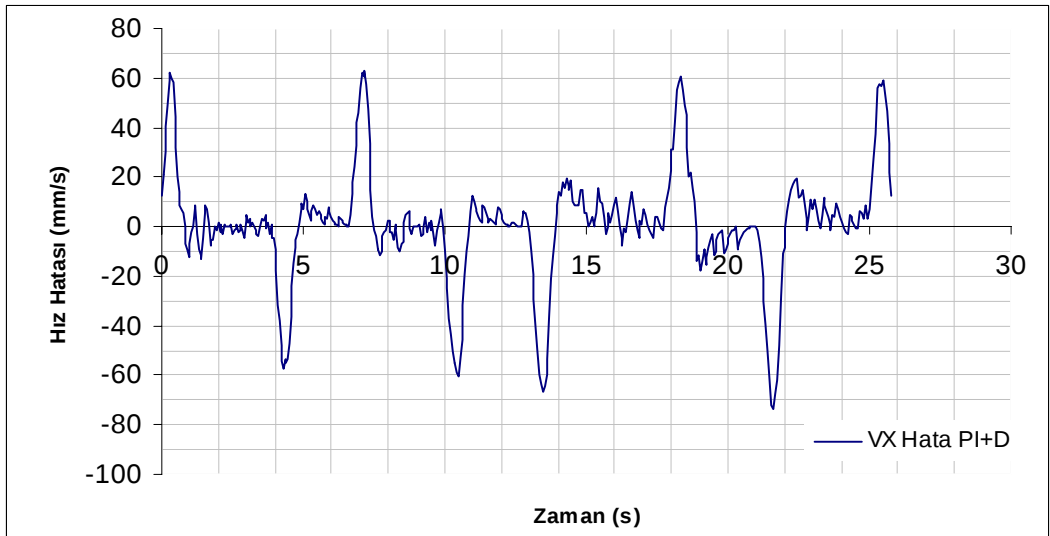
Şekil 5.22: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Hız Grafiği



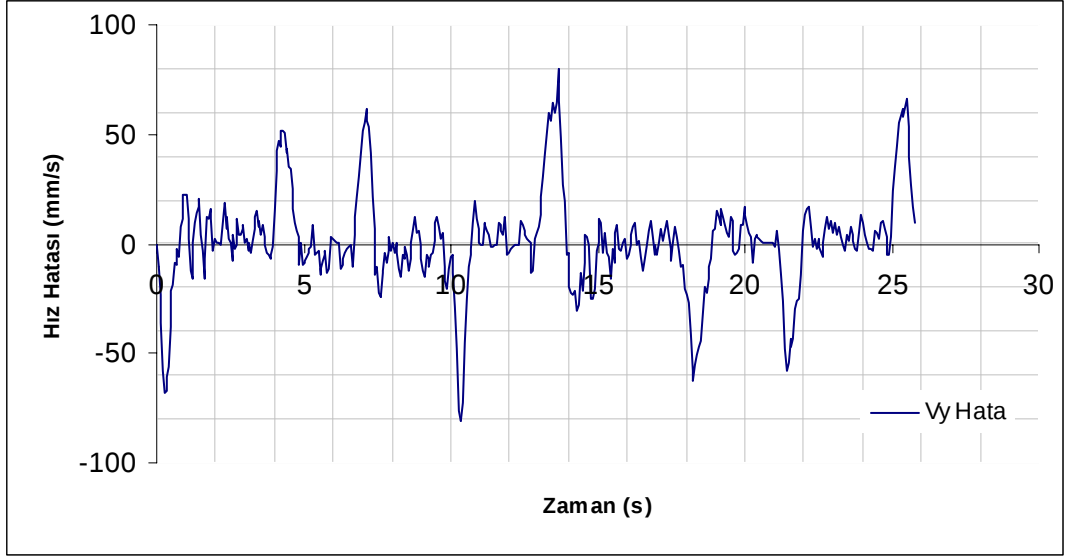
Şekil 5.23: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Konum Hataları



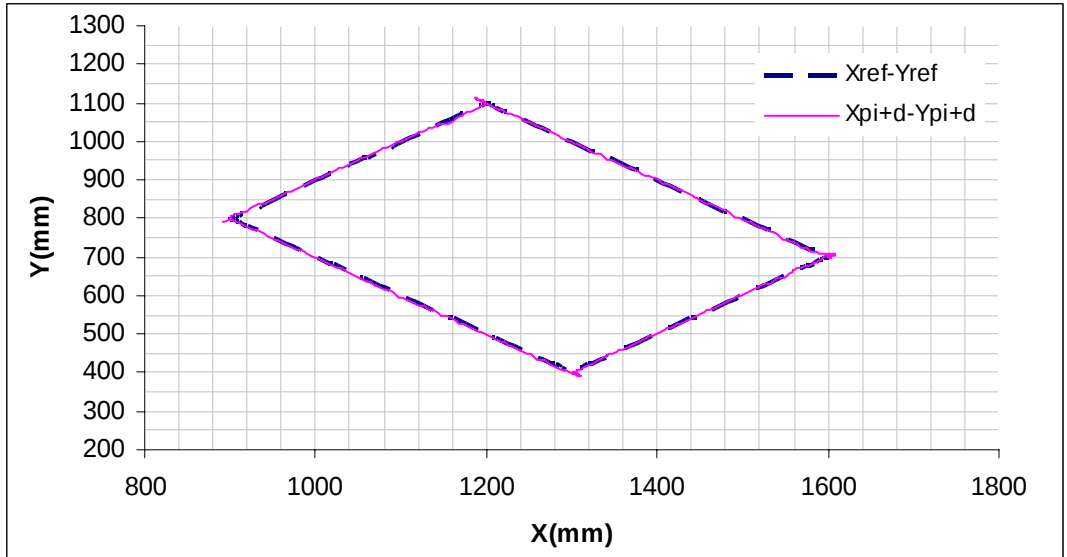
Şekil 5.24: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Konum Hataları



Şekil 5.25: Bağımsız PI+D Kontrol x Eksen Hız hataları



Şekil 5.26: Bağımsız PI+D Kontrol y Eksen Hız hataları



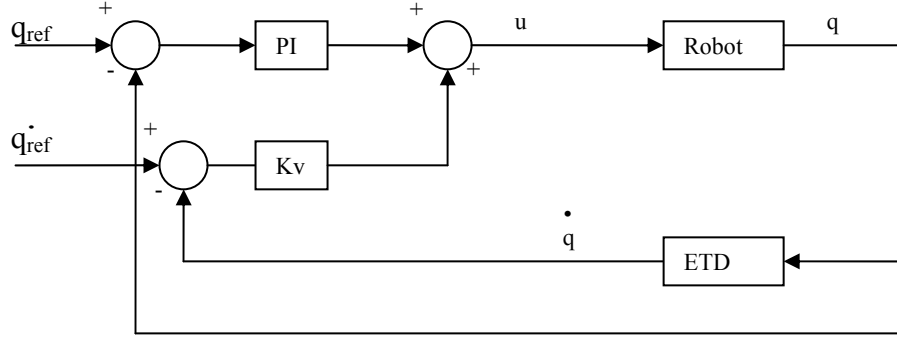
Şekil 5.27: Bağımsız PI+D Kontrol x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi

Bu deneylerde kullanılan katsayılar $K_p=30$, ve $K_I=25$ 'tir. K_p veya K_I katsayısının daha yüksek seçilmesi robotun uç noktasında salınımlara neden olmaktadır. Bu nedenle seçilebilecek en yüksek katsayı değerleri kullanılmıştır. Bağımsız PI kontrolde en yüksek hata değeri X ekseninde 17 mm ile Y ekseninde 23 mm civarında iken hızlardaki en yüksek hatalar X ekseninde 89 mm/s ile 86 mm/s'dir. Bu hatalar PI+D kontrolörünün yeterince hızlı bir kontrol sinyali sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Hızlardaki hatalar Şekil 5.12'de görüldüğü gibi genelde gecikmeden dolayı kaynaklanan hatalardır ve bu gecikme hız referansının iyi takip edilememesine yol açmaktadır. HKTK hatalarına bakıldığında X ve Y eksenlerindeki

konum hatası için 7 mm ile 11 mm değerleri, X ve Y eksenlerindeki hız hataları için ise 23 mm/s ile 24 mm/s bulunmaktadır.

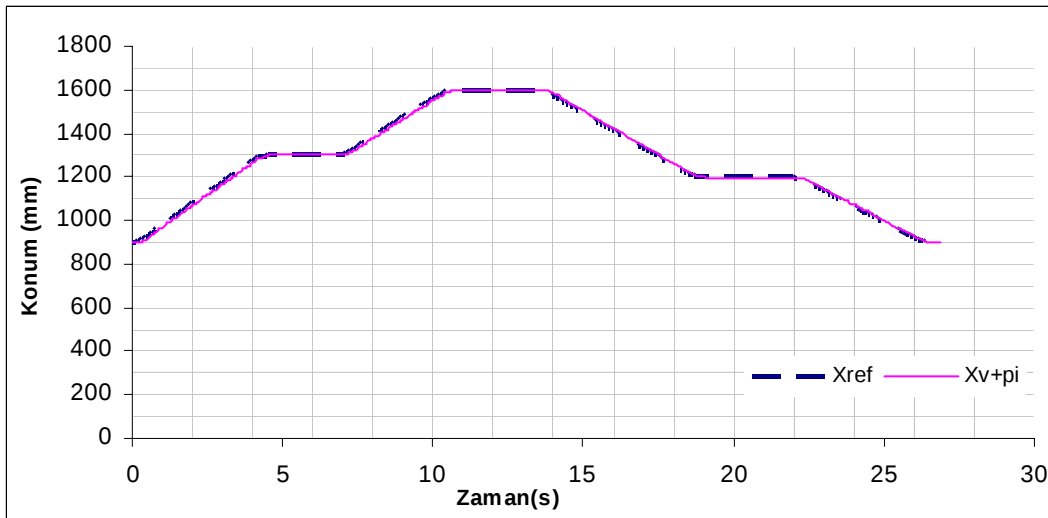
5.3. Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol

Bağımsız PI+D kontroldeki hız hatalarını giderebilmek için hız geri beslemeli PI kontrol uygulanmıştır.

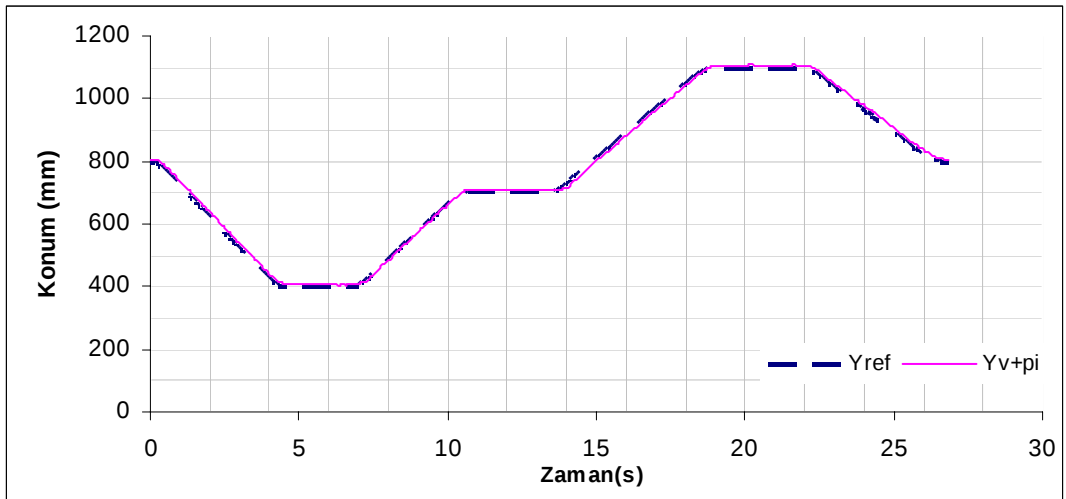


Şekil 5.28: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Çevrimi (PI+V)

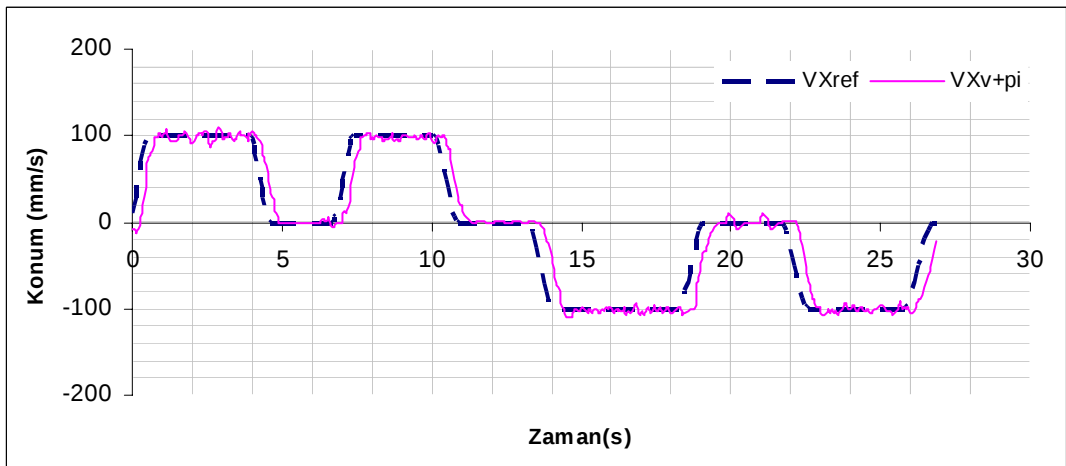
Şekil 5.28'deki blok diyagramda görüldüğü gibi hız ETD yöntemi ile hesaplanmakta ve referans hızdan çıkartılarak hız hatası bulunmaktadır. Bu kontrolörün aynı yörünge için verdiği cevaplar Şekil 5.29-5.37 de gösterilmiştir.



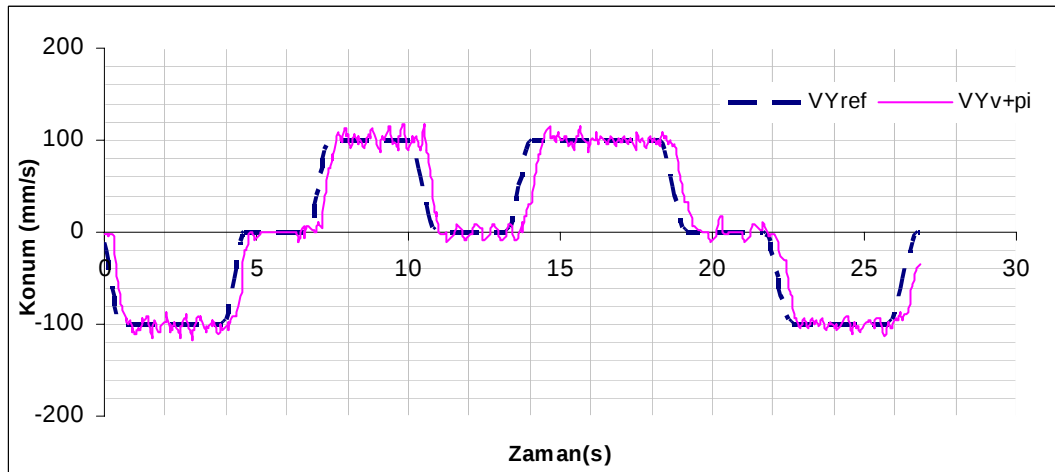
Şekil 5.29: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Konum Grafiği



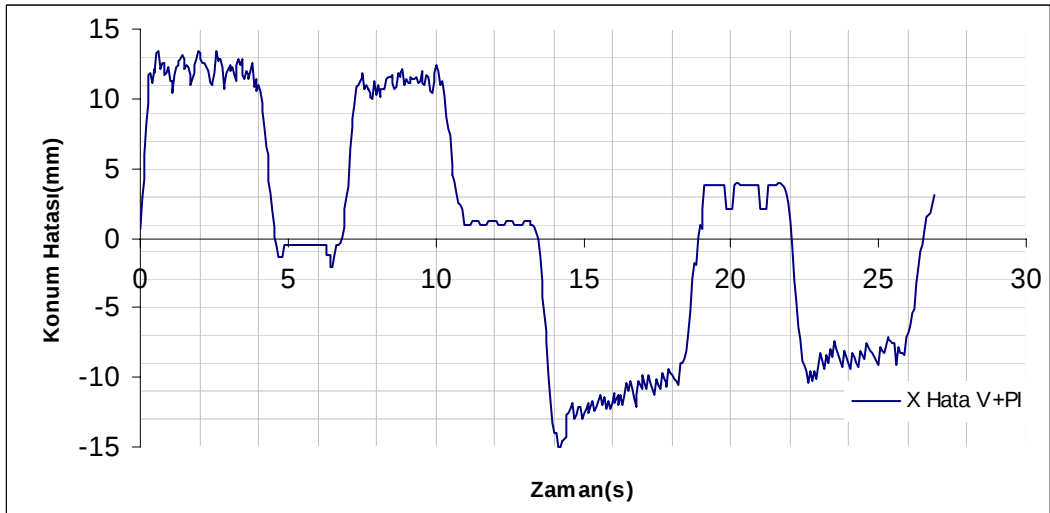
Şekil 5.30: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Ekseni Konum Grafiği



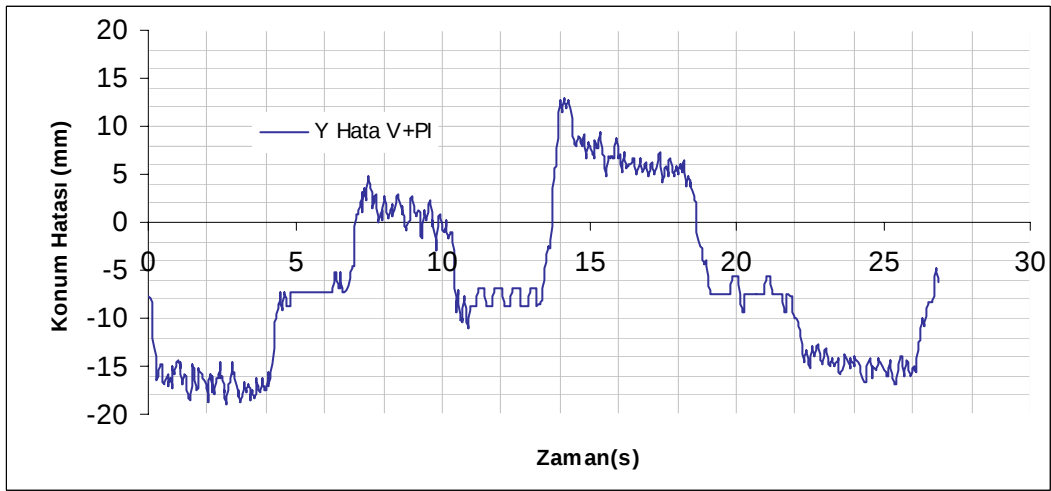
Şekil 5.31: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Ekseni Hız Grafiği



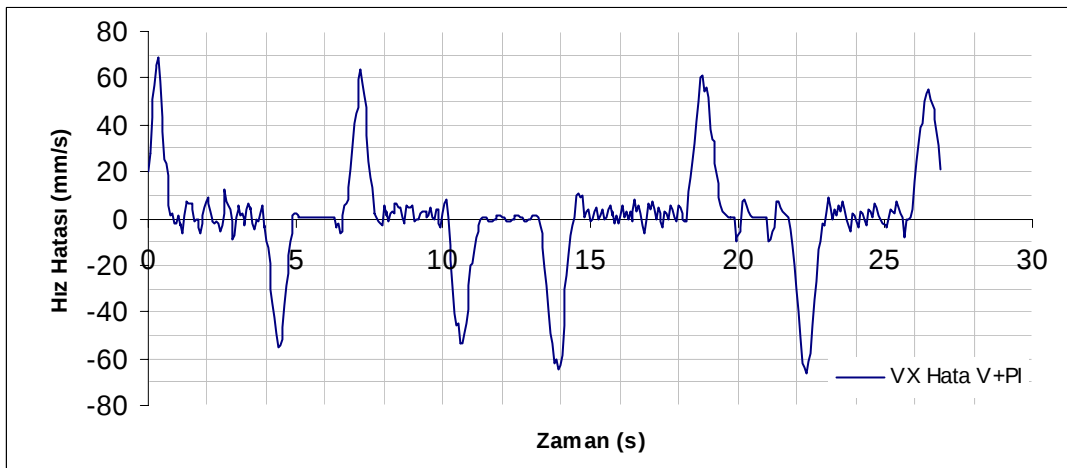
Şekil 5.32: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Ekseni Hız Grafiği



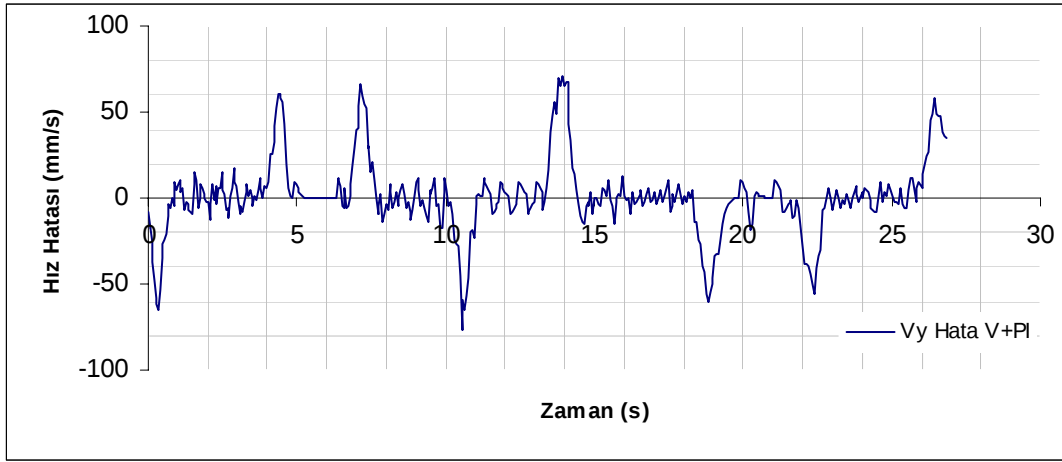
Şekil 5.33: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Konum Hataları



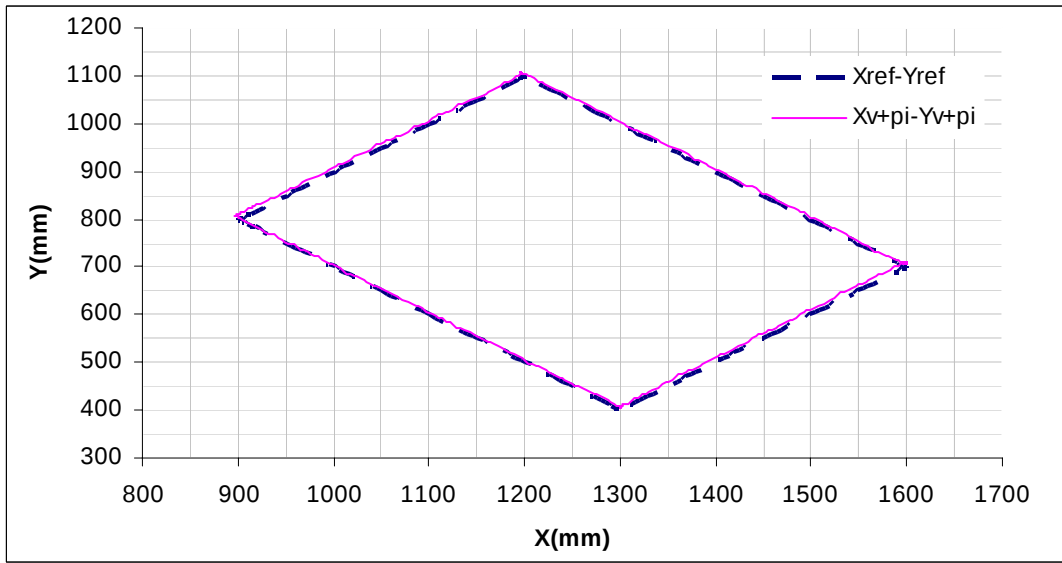
Şekil 5.34: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Konum Hataları



Şekil 5.35: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x Eksen Hız Hataları



Şekil 5.36: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol y Eksen Hız Hataları



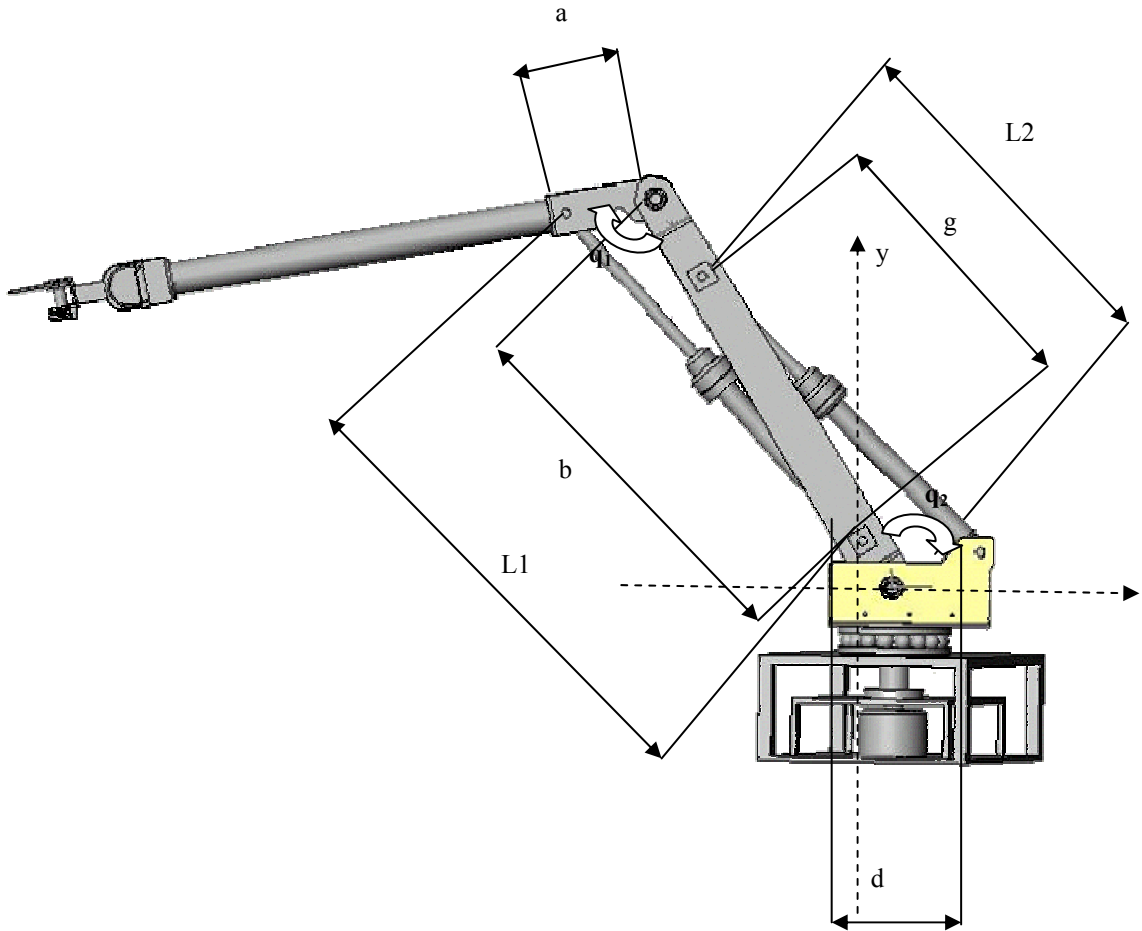
Şekil 5.37: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi

PI+D kontrolörün x eksen konum hataları incelendiğinde hataların hareket süresince 10 mm civarında bir değere çıktıktan sonra azalma eğiliminde olduğu ve 2 mm civarına indiği görülmektedir. Durma anında ise kararlı hal hataları 12 mm civarından 3 mm'ye düşmektedir. Hız geri beslemeli PI kontrolde ise hareket süresince hatalar 12 mm civarında takip etmekte iken durma anında hatalar hızlı bir şekilde düşmektedir. Kontrolörlerin hata kriterleri bakımından karşılaştırması 6. bölümde yapılmıştır.

6. YAPAY SİNİRSEL AĞ İLE İLERİ BESLEME VE KİNEMATİK KOMPAZASYON

6.1. Kinematik Kompanzasyon

BR1 boya robotunun uç nokta hızının kontrol edilebilmesi için 2. ve 3. serbestlik derecelerindeki eksenlerin kinematik analizinin yapılması gerekir. Bu serbestlik derecelerinde kol ile piston konumları ve hızları arasında doğrusal olmayan bağıntılar vardır. Bu bağıntılar kol ile piston arasında oluşan ve Şekil 6.1’de görülen kinematik üçgenlerin incelenmesiyle bulunabilir.



Şekil 6.1: BR1 Üzerindeki Kinematik Üçgenler

Şekil 6.1'e göre L1 birinci piston boyu, L2 ikinci piston boyu, q_1 iki kol arasındaki açı ve q_2 arkadaki kolun yer ile yaptığı açı olduğuna göre:

$$L1^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(q_1) \quad (6.1)$$

$$L1 \dot{q}_1 = \frac{ab}{L_1} \sin(q_1) \dot{q}_1 \quad (6.2)$$

$$L2^2 = g^2 + d^2 - 2gd \cos(q_2) \quad (6.3)$$

$$L2 \dot{q}_2 = \frac{dg}{L_2} \sin(q_2) \dot{q}_2 \quad (6.4)$$

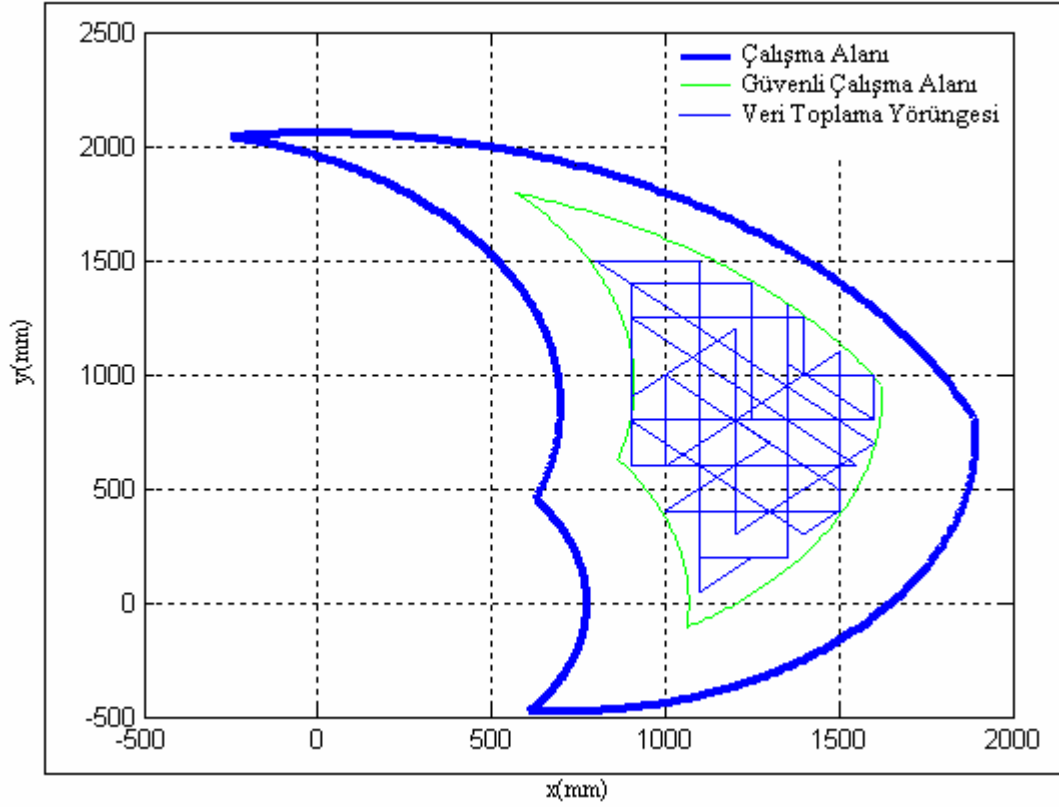
yazılabilir. Denklemlerdeki $\dot{L}_1, \dot{L}_2$ piston hız değerleridir

6.2. YSA ile İleri Besleme

Kinematik kompanzasyon sonucu açı değerleri ile piston hızları arasındaki ilişki elde edilir fakat piston hızlarını elde etmek için gerekli olan valf voltajları bilinmemektedir. Aynı zamanda açık çevrim analizlerinde görüldüğü gibi sabit bir valf voltajına karşılık gelen sabit bir hız bulunmamakta, aksine piston hızı ile valf voltajı arasında doğrusal olmayan bir ilişki bulunmaktadır. Bu noktada bir YSA oluşturularak piston hızları ile valf voltajları arasındaki doğrusal olmayan ilişki bu ağa öğretilmeye çalışılmıştır.

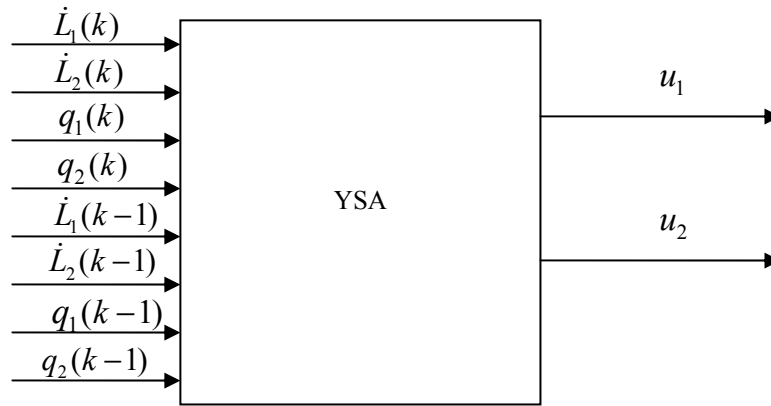
YSA'nın eğitilebilmesi için çalışma alanı içindeki hız ve konum sınır uzayının bilinmesi gerekir. Konum sınır değerleri Şekil 6.2'de gösterilen güvenli çalışma bölgesi içindeki bütün noktalardır. X ve Y eksenlerinde 60mm/s ile 130mm/s arası uç nokta hız değerleri hız uzayı olarak belirlenmiştir. Güvenli sınır bölgesi içindeki bir hareket için belirlenmiş olan bu hız değerleri robotun yapacağı boyama işlemi için yeterlidir [21].

YSA'nın eğitilebilmesi için konum ve hız uzayında Şekil 6.2'de görülen yörünge belirlenmiş ve bütün konum ve hız uzayını kapsayacak bir veri kümesi oluşturulmuştur.



Şekil 6.2: Veri Toplanan Yörünge

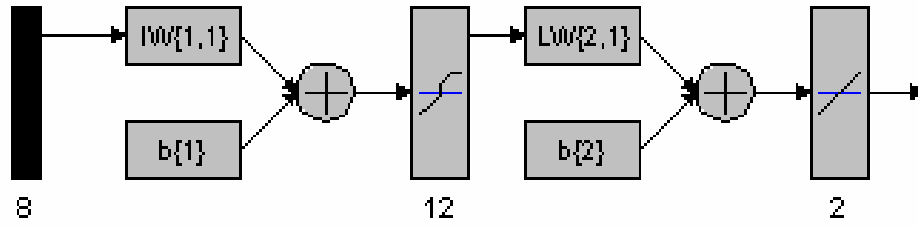
Şekil 6.2'deki yörünge üzerinde 60-130mm/s aralığında değişik hızlarla S-hız yörüngeleri P kontrolle çizdirilmiş ve toplanan veriler kaydedilmiştir.



Şekil 6.3: YSA Giriş Çıkış Değişkenleri

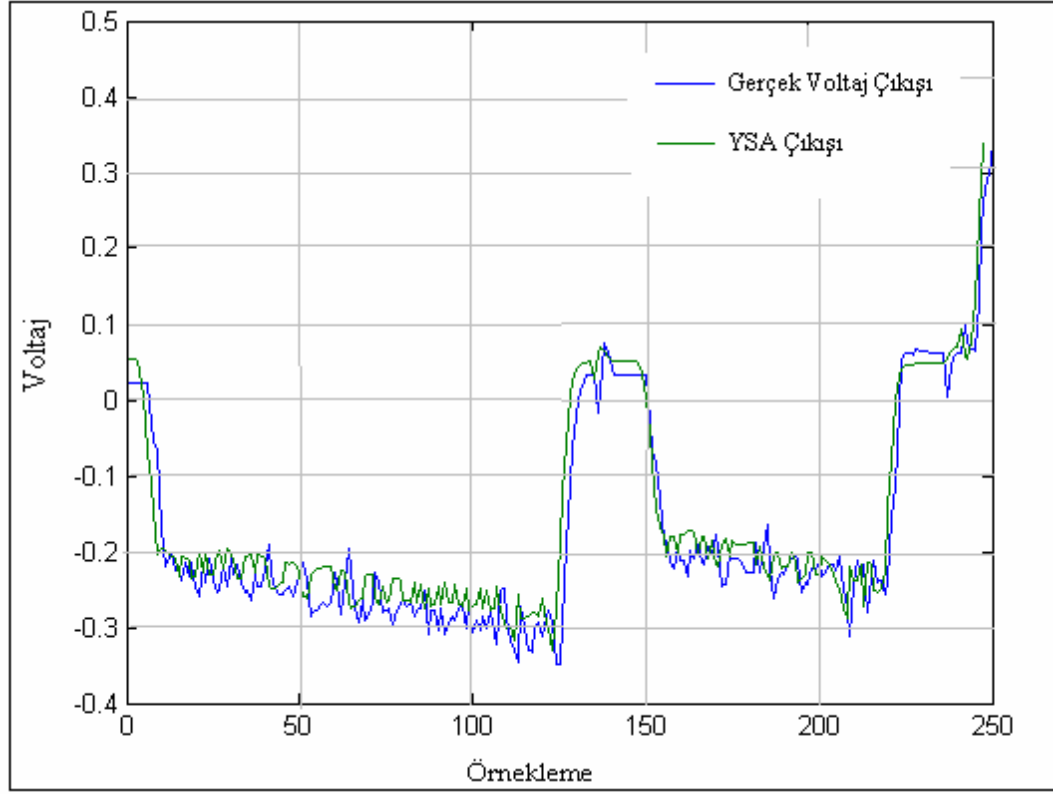
Şekil 6.3’de görülen YSA giriş ve çıkışlarına karar verilirken sistemin açık çevrim cevaplarına dikkat edilmiştir. Robotun pistonları birbirlerinin hızlarını etkilemekte olduğu gözönüne alınır ve aynı zamanda kolun o an bulunduğu konumun da piston hızlarına etki ettiği düşünülürse YSA’nın girişleri piston hızları ile o anki açı değerleri, çıkışlar ise valf voltajlarıdır. Aynı zamanda YSA’nın daha iyi bir öğrenme gerçekleştirebilmesi için açı ve piston hızı değerlerinin bir örnekleme zamanı önceki değerleri de giriş olarak YSA’ya verilmiştir.

Eğitilen YSA’da Şekil 6.4’de görüldüğü gibi giriş katmanında 8, saklı katmanda 12 ve çıkış katmanında 2 nöron bulunmaktadır. Giriş ve saklı katmanlar tanjant hiperbolik fonksiyonlar, çıkış katmanında ise doğrusal fonksiyon kullanılmıştır. Pratikte tanjant hiperbolik fonksiyonların kullanılmasının nedeni türev ifadeleri içerisinde kendilerinin yer alması ve hesap yükünün azalması ile doğrusal olmamaları ve yumuşak biçimde sürekli geçiş yapıyor olmalarıdır [24]. Bu ağ ile elde edilen test sonuçları Şekil 6.5’de görülmektedir.



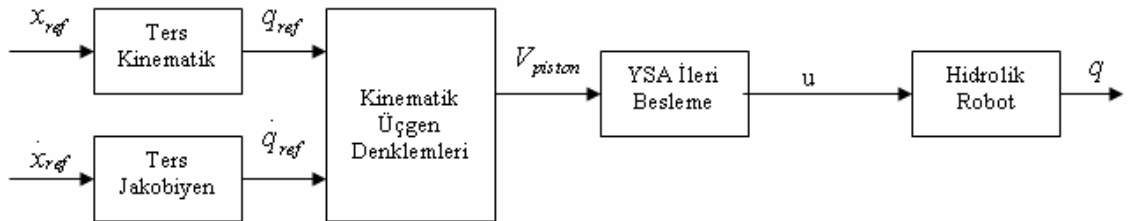
Şekil 6.4: YSA Yapısı

YSA eğitimi sırasında ağı sunulmayan sınaama değerleri eğitimden sonra sisteme giriş olarak verilmiş ve gerçek çıkışlar ile YSA çıkışları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.5’deki grafikte, YSA’nın çıkış değerlerinin gerçek çıkış değerlerine 0.05 volt gibi bir hassasiyetle yakın değerler olduğu görülmektedir. YSA eğitimi yapılırken bu hata değerine ulaşıldığında eğitim durdurulmuş ve YSA’nın verileri istenilen hassasiyetle öğrendiği kabul edilmiştir. YSA’ya öğretilen bütün veriler S-profil hız yörüngesi ile takip edilen ve güvenli bölge içinde kalan noktalardan oluşmaktadır.



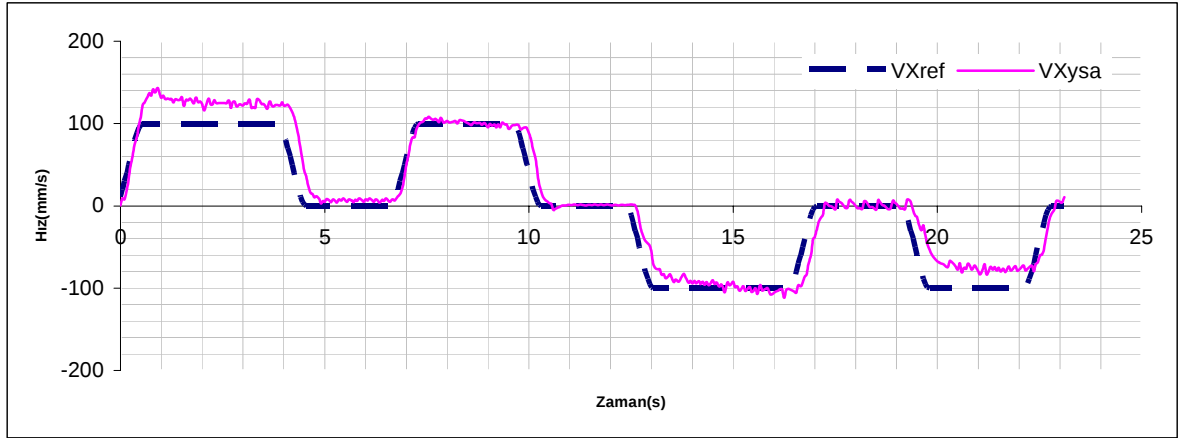
Şekil 6.5: Test Sonuçları

Eğitilen YSA eşkenar dörtgen test yörüngesi üzerinde Şekil 6.6’da görülen blok diyagramdaki gibi herhangi bir kontrolör olmaksızın gerçek zamanlı olarak denemeye sokulmuştur. Bu test yörüngesi içinde uç nokta hız profili S-profil ve uç nokta hızı 100 mm/s olarak alınmıştır. Ortaya çıkan cevaplar Şekil 6.7 ve 6.8’de verilmiştir.

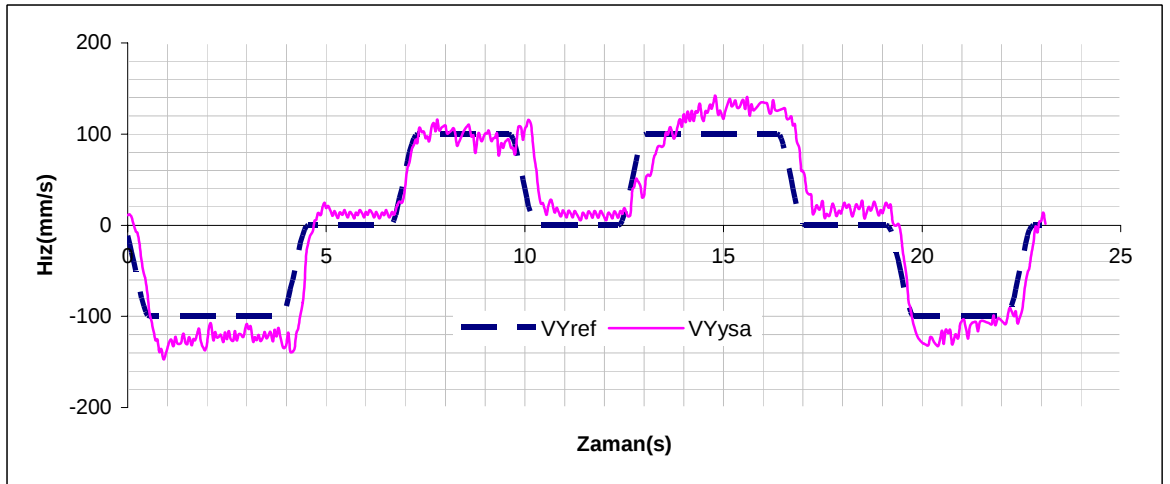


Şekil 6.6: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol Blok Diyagramı

Şekil 6.7 ve 6.8’deki grafiklerde YSA’nın sistemin hız referans girişlerini öğrendiği bın form ve yapı olarak referansa benzediği görülmüştür. X ve Y yönünde YSA hız hatalarına bağlı olarak beklenildiği üzere zamana bağlı olarak artan konum hataları oluşmuştur. Hız hataları sayısal olarak x ve y yönünde en yüksek 67mm/s ile 99mm/s’dir. X eksenindeki HKTK hatası 21mm/s ve y eksenindeki HKTK hatası 23mm/s’dir.



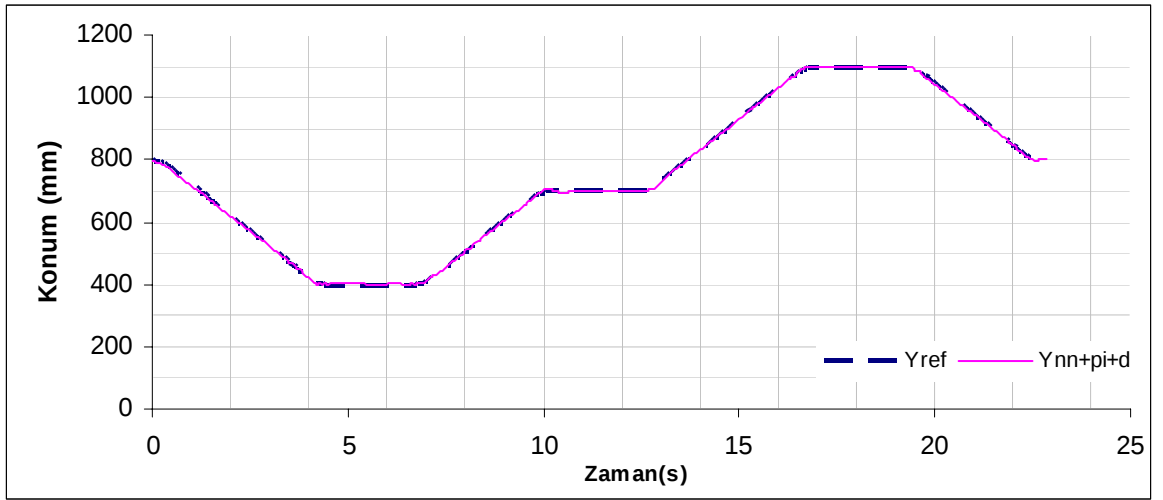
Şekil 6.7: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol x Eksen Hız Grafiği



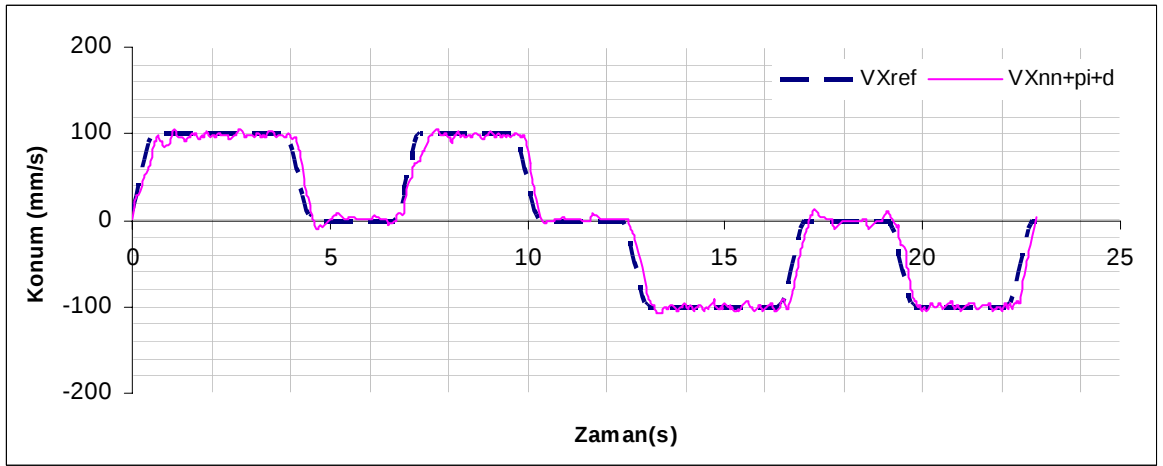
Şekil 6.8: YSA ile İleri Beslemeli Açık Çevrim Kontrol y Eksen Hız Grafiği

6.3 YSA ile İleri Beslemeli PI+D Kontrol

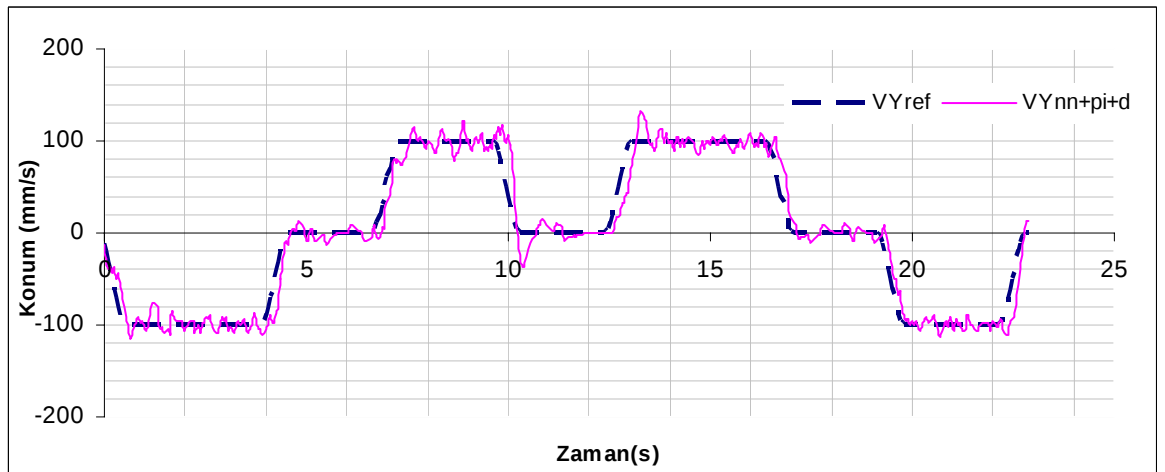
YSA çıkışının referans sinyali ile arasındaki hatalar bir geri besleme PI+D kontrolcüsü ile düzeltilmeye çalışılmıştır [26]. İleri beslemede YSA kullanılması sistemin hızlı bir cevap vermesini sağlarken geri besleme kompanzatorü sistemin



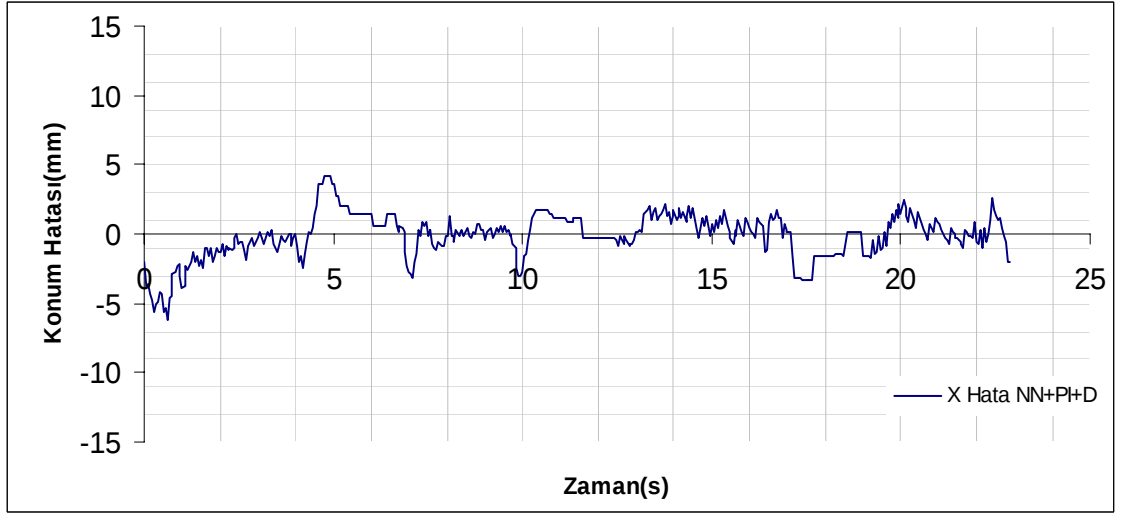
Şekil 6.11: YSA+PI+D Kontrol y Ekseni Konum Grafiği



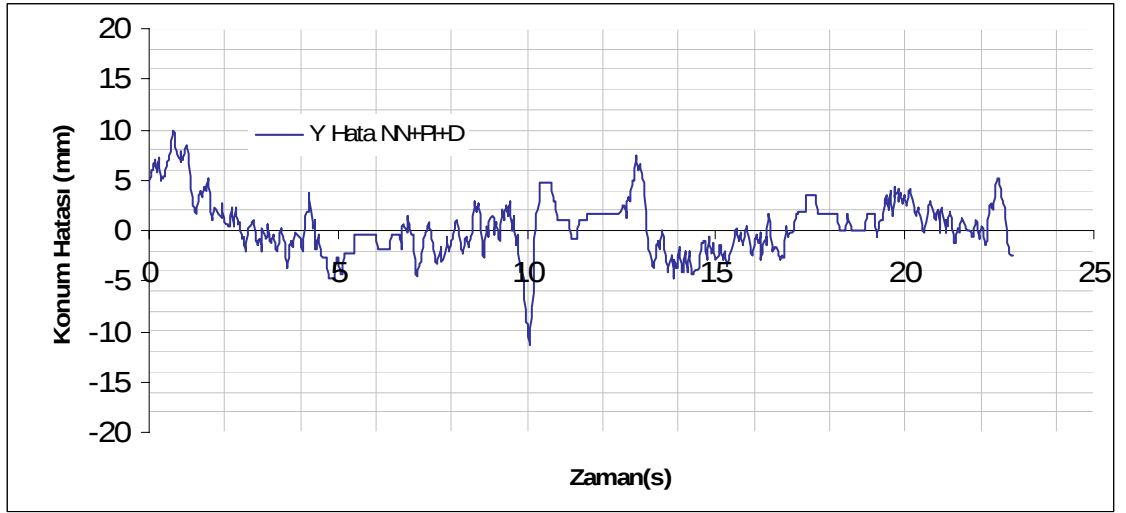
Şekil 6.12: YSA+PI+D Kontrol x Ekseni Hız Grafiği



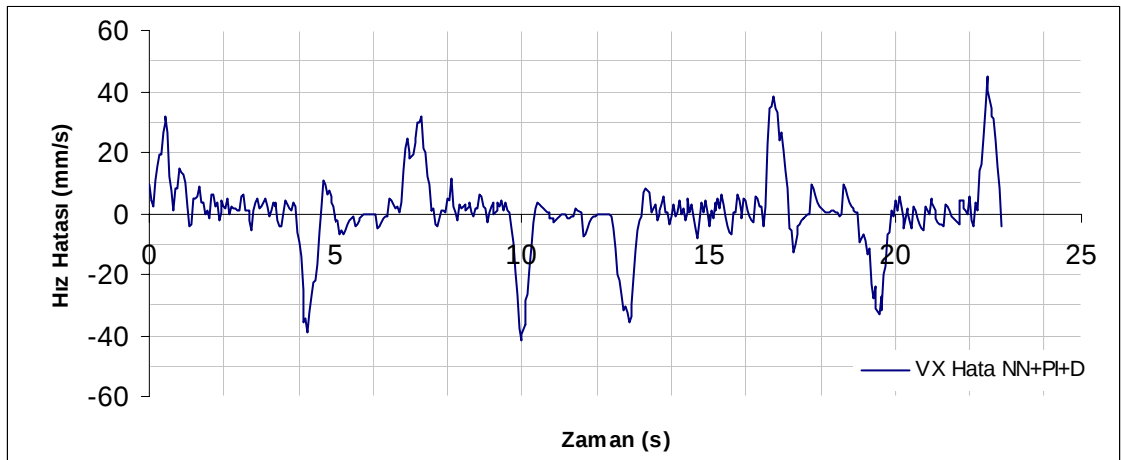
Şekil 6.13: YSA+PI+D Kontrol y Ekseni Hız Grafiği



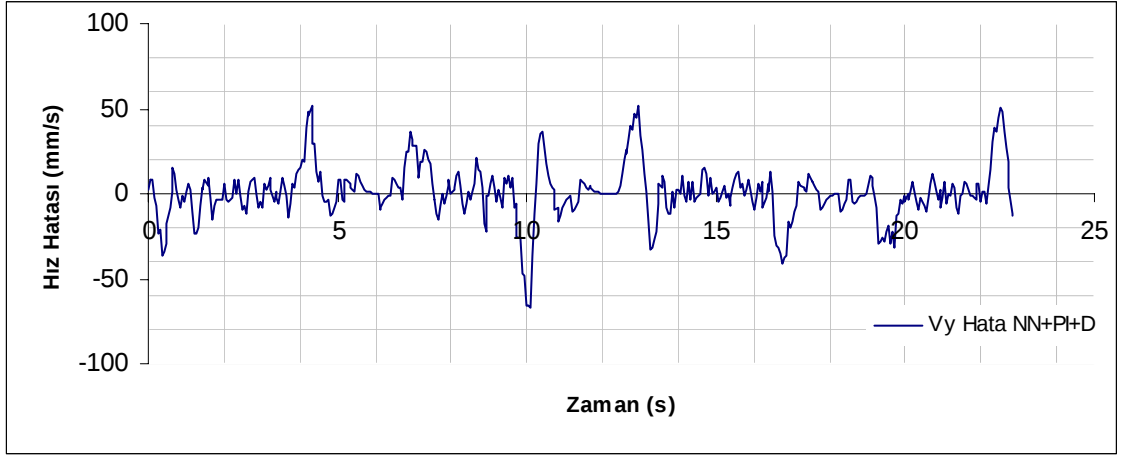
Şekil 6.14: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Konum Hataları



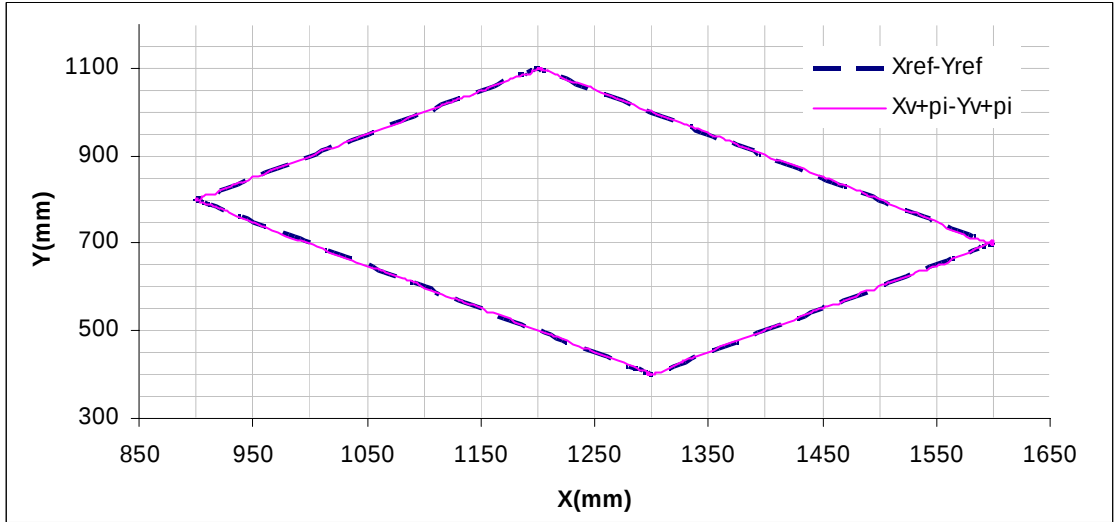
Şekil 6.15: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Konum Hataları



Şekil 6.16: YSA+PI+D Kontrol x Eksen Hız Hataları



Şekil 6.17: YSA+PI+D Kontrol y Eksen Hız Hataları



Şekil 6.18: YSA+PI+D x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi

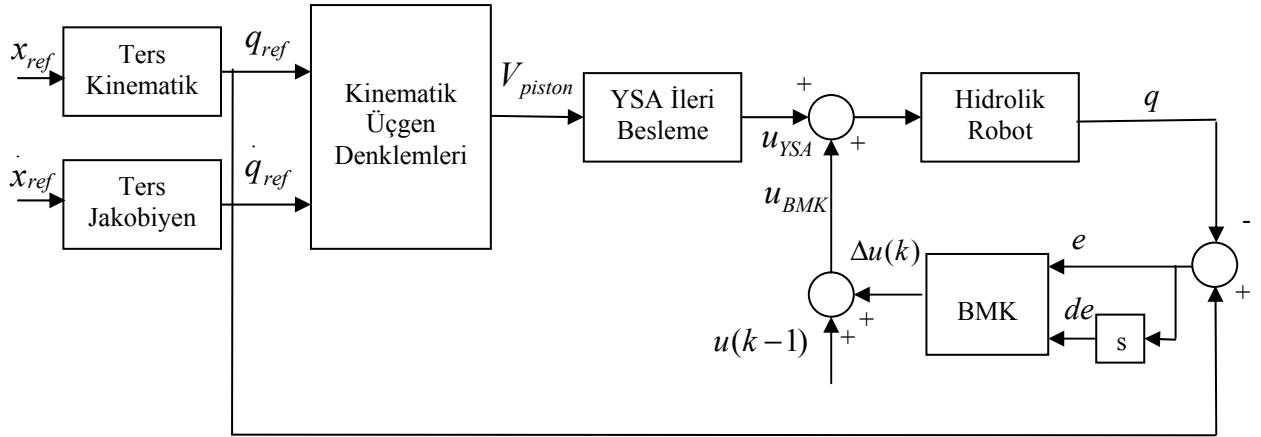
Geri beslemede PI kontrolörün kullanılması ile X ve Y eksenlerindeki maksimum hata 7 ve 9 mm'ye inmiştir. X eksenindeki maksimum hız hatası 42 mm/s civarında iken, Y eksenindeki hatalar 73 mm/s civarındadır. HKTK hataları incelendiğinde ise X ekseninde 1.57 mm ve Y eksenin 2.33 mm olarak bulunmuştur.

6.4. YSA ile İleri Beslemeli Artımsal Bulanık Mantık Kontrolü

YSA ileri besleme ve kinematik kompanzasyon çevriminin bir bulanık mantık kontrolcüsü (BMK) ile kapatılması düşünülmüştür. BMK çıkışı sistemdeki kararlı

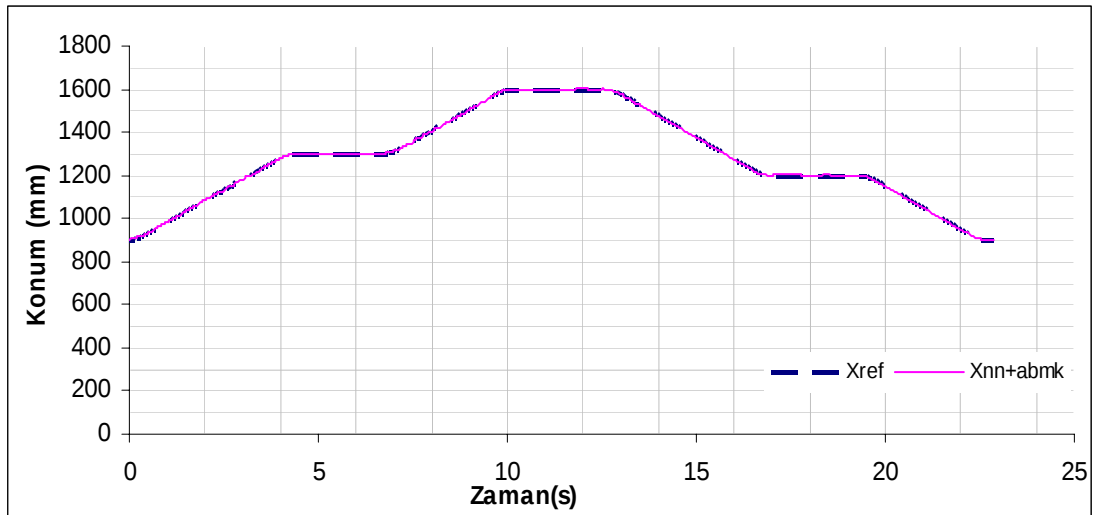
hal ve yörünge hatalarını düzeltmesi bakımından artımsal olmalıdır. Böylece BMK'ya bir integral etkisi kazandırılmış olur. Buna hız tipi BMK da denmektedir (ABMK) ve aşağıdaki gibi verilebilir.

$$u_{BMK} = \Delta u_{BMK}(k) + u_{BMK}(k-1) \quad (6.5)$$

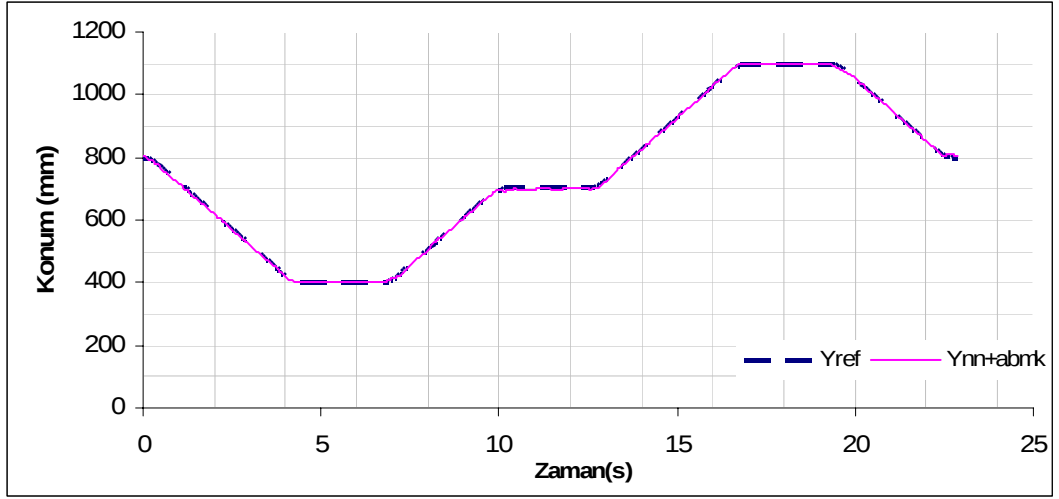


Şekil 6.19: YSA+ABMK Kontrol Blok Diyagramı

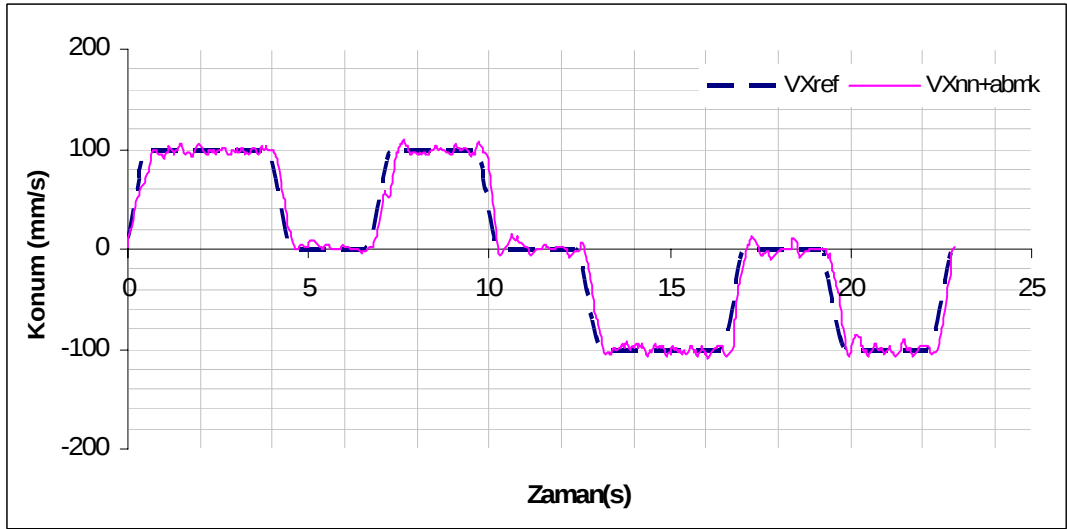
Bu kontrolcü ile kurulan blok diyagramı Şekil 6.19'da görülmektedir. Kurulan kapalı çevrim blok diyagramı ile ortaya çıkan sonuçlar Şekil 6.20-6.28'de verilmiştir.



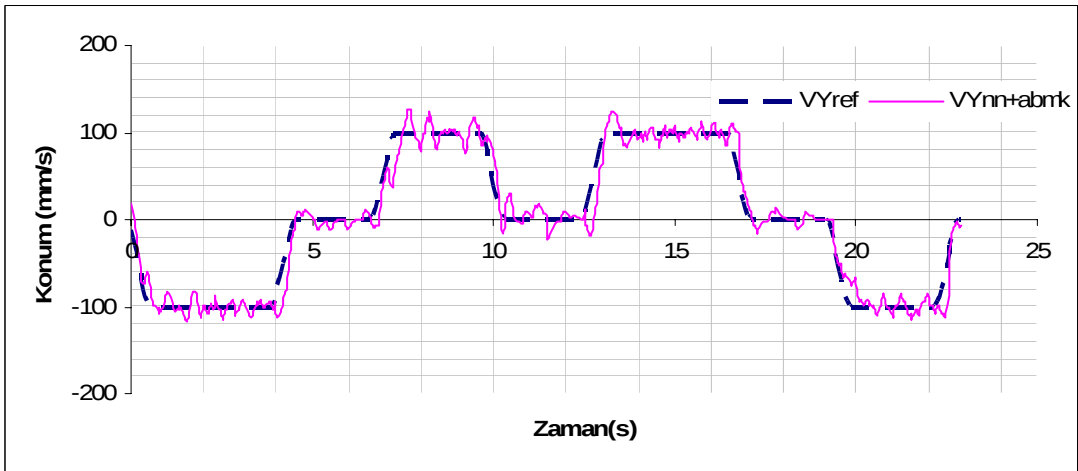
Şekil 6.20: YSA+ABMK x Eksen Konum Grafiği



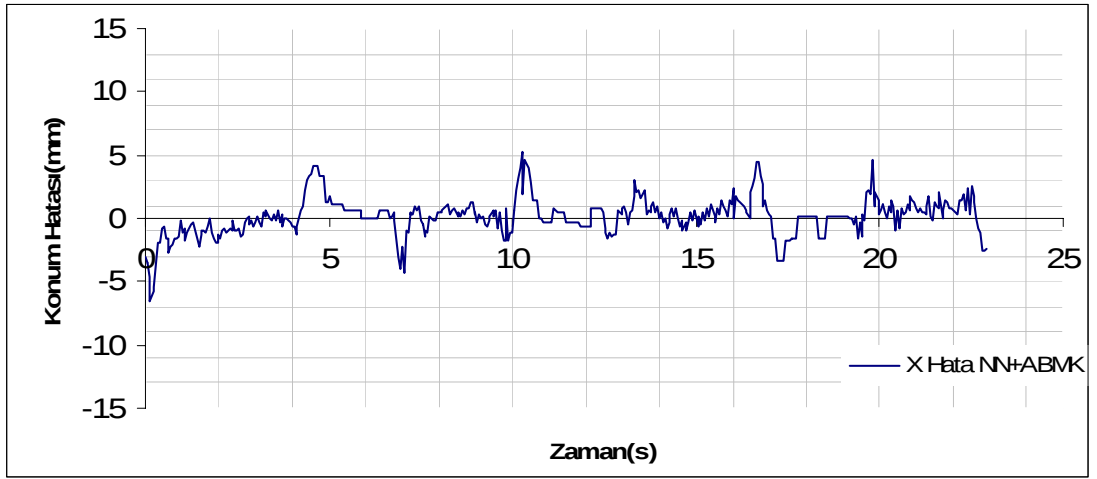
Şekil 6.21: YSA+ABMK y Eksen Konum Grafiği



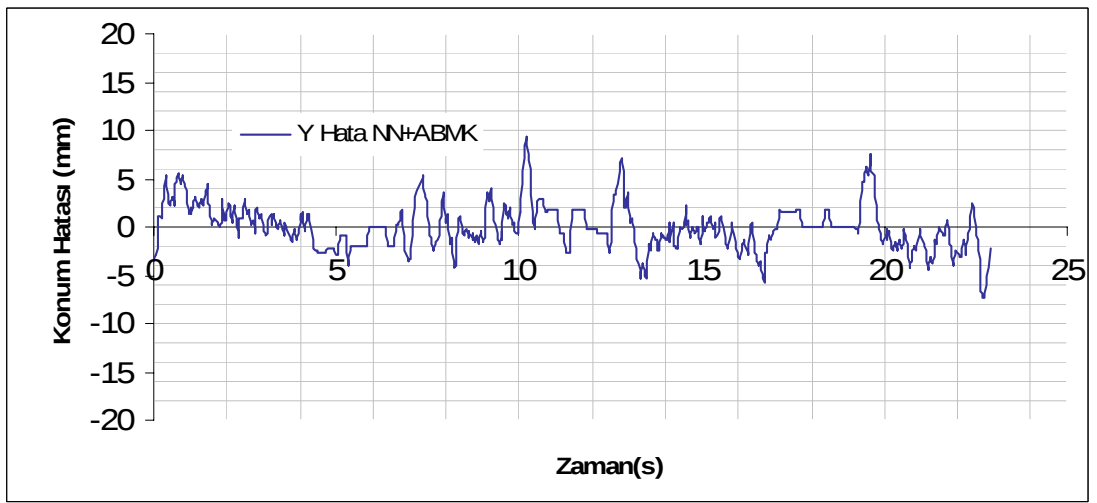
Şekil 6.22: YSA+ABMK x Eksen Hız Grafiği



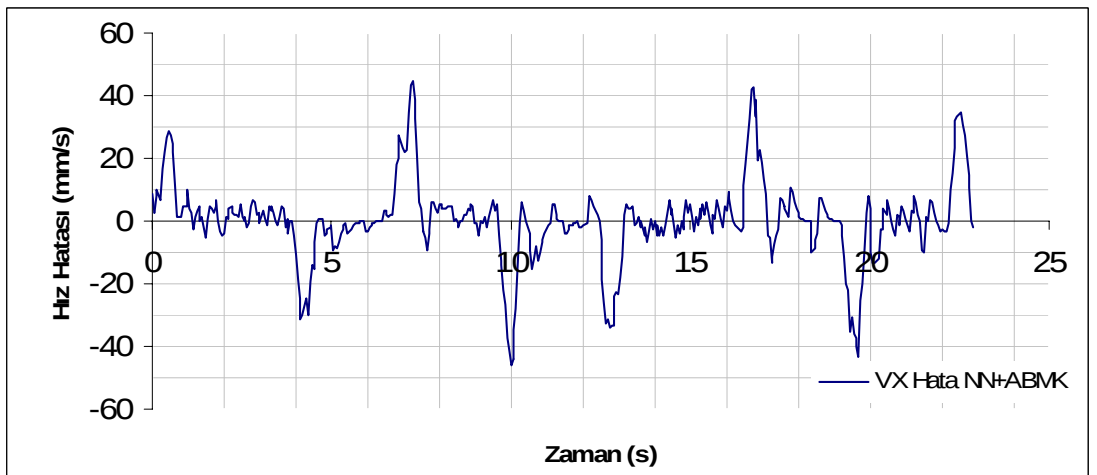
Şekil 6.23: YSA+ABMK y Eksen Hız Grafiği



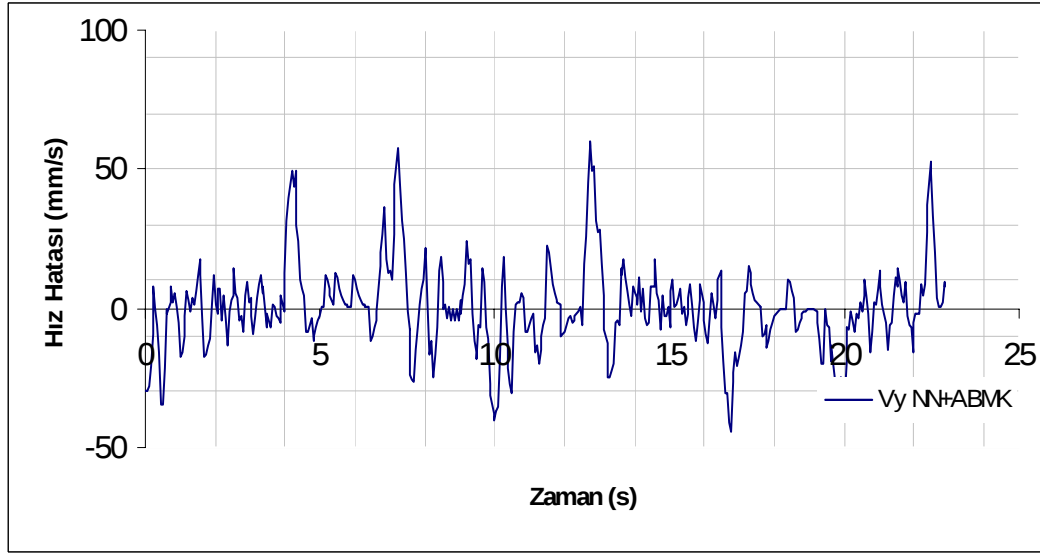
Şekil 6.24: YSA+ABMK x Eksen Konum Hataları



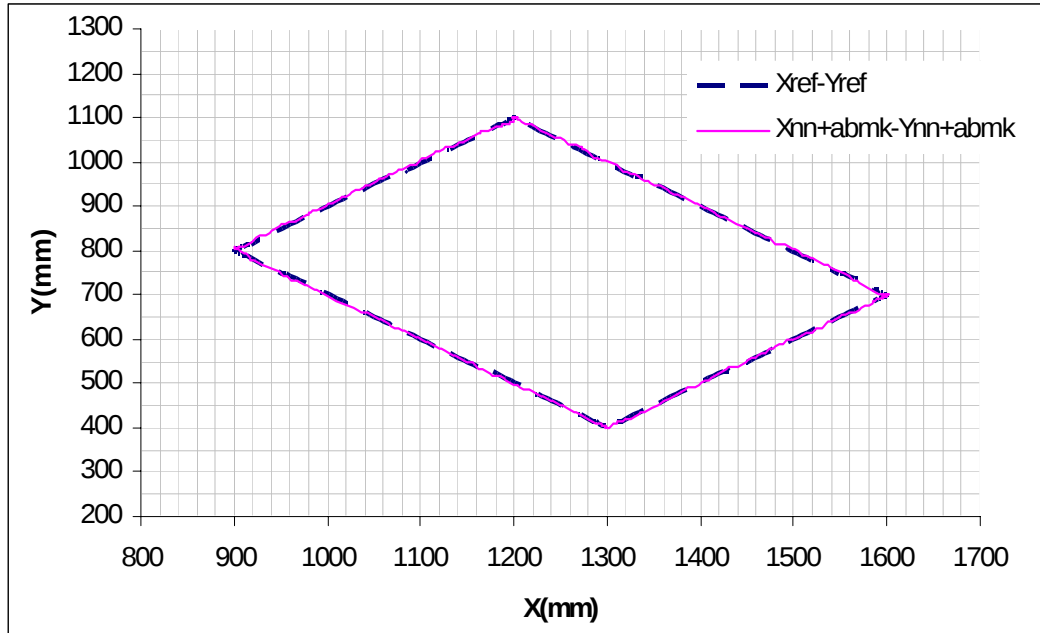
Şekil 6.25: YSA+ABMK y Eksen Konum Hataları



Şekil 6.26: YSA+BMK x Eksen Hız Hataları



Şekil 6.27: YSA+BMK y Eksen Hız Hataları



Şekil 6.28: YSA+ABMK x-y Eşkenar Dörtgen Yörüngesi

6.5. Hata Kriterleri

Sonuçların karşılaştırılması için değişik hata kriterleri kullanılmıştır. Bunlar konum ve hız için; HKTK, en büyük hata, en büyük radyal hata ve ortalama radyal hata olarak sınıflandırılabilir. HKTK değerinin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ref} - x_{ölçülen})_i^2}{n}} \quad (mm) \quad (6.6)$$

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ref} - y_{ölçülen})_i^2}{n}} \quad (mm) \quad (6.7)$$

$$Vx_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Vx_{ref} - Vx_{ölçülen})_i^2}{n}} \quad (mm / s) \quad (6.8)$$

$$Vy_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Vy_{ref} - Vy_{ölçülen})_i^2}{n}} \quad (mm / s) \quad (6.9)$$

olarak gösterilir.

En yüksek hata ifadesi ise bütün konum ve hız hatalarının en büyüğüdür.

$$e_{x\max} = \max(X_{ref} - X_{ölçülen})_i \quad (mm) \quad (6.10)$$

$$e_{y\max} = \max(Y_{ref} - Y_{ölçülen})_i \quad (mm) \quad (6.11)$$

$$e_{Vx\max} = \max(Vx_{ref} - Vx_{ölçülen})_i \quad (mm / s) \quad (6.12)$$

$$e_{Vy\max} = \max(Vy_{ref} - Vy_{ölçülen})_i \quad (mm / s) \quad (6.13)$$

En büyük radyal hata ifadesi ise konum ve hız için matematiksel olarak:

$$e_{r\max} = \max \sqrt{(X_{ref} - X_{ölçülen})^2 + (Y_{ref} - Y_{ölçülen})^2} \quad (mm) \quad (6.14)$$

$$e_{vr\max} = \max \sqrt{(Vx_{ref} - Vx_{ölçülen})^2 + (Vy_{ref} - Vy_{ölçülen})^2} \quad (mm / s) \quad (6.15)$$

olarak gösterilir. Ortalama radyal hata ifadesi ise konum ve hız için matematiksel olarak

$$e_{rort} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(X_{ref} - X_{ölçülen})_i^2 + (Y_{ref} - Y_{ölçülen})_i^2}}{n} \quad (mm) \quad (6.16)$$

$$e_{V_{rort}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Vx_{ref} - Vx_{ölçülen})^2_i + (Vy_{ref} - Vy_{ölçülen})^2_i}}{n} \quad (mm) \quad (6.17)$$

şeklinde ifade edilir.

6.6. Kontrolörlerin Sonuçlarının Hata Kriterleri İle İncelenmesi

BR1 boya robotu ile yapılan deneylerde bağımsız PI+D kontrolör, bağımsız hız geri beslemeli PI kontrolör (PI+V), bağımsız BMK kontrolör, YSA+PI+D kontrolör, YSA+BMK kontrolör ve YSA+ABMK kontrolörleri kullanılmıştır. Bu deneylerde bağımsız BMK kontrolör ve YSA+BMK kontrolörleri öbür kontrolörler kadar iyi sonuç vermediğinden tezde incelenmemiştir. Tablo 6.1 ve 6.2’de PI+D ve PI+V kontrolörlerinin hata kriterlerine göre karşılaştırması yapılmıştır.

Tablo 6.1: Bağımsız PI+D Kontrol Hata Değerleri

<i>Bağımsız PI+D Kontrol</i>	X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
HKTK Hatası	5.57	5.20	22.00	22.06
En Yüksek Hata(e_{max})	14.91	19.43	73.72	81.131
En Yüks. Radyal Konum Hatası (e_{rmax})	24.02			
En Yüks. Radyal Hız Hatası (e_{vrmax})	98.13			
Ort. Radyal Konum Hatası (e_{rort})	6.028			
Ort. Radyal Hız Hatası (e_{vrort})	20.07			

Tablo 6.2: Bağımsız Hız Geri Beslemeli PI Kontrol Hata Değerleri

<i>PI+V Kontrol</i>	X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
HKTK Hatası	8.5807	10.395	21.6024	21.3189
En Yüksek Hata (e_{max})	15.003	18.995	68.4755	76.5936
En Yüks. Radyal Konum Hatası (e_{rmax})	23.043			
En Yüks. Radyal Hız Hatası (e_{vrmax})	96.2755			
Ort. Radyal Konum Hatası (e_{rort})	12.5010			
Ort. Radyal Hız Hatası (e_{vrort})	18.246			

Tablo 6.1 ve 6.2’ye göre PI+D kontrolörün ortalama radyal konum hatası PI+V kontrolörüne göre daha iyidir fakat ortalama radyal hız hatası PI+V kontrolöründe daha düşüktür. Ayrıca PI+D kontrolörde en yüksek hız hatası 98.13 m/s olarak

gözükürken hız geri beslemeli PI kontrolördeki hız hatası 96.27 mm/s olmuştur. Genel olarak bağımsız hız geri beslemeli PI kontrolörü hız hatalarında bir iyileşme sağlarken konum hatalarını arttırmıştır. YSA+PI ve YSA+ABMK kontrolörlerinin sonuçları ise Tablo 6.3 ve 6.4’de gösterilmiştir.

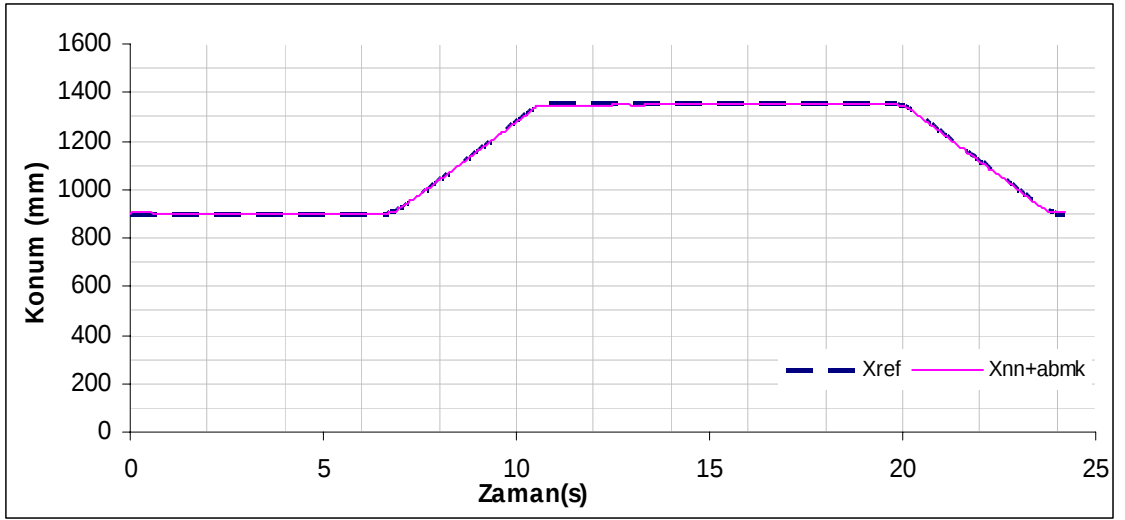
Tablo 6.3: YSA+PI+D ve YSA+ABMK Kontrol Hata Değerleri

<i>YSA+PI+D Kontrol</i>		<i>X(mm)</i>	<i>Y(mm)</i>	<i>Vx(mm/s)</i>	<i>Vy(mm/s)</i>
HKTK Hatası		1.61	2.84	12.37	15.94
En Yüksek Hata		6.15	11.24	45.15	67.01
En Yüksek Radyal Konum Hatası	Ort. Radyal Konum Hatası	11.73		2.57	
En Yüksek Radyal Hız Hatası	Ort. Radyal Hız Hatası	76.98		13.49	
<i>YSA+ABMK Kontrol</i>		<i>X(mm)</i>	<i>Y(mm)</i>	<i>Vx(mm/s)</i>	<i>Vy(mm/s)</i>
HKTK Hatası		1.49	2.36	12.95	15.86
En Yüksek Hata		6.57	9.29	46.25	60.44
En Yüksek Radyal Konum Hatası	Ort. Radyal Konum Hatası	10.11		2.19	
En Yüksek Radyal Hız Hatası	Ort. Radyal Hız Hatası	72.96		14.33	

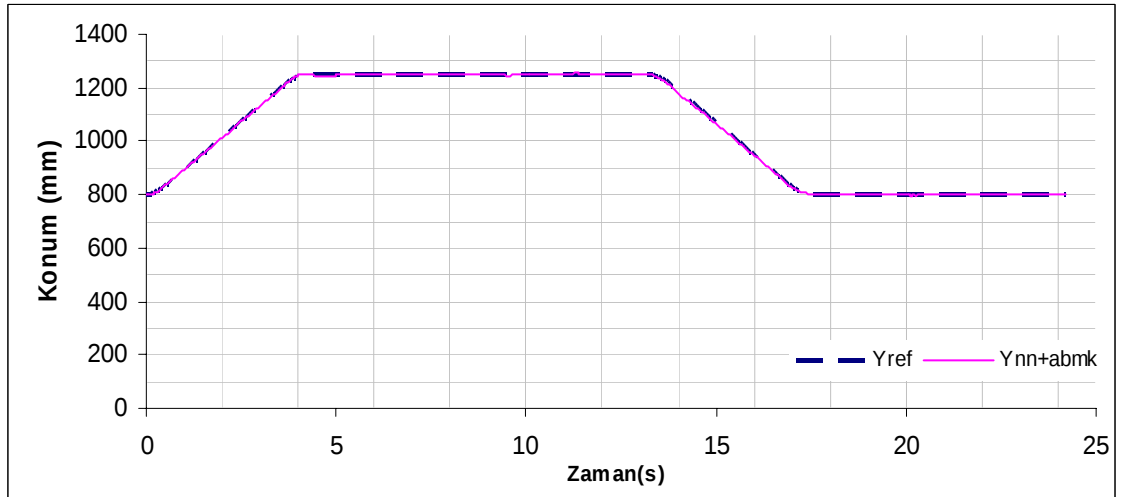
Tablo 6.3 ve 6.4’deki veriler incelendiğinde ve önceki veriler ile karşılaştırıldığında PI+D kontrolör ile x ekseninde 5.57 mm olan HKTK hatası, YSA+PI+D kontrolörü ile 1.61 mm’ye ve YSA+ABMK kontrolörü ile 1.49mm’ye indirilerek %80’lik bir iyileşme sağlanmıştır. Hız geri beslemeli PI kontrolörü ile 21.3 mm/s olan y eksenindeki HKTK hız hatası %25’lik bir performans artışı ile YSA+PI+D kontrolöründe 15.94 mm/s’ye ve YSA+ABMK kontrolöründe 15.86 mm/s ‘ye indirilmiştir. YSA+ABMK kontrolörünün x ve y eksenindeki HKTK konum hataları YSA+PI+D kontrolöründen daha düşüktür. Ayrıca en yüksek radyal konum ve hız hataları da YSA+ABMK sonuçlarında 10.11 mm ve 72.96 mm/s ile YSA+PI+D sonuçlarından daha düşük olarak gözükmektedir. Bu değerler daha önceki hız geri beslemeli PI kontrolörü ile gerçekleştirilen çevrimde 18 mm ile 96 mm/s idi. Gözlemlenen sonuçlardan kontrol çevrimine YSA eklenmesi ile konumda ve hızlardaki performans artışı görülmektedir.

6.7. Değişik Yörünge Profilleri için YSA ile İleri Beslemeli Artımsal Bulanık Mantık Kontrolü Sonuçları

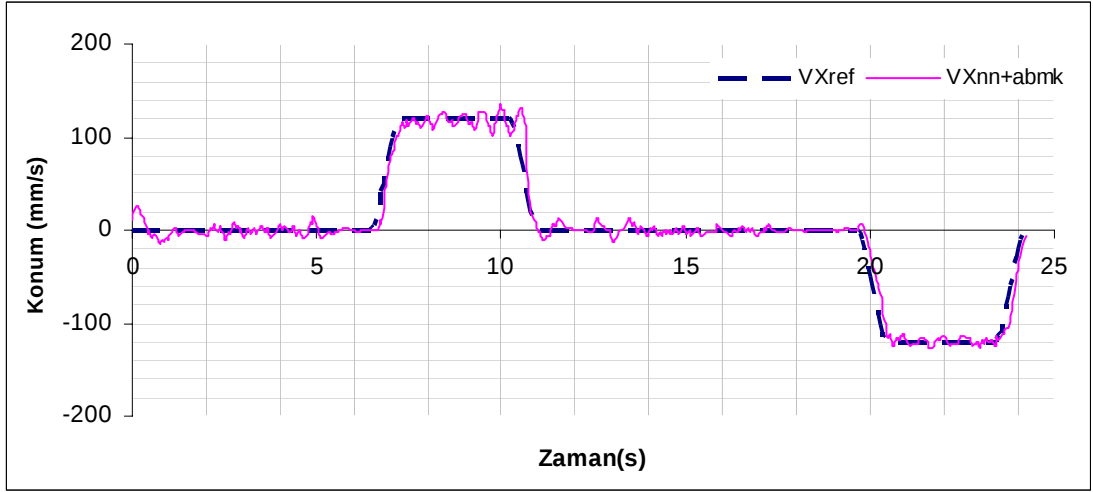
Eşkenar dörtgen yörüngesi dışında kare ve çembersel test yörüngeleri hazırlanmıştır. Kare ve çembersel yörüngelerde YSA+ABMK kontrolörü sonuçları Şekil 6.29-6.37’de verilmiştir. Bu yörüngelerden kare yörüngesi üzerinde uç nokta hızı 120 mm/s iken dairesel yörüngede sinuzoidal olarak ± 120 mm/s hız aralığında değişmektedir.



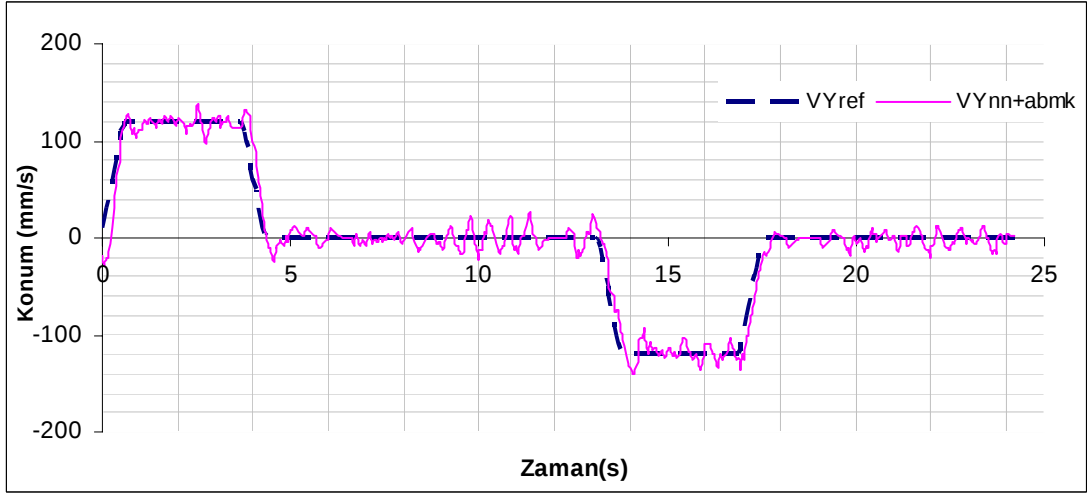
Şekil 6.29: YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksen Konum Grafiği



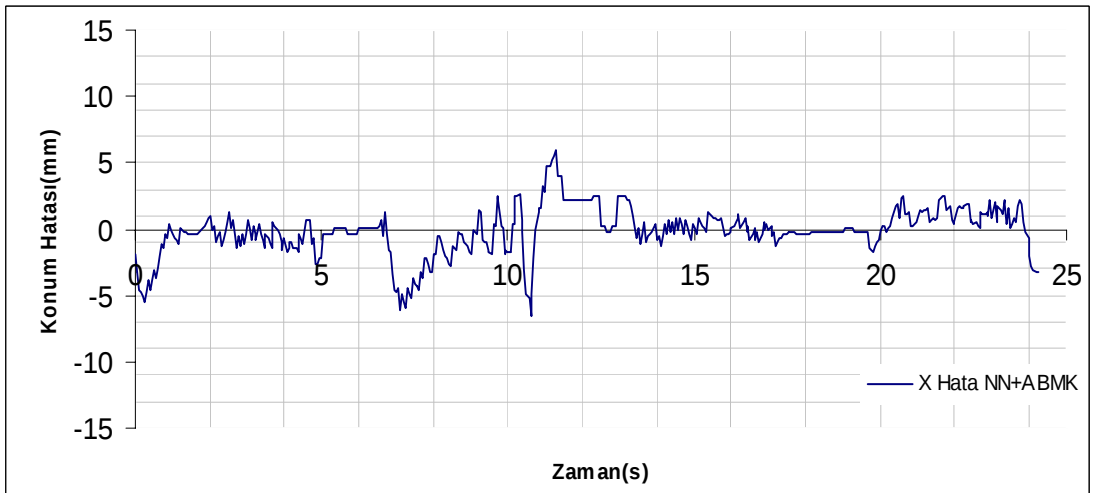
Şekil 6.30: YSA+ABMK y Eksen Konum Grafiği



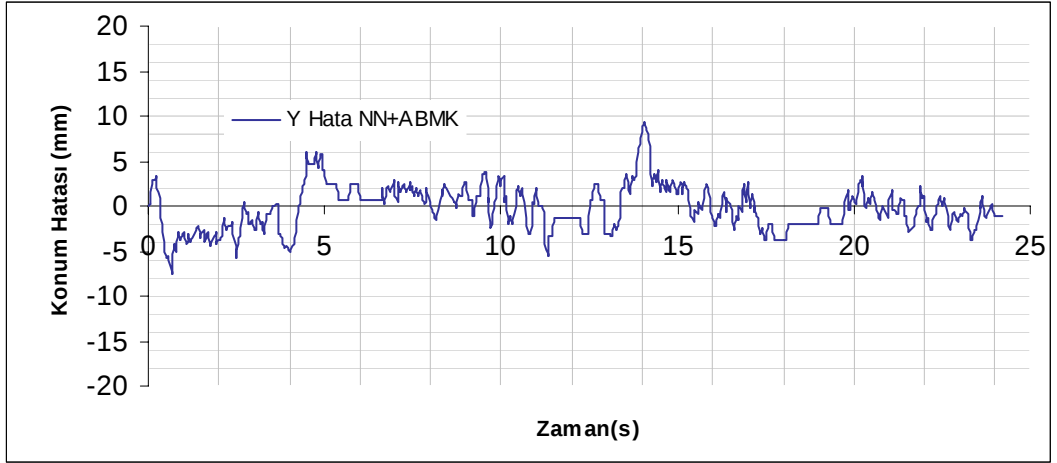
Şekil 6.31: YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksen Hız Grafiği



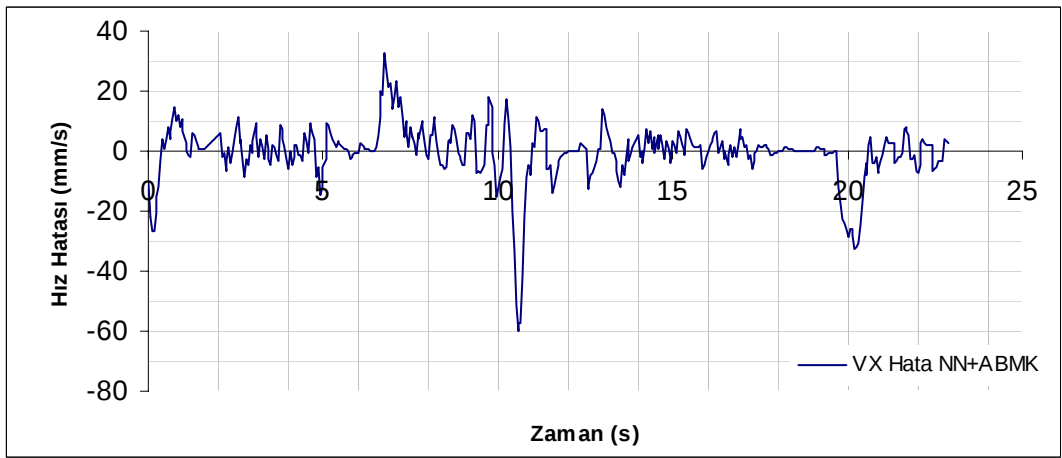
Şekil 6.32: YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksen Hız Grafiği



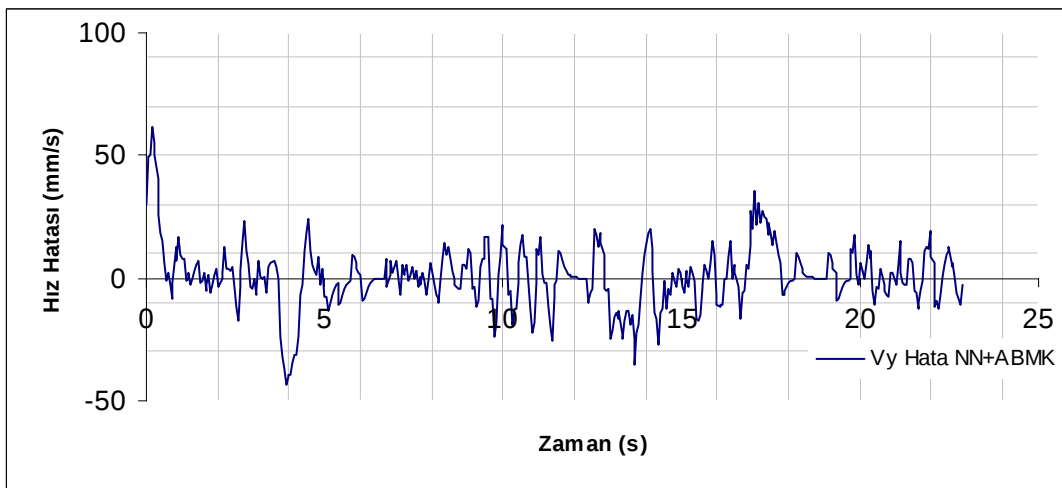
Şekil 6.33: YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksen Konum Hataları



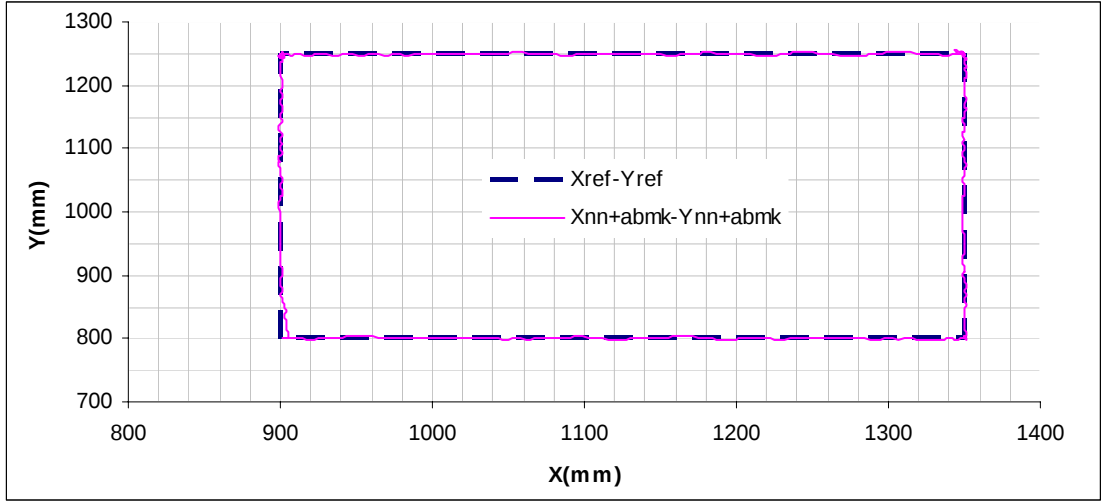
Şekil 6.34: YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksen Konum Grafiği



Şekil 6.35: YSA+ABMK Kare Yörünge x Eksen Hız Hataları

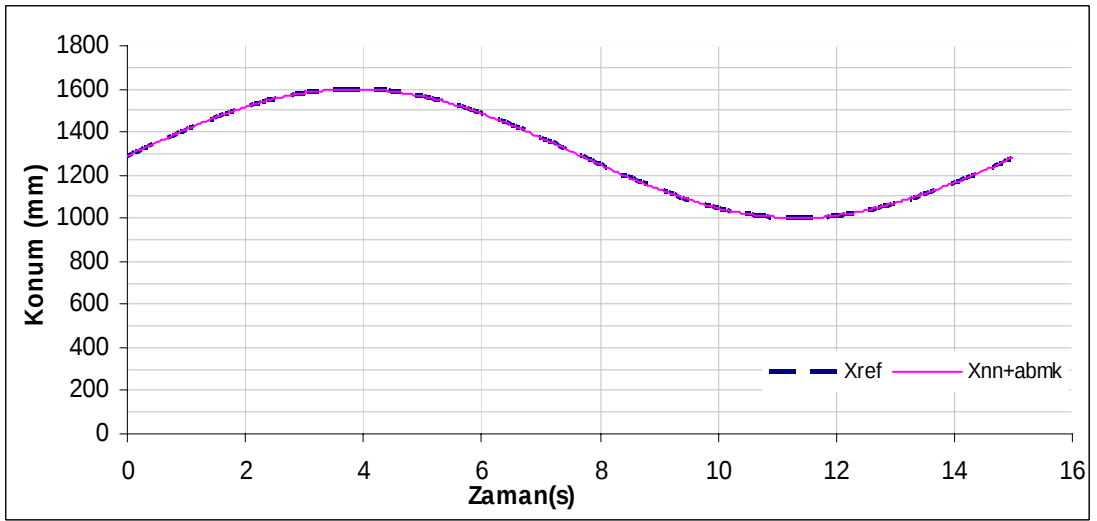


Şekil 6.36: YSA+ABMK Kare Yörünge y Eksen Hız Hataları

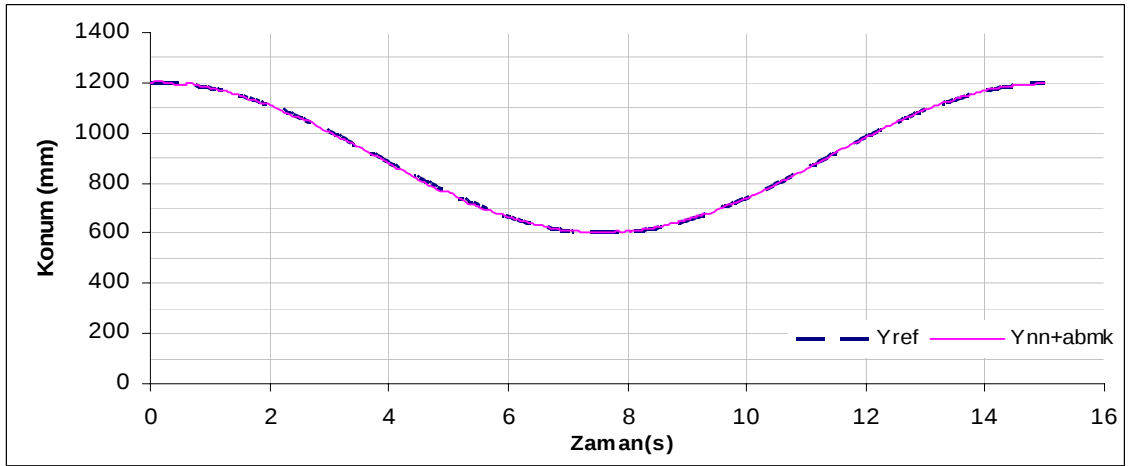


Şekil 6.37: YSA+ABMK x-y Kare Yörünge

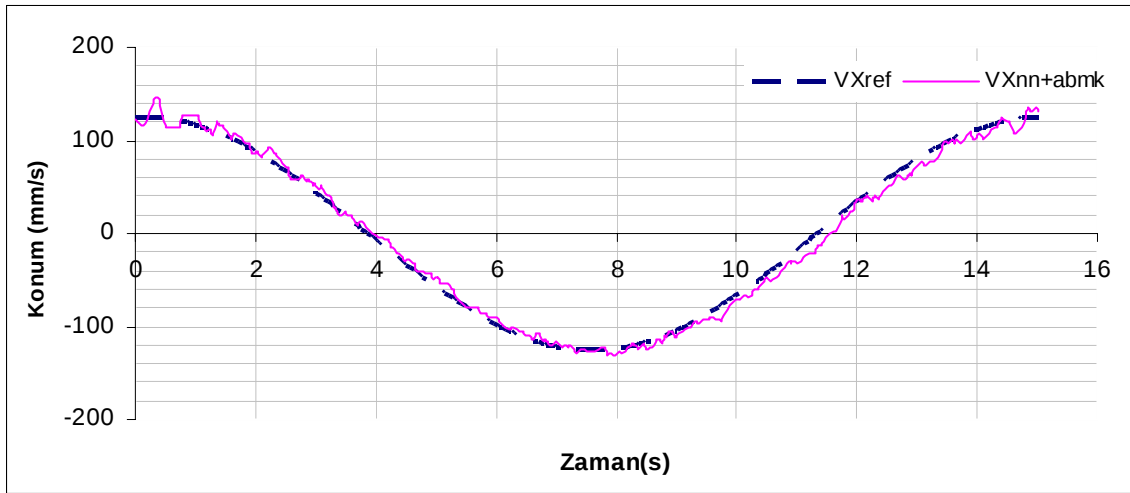
Çember yörünge'nin YSA+ABMK kontrolörü ile sonuçları Şekil 6.38- 6.46'da verilmiştir. Bu yörüngede hız profilinde keskin noktalar bulunmadığı ve yumuşak bir formda olduğu için hesap ve hız hatalarında düşüş gözlemlenmiştir.



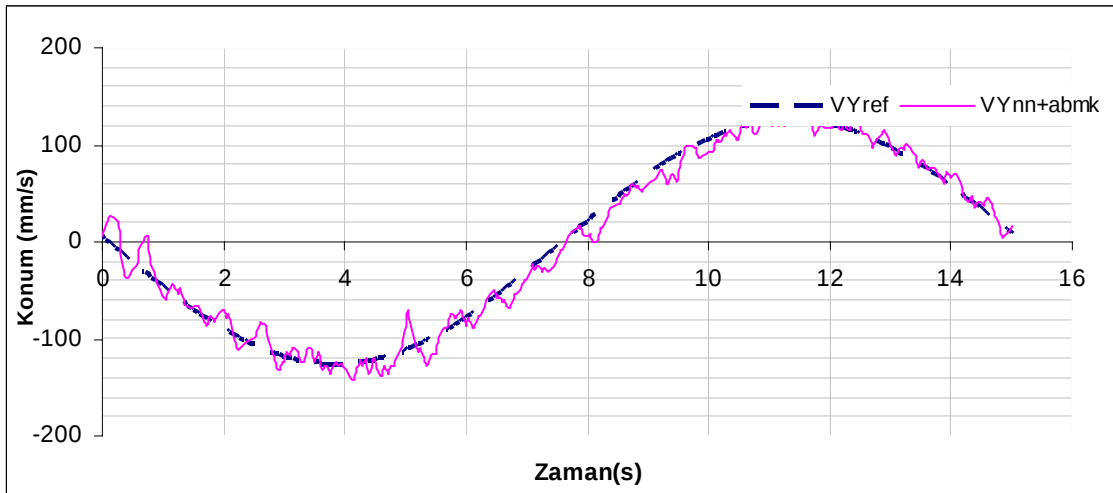
Şekil 6.38: YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksen Konum Grafiği



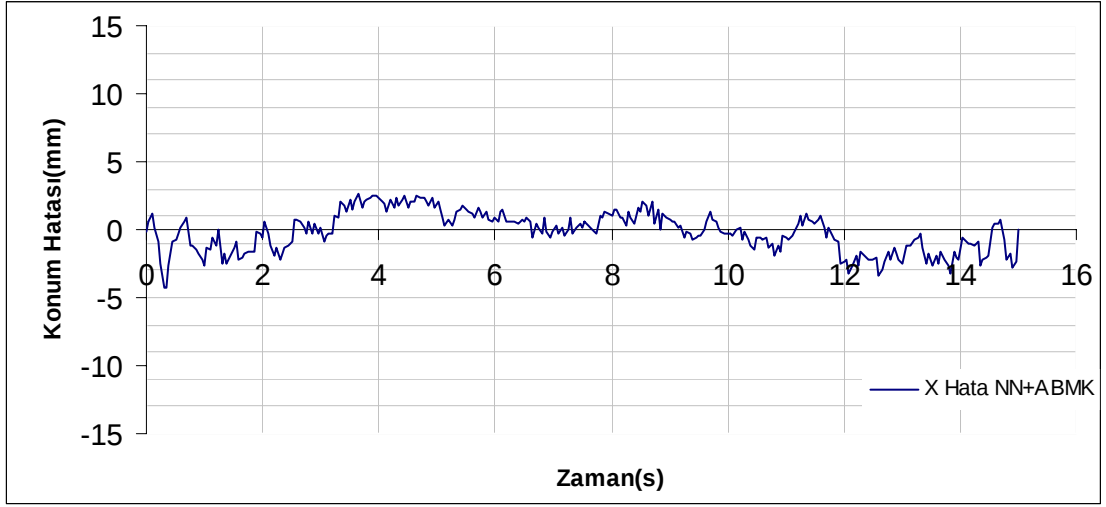
Şekil 6.39: YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksen Konum Grafiği



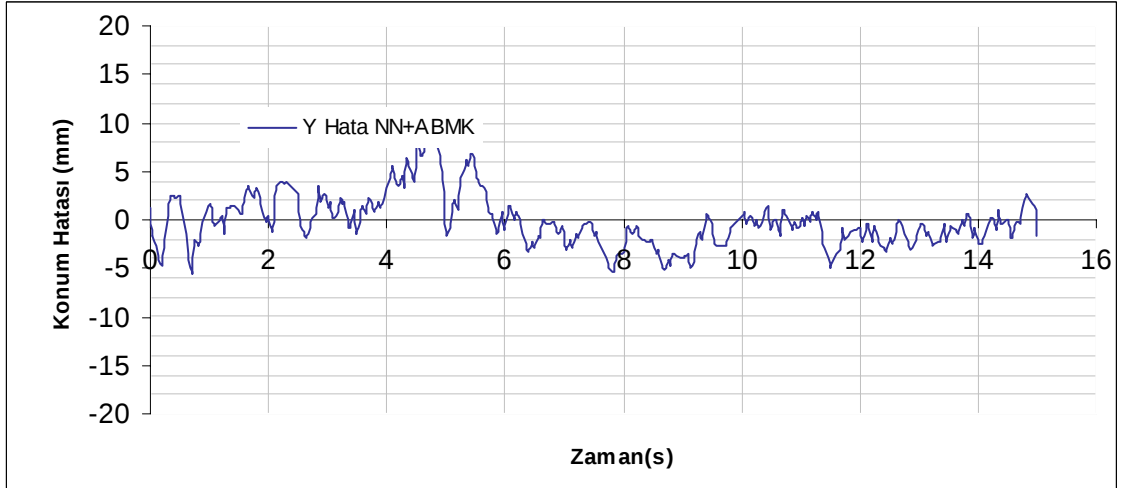
Şekil 6.40: YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksen Hız Grafiği



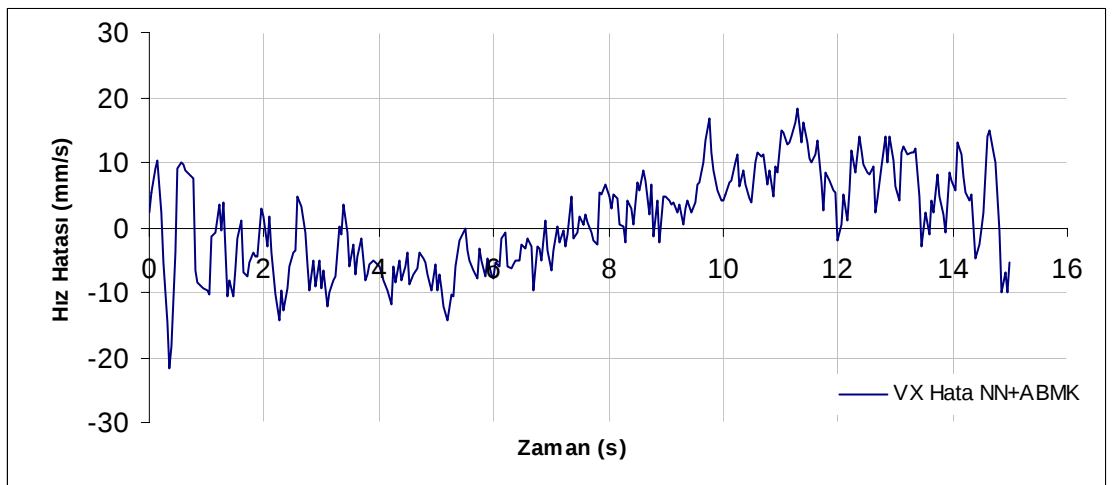
Şekil 6.41: YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksen Hız Grafiği



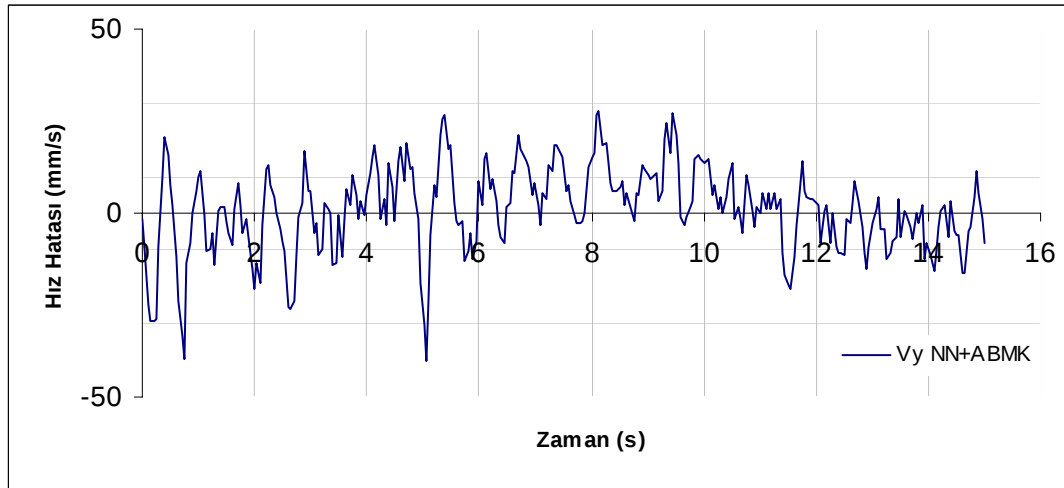
Şekil 6.42: YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksen Konum Hataları



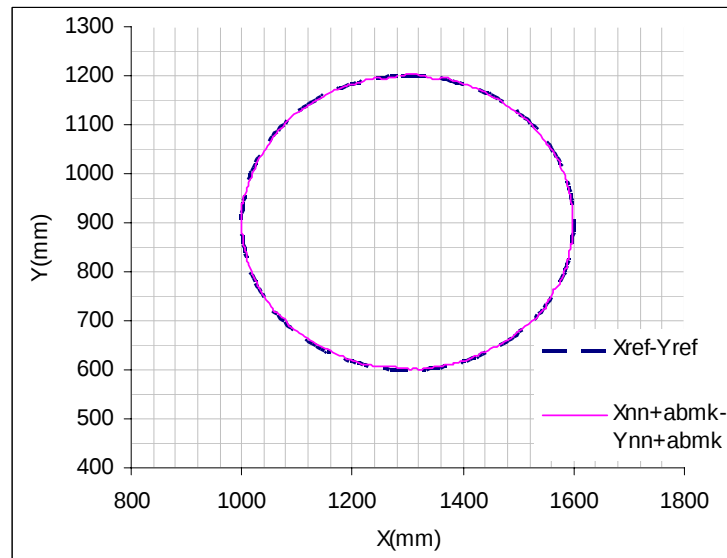
Şekil 6.43: YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksen Konum Hataları



Şekil 6.44: YSA+ABMK ÇemberYörünge x Eksen Hız Hataları



Şekil 6.45: YSA+ABMK ÇemberYörünge y Eksen Hız Hataları



Şekil 6.46: YSA+ABMK x-y ÇemberYörünge

Tablo 6.4: Diğer Yörüngeler İçin YSA+ABMK Kontrol Hata Değerleri

Kare Yörünge Hataları		X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
HKTK Hatası		1.79	2.54	9.91	12.79
En Yüksek Hata		6.49	9.26	60.29	61.33
En Yüksek Radyal Konum Hatası	Ort. Radyal Konum Hatası	9.27		2.64	
En Yüksek Radyal Hız Hatası	Ort. Radyal Hız Hatası	66.88		11.86	
Çember Yörünge Hataları		X(mm)	Y(mm)	Vx(mm/s)	Vy(mm/s)
HKTK Hatası		1.45	2.68	7.65	11.68
En Yüksek Hata		4.32	9.25	21.74	40.45
En Yüksek Radyal Konum Hatası	Ort. Radyal Konum Hatası	9.57		2.58	
En Yüksek Radyal Hız Hatası	Ort. Radyal Hız Hatası	41.10		12.22	

Tablo 6.4’de YSA+ABMK kontrol için kare ve çember yörünge üzerindeki hatalar gösterilmiştir. Hataların hesaplanma yöntemi daha önce bahsedilen hata kriterleri hesap yöntemi ile aynıdır. Kare yörüngede x eksenindeki hız hatası 9.91 mm/s ve y eksenindeki hız hatası ise 12.79 mm/s olarak görülmektedir. Bu hatalar daha önceki eşkenar dörtgen yörüngesinde 12.95 mm/s ve 15.86 mm/s idi. Çember yörüngesi üzerinde ise bu hatalar 7.65 mm/s ve 11.68 mm/s civarındadır. Dikkat çekici olan sonuç çember yörünge üzerinde en yüksek radyal hız hatalarında %50 civarında azalma görülmesidir. En yüksek radyal hız hatası eşkenar dörtgen yörüngesi için 72.96 mm/s iken çember yörüngesi için bu değer 41.10 mm/s’dir.

7.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında bir hidrolik robotun verilen bir referans yörüngeyi minimum hata ile izleyebilmesi için çeşitli kontrol çevrimleri denenmiştir. Hata kriterleri açısından bakıldığında akıllı sistemler ile ortaya çıkan sonuçların klasik kontrolörlerden daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır. Özellikle robotun kinematik kompanzasyonu ile birlikte bir YSA'nın ileri beslemede kullanılması performansta büyük artışlara neden olmuş ve hızlı bir cevap ile 1-2mm'ye kadar düşen yörünge hataları elde edilmiştir. En son olarak çevrimi gerçekleştirilen YSA ileri beslemeli ABMK, hız hatası kriterleri açısından, YSA ileri beslemeli PI'dan da iyi sonuçlar vermiş, HKTK hız hataları ile ortalama hız hata değerlerinde ve konum hatalarında iyileşme görülmüştür. Hız ölçümü için IEEE'nin 2006 yılında Kontrol Sistemleri Teknolojisi dergisinde yayınlanan ETD yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca çalışma sırasında basınç, sıcaklık ve güvenli çalışma bölgesi değerleri için uygun görülen çalışma sınırlarının dışına çıkılmamıştır.

7.2 Öneriler

Robotun üzerinde bulunan 1024 darbe/tur optik kodlayıcıların, çözünürlüğü daha yüksek kodlayıcılarla değiştirilmesi konum ve hız hassasiyetinin yükselmesi açısından yararlı olacaktır.

BR1 robotu üzerinde basınç ve/veya debi sensörlerinin kullanılması ile daha değişik kontrol metotları uygulanabilir. Bir takojeneratör kullanımı ile açısal hız ölçümleri yapılabilir.

Hidrolik robot için oluşturulan YSA'nın, daha değişik parametrelerle değişik yörünge ve hız değerleri için eğitilerek optimum değerler elde edilmesi söz konusu olabilir.

YSA ile birlikte kullanılan ABMK kontrolörünün üyelik fonksiyonları ile kural tabanının optimizasyonu için çalışma yapılabilir. Bunun için genetik algoritma veya Simplex optimizasyon algoritması gibi teknikler kullanılabilir.

Ayrıca eklenecek bir ivme sensörüyle robotun kol ucu titreşimlerinin ölçüm ve analizlerinin yapılması mümkün olabilir.

Sonuç olarak yapılan bu çalışma sayesinde hidrolik bir robot üzerinde akıllı kontrol sistemleri kullanılarak hassas bir kontrol elde edilebildiği gösterilmektedir. Hassasiyet üzerinde ölçüm elemanlarının ve hız hesaplama algoritmasının etkili olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Sirouspour, R.M.**, 2001. Nonlinear control of hydraulic robots, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Volume 17, No. 2, April.
- [2] **Habibi, S.R., Richards, R.J. and Goldenberg, A.A.**, 1994. Hydraulic actuator analysis for industrial robot multivariable control, *Proceedings of the American Control Conference*, Baltimore, Maryland, June.
- [3] **Corbet, T., Sepehri, N. and Lawrence, P.D.**, 1996. Fuzzy control of a class of hydraulically actuated industrial robots. *IEEE Transactions of Control Systems Technology*, Volume 4, No. 4, July.
- [4] **Zhou, J.**, 1995. Experimental evaluations of a kinematic compensation control method for hydraulic robot manipulators, *Control Engineering Practice*, Volume 3. No. 5, pp.675-684.
- [5] **Honegger, M. and Corke P.**, 2001. Model-based control of hydraulically actuated manipulators, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 21-26.
- [6] **Zhao, T. and Virvalo, T.**, 1993. Fuzzy control of a hydraulic position servo with unknown load, *IEEE 2nd. Int. Conf. Fuzzy Syst.*, San Francisco, CA, pp.785-788.
- [7] **Sepehri, N. D., G.A.M., Lawrence P.D. and Sassini, F.**, 1990. Cascade control of hydraulically-actuated manipulators, *Robotica*, Vol. 8, pp. 207-216.
- [8] **Jantzen J.**, 1998. Tuning of fuzzy pid controllers, *Technical University of Denmark, report 98-H 871*, September 30.
- [9] **Gross C. D. and Rattan S. K.**, 1997. Pneumatic cylinder trajectory tracking control using a feedforward multilayer neural network, *Proceedings of the IEEE Aerospace and Electronics Conference*.

- [10] **Tang S. K., Man F. K., Chen G. and Kwong S.,** 2001. An optimal fuzzy pid controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 4, August.
- [11] **Su X. Y., Zheng H. C., Mueller C. P. and Duan Y.B.,** 2006. A simple improved velocity estimation for low-speed regions based on position measurements only, *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 14, No, 5 September.
- [12] **Becan R. M., Kuzucu, A. ve Kutlu K.,** 1998. Hidrolik Konum Kontrol Sistemlerinin Gerçeğe Yakın Benzetimi, *Tr. J. of Engineering and Environmental Sciences*, Tübitak.
- [13] **Lewis F. L., Abdallah T. C. and Dawson M. D.,** 1993. Control of Robot Manipulators, Macmillan Publishing Company, New York.
- [14] **Bingül Z. ve Küçük S.,** 2005. Robot Tekniği 1, Birsen Yayınevi.
- [15] **Omatu S., Khalid M. and Yusof R.,** 1996. Neuro-Control and its Applications, Springer, London.
- [16] **Elmas Ç.,** 2003. Bulanık Manik Denetleyiciler, Seçkin, Ankara
- [17] **McCloy D. and Martin R. H.,** 1980. Control of Fluid Power: Analysis and Design, Ellis Horwood Limited.
- [18] **Critchlow J. A.,** 1985. Introduction to Robotics, Macmillan Publishing Company, New York.
- [19] **Hagan M., Howard B. D., Mark H. B.,** 1996. Neural Network Design, PWS Pub., Boston.
- [20] **Freeman, J.A. and Skapura, D.M.,** 1992. Neural Networks, Algorithms, Applications and Programming Techniques, Adisson-Wesley.
- [21] **Dayhoff, J.E.,** 1990. Neural Network, Architectures, An Introduction, Van Nostrand Reinhold.
- [22] **Alparslan K.,** 1991. Bir boya robotunun öğretim yoluyla kontrolü ve işletilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Aktaş Y. K., Günev İ., Kaban E., Özaydın M. ve Yıldız H.,** 2004 . BR1 boya robotunun mekanik olarak iyileştirilmesi ve kontrol uygulanması, *Lisans Tezi*, İstanbul.

- [24] **Arslan H.**, 1999. Yapay Sinir Ağları ile Robotlarda Hareket Kontrolü, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] **Becan R. M.**, 1995. Hidrolik sistemlerde konum ve hız kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] **Philips L.P. and Harbor D.R.**, 2000. Feedback Control Systems, Prentice Hall International Inc.
- [27] **Heidenhain Rotary Encoder Catalogue.**, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Caner Beykont 1981 yılında İstanbul’da doğdu. Orta öğrenimini 1999 yılında V.K.V. Koç Özel Lisesinde tamamladı. Daha sonra 2004 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünü tamamladı. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliğinde yüksek lisans eğitimine başladı. Okul hayatı boyunca özel dersler verdi ve çeşitli işlerde çalıştı.