

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ EKSENLİ ROBOT KOLUNUN  
GENETİK TABANLI BULANIK MANTIK  
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. Emre AYTAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**  
**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**  
**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Şinasi ARSLAN**

**Haziran 2007**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ EKSENLİ ROBOT KOLUNUN  
GENETİK TABANLI BULANIK MANTIK  
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. Emre AYTAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**

**Bu tez 11 / 06 / 2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

**Yrd.Doç.Dr.  
Şinasi ARSLAN  
Jüri Başkanı**

**Prof.Dr.  
Abdullah MİMAROĞLU  
Üye**

**Prof.Dr.  
Etem KÖKLÜKAYA  
Üye**

## ÖNSÖZ

Endüstride etkin şekilde var olan robotlar gitgide ilerleyen teknolojiyle beraber insanların yerlerini almaktadırlar. Bunun gerçekleşmesinde var olan en etkin faktör ise, insanların deneyimlerini ve edindiği tecrübelerini robot sistemlerine aktarabilir hale gelmesidir. Bu sistemlerin geliştirilen kontrol yöntemleriyle çok daha hızlı ve en az hata ile çalışır duruma getirilebilir olmaları bu alanda yapılan çalışmaların artmasına neden olmaktadır.

Çalışmalarım süresince kaynak ve bilgi yönünden her zaman destek olan ve beni yönlendiren danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Şinasi ARSLAN'a, benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, bilgisayar yazılımı konusunda yardımcı olan meslektaşım Mak.Müh. Hakan ERTUĞRUL'a teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
1.1. Robotların Temel Yapıları.....	1
1.1.1. Robotların güç kaynakları.....	2
1.1.2. Robot sensörleri.....	3
1.1.3. Robot eli.....	5
1.1.4. Robot hareketi ve hassasiyeti.....	6
1.2. Robotların Sınıflandırılması.....	7

## BÖLÜM 2.

ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ.....	12
2.1. Robot Kinematiği.....	12
2.1.1. İleri kinematik.....	12
2.1.1.1. Denavit-Hartenberg gösterimi.....	12
2.1.2. Ters kinematik.....	16
2.2. Robot Dinamiği.....	18
2.2.1. Lagrange-Euler formülasyonu.....	19
2.3. Robot Sistemine Ait Parametreler.....	24

2.4. Robot Kolumun Kontrol Edilmesi.....	25
<b>BÖLÜM 3.</b>	
<b>ROBOTLARDA PID KONTROL.....</b>	<b>27</b>
3.1. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları.....	31
3.1.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi.....	32
3.1.2. Verilen bir izin takibi.....	34
3.1.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi.....	36
3.1.4. Başlangıç noktasından verilen üç noktaya hareketi.....	38
3.1.5. Birbirine simetrik verilen dört noktaya hareketi.....	42
3.1.6. Dayanıklılık.....	50
<b>BÖLÜM 4.</b>	
<b>ROBOTLARDA BULANIK KONTROL.....</b>	<b>54</b>
4.1. Bulanık Mantık.....	54
4.2. Bulanık Kümeler.....	55
4.3. Bulanık Kümelerde İşlemler.....	57
4.4. Bulanık Kontrol Sistemlerinin Temel Yapısı.....	57
4.4.1. Bulanık kontrol sistemleri.....	57
4.4.1.1. Bulanıklaştırma arabirimi.....	59
4.4.1.2. Bilgi tabanı.....	59
4.4.1.3. Sonuç çıkarım mekanizması.....	61
4.4.1.4. Netleştirme arabirimi.....	62
4.5. Bulanık Kontrol Sistemi Tasarımında İzlenen Adımlar.....	67
4.6. Bulanık Mantık Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları.....	68
4.7. Mühendislik Bakış Açısıyla Bulanık Mantığın Sınırları.....	68
4.8. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları.....	68
4.8.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi.....	71
4.8.2. Verilen bir izin takibi.....	73
4.8.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi.....	76
4.8.4. Başlangıç noktasından verilen üç noktaya hareketi.....	79
4.8.5. Birbirine simetrik verilen dört noktaya hareketi.....	83
4.8.6. Dayanıklılık.....	92

## BÖLÜM 5.

### ROBOTLARDA GENETİK ALGORİTMA TABANLI BULANIK

MANTIK KONTROLÜ.....	96
5.1. Genetik Algoritma.....	96
5.1.1. Giriş.....	96
5.1.2. Genetik algoritma tekniği.....	97
5.1.3. Genetik algortmada kullanılan operatörler.....	98
5.1.3.1. Üreme .....	99
5.1.3.2. Çaprazlama.....	99
5.1.3.3. Mutasyon.....	99
5.1.3.4. En iyi bireyi bulma.....	100
5.1.4. Genetik algoritma parametreleri.....	100
5.1.4.1. Çaprazlama ve mutasyon olasılığı.....	100
5.1.4.2. Diğer parametreler.....	101
5.1.4.3. Seçim.....	101
5.2. Bulanık Mantık Kontrolörünün Genetik Algoritma ile En İyilenmesi.....	102
5.3. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları.....	106
5.3.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi.....	108
5.3.2. Verilen bir izin takibi.....	110
5.3.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi.....	113
5.3.4. Başlangıç noktasından verilen üç noktaya hareketi.....	117
5.3.5. Birbirine simetrik verilen dört noktaya hareketi.....	121
5.3.6. Dayanıklılık.....	130

## BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	134
---------------------------	-----

KAYNAKLAR.....	137
----------------	-----

ÖZGEÇMİŞ.....	140
---------------	-----

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

L-E	: Lagrange-Euler
N-E	: Newton-Euler
PD	: Oransal-Türevsel
PI	: Oransal-İntegral
DC	: Doğru Akım
FLC	: Bulanık Mantık Kontrolörü
GA	: Genetik Algoritma
AC	: Alternatif Akım
GAOT	: Genetik Algoritma Araç Kutusu

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Robot eklemlerinin sembolik gösterimi .....	8
Şekil 1.2. Kartezyen, silindirik ve altı eksenli robotlar .....	10
Şekil 2.1. Denavit- Hartenberg parametreleri.....	13
Şekil 2.2. İki serbestlik dereceli robot koluna ait parametreler .....	16
Şekil 2.3. İki serbestlik dereceli robot koluna ait parametreler .....	24
Şekil 2.4. Simülasyonda kullanılan robot kolu.....	25
Şekil 3.1. PID kontrolör.....	29
Şekil 3.2. PID kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı.....	31
Şekil 3.3. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	32
Şekil 3.4. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	32
Şekil 3.5. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	33
Şekil 3.6. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	33
Şekil 3.7. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	34
Şekil 3.8. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	34
Şekil 3.9. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	35
Şekil 3.10. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	35
Şekil 3.11. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	36



Şekil 3.12. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	36
Şekil 3.13. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	37
Şekil 3.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap	37
Şekil 3.15. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	38
Şekil 3.16. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	39
Şekil 3.17. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	40
Şekil 3.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap	41
Şekil 3.19. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	42
Şekil 3.20. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	42
Şekil 3.21. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	43
Şekil 3.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap	43
Şekil 3.23. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	44
Şekil 3.24. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	44
Şekil 3.25. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	45
Şekil 3.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	45
Şekil 3.27. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	46
Şekil 3.28. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	46
Şekil 3.29. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	47
Şekil 3.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	47

Şekil 3.31. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	48
Şekil 3.32. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	48
Şekil 3.33. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap.....	49
Şekil 3.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	49
Şekil 3.35. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	50
Şekil 3.36. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	51
Şekil 3.37. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	52
Şekil 4.1. Genç insanlar kümesi olan (B) kümesine ait değişik yaş gruplarının üyelik durumu.....	56
Şekil 4.2. Bulanık mantık kontrolörün temel yapısı.....	58
Şekil 4.3. Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan üyelik fonksiyonu.....	60
Şekil 4.4. Üyelik fonksiyonlarının maximum noktaları ile netleştirme işlemi.....	62
Şekil 4.5. Ağırlık merkez yöntemi ile netleştirme işlemi.....	63
Şekil 4.6. Ağırlıklı ortalama yöntemi ile netleştirme işlemi.....	64
Şekil 4.7. Maximum noktaların ortalaması yöntemi ile netleştirme işlemi.....	65
Şekil 4.8. Geniş alan merkezi metodu ile netleştirme işlemi.....	66
Şekil 4.9. İlk veya son yükselti metodu ile netleştirme işlemi.....	67
Şekil 4.10. Bulanık kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı.....	70
Şekil 4.11. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	71
Şekil 4.12. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	71
Şekil 4.13. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap.....	72

Şekil 4.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	72
Şekil 4.15. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	73
Şekil 4.16. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	74
Şekil 4.17. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	74
Şekil 4.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	75
Şekil 4.19. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	76
Şekil 4.20. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	77
Şekil 4.21. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	77
Şekil 4.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	78
Şekil 4.23. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	79
Şekil 4.24. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	80
Şekil 4.25. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	81
Şekil 4.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	82
Şekil 4.27. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	83
Şekil 4.28. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	83
Şekil 4.29. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	84
Şekil 4.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	85
Şekil 4.31. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	86

Şekil 4.32. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	86
Şekil 4.33. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	87
Şekil 4.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	87
Şekil 4.35. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	88
Şekil 4.36. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	88
Şekil 4.37. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	89
Şekil 4.38. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	89
Şekil 4.39. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	90
Şekil 4.40. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	90
Şekil 4.41. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	91
Şekil 4.42. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	91
Şekil 4.43. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	92
Şekil 4.44. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	93
Şekil 4.45. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	94
Şekil 5.1. Genetik algoritma akış şeması.....	103
Şekil 5.2. En iyi ve ortalama hata uygunluk değerleri .....	106
Şekil 5.3. Genetik tabanlı bulanık kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı .....	107
Şekil 5.4. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	108

Şekil 5.5. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	108
Şekil 5.6. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	109
Şekil 5.7. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	109
Şekil 5.8. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	110
Şekil 5.9. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	111
Şekil 5.10. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	111
Şekil 5.11. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	112
Şekil 5.12. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	113
Şekil 5.13. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	114
Şekil 5.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	115
Şekil 5.15. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	116
Şekil 5.16. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	117
Şekil 5.17. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	118
Şekil 5.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	119
Şekil 5.19. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	120
Şekil 5.20. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	121
Şekil 5.21. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	121
Şekil 5.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	122

Şekil 5.23. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	122
Şekil 5.24. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	123
Şekil 5.25. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	123
Şekil 5.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	124
Şekil 5.27. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	124
Şekil 5.28. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	125
Şekil 5.29. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	125
Şekil 5.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	126
Şekil 5.31. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	126
Şekil 5.32. $\theta_1$ açısının zamana karşı verdiği cevap .....	127
Şekil 5.33. $\theta_2$ açısının zamana karşı verdiği cevap.....	127
Şekil 5.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap .....	128
Şekil 5.35. Robotun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	129
Şekil 5.36. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	130
Şekil 5.37. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap .....	131
Şekil 5.38. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap.....	132

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Robot kollarına ait parametreler.....	24
Tablo 3.1.	Ziegler-Nichols parametrelerinin ayar tablosu.....	28
Tablo 3.2.	PID kontrolör başarıml sonuç tablosu.....	53
Tablo 4.1.	Bulanık kontrolörde kullanılan kural tablosu.....	61
Tablo 4.2.	Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu.....	70
Tablo 4.3.	Bulanık kontrolör başarıml sonuç tablosu.....	95
Tablo 5.1.	Kazanç değlerleri limit ve hassasiyetleri.....	104
Tablo 5.2.	Genetik tabanlı bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu.....	107
Tablo 5.3.	Genetik tabanlı bulanık kontrolör başarıml sonuç tablosu.....	133
Tablo 6.1.	Dayanıklılık simülasyonları başarıml tablosu.....	135

## **ÖZET**

Anahtar kelimeler: Bulanık Mantık, Genetik Algoritma, Dinamik Kontrol, Başarım Ölçütleri

Bu çalışmada, endüstride artan bir uygulama alanına sahip olan robot kollarına görevlerini yerine getirmeleri amacıyla çeşitli kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Bu noktadan hareketle bu çalışmada PID kontrol, bulanık mantık kontrol ve genetik algoritma ile en iyileme edilmiş bulanık mantıkla kontrol yöntemleri robot koluna uygulanmıştır. Böylece, belirtilen kontrol teknikleri başarım ölçütlerine göre karşılaştırılmaktadır.



# **FUZZY LOGIC CONTROL BASED ON GENETIC ALGORITHM OF A TWO AXES MANIPULATOR**

## **SUMMARY**

Key Words: Fuzzy Logic, Genetic Algorithm, Dynamic Control, Performance Criteria

Robotic manipulators which have an increasing usage in the industry, are applied to various control methods to perform their tasks. Through that point, in this work PID control, fuzzy logic control and optimized fuzzy logic control based on genetic algorithm control methods are simulated on the two-degree of freedom manipulator. So, all the mentioned control techniques are compared with each other according to some performance criteria.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Endüstriyel robot; parçaları, maddeleri yada özel işlem aletlerini, çeşitli programların hareketleri yönünde, istenen görev doğrultusunda hareket edebilen bir tasarımıdır. İlk eklemli kol 1950'lerde geliştirilmiştir. Özellikle endüstriyel otomasyon ve bilgisayar uygulamalarının üretim sistemlerinde genelde kullanılmasıyla bu alanda bir çok gelişme olmuştur. 1950'lerdeki eklemli kolun ilk gelişmesinden ve mikro işlemci teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak robotlar çeşitli tip, şekil ve ebatlarda kullanılmaya başlanmıştır. Robotlar geniş bir görev alanına sahiptir. Aslında robotlara olan gereksinim güçlü ekonomik performansın sağladığı rekabet ortamı ve her iş ortamına uyum sağlamasına bağlıdır. Bu iş ortamlarını kaynakçılık, boya işleri, herhangi bir maddeyi alıp bir yere koyma işleri olarak sayabiliriz.

Robot kelimesi "Rossum's Universal Robots" adlı Karel Lapek'in 1921'de yazmış olduğu fantezi oyunundan ortaya çıkmıştır. Lapek bu kelimeyi "Zorunlu İşçiler" anlamında kullanmıştır. The Robotics Industries Association (RIA), daha sonra Robotics Institute of America olarak bilinen kurum robotu şu şekilde tanımlar. Endüstriyel robot, parçaları, maddeleri, genel aletleri yada özel işlem aletlerini çeşitli programlama ile istenilen görev doğrultusunda hareket edebilen bir tasarımıdır.

İlk eklemli kol 1950'lerde geliştirilmiştir. Özellikle endüstriyel otomasyon ve bilgisayar uygulamalarının üretim sistemlerinde genel olarak kullanılmasıyla bu alanda birçok gelişmeler olmuştur [1].

### **1.1. Robotların Temel Yapıları**

Bir sanayi robotu, rijit mafsallardan ve çeşitli tiplerden oluşmakta olup aynı zamanda bilgisayar kontrollüdür. Genel anlamda, bir robotun fiziki yapısı, bir insan kolunu andırır. Mafsallar genellikle sabit yere bağlanır. Mafsal grubu, genel olarak bir robot

kolu olarak tanımlanır. Bilek kola bağlanır. Hareketleri kolaylaştırmak için bileğin sonuna bir el takılır. Robot terminolojisinde bu el “uç etken” diğer bir deyişle “end-effector” olarak tanımlanır. Son etkileyici elemanın tüm hareketi mafsallar, bağlantılar ve bileğin hareket serileri ile elde edilir.

Bir robotun ana parçaları ve temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

### **1.1.1. Robotların güç kaynakları**

Robotun en önemli elemanlarından biride robotun sahip olduğu tahrik sistemidir. Bu tahrik sistemi robotun hareketini sağlar. Robotun kullanacağı alana yada gerek duyduğu güce göre tahrik sistemleri 3 çeşittir. Bu sistemlere kısaca göz atarsak,

- i. Hidrolik sistem,
- ii. Elektrikli sistem,
- iii. Pnömatik sistem olmaktadır.

Hidrolik tahrik sistemi, robota büyük hız ve güç verir. Bu sistem mafsalların doğrusal ve dairesel hareket etmesini sağlayacak şekilde tasarlanır. Hidrolik sistemin temel dezavantajı fazla yer işgal etmesidir. Ayrıca, bu tip tahrik sisteminin sızıntı problemi vardır. Yüksek hız ve güç sağladığından dolayı bu sistem bir çok sanayi robotunda kullanılmaktadır. Sprey boyamadaki gibi elektrikli sistemlerin yangın çıkartma tehlikesi yüksek olan alanlarda hidrolik robotlar kullanılmaktadır.

Hidrolik sistemlerle karşılaştırıldığında, elektrikli sistemler, daha az hız ve güç sağlarlar. Bundan dolayı, elektrikli sistemler daha küçük robotlarda kullanılır. Fakat bu sistemler daha doğru ve daha iyi tekrarlayabilme kabiliyetine sahiptirler ve kullanımları da daha temizdir. Yaygın olarak sanayide bu tip robotlar kullanılır. Elektrik tahrik sistemli robotlar adım motorlular ve doğru akımlı servo motorlular olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. Adım motorlu robotların çoğu açık döngü tipindedir, fakat geri besleme döngüleri bu robotlarda ortaktır. Servo sistemli robotlar, sistem ile robot arasında sabit olan geri besleme döngülerine sahiptirler.

Pnömatik tahrik sistemleri, genellikle daha küçük robotlarda kullanılır. Bu robotlar daha az serbestlik derecelidirler ve malzemeleri bir yerden alıp başka bir yere nakletme işlemlerinde kullanılırlar. Bu işlemler genellikle basit ve kısa sürelidir. Pnömatik güç, doğrusal ve dairesel eklemler için kullanılır. Pnömatik robotlar, elektrikli veya hidrolik robotlardan daha ucuzdur. Fakat, çoğunlukla pnömatik robotlar mekanik olarak her bir eksen için sabit noktalı işlemler yaparlar. Bunlar sınırlı hareketler yapan sıra robotlardır. Bu robotların en büyük avantajı basit modüler yapıda olduklarından standart mevcut parçalar kullanılmasıdır. Bu da bir firma için maddi açıdan önemli ölçüde kazanç sağlar.

### 1.1.2. Robot sensörleri

Bir robotun çalışması, eklem ve bileklerindeki belirli hareketlerden meydana gelir. Bu hareketler elde edilirken, robotun çalışmasının belirli ve düzgün olması önemlidir. Tahrik sistemlerinin robot hareketlerinin düzenli olması için uygun araçlarla kontrol edilmesi gerekir. Kontrolleri sırasında, robotların çevrelerindeki karakteristik özelliklerine duyarlı olmalıdırlar. Bu karakteristikler, kontrol sistemlerinin manipülatör hareketlerinin verimli olmasını mümkün kılmak için geri besleme sağlar ve robotlara daha fazla esneklik verir. Görsel sensörler gibi sensörler , daha çok zeki robotlarda etkin şekilde kullanılmaktadır. Sensörler faydalarına göre birçok farklı yöntemlerle sınıflandırılabilir. Bu bölümde robotlarda kullanılan sensörleri ele alacağız.

- i. Pozisyon sensörleri
- ii. Alan sensörleri
- iii. Hız sensörleri
- iv. Yakınlık sensörleri

Pozisyon sensörleri, eklemlerinin pozisyonlarının kontrollerinde kullanılır. Pozisyon hakkındaki bilgi, eklem hareketlerinin doğruluğunun belirlenmesinde kullanılan kontrol sistemlerine geri beslenir. End-effector elemanının uygun pozisyonlarında eklem hareketlerinin sonuç vermesiyle yerine getirilmesi istenen iş başarıyla gerçekleştirilir.

Alan sensörleri, bir referans noktasından bir diğer nokta arasındaki mesafeyi ölçer. Alanın algılanması televizyon kameraları, sonar vericiler yada alıcılarla sağlanır. Alanın algılanmasındaki başlıca sorun, vericilerin pozisyonları itibariyle göremediği noktaları kaçırmasıdır. Bu gibi sorunların, daha çok sensör kullanılmasıyla önüne geçilir.

Hız sensörleri, hareket halindeki bir manipülatörün hızının ölçülmesinde kullanılır. Hız, manipülatörün dinamik çalışmasının önemli bir parçasıdır. Noktalar arasındaki hareketlerin hızlandırılmasındaki değişimler, manipülatörün dinamik durumunu verir. Hızlandırma değişiklikleriyle oluşan atalet kuvvetleri, hız değişimleriyle oluşan kuvvetleri ve kollarında genleşmeden dolayı oluşan kuvvetlerin neden olduğu yerçekimi ve kendi ağırlığı, manipülatörün dinamik çalışmasının hassas olarak kontrol edilmesini gerektirmektedir. DC (Doğru Akım) takometresi, hızın ölçülmesinde en yaygın olarak kullanılan araçlardan biridir. Aslında bir DC jeneratörü olan takometre, motorun açısal hızıyla orantılı bir çıkış voltajı sağlar. Bu bilgi hareketin uygun bir biçimde düzenlenmesi için kontrol ünitesine geri beslenir.

Yakınlık sensörleri, herhangi bir fiziki bağlantı olmaksızın belirli bir mesafe yada alandaki bir nesnenin algılanması için kullanılır. Bunlar, robotların kazaya neden olup hasar görmesini önler. Bu sensörler nesneden gelen sinyallere göre hareket ederler. Sinyaller, ışık yayan diyot vericisinden oluşur ve foto diyot alıcısında alınır. Aslında alan sensörleri, yakınlık sensörlerinin yerini alabilir.

Ayrıca algılama kabiliyetlerine göre daha birçok başka sensörlerde mevcuttur. Akustik sensörler gaz, sıvı veya katı ortamlardaki akustik dalgaları algılar ve çözümler. Dokunma sensörleri nesnelere arasındaki mesafeyi fiziksel temasla algılar. Kuvvet sensörleri, iki nesne arasındaki kuvvetlerin ve momentlerin bileşenlerini ölçer. Duyusal sensörler, görmeyle sağlanan temas halindeki parçaların konumlarından daha çok veri elde etmek için geliştirilmiştir.

Bir sensörün özellikleri, robotun esneklik, doğruluk ve tekrarlanabilirliklerini yansıtır. Önemli bir sensör teknolojisi olan makinenin görme kabiliyeti, günümüzde

önemli ölçüde ilerleme kaydetmiştir ve çeşitli robot uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Hatta bu teknoloji muayene sistemlerinde tatbik edilmekte ve böylece kaliteli tasarım, kontrol ve otomatik muayene elde edilebilmektedir. Ayrıca sensörler robot sistemlerinin ve işçilerin güvenlikleri içinde önem içermektedir.

### **1.1.3. Robot eli**

Genelde robot eli olarak bilinen uç tutucu, istenilen işlerin yapılması için robot bileklerine monte edilir. Uç tutucuların değişik tipleri, robotların daha esnek ve çok yönlü olması için tasarlanır. Uç tutucular kavrayıcılar ve aletler olmak üzere iki ana tipte sınıflandırılır.

Kavrayıcılar genellikle bir nesneyi kavrayıp ve tutup istenilen yere taşınmasında kullanılır. Kavrayıcılar mekanik kavrayıcılar, vakumlu kavrayıcılar, yapışkan kavrayıcılar, kancalılar, kepeceliler vb. olarak sınıflandırılır. Çift kavrayıcılar aynı anda iki nesneyi tutabilir ve bunlar birbirinden bağımsız olarak hareket ettirilebilmektedirler. Gerektiğinde daha fazla kavrayıcı kullanılabilir. Fakat bu pek yaygın değildir. Hatta kavrayıcılar, parçanın iç veya dış tarafından tutulmasına bağlı olarak, iç veya dış olarak sınıflandırılır.

Bir robotun bir iş parçası üzerinde bir işlem yapması için alet kullanması gerekebilir. Böyle durumlarda son etkileyici eleman çeşitli aletleri, kavrayıp tutabileceği bir kavrayıcı olarak kullanılabilir. Böylece robot çok takımlı olarak bir işi gerçekleştirebilir. Fakat, pek çok robot uygulamasında sadece tek takım olarak kullanılmaktadır. Bu takım doğrudan robotun bileğine monte edilir. Bu takım uç efektör gibi iş yapar. Nokta kaynağı takımları, ark kaynağı takımları, sprey boyama tabancaları, delme ve taşlama için dönen miller uç tutucu olarak kullanılan tipik örnek takımlardır.

#### 1.1.4. Robot hareketi ve hassasiyeti

Robot hareketlerinde hızlı cevap verme ve denge iki önemli karakteristiktir. Hız, robot kolunun bir noktadan diğer bir noktaya hareketinin çabukluğunu belirler. Denge, salınımın en küçük bir miktarı ile robot hareketini belirler. Mükemmel bir robot, yeterli hızda ve aynı zamanda dengeli olmalıdır. Hız ve denge sık sık çelişen hedeflerdir. Fakat robotlarda, iki parametre arasındaki uyumu sağlamak için iyi bir kontrol sistemi tasarlanabilmelidir. Robot hareketinin hassasiyeti üç temel özelliikle tanımlanır. Bunlar;

- i. Uzaysal çözüm,
- ii. Doğruluk,
- iii. Tekrarlanabilirlik.

Bir robotun uzaysal çözümü, iş hacminin bölünerek oluşan hareketinin en küçük artmasıdır. Bu sistemin kontrol çözümüne ve robotun mekanik kusurlarına bağlıdır. Bu kontrol çözümü, robotun pozisyon kontrol sistemi ve onun geri besleme ölçüm sistemi tarafından belirlenir. Kontrolörler, her bir eklem için hareketin toplam çalışma alanını bağımsız artışlarla böler. Kontrol hafızasının kapasitesi, toplam çalışma alanının artışlara bölünme kabiliyetini belirler. Belirli bir eksen için, ayrılmış artışların sayısı aşağıdaki formülle

$$\text{Artış sayısı} = 2^n$$

belirlenir. Burada “n” kontrol hafızasının bit sayısıdır.

Bu örnek, farklı eklemler için kontrol çözümünün nasıl hesaplanacağını göstermektedir. Robotun kontrol çözümünü elde etmek için vektörel olarak bileşenlerin çözümü yapılır. Fakat dairesel ve doğrusal gibi farklı tiplerdeki eklemler için robotların kontrol çözümü için karmaşık niceliklerinin hesaplanması gerekmektedir.

Yerçekimi ve diğer kuvvetlerden dolayı kollardaki elastik deformasyon mekanik hasarla sonuçlanır. Bu hasarlar robotlar büyüdükçe bileşende büyüdüğü için artar.

Hasarları oluşturan diğer faktörler kolun hareketi, robotun durumu ve hidrolik akışkanın sızmasından meydana gelmektedir. Uzaysal çözüm, kontrol ünitesinin kapasitesi ile geliştirilebilir.

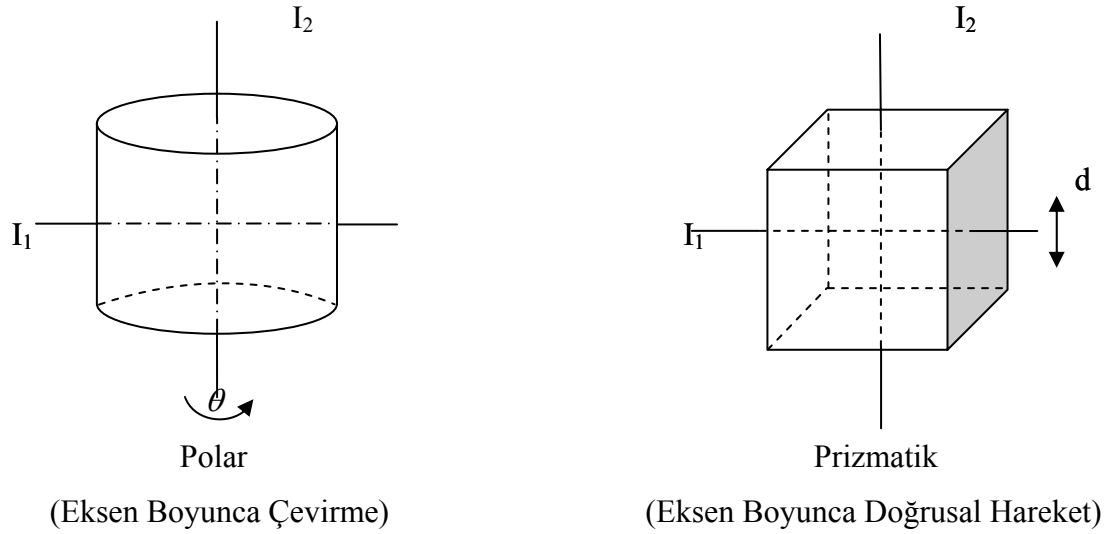
Doğruluk, bir robotun önceden tasarlanmış hedef noktasına ulaşabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Kontrol çözümü terimlerinde doğruluk, kontrol çözümünün yarısı olarak tanımlanır. Doğruluğun bu tanımı, hedef noktası iki kontrol noktasında olduğunda en kötü durumda uygulanır. Bu sonuç, ne programlanabilir nede ölçülebilir bir temel kontrol çözüm ünitesinden daha çok küçük yer değiştirmelerdir. Robotun doğruluğuna bir çok faktör etki eder. Örneğin kol, tamamen gerildiğinde mekanik hasarlar tamamen artar. Çünkü, yükler daha büyük momentlere sahip olduğundan daha büyük deformasyonlar açığa çıkar. Kol tabana yaklaştığında hasarlar minimuma düşer ve daha iyi bir doğruluğa yaklaşıldığı görülür. Robotlarda, sadece doğrusal değişkenli kollarda, ideal doğruluk uniform bir şekilde göz önünde bulundurulabilir. Fakat, dönerek ve doğrusal çalışan eklemlerden oluşan robotlar için belirli doğruluk ve bütün eklemlerin etkisini birleştirmek zordur.

Tekrarlanabilirlik, bir noktadaki robotun uç efektörünün pozisyona göre kabiliyeti olarak tanımlanır. Diğer bir değişle robotun aynı konuma defalarca dönmesindeki hassasiyetinin ölçülmesi tekrarlanabilirlik ile adlandırılır [1,2].

## **1.2. Robotların Sınıflandırılması**

Robotun her bir uzvu birbirlerine eklemlerle bağlanmıştır. Eklemlerle birleştirilen uzuvların sayısı; serbestlik derecesi hakkında bilgi edinilmesini sağlar. Eklemler prizmatik yada polar yapıya sahiptir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi bu yapıdaki eklemler için eklem açıları, uzvun uzunluğu ve ekleme etkiyen kuvvet önemlidir. Robot kolu, bu uzuvların bir araya gelmesiyle oluşur.





Şekil 1.1. Robot eklemlerinin sembolik gösterimi

Eklemler değişkeni polar eklemlerde  $\theta$  dönme açısı olurken prizmatik yapıda  $d$  mesafesidir. Robotik sistemin elemanları denildiğinde akla öncelikle mekaniksel kol gelmelidir.

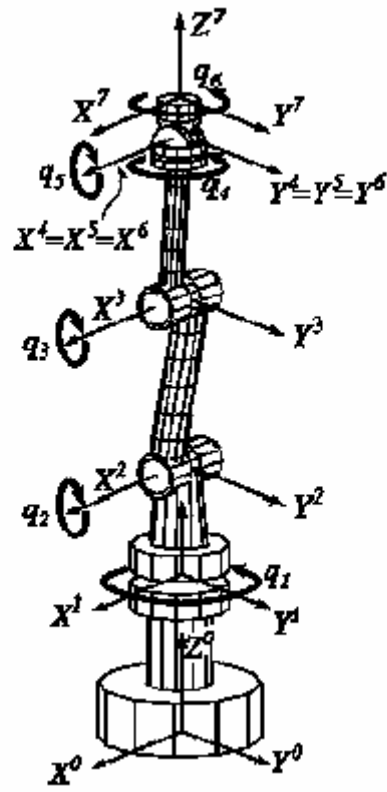
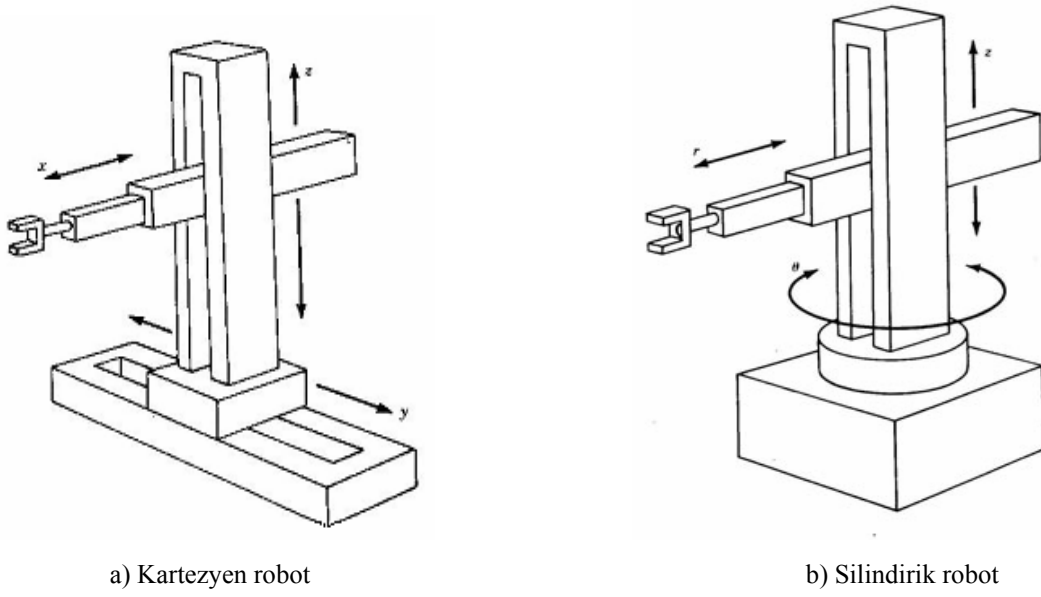
Robotlar aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

- Güç kaynaklarına göre; Elektriksel, hidrolik ve pnömatik sistemler ile çalışan robotlar vardır. Hidrolik robotlar; ağır yüklerin kaldırılmasında önemli fonksiyonlara sahiptir. Moment üretme kapasitesi ve sisteme verdiği yanıt oldukça iyidir. Elektriksel güç kaynağı ile gerçekleştirilen robotlar; AC (Alternatif Akım) yada DC (Doğru Akım) servo motorlar ile sürülebilir. Bu yöntem ucuz, temiz ve hızlı bir çözümdür. Pnömatik robotlar; diğerlerine göre daha sınırlı kullanıma sahip olduğu söylenebilir.

- Kontrol metotlarına göre; Servo ve servo olmayan robotlar şeklinde sınıflandırılabilir. İlk robotlar servo olmayan robotlardı ve açık döngüye sahipti. Çalışmaları önceden tanımlanmış mekaniksel hareketlerle sınırlıdır. Servo robotlar; kapalı döngü geri besleme özelliklerine sahiptir. Hareketleri bilgisayar tabanlı tekrar programlanabilir olmalıdır. Servo robotları kendi aralarında da sınıflandırmak mümkündür. Noktadan noktaya en basit türde olanıdır. Bu robotlarda; izleyeceği yola ait noktalar girdi olarak ifade edilir ancak uç nokta ile öğretilecek noktalar

arasında kontrol yapılmamaktadır. Noktadan noktaya giden robotlar istenen noktalar dışında yer alan ara noktalarda durmazlar. Sürekli yol izleyen robotlarda ise, her noktadaki konuma müdahale edilebilir. Robot kolu üç boyutlu uzayda tanımlanmaktadır. Ancak kontrolün hareketin değişken olmasından dolayı kolay bir şekilde yapılması mümkün değildir. Uygun bir kontrolör kullanıldığı takdirde belli bir yol boyunca her noktada durabilir.

– Uygulama alanlarına göre; Kartezyen, silindirik, küresel, Scara ve insan kolu benzeşimli biçimde sınıflandırma yapılabilir. Kartezyen robotta eksenler prizmatik yani eksen boyunca doğrusal hareket sergiler. 3SD (SD: Serbestlik Derecesi) özelliğine sahiptir. Literatürde PPP (Prismatic - Prismatic - Prismatic) biçimindeki notasyonla gösterilir. Silindirik robot ise RPP (Revolute - Prismatic - Prismatic) notasyonuna sahiptir. Yani silindirik robotta ikinci hareket eksen boyunca doğrusal yerine dönel biçimde tanımlanmıştır. Scara da aynı şekilde RPP (Revolute - Prismatic - Prismatic) yapısındadır. Ancak eksenlerin aldıkları açı bakımından farklılık gösterir. Bu robotta hareketin yatay bileşenini RR (Revolute – Revolute) yani birinci ve ikinci eksen tayin eder. Hareketin dikey bileşenini üçüncü eksen oluşturur. Böylece kolun yukarı aşağı hareketi prizmatik eksen tarafından yapılmıştır. Eksenler birbirine diktir. İnsan benzeşimli robotlarda genellikle 6 serbestlik dereceli yapıda olanları göze çarpar. Eklem açılarının ilk pozisyonu oldukça önemlidir. Omuz, kol, dirsek, ön kol, bilek, el gibi kavramlar oldukça yaygın biçimde kullanılan terimlerdir. Omuz dikey eksen boyunca öne arkaya doğru hareket eder. Kol yatay eksen boyunca; ön kol ise yukarı ve aşağı yatay dirsek eksenini boyunca hareketinde kullanılır. Uygulama alanlarına göre açıklanan bu robotlara ilişkin yapı Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Kartezyen, silindirik ve 6 eksenli robotlar

Daha sonraki bölümlerde robotun kinematik ve dinamik modellenmeleri ele alınarak kontrol yöntemleri üzerine durulacaktır. Robotun serbestlik derecesi arttıkça sistemin

özümü doğrusal olmadığı için kinematik denklemlerde ters modellenmenin yapılması oldukça zordur. Robotun dinamik özellikleri bilindiği takdirde robotun yeri kontrol edilebilir. Dinamik modellenme yapıldığında çok küçük kuvvetle bile robot kolu tepkide bulunabilir. Aşırı kuvvet uygulandığında robot kolu çatlayabilir yada osilasyon yapabilir. Robot imalatı yapılırken bu kriterler göz önüne alınır.

Edinilen bilgiler doğrultusunda bir robotta aranan önemli özellikler; robotun kapasitesi, hızı, eklem sayısı, doğruluğu, tekrarlanabilme yeteneği ve çalışma ortamı olarak sıralanabilir [1,2,6].

## **BÖLÜM 2. ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ**

Bu bölümde genel olarak, bir robot kolunun kinematik, ters kinematik dinamik denklemlerinin bulunması ve robot kollarının kontrol yöntemleri incelenecektir.

### **2.1. Robot Kinematığı**

Robot kinematığı ileri kinematik ve ters kinematik olarak yapılır.

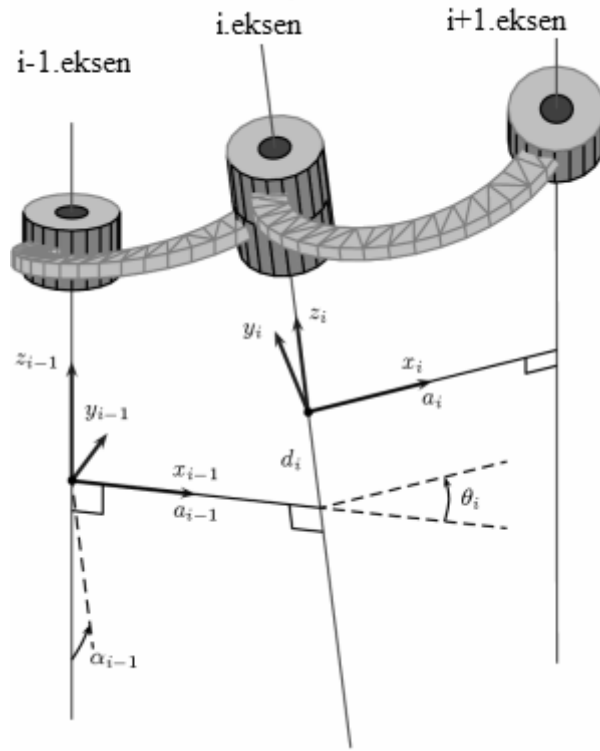
#### **2.1.1. İleri kinematik**

Robot kinematığı sabit bir referans koordinat sistemine göre robot kolunun hareketinin geometrisini harekete neden olan kuvvetleri göz önüne almadan analitik olarak incelenmesidir. Kinematik ile pozisyon, hız, ivme gibi değişkenler zamana bağlı olarak incelenebilir.

Bir robotun kinematik denklemlerini çıkarabilmek için koordinat sistemleri, vektörler ve matrisler hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Bunlardan başka kinematik denklemlerin çıkarılabilmesi için çıkarım yöntemleri bilinmelidir. Bu yöntemlerden en yaygını Denavit-Hartenberg (D-H) yöntemidir [1].

##### **2.1.1.1. Denavit-Hartenberg gösterimi**

Kinematik zincirde eklem sayısı arttıkça dönme ve ötelenmeden dolayı problemin çözümü güçleşir. Her bir eklem arasındaki bağı sistematik olarak matris metoduyla tanımlayarak geliştiren Denavit-Hartenberg olmuştur. Bu sayede kinematik çözüm karmaşası bir ölçüde ortadan kalkmıştır. Bağı konum ve yönlendirme 4x4 boyutundaki matris üzerine kuran Denavit-Hartenberg her uzvun konum ve yönlendirme bir önceki eksen takımı ile göstermiştir. Döner yada ötelenmeli bağı tanımlamak için Denavit-Hartenberg tarafından dört parametre saptanmıştır.



Şekil 2.1. Denavit-Hartenberg parametreleri

Bu parametreler,

$\theta_i$ :  $z_i$  ekseninde  $x_{i-1}$  ile  $x_i$  arasındaki açı,

$\alpha_{i-1}$ :  $x_{i-1}$  ekseninde  $z_{i-1}$  ile  $z_i$  arasındaki açı,

$d_i$ :  $z_i$  eksenini boyunca  $i$ . koordinat sistemi merkezinden  $x_{i-1}$  ve  $z_i$  eksenlerinin kesişme noktasına olan mesafesi,

$a_{i-1}$ :  $x_{i-1}$  eksenini boyunca  $x_{i-1}$  ile  $z_i$ 'nin kesişme noktasıyla  $i$ . eksenin orijini arasındaki mesafe şeklinde tanımlanmıştır.

Her bir eklem eksen takımı homojen dönüşüm matrisinin elde edilmesiyle kolayca bulunacaktır. Bu nedenle  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  eksenleri doğru yerleştirilmelidir.  $z_{i-1}$   $i$ . eklem hareket eksenine göre ve  $x_{i-1}$  ise  $z_i$ 'nin normali şeklinde yerleştirilmelidir.

Homojen dönüşüm matrisi şu şekilde elde edilir:

- i.  $x_{i-1}$  eksenine  $x_i$ 'in yönlerini aynı yapmak için  $z_i$   $\theta_i$  kadar döndürülür.
- ii.  $x_{i-1}$  ile  $x_i$ 'yi aynı hizaya getirmek için  $d_i$  kadar öteleme yapılmalıdır.
- iii. İki orijini bir araya getirmek ve  $x$  eksenlerinin örtüşmesi için  $a_{i-1}$  kadar öteleme yapılmalıdır.
- iv. İki eksen takımını çakıştırmak için  $x_{i-1}$  etrafında  $\alpha_{i-1}$  kadar döndürülür.

Homojen dönüşüm matrisi  $A_i$  için

$$A_i = T_{z,d} \cdot T_{z,\theta} \cdot T_{x,a} \cdot T_{x,\alpha} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1 ifade edilir.

$T_{z,d} \cdot T_{z,\theta}$  :  $z$  eksenini etrafında gerçekleştiğini gösterir,

$T_{x,a} \cdot T_{x,\alpha}$  :  $x$  eksenini etrafında gerçekleştiğini gösterir.

$\theta$  ve  $\alpha$  dönme matrislerini;  $d$  ve  $a$  ise öteleme matrislerini belirtir.

$$A_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Kısaca eşitlik (2.4)'deki gibi gösterilebilir.

Burada  $C_{\theta_i} = \cos \theta_i$ ,  $S_{\theta_i} = \sin \theta_i$  olarak yeniden düzenlenirse

$$A_i = \begin{bmatrix} C_{\theta_i} & -S_{\theta_i} C_{\alpha_i} & S_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i C_{\theta_i} \\ S_{\theta_i} & C_{\theta_i} C_{\alpha_i} & -C_{\theta_i} S_{\alpha_i} & a_i S_{\theta_i} \\ 0 & S_{\alpha_i} & C_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.5)'te belirtilmiş olan homojen matrisinde n, s, a, p tanımlandığında;

$$M = \begin{bmatrix} \text{Dönme Matrisi} & \text{Konum Vektörü} \\ \text{İzdüşüm} & \text{Ölçek} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & s & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

M matrisi şeklinde gösterilecektir.

$$n : \text{Elin normal vektörü,} \quad (2.6)$$

$$s : \text{Elin kayma vektörü,} \quad (2.7)$$

$$a : \text{Elin yaklaşım vektörü,} \quad (2.8)$$

$$p : \text{Elin konum vektörüdür.} \quad (2.9)$$

Robotik uygulamalarında izdüşüm 0 (sıfır); ölçeklendirme 1'dir. Eklem sayısı arttıkça robotun serbestlik derecesi değişecektir. Homojen dönüşüm matrisini genel olarak eşitlik (2.10)'daki gibi yazılabilir.

$$A_{i-1}^i = T_{z,d} \cdot T_{z,\theta} \cdot T_{x,a} \cdot T_{x,\alpha} \quad (2.10)$$



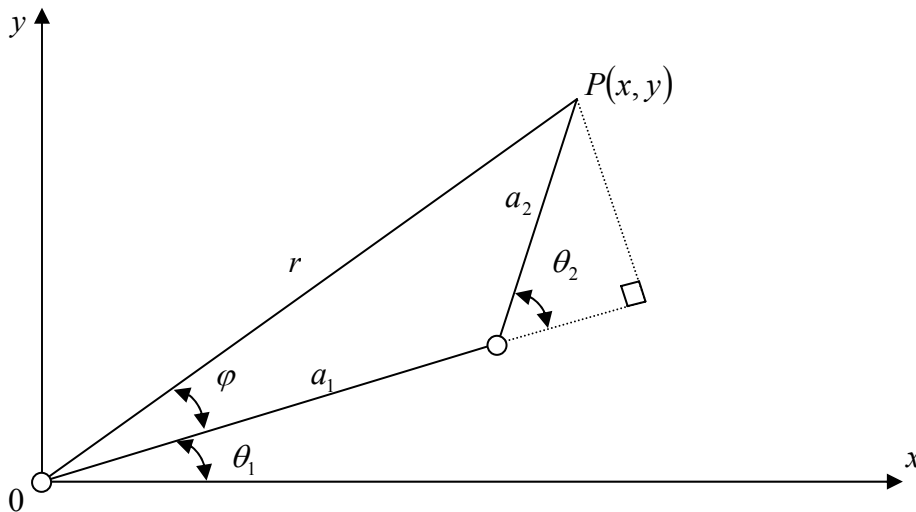
Robotun serbestlik derecesi değıştikçe çarpım elemanlarında değışecektir. Örneğın dört serbestlik dereceli robot için;

$$T_0^4 = A_0^1 \cdot A_1^2 \cdot A_2^3 \cdot A_3^4 = \prod_{j=1}^4 A_{j-1}^j \quad (2.11)$$

olmalıdır. Her eklem arasındaki  $a, d, \theta, \alpha$  bilindiğinde; düz kinematik çözümü yapılabilir. Tezde kullanılan robot kolu modelinde sisteme verilen işler için robota ait her bir kolun alması gereken açı değerlerinin hesaplanmasında ters kinematik çözüm kullanılmıştır.

### 2.1.2. Ters kinematik

Ters kinematik, robot kolunun verilen pozisyonuna göre her bir kolunun açılarının bulunmasıdır. Ters kinematik genel olarak ileri kinematiğe göre daha zordur. Bazı durumlarda analitik bir çözüm bulunamamaktadır. Bu tip durumlarda iteratif çözümler gerekmektedir. Analitik çözümler içinde birden fazla çözüm ortaya çıkabilir. Böyle bir durumda en uygun çözüm seçilmelidir. Çünkü bazı çözümlerde ortaya çıkabilecek sonuçlar çalışma uzayının dışında kalabilir.



Şekil 2.2. İki serbestlik dereceli robot koluna ait parametreler

İki serbestlik dereceli olan bir robot kolunun ters kinematik denklemleri Şekil 2.2'deki parametrelere göre düzenlenirse

Manipülátöre ait  $P(x, y)$  noktası için  $x$  ve  $y$  uzunlukları

$$x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.12)$$

$$y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.13)$$

Manipülátöre ait  $P(x, y)$  noktasının  $P(x_0, y_0)$ 'a olan mesafesi  $r$  olarak alınırsa

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (2.14)$$

elde edilir.

Elde edilen Denklem 2.14 düzenlenirse

$$r^2 = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1a_2 \cos(\pi - \theta_2) \quad (2.15)$$

$$r^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos \theta_2 \quad (2.16)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1a_2} \equiv C \quad (2.17)$$

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta_2} = \pm \sqrt{1 - C^2} \equiv D \quad (2.18)$$

olarak düzenlenirse

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{D}{C} \text{ ifadesinden yola çıkılarak} \quad (2.19)$$

Denklem 2.20 elde edilir.

$$\theta_2 = \pm 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{(a_1 + a_2)^2 - (x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2) - (a_1 - a_2)^2}} \quad (2.20)$$

$$\tan \varphi = \frac{a_2 \sin \theta_2}{a_1 + a_2 \cos \theta_2} \quad (2.21)$$

$$\tan(\varphi + \theta_1) = \frac{y}{x} \quad (2.22)$$

Denklem 2.21 ve 2.22'de four-quadrant fonksiyonu  $\tan^{-1}(b/c) \Rightarrow a \tan 2(b,c)$  uygulanıp yeniden düzenlenirse,

$$\theta_1 = a \tan 2(y,x) - a \tan 2(a_2 \sin \theta_2, a_1 + a_2 \cos \theta_2) \quad (2.23)$$

olarak elde edilir. Burada bulunan denklemler simülasyonda etkin bir şekilde kullanılacaktır [1,2,4,5].

## 2.2. Robot Dinamiği

Robot kol dinamiği, robot kol hareket denklemlerinin matematiksel formülasyonudur. Robot kolunun hareketi önceden tanımlanmışsa, gerekli torkları bulmak için yapılan hesaplama ters dinamik hesaplama denir. Eğer torklar önceden tanımlanmışsa, herhangi bir t zamanı için oluşacak hareketi bulmak için yapılan hesaplama ileri dinamik hesaplama denir. Kolu simüle etmek için ileri dinamik hesaplama kullanılır. İleri dinamik denklemlerde giriş uygulanan tork iken eklem hareketi de çıkış olacaktır.

Robota ait dinamik denklemlerinin elde edilebilmesi için literatürde bilinen birçok yöntem vardır. Dinamik denklemlerin elde edilmesinde faydalanılan yöntemlerden olan Lagrange-Euler ve Newton-Euler formülasyonları literatürde robot kollarının modellenmesinde en çok kullanılanları olmuştur. Lagrange-Euler formülasyonun da sistemin dinamik davranışı, genelleştirilmiş koordinatlar içerisinde kullanan iş ve enerji ifadelerinden elde edilir ve formülasyonun çıkarımı aşağıda gösterildiği gibidir.

### 2.2.1. Lagrange-Euler formülasyonu

Şekil 2.2 dikkate alınarak her bir kol için kinetik enerji, potansiyel enerjileri ve sürtünme için gerekli olan ifadeleri yazarsak;

Robot kolunun uç noktası için ifade,

$$x = a_1 \cos \theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.24)$$

$$y = a_1 \sin \theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.25)$$

Birinci kol ve ikinci kol için ağırlık merkezi hız ifadeleri,

$$\dot{x}_1 = \frac{a_1}{2} \cos \theta_1 \quad (2.26)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{a_1}{2} \sin \theta_1 \quad (2.27)$$

$$\dot{x}_2 = a_1 \cos \theta_1 + \frac{a_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.28)$$

$$\dot{y}_2 = a_1 \sin \theta_1 + \frac{a_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.29)$$

Birinci ve ikinci kol için hız ifadeleri,

$$V_1^2 = \dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2 \quad \text{için} \quad (2.30)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{a_1}{2} \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 \quad (2.31)$$

$$\dot{x}_1^2 = \frac{a_1^2}{4} \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.32)$$

$$\dot{y}_1 = \frac{a_1}{2} \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 \quad (2.33)$$

$$\dot{y}_1^2 = \frac{a_1^2}{4} \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.34)$$

Birinci kol için hız ifadesi

$$V_1^2 = \frac{a_1^2}{4} \dot{\theta}_1^2 \quad (2.35)$$

elde edilir.

$$V_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \quad (2.36)$$

$$\dot{x}_2 = -a_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1 - \frac{a_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2^2 &= a_1^2 \sin^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{a_2^2}{4} \sin^2(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ &\quad + a_1 a_2 \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\dot{y}_2 = a_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1 + \frac{a_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2^2 &= a_1^2 \cos^2 \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{a_2^2}{4} \cos^2(\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ &\quad + a_1 a_2 \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned} V_2^2 &= a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{a_2^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ &\quad + a_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) (\sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \end{aligned} \quad (2.41)$$

İkinci kola ait hız ifadesi

$$V_2^2 = a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{a_2^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + a_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.42)$$

elde edilir.

Robot koluna ait enerji ve Lagrange-Euler ifadesi

$$K = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} m_2 V_2^2 \quad (2.43)$$

$$D = \frac{1}{2} b_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} b_2 \dot{\theta}_2^2 \quad (2.44)$$

$$P = m_1 g \frac{a_1}{2} \sin \theta_1 + m_2 g a_1 \sin \theta_1 + m_2 g \frac{a_2}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.45)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial P}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2 \quad (2.46)$$

Denklem 2.46 düzenlenirse birinci kol için:

$$K = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} m_1 \frac{a_1^2}{4} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 a_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{m_2 a_2^2}{2} \frac{a_2^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \theta_1} = -\frac{m_2}{2} a_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1} &= I_1 \dot{\theta}_1 + I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_1 \frac{a_1^2}{4} \dot{\theta}_1 + m_2 a_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 \frac{a_2^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \\ &+ m_2 a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= I_1 \ddot{\theta}_1 + I_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_1 \frac{a_1^2}{4} \ddot{\theta}_1 + m_2 a_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 \frac{a_2^2}{4} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ &- m_2 a_1 a_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + \ddot{\theta}_1 m_2 a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ &- \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + \ddot{\theta}_2 \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} = b_1 \dot{\theta}_1 \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_1} = \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) g a_1 \cos \theta_1 + m_2 g a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.52)$$

Çıkarımlar düzenlenirse birinci kola ait tork ifadesi

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \left[ I_1 + I_2 + m_1 \frac{a_1^2}{4} + m_2 a_1^2 + m_2 \frac{a_2^2}{4} + m_2 a_1 a_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] \ddot{\theta}_1 \\ &\left[ I_2 + m_2 \frac{a_2^2}{4} + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[ \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 \\ &+ b_1 \dot{\theta}_1 + \left[ m_2 \frac{a_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) + \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) \frac{a_1}{2} \cos \theta_1 \right] g \end{aligned} \quad (2.53)$$

elde edilir.

Denklem 2.46 düzenlenirse ikinci kol için:

$$\frac{\partial K}{\partial \theta_2} = -\frac{m_2}{2} a_1 a_2 \dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.54)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_2} = I_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 \frac{a_2^2}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= I_2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 \frac{a_2^2}{4} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 a_1 a_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 \frac{a_2^2}{4} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \\ &\quad + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \left[ \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1 - \theta_2) - \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1 - \theta_2) (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \right] \end{aligned} \quad (2.56)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_2} = b_2 \dot{\theta}_2 \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_2} = m_2 g \frac{a_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.58)$$

Çıkarımlar düzenlenirse ikinci kola ait tork ifadesi

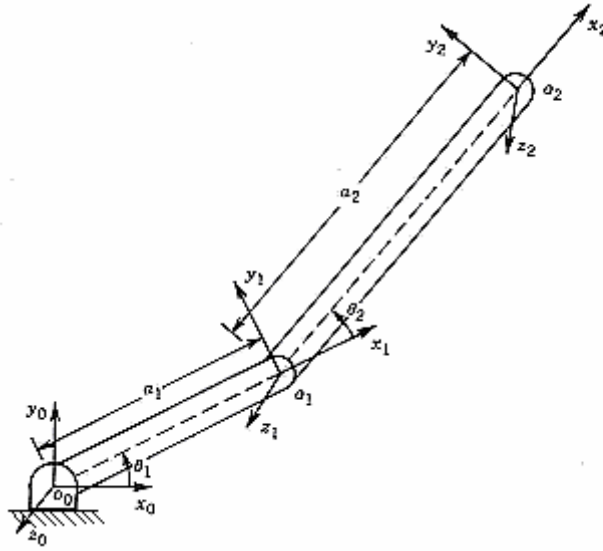
$$\begin{aligned} \tau_2 &= \left[ I_2 + m_2 \frac{a_2^2}{4} + \frac{m_2}{2} a_1 a_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \right] \ddot{\theta}_1 + \left[ I_2 + m_2 \frac{a_2^2}{4} \right] \ddot{\theta}_2 \\ &\quad + \left[ m_2 a_1 a_2 \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + b_1 \dot{\theta}_1 + \left[ m_2 \frac{a_2}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \right] g \end{aligned} \quad (2.59)$$

elde edilir.



### 2.3. Robot Sistemine Ait Parametreler

Simülasyonlarda kullanılan robot kolu Şekil 2.3’de gösterildiği gibi iki serbestlik dereceli bir manipülör olup parametrelerinin değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir. Simülasyonlar kullanılan robotun dinamik denklemleri çıkarılmış olup MATLAB programına uygun olarak matris formunda sisteme girilmiştir. Robot sistemi için girişler tork iken, çıkışlarda kollara ait açı değerleri olmaktadır.

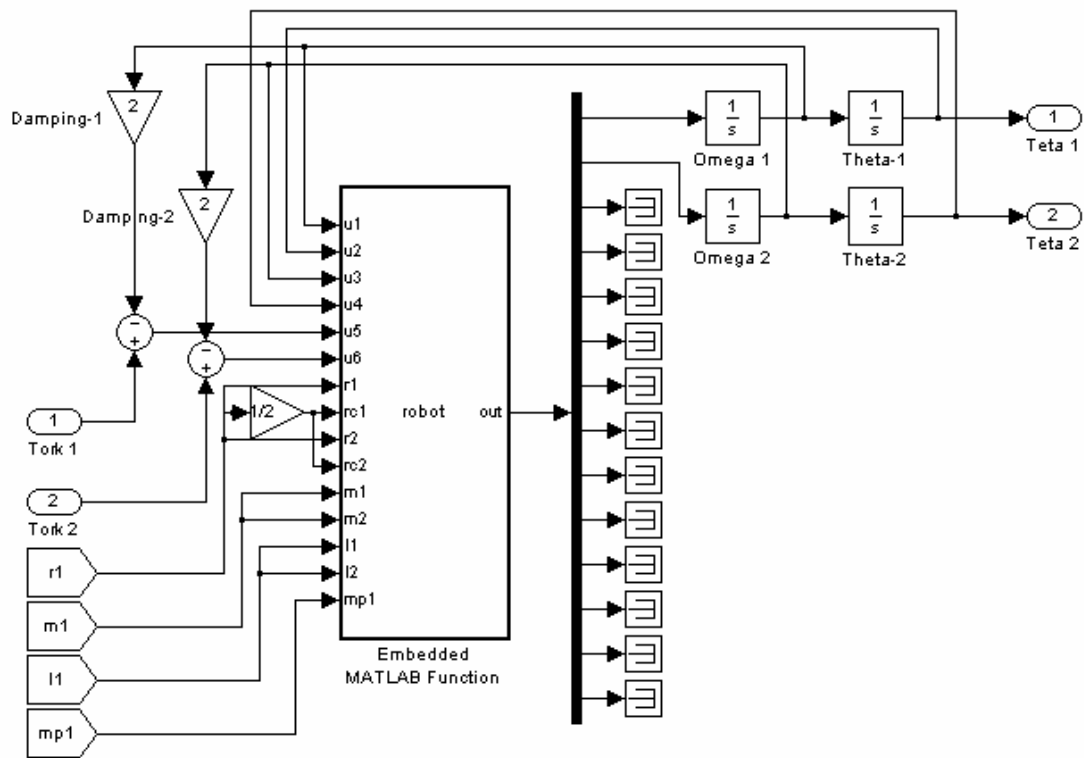


Şekil 2.3. İki serbestlik dereceli robot koluna ait parametreler

Simülasyonda kullanılan robot kolunun modeli Şekil 2.4’te gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Robot kollarına ait parametreler

Parametreler	Parametre Değerleri			
	$r_i$ [m]	$r_{ci}$ [m]	$I_i$ [kgm <sup>2</sup> ]	$m_i$ [kg]
Birinci kol $r_1, r_{c1}, I_1, m_1$	0.5	0.25	25	50
İkinci kol $r_2, r_{c2}, I_2, m_2$	0.5	0.25	25	50



Şekil 2.4. Simülasyonda kullanılan robot kolu

## 2.4. Robot Kolunun Kontrol Edilmesi

Öncelikle nominal bir yörünge tanımlanıp, planlı yörüngeyi takip etmek için eklem hareketlendirici bir mekanizmaya uygulanması gereken komutlar genel anlamda robot kontrol problemi olarak adlandırılır. Robot kolunun kontrolünde klasik yöntemlerin yanı sıra geliştirilen yeni yöntemlerle de doğru sonuca ulaşılabilmektedir. İstenen işin gerçekleşmesi ve planlanmış yörünge izlenmesi robot kontrolünde en önemli unsurdur. Robotun verimli bir şekilde çalışabilmesi ve istenen sonuçlara en az hata ile ulaşılabilmesi için doğru örneklemenin ve yönlendirmenin yapılmış olması gerekmektedir.

Klasik kontrol yöntemleri olarak bahsedilen kontrolörler günümüzde de en çok kullanılan PD ve PID kontrolörler olmaktadır. Bir çok endüstriyel robotta bilinen klasik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kontrolörlerin olumlu ve olumsuz yönleri bulunmaktadır. Örneğin; klasik bir PID kontrolörde düşük hızlarda ilerleme yapılabilir ve sabit girişe karşılık sıfır hatalı çıkış elde edilebilir. Buna karşın yüksek

hızda izleme yapamaz ve değişken sistem parametrelerinin etkisi hesaba katılamaz. Bu nedenle doğrusal olmayan sistemler için uygun ve arzu edilen sonuçlar elde edilemeyebilir [8].

Yapılan araştırmalar sonucu bazı matematiksel modeller çıkarılmış, bu modeller üzerinde çalışmalar sürdürülmüş ve klasik kontrol yöntemlerine alternatif kontrol yöntemleri ortaya çıkarılmıştır. Bilim adamlarının araştırmaları sonucunda bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar yöntemi ve bu gibi alanlarda yapılan çalışmalar sonucu matematiksel modelinin çıkarımı zor olan sistemlerin kontrolünü mümkün kılmıştır. Bulanık mantık ve yapay sinir ağları gibi öne sürülen kontrol yöntemlerinin birlikte kullanılarak neuro-fuzzy yöntemiyle de istenen sonuçlara ulaşmak mümkündür [7].

Robot kolu kontrolörlerinin performanslarının ölçülmesinde önemli olan kriterler istenen yörünge cevap olan izleme duyarlılığı, cevap hızı, bozucu dış yükler, kullanılan matematiksel algoritma ve modelleme hatası olarak söylenebilir. Bu çalışmada da bulanık mantık kontrolörün genetik algoritmalar yöntemi ile beraber kullanarak verilen parametreler için sistemin verdiği cevaplar göz önüne alınarak ne derece etkili olduğu irdelenecek ve klasik kontrolör olan PID ile de karşılaştırmaları yapılacaktır.

### BÖLÜM 3. ROBOTLARDA PID KONTROL

Oransal, integral ve türevsel ifadelerinin İngilizce karşılıklarının baş harflerinin yer almasıyla PID adı verilen kontrol metodu, klasik kontrol yöntemlerinden biri olup kontrol parametrelerinin belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda sistemin matematik modeline ihtiyaç duyar. Kontrolü güç ve karmaşık sistemlerde oransal kontrol veya oransal+türevsel, oransal+integral kontrolü yeterli olmadığı proseslerde oransal+integral+türevsel kontrol tercih edilmelidir. Kısaca bu kontrolü tanımlayacak olursak; oransal kontrolde oluşan offset oransal+integral kontrolle giderilebilir. Ancak, meydana gelen aşımalar bu kontrole türevsel etkinin de eklenmesi ile minimum seviye indirilir veya tamamen kaldırılır.

Bu sonuçlar bizi, PI ve PD kontrolörlerinin iyi yönlerinden yararlanmayı sağlayan, PID kontrolörünü kullanmaya yöneltmektedir. PID kontrolörünün tasarımı için aşağıdaki basamaklar izlenebilir.

- i. PID kontrolörü seri bağlı bir PI ve PD kısımlardan oluşur. PID kontrolörünün transfer fonksiyonu;

$$G_s(s) = K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} = (1 + K_{D1} s) \left( K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \right) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. PID kontrolöründe sadece üç parametreye ihtiyaç duyulduğundan PD kısmının oranı katsayısı birim alınır. PID kontrolörünün transfer fonksiyonunun iki tarafı eşitlenirse;

$$K_p = K_{p2} \quad (3.2)$$

$$K_D = K_{D1} K_{p2} \quad (3.3)$$

$$K_I = K_{I2} + K_{D1} K_{I2} \quad (3.4)$$

elde edilir.

- ii. Sadece PD kısmının etkin olduğunu varsayalım.  $K_{D1}$  değerini görelî kararlılığın bir kısmı yerine gelecek şekilde seçilir. Zaman tanım bölgesindeki bu görelî kararlılık en büyük aşım ve frekans tanım bölgesinde faz payı ile değerlendirilir.
- iii.  $K_{I2}$  ve  $K_{p2}$  parametreleri tüm görelî kararlılık koşulları sağlanacak şekilde seçilir.

Eş değer bir yöntem olarak önce kontrolörün PI kısmı görelî kararlılık koşullarından bir kısmı ve arkasından PD kısmı geri kalan koşullar sağlanacak şekilde tasarlanabilir.

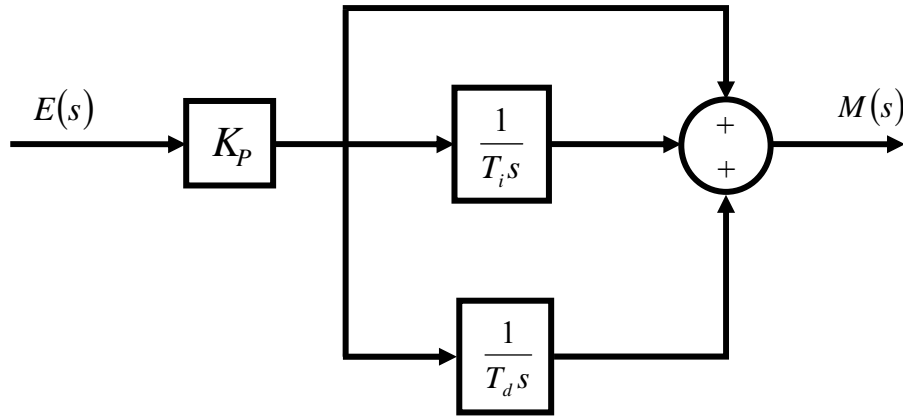
1942’de Ziegler-Nichols adlı iki araştırmacının geliştirdiği, verilen bir sistemin geçici cevap karakteristiğine dayanan oransal kazancı  $K_p$ , integral zamanını  $T_i$  ve türevsel zamanını  $T_d$  belirlemek için ortaya koydukları Ziegler-Nichols ayar metodu diğer araştırmacılar için öncü olmuş ve daha sonra Astrom-Hagglund kazanç-faz sınırı ayar metodu geliştirilmiştir. Bu ayar metotları, genellikle Nyquist eğrisinin kritik noktasından hesaplanan kritik kazanç ( $K_c$ ) ve kritik frekans  $\omega_c$  kavramlarına dayanmaktadır [3]. Tablo 3.1’de Ziegler-Nichols adlı araştırmacıların PID kontrolör parametrelerinin yakınsanmasında kullandıkları ayar tablosu belirtilmiştir.

Tablo 3.1. Ziegler-Nichols parametrelerinin ayar tablosu

Kontrolör	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P Kontrol	$K_u/2$	–	–
PI Kontrol	$K_u/2.2$	$P_u/1.2$	–
PID Kontrol	$K_u/1.7$	$P_u/2$	$P_u/8$

Bu yüzden sistemin Nyquist eğrisindeki kritik noktayı belirlemek için kontrol döngüsüne bir röle kontrolörü sokulduğunda, kontrolörler otomatik olarak ayarlamak mümkün olmaktadır. Bazı durumlarda bu ayar metotları, kapalı döngü sistemlerine tatmin edici cevap veremeyebilmektedir. Dolayısıyla, sistemin dinamik performansını geliştirmek için doğrusal olmayan PID algoritmaları bulunmaktadır.

PID kontrolör şekilde de gösterildiği üzere, P-Proportional (Oransal), I-Integral (İntegral) ve D-Derivative (Türev) olmak üzere üç temel etkinin birleşiminden meydana gelmektedir.



Şekil 3.1. PID kontrolör

PID kontrolör çıkışı;

$$M(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{K_p} \int_0^t e(t) dt + \frac{K_d}{K_p} \frac{de}{dt} \quad (3.5)$$

veya

$$M(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Buradan transfer fonksiyonu,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (3.7)$$

olarak elde edilir.

PID kontrolör; üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini tek bir kontrolör birim içerisinde birleştiren bir kontrol yöntemidir. İntegral etkisi, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken; türev etkisi de, yalnızca PI kontrolör kullanılması durumuna göre sistemin aynı göreceli kararlılığı için cevap hızını arttırır. Böylece PID kontrolörü sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap elde edilmesini sağlar.

PID kontrolörde  $K_p$ ,  $T_i$  ve  $T_d$  parametrelerinin dengeli bir şekilde ayarlanmasıyla uygun bir kontrolör elde edilebilir. Eğer bu katsayılar dengeli bir şekilde ayarlanmazsa, PID kontrolörün sağlayacağı üstün özelliklerden yararlanılamaz [3,8].

PID tipi denetleyiciler denetlenen proses kararlı bir durumdayken işini iyi yaparken aşağıdaki durumlarda işin üstesinden gelemeyizler:

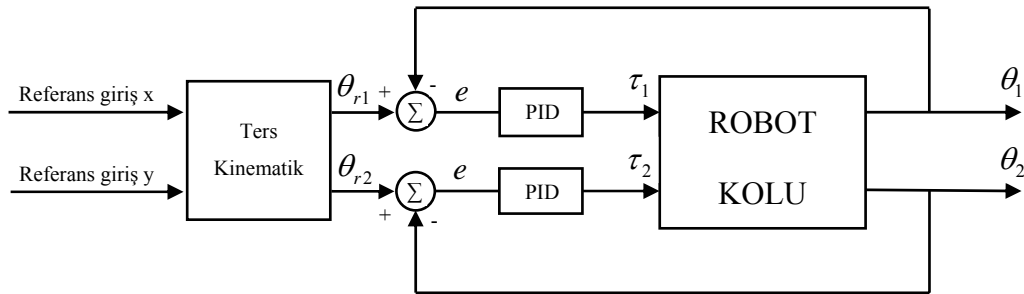
- Güçlü dış etkinin olduğu durumlarda (doğrusal olmayan durum),
- Süreçte zamana göre değişen parametreler varsa,
- Ölü zamanların bulunması.

Bunun sebebi PID denetleyicinin prosesin her durumda kesin bir doğrusallık özelliği göstereceğini varsaymasıdır. Bu kabul kararlı durumlarda geçerli olurken, güçlü bozucu faktörler prosesin işlem noktasını orijinininden saptırabilir. İşte bu anda doğrusal kabul daha fazla geçerliliğini koruyamamaktadır. Aynı olay prosesin parametrelerinin zamanla değişmesiyle de gerçekleşir. Bu gibi durumlarda PID kontrolörlerin bulanık kontrolörlerle yer değiştirmesinin kullanıcıya kolaylık sağlaması ve kontrol sisteminin doğrusal olmayan durumunda daha iyi sonuçlar elde edebildiği yapılan deneyler yoluyla gösterilmiştir.

### 3.1. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları

Tasarlanmış olan kontrol sistemi ve kontrolöre ait PID değişkenlerinin üzerinde uygulanabilmesi, gerekli değerlendirmelerin yapılabilmesi için bir robot sistemi tasarlanmıştır. Mevcut olan parametrelerin girilmesi sonucunda istenen durumlar için robot sisteminin vermiş olduğu cevaplar alınmış ve de simülasyon sonucu olarak elde edilen veriler açı  $\theta$ , kalıcı durum hata farkı  $e_{ss}$ , cevap verme zamanı  $t_r$ , oturma zamanı  $t_s$  ve aşım miktarı  $M_p$  Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Robot kolunun simülasyonunda kullanılan birinci kola ait  $K_p = 5000$ ,  $K_I = 8000$  ve  $K_D = 1000$ ; ikinci kola ait  $K_p = 1000$ ,  $K_I = 1150$  ve  $K_D = 250$  parametreleri Ziegler-Nichols metoduyla yakınsanıp deneme yanılma yoluyla elde edilmiştir. Simülasyon çalışmasında kullanılan sisteme ait blok diyagramı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



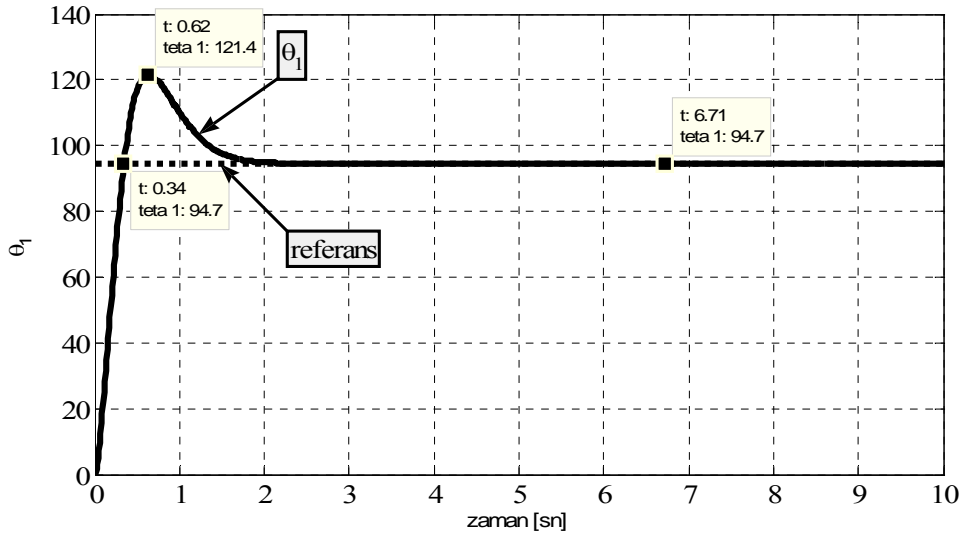
Şekil 3.2. PID kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı



### 3.1.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi

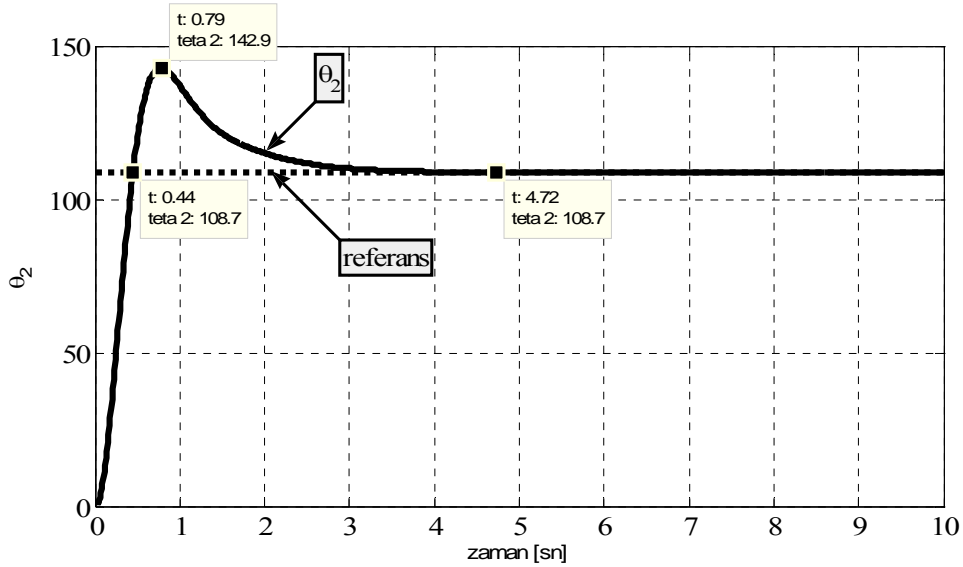
PID kontrolöre sahip robot kolu

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



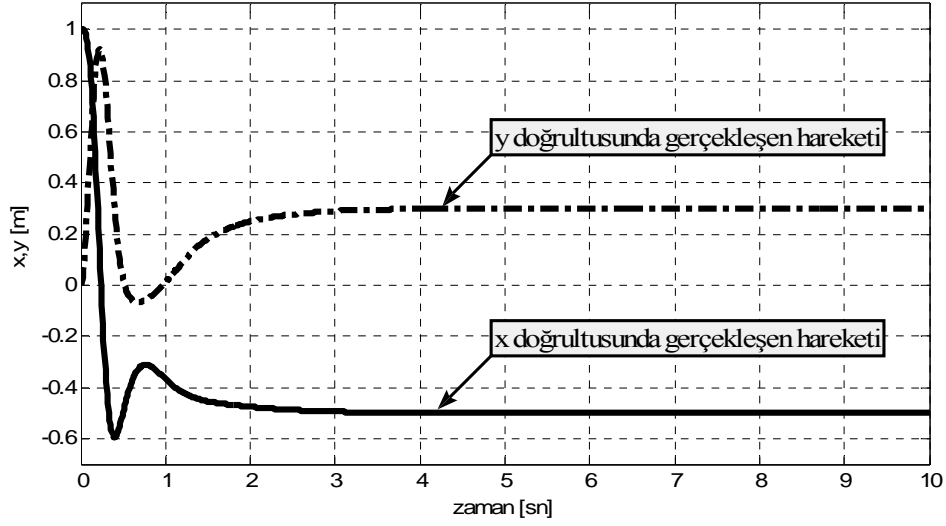
Şekil 3.3.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



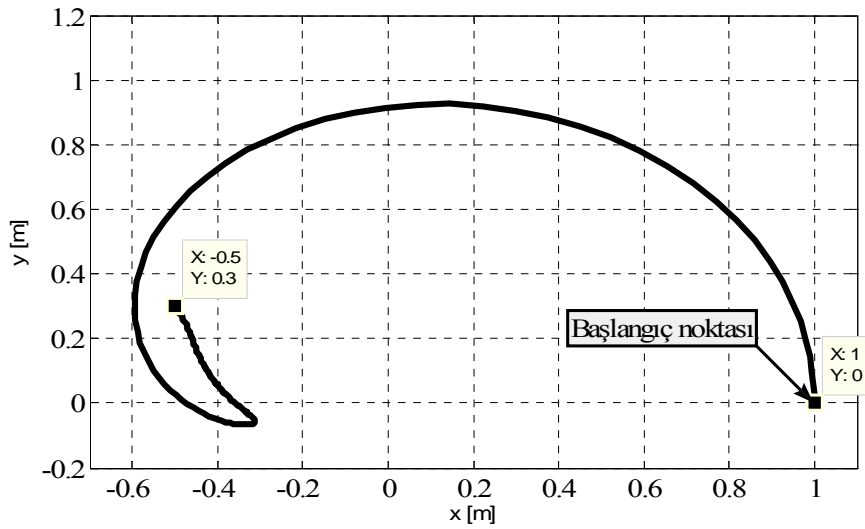
Şekil 3.4.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde izlediği yörünge Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

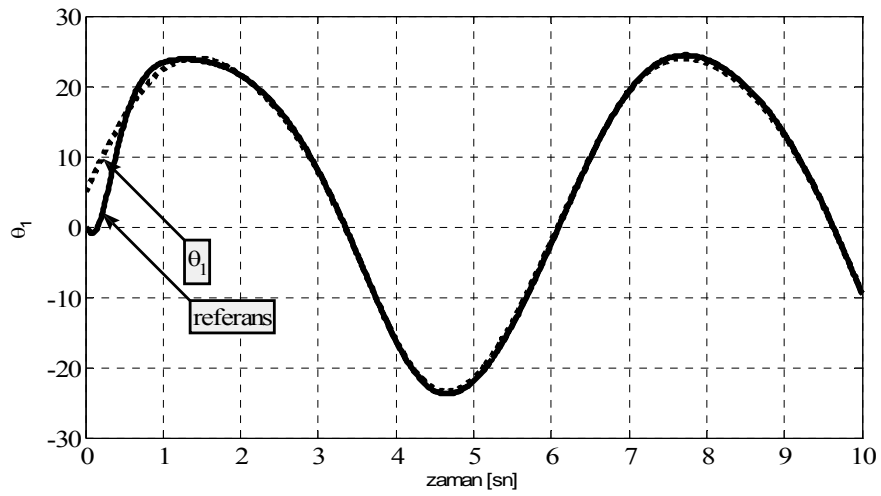


Şekil 3.6. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 3.1.2. Verilen bir izin takibi

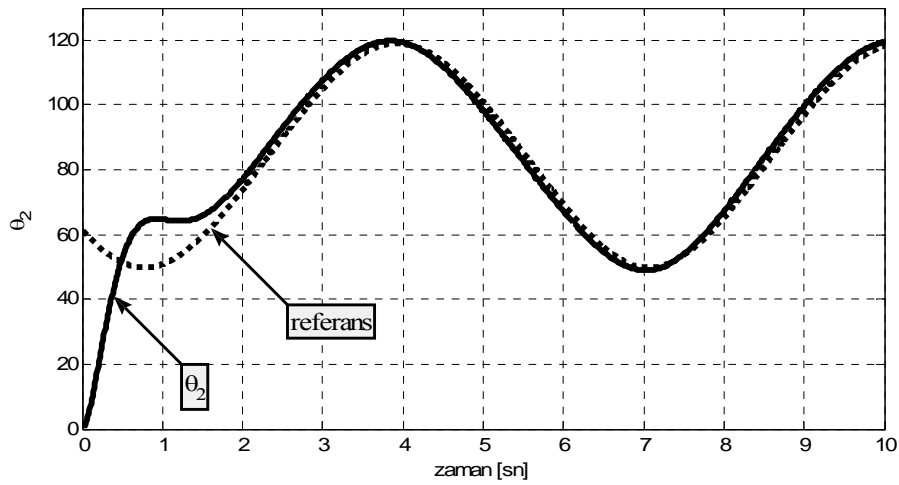
PID kontrolöre sahip robot kolu

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izin takibine  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



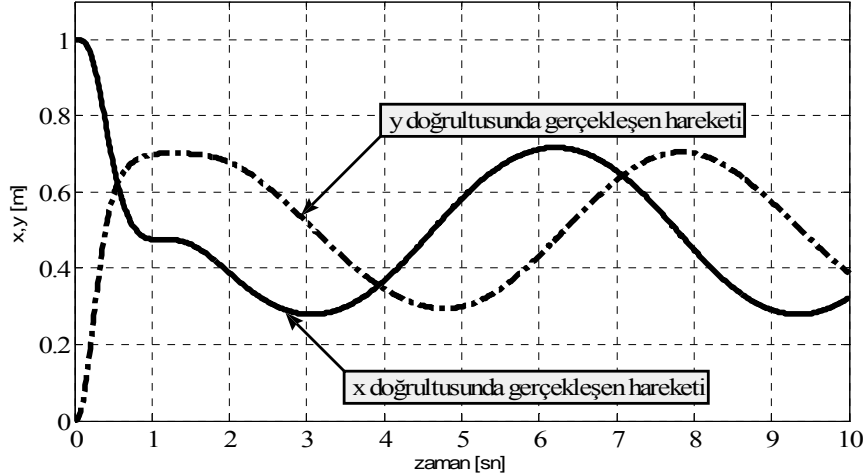
Şekil 3.7.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izin takibine  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



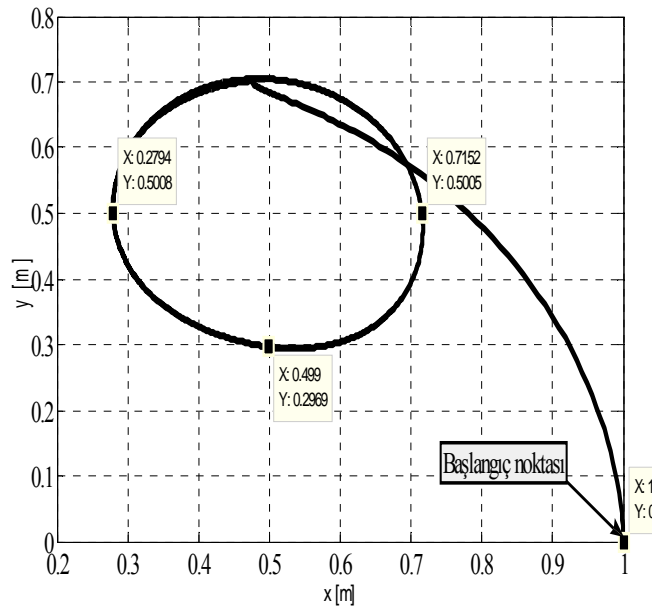
Şekil 3.8.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan hareket ederek merkezi  $P(0.5,0.5)$  noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının  $x$  ve  $y$  doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Robot kolunun uç noktasının  $x$  ve  $y$  doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan hareket ederek merkezi  $P(0.5,0.5)$  noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının  $x$  ve  $y$  koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

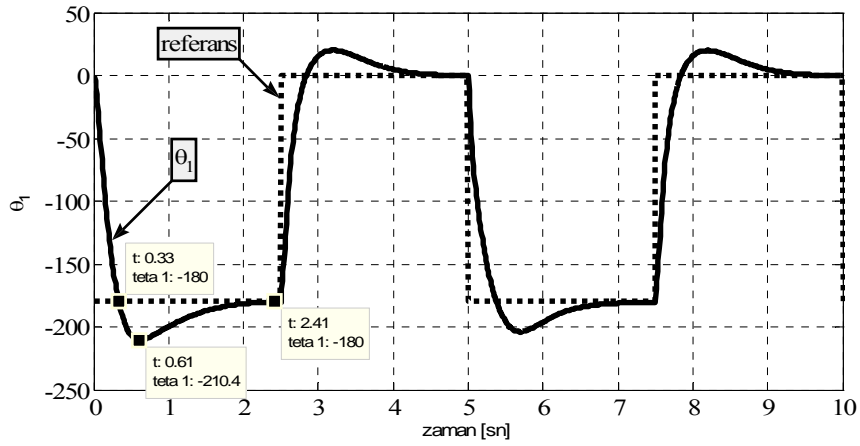


Şekil 3.10. Robot kolunun uç noktasının  $x$  ve  $y$  koordinat sisteminde verdiği cevap

### 3.1.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi

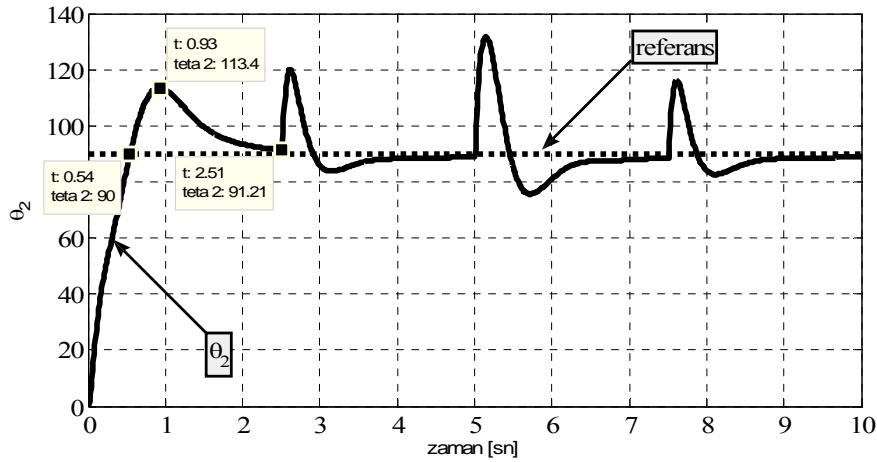
PID kontrolöre sahip robot kolu

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



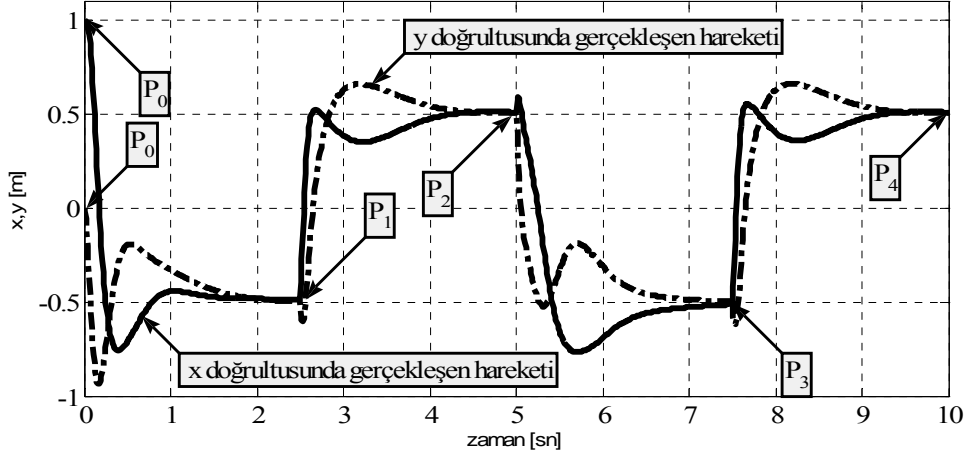
Şekil 3.11.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



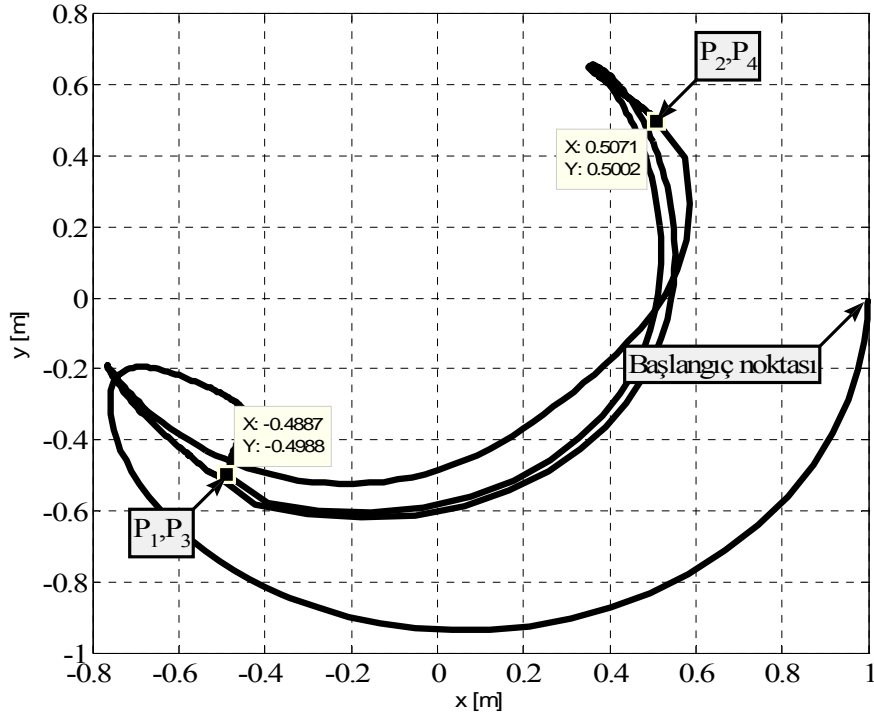
Şekil 3.12.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

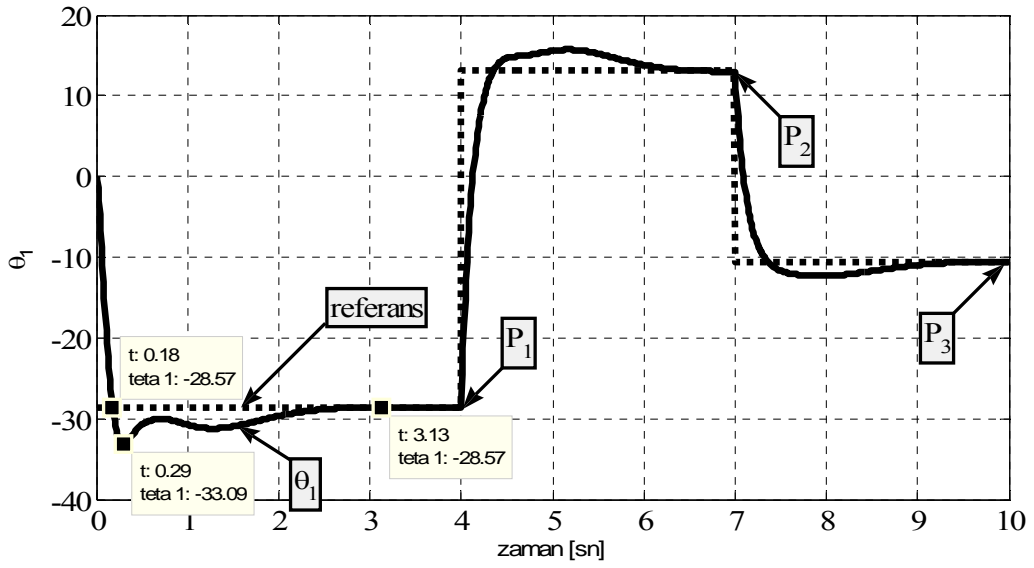


Şekil 3.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 3.1.4. Başlangıç noktasından verilen 3 noktaya hareketi

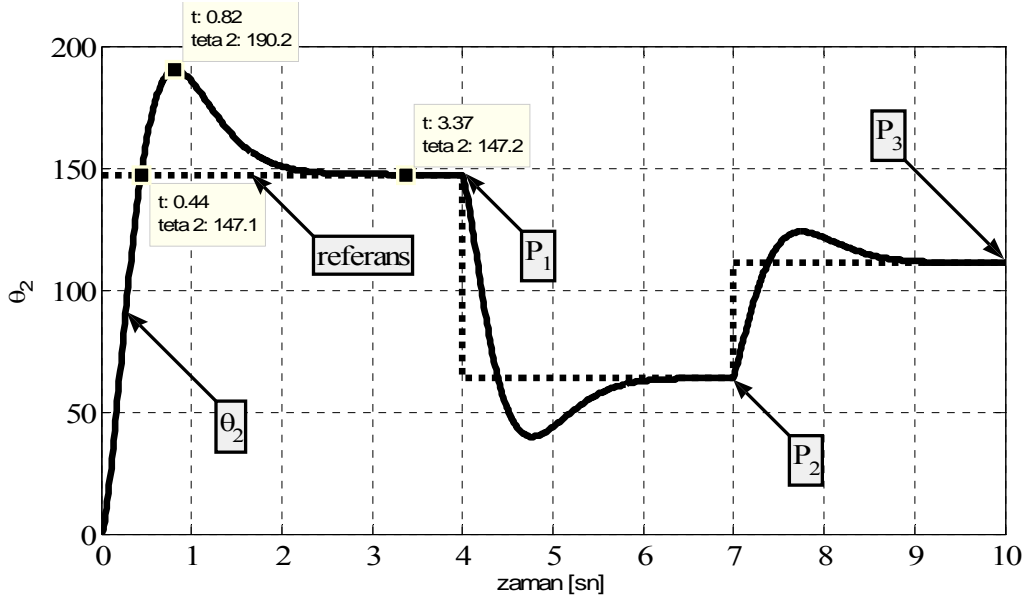
PID kontrolöre sahip robot kolu

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

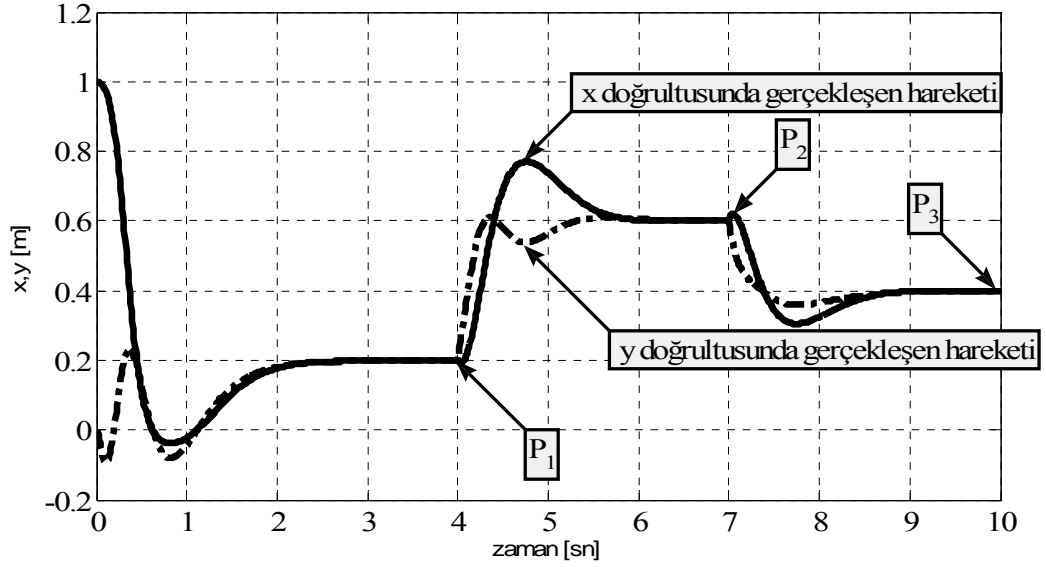
- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.16.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

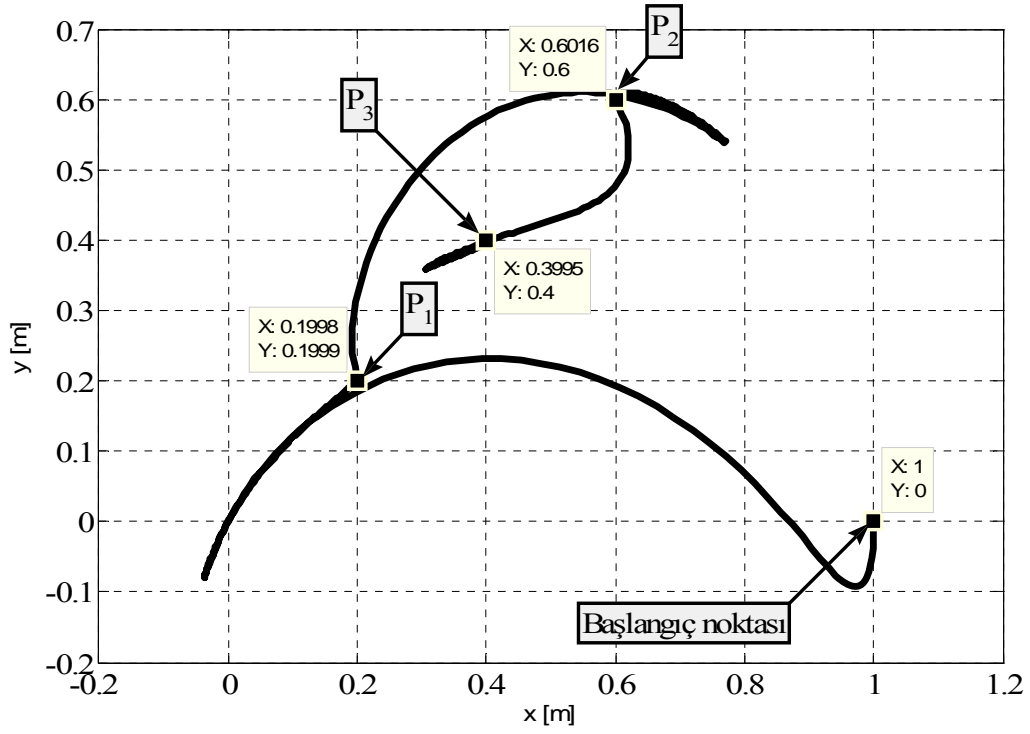


- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sistemine verdiği cevabı Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

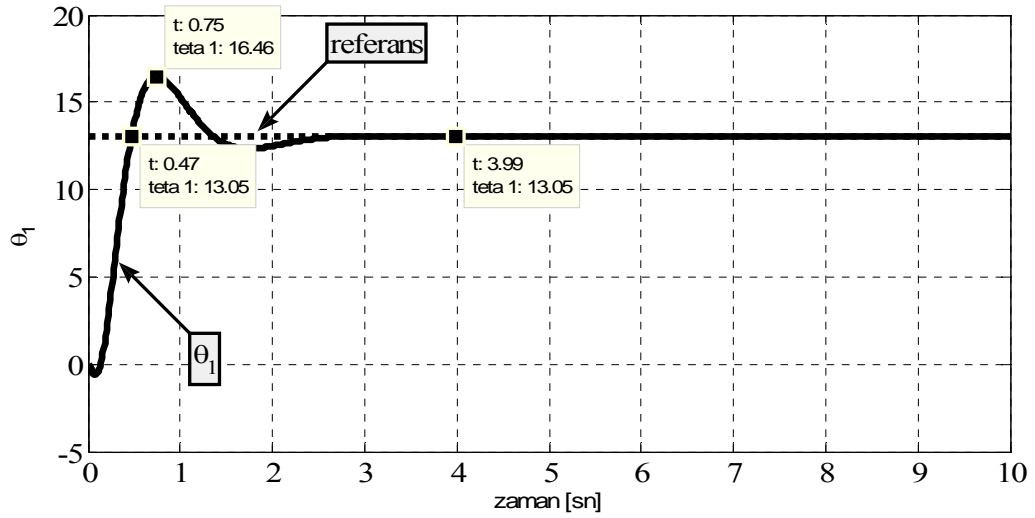


Şekil 3.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 3.1.5. Birbirine simetrik verilen 4 noktaya hareketi

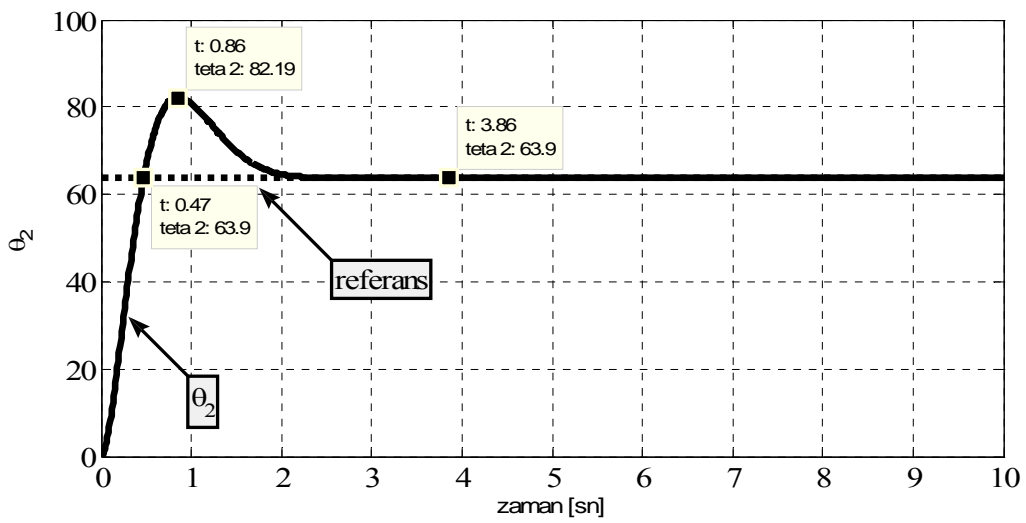
PID kontrolöre sahip robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



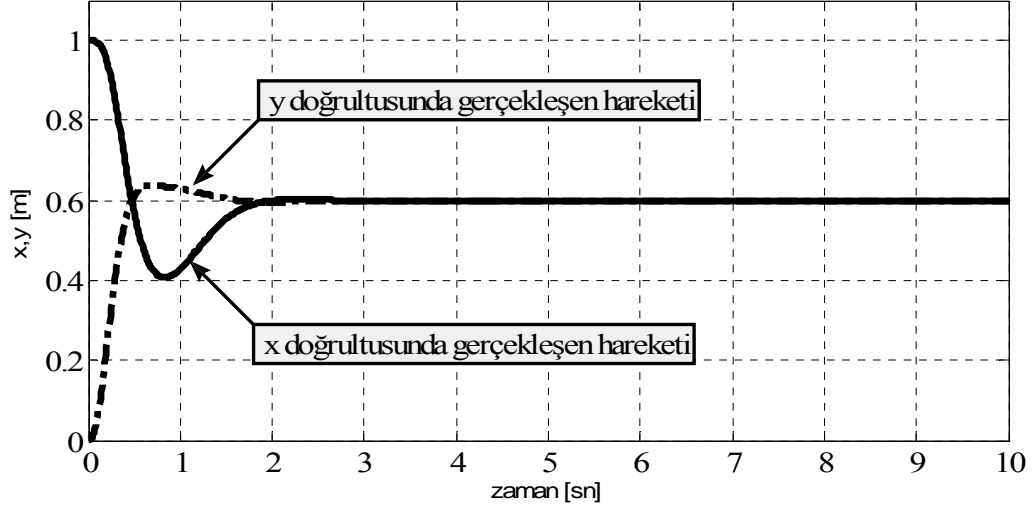
Şekil 3.19.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



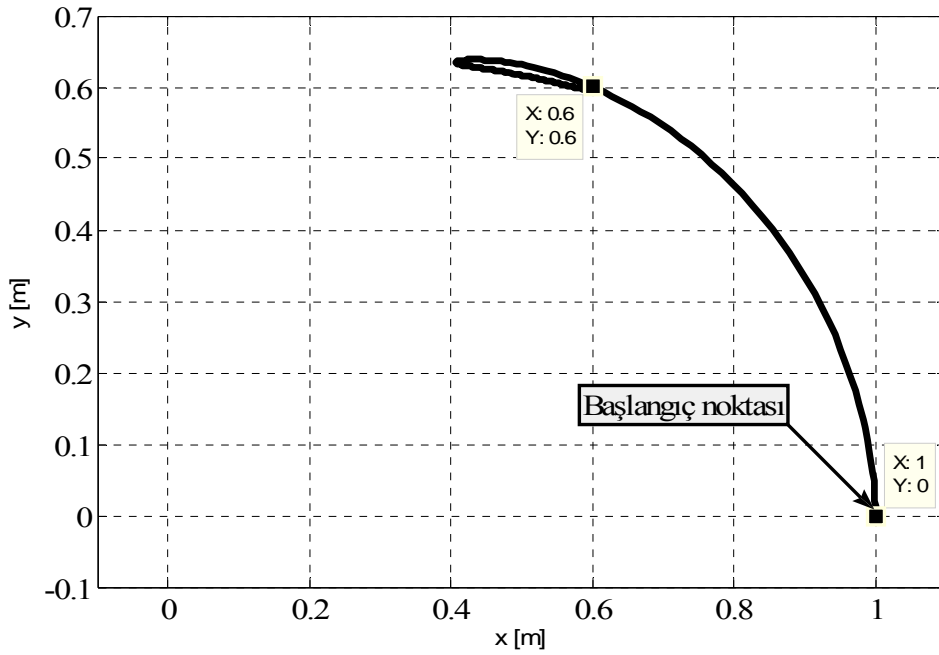
Şekil 3.20.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



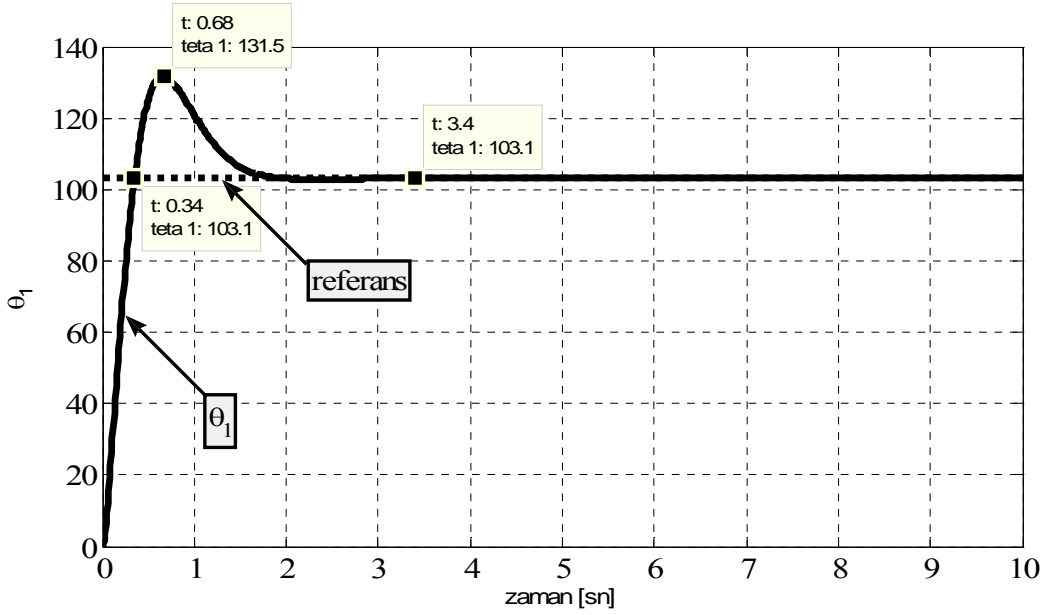
Şekil 3.21. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



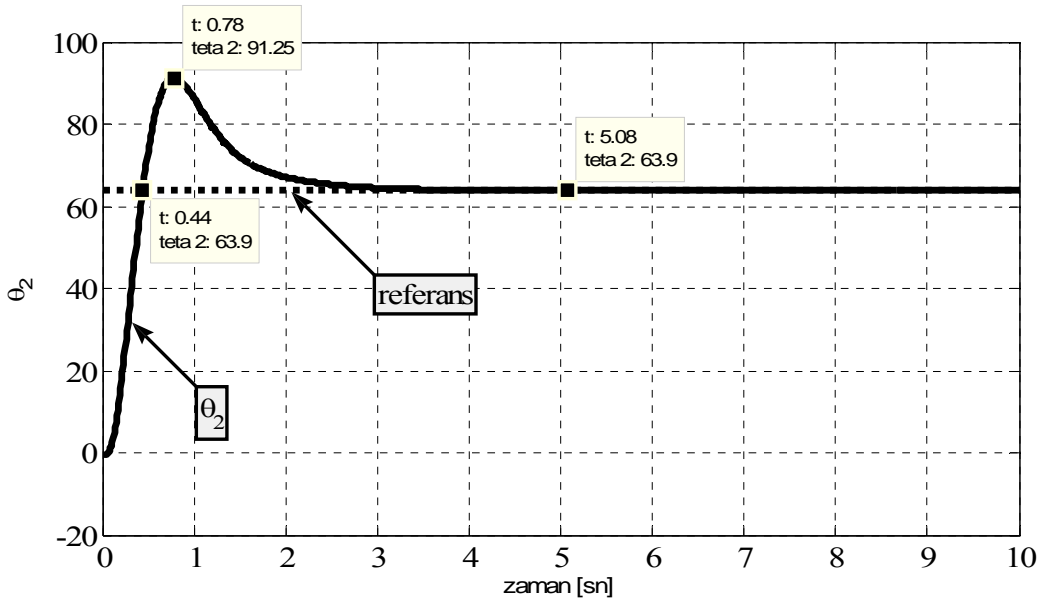
Şekil 3.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.23'te gösterilmiştir.



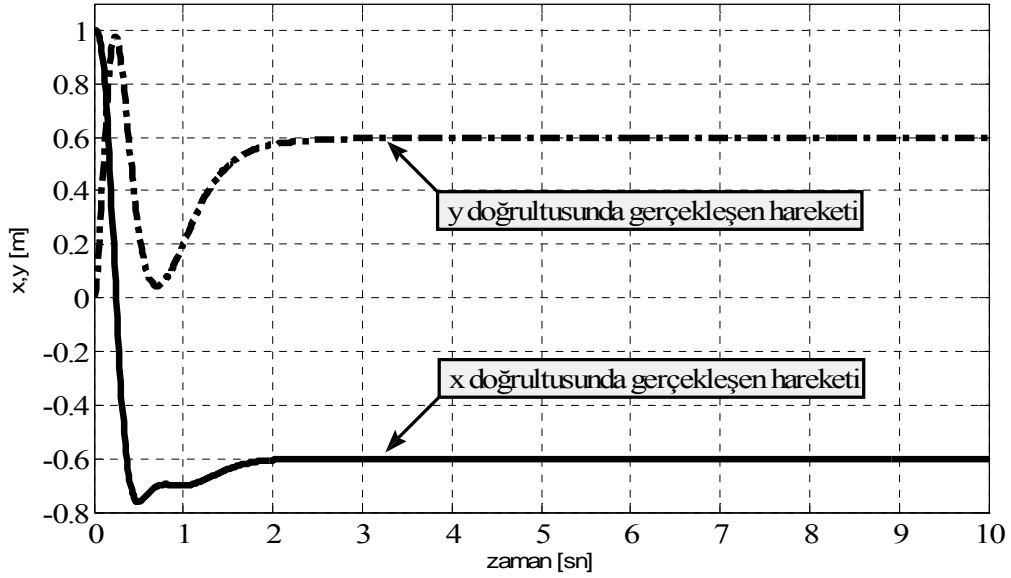
Şekil 3.23.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.24'te gösterilmiştir.



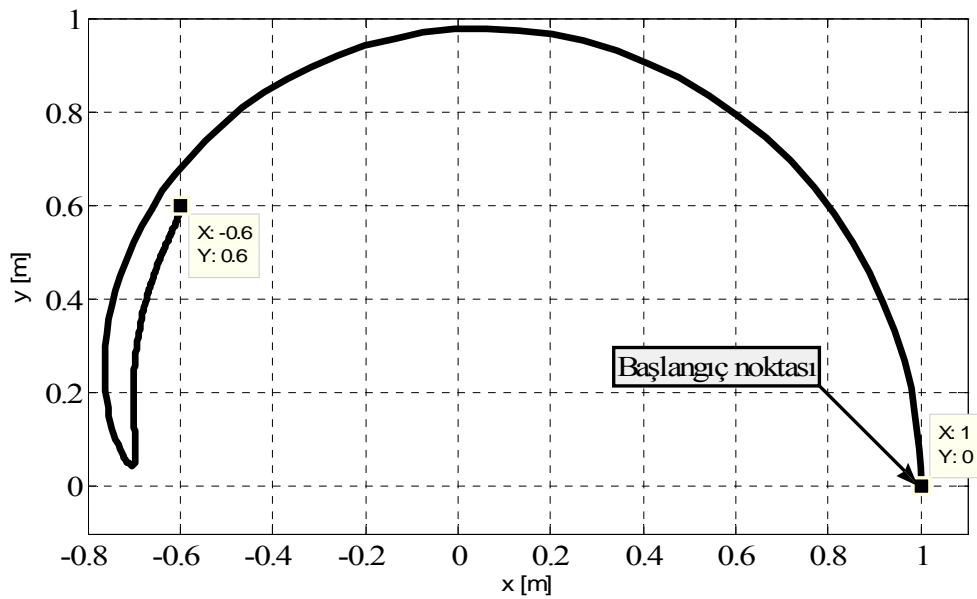
Şekil 3.24.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



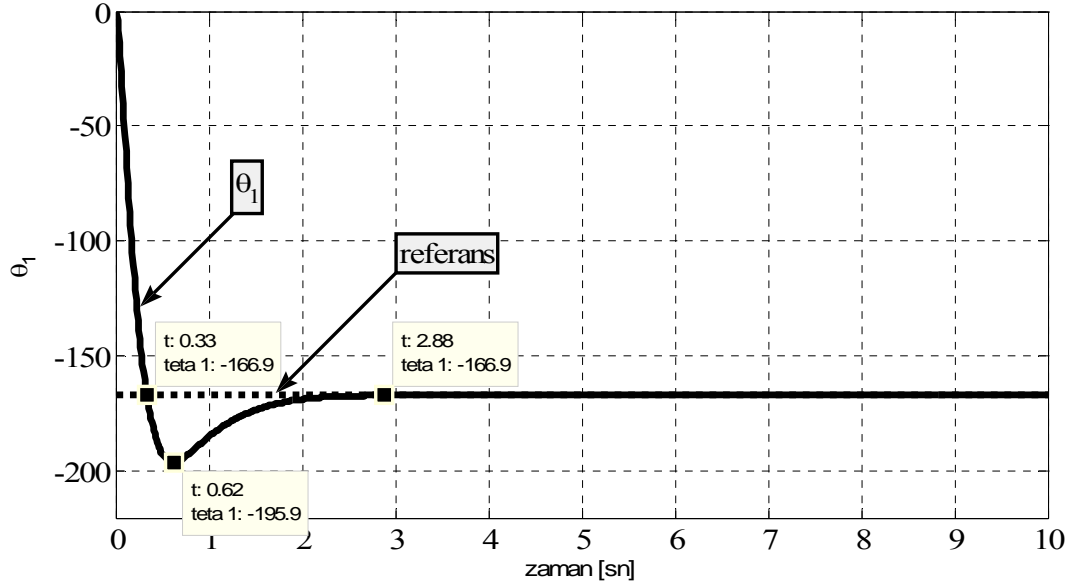
Şekil 3.25. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



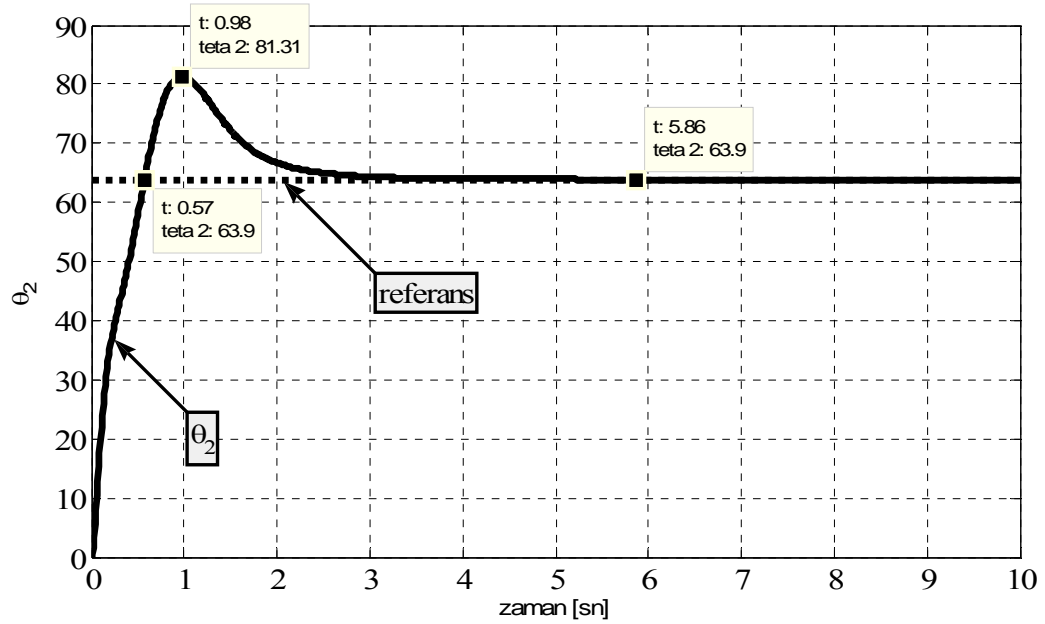
Şekil 3.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



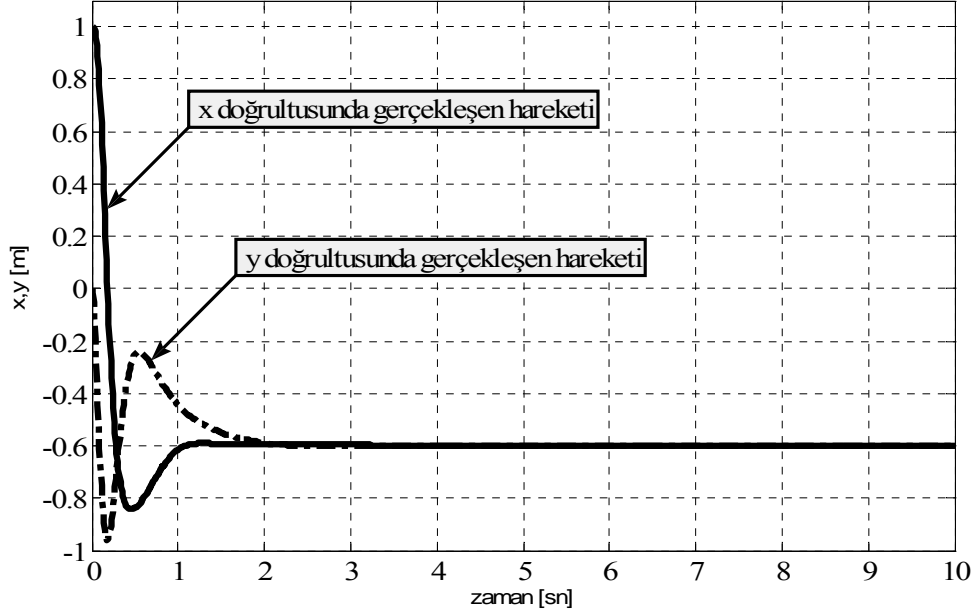
Şekil 3.27.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



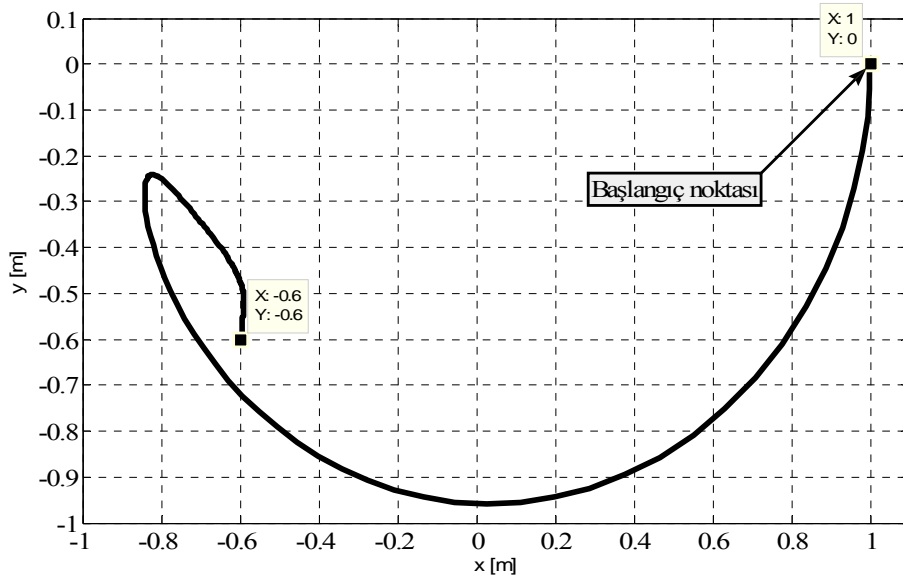
Şekil 3.28.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

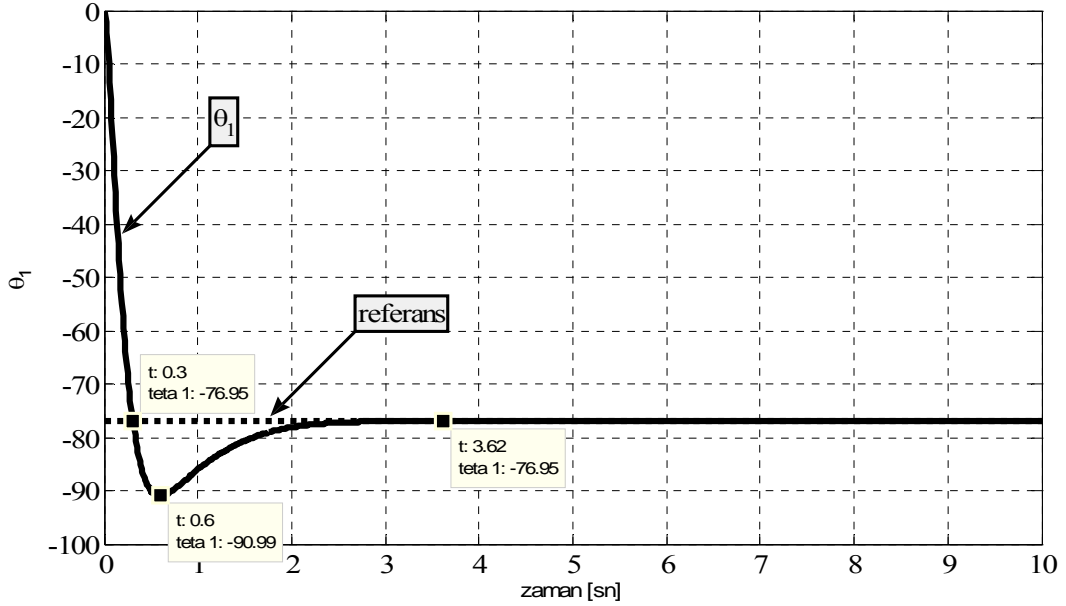
- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

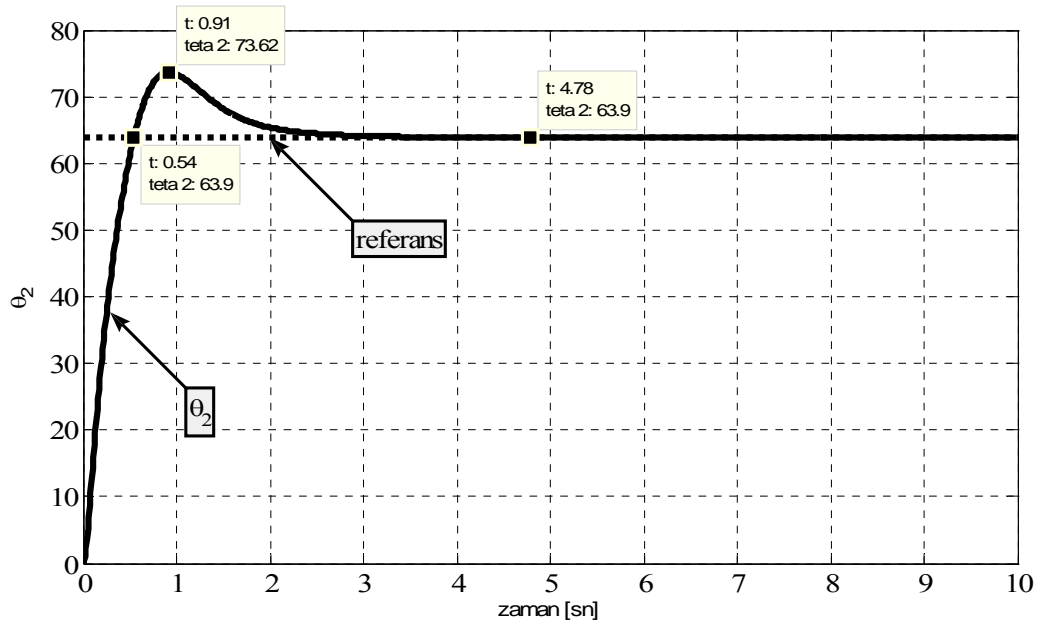


- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



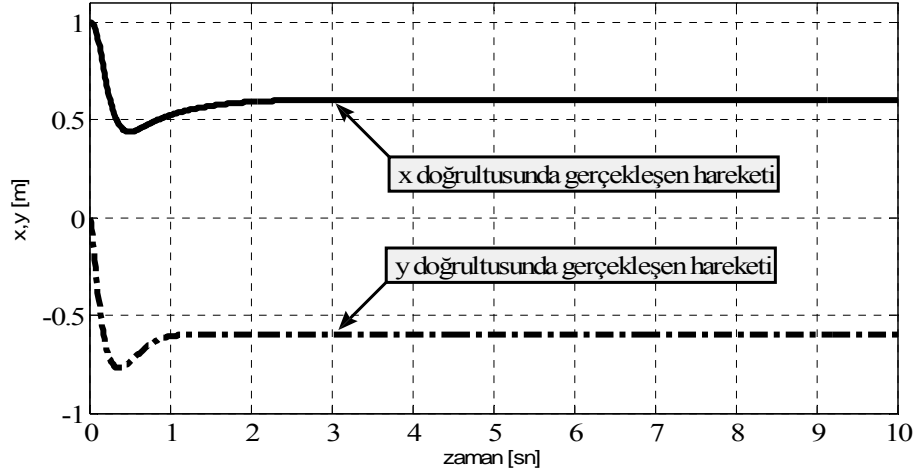
Şekil 3.31.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.32’de gösterilmiştir.



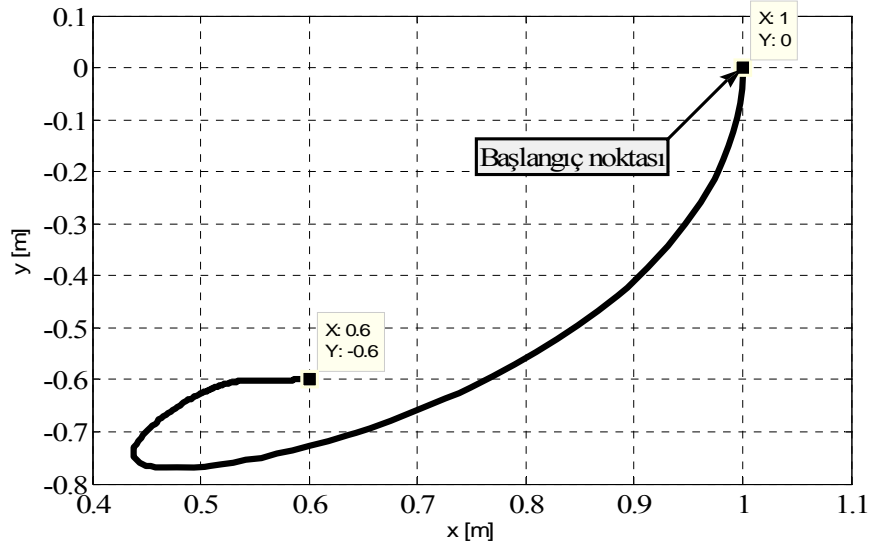
Şekil 3.32.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 3.33'te gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.34'te gösterilmiştir.

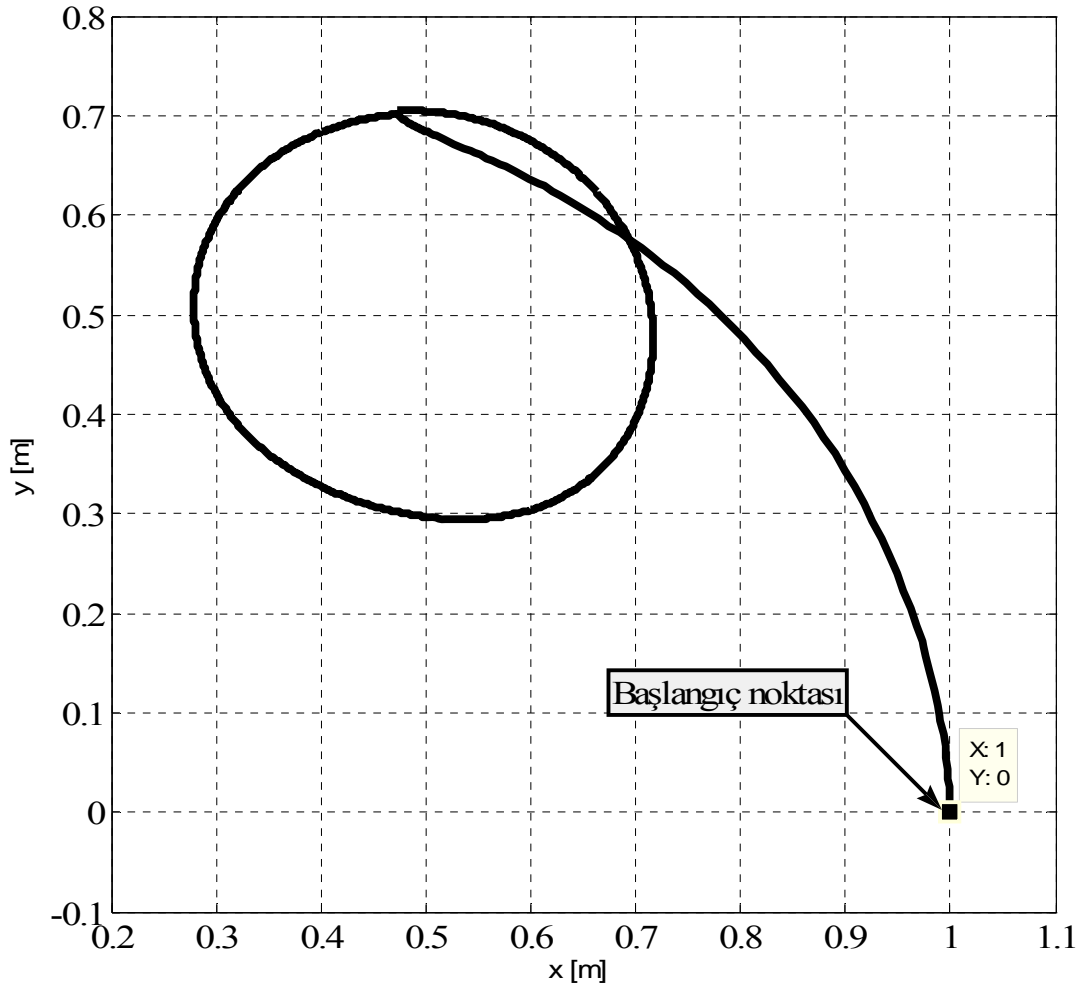


Şekil 3.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 3.1.6. Dayanıklılık

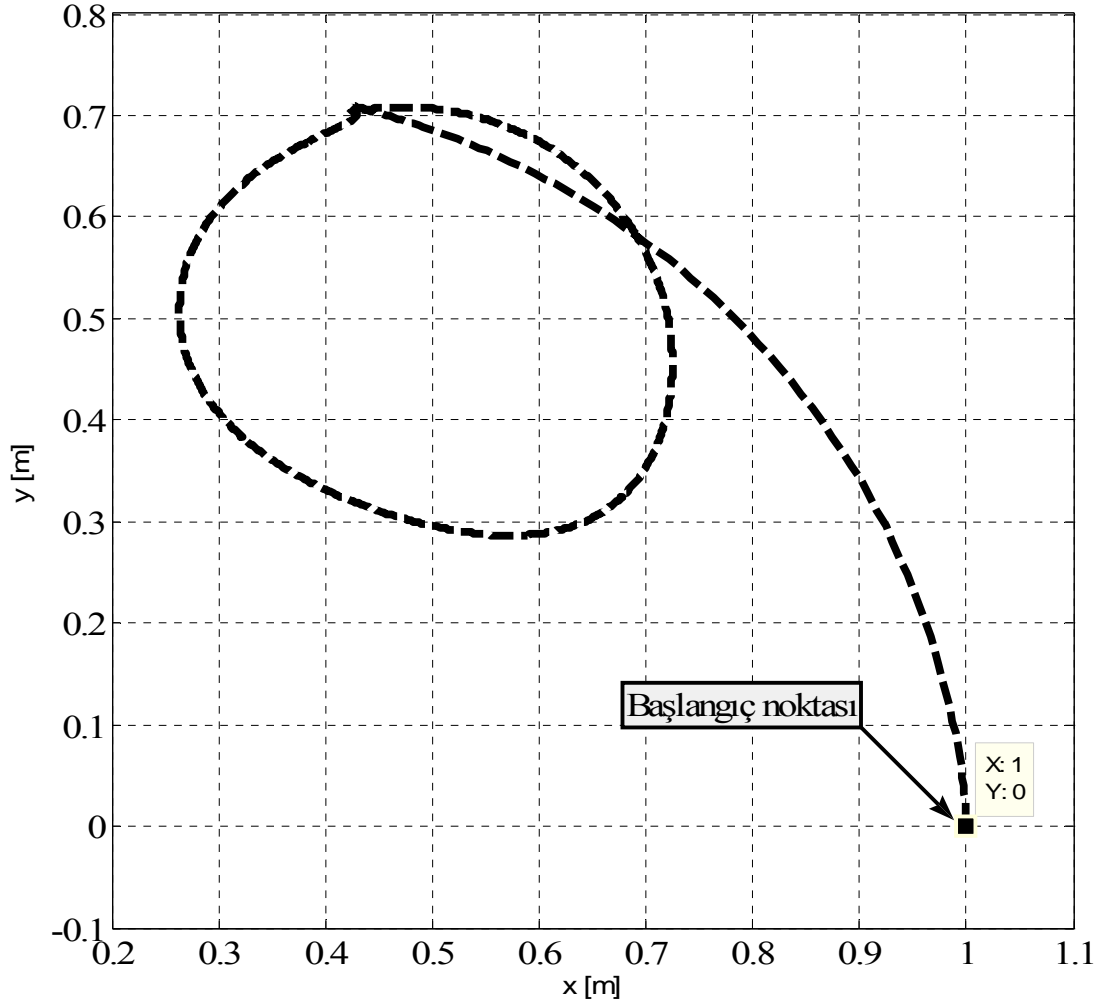
PID kontrolöre sahip robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 0 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.35'te gösterilmiştir.



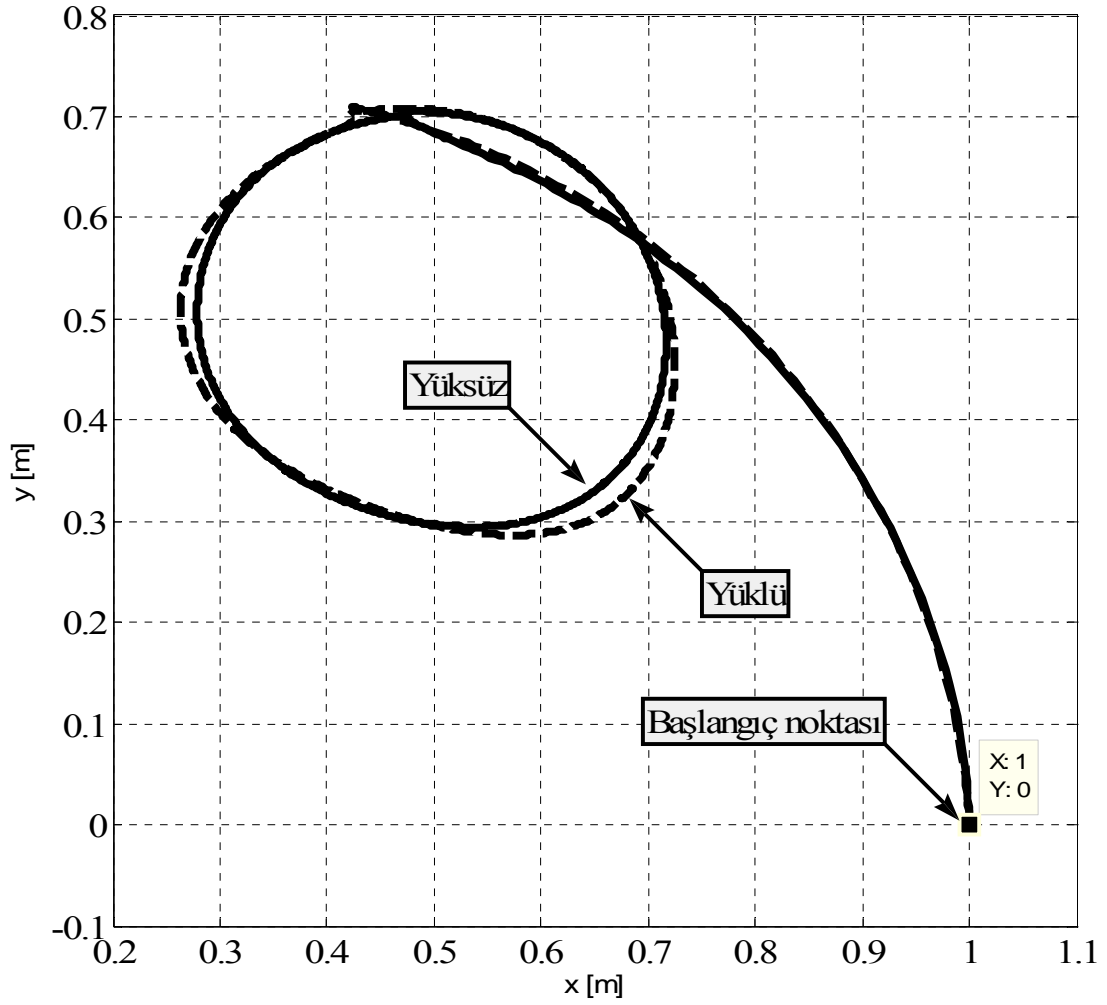
Şekil 3.35. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 20 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 3.36'da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının 0 kg. ve 20 kg. yükler altında x ve y koordinat sisteminde verdiği her iki cevap Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



Şekil 3.37. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerin düzenlenmesiyle Tablo 3.2 elde edilmiştir.

Tablo 3.2. PID kontrolör başarımlar sonuç tablosu

$P(x, y)$	$\theta_i$	$tr$ [sn]	$Mp$ [%]	$ts$ [sn]	$e_{ss}$ [sn]
$P(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.34	26.73	6.71	0
	$\theta_2$	0.44	34.26	4.72	0
Çember $r : 0.2m$ $H(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.56	2	3.6	-1
	$\theta_2$	0.48	14	4.08	-2.5
Kare Dalg genlik : 0.5 frekans : 0.2Hz	$\theta_1$	0.33	-30.4	2.41	0.2
	$\theta_2$	0.54	23.4	2.51	1.21
$t : 0 - 4sn$ $P_1(0.2, 0.2)$	$\theta_1$	0.18	-4.52	3.13	0.07
	$\theta_2$	0.44	43.1	3.37	0.08
$t : 4 - 7sn$ $P_2(0.6, 0.6)$	$\theta_1$	0.47	3.41	3.99	0
	$\theta_2$	0.47	18.29	3.86	0
$t : 7 - 10sn$ $P_3(0.4, 0.4)$	$\theta_1$	0.34	28.4	3.4	0
	$\theta_2$	0.44	27.35	5.08	0
$P_4(0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.33	-29	2.88	0
	$\theta_2$	0.57	17.41	5.86	0
$P_5(0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.3	-14.04	3.62	0
	$\theta_2$	0.54	9.72	4.78	0

## **BÖLÜM 4. ROBOTLARDA BULANIK KONTROL**

### **4.1. Bulanık Mantık**

Bulanık mantık (Fuzzy Logic) kavramı ilk kez 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Lotfi A.Zadeh'in bu konu üzerinde ilk makalelerini yayınlamasıyla duyuldu. O tarihten sonra önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş katı bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Bilindiği gibi istatistikte ve olasılık kuramında, belirsizliklerle değil kesinliklerle çalışılır. Ama insanın yaşadığı ortam daha çok belirsizliklerle doludur. Bu yüzden insanoğlunun sonuç çıkarabilme yeteneğini anlayabilmek için belirsizliklerle çalışmak gereklidir.

Bulanık mantık, temel olarak yaklaşıklık ve kesin olmama gibi insan düşüncesinde ve doğada var olan belirsizliği kullanmaktadır ve kesin doğru veya kesin yanlış yerine doğal derece doğru ya da yanlışlık belirten tanımlar kullanır. Böylelikle bulanık mantıkla günlük konuşmalarda kullanılan belirsiz ifadeler tanımlanabilmekte ve bu dilsel niteleyiciler kullanılarak insan benzeri sonuç çıkarma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede bulanık mantık, bilgisayarlara dolayısıyla kontrol sistemlerine insansı düşünme ve karar verebilme yeteneğinin kazandırılmasında başarılı bir yol sağlamaktadır.

Bulanık mantığın uygulama alanları kontrol sistemleriyle sınırlı değildir. Geliştirilen son teoremler bulanık mantığın ilke olarak, ister mühendislik, ister biyoloji ve hatta isterse ekonomi olsun, her türlü alanda sürekli sistemleri modellemek için kullanılabileceğini göstermektedir. Çoğu alanda bulanık mantık temelli modellerin standart matematiksel modellerden daha tatmin edici yada daha kesin sonuçlar verdiği görülmektedir.

Bulanık mantığın uygulama alanları çok geniştir. Sağladığı en büyük fayda ise

“insana özgü tecrübe ile öğrenme” olayının kolayca modellenebilmesi ve belirsiz kavramların bile matematiksel olarak ifade edilebilmesine olanak tanınmasıdır. Bu nedenle özellikle lineer olmayan sistemlere yaklaşım yapabilmek için uygundur [7].

#### 4.2. Bulanık Kümeler

Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki farkı en açık şekilde iki mantık sisteminin temelini oluşturan, kullandıkları küme teorilerini inceleyerek görebiliriz.

Klasik ikili mantığın dayandığı standart küme teorisinde, herhangi bir nesne bir kümeye ya aittir yada ait değildir. Yani bir nesnenin bir kümeye aitlik derecesini gösteren "üyelik derecesi" ya "birdir" yada "sıfırdır". Bulanık mantığın kullanıldığı "bulanık" yada başka bir deyişle "çok değerli" kümelerde ise, nesnelere bulanık bir kümeye ve bu kümenin tümleyeni olan kümeye aynı anda sonsuz farklı derecelerde ait olabilir. Buradaki tek sınırlama bu iki üyelik derecesinin toplamının bir olması gerektiğidir. Örneğin eğer hava, %20 serin ise %80 serin-değil olmalıdır. Bulanık mantık bu yolla, klasik mantığı geçersizleştiren "havanın %100 serin iken %100 serin-değil" ifadesinde olduğu gibi, çift çelişkiden kaçınır.

Diğer bir örnekte de genç insanların oluşturduğu bir küme tanımlamak istenilirse biçimsel olarak;

$$B = \{\text{genç insanlar kümesi}\}$$

Yaş kavramı 0'dan başladığından dolayı B kümesinin alt değerleri için değerlendirme yapılması kolay olacaktır. Ancak diğer taraftan yüksek değerler için tanımlama yapmak bayağı zor olacaktır. İlk adım olarak üst değer 20 olarak kabul edilsin. Bu tanımlama sonucu B kümesinin klasik küme gösterimi olarak aşağıdaki gibi

$$B = [0,20]$$

gösterilir.

Bu değerlendirme içerisinde elbet çeşitli sorular belirecektir. Niçin bir insan 20. yaş gününde gençken ertesi gün genç olarak kabul edilmiyor? Bu yapısal bir problem

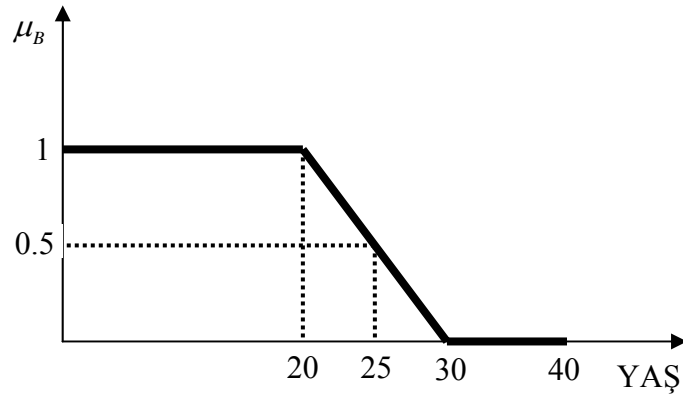


olduğu içindir ki, B kümesinin üst değerini farklı bir değere de taşısak aynı sorun tekrar tekrar ortaya çıkacaktır.

B kümesini inşa etmenin daha tabii ve kolay yolu genç ve genç olmayan keskin ayrımını biraz daha esnek bir şekilde tanımlamak olacaktır. Bunu EVET, O genç insanlar kümesinin bir elemanıdır veya HAYIR, O genç insanlar kümesinin bir elemanı değildir gibi keskin cümleler yerine daha esnek olan "O kısmen genç insanlar kümesine aittir." veya "O genç insanlar kümesine üye sayılamaz." gibi cümleler kullanarak ifade edilecektir.

Aşağıdaki grafikte görüldüğü üzere ordinat ekseninde 1 değerine karşılık gelen apsisteki elemanın B kümesinin elemanı olduğu ve 0 değerine karşılık gelen elemanın ise B kümesinin elemanı olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Diğer değerlerin neyi ifade ettiğine gelinirse, bunlarda B kümesine aşamalı üyelik durumunu belirtmektedir.

Belirgin bir ifade ortaya koymak açısından genç insanlar kümesinin bulanık küme gösteriminin grafik gösterimini incelenirse aşağıdaki gibi bir ifade elde edilebilir.



Şekil 4.1. Genç insanlar kümesi olan (B) kümesine ait değişik yaş gruplarının üyelik durumu

Yukarıda da görüldüğü üzere klasik küme mantığındaki yakınmaların aksine 25 yaşındaki bir insanı halen yüzde elli genç olarak nitelendirebilir.

### 4.3. Bulanık Kümelerde İşlemler

A ve B için eşit olma durumunu yalnızca  $\mu_A(x) = \mu_B(x)$  in tüm  $x \in U$  da olması durumunda söylenebilir. B'nin A'yı kapsamasını ise  $A \subset B$  için  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  in tüm  $x \in U$  da olması durumunda söylemek mümkündür.

Bir A bulanık kümesinin tamamlayıcılarının üyelik mertebesi cinsinden ifadesi

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (4.1)$$

olur.

A ve B bulanık kümelerinin birleşimleri U kümesindeki elemanların üyelik fonksiyonları  $(A \cup B)$  cinsinden

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.2)$$

şeklinde olur.

Aynı şekilde A ve B bulanık kümelerinin kesişimleri  $(A \cap B)$ , U'daki üyelik mertebeleri cinsinden,

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanır [7,9].

## 4.4. Bulanık Kontrol Sistemlerinin Temel Yapısı

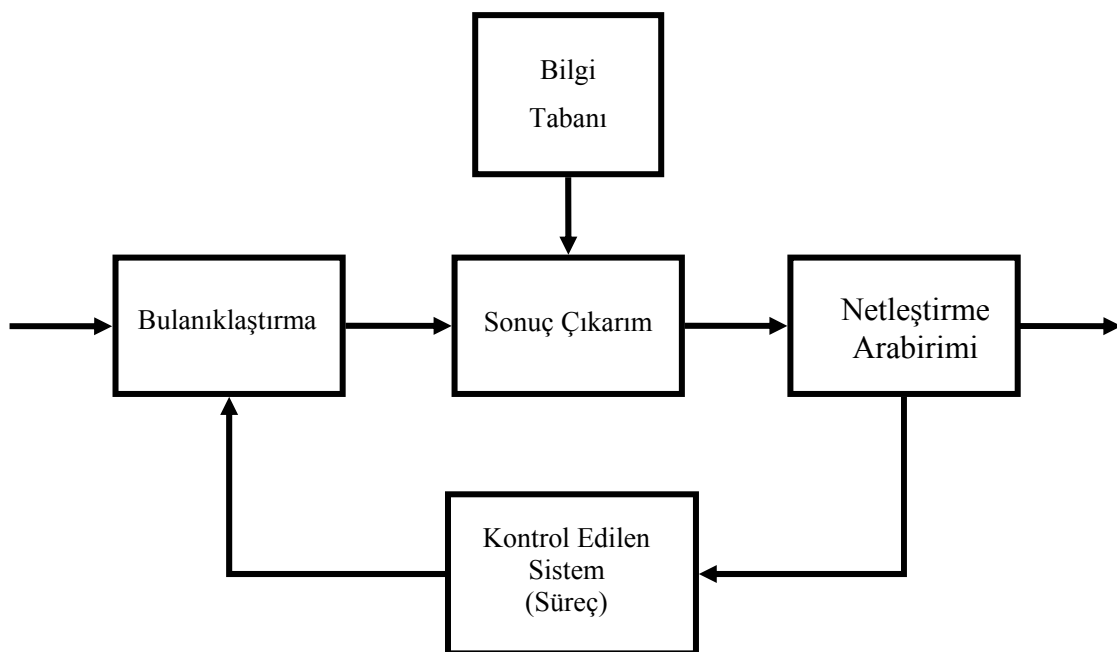
### 4.4.1. Bulanık kontrol sistemleri

Klasik kontrol sistem tasarımındaki ilk adım kontrol edilecek düzeneğin transfer fonksiyonunun tam olarak elde edilmesidir. Başka bir deyişle matematiksel modelinin oluşturulmasıdır. Ayrıca uygun ve etkin bir kontrol sağlamak için sistem parametrelerinin zamanla değişmemesi istenir. Fakat uygulamadaki sistemlerin pek çoğu bilinmeyen parametrelere veya kompleks ve lineer olmayan karakteristiklere

sahiptirler. Gerçi sistem parametrelerinin değiştiği veya sistemde lineerlikten sapma olduğu durumlar için adaptif kontrol yöntemleri gerçekleştirilmiştir; fakat bu tip kontrol sistemleri genellikle kompleks olmaları ve hesaplamalarda uzun zaman almaları sebebiyle gerçek zaman uygulamalarında sorunlar çıkarmaktadır.

Böyle uygulamalarda, uygulama alanındaki uzman kişilerin bilgisi klasik kontrol sistemlerinden daha faydalı ve etkili olabilmektedir. Bu yüzden insansı düşünme yeteneğini ve bilgisini kontrol sisteminin içine sokabilecek bir kontrol yöntemi olan Bulanık Mantık Kontrolörü (Fuzzy Logic Controller, FLC) iyi bir çözümlenebilmektedir. FLC sistemleri bir uzmanın kişisel ve mantıksal bilgi ve becerilerini nümerik hesaplamalar kullanarak otomatik bir kontrol stratejisine çevirebilir.

Temel olarak FLC sistemleri şekil 4.2'de görüldüğu gibi dört temel arabirimden oluşur:



şekil 4.2. Bulanık mantık kontrolörün temel yapısı

- Bulanıklaştırma arabirimi,
- Bilgi tabanı,
- Sonuç çıkarım mekanizması,
- Netleştirme arabirimi.

#### 4.4.1.1. Bulanıklaştırma arabirimi

FLC'nin dayandığı bulanık küme teorisinde işlemler bulanık değerler üzerinde yapılmaktadır. Bu sebeple dış ortamdan ölçülen gerçek giriş değişkenlerini bulanık değişkenlere çeviren bulanıklaştırma FLC'de önemli bir rol oynar ve ilk adımı teşkil eder.

Bu arabirimde gerçekleştirilen temel işlemler şunlardır: Kontrolü yapılan sistemden giriş değişkenlerinin gerçek zamanda ölçümlerinin alınması, eğer gerekliyse giriş değişkenlerini sabit bir sayıyla çarpmak ya da bölmek gibi işlemlerle ölçeklendirme yapılması, yine gerekliyse ve isteğe bağlı olarak seçilen dilsel uzayın kesikli hale dönüştürülmesi, ölçümü yapılan gerçek giriş değişkenlerinin her birisini o değişkene ait söylem uzayına göre dilsel değişkenlere dönüştürmek ve bunlara ait üyelik değerlerini bulmak sayılabilir.

#### 4.4.1.2. Bilgi tabanı

Temel olarak uygulama sahasına ait uzman bilgisini ve kontrol hedeflerini içeren bilgi tabanı FLC'nin dilsel kavramları kullanabilmesini sağlayan arabirimdir. Bulanık kontrol sistem tasarımında klasik kontrol sistemlerinde olduğu gibi analitik bir metod olmaması bu arabirimin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşur. Sonuç çıkarım ünitesi karar verme işlemlerinde, bilgi tabanına gidip, veri tabanından üyelik fonksiyonlarıyla ilgili bilgileri, kural tabanından ise değişik giriş değerleri için tespit edilmiş olan kontrol çıkışları bilgisini alır. Bu bakımdan bilgi tabanı ve çıkarım ünitesi sürekli ilişki halindedir. Kural ve veri tabanı aşağıdaki şekilde olmaktadır:

##### – Veri tabanı

Kısaca dilsel kavramları (bulanık değişkenleri) FLC sisteminde kullanabilmek için gerekli tanımları içerir. Başlıca giriş, çıkış değişkenlerine ait dilsel uzayların tanımlarını, üyelik fonksiyonlarını, eğer sistemde değişkenler normalize edilmişse ve kesikli hale dönüştürülmüşse bu işlemlerle ilgili bilgileri ve FLC'de kullanılan bulanık işlemlerinin tanımlarını kapsar.

##### – Kural tabanı

Uygulama alanındaki uzman kişilerin kontrol hedeflerini ve kontrol sırasında takip ettikleri yöntemleri karakterize etmeyi sağlayan dilsel değişkenlerden oluşturulan

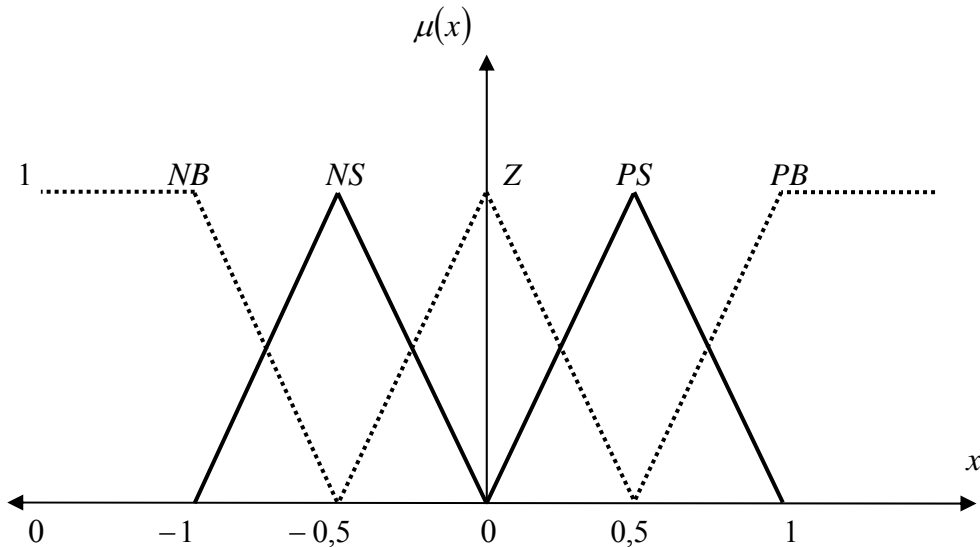
kurallar kümesidir. Oluşturulan bu kurallara bulanık kurallar denir. Dilsel kural tabanı, sistemde dilsel-bulanık giriş değişkenlerine hangi dilsel-bulanık değişkenlerinin çıkışa verileceğinin ifade edildiği bölümdür. Genellikle kurallar şart cümlelerinden (EĞER X=A İSE Y=B) oluşur.

Kuralların sayısı ve doğruluğu sistemin performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Sistemin kural tabanını oluşturmak için bugüne kadar değişik yollar kullanılmıştır.

Bunlardan birisi uygulanacak sistemi iyi tanıyan bir uzman bilgisi ile sistem giriş-çıkış değişkenleri ve kontrol kuralları belirlenir. Kurallar giriş çıkış değişkenlerinin dilsel ifadelerinden oluştuğundan bu işlem uzmanın kendi kontrol stratejisinin kural tabanına aktarımının en kolay ve güvenli yoludur.

Diğer bir yol ise daha önceden operatörün kontrol yönteminin taklit edilmesidir. Bazı endüstriyel sistemlerde modellenemeyen ve ancak bir operatör yardımıyla kontrol edilebilen süreçlerin; operatörün izlenmesiyle, yaptığı işlemlerin (bilinçli yada bilinçsiz) şart cümlelerine (EĞER .... İSE) dönüştürerek kural tabanının elde edilmesidir.

Bu sistemde kullanılan kurallar 2 girişli ve bir çıkışlı kontrolör için Tablo 4.1’te olduğu üzere ifade edilmiştir. Girişleri hata ve hatanın değişimi ifade ederken kontrolör çıkışıda tork olarak ele alınmıştır. Kontrolör için kullanılan her bir üyelik fonksiyonu NB (Negatif Büyük), NS (Negatif Küçük), Z (Sıfır), PS (Pozitif Küçük) ve PB (Pozitif Büyük) olmak üzere -1 ve +1 durum uzayında adlandırılmıştır.



Şekil 4.3. Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan üyelik fonksiyonu

Tablo 4.1. Bulanık kontrolörde kullanılan kural tablosu

$e$ $de/dt$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	Z
NS	PB	PS	PS	Z	NS
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PS	PS	Z	NS	NS	NB
PB	Z	NS	NS	NB	NB

#### 4.4.1.3. Sonuç çıkarım mekanizması

FLC'nin en önemli arabirimidir. Bilgi tabanında tanımlanan bulanık kavram ve kuralları kullanarak giriş değişkenlerinin durumuna göre uzman bir kişiden beklenen kontrol hareketlerini dilsel ifade olarak üretir. Çıkışta dilsel değişkeni ve üyelik fonksiyonu belli bulanık sayılar elde edilir. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonu bulunurken çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde en çok geçen yöntemler minimum korelasyonu ve çarpım korelasyonu olarak sayılabilir. Bu yöntemler kullanılırken ilk önce, dilsel çıkış değişkenlerinin üretilmesine sebep olan giriş değişkenlerine ait üyelik dereceleri isteğe bağlı olarak minimum (VE) veya maksimum (VEYA) işlemine tabi tutulur ve çıkış üyelik fonksiyonlarının etkinlik derecesi diyebileceğimiz tek bir üyelik derecesi elde edilir. Genelde etkinlik derecesini elde etmede literatürde minimum işlemi kullanılmıştır.

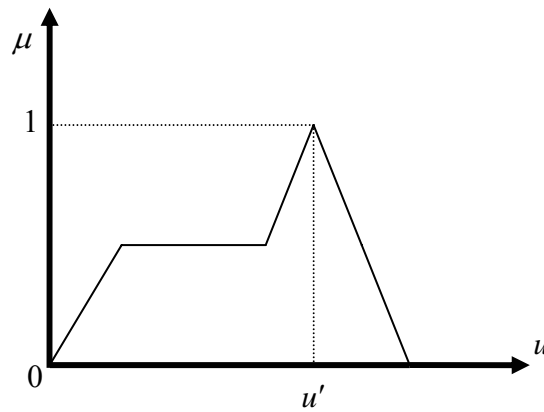
#### 4.4.1.4. Netleştirme arabirimi

Netleştirme arabirimi, sonuç çıkartım mekanizmasının ürettiği çıkış değişkenlerine ait bulanık sayılardan gerçek kontrol işaretlerinin elde edildiği bölümdür.

Netleştirici, bu işlemi aşağıda kullanılan yöntemlerden birini kullanarak yapmaktadır.

- Üyelik Fonksiyonunun Maximum Noktası (Maximum Membership Principle): Bu yöntemden “yükseklik yöntemi” olarak da söz edilmektedir. Aktif olan kuralların en büyük üyelik derecesi sayısal kontrol işareti olarak alınmaktadır (Şekil 4.4).

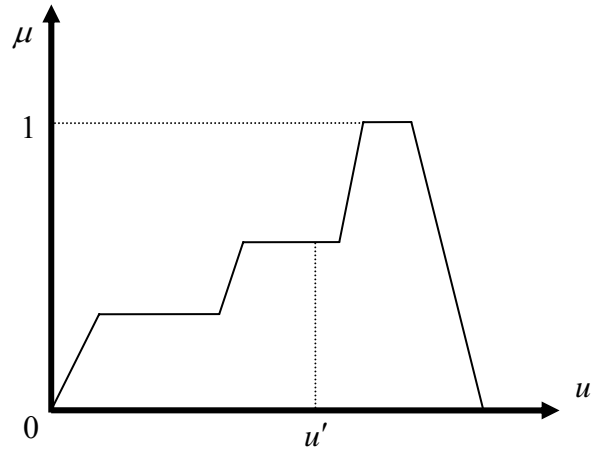
$$\mu_A(u') \geq \mu_B(u) \quad (4.4)$$



Şekil 4.4. Üyelik fonksiyonlarının maximum noktaları ile netleştirme işlemi

- Ağırlık Merkezi Metodu (Centroid Method): Bu yöntem, netleştirme yöntemi olarak en çok kullanılan yöntemlerden biridir ve ağırlık merkezi hesaplanarak yapılmaktadır (Şekil 4.5).

$$u^* = \frac{\int \mu(u)u dz}{\int \mu(u) dz} \quad (4.5)$$

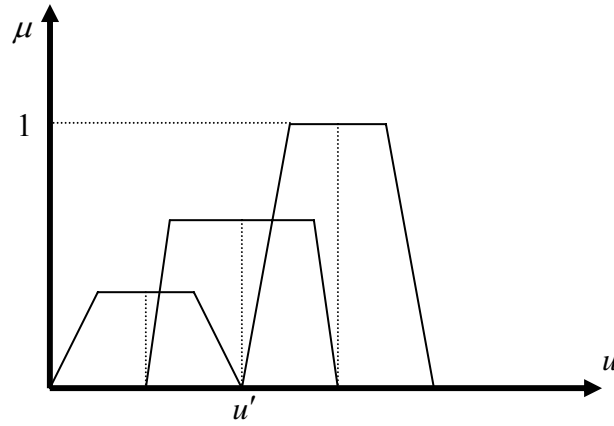


Şekil 4.5. Ağırlık merkez yöntemi ile netleştirme işlemi



- Ağırlıklı Ortalama Metodu (Weighted Average Method): Bu yöntem yalnızca simetrik çıkışlı üyelik fonksiyonları için kullanılmaktadır. Her bir simetrik üyelik değerinin tepe noktası değeri belirlenerek, ortalamaların alınmasıyla yapılmaktadır (Şekil 4.6).

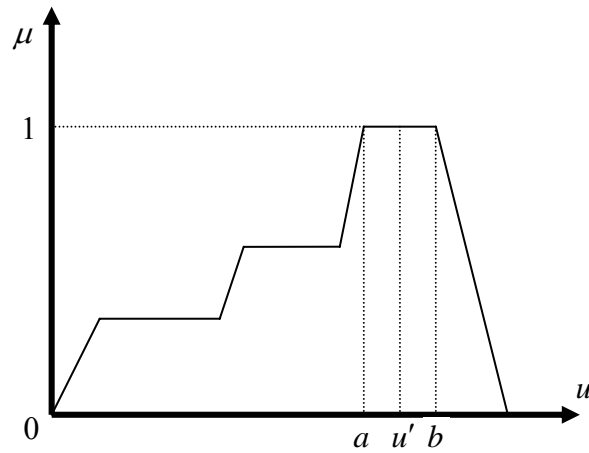
$$u' = \frac{\sum \mu(u).u}{\sum \mu(u)} \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Ağırlıklı ortalama yöntemi ile netleştirme işlemi

- Üyelik İşlevinin Max. Noktalarının Ortalaması (Mean - Maximum Membership=MOM): Yüksek noktaların ortası da denilen bu yöntem, ilk yöntemle aşağı yukarı benzerdir. Ancak üyelik işlevinin en yüksek noktası burada tek değildir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi bir dörtgen olabilmektedir.

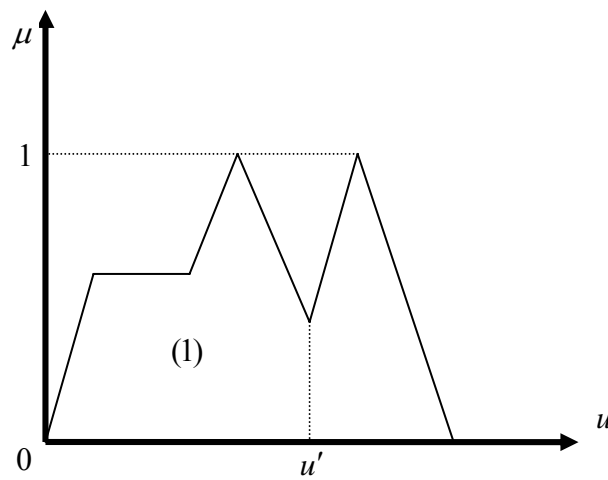
$$u' = \frac{a+b}{2} \quad (4.7)$$



Şekil 4.7. Maximum noktaların ortalaması yöntemi ile netleştirme işlemi

- Geniş Alan Merkezi (Center of Largest Area = COA): Eğer bulanık çıkarımlar en az iki tane dışbükey üyelik elamanından oluşuyorsa bu yöntem kullanılabilir. Bu yöntemde dışbükey olmayan üyelik değerlerinin bileşkeleri parçalanarak netleştirilir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi (1) numara ile belirlenmiş olan geniş alan ele alınmaktadır ki bu alan dışbükeydir.

$$u^* = \frac{\int \mu(z).zdz}{\int \mu(z)dz} \quad (4.8)$$



Şekil 4.8. Geniş Alan Merkezi Metodu İle Netleştirme İşlemi

- İlk veya Son Yükselti (First or last of maxima): Bu yöntem tüm bulanık çıkışlarda uygulanabilecek bir yöntemdir. Bileşkedeki en yüksek değer  $hgt(A_k) = \sup \mu_{A_k}(u)$  olmak üzere;

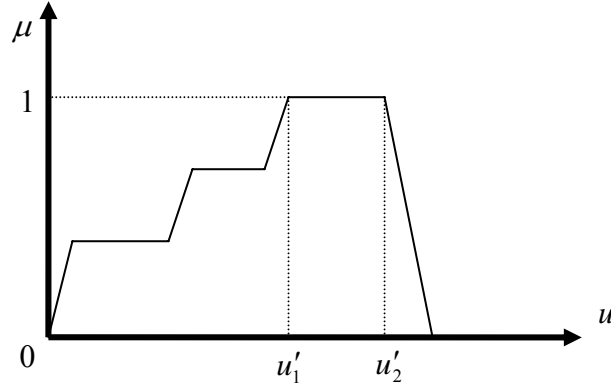
$(u \in U)$  ilk yükselti,

$$u^* = \inf \{u \in U \mid \mu_{A_k}(u) = hgt(A_k)\} \quad (4.9)$$

ya da son yükselti,

$$u^* = \sup\{u \in U \mid \mu_{A_k}(u) = hgt(A_k)\} \quad (4.10)$$

Burada sup (supremum), en düşük yüksek sınırı ve inf (infimum) da en yüksek düşük sınırı göstermektedir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ilk yükselti çözümü  $u_1^*$  veya son yükselti çözümü ise  $u_2^*$ ’dir.



Şekil 4.9. İlk veya son yükselti metodu ile netleştirme işlemi

#### 4.5. Bulanık Kontrol Sistemi Tasarımında İzlenen Adımlar

Yukarıda verilen bilgilerin ışığı altında tasarımda izlenen adımlar;

- Giriş, çıkış ve durum değişkenlerinin tanımlanması,
- Her bir değişkenin tanım uzayı içerisinde bulanık alt kümelere ayrılıp dilsel olarak adlandırılması,
- Her bir alt küme için üyelik fonksiyonunun atanması,
- Kural tabanını oluşturmak için giriş ve durum değişkenlerinin bulanık alt kümeleriyle çıkışın bulanık alt kümeleri arasındaki ilişkilerin atanması,
- Giriş ve çıkış değişkenlerinin ölçekleme faktörlerinin seçilmesi,
- Girişlerin bulanıklaştırılması,
- Kurallar incelenerek uygun bulanık çıkışın elde edilmesi,
- Elde edilen çıkışın netleştirilmesi.

#### 4.6. Bulanık Mantık Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Bulanık mantığın insan düşünme tarzına yakın olması, matematiksel modele ihtiyaç duymaması, uzman kişi yerine geçebilmesi, hızlı olması ve ucuza mal olması ve doğrusal olmayan işlemlerde kullanılabilir olması en büyük avantajlarıdır.

Bunun yanı sıra bulanık mantık sistemlerinin genel bir tasarım metodunun olmaması, kullandıkları kuralların mutlaka uzman deneyimlerine bağlı olarak oluşturulması, üyelik fonksiyonlarının deneme-yanılma ile bulunmasında oluşabilecek zaman kaybı ve bulanık mantık sistemlerinin kararlılık analizinin yapılmasının zorluğu başlıca dezavantajlarını oluşturmaktadır.

#### 4.7. Mühendislik Bakış Açısıyla Bulanık Mantığın Sınırları

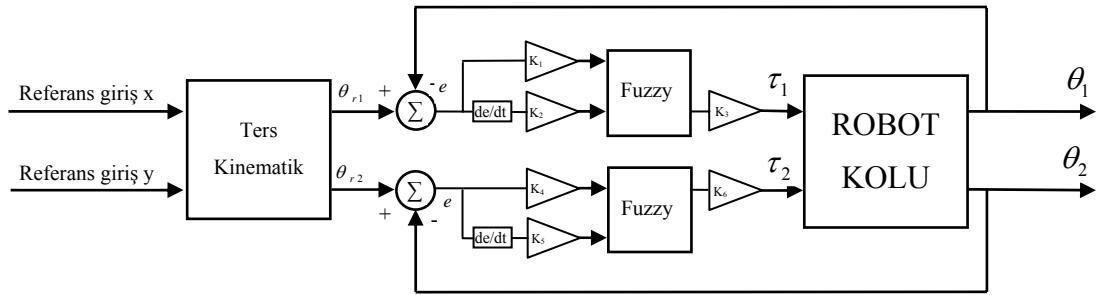
- Bulanık mantık , bilinen çözümü olmayan problemleri çözemez ; bir uzmanın bilgisini gerektirir. Problemi çözecek bir uzman olduğunda özellikle yararlıdır, ama izlenecek matematiksel model yoktur. Hiç kimse problemin nasıl çözüleceğini bilmiyorsa , kurallar düşünüp bulamaz ve bulanık mantık ilkeleri uygulanamaz.
- Bulanık mantık algoritmasının, problem çözme sırasında ve sonrasında üyelik fonksiyonlarını veya kurallarını öğrenme yeteneği yoktur.
- Özellikle güvenliğin anahtar etmen olduğu durumlarda geniş ölçüde doğrulama ve onaylama gerektirir.
- Bulanık bir sistemin test edilmeden önce dengesinin belirlenmesi karmaşıktır ve dengeyi saptamada standart, basit bir yol yoktur.

#### 4.8. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları

Tasarlanmış olan kontrol sistemiyle kontrolöre ait kazanç değerleri ve gerekli parametrelerin kullanıcı tarafından sistem üzerinde manuel uygulanabilmesiyle beraber gerekli değerlendirmelerin yapılabilmesi için bir robot sistemi tasarlanmıştır. Simülasyon çalışmasında kullanılan sisteme ait blok diyagramı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu Tablo 4.2'te gösterilmiştir. Robot kolu sistemi simetrik davranış gösterdiği için simetrik kural

tablosu kullanılmıştır. Bulanık kontrol kuralları sistem davranışının incelenmesiyle elde edilir. Her bir kontrolör hata değeri için açıcı ve hatanın değişimi olarak açının türevi olmak üzere ikişer giriş, çıkış olarak ta robota ait her bir kola uygulanacak tork değeri için birer çıkışa sahiptir. Kontrolörde kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.3'te gösterildiği üzere istenilen değerler için kullanıcıya kolaylık sağlaması amacıyla -1 ve +1 durum uzayında tanımlanmış olup katsayı çarpımları yapılarak normalize edilmiş evren ifadesini işlem bölgesine uygun hale getirerek istenen değerler arasına taşımak mümkündür. Çoğu bulanık mantık kontrolörleri uzman deneyimi ve bilgisine dayanarak oluşturulur. Ancak, çoğu durumda bir uzmana ulaşamaz. Bundan dolayı, bulanık kontrol parametrelerinin bulunmasında genellikle deneme yanılma metodu kullanılır [10].

Bulanık kontrolör sisteminde birinci kontrolöre gelen hata değerinin kazanç katsayısı  $K_1 = 0.5$ , hata değişiminin katsayısı  $K_2 = 0.03$  ve çıkış değeri olan tork değerinin katsayısı  $K_3 = -200000$ ; ikinci kontrolöre gelen hata değerinin kazanç katsayısı  $K_4 = -0.4$ , hata değişiminin katsayısı  $K_5 = -0.015$  ve çıkış değeri olan tork değerinin katsayısı  $K_6 = 200000$  değerleri verilerek sistem çalıştırılmıştır. Bu değerler deneme ve yanılma metoduyla seçilen kazanç değerleri ile sistemin çeşitli başarımları elde edilebilir. Ancak, hangi kazançların sistemin başarımına en iyi uygun olup olmadığını bulmak zordur. Bundan dolayı, bu kontrolörün başarımını en iyi duruma getirmek için genetik algoritma kullanılacaktır. Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan üyelik fonksiyonları ve de tanımlanan kural tablosu ile yapılan çalışmalar sonucu edinilen sisteme parametrelerin girilmesi sonucunda istenen durumlar için robot sisteminin vermiş olduğu cevaplar alınmış ve de simülasyon sonucu olarak elde edilen veriler Tablo 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Bulanık kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı

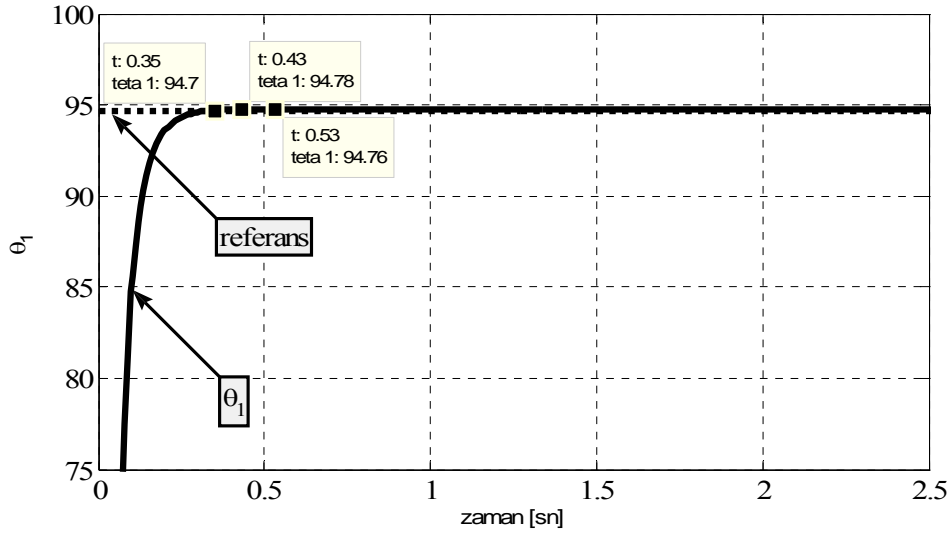
Tablo 4.2. Bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu

$e$ $de/dt$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	Z
NS	PB	PS	PS	Z	NS
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PS	PS	Z	NS	NS	NB
PB	Z	NS	NS	NB	NB

#### 4.8.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi

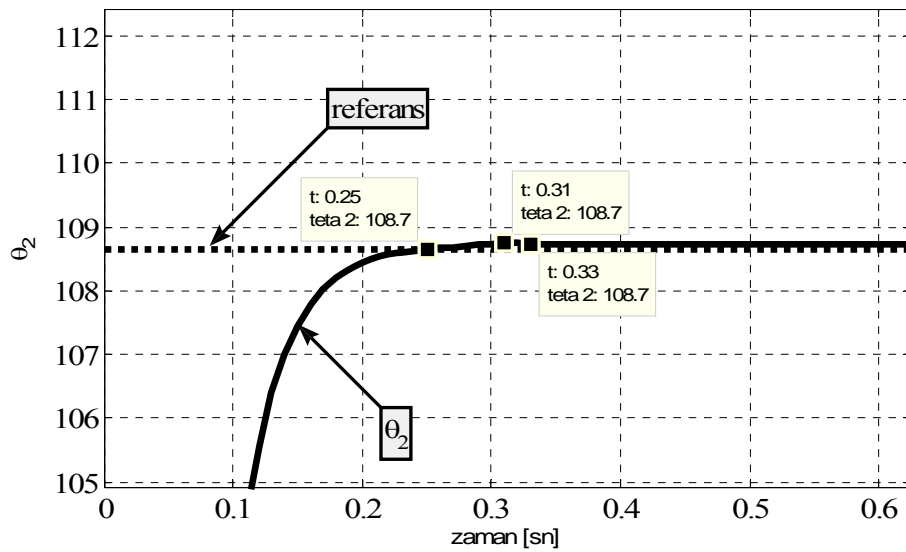
Bulanık kontrolörlü robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

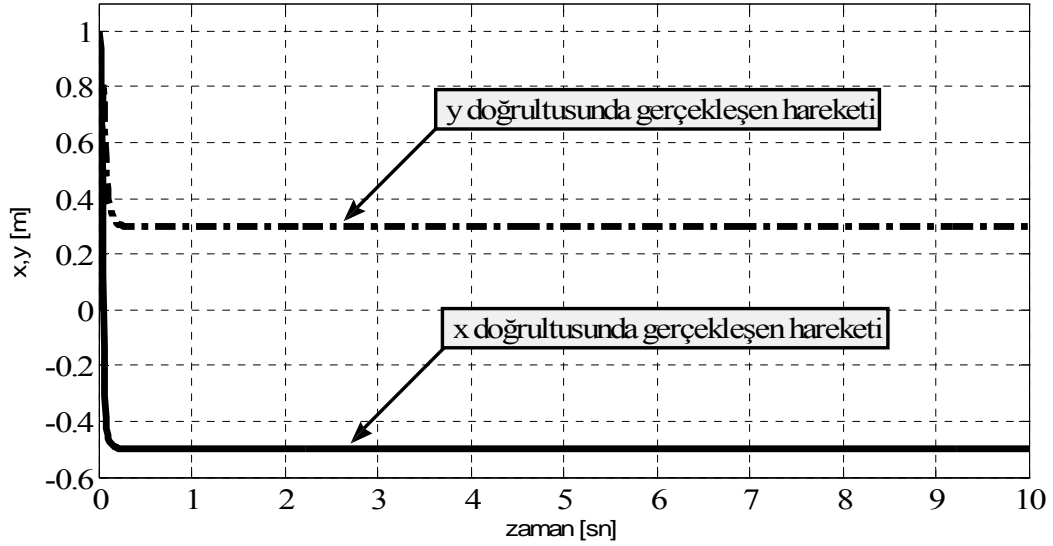
- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

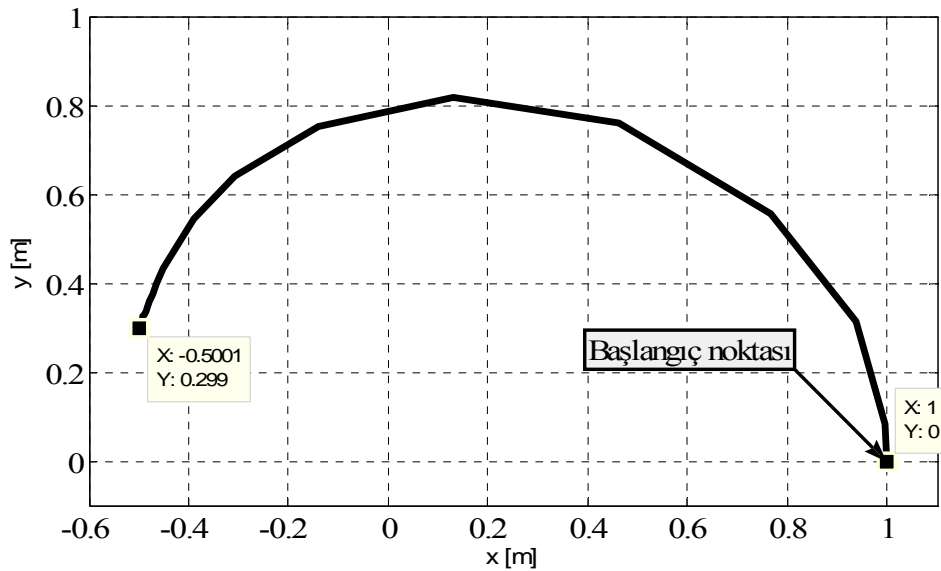


- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.14'te gösterilmiştir.

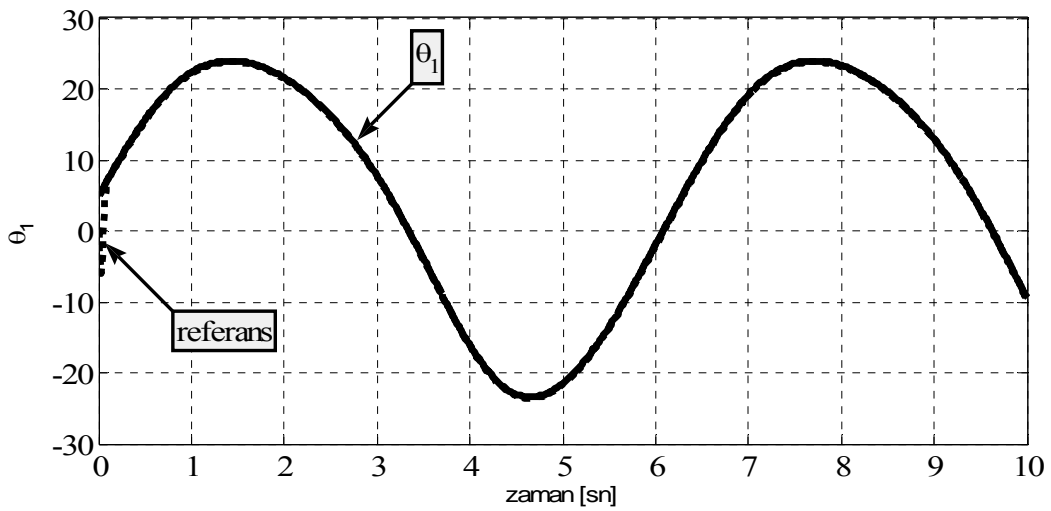


Şekil 4.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

#### 4.8.2. Verilen bir izin takibi

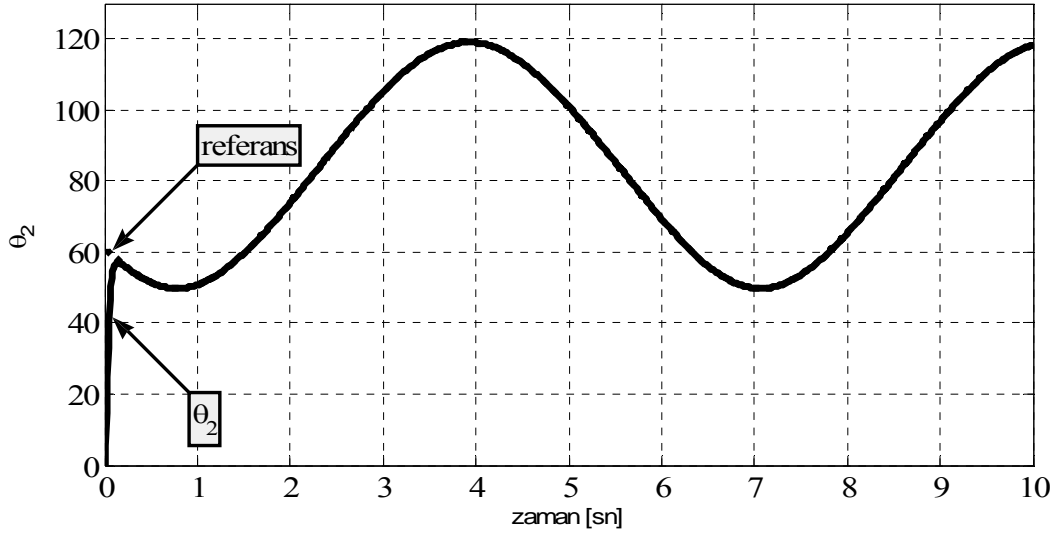
Bulanık kontrolörlü robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izin takibine  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.15'te gösterilmiştir.



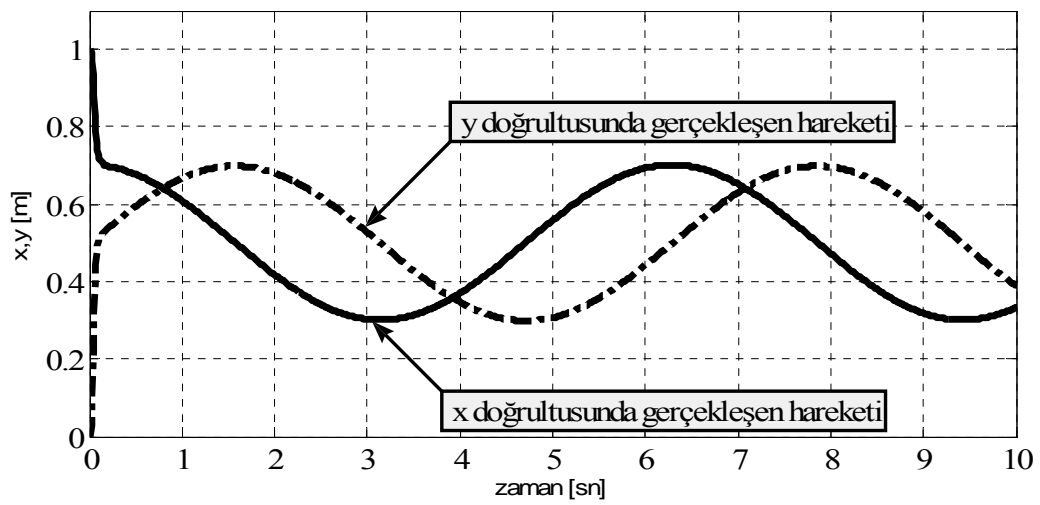
Şekil 4.15.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takibine  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.16’da gösterilmiştir.



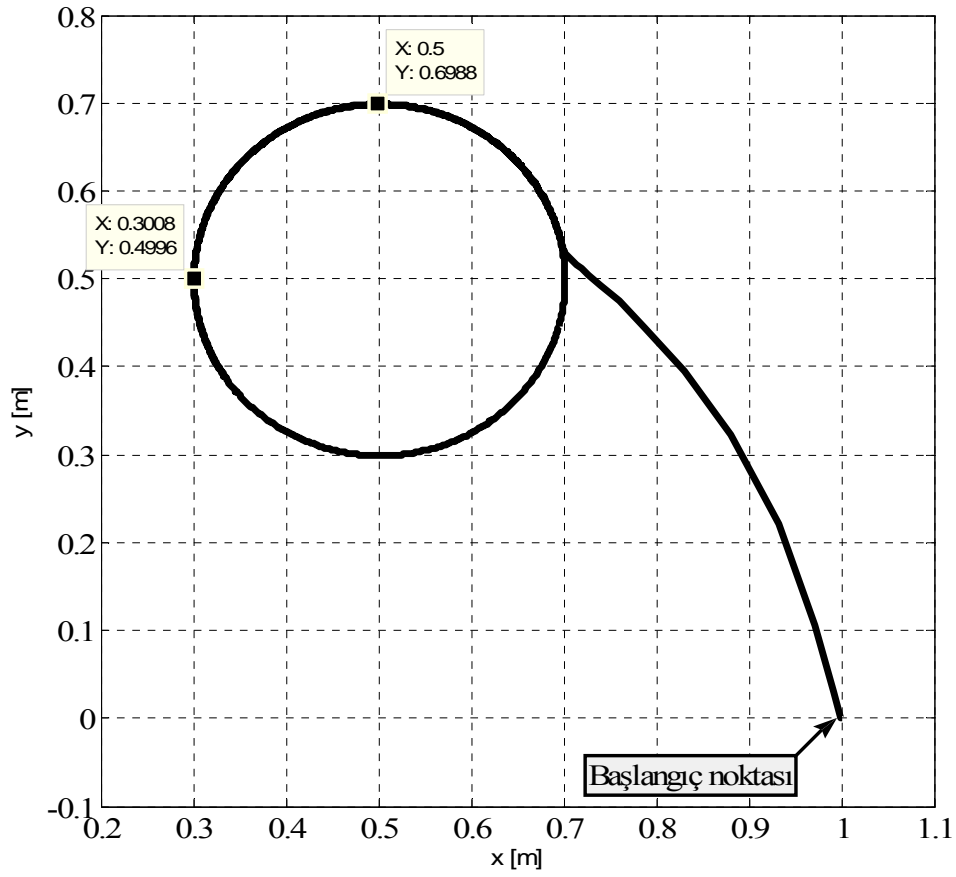
Şekil 4.16.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir daire çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

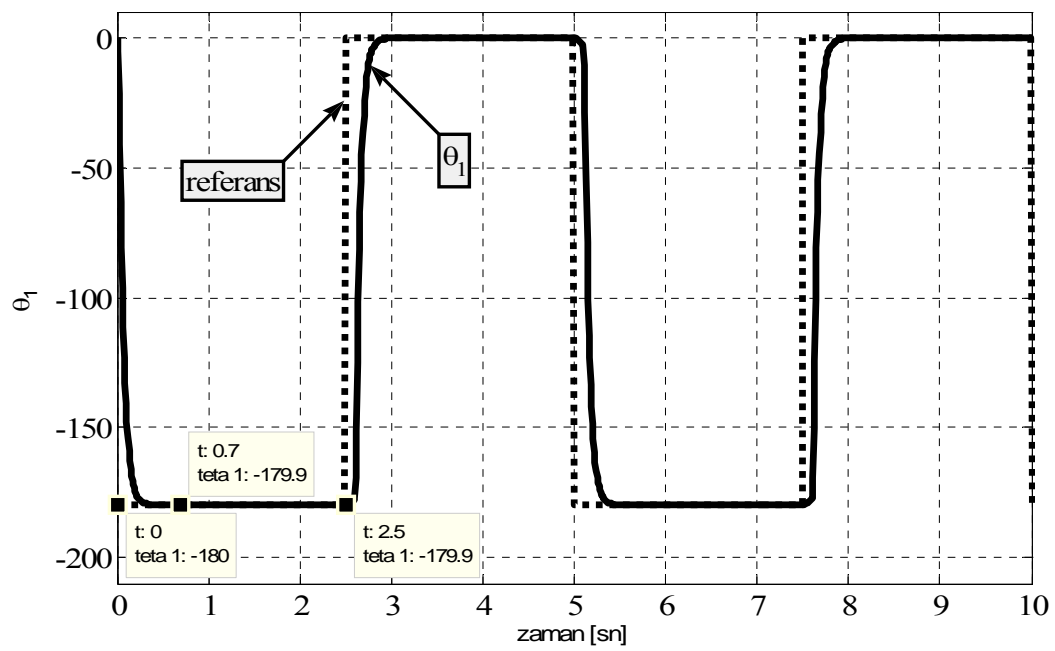


Şekil 4.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 4.8.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi

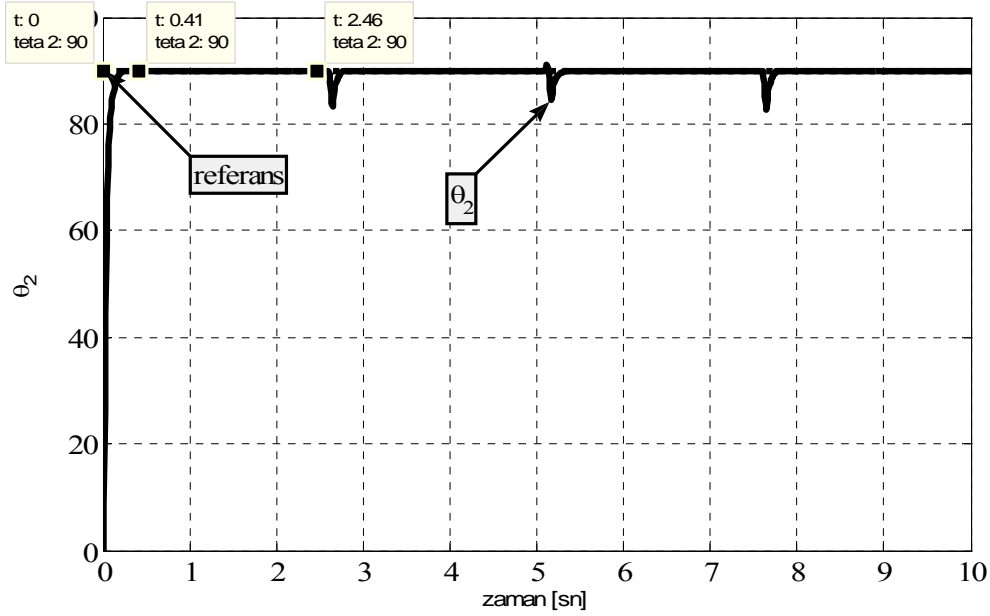
Bulanık kontrolörlü robot kolunun

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



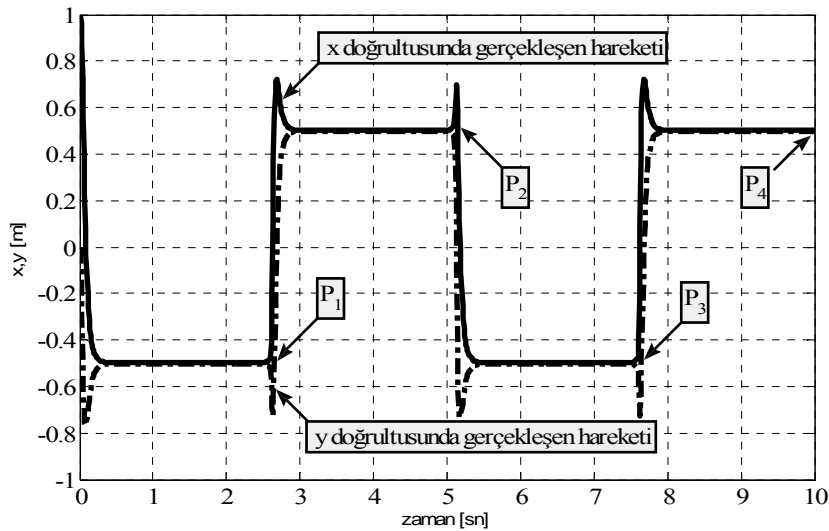
Şekil 4.19.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



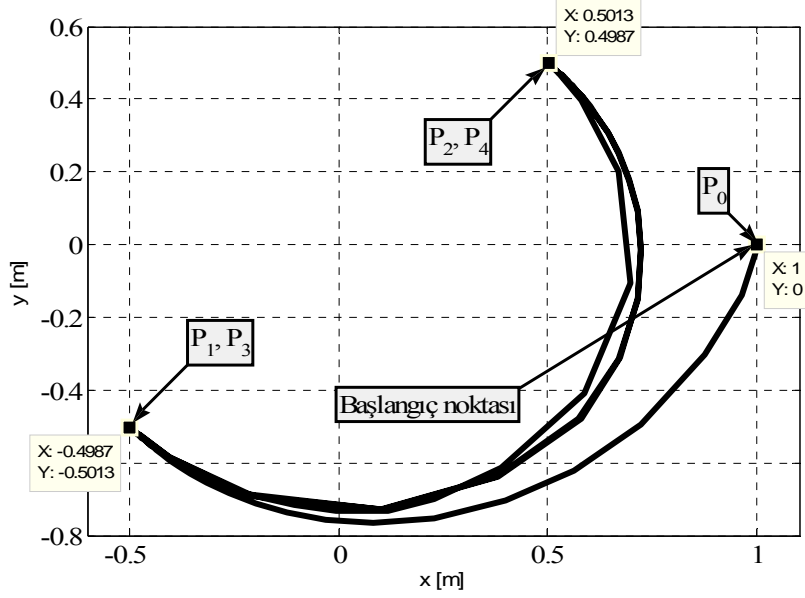
Şekil 4.20.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.21’de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

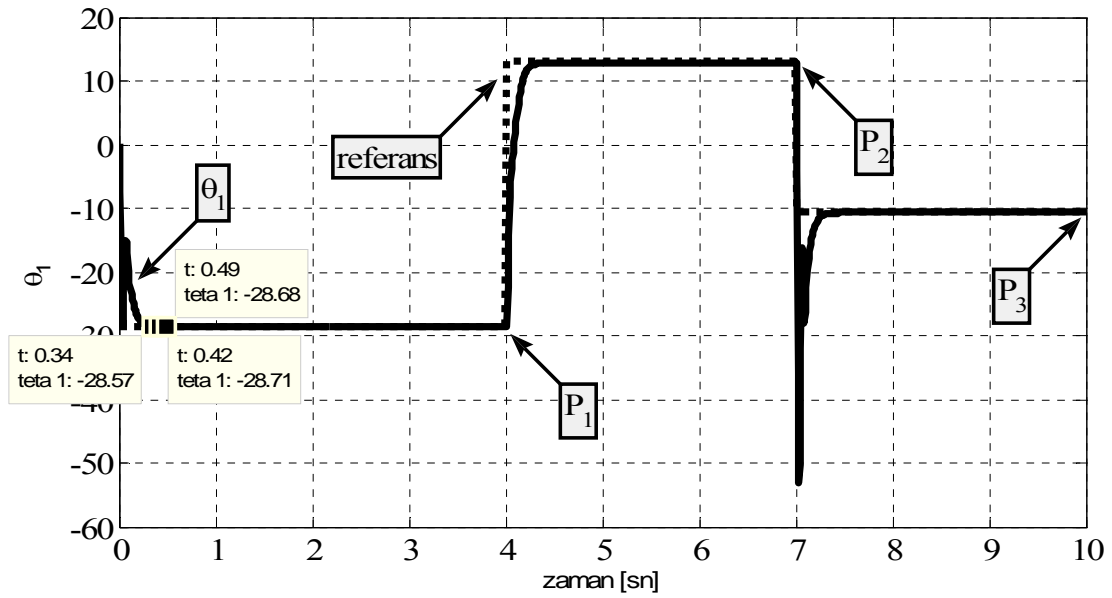


Şekil 4.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

#### 4.8.4. Başlangıç noktasından verilen 3 noktaya hareketi

Bulanık kontrolöre sahip robot kolu

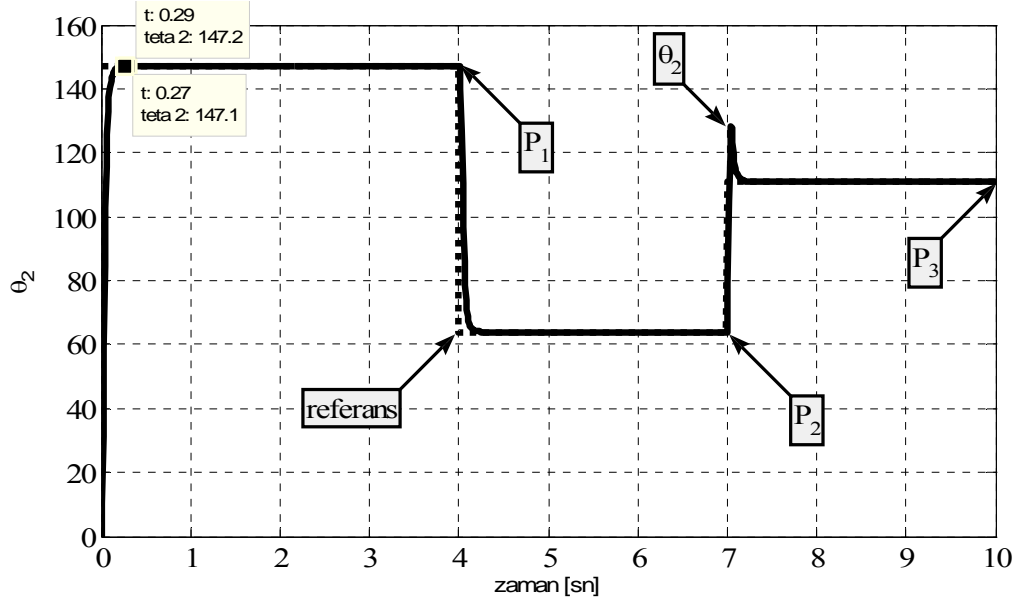
- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

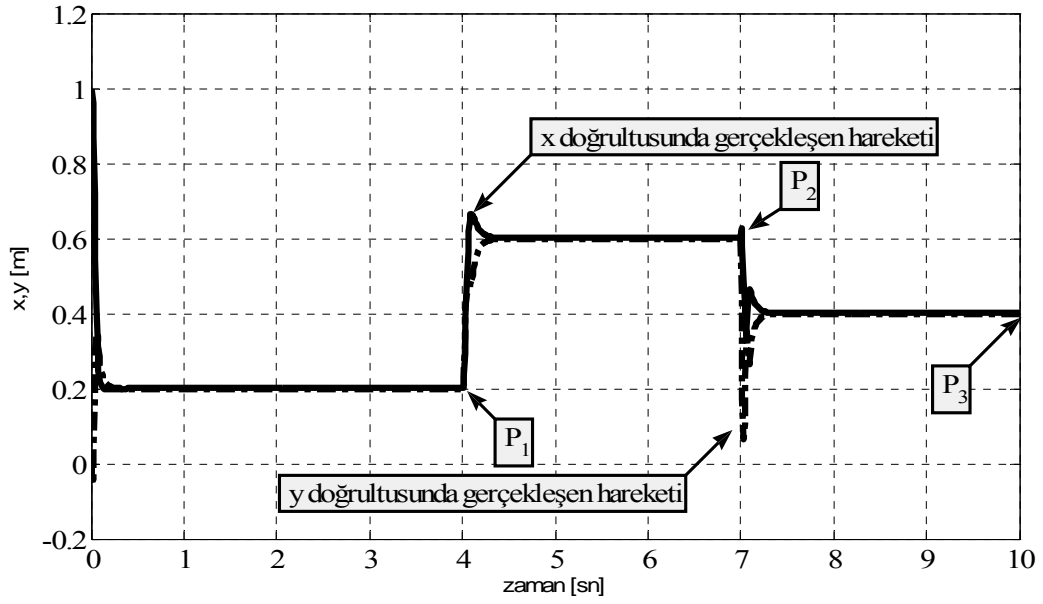


- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



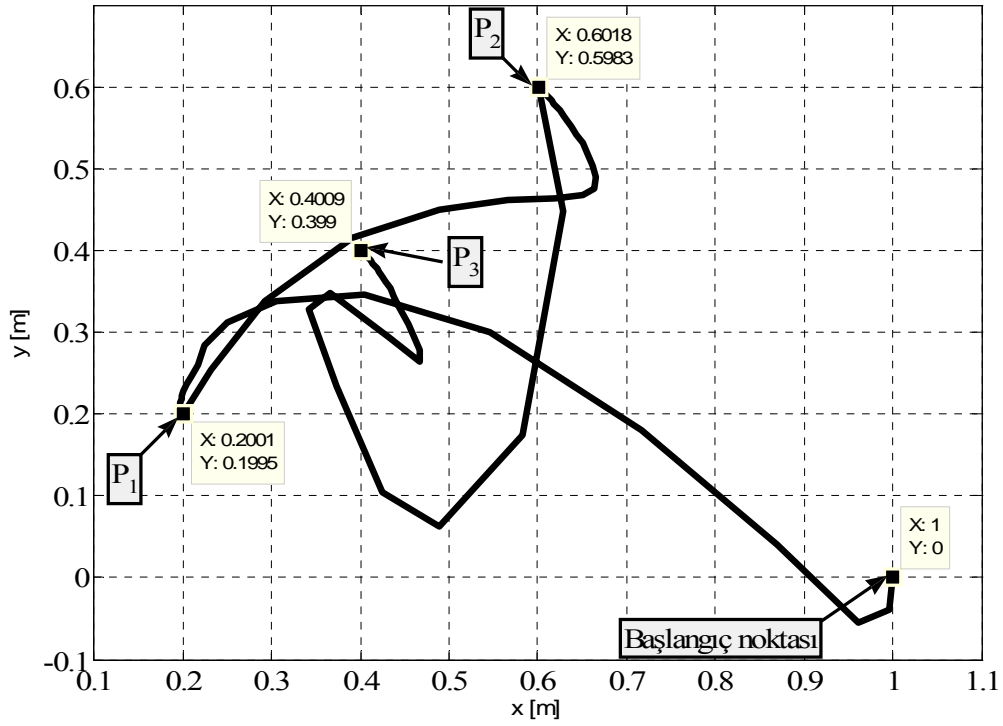
Şekil 4.24.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sistemine verdiği cevabı Şekil 4.26'da gösterilmiştir.

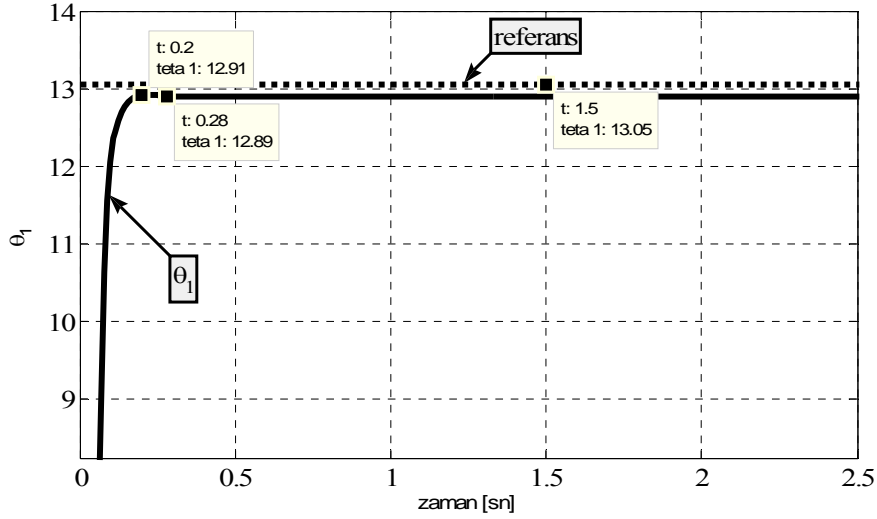


Şekil 4.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

#### 4.8.5. Birbirine simetrik verilen 4 noktaya hareketi

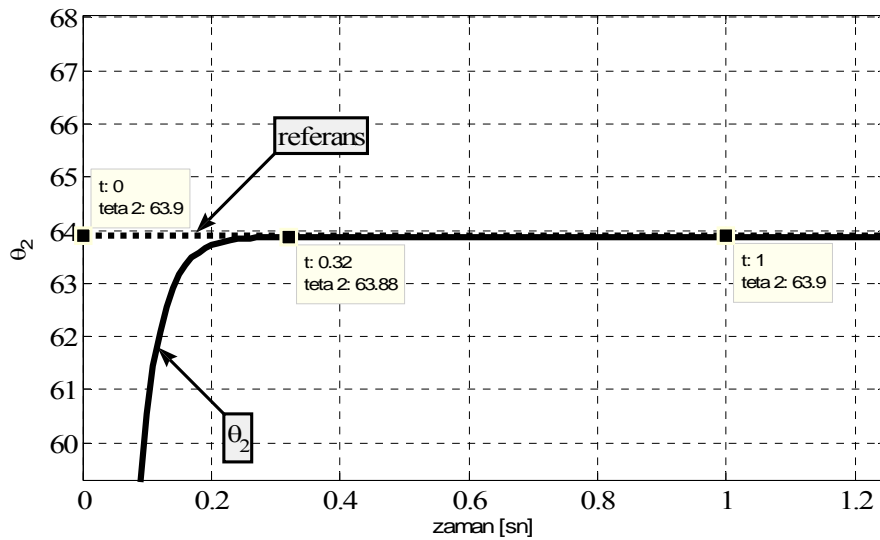
Bulanık kontrolöre sahip robot kolu

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



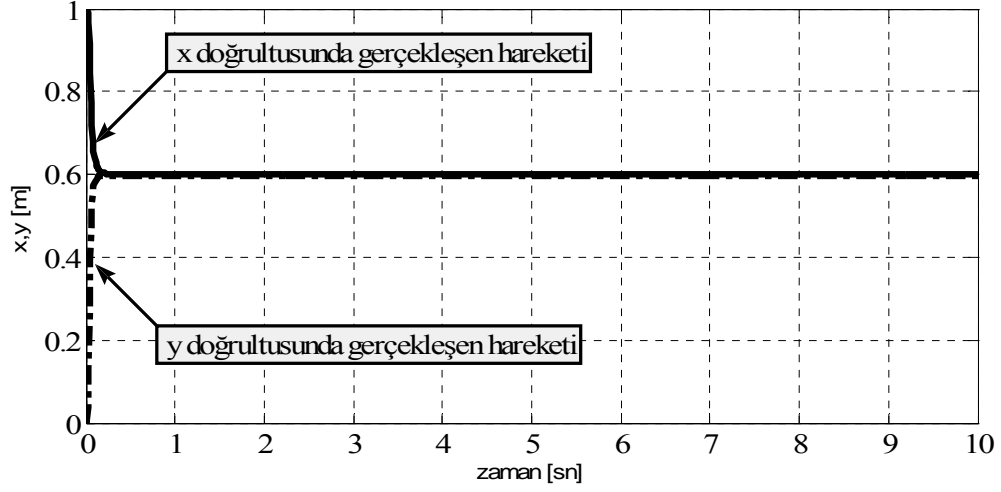
Şekil 4.27.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.28’de gösterilmiştir.



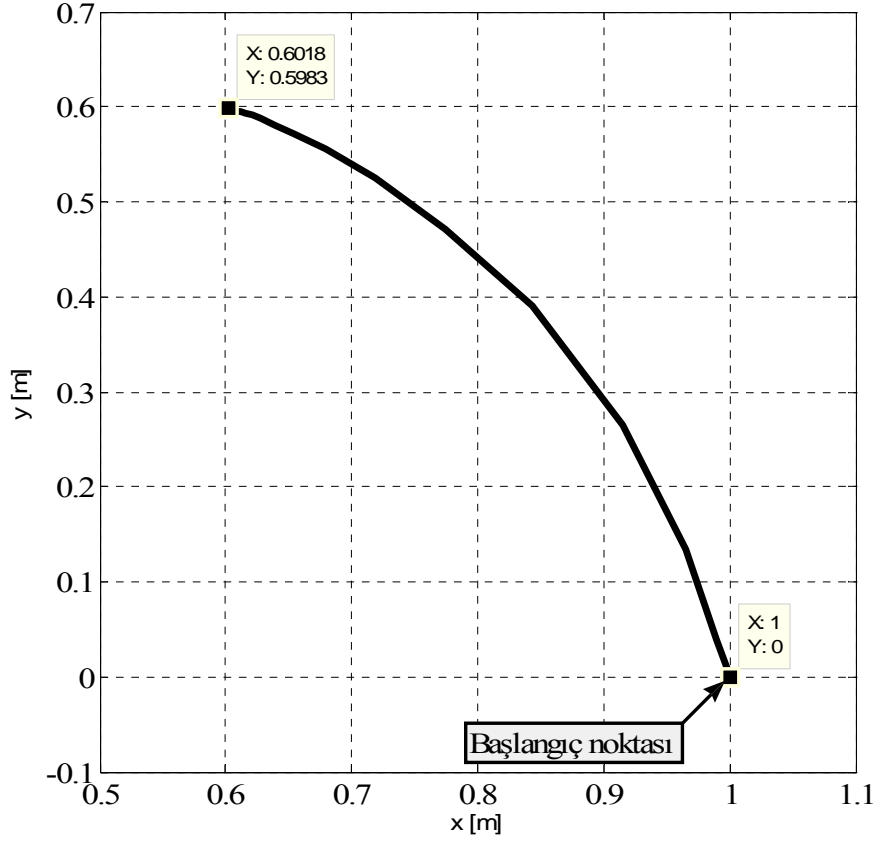
Şekil 4.28.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.29'da gösterilmiştir.



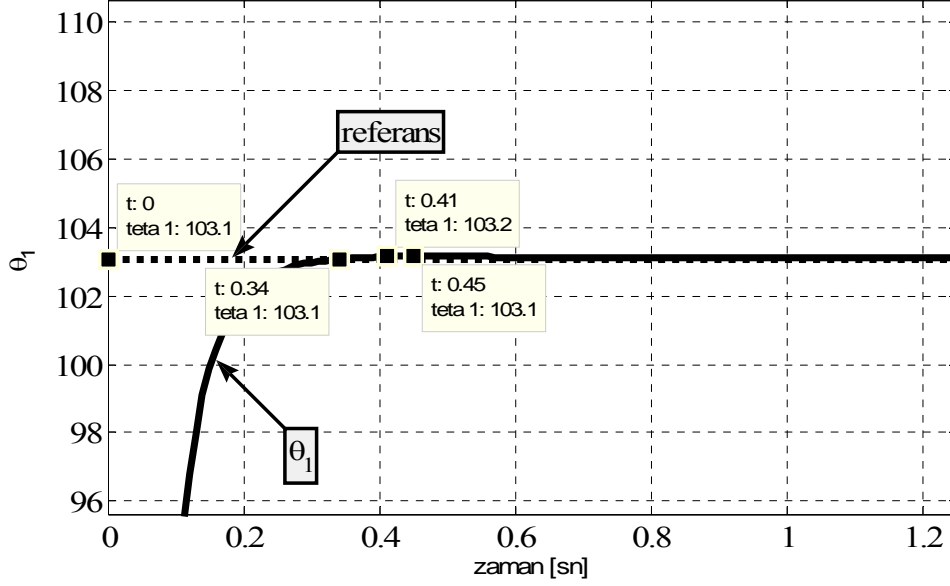
Şekil 4.29. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



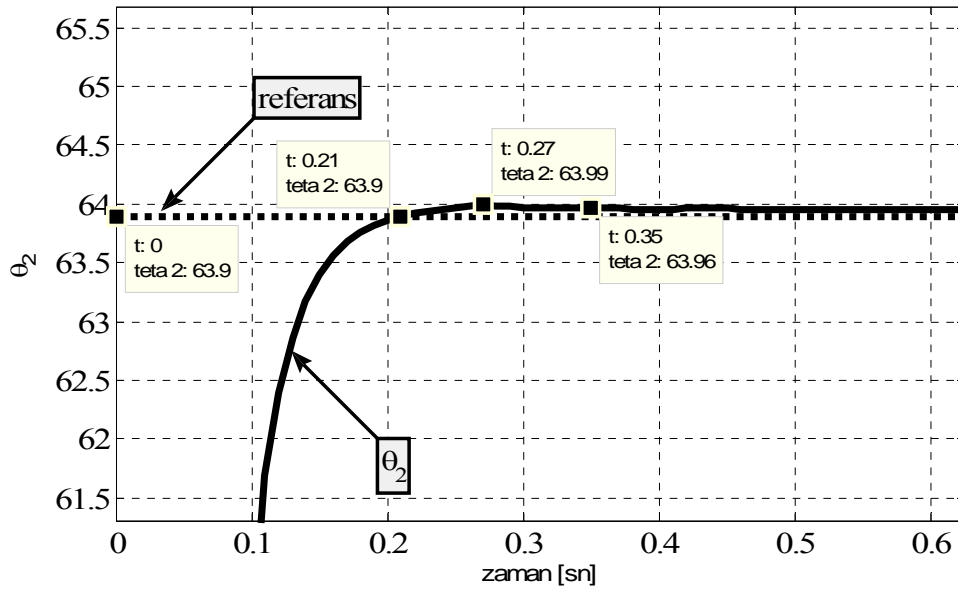
Şekil 4.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



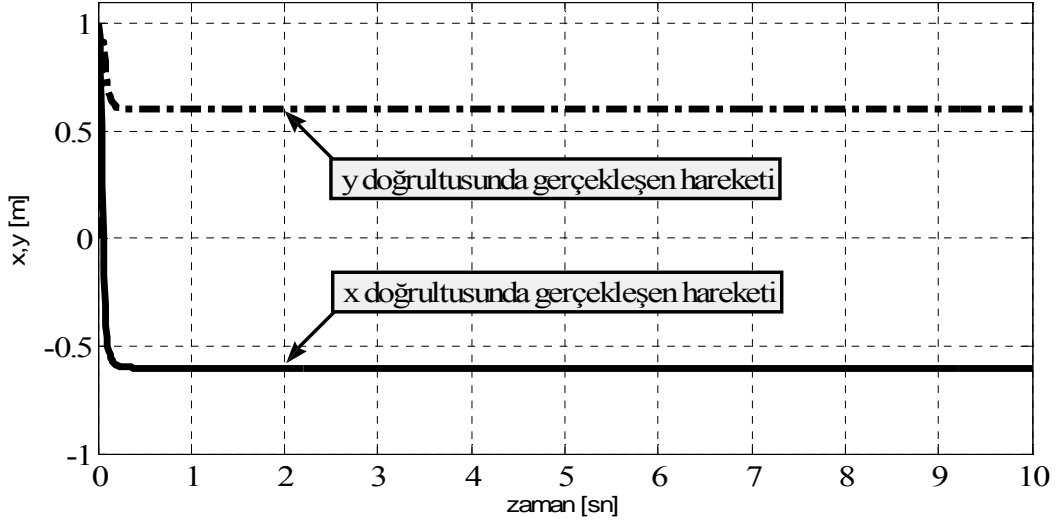
Şekil 4.31.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



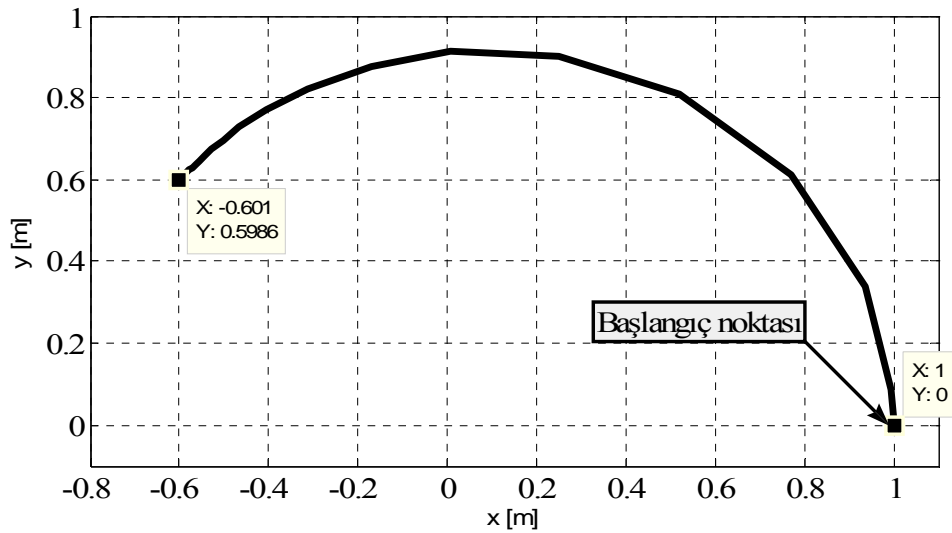
Şekil 4.32.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

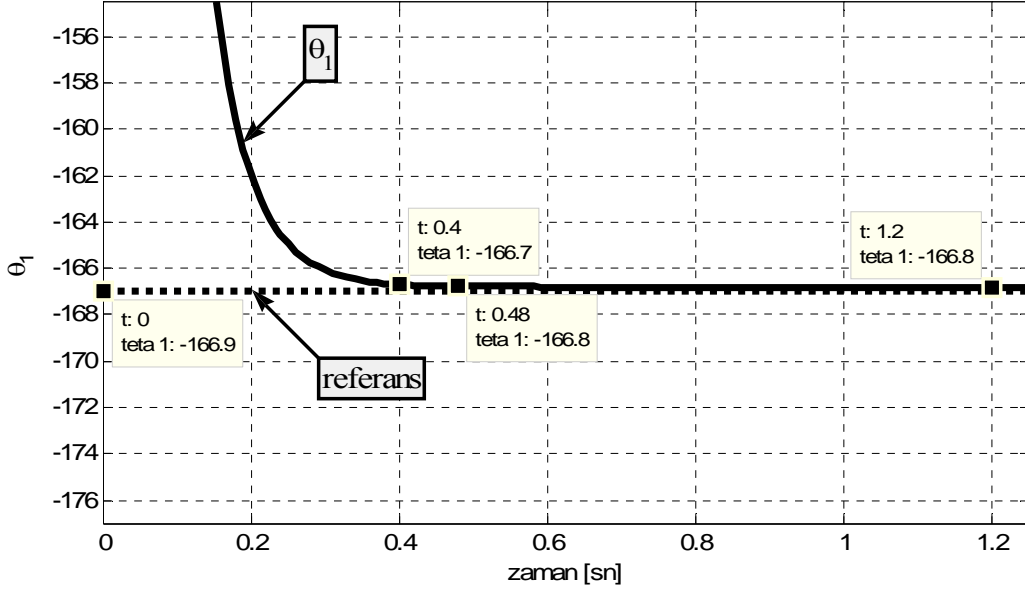
- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.34'te gösterilmiştir.



Şekil 4.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

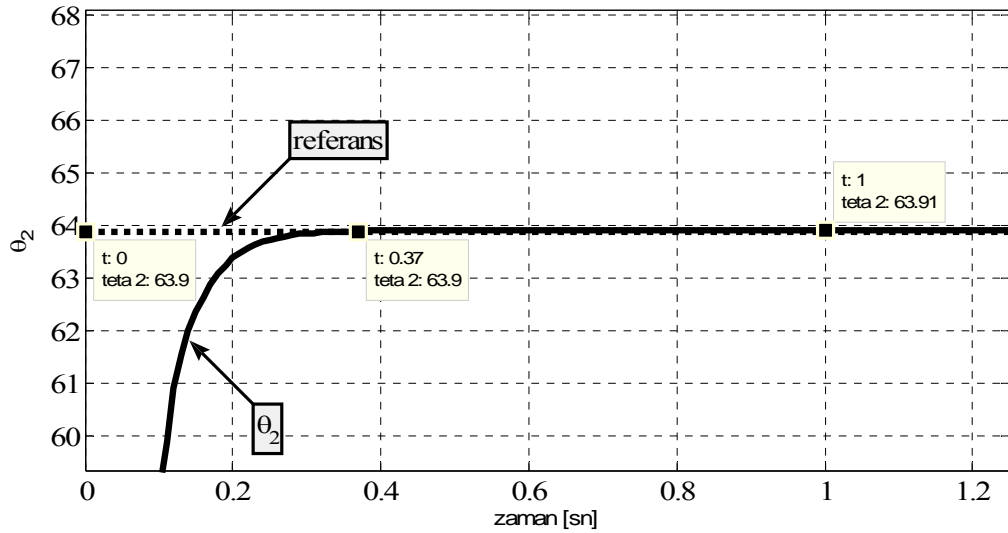


- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



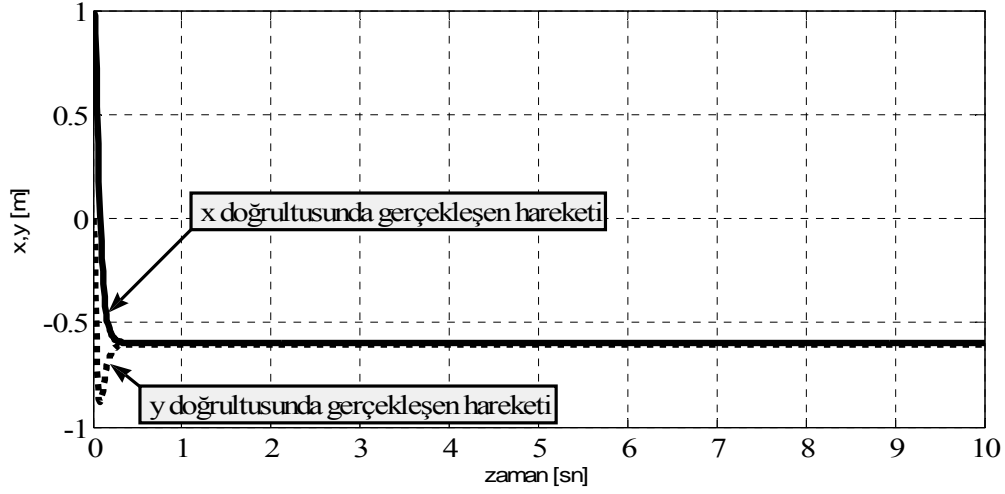
Şekil 4.35.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.36'da gösterilmiştir.



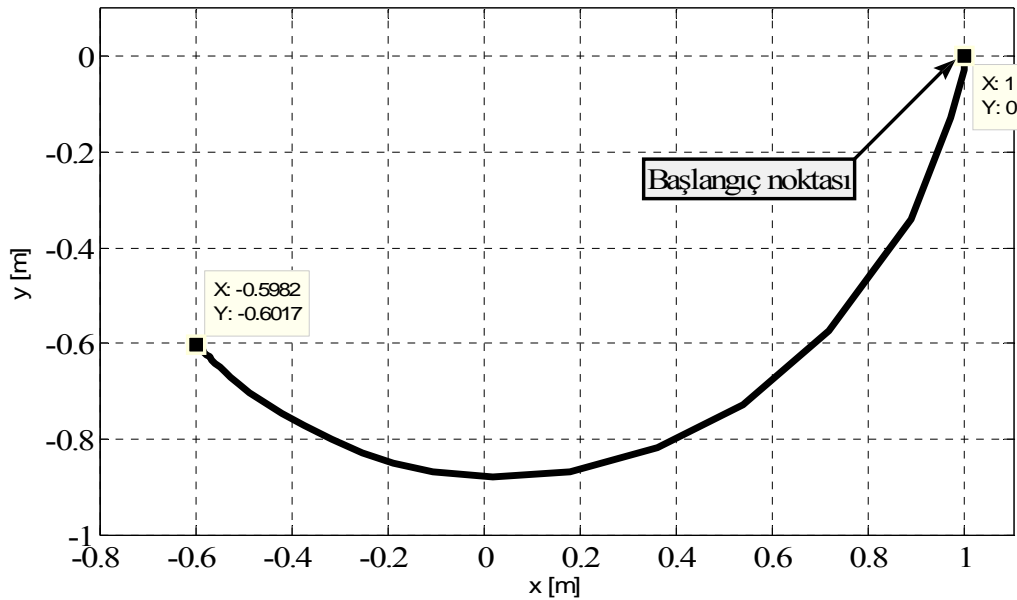
Şekil 4.36.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.37’de gösterilmiştir.



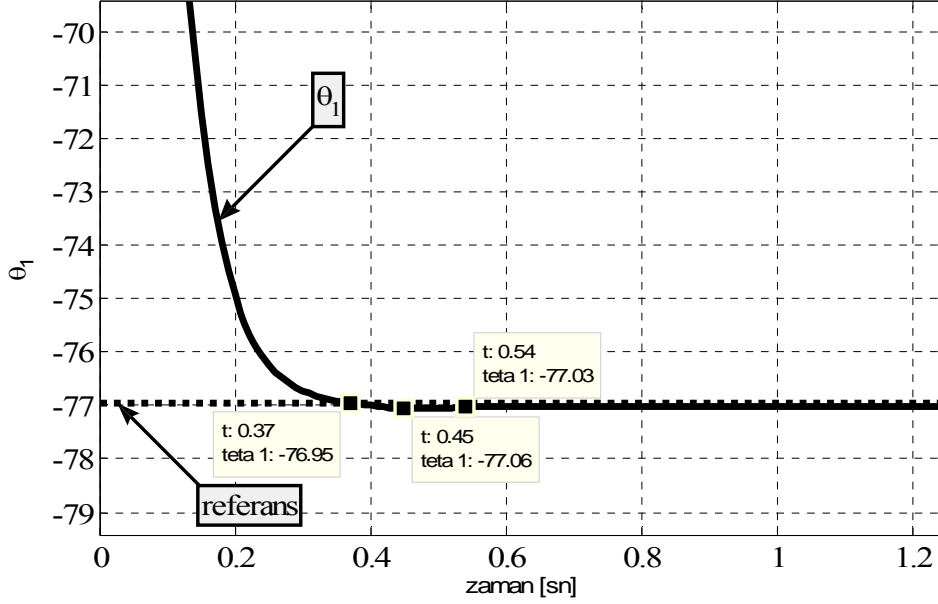
Şekil 4.37. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



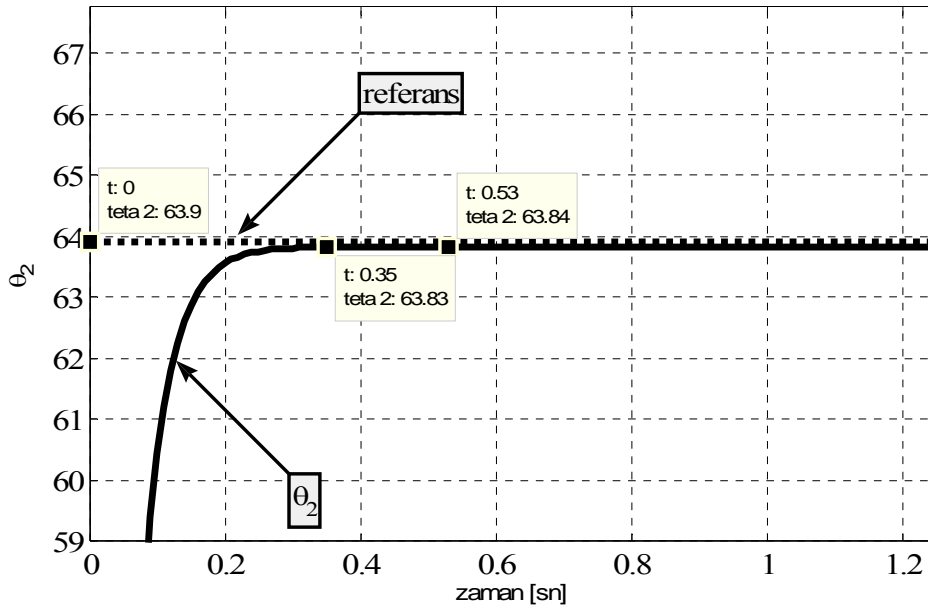
Şekil 4.38. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



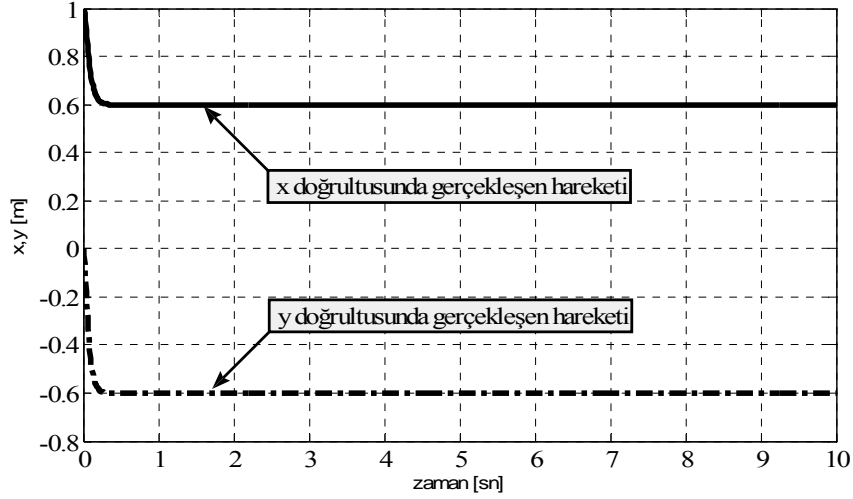
Şekil 4.39.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



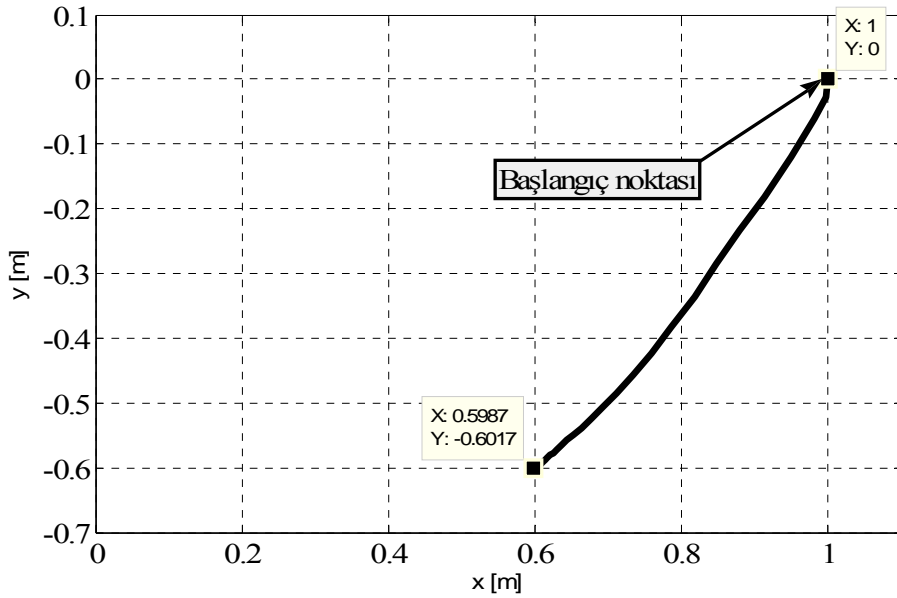
Şekil 4.40.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.42’de gösterilmiştir.

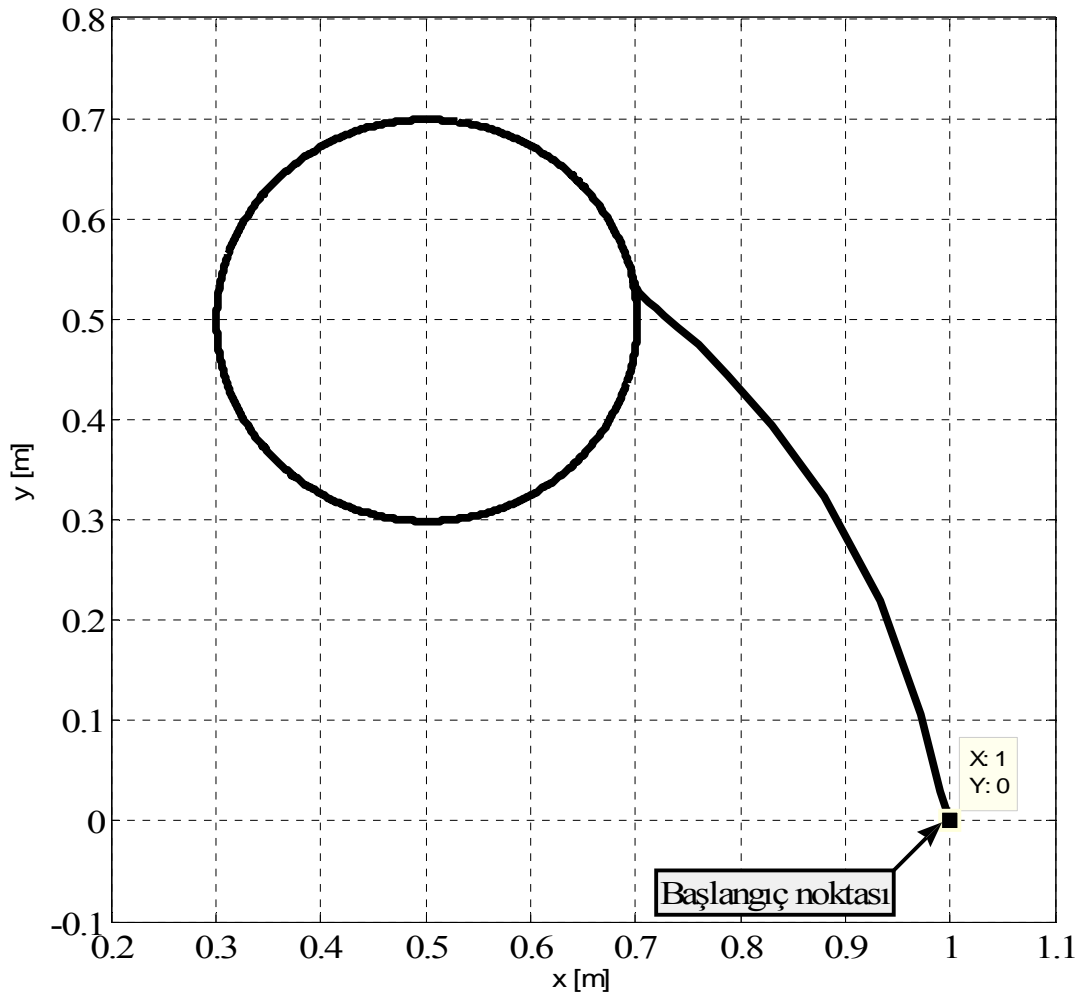


Şekil 4.42. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

#### 4.8.6. Dayanıklılık

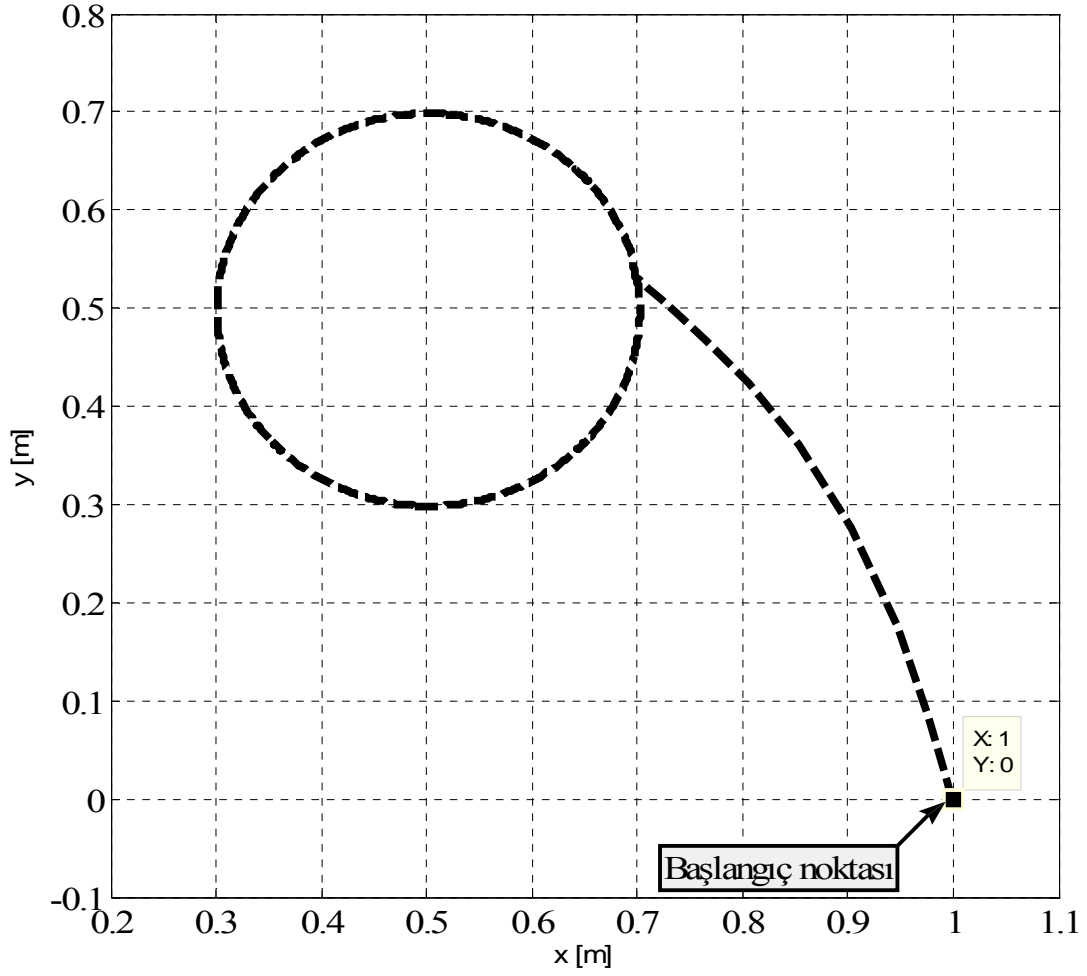
Bulanık kontrolöre sahip robot kolu

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 0 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



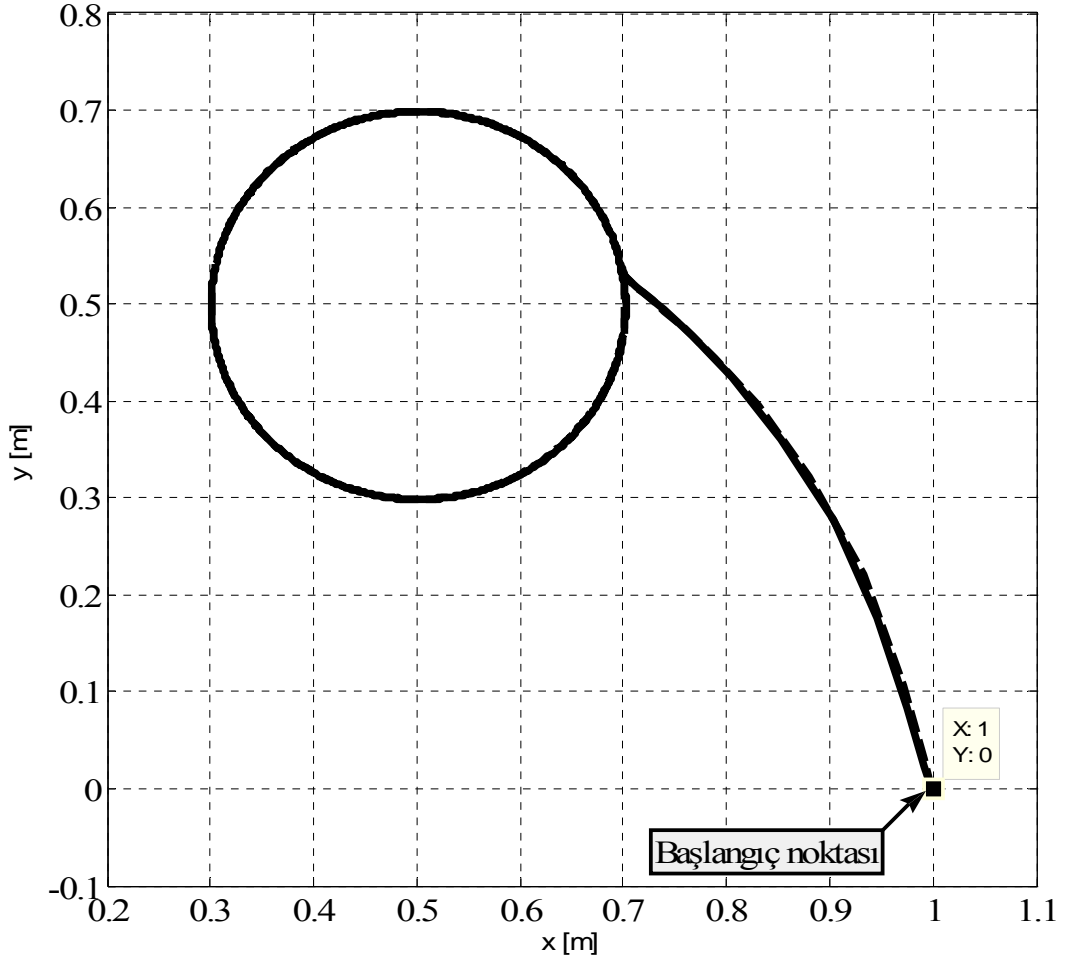
Şekil 4.43. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 20 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 4.44'te gösterilmiştir.



Şekil 4.44. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının 0 kg. ve 20 kg. yükler altında x ve y koordinat sisteminde verdiği her iki cevap Şekil 4.45'te gösterilmiştir.



Şekil 4.45. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerin düzenlenmesiyle aşağıdaki Tablo 4.3 elde edilmiştir.

Tablo 4.3. Bulanık kontrolör başarımlar sonuç tablosu

$P(x, y)$	$\theta_i$	$tr$ [sn]	$Mp$ [%]	$ts$ [sn]	$e_{ss}$ [sn]
$P(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.35	0.08	0.53	0.06
	$\theta_2$	0.25	0.08	0.33	0
Çember $r : 0.2m$ $H(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.13	0.15	0.17	0.14
	$\theta_2$	0.21	0.03	1.76	0
Kare Dalga genlik : 0.5 frekans : 0.2Hz	$\theta_1$	0.7	0	0.7	0.17
	$\theta_2$	0.41	0	0.41	0
$t : 0 - 4sn$ $P_1(0.2, 0.2)$  $t : 4 - 7sn$ $P_2(0.6, 0.6)$  $t : 7 - 10sn$ $P_3(0.4, 0.4)$	$\theta_1$	0.34	-0.14	0.49	0.11
	$\theta_2$	0.27	0.04	0.49	0.03
$P_1(0.6, 0.6)$	$\theta_1$	0.2	0	0.28	0.16
	$\theta_2$	0.32	0	0.32	0.02
$P_2(-0.6, 0.6)$	$\theta_1$	0.34	0.11	0.45	0.08
	$\theta_2$	0.21	0.09	0.35	0.06
$P_3(-0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.48	0	0.48	0.18
	$\theta_2$	0.37	0.01	1	0
$P_4(0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.37	-0.11	0.54	0.08
	$\theta_2$	0.53	0	0.53	0.06



## **BÖLÜM 5. ROBOTLARDA GENETİK ALGORİTMA TABANLI BULANIK MANTIK KONTROLÜ**

### **5.1. Genetik Algoritma**

#### **5.1.1. Giriş**

Genetik algoritmalar çözüm uzayının belirlenmesinde güvenilir ve iyi bir metot olup biyolojik evrim teorisinde var olan doğal ayıklama ve bir çok benzer terimlerden esinlenmiştir. Herhangi bir problemin genetik algoritmalar ile çözümü, problemi sanal olarak evrimden geçirmek suretiyle yapılmaktadır.

Evrimsel hesaplama ilk olarak 1960'larda I.Rechenberg tarafından "Evrimsel Stratejileri (Evolutionstrategie)" isimli eserinde tanıtılmıştır. Onun fikri daha sonra başka araştırmacıların da ilgisini çekmiş ve geliştirilmiştir. John Holland evrim sürecinin bir bilgisayar yardımıyla kullanılarak, bilgisayara anlayamadığı çözüm yöntemlerinin öğretilebileceğini düşündü. Genetik Algoritma (GA) böylece John Holland tarafından bu düşüncenin bir sonucu olarak bulundu. Onun öğrencileri ve arkadaşları tarafından geliştirildi ve bu sayede Holland'ın kitabı "Doğal ve Yapay Sistemlerde Adaptasyon (Adaptation in Natural and Artificial Systems)" 1975 yılında yayınlandı.

1992 yılında John Koza genetik algoritmayı kullanarak çeşitli görevleri yerine getiren programlar geliştirdi. Bu metoda Genetik Programlama adını verdi [11].

Genetik algoritma geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkansız olan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Çok genel anlamda genetik algoritmanın üç uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlar deneysel çalışmalarda en iyileme, pratik endüstriyel uygulamalar ve sınıflandırma sistemleridir.

Mühendislik problemlerinde en iyileme amaçlı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle mekanizma tasarımında çok iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Bunlardan başka otomatik programlama, öğrenme kabiliyetli makinalar, ekonomi, ekoloji, planlama, üretim hattı yerleşimi gibi alanlarda da uygulanmaktadır. Ayrıca dijital resim işleme tekniğinde de çokça uygulama alanı bulmuştur.

Bu problemlerin hemen hemen hepsi çok geniş bir çözüm havzasının taranmasını gerektirmektedir. Bu çözüm havzasının geleneksel yöntemlerle taranması çok uzun sürmekte, genetik algoritmayla ise kısa bir sürede kabul edilebilir bir sonuç alınabilmektedir [11,12].

### 5.1.2. Genetik algoritma tekniği

Algoritma ilk olarak popülasyon diye ifade edilen ve kromozomlardan meydana gelen bir çözüm seti ile başlatılır. Bir kromozomda en iyi edilen değişkenler için olanaklı değerlerin kodlandığı dizidir. Bir popülasyondan alınan sonuçlar bir öncekinden daha iyi olacağı beklenen yeni bir popülasyon oluşturmak için kullanılır. Yeni popülasyon oluşturulması için seçilen çözümler uyumluluklarına göre seçilir. Çünkü uyumlu olanların daha iyi sonuçlar üretmesi olasıdır. Bu istenen çözüm sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Genetik algoritmanın aşamaları aşağıda sıralandığı gibi gerçekleşmektedir.

- i. Başlangıç: (n) adet kromozom içeren popülasyonun oluşturulması (problemin uygun bir çözümü),
- ii. Uyumluluk: Her (x) kromozomu için uyumluluğun  $f(x)$  değerlendirilmesi,
- iii. Yeni popülasyon: Yeni popülasyon oluşuncaya kadar aşağıdaki adımların tekrar edilmesi,
- iv. Seçim: İki ebeveyn kromozomun uyumluluğuna göre seçimi (daha iyi uyum seçilme şansını artırır),
- v. Çaprazlama: Yeni bir fert oluşturmak için ebeveynlerin bir çaprazlama olasılığına göre çaprazlanması. Eğer çaprazlama yapılmazsa yeni fert anne veya babanın kopyası olacaktır,
- vi. Mutasyon: Yeni ferdin mutasyon olasılığına göre kromozom içindeki konumu değiştirilir,

- vii. Ekleme: Yeni bireyin yeni popülasyona eklenmesi,
- viii. Değişirme: Algoritmanın yeniden çalıştırılmasında oluşan yeni popülasyonun kullanılması,
- ix. Test: Eğer sonuç tatmin ediyorsa algoritmanın sona erdirilmesi ve son popülasyonun çözüm olarak sunulması,
- x. Döngü: İkinci adıma geri dönülmesi.

Görüldüğü üzere genetik algoritmanın yapısı oldukça geneldir ve herhangi bir probleme uygulanabilir. Kromozomların tanımlanması genellikle ikili düzendeki sayılarla yapılır. Çaprazlama işlemi için kullanılan bireyler iyi bireylerden seçilir.

Genetik algoritmanın kullanılarak bir problem çözülecekse algoritmanın ne zaman sonlanacağına kullanıcı karar vermektedir. Genetik algoritma'nın belli bir sonlanma kriteri yoktur. Sonucun yeterince iyi olması veya yakınsamanın sağlanması algoritmanın durması için kriter olarak kullanılabilir [11, 12].

### 5.1.3. Genetik algoritmada kullanılan operatörler

Genetik algoritmanın en önemli kısımları çaprazlama ve mutasyon işlemleridir. Bu işlemler bir olasılık değeri ile ve genelde rasgele olarak uygulanır. Bu şekilde iyi sonuç alınabilmektedir.

Bir kromozomun ikili sayılarla temsil edilmesi:

Kromozom 1: 1101100100110110

Kromozom 2: 1101111000011110

Kromozom temsil ettiği çözümle ilgili bilgi içermelidir. Her kromozom ikili (binary) bir diziden oluşur. Bu dizi içindeki bit adı verilen her bir sayı çözümün bir karakteristiğini temsil edebilir veya bir dizi bütünüyle bir sayıya işaret edebilir.

Kromozomu ikili düzendeki sayılar dizisiyle ifade etmek çok tercih edilen bir temsil şeklidir, ancak bunun yerine tamsayı veya reel sayılar da kullanılabilir. İkili düzenin tercih edilmesinin sebebi basit olması ve bilgisayar tarafından daha kolay ve hızlı bir biçimde işlenebilmesidir.

### 5.1.3.1. Üreme

Üreme işlemi belli bir seçme kriterine göre bireylerin seçilip yeni kuşağın oluşturulması işlemidir. Seçme kriterleri uyumluluğu esas alarak birbiriyle uyumlu olan bireyleri seçer. Daha sonra çaprazlama ve mutasyon uygulanacak olan bireylerden daha uyumlu yeni bireylerin ortaya çıkması olasıdır. Bireylerin tamamı uyumluluğa göre seçilebilir veya bir kısmı rasgele seçilerek yeni kuşağa aktarılabilir.

### 5.1.3.2. Çaprazlama

Kromozomların nasıl temsil edileceğine karar verildikten sonra çaprazlama yapılabilir. Çaprazlama ebeveynlerden bazı genleri alarak yeni bireyler oluşturma işlemidir.

Kromozom 1: 

11011
-------

00100110110
-------------

  
↑↓  
Kromozom 2: 

11011
-------

11000011110
-------------

Birey 1 : 

11011
-------

11000011110
-------------

Birey 2 : 

11011
-------

00100110110
-------------

Çaprazlama yapılacak konum rasgele seçilir. Oluşan yeni birey ebeveynlerin bazı özelliklerini almış ve bir bakıma ikisinin kopyası olmuştur. Çaprazlama işlemi başka şekillerde de yapılabilir. Mesela birden fazla çaprazlama noktası seçilebilir. Daha iyi performans almak amacıyla değişik çaprazlamalar kullanılabilir.

### 5.1.3.3. Mutasyon

Çaprazlama gerçekleşikten sonra mutasyon gerçekleştirilir. Mutasyon oluşan yeni çözümlerin önceki çözümü kopyalamasını önlemek ve sonuca daha hızlı ulaşmak amacıyla yapılır. Mutasyon oluşan yeni bireyin bir bitini (eğer ikili düzende ifade edilmiş ise) rasgele değiştirir.

Orjinal Birey 1: 

110	1	111000011110
-----	---	--------------

Orjinal Birey 2: 

110110	0	100110110
--------	---	-----------

Değişmiş Birey 1: 

110	0	111000011110
-----	---	--------------

Değişmiş Birey 2: 

110110	1	100110110
--------	---	-----------

#### 5.1.3.4. En iyi bireyi bulma

Üreme, çaprazlama ve mutasyon işlemleri sonrasında kuşakta bulunan en iyi uyumluluğa sahip birey sonraki kuşağa aktarılamayabilir. Bunu önlemek için bu işlemlerden sonra oluşan yeni kuşağa bir önceki kuşağın en iyi bireyi, yeni kuşaktaki herhangi bir birey ile değiştirilir. Bu işlem istenilen nesil sayısı kadar devam ettirilir.

#### 5.1.4. Genetik algoritma parametreleri

##### 5.1.4.1. Çaprazlama ve mutasyon olasılığı

Genetik Algoritmalar tekniğinin çaprazlama olasılığı ve mutasyon olasılığı olmak üzere iki basit parametresi vardır.

Çaprazlama olasılığı çaprazlamanın hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Eğer çaprazlama olasılığını %0 olarak kabul edersek hiç çaprazlama yapılmaz ve yeni bireyler eski bireylerin aynısı olur ama bu yeni kuşağın eskisiyle aynı olacağı anlamına gelmez. Eğer ki, bu oran %100 olursa yeni bireyler tamamıyla çaprazlama ile elde edilir. Çaprazlama eski bireylerden iyi taraflar alınarak elde edilen yeni bireylerin daha iyi olması amacıyla yapılır.

Mutasyon olasılığı ise mutasyonun hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Mutasyon olmaz ise yeni birey çaprazlama veya kopyalama sonrasında aynen olduğu gibi kalır. Eğer mutasyon olur ise yeni bireyin bir kısmı değiştirilmiş olur. Eğer bu oran %100

olur ise kuşak içindeki bireyler tamamen değişir, %0 olur ise de kuşak içindeki bireyler hiç değişmeden kalır.

#### 5.1.4.2. Diğer parametreler

GA tekniği başka parametreler de içerir. Bunların en önemlilerinden birisi de popülasyon büyüklüğüdür.

Bu parametre bir jenerasyon için popülasyon içerisinde kaç adet kromozom yani birey olduğunu söyler. Eğer kromozom sayısı az olursa Genetik Algoritma çözüm aranan uzayın ancak bir kısmını gezebilir ve çaprazlama için fazla bir seçeneği yoktur. Kromozom sayısı çok fazla olursa Genetik Algoritma çok yavaş çalışır. Araştırmalar belli bir noktadan sonra popülasyon sayısını artırmanın bir yararı olmadığını göstermiştir.

#### 5.1.4.3. Seçim

Ebeveynleri oluşturmak üzere bazı bireylerin seçilmesi gerekir. Teoriye göre iyi olan bireyler yaşamını sürdürmeli ve bu bireylerden yeni bireyler oluşmalıdır. Bu seçim çeşitli kriterlere göre yapılabilir. En çok kullanılanları rulet seçimi ve stochastic reminder seçimidir.

Rulet seçiminin adından da anlaşılacağı üzere çalışma şeklinin rulet tekerleğine benzer olmasındandır. Bu yöntemde popülasyonda yer alan her bir birey bir rulet tekerleği üzerinde pay edilerek gösterilir. Bu paylaşımın boyutu bireylerin birbirleriyle uyumluluğu ile orantılı olarak değişir. Bir işaretleyici aynı bir rulet topu gibi rulet tekerliği etrafında döner ve herhangi bir rasgele bireyi seçerek işleme sokar. Bu durumda daha büyük alana sahip bireyin seçilme şansı daha büyük olacaktır. Bu işlem seçilen bireylerin gerek duyulan sayıya ulaşmasına kadar sürer. Bir bireyin seçilme eğilimi bu yüzden kendi uyumluluk durumuyla ilişkilidir; bu durum daha uyumlu derecede olan bireylerin seçim için daha fazla şansı olduğunu garanti eder. Bu yaklaşımdaki diğer bir problemde bireyin kaç defa seçildiğinin büyük farklılık göstermesidir; bu yüzden daha uygun bireylerin bir sonraki jenerasyonda yer alacağına dair bir garanti yoktur.

Rulet seçimi eğer uyumluluk çok fazla değişiyorsa sorun çıkartabilir. Örneğin en iyi kromozomun uyumluluğu %90 ise diğer kromozomların seçilme şansı azalacaktır. Bunu önlemek için sıralı seçim kullanılabilir. Sıralı seçimde en kötü uyumlulukta olan kromozoma 1 değeri sonrakine 2 değeri verilir ve böylelikle seçilmede bunlara öncelik tanınmış olur. Bu şekilde onların da seçilme şansı artar fakat bu çözümün daha geç yakınsamasına neden olabilir.

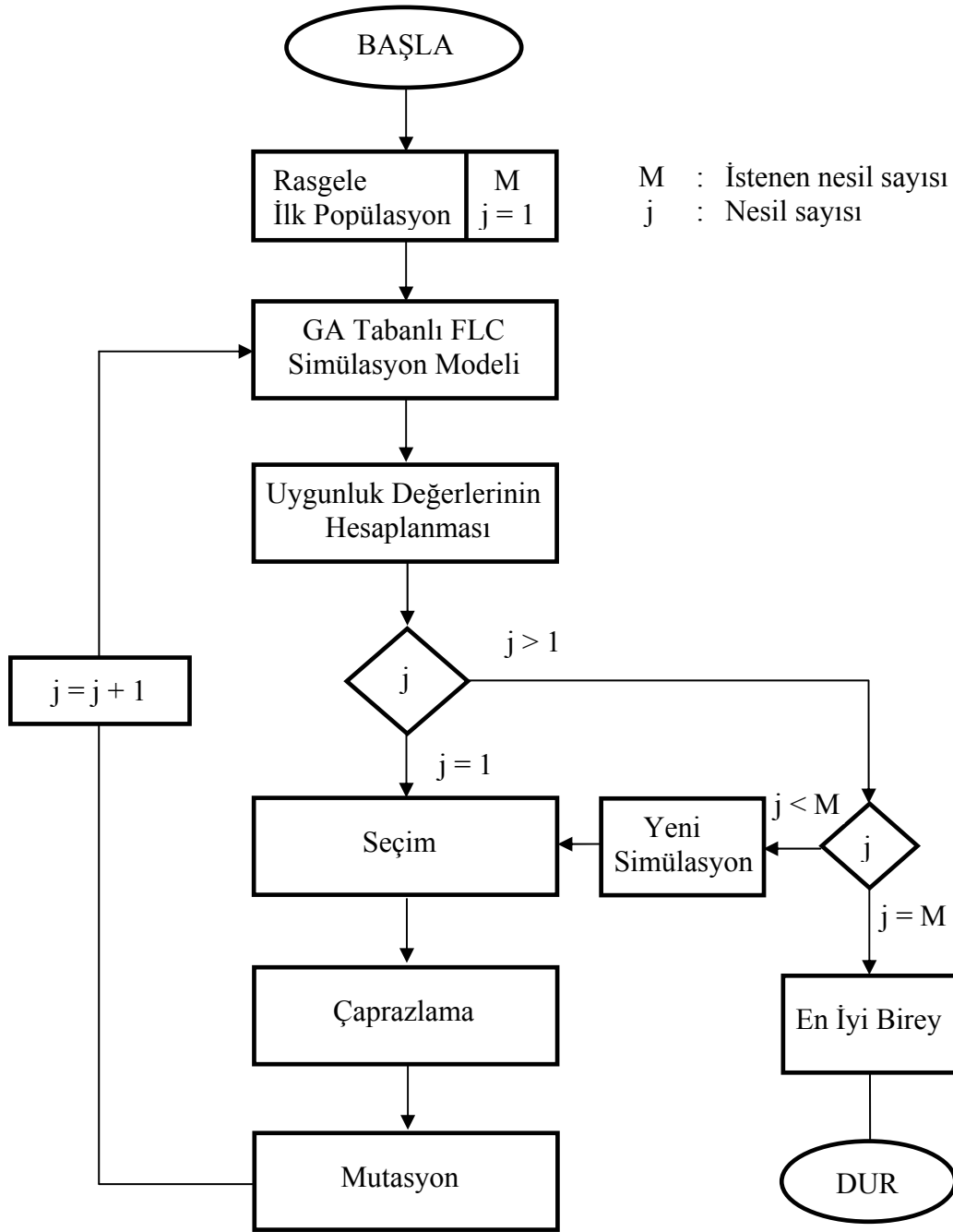
Diğer bir popüler algortmada stochastic reminder seçimidir. Bu metotta seçilen bekleme zamanlarının sayısı her bir birey için hesaplanır. İstenen yaklaşımın tamsayı parçaları her bir birey için deterministik olarak atanır. Kesirli kalanlarda aynen rulet seçimindeki yol izlenerek atanır.

Örnek olarak, seçilen bekleme zamanlarının sayısı 2.4 olan birey kesin olarak 2 kere seçilmekte ve muhtemel olarak 3ncü kez seçilirse de 0.4 değeri almaktadır. Bu yaklaşım rulet algoritmasıyla ilişkilendirilen tutarsızlığı giderir ve ortalama üstünde kalan tüm bireyler gelecek nesilde gösterilebilir.

## 5.2. Bulanık Mantık Kontrolörünün Genetik Algoritma ile En İyilenmesi

Bu çalışmada kontrolörün başarımını artırmak için kullanılan FLC kontrolörün giriş ve çıkış kazanç sabitlerinin deneme ve yanılma metodu yerine en iyi uygun değerlerini bulmak için genetik algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma yukarıda verilen bilgilerin ışığı altında simülasyon çalışmalarında MATLAB program paketinin GAOT Tool Box kodları yardımıyla yapılmıştır.

Burada birinci kontrolör FLC kontrolör için gerekli olan giriş kazanç kat sayıları  $(K_1, K_2)$  ve çıkış kazanç katsayısı  $K_3$  değerleri ile ikinci kontrolör için gerekli olan giriş kazanç katsayıları  $(K_4, K_5)$  ve çıkış kazanç katsayısı  $K_6$  değerlerinin en iyi uygun değerlerinin belirlenmesi için kullanılan temel genetik algoritma (GA) Şekil 5.1'te verilmiştir.



Şekil 5.1. Genetik algoritma akış şeması

GA çalışabilmesi için başlangıç popülasyonunun belirlenmesi gerekir. Bunun öncelikle sistemin kazanç katsayılarını belirleyen diziyi  $\{K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6\}$  temel olarak alınıp popülasyonun herhangi bir bireyi olarak tanımlanır. Dolayısıyla, bireyin öncelikle boyunun belirlenmesi gerekir. Bunun için en alt ve en üst kazanç değerleri, limitleri ile her bir kazanç arasındaki hassasiyetlere göre her bir kazanç



değerinin ikili sistemdeki bit sayısına göre boyu bulunur. Bu çalışmada  $K_1 = 10$ ,  $K_2 = 14$ ,  $K_3 = 11$ ,  $K_4 = 10$ ,  $K_5 = 14$ ,  $K_6 = 11$  olmak üzere 70 bit uzunluğundaki bireyin Tablo 5.1’de en alt ve en üst kazanç değerleri ile hassasiyetleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Kazanç değerleri limit ve hassasiyetleri

Parametreler	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$
Alt Limit	-0.5	-0.5	-100000	-0.5	-0.5	-100000
Üst Limit	0.5	0.5	100000	0.5	0.5	100000
Hassasiyet	0.001	0.0001	100	0.001	0.0001	100

Bireyin boyu belirlendikten sonra GA için başlangıç popülasyonu rasgele olarak, verilen birey sayısı kadar bireylerin kazanç limitleri arasındaki değişen hassasiyetler göz önüne alınarak oluşan bireyler arasından seçilir. Bu ilk nesil olup verilen nesil sayısı kadar GA çalıştırılır.

Oluşturulan başlangıç popülasyonunun her bir bireyinin kazanç değerleri için GA tabanlı FLC simülasyon modelinde elde edilen hatalar GA’ya gönderilir. Burada her bir bireyin hata uygunluk değeri  $eff$ , aşağıdaki Denklem 5.1 ile

$$eff = \frac{100}{(e_1^2 + e_2^2)t} \quad (5.1)$$

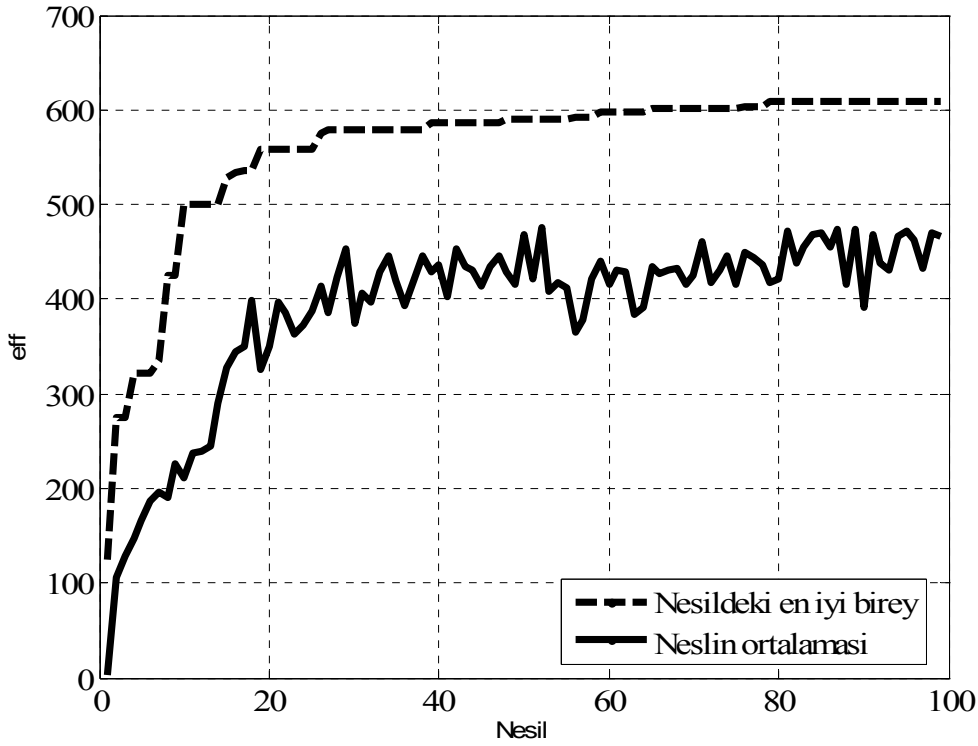
bulunur. Burada,  $e_1$ : birinci kolun konum hatası,  $e_2$ : ikinci kolun konum hatası ve  $t$ : simülasyon çalışma süresidir. Bulunan hata uygunluk değerleri çaprazlamaya girecek bireylerin seçilmeleri amacıyla kullanılır. Seçim işlemi her bir bireyin hata uygunluk değerinin popülasyonda bulunan tüm bireylerin uygunluk değerlerinin ortalamasına oranı ile

$$s_i = \frac{eff_i}{\sum_{i=1}^n eff_i / n} \quad (5.2)$$

yapılır. Burada,  $(i)$ :  $(i)$ nci birey,  $(n)$ : popülasyondaki birey sayısı,  $eff_i$ :  $(i)$ nci bireyin hata uygunluk değeri ve  $s_i$ :  $(i)$ nci bireyin seçim oranıdır. Bu seçim oranlanmasından sonra elde edilen değerlerin tam sayı karşılığı kadar bireyler seçim havuzuna atılır. Eksik kalan bireyler elde edilen seçim oranlarının kesirli karşılığı göz önüne alınarak roulette seçiminde olduğu gibi seçim yapılır ve popülasyon sayısı tamamlanır. Bu işlemden sonra çaprazlama işlemine geçilir.

Çaprazlama işlemi önce popülasyondan çift sayıda bireyler alınıp, varsa tek birey çaprazlamaya dahil edilmiyor. Bu çift sayıda bireyler rasgele eşlendiriliyor. Her bir çift bireyin birincisi rasgele ikili sistemde 70 bitlik bir dizi mask 1 bireyi olarak tanımlanan bireyle çaprazlandırılıyor. İkinci mask 1 bireyinin tamamlayıcısı olan mask 2 ( $\sim$ mask 1) ile çaprazlandırılıyor. Bu çaprazlama işlemleri sonunda elde edilen yeni bireyler ve varsa kalan birey ile birlikte oluşturulan yeni popülasyon mutasyon işlemi için kullanılır.

Verilen mutasyon ihtimal oranında bir bireydeki bitlerin karşılığına gelen bitlerin karşılığı ile yapılan bir değiştirilme işlemidir. Mutasyondan sonra oluşan popülasyonun her bir bireyi simülasyon modelinin yardımıyla elde edilen hatalar GA'ya gönderilir. Burada her bir birey için hata uygunluk değeri bulunur. Eğer istenilen nesil sayısına ulaşılmamış ise popülasyondaki en düşük uygunluk değerine sahip birey çıkarılıp bir önceki nesildeki en iyi hata uygunluk değerine sahip birey yerleştirilir. Bu yeni nesil popülasyonu tekrar ilk başlangıç popülasyonu gibi GA ve simülasyon modelindeki işlemler uygulanır. Bu işlemler verilen nesil sayısına eşitleninceye kadar sürer. Nesil sayısına ulaşıldığında en yüksek hata uygunluk değerine sahip birey olarak seçilir. Burada 100 nesil olarak seçilen GA'nın sonucu Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



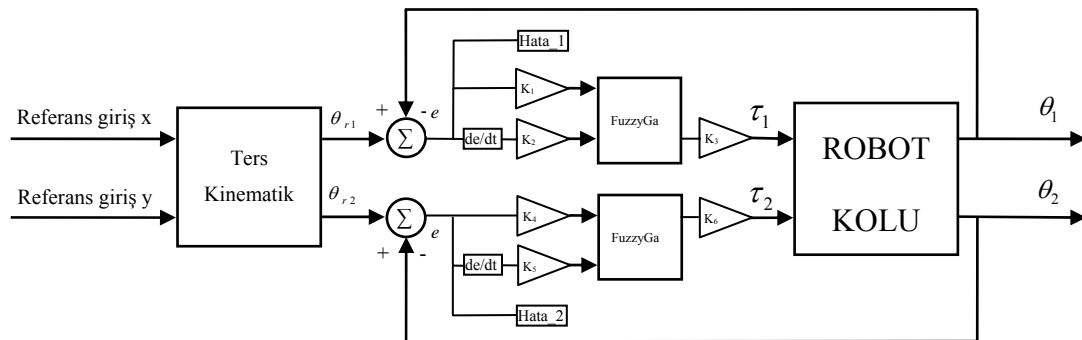
Şekil 5.2. En iyi ve ortalama hata uygunluk değerleri

### 5.3. Simülasyon Çalışması ve Sonuçları

Tasarlanmış olan kontrol sistemi için hazırlanmış olan kontrol yazılımına kullanıcının işlenmesini istediği gerekli parametreler girildiği üzere, sistem yapılması istenilen iş için en uygun değerleri ortaya çıkarmak amacıyla hesaplamalara başlamaktadır. Genetik tabanlı bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Her bir kontrolör hata değeri için aç ve hatanın değişimi olarak açının türevi olmak üzere ikişer giriş, çıkış olarakta robota ait her bir kola uygulanacak tork değeri için birer çıkışa sahiptir. Kontrolörde kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.3’te gösterildiği gibi genetik algoritma yazılımının üzerinde çalışabilmesi amacıyla -1 ve +1 durum uzayında tanımlanmıştır. Simülasyon çalışmasında kullanılan sisteme ait blok diyagramı Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Genetik tabanlı bulanık kontrolör sisteminde kullanılan üyelik fonksiyonları ve tanımlanan kural tablosu ile yapılan çalışmalar sonucu edinilen sisteme parametrelerin girilmesiyle beraber istenen durumlar için robot kolu sisteminin vermiş olduğu cevaplar alınmış ve de simülasyon sonucu olarak elde edilen veriler Tablo 5.3’te gösterilmiştir.

Tablo 5.2. Genetik tabanlı bulanık kontrolör sisteminde kullanılan kural tablosu

$e$ $de/dt$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PS	PS	Z
NS	PB	PS	PS	Z	NS
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PS	PS	Z	NS	NS	NB
PB	Z	NS	NS	NB	NB

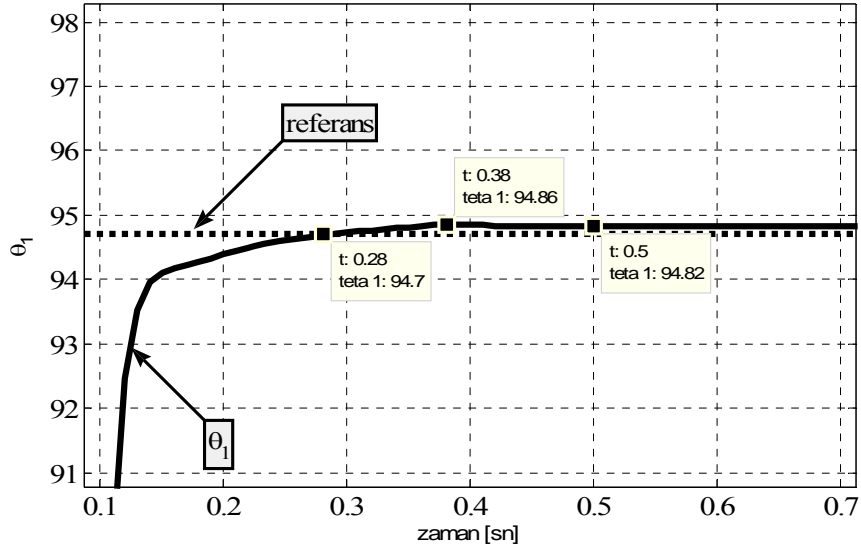


Şekil 5.3. Genetik tabanlı bulanık kontrolörlü robot kolunun blok diyagramı

### 5.3.1. Başlangıç noktasından verilen bir noktaya hareketi

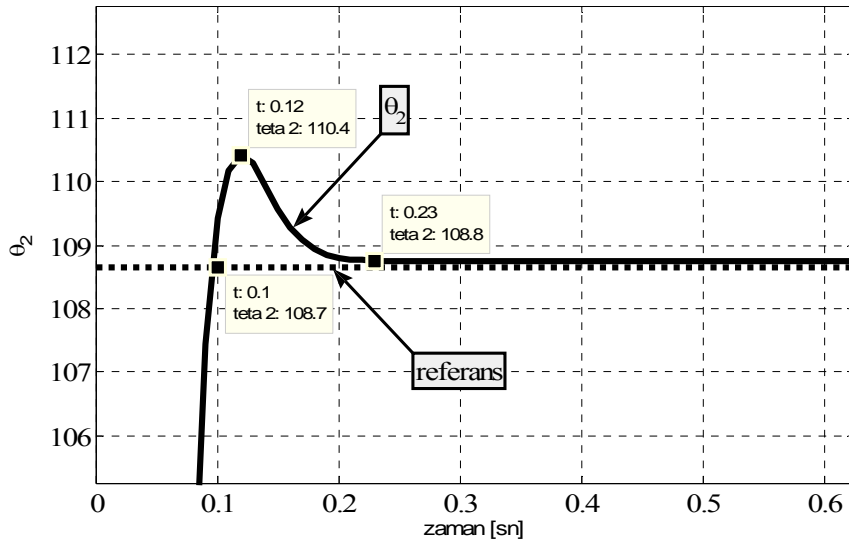
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



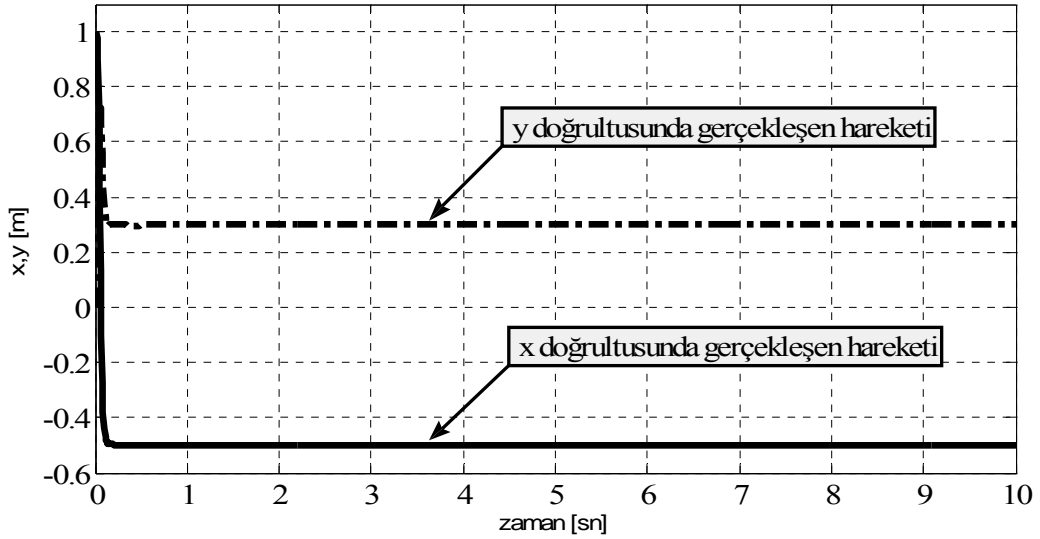
Şekil 5.4.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



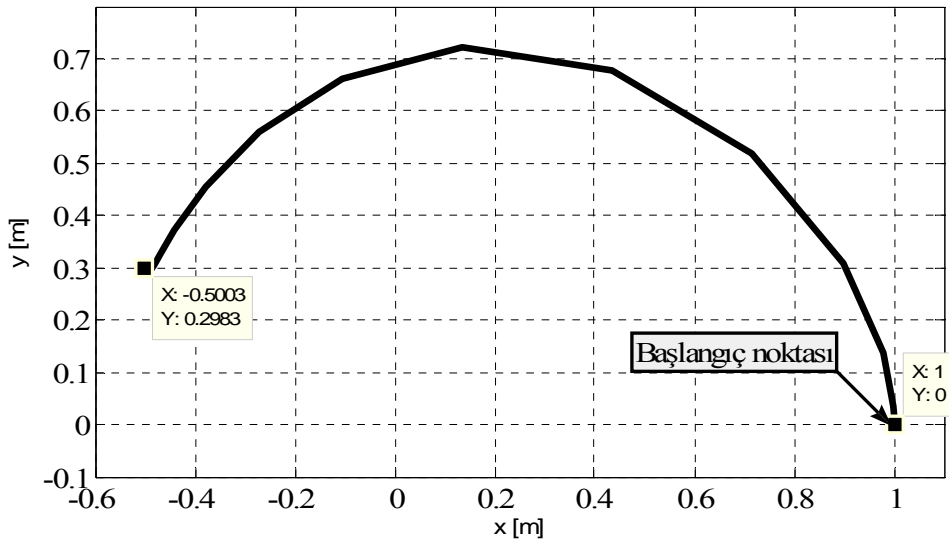
Şekil 5.5.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan P(-0.5,0.3) noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.

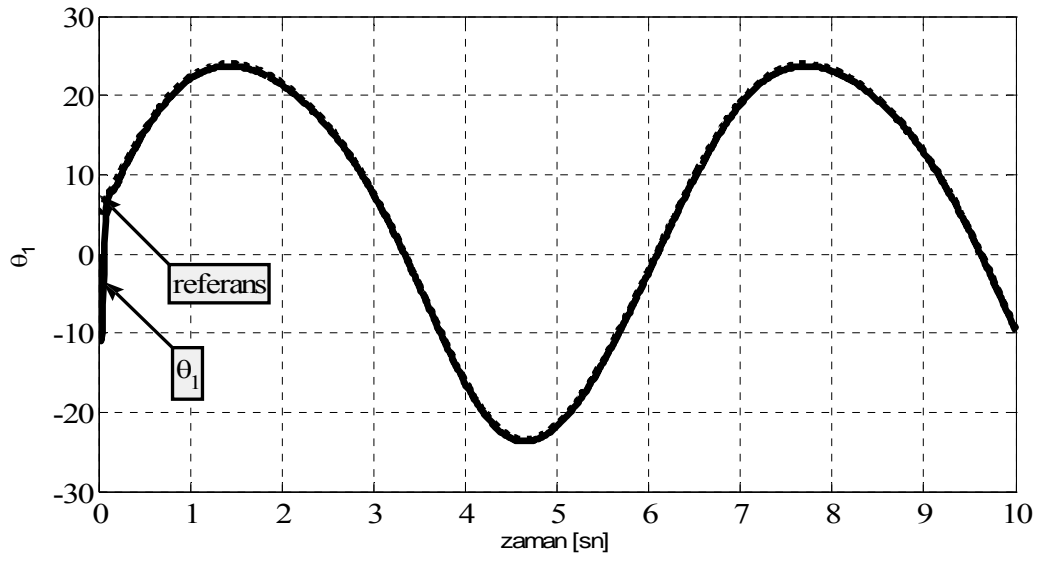


Şekil 5.7. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 5.3.2. Verilen bir izin takibi

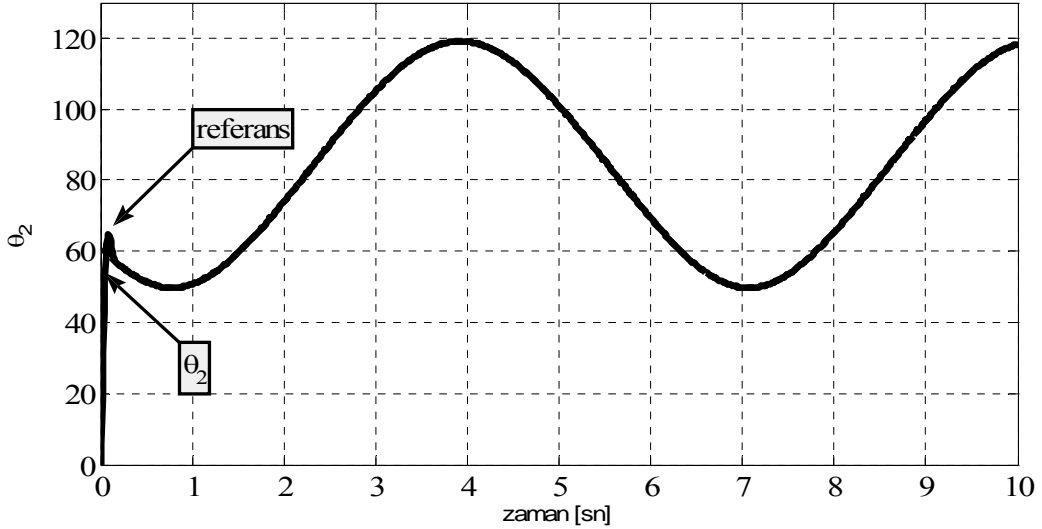
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izin takibine  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



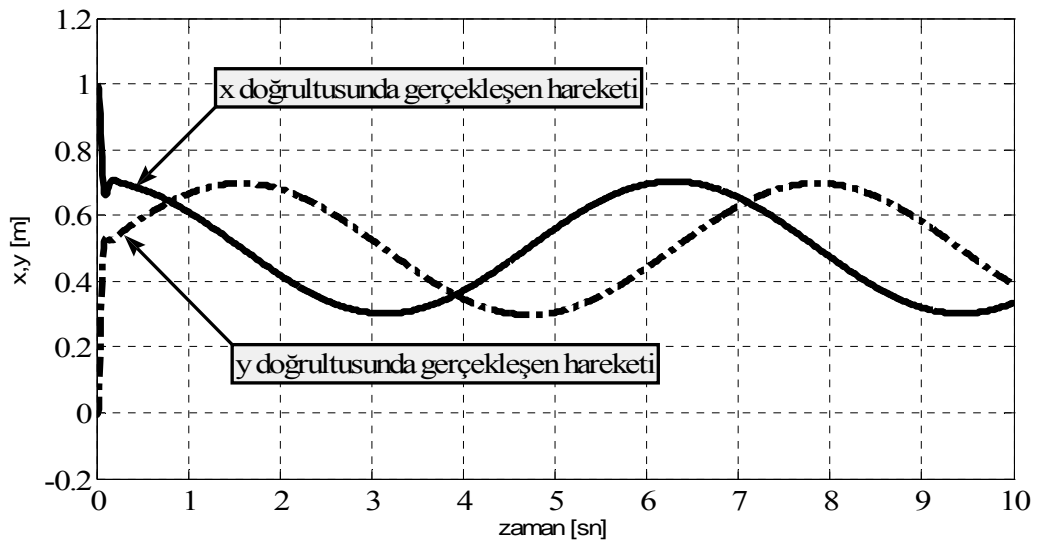
Şekil 5.8.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takibine  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

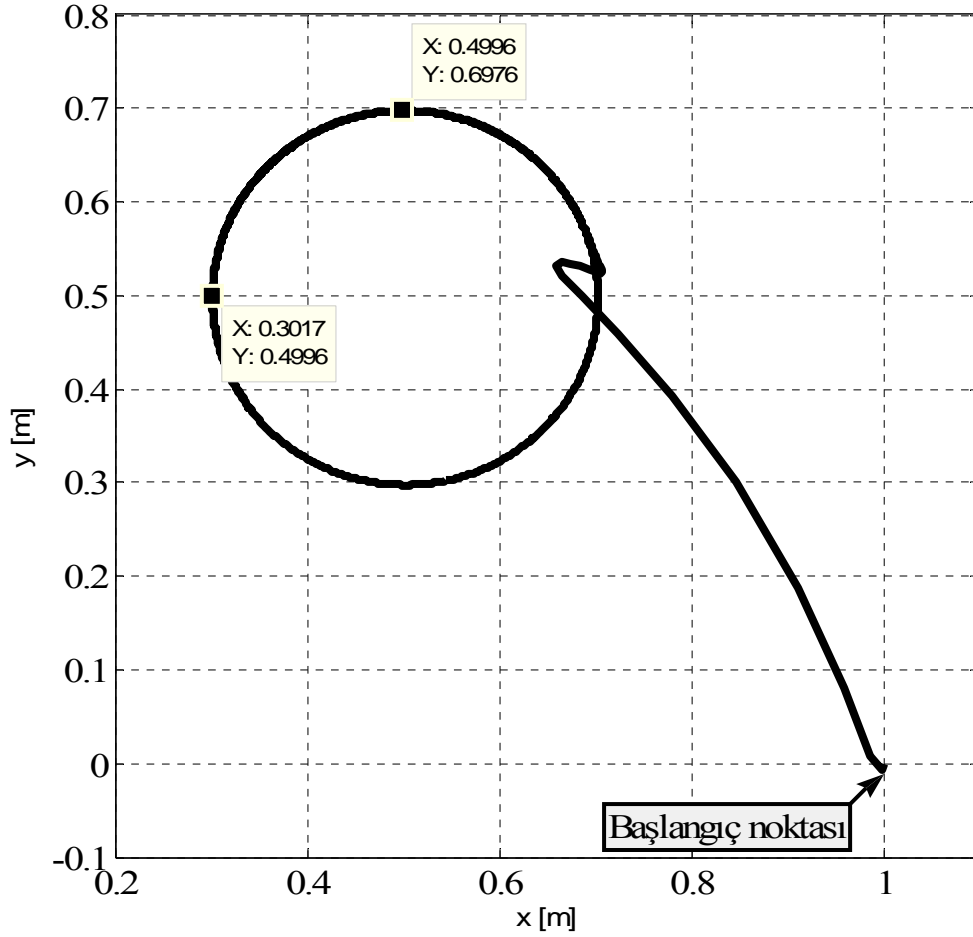
- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap



- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizmesi ve bu izi takip ederken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.11’de gösterilmiştir.

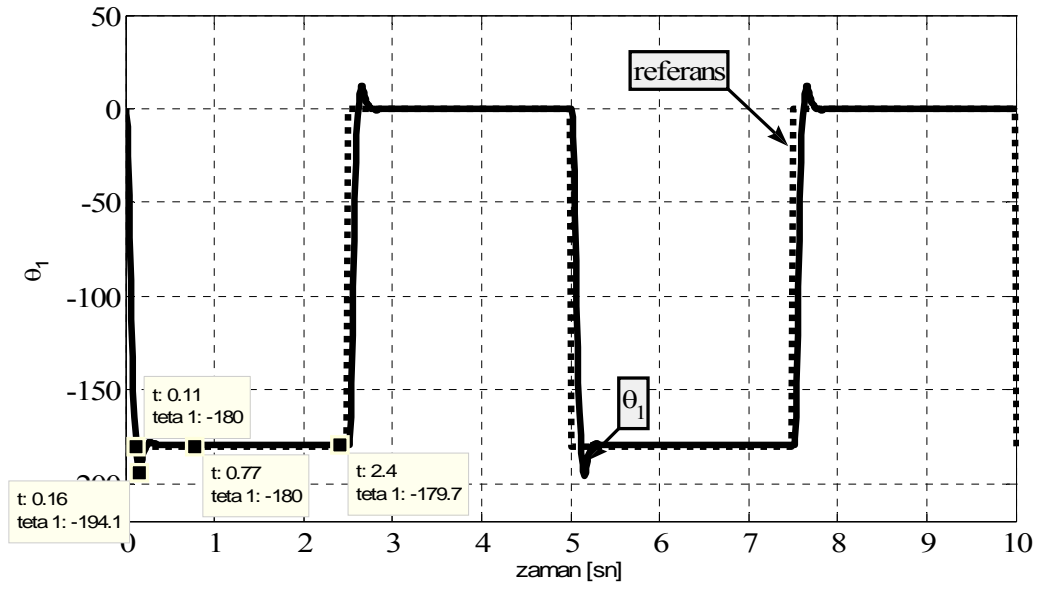


Şekil 5.11. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 5.3.3. Verilen bir kare dalga için iz takibi

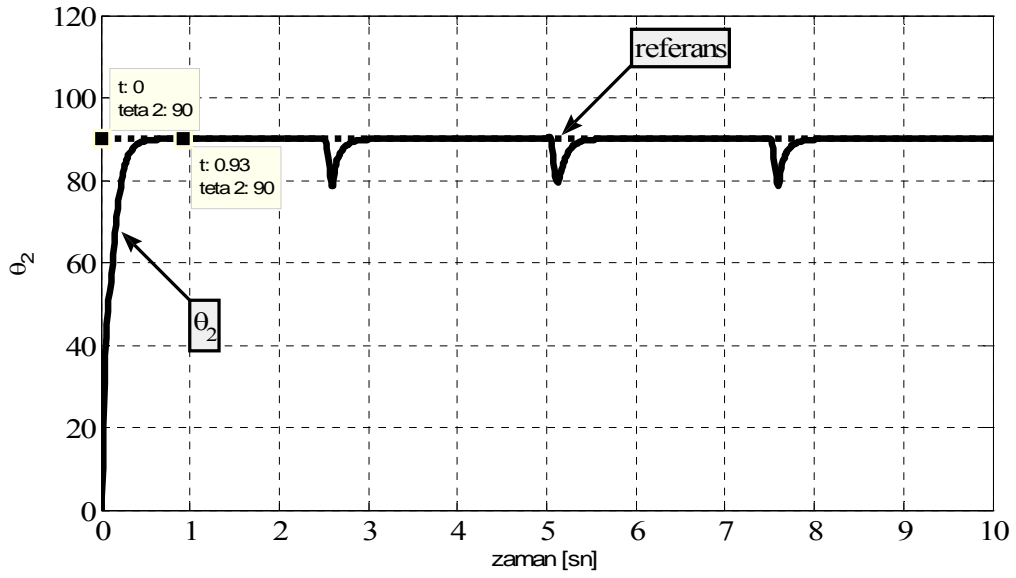
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



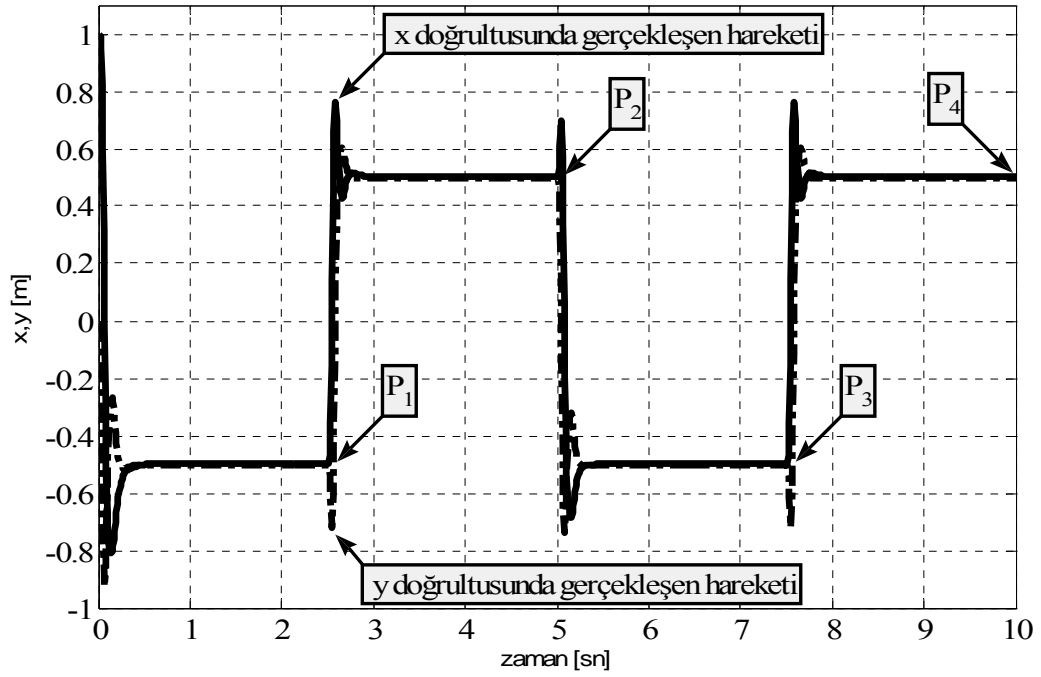
Şekil 5.12.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için H(1,0) başlangıç pozisyonundan harekete başladığında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



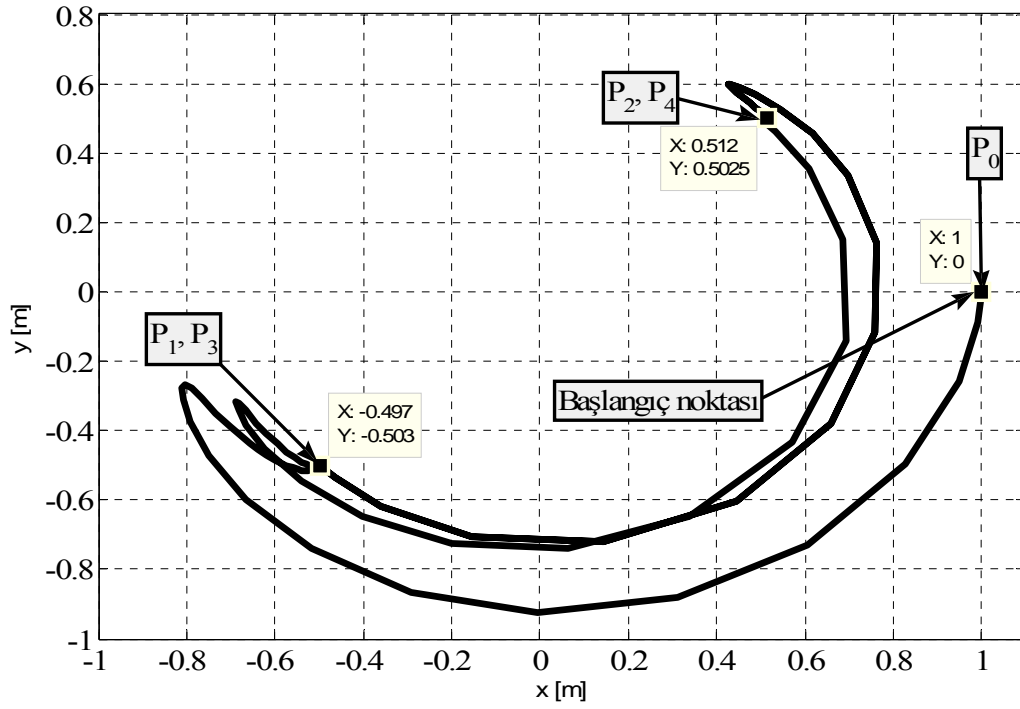
Şekil 5.13.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için  $H(1,0)$  başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.14'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- Genliği 0.5 ve frekansı 0.2 Hz olan kare dalgası için  $H(1,0)$  başlangıç pozisyonundan harekete başladığında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.15'te gösterilmiştir.

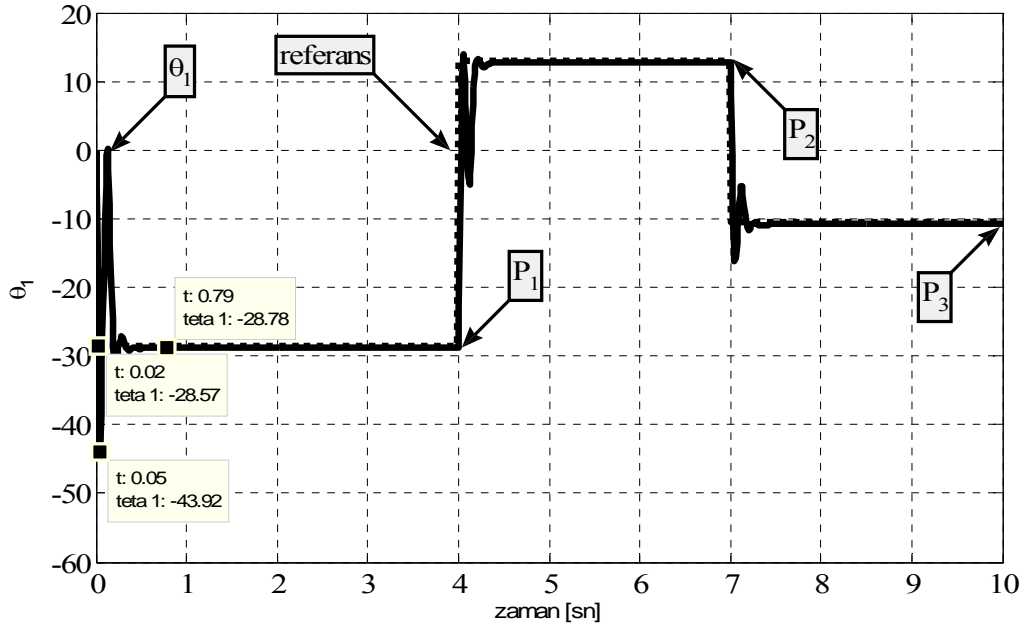


Şekil 5.15. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 5.3.4. Başlangıç noktasından verilen 3 noktaya hareketi

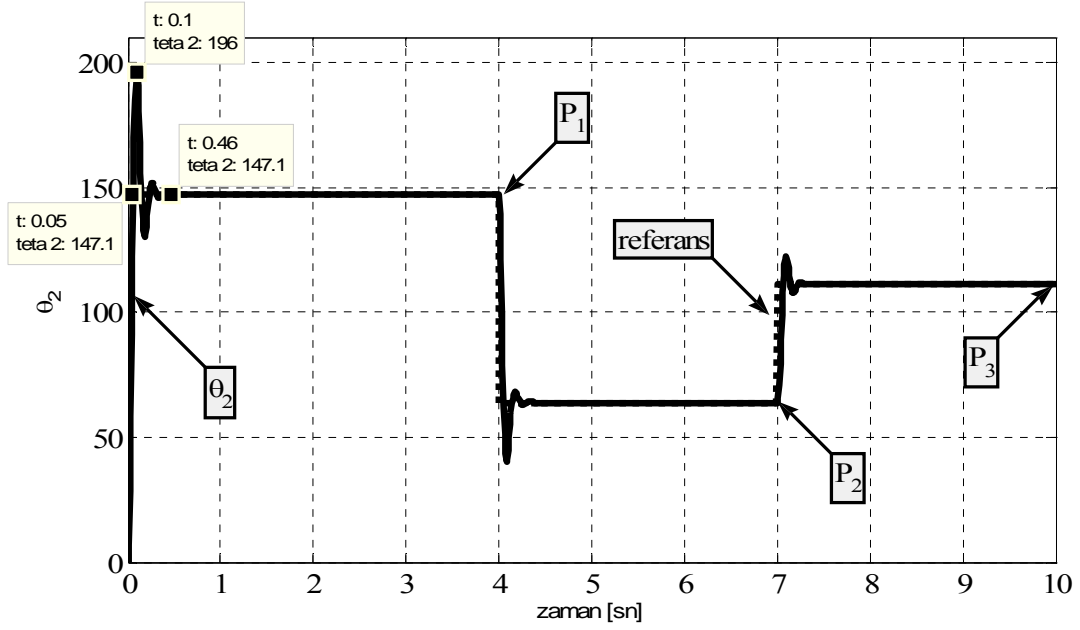
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



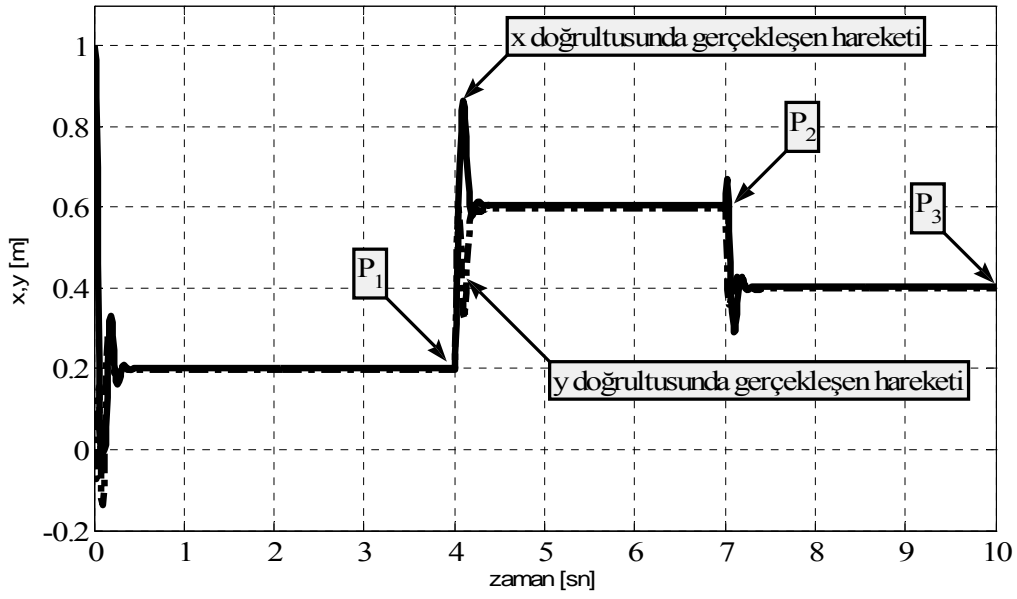
Şekil 5.16.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

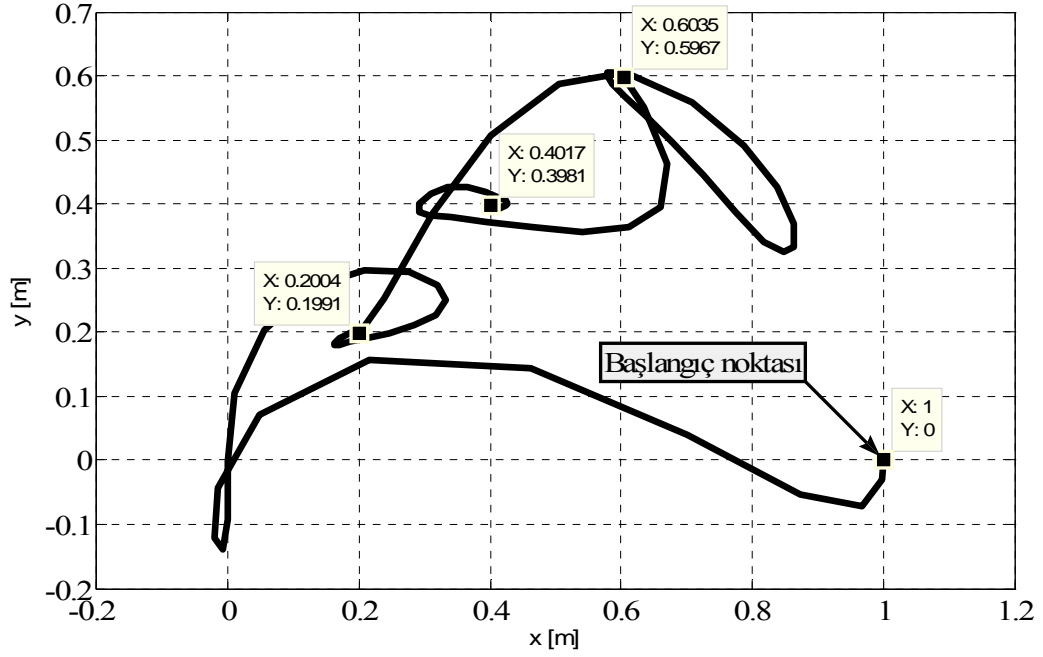
- $H(1,0)$  başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.18. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap



- H(1,0) başlangıç konumundan;  
 $t=0-4$  saniyeleri arasında  $P_1(0.2,0.2)$  noktasına,  
 $t=4-7$  saniyeleri arasında  $P_2(0.6,0.6)$  noktasına,  
 $t=7-10$  saniyeleri arasında  $P_3(0.4,0.4)$  noktasına ulaşması esnasında robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sistemine verdiği cevabı Şekil 5.19'da gösterilmiştir.

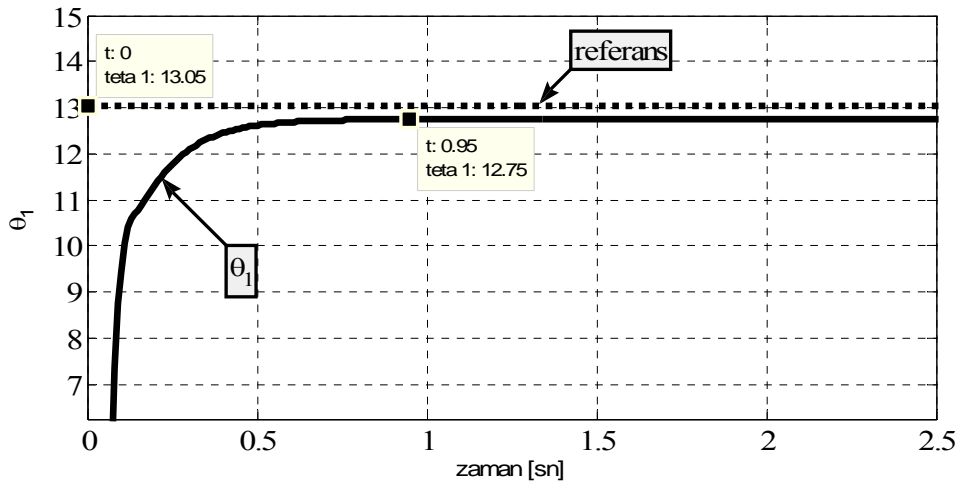


Şekil 5.19. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 5.3.5. Birbirine simetrik verilen 4 noktaya hareketi

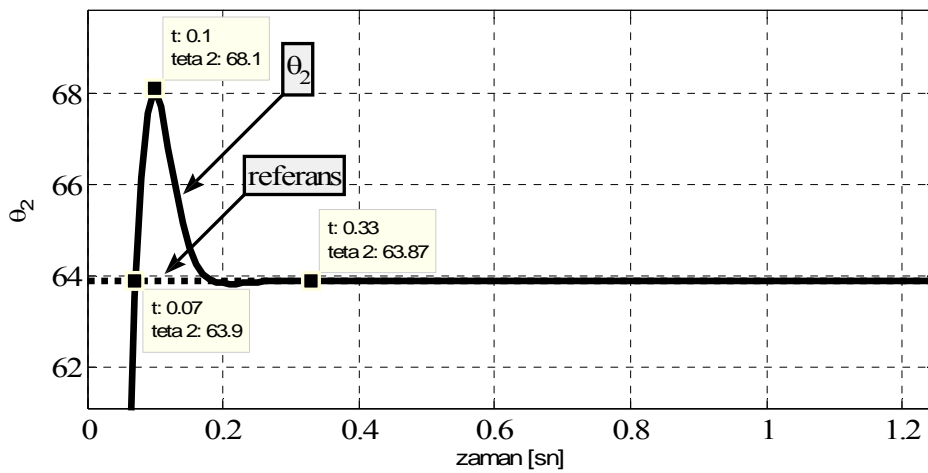
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



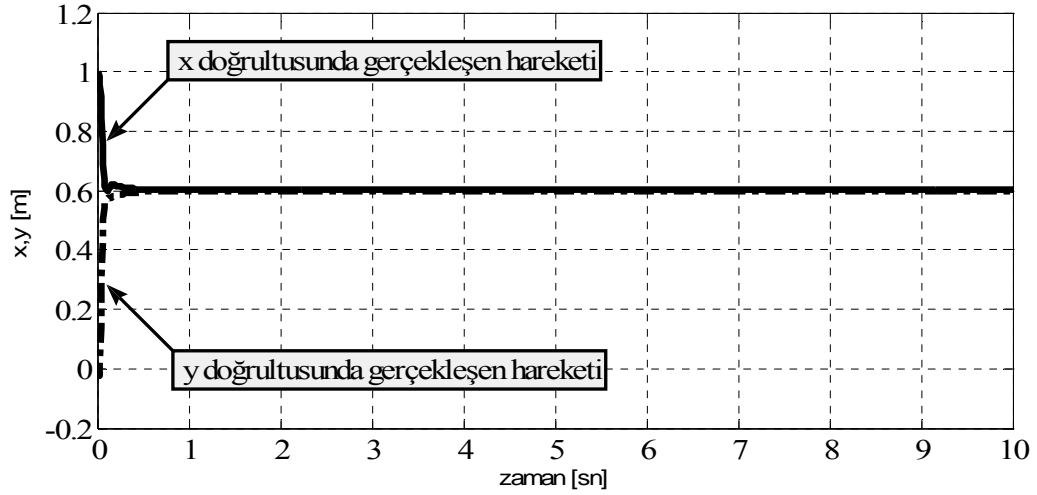
Şekil 5.20.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



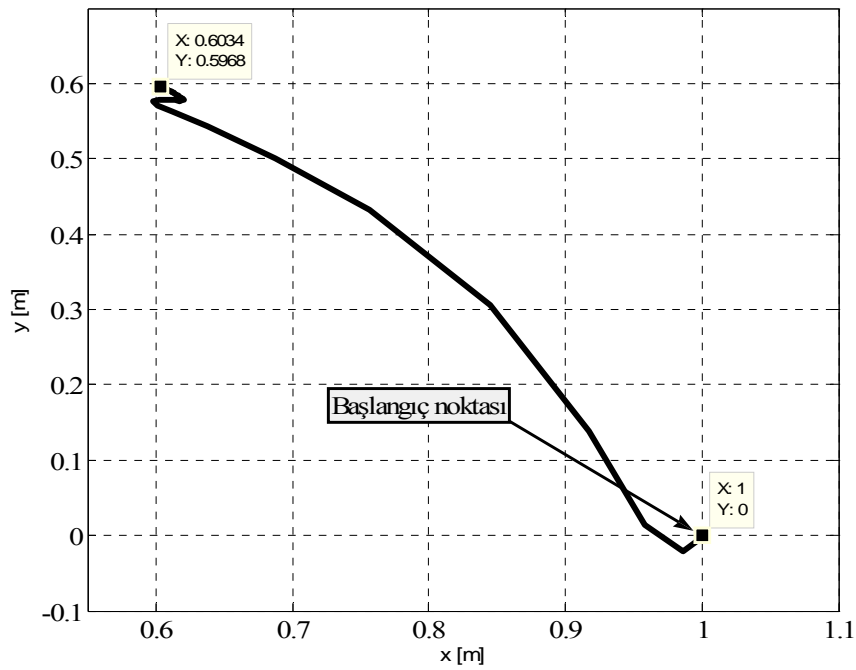
Şekil 5.21.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.22’de gösterilmiştir.



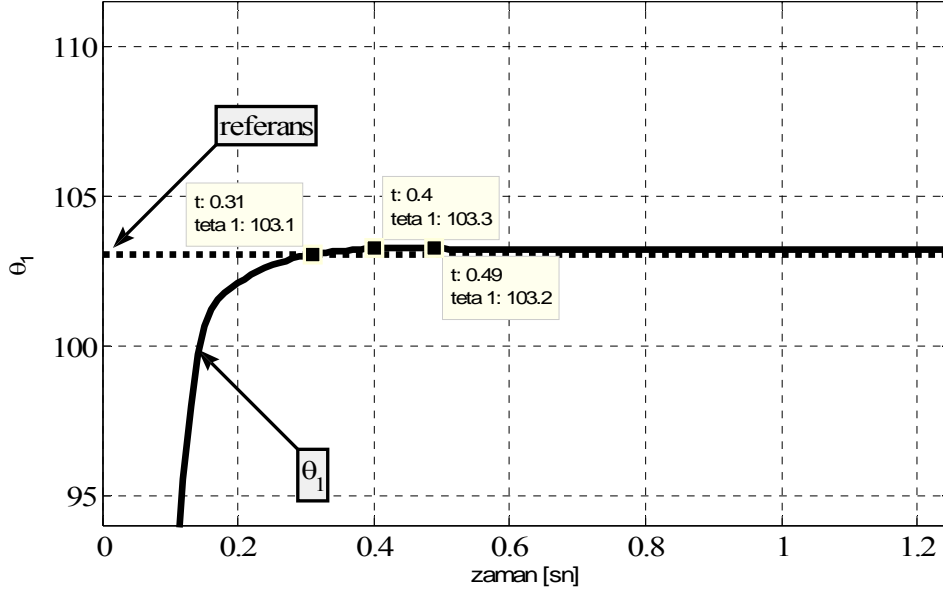
Şekil 5.22. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_1(0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.23’te gösterilmiştir.



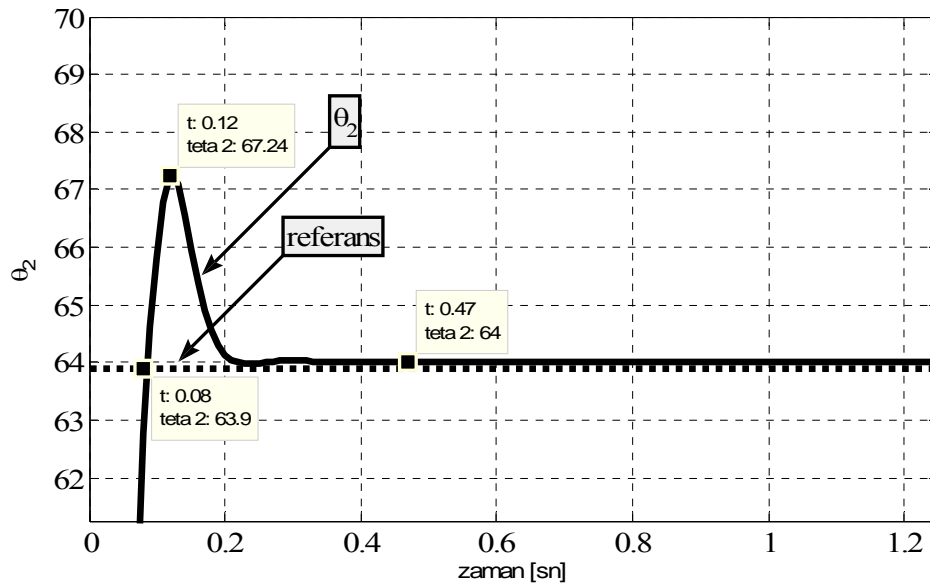
Şekil 5.23. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



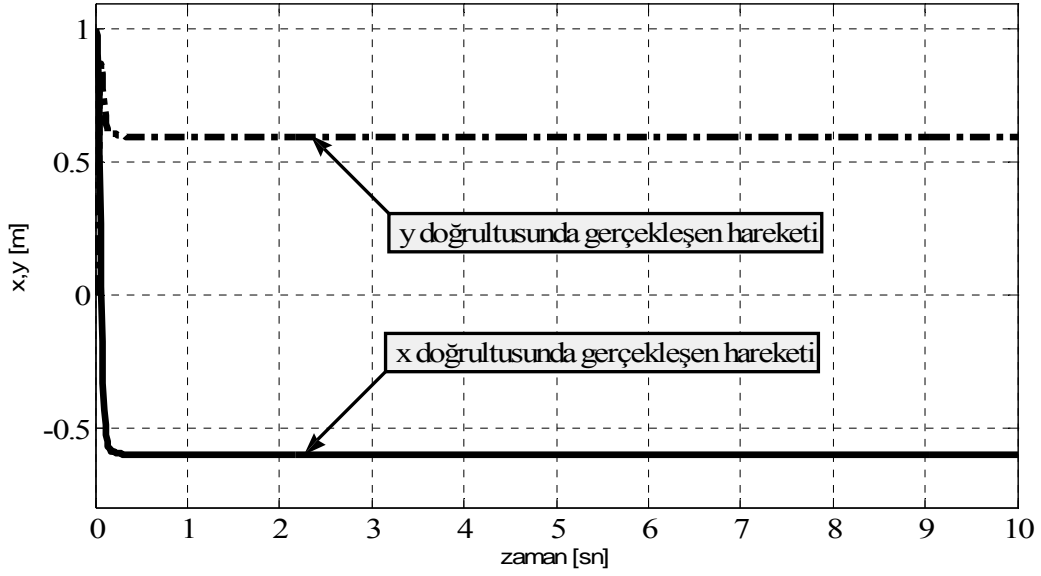
Şekil 5.24.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.25'te gösterilmiştir.



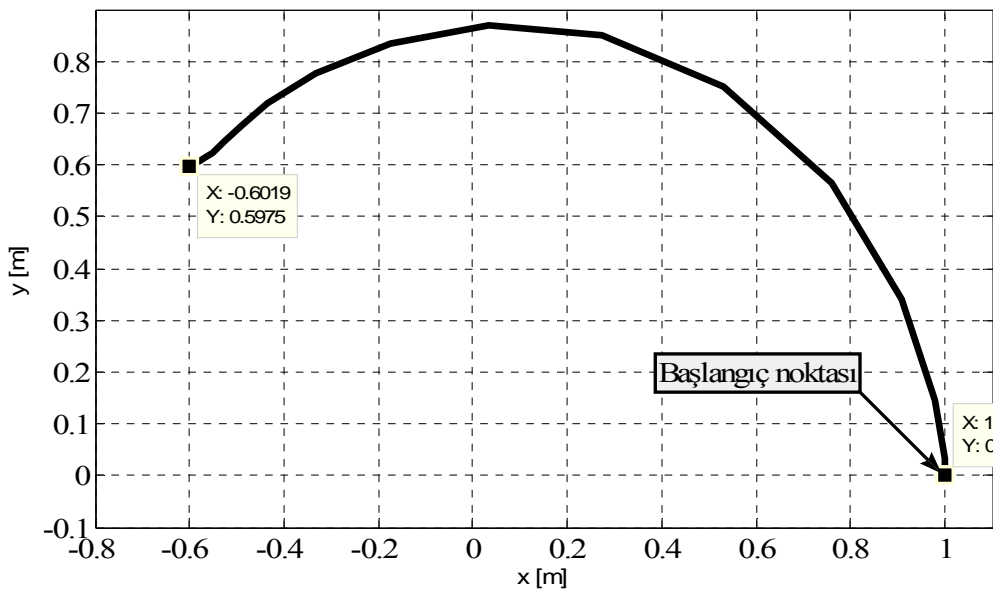
Şekil 5.25.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.26'da gösterilmiştir.



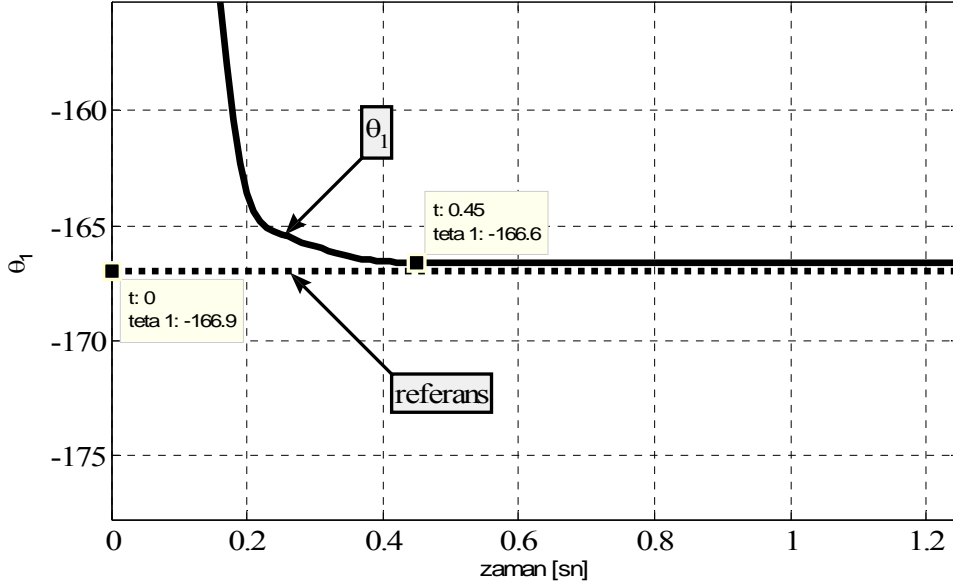
Şekil 5.26. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_2(-0.6,0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.27'de gösterilmiştir.



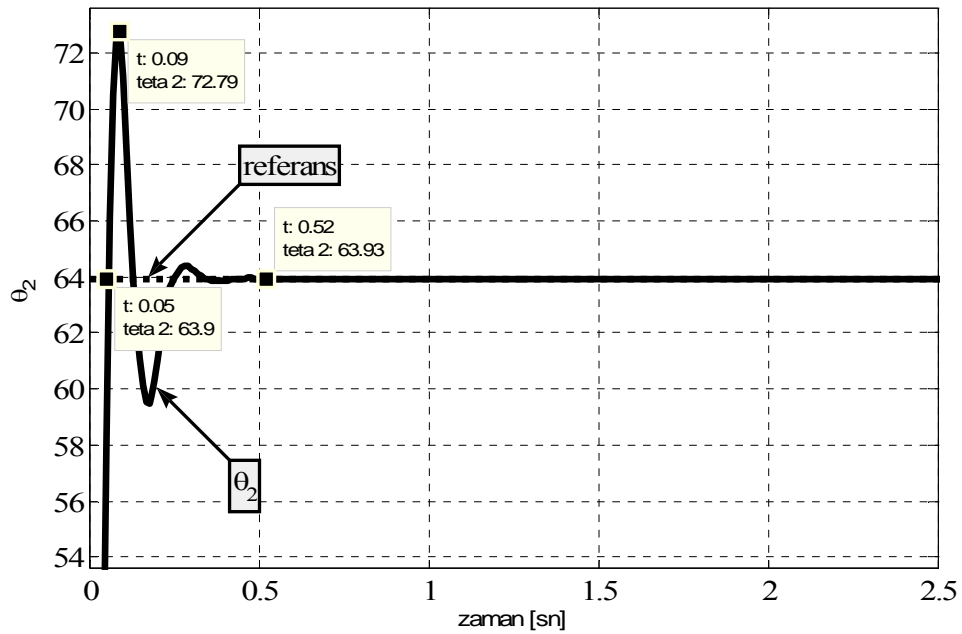
Şekil 5.27. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.28’de gösterilmiştir.



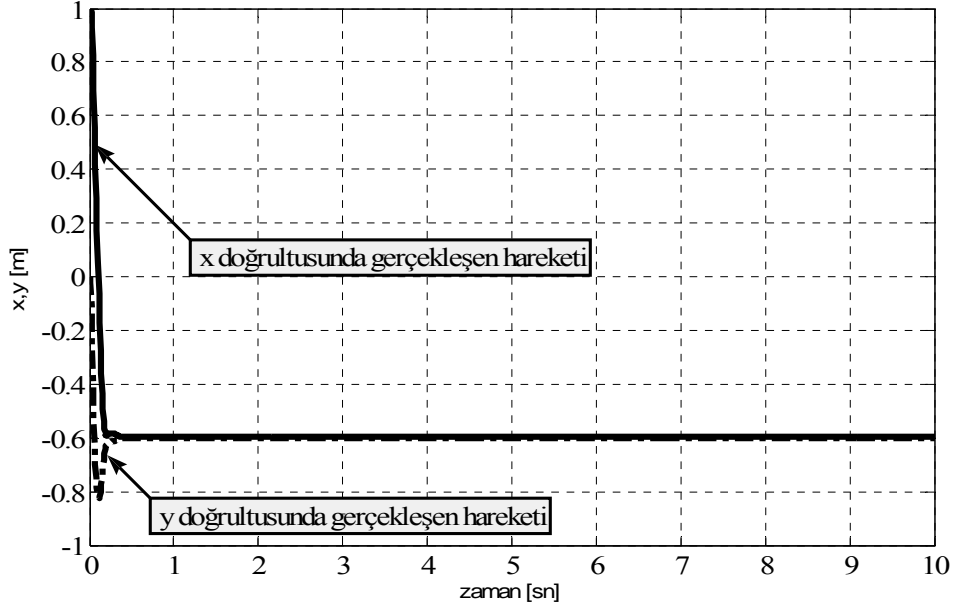
Şekil 5.28.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.29’da gösterilmiştir.



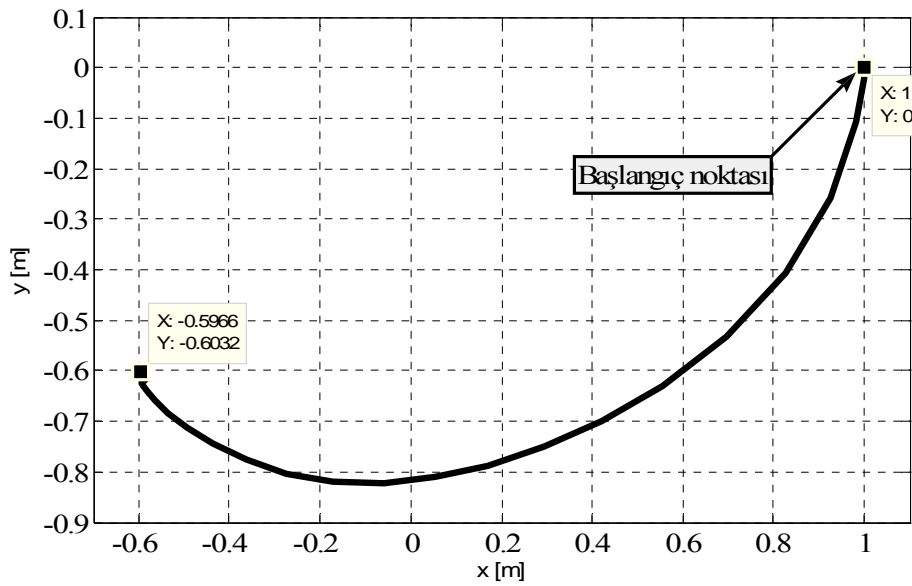
Şekil 5.29.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



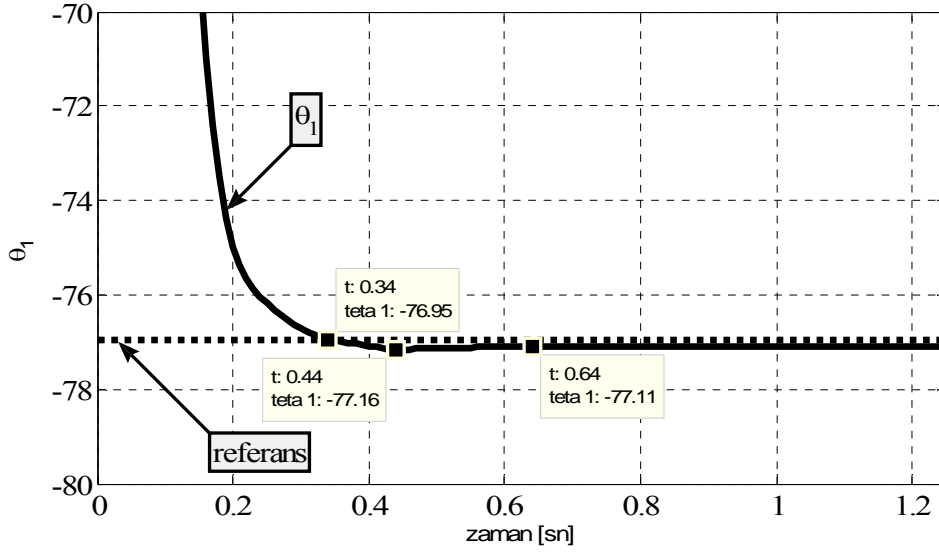
Şekil 5.30. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_3(-0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



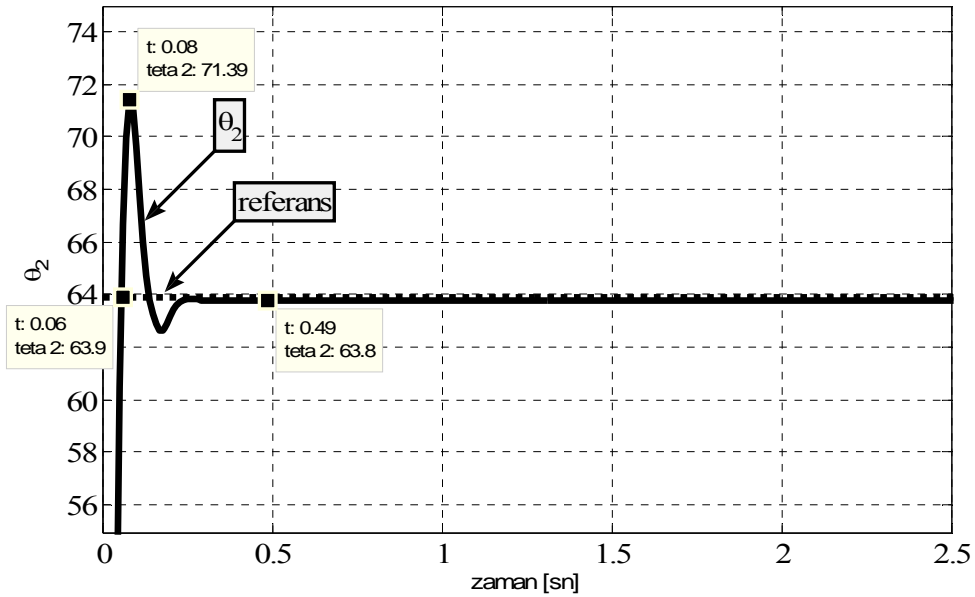
Şekil 5.31. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.32’de gösterilmiştir.



Şekil 5.32.  $\theta_1$  açısının zamana karşı verdiği cevap

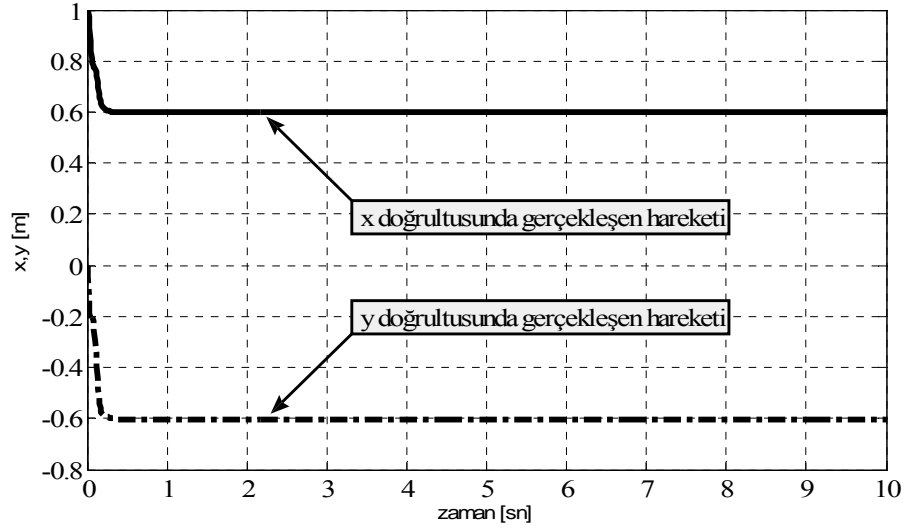
- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.33’te gösterilmiştir.



Şekil 5.33.  $\theta_2$  açısının zamana karşı verdiği cevap

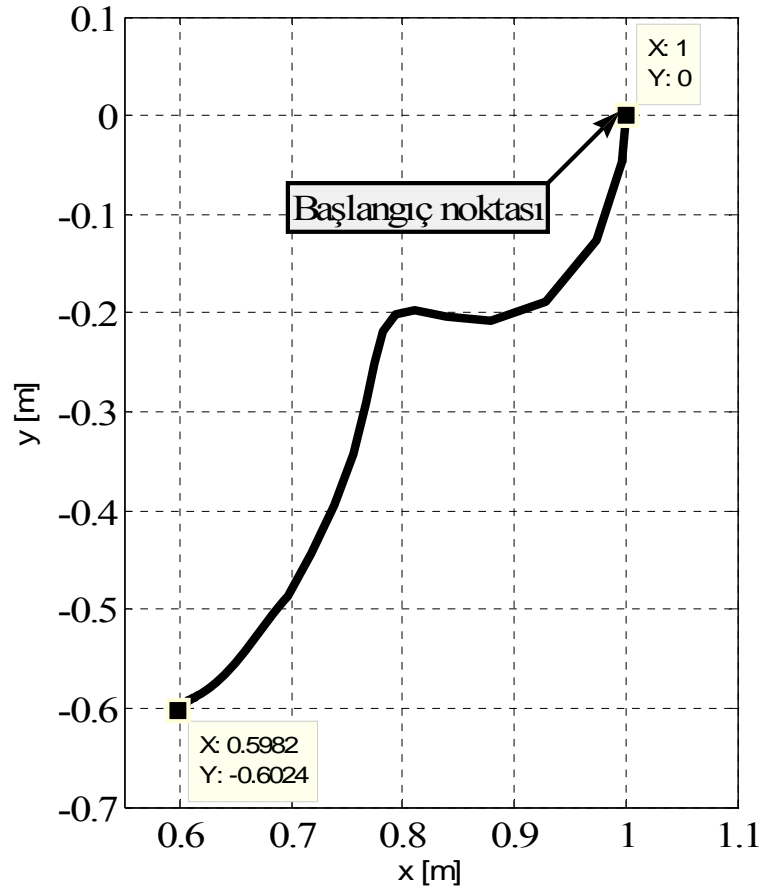


- $H(1,0)$  başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevabı Şekil 5.34'te gösterilmiştir.



Şekil 5.34. Robot kolunun uç noktasının x ve y doğrultuları için zamana karşı verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan  $P_4(0.6,-0.6)$  noktasına giderken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.35'te gösterilmiştir.

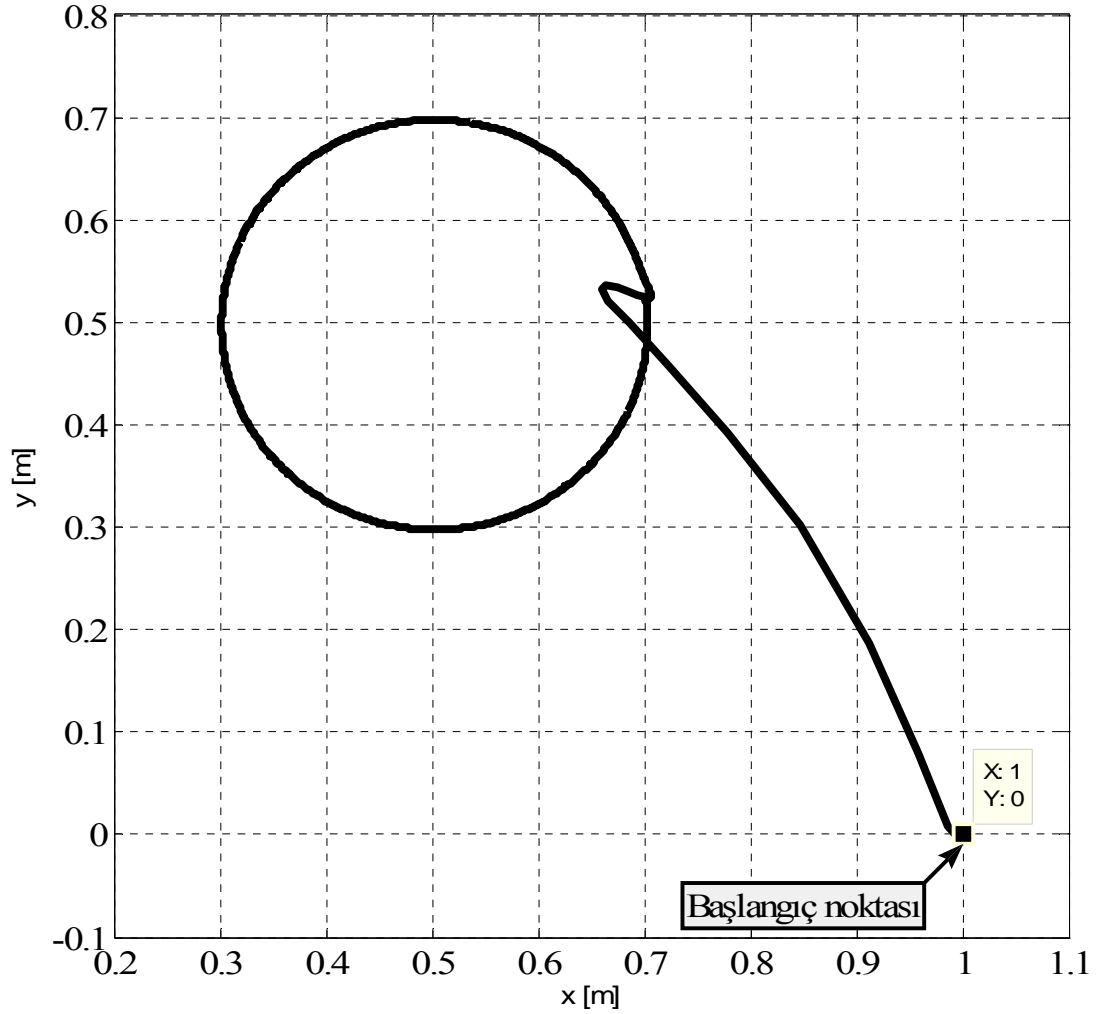


Şekil 5.35. Robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

### 5.3.6. Dayanıklılık

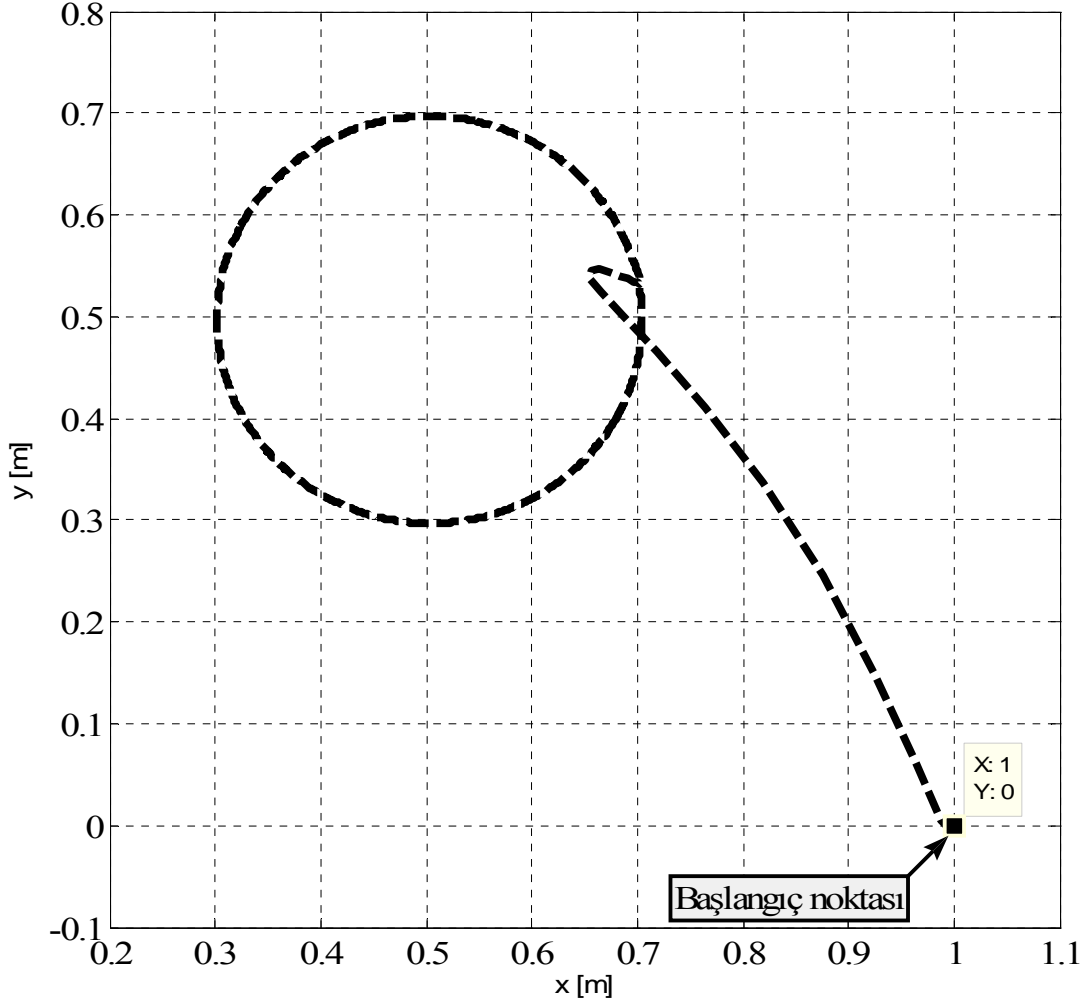
Genetik tabanlı bulanık kontrolör robot kolunun

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 0 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



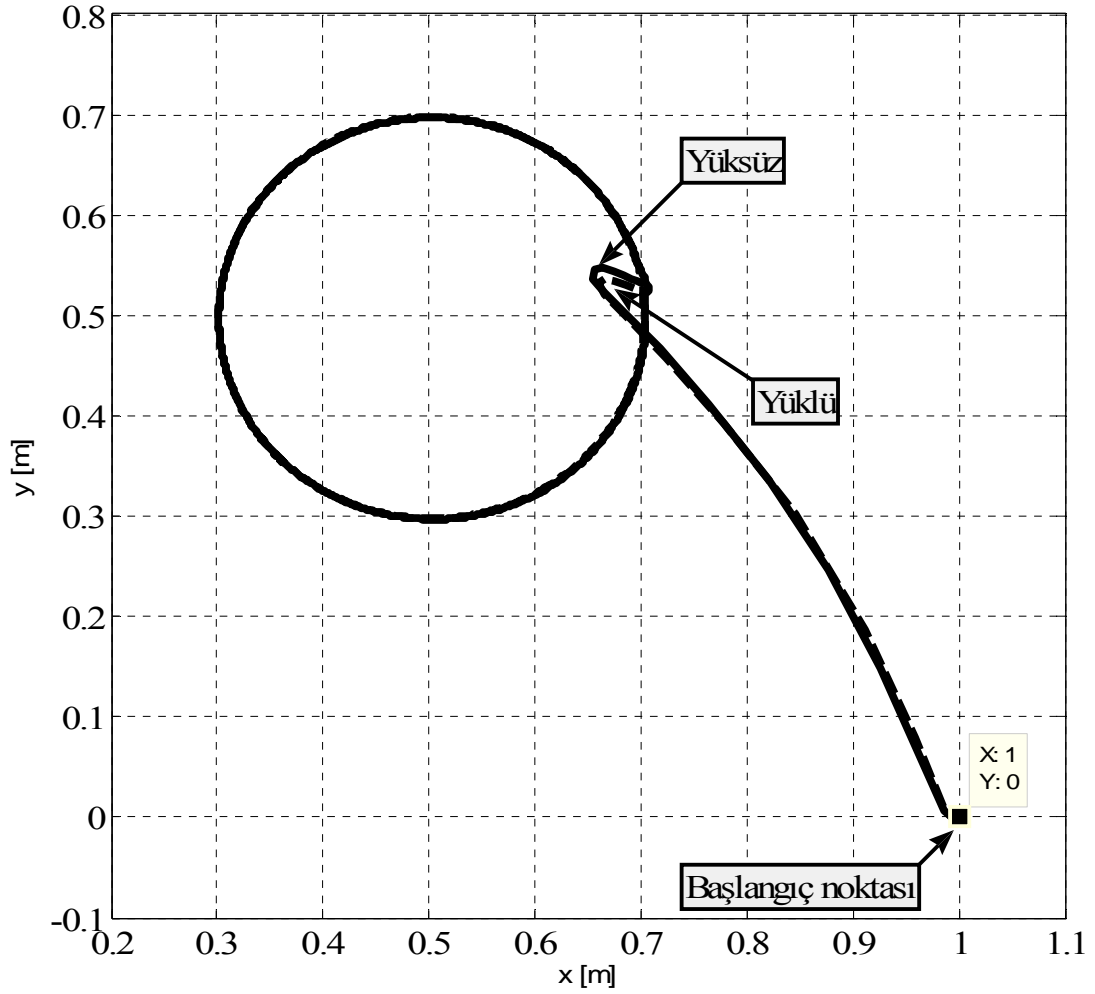
Şekil 5.36. 0 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde 20 kg. yük altında bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevabı Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



Şekil 5.37. 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

- H(1,0) başlangıç konumundan hareket ederek merkezi P(0.5,0.5) noktası ve yarıçapı  $r = 0.2$  m. olacak şekilde bir çember çizerken robot kolunun uç noktasının 0 kg. ve 20 kg. yükler altında x ve y koordinat sisteminde verdiği her iki cevap Şekil 3.38’de gösterilmiştir.



Şekil 3.38. 0 kg. ve 20 kg. yük altındaki robot kolunun uç noktasının x ve y koordinat sisteminde verdiği cevap

Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilerin düzenlenmesiyle aşağıdaki Tablo 5.3 elde edilmiştir.

Tablo 5.3. Genetik algoritmalar ile optimize edilmiş bulanık kontrolör başarımlarının sonuç tablosu

$P(x, y)$	$\theta_i$	$tr$ [sn]	$Mp$ [%]	$ts$ [sn]	$e_{ss}$ [sn]
$P(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.28	0.16	0.5	0.12
	$\theta_2$	0.1	1.7	0.23	0.1
Çember $r : 0.2m$ $H(-0.5, 0.3)$	$\theta_1$	0.11	0.07	0.25	0.42
	$\theta_2$	0.06	5.5	0.26	0.44
Kare Dalga genlik : 0.5 frekans : 0.2Hz	$\theta_1$	0.11	-14	0.77	0.3
	$\theta_2$	0.93	0	0.93	0
$t : 0 - 4sn$ $P_1(0.2, 0.2)$ $t : 4 - 7sn$ $P_2(0.6, 0.6)$ $t : 7 - 10sn$ $P_3(0.4, 0.4)$	$\theta_1$	0.02	-15.35	0.79	0.2
	$\theta_2$	0.05	48.9	0.46	0.05
$P_1(0.6, 0.6)$	$\theta_1$	0.95	0	0.95	0.3
	$\theta_2$	0.07	4.2	0.33	0.03
$P_2(-0.6, 0.6)$	$\theta_1$	0.31	0.2	0.49	0.1
	$\theta_2$	0.08	3.34	0.47	0.1
$P_3(-0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.45	0	0.45	0.29
	$\theta_2$	0.05	8.89	0.52	0.03
$P_4(0.6, -0.6)$	$\theta_1$	0.34	-0.21	0.64	0.16
	$\theta_2$	0.06	7.49	0.49	0.09

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada iki serbestlik dereceli bir robot kolu PID kontrolör, bulanık mantık kontrolörü ve her bir iş için genetik algoritma tabanlı bulanık mantık kontrolörü kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sonucunda, klasik kontrol yöntemleri arasında yer alan PID kontrolörün her bir giriş için oransal, türevsel ve integral olmak üzere üç kontrol parametresi ile ayarlandığı görülür. Eğer ki, bu üç parametre iyi bir şekilde ayarlandığı sürece kontrol edilen sistem tepki verme süresi ve kesinlik konusunda çok iyi sonuçlar verdikleri görülür.

Bununla beraber değerlendirme yapılabilmesi amacı ile aynı işlerin bulanık mantık kontrolörünün etkidiği sistemin vermiş olduğu cevaplar göz önüne getirildiğinde; sistemin tepki verme süresinin klasik PID kontrolöre nazaran çok daha kısa sürede gerçekleştirdiği gözlenmektedir. Bununla beraber simülasyon grafiklerinde görüldüğü üzere sistemin verdiği cevabın referans olarak gözlenen çizgiye olan ulaşma süresinin daha kısa sürede gerçekleşmiş olması ve yapmış olduğu aşım miktarının çok daha az olması klasik kontrol sistemi olan PID kontrolöre nazaran bulanık kontrol sistemlerinin tercih edilebilir bir kontrolör olmasına neden olmaktadır.

Fakat bulanık kontrolörünün arzu edilen sonuçlara ulaşabilmesi için sahip olduğu parametrelerin iyi bir şekilde ayarlanmış olması mutlaklıdır. Uzman kişinin bilgisini sisteme yansıttığı için bulanık kontrolörün sahip olduğu kural tabanının ve üyelik fonksiyonlarının sahip olduğu parametrelerinin iyi bir şekilde ayarlanmış olması kesin koşuldur. İyi ayarlanmış bir bulanık kontrolör zaman bölgesinde hızlı tepki verirken, hata değeri olarak da en az miktarda cevaba ulaşacaktır.

Bulanık kontrolörün simülasyonlarda kullanılan her bir iş durumu için genetik algoritma kullanılarak en iyi uygulama ile elde edilen üyelik fonksiyonların doğrultusunda sistemin verdiği cevabın hem PID kontrolöre hem de bulanık kontrolöre kıyasla zaman bölgesinde çok daha hızlı bir şekilde istenen referans çizgisine ulaştığı ve referans çizgisini en az hatayla takip edebildiği gözlenmiştir.

Genetik algoritma tabanlı bulanık mantık kontrolörün en iyi uygulama esnasında girilen parametrelerin miktarı hesaplanma süresine ve de kontrolör cevabına doğrudan etki etmektedir. Fakat parametrelere girilen değerler arasında yer alan popülasyon sayısındaki ve nesil sayısındaki artış hesaplama süresinin de artmasına neden olmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu belli bir nesilden sonra yapılan hesaplamaların sistemin verdiği cevapları büyük ölçüde etkilemediğinden dolayı popülasyon sayısının ve nesil sayısının çok yüksek seviyede tutulması zaman kaybına sebep olmaktadır. Fakat bir önceki nesil ile bir sonraki nesil arasındaki uygunluk değerlerinin uzmanın sisteme tolerasyon değeri girmesi ile bununda önüne geçilebilmekte fakat sistem hesaplama işlemini istenen nesilde tamamlayamamaktadır.

Dayanıklılık simülasyonlarında her bir kontrolör için robot koluna yüksüz ve 20 kg. yüklü olmak üzere birer çember çizdirilmiştir. Robot kolunun uç noktasının yüksüz ve yüklü durumlarda tam bir çember çizebilmesi için ihtiyaç duyduğu zaman her bir kontrolör için elde edilmiştir ve Tablo 6.1’de belirtilmiştir.

Tablo 6.1. Dayanıklılık simülasyonları başarımlar tablosu

Kontrolör \ Parametreler	Yüksüz (0 kg.) [sn]	Yüklü (20 kg.) [sn]
PID Kontrolör	7.89	8.03
Bulanık Mantık Kontrolör	6.45	6.46
Genetik Tabanlı Bulanık Mantık Kontrolör	6.42	6.45



Tüm bu simülasyonlar doğrultusunda bulanık kontrolör ve genetik tabanlı bulanık kontrolörün, klasik kontrolör olan PID kontrolörden daha hızlı ve kesin cevap vermeleri aynı zamanda istenen referans doğrultuya en az hata ile ulaşmaları ve de takip etmelerinden dolayı üstünlükleri görülebilmektedir. Aynı zamanda simülasyonlarda tekrar incelendiği üzere genetik algoritma yöntemi ile en iyi uygulama edilmiş bulanık mantık kontrol yönteminin, kontrolörün zaman bölgesinde hızlı cevap vermesi ve referans çizginin en az hata ile takip edebilmesinden dolayı, bulanık kontrolörden daha etkili bir kontrol yöntemi olduğu ortaya çıkmaktadır.

## KAYNAKLAR

- [1] NIKU, S.B., "Introduction to robotics: Analysis, systems, applications", Prentice-Hall: Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [2] SANDIER, B.Z., "Robotics designing the mechanisms for automated machinery, (2nd Edition)", San Diego, Academic Press, 1999.
- [3] KWOK, D.P., SUN, Z.Q., WANG, P., "Linguistic PID controllers for robot arms, Control 1991". Control '91., International Conference ,1991.
- [4] GARDNER, J.F., "Simulations of machines using MATLAB and simulink", Wadsworth Group, Pacific Grove, California, 2001.
- [5] HAKLIDIR, M., GÜLER, M., "Bulanık mantıklı PD kontrolcü ile iki serbestlik dereceli robot kolunun kontrolü", 11. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, 4-6 Eylül, 2003.
- [6] LEWIS, F.L., ABDALLAH, C.T., DAWSON, D.M., "Control of robot manipulators", New York, Macmillan Publishing Company, 1993.
- [7] LI-XIN, W., "A course in fuzzy systems and control", New Jersey, Prentice Hall, 1997.
- [8] NİL, M., " İki serbestlik dereceli robot kolunun dinamik modellenmesi simülasyonu ve kontrolü", Yüksek Lisans Tezi , Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Ocak, 1999.
- [9] KOVACIC, Z., BOGDAN, S., "Fuzzy controller design: Theory and applications", CRC, Aralık, 2005.
- [10] LIU, B., DUAN, S., KANG, Y., CHEN, C., "Optimization of scaling factors of fuzzy-logic controller for CVCF inverter by genetic algorithm", Department of Electrical Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan,China, Vol. 2, p-p 1396- 1400, Eylül, 2005.
- [11] KURT, M., SEMETAY, C., "Genetik algoritma ve uygulama alanları", Mühendis ve Makina, Cilt. 42, Sayı. 501, p-p 19-24, Ekim, 2001.
- [12] WHITLEY, D., "A genetic algorithm tutorial", Technical Report CS-93-103, Dept. Of Computer Science, Colorado State University, 1993.

- [13] ÖZKÖK, D., "PID, Fuzzy-PID and variable structure control of two link manipulators", Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Haziran, 1998.
- [14] BYRNE, J.P., "GA-Optimisation of a fuzzy logic controller", M.Eng. Project Report, School of Electronic Engineering, DCU, Ağustos, 2003.
- [15] SOORAKSA, P., GUANRONG, C., "Mathematical modeling and fuzzy control of a flexible-link robot arm", Department of Electrical and Computer Engineering University of Houston, Houston, Temmuz, 1997.
- [16] JIN, Y., "Decentralized adaptive fuzzy control of robot manipulators", Systems, Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on Volume 28, No. 1, p-p 47 – 57, Şubat, 1998.
- [17] ANTONIO, A., LUISCUSTODIO, C.P.-F., "Fuzzy modelling: A rule based approach", Proceedings of the fifth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 1, p-p 162-168, New Orleans, LA, USA, 1996.
- [18] CHEONG, F., LAI, R., "Constraining the optimization of a fuzzy logic controller using an enhanced genetic algorithm", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 30, No. 1, p-p 31 – 46, Şubat, 2000.
- [19] NARANKER, D., "Introduction to genetic algorithms", URL: [http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise\\_96/journal/vol1/hmw/article1.html](http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol1/hmw/article1.html) Accessed online, Ağustos, 2003.
- [20] HOUCK, C.R., JOINES, J., KAY, M., "A genetic algorithm for function optimisation: A Matlab implementation" ACM Transactions on Mathematical Software, 1996.
- [21] PAVEL, O., RADOMIL, M., "Automatic optimal design of fuzzy controllers based on genetic algorithms", IEE Conference Publication 446, Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, 2-4 Eylül, 1997.
- [22] LINKENS, D.A., NYONGESA, H.O., "Genetic algorithms for fuzzy control. Part 1: Offline system development and application", IEEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 142, No. 3, p-p 161-176, Mayıs, 1995.
- [23] LINKENS, D.A., NYONGESA, H.O., "Genetic algorithms for fuzzy control. Part 1: Online system development and application", IEEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 142, No. 3, p-p 177-185, Mayıs, 1995.

- [24] PARK, Y.J., CHO, H.S., CHA, D.H., “Genetic algorithm based optimization of fuzzy logic controller using characteristic parameters”, Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation, Vol. 2, p-p 831-836, Perth, WA, Australia, Aralık, 1995.
- [25] HERRERA, F., LOZANO, M., VERDEGAY, J.L., “Tuning fuzzy logic controllers by genetic algorithms”, Vol. 12, No. 3-4, p-p 299-315, 1995.
- [26] BELARBI, K., TITEL, F., “Genetic algorithm for the design of a class of fuzzy controllers: An alternative approach”, IEEE Transactions On Fuzzy Systems , Vol. 8, No. 4, p-p 398-405, Ağustos, 2000.

## ÖZGEÇMİŞ

Emre AYTAN, 19.03.1980'de Nazilli'de doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Nazilli'de tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümüne girdi ve 2003'de mezun oldu. Askerlik görevini tamamladıktan sonra 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim dalı Makina Tasarım ve İmalat bilim dalı yüksek lisans programına katılarak eğitimini sürdürdü.