

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK EKLEMLİ VE ESNEK BAĞLI ROBOT KOLU
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS

Mekatronik Müh. İsmail Hakkı AKYÜZ

Anabilim Dalı: Mekatronik Mühendisliği

Danışman: Doç.Dr. Zafer BİNGÜL

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ESNEK EKLEMLİ VE ESNEK BAĞLI ROBOT KOLU
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Müh. İsmail Hakkı AKYÜZ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 KASIM 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 16 ARALIK 2011

**Tez Danışmanı
Doç.Dr. Zafer BİNGÜL**

(.....)

**Üye
Doç.Dr. Serdar KÜÇÜK**

(.....)

**Üye
Doç.Dr. Erkan ZERGEROĞLU**

(.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Robot kollarındaki esneklik ve bağın uç noktasında oluşan titreşimlerin sönümlenmesi, robot uç işlevcisinde meydana gelen sonsuz sayıda yüksek frekanslı doğrusal olmayan titreşimlerden dolayı, bu güne kadar kontrol teorisinde üzerinde en çok çalışılan konulardan birisi olmuştur. Esneklik, robotlara, endüstride kullanılan geleneksel rijit yapıdaki robot kollarına göre, güç tasarrufu, daha fazla yük kapasitesi, çalışma hızı gibi çeşitli avantajlar sağlar. Bununla birlikte uç işlevcide meydana gelen titreşimler ve bu tip robotların doğrusal olmayan dinamikleri nedeniyle esnek yapılı robotların kontrolü konusunda çeşitli zorluklar oluşmaktadır. Esnek eklemlili veya esnek bağlı robotlara, uzay, savunma, tıp, hizmet ve makine imalatı gibi çeşitli endüstri alanlarında fazlaca ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, esnek eklemlili ve esnek bağlı robot kollarının, matematiksel olarak modellenmesi ve çeşitli kontrol yöntemleriyle gerçek zamanlı kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışması süresince her zaman ilgilerini yakından hissettiğim, çalışmalarına yapmış olduğu katkıları ve fikirleri sayesinde bugünlere gelmemde yol gösterici olan değerli danışmanım Sn. Doç. Dr. Zafer BİNGÜL' e teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmamın, üretilmesi konusunda benden asla yardımlarını esirgemeyen Tırsan Treyler A.Ş. Adapazarı Fabrikası çalışanlarına, bakım onarım bölümü personeline ve üniversite hayatım boyunca vermiş olduğu değerli fikirlerle beni yönlendiren ve teşvik eden Tırsan Treyler A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Çetin NUHOĞLU' na ve son olarak hayatım boyunca beni destekleyen, bugünlere getiren babam Sakarya Ağır Ceza Mahkemesi Başkanı Ahmet AKYÜZ, annem Fazilet AKYÜZ ve değerli kardeşim Salih AKYÜZ' e sonsuz minnet duygularımı sunarım.

11 Kasım 2011

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ	xv
SİMGELER ve KISALTMALAR	xix
ÖZET.....	xxii
İNGİLİZCE ÖZET	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Bu Tezde Yapılan Çalışmalar	3
2. ESNEK EKLEMLİ VE ESNEK BAĞLI ROBOTLARIN TEST DÜZENEĞİ	5
2.1. Esnek Eklemlili Robot Kolu Sistemi	6
2.2. Esnek Bağlı Robot Kolu Sistemi	7
2.3. BLDC Motor, Motor Sürücü ve Dağıtım Kartı.....	9
2.4. İvmeölçer ve Yük Hücreleri.....	11
3. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ	12
3.1. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Modellenmesi Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar.....	12
3.2. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Matematiksel Modeli	13
4. ESNEK BAĞLI ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ.....	36
4.1. Esnek Bağlı Robot Kolunun Modellenmesi Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar.....	36
4.2. Esnek Bağlı Robot Kolunun Matematiksel Modellemesi.....	38
4.2.1. Esnek bağlı robot kolunun Timoshenko modeli	39
4.2.2. Esnek bağlı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli	43
4.2.3. Esnek bağlı robot kolunun Timoshenko modelinin çözümü.....	46
4.2.4. Esnek bağlı robot kolunun Euler-Bernoulli modelinin çözümü	49
4.2.5. Esnek bağlı robot kolunun Modları ve Mod Şekilleri.....	51
5. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ	55
5.1. Esnek Eklemlili Robot Kolu Kontrolü Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar	55
5.2. Esnek Eklemlili Robot Kolu Kontrolünde Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	56
5.2.1. PID kontrol yöntemi.....	56
5.2.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi	59
5.2.2.1. Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları.....	60
5.2.2.2. Bulanık mantığın üstünlüğü ve eksiklikleri	62
5.2.3. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi	62
5.2.4. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi	64
5.3. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Açık Çevrim Cevapları	67
5.4. Esnek Eklemlili Robot Kolunun PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	70
5.4.1. PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları	70

5.4.2. PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	73
5.4.2.1. Esnek eklemli robot kolunun PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri.....	74
5.4.2.2. Esnek eklemli robot kolunun PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	78
5.4.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	79
5.4.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	83
5.4.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri	87
5.4.2.3. PID kontrolörün gürbüzlüğü'nün test edilmesi	91
5.4.2.3.1. PID kontrolörün dürtü girişi deneyleri.....	91
5.4.2.3.2. PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri.....	95
5.5. Esnek Eklemli Robot Kolunun Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	100
5.5.1. Bulanık mantık kontrolör yapısı ve blok diyagramları	100
5.5.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	107
5.5.2.1. Esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneyleri	108
5.5.2.2. Esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	112
5.5.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	113
5.5.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	117
5.5.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri	121
5.5.2.3. Bulanık mantık kontrolörün gürbüzlüğü'nün test edilmesi.....	125
5.5.2.3.1. Bulanık mantık kontrolörün dürtü girişi deneyleri.....	126
5.5.2.3.2. Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri.....	130
5.6. Esnek Eklemli Robot Kolunun Durum Geri Beslemeli Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	134
5.6.1. Durum geri beslemeli kontrolör yapısı ve blok diyagramları	134
5.6.2. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	136
5.6.2.1. Esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneyleri	137
5.6.2.2. Esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	141
5.6.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	142
5.6.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	146
5.6.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri	150
5.6.2.3. Durum geri beslemeli kontrolörün gürbüzlüğü'nün test edilmesi.....	154
5.6.2.3.1. Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü girişi deneyleri	155
5.6.2.3.2. Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri	159
5.7. Esnek Eklemli Robot Kolunun Kesir Dereceli PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	163
5.7.1. Kesir dereceli PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları	163
5.7.2. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	168

5.7.2.1. Esnek eklemlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri	169
5.7.2.2. Esnek eklemlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	173
5.7.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	173
5.7.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	178
5.7.2.3. Kesir dereceli PID kontrolörün gürbüzlüğünün test edilmesi.....	182
5.7.2.3.1. Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü girişı deneyleri.....	182
5.7.2.3.2. Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişı deneyleri.....	187
5.8. Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolü İçin Uygulanan Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması	191
5.8.1. Geliştirilen kontrolörlerin birim basamak girişı deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması	192
5.8.2. Geliştirilen kontrolörlerin sinüzoidal yörünge girişı deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması	201
6. ESNEK BAĞLI ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ	211
6.1. Esnek Bağlı Robotun Kontrolü Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar	211
6.2. Esnek Bağlı Robot Kolunun Kontrolünde Kullanılan Kontrol Yöntemleri.....	212
6.3. Esnek Bağlı Robot Kolunun Açık Çevrim Cevapları	212
6.4. Esnek Bağlı Robot Kolunun PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi.....	217
6.4.1. PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları	217
6.4.2. PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	220
6.4.2.1. Esnek bağı robot kolunun PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri.....	220
6.4.2.2. Esnek bağı robot kolunun PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri....	222
6.4.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	222
6.4.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	224
6.4.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	226
6.4.2.3. PID kontrolörün kararlılığının test edilmesi	227
6.4.2.3.1. PID kontrolörün dürtü girişı deneyi	228
6.4.2.3.2. PID kontrolörün bozucu darbe girişı deneyi	229
6.5. Esnek Bağlı Robot Kolunun Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	230
6.5.1. Bulanık mantık kontrolör yapısı ve blok diyagramları	230
6.5.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	237
6.5.2.1. Esnek bağı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneyleri	238
6.5.2.2. Esnek bağı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	240
6.5.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	241
6.5.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	243
6.5.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	245
6.5.2.3. Bulanık mantık kontrolörün kararlılığının test edilmesi	246
6.5.2.3.1. Bulanık mantık kontrolörün dürtü girişı deneyi.....	246

6.5.2.3.2. Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi.....	248
6.6. Esnek Bağlı Robot Kolunun Durum Geri Beslemeli Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	249
6.6.1. Durum geri beslemeli kontrolör yapısı ve blok diyagramları	249
6.6.2. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	252
6.6.2.1. Esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneyleri	252
6.6.2.2. Esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	254
6.6.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	255
6.6.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	257
6.6.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	259
6.6.2.3. Durum geri beslemeli kontrolörün kararlılığının test edilmesi	260
6.6.2.3.1. Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü girişi deneyi.....	260
6.6.2.3.2. Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi.....	261
6.7. Esnek Bağlı Robot Kolunun Kesir Dereceli PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi	262
6.7.1. Kesir dereceli PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları	262
6.7.2. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması	266
6.7.2.1. Esnek bağlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri	267
6.7.2.2. Esnek bağlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri.....	269
6.7.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri.....	269
6.7.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri	271
6.7.2.3. Kesir dereceli PID kontrolörün kararlılığının test edilmesi	273
6.7.2.3.1. Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü girişi deneyi.....	273
6.7.2.3.2. Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi.....	275
6.8. Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolü İçin Uygulanan Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	276
6.8.1. Geliştirilen kontrolörlerin birim basamak girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması	277
6.8.2. Geliştirilen kontrolörlerin sinüzoidal yörünge girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması	282
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	289
KAYNAKLAR	293
EKLER.....	301
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	314
ÖZGEÇMİŞ	315

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1: Esnek yapılı robotların uzay istasyonlarında kullanımı.....	2
Şekil 1. 2: Esnek eklemlerin robotik insan eli uygulamalarında kullanımı	2
Şekil 2. 1 : Tek esnek bağlı ve tek esnek eklemlili robot kolu test düzeneği.....	5
Şekil 2. 2: Tek esnek eklemlili robot kolunun katı modeli	7
Şekil 2. 3: Tek eklemlili esnek bağlı robot kolunun katı modeli	8
Şekil 2. 4: Esnek yapılı robot kolunun blok diyagramı.....	8
Şekil 2. 5: dSPACE DS1103 kontrol kartı ve bilgisayar ara yüzü.....	9
Şekil 2. 6: Fırçasız doğru akım motoru, sürücüsü ve bağlantı şeması	10
Şekil 2. 7: Dağıtım kartı	10
Şekil 2. 8: Esnek bağlı robotta kullanılan yük hücresi.....	11
Şekil 2. 9: Esnek bağlı robotta kullanılan ivmeölçer	11
Şekil 3. 1: Eklem esnekliği modeli	14
Şekil 3. 2: Esnek eklemlili robot kolu modeli	15
Şekil 3. 3: Esnek eklemin basit yay modelinin üstten ve yandan görünüşü	18
Şekil 3. 4: Kullanılan yaylar, yay boyları ve yay sertlikleri.....	24
Şekil 3. 5: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 1.85 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	24
Şekil 3. 6: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	25
Şekil 3. 7: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 16.96 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	25
Şekil 3. 8: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 24.52 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	26
Şekil 3. 9: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 49.05 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	26
Şekil 3. 10: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	27
Şekil 3. 11: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	27
Şekil 3. 12: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 113.63 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	28
Şekil 3. 13: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 1.85 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	28
Şekil 3. 14: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	29
Şekil 3. 15: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 16.96 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	29
Şekil 3. 16: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 24.52 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	30
Şekil 3. 17: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 49.05 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	30

Şekil 3. 18: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m).....	31
Şekil 3. 19: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	31
Şekil 3. 20: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 113.63 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m).....	32
Şekil 4. 1: Esnek bağlı robot modeli	39
Şekil 4. 2: Esnek bağlı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli için şematik diyagramı.....	44
Şekil 4. 3: Esnek bağlı robotun esnek bağının serbest salınım grafiği.....	54
Şekil 5. 1: PID kontrol blok diyagramı.....	57
Şekil 5. 2: (a) Klasik-Mantık küme gösterimi (b) Bulanık-Mantık küme gösterimi .	61
Şekil 5. 3: Sistemin durum uzayının bloklar ile gösterimi.....	63
Şekil 5. 4: Durum geri beslemeli sistem	63
Şekil 5. 5: Kesir dereceli PID kontrolörün blok diyagramı	66
Şekil 5. 6: a) Tam dereceli PID b) Kesir dereceli PID'nin P-I-D Düzlemi	66
Şekil 5. 7: Esnek eklemli robotun açık çevrim simulink blokları.....	67
Şekil 5. 8: Esnek eklemli robot kolunun açık çevrim dürtü cevabı	68
Şekil 5. 9: Esnek eklemli robot kolunun açık çevrim birim basamak yanıtı.....	69
Şekil 5. 10: Esnek eklemli robot kolunun açık çevrim $4.8\sin(10rd)$ girişi için cevabı	70
Şekil 5. 11: Esnek eklemli robot kolunun PID kontrol için simulink blokları.....	71
Şekil 5. 12: Simulink'te oluşturulan PID kontrol yapısı	72
Şekil 5. 13: PID kontrolörler şeması	73
Şekil 5. 14: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m). 74	
Şekil 5. 15: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m). 75	
Şekil 5. 16: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m). 75	
Şekil 5. 17: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	76
Şekil 5. 18: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	76
Şekil 5. 19: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	77
Şekil 5. 20: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	79
Şekil 5. 21: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	79
Şekil 5. 22: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	80
Şekil 5. 23: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	80
Şekil 5. 24: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	81
Şekil 5. 25: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	81
Şekil 5. 26: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	83

Şekil 5. 27: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	83
Şekil 5. 28: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	84
Şekil 5. 29: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	84
Şekil 5. 30: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	85
Şekil 5. 31: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	85
Şekil 5. 32: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	87
Şekil 5. 33: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	87
Şekil 5. 34: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	88
Şekil 5. 35: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	88
Şekil 5. 36: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	89
Şekil 5. 37: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	89
Şekil 5. 38: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	91
Şekil 5. 39: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	92
Şekil 5. 40: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	92
Şekil 5. 41: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	93
Şekil 5. 42: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	93
Şekil 5. 43: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	94
Şekil 5. 44: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	96
Şekil 5. 45: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	96
Şekil 5. 46: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	97
Şekil 5. 47: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) ...	97
Şekil 5. 48: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) ...	98
Şekil 5. 49: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) ...	98
Şekil 5. 50: Bulanık mantık ana kontrolör şeması	101
Şekil 5. 51: Bulanık Kontrolör I' in üyelik fonksiyonları, θ açısının hatası, θ açısının hatasının türevi ve çıkış	102
Şekil 5. 52: Bulanık Kontrolör I' in kontrol yüzeyi	103
Şekil 5. 53: Bulanık Kontrolör II' in üyelik fonksiyonları, α açısının hatası, α açısının hatasının türevi ve çıkış	104
Şekil 5. 54: Bulanık Kontrolör II' nin kontrol yüzeyi.....	104
Şekil 5. 55: Bulanık Kontrolör III' ün üyelik fonksiyonları, Bulanık Kontrolör I' in çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve çıkış.....	105
Şekil 5. 56: Bulanık Kontrolör III' ün kontrol yüzeyi	106
Şekil 5. 57: Bulanık kontrolör Simulink blokları.....	106
Şekil 5. 58: Simulink' te oluşturulan bulanık mantık kontrolör şeması.....	107

Şekil 5. 59: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	108
Şekil 5. 60: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	109
Şekil 5. 61: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	109
Şekil 5. 62: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	110
Şekil 5. 63: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	110
Şekil 5. 64: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	111
Şekil 5. 65: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	113
Şekil 5. 66: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	113
Şekil 5. 67: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	114
Şekil 5. 68: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	114
Şekil 5. 69: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	115
Şekil 5. 70: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	115
Şekil 5. 71: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	117
Şekil 5. 72: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	117
Şekil 5. 73: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	118
Şekil 5. 74: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	118
Şekil 5. 75: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	119
Şekil 5. 76: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	119
Şekil 5. 77: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	121
Şekil 5. 78: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	122
Şekil 5. 79: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	122
Şekil 5. 80: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	123
Şekil 5. 81: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	123

Şekil 5. 82: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	124
Şekil 5. 83: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	126
Şekil 5. 84: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	126
Şekil 5. 85: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	127
Şekil 5. 86: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	127
Şekil 5. 87: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	128
Şekil 5. 88: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	128
Şekil 5. 89: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m) ...	130
Şekil 5. 90: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m) ...	130
Şekil 5. 91: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m) ...	131
Şekil 5. 92: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) .	131
Şekil 5. 93: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) .	132
Şekil 5. 94: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m) .	132
Şekil 5. 95: Durum geri beslemeli kontrolör blok diyagramı	134
Şekil 5. 96: Durum geri beslemeli kontrolörün simulink blokları	135
Şekil 5. 97: Simulink' te oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör şeması.....	136
Şekil 5. 98: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	137
Şekil 5. 99: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	138
Şekil 5. 100: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	138
Şekil 5. 101: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	139
Şekil 5. 102: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	139
Şekil 5. 103: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	140
Şekil 5. 104: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	142
Şekil 5. 105: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	142
Şekil 5. 106: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	143
Şekil 5. 107: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	143
Şekil 5. 108: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	144
Şekil 5. 109: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	144
Şekil 5. 110: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	146
Şekil 5. 111: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	146
Şekil 5. 112: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	147

Şekil 5. 113: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	147
Şekil 5. 114: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	148
Şekil 5. 115: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	148
Şekil 5. 116: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	150
Şekil 5. 117: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	151
Şekil 5. 118: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	151
Şekil 5. 119: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	152
Şekil 5. 120: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	152
Şekil 5. 121: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	153
Şekil 5. 122: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	155
Şekil 5. 123: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	155
Şekil 5. 124: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	156
Şekil 5. 125: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	156
Şekil 5. 126: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	157
Şekil 5. 127: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	157
Şekil 5. 128: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	159
Şekil 5. 129: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	159
Şekil 5. 130: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	160
Şekil 5. 131: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	160
Şekil 5. 132: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	161
Şekil 5. 133: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	161
Şekil 5. 134: Kesir dereceli PID kontrolör şeması.....	164
Şekil 5. 135: Kesir dereceli PID I ve PID I kontrolörlerinin bode diyagramı	165
Şekil 5. 136: Kesir dereceli PID II ve PID II kontrolörlerinin bode diyagramı.....	166
Şekil 5. 137: Kesir dereceli PID kontrolörün simulink blokları	167
Şekil 5. 138: Kesir dereceli PID kontrolör simulink bloğu.....	168
Şekil 5. 139: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	169
Şekil 5. 140: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	169
Şekil 5. 141: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	170

Şekil 5. 142: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	170
Şekil 5. 143: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	171
Şekil 5. 144: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	171
Şekil 5. 145: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	174
Şekil 5. 146: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	174
Şekil 5. 147: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	175
Şekil 5. 148: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	175
Şekil 5. 149: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	176
Şekil 5. 150: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	176
Şekil 5. 151: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	178
Şekil 5. 152: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	178
Şekil 5. 153: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	179
Şekil 5. 154: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	179
Şekil 5. 155: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	180
Şekil 5. 156: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	180
Şekil 5. 157: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	182
Şekil 5. 158: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	183
Şekil 5. 159: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m).....	183
Şekil 5. 160: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	184
Şekil 5. 161: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	184
Şekil 5. 162: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m).....	185
Şekil 5. 163: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	187
Şekil 5. 164: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	187
Şekil 5. 165: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)	188
Şekil 5. 166: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	188
Şekil 5. 167: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	189

Şekil 5. 168: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)	189
Şekil 5. 169: Esnek eklemli robot kolunun birim basamak girişi deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı	192
Şekil 5. 170: Esnek eklemli robot kolunun birim basamak girişi deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı	198
Şekil 5. 171: Esnek eklemli robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı	201
Şekil 5. 172: Esnek eklemli robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı	206
Şekil 6. 1: Esnek bağlı robot kolunun açık çevrim simulink blokları.....	213
Şekil 6. 2: Esnek bağın mesafe-gerilim kalibrasyonu eğrisi	214
Şekil 6. 3: Esnek bağlı robot kolunun açık çevrim dürtü yanıtı.....	215
Şekil 6. 4: Esnek bağlı robot kolunun açık çevrim $2.4\sin(10rd)$ girişi için cevabı..	216
Şekil 6. 5: PID kontrolör kontrol şeması.....	218
Şekil 6. 6: PID kontrolör simulink blokları.....	219
Şekil 6. 7: Simulink'te oluşturulan PID kontrol yapısı.....	219
Şekil 6. 8: 90° lik birim basamak girişi yanıtı	221
Şekil 6. 9: 60° lik birim basamak girişi yanıtı	221
Şekil 6. 10: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(1rd)$).....	223
Şekil 6. 11: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(2rd)$).....	223
Şekil 6. 12: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)	225
Şekil 6. 13: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60 derece).....	225
Şekil 6. 14: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	227
Şekil 6. 15: Birim dürtü yanıtı deneyi.....	228
Şekil 6. 16: Bozucu darbe girişi deneyi	229
Şekil 6. 17: Bulanık mantık kontrolör kontrol şeması	231
Şekil 6. 18: Bulanık Kontrolör I' in üyelik fonksiyonları, θ açısının hatası, θ açısının hatasının türevi ve çıkış	232
Şekil 6. 19: Bulanık Kontrolör I' in kontrol yüzeyi	233
Şekil 6. 20: Bulanık Kontrolör II' in üyelik fonksiyonları, uç işlevcinin ivmesinin hatası, uç işlevcinin ivmesinin hatasının türevi ve çıkış.....	234
Şekil 6. 21: Bulanık Kontrolör II' nin kontrol yüzeyi.....	234
Şekil 6. 22: Bulanık Kontrolör III' ün üyelik fonksiyonları, Bulanık Kontrolör I' in çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve çıkış.....	235
Şekil 6. 23: Bulanık Kontrolör III' ün kontrol yüzeyi	236
Şekil 6. 24: Bulanık mantık kontrolör simulink blokları	236
Şekil 6. 25: Simulink'te oluşturulan bulanık mantık kontrolör yapısı	237
Şekil 6. 26: 90° lik birim basamak girişi yanıtı	239

Şekil 6. 27: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı	239
Şekil 6. 28: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(1rd)).....	241
Şekil 6. 29: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(2rd)).....	242
Şekil 6. 30: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)	243
Şekil 6. 31: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)	244
Şekil 6. 32: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	245
Şekil 6. 33: Birim dürtü yanıtı deneyi	246
Şekil 6. 34: Bozucu darbe girişi deneyi	248
Şekil 6. 35: Durum geri beslemeli kontrolör kontrol şeması	250
Şekil 6. 36: Durum geri beslemeli kontrolör simulink blokları	250
Şekil 6. 37: Simulink' te oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör yapısı	251
Şekil 6. 38: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı	253
Şekil 6. 39: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı	253
Şekil 6. 40: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(1rd)).....	255
Şekil 6. 41: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(2rd)).....	256
Şekil 6. 42: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)	257
Şekil 6. 43: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)	258
Şekil 6. 44: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi	259
Şekil 6. 45: Birim dürtü yanıtı deneyi	260
Şekil 6. 46: Bozucu darbe girişi deneyi	261
Şekil 6. 47: Kesir dereceli PID kontrolörün kontrol şeması	263
Şekil 6. 48: Kesir dereceli PID I bode diyagramı	264
Şekil 6. 49: Kesir dereceli PID II bode diyagramı	265
Şekil 6. 50: Kesir dereceli PID kontrolörün simulink blokları	266
Şekil 6. 51: Simulink' te oluşturulan kesir dereceli PID kontrolör yapısı	266
Şekil 6. 52: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı	267
Şekil 6. 53: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı	268
Şekil 6. 54: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(1rd)).....	270
Şekil 6. 55: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: 15sin(2rd)).....	270
Şekil 6. 56: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)	272
Şekil 6. 57: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)	272
Şekil 6. 58: Birim dürtü yanıtı deneyi	274
Şekil 6. 59: Bozucu darbe girişi deneyi	275
Şekil 6. 60: Esnek bağlı robot kolunun birim basamak girişi deneyleri a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı.....	278
Şekil 6. 61: Esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı.....	283

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3. 1: Esnek eklemli robot kolun modellerinin salınım frekansları ve oturma zamanları.....	32
Tablo 3. 2: Esnek eklemli robot kolunun sistem parametreleri	35
Tablo 4. 1 : Esnek bağlı robot kolunun model parametreleri.....	54
Tablo 5. 1: PID parametrelerini ayarlama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları..	58
Tablo 5. 2: Ziegler-Nichols yöntemi.....	59
Tablo 5. 3: PID parametrelerinin sistem çıkışına olan etkisi	59
Tablo 5. 4: Klasik Mantık - Bulanık Mantık arasındaki temel farklılıklar	60
Tablo 5. 5: PID kontrolörün konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçlar.....	78
Tablo 5. 6: PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları	82
Tablo 5. 7: PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları	86
Tablo 5. 8: PID kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları	90
Tablo 5. 9: PID kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları	95
Tablo 5. 10: PID kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları	99
Tablo 5. 11: Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu	101
Tablo 5. 12: Bulanık Kontrolör II' in kural tablosu	103
Tablo 5. 13: Bulanık Kontrolör III' ün kural tablosu.....	105
Tablo 5. 14: Bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları	112
Tablo 5. 15: Bulanık mantık kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları	116
Tablo 5. 16: Bulanık mantık kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları.....	120
Tablo 5. 17: Bulanık mantık kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları.....	125
Tablo 5. 18: Bulanık mantık kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları.....	129
Tablo 5. 19: Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları.....	133
Tablo 5. 20: Durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları.....	141
Tablo 5. 21: Durum geri beslemeli kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları.....	145
Tablo 5. 22: Durum geri beslemeli kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları.....	149
Tablo 5. 23: Durum geri beslemeli kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları	154
Tablo 5. 24: Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları.....	158
Tablo 5. 25: Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları	162
Tablo 5. 26: Kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları.....	172
Tablo 5. 27: Kesir dereceli PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları	177

Tablo 5. 28: Kesir dereceli PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları.....	181
Tablo 5. 29: Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları.....	186
Tablo 5. 30: Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları	190
Tablo 5. 31: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m).....	193
Tablo 5. 32: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)	195
Tablo 5. 33: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)	196
Tablo 5. 34: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58m)	197
Tablo 5. 35: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)	199
Tablo 5. 36: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)	200
Tablo 5. 37: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m).....	202
Tablo 5. 38: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)	203
Tablo 5. 39: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)	204
Tablo 5. 40: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86N/m, Eklem uzunluğu 0.58m).....	205
Tablo 5. 41: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)	207
Tablo 5. 42: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)	208
Tablo 6. 1: PID kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	222
Tablo 6. 2: PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları	224
Tablo 6. 3: PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları	226
Tablo 6. 4: PID kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları	227
Tablo 6. 5: PID kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları	228

Tablo 6. 6: PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları	229
Tablo 6. 7: Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu	232
Tablo 6. 8: Bulanık Kontrolör II' in kural tablosu	233
Tablo 6. 9: Bulanık Kontrolör III' ün kural tablosu.....	235
Tablo 6. 10: Bulanık mantık kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları	240
Tablo 6. 11: Bulanık mantık kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları	242
Tablo 6. 12: Bulanık mantık kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	244
Tablo 6. 13: Bulanık mantık kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	246
Tablo 6. 14: Bulanık mantık kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	247
Tablo 6. 15: Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	249
Tablo 6. 16: Durum geri beslemeli kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	254
Tablo 6. 17: Durum geri beslemeli kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	256
Tablo 6. 18: Durum geri beslemeli kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	258
Tablo 6. 19: Durum geri beslemeli kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	259
Tablo 6. 20: Durum geri beslemeli kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları	261
Tablo 6. 21: Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları	262
Tablo 6. 22: Kesir dereceli PID kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları	269
Tablo 6. 23: Kesir dereceli PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	271
Tablo 6. 24: Kesir dereceli PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları.....	273
Tablo 6. 25: Kesir dereceli PID kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	274
Tablo 6. 26: Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları.....	275
Tablo 6. 27: Esnek bağlı robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişi deney sonuçları	277
Tablo 6. 28: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı)	280
Tablo 6. 29: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı)	281
Tablo 6. 30: Esnek bağlı robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları	284

Tablo 6. 31: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi)	285
Tablo 6. 32: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi).....	286

SİMGELER ve KISALTMALAR

A	:Sistem durum matrisi (Esnek eklemlili robot)
B	:Sistem geçiş matrisi
B_e	:Sistemin eşdeğer sürtünme katsayısı
C	:Sistem çıkış matrisi
${}_aD_t^\alpha$	:İntegrotürev operatörü
d	:Eklemin dönme noktasının, yayların bağlantı noktasına olan y eksenindeki uzaklığı
E	:Young modülü
$e(t)$	:Hata Sinyali
G	:Esnek eklemin elastik kayma modülü
F_0	:Yayın başlangıç kuvveti
F_i	: i . Yayın çekme kuvveti
F_{x_i}	:Yayın yatay eksenindeki bileşke çekme kuvveti
F_{y_i}	:Yayın düşey eksenindeki bileşke çekme kuvveti
F_{ix_j}	:Hareket sonrası i . yayın yatay eksenindeki çekme kuvveti
F_{iy_j}	:Hareket sonrası i . yayın düşey eksenindeki çekme kuvveti
J	:Uç işlevciadaki ağırlığın atalet momenti
I	:Esnek bağın atalet momenti
I_h	:Döner tablanın atalet momenti
i_m	:Motor akımı
J_e	:Esnek eklemin ataleti
J_t	:Robot kolunun toplam ataleti
K_m	:Motorun hız sabiti
K_d	:Planet dişlinin dişli oranı
K_t	:Motorun akım sabitini
K_s	:Eklem uyumu faktörü
$\mathcal{K}$	:Esnek bağlı robot kolunun esneklik matrisi
K_{yay}	:Eklemin esneklik sabiti
K_y	:Yayların, esneklik katsayıları
K_p	:Oransal kazanç
K_I	:İntegratör kazancı
K_D	:Türevsel kazanç
K_U	:Nihai kazanç
K	:Durum geri beslemeli kontrolörün kazanç matrisi

k	:Şekil faktörü
L	:Esnek çubuğun uzunluğu
L_i	:Hareket sonrası i. yayın yay boyu
l	:Yayların gerilmemiş haldeki uzunlukları
L_0	:Yayların eklemle bağlandığındaki başlangıç uzunlukları
L_{ix_j}	:Hareket sonrası i. yayın yatay eksenindeki uzunluğu
L_{iy_j}	:Hareket sonrası i. yayın düşey eksenindeki uzunluğu
M_{x_i}	:Yaydaki çekmeden kaynaklanan yataydaki moment
M_{y_i}	:Yaydaki çekmeden kaynaklanan düşeydeki moment
M_g	:Toplam geri döndürme momenti
M_p	:Uç işlevciindeki yük ağırlığı
ML_i	: i. Maliyet fonksiyonu
m	:Eklem veya bağ ağırlığı
M_{robot}	:Robot kolu toplam ağırlığı
M	:Esnek bağlı robot kolunun kütle matrisi
n_{Terim}	:Doğrusal olmayan terimler
OV	:Yüzde aşım miktarı
P_U	:Osilasyon periyodu
R_m	:Motor terminallerinden ölçülen direnç değeri
r	:Yayın döner tabla üzerindeki bağlantı noktasına olan x eksenini yönündeki uzaklığı
R	:Yayların eklem üzerindeki bağlantı noktasının, dönme merkezine, y eksenini yönündeki uzaklığı
$r(t)$	:Referans Sinyal
$RMS_{\alpha e}$	:Esnek eklemli robot kolu uç işlevcisinin etkin titreşim değeri
$RMS_{\theta e}$	:Esnek eklemli robot kolunu etkin motor dönme açısı hatası değeri
$RMS_{\delta e}$	:Esnek bağlı robot kolunun etkin sapma değeri
r_i	:Bağın Kesme miktarı için genelleştirilmiş koordinat
q_i	:Bağın bükülmesi için genelleştirilmiş koordinat
$ST\theta$	:Motor dönme açısının oturma zamanı
T_{tabla}	:Döner tablanın kinetik enerjisi
T_{eklem}	:Eklem kinetik enerjisi
τ, τ_m	:Motor momenti
T	:Toplam kinetik enerji
T_r	:Esnek bağın esnemeyen bölümünün kinetik enerjisi
T_e	:Esnek bağın esneyen bölümünün kinetik enerjisi
T	:Esnek bağlı robot kolunun tork matrisi
$TF_{PID I}$	:Birinci PID kontrolörün transfer fonksiyonu
$TF_{PID II}$	:İkinci PID kontrolörün transfer fonksiyonu
$TF_{FOPID I}$	:Birinci kesir dereceli PID kontrolörün transfer fonksiyonu

$TF_{FOPID II}$	:İkinci kesir dereceli PID kontrolörün transfer fonksiyonu
u	:Çubuğun bükülmesine bağlı olan sapma (Esnek bağlı robot)
V	:Toplam potansiyel enerji
v	:Bağın kaymasına bağlı olan sapma (Esnek bağlı robot)
V_{yer}	:Yeryüzüne göre oluşan potansiyel enerji
V_{yay}	:Yayda oluşan potansiyel enerji
W	:Sistemde yapılan toplam sanal iş
x_i	:Sistemin durum değişkenleri
x	:Bağ üzerindeki herhangi bir pozisyon
$y(t)$	:Çıkış Sinyali
y	:Bağın uç işlevcisinin pozisyonu
θ, θ_m	:Motor dönme açısı
θ_l	:Eklemin dönme açısı
η_d	:Planet dişlinin verimi
η_m	:Motorun verimi
α	:Uç işlevci titreşim miktarı
λ	:Yaydaki deformasyon miktarı
δ	:Uç işlevcideki sapma miktarı
ω	:Motorun açısal hızı
ρ	:Malzeme yoğunluğu
θ_r	:Esnek çubuğun esnemeyen bölümünün açısı
θ_e	:Esnek çubuğun bükülme açısı
β_i	:Bağın titreşiminin i. modu
α_i	:i. Titreşim modu
Γ	:Eulerin gama fonksiyonu
$\mu_A(x)$	:Üyelik derecesi
BLDC	:Fırçasız doğru akım motoru
FFT	:Hızlı Fourier dönüşümü
LQR	:Dorsal karesel düzenleyici
PID	:Oransal-integral-türevsel kontrolör
CS	: Kontrol sinyali

ESNEK EKLEMLİ VE ESNEK BAĞLI ROBOT KOLU KONTROLÜ

İsmail Hakkı AKYÜZ

Anahtar Kelimeler: Esnek Bağlı Robot Kolu, Esnek Eklemlili Robot Kolu, Bulanık Mantık Kontrol, PID Kontrol, FO-PID Kontrol, Durum Geri Beslemeli Kontrol, dSPACE

ÖZET: Bu çalışmada, robot biliminde önemli kontrol problemleri arasında bulunan robot kollarındaki esneklik ve titreşim sönümlemesi konuları incelenmiştir. Esnek eklemlili ve esnek bağlı robot kolları için deney düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan robot modelleri matematiksel olarak modellenip, robot kollarının dinamik denklemleri elde edilmiştir. Her iki esnek robot kolu için, robot uç işlevcisinin istenilen referansa en az titreşim ve en yüksek hassasiyetle ulaşabilmesi için çeşitli kontrolörler tasarlanmıştır. Esnek eklemlili ve esnek bağlı robotların kontrolü için sırasıyla, PID, bulanık mantık, durum geri beslemeli ve kesir dereceli PID kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan kontrolörler Matlab/Simulink ortamında hazırlanmış ve bu ortamla uyumlu çalışabilen DS1103 dSPACE DSP gerçek zamanlı kontrol kartı ile sistemlere uygulanmıştır. Oluşturulan iki farklı robot kolu modeli içinde, konum kontrolü, yörünge takibi ve gürbüzlük ve kararlılık testi deneyleri yapılmıştır. Esnek eklemlili ve esnek bağlı robot kolu için yapılan konum ve yörünge takibi deneylerinde en iyi sonuçları bulanık mantık kontrolörü üretmiştir. Geliştirilen bulanık mantık kontrolörler, esnek eklemlili robotun 1.7 saniyede, esnek bağlı robotun ise 1.35 saniyede konum kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde ise bulanık mantık kontrolör, esnek eklemlili ve esnek bağlı robot uç işlevcilerinin yörünge takibini en büyük 0.54° ve 3.2 mm hata ile gerçekleştirmelerini sağlamıştır. Ayrıca kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörünge takibi deneylerinde oldukça başarılı sonuçlar elde etmiştir.

CONTROL OF FLEXIBLE LINK AND FLEXIBLE JOINT ROBOT MANIPULATOR

İsmail Hakkı AKYÜZ

Keywords: Single-Link Flexible Manipulator, Single-Link Flexible Joint Manipulator, Fuzzy Logic Control, PID Control, FO-PID Control, State-Feedback Control, dSPACE

ABSTRACT: In this study, flexibility and vibration suppression in the robot arms, are examined. These subjects are very important control problems in robotics. The experimental setups of the single-link flexible joint robot arm and single-link flexible robot manipulator are developed to study control problems of the robot arms. Fabricated robot manipulators are modelled with energy based Lagrangian equations. Different controllers are developed to control position and trajectory tracking of the end point. The used control algorithms are PID, fuzzy logic, state-feedback and fractional order PID controllers. They are designed in Matlab/Simulink environment and embedded in dSPACE DS1103 real time control board and applied to the robot arms with this controller board. The position and trajectory tracking control experiments are conducted to the both of the systems to verify the developed controllers performances. Moreover, the robustness and stability of the controllers are tested in order to compare them. Considering the all results of the experiments, the best results are obtained with the fuzzy logic controllers. During the position control experiments with fuzzy logic controllers, settling time of the motor rotation angles of the flexible joint robot arm and the flexible link robot are obtained 1.7 and 1.35 seconds, respectively. In the sinusoidal trajectory tracking experiments with fuzzy logic controllers, the reference trajectories are tracked with maximum 0.54° and 3.2 mm errors in the tip deflection, respectively.

1. GİRİŞ

Günümüzde robotlar kaynak, boyama, montaj, lazer kesme, frezeleme gibi birçok endüstriyel uygulamanın temel ögesi olarak kullanılmaktadırlar. Robot ve kontrol mühendisleri, endüstrinin sürekli artan ve değişken performans kriterlerini karşılayabilmek için gün geçtikçe teknolojinin her alanında araştırma ve geliştirme faaliyetlerini sürdürmeye devam etmektedirler [1].

Endüstrideki robot kollarına bakıldığında, eklem yük taşıması sırasında kolda oluşan esnemelerin ve titreşimlerin en aza indirilmesi için robot eklemleri rijit ve ağır malzemeler kullanılarak üretilirler. Ancak bu tip rijit, ağır, eklem ve kollardan oluşan robotlar hareketlerini gerçekleştirebilmeleri için büyük eyleyicilere ihtiyaç duyarlar. Bu da robotun toplam enerji sarfiyatını, maliyetini, eklem ağırlıklarını artırır ve robotun çalışma hızını azaltır. Bu sebepten ötürü, rijit yapıdaki robot kolları bazen hız bazen enerji tüketimi ve bazen de maliyet açısından bakıldığında bazı işleri yerine getirmede istenildiği kadar verimli olamamaktadırlar. Söz konusu daha fazla hız, düşük enerji sarfiyatı gerektiren uygulamalarda endüstriyel robot kollarını daha verimli kullanabilmek için robot eklemlerinin ağırlıkları azaltılmalı ya da hızları artırılmalıdır.

Esnek yapılı, hafif ve daha hızlı olan robotlara olan ihtiyaç bu noktada önem kazanmaktadır. Bu tip robotlar, özellikle enerji sarfiyatının önemli olduğu havacılık ve uzay endüstrisinde, canlılarla birlikte çalışabilme özelliğinin ve can güvenliğinin ön planda olduğu hizmet sektöründe, hız ve hassasiyetin gündeme geldiği savunma sanayi ve tıp uygulamalarında ve endüstrinin daha birçok alanında kendilerine fazlaca yer bulmaktadırlar. Bununla birlikte özel amaçlarla tasarlanan esnek eklemlerli robotların, yüksek yük taşıma kapasitesi, düşük robot ağırlığı ve geniş çalışma uzayına sahip olmaları da rijit robot kollarına göre en önemli avantajlarındanıdır.

Şekil 1.1 ve 1.2’ de esnek yapılı robotların uzay ve robotik insan eli yapımı uygulamalarında kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 1. 1: Esnek yapılı robotların uzay istasyonlarında kullanımı



Şekil 1. 2: Esnek eklemlerin robotik insan eli uygulamalarında kullanımı

Günümüzde verimliliğin artması ve maliyetin düşürülmesine olan ihtiyaçtan dolayı robot kollarının çoğunlukla hafif malzemelerden üretilmesinde büyük faydalar vardır. Ancak bu durum eklemlerdeki esnekliği arttıracak ve sistem dinamiklerini karmaşık bir hale getirecek için bunun robot tasarımında hesaba katılması gerekmektedir. Çoğunlukla robot eklemlerindeki esneklik, önemli kontrol problemlerine neden olduğundan ve robot uç işlevcilerinde doğrusal olmayan titreşimler meydana getirdiklerinden dolayı istenmeyen bir özelliktir. Robot

eklemlerinde oluşan bu titreşimler, uç işlevcinin son nokta hassasiyetinin azalmasına, oturma zamanının artmasına ve kontrolör yapısının karmaşık bir yapıya dönüşmesine neden olur. Mekanizmalardaki esneklik, malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak oluşmakta, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilmekte ve sonsuz sayıda moddan oluşmaktadır [2]. Esnek yapıların yüksek frekanslı modları, bilinmeyen sistem parametreleri, robot üretiminde kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan dinamikleri, tasarım hataları, kullanılan dişlilerdeki boşluklar ve esnemeler, doğrusal olmayan sürtünmeler ve diğer çevresel etkenler esnek eklemlili robot kollarının kontrol edilmesini oldukça güçleştirmektedir.

Esnek malzemelerin söz konusu davranışlarından dolayı, bu tür eklemlere sahip robotların kontrolünü geleneksel rijit eklemlili robotlarla karıştırmamak gerekmektedir. Esnek yapılı robotların kontrolü yapılırken, robota istenilen bir referans sinyal uygulandığında, robotun uç işlevcisinin söz konusu referansa en kısa sürede, en yüksek hassasiyetle ve en az titreşimle ulaşması istenmektedir. Bu da kullanılan kontrolörün, eklemin esnemesinden kaynaklanan uç işlevcideki titreşimleri anlık olarak sönümlemesiyle mümkün olabilmektedir.

Görüldüğü üzere robotları esnek ve hafif malzemelerle üretmek birçok açıdan avantajlar getirse bile bu tip robotları kontrol etmek rijit eklemlili robotların kontrolüne göre çok daha karmaşık kontrolörler tasarlamayı gerektirmektedir.

1.1. Bu Tezde Yapılan Çalışmalar

Bu tezde, esnek eklemlili ve esnek bağlı robot kolları hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Tez de yapılan çalışmalar genel olarak yedi ana başlık altında incelenmiştir.

Bölüm 1’ de esnekliğin mekanizmalardaki avantaj ve dezavantajları, esnek yapılı robot kollarının kullanım alanları gibi konular işlenmiş ve esnek robot kolları hakkında genel bilgi verilmiştir.

Bölüm 2’ de esnek eklemlili ve esnek bağı robot kolları için oluşturulan test düzeneğı, mekanizmaların hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri, mekanizmaların tasarlanması ve fiziksel özellikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3 ve bölüm 4, esnek eklemlili ve esnek bağı robot kollarının matematiksel olarak modellenmeleri, hareket denklemlerinin çıkarılması, esnek eklemlili ve esnek bağı robot kollarının uç işlevcilerinin serbest salınım grafikleri gibi konuları içermektedir.

Bölüm 5 ve bölüm 6 başlıkları altında, esnek eklemlili ve esnek bağı robot kollarının kontrol edilmesi, kullanılan kontrol yöntemleri hakkında genel bilgi verilmesi, geliştirilen kontrol algoritmalarının sistemler uygulanması, robot kollarıyla yapılan deneyler, deneylerin sonuçları ve karşılaştırılması, geliştirilen farklı kontrol yapılarının birbirleri arasında karşılaştırılması konuları işlenmiştir.

Bölüm 7 de ise, tezde yapılan çalışmaların değerlendirilmesi ve yorumlanması, tezden çıkarılan sonuçlar ve çalışmanın iyileştirilmesi için gelecekte yapılması gerekenler verilmiştir.

2. ESNEK EKLEMLİ VE ESNEK BAĞLI ROBOTLARIN TEST DÜZENEGİ

Esnek yapılı robot kolu deney düzeneği basit olarak, esnek eklem ya da esnek bağın pozisyonunu, titreşimini, eklem bağı olduğu tablanın pozisyonunu ölçen sensör ve optik kodlayıcılar, robot eklem hareketini sağlayan motor ve motor sürücüsü, bilgisayar ve robot kolu arasındaki veri alışverişini sağlayan dağıtım kartı, tasarlanan kontrol algoritmalarını sisteme uygulayan gerçek zamanlı kontrol kartı ve bilgisayar ara yüzünden oluşmaktadır.



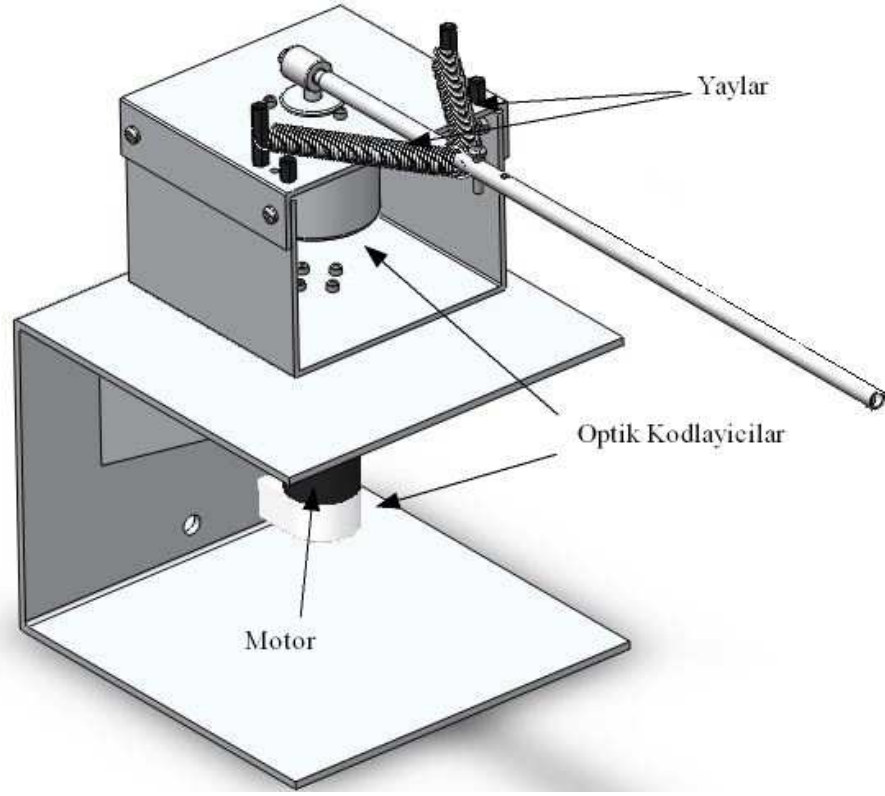
Şekil 2. 1 : Tek esnek bağı ve tek esnek eklemli robot kolu test düzeneği

Şekil 2.1’ de görüldüğü üzere, her iki sistem de tek bir platform üzerine yerleştirilmiş olup, tek motor sürücüsüyle sürülmektedir. Dağıtım kartı üzerinde bulunan anahtarlar sayesinde kontrol edilmek istenen sistem seçilip bilgisayarla bağlantısı yapılarak tasarlanan kontrol algoritmaları gerçek model üzerinde uygulanabilmektedir. Tasarlanan kontrolörün sisteme uygulanması ve sistemden geri besleme olarak alınan sinyallerin işlenmesi için dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı kullanılmıştır. Robot eklem referans sinyali takip etmesi için sisteme gerekli kuvvet, FAULHABER firmasına ait 2444S serisi fırçasız doğru akım motoru

(BLDC) tarafından uygulanmaktadır. Bu motorları sürmek için yine aynı firmaya ait MCBL 5004 serisi fırçasız doğru akım motoru sürücüsü kullanılmıştır. Sisteme hareket vermek için kullanılan fırçasız doğru akım motoru 36 W gücünde olup, tutma momenti 111 mNm' dir. Ayrıca robot eklemine kullanılan motor, ekleme uygulanan momenti arttırmak amacı ile esnek eklemine bağlı olduğu döner tablaya yine aynı firmaya ait olan planet dişli üzerinden bağlanmıştır. Kullanılan planet dişli 246:1 dişli oranına sahip olup, dişleri arasında ortalama 0.5° boşluk bulunmaktadır. Motor, motor sürücüsü ve planet dişli ile ilgili ayrıntılı bilgiler bölüm 2.3, Ek - A, B ve D' de bulunabilir.

2.1. Esnek Eklemli Robot Kolu Sistemi

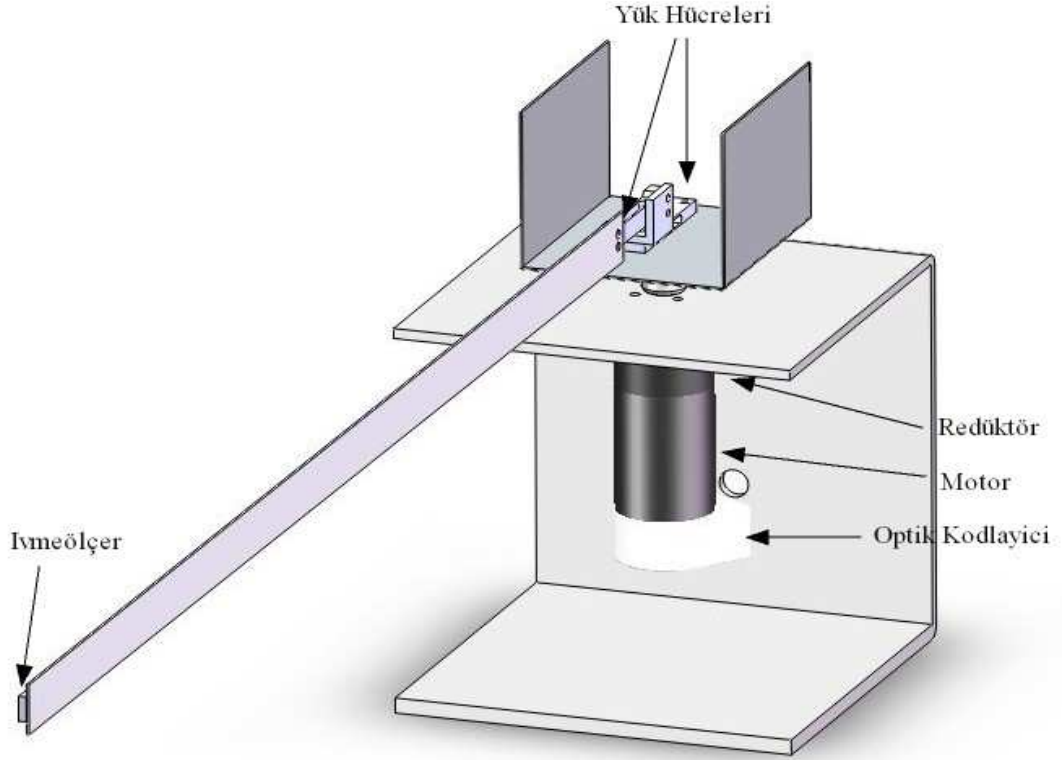
Tek esnek eklemli robot kolu, rijit bir eklem ve bu eklemine iki tarafından yaylarla döner tablaya bağlanmasıyla oluşturulmuştur. Bu sistemde robot uç işlevcisinin açısı eklemine hemen altında bulunan 2000 darbe/tur (0.18° çözünürlük) oranına sahip bir optik kodlayıcı ile ölçülmektedir. Bu sistemde döner tablanın açısı ise hemen fırçasız doğru akım motorunun altında bulunan 512 darbe/tur oranına sahip optik kodlayıcı ile ölçülmektedir. Burada motor planet dişliye bağlı olduğu için döner tablanın pozisyonunu ölçen optik kodlayıcıdan bir turda elde edilen darbe sayısı 125952 darbe/tur' a (0.0028° çözünürlük) yükselmiştir. Ayrıca eklemine ve döner tablanın açısal hız değerleri türevlerinin alınmasıyla nümerik olarak elde edilmiştir. Normal kol boyu 0.4 m ve ağırlığı 0.052 kg olarak seçilmiş olup istenirse, uzatılarak 0.58 m ve 0.072 kg' a çıkarılabilir. Ekleme esneklik sağlayan yayların yay sabiti ise 58.86 N/m olarak seçilmiştir. İstenildiği takdirde farklı yaylar kullanılarak ekleme bağlanan yayların yay sabiti sırasıyla 1.85, 12.53, 16.96, 24.52, 49.05, 58.86, 99.19, 113.63 N/m olan yaylarla değiştirilebilmektedirler. Son olarak robot kolunun toplam ağırlığı 1.98 kg olarak ölçülmüştür. Şekil 2.2' de tek esnek eklemli robot kolu katı modeli görülmektedir.



Şekil 2. 2: Tek esnek eklemlili robot kolunun katı modeli

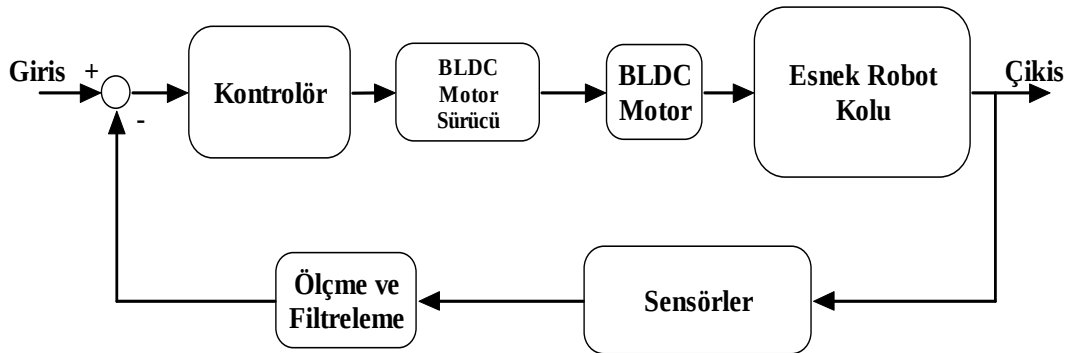
2.2. Esnek Bağlı Robot Kolu Sistemi

Tek esnek bağlı robot kolu, alüminyumdan yapılmış esnek bir sac levha ve bu bağın üzerine oturtulduğu döner bir tabladan oluşmaktadır. Ekleme esneklik vermek amacıyla kullanılan sac levhanın uzunluğu 0.4 m, genişliği 0.02 m, kalınlığı 0.001 m ve ağırlığı 0.021 kg' dır. Ayrıca sac levhanın söz konusu ölçüler için deneysel olarak ölçülen salınım frekansı 3.86 Hz' dir. Esnek bağın ucunda oluşan ivme, bağın ucuna bağlanan bir ivmeölçer tarafından, bağın ucunda oluşan sapma miktarı ise bağın son noktasına bağlanan ve gerekli kalibrasyonları yapılmış bir yük hücresi tarafından ölçülmektedir. Ayrıca hareket sırasında eklemden dikey titreşimlerin oluşup oluşmadığını incelemek amacıyla ivmeölçer ve yük hücresinden veri alınmaktadır. Eklemin bağlandığı döner tablanın, açısal pozisyonu, yine 125952 darbe/tur (0.0028° çözünürlük) olan bir optik kodlayıcı tarafından ölçülmektedir. Toplam sistem ağırlığını azaltmak amacıyla robot eklemi tamamıyla alüminyumdan üretilmiş olup toplam ağırlığı 1.65 kg olarak ölçülmüştür. Şekil 2.3' te tek eklemlili esnek robot kolunun katı modeli gösterilmektedir.



Şekil 2. 3: Tek eklemlı esnek bağı robot kolunun katı modeli

Fiziksel olarak gerçekleştirilen her iki sistemi de kontrol etmek için tasarlanan kontrol algoritmaları MATLAB/SIMULINK ortamında oluşturularak, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla robot koluna uygulanmıştır. dSPACE gerçek zamanlı kontrol kartı, CLP1103 giriş-çıkış arabirimi, DS817 bağlantı kartı ve uyumlu bir bilgisayardan oluşmaktadır. Şekil 2.4’ te esnek robot kolunun kontrolü için kullanılan blok diyagramı verilmiştir. Şekil 2.5’ te dSPACE kontrol kartı gösterilmiştir.



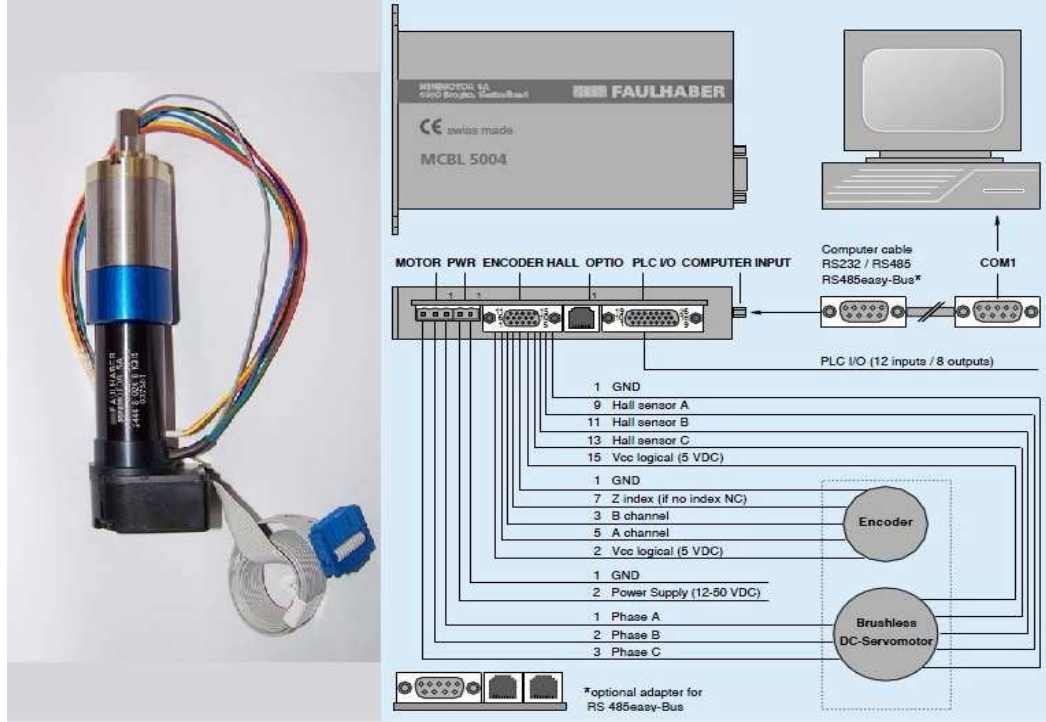
Şekil 2. 4: Esnek yapılı robot kolunun blok diyagramı



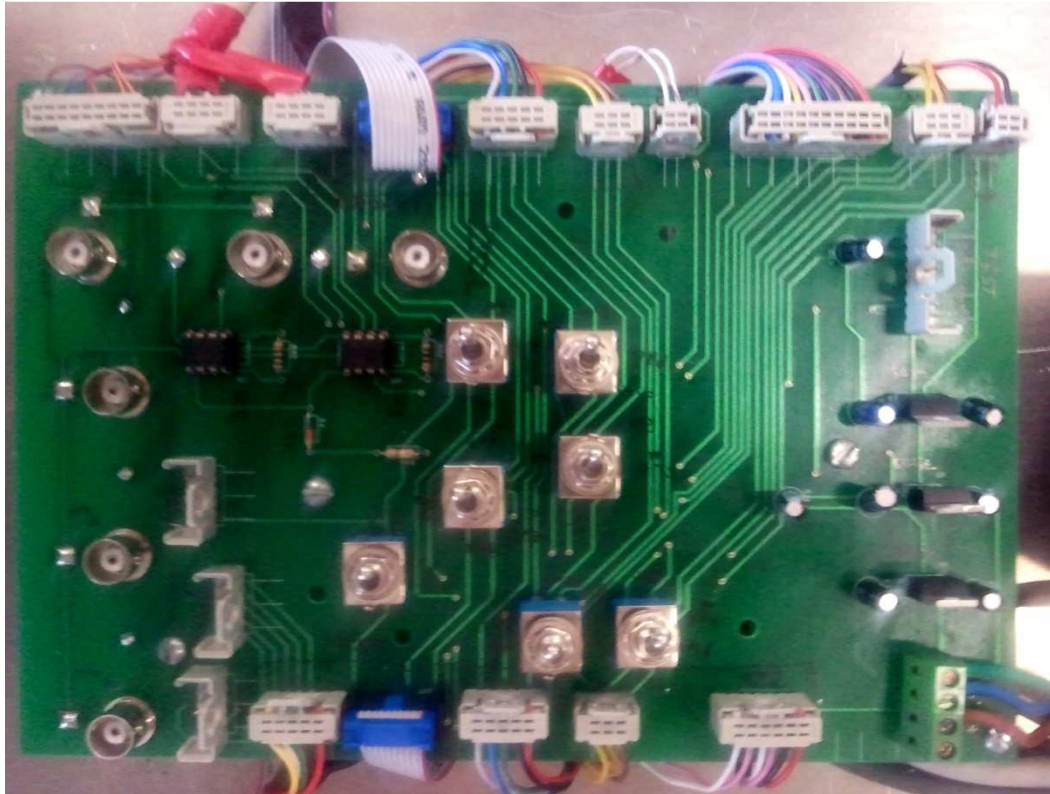
Şekil 2. 5: dSPACE DS1103 kontrol kartı ve bilgisayar ara yüzü

2.3. BLDC Motor, Motor Sürücü ve Dağıtım Kartı

Esnek eklemlili ve esnek bağı robotları kontrol etmekte kullanılan fırçasız doğru akım motoru, sürücüsü ve sürücü bağlantı şeması Şekil 2.6' da gösterilmektedir. Motor sürücüsü, kullanılan servo motoru hız ve pozisyon kontrol modlarında çalıştırabilmektedir. Bunun için sürücüye RS-232 üzerinden bağlanılarak sürücünün hangi modda, hangi parametrelerle kullanılacağı verilmektedir.



Şekil 2. 6: Fırçasız doğru akım motoru, sürücüsü ve bağlantı şeması



Şekil 2. 7: Dağıtım kartı

Esnek bağı robot ve esnek eklemli robot gerçek zamanlı kontrolöre bir dağıtım kartı aracılığıyla bağlanmış olup bu dağıtım devresinin asıl amacı esnek robot kollarının, kartın üzerinde bulunan anahtarlar yardımıyla birbirlerinden ayrı olarak çalışabilmelerini sağlamaktır. Bunun yanında her iki robot kolu sisteminin bütün sensörleri, motor sürücüsü, motorlar ve optik kodlayıcılar öncelikle bu karta bağlıdır. Söz konusu dağıtım kartı gereken sinyalleri ve enerjiyi kartın üzerinde bulunan anahtarlar vasıtasıyla olması gereken yere iletir. Şekil 2.7’ de dağıtım kartının üstten görünüşü görülmektedir. Kartla ilgili ayrıntılı şema Ek – E’ de yer almaktadır.

2.4. İvmeölçer ve Yük Hücreleri

Bu çalışmada ivmeölçer ve yük hücreleri esnek bağı robot kolunda, bağdaki titreşimi ölçmek için kullanılmıştır. İvmeölçer, bağın uç noktasındaki titreşim miktarını “m/s²” cinsinden ölçer ve analog sinyal olarak kontrolöre iletir. Yük hücresi ise Şekil 2.8’ de görüldüğü gibi alüminyum bir parçanın üzerine dört adet gergi sensörü yerleştirilerek oluşturulmuştur. Gergi sensörleri, malzemede oluşan gerilmeyi bir Wheatstone köprüsü yardımıyla yine analog sinyal olarak gerilim cinsinden kontrolöre iletir. Bu çalışmada FreeScale firmasına ait MMA7361L ivmeölçeri ve ITPAC firmasına ait CZL601 yük hücresi kullanılmıştır.



Şekil 2. 8: Esnek bağı robotta kullanılan yük hücresi



Şekil 2. 9: Esnek bağı robotta kullanılan ivmeölçer

3. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ

Bu bölümde esnek eklemlili robot kolu konusundaki bu güne kadar yapılan çalışmalar, sistem parametrelerinin belirlenmesi ve robot kolunun matematiksel olarak modellenmesi üzerinde durulacaktır.

3.1. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Modellenmesi Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar

Esnekliğin mekanizmalarda oluşturduğu büyük yararlar göz önüne alındığında, esnek yapılar ve hafif robot kolları endüstrinin birçok alanında kullanılmaya başlamıştır. Bu ihtiyaçla beraber esnek mekanizmalar ve esnek eklemlili robot kolları konusuna olan ilgi artarak, bu tip yapıların sistem dinamiklerinin incelenmesi ve matematiksel olarak modellenmeleri konusunda birçok çalışma ve araştırma yapılmıştır.

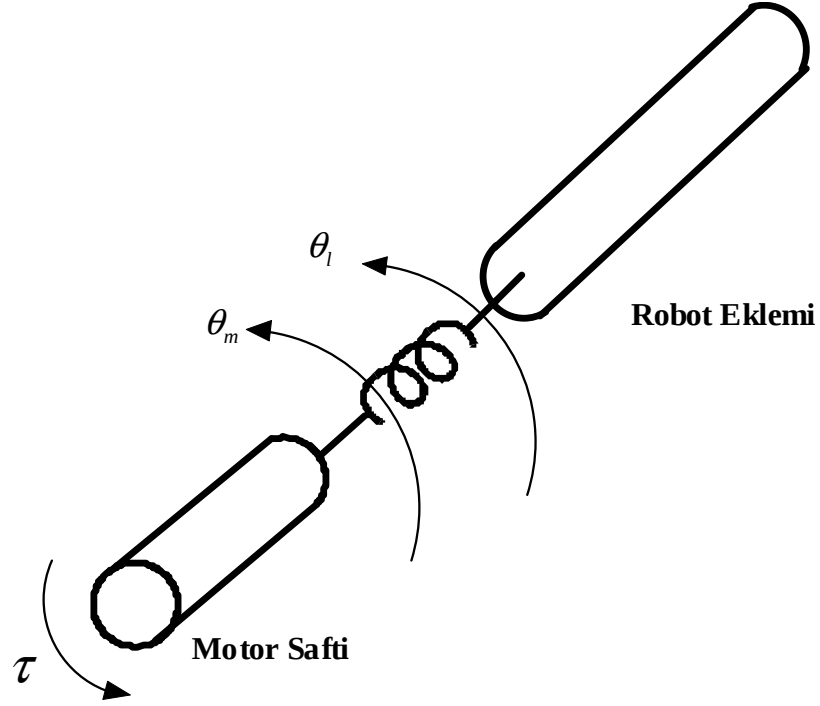
Literatürde, esnek eklemlili robotların modellenmesi için yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir. 80' li yılların sonlarında, Dado ve Soni [3] iki dönel esnek eklemlili düzlemsel robotun dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Querrioz ve diğ. [4] benzer olarak iki esnek eklemlili bir robot kolu konusunda çalışmışlardır. Spong [5], eklem esnekliğini, doğrusal bir yay benzetimi ile modellemiş ve rijit bağlı esnek eklemlili robotların, bağ esnekliği sonsuzluk eğilimindeki klasik katı yapıli robotlara benzetilebileceğini göstermiştir. Ve önerilen bu model, robotik topluluklarında ve araştırma gruplarında robotların kontrolör tasarımı için çokça kullanılmıştır. Yang ve Donath [6], esnek bağ ve ekleme sahip bir robotun üzerinde çalışmışlar ve esnek eklemi doğrusal bir yay benzetimi ile modellemişlerdir. Tzou [7], elastik eklemlilerin uzay robotlarında kullanımını analiz etmiştir. Tomei [8], rijit bağlı esnek eklemlili robotlarda, eklemlilerdeki sürtünme kuvvetleri üzerinde çalışmıştır. Yue ve diğ. [9], üç rijit bağa ve dönel eklemlilere sahip düzlemsel bir robotun modellenmesinde sonlu elemanlar yöntemi konusunda çalışmışlardır. Farid ve Lukaiewicz [10], uzayda kullanılan esnek robot kolunun dinamik modellemesi ve esnek eklemlilerde meydana

gelen burulma deformasyonunu incelemişlerdir. Li ve diğ. [11], esnek eklemlili bir robotun dinamik modellemesinde sistematik yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Ve bu çalışmayla, robot eklemindeli küçük bir esnekliğin sistem cevabına büyük oranda yansıdığını, esnek eklemli temel frekansının döner tabla ataletinden bağımsız iken uç işlevcideli yüke büyük oranda bağılı olduğunu ve eklemli ikinci frekansının yük ataletinden büyük oranda etkilendiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Bahrami ve Rahi [12], Lagrange-Euler denklemlerini temel alarak n sayıda bağı sahip esnek eklemlili robot kolunun dinamik hareket denklemlerini geliştirmişlerdir. Ve ayrıca Korayem ve Basu [13], mobil tabanlı esnek eklemlili robot kollarının yük taşıma kapasiteleri üzerinde çalışmışlardır. Zhang ve Angeles [14], esnek eklemlili robotların etki dinamikleri konusunu incelemişlerdir. Akhtaruzzaman ve diğ. [15], yüksek serbestlik derecesine sahip esnek eklemlili robot kolunun modellenmesi konusunda çalışmışlardır. Rafieian ve diğ. [16], zımparalama uygulaması için altı serbestlik derecesine sahip esnek robot kolunun dinamik modellenmesi ve titreşim analizini gerçekleştirmişlerdir.

3.2. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Matematiksel Modeli

Esnek eklemlili robotu modellemenin amacı sistemin matematiksel olarak ifadesini doğru şekilde belirleyip, sistemin gerçekte nasıl çalıştığını anlamaktır. Matematiksel olarak modelleme sistemin dinamik denklemlerinin çıkarılmasıyla oluşturulur.

Esnek eklemlili robotlar genelde iki tip modele sahiptirler bunlardan birincisinde eklemli motora veya dişli grubuna bağlandığı kısımda kurmalı bir yay var olduğu kabul edilir. Bu modelde robot eklemine esnekliği döner tabla ile dişli kutusu veya rotor arasında bulunduğı kabul edilen yay verir. Modeldeki bu yay, dişli kutusundaki boşlukları, dişlilerin esneme paylarını, motor şaftının burulmasını vs. ifade etmekte ve yay sabiti eklem esnekliğini belirlemektedir. Bahsedilen model Şekil 3.1' de gösterilmektedir.



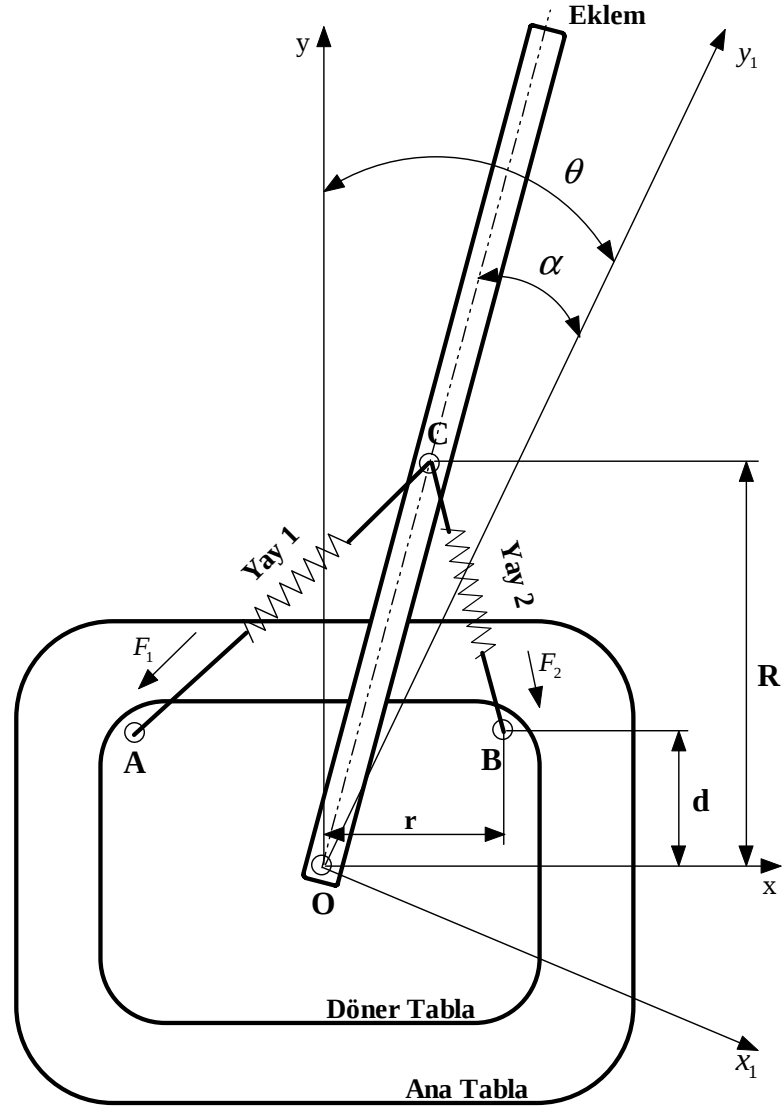
Şekil 3. 1: Eklem esnekliği modeli

Şekil 3.1’ de görüleceği üzere, söz konusu modelde, motor tarafından üretilen dönme momenti eklem bir yay üzerinden verilmektedir. Yani motorun dönme açısının (θ_m), eklemün dönme açısı (θ_l) ile aynı olmayacağı kesindir. Bu modele yay, dönme açılarında farklılık oluşmasına sebep olur, bu farklılık da yaydaki deformasyon (λ) ile açıklanır. Denklem 3.1, esnek eklemde oluşan deformasyonu göstermektedir.

$$\lambda = \theta_m - \theta_l \quad (3. 1)$$

Yukarıda bahsedilenlerden farklı olarak esnek eklemli robotların diğer bir modelleme şekli ise; Şekil 3.2’ de görüleceği üzere döner bir tabla üzerine yerleştirilmiş dönel bir eklem ve bu eklemün döner tablayla bağlantısını sağlayan, eklem esneklik veren ve eklemün her iki tarafına yerleştirilen iki yay ile oluşturulmaktadır. Bu modelde kullanılan yayların yay sabitleri eklem esnekliğini belirlemektedir.

Bu çalışmada esnek eklemli robot modeli, Quanser [17] firmasının dönel esnek eklemli robot kolu modeli benzetimi ile oluşturulmuş ve matematiksel olarak modellenmiştir.



Şekil 3. 2: Esnek eklemlili robot kolu modeli

Şekil 3.2’ de görüleceği üzere, eklem esneklik katan yaylar bir uçlarında A ve B noktalarının diğer uçlarından ise eklem üzerindeki C noktasına bağlanmıştır. Kullanılan yayların, esneklik katsayıları, eklem bağlandığındaki başlangıç uzunlukları ve yayların gerilmemiş haldeki uzunlukları aynı olup sırasıyla K_y , L_0 ve l ile ifade edilmektedir. Burada, yaylar başlangıç uzunluğu olan L_0 boyunda iken üzerlerinde oluşan başlangıç kuvveti F_0 ile ifade edilmektedir. Ayrıca bu model de eklem dönme noktasının, yayın döner tabla üzerindeki bağlantı noktasına olan x eksen yönündeki uzaklığı r , yayların eklem üzerindeki bağlantı noktasının, eklem dönme merkezine olan y eksen yönündeki uzaklığı R ve eklem dönme noktasının,

yayların bağlantı noktasına olan y eksen yönündeki uzaklığı d olarak ifade edilmekte olup bu uzunluklar sabit uzunluklardır. Burada dönel eklem hareket ederken yaylar üzerinde oluşan çekme ve sıkıştırma kuvvetleri birinci yay için F_1 ve ikinci yay için F_2 olarak ifade edilmekte olup, bu çekme ve sıkıştırma kuvvetlerinin sistem dinamikleri üzerinde çok önemli bir rolü vardır.

Esnek eklemlili robot kolunun uç işlevcisinin, y ekseninde y_1 eksenine hareket etmesi istenirse, ekleme bağlı olan yayların boyları ve üzerlerindeki yay kuvvetleri değişecektir. Bu değişimler basitçe aşağıdaki denklemlerle gösterilebilir.

Söz konusu hareket sonrası birinci yayın yatay eksenindeki uzunluğu;

$$L_{1x_1} = r - R \sin \alpha \quad (3.2)$$

Birinci yayın düşey eksenindeki uzunluğu;

$$L_{1y_1} = R \cos \alpha - d \quad (3.3)$$

İkinci yayın yatay eksenindeki uzunluğu;

$$L_{2x_1} = r + R \sin \alpha \quad (3.4)$$

İkinci yayın düşey eksenindeki uzunluğu;

$$L_{2y_1} = R \cos \alpha - d \quad (3.5)$$

olarak hesaplanır. Burada, $L_{1y_1} = L_{2y_1}$ eşitliği açıkça görülmektedir. Birinci yayın toplam uzunluğu Denklem 3.2 ve 3.3 yardımıyla,

$$L_1 = \sqrt{L_{1x_1}^2 + L_{1y_1}^2} = \sqrt{R^2 + d^2 + r^2 - 2R(r \sin \alpha + d \cos \alpha)} \quad (3.6)$$

İkinci yayın toplam uzunluğu ise, Denklem 3.4 ve 3.5 kullanılarak;

$$L_2 = \sqrt{L_{2x_1}^2 + L_{2y_1}^2} = \sqrt{R^2 + d^2 + r^2 + 2R(r \sin \alpha - d \cos \alpha)} \quad (3.7)$$

Denklem 3.6 ve 3.7’ deki gibi elde edilir. Söz konusu hareket sonrası boyları değişen yaylarda belirli kuvvetler oluşmaktadır. Buna göre birinci yayın hareket sonrası ulaşmış olduğu uzunluk için üzerinde oluşan kuvvet,

$$F_1 = K_y(L_1 - L_0) + F_0 \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’ de olduğu gibi, ikinci yayın üzerinde oluşan kuvvet ise,

$$F_2 = K_y(L_2 - L_0) + F_0 \quad (3.9)$$

Denklem 3.9’ da olduğu gibi ifade edilmektedir. Burada, yaylar üzerinde oluşan kuvvetlerin yatay ve düşey bileşenleri ise basitçe,

$$F_{1x_1} = F_1(L_{1x_1}/L_1) \quad (3.10)$$

$$F_{1y_1} = F_1(L_{1y_1}/L_1) \quad (3.11)$$

$$F_{2x_1} = F_2(L_{2x_1}/L_2) \quad (3.12)$$

$$F_{2y_1} = F_2(L_{2y_1}/L_2) \quad (3.13)$$

Denklem 3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13’ te olduğu gibi ifade edilmektedir. Şekil 3.2’ de açıkça görüldüğü üzere eklemin y ekseninden y_1 eksenine olan hareketinde, yayların yatay eksenindeki bileşenleri birbirine zıt yönde olup, dikey eksenindeki bileşenleri aynı yönlüdür. Bu durumda robot eklemine hareket ettirmeye çalışan toplam kuvvetin yatay ve dikey bileşenlerini,

$$F_{x_1} = F_{2x_1} - F_{1x_1} \quad (3.14)$$

$$F_{y_1} = F_{2y_1} + F_{1y_1} \quad (3.15)$$

denklemlerinde olduğu gibi ifade edebiliriz. Yayların ekleme bağlanma noktasında oluşan kuvvetler Denklem 3.14 ve 3.15’ de ifade edilmektedir. Bu noktada oluşan kuvvetler eklemin hareketi için R uzunluğuna bağlı olarak bir geri döndürme momenti oluşturmaktadır. Oluşan bu geri döndürme momenti eklemi ilk pozisyonuna

döndürmeye çalışır. Oluşan bu momentin yatay, dikey bileşenleri aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$M_{g_{x_1}} = RF_{x_1} \cos \alpha \quad (3.16)$$

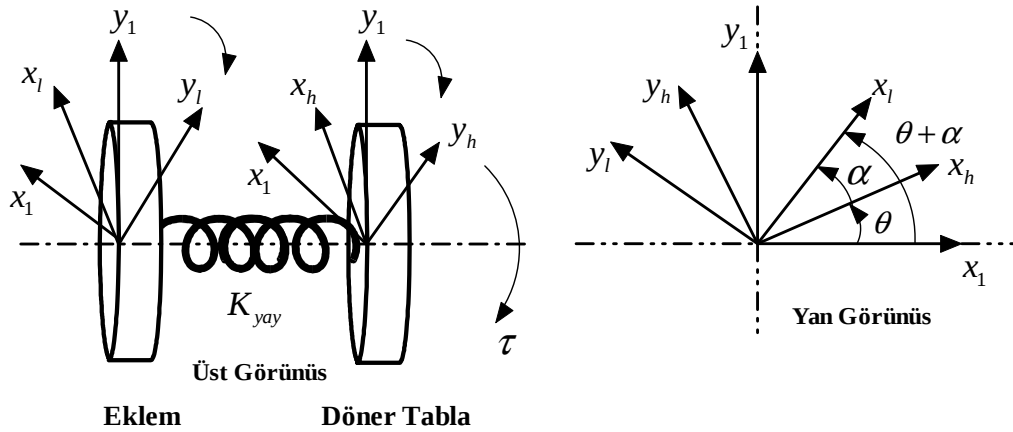
$$M_{g_{y_1}} = -RF_{y_1} \sin \alpha \quad (3.17)$$

Denklem 3.16 ve 3.17 kullanılarak ekleme uygulanan toplam geri döndürme momentini;

$$M_g = M_{g_{x_1}} + M_{g_{y_1}} = R \cos \alpha (F_{2x_1} - F_{1x_1}) - R \sin \alpha (F_{2y_1} + F_{1y_1}) \quad (3.18)$$

yukarıdaki denklemle hesaplanır. Ekleme uygulanan toplam geri döndürme momentini hesaplandıktan sonra esnek eklem basit bir yay gibi modellenebilir. Şekil 3.3' de esnek eklem dinamiklerini basite indirmek için kullanılan basit yay modeli gösterilmektedir.

$$M_g = K_{yay} \alpha \quad (3.19)$$



Şekil 3. 3: Esnek eklem basit yay modelinin üstten ve yandan görünüşü

Burada, K_{yay} model olarak kullanılan yayın yay sabiti, α ise yayda oluşan deformasyon miktarıdır. Görüleceği üzere elde edilen geri döndürme momenti (M_g) doğrusal olmayan bir ifade olup, ekleme esneklik veren yayın birinci dereceden doğrusal ifadesi, deformasyon miktarı sıfır civarında iken, geri döndürme

momentinin deformasyon miktarına kısmi türevi ile elde edilir. Söz konusu eşitlik Denklem 3.20' de görülmektedir.

$$K_{yay} = \frac{\delta M_g}{\delta \alpha} \quad (3.20)$$

Kısmi türev alma işleminde, Denklem 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.10, 3.11, 3.12 ve 3.13, Denklem 3.18' de yerine koyulur ve Denklem 3.18' de Denklem 3.20' de yerine koyulursa söz konusu türev ifadesi Denklem 3.21' deki gibi ifade edilir.

$$K_{yay} = \frac{\delta \left(R \cos \alpha \left(F_2 \left(\frac{r+R \sin \alpha}{L_2} \right) - F_1 \left(\frac{r-R \sin \alpha}{L_1} \right) \right) - R \sin \alpha \left(F_2 \left(\frac{R \cos \alpha - d}{L_2} \right) + F_1 \left(\frac{R \cos \alpha - d}{L_1} \right) \right) \right)}{\delta \alpha} \quad (3.21)$$

Burada, $D=r^2+(R-d)^2$ olarak kabul edilir, gereken kısaltmalar yapılır ve Denklem 3.21' deki kısmi türev alma işlemi yapılırsa, esnek eklemin birinci dereceden doğrusal yay sabiti K_{yay} , Denklem 3.22' deki gibi elde edilir.

$$K_{yay} = \left(\frac{2R}{D^{3/2}} \right) ((Dd-Rr^2)F_0 + (dD^{3/2} - dDL_0 + Rr^2L_0)K_y) \quad (3.22)$$

Basitçe bu yay modelinde döner tablanın dönme açısı θ , ve esnek eklemin titreşim açısının α ile ifade edilmektedir. Eklemin dönmesi ve yayların etkisiyle uç işlevcide meydana gelen deformasyon miktarı λ , Denklem 3.23' te ifade edildiği gibidir.

$$\lambda = \theta - \alpha \quad (3.23)$$

Ayrıca, Şekil 3.2 ve 3.3' de de görüleceği üzere, döner tablanın, ana tablanın sabit koordinat sistemine göre hareketi ve robot uç işlevcisinin, döner tablanın referans koordinat sistemine göre hareketi göz önüne alındığında, sistemin iki serbestlik derecesine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Yatay düzlemde hareket eden esnek eklemlili robot kolunun matematiksel modeli enerji tabanlı Lagrange-Euler metoduyla kolaylıkla elde edilebilir. Görüleceği üzere sistem yatay düzlem de hareket ettiği için, yerçekimi ivmesinden bağımsızdır. Esnek eklemlili robot kolunun hareketi sırasında oluşan kinetik ve potansiyel enerjileri,

$$T=T_{\text{tabla}}+T_{\text{eklem}} \quad (3.24)$$

$$V=V_{\text{yay}}+V_{\text{yer}} \quad (3.25)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada, T sistemin toplam kinetik enerjisini, V sistemin toplam potansiyel enerjisini, T_{tabla} döner tablanın kinetik enerjisini, T_{eklem} robot ekleminin kinetik enerjisini, V_{yay} kullanılan yay modelinin potansiyel enerjisini ve V_{yer} ise yeryüzüne göre oluşan potansiyel enerjiyi ifade etmektedir. Eklem yatay da hareket ettiği için bu ifade sıfır kabul edilebilir. Bu durumda söz konusu kinetik ve potansiyel enerji denklemleri,

$$T_{\text{tabla}}=\frac{1}{2}J_t\dot{\theta}^2 \quad (3.26)$$

$$T_{\text{eklem}}=\frac{1}{2}J_e(\dot{\theta}+\dot{\alpha})^2 \quad (3.27)$$

$$V_{\text{yay}}=\frac{1}{2}K_{\text{yay}}\alpha^2 \quad (3.28)$$

Denklem 3.26, 3.27 ve 3.28' de olduğu gibi elde edilmektedir. Burada, J_t robot kolunun toplam ataletini ve J_e eklemin ataletini belirtmektedir. Bu denklemler, Denklem 3.24 ve 3.25' de yerlerine koyulursa, esnek eklemli robot kolu sisteminin toplam kinetik ve potansiyel enerjisi,

$$T=\frac{1}{2}J_t\dot{\theta}^2+\frac{1}{2}J_e(\dot{\theta}+\dot{\alpha})^2 \quad (3.29)$$

$$V=\frac{1}{2}K_{\text{yay}}\alpha^2 \quad (3.30)$$

Denklem 3.29 ve 3.30' da olduğu gibi elde edilir. Sistemin toplam potansiyel ve kinetik enerjisi elde edildikten sonra sistemin Lagrange' ı alınır. Lagrange ifadesi,

$$L=T-V \quad (3.31)$$

ve Lagrange hareket denklemleri,

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}}\right)-\frac{\partial L}{\partial \alpha}=0 \quad (3.32)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau_m - B_e \dot{\theta} \quad (3.33)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada, τ_m motor tarafından üretilen moment ve B_e sistemin eşdeğer sürtünme katsayısıdır. Denklem 3.32 ve 3.33 çözülerek, esnek eklemli robot kolunun hareket denklemleri,

$$J_t \ddot{\theta} + J_e (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) = \tau_m - B_e \dot{\theta} \quad (3.34)$$

$$J_e (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + K_{yay} \alpha = 0 \quad (3.35)$$

Denklem 3.34 ve 3.35' deki gibi elde edilir. Motor momentinin, sistemin girişi olan gerilim (v) ilişkisi sırasıyla aşağıdaki denklemlerin yardımıyla ifade etmek mümkündür. Motorun terminallerine uygulanan gerilim ile motorun açısal hızı arasındaki ilişki ve motor akımıyla açısal hıza arasındaki ilişki,

$$v = i_m R_m + K_m K_d \omega \quad (3.36)$$

$$i_m = \frac{v}{R_m} - \frac{K_m K_d}{R_m} \omega \quad (3.37)$$

Denklem 3.36 ve 3.37' de verildiği gibidir. Burada, R_m motorun terminalleri arasındaki direnç değeri, i_m motordan akan akım, K_m motorun hız sabiti, ω motorun açısal hızı ve K_d planet dişlinin dişli oranını ifade etmektedir. Ayrıca motor terminallerinden akan akımla motor momentini arasındaki ilişki,

$$i_m = \frac{\tau_m}{K_t K_d} \quad (3.38)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.39)$$

Denklem 3.38' de verildiği gibidir. Burada, K_t motorun akım sabitini ifade etmektedir. Sisteme uygulanan motor momentini ile motora uygulanan gerilim arasındaki ifade, Denklem 3.36, 3.37, 3.38 ve 3.39 yardımıyla,

$$\tau_m = \frac{K_t K_d}{R_m} v - \frac{K_m K_t K_d^2}{R_m} \dot{\theta} \quad (3.40)$$

Denklem 3.40' da ki gibi ifade edilir. Motor ve planet dişlinin verimleri de Denklem 3.40' a eklenecek olur ise,

$$\tau_m = \frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{R_m} v - \frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2}{R_m} \dot{\theta} \quad (3.41)$$

motora uygulanan gerilim ile sisteme uygulanan motor momenti arasında ki ifade Denklem 3.41' de olduğu gibi genellenebilir. Burada, η_d planet dişlinin verimini, η_m motorun verimi ifade etmektedir.

Burada, sistemi durum uzayı matris formuna dönüştürmek için durum değişkenleri,

$$\theta = x_1 \quad (3.42)$$

$$\alpha = x_2 \quad (3.43)$$

$$\dot{\theta} = x_3 \quad (3.44)$$

$$\dot{\alpha} = x_4 \quad (3.45)$$

Denklem 3.42, 3.43, 3.44 ve 3.45' te ki gibi seçilirse, sistem,

$$\dot{x}_1 = x_3 \quad (3.46)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \quad (3.47)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{K_{yay}}{J_t} x_2 - \frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} x_3 + \frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} v \quad (3.48)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{K_{yay}(J_t + J_e)}{J_t J_e} x_2 + \frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} x_3 - \frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} v \quad (3.49)$$

Denklem 3.46, 3.47, 3.48 ve 3.49' da ki gibi ifade edilebilir. Burada esnek eklemlili robot kolunun girişi olan motor gerilimi $u = v$ olarak ve sistemin çıkışı olan uç işlevcinin pozisyonu $y = x_1 + x_2$ olarak seçilirse, sistemin durum uzayı gösterimi,

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.50)$$

$$y = Cx \quad (3.51)$$

olarak oluşturulabilir. Burada, $\dot{x} = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3 \ \dot{x}_4]^T = [\dot{\theta} \ \alpha \ \ddot{\theta} \ \ddot{\alpha}]^T$ ve $x = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}]^T$ olarak seçilir ve ayrıca sistemin durum matrisleri olan A, B ve C matrisleri,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{yay}}{J_t} & -\frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{yay}(J_t + J_e)}{J_t J_e} & \frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} \\ -\frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$C = [1 \ 1 \ 0 \ 0]^T \quad (3.54)$$

olarak belirlenip Denklem 3.50 ve 3.51' de yerlerine koyulursa, esnek eklemlili robot kolu sisteminin durum uzayı gösterimi,

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{K_{yay}}{J_t} & -\frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} & 0 \\ 0 & -\frac{K_{yay}(J_t + J_e)}{J_t J_e} & \frac{\eta_m \eta_d K_m K_t K_d^2 + B_e R_m}{J_t R_m} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} \\ -\frac{\eta_m \eta_d K_t K_d}{J_t R_m} \end{bmatrix} v \quad (3.55)$$

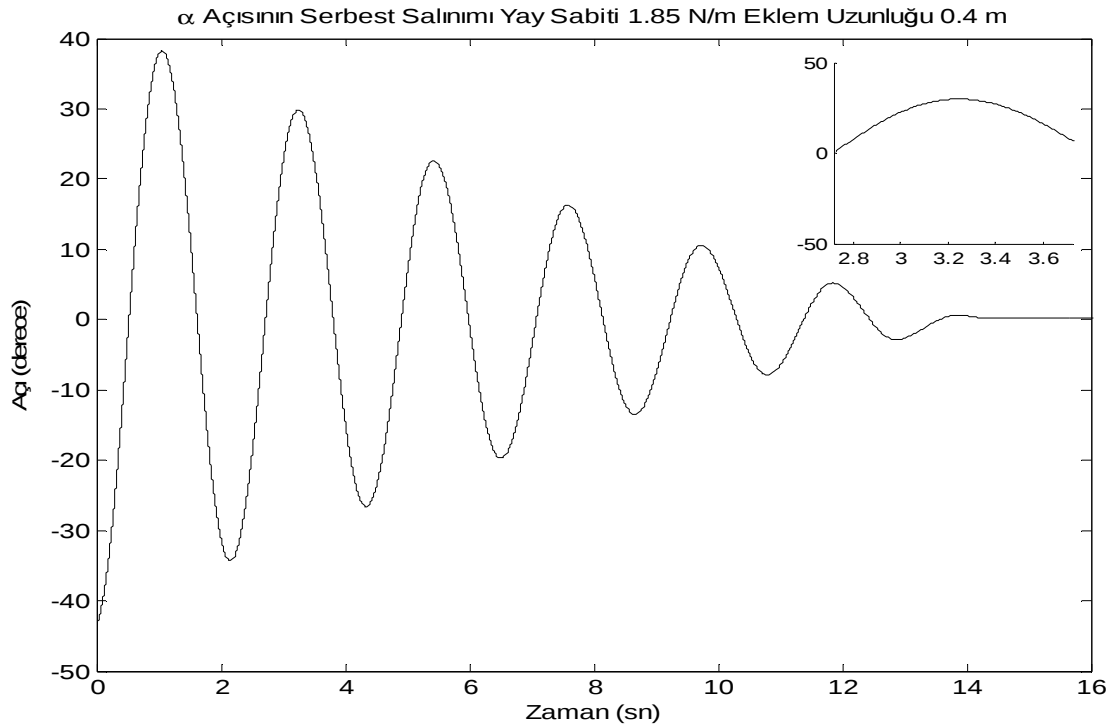
Denklem 3.55' te ki gibi ifade edilir.

Esnek eklemlili robot kolunun uç işlevcisinin, kullanılan farklı model parametreleriyle, serbest salınım frekansının ölçülmesi için, robot uç işlevcisi belirli bir başlangıç noktasına getirilerek serbest bırakılmış ve uç işlevcideki salınım sona erene kadar veri toplanmıştır. Şekil 3.5 – 3.20' de esnek eklemlili robot kolunun, gerilmemiş yay boyu 0.02, 0.04 m, yay sabiti 1.85, 12.53, 16.96, 24.52, 49.05, 58.86, 99.19, 113.63 N/m ve eklem uzunluğu 0.4, 0.58 m olan modelleri için robot uç

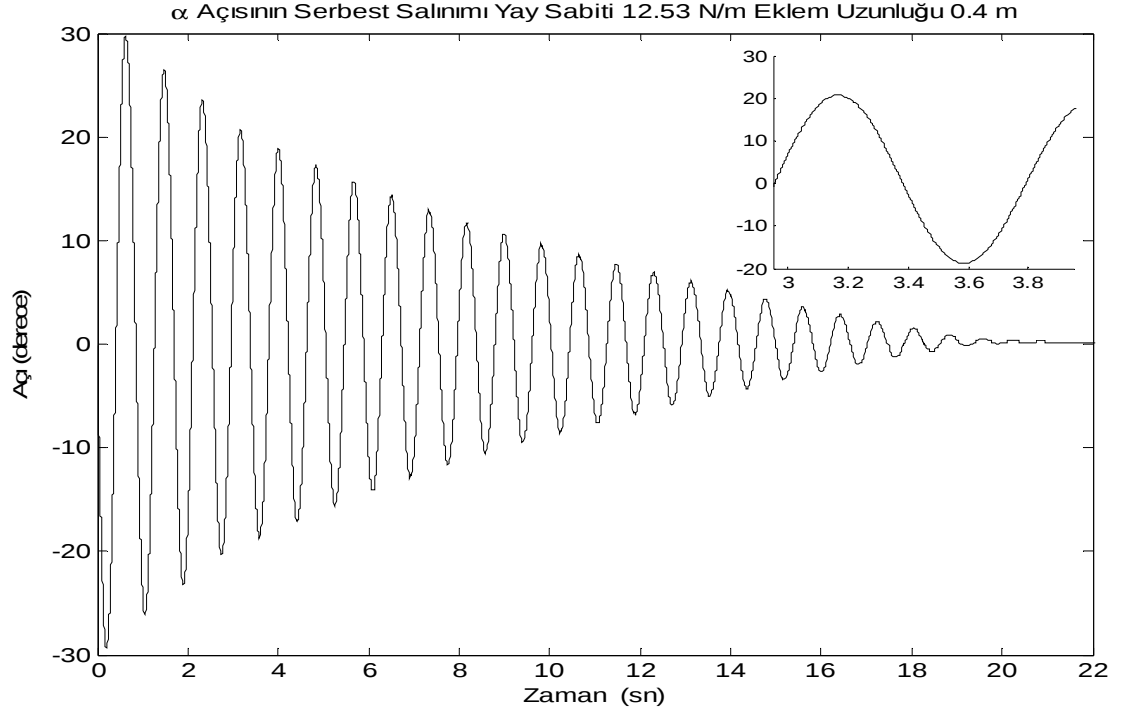
işlevcisinin serbest salınım açıları gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 3.4’ de esnek eklemden kullanılan yaylar, yay boyları ve yay sertlikleri gösterilmiştir.



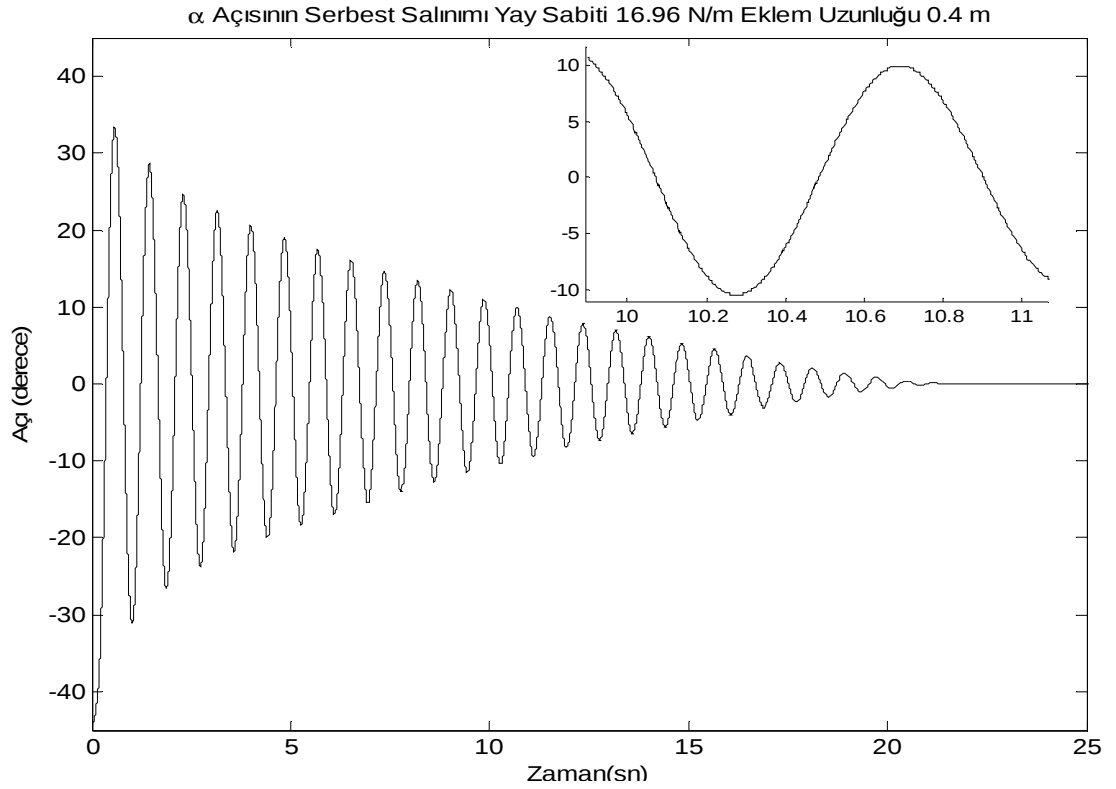
Şekil 3. 4: Kullanılan yaylar, yay boyları ve yay sertlikleri



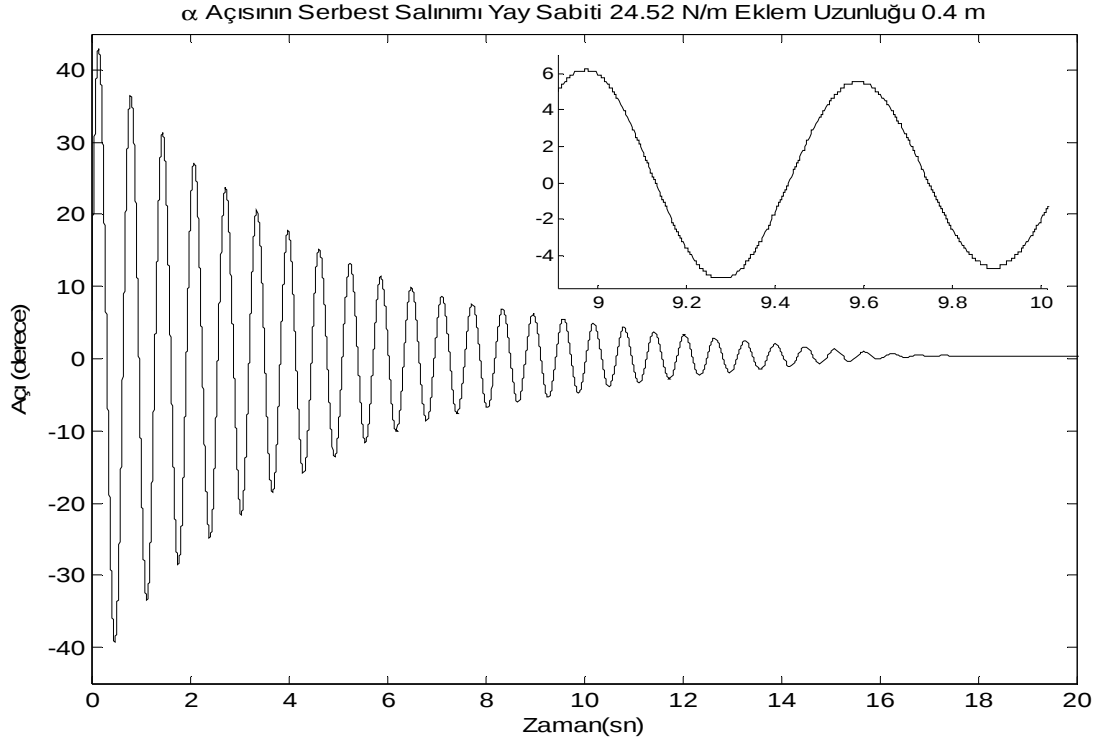
Şekil 3. 5: Uç işlevcisinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 1.85 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



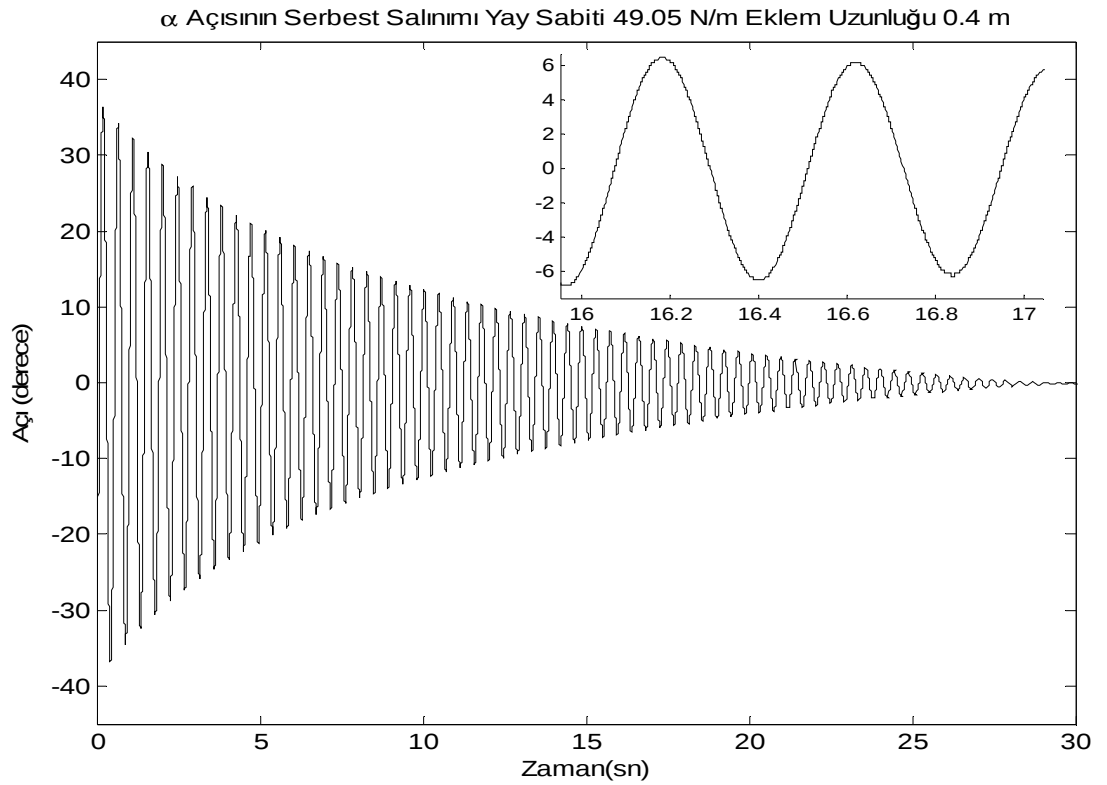
Şekil 3. 6: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



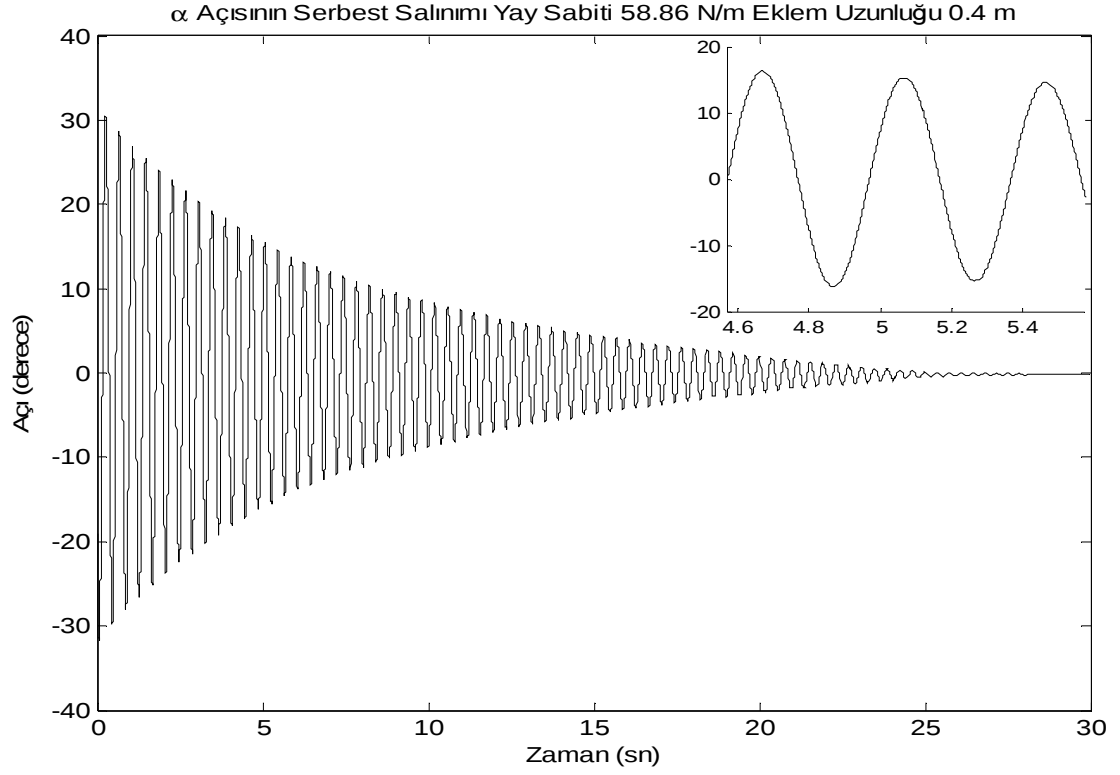
Şekil 3. 7: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 16.96 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



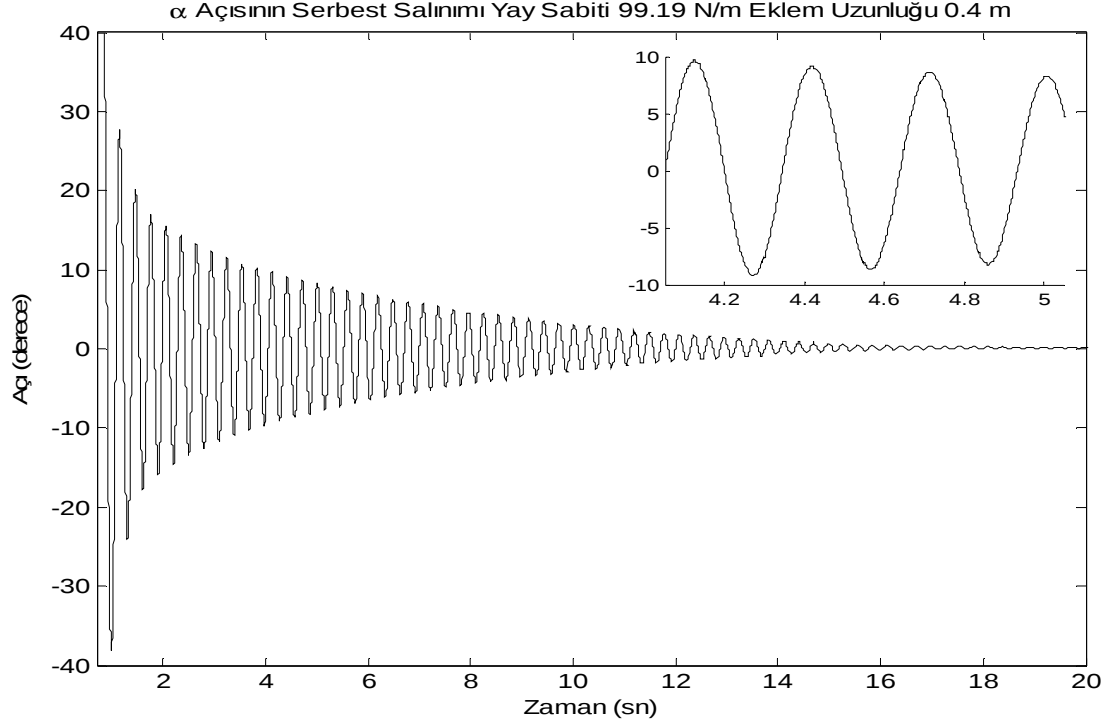
Şekil 3. 8: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 24.52 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)



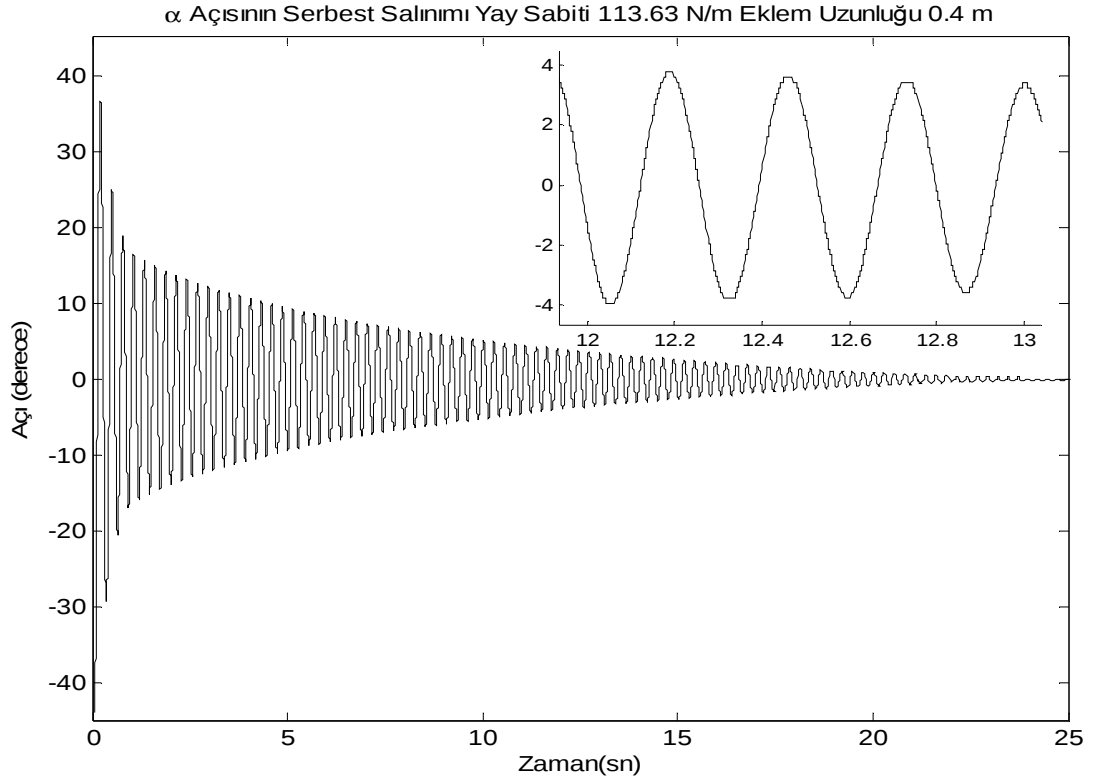
Şekil 3. 9: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 49.05 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



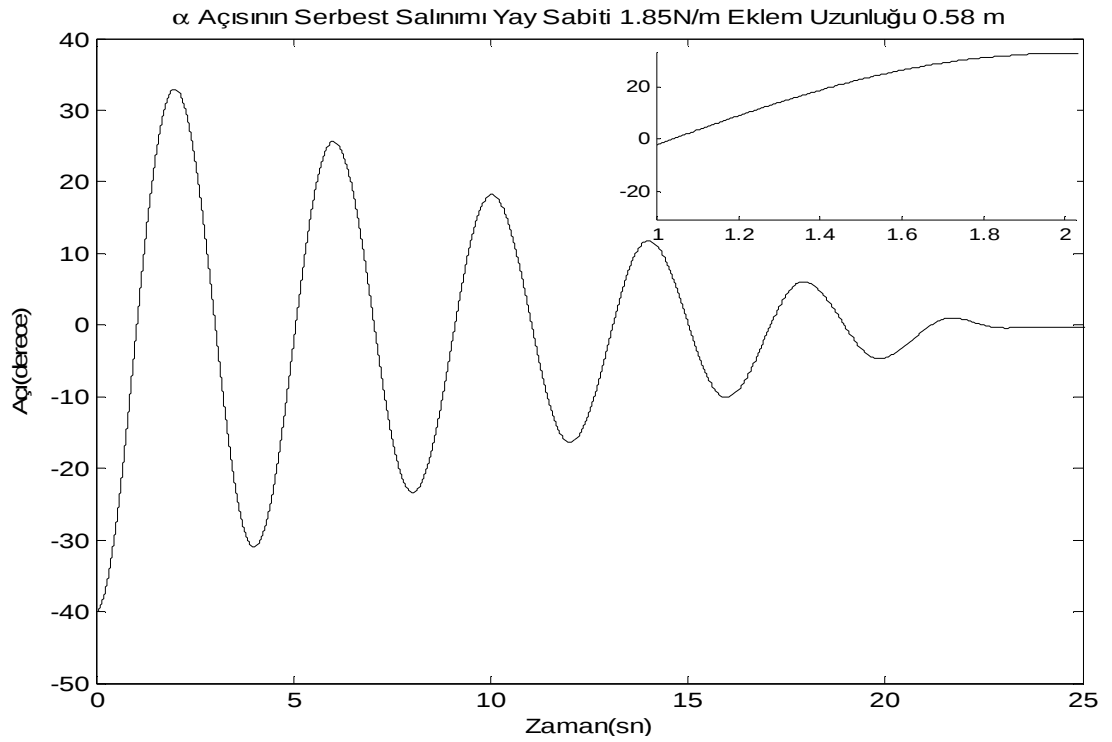
Şekil 3. 10: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



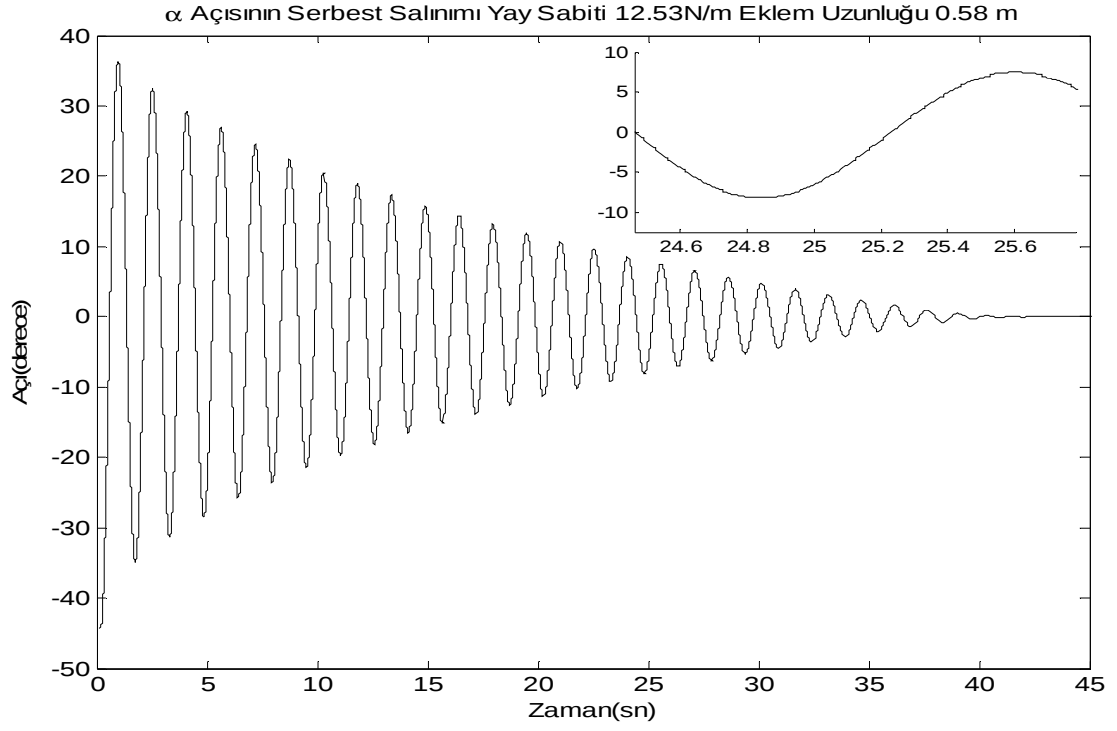
Şekil 3. 11: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)



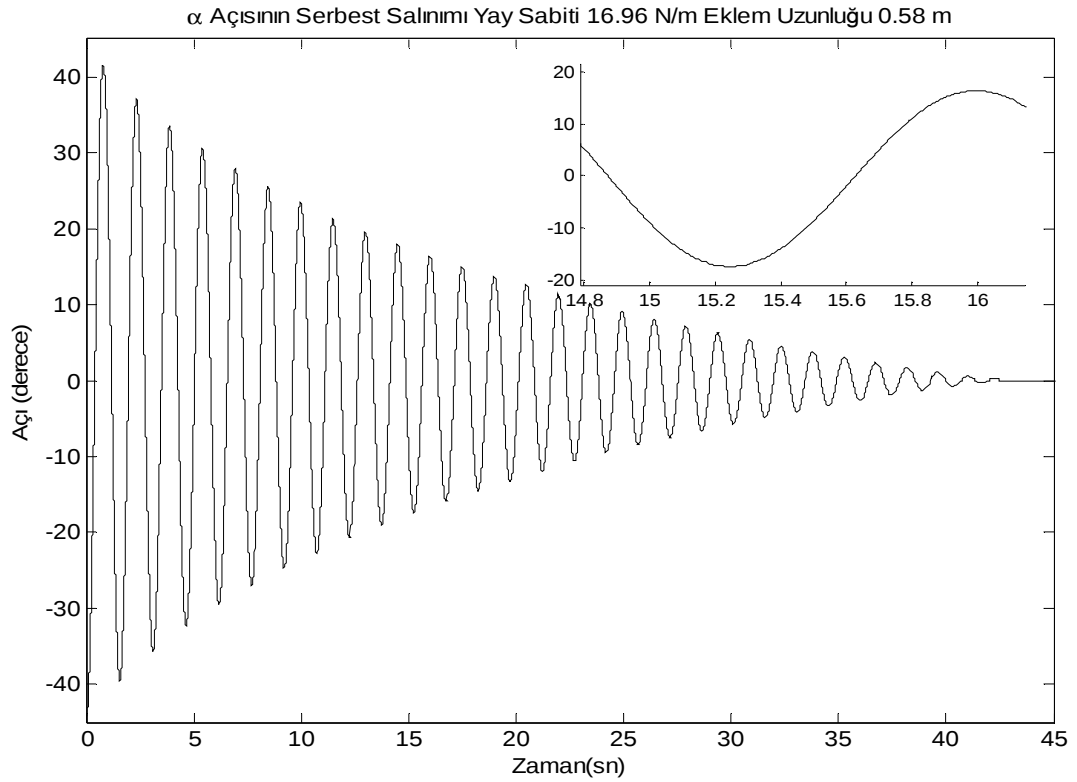
Şekil 3. 12: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 113.63 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)



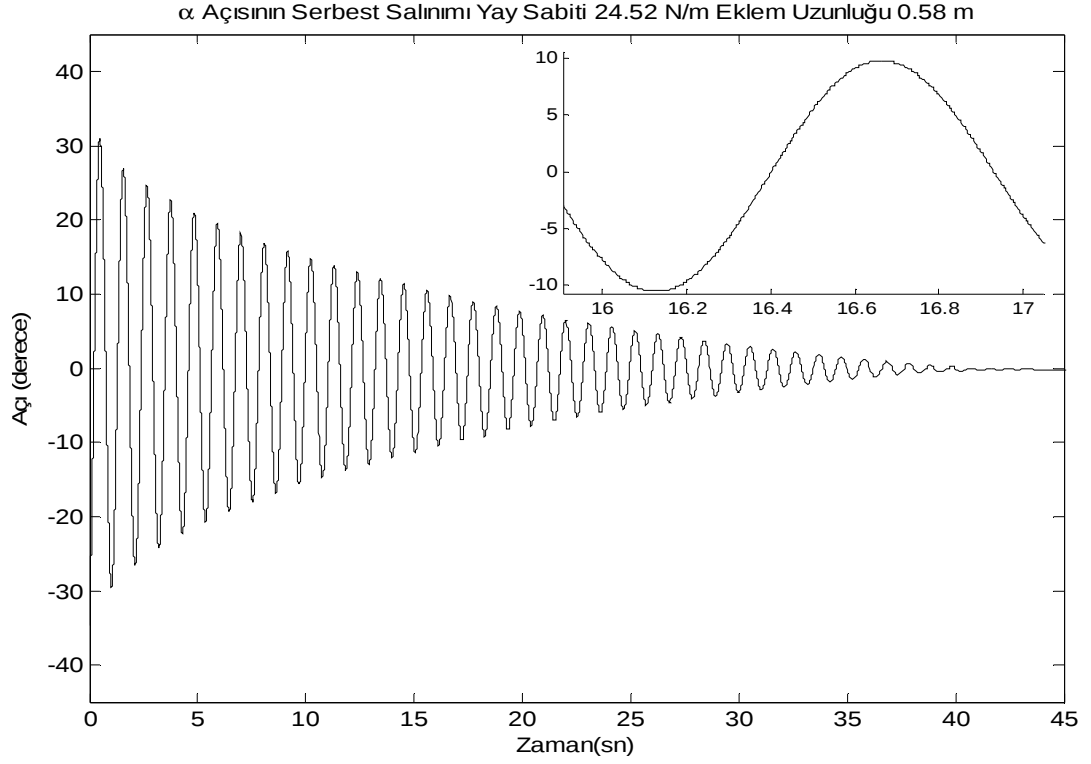
Şekil 3. 13: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 1.85 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



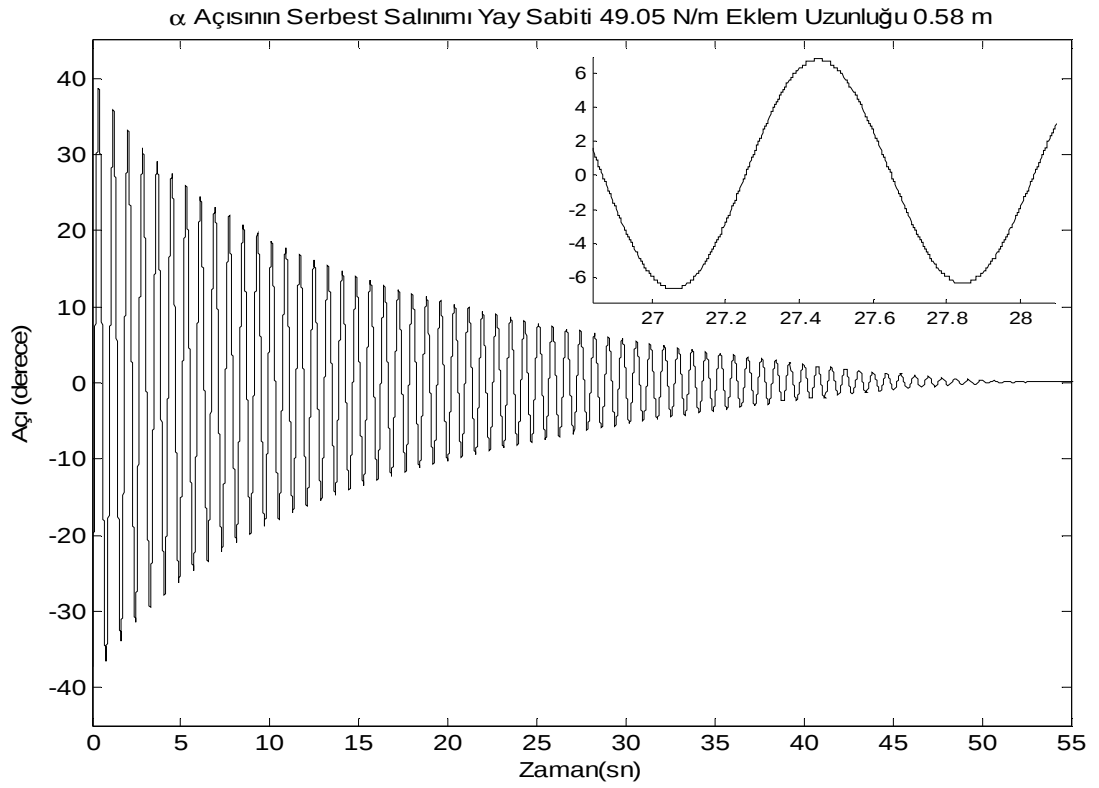
Şekil 3. 14: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



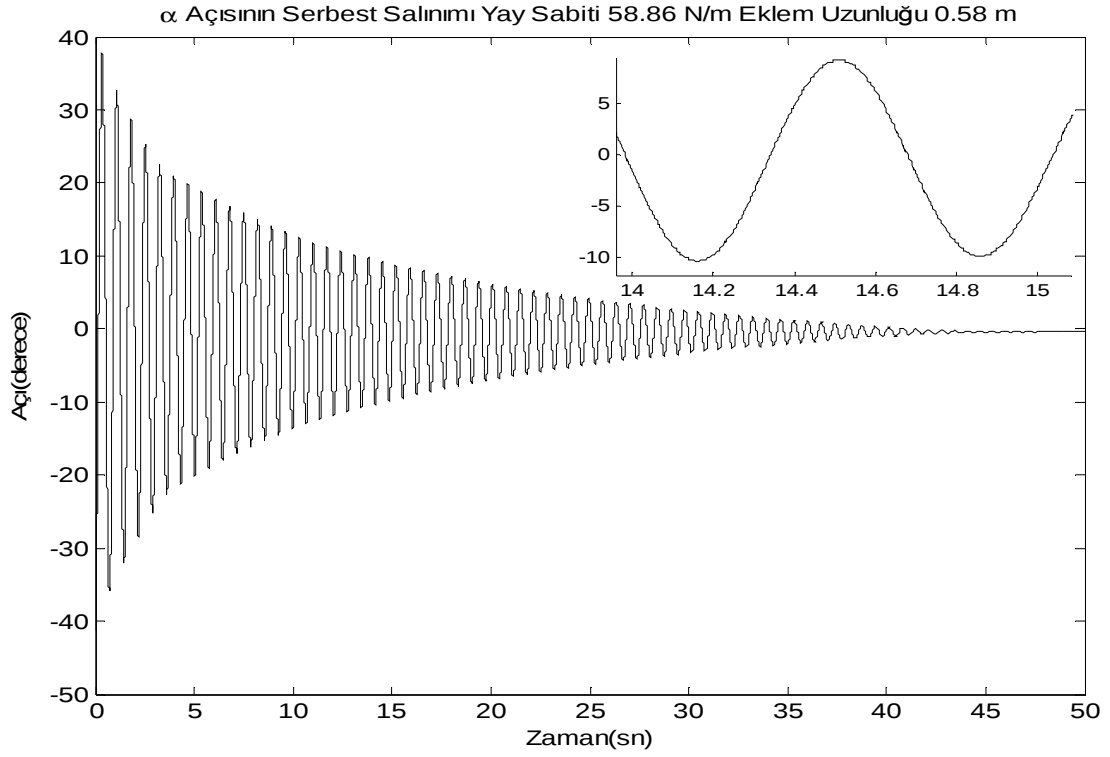
Şekil 3. 15: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 16.96 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



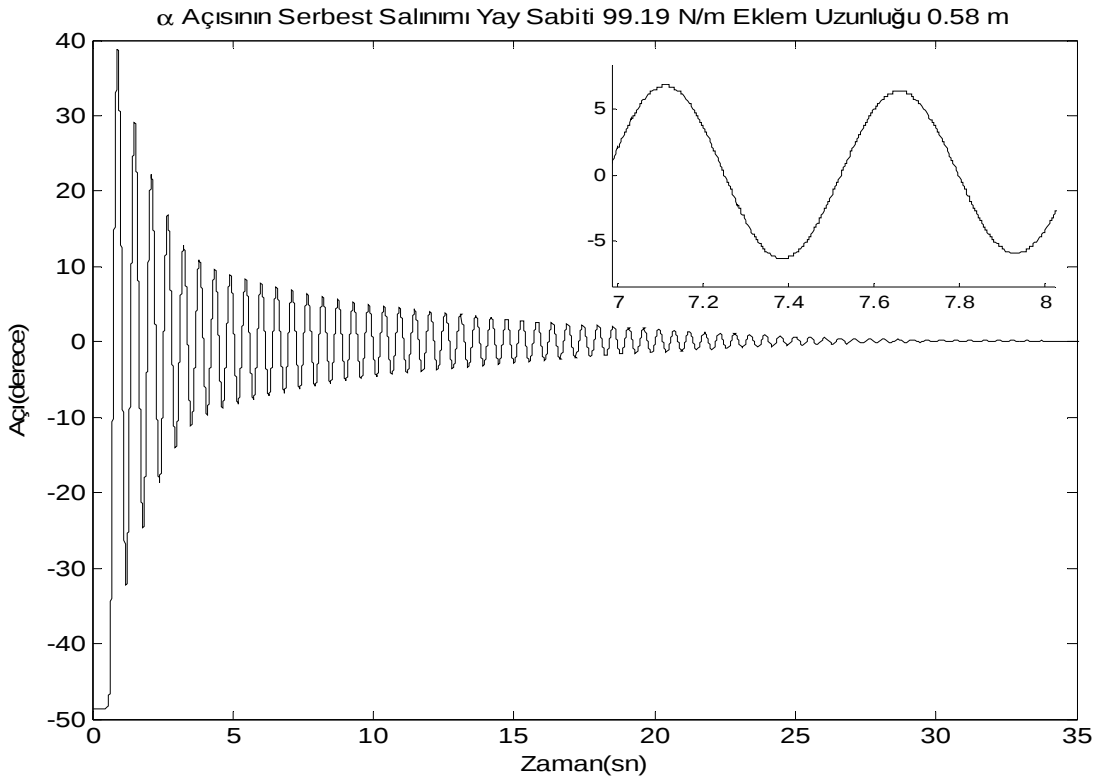
Şekil 3. 16: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 24.52 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)



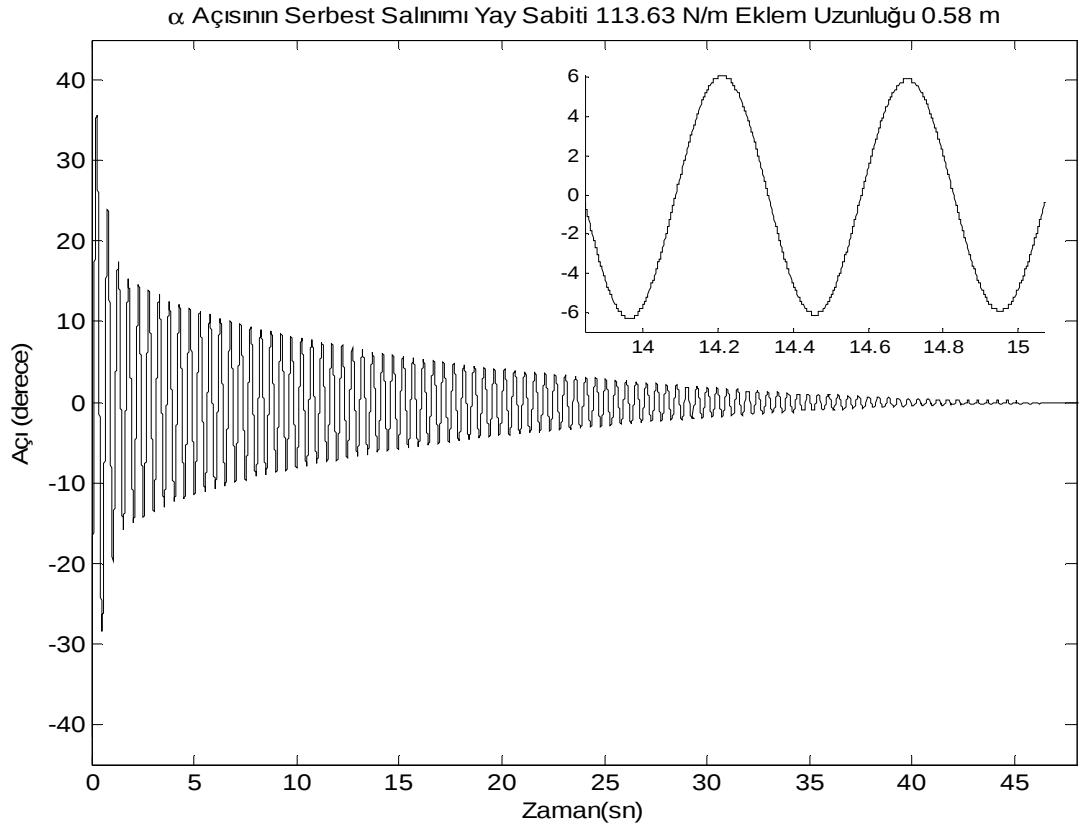
Şekil 3. 17: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 49.05 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



Şekil 3. 18: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.04 m)



Şekil 3. 19: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)



Şekil 3. 20: Uç işlevcinin serbest salınım grafiği (yay sabiti 113.63 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m, gerilmemiş yay boyu 0.02 m)

Şekil 3.5 – 3.20’ de görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun farklı yay sabitleri farklı eklem uzunlukları ve farklı yay boyları için salınım sayıları deneysel olarak elde edilmiştir. Elde edilen verilerin bilgisayar ortamında hızlı Fourier dönüşümü (FFT) analizi yapıp, esnek eklem için farklı yay sabitleri, farklı eklem uzunlukları ve farklı yay boyları için salınım frekansları Tablo 3.1’ deki gibi elde edilmiştir.

Bilindiği gibi bir ideal olarak rijit tanımlanan bir eklem salınım frekansı sonsuzdur ve eklemde çok yüksek frekanslarda çok küçük genlikli titreşimler oluşmaktadır. Bu da eklem oturma zamanının sonsuza gitmesi anlamına gelmektedir. O halde bir eklem salınım frekansının artması, eklem rijitliğe yaklaşması, salınım frekansının azalması ise eklem rijitlikten uzaklaşması anlamına gelmektedir. Burada farklı yay sertlikleri, farklı yay boyları ve farklı eklem uzunlukları için esnek eklemli robot kolunun uç işlevcinin salınım frekansları incelenmiştir.

Tablo 3. 1: Esnek eklemli robot kolun modellerinin salınım frekansları ve oturma zamanları

Kullanılan Model Parametreleri	Eklem Salınım Frekansı (Hz)	Eklem Oturma Zamanı (s)
Yay Sabiti: 1.85 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	0.45	14.21
Yay Sabiti: 12.53 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	1.20	20.94
Yay Sabiti: 16.96 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	1.35	22.85
Yay Sabiti: 24.52 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	1.60	17.68
Yay Sabiti: 49.05 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	2.25	27.65
Yay Sabiti: 58.86 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	2.53	29.43
Yay Sabiti: 99.19 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	3.38	20.44
Yay Sabiti: 113.63 N/m Eklem Uzunluğu: 0.4 m	3.67	24.98
Yay Sabiti: 1.85 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	0.24	23.29
Yay Sabiti: 12.53 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	0.65	41.17
Yay Sabiti: 16.96 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	0.78	44.51
Yay Sabiti: 24.52 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	0.93	43.62
Yay Sabiti: 49.05 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	1.25	51.65
Yay Sabiti: 58.86 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	1.43	53.64
Yay Sabiti: 99.19 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	1.81	33.79
Yay Sabiti: 113.63 N/m Eklem Uzunluğu: 0.58 m	2.01	46.44

Kullanılan model parametreleri için oluşan salınım frekansları ve oturma zamanları Tablo 3.1' de gösterilmiştir. Tablo 3.1' de görüldüğü üzere esnek eklemlili robot kolunda eklem uzunluğu değiştirilmeden, kullanılan yay sabiti artırıldığında, beklenildiği gibi uç işlevcinin salınım frekansı artmaktadır. Eğer robot kolunun, yay sabiti değiştirilmeden, eklem uzunluğu arttırılırsa, uç işlevcinin salınım frekansı düşmektedir. Ayrıca, robot kolu uç işlevcisinin oturma zamanı, yay sabiti sabit tutulup eklem uzunluğu arttırıldığında ve eklem uzunluğu sabit tutulup yay sabiti arttırıldığında artmaktadır. Ancak görüldüğü üzere, eklem uzunluğunun arttırılması uç işlevcinin salınım frekansını azaltmaktadır. Bu, eklem ataletiyle açıklanabilmektedir. Bilindiği gibi, robot kolunun esnekliği, basit olarak eklem ataleti ve doğal frekansının karesinin çarpımları ile elde edilmektedir. Eklem yay sabiti olan K_{yay} ise yay sabitiyle doğru orantılıdır. Yay sabiti arttırıldığında K_{yay} da artar, yay sabiti azaltıldığında ise azalır. Bu sözlem basit olarak Denklem 3.22' de gösterilmiştir. Bunlara göre, eğer eklem uzunluğu arttırılır ise, eklem ataleti artıp, K_{yay} değişmeyeceği için uç işlevcinin salınım frekansının düşmesi beklenmektedir ki tablodaki deneysel sonuçlar bunu doğrulamaktadır.

Bunlara ek olarak, Şekil 3.4' e bakılırsa, kullanılan yaylardan 24.52, 99.19, 113.63 N/m sertliğe sahip olanların boyları 0.02 metredir. Şekil 3.2' ye bakılacak olur ise kullanılan yay boyları kısa seçildiği durumda rijit ekleme uygulanan çekme kuvvetleri artmaktadır. Eğer Denklem 3.22 incelenecek olur ise yay sabitinin artması ve yay başlangıçtaki çekme kuvvetinin artması, eklem yay sabitini arttırmaktadır. Eklem uzunluğunda sabit olduğu göz önünde bulundurulursa, uç işlevcinin salınım frekansının artması ve buna bağlı olarak eklem rijitliğinin de artması beklenmektedir ki, tabloda verilen deneysel sonuçlar da bununla örtüşmektedir. Ancak dikkat edilirse bu kısa yaylarla yapılan deneylerde uç işlevcinin oturma zamanı, eklem yay sabiti artmasına rağmen azalmıştır. Bu azalma, yay kuvvetinin artmasıyla açıklanmaktadır.

Tablo 3.2' de esnek eklemlili robot kolunu bazı ölçülebilen, hesaplanabilen veya deneysel olarak belirlenebilen sistem parametreleri gösterilmektedir.

Tablo 3. 2: Esnek eklemli robot kolunun sistem parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Yay sertliği	K_y	58.86 N/m
Durgun haldeki yay uzunluğu	L_1	0.0438 m
Başlangıç durumundaki yay uzunluğu	L_0	0.086 m
Başlangıç durumundaki yay kuvveti	F_0	6,08 N
Eklem ağırlığı	m	0.052 kg
Esnek eklemli robot kolu ağırlığı	M_{robot}	1.98 kg
Motor hız sabiti	K_m	0.0098 V/(rad/s)
Motor akım sabiti	K_t	0.0098 Nm/A
Motor direnci	R_m	2.1 Ω
Motor endüktansı	L_m	0.18 H
Motor verimi	η_m	0.77
Dişli oranı	K_d	246
Dişli verimi	η_d	0.60
Eklem dönme noktasının tabla bağlantı noktasına olan yatay uzaklığı	r	0.0424 m
Eklem dönme noktasının tabla bağlantı noktasına olan dikey uzaklığı	d	0.0177 m
Eklem dönme noktasının eklemdeki yay bağlantı noktasına olan dikey uzaklığı	R	0.121 m

4. ESNEK BAĞLI ROBOT KOLUNUN MODELLENMESİ

Bu bölümde esnek bağlı robot kolu konusundaki bu güne kadar yapılan çalışmalar, sistem parametrelerinin belirlenmesi ve robot kolunun matematiksel olarak modellenmesi üzerinde durulacaktır.

4.1. Esnek Bağlı Robot Kolunun Modellenmesi Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar

Esnek bağlı robotlar, esnek eklemli robotlara benzer olarak, eklem esnekliği yerine bağ esnekliğine sahiptirler. Bu yüzden esnek bağlı ve esnek eklemli robotların matematiksel olarak modellenmeleri birbirine benzetilebilir. Esnek bağlarla üretilen robotlar, sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahip, adi ve kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilebilen sürekli dinamik sistemlerdir. Bağ esnekliğine sahip robotların, çeşitli endüstri alanlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmasından beri bu tip robotların matematiksel olarak ifade edilebilmeleri için birçok yaklaşım metodu oluşturulmuştur. Bu yaklaşımlar, kısmi diferansiyel denklemler yöntemi mod varsayımı metodu, sonlu elemanlar yöntemi ve toplu parametre yöntemi olarak ifade edilmektedirler.

Bu yaklaşım yöntemlerinden, kısmi diferansiyel denklemler yöntemi yaklaşımı, esnek bağlı robot sisteminin dinamiklerinin tanımlanmasında diğer yaklaşım metodları arasında en iyi sonucu verir; ancak kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü oldukça zordur. Bu yüzden genellikle sistem dinamiklerinin belirlenmesi için sistem ayrıklaştırılır.

Mod varsayımı metodu ve sonlu elemanlar yönteminde ya Lagrangian formülü ya da özyinelemeli Newton-Euler formülü kullanılır. Bunlar literatürde en çok kullanılan yöntemlerdendir. Bağ sınır koşullarını ve mod öz fonksiyonlarını belirlemede birçok yöntem vardır. Bunlar tek taraflı sabitlenmiş çubuk, iki taraftan mesnetlenmiş çubuk

sınır koşulları vb. Bu yöntemin olumsuz yönü ise, sistemin gerçek mod şekli fonksiyonlarının tahmin edilmesinin zorluğudur.

80' li yılların sonlarında, Cannon ve Schmitz [18], Bayo [19], Wang ve Wei [20], Tomei ve Tornambe [21], Krishnamurthy [22], doksanlı yılların başlarında, Bezella ve diğ. [23], Tadikonda ve Baruh [24], Ravichandran ve diğ. [25], doksanlı yılların sonuna yaklaşırken, Jnifene ve Fahim [26], Karray ve diğ. [27], ve geçtiğimiz son on yılda, Wedding ve Eltimsahy [28], Nagaraj ve diğ. [29], Martins ve diğ. [30-31], Tso ve diğ. [32] esnek bağlı robot kolunun matematiksel olarak modellenmesinde Lagrange formülleri ve mod varsayımı metodunu kullanmışlardır. Ve ayrıca, Dwivedy ve Kar [33-34] prizmatik eklemlili esnek bağlı robot kolunun, Coleman ve McSwency [35] esnek bağlı Kartezyen robot kolunun modellenmesinde mod varsayımı yöntemini kullanmışlardır.

Diğer bir taraftan sonlu elemanlar yöntemi, esnek bağlı robotların modellenmesi konusunda araştırmacılar arasında yeterince kabul görmemiştir ancak genel olarak esnek bağlı robotların modellenmesinde kullanışlı bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde, sınır koşulları bağın geometrisine ve fiziksel özelliklerine göre hesaplanmaktadır [1]. Literatürde sonlu elemanlar yöntemiyle esnek bağlı robotların modellenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Nagarajan ve Turcic [36] rijit ve esnek bağlı sistemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle analizi üzerinde çalışmışlardır. Moulin ve Bayo [37] esnek bağlı robotların uç işlevcilerinin yörünge takibinde sonlu elemanlar yöntemini kullanmışlardır. Theodore ve Ghosal [38] esnek bağlı robot kolunun modellenmesinde mod varsayımı metodu ve sonlu elemanlar yönteminin karşılaştırılmasını oldukça iyi bir şekilde vermişlerdir. Tokhi ve diğ. [39-40] sonlu elemanlar yöntemini kullanarak esnek bağlı robot kolunun dinamik modelini oluşturmuştur. Mohamed ve Tokhi [41] tek eklemlili esnek bağlı robot kolunun dinamik denklemlerinin elde edilmesinde sonlu elemanlar yöntemini kullanmış ve uç işlevci titreşimini azaltmak için çeşitli kontrol stratejileri geliştirmiştir.

Bunlara ek olarak, Khalil ve Gautier [42] esnek mekanizmalar için toplu esneklik modelini kullanmıştır. Nissing [43] tek eklemlili esnek bağı bir robot kolunun titreşimlerinin sönümlendirilmesi için bağa yay ve sönümleyici eklenmesi konusunda çalışmıştır. Rabound ve diğ. [44] çok esnek bağı robot kolunun toplu parametreler yöntemiyle modellenmesi ve kontrol edilmesi konusunda çalışmıştır. Megahed ve Hamza [45] düzlemsel esnek bağı bir robot kolunun modellenmesinde toplu parametreler yöntemi kullanmıştır.

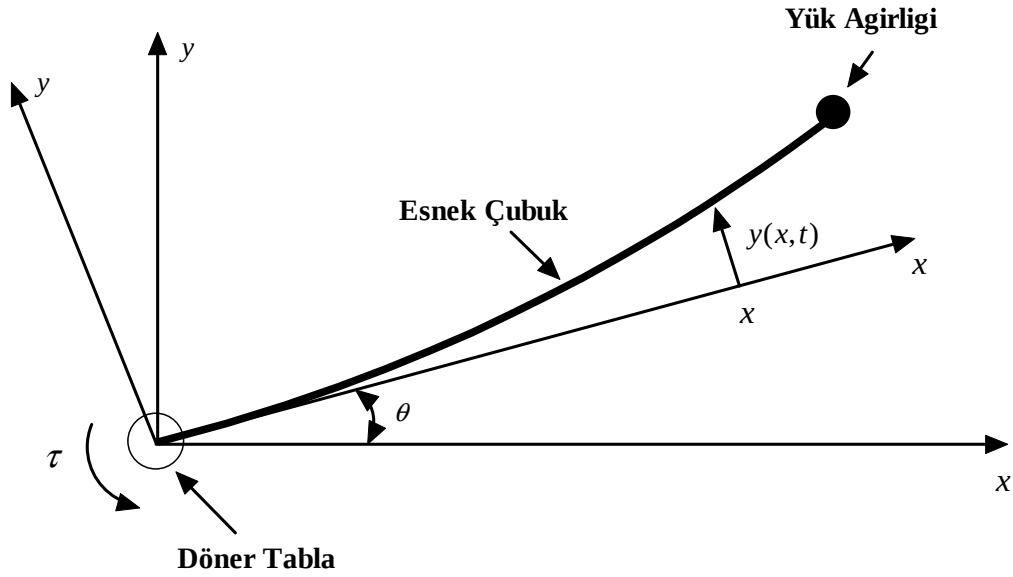
Ve ayrıca son birkaç yılda, Merabet ve Gu [46] tek eklemlili esnek bağı robot kolunun belirsizlikler ve bilinmeyen dış etkiler için modellemişlerdir. Zain ve diğ. [47] esnek bağı robot kolunun modellemesinde parametrik teknikler ve genetik algoritmalar kullanmışlardır. Ahmad ve diğ. [48] bağ uzunluğunun esnek bağı robot kolunun dinamik modellenmesine olan etkisini incelemişlerdir. Basher [49] esnek bağı prizmatik eklemlili bir robot kolunun modellenmesi üzerinde çalışmıştır. Heidari ve diğ. [50] büyük sapmalar ve bükülmeler yapan esnek bağı bir robotun modellenmesi için doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir.

4.2. Esnek Bağı Robot Kolunun Matematiksel Modellemesi

Esnek bağı robot kolunun hareket denklemleri, Timoshenko çubuk teorisi ve Euler-Bernoulli metoduyla kolaylıkla elde edilebilir. Timoshenko çubuk teorisi kullanılarak elde edilen model esnek bağı robotların kontrolör tasarımında genel bir referans olarak kullanılabilir [51]. Söz konusu modelin çözümünde, çubuğun ilk iki modunun, yüksek frekanstaki modlarından çok daha fazla baskın olmaları sebebiyle yalnızca ilk iki mod ele alınmıştır. Ve ayrıca Euler-Bernoulli çubuk modeli de çözümlenmiştir. Newton' nun birinci ve ikinci kurallarını kullanarak elde edilen birinci model, çubuğun doğrusal modeli olup, Timoshenko modeli kullanılarak ve kesme etkilerinin ihmal edildiği diğer model ise çubuğun doğrusal olmayan modelidir.

4.2.1. Esnek bağı robot kolunun Timoshenko modeli

Esnek bağı robot kolu basitçe, esnek bir çubuk, esnek eklem, çubuğun uç noktasında bir kütle, sisteme uygulanacak momenti üreten bir motor ve uygulanan momenti çubuğa ileten ve çubuğun eklemle bağlantısını sağlayan bir tabladan oluşur. Şekil 4.1’ de esnek bağı robot kolu modeli görülmektedir.



Şekil 4. 1: Esnek bağı robot modeli

Burada çubuk yatay düzlemde hareket ettiğinden, çubuğun diğer düzlemlerdeki hareketleri ihmal edilmektedir. Burada yer çekimi etkisi dikkate alınmamıştır. Ayrıca, eklem ucundaki yük ağırlığının, eklem ucuna, dönme atalet momenti ve kesme kuvveti uyguladığını da dikkate almak gerekmektedir. Esnek bağı robotun hareket denklemleri, Hamiltonian prensibi kullanılarak basitçe,

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T-V+W) dt = 0 \quad (4. 1)$$

Denklem 4.1’ deki gibi ifade edilmektedir. Burada, T sistemin toplam kinetik enerjisini, V sistemin toplam potansiyel enerjisini, W sistemde yapılan toplam sanal işi ifade etmektedir. Bu durumda keyfi bir zamanda, çubuğun herhangi bir noktasındaki dönme açısı,

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial x} = u(x,t) + v(x,t) \quad (4.2)$$

Denklem 4.2' deki gibi ifade edilir. Ve bu durumda sistemin toplam kinetik enerjisi,

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} I_h \dot{\theta}_r^2 + \frac{1}{2} \rho A \int_0^L \left\{ [x^2 + y^2(x,t)] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 + 2x\dot{y}(x,t) (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) \right\} dx \\ & + \frac{1}{2} \rho I \int_0^L [\dot{u}(x,t) + (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)]^2 dx + \frac{1}{2} J [\dot{u}(x,t) + (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)]^2 \\ & + \frac{1}{2} M_p \left\{ [L^2 + y^2(L,t)] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 + 2L\dot{y}(L,t) (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) \right\} \\ & + \frac{1}{2} \rho A \int_0^L \dot{y}^2(x,t) dx + \frac{1}{2} M_p \dot{y}^2(L,t) \end{aligned} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ve sistemin toplam potansiyel enerjisi,

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} EI \int_0^L u'(x,t) dx + \frac{1}{2} kGA \int_0^L \dot{v}^2(x,t) dx + \frac{1}{2} K_s \dot{\theta}_e^2 \\ = & \frac{1}{2} EI \int_0^L u'(x,t) dx + \frac{1}{2} kGA \int_0^L [y'(x,t) - u(x,t)] dx + \frac{1}{2} K_s \dot{\theta}_e^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Denklem 4.4' deki gibi ifade edilir. Ve yük tarafından yapılan sanal iş ise,

$$\delta W = T_r \delta \theta_r + T_e \delta \theta_e \quad (4.5)$$

olarak elde edilir. Denklem 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5' te kullanılan sabit ve değişkenler sırasıyla, $y(x,t)$ esnek bağın uç noktasının pozisyonu, $u(x,t)$ bağdaki bükülme miktarına göre oluşan sapma miktarı, $v(x,t)$ bağdaki kesme kuvvetine göre oluşan sapma miktarı, x çubuk boyunca uzunluk, I_h döner tablanın atalet momenti, ρ esnek bağda kullanılan malzemenin yoğunluğu, A esnek bağın kesit alanı, I çubuğun atalet momenti, J çubuğun ucundaki ağırlığın atalet momenti, L esnek çubuğun uzunluğu, M_p uç işlevicideki ağırlık, θ_r çubuğun esnemeyen kısmının dönme açısı, θ_e bağın esneyen kısmının bükülme açısı, E Young modülü, k şekil faktörü, G esnek çubuğun kesme modülü, K_s eklem uyumu faktörü, T_r esnek bağın esnemeyen kısmının kinetik enerjisi, T_e esnek bağın esneyen kısmının kinetik enerjisi olarak ifade edilmektedirler.

Hamiltonian prensibinin uygulanmasıyla δW , δV ve δT şu şekilde hesaplanabilir. Burada işlem yoğunluğundan kurtulmak için $y(x,t)$, $u(x,t)$, $v(x,t)$, $y(L,t)$, $u(L,t)$ ve $v(L,t)$ sırasıyla y , u , v , $y(L)$, $u(L)$, $v(L)$ olarak kısaltılmıştır. Bu durumda sistemin kinetik enerjisindeki değişim,

$$\begin{aligned}\delta(T) = & I_h \dot{\theta}_r \delta \dot{\theta}_r + \rho A \int_0^L \{ [x^2 + y^2] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) + x \dot{y} \} dx (\delta \dot{\theta}_r + \delta \dot{\theta}_e) \\ & + \rho A \int_0^L (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 y dx \delta y + \rho A \int_0^L [x (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) + \dot{y}] dx \delta \dot{y} \\ & + \rho I \int_0^L \{ [\ddot{u} + (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e)] [\delta \ddot{u} + (\delta \ddot{\theta}_r + \delta \ddot{\theta}_e)] \} dx \\ & + M_p \{ [L^2 + y^2(L)] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) + L \dot{y}(L) \} (\delta \dot{\theta}_r + \delta \dot{\theta}_e) \\ & + J [\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e + \dot{u}(L)] [\delta \dot{u}(L) + (\delta \dot{\theta}_r + \delta \dot{\theta}_e)]\end{aligned}\quad (4.6)$$

Denklem 4.6' da, potansiyel enerjisindeki değişim,

$$\delta(V) = EI \int_0^L u' \delta u' dx + kGA \int_0^L [y' - u] [\delta y' - \delta u] + K_s \theta_e \delta \theta_e \quad (4.7)$$

Denklem 4.7' de ve dış kuvvetler tarafından yapılan sanal iş ise,

$$\delta(W) = T_r \delta \theta_r + T_e \delta \theta_e \quad (4.8)$$

Denklem 4.8' de olduğu gibi ifade edilir.

Yukarıda elde edilen denklemleri kullanarak, gereken hesaplar yapılır ve integraller hesaplanırsa esnek bağın hareket denklemi Denklem 4.9' da olduğu gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}& I_h \ddot{\theta}_r \delta \dot{\theta}_r + \left[\frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^3 + \rho I + J + M_p y^2(L) \right] (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) (\delta \theta_r + \delta \theta_e) \\ & + \left\{ \rho A \int_0^L y^2 dx + \left[2 \rho A \int_0^L y \dot{y} + 2 M_p y(L) \dot{y}(L) \right] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) \right\} (\delta \theta_r + \delta \theta_e) \\ & + \left\{ \rho A \int_0^L x \ddot{y} dx + M_p L \ddot{y}(L) + \rho I \int_0^L \ddot{u} dx + J \ddot{u}(L) \right\} (\delta \theta_r + \delta \theta_e) - K_s \theta_e \delta \theta_e \\ & = T_r \delta \theta_r + T_e \delta \theta_e\end{aligned}\quad (4.9)$$

Denklem 4.9' da $\delta\theta_r$ çarpanı bulunan bütün terimleri gruplandırırsak,

$$\begin{aligned} & I_h \ddot{\theta}_r + \left[\frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + \rho I + J + M_p y^2(L) + \rho A \int_0^L y^2 dx \right] (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) \\ & + \left[2\rho A \int_0^L y \dot{y} + 2M_p y(L) \dot{y}(L) \right] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) + \rho A \int_0^L x \ddot{y} dx + M_p L \ddot{y}(L) \\ & + \rho I \int_0^L \ddot{u} dx + J \ddot{u}(L) = T_r \end{aligned} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10 elde edilir. Ve yine Denklem 4.9' da $\delta\theta_e$ çarpanı bulunan bütün terimleri de ayrıca gruplandırarak,

$$\begin{aligned} & \left[\frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + \rho I + J + M_p y^2(L) + \rho A \int_0^L y^2 dx \right] (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) \\ & + \left[2\rho A \int_0^L y \dot{y} + 2M_p y(L) \dot{y}(L) \right] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) + \rho A \int_0^L x \ddot{y} dx + M_p L \ddot{y}(L) \\ & + \rho I \int_0^L \ddot{u} dx + J \ddot{u}(L) + K_s \theta_e = T_e \end{aligned} \quad (4.11)$$

Denklem 4.11' i elde ederiz. δy ve δu terimlerini içeren ifadeleri gruplandırırsak,

$$u'' + \frac{kGA}{EI} (y' - u) - \frac{\rho}{E} (\ddot{u} + \ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) = 0 \quad (4.12)$$

$$y'' - u' - \frac{\rho}{kG} \left[x(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) + \ddot{y} - (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 y \right] = 0 \quad (4.13)$$

sırasıyla Denklem 4.12 ve 4.13' ü elde ederiz. Hamiltonian metodu aşağıdaki sınır koşulları ile uygulanabilir. $\delta y(L)$ çarpımları içeren ifade,

$$u' + \frac{J}{EI} (\ddot{u}(L) + \ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) = 0 \quad (4.14)$$

ve $\delta u(L)$ çarpımları içeren ifade,

$$y'(L) - u(L) + \frac{M}{kGA} \left[L(\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) + \ddot{y}(L) - (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 y(L) \right] = 0 \quad (4.15)$$

Denklem 4.14 ve 4.15' te ki gibi verilmiştir ve verilen iki geometrik sınır koşulu Denklem 4.16 ve 4.17' de tanımlanmıştır.

$$y(0,t)=0 \quad (4.16)$$

$$y'(0,t)=0 \quad (4.17)$$

Kolaylıkla gösterilebilir ki esnek bağı esnemeyen kısmının dönme açısı olan θ_r ve esnek bağı esneyen kısmının dönme açısı olan θ_e aynı frekans içeriğine sahiptirler. Bu nedenle ikisinden birini çözümü yeterli olacaktır. Denklem 4.11'in, Denklem 4.10' dan çıkarılmasıyla,

$$I_h \ddot{\theta}_r + K_s \theta_e = T_r - T_e \quad (4.18)$$

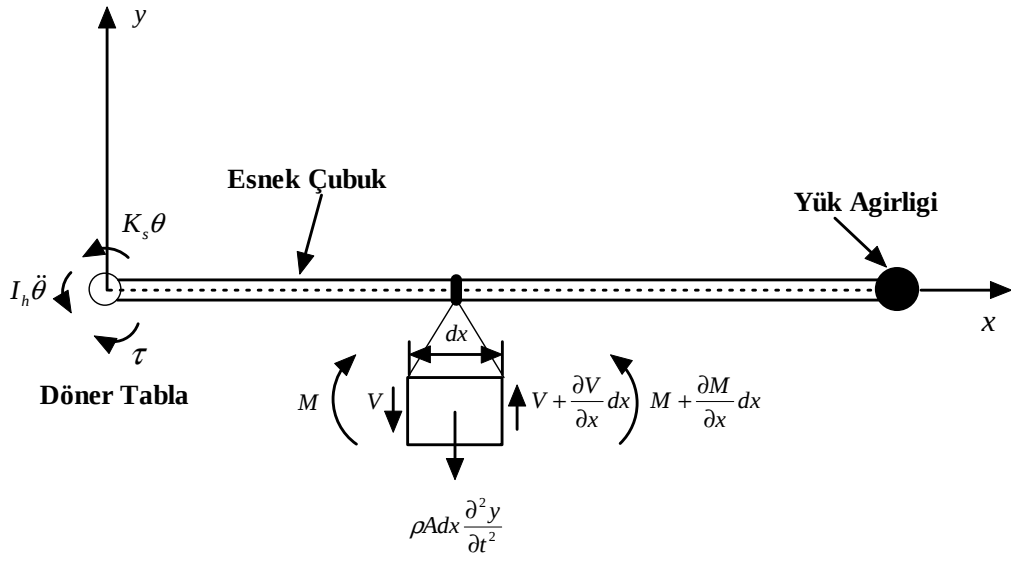
denklemini elde edilir. Yukarıdaki denklem her iki açının da aynı frekans içeriğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, eğer tablanın toplam dönme açısının θ_r olduğunu varsayarsak, Denklem 4.10' u,

$$\begin{aligned} & \left[I_h + \frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + \rho I + J + M_p y^2(L) + \rho A \int_0^L y^2 dx \right] \ddot{\theta} \\ & + \left[2\rho A \int_0^L y \dot{y} + 2M_p y(L) \dot{y}(L) \right] \dot{\theta} + \rho A \int_0^L x \ddot{y} dx + K_s \theta + M_p L \ddot{y}(L) \\ & + \rho I \int_0^L \ddot{u} dx + J \ddot{u}(L) = T \end{aligned} \quad (4.19)$$

Denklem 4.19' da ki gibi yazabiliriz. Bu denklem esnek bağı robot kolunun hareket denklemini olmakla beraber bu denklemde çubuğa uygulanan kesme kuvveti ve dönel atalet momenti ihmal edilmiştir.

4.2.2. Esnek bağı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli

Esnek bağı robotların modellenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden birisi Euler-Bernoulli yöntemidir. Bu yöntemde esnek bağdaki kesme etkileri yüksek frekanstaki modlar kullanılmadığında ihmal edilebilir hale gelmektedir. Euler-Bernoulli modelinin birçok değişik formu vardır [51]. Bu çalışmada oluşturulan esnek çubuğun dinamik modelleri esnek bağı robotların kontrolünde kullanılmaktadır. Esnek bağı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli için kullanılan şematik diyagramı Şekil 4.2' de gösterilmektedir.



Şekil 4. 2: Esnek bağı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli için şematik diyagramı

Esnek bağı robot kolunun hareket denklemi, esneyebilen cisimlerin mekanik özellikleri ve Newton' un ikinci ve üçüncü yasası kullanılarak bulunabilir. Buna göre, esnek bağıdaki kuvvetler toplamı sıfır olmalıdır.

$$\sum F_y = 0 \quad (4. 20)$$

veya

$$V - V - \frac{\partial V}{\partial x} dx - \rho A dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (4. 21)$$

ve bağı etkileyen toplam momentlerin de sıfır olması gerekmektedir.

$$\sum M = 0 \quad (4. 22)$$

veya

$$-V \frac{dx}{2} - \left(V + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \frac{dx}{2} + \frac{\partial M}{\partial x} dx \cong -V dx + \frac{\partial M}{\partial x} dx = 0 \quad (4. 23)$$

veya

$$V = \frac{\partial M}{\partial x} \quad (4. 24)$$

Esneyebilen cisimlerin mekanik özelliklerinden bilindiği gibi, bükülme momenti ile sapma miktarı arasındaki ilişki basitçe,

$$M=EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (4. 25)$$

Denklem 4.25’ te ki gibi ifade edilebilir. Denklem 4.21,

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} dx = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \quad (4. 26)$$

veya

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4. 27)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir.

Esnek bağlı robot koluna, döner tabla ve uç noktalardaki sınır koşullarını uygularsak, bağın döner tablaya bağlantı noktasında $x=0$ ve bağın uç noktasında $x=L$ sınır koşulları geçerlidir. Buna göre $x=0$ için,

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - I_h \ddot{\theta} - K_s \theta + T = 0 \quad (4. 28)$$

ve

$$y(0,t)=0 \quad (4. 29)$$

denklemleri ve $x=L$ sınır koşulu için,

$$EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = M_p \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (4. 30)$$

denklemleri elde edilir. İfade edilen sınır koşulları kullanılarak esnek bağlı robot kolu için basit bir Euler-Bernoulli modeli, Denklem 4.31 - 4.37’ de olduğu gibi elde edilir. Bu modelin bir önceki bölümde anlatılan Timoshenko modelinden farkı kesme kuvveti etkilerinin ihmal edilmesidir. Burada Denklem 4.31 esnek bağlı robot kolunun Euler-Bernoulli modeli için elde edilen hareket denklemdir.

$$\left[\frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + J + M_p y^2(L,t) + \rho A \int_0^L y^2(x,t) dx \right] \ddot{\theta} + \left[\int_0^L y(x,t) \dot{y}(x,t) dx + \frac{M}{\rho A} y(L,t) \dot{y}(L,t) \right] 2\rho A \dot{\theta} \quad (4.31)$$

$$+ \rho A \int_0^L x \ddot{y}(x,t) dx + \frac{M_p L}{\rho A} \ddot{y}(L,t) = T$$

$$\frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4}(x,t) + x \ddot{\theta} + \ddot{y}(x,t) - \dot{\theta}^2 y(x,t) = 0 \quad (4.32)$$

$$y''(L,t) = 0 \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(x,t) = \frac{M_p}{EI} \left[L \ddot{\theta} + \ddot{y}(L,t) - \dot{\theta}^2 y(L,t) \right] \quad (4.34)$$

$$\theta = \theta_e + \theta_r \quad (4.35)$$

$$I_h \ddot{\theta}_r + K_s \theta_e = T_r - T_e \quad (4.36)$$

ve son olarak,

$$T = T_r - T_e \quad (4.37)$$

4.2.3. Esnek bağı robot kolunun Timoshenko modelinin çözümü

Esnek bağı robotun uç işlevcisinin yer değiştirme ve ivmesinin çözümünü yapabilmek için birçok metod vardır. Bu bölümde çözümün gerçekleştirilmesi için mod varsayımı yöntemi kullanılmıştır. Esnek bağı robot kolunun uç işlevcisinin yer değiştirmesi sonsuz sayıda zaman fonksiyonunun toplamının uzunluk fonksiyonuyla çarpılması sonucu elde edilir. Esnek bağı mod şekilleri olarak adlandırılan uzunluk fonksiyonları ve zaman fonksiyonları koordinatların genelleştirilmesiyle nümerik olarak çözülebilirler. Ancak, çubuğun yüksek frekanstaki modlarının baskın olmaması sebebiyle, sadece çubuğun ilk iki modu göz önünde bulundurulur. Robot uç işlevcisinin deplasmanı ve kesme açısı, sadece ilk iki mod ele alınarak aşağıdaki denklemlerdeki gibi elde edilir.

$$y(x,t)=\beta_1(x)q_1(t)+\beta_2(x)q_2(t) \quad (4.38)$$

$$u(x,t)=\beta'_1(x)r_1(t)+\beta_2(x)q_2(t) \quad (4.39)$$

Denklem 4.39' da ki (') ifadesi x'e göre türev anlamına gelmektedir. Burada β_i sistemin i' inci mod şekli, q_i ve r_i ise bağın bükülme ve kesme miktarı için sistemin genelleştirilmiş koordinatlarıdır. Denklem 4.38 ve 4.39' u, Denklem 4.28 ve 4.30 arasındaki denklemlerde yerine koyar gerekli sınır koşullarını denklemlere uygular ve gerekli kısaltmaları yaparsak,

$$\begin{aligned} & I_1\ddot{\theta}_r + I_2\ddot{\theta}_e + M_p L \beta_1(L)\ddot{q}_1 + M_p L \beta_2(L)\ddot{q}_2 + J\beta'_1(L)\ddot{r}_1 \\ & + \rho A \int_0^L x(\beta_1\ddot{q}_1 + \beta_2\ddot{q}_2)dx + J\beta'_2(L)\ddot{r}_2 \\ & + \rho I \int_0^L (\beta_1'\ddot{q}_1 + \beta_2'\ddot{q}_2)dx + n\text{Terim} = T_r \end{aligned} \quad (4.40)$$

Burada,

$$I_1 = I_h + \frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + \rho I + J, \quad I_2 = \frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + \rho I + J \text{ olarak verilmektedir.}$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\rho}{E}\ddot{\theta}_r - \frac{\rho}{E}\ddot{\theta}_e + \frac{kGA}{EI}\beta'_1 q_1 + \frac{kGA}{EI}\beta'_2 q_2 + \left(\beta'''_1 - \frac{kGA}{EI}\beta'_1\right)r_1 \\ & + \left(\beta'''_2 - \frac{kGA}{EI}\beta'_2\right)r_2 - \frac{\rho}{E}\beta_1\ddot{q}_1 - \frac{\rho}{E}\beta_2\ddot{q}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4.41)$$

$$-\frac{\rho}{kG}x\ddot{\theta}_r - \frac{\rho}{kG}x\ddot{\theta}_e + \beta''_1 q_1 + \beta''_2 q_2 - \frac{\rho}{kG}\beta_1\ddot{q}_1 - \frac{\rho}{kG}\beta_2\ddot{q}_2 \quad (4.42)$$

$$-\beta''_1 r_1 - \beta''_2 r_2 + n\text{Terim}1 = 0$$

$$\frac{J}{EI}\ddot{\theta}_r + \frac{J}{EI}\ddot{\theta}_e + \beta''_1(L)r_1 + \beta''_2(L)r_2 + \frac{J}{EI}\beta'_1(L)\ddot{r}_1 + \frac{J}{EI}\beta'_2(L)\ddot{r}_2 = 0 \quad (4.43)$$

$$\frac{M_p L}{kGA}\ddot{\theta}_r + \frac{M_p L}{kGA}\ddot{\theta}_e + \beta'_1(L)q_1 + \beta'_2(L)q_2 + \frac{M_p}{kGA}\beta_1(L)\ddot{q}_1 + \frac{M_p}{kGA}\beta_2(L)\ddot{q}_2 \quad (4.44)$$

$$-\beta'_1 r_1 - \beta'_2 r_2 + n\text{Terim}2 = 0$$

Söz konusu ifade de, doğrusal olmayan terimler, nTerim, nTerim1, nTerim2 aşağıdaki gibi tanımlanmışlardır.

$$\begin{aligned} nTerim = & M_p [\beta_1(L)q_1 + \beta_2(L)q_2]^2 (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) \\ & + \rho A (\ddot{\theta}_r + \ddot{\theta}_e) \int_0^L (\beta_1 q_1 + \beta_2 q_2)^2 dx \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} & + \left[2\rho A \int_0^L (\beta_1 q_1 + \beta_2 q_2)(\beta_1 \dot{q}_1 + \beta_2 \dot{q}_2) dx \right] (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) \\ & + \{ 2M_p [\beta_1(L)q_1 + \beta_2(L)q_2] [\beta_1(L)\dot{q}_1 + \beta_2(L)\dot{q}_2] \} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e) \end{aligned}$$

$$nTerim1 = \frac{\rho}{kG} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 (\beta_1 q_1 + \beta_2 q_2) \quad (4.46)$$

$$nTerim2 = -\frac{M_p}{kGA} (\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_e)^2 (\beta_1(L)q_1 + \beta_2(L)q_2) \quad (4.47)$$

Denklem 4.40 ile 4.44 arasındaki denklemleri matris formatında yazarsak esnek bağlı robot kolunun dinamik denklemini,

$$[M][\ddot{X}] + [K][X] + [nTerimler] = [T] \quad (4.48)$$

Denklem 4.48’ deki gibi elde ederiz. Bu denklemde M ve K , sırasıyla esnek bağlı robotun kütle ve sertlik matrisleridir. Ve ayrıca nTerimler matrisi, sistemin tüm doğrusal olmayan terimlerinin ifade edildiği matristir. Denklem 4.48’ de kullanılan ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$[M] = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 & M_{13} & M_{14} & M_{15} & M_{16} \\ I_h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\rho}{E} & -\frac{\rho}{E} & 0 & 0 & -\frac{\rho}{E}\beta'_1 & -\frac{\rho}{E}\beta'_2 \\ -\frac{\rho}{kG}x & -\frac{\rho}{kG}x & -\frac{\rho}{kG}\beta_1 & -\frac{\rho}{kG}\beta_2 & 0 & 0 \\ \frac{J}{EI} & \frac{J}{EI} & 0 & 0 & \frac{J}{EI}\beta'_1(L) & \frac{J}{EI}\beta'_2(L) \\ \frac{M_p L}{kGA} & \frac{M_p L}{kGA} & \frac{M_p L}{kGA}\beta_1(L) & \frac{M_p L}{kGA}\beta_2(L) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

burada,

$$M_{13}=M_p L \beta_1(L) + \rho A \int_0^L x \beta_1 dx \quad (4.50)$$

$$M_{14}=M_p L \beta_2(L) + \rho A \int_0^L x \beta_2 dx \quad (4.51)$$

$$M_{15}=J \beta_1'(L) + \rho I \int_0^L \beta_1' dx \quad (4.52)$$

$$M_{16}=J \beta_2'(L) + \rho I \int_0^L \beta_2' dx \quad (4.53)$$

$$[\ddot{X}] = [\ddot{\theta}_r \quad \ddot{\theta}_e \quad \ddot{q}_1 \quad \ddot{q}_2 \quad \ddot{r}_1 \quad \ddot{r}_2]^T \quad (4.54)$$

$$[X] = [\theta_r \quad \theta_e \quad q_1 \quad q_2 \quad r_1 \quad r_2]^T \quad (4.55)$$

$$[nTerimler] = [nTerim \quad 0 \quad 0 \quad nTerim1 \quad 0 \quad nTerim2]^T \quad (4.56)$$

$$[T] = [T_r \quad T_r - T_e \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4.57)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{kGA}{EI} \beta_1' & \frac{kGA}{EI} \beta_2' & \beta_1''' - \frac{kGA}{EI} \beta_1' & \beta_2''' - \frac{kGA}{EI} \beta_2' \\ 0 & 0 & \beta_1'' & \beta_2'' & -\beta_1'' & -\beta_2'' \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1''(L) & \beta_2''(L) \\ 0 & 0 & \beta_1'(L) & \beta_2'(L) & -\beta_1'(L) & -\beta_2'(L) \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

4.2.4. Esnek bağlı robot kolunun Euler-Bernoulli modelinin çözümü

Esnek bağlı robotların modellenmesinde Euler-Bernoulli modelinin literatürde en çok kullanılan modellerden biri olduğu daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Bu yöntemde, modelin elde edilmesi oldukça kolaydır. Ve bu modelde esnek bağlı robotun bağ dinamikleri, bilinen koşullar altında, yüksek doğrulukta tahmin edilebilmektedir.

Esnek bağlı robotun Euler-Bernoulli modeli, Denklem 4.48' de olduğu gibi matris formatında yazılabilir. Bu yazım sonrasında söz konusu denklemde sadece matrisler değişecektir. Bu durumda robotun denkleminde kullanılan matrisler,

$$[M] = \begin{bmatrix} \frac{\rho A L^3}{3} + M_p L^2 + J & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_p \beta_1^2(L) + \int_0^L \rho \beta_1^2 dx & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

burada,

$$M_{12} = M_p L \beta_1(L) + \int_0^L \rho x \beta_1 dx \quad (4.60)$$

$$M_{13} = M_p L \beta_2(L) + \int_0^L \rho x \beta_2 dx \quad (4.61)$$

$$M_{23} = M_p \beta_1(L) \beta_2(L) + \int_0^L \rho \beta_1 \beta_2 dx \quad (4.62)$$

$$M_{33} = M_p \beta_2^2(L) + \int_0^L \rho \beta_2^2 dx \quad (4.63)$$

ve ayrıca,

$$M_{21} = M_{12}, M_{31} = M_{13}, M_{32} = M_{23}$$

$$[\ddot{X}] = [\ddot{\theta} \quad \ddot{q}_1 \quad \ddot{q}_2]^T \quad (4.64)$$

$$[X] = [\theta \quad q_1 \quad q_2]^T \quad (4.65)$$

$$\theta = \theta_e + \theta_r \quad (4.66)$$

$$I_h \ddot{\theta}_r + K_s \theta_e = T_r - T_e \quad (4.67)$$

ve,

$$T = T_r - T_e \quad (4.68)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_s & K_s \beta_1'(0) & K_s \beta_2'(0) \\ K_s \beta_1'(0) & K_{22} & K_{23} \\ K_s \beta_2'(0) & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

burada,

$$K_{22}=EI \int_0^L \beta_1''(x)dx + K_s \beta_1'^2 \quad (4. 70)$$

$$K_{23}=K_{32}=EI \int_0^L \beta_1''(x)\beta_2''(x)dx + K_s \beta_1'^2(0)\beta_2'^2(0) \quad (4. 71)$$

$$K_{33}=EI \int_0^L \beta_2''(x)dx + K_s \beta_2'^2 \quad (4. 72)$$

$$[nTerimler]=[nTerim1 \quad nTerim2 \quad nTerim3]^T \quad (4. 73)$$

burada,

$$\begin{aligned} nTerim1 &= \rho \int_0^L (\beta_1 q_1 + \beta_2 q_2)^2 dx + M_p [\beta_1(L)q_1 + \beta_2(L)q_2]^2 \\ &+ 2M_p \dot{\theta} [\beta_1(L)q_1 + \beta_2(L)q_2] [\beta_1(L)\dot{q}_1 + \beta_2(L)\dot{q}_2] \end{aligned} \quad (4. 74)$$

$$+ 2\rho \dot{\theta} \int_0^L (\beta_1 q_1 + \beta_2 q_2)(\beta_1 \dot{q}_1 + \beta_2 \dot{q}_2)$$

$$nTerim2 = \rho \dot{\theta}^2 \int_0^L (\beta_1^2 q_1 + \beta_1 \beta_2 q_2)^2 dx + M_p [\beta_1^2(L)q_1 + \beta_1(L)\beta_2(L)q_2] \quad (4. 75)$$

$$nTerim3 = \rho \dot{\theta}^2 \int_0^L (\beta_2^2 q_1 + \beta_1 \beta_2 q_1)^2 dx + M_p [\beta_2^2(L)q_2 + \beta_1(L)\beta_2(L)q_1] \quad (4. 76)$$

4.2.5. Esnek bağlı robot kolunun Modları ve Mod Şekilleri

Esnek bağlı robot kolunun her iki dinamik modelinde de kullanılan mod fonksiyonları (β_i) mod şekilleri olarak adlandırılırlar ve tanımlanmaları için sistemin sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Bu fonksiyonların, kesin çözümleri var olmayabilir ancak sistemin sınır koşullarına uyan, kabul edilebilir bir çözümleri vardır. Daha önce de tanımlandığı gibi, uç işlevciadaki deplasman fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$y(x,t) = \beta_1(x)q_1(t) + \beta_2(x)q_2(t) + \dots + \beta_n(x)q_n(t) \quad (4. 77)$$

Burada β_i fonksiyonları, çubuk denkleminin çözümüdür.

$$\beta_1(x) = A_1 \sin \alpha_1 + A_2 \cos \alpha_1 + A_3 \sinh \alpha_1 + A_4 \cosh \alpha_1 \quad (4. 78)$$

$$\beta_2(x)=A_1 \sin \alpha_2 +A_2 \cos \alpha_2+ A_3 \sinh \alpha_2 +A_4 \cosh \alpha_2 \quad (4. 79)$$

ve genel formda yazarsak,

$$\beta_n(x)=A_1 \sin \alpha_n +A_2 \cos \alpha_n+ A_3 \sinh \alpha_n +A_4 \cosh \alpha_n \quad (4. 80)$$

Burada, α_i öz değer fonksiyonu veya esnek bağlı robot sisteminin modları olarak tanımlanmaktadır. Söz konusu sistem modları aşağıdaki matrisin hesaplanmasıyla kolaylıkla bulunabilir.

$$[G] \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4. 81)$$

burada,

$$[G] = \begin{bmatrix} G_{11} & 2\alpha L & G_{13} \\ \sin \alpha L & G_{22} & -\sin \alpha L \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \quad (4. 82)$$

burada,

$$G_{11}=G_{13}=\left(-I_h \frac{EI}{\rho} \alpha^4 + K_s\right) \frac{L}{EI} \quad (4. 83)$$

$$G_{22}=\cos \alpha L + \cosh \alpha L \quad (4. 84)$$

$$G_{31}=\frac{M_p}{\rho} \alpha \sin \alpha L - \cos \alpha L \quad (4. 85)$$

$$G_{32}=\frac{M_p}{\rho} \alpha (\cos \alpha L - \cosh \alpha L) + (\sin \alpha L - \sinh \alpha L) \quad (4. 86)$$

$$G_{33}=\frac{M_p}{\rho} \alpha \sin \alpha L + \cos \alpha L \quad (4. 87)$$

Denklem 4.81' deki matris çarpımını gerçekleştirilip gerekli eşitlemeler yapılırsa,

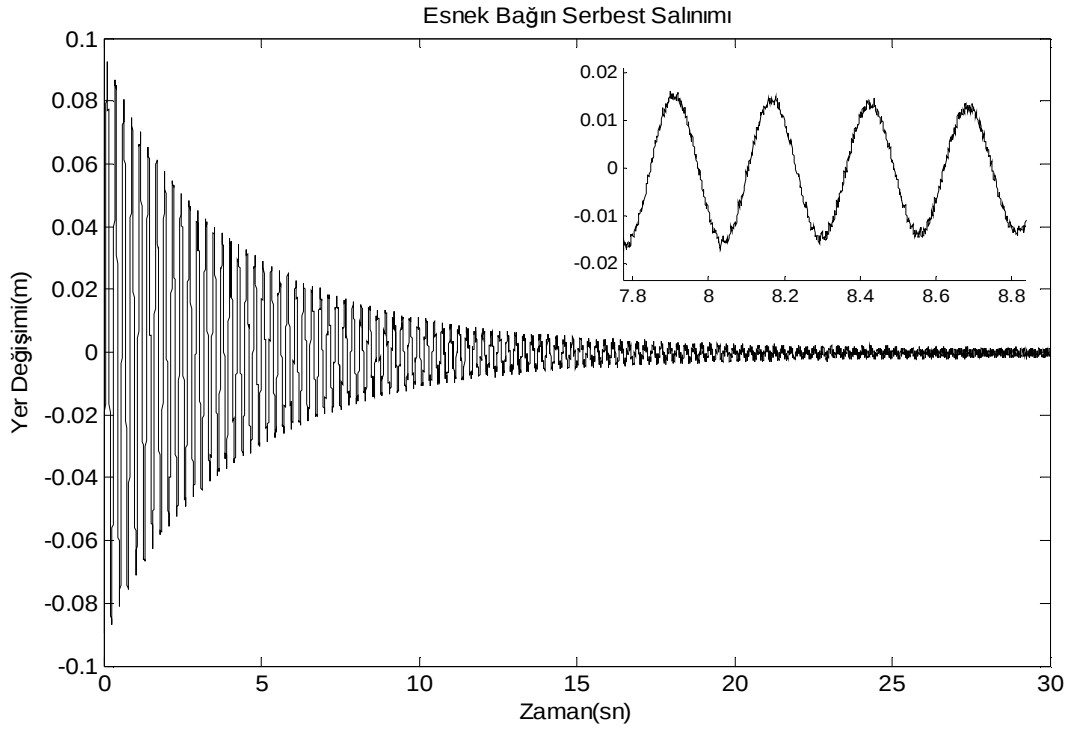
$$2 \left(-\frac{I_h}{\rho} \alpha^4 L + \frac{K_s L}{EI} \right) \{1 + \cos \alpha L \cosh \alpha L\} \quad (4. 88)$$

$$+2 \left(-\frac{I_h}{\rho} \alpha^4 L + \frac{K_s L}{EI} \right) \left\{ \frac{M_p}{\rho A} \alpha (\cos \alpha L \sinh \alpha L - \sin \alpha L \cosh \alpha L) \right\}$$

$$-2\alpha L \{ \sin \alpha L \cosh \alpha L - \cos \alpha L \sinh \alpha L \} - 4 \frac{M_p L}{\rho A} \alpha^2 \sin \alpha L \sinh \alpha L = 0$$

Denklem 4.88 elde edilir. Bu denklem çubuğun karakteristik denklemi olarak da adlandırılır. Ayrıca, esnek bağı elde edilen karakteristik denkleminin sonsuz sayıda mod şekli içeren sonsuz sayıda çözümü vardır. Ve uç işlevcinin kesin pozisyonu mod şekillerinin sonsuz sayıda çarpının toplamlarından elde edilebilir. Daha öncede bahsedildiği gibi, esnek bağlı robot kolunun dinamik denklemini yüksek doğrulukta elde etmek için sadece ilk iki modun kullanılması yeterli olmaktadır.

Şekil 4.3, Uzunluğu 0.4 m, genişliği 0.02 m, kalınlığı 0.001 m, ağırlığı 0.021 kg, $69 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ Young modülü, 2.71 gr/cm^3 yoğunluğu ve alüminyumdan üretilmiş olan esnek bağı tek ucundan sabitlenerek belirli bir başlangıç koşulu için salınım grafiğini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere çubuğun saniyedeki salınım sayısı deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel olarak toplanan verilerin hızlı Fourier dönüşümü yardımıyla (FFT) analizi yapıp, esnek bağlı robotun esnek bağının salınım frekansı 3.86 Hz olarak elde edilmiştir.



Şekil 4. 3: Esnek bağı robotun esnek bağının serbest salınım grafiği

Tablo 4. 1 : Esnek bağı robot kolunun model parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Bağın yay sabiti	K_s	121.8 N/m
Bağ ağırlığı	m	0.021 kg
Esnek bağı robot kolu ağırlığı	M_{robot}	1.65 kg
Motor hız sabiti	K_m	0.0098 V/(rad/s)
Motor akım sabiti	K_t	0.0098 Nm/A
Motor direnci	R_m	2.1 Ω
Motor endüktansı	L_m	0.18 H
Motor verimi	η_m	0.77
Dişli oranı	K_d	246
Dişli verimi	η_d	0.60

5. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ

Bu bölümde esnek eklemli robotun kontrolü konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar, esnek eklemli robotun kontrolünde kullanılan kontrol şemalarının kısaca özetlenmesi, robotun açık çevrim cevapları, robota uygulanan farklı kontrol yöntemleri ve bunların deneysel sonuçları incelenecektir.

5.1. Esnek Eklemli Robot Kolu Kontrolü Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar

Esnek eklemli robotların matematiksel olarak dinamiklerinin belirlenmesi, sistem modelinin oluşturulması ve sistemin ayrıntılı olarak incelenmesinde olduğu gibi eklem esnekliğine sahip robotların kontrol edilmesi konusunda da günümüze kadar akademik ve endüstriyel alanlarda birçok çalışma yapılmıştır.

Esnek eklemli robotların kontrolü basit anlamda iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi, doğrusal kontrol yöntemleriyle esnek eklemli robotların kontrol edilmesi, ikicisi ise bu tip robotların kontrolünde doğrusal olmayan kontrol şemalarının kullanılmasıdır. Literatürde her iki yaklaşım yöntemi içinde birçok çalışma yer almaktadır.

Bugüne kadar, esnek eklemli robotların doğrusal kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesi konusundaki çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir. Zhang ve Furusho [52], esnek eklemli robotların kontrolü için PID kontrol yöntemini kullanmışlardır. Tzu ve diğ. [53], yine esnek robot kontrolü için doğrusal kontrol yöntemi olan PID kontrol konusunda çalışma yapmışlardır. Akyuz ve diğ. [54], esnek eklemli robot kolu kontrolü için PID ve durum geri beslemeli kontrolörler kullanmışlardır. Schaeffer ve Hirzinger [55], esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolünü gerçekleştirmiştir. Yine Lim ve diğ. [56], rijit bağlı esnek eklemli bir robot kolunun yörünge takibinde tam durum geri beslemeli kontrolünü

gerçekleştirmişlerdir. Cannon ve Schmitz [57], esnek eklemlı robot kolu kontrolünde doğrusal karesel düzenleyici (LQR) kullanmışlardır. Trautman ve Wang [58], esnek eklemlı robot kontrolünde H_{∞} kontrol yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca esnek eklemlı robotların doğrusal olmayan kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesi konusundaki çalışmalar şu şekilde özetlenebilir. Taloe ve diğ. [59], genişletilmiş durum gözlemleyici (ESO) tabanlı geri besleme doğrusallaştırması yöntemiyle esnek eklemlı robot kolunun kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Ahmad ve diğ. [60], esnek eklemlı robot kolunun uç işlevcisinin titreşim kontrolünü PD tipli bulanık mantık kontrolörle gerçekleştirmişlerdir. Farivar ve diğ. [61] esnek eklemlı robot kolunun kayma kipli kontrolörle kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Orłowska ve Szabat [62] esnek robot kontrolünde uyarlamalı bulanık kayma kipli kontrolör kullanmışlardır. Che-Min ve Jung-Shan [63] doğrusal olmayan uyarlamalı geri adımlamalı kontrolör kullanarak esnek eklemlı robotun titreşim kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Khorasani [64] esnek eklemlı robotu uyarlamalı kontrol algoritmasıyla ile kontrol etmiştir. Seidi ve Markazi [65] model tabanlı bulanık kontrolör kullanarak esnek eklemlı robot kolunun kontrolü konusunda çalışmışlardır. Akyuz ve diğ. [66] bulanık mantık kontrolör kullanarak esnek eklemlı robot kolu kontrolünü gerçekleştirmişlerdir.

5.2. Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolünde Kullanılan Kontrol Yöntemleri

Bu bölümde, esnek eklemlı robot kolunun kontrolü için çalışmada kullanılan kontrol yöntemlerinin işleyiş şekilleri hakkında kısaca bilgi verilecektir.

5.2.1. PID kontrol yöntemi

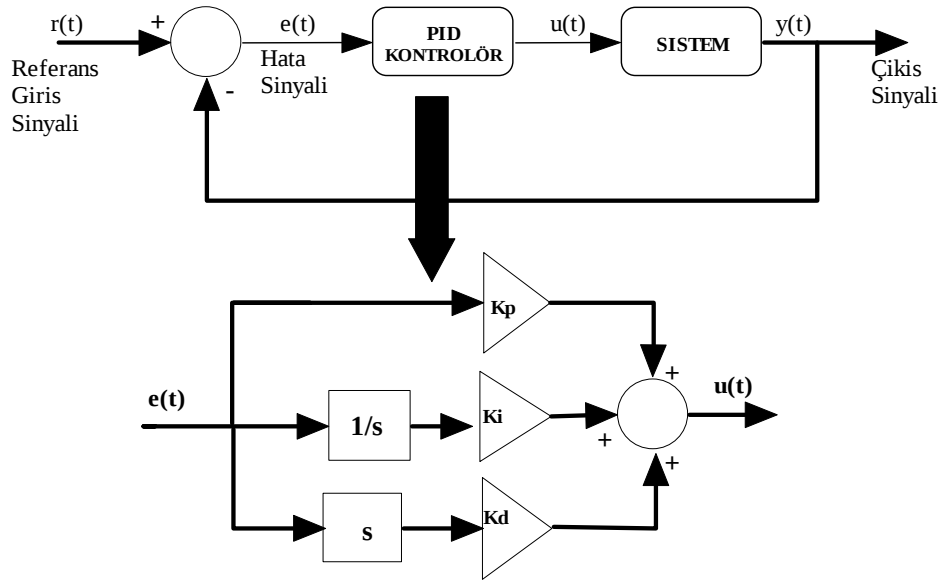
PID kontrol yöntemi, basit yapısı ve kararlı çalışabilme özelliği göz önüne alındığında günümüz endüstrisinde en çok kullanılan kontrol yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde, basitçe P oransal, I toplamsal ve D türevsel terimleri ifade etmektedir.

PID kontrol mantığını kısaca özetlemek gerekirse, bir sistemde PID kontrolör istenilen referans sinyali ile sistemin çıkışından anlık olarak ölçülen çıkış sinyalinin farkını alarak bir “hata” değeri oluşturur. Ve PID kontrolörde kullanılan P, I ve D kazançlarına göre bir çıkış üreterek hata sinyalini en küçük değere ulaştırmaya çalışır. Burada P katsayısı hatanın o anki değerine, I katsayısı hatanın geçmişteki değerlerinin toplamına ve D katsayısı ise hata sinyalinin gelecekteki tahmini değerlerine bağlıdır. PID kontrol algoritmasında kontrolör çıkışı,

$$u(t)=K_P e(t)+K_I \int e(t)dt +K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5.1)$$

$$e(t)=r(t)-y(t) \quad (5.2)$$

Denklem 5.1 ve 5.2’ de gösterilen eşitliklere bağlı olarak hesaplanır. Burada, $u(t)$ kontrol parametresi, $e(t)$ hata sinyali, $r(t)$ referans giriş sinyali, $y(t)$ ise sistemin çıkış sinyali olarak adlandırılmaktadır. Şekil 5.1’ de PID kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 5. 1: PID kontrol blok diyagramı

PID kontrol yönteminde, kontrolör yanıtının sistemin çıkışını istenilen referansa en kısa ve en düzgün şekilde ulaştırması için Denklem 5.1’ de tanımlanan K_P , K_I ve K_D

parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Söz konusu bu ayarlamaların yapılabilmesi için ise dört farklı yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar, El becerisi ve insani duyulara bağlı olarak ayarlama, Ziegler-Nichols yöntemi, bilgisayar programları vasıtasıyla ayarlama ve Cohen-Coon metodudur. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Bu avantaj ve dezavantajlar Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5. 1: PID parametrelerini ayarlama yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları

YÖNTEM	AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
El ile yapılan ayarlama	Matematiksel hesaplama gerektirmez. Proses esnasında yapılabilir.	Deneyimli personel ihtiyacı gerektirir.
Ziegler-Nichols Yöntemi	İspatlanmış bir yöntemdir. Proses esnasında yapılabilir.	Proses problemlerine neden olabilir. Bazen deneme yanılma gerektirebilir.
Yazılım Yöntemleri	Tutarlı ayarlama. Proses esnasında veya proses kapalı iken ayarlama yapılabilir. Valf ve sensör analizleri içerebilir. Simülasyona izin verir. Kararlı durum oluşmadan ayarlama yapılabilir.	Maliyeti çok fazladır. Yazılım konusunda uzman personele ve devamlı çalışmaya ihtiyaç duyar.
Cohen-Coon Yöntemi	İyi bir proses modelidir.	Proses esnasında ayarlama yapılmaz. Sadece birinci dereceden sistemler için iyi sonuçlar üretir.

Tabloda da görüleceği üzere PID parametrelerinin ayarlanmasında birçok yöntem yer almaktadır ve bu yöntemlerin birbirleri arasında avantaj ve dezavantajları vardır. Bu yöntemlerden Ziegler-Nichols yöntemi basitçe şu şekilde açıklanabilir. Ziegler-Nichols yönteminde ayarlama yapılırken ilk olarak K_I ve K_D katsayıları sıfır olacak şekilde ayarlanır. Daha sonra K_P katsayısı, sistem cevabı osilasyona ilk girdiği yere kadar artırılır. Bu andaki K_P katsayısına nihai kazanç denir ve K_U ile ifade edilir. Burada osilasyon periyodunu P_U ifade eder. Nihai kazanç ve osilasyon periyodu elde

edildikten sonra K_p , K_I ve K_D kazançları sırasıyla aşağıdaki tabloda olduğu gibi hesaplanır.

Tablo 5. 2: Ziegler-Nichols yöntemi

Kontrol Tipi	K_p	K_I	K_D
P	$0.50K_U$	-	-
PI	$0.45K_U$	$1.2K_p / P_U$	-
PID	$0.60K_U$	$2K_p / P_U$	$K_p P_U / 8$

Ayrıca PID kontrol yönteminde K_p , K_I ve K_D katsayılarının artırıldığı durumda, bu değişimin sistem çıkışına olan etkisi Tablo 5.3' te ifade edilmektedir.

Tablo 5. 3: PID parametrelerinin sistem çıkışına olan etkisi

Parametre	Yükselme Zamanı	Aşım Miktarı	Oturma Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Kararlılık
K_p	Azalır	Artar	Küçük Değişim	Azalır	Azalır
K_I	Azalır	Artar	Artar	Çok Azalır	Azalır
K_D	Az Azalır	Az Azalır	Az Azalır	Etkilemez	K_D küçükse Artar

5.2.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi

Klasik mantıkta önermeler ya tamamen doğrudur (1) ya da tamamen yanlıştır (0). Bu nedenle klasik mantığın yolundan körü körüne gittiğimizde bazen paradokslarla karşılaşırız. Bulanık mantıkta önermeler kısmen doğru olabilir. Bulanık mantığın kullandığı kümeler ve bu kümeleri kullanarak yürüttüğü kurallar da birer kesin matematiksel modeldir. Ama yaptıkları iş göz önüne alındığında bu modeller, ellerindeki yaklaşık bilgilerle hesap yapabilmek için tasarlanmıştır ve bu haliyle makinelerin 'insana özgü olana' öykünmesinin yolunu açarlar. Tablo 5.4' de klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel farklar özetlenmiştir.

Tablo 5. 4: Klasik Mantık - Bulanık Mantık arasındaki temel farklılıklar

Klasik Mantık	Bulanık Mantık
A <u>veya</u> A Değil	A <u>ve</u> A Değil
Kesin	Kısmi
Hepsi veya Hiçbiri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 Arasında Süreklilik
İkili Birimler	Bulanık Birimler

Bulanık küme kuramı, şayet eldeki bilgiler belirsiz, eksik, bulanık, kesin olmayan veriler ise bunları değerlendirebilmek ve yaklaşık da olsa sonuçlar çıkarabilmek için bize matematiksel araçlar sağlar [65].

Bulanık mantığın başlıca özellikleri; “iyi” , ”çok iyi” , ”az çok iyi” v.b. gibi sözel olarak ifade edilen doğruluk derecelerine sahip olması, geçerliliği kesin değil fakat yaklaşık olan çıkarım kurallarına sahip olması, her kavramın bir derecesi olması, her mantıksal sistemin bulanıklaştırılabilmesi, bulanık mantıkta bilginin, bulanık kısıtlara ait değişkenlerin esnekliği veya denkliliğiyle yorumlanması olarak sıralanabilir.

5.2.2.1. Bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonları

Bulanık kümelerde bazı değerler klasik kümelerdeki gibi kolayca sınıflanamaz. Sınıflansa bile o kümenin ve diğer bir kümenin özelliklerini aynı anda göstermeleri nedeniyle sınıflamamız yanlış olur. Zadeh [67], sadece iki üyelik derecesi alan bu ifadeyi, 0 ile 1 arasında çeşitli üyelik dereceleri alabilen bir başka gösterim şekline genişletmiştir ve bu yeni üyelik fonksiyonunu ile temsil etmiştir. Bu nedenle klasik kümeleri, bulanık kümelerin özel bir durumu olarak kabul edebiliriz. Sonuçta her iki küme de elemanlardan oluşur. Kümelerin sınırları dışında iki küme türünde de üyelik dereceleri sıfırdır çünkü kümelerin buralarda elemanları yoktur.

X bir nesneler uzayı, x' de bu uzaya ait bir eleman olsun. A kümesi de bu X uzayının bir alt kümesi olan klasik bir küme olsun. Bu durumda her bir x için bu A kümesine

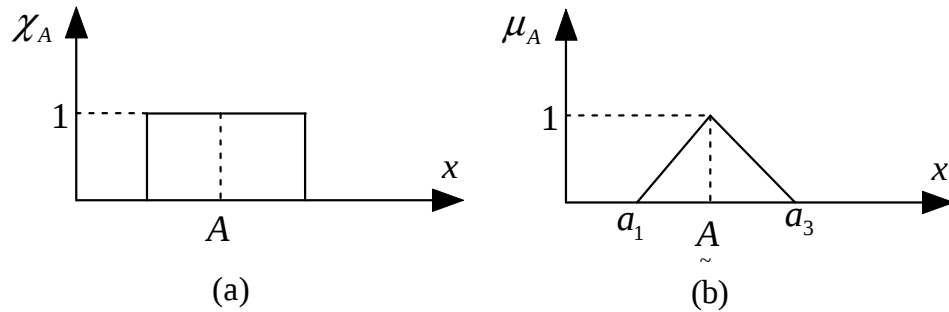
aittir ya da ait değildir. Her bir x elemanı için bir karakteristik fonksiyon tanımlanarak, klasik A kümesi $(x, 0)$ veya $(x, 1)$ sıralı ikilileri ile temsil edilebilir. Bu gösterim x elemanının A kümesine ait olup olmadığını gösteren bir gösterimdir.

Bulanık kümelerin karakteristik fonksiyonları, bir elemanın ilgili bulanık kümeye ne derecede üye olduğunu gösteren $[0-1]$ aralığındaki ifadelerdir. Ayrıca bu kümeler ayrık uzayda veya sürekli uzayda tanımlı olabilirler.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (5.3)$$

Denklem 5.3' te ki tanımlamada A kümesi bir bulanık küme, x elemanı X uzayında tanımlı bir eleman, $\mu_A(x)$ ise bu kümeye ilişkin üyelik fonksiyonudur. Eğer A kümesi $A=[a_1, a_3]$ aralığında ise $\mu_A(x)$ Denklem 5.4' de olduğu gibi ifade edilir.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ 1, & a_1 < x < a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (5.4)$$



Şekil 5. 2: (a) Klasik-Mantık küme gösterimi (b) Bulanık-Mantık küme gösterimi

Ayrıca A , bir bulanık küme olmak üzere X uzayında, birden çok x_i elemanına sahip olabilir bu durumda A kümesinin matematiksel olarak gösterimi Denklem 5.5' te gösterilmiştir.

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum_i \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \right\} \quad (5.5)$$

5.2.2.2. Bulanık mantığın üstünlüğü ve eksiklikleri

Bulanık mantık kullanılarak oluşturulan bulanık denetçilerin avantajları sırasıyla: Günlük hayatta olduğu gibi belirsiz, zamanla değişen, karmaşık, iyi tanımlanmamış sistemlerin denetimine basit çözümler getirir. Sistem basit bir matematiksel modelle tanımlanabilen bir sistem ise o zaman geleneksel bir denetim yeterli olacaktır. Ama karmaşık bir sisteme geleneksel bir mantık uygulamak hem çok zor hem de yüksek maliyetlidir. Buna karşılık bulanık mantık denetimi geleneksel mantığa göre sistemi daha iyi analiz edebileceği gibi aynı zamanda da ekonomiktir, bulanık mantıkta işaretlerin bir ön işleme tabi tutulmaları ve oldukça geniş bir alana yayılan değerlerin az sayıda üyelik fonksiyonlarına indirgenmeleri nedeni ile bulanık denetim genellikle daha küçük bir yazılımla daha hızlı bir şekilde sonuçlanır, söz edilen az sayıda değerler üzerinde uygulanacak kural sayısı da az olduğundan sonuca ulaşmak daha da çabuklaşacaktır, özel geliştirilmiş bir donanımla sonuca daha da hızlı ulaşmak olasıdır, bulanık mantık denetimi doğrudan kullanıcı girişlerine ve kullanıcının deneyimlerinden yararlanabilmesine olanak sağlamaktadır, olarak açıklanabilir.

Oluşturulan ve fazlaca kullanılan bu bulanık mantık denetçilerin dezavantajları ise sırasıyla Bulanık denetimde kullanılan kurallar deneyime çok bağlıdır, Üyelik fonksiyonlarının seçiminde belirli bir yöntem yoktur, en uygun fonksiyon deneme yanılma ile bulunur ve bu da oldukça uzun bir zaman alabilir, denetlenen sistemin bir kararlılık analizi yapılamaz ve sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez bu yüzden yapılacak tek şey benzetim çalışmasıdır, olarak sıralanabilir.

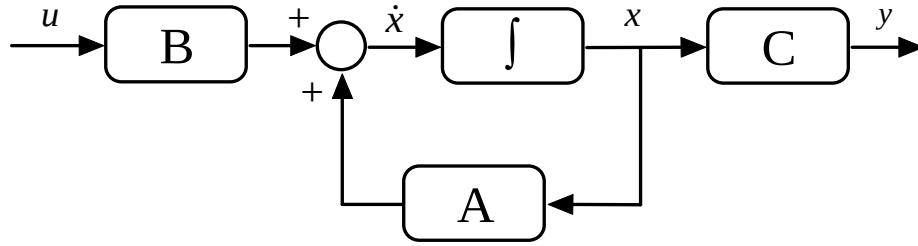
5.2.3. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi

Durum geri beslemeli kontrol yöntemi, aynı PID kontrol yönteminde olduğu gibi kapalı çevrim bir sistemde, sistemin durum değişkenlerinin sabit katsayılarla çarpılarak ve bu durum değişkenlerinin geri beslemesiyle sistemin istenilen referans girişine ulaşmasını amaçlar. Durum geri beslemeli kontrol yönteminde sistem durum uzayı matrisi ile ifade edilmektedir. Herhangi bir sistem için sistemin durum uzayı gösterimi,

$$\dot{x}=Ax+Bu \quad (5.6)$$

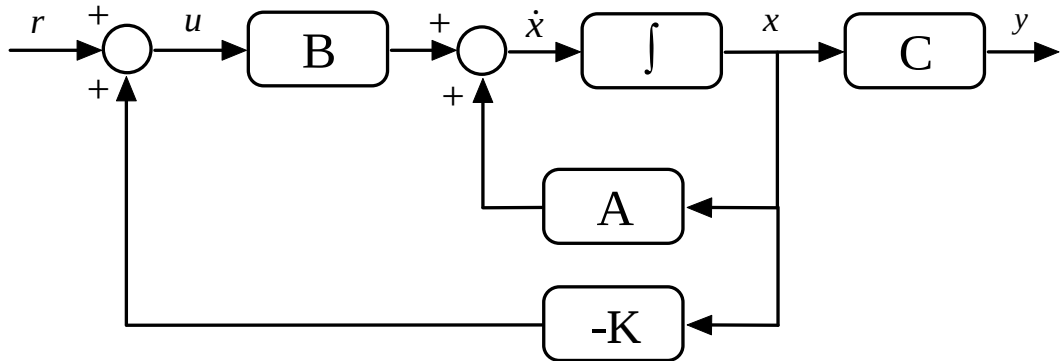
$$y=Cx \quad (5.7)$$

Denklem 5.6 ve 5.7’ de gösterildiği gibidir. Burada A sistemin durum geçiş matrisi, B kontrol dağıtım katsayılar matrisi, C çıkış matrisi, y sistemin çıkış vektörü, x durum vektörü, u sistemin giriş vektörü olarak tanımlanmıştır. Söz konusu sistemin durum uzayı gösterimi için blok diyagramı Şekil 5.3’ te gösterilmektedir.



Şekil 5. 3: Sistemin durum uzayının bloklar ile gösterimi

Söz konusu sistem için tam durum geri besleme uygulanması amacıyla, sistemin bütün durumları bir K matrisiyle çarpılarak sisteme geri besleme yapılır. Bu durumda sistem kapalı çevrim halini alır. Ve sistemin geri besleme matrisiyle çarpılmasıyla sistem kutupları kök yer eğrisinde herhangi bir yere yerleştirilebilir. Bu yöntem kullanılarak hızlı ve kararlı bir sistem cevabı elde edilebilir ancak, sistemin gerçek performansı fiziksel ve mekanik donanımla sınırlıdır. Sistemi için istenilen en iyi sonuca cevabın optimizasyonu yapılarak ulaşılabilir.



Şekil 5. 4: Durum geri beslemeli sistem

Sistemde kullanılan söz konusu geri besleme matrisi,

$$K=[k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n] \quad (5.8)$$

Denklem 5.8' de olduğu gibi ifade edilir. Bu durumda u giriş vektörü,

$$u=-K^T x+r \quad (5.9)$$

Denklem 5.9' da gösterildiği hale gelir ve Denklem 5.9, Denklem 5.6 ve 5.7' de yerine yazılırsa,

$$\dot{x}=Ax+B(-K^T x+r)=(A-BK^T)x+Br \quad (5.10)$$

Denklem 5.10 elde edilir. A ve B matrislerinin tamamen kontrol edilebilir olması halinde,

$$|sI-A+BK^T|=0 \quad (5.11)$$

Denklem 5.11' den K geri besleme matrisi elde edilebilir.

Ayrıca, tam durum geri beslemeli kontrolün en uygun şekilde gerçekleştirilebilmesi için nümerik bir yöntem olan doğrusal karesel düzenleyici (LQR) yöntemi de kullanılabilir. Bu yöntem geri besleme matrisi olan K ' nın en uygun şekilde elde edilmesi için oldukça çok kullanılan bir yöntemdir. LQR yönteminde kullanılan matrisler,

$$J=\int_0^{\infty} x(t)^T Q x(t)+u(t)^T R u(t)dt \quad (5.12)$$

Denklem 5.12' nin hesaplanmasıyla kolaylıkla elde edilebilirler.

5.2.4. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi

Kesir dereceli sistemler ve bu mantıkla geliştirilen kontrol yöntemleri, günümüzde bilim ve mühendisliğin birçok alanında ilgi çeken konular olmaktadır [68]. Bu kısımda kesir dereceli PID kontrol yönteminin basitçe mantığı ve nasıl uygulanabileceği konusunda bilgiler verilecektir.

Kesir dereceli PID kontrolör, içerisindeki türev ve integral ile ifade edilebilen matematiksel işlemler sayesinde, kesir dereceli türev ve integrallere sahip diferansiyel denklemler olarak tanımlanırlar. Kesirli türev ve integral alma için kullanılan en yaygın tanımlamalar, Grünwald–Letnikov (GL) ve Riemann–Liouville (RL) tanımlamalarıdır. Kullanılan en genel tanım, Denklem 5.13’ de verilen Riemann ve Liouville [69] yaklaşımlarıdır.

$${}_aD_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \frac{d^n}{dt^n} \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau, \quad n-1 < \alpha < n \quad (5.13)$$

Denklem 5.13’ de Γ Euler’ in gama fonksiyonu, a ve t sırasıyla alt ve üst sınır, α , türev ve integralin derecesi, ise, ${}_aD_t^\alpha$ ifadesi ise integrotürev operatörüdür [70].

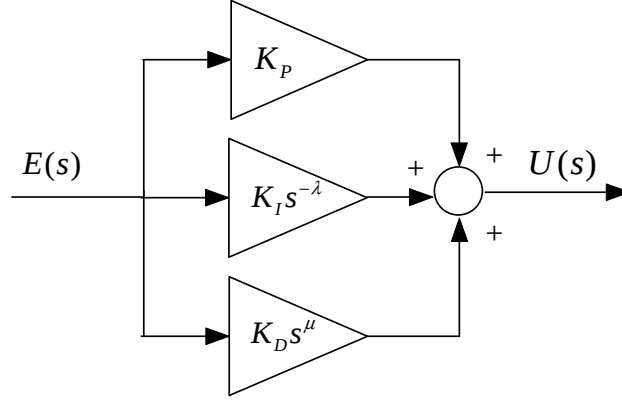
Kesir dereceli sistemlerin transfer fonksiyonlarını Laplace yöntemiyle elde etmek mümkündür. Ancak hem simülasyonlarda hem de donanımsal uygulamalarda kesir dereceli s' e sahip fonksiyonu kullanımı pek uygun değildir. Bu yüzden bu fonksiyonu tamsayı dereceli bir transfer fonksiyonuna benzetmek gerekmektedir. Kesir dereceli transfer fonksiyonunu yaklaşık olarak tamsayı dereceli transfer fonksiyonunun hesaplanabilmesi için, sonsuz sayıda kutup ve sıfırlar içermelidir. Sonlu sayıda sıfır ve kutuplar içeren kabul edilebilir yaklaşımlar elde etmek mümkündür. Yaklaşım teknikleri vasıtasıyla kesir dereceli transfer fonksiyonları, tamsayı dereceli transfer fonksiyonlarına dönüştürülebilir. En iyi bilinen tekniklerden birisi Manabe ve Oustaloup tarafından önerilen Crone yaklaşımıdır [71]. Bahsedilen yaklaşım tekniklerinin kullanılmasıyla elde edilen kesir dereceli PID kontrolörün diferansiyel denklemi Denklem 5.14 ile ifade edilmektedir. Kesir dereceli PID kontrolör, $PI^\lambda D^\mu$ şeklinde ifade edilebilmektedir.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i D_t^{-\lambda} e(t) + k_d D_t^\mu e(t) \quad (5.14)$$

Laplace dönüşümü yardımı ile FOPID’nin sürekli transfer fonksiyonu Denklem 5.15’ deki gibi elde edilir.

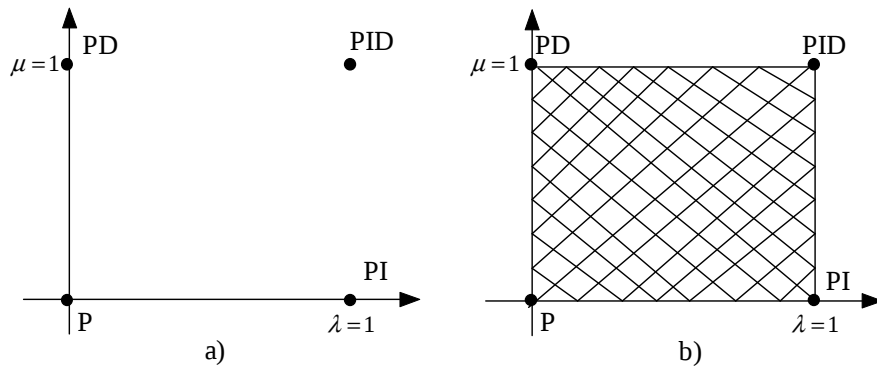
$$G_c(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^\mu \quad (5.15)$$

Verilen bir sistem için FOPID kontrolörün tasarımında K_p , K_I , K_D , K_p, K_d, K_i ve ondalık dereceli μ , λ toplam beş adet parametre, sistem cevabının en iyi şekilde elde edilebilmesi için belirlenir.



Şekil 5. 5: Kesir dereceli PID kontrolörün blok diyagramı

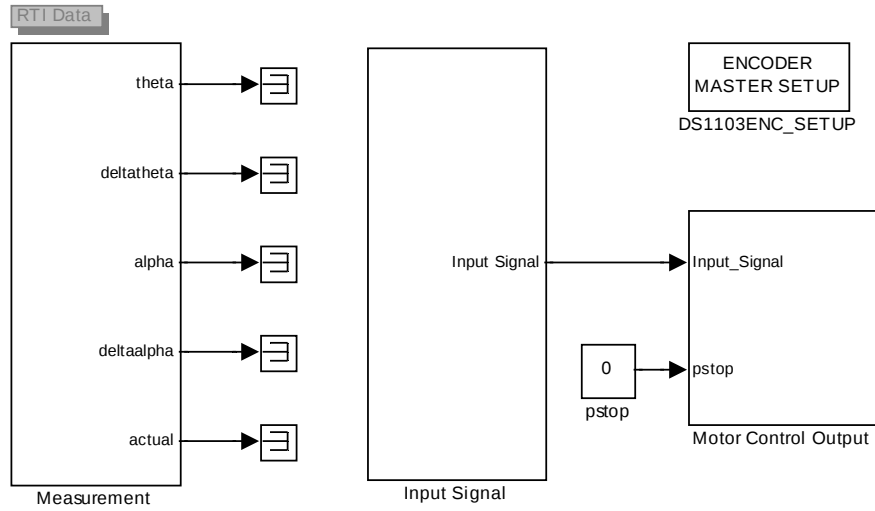
Şekil 5.5’ de kesir dereceli PID kontrolörün blok diyagramı gösterilmektedir. Burada eğer PID kontrolörün $\lambda = 1$ ve $\mu = 1$ tam dereceli ve $\lambda-\mu$ düzleminde gösterimini incelersek, tam dereceli kontrolör düzlem üzerinde dört nokta ile ifade edilirken, kesir dereceli kontrolör taralı alandaki sonsuz nokta ile ifade edilebilir. Bu durum, kontrol edilecek sistemin dinamiği üzerine daha esnek bir müdahalenin söz konusu olduğu anlamına gelmektedir.



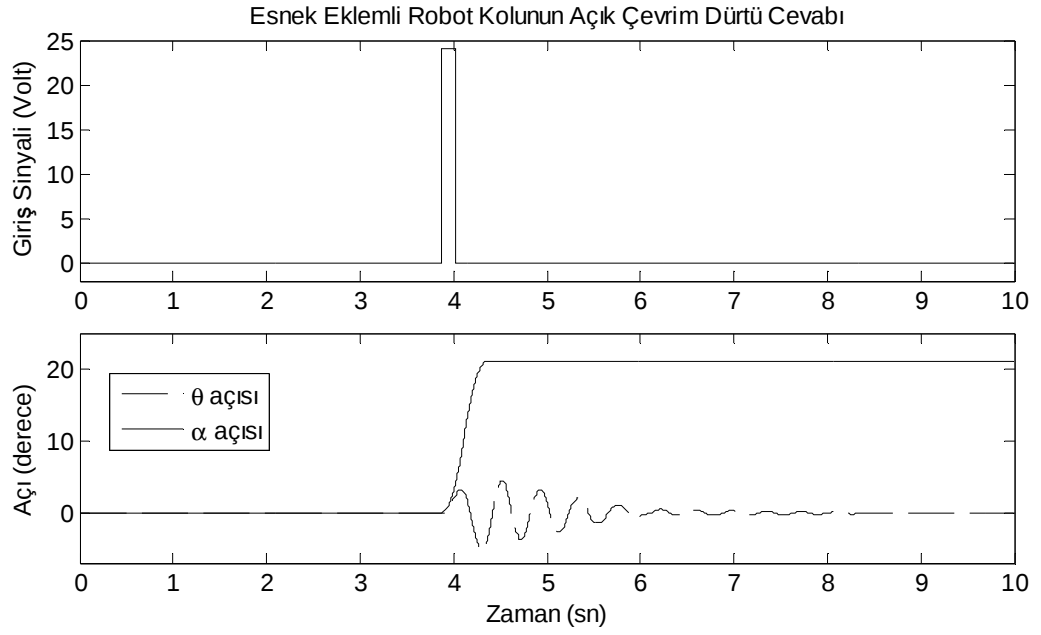
Şekil 5. 6: a) Tam dereceli PID b) Kesir dereceli PID’nin P-I-D Düzlemi

5.3. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Açık Çevrim Cevapları

Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun açık çevrim cevapları incelenecektir. Bu kısımda esnek eklemlili robot kolunda kullanılan eklem uzunluğu 0.4 m, eklem ağırlığı 0.052 kg ve ekleme esneklik vermek için eklemin her iki tarafına sabitlenen yayların yay sabitleri ise 58.86 N/m olarak belirlenmiş ve sistemin açık çevrim cevapları bu sistem parametrelerine göre elde edilmiştir.

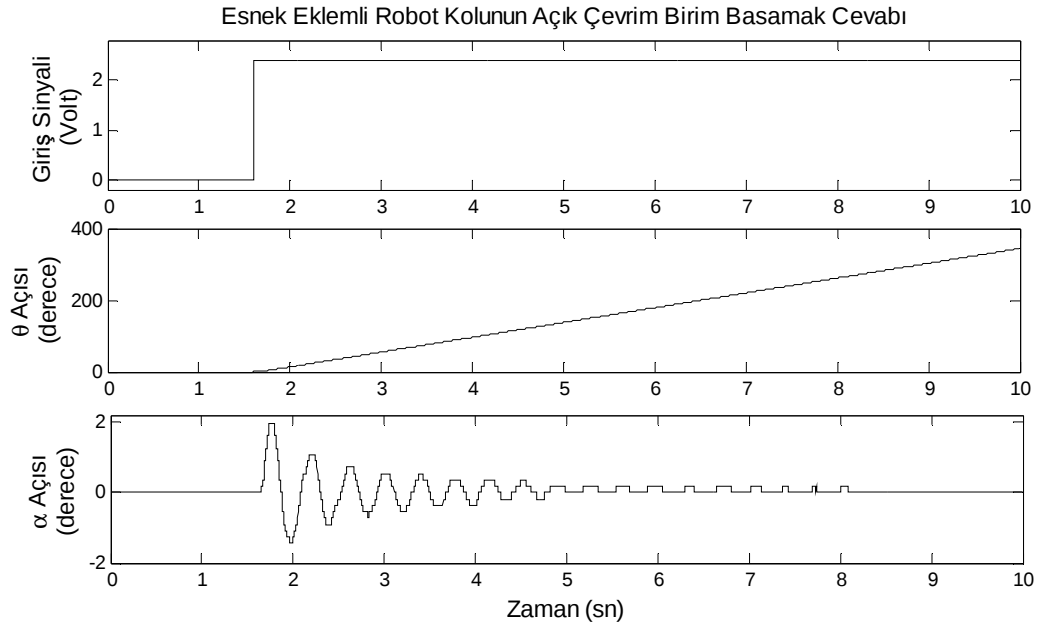


Şekil 5. 7: Esnek eklemlili robotun açık çevrim simulink blokları



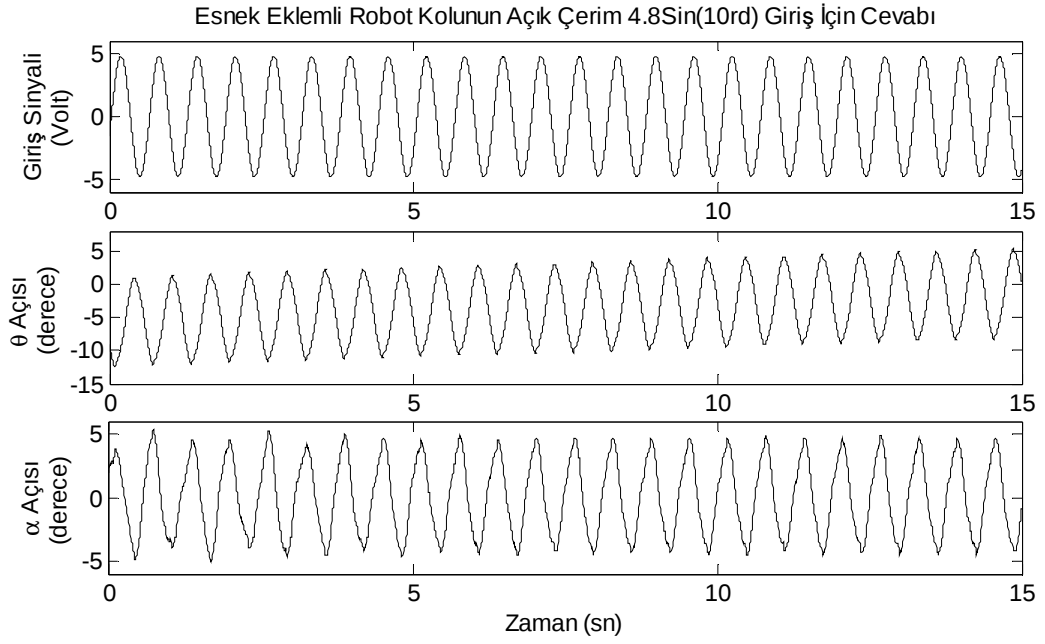
Şekil 5. 8: Esnek eklemli robot kolunun açık çevrim dürtü cevabı

Ayrıca kullanılan yaylar için esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisinin salının frekansı deneysel olarak 3.38 Hz olarak ölçülmüştür. Burada esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisinin titreşim açısının α ve döner tablanın dönme açısının θ olduğu daha önceki bölümlerde verilmiştir. Şekil 5.8 esnek eklemli robot kolunun açık çevrim dürtü cevabını göstermektedir. Şekilde de görüleceği üzere ekleme gerekli dönme hareketini sağlayan motora kısa bir süre için motorun anma gerilimi uygulanmış, buna karşın esnek eklemin döner tablasının ve eklemin uç işlevcisinin titreşim açısının cevabı gözlemlenmiştir. Beklenildiği gibi esnek eklemin döner tablası uygulanan dürtü cevabı karşısında, belirli bir konuma kadar hareket edip o konumda kalmış, uç işlevci ise aynı dürtü sinyali sonrasında en fazla 5°' lik titreşimler yaparak başlangıç değeri olan 0 dereceye oturmuştur.



Şekil 5. 9: Esnek eklemli robot kolunun açık çevrim birim basamak yanıtı

Şekil 5.9’ da esnek eklemli robot kolunun açık çevrim birim basamak yanıtı gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere esnek eklemli robot koluna genliği 2,4 V olan bir giriş gerilimi uygulanıp döner tablanın ve uç işlevcinin durumu gözlemlenmiştir. Beklenildiği gibi uygulanan girişe bağlı olarak döner tablanın açısı giderek artmış, uç işlevcinin salınım açısı en yüksek 2 derece olup zamanla azalmıştır ve başlangıç değeri olan 0 dereceye ulaşmıştır.



Şekil 5. 10: Esnek eklemlili robot kolunun açık çevrim $4.8\sin(10t)$ girişi için cevabı

Şekil 5.10’ de esnek eklemlili robot kolunun girişine 4.8 V genlikli 10 radyan/s frekansa sahip bir sinüzoidal sinyal uygulandığında oluşan sistem cevabını göstermektedir. Görüleceği üzere döner tabla ve uç işlevcinin açısı da sinüzoidal olarak elde edilmiştir. Burada döner tablanın açısının sinüzoidal olarak belli bir eğimle atmasının sebebi esnek eklemlili robot kolundaki sürtünmeler ve dişli boşluklarıdır.

5.4. Esnek Eklemlili Robot Kolunun PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu kısımda açık çevrim cevabı bölüm 5.3’ te verilen esnek eklemlili robot kolunun PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi incelenecek, eklemi oluşturmada kullanılan farklı yay ve farklı uzunluklardaki çubuklarla yapılan deneylere yer verilecek ve elde edilen sonuçlar tartışılacaktır.

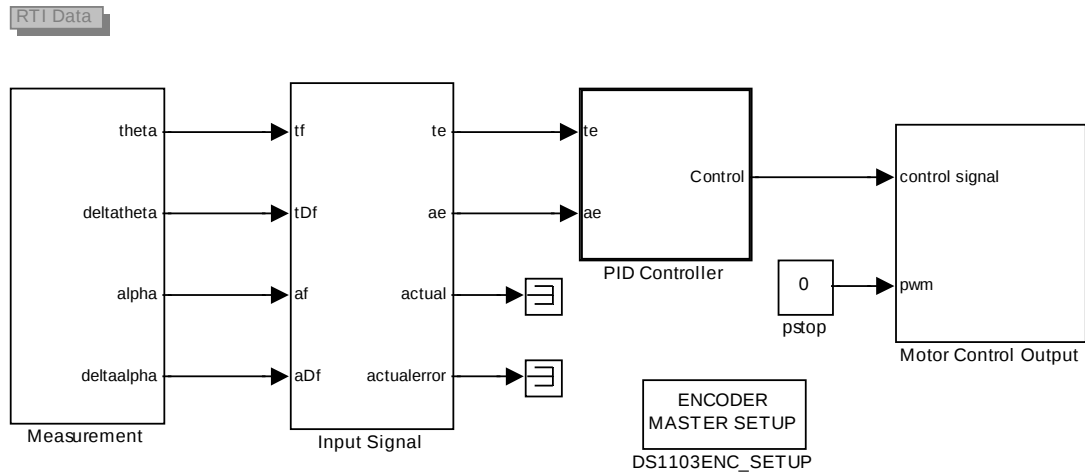
5.4.1. PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Daha öncede açıklandığı gibi tek esnek eklemlili robot kolu, tek girişli iki çıkışlı bir sistem olup esnek eklemlili robot kolunda kullanılan eklem uzunluğu 0.4 m, eklem

ağırlığı 0.052 kg ve ekleme esneklik vermek için eklem her iki tarafına sabitlenen yayların yay sabitleri ise 58.86 N/m olarak belirlenmiştir. Ve bu kısımda esnek eklemlili robot kolunun yukarıda verilen sistem parametreleri için PID kontrolörü tasarlanmıştır.

Daha önce de bahsedildiği gibi bu sistemde kontrol edilmesi gereken değişkenler sırasıyla, eklem döner tabla açısı olan θ açısı yani eklem pozisyonu ve uç işlevcinin titreşim açısının α olan açısıdır. PID kontrolde bu iki değişken için ayrı ayrı iki farklı PID kontrolör tanımlanmıştır. Birinci PID kontrolör θ açısını, ikinci PID kontrolör ise α açısını kontrol etmektedir. Bu iki PID kontrolörün çıkışı toplanarak sisteme kontrol sinyali olarak uygulanmaktadır.

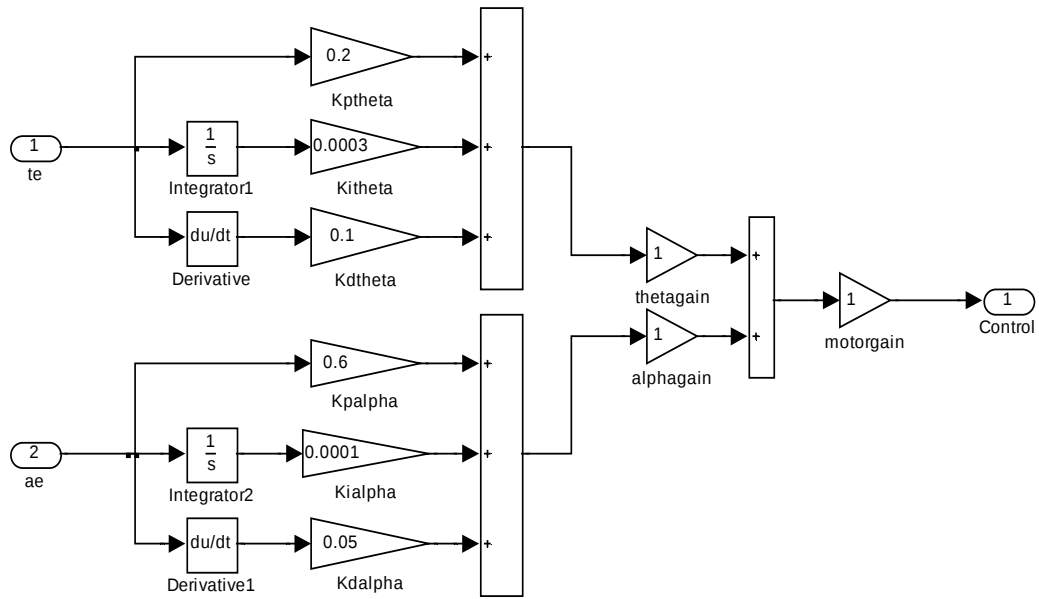
Sisteme uygulanan PID kontrolör Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış olup, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla esnek eklemlili robot koluna uygulanmıştır.



Şekil 5. 11: Esnek eklemlili robot kolunun PID kontrol için simulink blokları

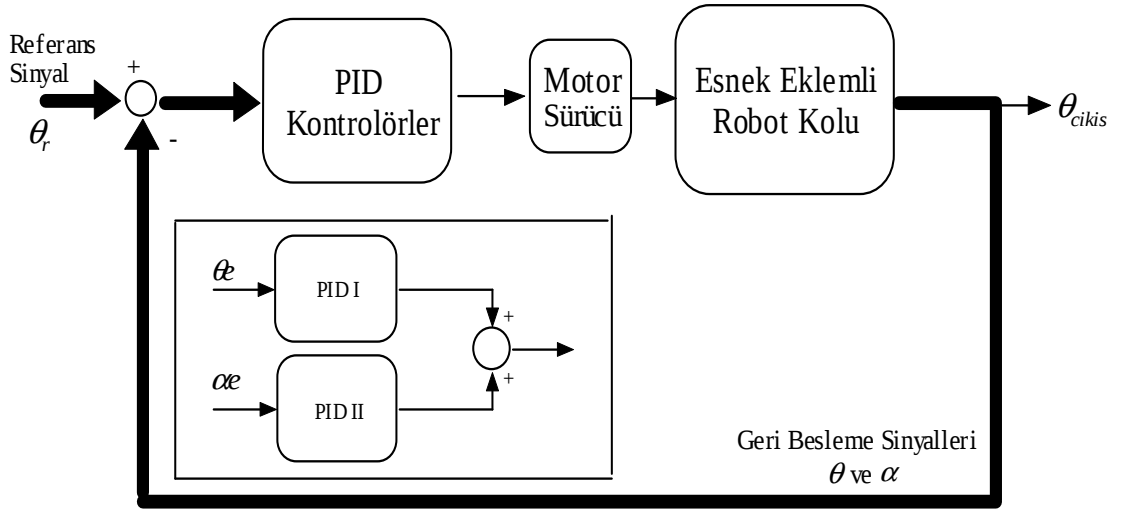
Şekil 5.11’ de esnek eklemlili robot kolunun PID kontrol için simulink’ de hazırlanan blokları gösterilmiştir. Görüleceği üzere esnek robotun kontrolü için dört adet blok tasarlanmıştır. Bu blokların isimleri sırasıyla, ölçüm bloğu, giriş sinyali bloğu, kontrolör bloğu ve çıkış bloğudur. Ölçüm bloğu, esnek eklemlili robot kolunun

hareketi sırasında optik kodlayıcılar tarafından ölçülen döner tabla ve uç işlevcinin titreşim açısını derece cinsinden oluşturmaktır. Giriş sinyali bloğu, robot koluna istenilen referans sinyali takip etmesi için tasarlanan bloktur. Kontrolör bloğu ise esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için çeşitli kontrol algoritmalarının kullanıldığı bloktur. Bu bölümde kontrolör bloğunun içinde PID kontrolör yer almaktadır. Çıkış bloğu ise kontrolör bloğunun ürettiği kontrol sinyalini analog sinyal cinsinden motor sürücüsüne iletmek için tasarlanmıştır. Esnek eklemlili robot kolunun PID kontrolü için kullanılan PID kontrolör şeması Şekil 5.12’ de gösterilmektedir.



Şekil 5. 12: Simulink’te oluşturulan PID kontrol yapısı

Şekil 5.12’ de gösterildiği üzere tasarlanan PID kontrolör yapısında iki adet PID kontrolör döner tablanın açısının hata sinyalini ve uç işlevcinin titreşim açısının hata sinyalini alır önceden belirlenmiş PID katsayılarıyla çarpar ve iki kontrolörün çıkışlarını toplayarak sisteme uygulanacak kontrol sinyalini üretir.



Şekil 5. 13: PID kontrolörler şeması

Şekil 5.13 esnek eklemli robot kolunun PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi için tasarlanan PID kontrolörün blok diyagramını göstermektedir.

$$TF_{PID I} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.1s^2 + 0.2s + 0.0003}{s} \quad (5.16)$$

$$TF_{PID II} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.05s^2 + 0.6s + 0.0001}{s} \quad (5.17)$$

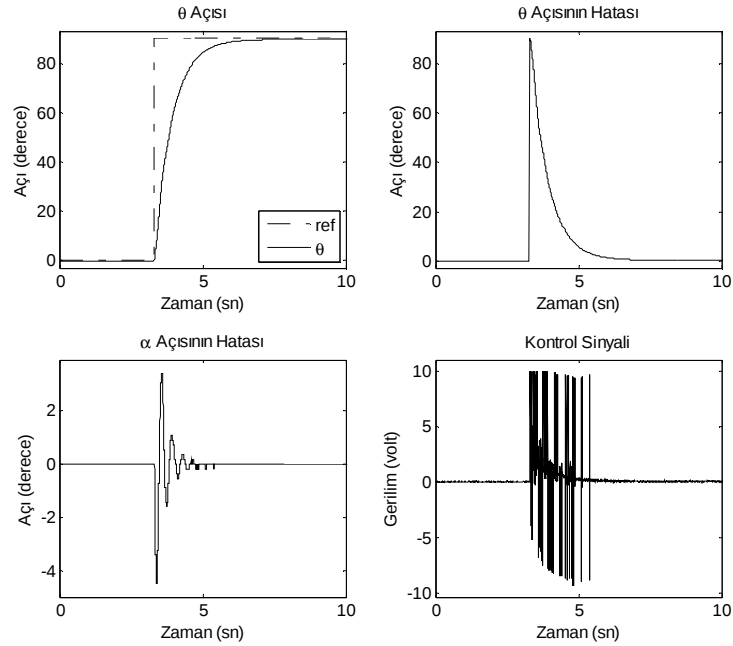
Denklem 5.16 ve 5.17’ de esnek eklemli robot kolunun θ ve α açılarının kontrolü için geliştirilen PID kontrolörlerin transfer fonksiyonları gösterilmektedir. Ayrıca bu bölümde geliştirilen PID kontrolörlerin bode diyagramları Ek – F’ de yer almaktadır.

5.4.2. PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

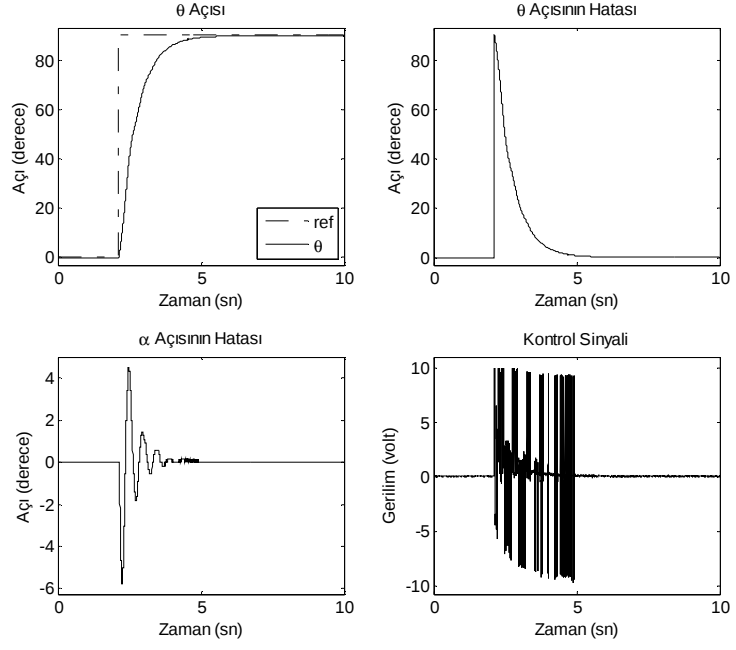
Bu bölümde esnek eklemli robot kolunun PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi sırasında elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması verilecektir. Esnek eklemli robot kolunun PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusunda birçok deney yapılmış olup, bu deneyler temel olarak üç ana grupta incelenmektedir. Birinci grupta konum kontrolü deneyleri verilerek bu başlık altında esnek eklemli robot koluna birim basamak fonksiyonu girişi uygulanmaktadır. İkinci grupta esnek eklemli robot kolunun yörünge takibi deneyleri incelenmektedir ve bunun için

sisteme giriş olarak sinüzoidal, kane ve üstel fonksiyonlar uygulanmaktadır. Üçüncü grupta ise geliştirilen kontrolörün gürbüzlüğü test edilmektedir ve bu amaçla sisteme dürtü fonksiyonu ve dışsal darbeler uygulanarak kontrolörün verdiği cevaplar incelenmiştir. Uygulanan kane fonksiyonu yörüngesi için kullanılan fonksiyon Ek – G’ de yer almaktadır. Ayrıca tasarlanan kontrolörün verimliliğinin ve değişik durumlarda verdiği cevapların tartışılabilmesi için esnek eklemlili robot kolunun yay sabitleri ve eklem uzunluğu gibi sistem parametreleri değiştirilerek kontrolörün tasarlandığı modelden farklı modeller oluşturulmuş ve söz konusu deneyler tekrarlanmıştır.

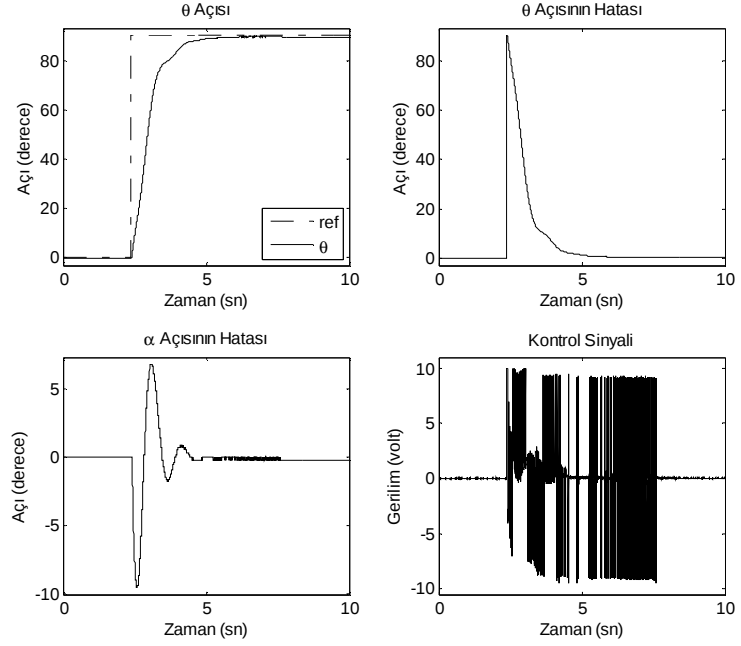
5.4.2.1. Esnek eklemlili robot kolunun PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri



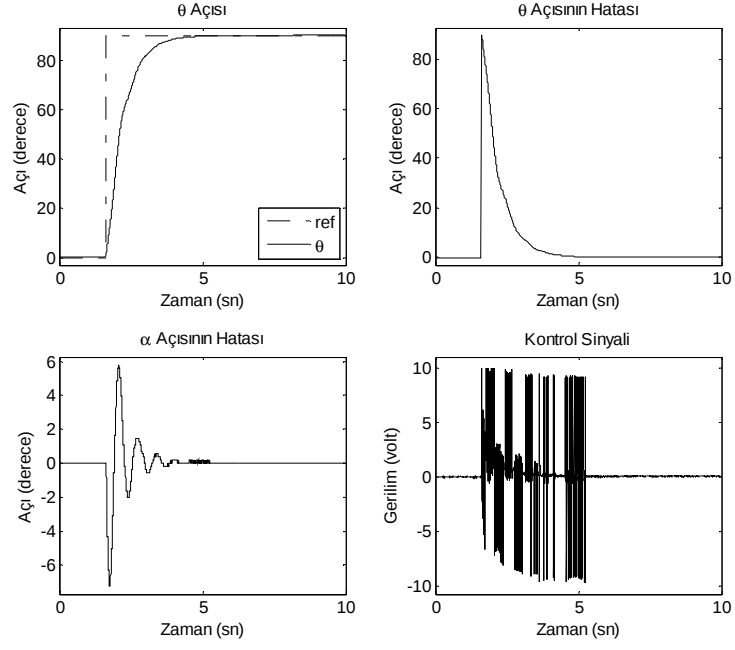
Şekil 5. 14: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



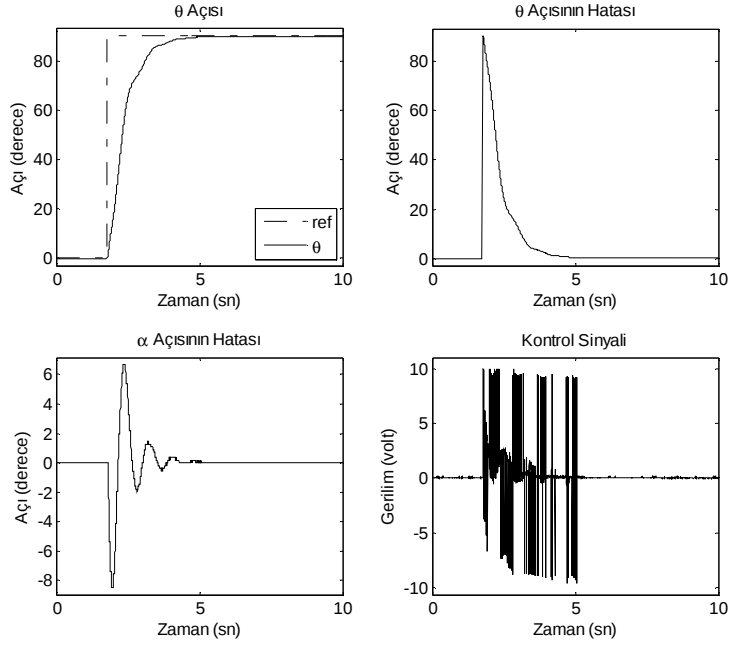
Şekil 5. 15: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



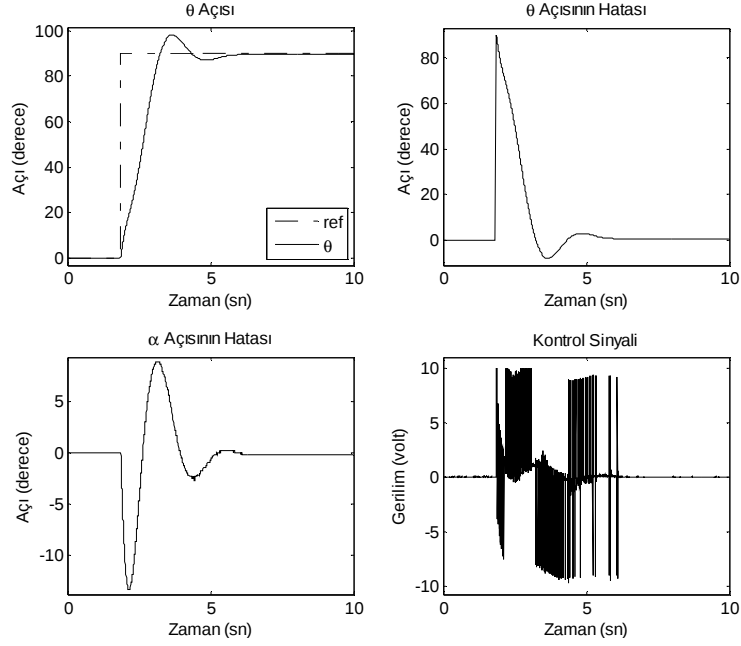
Şekil 5. 16: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 17: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 18: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 19: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.14 – 5.19’ da görüldüğü üzere esnek eklemli robot kolunun konum kontrolü deneyleri birim basamak girişi uygulanmasıyla elde edilmiştir. Ve yine aynı şekillerden görüleceği üzere eklemün yay sabiti ve eklem uzunluğu değiştirilerek toplam altı farklı model oluşturulmuş ve tasarlanan kontrolörün farklı modeller için konum kontrolündeki performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.5’ de karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.5’ de görüldüğü üzere esnek eklemli robot kolunun model parametrelerinin değiştirilmesiyle farklı sonuçlar elde edilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere, robot kolunun konum kontrolü deneylerinde yay sabitinin azaltılması ve eklem uzunluğunun artırılması kontrolör performansına kötü yönde ve tam tersi olarak eklem uzunluğunun azaltılması ve yay sabitlerinin artırılması kontrolör performansına iyi yönde etki etmektedir. Gerilmemiş yay boyunun ve eklem uzunluğunun kısa, yay sabitinin yüksek olması eklemün rijitliğini arttırdığı için, söz konusu konum kontrolü deneylerinde kontrolör en iyi performansı eklem uzunluğu 0.4 m, yay sabiti 99.19 N/m ve gerilmemiş yay boyu 0.02 m olan model için göstermiştir.

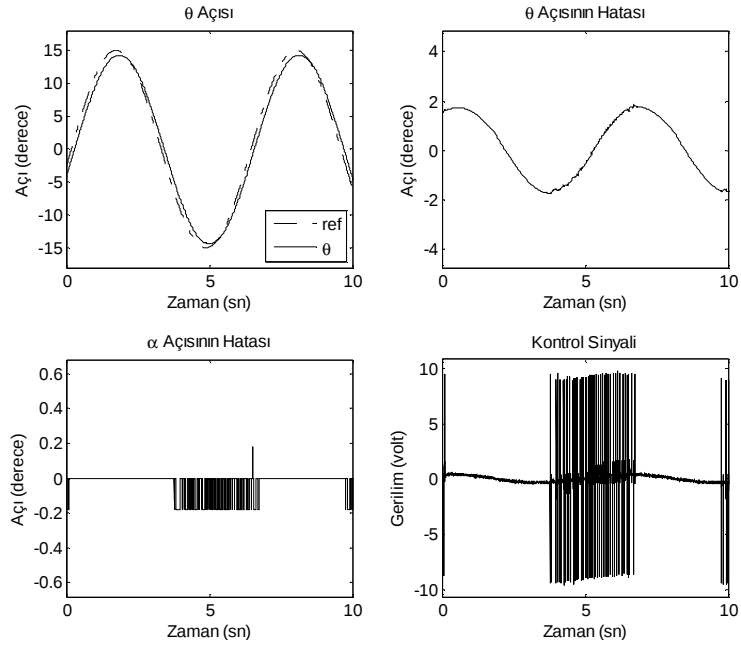
Tablo 5. 5: PID kontrolörün konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçlar

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (sn)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.1	1.8	0	4.5	0.25	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.3	2.2	0	6.2	0.2	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.4	5.1	0	9.5	0.5	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.2	3.6	0	7.2	0.18	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.3	3.2	0	8.5	0.25	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3.5	4.2	8.8	13.4	0.6	0

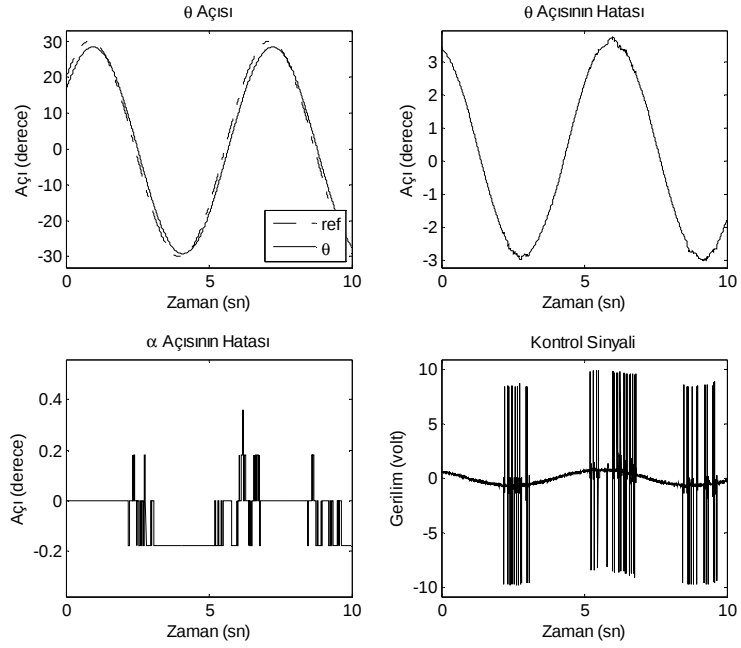
5.4.2.2. Esnek eklemli robot kolunun PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri

Bu kısımda esnek eklemli robot kolunun daha önce bahsedilen altı farklı modelinin PID kontrolör ile yörünge takibi deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde üç farklı yörünge sisteme uygulanmış ve sistem cevapları karşılaştırılmıştır.

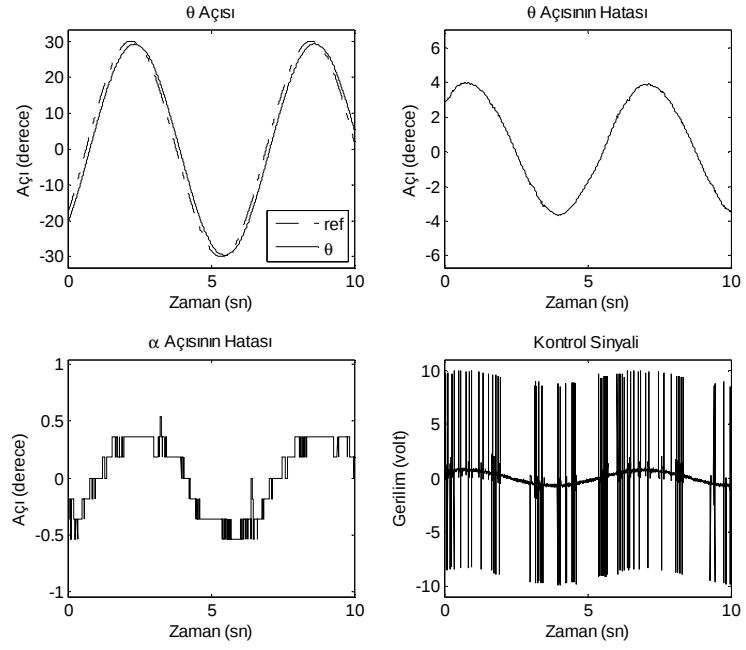
5.4.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri



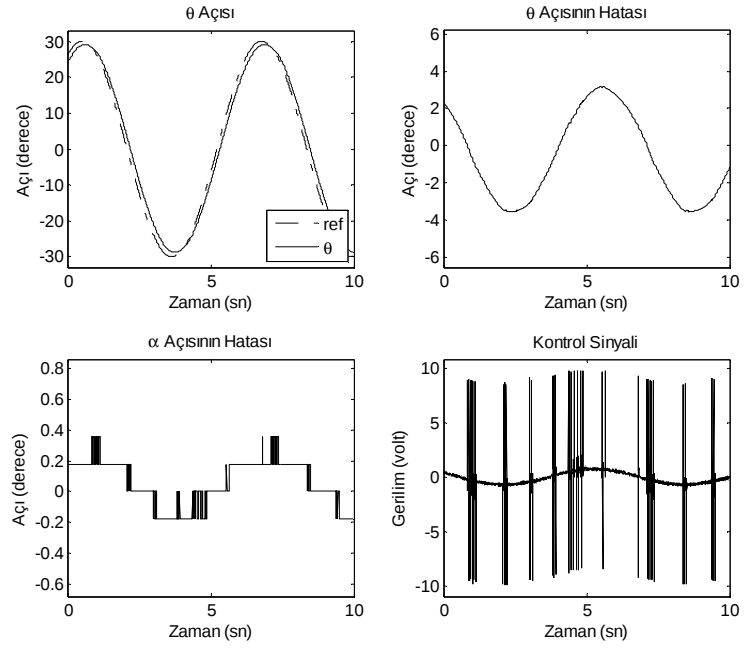
Şekil 5. 20: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



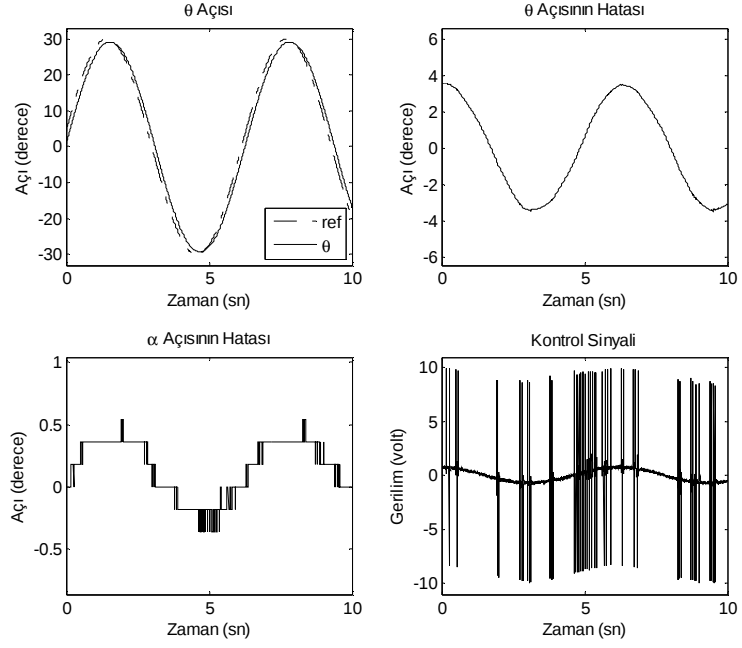
Şekil 5. 21: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



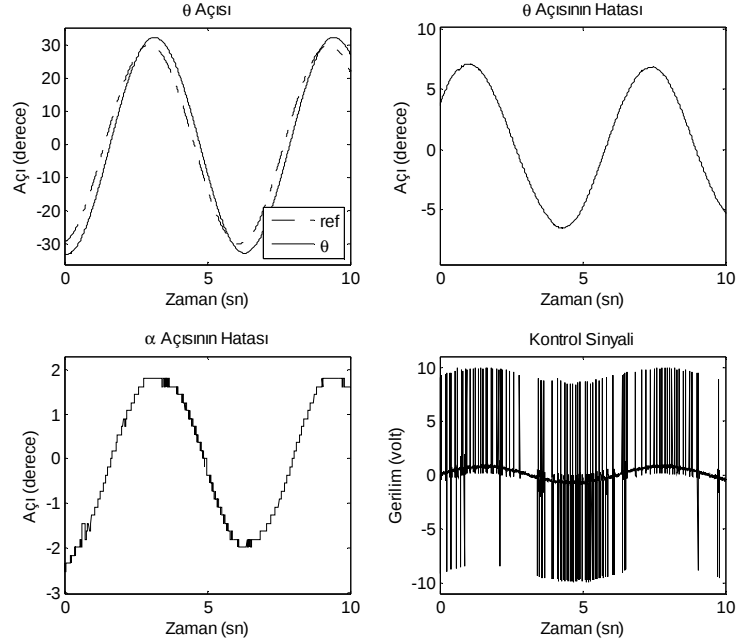
Şekil 5. 22: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 23: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 24: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 25: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.20 – 5.25’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için PID kontrolör ile gerçekleştirilen sinüzoidal yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir. Deneylerden de görüldüğü gibi eklem uzunluğu arttığında ve yay sabiti düştüğünde kontrolörün performansı azalmakta ve eklem ucu işlevcisinin istenilen yörüngeyi

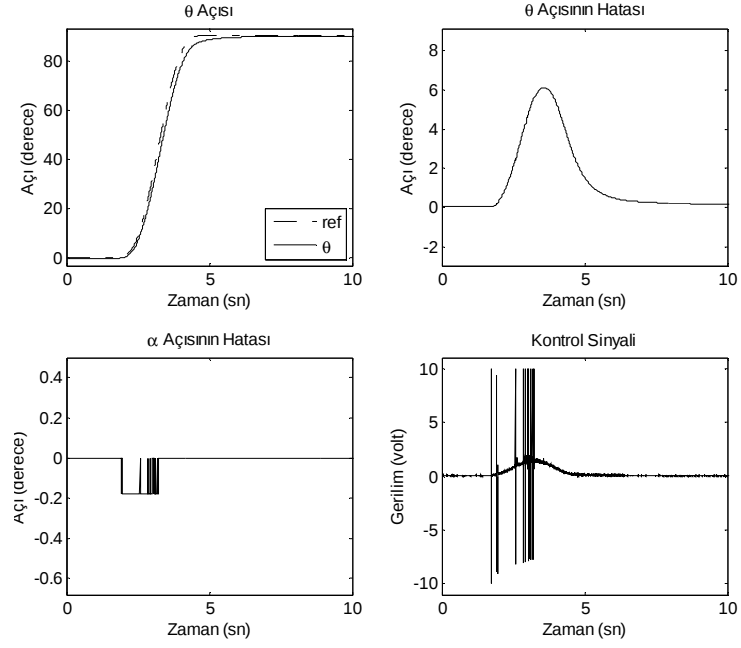
takibi sırasındaki hatalar artmaktadır. Sinüzoidal yörünge takibi sırasında elde edilen sonuçlar Tablo 5.6’ da gösterilmektedir.

Tablo 5. 6: PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları

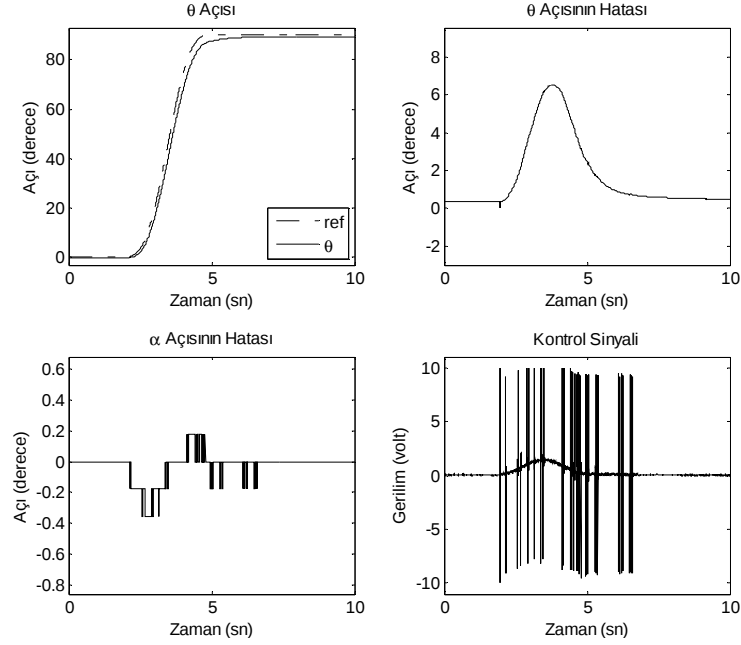
Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	1.7	0.09
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.36	3.6	0.1
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.54	3.9	0.15
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	3.1	0.12
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.54	3.5	0.13
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	1.8	7.05	0.19

Tablo 5.6’ da ki deney sonuçlarından da kolaylıkla görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun PID kontrolör ile sinüzoidal yörünge rakibi deneyinde, eklem uzunluğu arttırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında beklenildiği gibi kontrolör performansı düşmektedir. Aynı zamanda uç işlevciadaki titreşim miktarı, θ açısında oluşan hatalar ve referans sinyalin takibinde oluşan faz farkı artmaktadır.

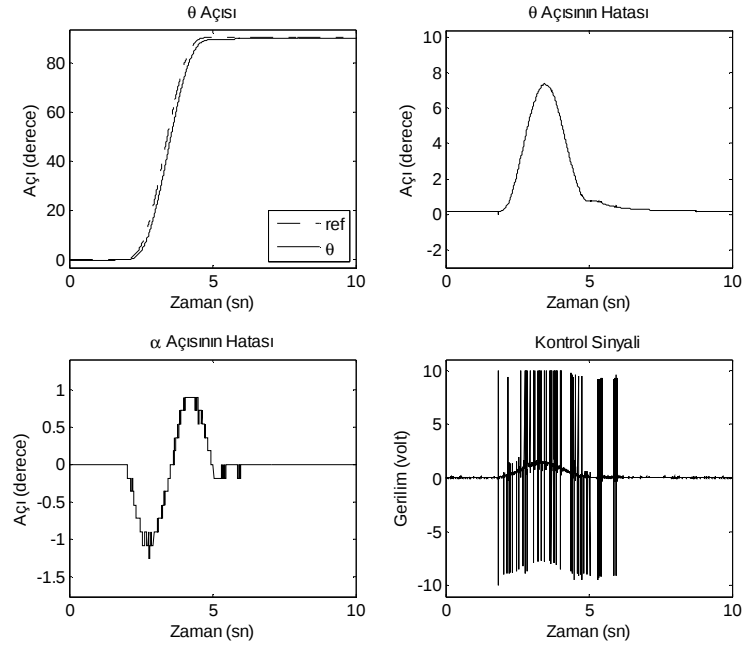
5.4.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri



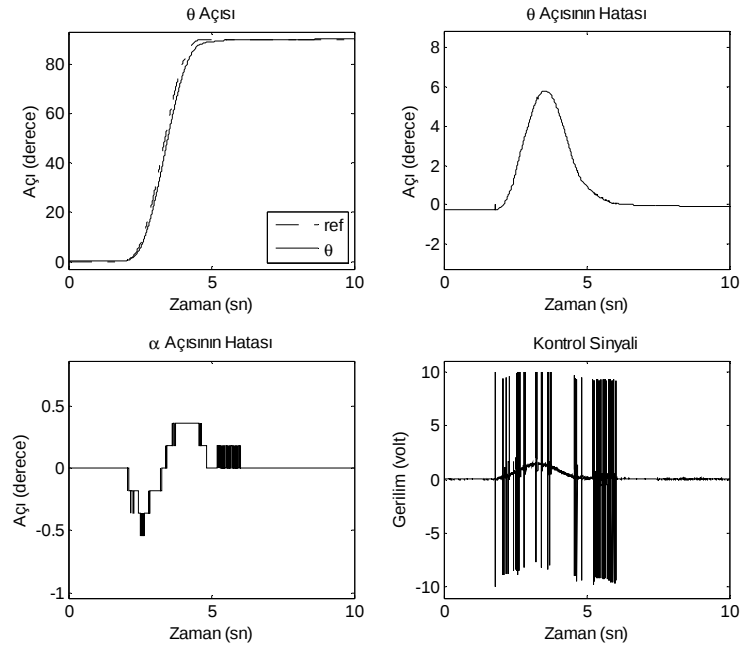
Şekil 5. 26: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



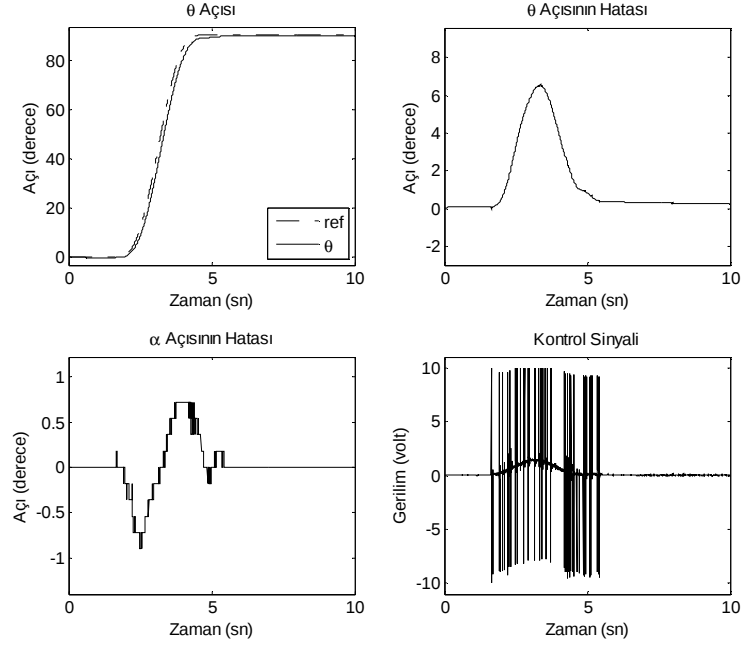
Şekil 5. 27: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



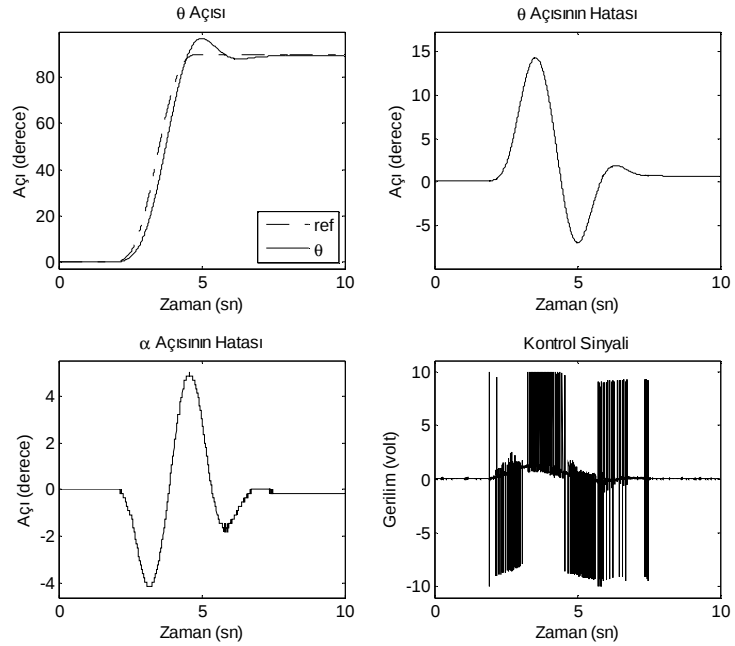
Şekil 5. 28: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 29: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 30: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 31: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.26 – 5.31’ de esnek eklemli robot kolunun kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri verilmiştir. Beklenildiği gibi ve diğer deneylerde de görüldüğü gibi eklem uzunluğunu arttırmak ve yay sabitini düşürmek kane yörüngesi takibi deneyinde de θ ve α açılarındaki hataların artmasına sebep olmuştur. Kane yörünge takibi deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.7’ de verilmektedir.

Görüleceği üzere uygulanan kane yörüngesi birim basamak fonksiyonuna benzer bir yapı içermektedir. Ancak sisteme kane yörüngesi giriş sinyali uygulandığında α açısındaki titreşim miktarı, birim basamak fonksiyonu uygulandığındaki α açısındaki titreşim miktarına göre yapılan bütün deneyler için daha az olarak gerçekleşmiştir. Bunun nedeni PID kontrolördeki oransal katsayı, hata sinyalini gördüğü anda oldukça büyük bir kontrol sinyali üretmekte buda α açısındaki titreşim miktarının artmasına neden olmaktadır.

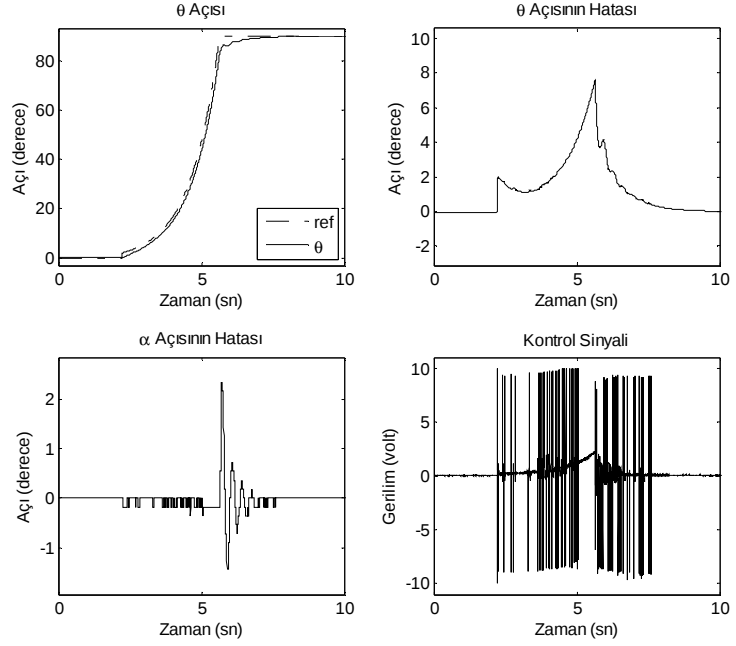
Tablo 5. 7: PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	6.15	0.09	0.1
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.18	6.55	0.1	0.15
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.9	7.4	0.12	0.2
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.54	5.75	0.09	0.2
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.9	6.5	0.11	0.2
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	5.04	14.25	0.2	0.6

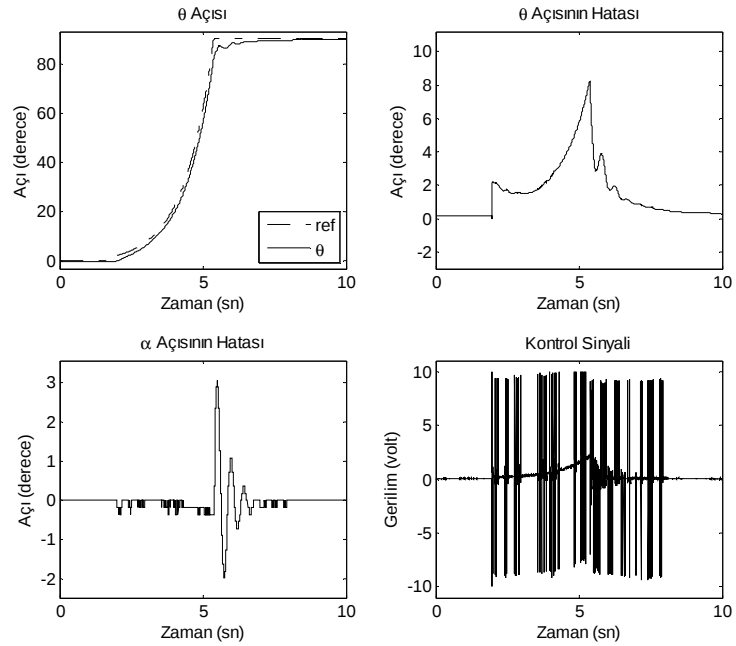
Uygulanan kane yörüngesinde ise hata miktarı birim basamak fonksiyonundakinin aksine zamanla artarak artmakta daha sonra belli bir eğimle artmaya devam etmekte ve zamanla azalarak artmaya devam etmekte ve istenilen değerde kalmaktadır. Bu

sayede tasarlanan PID kontrolörün oransal katsayısı birim basamak fonksiyonundaki kadar baskın olmamaktadır. Bu sayede esnek eklemlili robot kolunun uç işlevcisinin daha hassas konumlaması gerçekleştirilebilmektedir.

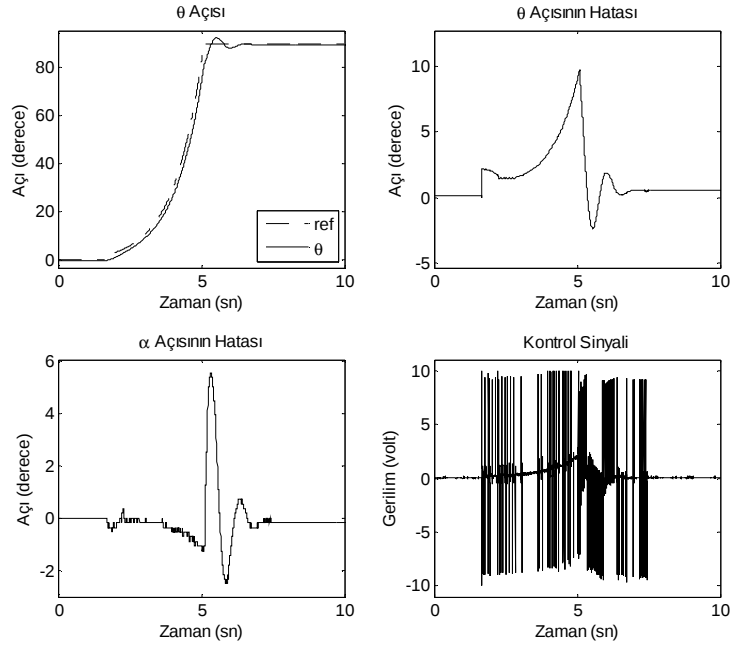
5.4.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri



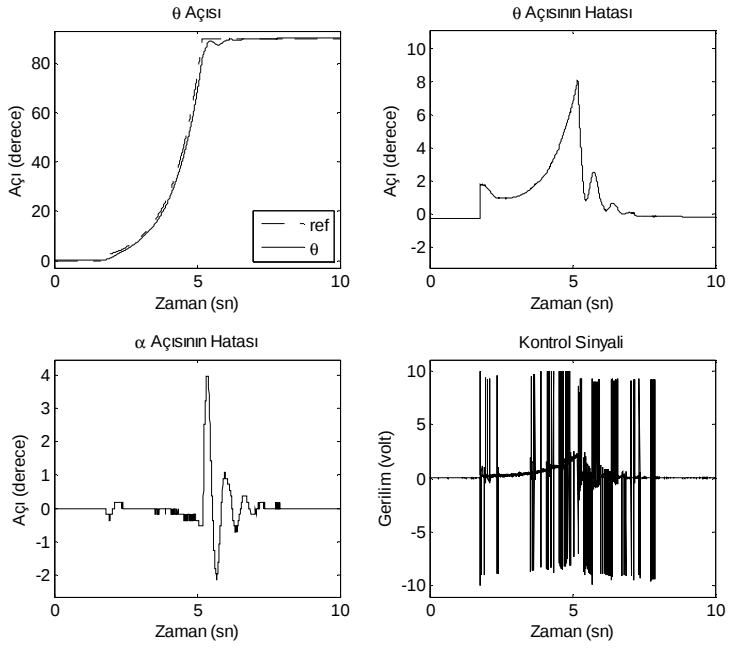
Şekil 5. 32: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



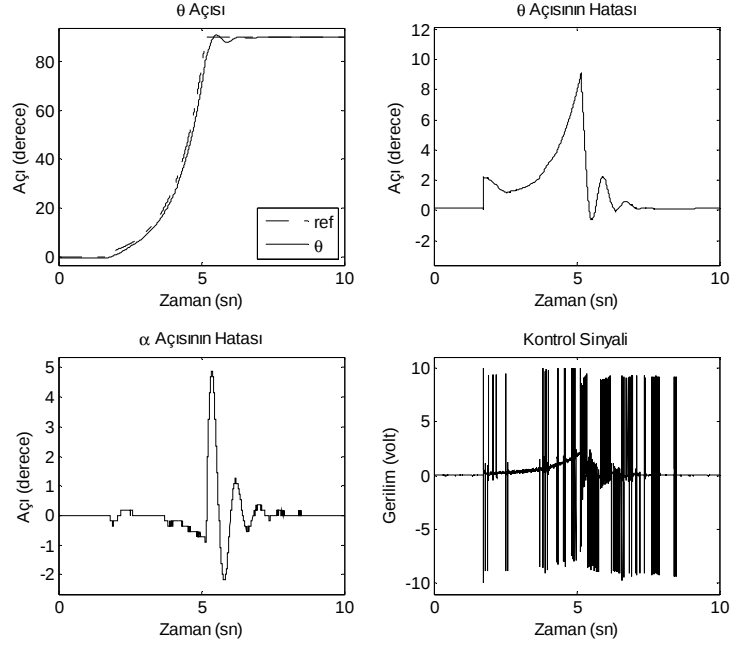
Şekil 5. 33: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



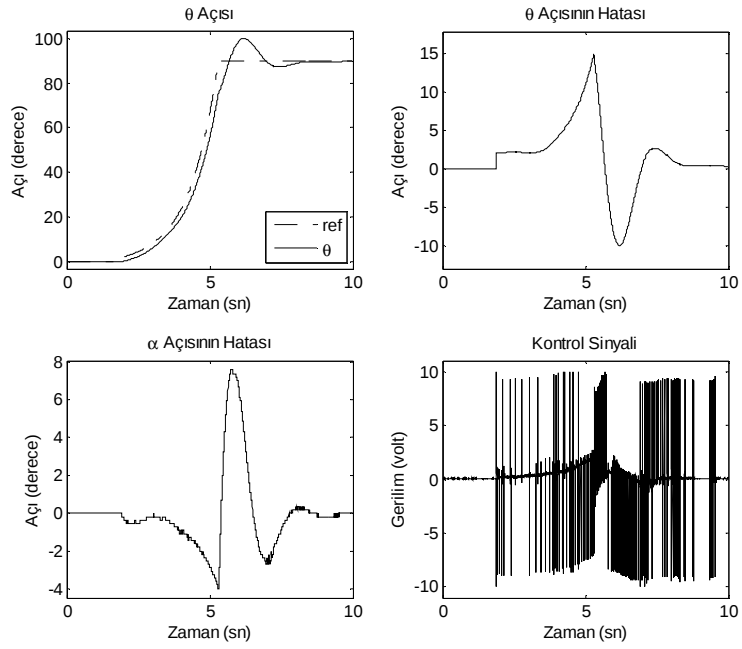
Şekil 5. 34: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 35: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 36: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 37: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.32 – 5.37’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için PID kontrolör ile gerçekleştirilen üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir.

Elde edilen deney sonuçları incelendiğinde üstel fonksiyonun, uygulanan diğer yörüngelerden farkının, uygulanan referans sinyalin artan şekilde arttığı olduğu görülmektedir. Bu yörünge için esnek eklemli robot koluna referans olarak verilmesiyle hata sinyali artan şekilde bir artışa geçmekte kontrolör ise bu hatayı sıfıra indirebilmek için kontrol sinyali uygulamaktadır. Buradaki deneylerde dikkat edilirse referans sinyalin bittiği ve istenilen açıya ulaşıldığı noktada ani bir kesilme meydana gelmekte ve bir süreksizlik oluşmaktadır. Bu nedenle tasarlanan PID kontrolörün bu noktalarda uç işlevci içindeki titreşimi sönümlemesi zorlaşmaktadır. Elde edilen sonuçlar incelenecek olur ise diğer deneylerde olduğu gibi esnek eklemli robot kolunun model parametreleri olan eklem uzunluğu ve yay sabitleri değiştirildiğinde kontrolör performansı düşmektedir.

Tablo 5. 8: PID kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları

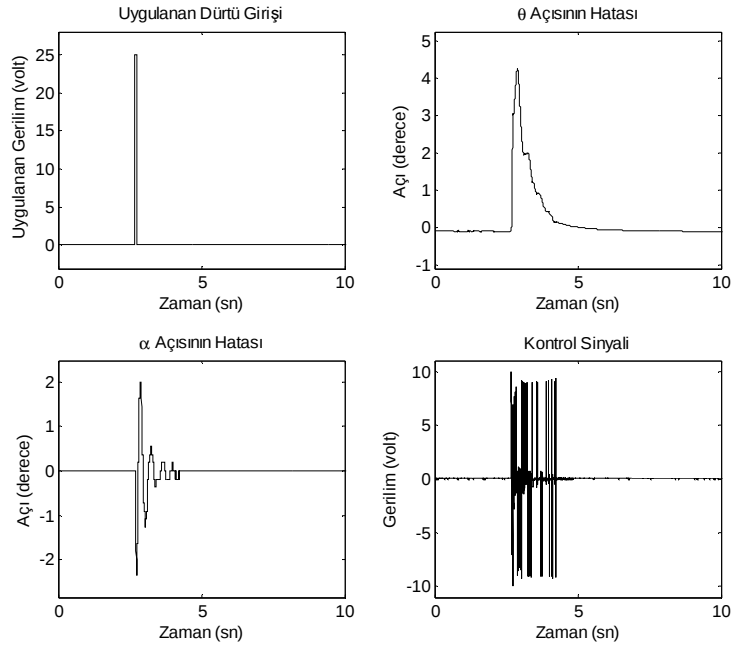
Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.34	7.55	0.09	0.015
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	3.06	8.2	0.1	0.2
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	5.58	9.71	0.12	0.3
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	3.95	8	0.1	0.05
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	4.86	9.1	0.11	0.14
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	7.55	14.85	0.17	0.34

Ancak dikkat edilirse α açısındaki titreşim miktarının, bütün deneyler için birim basamak fonksiyonundakine oranla daha az olduğu görülmektedir. Daha önce bahsedildiği gibi bu durum kontrolörün oransal katsayısı ile açıklanmaktadır. Tablo 5.8’ de üstel yörünge deneyinde elde edilen sonuçlar verilmiştir. Tabloda verilen sonuçlarda görüldüğü üzere esnek eklemlili robot koluna kullanılan model parametreleri diğer deneylerde olduğu gibi PID kontrolörün cevabını etkilemektedir.

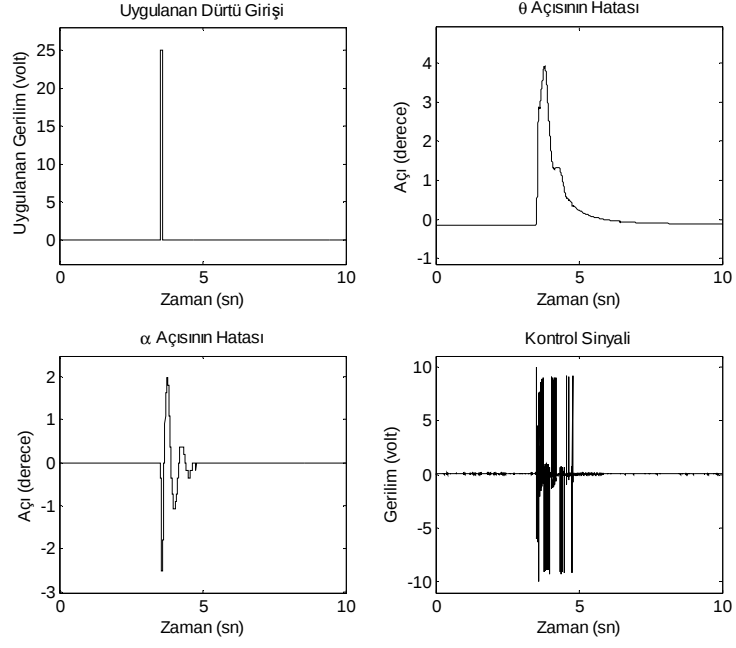
5.4.2.3. PID kontrolörün gürbüzlüğünün test edilmesi

Bu başlık altında esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için tasarlanan PID kontrolörün gürbüzlüğünün ve kararlılığının test edilebilmesi için sisteme, birim dürtü girişi deneyleri ve dış darbe deneyleri uygulanmıştır. Daha öncede bahsedilen altı farklı model için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki başlık altında toplanmış ve karşılaştırılmıştır.

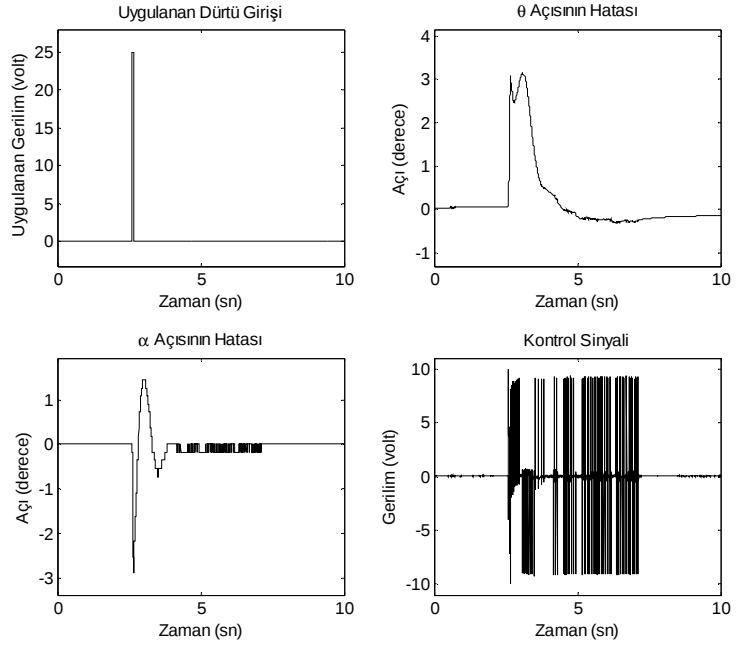
5.4.2.3.1. PID kontrolörün dürtü girişi deneyleri



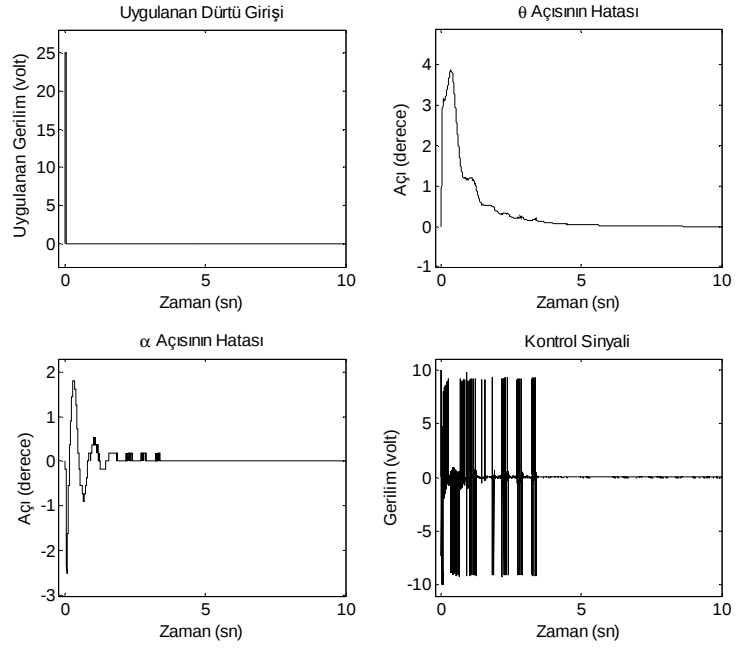
Şekil 5. 38: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



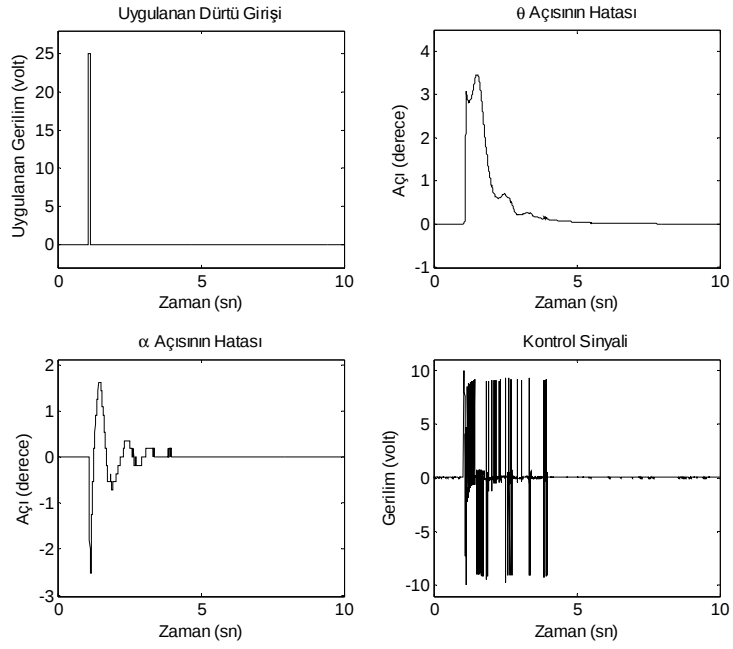
Şekil 5. 39: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



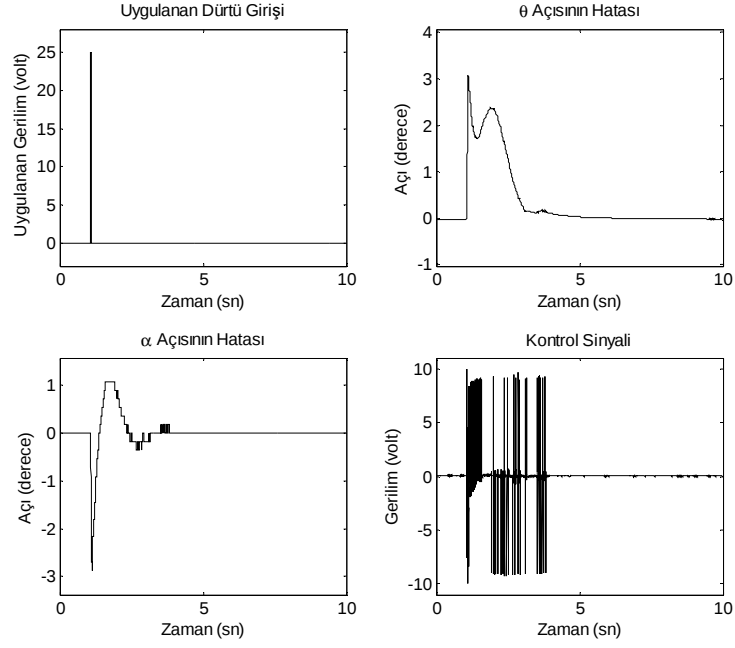
Şekil 5. 40: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 41: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 42: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 43: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.38 – 5.43’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için dürtü yanıtı gösterilmektedir. Yapılan deneylerden de görüleceği üzere kullanılan farklı eklem uzunluğu ve farklı yay sabitleri θ ve α açılarının oturma zamanlarını ve aşım miktarlarını etkilemektedir.

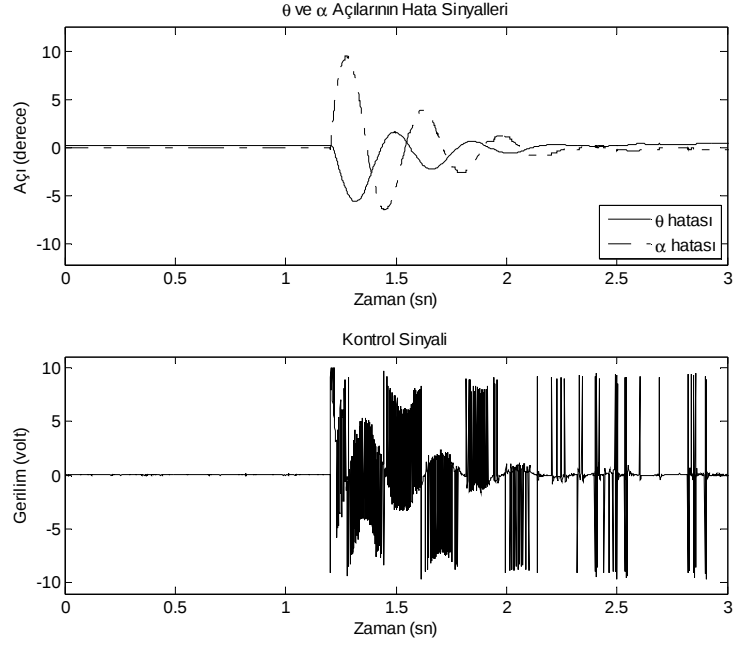
Tablo 5.9’ da esnek eklemli robot kolunun dürtü yanıtının sonuçları gösterilmektedir. Deney sonuçlarından da görüleceği üzere, esnek eklemli robot kolunun dürtü yanıtı deneylerinde, eklem uzunluğu sabit tutulup yay sabiti azaltıldığında θ ve α açılarının oturma zamanları artmakta, θ açısındaki hata değeri azalmakta ve α açısındaki hata değeri artmaktadır. Yay sabiti sabit tutulup eklem uzunluğu arttırıldığında ise, yine θ ve α açılarının oturma zamanları artmakta ancak söz konusu açıların hata değerlerinde büyük bir değişim olmamaktadır.

Tablo 5. 9: PID kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları

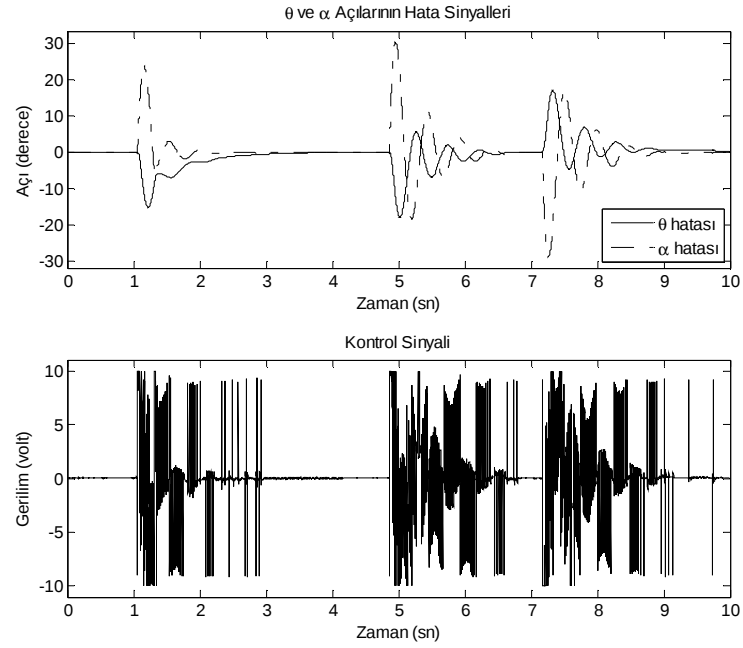
Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.75	1.5	4.24	2.34	0.05	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2	1.55	3.9	2.52	0.05	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	3.8	4.5	3.15	2.88	0.08	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	3.8	3.4	3.87	2.34	0	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	3	3	3.47	2.52	0	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3.1	2.9	3.06	2.88	0.02	0

5.4.2.3.2. PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri

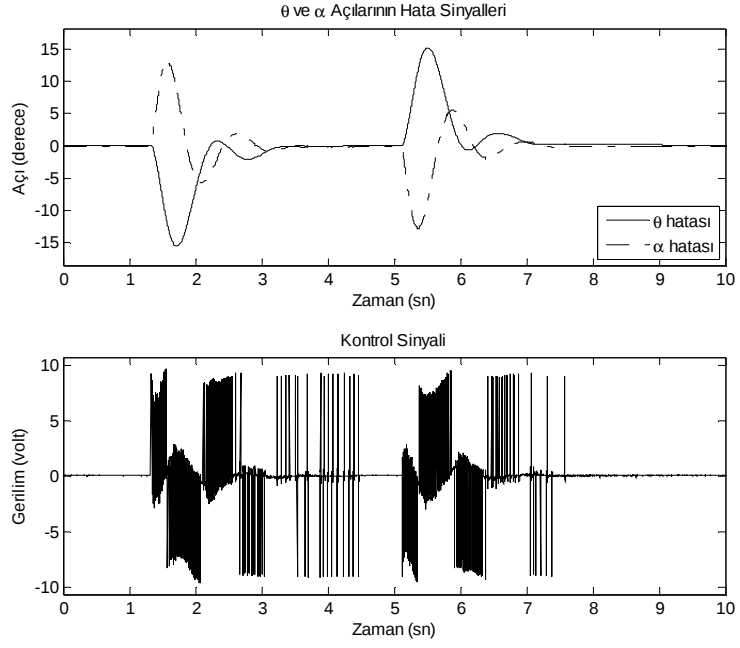
Bozucu darbeler esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisine dışardan ani bir darbe uygulanmasıyla oluşturulmuş olup, bu sayede geliştirilen PID kontrolörün bozucu darbeler karşısındaki kararlılığı ve gürbüzlüğü incelenmektedir. Şekil 5.44 – 5.49’ da esnek eklemli robot kolunun dışarıdan gelen bozucu darbe deneyleri gösterilmektedir.



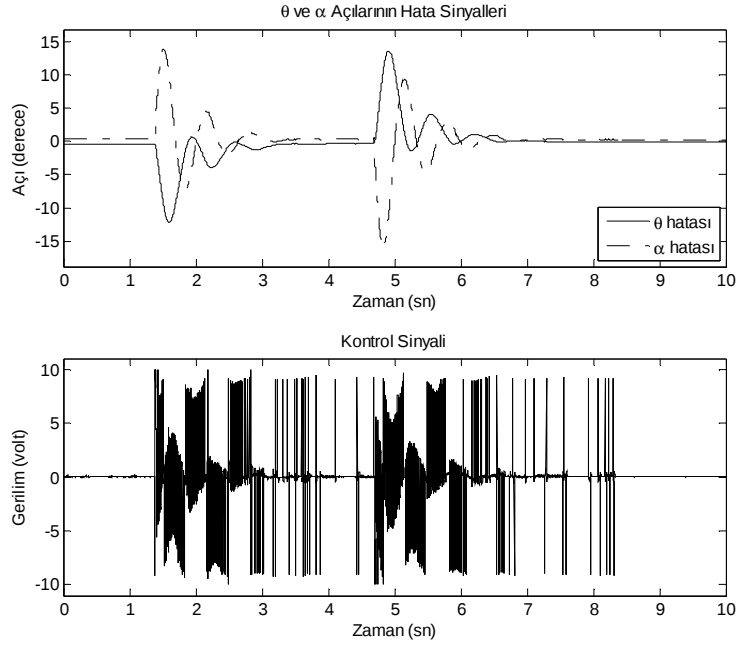
Şekil 5. 44: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



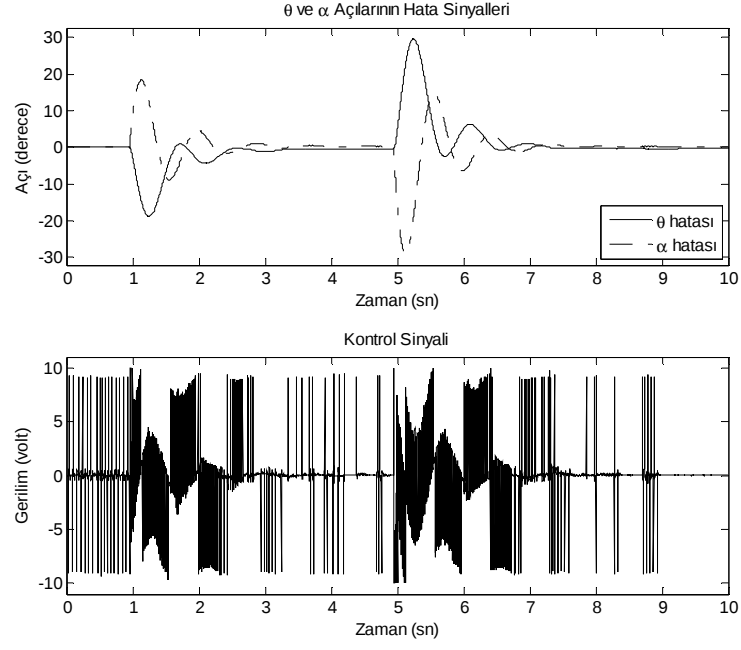
Şekil 5. 45: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



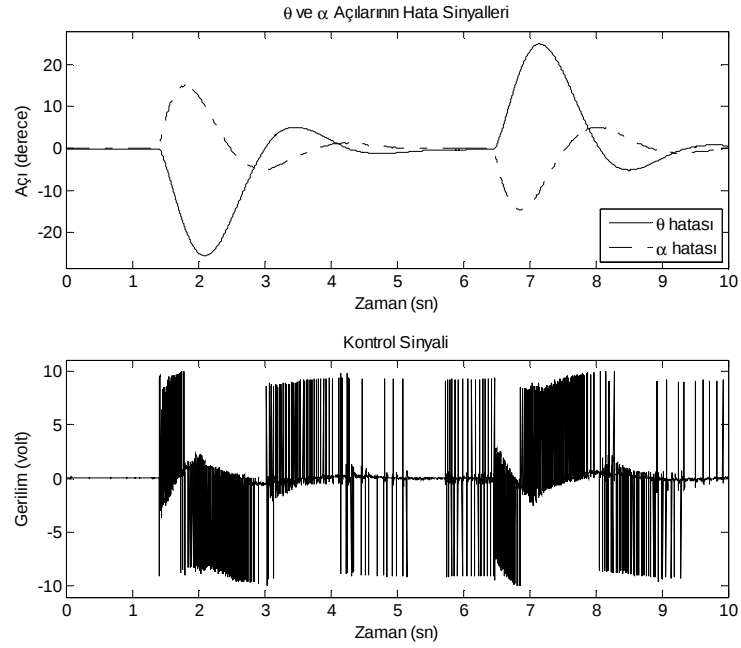
Şekil 5. 46: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 47: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 48: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 49: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Tablo 5.10’ da esnek eklemli robot kolunun dışsal bozucu darbe deney sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5. 10: PID kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.1	1.1	5.7	9.5	0.3	0.18
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.75	1.75	18	30	0.15	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.9	1.9	15	13	0.2	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.1	2.1	13.5	16	0.1	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.7	2.7	30	29	0.3	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3.9	3.9	26	15	0.3	0

Tablo 5.10’ da görüldüğü üzere eklem yay sabitinin azaltılması veya eklem boyunun uzatılması sistemin oturma zamanını uzatmaktadır. Ancak eklem uzunluğunun 0.58 m ve yay sabitinin 12.53 N/m seçildiği durumda bile geliştirilen PID kontrolör gelen dış darbeleri kolaylıkla sönmölemek ve sistemin kararlı durumunu korumasını sağlamaktadır.

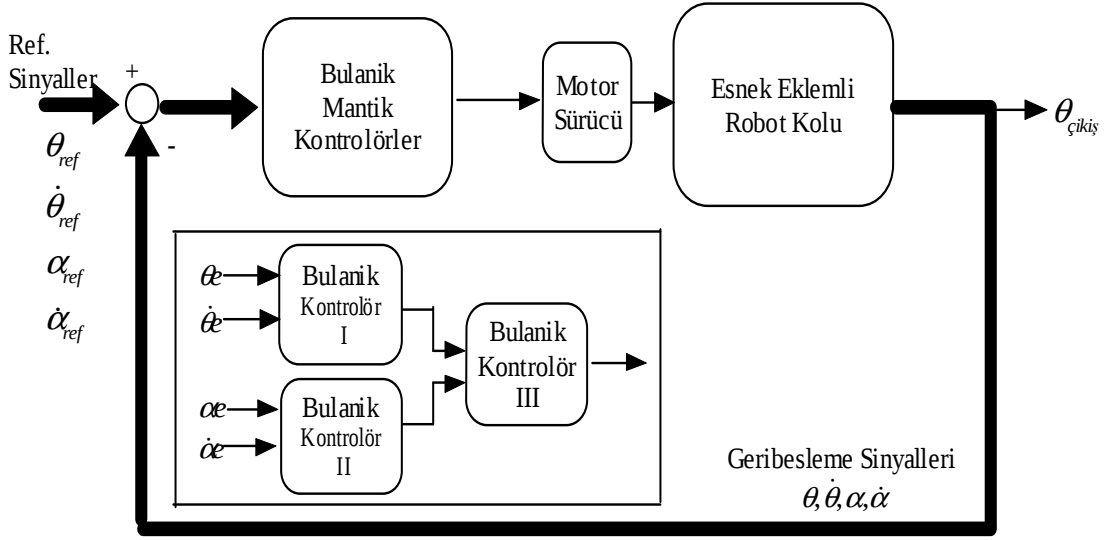
5.5. Esnek Eklemlı Robot Kolunun Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu kısımda esnek eklemlı robot kolunun bulanık mantık ile kontrolü konusu işlenecek, geliştirilen bulanık mantık kontrolörün üyelik fonksiyonları kural tabloları ve kontrol yüzeyleri verilecek, aynı zamanda esnek eklemlı robot kolunun eklem uzunluğunu ve yay sabitinin değiştirilmesiyle oluşan farklı modelleri için geliştirilen bulanık kontrolör performansı test edilerek elde edilen deney sonuçları ayrı başlıklar altında incelenecektir.

5.5.1. Bulanık mantık kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Daha öncede bahsedildiği gibi esnek eklemlı robot kolunun çıkışları motor dönme açısı θ ve eklemin uç işlevcisinin salınım açısı α olarak belirlenmiştir. Ve bu bölümde tasarlanan bulanık kontrolör eklem uzunluğu 0.4 m ve yay sabiti 58.86 N/m olan model için geliştirilmiş, bulanık kontrolörün üyelik fonksiyonları ve sisteme uygulanan kazançlar bu model için oluşturulmuştur.

Esnek eklemlı robot kolunun bulanık mantık kontrol yapısı temel olarak üç ana bulanık kontrolöre dayanmaktadır. Açıkça görüldüğü gibi esnek eklemlı robot kolu tek girişli iki çıkışlı bir sistemdir. Sistemin girişi motora uygulanan gerilim sinyalidir. Sistemin çıkışları ise motorun dönme açısı olan θ ve eklemin salınım açısı olan α açısıdır. Bu nedenle kontrolör yapısında her iki çıkışında ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekmektedir. Bulanık mantık kontrol yapısında kullanılan üç bulanık kontrolörden birincisi, θ açısının hatasını ve θ açısının hatasının türevini giriş olarak alıp, kullandığı üyelik fonksiyonlarına ve kural tablosuna göre uygun kontrol sinyalini üretir. İkincisi, α açısının hatasını ve α açısının hatasının türevini giriş olarak alıp bu girişlere göre uygun kontrol sinyalini üretir. Bulanık mantık kontrol yapısında geliştirilen üçüncü ve son kontrolör ise ilk iki kontrolörün ürettikleri çıkışları giriş olarak alarak bu girişlere göre sisteme uygulanması gereken en uygun kontrol sinyalini üreten karar mekanizmasını oluşturmaktadır. Şekil 5.50' de esnek eklemlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör şeması gösterilmektedir.



Şekil 5. 50: Bulanık mantık ana kontrolör şeması

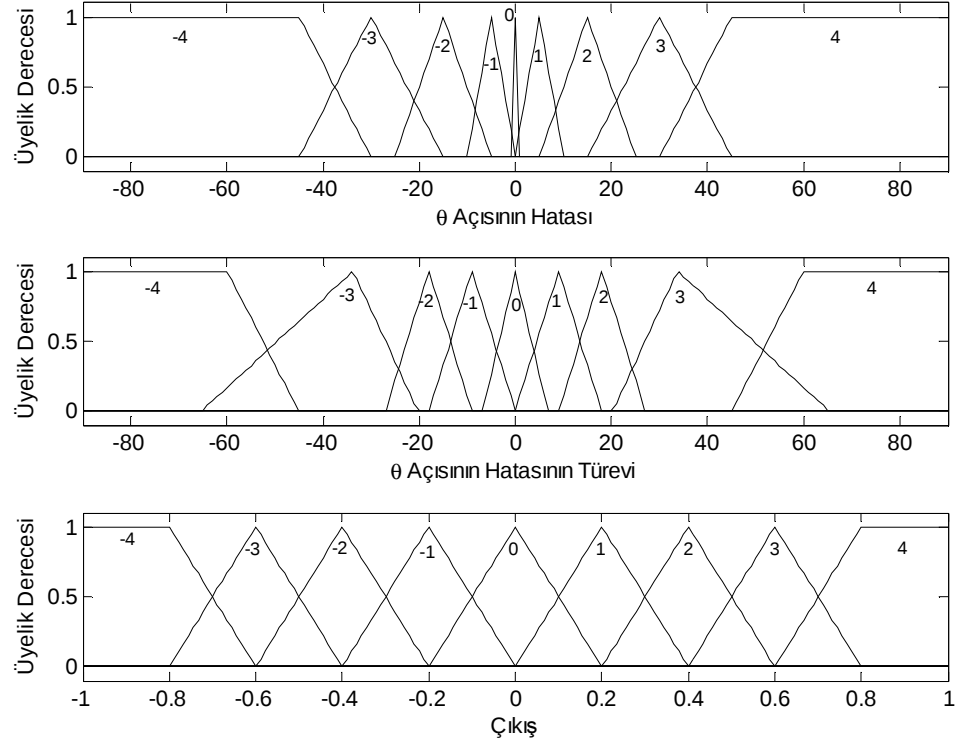
Tasarlanan bu üç farklı bulanık kontrolörün her biri için farklı üyelik fonksiyonları ve farklı kural tabloları oluşturulmuştur. Ayrıca tasarlanan üç bulanık kontrolörde de Mamdani bulanık kural tabanı ve Centroid durulaştırma yöntemi kullanılmıştır. Bu kontrolörlerden Bulanık Kontrolör I de motor dönme açısının hatası (θe), bu hatanın türevi ($\dot{\theta}e$) ve çıkış fonksiyonu için toplam dokuz adet üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [-4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4].

Tablo 5. 11: Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu

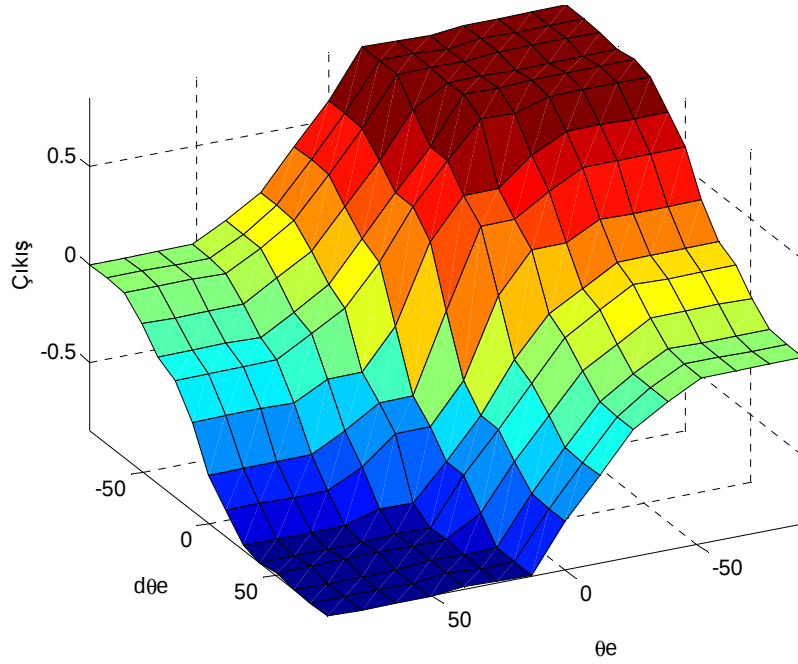
$\dot{e}/e$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	4	4	4	3	3	2	2	1	0
-3	4	4	3	2	3	2	1	0	-1
-2	4	3	3	2	2	1	0	-1	-2
-1	3	3	2	1	1	0	-1	-2	-2
0	3	2	2	1	0	-1	-2	-2	-3
1	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
2	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4
3	1	0	-1	-2	-3	-2	-3	-4	-4
4	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4

Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken motor dönme açısının hatasının (θe) ve motor dönme açısının hatasının türevinin ($\dot{\theta}e$) aralığı ∓ 90 , çıkış

fonksiyonunun aralığı ise ∓ 1 olarak belirlenmiş ve kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 81 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu Tablo 5.11, üyelik fonksiyonları Şekil 5.51 ve kontrol yüzeyi Şekil 5.52' de gösterilmektedir.



Şekil 5. 51: Bulanık Kontrolör I' in üyelik fonksiyonları, θ açısının hatası, θ açısının hatasının türevi ve çıkış

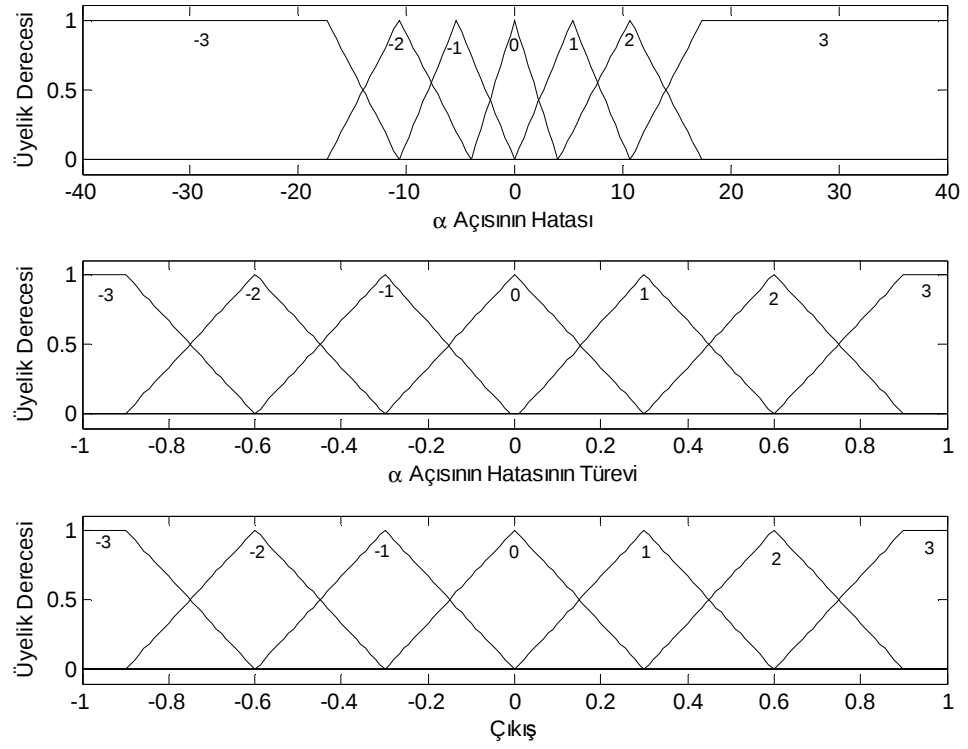


Şekil 5. 52: Bulanık Kontrolör I' in kontrol yüzeyi

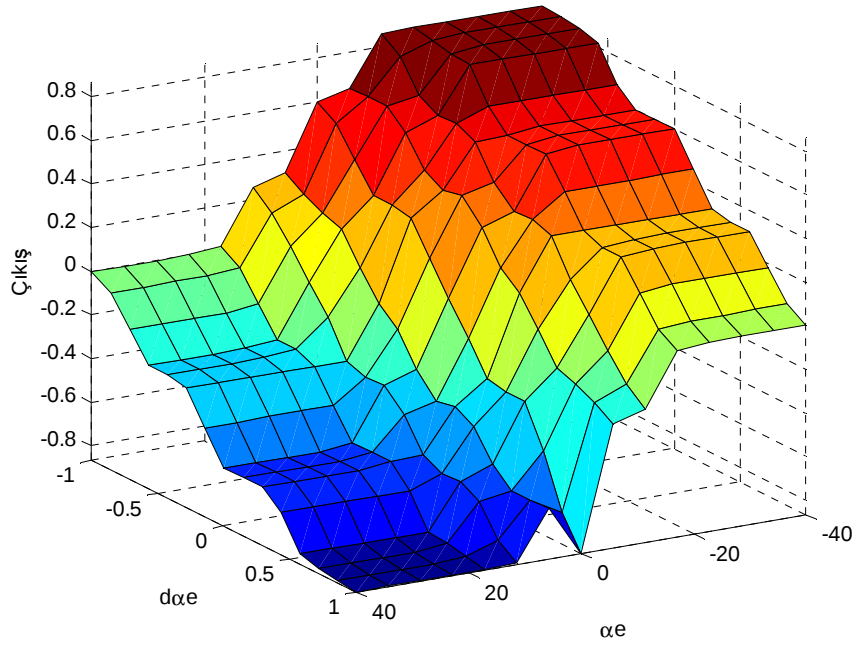
Bulanık Kontrolör II de uç işlevcinin titreşim açısının hatası (αe), bu hatanın türevi ($\dot{\alpha}e$) ve çıkış fonksiyonu için toplam yedişer adet üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [-3 -2 -1 0 1 2 3]. Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken uç işlevcinin titreşim açısının hatasının (αe) aralığı ∓ 40 , uç işlevcinin titreşim açısının hatasının türevinin ($\dot{\alpha}e$) ve çıkış fonksiyonunun aralığı ise ∓ 1 olarak belirlenmiş ve kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 49 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu Tablo 5.12, üyelik fonksiyonları Şekil 5.53 ve kontrol yüzeyi Şekil 5.54'de gösterilmektedir.

Tablo 5. 12: Bulanık Kontrolör II' in kural tablosu

$\dot{e}/e$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	1	0
-2	3	2	2	1	1	0	-1
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
3	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3



Şekil 5. 53: Bulanık Kontrolör II' in üyelik fonksiyonları, α açısının hatası, α açısının hatasının türevi ve çıkış



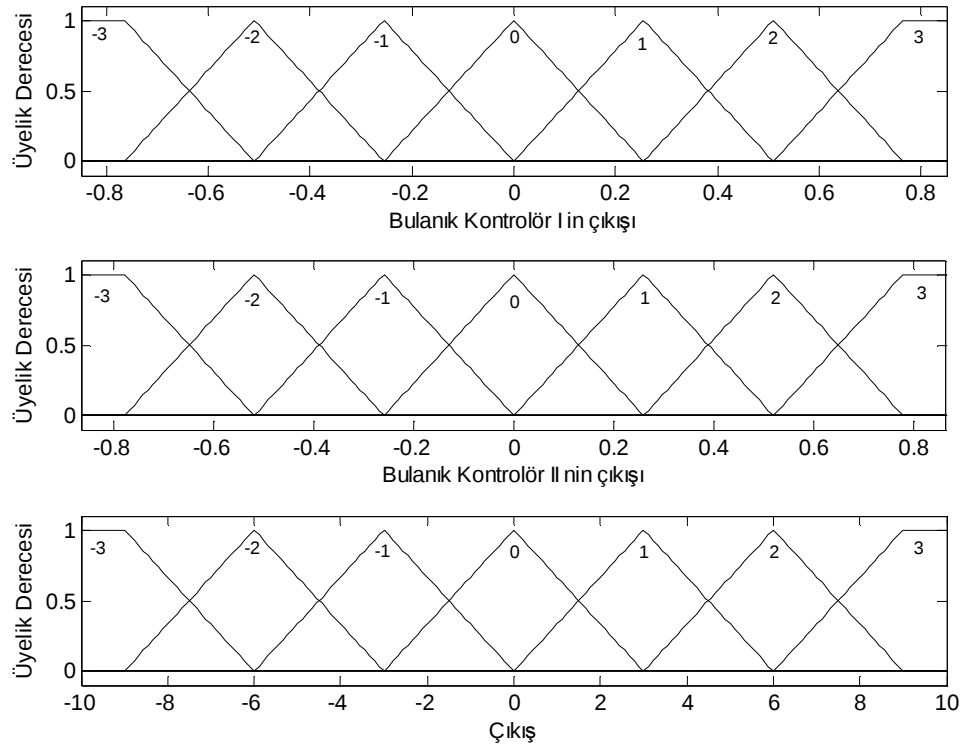
Şekil 5. 54: Bulanık Kontrolör II' nin kontrol yüzeyi

Bulanık Kontrolör III de Bulanık Kontrolör I' nin çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve Kontrol çıkış fonksiyonu için toplam yedişer adet üçgen üyelik fonksiyonu

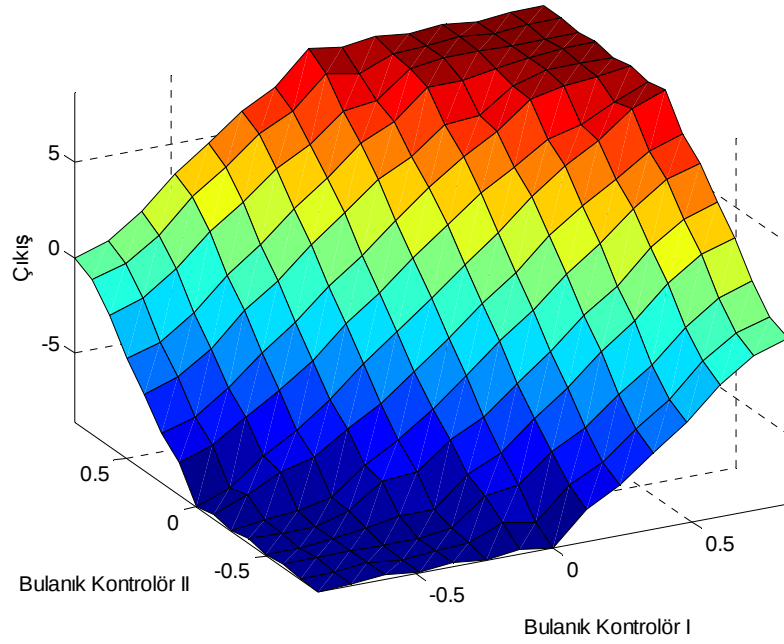
tanımlanmıştır $[-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]$. Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken Bulanık Kontrolör I ve II' nin aralığı ∓ 0.87 ve çıkış fonksiyonunun aralığı ise ∓ 10 olarak belirlenmiştir. Kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 49 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör III' in kural tablosu Tablo 5.13, üyelik fonksiyonları Şekil 5.55 ve kontrol yüzeyi Şekil 5.56'de gösterilmektedir.

Tablo 5. 13: Bulanık Kontrolör III' ün kural tablosu

α/θ	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	0
-2	-3	-3	-3	-2	-1	0	1
-1	-3	-3	-2	-1	0	1	2
0	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	-2	-1	0	1	2	3	3
2	-1	0	1	2	3	3	3
3	0	1	2	3	3	3	3

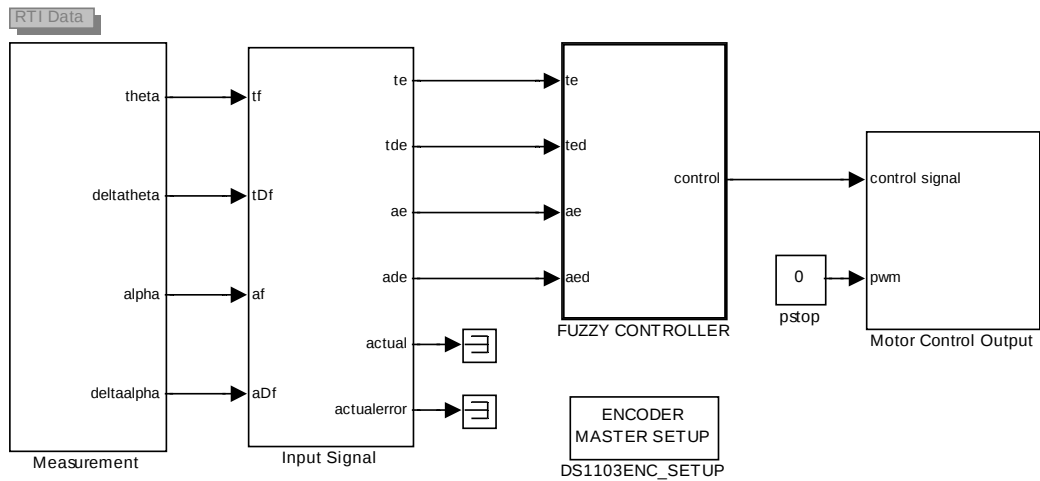


Şekil 5. 55: Bulanık Kontrolör III' ün üyelik fonksiyonları, Bulanık Kontrolör I' in çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve çıkış



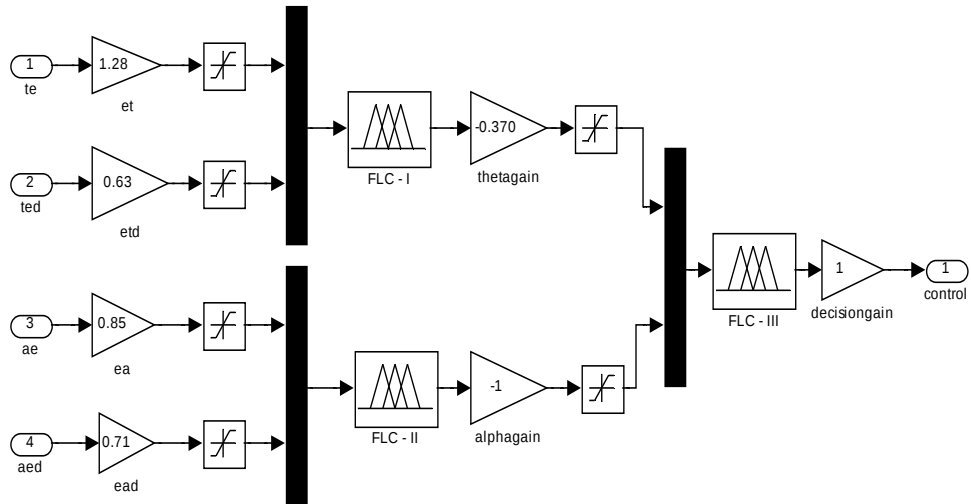
Şekil 5. 56: Bulanık Kontrolör III' ün kontrol yüzeyi

Kural tabloları, kontrol yüzeyleri ve üyelik fonksiyonları verilen bulanık mantık kontrolörler ayrı ayrı Matlab/FIS Editor kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca geliştirilen ana bulanık kontrolör şeması Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuş ve DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı ile esnek eklemli robot kolu sistemine uygulanmıştır. Şekil 5.57' de esnek eklemli robot kolu kontrolü için geliştirilen bulanık kontrolörün Simulink blokları gösterilmektedir.



Şekil 5. 57: Bulanık kontrolör Simulink blokları

Görüldüğü üzere esnek eklemlili robot kolunun bulanık kontrolör ile kontrol edilmesi için oluşturulan Simulink şemasında dört ana blok bulunmaktadır. Bunlardan birincisi gerekli geri besleme sinyallerini eklem ve motor optik kodlayıcılarından alan ölçüm bloğu, ikincisi sisteme uygulanacak giriş sinyallerinin oluşturulduğu giriş bloğu, üçüncüsü sistemin kontrol edilmesi için tasarlanan bulanık kontrolörün içine yerleştirildiği kontrolör bloğu ve sonuncusu motor sürücüsüne gereken analog sinyali üreten çıkış bloğudur. Şekil 5.58’ de esnek eklemlili robot kolunun bulanık mantıkla kontrolü için geliştirilen bulanık mantık kontrolör simulink blok şeması gösterilmektedir. Yapıda, şekilden de görüleceği üzere üç farklı bulanık kontrolör ve bazı kazançlar yer almaktadır. Bu kazançlar istenilen sinyallerin istenilen oranda ayarlanmasını sağlayarak kontrolörün daha uygun şekilde ayarlanmasına yardımcı olurlar.



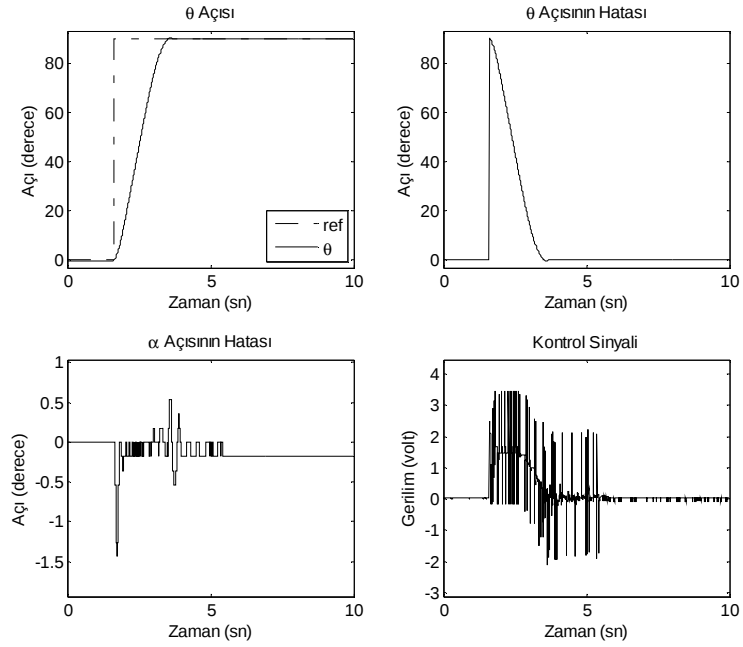
Şekil 5. 58: Simulink’ te oluşturulan bulanık mantık kontrolör şeması

5.5.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

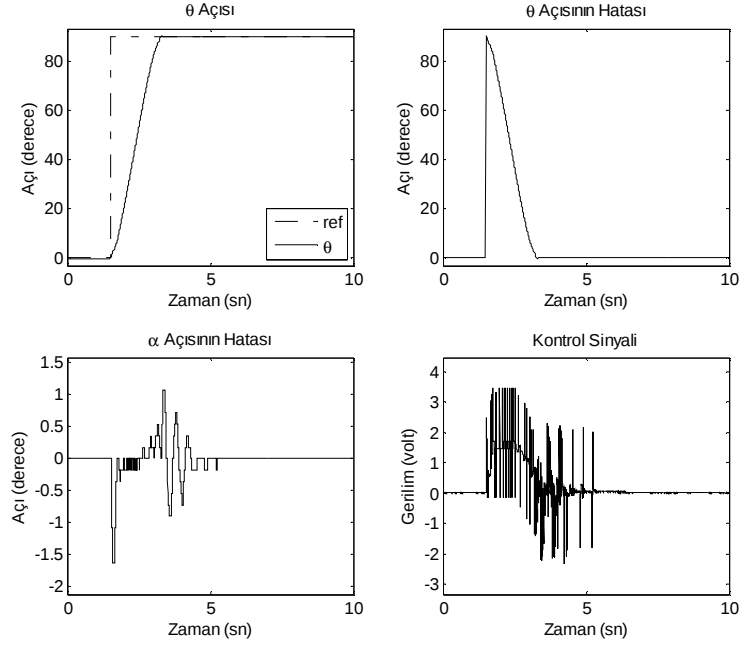
Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun bulanık mantık kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi sırasında elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması verilecektir.

Esnek eklemlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen bulanık mantık kontrolörün kontrol performansının test edilmesi için birçok deney yapılmıştır. Yapılan bu deneyler, daha önce bölüm 5.4.2’ de bahsedilen, konum kontrolü, yörünge takibi ve tasarlanan kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünün test edilmesi için yapılan deneylerdir. Ve kontrolörün performansının daha iyi test edilebilmesi için eklem uzunluğu ve yay sabitleri değiştirilerek tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

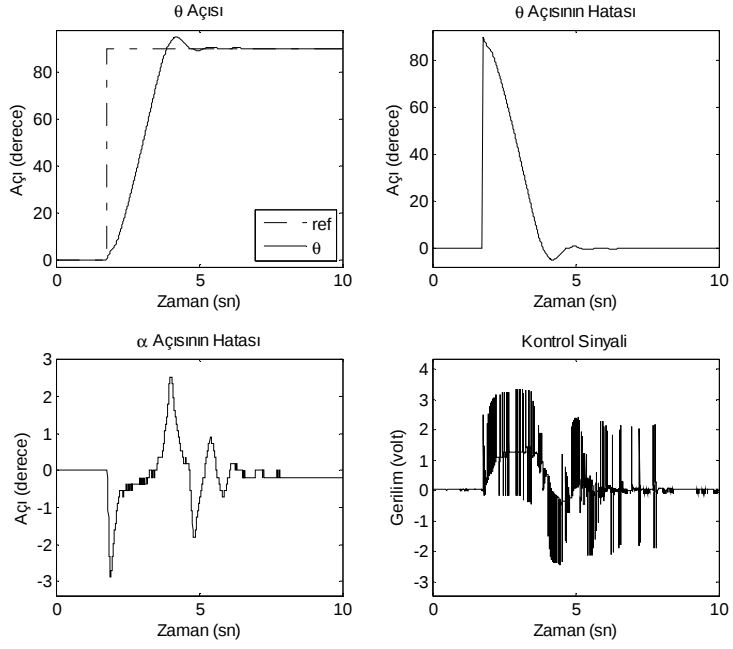
5.5.2.1. Esnek eklemlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneyleri



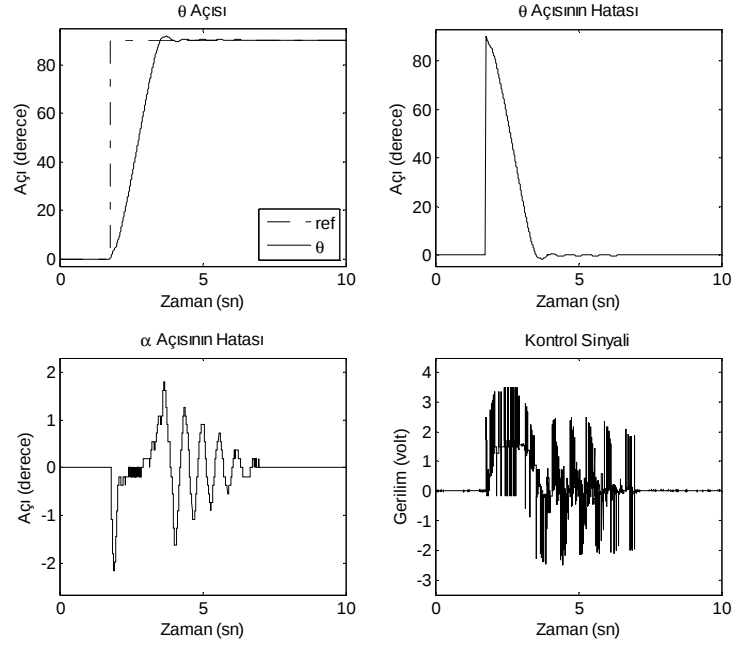
Şekil 5. 59: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



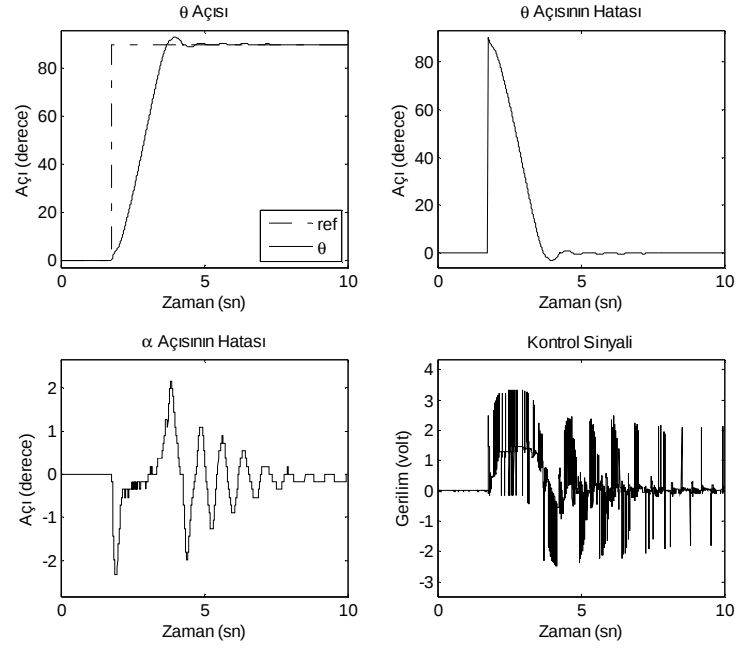
Şekil 5. 60: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



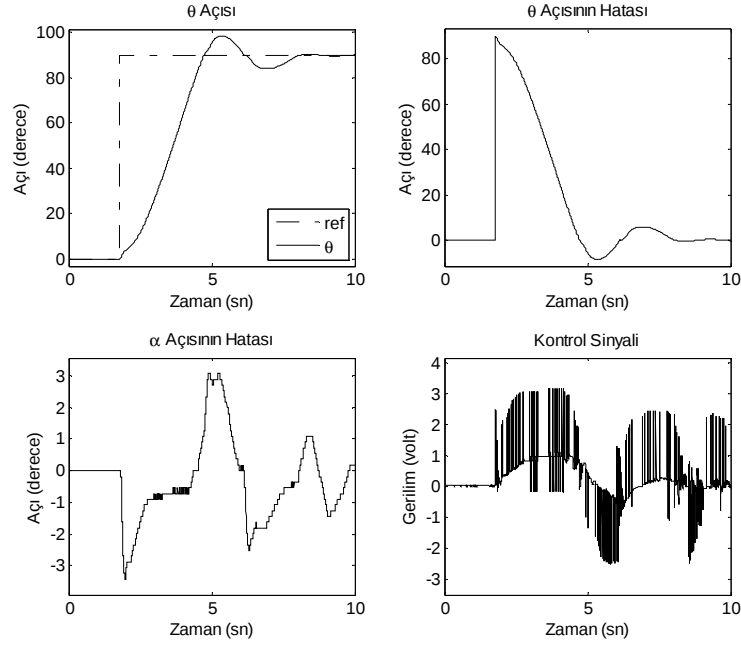
Şekil 5. 61: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 62: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 63: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 64: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.59 – 5.64’ da görüldüğü üzere esnek eklemli robot kolunun bulanık mantıkla konum kontrolü deneyleri birim basamak girişi uygulanmasıyla elde edilmiştir. Ve yine aynı şekillerden görüleceği üzere eklemün yay sabiti ve eklem uzunluğu değiştirilerek toplam altı farklı model için geliştirilen bulanık mantık kontrolörün konum kontrolündeki performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.14’ de karşılaştırılmıştır.

Altı farklı model için de yapılan konum kontrolü deneylerinden görüleceği üzere, bulanık mantık kontrolör esnek eklemli robot kolunun konum kontrolünü başarı ile gerçekleştirmektedir. Robotun uç işlevcisindeki en büyük salınım miktarı eklem uzunluğunun artması ve yay sabitinin azalmasıyla artmasına rağmen kontrolörün tasarlandığı model için elde edilen sonuçlara bakıldığında hata değerinin 1.62 derece olduğu görülmektedir. Uç işlevcinin oturma zamanının, motor açısının oturma zamanından fazla olması uç işlevcinin durma sırasında 0.18° ’ lik titreşimleriyle açıklanmaktadır ki bu titreşimler oldukça küçüktür. Ayrıca, eğer dikkat edilirse eklem uzunluğu arttırılıp, yay sabiti azaltılarak elde edilen sonuçlarda, uç işlevcinin salınım miktarı, oturma zamanı ve θ açısındaki yüzde aşım artmaktadır. Eğer yay sabiti sabit tutulup eklem uzunluğu arttırılırsa, kontrolör performansı yine yapılan

değişimden kötü etkilenmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, beklenildiği gibi en iyi kontrolör performansı, kısa eklem ve sert yay sabitine sahip olan model için elde edilmiştir.

Tablo 5. 14: Bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları

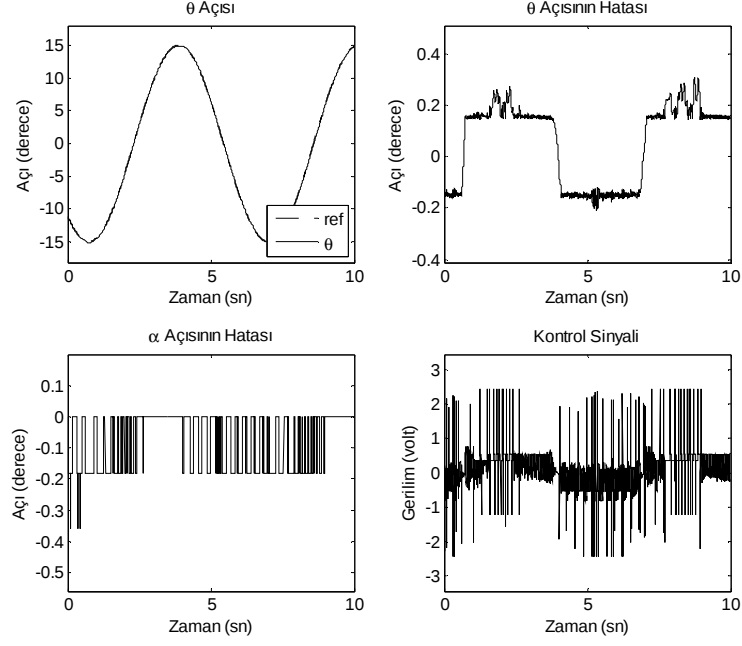
Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.8	3.4	0	1.44	0.13	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.7	3.7	0	1.62	0.05	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.8	5.6	5	2.88	0.13	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.7	5.2	1.66	2.15	0.05	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.9	6.15	3.3	2.34	0.18	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	6	15	8.8	3.42	0.2	0

5.5.2.2. Esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör için yörünge takibi deneyleri

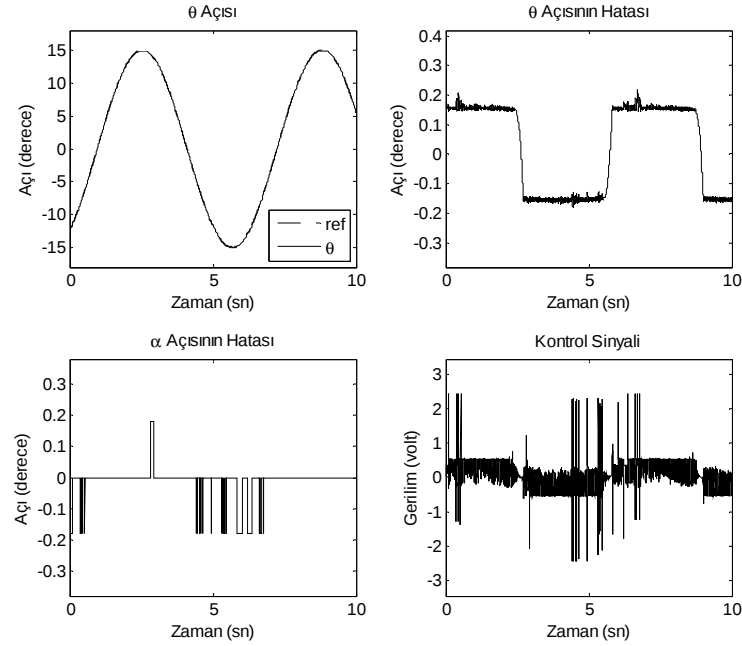
Bu kısımda esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık ile kontrol edilmesi konusu için, geliştirilen bulanık kontrolörün yörünge takibi deneyleri verilmektedir. Yörünge takibi deneyleri, sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri olarak

üç ayrılmaktadır. Yapılan bütün deneyler tasarlanan altı farklı esnek eklemli robot kolu modeli için tekrarlanmış ve ayrı ayrı elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

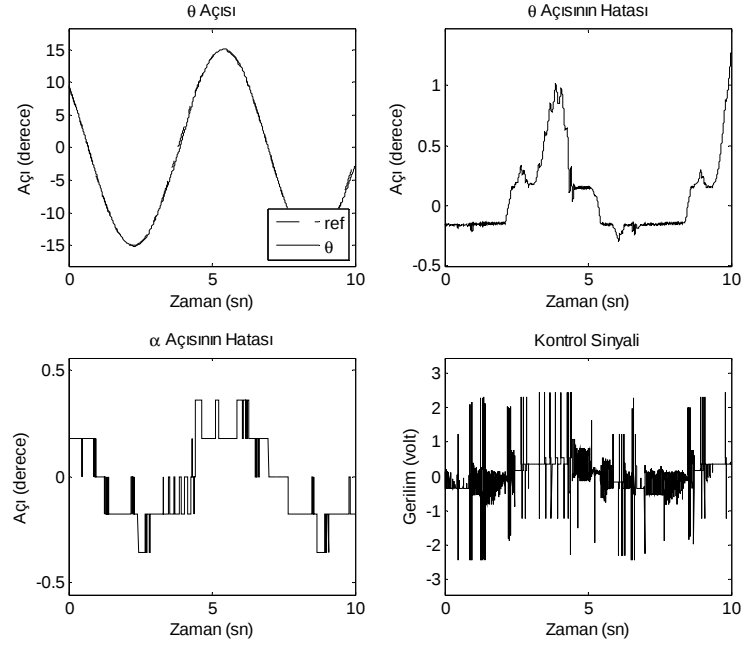
5.5.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri



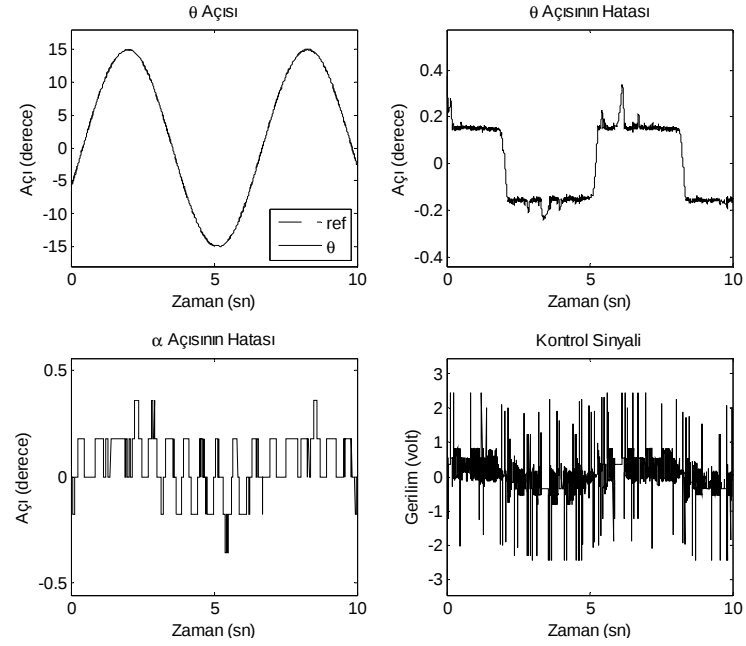
Şekil 5. 65: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



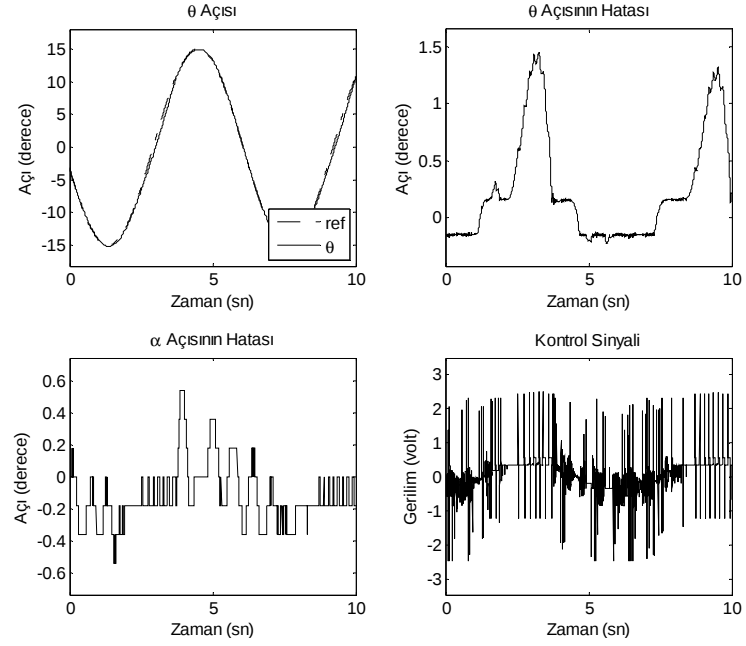
Şekil 5. 66: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



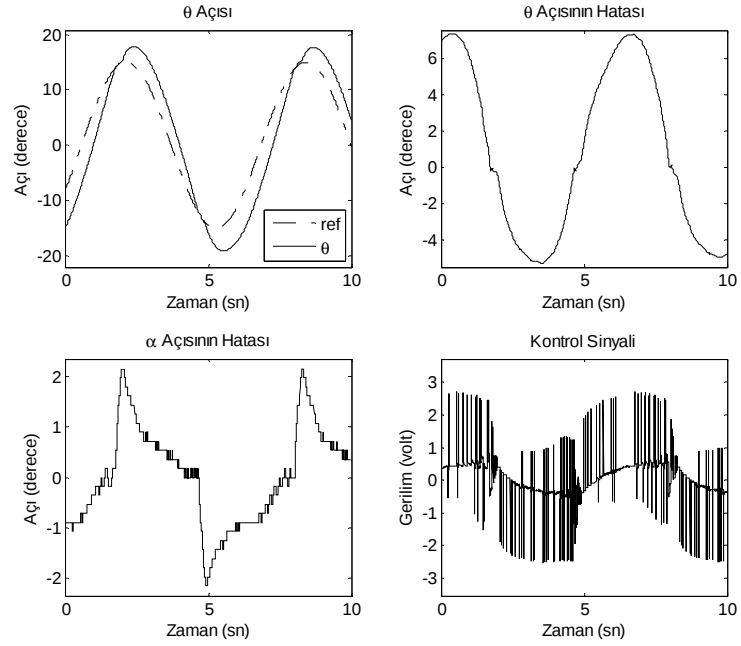
Şekil 5. 67: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 68: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 69: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 70: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.65 – 5.70’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için bulanık mantık kontrolör ile gerçekleştirilen sinüzoidal yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir. Deneylerden de görüldüğü üzere eklem uzunluğu arttığında ve yay sabiti düştüğünde kontrolörün performansı azalmakta ve eklem uç işlevcisinin istenilen yörüngeyi takibi sırasındaki hatalar artmaktadır. Bulanık mantık

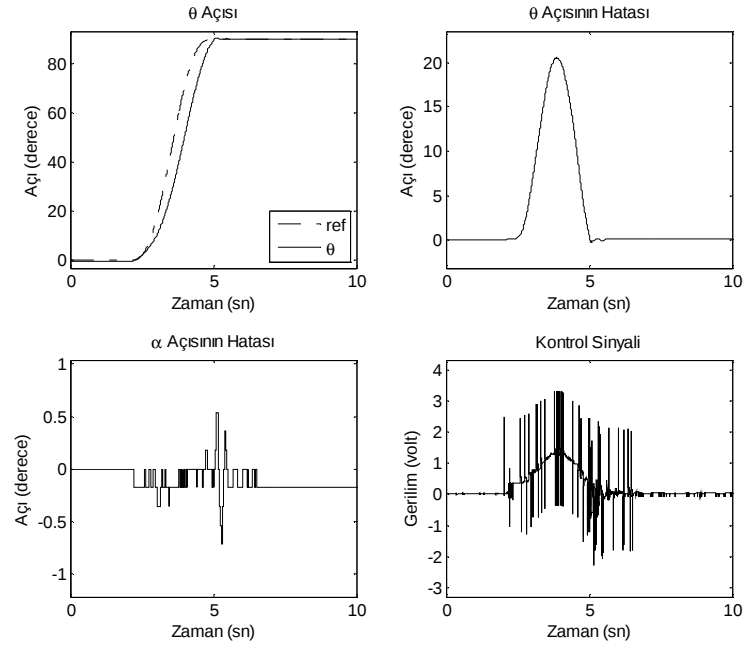
kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi sırasında elde edilen sonuçları Tablo 5.15’ de gösterilmektedir.

Tablo 5. 15: Bulanık mantık kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları

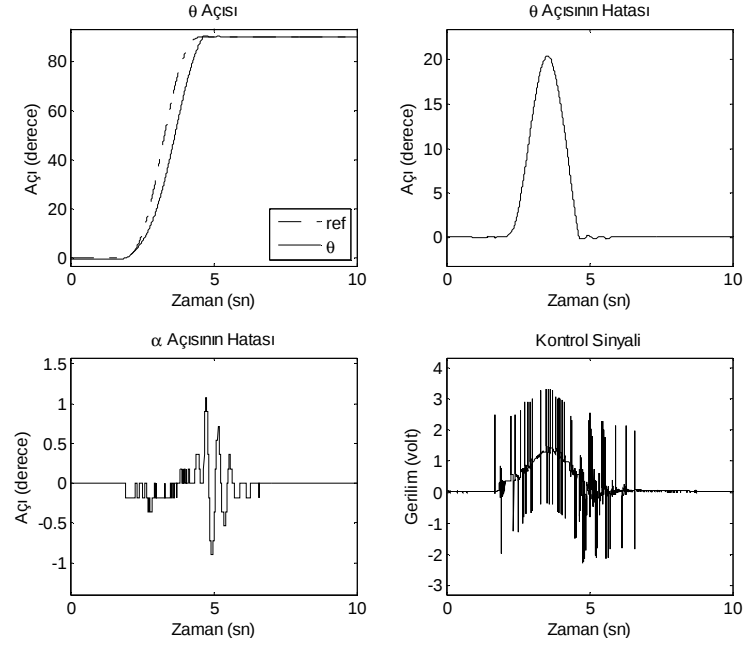
Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.36	0.26	0.015
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.18	0.22	0.01
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.36	1	0.1
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.36	0.34	0.025
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.54	1.5	0.1
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	2.2	6.8	0.4

Tablo 5.15’ deki deney sonuçlarından da kolaylıkla görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör ile sinüzoidal yörünge rakibi deneyinde, eklem uzunluğu artırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında beklenildiği gibi kontrolör performansı düşmektedir. Aynı zamanda uç işlevcideki titreşim miktarı, θ açısında oluşan hatalar ve referans sinyalin takibinde oluşan faz farkı artmaktadır. Ancak, yapılan deneyler göz önünde bulundurulduğunda bulanık mantık kontrolörün sinüzoidal yörünge cevabının oldukça tatmin edici sonuçlar içerdiği açıktır.

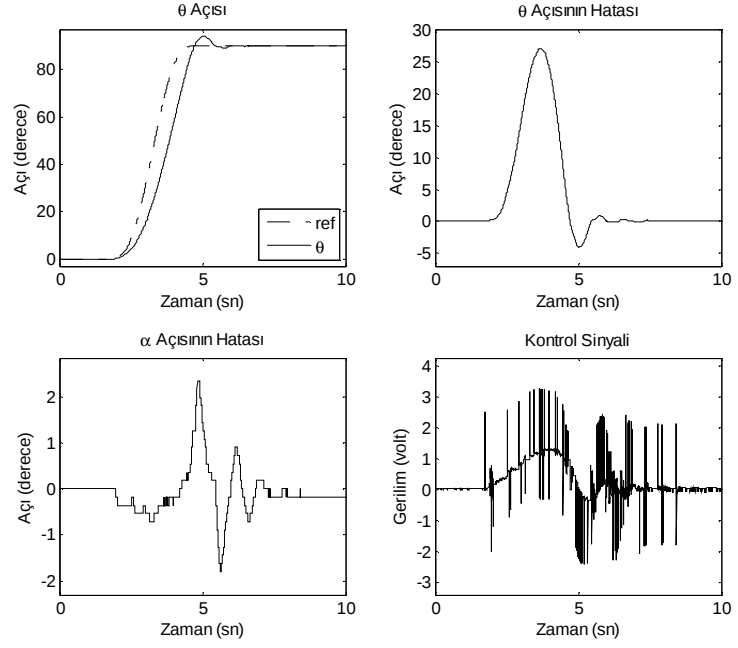
5.5.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri



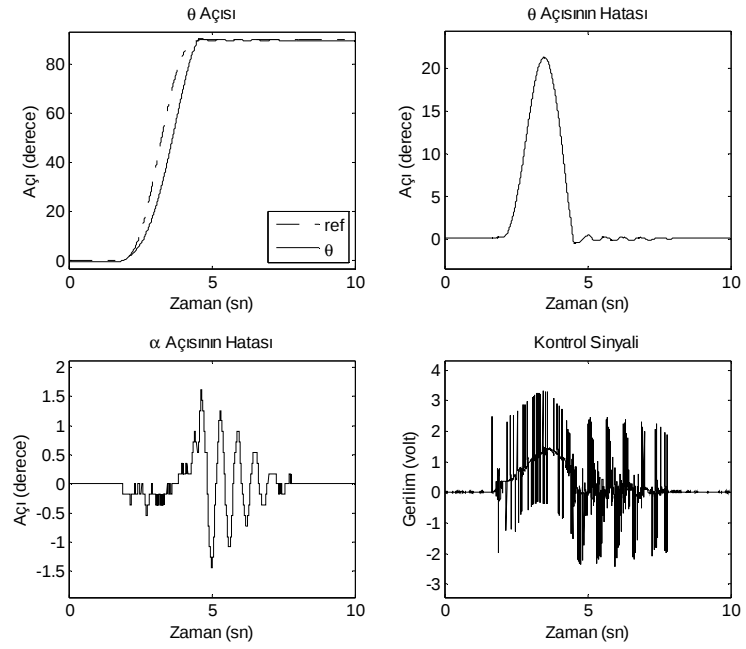
Şekil 5. 71: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



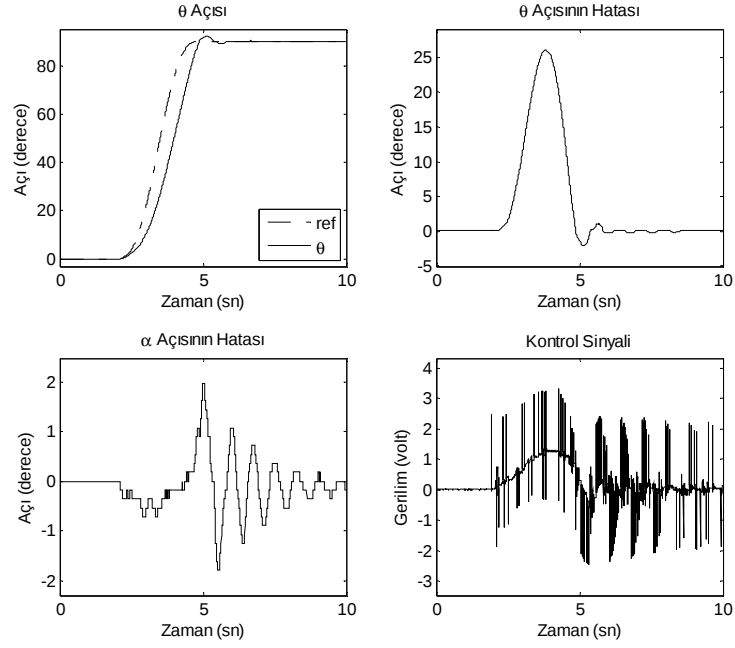
Şekil 5. 72: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



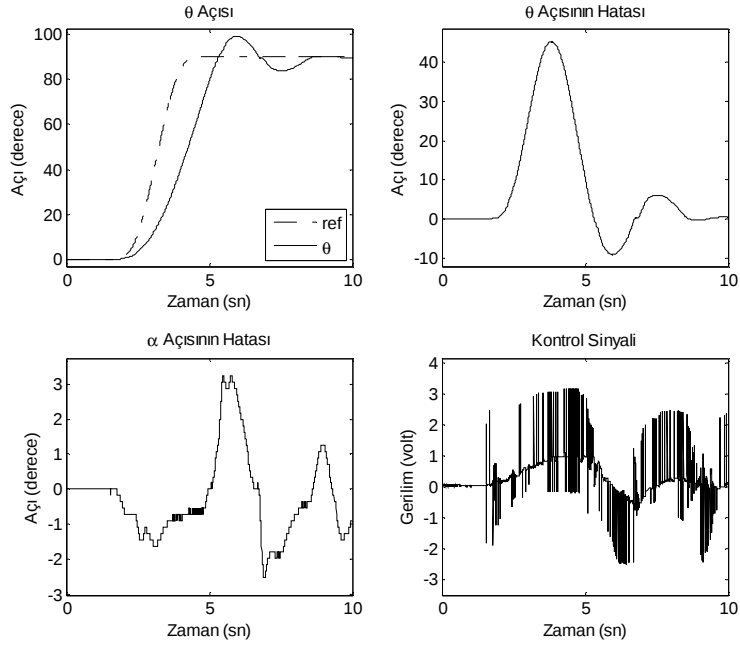
Şekil 5. 73: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 74: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 75: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 76: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.71 – 5.76’ da esnek eklemlili robot kolunun bulanık mantık kontrolör için kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri verilmiştir. Beklenildiği gibi ve diğer deneylerde de görüldüğü gibi eklem uzunluğunu arttırmak ve yay sabitini düşürmek kane yörüngesi takibi deneyinde de θ ve α açılarındaki hataların artmasına sebep

olmuştur. Kane yörünge takibi deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.16’ da verilmektedir.

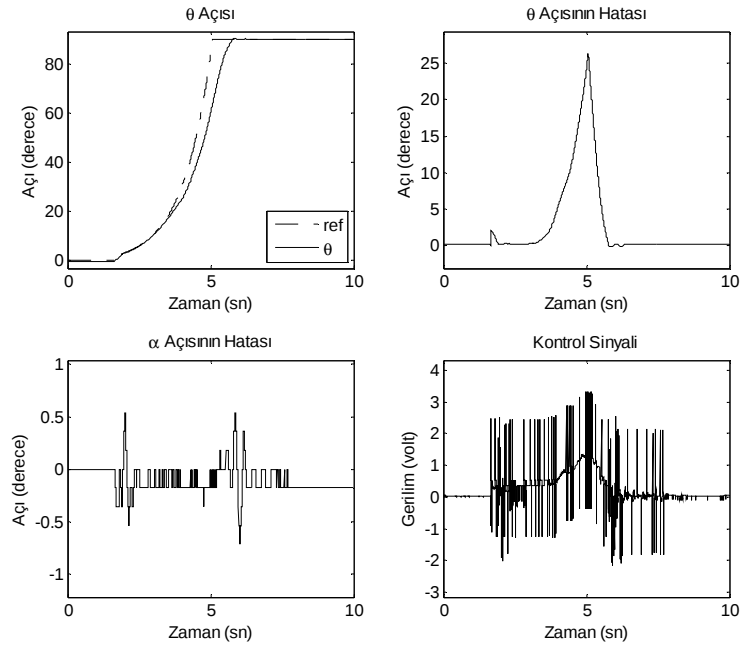
Tablo 5. 16: Bulanık mantık kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.54	20.2	0.4	0.1
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.08	20.5	0.4	0.06
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.34	27	0.45	0.15
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.62	21.3	0.42	0.05
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.98	26.02	0.43	0.1
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3.24	45.4	0.8	0.2

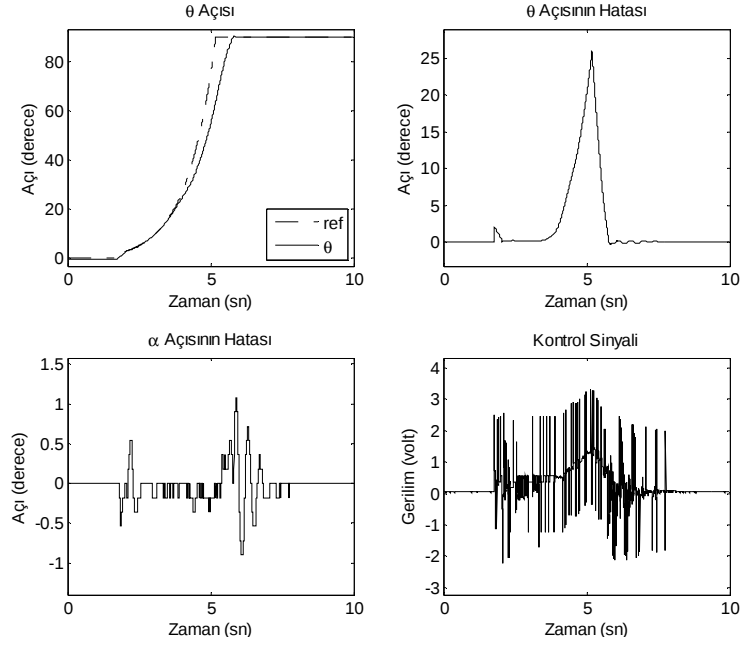
Deney sonuçlarında da görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör için yapılan kane fonksiyonu yörüngesi takibi deneylerinde, sistemin model parametreleri olan eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti azaldıkça eklem uc işlevcisinde oluşan salınım genliği artmaktadır. Söz konusu yörünge takibi deneyinde θ açısında oluşan hataların sebebi, eklem uc işlevcisinin istenilen referans yörüngeyi belirli bir faz farkı ile takip etmesinden kaynaklanmaktadır. Ve yine görüleceği üzere eklem uzunluğu arttırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında θ

açısında oluşan bu hatalar, esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisinin oturma zamanı ve θ açısında oluşan aşma miktarı artmaktadır. 0.4 m uzunluğunda eklem, 58.86 N/m yay sabitine sahip esnek eklemli robot kolu için tasarlanan bulanık kontrolör kane fonksiyonu yörüngesini belirli bir faz farkı ve oldukça küçük hatalar ile takip ettiği gözlemlenmiştir.

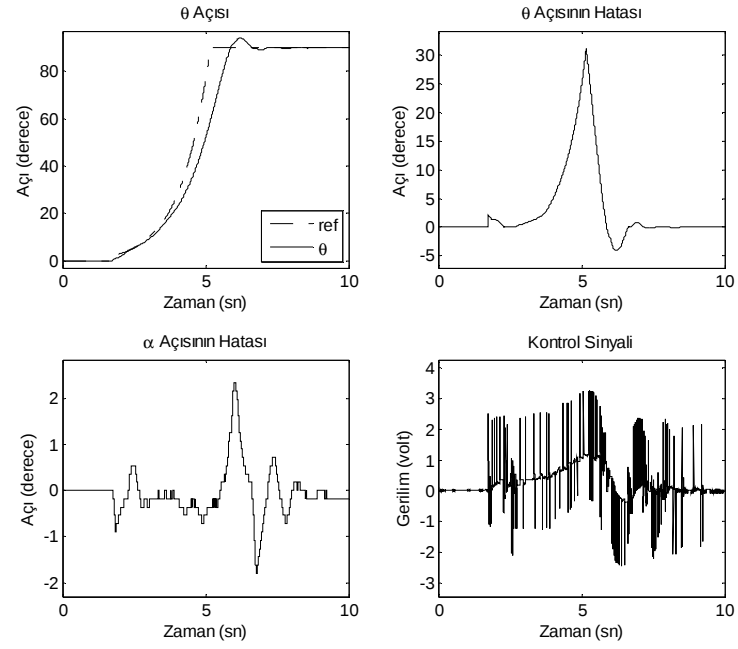
5.5.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri



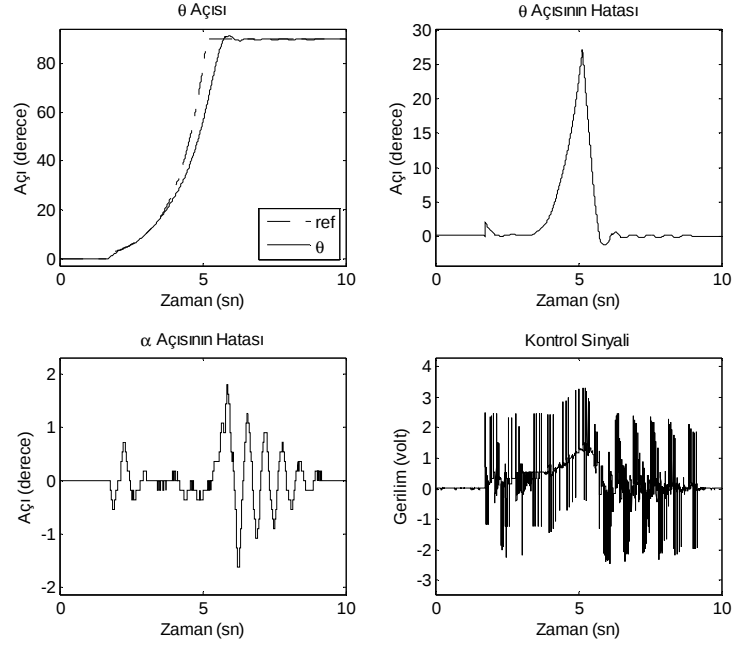
Şekil 5. 77: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



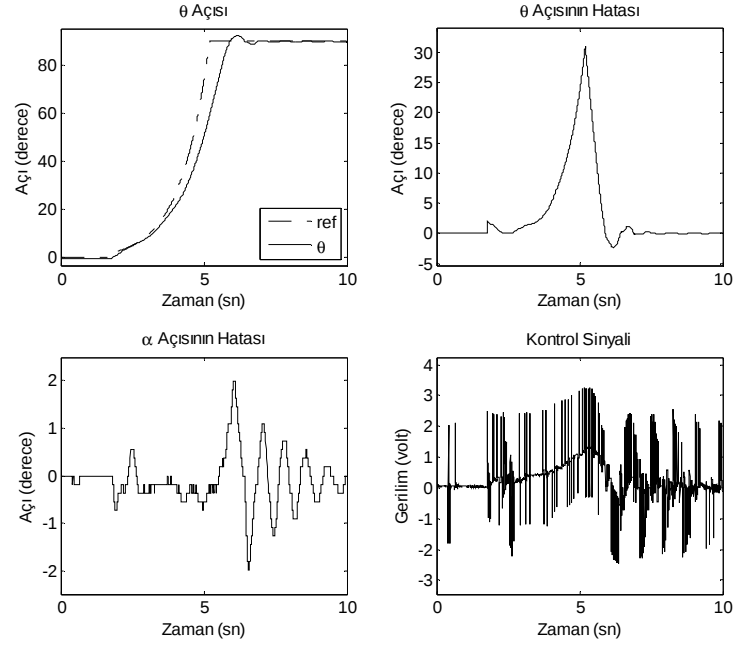
Şekil 5. 78: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



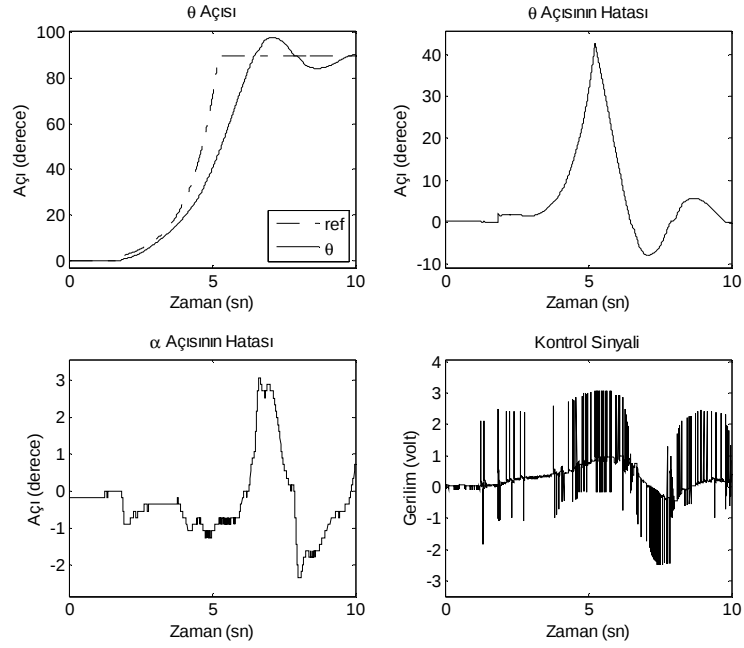
Şekil 5. 79: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 80: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 81: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 82: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.77 – 5.82’ de esnek eklemlili robot kolunun altı farklı modeli için bulanık mantık kontrolör ile gerçekleştirilen üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir. Tablo 5.17’ de esnek eklemlili robot kolunun bulanık mantık kontrolör ile yapılan üstel fonksiyon yörünge takibi deney sonuçları gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere ve esnek eklemlili robot koluna uygulanan diğer deneylerden de bilindiği üzere eklem uzunluğunun artması ve yay sabitinin azalması kontrolör performansını kötü etkilemektedir. Ayrıca uygulanan üstel yörüngede referans sinyal devamlı artan şekilde arttığı için kontrolör uygulanan yörüngeyi başlangıçta faz farkı oluşmadan, sona doğru faz farkı artarak takip etmektedir. Ayrıca burada dikkat edilirse θ açısında oluşan hatalar faz farkının artmasından kaynaklanmaktadır. Verilen şekillere dikkat edilecek olursa θ açısında oluşan hataların en büyük olduğu noktalarda sistemin faz farkı en büyük değere ulaşmaktadır. Kontrolörün tasarlandığı model dikkate alındığında, geliştirilen bulanık mantık kontrolör, üstel yörünge takibini θ açısında artan bir faz farkı ve α açısında oluşan ve değeri en yüksek 1.08 dereceye ulaşan ufak titreşimlerle gerçekleştirmektedir.

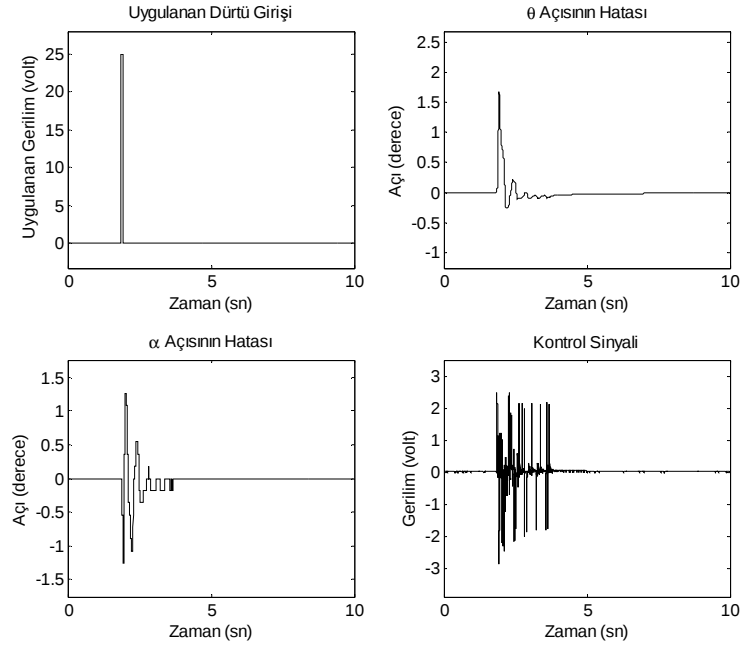
Tablo 5. 17: Bulanık mantık kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.54	26.3	0.4	0.14
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.08	25.9	0.4	0.08
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.34	31.2	0.42	0.14
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.8	27.2	0.37	0.05
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.98	31	0.35	0.12
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3	42.5	0.5	0.15

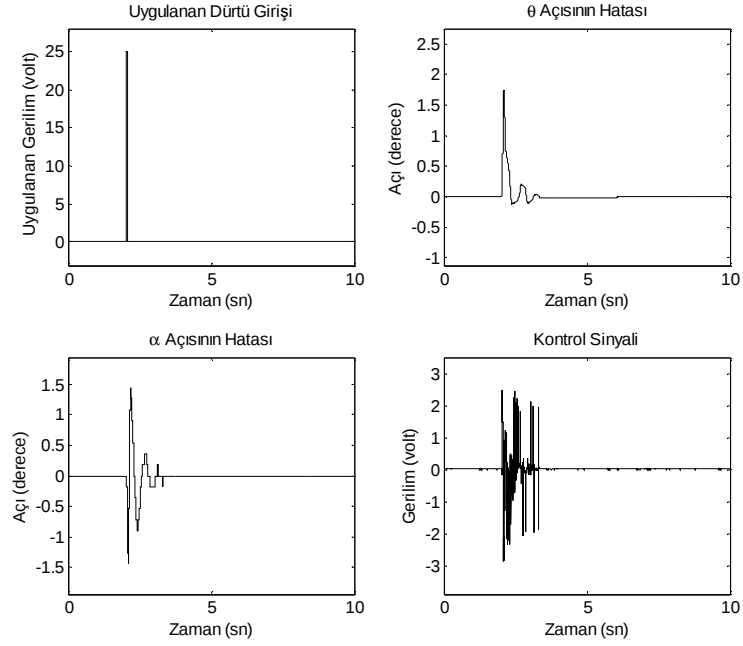
5.5.2.3. Bulanık mantık kontrolörün gürbüzlüğünün test edilmesi

Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için geliştirilen bulanık mantık kontrolörün gürbüzlüğünün ve kararlılığının test edilebilmesi için sisteme, dürtü girişi deneyleri ve dış darbe deneyleri uygulanmıştır. Ve daha öncede bahsedilen altı farklı model için test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki başlık altında toplanmış ve karşılaştırılmıştır.

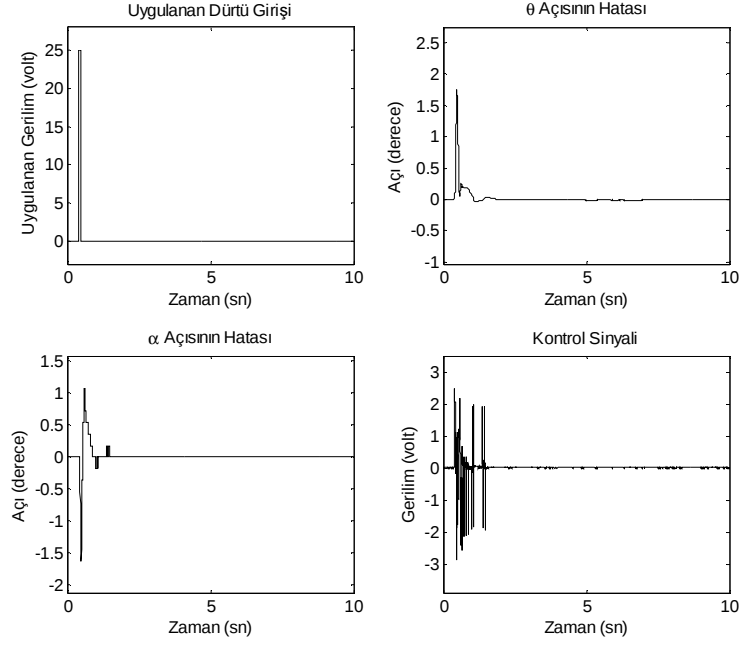
5.5.2.3.1. Bulanık mantık kontrolörün dürtü girişi deneyleri



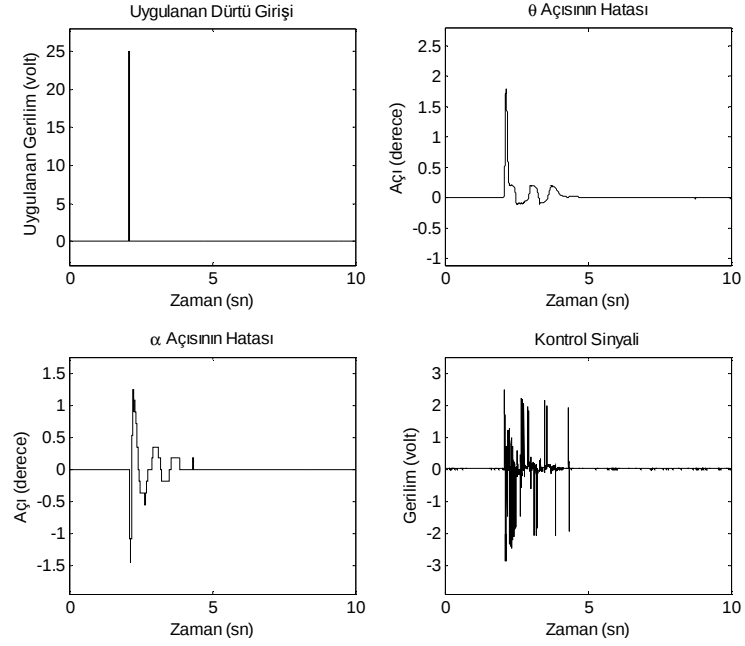
Şekil 5. 83: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



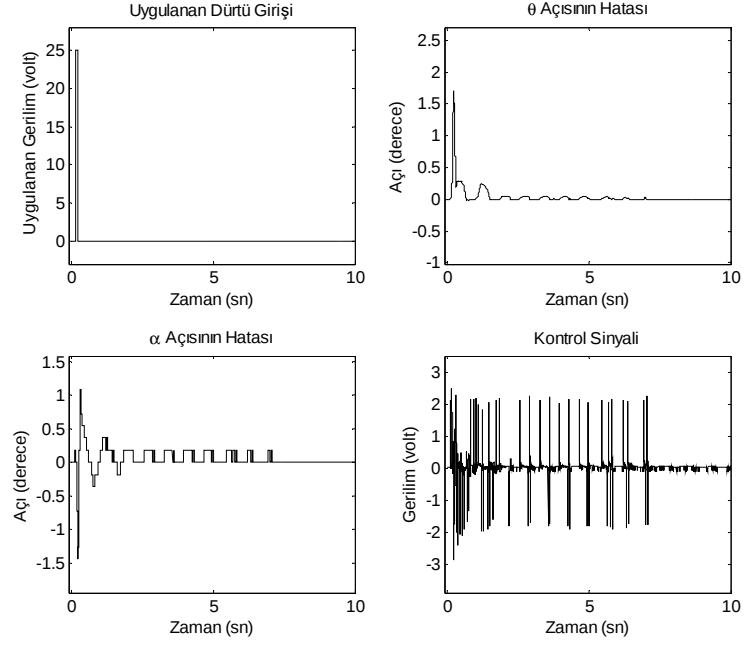
Şekil 5. 84: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



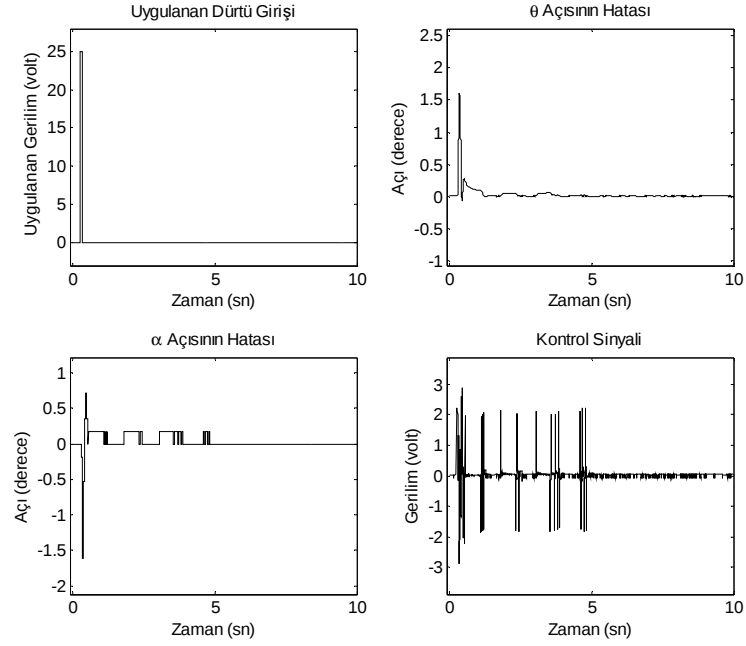
Şekil 5. 85: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 86: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 87: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 88: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

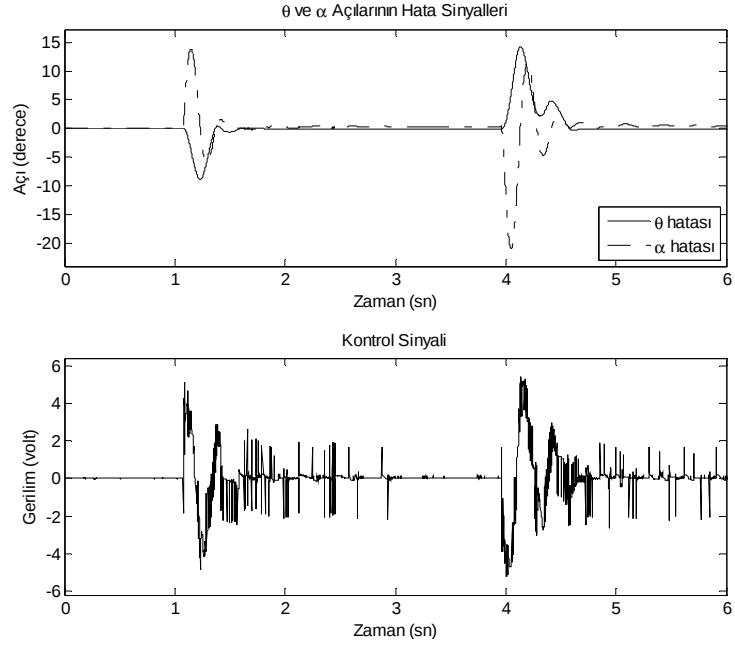
Şekil 5.83 – 5.88’ de esnek eklemlı robot kolunun altı farklı modeli için dürtü yanıtı gösterilmektedir. Yapılan deneylerden de görüleceğı üzere kullanılan farklı eklem uzunluğı ve farklı yay sabitleri θ ve α açılarının oturma zamanlarını ve aşım miktarlarını etkilemektedir. Tablo 5.18’ da esnek eklemlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için dürtü yanıtının sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5. 18: Bulanık mantık kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları

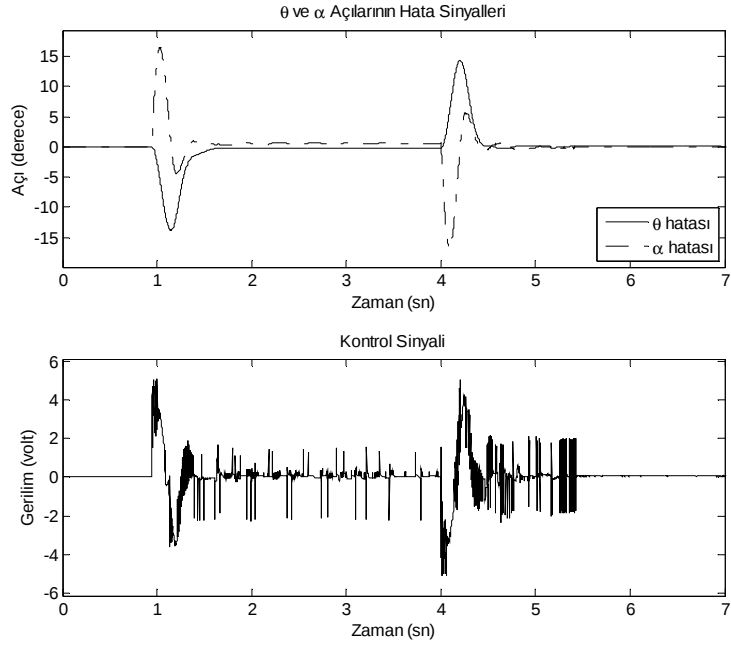
Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğı: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.2	1.9	1.68	1.26	0.01	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğı: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.6	1.4	1.75	1.44	0.005	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğı: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.5	1	1.82	1.62	0.005	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğı: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.4	2.1	1.79	1.44	0.08	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğı: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	3.5	6	1.87	1.44	0.05	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğı: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	3	4.5	1.62	1.62	0.09	0

Deney sonuçlarından da görüleceğı üzere, esnek eklemlı robot kolunun dürtü yanıtı deneylerinde, bulanık mantık kontrolör anlık olarak motora uygulanan 24 voltluk gerilime karşı oldukça iyi bir kontrol performansı göstererek kararlılığını korumuştur. Burada eğer dikkat edilirse eklem uzunluğı sabit tutulup yay sabiti azaltıldığında θ ve α açılarının oturma zamanları azalmakta, bu açılarda oluşan hata değeri artmaktadır.

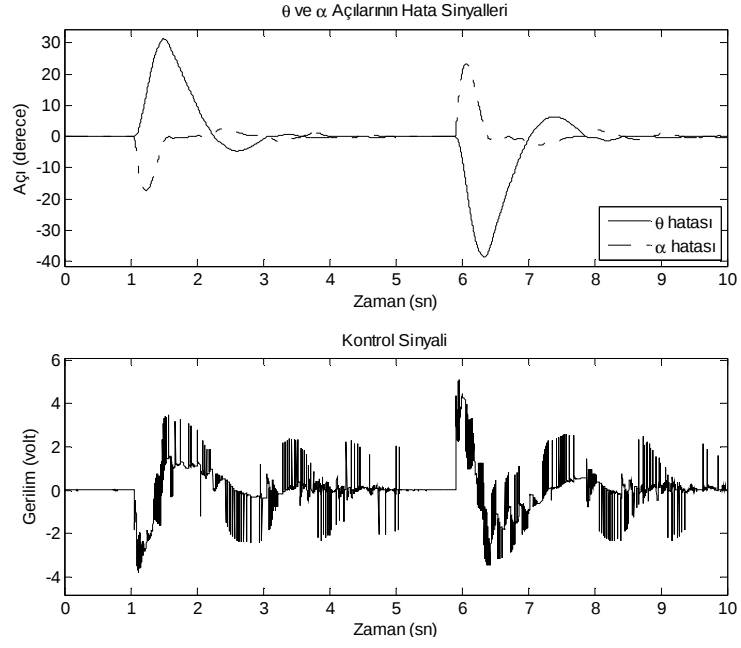
5.5.2.3.2. Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri



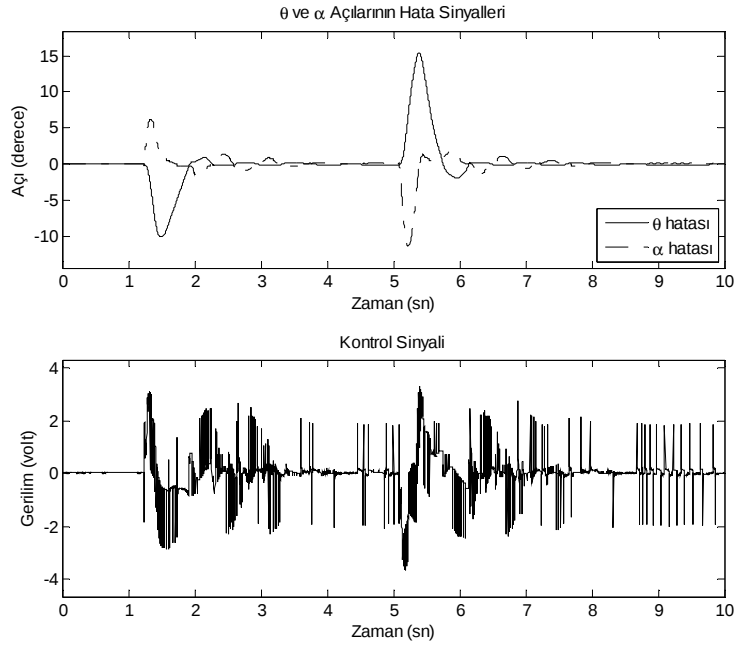
Şekil 5. 89: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



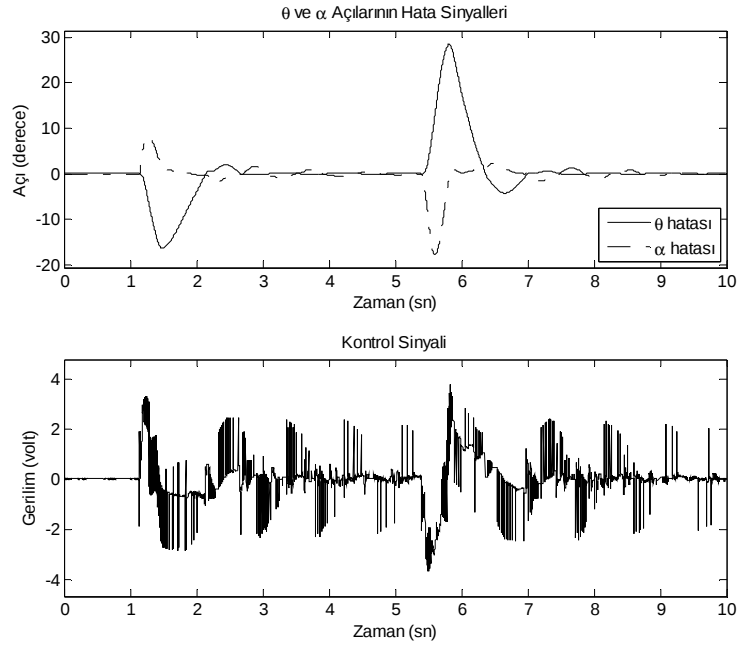
Şekil 5. 90: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



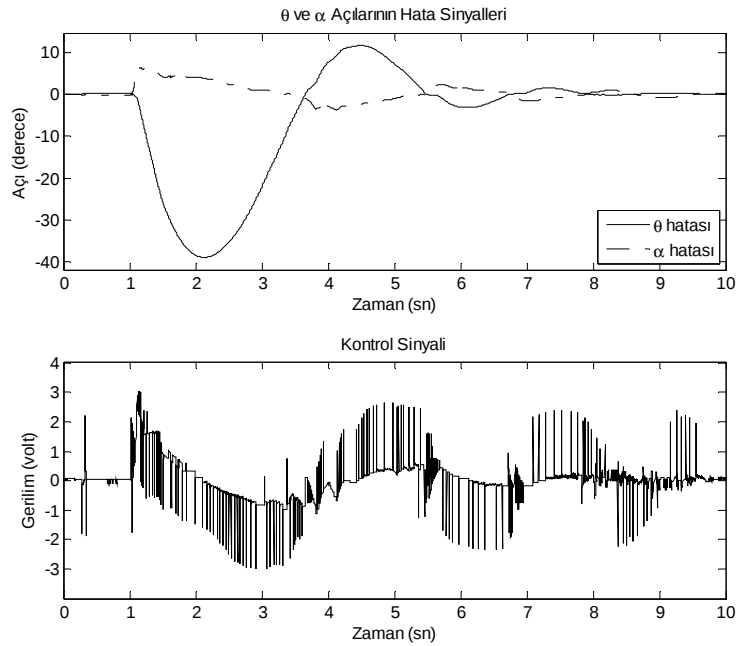
Şekil 5. 91: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 92: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 93: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 94: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.89 – 5.94’ da esnek eklemli robot kolunun dışarıdan gelen bozucu darbe deneyleri gösterilmektedir. Bozucu darbeler esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisine ani bir darbe uygulanmasıyla oluşturulmuş olup, bu sayede geliştirilen bulanık mantık kontrolörün bozucu darbeler karşısındaki kararlılığı ve gürbüzlüğü

test edilebilmektedir. Tablo 5.19’ da esnek eklemli robot kolunun dışsal bozucu darbe deney sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5. 19: Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.6	1	14.5	21	0.15	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.8	1.1	14.8	16.5	0.18	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2	2.6	38.5	23	0.15	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.8	2.2	15.4	12	0.15	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2	2.4	28.5	17.6	0.17	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	6.9	7.8	39	6.5	0.25	0

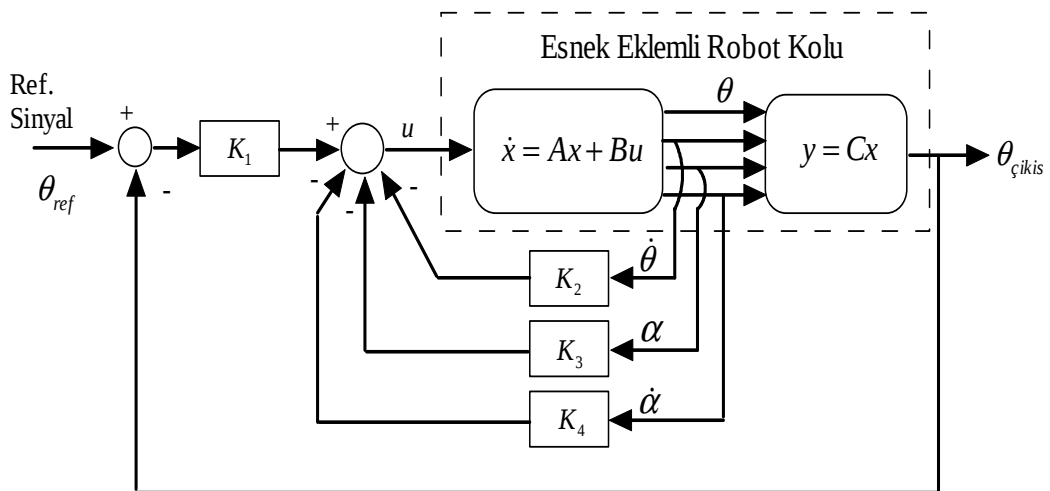
Elde edilen deney sonuçlarında görüleceği üzere, esnek eklemli robot kolunun bulanık mantık kontrolör ile kontrolü sırasında, eklem uc işlevcisine dışarıdan uygulanan bozucu darbeler karşısında geliştirilen kontrolör oldukça kararlı bir yapı oluşturmakta ve seçilen model parametrelerine göre belirli süreler içerisinde sistemi başlangıç durumuna getirmektedir. Yapılan deneylerde görüleceği üzere, eklem uzunluğu artırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında beklenildiği gibi sistemin oturma zamanı artmaktadır. Bulanık mantık kontrolörün tasarlandığı model için yapılan deney olan deney 2 incelendiğinde kontrolör, θ açısını 0.8, α açısını ise 1.1 saniyede kararlı duruma getirmekte ve oldukça iyi bir performans göstermektedir.

5.6. Esnek Eklemlı Robot Kolunun Durum Geri Beslemeli Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu kısımda esnek eklemlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusu incelenecektir. Geliştirilen kontrolör esnek eklemlı robot kolunun eklem uzunluğunun ve yay sabitinin değiştirilmesiyle oluşan farklı modellerine uygulanarak kontrolör performansı test edilecektir. Ayrıca tasarlanan durum geri beslemeli kontrolörün blok diyagramı, Simulink' te oluşturulan kontrolör yapısı da ilgili başlıklar altında verilecektir.

5.6.1. Durum geri beslemeli kontrolör yapısı ve blok diyagramları

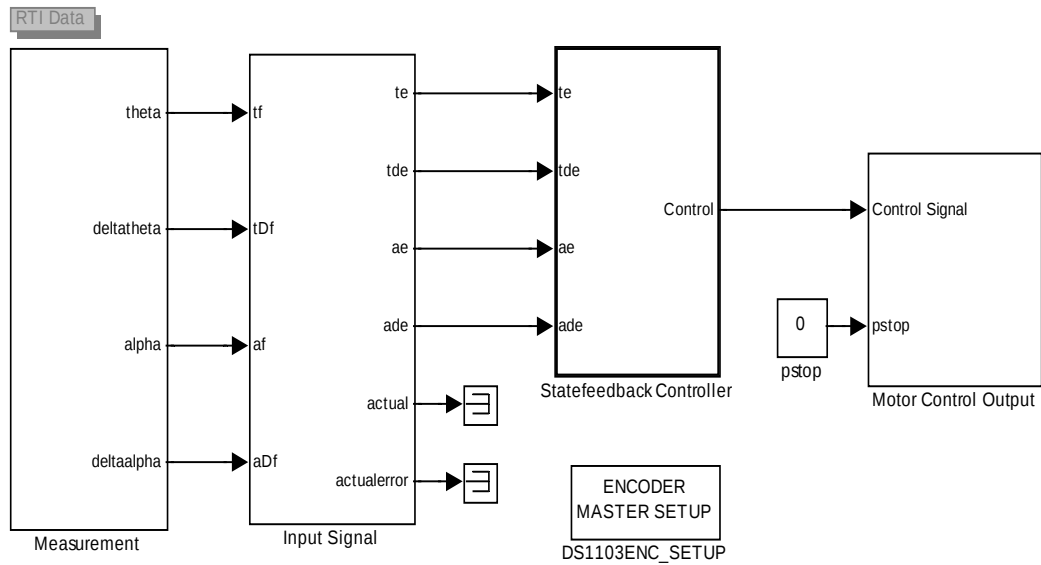
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi esnek eklemlı robot kolu sisteminin çıkışları motor dönme açısı θ ve eklemin uç işlevcisinin sanlınım açısı α olarak belirtilmiştir. Bilindiği üzere durum geri beslemeli kontrol yönteminde sistemin çıkışları geri beslenerek belirli kat sayılarla çarpılır ve toplanarak sisteme kontrol sinyali olarak uygulanır. Durum geri beslemeli kontrol yönteminde geri beslenen durumların hangi katsayılar ile çarpılacağı ya deneme yanılma yöntemiyle sistemi çalıştırarak ya da doğrusal karesel düzenleyici (LQR) yöntemi ile elde edilir. Ancak doğrusal karesel düzenleyici yöntemini kullanmak için sistemin modeline ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5. 95: Durum geri beslemeli kontrolör blok diyagramı

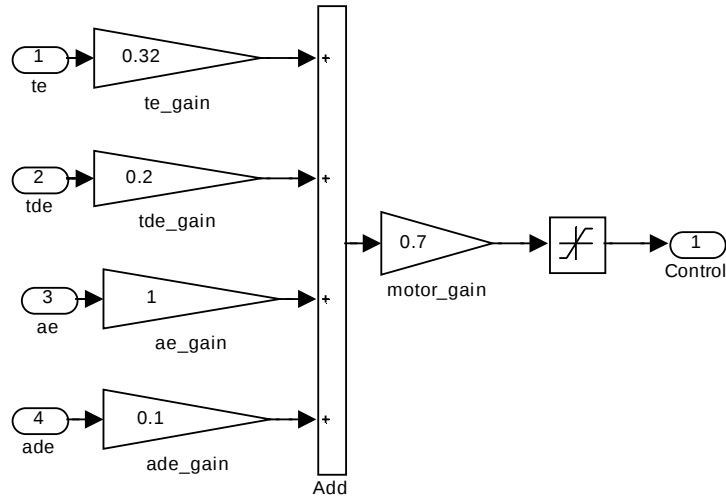
Bu kısımda oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör yönteminde geri beslenen durumların kat sayıları deneme yanılma yöntemiyle elde edilmiş ve esnek eklemli robot kolu sisteminde uygulanmıştır. Şekil 5.95’ te esnek eklemli robot kolunun kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün blok diyagramı gösterilmektedir. Bu bölümde tasarlanan durum geri beslemeli kontrolör eklem uzunluğu 0.4 m ve yay sabiti 58.86 N/m olan esnek eklemli robot kolu için tasarlanmış olup kullanılan diğer modeller kontrolörün performansını test etme amacı taşımaktadır. Şekil 5.95’ te de görüleceği üzere durum geri beslemeli kontrolörde sistemin durumları olarak, esnek eklemli robot kolunun motor dönme açısı olan θ , motorun dönüş hızı olan $\dot{\theta}$, eklem uc işlevcisinin salınım açısı olan α ve eklem uc işlevcisinin salınım hızı olan $\dot{\alpha}$ kullanılmıştır. Geri beslenen durumlar deneme yanılma yöntemi ile elde edilen kazançlar ile çarpılıp, toplanarak motor sürücüsüne kontrol sinyali olarak uygulanmıştır. Ayrıca burada, esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisinin konumlaması için kullanılan referans sinyal motorun dönme açısıdır (θ).

Esnek eklemli robot kolunun kontrolü için tasarlanan durum geri beslemeli kontrolör Matlab/Simulink ortamında tasarlanıp, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla sisteme uygulanmıştır. Şekil 5.96’ da Simulink ortamında tasarlanan ana kontrol şeması gösterilmektedir.



Şekil 5. 96: Durum geri beslemeli kontrolörün simulink blokları

Şekil 5.95’ ten görüleceği üzere, simulink blokları oluşturulurken dört ana blok kullanılmıştır. Ölçüm bloğu, esnek eklemli robot kolunun durumlarını ölçme işlemini gerçekleştirir. Giriş bloğu, robot koluna verilecek olan giriş sinyalinin ayarlandığı bloktur. Kontrolör bloğu, durum geri beslemeli kontrolörün bulunduğu ve kontrol sinyalinin üretildiği bölümdür. Çıkış bloğu ise esnek robot kolunun hareketini sağlayan motor sürücüsüne gereken analog sinyali üreten bloktur. Şekil 5.97’ de esnek eklemli robot kolu için simulink’ te tasarlanan durum geri beslemeli kontrolörün ana kontrolör blokları ve kontrolör yapısında kullanılan kazançlar gösterilmektedir.



Şekil 5. 97: Simulink’ te oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör şeması

Şekil 5.96’ da görüleceği üzere robot kolundan geri besleme alınarak elde edilen bütün durumlar belirli kazançlar ile çarpılıp toplanarak motora iletilecek olan kontrol sinyali üretilmiştir.

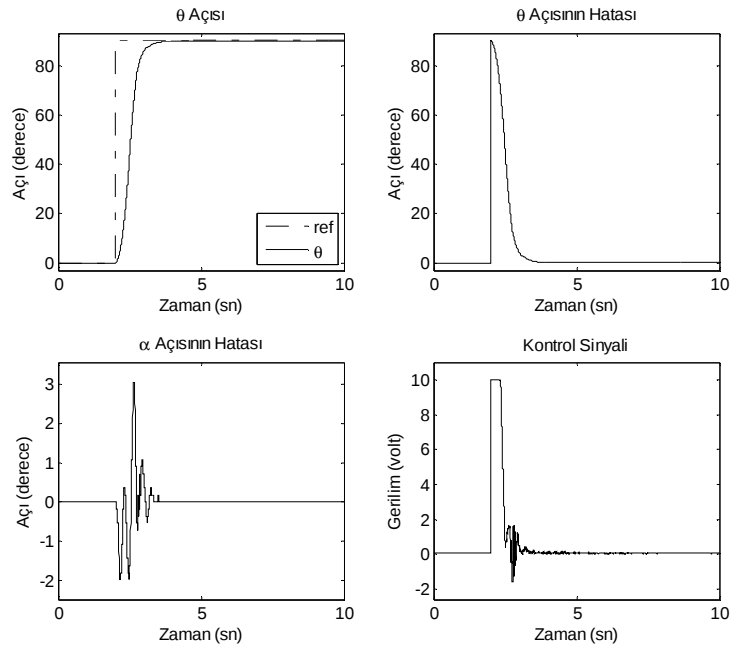
5.6.2. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Bu kısımda esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi sırasında elde edilen deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması ayrı başlıklar altında verilecektir.

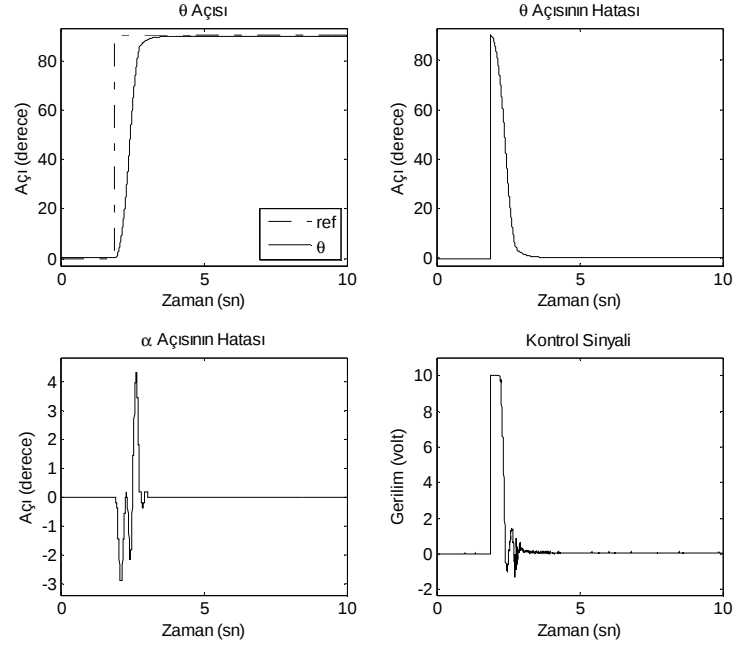
Geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün kontrol performansının test edilmesi için birçok deney yapılmıştır. Yapılan bu deneyler, daha önce bölüm 5.4.2’ de bahsedilen, konum kontrolü, yörünge takibi ve tasarlanan kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünün test edilmesi için yapılan deneylerdir. Ayrıca tasarlanan kontrolörün performansının daha iyi test edilebilmesi için eklem uzunluğu ve yay sabitleri değiştirilerek deneyler tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.6.2.1. Esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneyleri

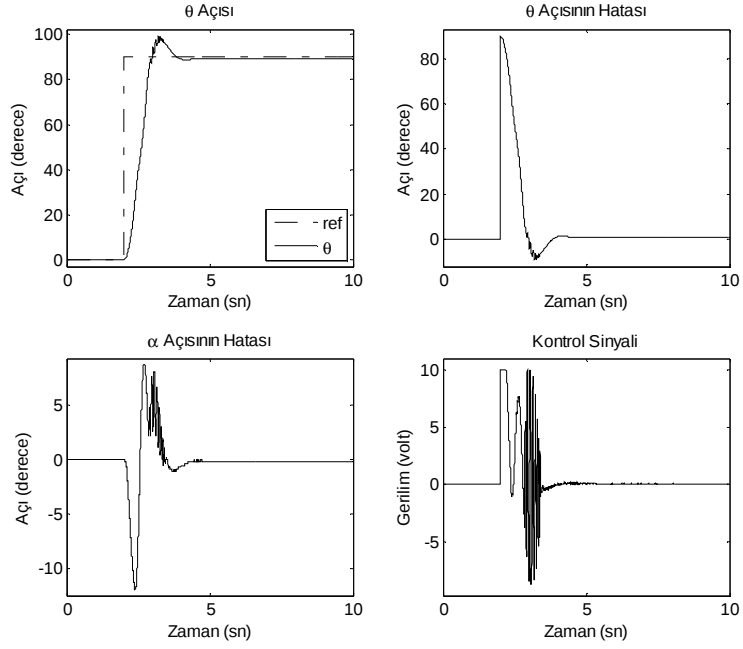
Şekil 5.98 – 5.103’ de görüldüğü üzere esnek eklemli robot kolunun konum kontrolü deneyleri birim basamak girişi uygulanmasıyla elde edilmiştir. Yine aynı şekillerden görüleceği üzere eklem yay sabiti ve eklem uzunluğu değiştirilerek oluşturulan toplam altı farklı model için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün konum kontrolündeki performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.20’ de karşılaştırılmıştır.



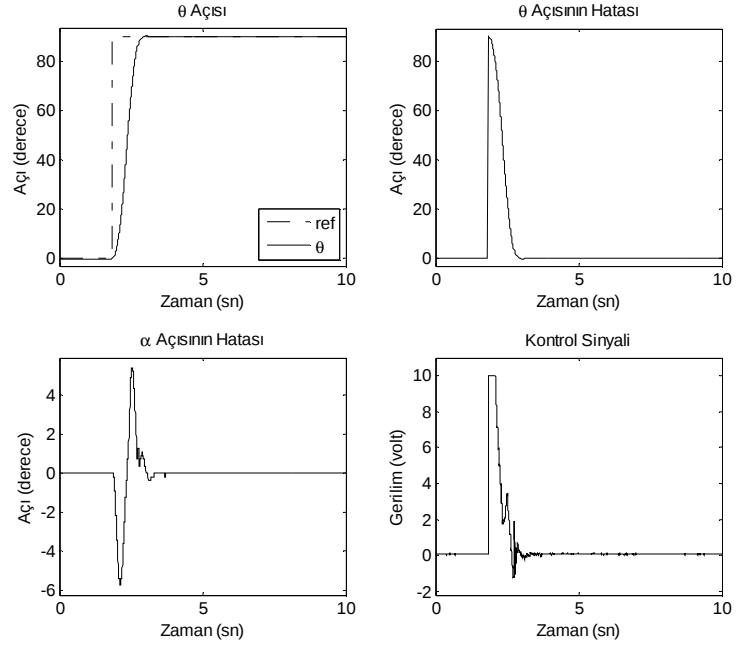
Şekil 5. 98: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



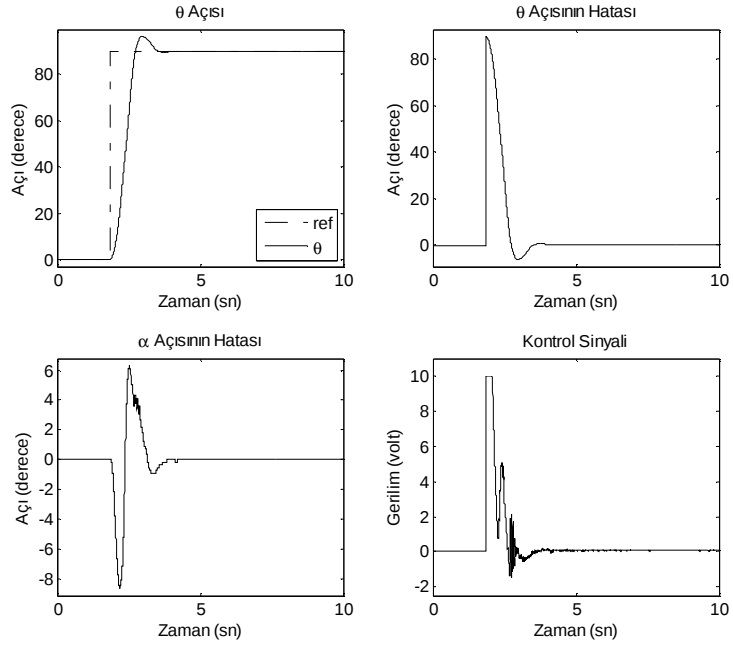
Şekil 5. 99: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



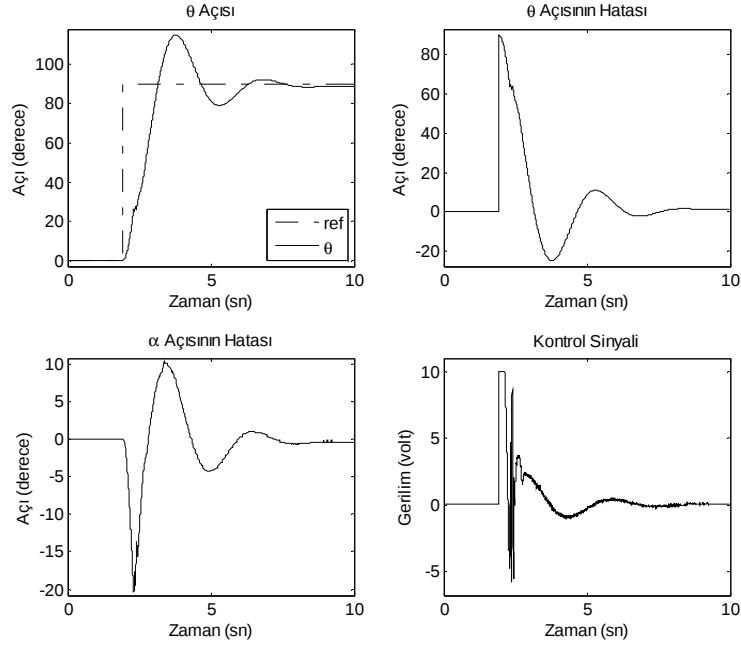
Şekil 5. 100: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 101: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 102: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 103: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Tablo 5.20’ de görülen esnek eklemli robot kolunun birim basamak yanıtı incelendiğinde, durum geri beslemeli kontrolörün, model parametrelerinin değiştirilmesi ile oluşturulan bütün robot modelleri için kararlı bir cevap oluşturduğu görülmüştür. Deney sonuçlarına bakılarak bir genelleme yapılacak olur ise, beklenildiği gibi eklem uzunluğunun artması ve yay sabitinin azalması θ ve α açılarının oturma zamanının artmasına, θ açısındaki yüzde aşma miktarının artmasına ve eklem uc işlevcisinin salınım açısı olan α açısındaki salınım genliğinin artmasına neden olmaktadır.

Daha öncede bahsedildiği üzere, bu bölümde tasarlanan durum geri beslemeli kontrolör deney 2’ deki model için tasarlanmış olup diğer deneyler kontrolör performansını incelemek için yapılmıştır. Deney 2’ de de görüleceği üzere geliştirilen kontrolör için sistemin oturma zamanı 1.3 sn, α açısında oluşan en büyük hata değeri 4.32 derece olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca θ açısında herhangi bir aşma olmamakla beraber tasarlanan geri beslemeli kontrolör için kalıcı durum hatası 0.09 dere olarak oluşmuştur.

Tablo 5. 20: Durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları

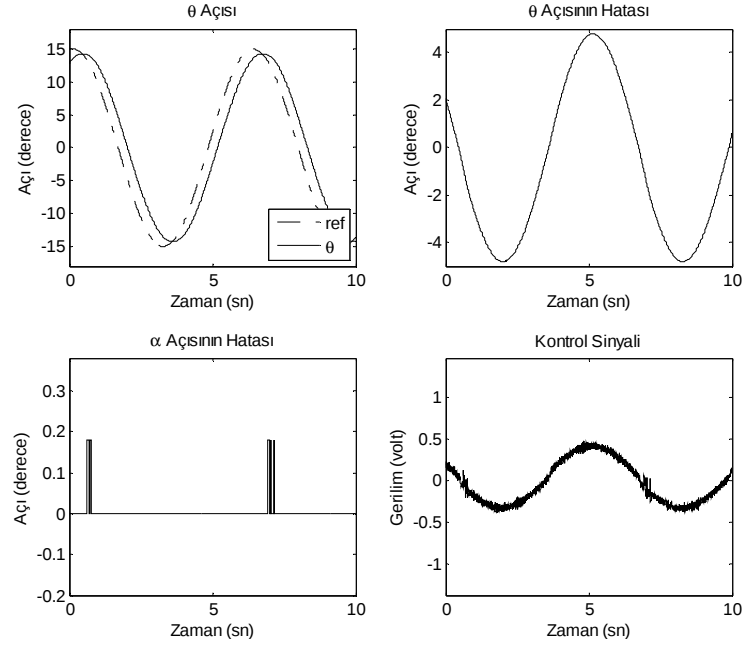
Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.25	1.5	0	3.05	0.09	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.3	1.2	0	4.32	0.09	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.4	2.2	10	12.05	0.5	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.1	1.8	0	5.76	0.1	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.4	2.2	6	8.64	0.1	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	4.2	6.1	25	20.34	0.1	0

5.6.2.2. Esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için yörünge takibi deneyleri

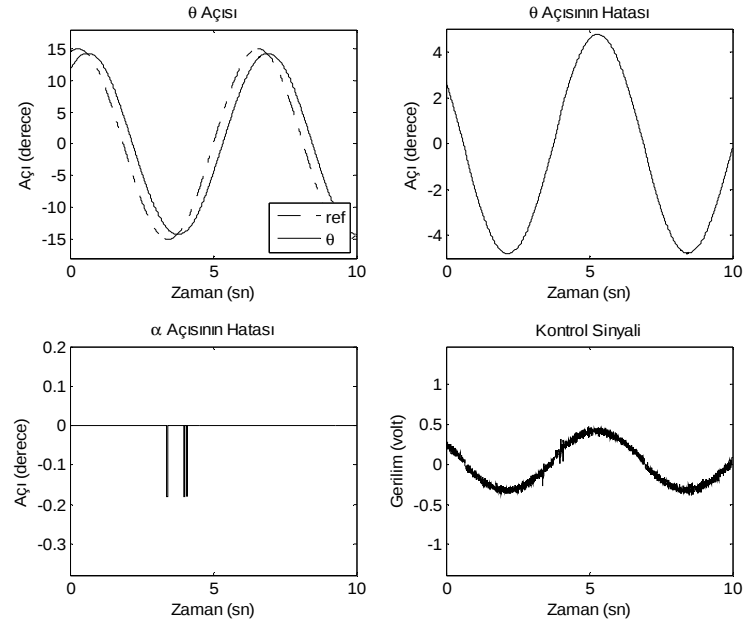
Bu bölümde esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrol yöntemi için yörünge takibi deney sonuçları gösterilmiştir. Bu bölümde geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör için toplam üç farklı yörünge takibi uygulaması yapılmıştır. Bunlar, sinüzoidal yörünge, kane fonksiyonu yörüngesi ve üstel fonksiyon yörüngesi olmak üzere üç kısımda incelenmiş ve ayrı ayrı kontrolör cevapları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca, bu bölümde gerçekleştirilen deneyler, esnek eklemlili robot kolunun eklem uzunluğu ve yay sabitinin değiştirilmesiyle oluşturulan altı farklı modeli için ayrıca tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

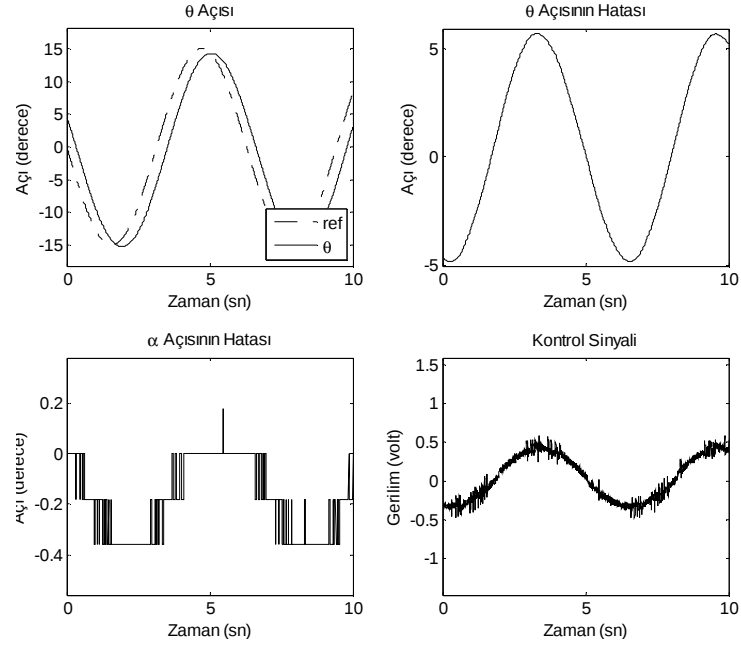
5.6.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri



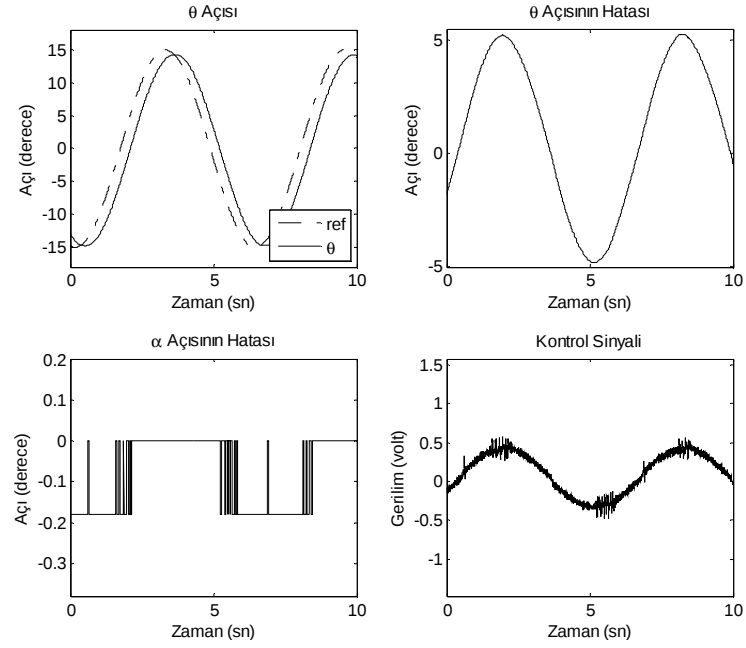
Şekil 5. 104: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



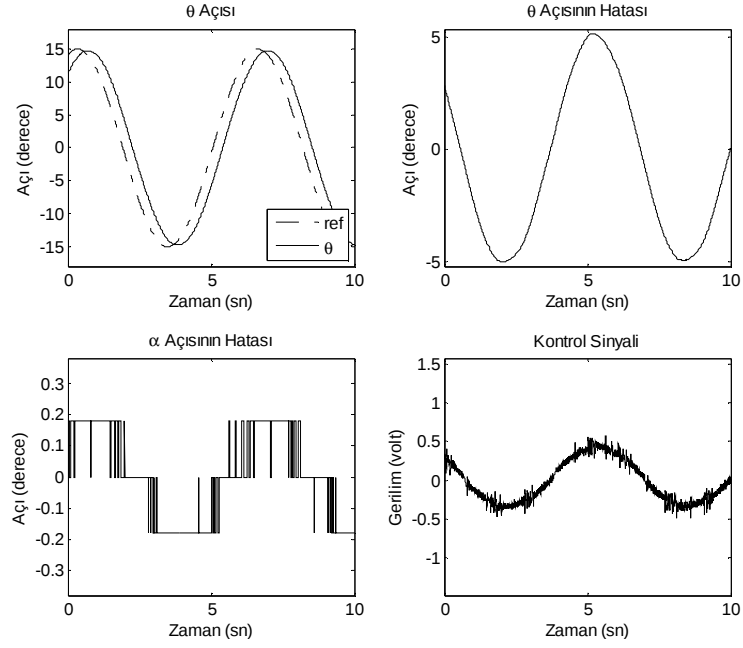
Şekil 5. 105: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



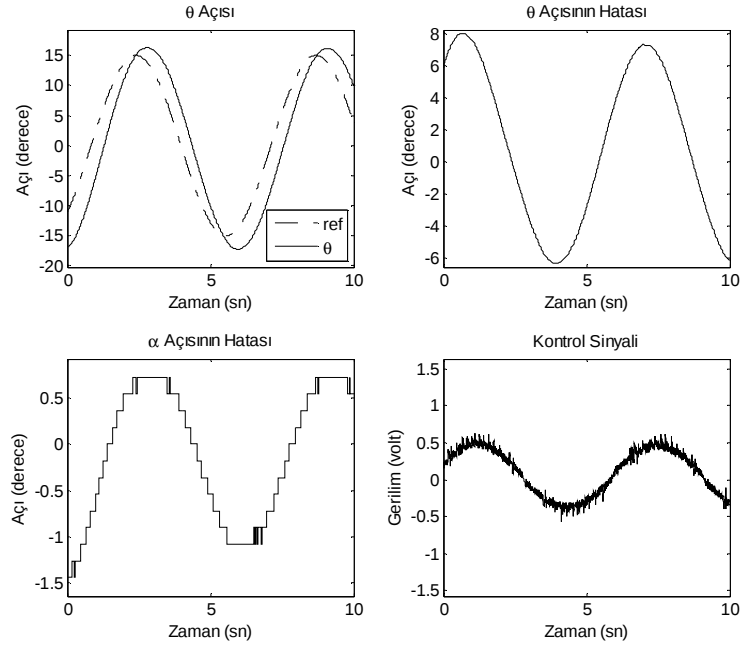
Şekil 5. 106: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 107: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 108: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 109: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

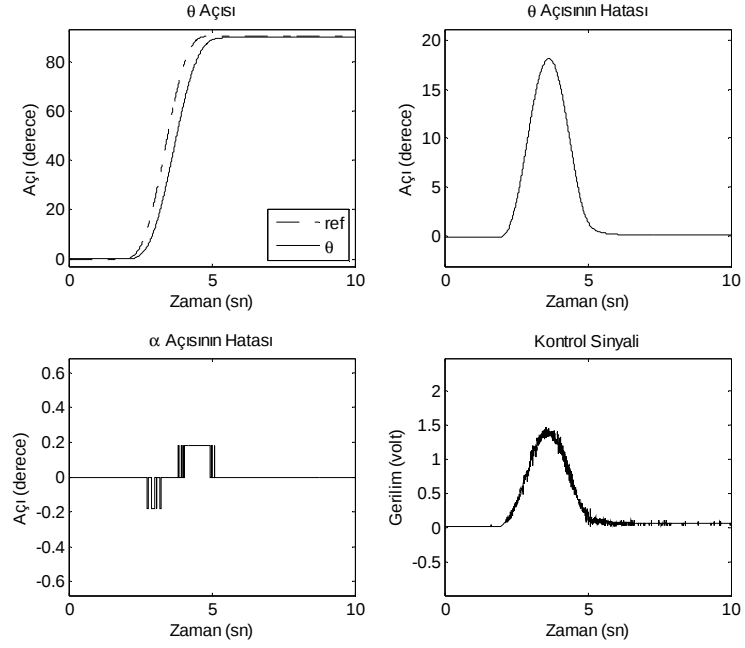
Şekil 5.104 – 5.109’ da esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için durum geri beslemeli kontrolör ile gerçekleştirilen sinüzoidal yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir. Deneylerden de görüldüğü üzere eklem uzunluğu arttığında ve yay sabiti düştüğünde tasarlanan kontrolörün kontrol performansı azalmakta ve görüleceği üzere θ ve α açısındaki hatalar artmaktadır. Durum geri beslemeli

kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi sırasında elde edilen sonuçları Tablo 5.21’ de gösterilmektedir. Yapılan deney sonuçlarından da kolaylıkla görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun istenilen yörüngeyi takibi sırasında 0.35 sn lik bir faz farkı oluşmaktadır. Ancak geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör sisteme girilen referans yörüngeyi takip ederken, yapılan ilk beş deneyden de görüldüğü gibi α açısında oldukça küçük titreşimler oluşmakta ve yapılan altıncı deneyde α açısındaki titreşim miktarı artmaktadır. Ayrıca beklenildiği gibi eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti düştükçe θ açısındaki hatalar artmaktadır.

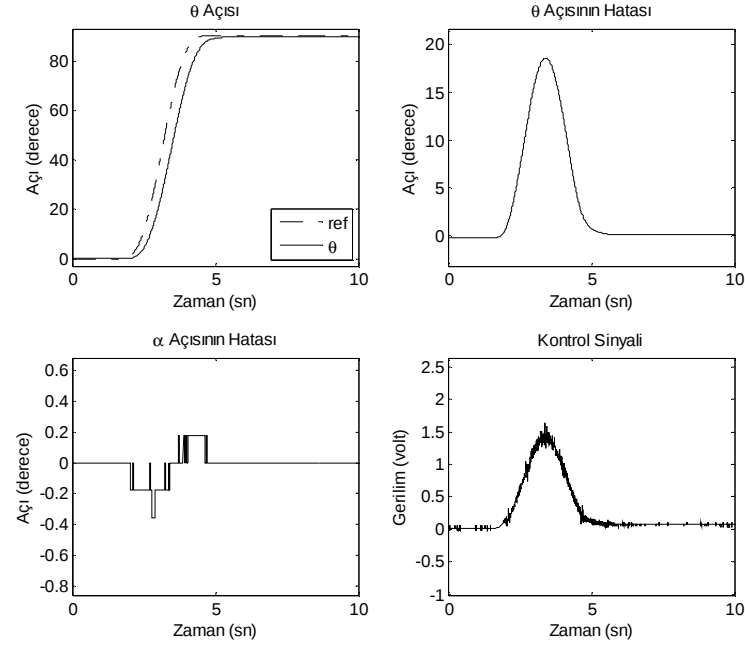
Tablo 5. 21: Durum geri beslemeli kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	4.75	0.32
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.18	4.78	0.32
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.36	5.7	0.38
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	5.1	0.34
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.18	5.15	0.35
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	0.54	7.3	0.4

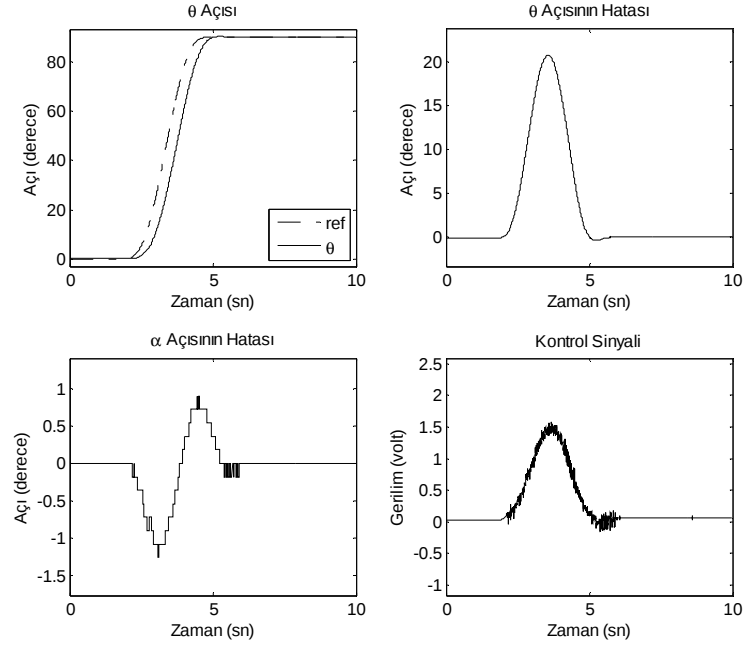
5.6.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri



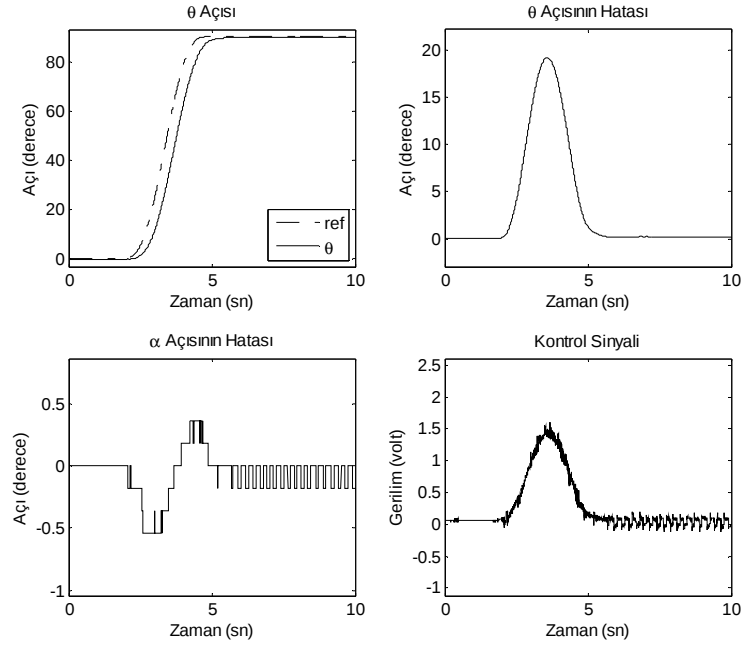
Şekil 5. 110: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



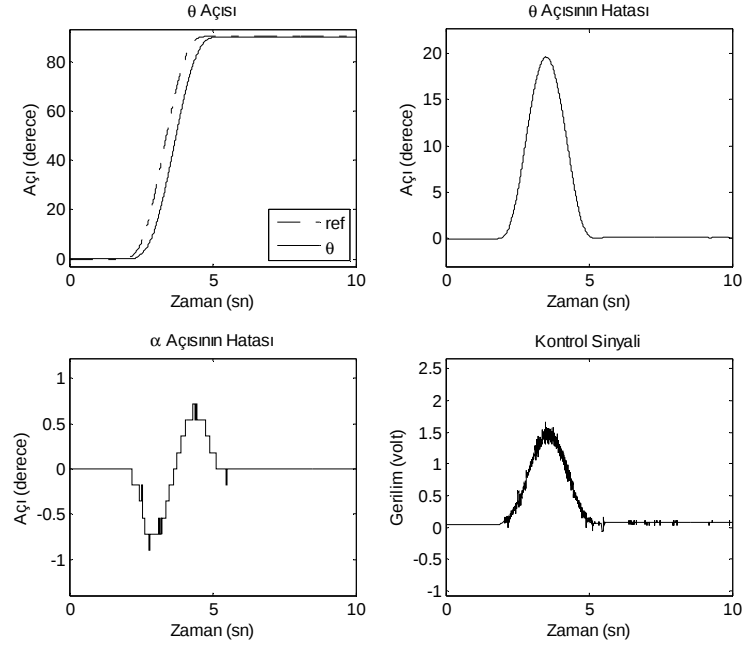
Şekil 5. 111: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



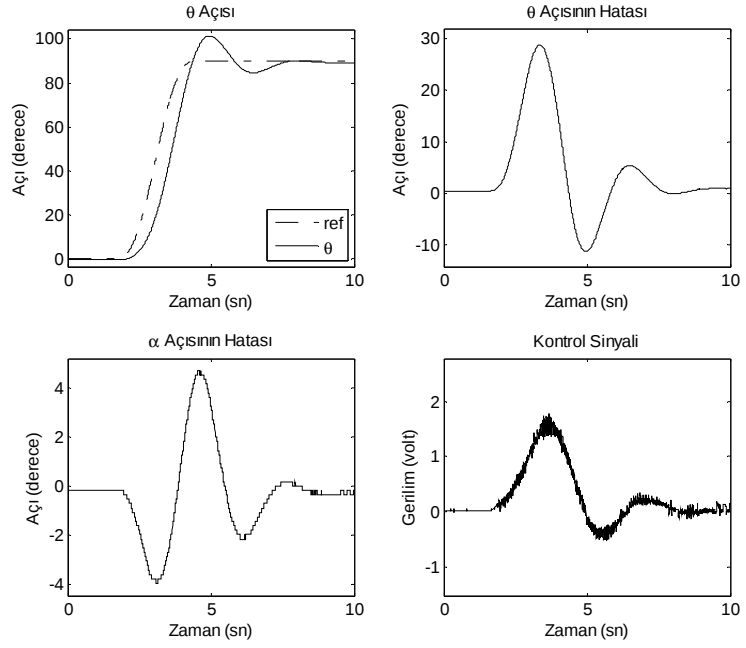
Şekil 5. 112: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 113: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 114: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 115: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.110 – 5.115’ de esnek eklemlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri verilmiştir. Kane yörünge takibi deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.22’ de verilmektedir.

Tablo 5. 22: Durum geri beslemeli kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları

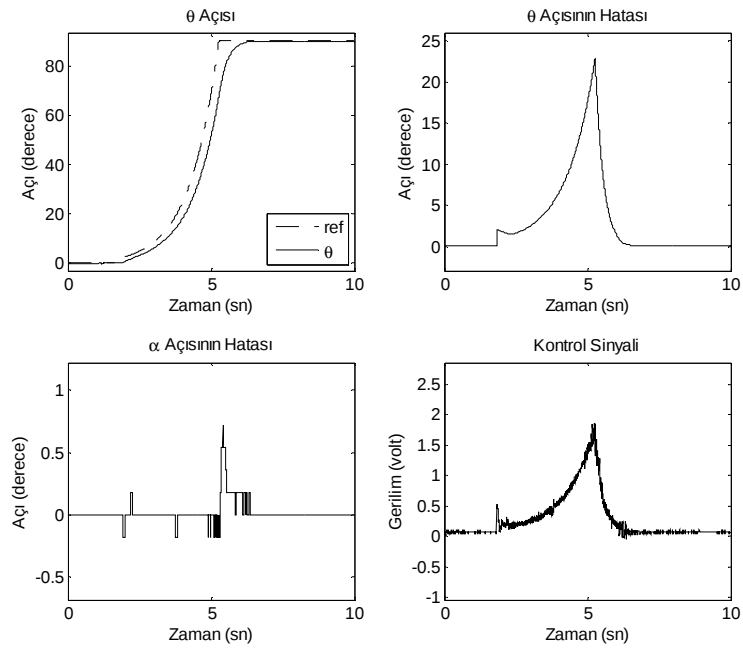
Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	18.2	0.25	0.09
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.36	18.6	0.27	0.1
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.26	20.8	0.32	0.1
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.54	19.15	0.31	0.15
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.9	19.6	0.32	0.09
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	4.68	28.8	0.45	0.5

Deney sonuçlarında da görüleceği üzere esnek eklemlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolörü için yapılan kane fonksiyonu yörüngesi takibi deneylerinde, sistemin model parametreleri olan eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti azaldıkça eklemin uç işlevcisinde oluşan titreşim miktarı artmaktadır. Söz konusu yörünge takibi deneyinde θ açısında oluşan hataların sebebi, robot uç işlevcisinin istenilen referansı ortalama 0.32 saniyelik faz farkı ile takip etmesinden kaynaklanmaktadır.

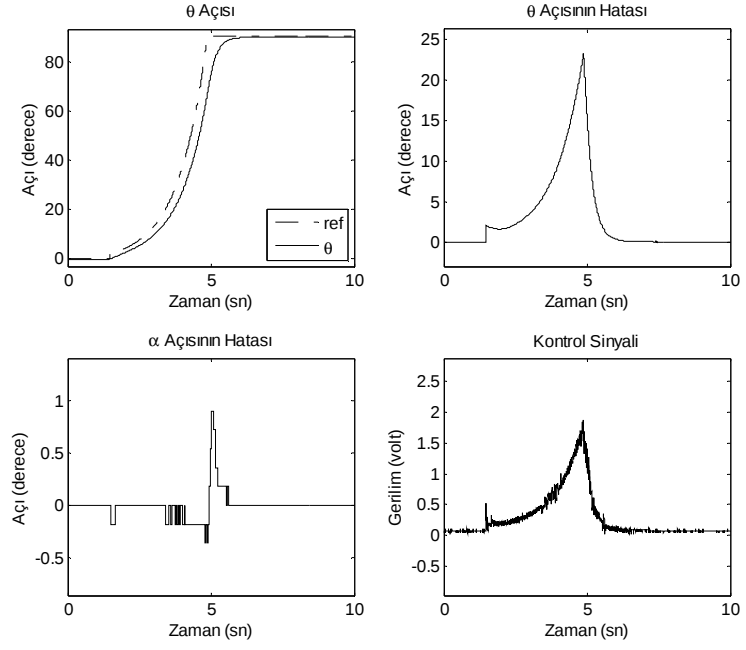
Ve yine görüleceği üzere eklem uzunluğu arttırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında θ açısında oluşan bu hatalar, esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisinin oturma zamanı ve θ açısında oluşan aşma miktarı artmaktadır. 0.4 m uzunluğunda eklem, 58.86 N/m yay sabitine sahip esnek eklemli robot kolu için tasarlanan bulanık kontrolör kane fonksiyonu yörüngesini 0.27 saniyelik faz farkı, α açısında oluşan 0.36 derecelik oldukça küçük hatalar ile takip ettiği gözlemlenmiştir.

5.6.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri

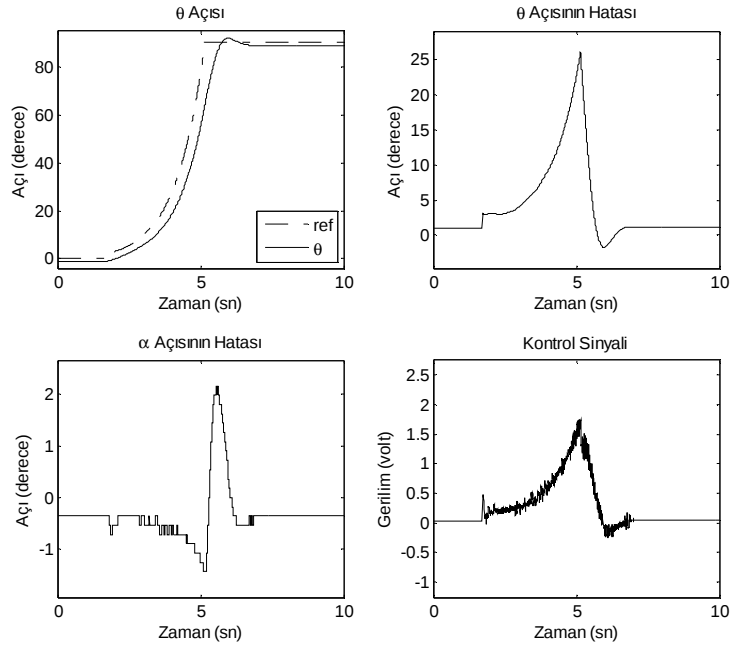
Şekil 5.116 – 5.121’ de esnek eklemli robot kolunun farklı modelleri için durum geri beslemeli kontrolör ile gerçekleştirilen üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri, Tablo 5.23’ de ise elde edilen deney sonuçları gösterilmektedir.



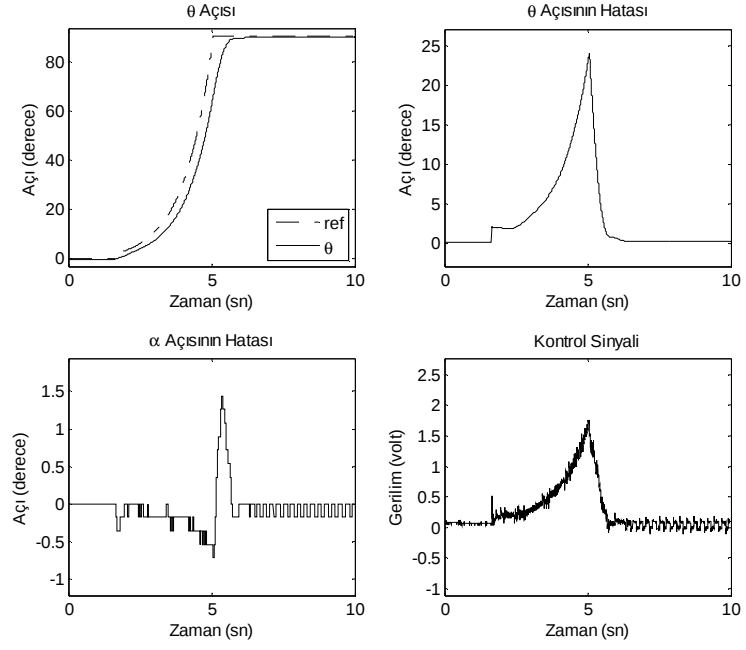
Şekil 5. 116: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



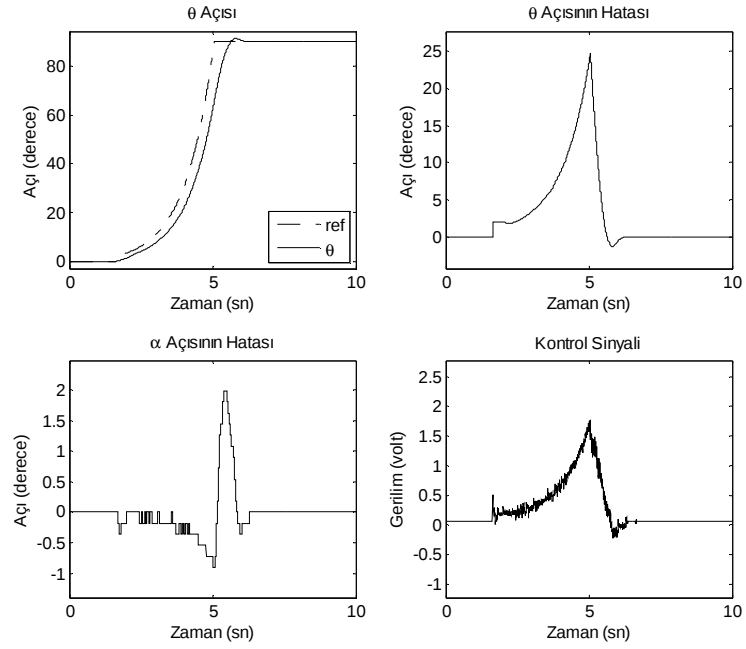
Şekil 5. 117: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



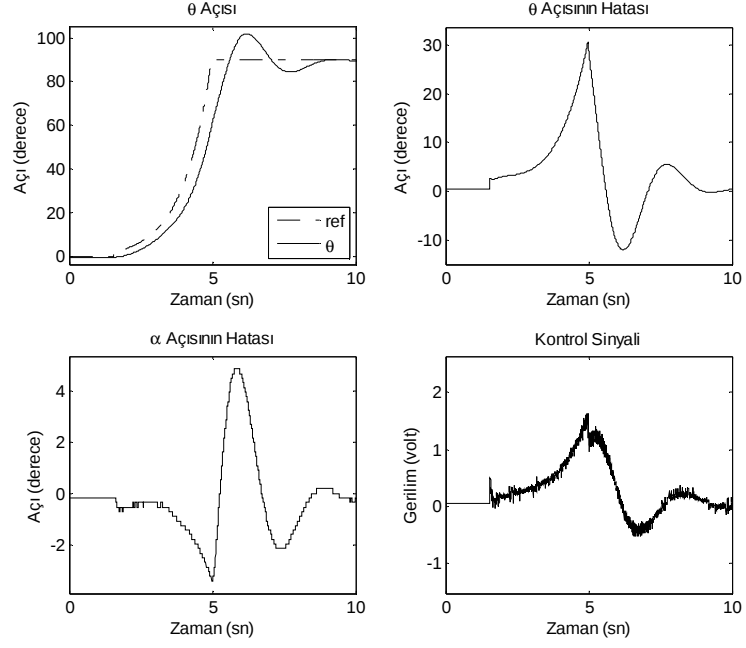
Şekil 5. 118: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 119: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 99.19N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 120: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 121: Üstel fonksiyon yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Durum geri beslemeli kontrolörün tasarlanmış olduğu model olan deney 2’ deki deney sonuçlarına göre, esnek eklemlili robot kolu izlemesi istenilen üstel yörüngeyi, eklemin uç işlevcisinin salınım açısı olan α açısında en büyük 0.9 derece titreşim, θ ise 0.32 saniyelik faz farkı ile takip etmektedir. Ayrıca θ açısında oluşan hatanın büyük olmasının sebebi istenilen referans izlenirken meydana gelen faz farkı olduğu açıktır. Eğer dikkat edilirse verilen yörünge başlangıç ve bitiş noktalarında motor dönme açısında oluşan hataların küçük olduğu görülmektedir. Son olarak eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti düştükçe sistemdeki hatalar artmaktadır.

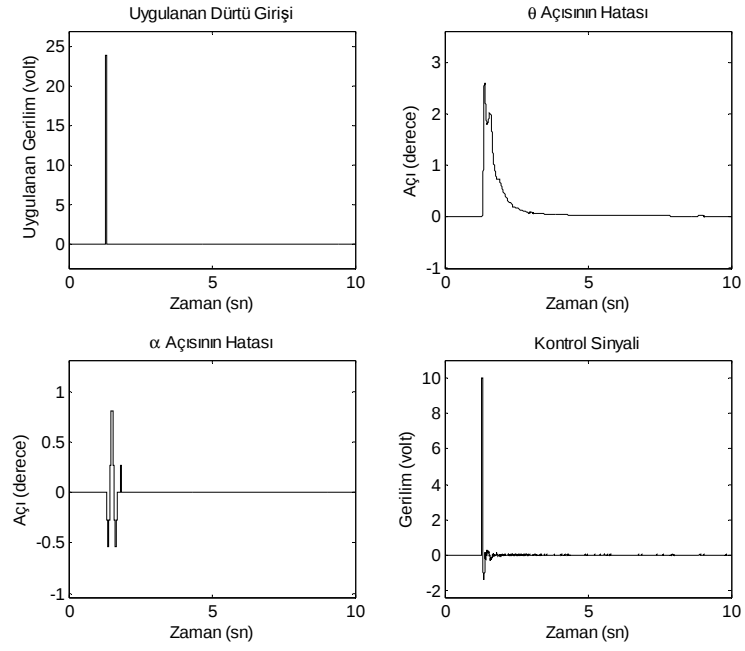
Tablo 5. 23: Durum geri beslemeli kontrolörün üstel yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.72	22.9	0.31	0.1
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.9	23.3	0.32	0.1
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.16	26.1	0.34	0.8
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.44	24.1	0.32	0.18
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.98	24.6	0.32	0.04
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	4.86	30.6	0.39	0.1

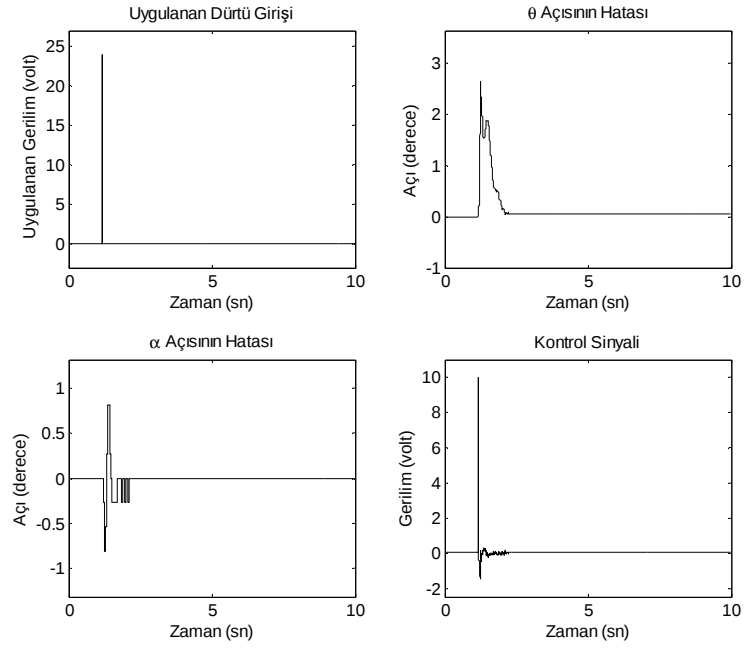
5.6.2.3. Durum geri beslemeli kontrolörün gürbüzlüğünün test edilmesi

Bu bölümde esnek eklemli robot kolunun kontrol edilmesi için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün kararlılığının ve gürbüzlüğünün test edilebilmesi için ekleme birim dürtü fonksiyonu ve dışsal bozucu darbeler uygulanmıştır. Ve kontrolörün bu iki durum için cevabı incelenmiş ve ayrı başlıklar altında karşılaştırılmıştır. Ayrıca model parametreleri değiştirilerek deneyler tekrarlanmıştır.

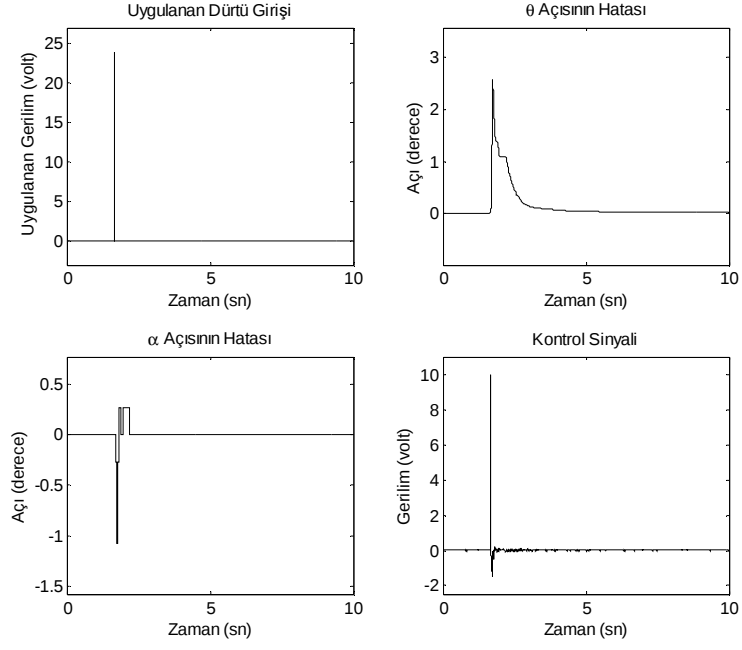
5.6.2.3.1. Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü girişi deneyleri



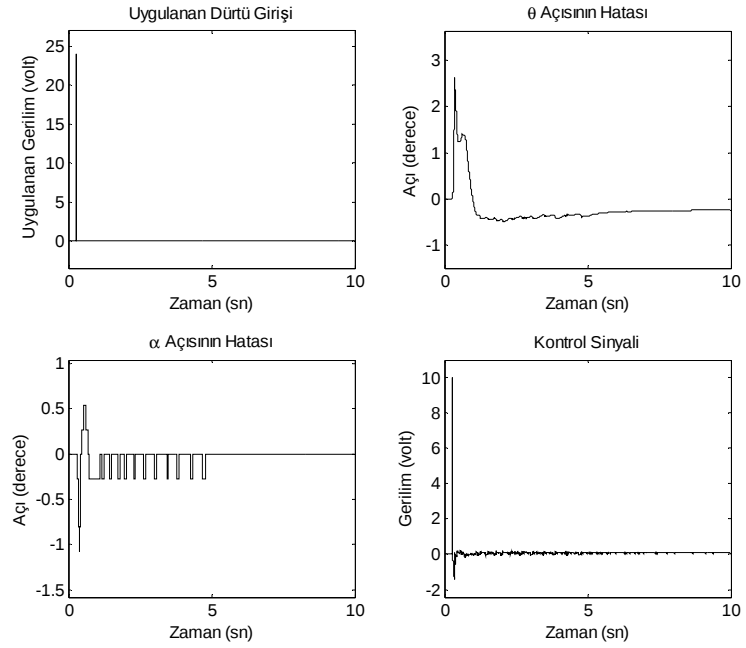
Şekil 5. 122: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



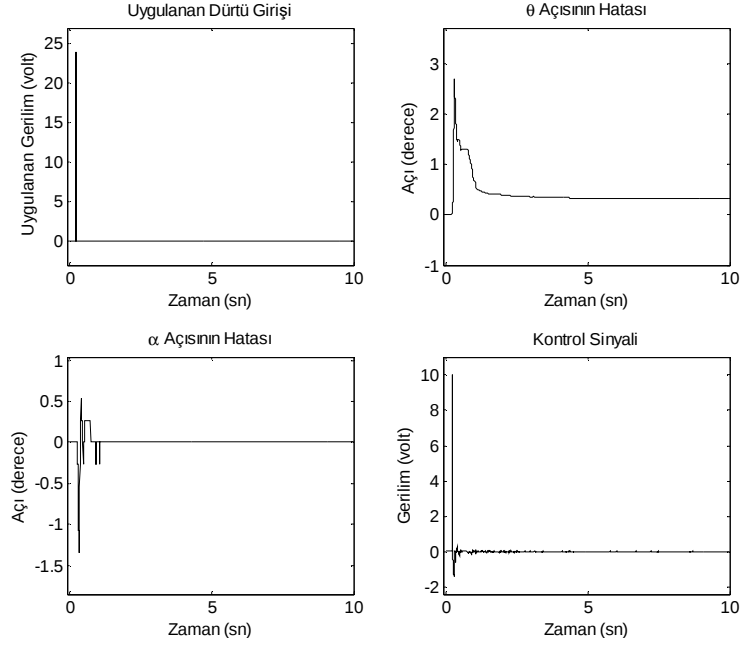
Şekil 5. 123: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



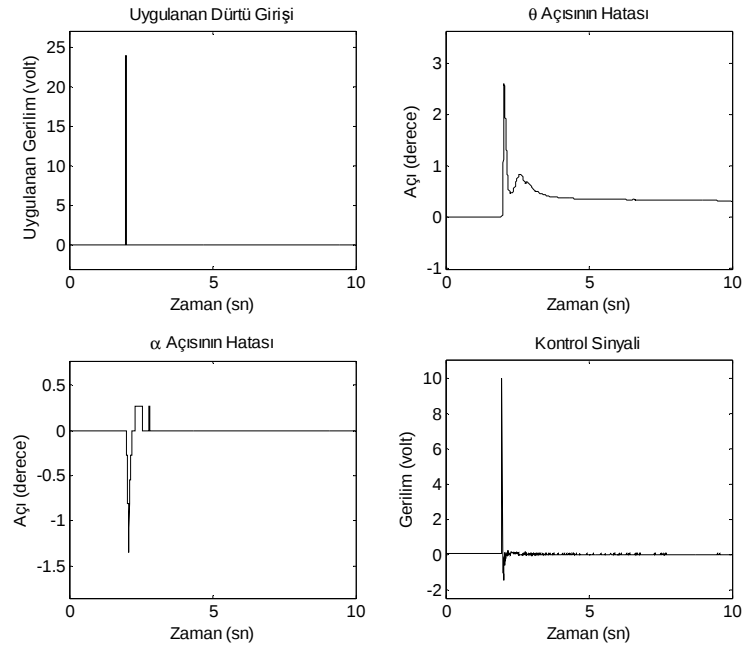
Şekil 5. 124: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 125: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 126: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 127: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

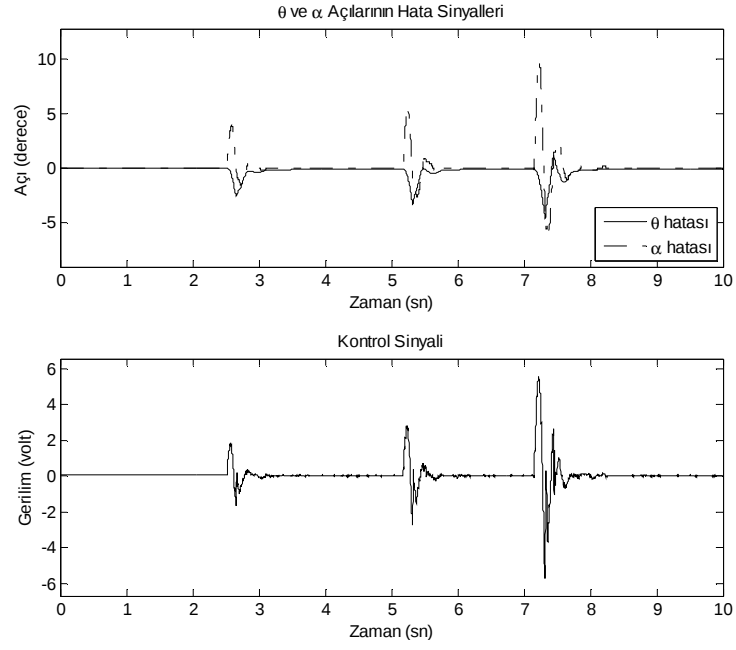
Şekil 5.122 – 5.127’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için dürtü yanıtı gösterilmektedir. Yapılan deneylerden de görüleceği üzere kullanılan farklı eklem uzunluğu ve farklı yay sabitleri θ ve α açılarının oturma zamanlarını ve aşım miktarlarını etkilemektedir. Tablo 5.24’ de esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için dürtü yanıtının sonuçları gösterilmektedir.

Tablo 5. 24: Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları

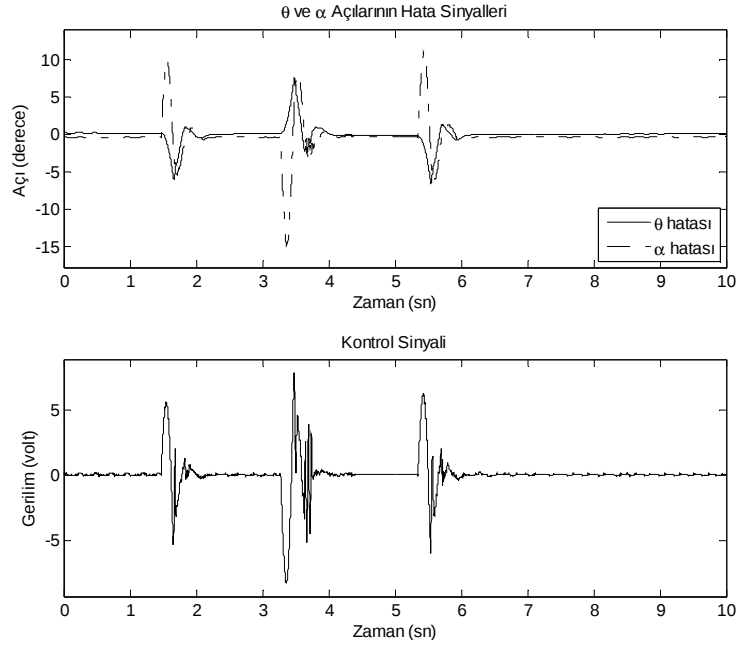
Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.6	1.6	2.62	0.81	0.015	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1	0.95	2.63	0.81	0.06	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.2	0.8	2.72	1.08	0.05	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.5	4.3	2.62	1.08	0.2	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.5	0.8	2.7	1.35	0.3	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	2.8	0.8	2.62	1.35	0.33	0

Deney sonuçlarından da görüleceği üzere, esnek eklemli robot kolunun girişi olan motor gerilimi ani olarak değiştirilmiş ve birim dürtü etkisi oluşturulmuştur. Farklı modellere yapılan aynı giriş görüleceği üzere θ açısında yaklaşık aynı hata değerinin oluşmasına sebep olmuştur. Ancak deney sonuçlarından da görüldüğü gibi model parametreleri olan eklem uzunluğu artırıldığında ve yay sabiti azaltıldığında eklem uç işlevcisinin salınım miktarı artmaktadır. Burada bazı deneylerde 0.3 derecelere kadar kalıcı durum hatası oluşmuştur. Bu değer dişliler arasındaki boşluklardan kaynaklanmaktadır.

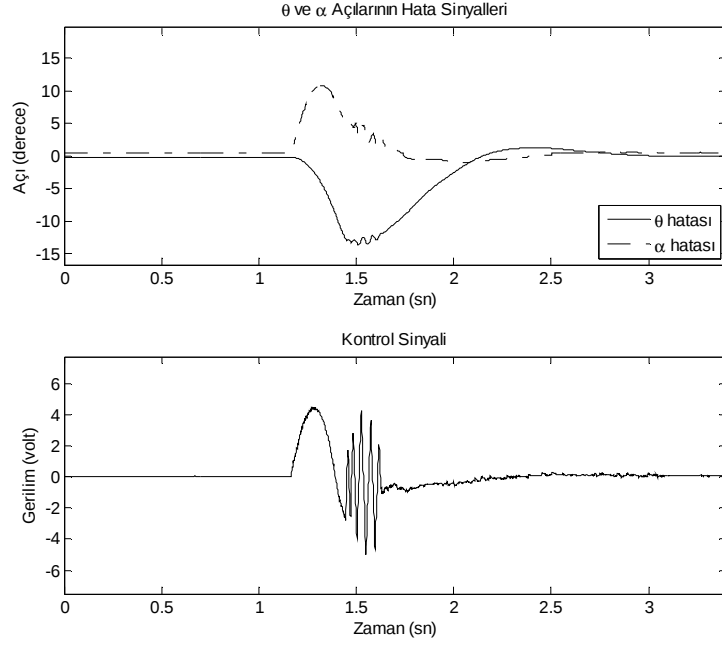
5.6.2.3.2. Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri



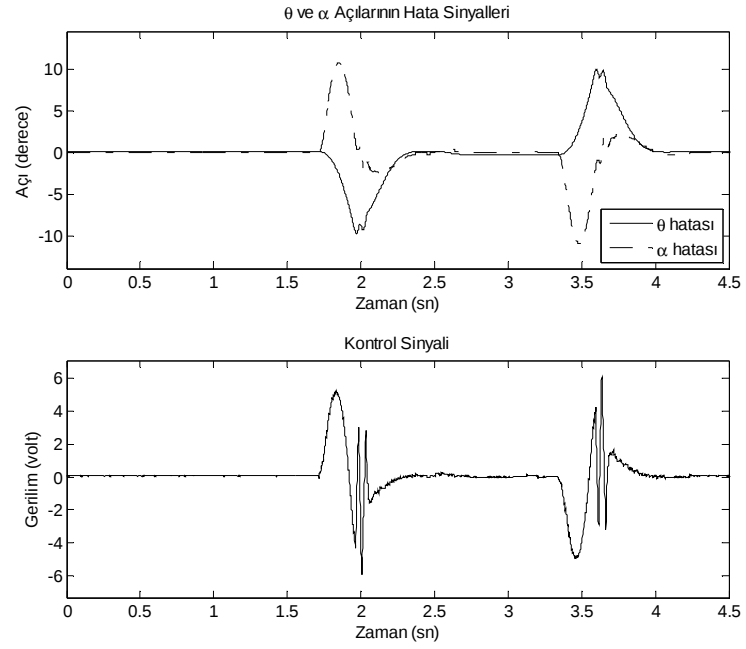
Şekil 5. 128: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



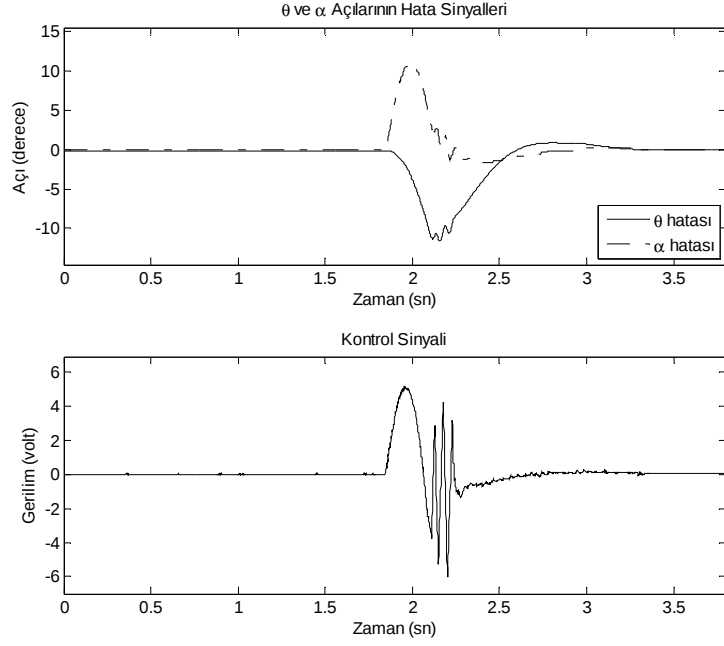
Şekil 5. 129: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



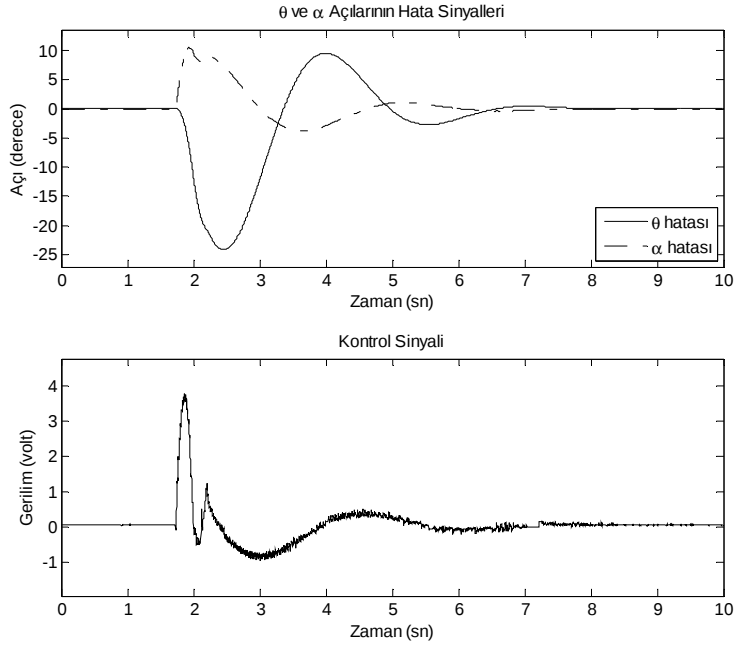
Şekil 5. 130: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 131: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 132: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 133: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.128 – 5.133’ de esnek eklemli robot kolunun dışarıdan gelen bozucu darbe deneyleri gösterilmektedir. Esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisine uygulanan bozucu darbeler geliştirilen kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünü test etmeye yardımcı olmaktadır. Tablo 5.25’ te durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe cevabı için deney sonuçları verilmektedir.

Tablo 5. 25: Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1	1	4.6	9.7	0.15	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.8	0.89	7.5	15	0.13	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	1.75	1.6	13.5	11	0.2	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.2	1.3	10	11	0.15	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.5	1.55	12	11	0.08	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	6	5.5	24.1	10.5	0.1	0

Elde edilen deney sonuçlarında görüleceği üzere, esnek eklemli robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör ile kontrolü sırasında, eklem ucü işlevcisine dışarıdan uygulanan bozucu darbeler karşısında geliştirilen kontrolör karalı bir yapı oluşturmakta ve seçilen model parametrelerine göre belirli süreler içerisinde sistemi denge durumuna getirmektedir. Durum geri beslemeli kontrolörün tasarlandığı model için yapılan deney olan deney 2 incelendiğinde kontrolör, θ açısını 0.8, α açısını ise 0.89 saniyede kararlı duruma getirmekte ve oldukça iyi bir performans göstermektedir.

5.7. Esnek Eklemlı Robot Kolunun Kesir Dereceli PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu başlık altında esnek eklemlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusu, tasarlanan kontrolörün yapısı ve blok diyagramları, son olarak deneysel sonuçlar incelenecektir.

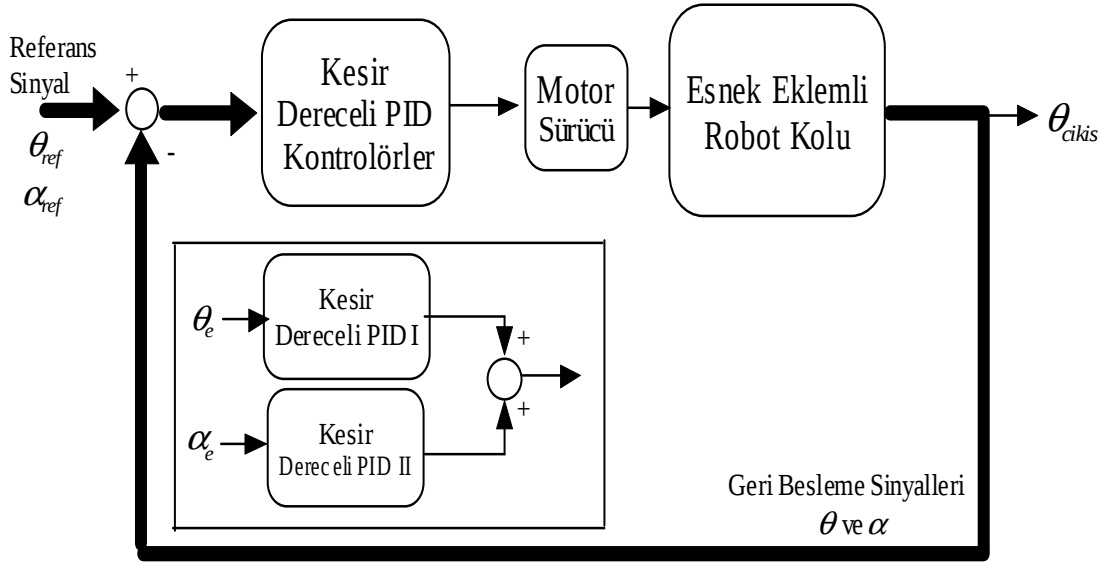
Geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, esnek eklemin daha önce de bahsedilen altı farklı modeline uygulanarak kontrolörün kontrol performansı test edilecektir. Bu başlık altında yapılan deneyler temel olarak konum kontrolü deneyleri, yörünge takibi deneyleridir. Konum kontrolü deneyleri için sistemin birim basamak yanıtı incelenmiştir. Ayrıca yörünge takibi deneylerinde robot koluna referans yörünge olarak sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmış ve kontrolörün bunlar karşısındaki davranışı incelenmiştir. Ve son olarak tasarlanan kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünü test etmek amacıyla robot koluna birim dürtü girişı ve bozucu darbe girişı yapılarak kontrolörün bu girişler karşısındaki davranışları incelenmiştir.

5.7.1. Kesir dereceli PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Geliştirilen diğer kontrolörler de olduğu gibi, kesir dereceli PID kontrolör de esnek eklemlı robot kolunun eklem uzunluğu 0.4 m ve yay sabiti 58.86 N/m olan modeli için tasarlanmış olup, eklem uzunluğu ve yay sabitlerinin değiştirilmesiyle oluşturulan diğer robot modellerine uygulanmış ve kontrolör performansı incelenmiştir.

Esnek eklemlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen, kesir dereceli PID kontrolör yöntemi temel olarak iki bloktan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi motorun dönme açısı olan θ açısının hata sinyalinı alarak, kesir dereceli PID kontrol parametrelerine bağılı olarak, θ açısının kontrolü için gerekli çıkışı üretmektedir. İkincisi eklemin uç işlevcisinin salınım açısı olan α açısını hata sinyalinı alarak, kontrol parametrelerin göre, α açısının kontrol edilebilmesi için gerekli çıkışı üretir. Ayrıca, geliştirilen ana

kontrolör yapısında, hangi kontrol sinyalinin sistemde daha baskın olacağını belirlemek amacıyla iki kontrolöründe çıkışları belirli kazançlarla çarpılmaktadır. Ve toplanarak elde edilen kontrol sinyali sisteme uygulanmaktadır.



Şekil 5.134: Kesir dereceli PID kontrolör şeması

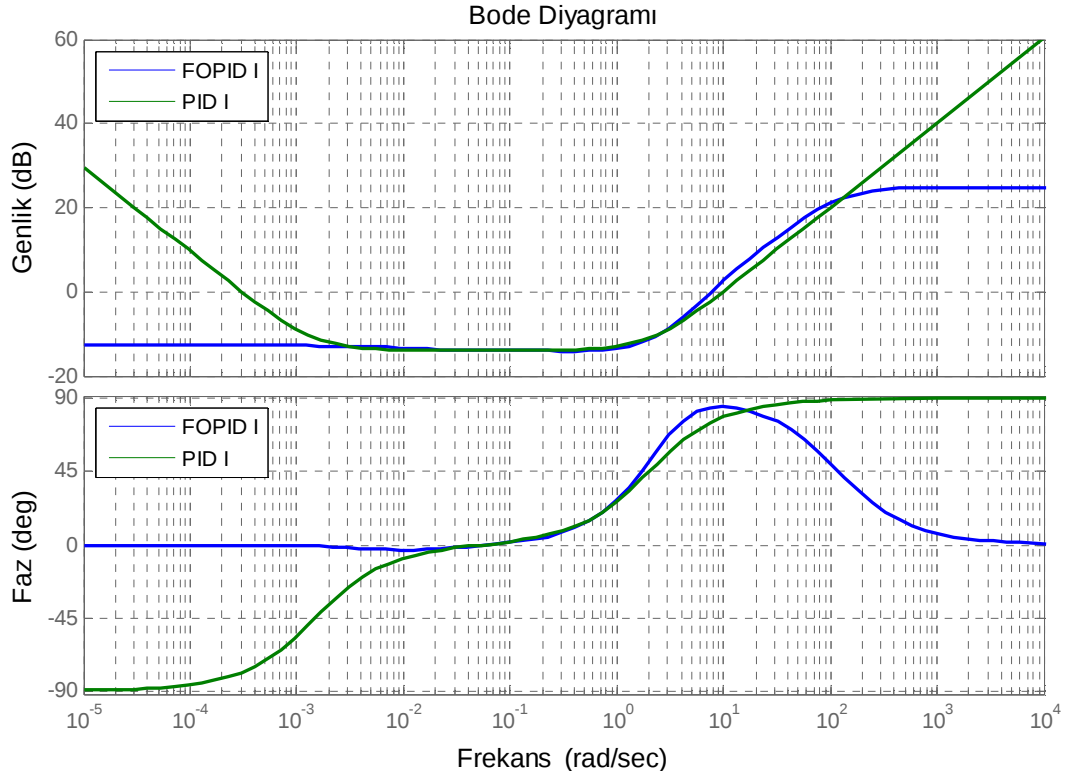
Şekil 5.134' de esnek eklemli robot kolu kontrolü için tasarlanan kesir dereceli PID kontrolör yapısı gösterilmiştir. Görüleceği üzere sistemin iki farklı çıkışı için iki farklı kesir dereceli PID kontrolör tasarlanmıştır.

Motor dönme açısının ve uç işlevcinin salınım açısını kontrolü için tasarlanan iki farklı kesir dereceli PID kontrolörün kontrol parametreleri de farklıdır, bu nedenle her iki kontrolör için oluşan transfer fonksiyonları da farklı olmaktadır. Kesir dereceli PID I ve PID II için Crone hesapsal yaklaşım metoduna göre hesaplanan yaklaşık transfer fonksiyonları,

$$TF_{FOPID I} = \frac{17.5s^6 + 185.1s^5 + 660.6s^4 + 926.7s^3 + 356.2s^2 + 42.3s + 0.45}{s^6 + 131.2s^5 + 1347s^4 + 3904s^3 + 1696s^2 + 207.9s + 1.99} \quad (5.18)$$

$$TF_{FOPID II} = \frac{6.89s^6 + 132.5s^5 + 860.8s^4 + 2014s^3 + 824.8s^2 + 97.9s + 1.07}{s^6 + 118.5s^5 + 1164s^4 + 3246s^3 + 1357s^2 + 161.1s + 1.58} \quad (5.19)$$

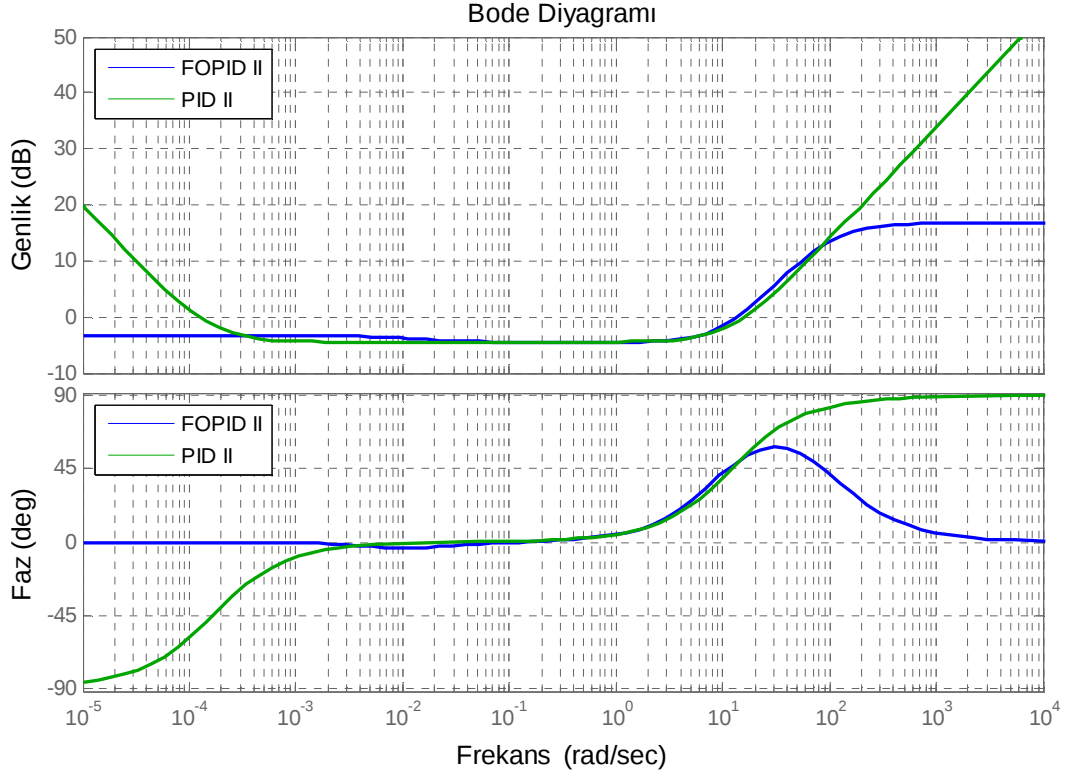
Denklem 5.18 ve 5.19’ da gösterildiği gibi altıncı dereceden transfer fonksiyonları olarak elde edilmişlerdir. Bölüm 5.4’ te geliştirilen PID I ve bu bölümde geliştirilen kesir dereceli PID I’ in bode diyagramları Şekil 5.135’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. 135: Kesir dereceli PID I ve PID I kontrolörlerinin bode diyagramı

Daha önce de belirtildiği gibi kesir dereceli PID I ve bölüm 5.4’ te geliştirilen PID I kontrolörleri θ açısının hata sinyalini giriş olarak alıp buna göre bir çıkış üretmektedirler. Şekil 135’ de görüleceği üzere bahsedilen iki kontrolör $10^{-2} - 10^0$ frekans aralığında birbirlerine benzer olarak çalışmakta ancak bu frekansların dışındaki frekanslarda sistem için farklı cevaplar üretmektedirler. Genlik ve faz grafiklerinden görüleceği üzere yüksek ve düşük frekanslarda geliştirilen kesir dereceli PID I kontrolörü, PID I kontrolörüne göre daha iyi bir cevap üretmektedir.

Bölüm 5.4’ de geliştirilen PID II kontrolörü ve bu bölümde tasarlanan kesir dereceli PID II kontrolörünün bode diyagramları Şekil 5.136’ da gösterilmektedir.

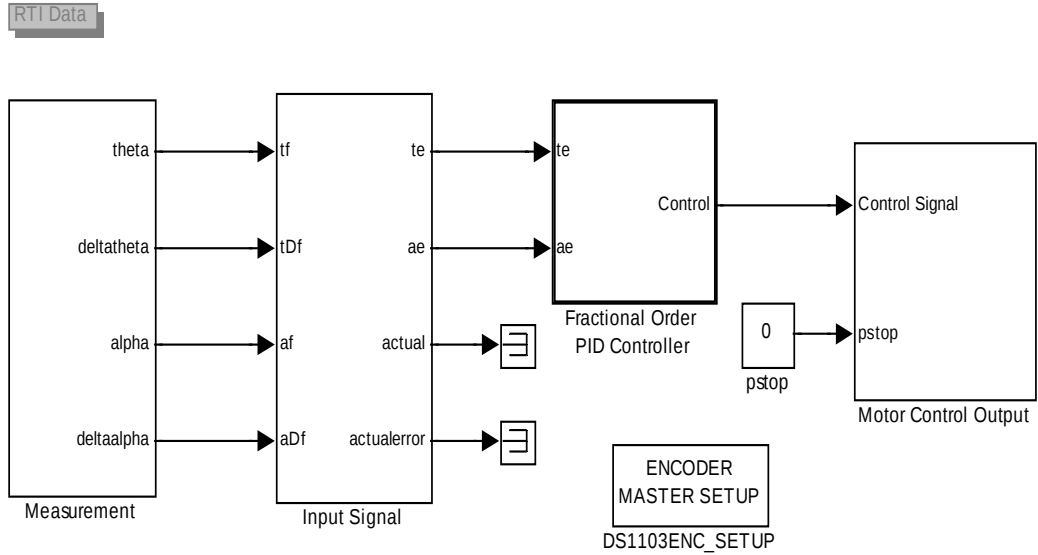


Şekil 5. 136: Kesir dereceli PID II ve PID II kontrolörlerinin bode diyagramı

Bölüm 5.4’ de oluşturulan PID II ve bu bölümde geliştirilen kesir dereceli PID II kontrolörlerinin girişleri robot uç işlevcisinin salınım açısı olan α açısıdır. Bu iki kontrolör bu girişe ve kontrolör parametrelerine göre birer çıkış üretmektedirler. Şekil 5.136’ dan da görüldüğü gibi bu iki kontrolör $10^{-3} - 10^1$ frekans aralığında benzer çalışmaktadır. Bu frekans aralığının dışında kalan daha yüksek ve daha düşük frekanslarda ise kesir dereceli PID II kontrolörü, bölüm 5.4’ te oluşturulan PID II kontrolörüne göre daha iyi bir cevap üretmektedir.

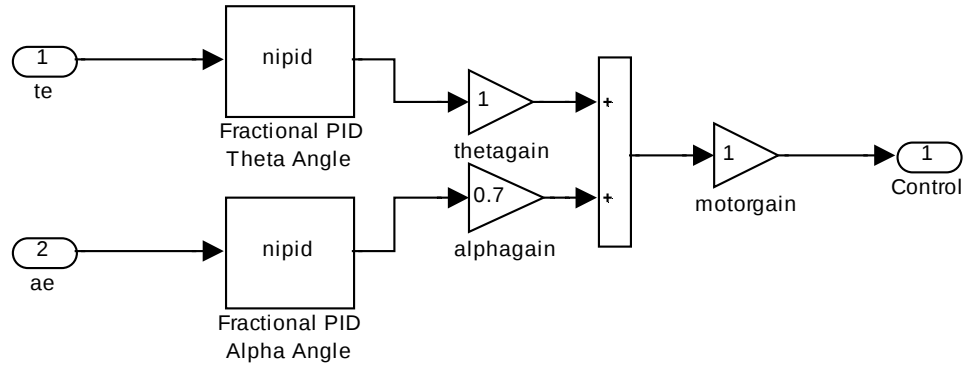
Ayrı ayrı karşılaştırıldığında kesir dereceli PID kontrolörlerin, PID kontrolörlere göre daha iyi cevap ürettiği görülmektedir. Ancak Şekil 5.134’ de görüldüğü üzere sisteme uygulanan kontrol sinyali kesir dereceli PID I ve kesir dereceli PID II kontrolörlerinin toplamı olmaktadır. Bu durumda oluşan kontrolör cevabı değişmektedir. Bu bölümde geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün, geliştirilen diğer kontrolörlerle karşılaştırılması bölüm 5.8’ de yapılacaktır.

Kesir dereceli PID kontrolör Matlab/Simulink ortamında geliştirilmiş olup sisteme dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla uygulanmaktadır. Şekil 5. 137’ de kesir dereceli PID kontrolörün simulink blokları gösterilmektedir.



Şekil 5. 137: Kesir dereceli PID kontrolörün simulink blokları

Şekil 5.137’ de görüleceği üzere kontrolör dört ana bloktan oluşmaktadır. Bunlardan ölçüm bloğu, sistem çıkışları olan α ve θ açılarının anlık değerlerini ölçer, giriş bloğu, sisteme istenilen referans sinyalin üretilmesini sağlar, kontrolör bloğu, istenilen referans yörüngesinin izlenebilmesi için gerekli kontrol sinyalini üretir ve çıkış bloğu, motora gerekli analog sinyali üretir. Şekil 5.138’ de esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için simulink’ te tasarlanan kesir dereceli PID ana kontrolör bloğu gösterilmektedir.



Şekil 5. 138: Kesir dereceli PID kontrolör simulink bloğu

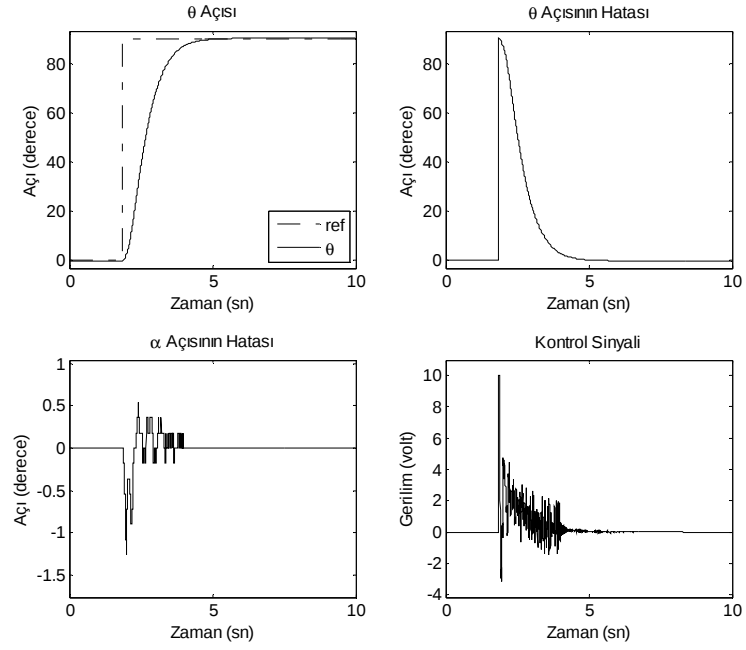
Şekilde görüldüğü üzere, üretilen kontrol sinyali kesir dereceli PID I ve kesir dereceli PID II' nin çıkışlarının belirli kat sayılarla çarpılmasından sonra toplanmasıyla elde edilmektedir.

5.7.2. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

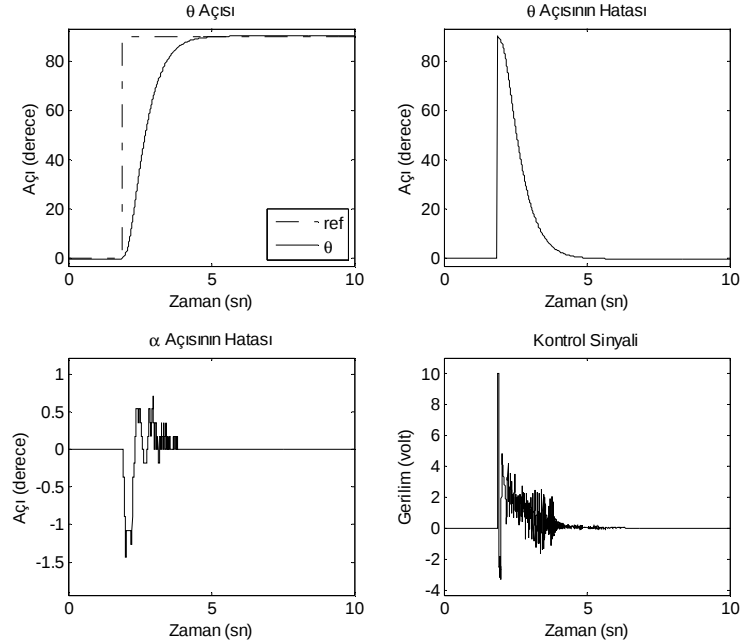
Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun kesir dereceli PID kontrolü için elde edilen deney sonuçları ve bu sonuçların karşılaştırılması verilecektir.

Tasarlanan kesir dereceli PID kontrolörün kontrol performansının test edilebilmesi için birçok deney yapılmış olup yapılan deneyler ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Bu bölümde yapılan deneyler üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlardan birincisi, konum kontrolü deneyleridir. Bu başlık altında sisteme birim basamak fonksiyonu uygulanmış olup sistemin istenen konuma oturması sırasındaki kriterler değerlendirilmiştir. İkincisi, yörünge takibi deneyleridir, bu bölümde esnek eklemlili robot koluna sinüzoidal ve kane fonksiyonu yörüngeleri verilmiştir. Bunlara ek olarak, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün kararlılığının ve gürbüzlüğünün test edilebilmesi için, esnek eklemlili robot koluna birim dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri verilmiş ve kontrolörün bu girişler karşısındaki davranışı incelenmiştir. Ayrıca bu yapılan deneyler esnek eklemlili robot kolunun daha önce bahsedilen altı farklı modeli için tekrarlanmıştır.

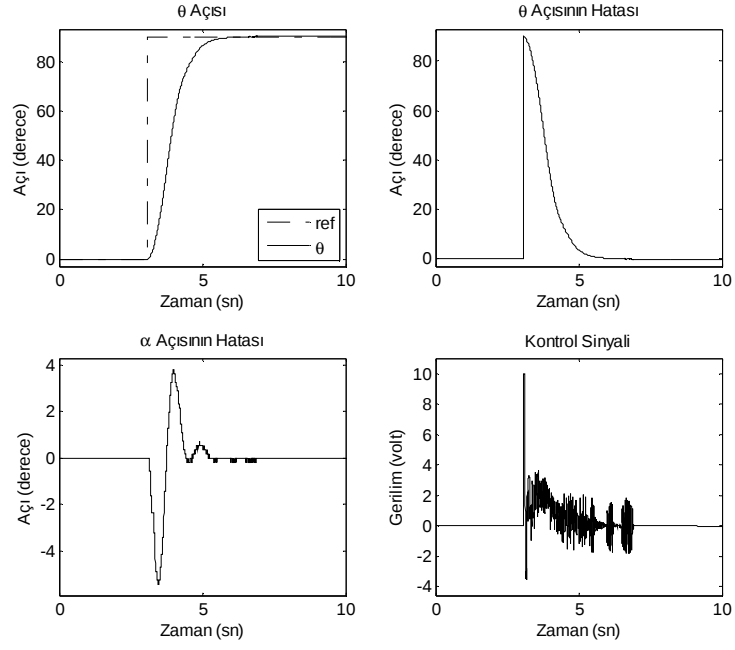
5.7.2.1. Esnek eklemlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri



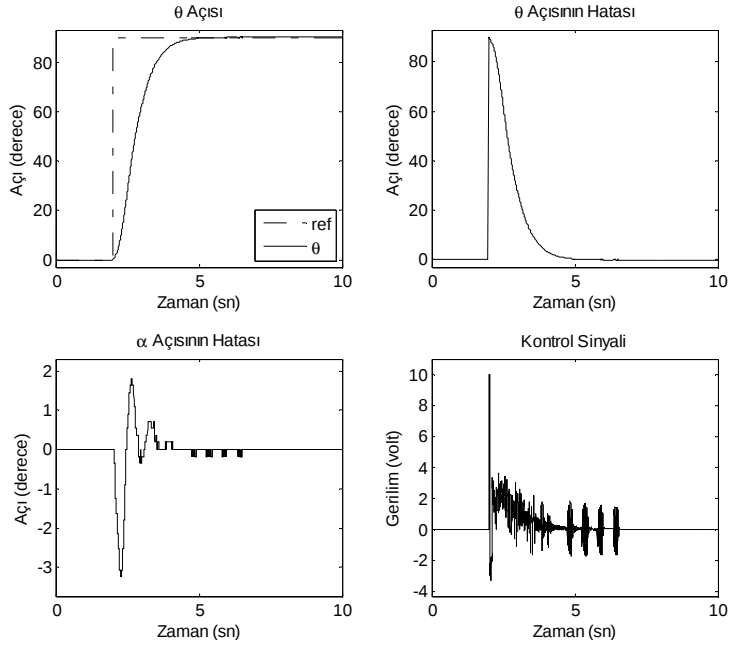
Şekil 5. 139: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklemler uzunluğu 0.4 m)



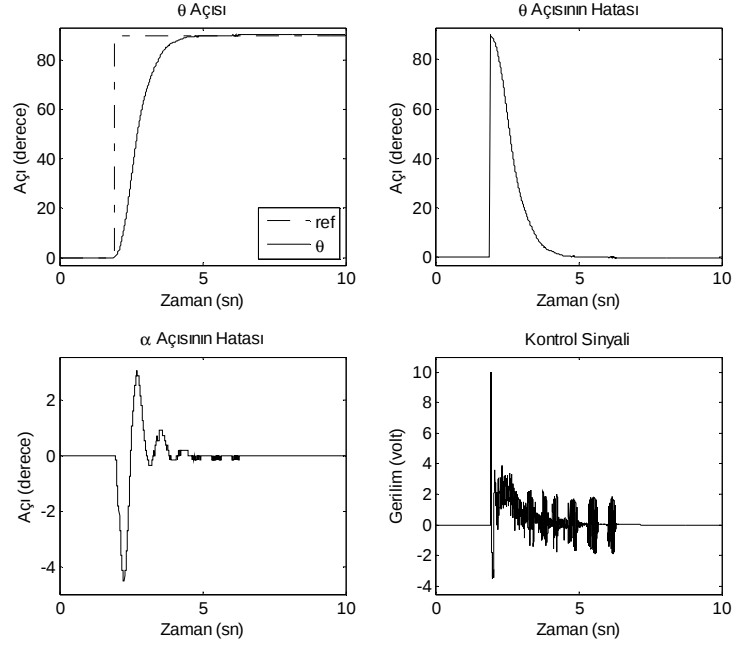
Şekil 5. 140: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklemler uzunluğu 0.4 m)



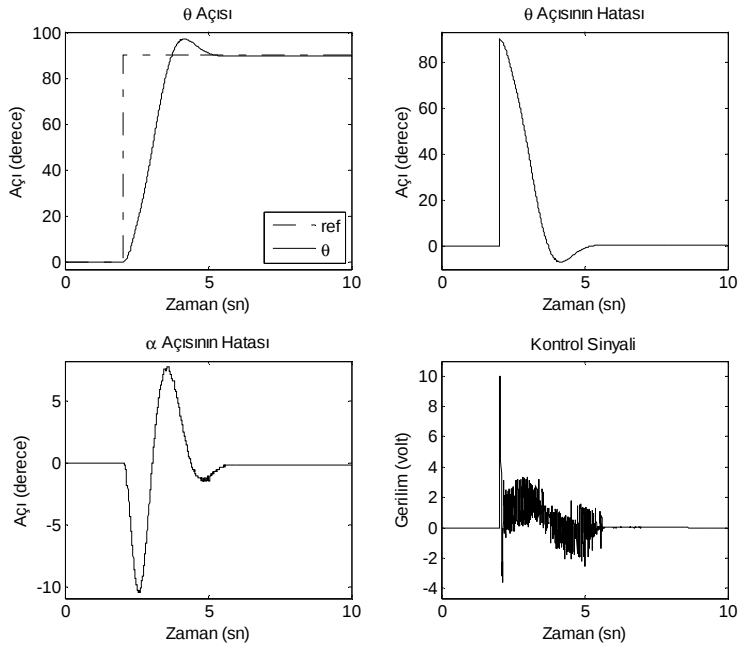
Şekil 5. 141: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 142: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 143: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 144: Birim basamak cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.139 – 5.144’ te görüldüğü üzere esnek eklemlili robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör ile konum kontrolü deneyleri sisteme birim basamak girişi uygulanmasıyla elde edilmiştir. Eklemin yay sabiti ve eklem uzunluğu değiştirilerek oluşturulan toplam altı farklı model için geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün

konum kontrolündeki performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.26’ da karşılaştırılmıştır.

Tablo 5. 26: Kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneylerinde elde edilen sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.32	2.15	0	1.26	0.2	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.26	1.96	0	1.44	0.22	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.11	3.77	0	5.4	0.27	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2.24	3.98	0	3.24	0.25	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.18	4.31	0.3	4.5	0.26	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	2.78	3.5	7.7	10.44	0.25	0

Tablodan açıkça görüldüğü üzere kesir dereceli PID kontrolör, esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için, oldukça başarılı bir konum kontrolü gerçekleştirmiştir. Kontrolörün geliştirildiği model olan deney 2’ deki model için, kesir dereceli PID kontrolör robot kolunu 2.26 saniyede istenilen konuma getirmekte ve bu hareket sırasında eklem uc işlevcisinde en büyük 1.44°’ lik bir titreşim oluşmaktadır. Esnek eklemli robot kolunun eklem uzunluğunun ve yay sabitinin değiştirilmesiyle elde edilen farklı modeller için yapılan deneyler göz önüne

alındığında, eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti azaldıkça uç işlevcide daha büyük genlikli titreşimler oluşmakta ve motor dönme açısında aşımalar meydana gelebilmektedir.

5.7.2.2. Esnek eklemli robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri

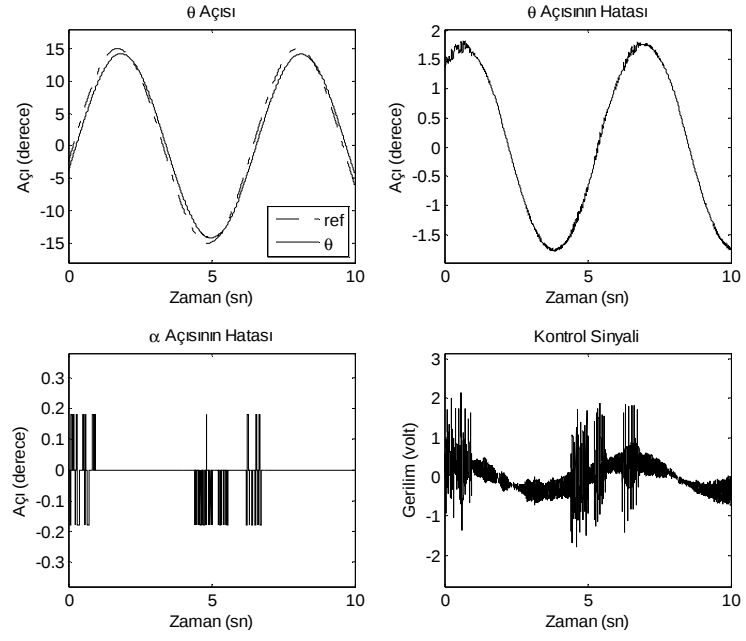
Bu başlık altında esnek eklemli robot kolunun kontrolü için tasarlanan kesir dereceli PID kontrolörün yörünge takibi deneyleri verilmektedir.

Kontrolörün performansını test edebilmek amacıyla, sisteme referans olarak sinüzoidal ve kane fonksiyonu yörüngeleri uygulanmış ve ayrı başlıklar altında elde edilen kontrolör cevapları karşılaştırılmıştır.

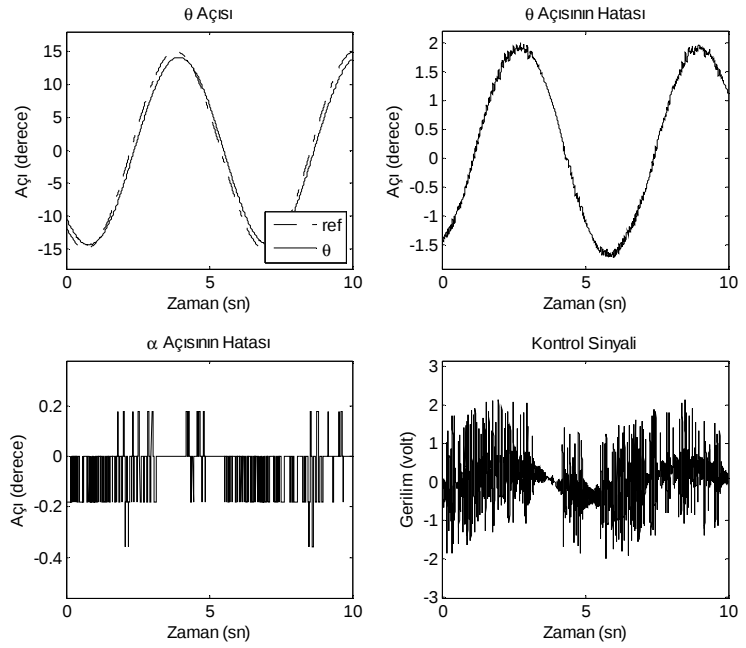
Ayrıca daha önceki bölümlerde olduğu gibi, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, esnek eklemli robot kolunun model parametrelerinin değiştirilmesiyle oluşturulan altı farklı modeli için de ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen sistem cevapları incelenmiştir.

5.7.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri

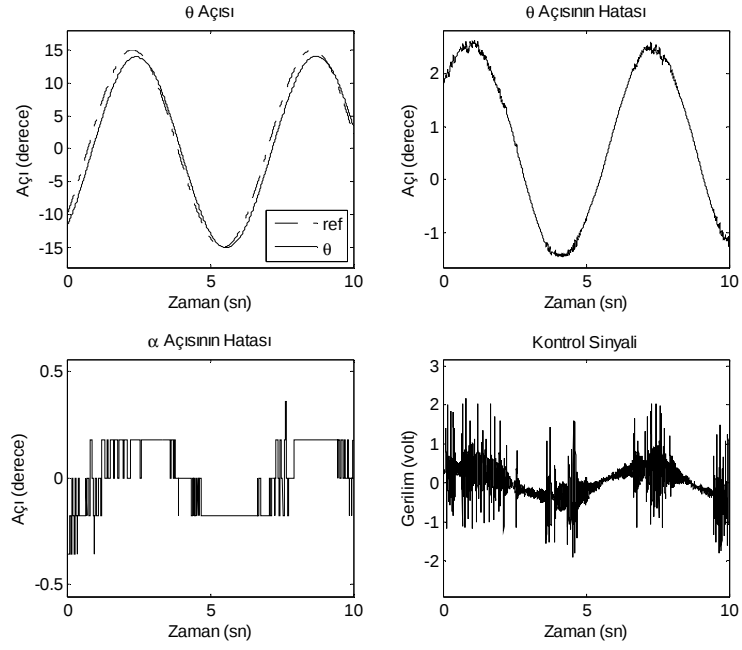
Şekil 5.145 – 5.150’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için kesir dereceli PID kontrolör ile gerçekleştirilen sinüzoidal yörünge takibi deneyleri gösterilmektedir.



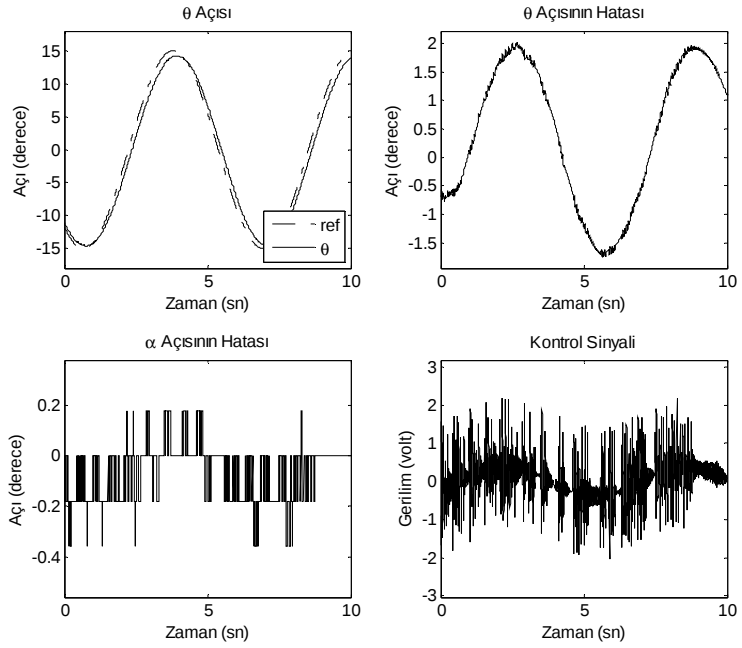
Şekil 5. 145: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



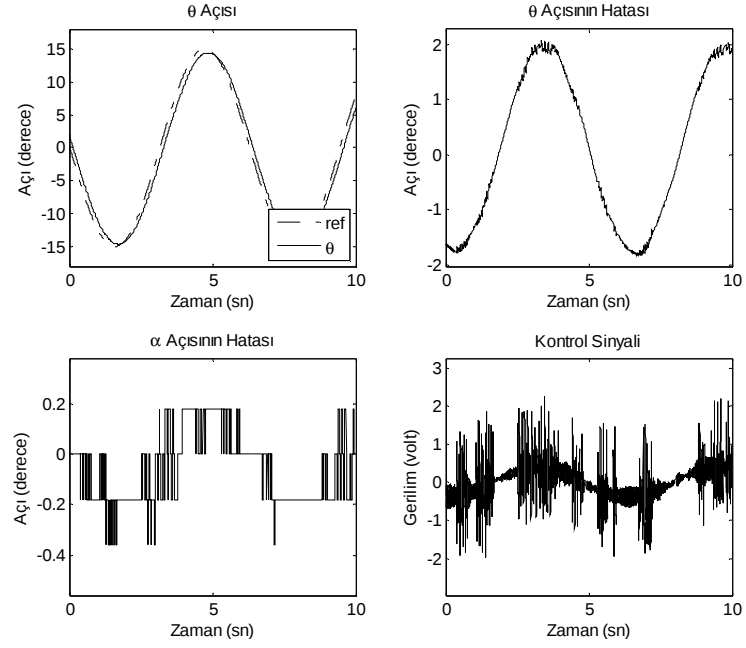
Şekil 5. 146: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



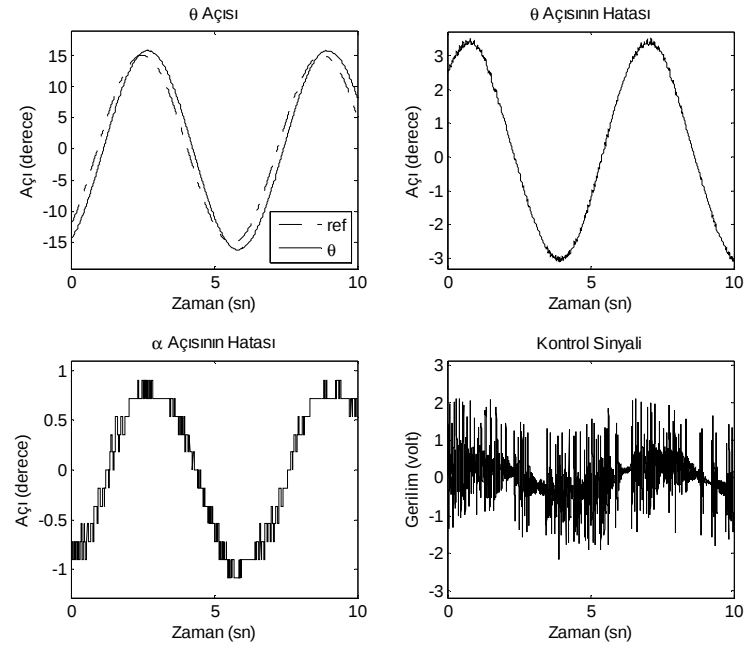
Şekil 5. 147: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 148: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 149: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



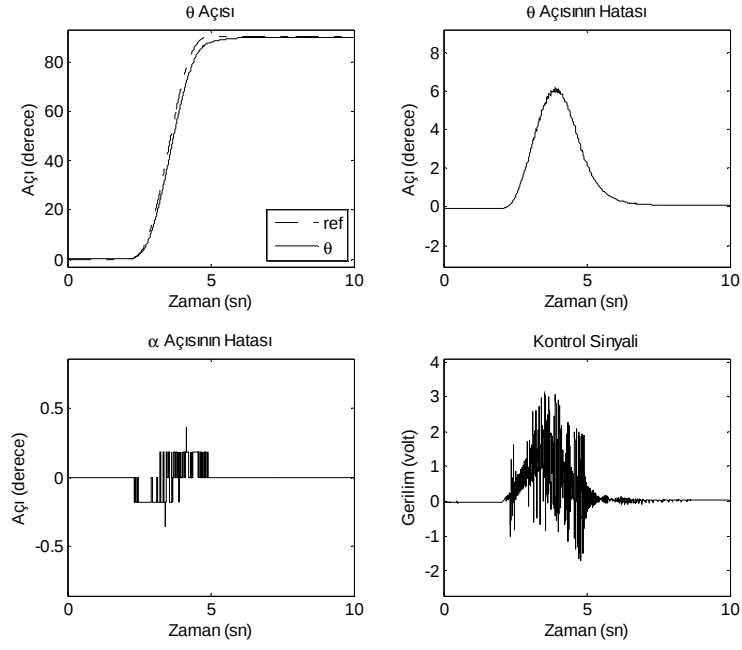
Şekil 5. 150: Sinüzoidal yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Tablo 5. 27: Kesir dereceli PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları

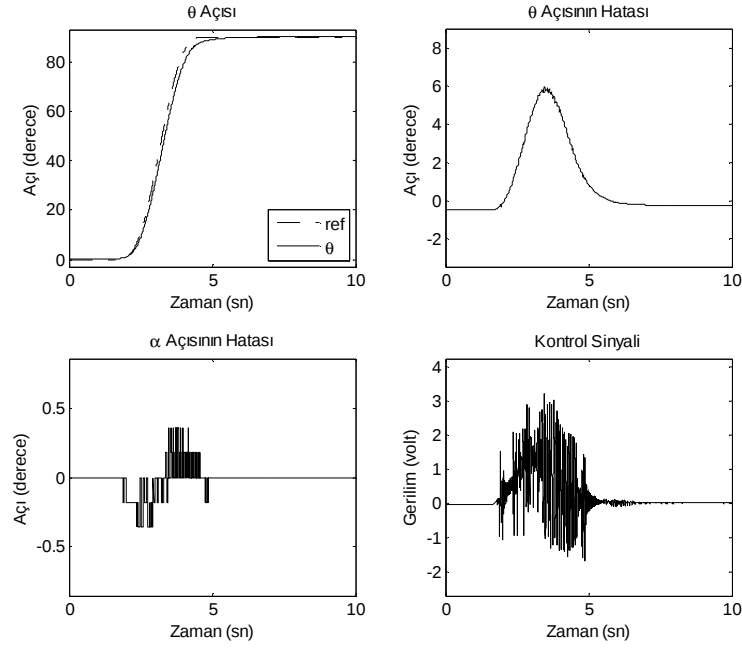
Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.18	1.82	0.1
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.36	1.95	0.1
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.36	2.55	0.15
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.36	2	0.1
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.36	2.05	0.13
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	0.9	3.5	0.18

Elde edilen deney sonuçlarına göre kesir dereceli PID kontrolör tasarlandığı model olan deney 2' deki model için α açısında en büyük 0.36 derece salınım yapmakta ve θ açısında en büyük 1.95°' lik bir hata ile referans olarak girilen sinüzoidal yörüngeyi izlemektedir. Motor dönme açısında oluşan hata, istenilen referans yörünge izlenirken oluşan faz farkından dolayı oluşmaktadır. Farklı robot modelleri ile yapılan deney sonuçlarından da görüleceği üzere yay sabiti azaldığında ve eklem uzunluğu arttığında sistemdeki hataların da arttığı görülmektedir. Ancak kesir dereceli PID kontrolörün sinüzoidal yörüngeyi başarılı bir şekilde izlediği söylenebilmektedir.

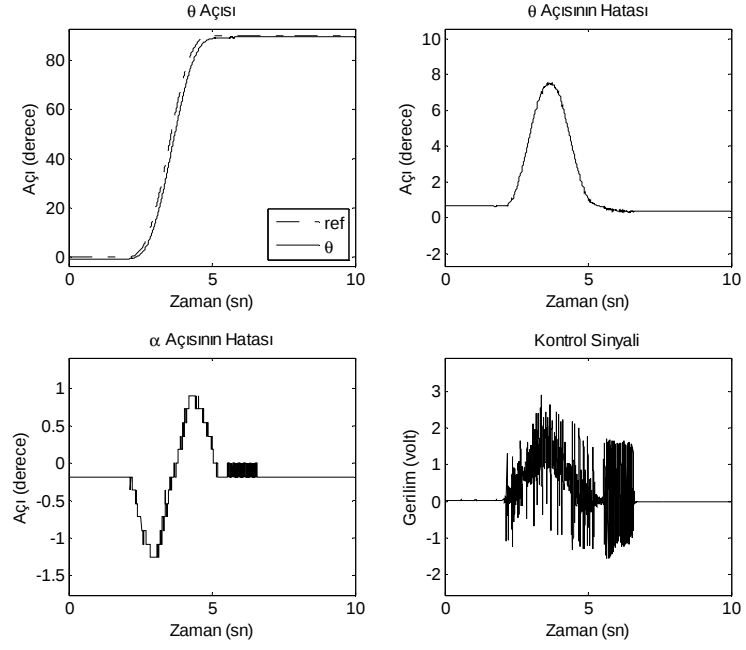
5.7.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri



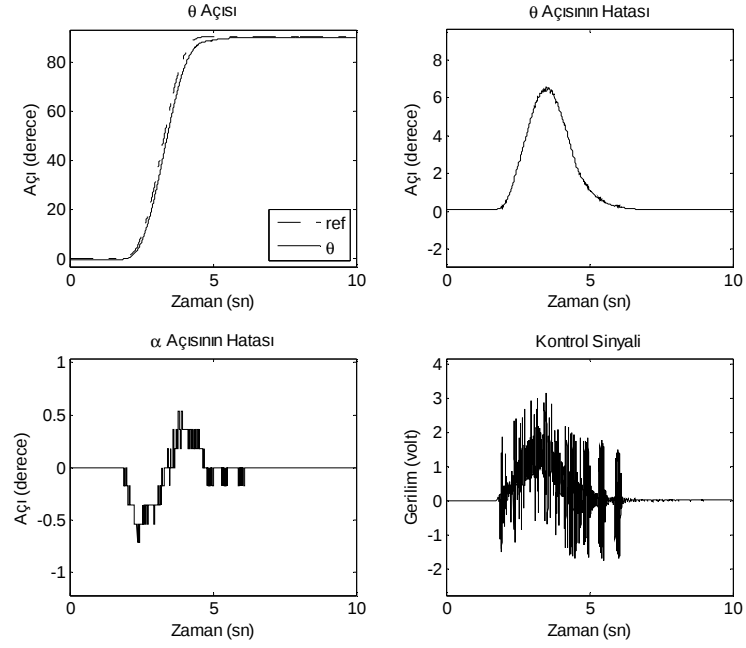
Şekil 5. 151: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



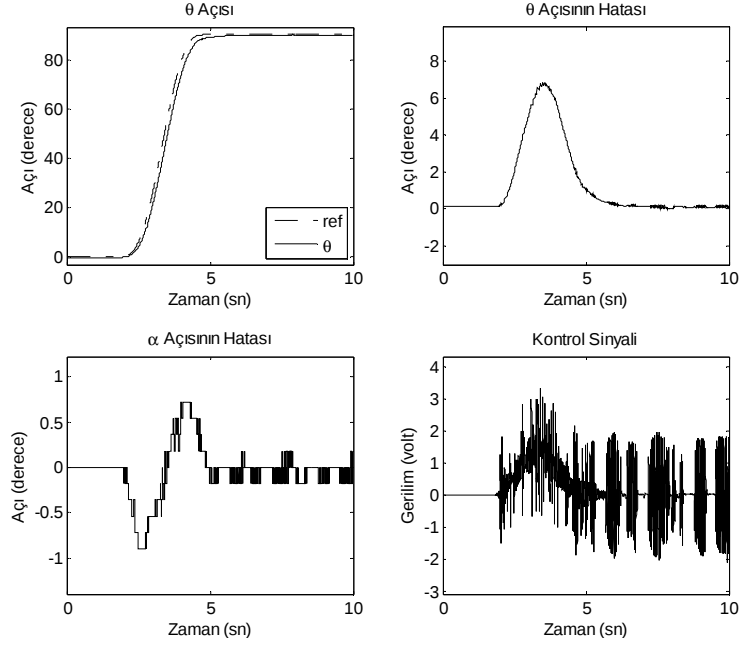
Şekil 5. 152: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



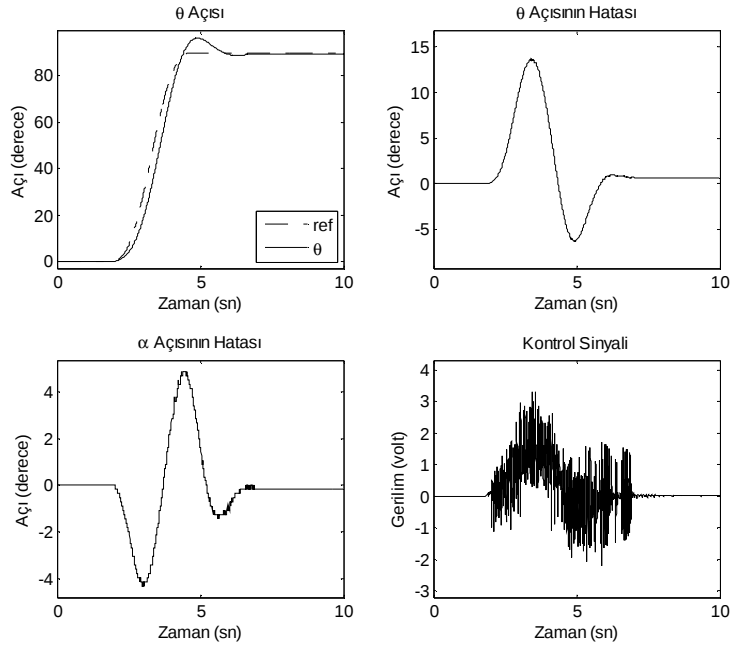
Şekil 5. 153: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 154: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 155: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 156: Kane fonksiyonu yörünge takibi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.151 – 5.156’ da esnek eklemlı robot kolunun kesir derecelı PID kontrolör için kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri verilmiştir. Kane yörünge takibi deneyinde elde edilen sonuçlar Tablo 5.28’ da verilmektedir.

Tablo 5. 28: Kesir dereceli PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.36	6.2	0.08	0.09
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.36	5.96	0.07	0.2
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	0.9	7.5	0.12	0.34
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	0.72	6.6	0.1	0.1
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	0.9	6.9	0.11	0.1
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	4.9	14	0.2	0.5

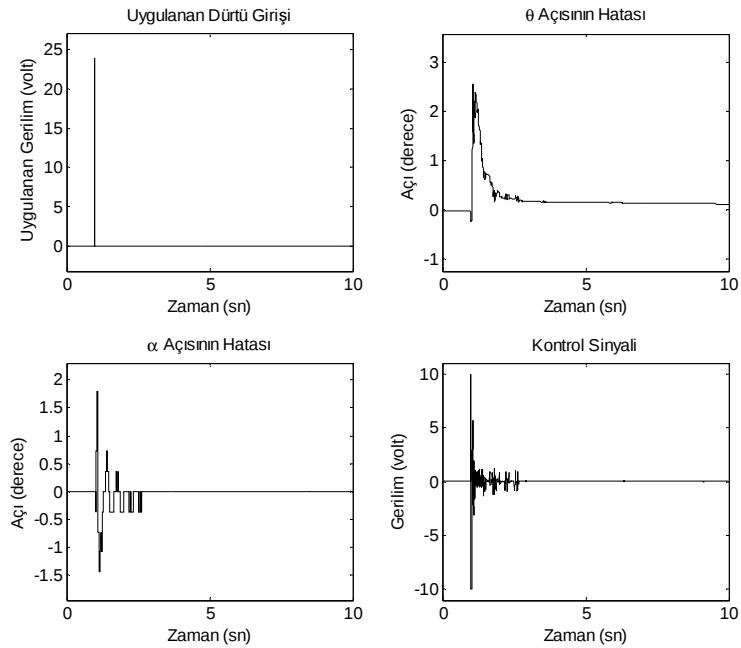
Tablodan da görüleceği üzere, esnek eklemlili robot kolu kontrolü için geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün kane fonksiyonu yörüngesi cevabı, kontrolörün tasarlandığı deney 2’ deki model için α açısında en büyük 0.36° ’ lik titreşimler ve θ açısında en büyük 5.96° ’ lik hata ile gerçekleşmiştir. Eğer dikkat edilirse θ açısında oluşan hatanın sebebinin takip edilen referans yörünge sırasında sistemde oluşan faz farkı olduğu görülmektedir. Ayrıca diğer deneyler de olduğu gibi bu deneyde de eklem uzunluğu ve yay sabiti kontrolör performansını büyük ölçüde etkilemektedir. Kane fonksiyonu yörünge takibindeki bütün deney sonuçlarına bakılarak, kesir dereceli PID kontrolörün kane yörüngesini α açısında oldukça küçük hatalar ve belirli bir faz farkı ile takip ettiği gözlemlenmiştir.

5.7.2.3. Kesir dereceli PID kontrolörün gürbüzlüğünün test edilmesi

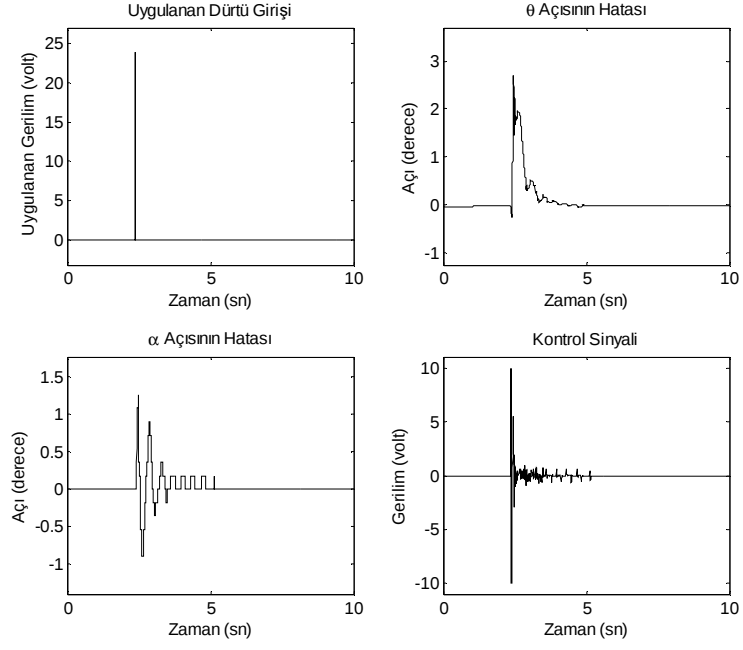
Bu bölümde esnek eklemli robot kolu kontrolü için tasarlanan kesir dereceli PID kontrolörün kararlılığının ve gürbüzlüğünün test edilebilmesi için yapılan deneyler, deney sonuçları ve sonuçların karşılaştırılması verilecektir.

Bahsedilen testlerin yapılabilmesi için sisteme birim dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri verilip kontrolörün bu girişler karşısındaki yanıtları incelenmiştir. Ayrıca yapılan deneyler robot kolunun eklem uzunluğu ve yay sabitinin değiştirilmesiyle oluşan farklı modelleri için tekrarlanmıştır.

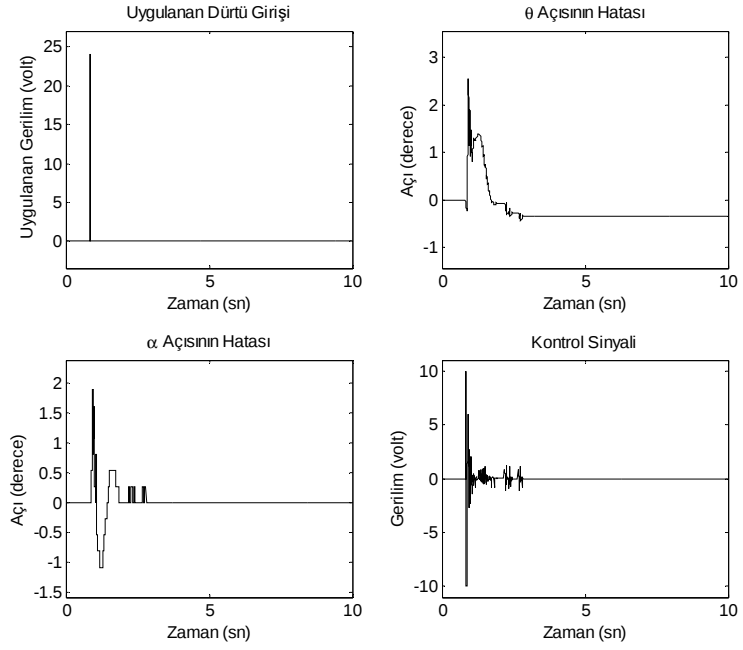
5.7.2.3.1. Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü girişi deneyleri



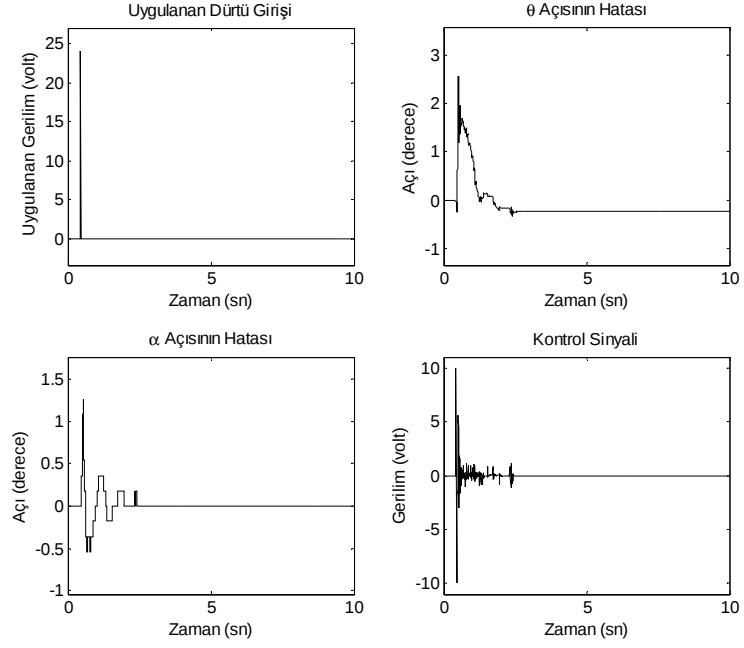
Şekil 5. 157: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



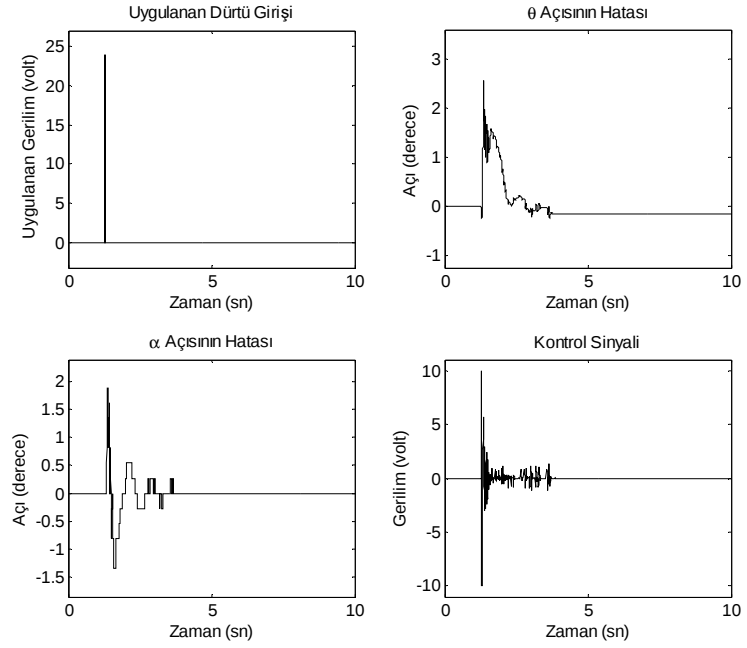
Şekil 5. 158: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



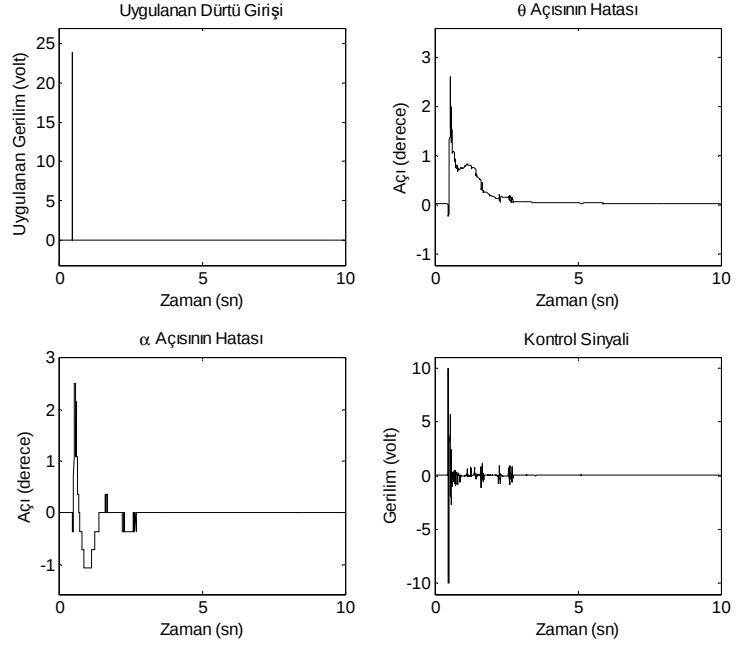
Şekil 5. 159: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 160: Dürtü cevabı (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 161: Dürtü cevabı (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 162: Dürtü cevabı (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

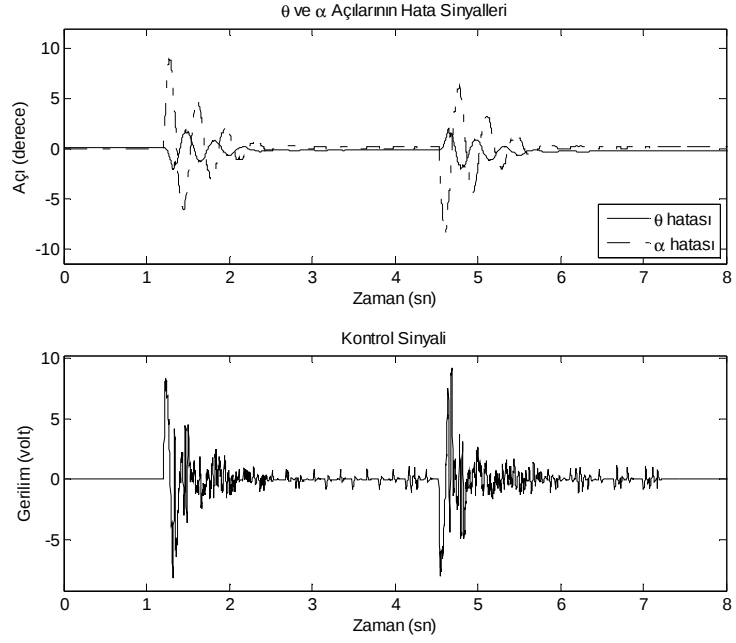
Şekil 5.157 – 5.162’ de esnek eklemli robot kolunun altı farklı modeli için dürtü yanıtı gösterilmektedir. Tablo 5.29’ da esnek eklemli robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için dürtü yanıtının sonuçları gösterilmektedir.

Beklenildiği gibi, eklem uzunluğu arttıkça ve yay sabiti azaldıkça θ ve α açılarında oluşan hata değerleri artmaktadır. Ayrıca kontrolörün tasarlandığı model olan deney 2’ deki model için kesir dereceli PID kontrolör sisteme girilen birim dürtü fonksiyonuna karşın, 2.1 saniye gibi kısa bir sürede sistemi kararlı hale getirebilmekte ve bu sırada θ ve α açılarındaki hatalar sırasıyla 2.68 ve 1.26 derece olarak elde edilmektedir.

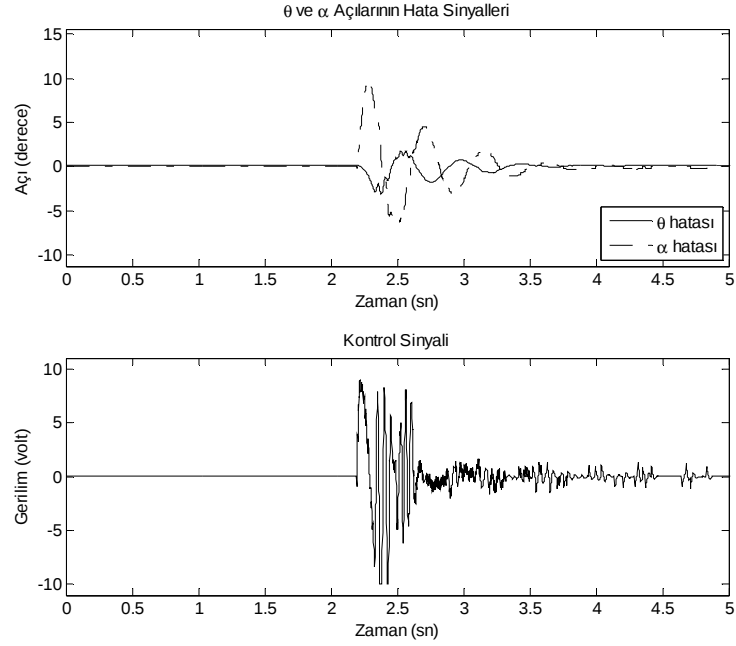
Tablo 5. 29: Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü yanıtı deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.8	1.6	2.57	1.8	0.05	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2	2.1	2.68	1.26	0.001	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2	1.9	1.8	2.85	0.22	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.8	1.9	2.52	1.26	0.15	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.4	2.3	2.7	1.89	0.13	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	2.5	2.2	2.82	2.52	0.015	0

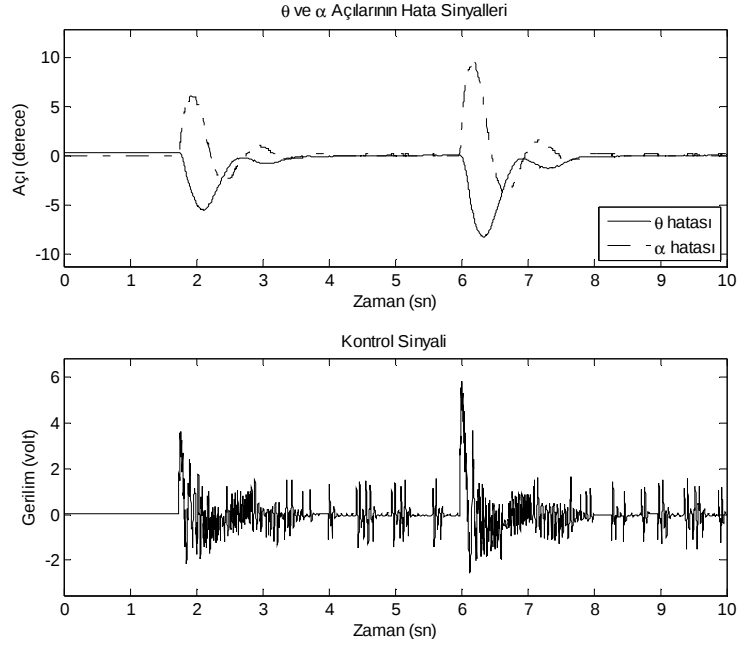
5.7.2.3.2. Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyleri



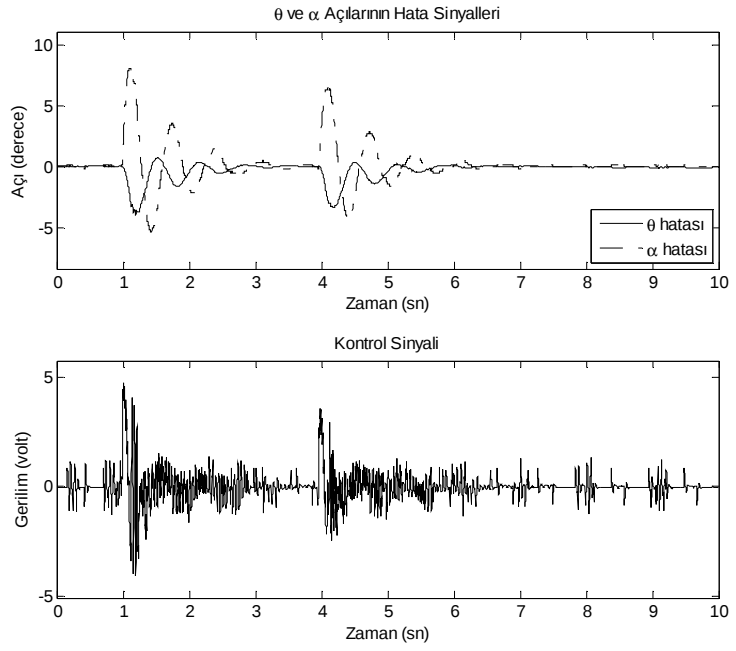
Şekil 5. 163: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



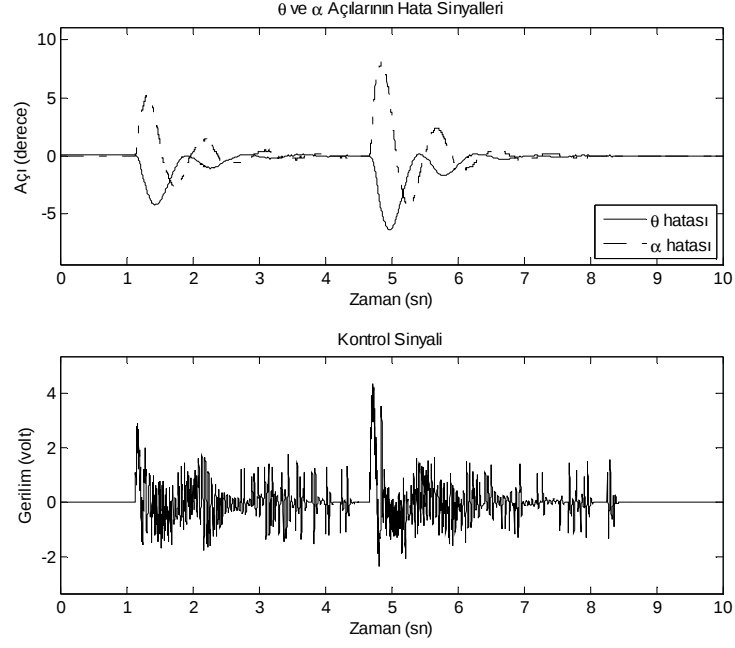
Şekil 5. 164: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



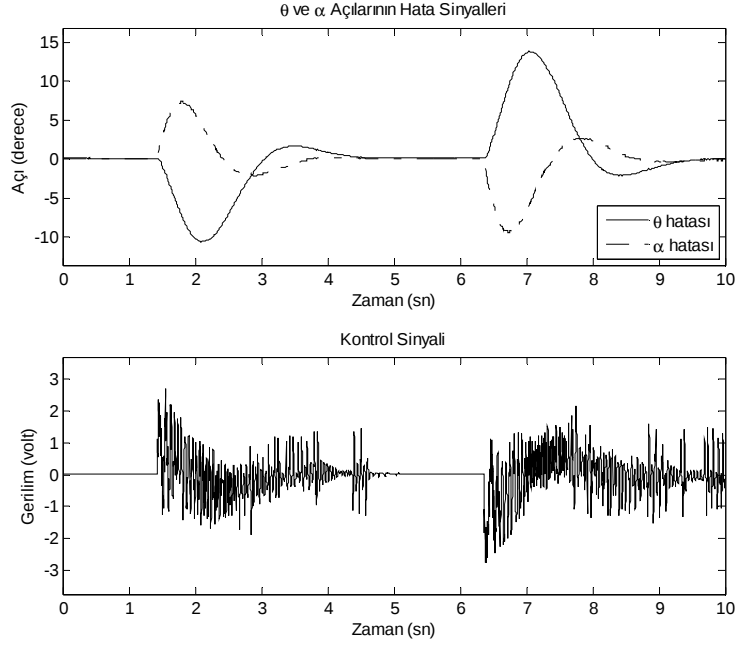
Şekil 5. 165: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.4 m)



Şekil 5. 166: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 99.19 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 167: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 58.86 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)



Şekil 5. 168: Bozucu darbe girişi (Yay sabiti 12.53 N/m, eklem uzunluğu 0.58 m)

Şekil 5.163 – 5.168’ de robot kolunun bozucu darbe deneyleri gösterilmektedir. Esnek eklemli robot kolunun uç işlevcisine bozucu darbeler anlık olarak verilen darbeler şeklinde uygulanmıştır ve bu darbeler kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünü test etmeye yardımcı olmaktadır. Tablo 5.30’ da kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe cevabı için deney sonuçları verilmektedir.

Tablo 5. 30: Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe yanıtı deney sonuçları

Yapılan Farklı Deneyler	Oturma Zamanı (s)		En Büyük Hata Değeri (derece)		Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	θ	α
DENEY 1 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	1.2	1.3	2.2	9	0.1	0
DENEY 2 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	1.3	1.4	3	9.7	0.2	0
DENEY 3 Eklem Uzunluğu: 0.4 m Yay Sabiti: 12.93 N/m	2.05	2	8.4	10	0.09	0
DENEY 4 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 99.19 N/m	2	2.1	4	8.2	0.2	0
DENEY 5 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 58.86 N/m	2.3	2.35	6.4	8.1	0.02	0
DENEY 6 Eklem Uzunluğu: 0.58 m Yay Sabiti: 12.53 N/m	2.8	2.95	9.5	14	0.05	0

Yapılan deneylerden görüldüğü üzere, deney 2’ deki model için geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, robot eklemının uç işlevcisine girilen ve α açısının 9.7 derece sapmasına neden olan bozucu etken karşısında, esnek eklemlili robot kolu sistemini 1.4 saniye gibi kısa bir sürede kararlı bir hale getirmiştir. Yapılan diğer deneylerden de görüldüğü üzere eklem uzunluğunun artması ve yay sabitinin azalması her ne kadar kontrolör performansını düşürse de, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör yapılan bütün deneylerde sistemi, Tablo 5.30’ da belirtilen sürelerde kararlı durumuna getirmeyi başarmıştır.

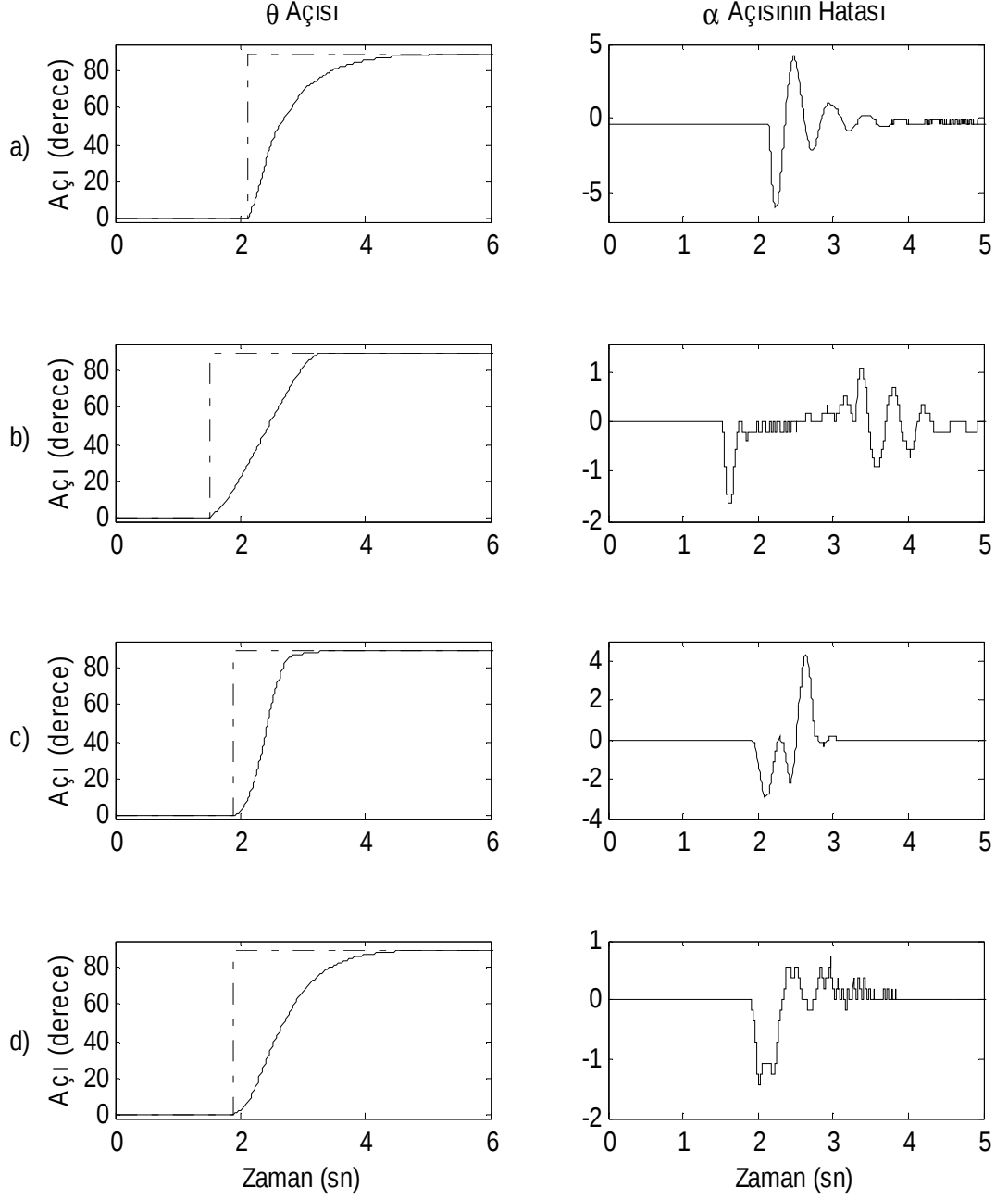
5.8. Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolü İçin Uygulanan Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu başlık altında esnek eklemlı robot kolunun kontrolü için uygulanan kontrol yöntemlerinin birbirleri arasında karşılaştırılmasına yer verilecektir.

Daha önceki başlıklardan görüleceğı üzere robot kolunun kontrol edilebilmesi için dört farklı kontrolör tasarlanmıştır. Bunlar; PID, bulanık mantık, durum geri beslemeli ve kesir dereceli PID kontrolörler olarak adlandırılmaktadırlar. Geliştirilen kontrolörlerin performansını ve gürbüzlüğünü test edebilmek amacıyla birçok deney yapılmıştır. Yapılan deneyler, konum kontrolü deneyleri, yörünge takibi deneyleri, birim dürtü cevabı deneyleri ve bozucu dış darbe girişı deneyleridir. Ayrıca esnek eklemlı robot kolunun model parametreleri olan eklem uzunluğu, yay sabiti ve gerilmemiş yay boyu değiştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrı başlıklar altında değerlendirilip yorumlanmış, deney sonuçları tablolar halinde belirtilmiştir.

Bu kısımda, geliştirilen farklı kontrolörlerin değerlendirilebilmesi için, esnek eklemlı robot kolunun yay sabiti 58.86 N/m olarak sabit tutulup, eklem uzunlukları 0.4 m ve 0.58 m olarak değiştirilmiştir. Elde edilen iki farklı robot kolu modeline daha önceki bölümlerde bahsedilen kontrolörler uygulanmıştır. Genel bir değerlendirme yapılabilmesi için robot koluna referans olarak sinüzoidal yörünge ve birim basamak fonksiyonu uygulanmıştır. Oluşturulan farklı modellerin, farklı referans girişleri için elde edilen sonuçları ayrı grafikler halinde çizdirilmiş ve ayrı tablolar halinde yorumlanmıştır.

5.8.1. Geliştirilen kontrolörlerin birim basamak girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması



Şekil 5. 169: Esnek eklemli robot kolunun birim basamak girişi deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Tablo 5. 31: Esnek eklemlı robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişı deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Etkin Titreşim Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	$\frac{\sqrt{\sum(\alpha e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(CS)^2}}{N}$	θ	α
PID Kontrolör	2.3	2.2	0	6.2	0.0083	0.0143	0.2	0
Bulanık Mantık Kontrolör	1.7	3.7	0	1.62	0.0025	0.0061	0.05	0
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	1.3	1.2	0	4.32	0.0061	0.0202	0.09	0
Kesir Dereceli PID Kontrolör	2.26	1.96	0	1.44	0.0022	0.0096	0.22	0

Tablo 5.31’ deki deney sonuçlarında görüldüğü üzere, geliştirilen farklı kontrolörlerle yapılan birim basamak girişı deney sonuçları, en hızlı oturma zamanına sahip olan kontrolörün durum geri beslemeli kontrolör, uç işlevcide en az sapmayı sağlayan kontrolörün kesir dereceli PID kontrolör olduğunu göstermektedir. Ancak, durum geri beslemeli kontrolör uygulanan birim basamak fonksiyonu sonrasında istenilen konuma giderken robot kolunun uç işlevcisinde tepe değeri 4.32 derece olan bir sapma meydana getirirken, kesir dereceli PID kontrolörde bu sapma değeri 1.44 derece olarak ölçülmüştür. Şekil 5.169 – a’ da görüleceği üzere PID kontrolör, kontrolör yapısında bulunan oransal katsayı nedeniyle referans sinyalin verildiği ilk anda uç işlevcide tepe değeri 6.2 dereceye ulaşan bir sapmaya neden olmuş ve toplam 2.3 saniyede istenilen referansa oturmuştur. Şekil 5.169 – b’ deki sonuçlara göre geliştirilen bulanık mantık kontrolör, doğrusal olmayan yapısı sayesinde, robot uç işlevcisindeki sapma miktarını 1.62 dereceye kadar düşürmüştür. Şekil 5.169 – c ve Şekil 5.169 – d’ de görüleceği üzere, tasarlanan kesir dereceli PID

ve durum geri beslemeli kontrolörlerin oturma zamanları sırasıyla 2.26 ve 1.3 saniye olarak ölçülmüştür. Bunlara ek olarak bütün kontrolörler söz konusu robot modeli için, motor dönme açısı olan θ açısında herhangi bir aşmaya sebebiyet vermemişlerdir. Ve esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için kullanılan farklı kontrolörlerin kalıcı durum hatalarına bakıldığında, planet dişli kutusunun ortalama diş boşluğu değeri olan 0.5 dereceden çok daha küçük oldukları gözlemlenmiştir.

Bunların dışında, esnek eklemlili robot kolunun yay sabiti 58.86 N/m ve eklem uzunluğu 0.4 m olan modelinin kontrolünde kullanılan kontrolörlerin, birim basamak cevabı sırasında, uç işlevciye oluşan titreşim hatası etkin değeri,

$$\text{Etkin değer} = \sqrt{\sum (xe)^2} / N \quad (5.20)$$

Denklem 5.20' deki gibi hesaplanmış ve Tablo 5.31' de gösterilmiştir. Burada, N toplanan veri sayısını, xe ise hata değerini göstermektedir. Elde edilen uç işlevci titreşim hatası etkin değerlerine göre, kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolörler titreşim hatasının en az olmasını sağlayan kontrolörlerdir. Denklem 5.20' de tanımlanan etkin titreşim değeri aynı zamanda, hem α açısının oturma zamanı hem de titreşim miktarı değerini içermektedir. Bu nedenle eğer, θ açısının oturma zamanını ve etkin titreşim değerini değerlendirme kriteri olarak belirleyip, gerekli normalizasyonlar yapıldıktan sonra bir maliyet fonksiyonu çıkarılabilir. Seçilen kriterlerin normalizasyonu, bütün değerlerin en büyük değere bölünmesi suretiyle yapılmıştır. Tablo 5.32' de belirtilen kriterlerin normalize edilmiş değerleri verilmiştir.

Tablo 5.32, kontrolörlerin değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerlerini göstermektedir. Tablo 5.31' de verilen değerlere göre PID kontrolörün motor dönme açısı oturma zamanı ve uç işlevci etkin titreşim miktarı değeri en büyük olduğu için Tablo 5.32' de normalizasyon değerleri "1" olarak hesaplanmıştır. Kriterlerin normalizasyon işlemleri yapıldıktan sonra, hangi kontrolörün titreşimi kontrol etmede, hangi kontrolörün daha hızlı olduğunu belirlemede ve hangi kontrolörün her

iki kriterde aynı derecede göz önünde tutulduğunda daha iyi olduğunu saptamak için üç farklı maliyet fonksiyonu tanımlanmıştır.

Tablo 5. 32: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	θ Açısı Oturma Zamanı	Etkin Titreşim Değeri
PID Kontrolör	1	1
Bulanık Mantık Kontrolör	0.7391	0.3012
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.5652	0.7349
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.9826	0.2651

Burada, kontrolörlerin hiçbirinde aşım meydana gelmediği için aşım kriteri değerlendirilmemiştir.

$$ML_1 = 0.3(ST\theta) + 0.7(RMS_{ae}) \quad (5. 21)$$

$$ML_2 = 0.5(ST\theta) + 0.5(RMS_{ae}) \quad (5. 22)$$

$$ML_3 = 0.7(ST\theta) + 0.3(RMS_{ae}) \quad (5. 23)$$

Denklem 5.21 – 5.23’ de, kriterlerin baskınlıklarına göre belirlenen maliyet fonksiyonları verilmiştir. $ST\theta$, θ açısının oturma zamanını, RMS_{ae} ise etkin titreşim miktarını göstermektedir. Burada, dikkat edilirse ML_1 ’ de uç işlevcinin hatasının baskınlığı, ML_3 ’ de oturma zamanının baskınlığı göz önünde tutulmuştur. ML_2 ’ de ise bütün kriterler aynı oranda hesaba katılmıştır.

Tablo 5. 33: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	ML_1	ML_2	ML_3
Bulanık Mantık Kontrolör	0.4326	0.5202	0.6077
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.4803	0.6239	0.7673
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.6840	0.6501	0.6161
PID Kontrolör	1	1	1

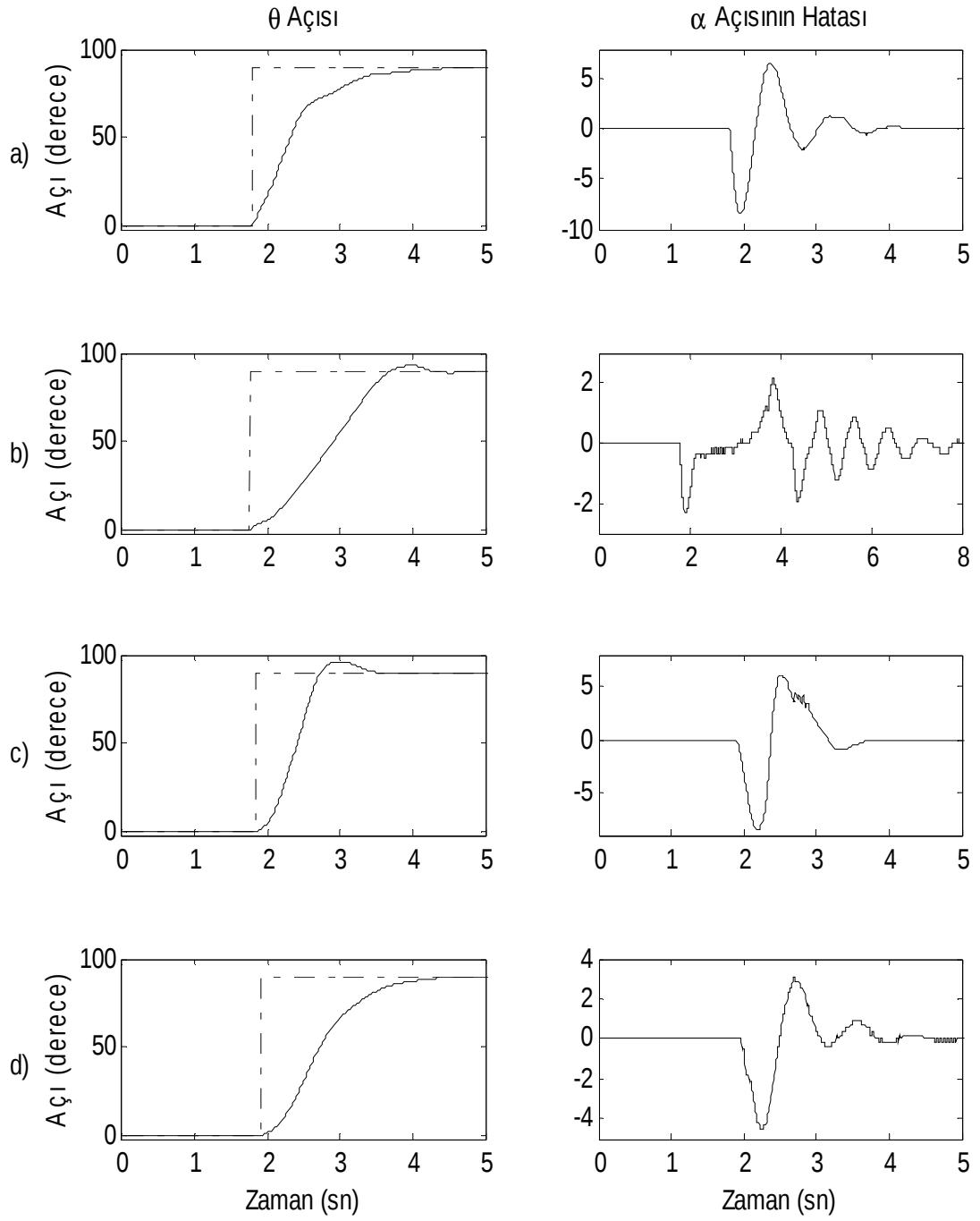
Burada, kullanılan değerlendirme kriterlerine göre maliyet fonksiyonu sonucu en küçük olan kontrolör en başarılı kontrolördür. Tablo 5.33’ deki sonuçlar incelendiğinde, bulanık mantık kontrolörün, belirlenen bütün maliyet fonksiyonları için en küçük sonuçları ürettiği görülmektedir.

Tablo 5.34’ de esnek eklemli robot kolunun eklem uzunluğu 0.58 m ve yay sabiti 58.86 N/m olan modeli için, uygulanan farklı kontrolörlerin birim basamak cevabı deney sonuçları yer almaktadır. Aynı model için, bulanık mantık kontrolör 2.34°’ lik tepe değeri ile uç işlevcide en az sapmanın oluşmasını sağlayan kontrolördür. Ancak bahsedilen bulanık mantık kontrolörün istenilen referans yörüngeye oturması sırasında θ açısında yüzde 3.3’ lük bir aşma meydana gelmiştir. Bu kontrolörde, θ açısı oturduktan sonra, α açısında en büyük değeri 0.7 dereceye ulaşan titreşimler meydana gelmiş ve daha sonra uç işlevci durgun hale gelmiştir. Söz konusu modelde yapılan deneyde, kesir dereceli PID kontrolör robot eklemının uç işlevcisinde en büyük sapma değeri 4.5 olacak şekilde sistemi durağan hale getirmeyi başarabilmiştir. Burada, PID kontrolörün ve durum geri beslemeli kontrolörün uç işlevcideki sapma değerleri sırasıyla, 8.5 ve 8.64 dereceye kadar ulaşmıştır. Durum geri beslemeli kontrolörde θ açısında yüzde 6’ ya varan bir aşım meydana gelmiştir. Ayrıca, uygulanan bütün kontrolörler birim basamak yanıtı sonunda, belirli bir kalıcı durum hatası oluşturmuştur ancak bu değerler, motorun planet dişlisinin diş boşluğundan çok daha küçük değerlerdir.

Tablo 5. 34: Esnek eklemlı robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişı deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Tepe Değeri (derece)	Etkin Titreşim Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	Kalıcı Durum Hatası (derece)	
	θ	α	θ	α	$\frac{\sqrt{\sum(\alpha e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(CS)^2}}{N}$	θ	α
PID Kontrolör	2.3	3.2	0	8.5	0.0156	0.015	0.25	0
Bulanık Mantık Kontrolör	1.9	6.15	3.3	2.34	0.0062	0.0061	0.18	0
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	1.4	2.2	6	8.64	0.0168	0.0181	0.1	0
Kesir Dereceli PID Kontrolör	2.18	4.31	0.3	4.5	0.0084	0.0097	0.26	0

Bunlara ek olarak, esnek eklemlı robot kolunun yay sabiti 58.86 N/m ve eklem uzunluğu 0.58 m olan modelinin kontrolünde kullanılan kontrolörlerin, birim basamak cevabı sırasında, uç işlevcide oluşan titreşim hatası etkin değeri Denklem 5.20' deki gibi hesaplanmış ve Tablo 5.34' de gösterilmiştir. Tabloda görüleceği üzere, bulanık mantık kontrolör ve kesir dereceli PID kontrolör, uç işlevcide en az titreşimin oluşmasını sağlayan kontrolörlerdir. Durum geri beslemeli kontrolör ise en hızlı oturma zamanına sahip olan kontrolördür. Burada değerlendirme kriterleri olarak θ açısının oturma zamanı, uç işlevci titreşiminin etkin değeri ve θ açısında meydana gelen yüzde aşım kullanılmıştır.



Şekil 5. 170: Esnek eklemlı robot kolunun birim basamak girişı deneyleri
 (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m) a) PID kontrolör cevabı
 b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı
 d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Belirlenen kriterlerin gerekli normalizasyon işlemleri daha önce anlatıldığı gibi yapıp normalizasyon sonrası elde edilen değler Tablo 5.35' de gösterilmiştir.

Tablo 5. 35: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	θ Açısı Oturma Zamanı	θ Açısı Aşım Miktarı	Etkin Titreşim Değeri
PID Kontrolör	1	0	0.9285
Bulanık Mantık Kontrolör	0.8260	0.55	0.3690
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.6086	1	1
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.9478	0.05	0.5

Esnek eklemli robot kolunda kullanılan kontrolörlerin, belirlenen kriterlerinin normalize edilmiş halleri tabloda verildiği gibidir. Bu aşamadan sonra, geliştirilen kontrolörleri karşılaştırabilmek için daha öncede yapıldığı gibi çeşitli maliyet fonksiyonları tanımlanmıştır.

$$ML_4 = 0.2(ST\theta) + 0.2(OV) + 0.6(RMS_{ae}) \quad (5.24)$$

$$ML_5 = 0.333(ST\theta) + 0.333(OV) + 0.334(RMS_{ae}) \quad (5.25)$$

$$ML_6 = 0.6(ST\theta) + 0.2(OV) + 0.2(RMS_{ae}) \quad (5.26)$$

Denklem 5.24 – 5.26’ da, belirlenen kriterlerin baskınlıklarına göre oluşturulan maliyet fonksiyonları verilmiştir. Burada, OV, θ açısında meydana gelen aşmayı göstermektedir. Dikkat edilirse ML_4 ’ de uç işlevcinin hatasının baskınlığı, ML_6 ’ de oturma zamanının baskınlığı göz önünde tutulmuştur. ML_5 ’ de ise bütün kriterler yaklaşık olarak aynı oranda hesaba katılmıştır.

Tablo 5.36’ da elde edilen maliyet fonksiyonu sonuçlarına göre, titreşim kontrolünde etkili olan kontrolör bulanık mantık kontrolördür. Kesir dereceli PID kontrolör ise oturma zamanı konusunda ve bütün kriterler eşit olarak değerlendirildiğinde en iyi sonuçları üretmiştir. Bununla birlikte bulanık mantık kontrolör ve kesir dereceli PID

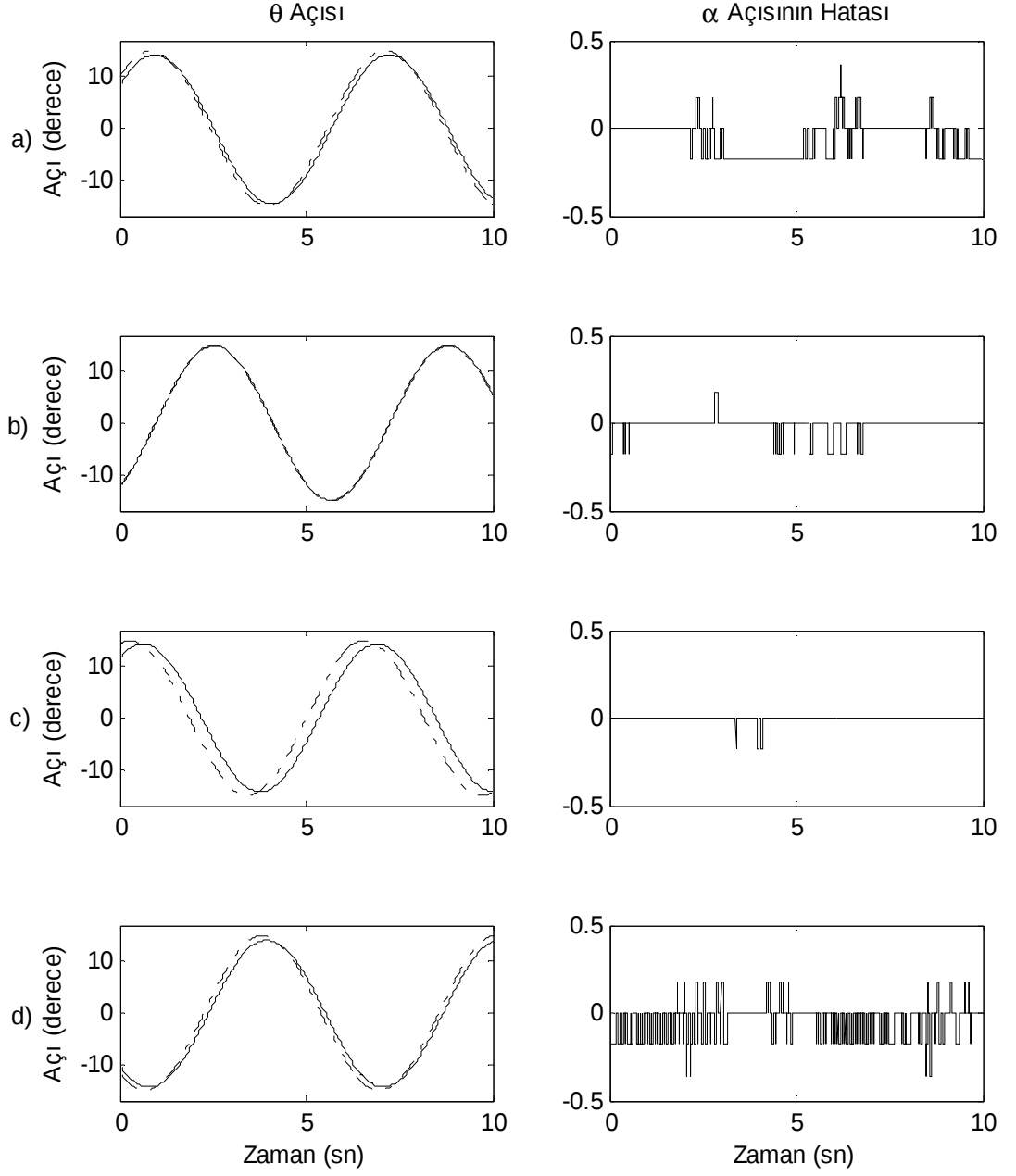
kontrolörün, etkin titreşim değeri ve oturma zamanının baskın olduğu durumlarda bir birlerine oldukça yakın sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5. 36: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	ML_4	ML_5	ML_6
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.4996	0.4993	0.6787
Bulanık Mantık Kontrolör	0.4966	0.5815	0.6794
PID Kontrolör	0.7571	0.6431	0.7857
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.9217	0.8697	0.7652

Geliştirilen bütün kontrolörlerle yapılan iki birim basamak girişi deneyi göz önüne alınıp farklı kontrolörler için bir performans değerlendirmesi yapılırsa, bulanık mantık kontrolörün ve kesir dereceli PID kontrolörün en iyi sonuçları elde ettiği görülmektedir. Durum geri beslemeli kontrolörün bu iki kontrolör kadar iyi sonuçlar elde edememesinin sebebi ise, kontrolörün yapısında bulunan durum kazançlarının deneme yanılma yöntemiyle elde edilmesidir. Eğer doğrusal karesel düzenleyici (LQR) yöntemiyle durum kazançları belirlenmiş olsaydı, durum geri beslemeli kontrolör, bulanık mantık ve kesir dereceli PID kontrolör kadar iyi sonuçlar üretebilirdi. Bilindiği gibi bir sistemin birim basamak cevabı o sistemin birçok çalışma frekansını içermektedir. Bu giriş için yapılan deney sonuçlarına dikkat edilirse kesir dereceli PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolör eklem uzunluğunun artmasına rağmen uç işlevciadaki sapma miktarını sınırlı tutarak PID ve durum geri beslemeli kontrolörlere göre daha gürbüz bir yapıda olduklarını göstermişlerdir. Aynı zamanda eğer bölüm 5.7’ deki kesir dereceli PID ve PID kontrolörlerin bode diyagramları incelenirse, kesir dereceli PID kontrolörün, PID kontrolöre göre yüksek ve düşük frekanslarda daha kararlı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

5.8.2. Geliştirilen kontrolörlerin sinüzoidal yörünge girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması



Şekil 5. 171: Esnek eklemli robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m) a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Tablo 5. 37: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	Etkin Titreşim Değeri	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	Etkin θe Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
		$\frac{\sqrt{\sum(\alpha e)^2}}{N}$		$\frac{\sqrt{\sum(\theta e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(CS)^2}}{N}$	
PID Kontrolör	0.36	0.0012	2.45	0.0232	0.0097	0.15
Bulanık Mantık Kontrolör	0.18	0.0005	0.22	0.0015	0.0040	0.01
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.18	0.0002	4.78	0.033	0.0025	0.32
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.36	0.001	1.95	0.013	0.0055	0.1

Şekil 5.171' den görüleceği üzere esnek eklemli robot kolunun eklem uzunluğu 0.4 m ve yay sabiti 58.86 N/m olan modeline referans olarak $15\sin(1\text{rad})$ şeklinde sinüzoidal bir giriş uygulanmış ve robot kolunun bu referans yörüngeyi takip etmesi istenmiştir. Tablo 5.33, uygulanan farklı kontrolörlerin verilen referans yörüngeyi takibi sonucu elde edilen deneysel sonuçları, etkin titreşim ve etkin θe değerlerini göstermektedir.

Verilen referans yörünge takibi sırasında, bulanık mantık kontrolörle yapılan deneyde robot uç işlevcisinde en büyük 0.18 derece hata, motor dönme açısında ise en büyük 0.22° lik hata oluşmuştur ve bu sonuç söz konusu modelle elde edilen en iyi sonuçtur. Durum geri beslemeli kontrolörle yapılan deneyde de uç işlevcide 0.18° lik hata meydana gelmiş ancak geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün verilen referans yörüngeyi izlemesi sırasında oluşan ve 0.32 dereceye varan faz farkı

nedeniyle motor dönme açısı olan θ açısında en büyük 4.78 dereceye varan hatalar meydana gelmiştir. Bunlara ek olarak, esnek eklemli robot kolunun yay sabiti 58.86 N/m ve eklem uzunluğu 0.4 m olan modelinin kontrolünde kullanılan kontrolörlerin, sinüzoidal yörünge takibi sırasında, uç işlevcide oluşan titreşim hatası etkin değeri ve θ_e etkin değeri Denklem 5.20’ de olduğu gibi hesaplanıp Tablo 5.37’ de gösterilmiştir. Robot kolunun sinüzoidla yörünge takibi sırasında hangi kontrolörün en iyi sonuçları ürettiğini göremek amacıyla, etkin α_e ve θ_e değerleri için maliyet fonksiyonları oluşturulmuştur.

$$ML_7 = 0.3(RMS\theta_e) + 0.7(RMS\alpha_e) \quad (5.27)$$

$$ML_8 = 0.5(RMS\theta_e) + 0.5(RMS\alpha_e) \quad (5.28)$$

$$ML_9 = 0.7(RMS\theta_e) + 0.3(RMS\alpha_e) \quad (5.29)$$

Denklem 5.27 – 5.29’ da esnek eklemli robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi için oluşturulan maliyet fonksiyonları verilmiştir. Burada, $RMS\theta_e$, θ açısının hatasının etkin değerini simgelemektedir. Görüleceği gibi, ML_7 ’ de uç işlevci hatasının etkin değeri, ML_9 ’ da motor dönme açısı hatasının etkin değeri, ML_8 ’ de ise her iki hata değeride aynı derecede baskındırlar. Bu hataların etkin değerleri için gerekli normalizasyon işlemleri daha önce anlatıldığı gibi yapıp elde edilen değerler, Tablo 5.38’ de verilmiştir.

Tablo 5. 38: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	Etkin Titreşim Değeri	Etkin θ_e Değeri
PID Kontrolör	1	0.7030
Bulanık Mantık Kontrolör	0.4166	0.0454
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.1666	1
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.8333	0.3939

Geliştirilen kontrolörlerin sinüzoidal yörünge takibindeki sonuçlarını karşılaştırmak için normalize edilmiş kriterlerin Denklem 5.27- 5.29’ daki denklemlerde yerine koyulması gerekmektedir. Tablo 5.39, kullanılan kontrolörler için oluşturulan maliyet fonksiyonlarının sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 5. 39: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.4 m)

Kullanılan Kontrolör	ML_7	ML_8	ML_9
Bulanık Mantık Kontrolör	0.1568	0.2310	0.3052
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.5257	0.6136	0.7015
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.7500	0.5833	0.4166
PID Kontrolör	0.7921	0.8515	0.9109

Geliştirilen bulanık mantık kontrolör, oluşturulan bütün maliyet fonksiyonları için sinüzoidal yörünge takibinde en iyi sonuçlar üreten kontrolör olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda kesir dereceli PID kontrolör de etkin titreşim değerinin baskın olduğu maliyet fonksiyonunda oldukça iyi bir sonuç üretmiştir. PID kontrolör ise oluşturulan maliyet fonksiyonlarına göre, sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde geliştirilen kontrolörler arasında en kötü sonuçları üreten kontrolör olarak belirlenmiştir. Ancak, Tablo 5.37’ deki sonuçlar incelendiğinde kabul edilebilir sonuçlar ürettiği görülmüştür.

Görüleceği üzere geliştirilen kesir dereceli PID ve PID kontrolörler, uç işlevcide 0.36° ’ lik hatalar meydana gelmesini engelleyemez iken kesir dereceli PID kontrolör PID kontrolöre göre motor dönme açısından daha küçük bir hata ile verilen referans yörüngeyi takip etmeyi başarmıştır. Verilen bode diyagramlarında da görüldüğü gibi kesir dereceli PID kontrolör, PID kontrolöre göre yüksek ve düşük çalışma frekanslarında daha iyi sonuçlar üretmektedir. Kesir dereceli PID kontrolörün tam sayı olmayan transfer fonksiyonu derecesi nedeniyle PID kontrolörün erişmekte yetersiz kaldığı frekanslara erişerek daha iyi bir kontrol oluşturmaktadır. Ayrıca

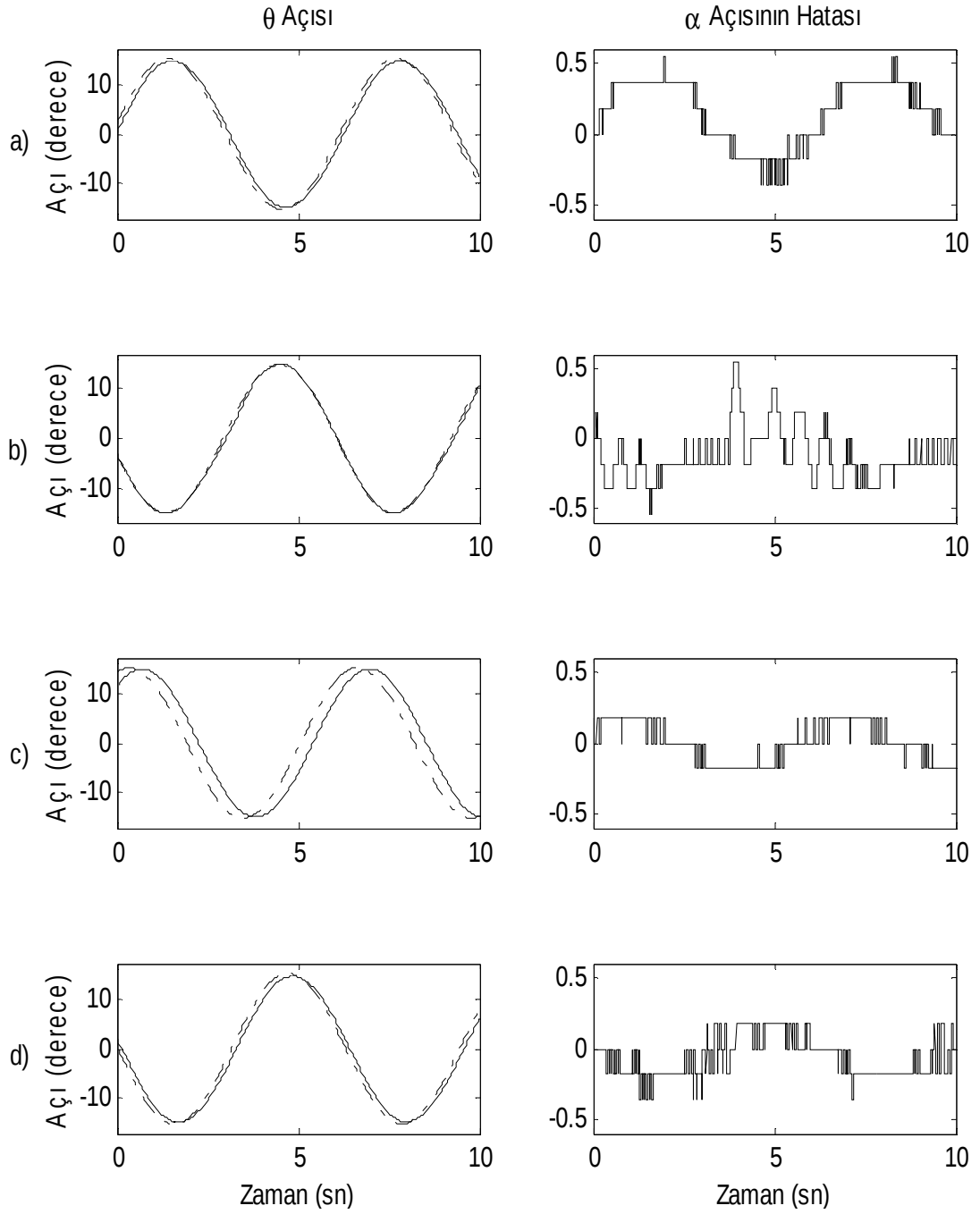
geliştirilen bulanık mantık kontrolörün, doğrusal olmayan yapısı sayesinde, doğrusal olmayan dinamiğe sahip olan esnek eklemli robot kolunun, verilen referans yörüngeyi yüksek hassasiyette takip etmesi beklenen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 5. 40: Esnek eklemli robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	α Açısındaki En Büyük Titreşim (derece)	Etkin Titreşim Değeri	θ Açısında Oluşan En Büyük Hata (derece)	Etkin θe Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
		$\frac{\sqrt{\sum(\alpha e)^2}}{N}$		$\frac{\sqrt{\sum(\theta e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(\theta e)^2}}{N}$	
PID Kontrolör	0.54	0.0027	2.95	0.0251	0.0102	0.13
Bulanık Mantık Kontrolör	0.54	0.0022	1.5	0.0052	0.0041	0.1
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.18	0.0014	5.15	0.0351	0.0026	0.35
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.36	0.0015	2.05	0.0136	0.0050	0.13

Şekil 5.172’ de esnek eklemli robot kolunun yay sabiti 58.86 N/m ve eklem uzunluğu 0.58 m olan modeli için farklı kontrolörlerle yapılan deneyleri ve Tablo 5.40’ da bu deneylerin sonuçları gösterilmektedir.

Görüleceği üzere bir önceki sinüzoidal yörünge takibi deneyine göre eklem 0.18 m daha uzatılmasıyla bütün kontrolörler uç işlevcide ve motor dönme açısında daha fazla hata oluşmasını engelleyememişlerdir ki, eklem 0.18 m daha uzatılmasının eklem rijitliğini azalttığı düşünüldüğünde bu beklenen bir durumdur.



Şekil 5. 172: Esnek eklemlı robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri
 (Yay sabiti 58.86 N/m, Eklem uzunluğu 0.58 m) a) PID kontrolör cevabı
 b) Bulanık mantık kontrolör cevabı c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı
 d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Elde edilen deney sonuçlarına göre, Bulanık mantık kontrolör ve PID kontrolör uç işlevicide 0.54° lik hatanın meydana gelmesini engelleyememişlerdir ve θ açısında oluşan hatalar bulanık mantık kontrolörle 1.5 dereceyi, PID kontrolörle ise 2.95 dereceyi bulmuştur. Görüleceği üzere uç işlevicideki en küçük titreşim değerleri durum geri beslemeli kontrolörle gerçekleşmiştir ancak bu kontrolörün istenilen referans yörüngeyi takibi sırasında oluşturduğu faz farkı 5.15 derece gibi oldukça yüksek bir değerdir. Kesir dereceli PID kontrolör ise, uç işlevicide oluşan 0.36° lik sapmaları engelleyememiş ve söz konusu model için verilen referansı 0.13 saniyelik faz farkı ve θ açısında ki 2.05° lik hata ile takip etmeyi başarmıştır.

Bunların dışında, esnek eklemlili robot kolunun 58.86 N/m yay sabiti ve 0.58 m eklem uzunluğu olan modeli için uygulanan sinüzoidal yörünge takibi deneyinde, kullanılan bütün kontrolörler için oluşan titreşim hatası etkin değeri ve motor dönme açısı etkin değeri, Denklem 5.20' de gösterildiği gibi hesaplanıp, elde edilen değerler Tablo 5.40' da gösterilmiştir.

Tablo 5. 41: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Eklem uzunluğu: 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	Etkin Titreşim Değeri	Etkin θ e Değeri
PID Kontrolör	1	0.7150
Bulanık Mantık Kontrolör	0.8148	0.1481
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.5185	1
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.5555	0.3874

Esnek eklemlili robot kolunun söz konusu modeline uygulanan tüm kontrolörlerin birbirleri arasında karşılaştırılmasını yapmak amacıyla, elde edilen etkin değerler daha önce anlatıldığı gibi normalize edilip, oluşturulan maliyet fonksiyonlarında yerlerine koyularak istenilen karşılaştırma yapılabilmektedir. Burada kullanılacak olan maliyet fonksiyonları Denklem 5.27 – 5.29' da verilmiştir. Buan göre etkin

değerlerin normalizasyonu yapıldıktan sonra elde edilen sonuçlar Tablo 5.41’ de gösterilmiştir. Normalize edilen etkin değerler maliyet fonksiyonlarında yerine koyulup, kullanılan bütün kontrolörlerin oluşturulan bütün maliyet fonksiyonları için ürettikleri sonuçlar Tablo 5.42’ de gösterilmiştir.

Tablo 5. 42: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi, Yay sabiti: 58.86, Ekleme uzunluğu: 0.58 m)

Kullanılan Kontrolör	ML_7	ML_8	ML_9
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.5051	0.4715	0.4378
Bulanık Mantık Kontrolör	0.6148	0.4814	0.3481
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.6629	0.7592	0.8555
PID Kontrolör	0.9145	0.8575	0.8005

Oluşturulan maliyet fonksiyonlarına dikkat edilirse, ML_7 ’ de uç işlevci hatasının etkin değeri, ML_9 ’ da motor dönme açısı hatasının etkin değeri, ML_8 ’ de ise her iki hata değerinde aynı derecede baskındırlar. Buna göre eklemin uzatılması durumunda yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneyinde bulanık mantık kontrolör, oluşturulan maliyet fonksiyonu için, istenilen referans yörüngeyi takip etmede en iyi sonuçları üreten kontrolördür. Kesir dereceli PID kontrolör ise, oluşturulan maliyet fonksiyonlarına göre titreşim değerini en iyi kontrol eden kontrolör olarak belirlenmiştir. Görüleceği üzere PID kontrolör oluşturulan maliyet fonksiyonları için en kötü sonuçları üretmiş olsa bile Şekil 5.172’ ye bakıldığında oldukça iyi bir referans yörünge takibi gerçekleştirdiği söylenebilir. Bunun yanında durum geri beslemeli kontrolörün durum kazançları doğrusal karesel düzenleyici yardımıyla optimize edilerek, sinüzoidal yörünge takibinde oluşturduğu hatalar giderilebilir.

Esnek eklemli robot kolunun iki farklı modeli için yapılan sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçlarına göre, bulanık mantık kontrolör kullanılarak yapılan deneylerde diğer kontrolörlere göre daha iyi sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Sistemin

model parametresi olan eklem uzunluğunun arttırılmasına rağmen, kesir dereceli PID kontrolör, PID kontrolöre göre daha iyi sonuçlar üretmektedir ve bu iki kontrolör arasında kesir dereceli PID kontrolörün daha gürbüz bir yapıya sahip olduğu söylenebilmektedir.

Son olarak esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için genel bir değerlendirme yapmak gerekirse, tasarlanan robot kolunun model parametresi olan eklem uzunluğu arttırıldığında, eklem ataleti artmakta, eklem kütle merkezinin eklem dönme merkezine olan uzaklığı artmakta, eklem salınım frekansı azalmakta ve bununla birlikte eklem rijitliği azalmaktadır. Aynı zamanda robot kolunun diğer bir model parametresi olan yay sabiti azaltıldığında eklem salınım frekansı azalmakta ancak yay sabitinin azalması eklem rijitlik özelliğinin de azalması anlamına gelmektedir. Eklem model parametrelerin değiştirilerek robotun dinamiklerinde meydana getirilen bu değişimler robot kolunun doğrusalsızlığını arttırarak kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, geliştirilen bütün kontrolörlerle yapılan bütün deneyler göz önüne alındığında, eklem uzunluğunun arttırılması ve yay sabitinin azaltılması kullanılan bütün kontrolörlerde kontrol performansının azalmasına neden olmuş ve bunun tam tersi durumlar ise kontrolör performansını arttırmıştır.

Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için tasarlanan bütün kontrolörlere konum kontrolü, yörünge takibi deneyleri yapılmış, kontrolörün kararlılığının ve gürbüzlüğünün test edilmesi için robot koluna birim dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişi uygulanmıştır. Deney sonuçlarına bakılırsa bütün kontrolörler, kararlı, bir dereceye kadar istenilen yörüngeyi takip edebilen, istenilen konumda belirli bir hassasiyette gerekli konumlamayı yapabilen sonuçlar üretmişlerdir. Fakat yapılan deney sonuçları göz önüne alındığında, geliştirilen kontrolörler arasında, bulanık mantık kontrolör ve kesir dereceli PID kontrolörün geniş çalışma frekansı ve doğrusal olmayan yapıları yüksek hassasiyette kontrol edebilme yeteneklerinden ötürü, en başarılı sonuçlar bu kontrolörle yapılan deneylerde elde edilmiştir. Geliştirilen durum geri beslemeli ve PID kontrolör ise doğrusal yapıları ve tasarım sırasında kontrolör kazançlarının deneme yanılma yöntemleriyle elde edilmesi nedeniyle oluşan optimizasyon eksiklikleri sonucu robot

uç işlevcisinin hassas kontrolü konusunda belirli bir yerde kalmışlar ve kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolör kadar başarılı olamamışlardır. Model parametrelerinin değiştirilmesiyle yapılan deneylerde ise, kullanılan kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolörlerin, durum geri beslemeli ve PID kontrolörlere göre daha gürbüz bir yapıya sahip oldukları görölmektedir.

6. ESNEK BAĞLI ROBOT KOLUNUN KONTROLÜ

Bu bölümde esnek bağlı robotun kontrolü konusunda bugüne kadar yapılan çalışmalar, esnek eklemli robotun kontrolünde kullanılan kontrol şemalarının kısaca özetlenmesi, robotun açık çevrim cevapları, robota uygulanan farklı kontrol yöntemleri ve bunların deneysel sonuçları incelenecektir.

6.1. Esnek Bağlı Robotun Kontrolü Konusunda Bugüne Kadar Yapılan Çalışmalar

Esnek bağlı robotların matematiksel olarak modellenmesi, bağın modlarının ve mod şekillerinin belirlenmesinde olduğu gibi bağ yapısı esnek olan robotların kontrol edilmesi konusunda da günümüze kadar birçok akademik ve endüstriyel çalışma yapılmıştır.

Literatürde esnek bağlı robotların kontrolü iki farklı yaklaşımla gerçekleştirilmektedir. Bunlardan birincisi, doğrusal kontrol yöntemleriyle bağ esnekliğine sahip robotların kontrol edilmesi, ikincisi ise bu tip robotların kontrol edilmesinde doğrusal olmayan kontrol algoritmalarının kullanılmasıdır. Literatürde her iki yaklaşım içinde birçok çalışma yer almaktadır.

Bugüne kadar, esnek bağlı robotların doğrusal kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesi konusundaki çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir. Ho ve Tu [72], esnek bağlı robot kolunun pozisyon kontrolünü H_∞ tabanlı PID kontrolörle gerçekleştirmişlerdir. Zain ve diğ. [73], dikey eksende hareket edebilen esnek bağlı bir robotun kontrolünü PID tabanlı kontrol yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Atashzar ve diğ. [74], esnek bağın yörünge takibi kontrolünde gürbüz bir geri besleme doğrusallaştırması yöntemi kullanmıştır. Baroudi ve diğ. [75], doğrusal karesel düzenleyici (LQR) uyguladıkları esnek bağlı bir robot kolunun durum geri beslemeli kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Solihin ve diğ. [76], esnek bağlı robot kolunun yörünge takibi kontrolünde doğrusal

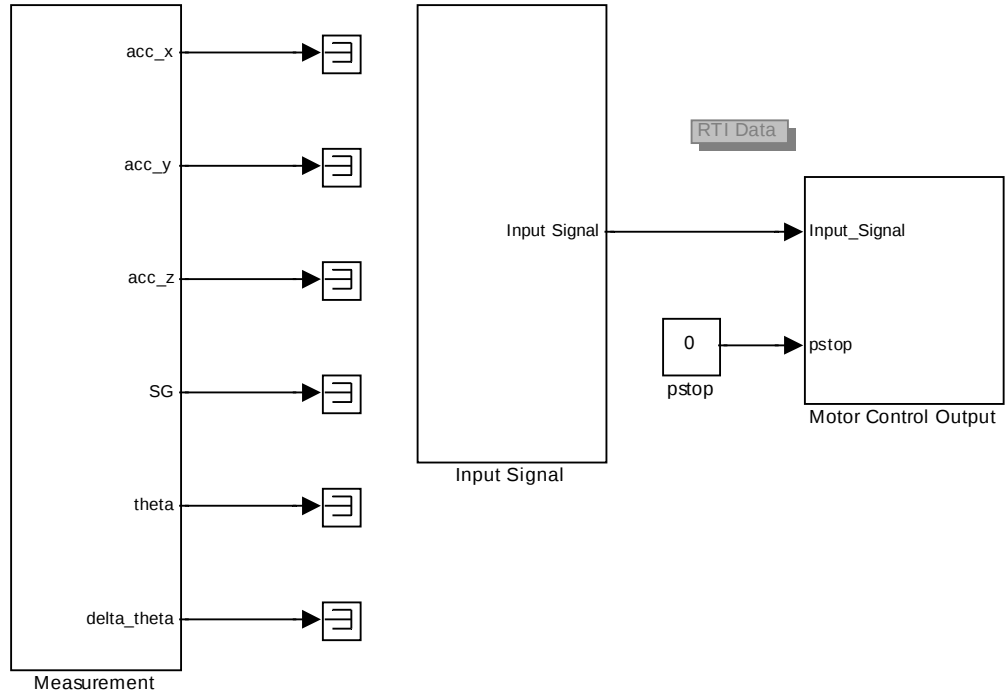
karesel düzenleyici (LQR) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile tasarlanmış durum geri beslemeli kontrolörlerin karşılaştırılmasını işlemişlerdir. Ayrıca esnek bağlı robotların doğrusal olmayan kontrol yöntemleriyle kontrol edilmesi konusundaki çalışmalar şu şekilde özetlenebilir. Zebin ve Alam [77], genetik optimizasyon tekniklerini kullanarak, iki eklemli esnek bağlı bir robot kolunun dinamik modellemesi ve bulanık mantıkla kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Mougda ve diğ. [78], esnek bağlı robot kolunun kural tabanlı bulanık mantık kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Nikpay ve diğ. [79], esnek bağlı robot kolunun uyarlamalı kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Lih-Chang ve Ting-Wang [80], esnek bağlı robot kolu kontrolü için model tabanlı sinirsel ağ (neural network) kontrolör kullanmışlardır. Arısoy ve diğ. [81], esnek bağlı robot kolu kontrolünde kayma kipli kontrolör kullanmışlardır. Zhang ve diğ. [82], esnek bağlı robot kolunun yörünge takibi kontrolünü uyarlamalı kayma kipli kontrolör ile gerçekleştirmişlerdir.

6.2. Esnek Bağlı Robot Kolunun Kontrolünde Kullanılan Kontrol Yöntemleri

Esnek bağlı robot kolunun kontrolünde kullanılan kontrol yöntemleri, bölüm 5.2' de anlatılan esnek eklemli robot kolunun kontrol yönteminde kullanılan, PID kontrol yöntemi, bulanık mantık kontrol yöntemi, durum geri beslemeli kontrol yöntemi ve kesir dereceli PID kontrol yöntemleridir. Söz konusu kontrolörlerin kontrol yapıları ve çalışma şekilleri detaylı olarak bölüm 5.2' de ayrı başlıklar altında anlatıldığı için bu bölümde tekrar işlenmeyecektir.

6.3. Esnek Bağlı Robot Kolunun Açık Çevrim Cevapları

Bu bölümde, esnek bağlı robot kolunun, bağ uzunluğu 0.4 m, genişliği, 0.02 m, kalınlığı 0.001 m, ağırlığı 0.021 kg ve bağın salınım frekansı 3.86 Hz olan modeli için, sistemin açık çevrim cevapları incelenmiştir. Esnek bağlı robot koluna, birim basamak girişi, ve sinüzoidal yörünge girişi verilip sistem çıkışı olan motor dönme açısı, uç işlevcinin titreşim miktarı ve uç işlevcinin sapma miktarı gözlemlenmiştir.



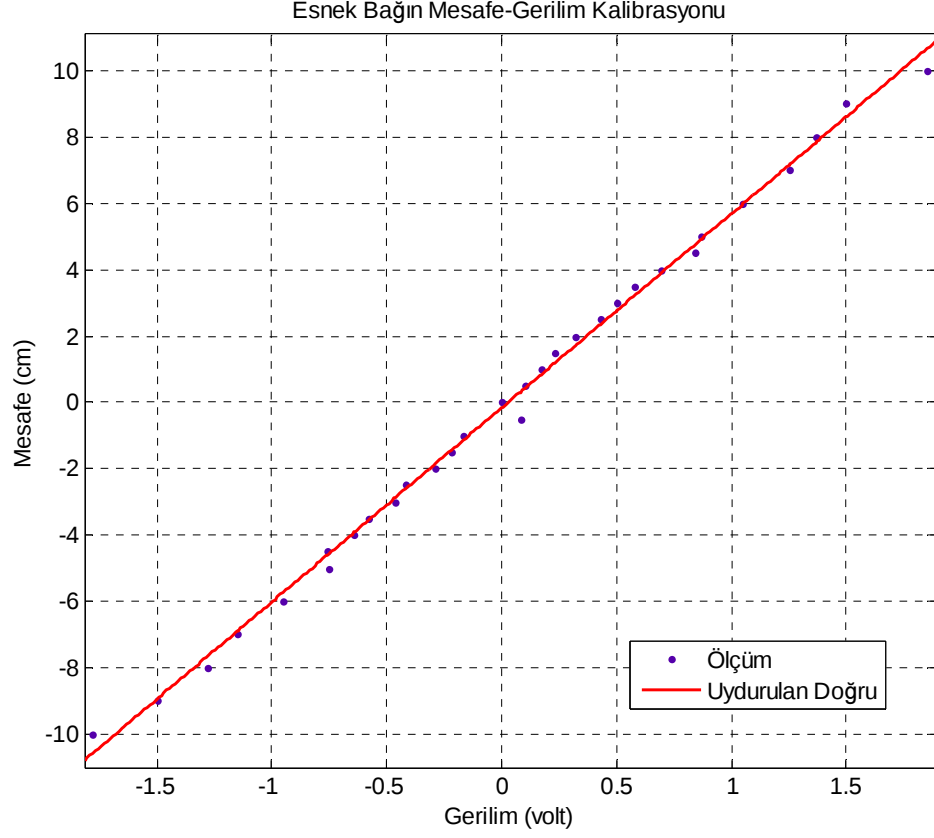
Şekil 6. 1: Esnek bağı robot kolunun açık çevrim simulink blokları

Şekil 6.1’ den görüleceği üzere açık çevrim simulink blokları üç ana yapıdan oluşmaktadır. Bunlardan ölçüm bloğu esnek bağı uç işlevcisinin konumu, titreşimi ve motorun açısı gibi değişkenleri ölçer, giriş bloğu sisteme istenilen girişin verilmesini sağlar ve çıkış bloğu bağı hareket edebilmesi için motora gerekli sinyalleri gönderen bloktur.

Daha önce bölüm 2’ de anlatıldığı gibi esnek bağı robot kolunun motor dönme açısı olan θ açısı motora bağı bir optik kodlayıcıyla, esnek bağı uç noktasının ivmesi $\ddot{\alpha}$, bağı ucuna bağılanan bir ivmeölçer ile ölçülmüştür.

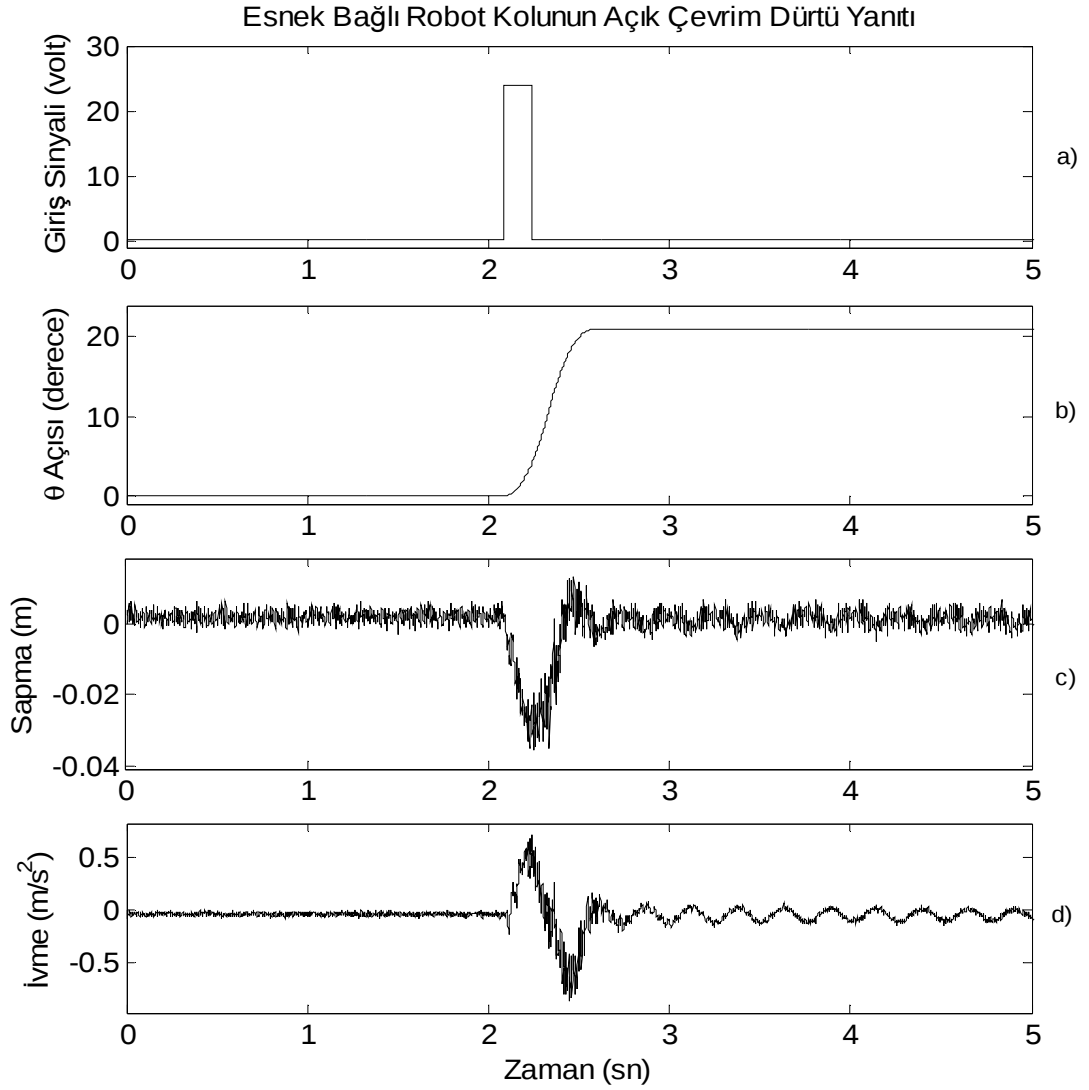
Ayrıca bağı döner tablayla birleştiği yere bağılanan bir yük hücresi yardımıyla bağı uç noktasının sapma miktarı (δ) ölçülebilmektedir. Bahsedilen sapma miktarını ölçebilmek için gerilim sinyali üreten yük hücresinin metre/gerilim kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Bu kalibrasyonu yapabilmek için yük hücresinin ucuna kullanılacak olan esnek bağı bağılanmış, bağı uç noktası ± 0.1 m civarında farklı uzaklıklara götürülerek her mesafe değeri için birçok veri toplanmıştır. Toplanan

veriler Matlab/Curve Fitting Toolbox kullanılarak yük hücresinin m/V kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir.



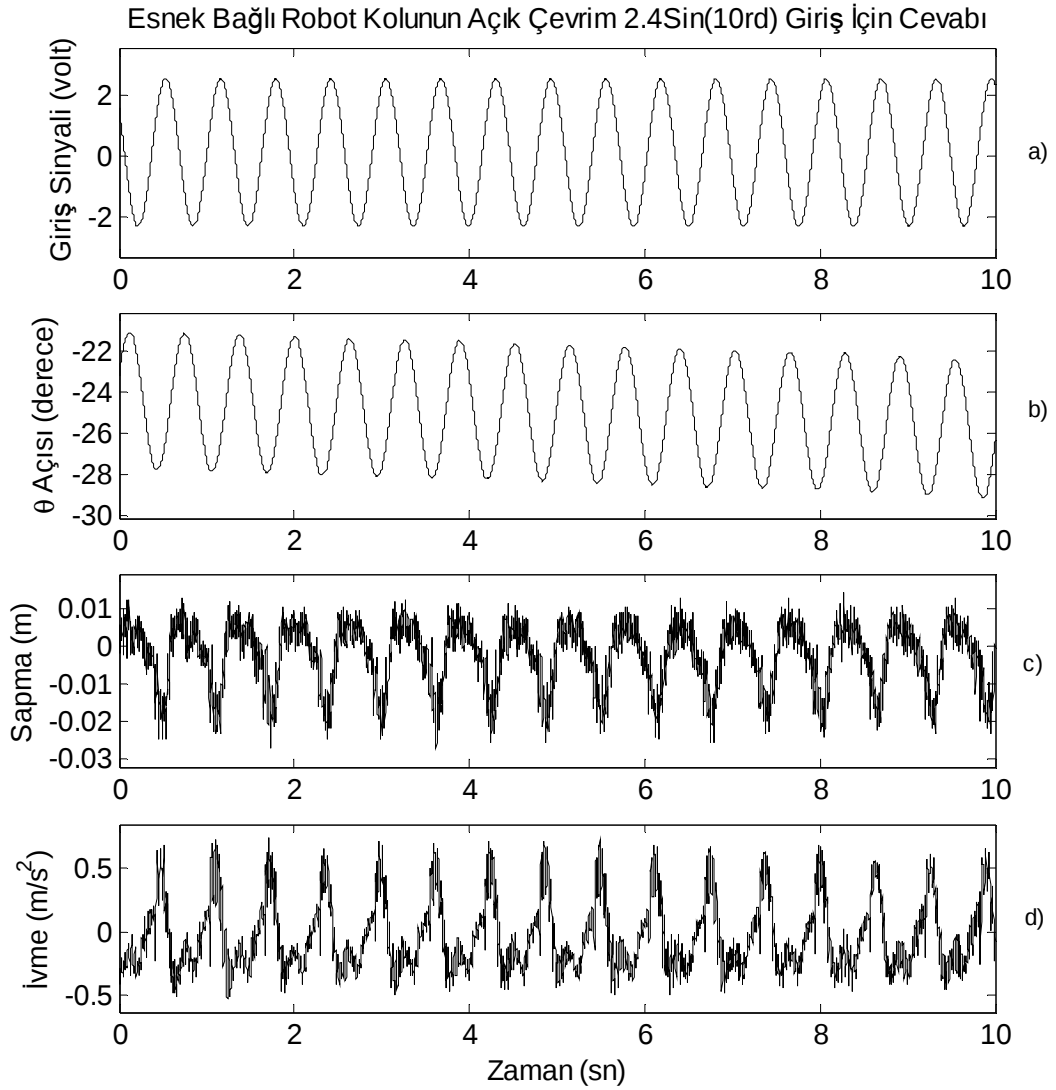
Şekil 6. 2: Esnek bağın mesafe-gerilim kalibrasyonu eğrisi

Şekil 6.2' de esnek bağın mesafe-gerilim kalibrasyonu için uydurulan eğri gösterilmektedir. Bu eğri görüleceği gibi cm/V' a göre uydurulmuş olup eğrinin eğimi 5.852 olarak hesaplanmıştır. Bağın m/V kalibrasyonu yapmak için yük hücresinden elde edilen gerilim değerini 0.05852 ile çarpmak gerekir ve bu sayede esnek bağın, 1 volta karşı metre cinsinden sapma miktarı kalibrasyonu gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 6. 3: Esnek bağlı robot kolunun açık çevrim dürtü yanıtı

Şekil 6.3 esnek bağlı robot kolunun açık çevrim dürtü yanıtını göstermektedir. Şekil 6.2 – a, motora uygulanan ve anlık olan verilen 24 voltluk giriş sinyalidir. Şekil 6.3 – b, girilen referans giriş karşısında motorun dönme açısını, Şekil 6.3 – c, bağın uç işlevcisinin, bağın esnemesinden dolayı oluşan, sapma miktarını ve son olarak Şekil 6.3 – d, bağın uç işlevcisinin ivmesini göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere esnek bağlı robot koluna uygulanana anlık giriş sinyali motorun belli bir açıya kadar dönmesine ve esnek bağın uç işlevcisinde belirli bir sapma miktarına ve titreşime sebep olmaktadır. Oluşan bu titreşim ve sapma belirli bir süre sonra azalarak başlangıç değeri olan sıfıra oturmaktadır.



Şekil 6. 4: Esnek bağlı robot kolunun açık çevrim 2.4sin(10rd) girişi için cevabı

Şekil 6.4, esnek bağlı robot koluna giriş olarak verilen 2.4 volt genlikli ve 10 rad/sn frekansa sahip olan sinüzoidal bir sinyale karşı robotun oluşturduğu açık çevrim yanıtını göstermektedir. Şekil 6.4 – b’ de görüleceği üzere motor dönme açısı verilen referans sinyal ile aynı frekansı takip edecek şekilde bir hareket oluşturmaktadır. Ancak dikkat edilirse motor dönmesi sonunda oluşan çıkış zamanla sinüzoidal olarak azalan bir çıkış üretmektedir. Bunun nedeni motorun bağlanmış olduğu planet dişlideki diş boşluklarıdır.

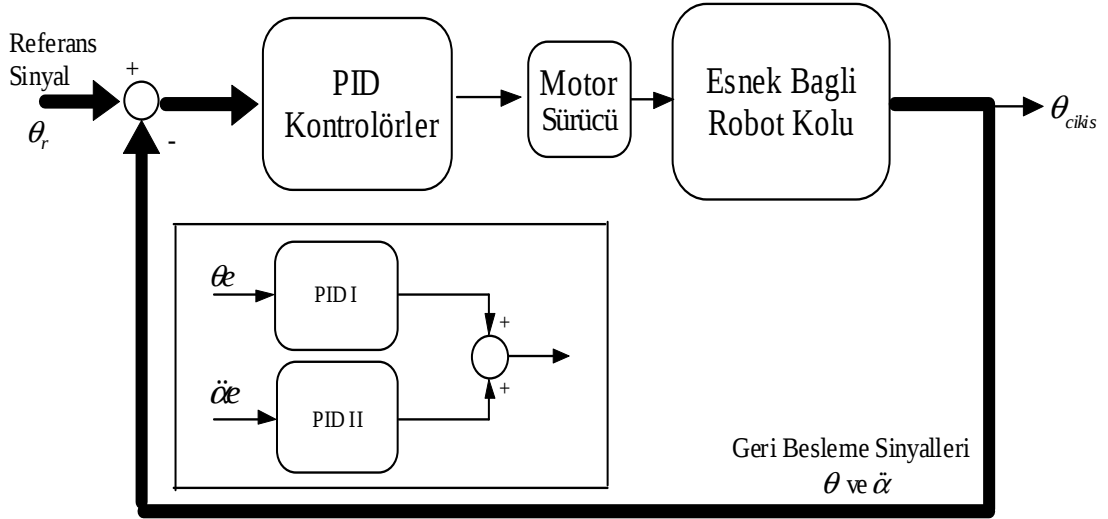
6.4. Esnek Bağlı Robot Kolunun PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu başlık altında açık çevrim cevapları bölüm 6.3 altında verilen esnek bağlı robot kolu için PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi üzerinde durulacaktır. Geliştirilen PID kontrolörün yapısı, blok diyagramları, kontrolörü test etmek için yapılan deneyler, elde edilen deney sonuçları ayrı başlıklar altında yorumlanacaktır.

6.4.1. PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Bölüm 4' de esnek bağlı robot kolunun modellenmesinde de anlatıldığı gibi esnek bağlı robot kolu sistemi, tek girişli iki çıkışlı bir sistemdir. Robot kolunun girişi motora uygulanan gerilim, çıkışları ise motorun dönme açısı olan θ açısı ve esnek bağın uç noktasının sapma miktarı olan δ ' dır. Kullanılan kontrolör yapısına göre eğer istenilirse esnek bağın uç noktasının ivmesi ($\ddot{\alpha}$) de çıkış olarak alınabilir.

Geliştirilen PID kontrol alt yapısında kullanılan geri besleme sinyalleri, motor dönme açısı θ ve bağın uç noktasının ivmesi $\ddot{\alpha}$ sinyalleridir. Ayrıca bağın uç noktasının sapma miktarı olan δ da yük hücresi ile ölçülüp uç işlevcideki sapma miktarı belirlenmiştir. Geliştirilen kontrol alt yapısında her geri besleme sinyali için ayrı PID kontrolörler kullanılmıştır. Şekil 6.5' de esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen PID kontrolör şeması yer almaktadır. Şekil 6.5' de görüldüğü üzere PID I motor dönme açısının hatasını alır ve yapısında bulunan PID katsayılarına göre bir çıkış üretir. PID II esnek bağın uç işlevcisinin hatasını alır ve PID katsayılarına göre bir çıkış üretir. Bu üretilen iki çıkış toplanarak sisteme kontrol sinyali olarak uygulanır.



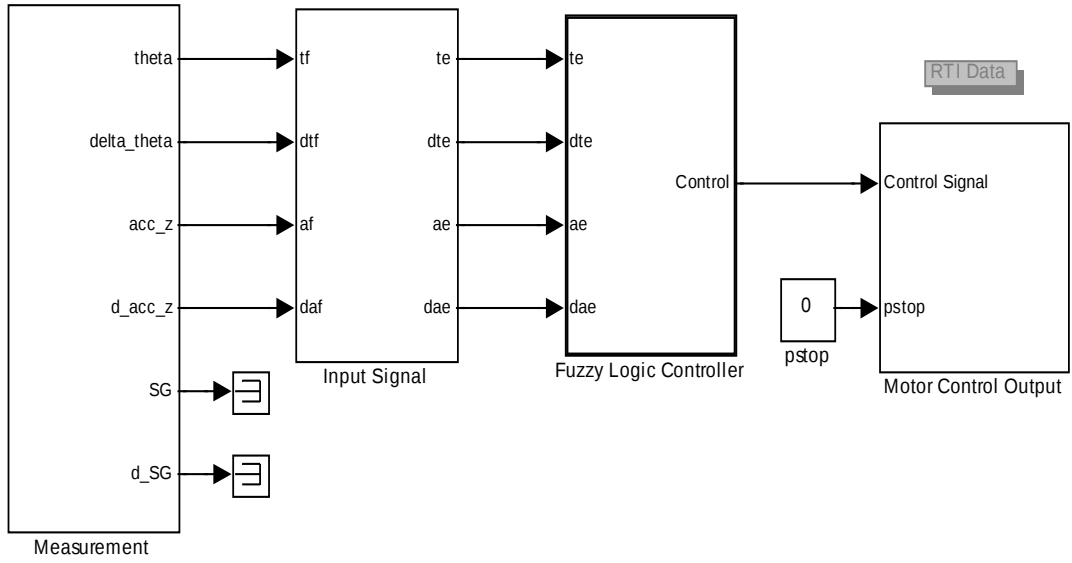
Şekil 6. 5: PID kontrolör kontrol şeması

Esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen PID kontrolör yapısında bahsedildiği gibi iki farklı PID I ve PID II kontrolörleri yer almaktadır. Bu kontrolörlerin kontrol yapılarında bulunan katsayılarına göre elde edilen transfer fonksiyonları Denklem 6.1 ve 6.2’ de gösterildiği gibidir.

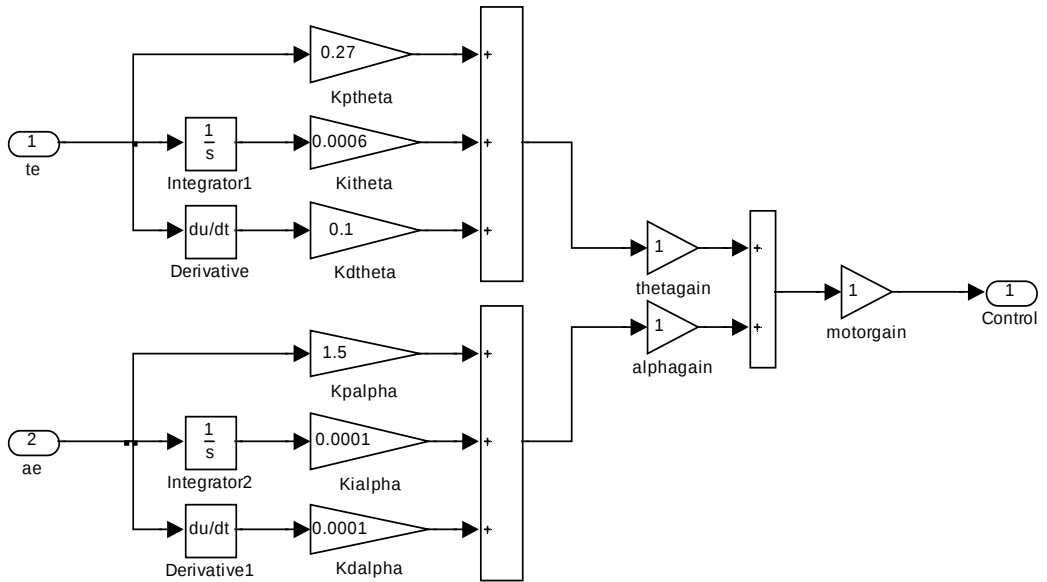
$$TF_{PID\ I} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.1s^2 + 0.27s + 0.0006}{s} \quad (6.1)$$

$$TF_{PID\ II} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} = \frac{0.0001s^2 + 1.5s + 0.0001}{s} \quad (6.2)$$

Yukarıda verilen transfer fonksiyonları için oluşan bode diyagramları Ek – F’ de yer almaktadır. Robot kolunun kontrolü için geliştirilen PID kontrolör Matlab/Simulink ortamında oluşturulup, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla gerçek sisteme uygulanmıştır. Şekil 6.6’ da esnek eklemlili robot kolu için tasarlanan PID kontrolörün simulink blokları gösterilmektedir. Görüleceği üzere simulink’ te tasarlanan kontrolör yapısı dört ana bloktan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi olan ölçüm bloğu, esnek motorun dönme açısını, esnek bağın uç işlevcisinin ivmesini ve uç işlevcisinin sapma miktarını anlık olarak ölçer. İkincisi olan giriş bloğu robot koluna istenen referans yörüngesinin verilmesini sağlar. Üçüncüsü olan kontrolör bloğu, elde edilen hata sinyallerine ve kontrolör kazançlarına göre kontrol sinyalini oluşturur. Ve son blok, kontrolör bloğunun oluşturduğu kontrol sinyalini analog sinyale çevirerek motor sürücüsüne iletir.



Şekil 6. 6: PID kontrolör simulink blokları



Şekil 6. 7: Simulink'te oluşturulan PID kontrol yapısı

Şekil 6.6' da esnek bağlı robot kolunun simulink'te oluşturulan PID kontrol yapısı gösterilmektedir. Görüleceği üzere oluşturulan PID I ve PID II kontrolörleri için farklı katsayılar belirlenmiş ve bu katsayılar deneme yanılma yolu ile elde edilmiştir.

6.4.2. PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

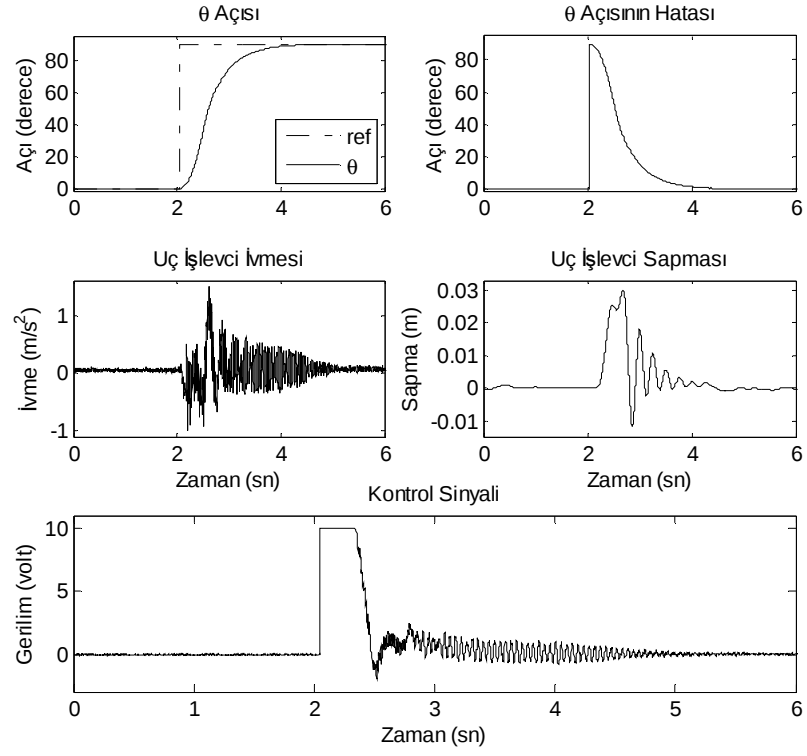
Bu başlık altında esnek bağlı robot kolunun PID kontrolör ile kontrolü sırasında elde edilen deneysel sonuçlar, sonuçların karşılaştırılması ve yorumlanması işlenecektir. Esnek bağlı robot kolunun PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusunda birçok deney yapılmış olup, bu deneyler temel olarak üç ana grupta incelenmektedir.

Birinci grupta konum kontrolü deneyleri verilerek bu başlık altında esnek eklemli robot koluna birim basamak fonksiyonu girişi uygulanmaktadır. İkinci grupta esnek eklemli robot kolunun yörünge takibi deneyleri incelenmektedir ve bunun için sisteme giriş olarak sinüzoidal, kane ve üstel fonksiyonları uygulanmaktadır. Üçüncü grupta ise geliştirilen kontrolörün gürbüzlüğü test edilmektedir ve bu amaçla sisteme dürtü fonksiyonu ve bozucu darbeler uygulanarak kontrolörün verdiği cevaplar incelenmiş ve yorumlanmıştır.

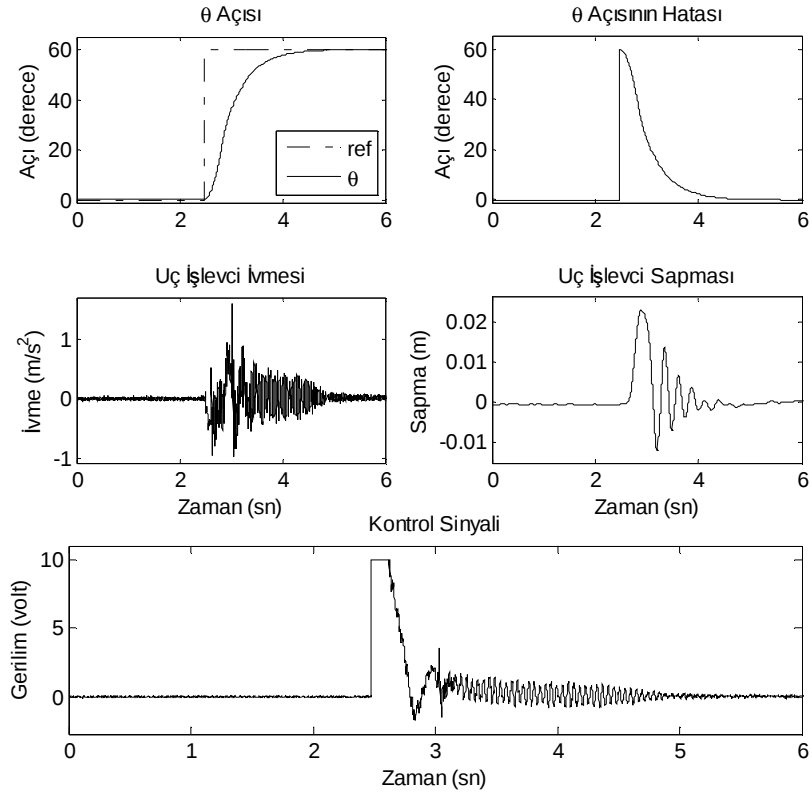
6.4.2.1. Esnek bağlı robot kolunun PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun PID kontrolörle yapılan konum kontrolü deneyleri yer almaktadır. Şekil 6.8 – 6.9’ da görüleceği üzere esnek bağlı robotun konum kontrolü deneylerinde robot koluna doksan ve altmış derecelik iki farklı birim basamak girişi verilmiştir. Ve bu durumda robotun dönme açısı θ , uç işlevcinin ivmesi $\ddot{a}$ ve sapma miktarı δ , son olarak kontrolörün oluşturduğu kontrol sinyali incelenmiştir. Şekillerde görülen deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 6.1’ de verilmiştir.

Tablo 6.1’ deki sonuçlardan da görüleceği üzere, esnek bağlı robot koluna referans olarak verilen birim basamak fonksiyonun son değeri arttıkça, uç işlevcinin sapma miktarı ve sistemin toplam oturma zamanı artmaktadır. PID kontrolörle gerçekleştirilen birim basamak girişi deneylerinin her ikisinde de, θ açısında herhangi bir aşma oluşmamış ve uç işlevcide oluşan ivmeler $\ddot{a}$, birbirlerine yakın değerlerde olmuştur.



Şekil 6. 8: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı



Şekil 6. 9: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı

Tablo 6. 1: PID kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

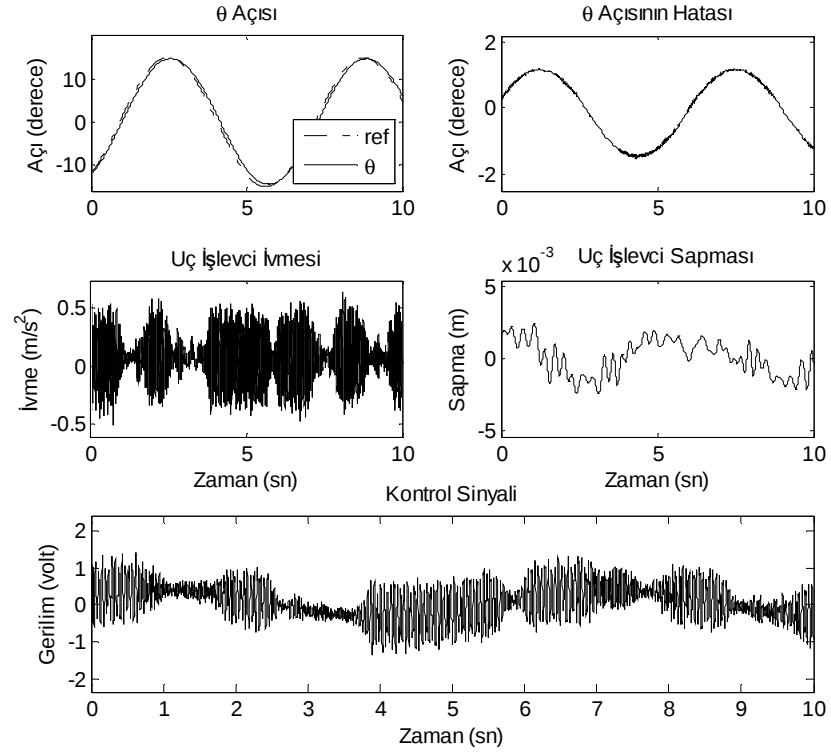
Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Oluşan Hatanın Tepe Değeri		Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	θ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 60°' lik Birim Basamak Girişi	1.58	2.12	0	1.59	0.022	0.18	0
DENEY 2 90°' lik Birim Basamak Girişi	1.78	2.17	0	1.52	0.03	0.17	0

6.4.2.2. Esnek bağlı robot kolunun PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri

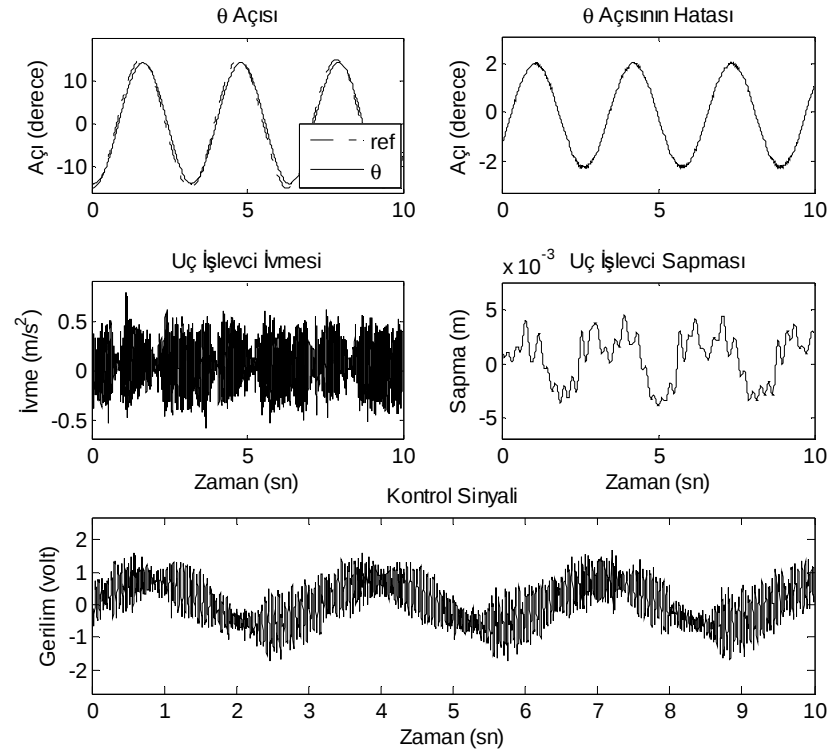
Bu başlık altında esnek bağlı robot kolunun yörünge takibi deneylerine yer verilecektir. Yapılan deneyler, sinüzoidal yörünge, kane fonksiyonu yörüngesi, üstel fonksiyon yörüngesi olmak üzere üç ana başlık altında toplanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak tablolarda verilmiş ve yorumlanmıştır.

6.4.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun PID kontrolörle yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde referans olarak iki farklı sinüzoidal yörüngeye yer verilmiştir. Birinci sinüzoidal referansın tepe genliği 15 derece ve frekansı 1 rad/sn' dir. İkinci referans sinyalin, tepe genliği birinci sinyalle aynı ancak frekansı 2 rad/s' dir. Her iki referans sinyalde sisteme uygulanıp elde edilen sonuçlar Tablo 6.2' de verilmiştir. Tablodan da açıkça görüldüğü üzere frekansı 1 rad/s olan işaret için elde edilen sonuçlarda uç işlevcinin sapma miktarı en büyük 0.0025 m ve θ açısında oluşan en büyük hata değeri 1.2 derece olmuştur.



Şekil 6. 10: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(1rd)$)



Şekil 6. 11: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(2rd)$)

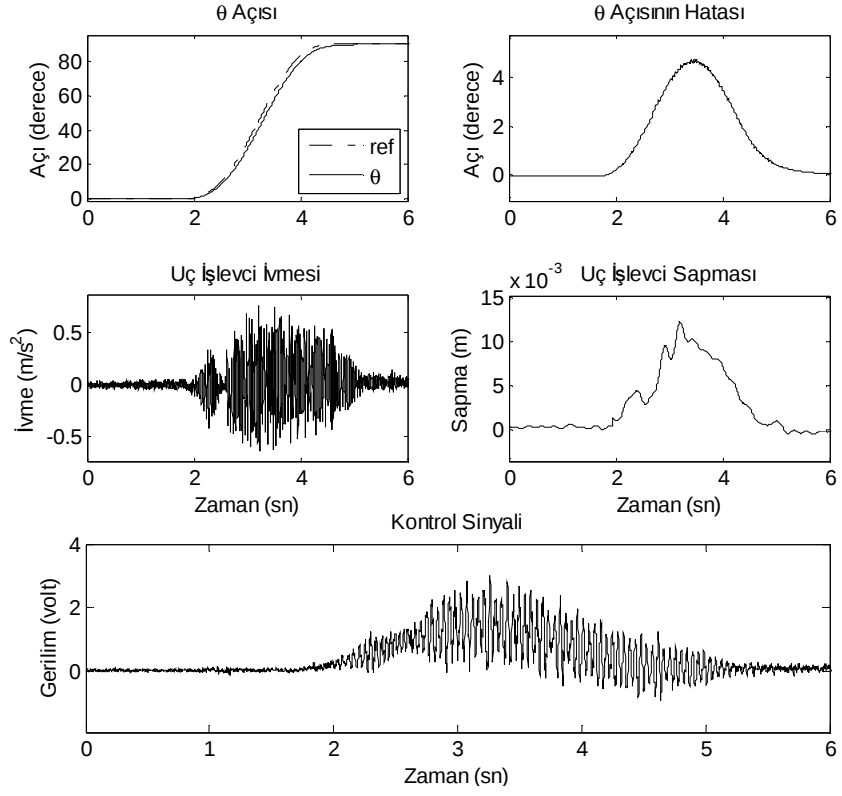
Tablo 6. 2: PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	
DENEY 1 Referans Sinyal: 15sin(1rd)	0.5	0.0025	1.3	0.07
DENEY 2 Referans Sinyal: 15sin(2rd)	0.8	0.0049	2.15	0.065

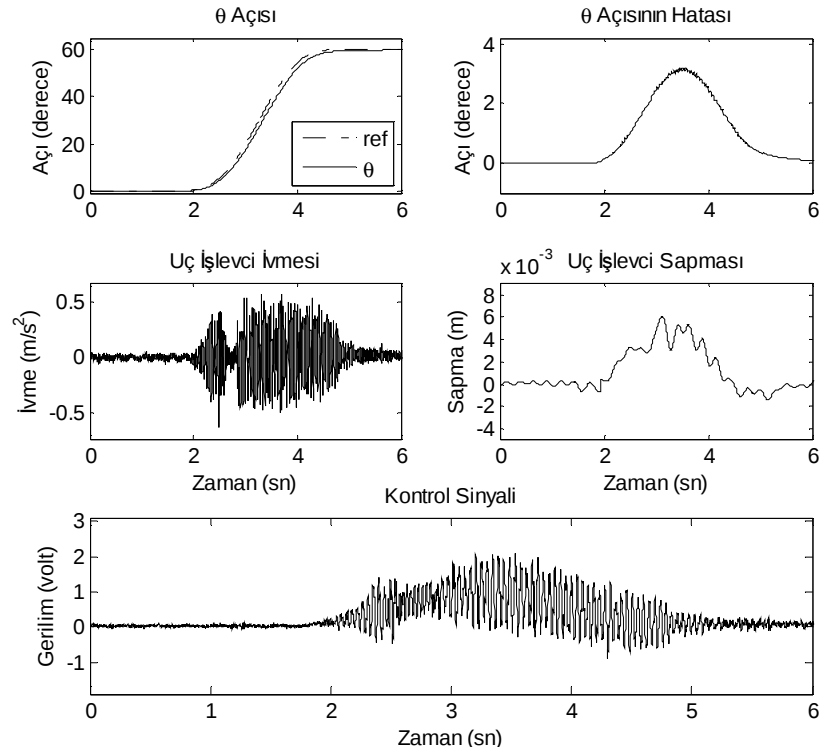
Bu sonuçlar deney 2’ deki sonuçlarla karşılaştırıldığında, beklenildiği üzere sisteme referans olarak girilen işaretin frekansı arttıkça uç işlevcide ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır.

6.4.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri bu başlık altında incelenecektir. Şekil 6.12 ve 6.13’ de görüleceği üzere robot koluna son konum değeri 60 ve 90° olan iki kane yörüngesi verilmiş ve robot kolunun bu yörüngeler karşısında oluşturduğu çıkışlar incelenmiştir. Tablo 6.3’ de görüleceği üzere, verilen yörüngenin son konum değeri arttırıldığında, uç işlevcinin ivmesi, sapma miktarı ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır. Son konumu 90° olan kane yörüngesi girişi için, uç işlevcinin ivmesinin en büyük hata değeri 0.75 m/s², sapma miktarının en büyük hata değeri 0.012 m ve motor dönme açısının en büyük hata değeri 4.7 derece olarak elde edilmiştir. Burada motor dönme açısında oluşan hata değeri, robot kolunun istenilen referansı takip ederken oluşturduğu faz kaymasından kaynaklanmaktadır. Aynı deney için motor dönme açısında 0.07 s’ lik faz kayması oluşmuştur.



Şekil 6. 12: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum:90°)



Şekil 6. 13: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60 derece)

Tablo 6. 3: PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

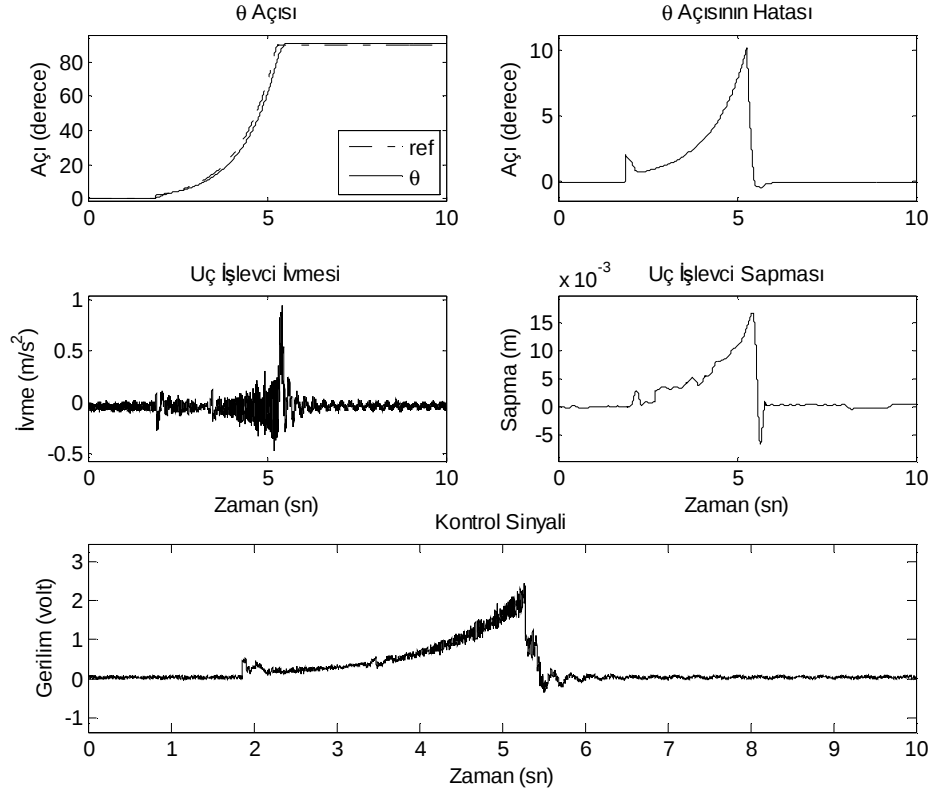
Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 60 derece	0.64	0.0062	3.2	0.1	0.09
DENEY 2 Son Konum: 90°	0.75	0.012	4.7	0.07	0.13

PID kontrolörle gerçekleştirilen kane fonksiyonu ve birim basamak yanıtı karşılaştırıldığında, kane fonksiyonunun yumuşak kalkış ve yumuşak duruş özelliğinden dolayı uç işlevcide oluşa sapma miktarının yarı yarıya azaldığı görülmektedir.

6.4.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi

Bu başlık altında geliştirilen PID kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi incelenmiştir. Esnek bağlı robot koluna referans olarak, başlangıç konumu 0, son konumu 90° olan üstel fonksiyon uygulanmıştır. Şekil 6.14' de esnek bağlı robot kolunun üstel fonksiyon yörünge takibi grafikleri, Tablo 6.4' de yörünge takibi deney sonuçları gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlardan görüleceği üzere, esnek bağlı robot koluna bahsedilen üstel fonksiyon referans olarak uygulandığında, uç işlevcideki sapma miktarı en büyük 0.017 m, uç işlevcinin ivmesi en büyük 0.95 m/s² ve θ açısının hatası en büyük 10.2 derece olarak elde edilmiştir. Burada da θ açısında oluşan hata, sistemdeki faz farkından kaynaklanmaktadır. Ayrıca görüleceği üzere uç işlevcideki sapma miktarı aynı son değere oturan kane yörüngesine göre artmaktadır.



Şekil 6. 14: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi

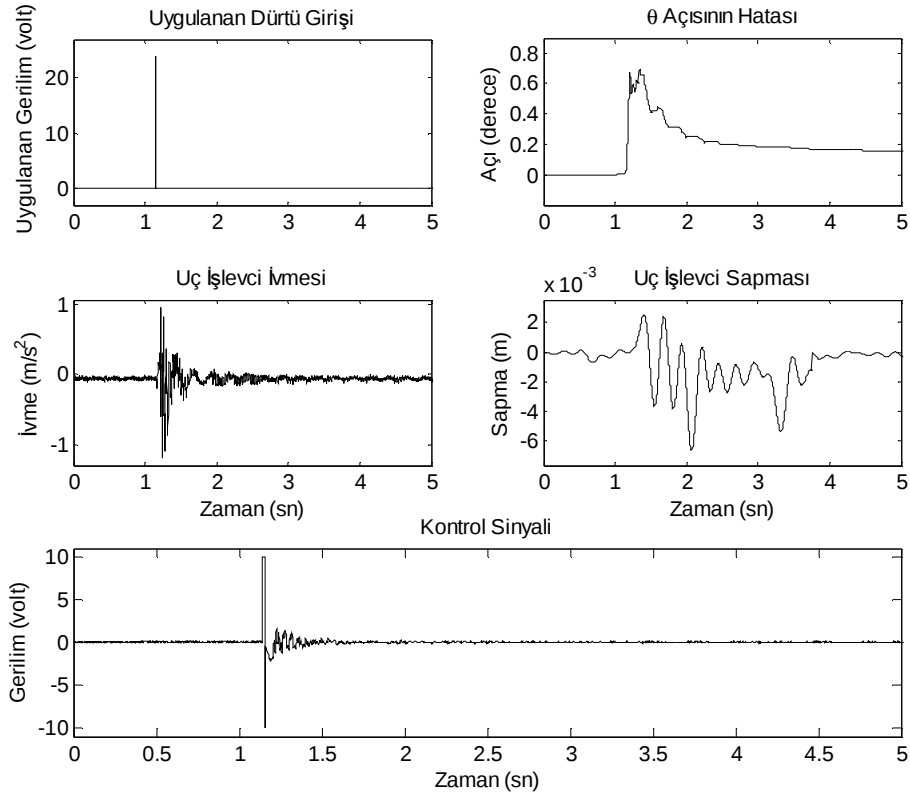
Tablo 6. 4: PID kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 90°	0.95	0.017	10.2	0.11	0.4

6.4.2.3. PID kontrolörün kararlılığının test edilmesi

Bu kısımda esnek bağlı robot koluna dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri verilerek geliştirilen kontrolörün kararlılığı test edilecektir. Her iki giriş ayrı başlıklar altında incelenecek ve oluşan sonuçlar karşılaştırılacaktır.

6.4.2.3.1. PID kontrolörün dürtü girişi deneyi



Şekil 6. 15: Birim dürtü yanıtı deneyi

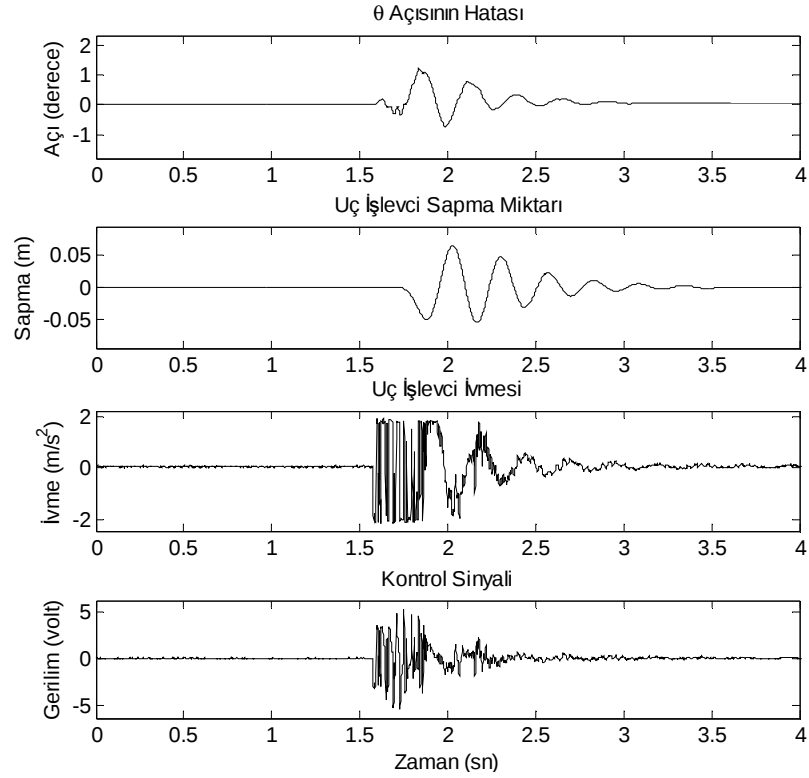
Tablo 6. 5: PID kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	1.3	2.4	1.2	0.0054	0.69	0.15	0

Şekil 6.15' te görüldüğü üzere robot koluna 24 volt genliğinde anlık bir dürtü girişi uygulanıp bunun sonucunda elde edilen çıkışlar Tablo 6.5' de verilmiştir. Tabloda görüleceği üzere geliştirilen PID kontrolör 1.3 saniyede θ açısının, 2.4 saniyede sapma miktarının hatasını sıfıra indirerek sistemi kararlı hale getirmektedir. Ayrıca,

uygulanan dürtü girişi nedeniyle sapma miktarında en büyük 0.0054 m, θ açısında en büyük 0.69 derece hatalar oluşmaktadır.

6.4.2.3.2. PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi



Şekil 6. 16: Bozucu darbe girişi deneyi

Tablo 6. 6: PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	1.3	1.7	1.9	0.064	1.2	0.06	0

Şekil 6.16’ da görüldüğü üzere esnek bağlı robot kolunun uç işlevcisine bozucu darbe uygulanmıştır. Deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.6’ da gösterilmiştir. Görüleceği üzere, PID kontrolör robot uç işlevcisine uygulanan

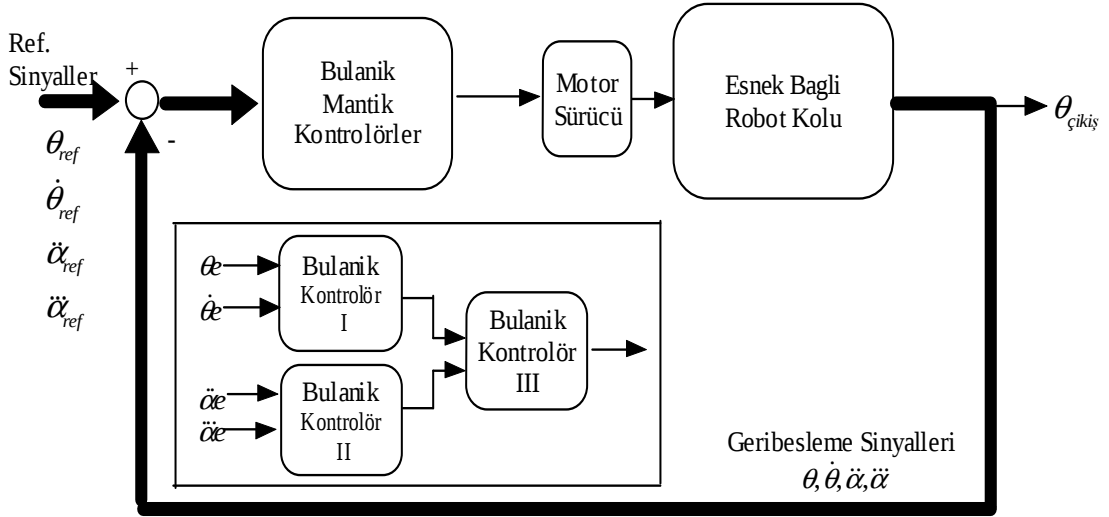
bozucu darbe girişi sonrasında θ açısını 1.3 saniyede, sapma miktarını δ 1.7 saniyede başlangıç konumu olan sıfıra getirerek sistemi kontrol edebilmiştir. Ayrıca, uygulanan bozucu darbe girişi nedeniyle uç işlevci sapmasında en büyük 0.064 m, θ açısında en büyük 1.2 derece hatalar oluşmaktadır.

6.5. Esnek Bağlı Robot Kolunun Bulanık Mantık Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun açık çevrim cevapları bölüm 6.3’ de verilen modeli için geliştirilen bulanık mantık kontrolörün, kontrolör yapısı ve blok diyagramları, kontrolörün farklı girişler için oluşturduğu cevaplar, kontrolörün performans testleri, yapılan deneyler, elde edilen deney sonuçları incelenecek, ayrı başlıklar altında karşılaştırılacak ve yorumlanacaktır.

6.5.1. Bulanık mantık kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen bulanık mantık kontrolör temel olarak üç farklı bulanık kontrolörden oluşur. Daha öncede belirtildiği gibi esnek bağlı robot kolu tek girişli iki çıkışlı bir sistem olup sistemin girişi, motor gerilimi, çıkışları ise motor dönme açısı olan θ açısı ve bağın uç işlevcisinin sapma miktarıdır. Ancak kontrolör yapısına göre uç işlevcinin ivmesi de sistemin çıkışı olarak alınıp geri besleme sinyali olarak kontrolöre katılabilir. Bu bölüm altında geliştirilen bulanık mantık kontrolörde kullanılan geri besleme sinyalleri motor dönme açısı olan θ açısı ve bağın titreşiminden dolayı uç işlevcide oluşan ivme değeridir ($\ddot{\alpha}$).



Şekil 6. 17: Bulanık mantık kontrolör kontrol şeması

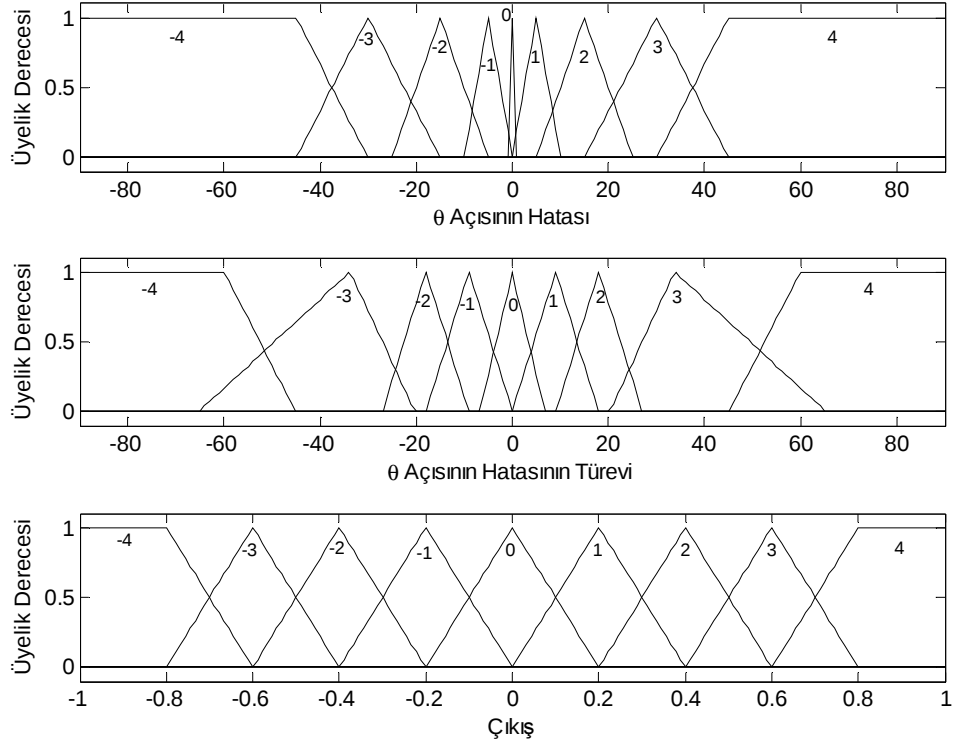
Şekil 6.17’ de görüleceği üzere geliştirilen bulanık mantık kontrol yapısında üç farklı bulanık mantık kontrolör vardır. Bunlardan birincisi, motor dönme açısı hatasını ve bu hatanın türevini giriş olarak alarak yapısında bulunan üyelik fonksiyonları ve kural tabanına göre bir çıkış üretmektedir. İkinci bulanık kontrolör referans değerleri sıfır olan, esnek bağın uç işlevcisinin ivme değerinin hatasını ve söz konusu ivmenin türevinin alınmasıyla elde edilen uç işlevcisinin jörk değerinin hatasını giriş olarak alır kontrol tabanında bulunan üyelik fonksiyonları ve kural tablosuna göre bir çıkış üretir. Üçüncü bir bulanık mantık kontrolör ise, birinci ve ikinci bulanık mantık kontrolörlerin çıkışını giriş olarak alarak, motor sürücüsüne uygulanacak olan kontrol sinyalini üretir. Kısaca geliştirilen bulanık mantık yapısında kullanılan üçüncü bulanık kontrolör esnek bağın titreşimine ve motor dönme açısına göre uygulanacak karar mekanizmasını oluşturur. Tasarlanan bu üç farklı bulanık kontrolörde, farklı kural tabloları ve farklı üyelik fonksiyonları mevcuttur. Ayrıca geliştirilen üç farklı kontrolör de, Mamdani bulanık kural tabanı ve Centroid durulaştırma yöntemini kullanır.

Bu kontrolörlerden Bulanık Kontrolör I de motor dönme açısının hatası (θe), bu hatanın türevi ($\dot{\theta}e$) ve çıkış fonksiyonu için toplam dokuz adet üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [-4 -3 -2 -1 0 1 2 3 4]. Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken motor dönme açısının hatasının (θe) ve motor dönme

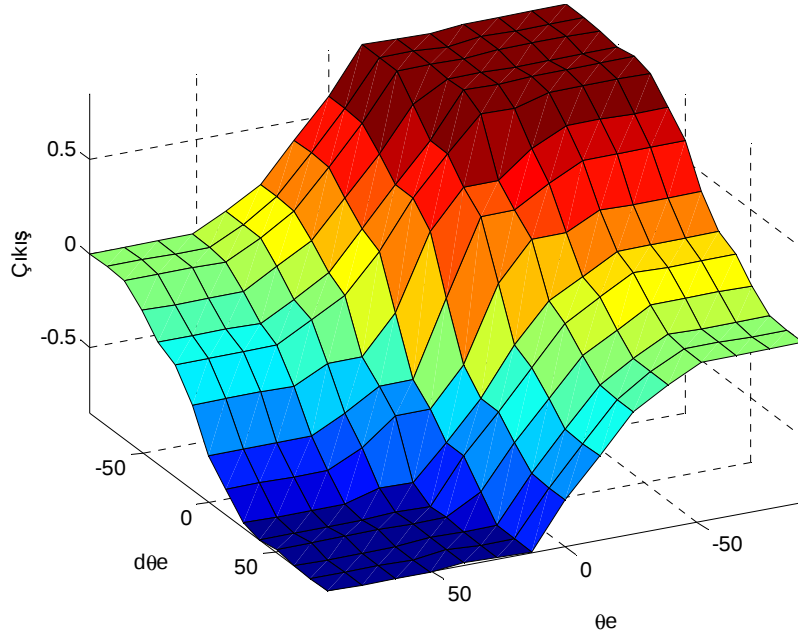
θ açısının hatasının türevinin ($\dot{\theta}e$) aralığı ± 90 , çıkış fonksiyonunun aralığı ise ± 1 olarak belirlenmiş ve kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 81 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu Tablo 6.7, üyelik fonksiyonları Şekil 6.18 ve kontrol yüzeyi Şekil 6.19'da gösterilmektedir.

Tablo 6. 7: Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu

$\dot{e}/e$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	4	4	4	3	3	2	2	1	0
-3	4	4	3	2	3	2	1	0	-1
-2	4	3	3	2	2	1	0	-1	-2
-1	3	3	2	1	1	0	-1	-2	-2
0	3	2	2	1	0	-1	-2	-2	-3
1	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
2	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4
3	1	0	-1	-2	-3	-2	-3	-4	-4
4	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4



Şekil 6. 18: Bulanık Kontrolör I' in üyelik fonksiyonları, θ açısının hatası, θ açısının hatasının türevi ve çıkış

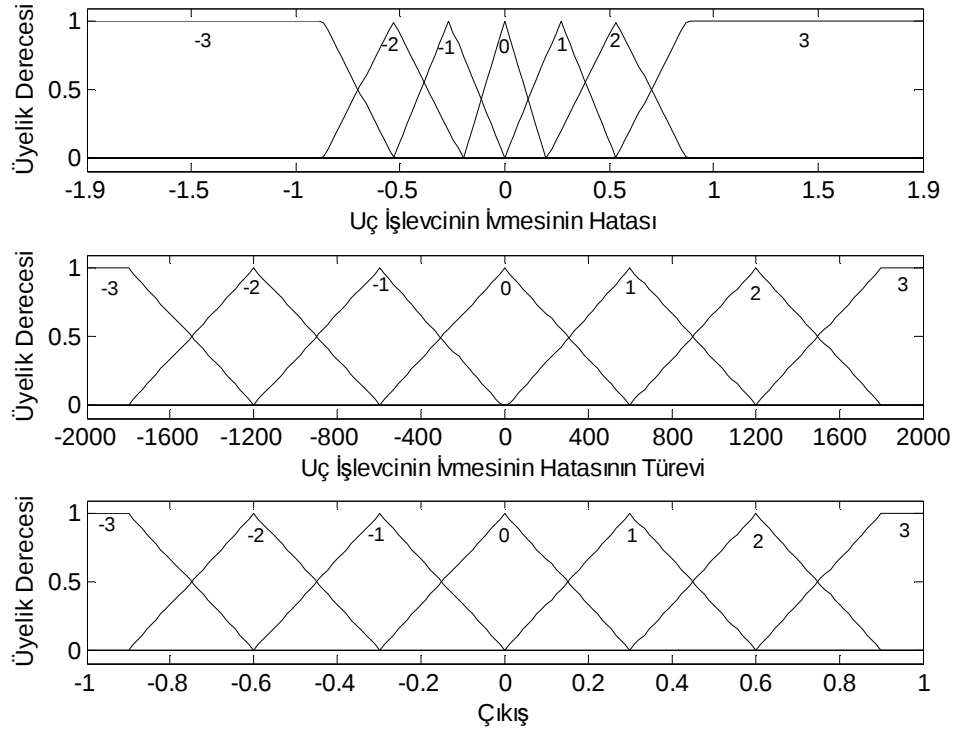


Şekil 6. 19: Bulanık Kontrolör I' in kontrol yüzeyi

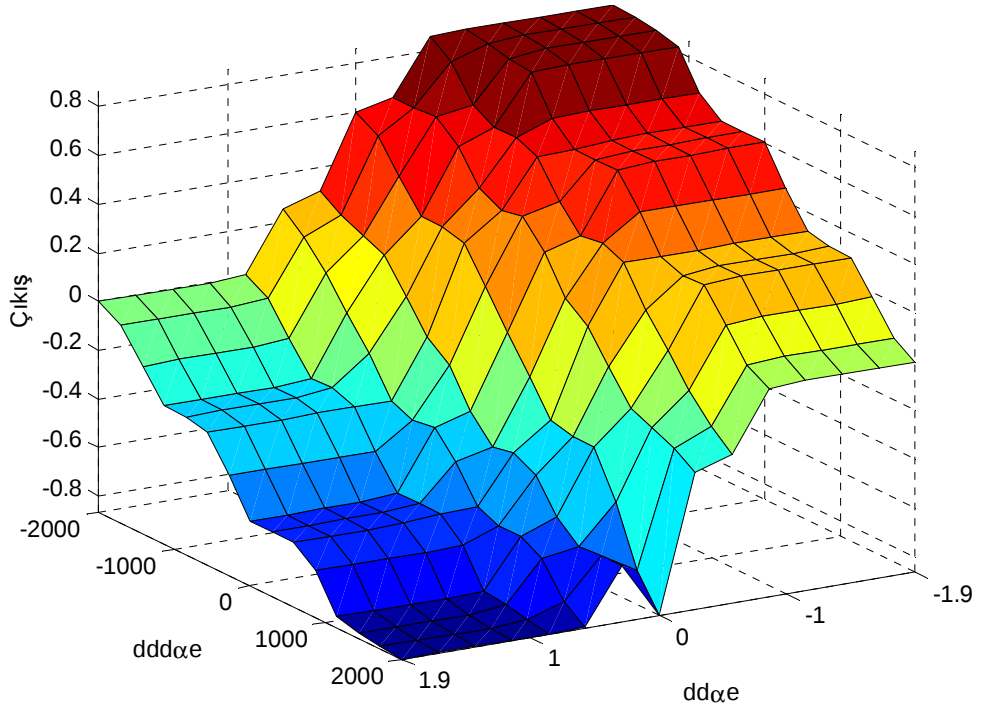
Esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen Bulanık Kontrolör II de uç işlevcinin ivmesinin hatası ($\ddot{a}e$), bu hatanın türevi yani uç işlevcinin jörk değerinin hatası ($\dot{\ddot{a}}e$) ve çıkış fonksiyonu için toplam yedişer adet üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [-3 -2 -1 0 1 2 3]. Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken uç işlevcinin ivmesinin hatası ($\ddot{a}e$) aralığı ± 1.9 , uç işlevcinin jörk değerinin hatası ($\dot{\ddot{a}}e$) aralığı ± 2000 ve çıkış fonksiyonunun aralığı ise ∓ 1 olarak belirlenmiş ve kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 49 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör I' in kural tablosu Tablo 6.8, üyelik fonksiyonları Şekil 6.20 ve kontrol yüzeyi Şekil 6.21'de gösterilmektedir.

Tablo 6. 8: Bulanık Kontrolör II' in kural tablosu

$\dot{e}/e$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	1	0
-2	3	2	2	1	1	0	-1
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
3	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3



Şekil 6. 20: Bulanık Kontrolör II' in üyelik fonksiyonları, uç işlevcinin ivmesinin hatası, uç işlevcinin ivmesinin hatasının türevi ve çıkış

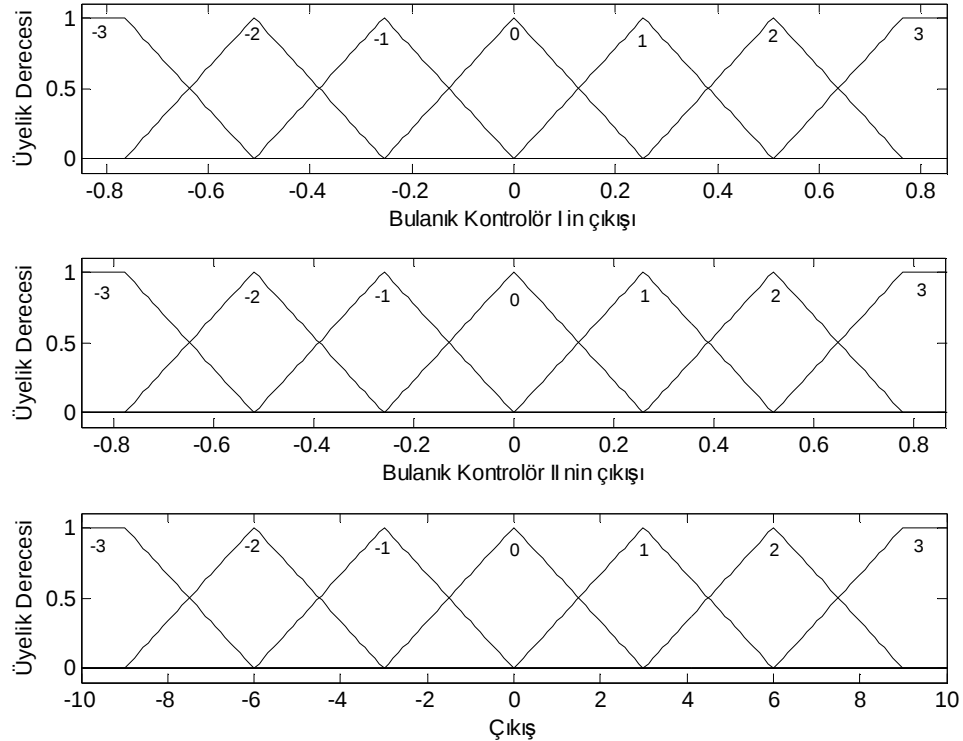


Şekil 6. 21: Bulanık Kontrolör II' nin kontrol yüzeyi

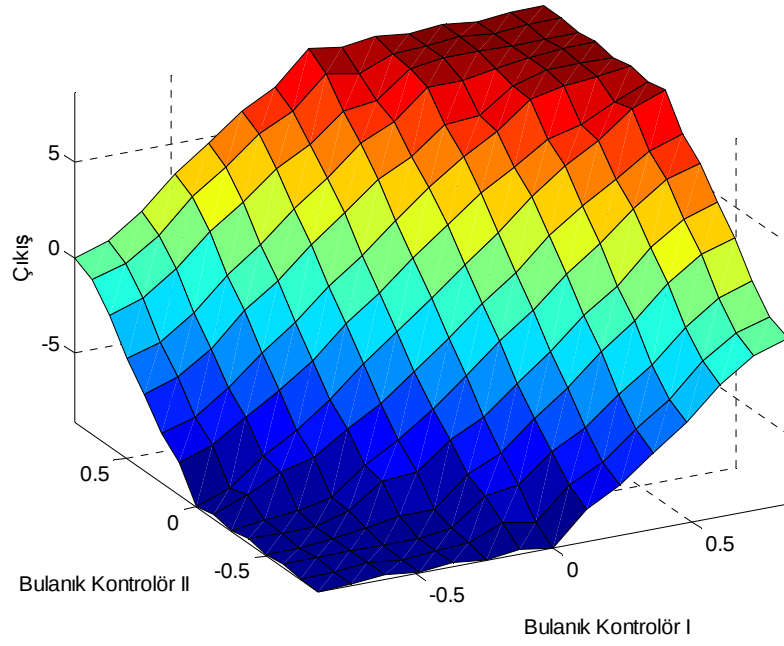
Geliştirilen Bulanık Kontrolör III de Bulanık Kontrolör I' nin çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve Kontrol çıkış fonksiyonu için toplam yedişer adet üçgen üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır [-3 -2 -1 0 1 2 3]. Aynı zamanda bu üçgen üyelik fonksiyonları tasarlanırken Bulanık Kontrolör I' in aralığı ± 0.85 , Bulanık Kontrolör II' nin aralığı ± 0.866 ve çıkış fonksiyonunun aralığı ise ± 10 olarak belirlenmiştir. Kontrolörün tasarımı sırasında kural tablosunda toplam 49 adet kural tanımlanmıştır. Geliştirilen Bulanık Kontrolör III' in kural tablosu Tablo 6.9, üyelik fonksiyonları Şekil 6.22 ve kontrol yüzeyi Şekil 6.23' de gösterilmektedir.

Tablo 6. 9: Bulanık Kontrolör III' ün kural tablosu

α/θ	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-3	-3	-2	-1	0
-2	-3	-3	-3	-2	-1	0	1
-1	-3	-3	-2	-1	0	1	2
0	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	-2	-1	0	1	2	3	3
2	-1	0	1	2	3	3	3
3	0	1	2	3	3	3	3

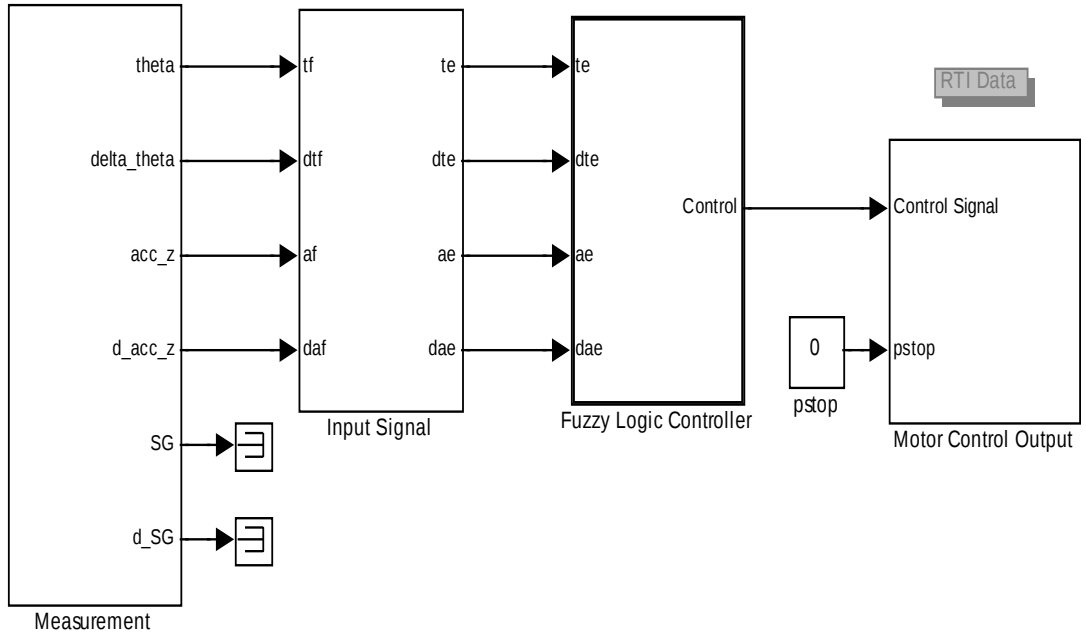


Şekil 6. 22: Bulanık Kontrolör III' ün üyelik fonksiyonları, Bulanık Kontrolör I' in çıkışı, Bulanık Kontrolör II' nin çıkışı ve çıkış

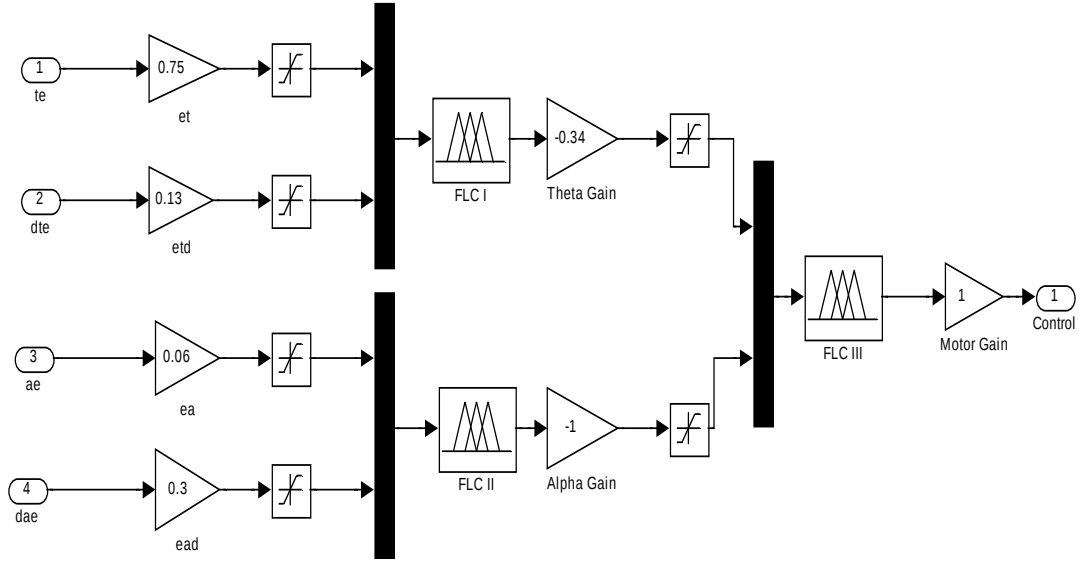


Şekil 6. 23: Bulanık Kontrolör III' ün kontrol yüzeyi

Oluşturulan kural tabloları, kontrol yüzeyleri ve üyelik fonksiyonları verilen bulanık mantık kontrolörler Matlab/FIS Editor kullanılarak tasarlanmıştır. Ayrıca geliştirilen ana bulanık kontrolör şeması Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuş ve DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı ile esnek eklemli robot kolu sistemine uygulanmıştır.



Şekil 6. 24: Bulanık mantık kontrolör simulink blokları



Şekil 6. 25: Simulink'te oluşturulan bulanık mantık kontrolör yapısı

Şekil 6.24'de görüldüğü üzere, bulanık mantık kontrolörün simulink blokları dört ana bloktan oluşmaktadır. Bu bloklardan ölçüm bloğu, robot kolunun pozisyonunu, bağın ivmesini, bağda oluşan sapma miktarı gibi değişkenleri ölçerek sistemin geri beslemesini sağlar. Giriş bloğu, robot koluna istenilen referans sinyalin verilmesini sağlar. Kontrolör bloğu, geliştirilen bulanık mantık kontrolörlerin bulunduğu ve kontrol sinyalinin üretildiği bloktur. Çıkış bloğu ise, kontrolör bloğu tarafından üretilen kontrol sinyalinin analog sinyale dönüştürülüp, motor sürücüsüne uygulandığı bloktur. Şekil 6.25' de görüldüğü üzere kontrolör bloğu içinde, üç farklı bulanık kontrolör tasarlanmış olup farklı katsayılar ile sisteme uygulanmıştır.

6.5.2. Bulanık mantık kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

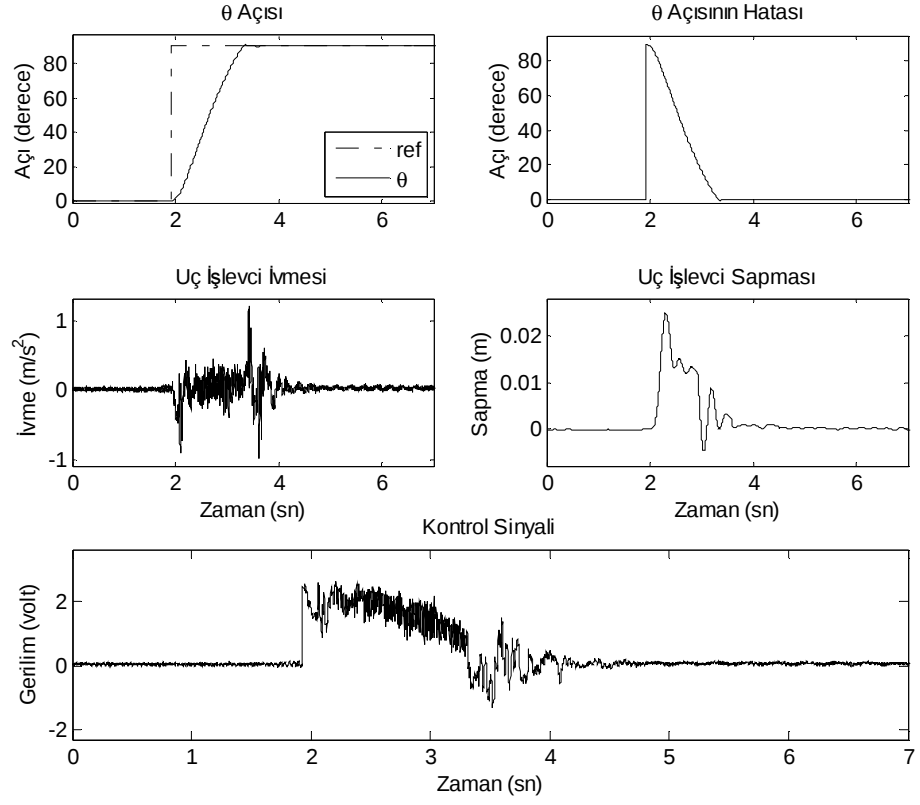
Bu bölümde, esnek bağlı robot kolunun bulanık mantıkla kontrolü konusunda yapılan deneyler, deneylerden elde edilen sonuçlar ve bunların karşılaştırılması yer almaktadır.

Esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör ile kontrol edilmesi sırasında, geliştirilen kontrolörün performansının test edilebilmesi için birçok deney yapılmış olup bu deneyler üç ana başlık altında toplanmıştır.

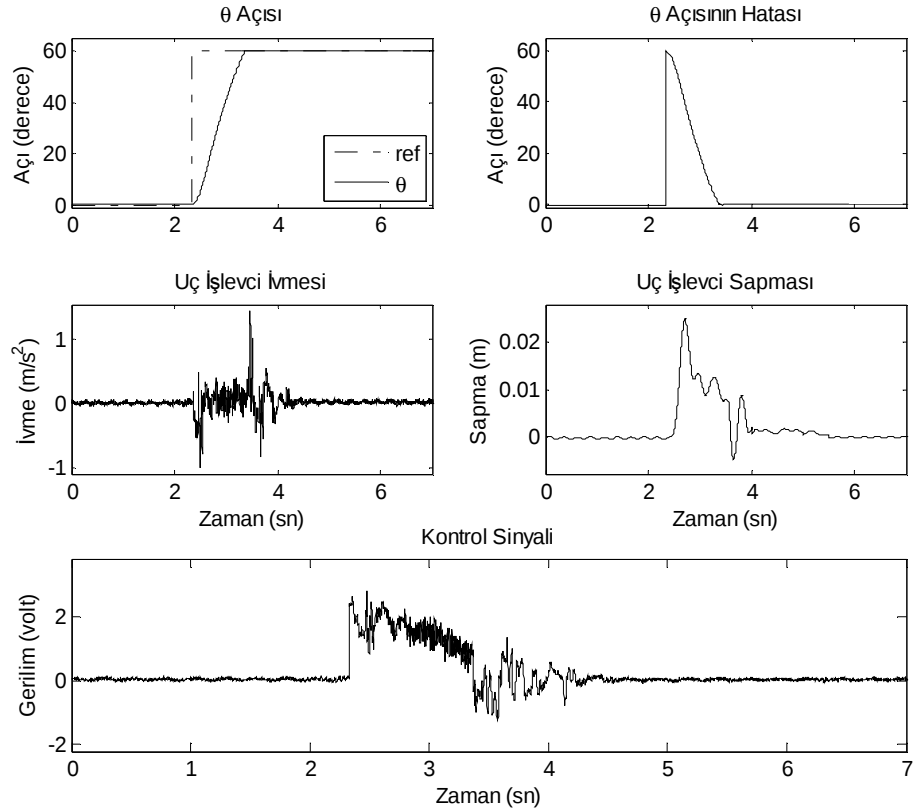
Birinci grupta, esnek bağı robot kolunu konum kontrolü deneyleri yapılmış olup, robot koluna referans olarak birim basamak girişi uygulanmıştır. İkinci grupta, robot kolunun yörünge takibi deneyleri yapılmış olup, sisteme referans olarak sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmış ve uç işlevcinin istenilen yörüngeyi takibindeki durumu incelenmiştir. Son olarak, geliştirilen kontrolörün kararlılığını test edebilmek için, robot koluna birim dürtü ve bozucu darbe girişleri verilmiş ve sistemin bu girişler karşısında oluşturduğu çıkışlar incelenmiştir. Yapılan bütün deneyler ayrı başlıklar altında toplanmış, deney sonuçları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

6.5.2.1. Esnek bağı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için konum kontrolü deneyleri

Bu kısımda esnek bağı robot kolunun bulanık mantık kontrolörle yapılan konum kontrolü deneylerine yer verilmiştir. Şekil 6.26 – 6.27’ de görüleceği üzere esnek bağı robotun konum kontrolü deneylerinde robota altmış ve doksan derecelik iki farklı birim basamak fonksiyonu uygulanmıştır. Bu durumda robotun dönme açısı θ , uç işlevcinin ivmesi $\ddot{a}$ ve sapma miktarı δ , son olarak kontrolörün oluşturduğu kontrol sinyali gözlemlenmiştir. Şekillerde görülen deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 6.10’ da verilmiştir.



Şekil 6. 26: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı



Şekil 6. 27: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı

Tablo 6. 10: Bulanık mantık kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Oluşan Hatanın Tepe Değeri		Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	θ	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 60°' lik Birim Basamak Girişi	0.99	1.5	0	1.43	0.023	0.02	0
DENEY 2 90°' lik Birim Basamak Girişi	1.35	1.55	0	1.22	0.025	0.05	0

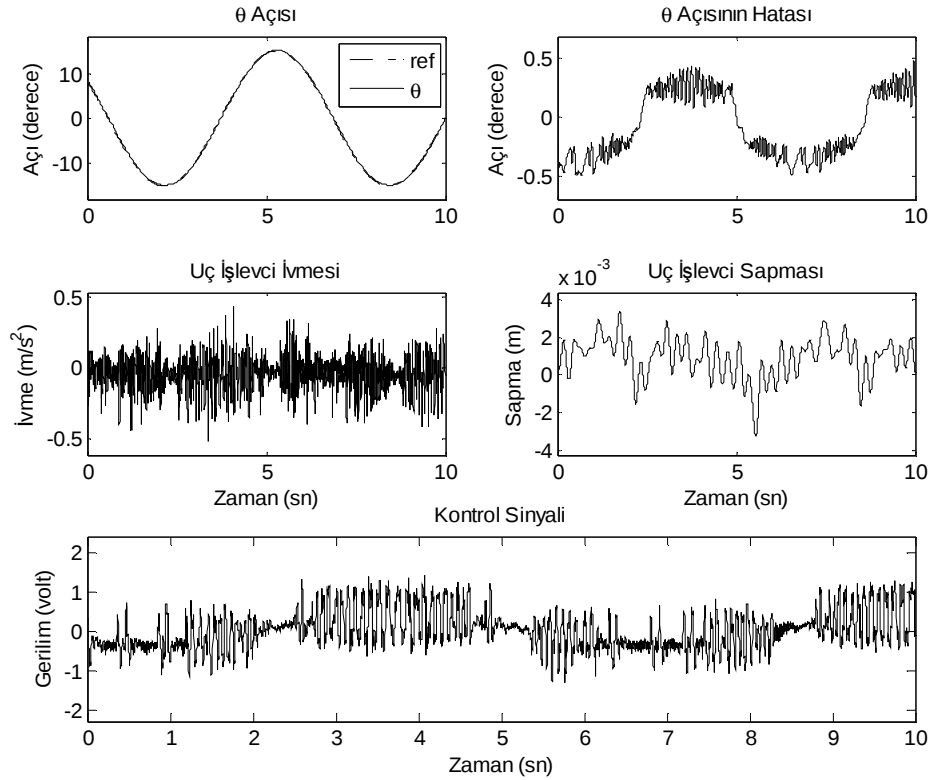
Elde edilen deney sonuçlarında görüldüğü üzere, uygulanan birim basamak fonksiyonunun son değeri arttırıldığında, robot kolunun oturma zamanı artmaktadır. Geliştirilen bulanık kontrolör uygulanan 90°' lik birim basamak girişi için θ açısını 1.35 saniyede, uç işlevcinin sapma miktarını δ ise 2.2 saniyede istenilen değerlere oturturmaktadır. Ayrıca bu giriş sonrasında uç işlevcinin sapma miktarında en büyük 0.025 m hatalar meydana gelmekte ve oluşan titreşimler bahsedilen sürede kolaylıkla sönmülebilmektedir. Dikkat edilirse kullanılan bulanık mantık kontrolör, PID kontrolöre göre uç işlevcinin daha az titreşimle istenilen referansa oturmasını sağlamaktadır.

6.5.2.2. Esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör için yörünge takibi deneyleri

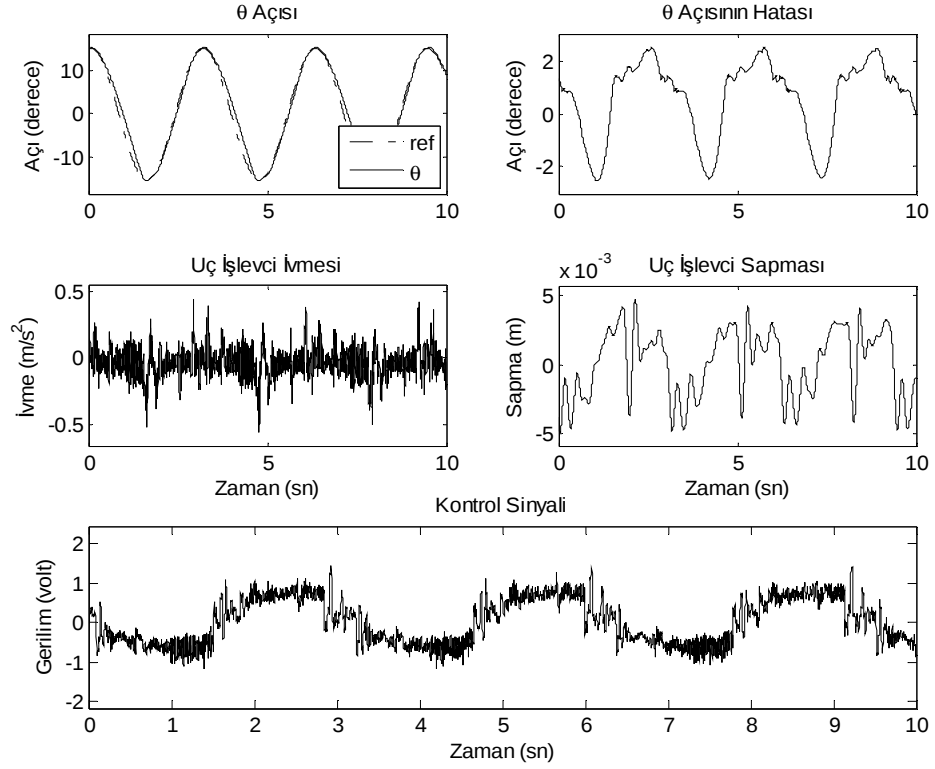
Bu bölümde, esnek bağlı robot kolunun geliştirilen bulanık mantık kontrolörün yörünge takibi deneyleri verilmiştir. Robot koluna uygulanan yörünge takibi deneylerinde, robota referans olarak sırasıyla sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmış ve kontrolörün bu yörüngeleri takip ederken oluşan sistem çıkışları gözlemlenmiştir. Uygulanan yörüngeler bu bölümde ayrı başlıklar altında gösterilmiş ve elde edilen deney sonuçları tartışılmıştır.

6.5.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi deneyi için farklı frekansta iki referans sinyal oluşturulmuş ve sistemin bu farklı sinyaller için oluşturduğu cevaplar incelenmiştir. Şekil 6.28 ve 6.29, farklı frekanslardaki sinüzoidal yörüngeler için robot kolunun çıkışlarını göstermektedir. Görüleceği üzere robot koluna 15 derece genlikli 1 rad/s ve 2 rad/s frekanslarında iki farklı referans sinyal uygulanmıştır. Tablo 6.11’ de uygulanan referans sinyal sonrasında esnek bağlı robot kolunun oluşturduğu sistem çıkışları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelenecek olur ise, robot koluna uygulanan referans sinyalin frekansı arttıkça, robot kolu uç işlevcisinde oluşan sapma miktarı, uç işlevcinin ivmesi ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır.



Şekil 6. 28: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(1rd)$)



Şekil 6. 29: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(2\text{rd})$)

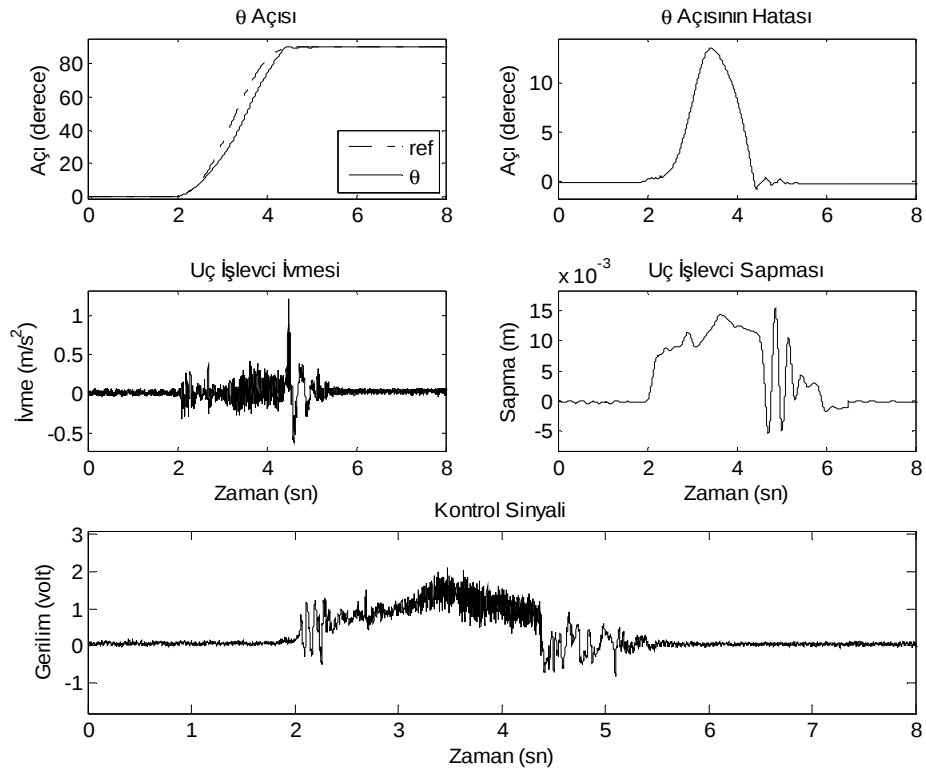
Tablo 6. 11: Bulanık mantık kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	
DENEY 1 Referans Sinyal: $15\sin(1\text{rd})$	0.43	0.0032	0.44	0.03
DENEY 2 Referans Sinyal: $15\sin(2\text{rd})$	0.56	0.0047	2.6	0.08

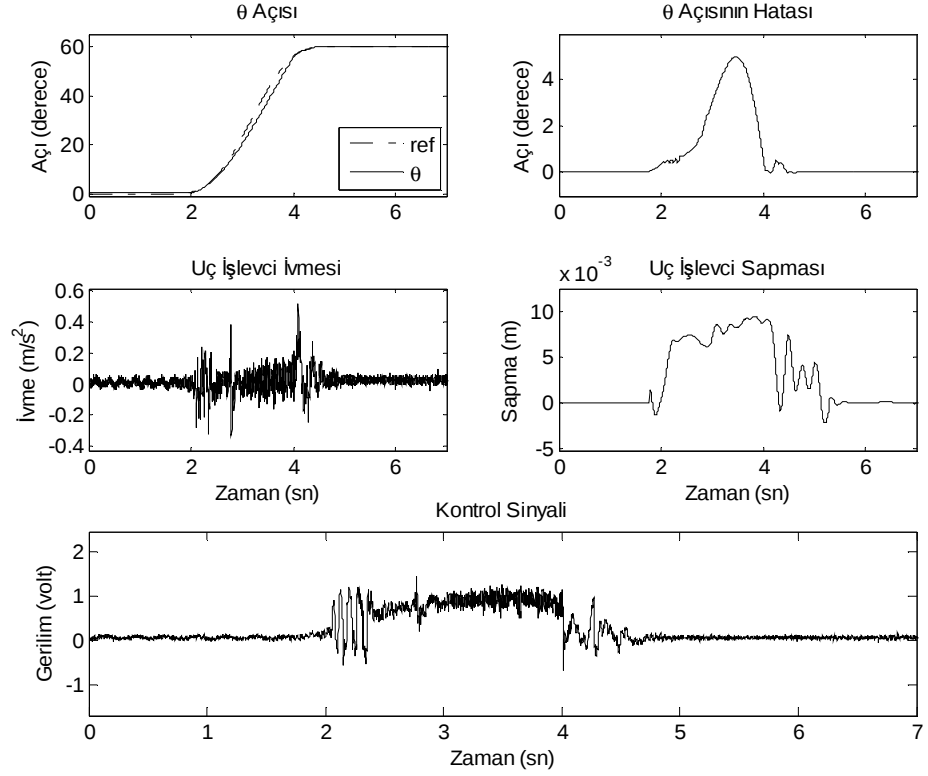
Tabloda görüldüğü gibi, 1 rad/s frekanstaki sinyal için robot uç işlevcisinde en büyük değeri 0.0032 m olan sapma değerleri ve θ açısında en büyük değeri 0.44 derece olan hatalar meydana gelmiştir. Motor dönme açısında oluşan hataların sebebi robotun istenilen referansı takip ederken meydana gelen faz farkı ve dişli boşluklarıdır.

6.5.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolörle yapılan kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde, iki farklı kane fonksiyonu tasarlanmıştır. Bunlardan birincisi, başlangıç pozisyonu 0 bitiş pozisyonu 90° olan, ikincisi başlangıç pozisyonu 0 bitiş pozisyonun 60° olan kane yörüngesidir. Her iki yörüngede robot koluna uygulanıp elde edilen sonuçlar Tablo 6.12’ de gösterilmiştir. Şekil 6.30 ve 6.31, sisteme uygulanan kane fonksiyonlarının çıkış grafiklerini göstermektedir. Verilen şekillerden ve tablodan görüleceği üzere, kane fonksiyonun son konumu arttıkça uç işlevcide ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır. Görüleceği üzere son konumu 90° olan kane fonksiyonu robot koluna uygulandığında, θ açısında en büyük 13.6 derece, uç işlevci sapma miktarında en büyük 0.013 m ve uç işlevci ivmesinde 1.18 m/s² değerinde hatalar oluşmaktadır.



Şekil 6. 30: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)



Şekil 6. 31: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)

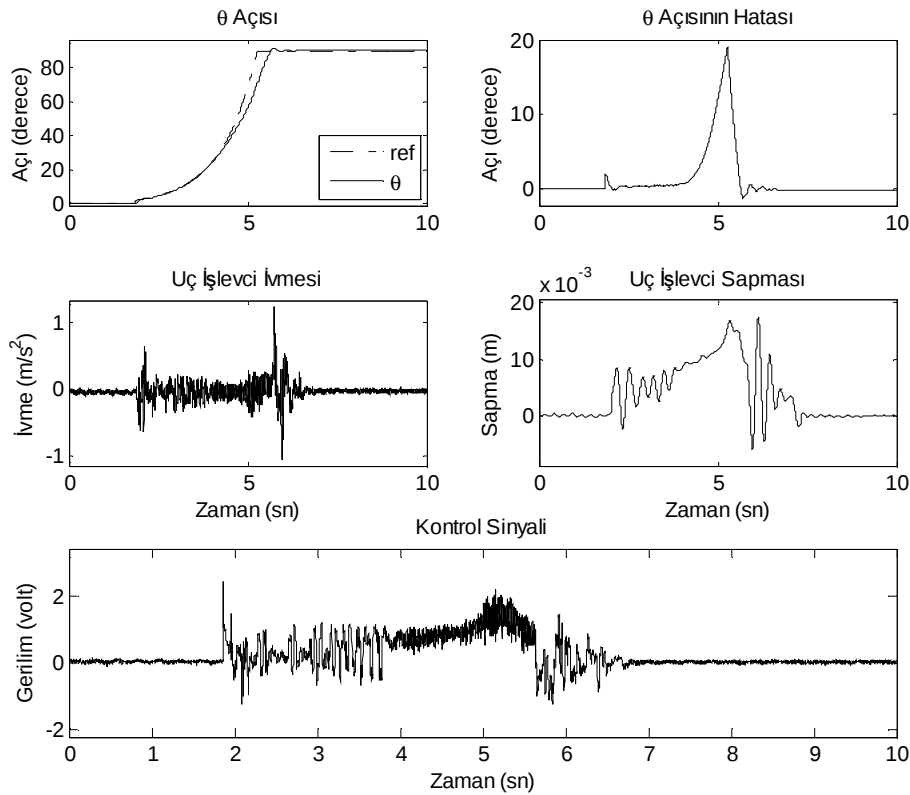
Tablo 6. 12: Bulanık mantık kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 60 derece	0.51	0.0095	4.96	0.11	0.2
DENEY 2 Son Konum: 90°	1.18	0.013	13.6	0.15	0.2

Burada motor dönme açısında oluşan hatanın asıl sebebi robotun istenilen referans yörüngeyi izlerken, robotun meydana getirdiği 0.15 saniyelik faz farkıdır.

6.5.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolörle gerçekleştirilen, üstel fonksiyon yörünge takibi deneyleri yer almaktadır. Şekil 6.32’ de görüleceği üzere üstel fonksiyonun başlangıç konumu 0 ve bitiş konumu 90° ’ dir. Uygulanan referans yörüngeye bağlı olarak sistemin ürettiği çıkışlar söz konusu şekilde gösterilmiştir. Ayrıca Tablo 6.13’ de üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi için elde edilen deney sonuçları verilmiştir. Tablodaki deney sonuçlarından da görüleceği üzere, geliştirilen bulanık mantık kontrolörle yapılan üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde, uç işlevcinin sapmasında en büyük 0.017 m, uç işlevcinin ivmesinde en büyük 1.2 m/s^2 ve motor dönme açısında en büyük 19.1 derece hata oluşmaktadır. Uç işlevcide oluşan hataların sebebi, istenilen referans yörünge takip edilirken esnek bağın esnemesi, motor dönme açısındaki hatanın sebebi ise robot kolunun referans yörüngeyi 0.08° ’ lik faz farkıyla izlemesi ve kane yörüngesindeki gibi yumuşak bir duruşun gerçekleştirilmemiş olmasıdır.



Şekil 6. 32: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi

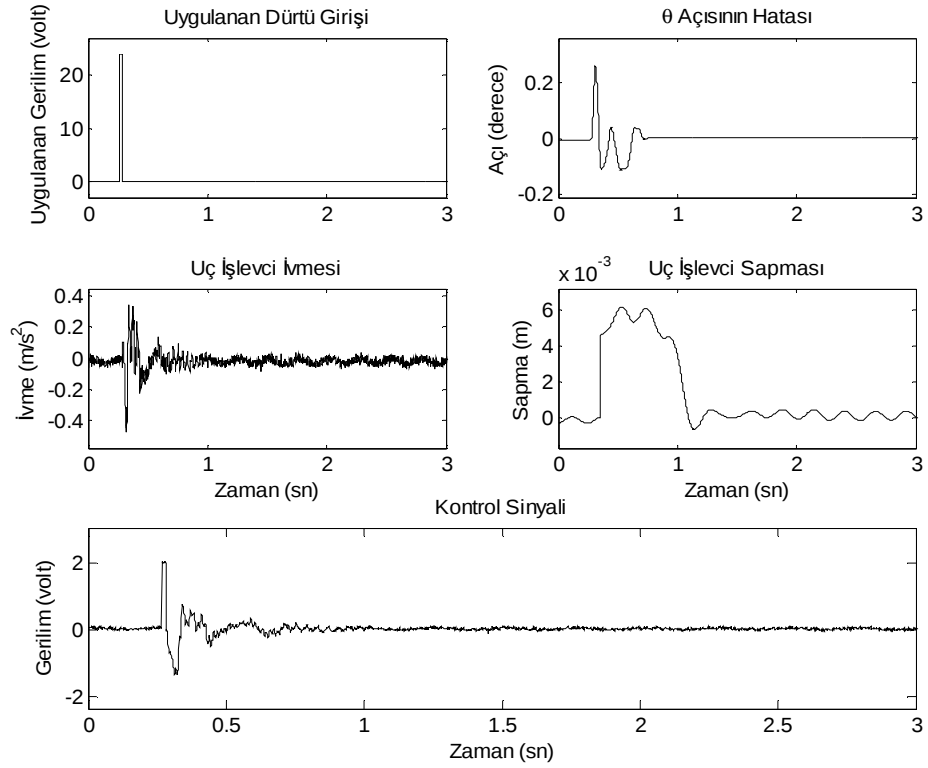
Tablo 6. 13: Bulanık mantık kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 90°	1.2	0.017	19.1	0.08	0.2

6.5.2.3. Bulanık mantık kontrolörün kararlılığının test edilmesi

Bu kısımda esnek bağlı robot koluna dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri verilerek geliştirilen bulanık mantık kontrolörün kararlılığı test edilecektir. Her iki giriş ayrı başlıklar altında incelenecek ve oluşan sonuçlar karşılaştırılacaktır.

6.5.2.3.1. Bulanık mantık kontrolörün dürtü girişi deneyi



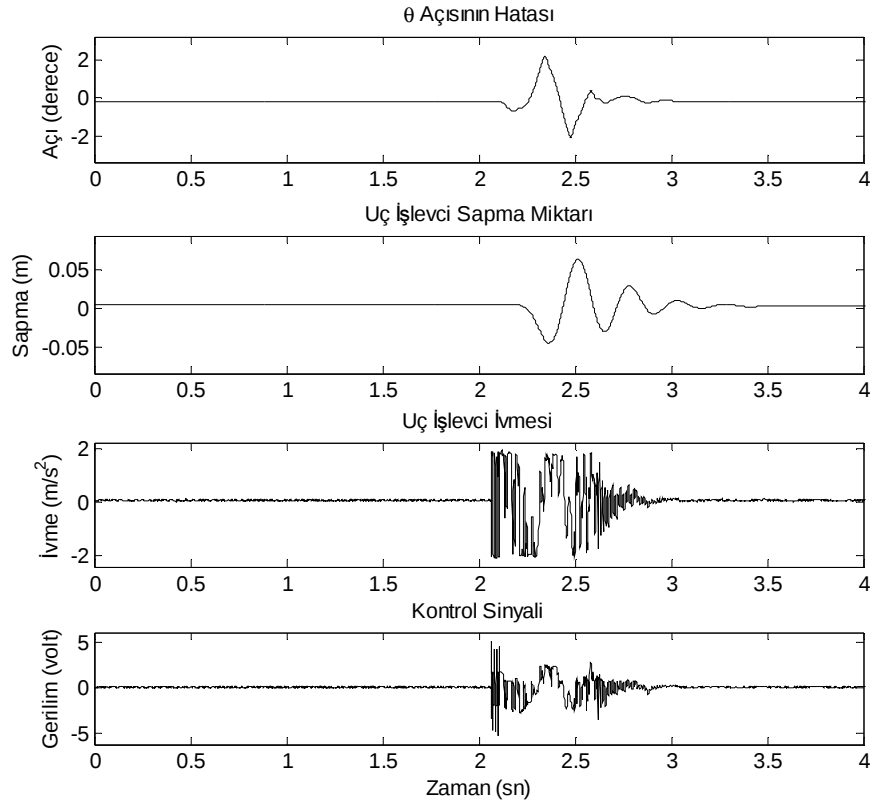
Şekil 6. 33: Birim dürtü yanıtı deneyi

Tablo 6. 14: Bulanık mantık kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	0.5	0.7	0.48	0.0061	0.26	0.008	0

Şekil 6.33’ de bulanık mantık kontrolörün dürtü girişi yanıtı için sistem çıkışlarını göstermektedir. Elde edilen deney sonuçları Tablo 6.14’ de verilmiştir. Tablodaki deney sonuçlarından da görüleceği üzere geliştirilen bulanık mantık kontrolör, esnek bağlı robot koluna giriş olarak verilen 24 volt genlikli dürtü fonksiyonu karşısında, 0.7 saniye kadar kısa bir sürede sistemi başlangıç durumuna getirmiştir. Bu sürede uç işlevciye sapa miktarı en büyük 0.0061 m ve motor dönme açısında en büyük 0.26 °’ lik hata meydana gelmiştir.

6.5.2.3.2. Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi



Şekil 6. 34: Bozucu darbe girişi deneyi

Esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolör ile gerçekleştirilen bozucu darbe girişi deneyinde, robot uç işlevcisine bozucu bir giriş uygulanmış ve bu darbe, motor dönme açısında en büyük 2.2 derece ve uç işlevci sapmasında en büyük 0.065 m hata meydana getirmiştir. Elde edilen deney sonuçlarında da görüleceği üzere bulanık mantık kontrolör 1 saniye kadar kısa bir sürede sistemi başlangıç durumuna getirerek, oldukça iyi bir performans göstermiştir.

Tablo 6. 15: Bulanık mantık kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	1	0.9	1.9	0.065	2.2	0.2	0

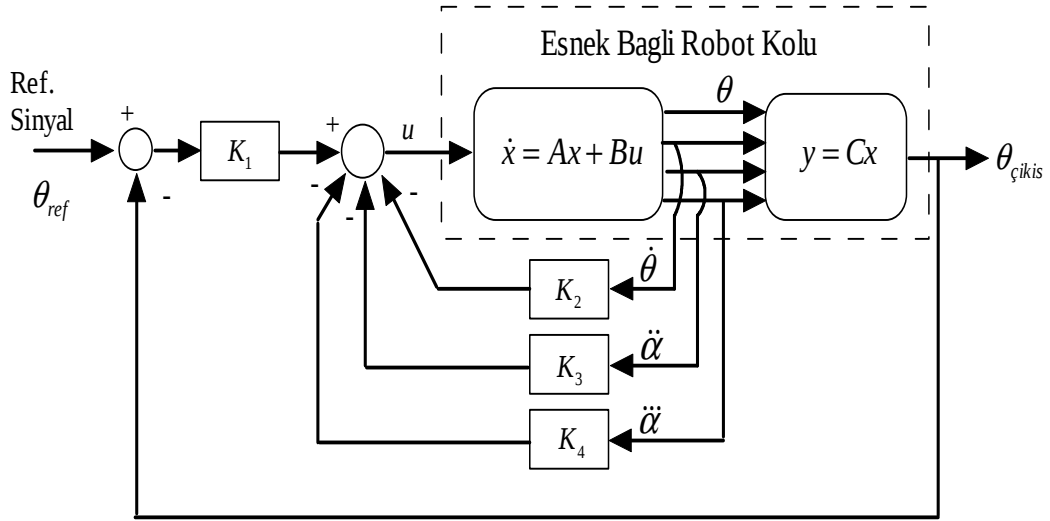
6.6. Esnek Bağlı Robot Kolunun Durum Geri Beslemeli Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu kısımda esnek bağlı robot kolunun, durum geri beslemeli kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusu işlenecektir. Geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün kontrolör yapısı ve blok diyagramları, kontrolörün performansını test etmek için yapılan deneyler ve deney sonuçları ayrı başlıklar altında toplanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

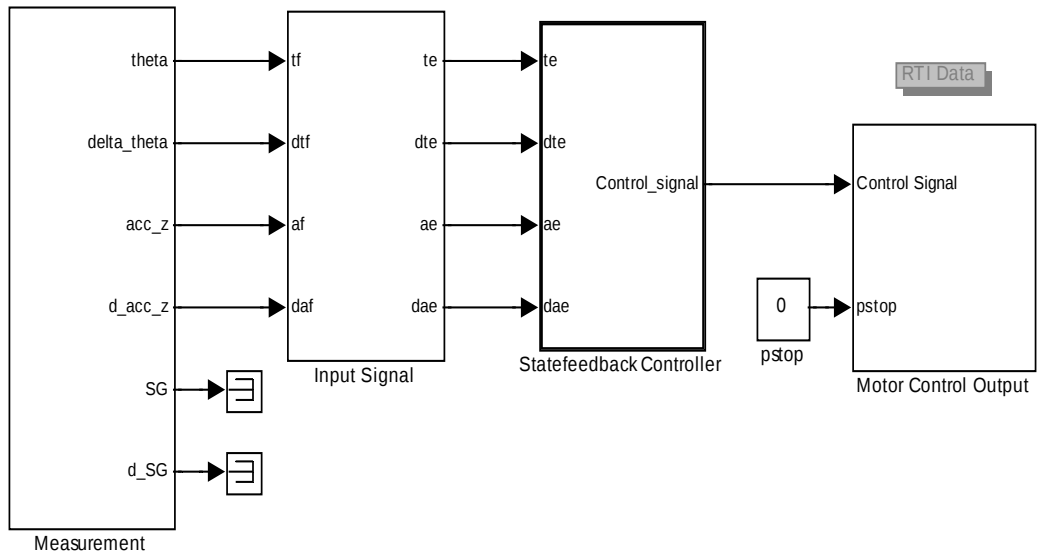
6.6.1. Durum geri beslemeli kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Bölüm 4’ de anlatıldığı gibi esnek bağlı robot kolu tek girişli iki çıkışlı bir sistemdir. Sistemin girişi motor gerilimi, çıkışları ise motor dönme açısı olan θ açısı ve bağın esnemesinden kaynaklanan sapma miktarıdır. Daha öncede bahsedildiği gibi durum geri beslemeli kontrol yönteminde sistemin seçilen durumları geri beslenerek belirli katsayılarla çarpılır, çarpımlar toplanarak kontrol sinyali elde edilmiş olur. Geri beslenen durumların hangi katsayılar ile çarpılacağı, deneme yanılma yöntemi veya doğrusal karesel düzenleyici (LQR) ile bulunabilir. Doğrusal karesel düzenleyici yöntemini kullanabilmek için sistemin, doğrulanmış matematiksel modeline ihtiyaç vardır. Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun geri beslenen durumlarının hangi katsayılarla çarpılacağı deneme yanılma yöntemiyle bulunmuştur. Geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörde, robot kolunun durumları olarak motor dönme açısı θ , motor dönme hızı $\dot{\theta}$, esnek bağın ivmesi $\ddot{\alpha}$ ve esnek bağın jörk değeri $\ddot{\alpha}$ seçilmiştir.

Robot koluna istenilen referans sinyal motor dönme açısı üzerinden verilerek, robotun istenilen referansa gitmesi sağlanmaktadır. Hassas hareket için esnek bağın en az titreşimle ve en az sapma ile referansa oturması istenmektedir. Şekil 6.25’ de esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör şeması gösterilmektedir.



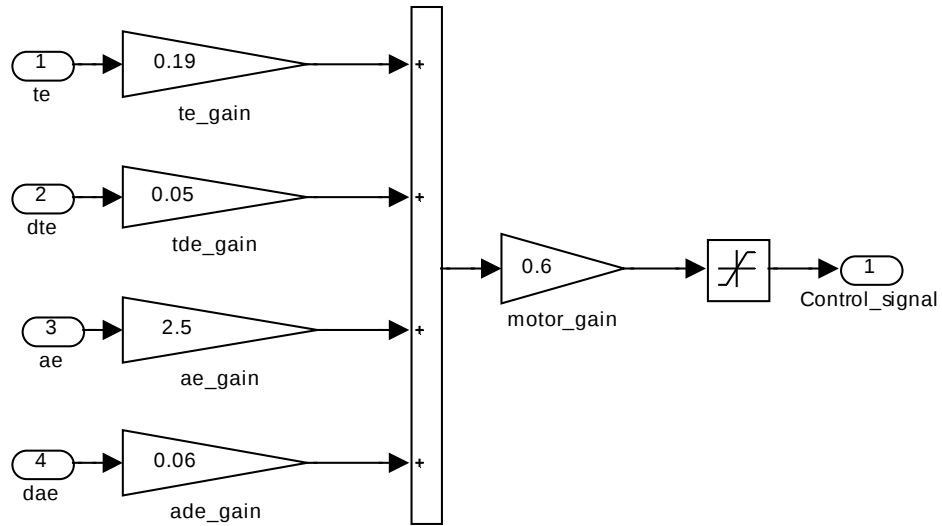
Şekil 6. 35: Durum geri beslemeli kontrolör kontrol şeması



Şekil 6. 36: Durum geri beslemeli kontrolör simulink blokları

Esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör, Matlab/Simulink ortamında geliştirilmiş olup, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı

kontrol kartıyla robot koluna uygulanmıştır. Şekil 6.36’ da görüleceği üzere, simulink’ te geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör dört ana bloktan oluşmaktadır. Bunlardan ölçüm bloğu, gerekli geri besleme sinyallerini anlık olarak ölçerek kontrolöre bu değerler hakkında bilgi verir. Giriş bloğu, robot koluna istenilen referans sinyalin verilmesini sağlayan bloktur. Kontrolör bloğu, durum geri beslemeli kontrolörün geliştirildiği ve robot kolunun kontrol edilebilmesi için üretilmesi gereken kontrol sinyalinin üretildiği bloktur. Ve son olarak çıkış bloğu, kontrolör bloğunun ürettiği kontrol sinyalini uygun analog sinyale dönüştürerek hareketi sağlayan motora uygulayan bloktur. Şekil 6.37’ de simulink’ te oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör yapısı bulunmaktadır. Şekildende görüleceği üzere, robot kolunun geri beslenen durumları, deneme yanılma yöntemiyle elde edilen katsayılarla çarpılmıştır.



Şekil 6. 37: Simulink’ te oluşturulan durum geri beslemeli kontrolör yapısı

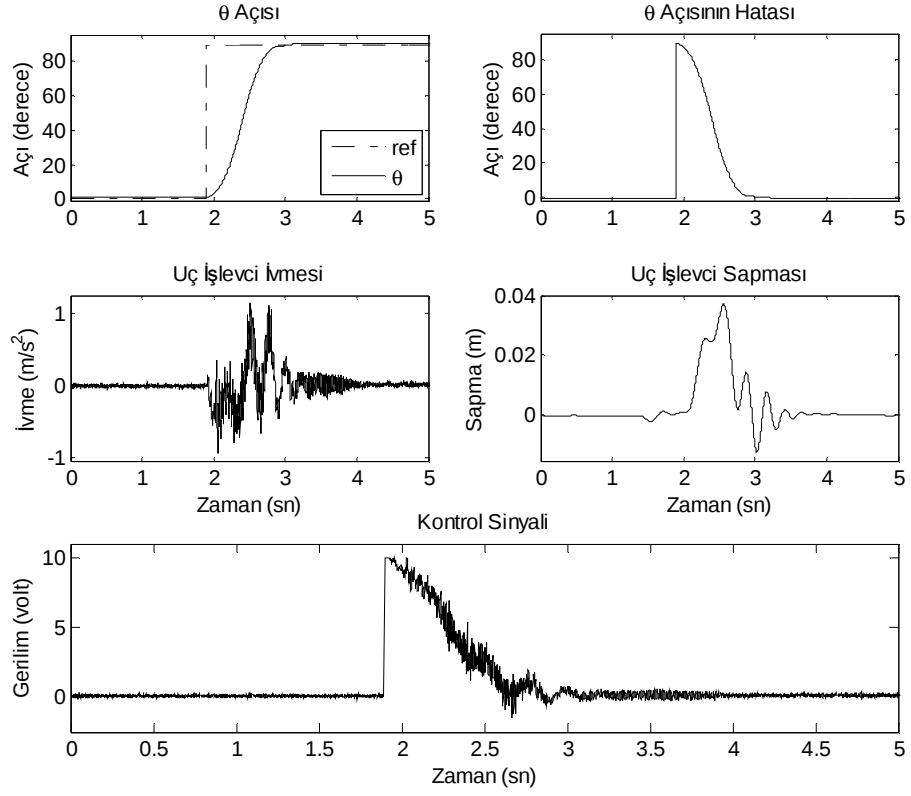
6.6.2. Durum geri beslemeli kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Bu başlık altında esnek bağlı robot kolunun kontrolünde kullanılan durum geri beslemeli kontrolör için yapılan deneyler, deneylerin sonuçları ve bunların karşılaştırılması işlenecektir.

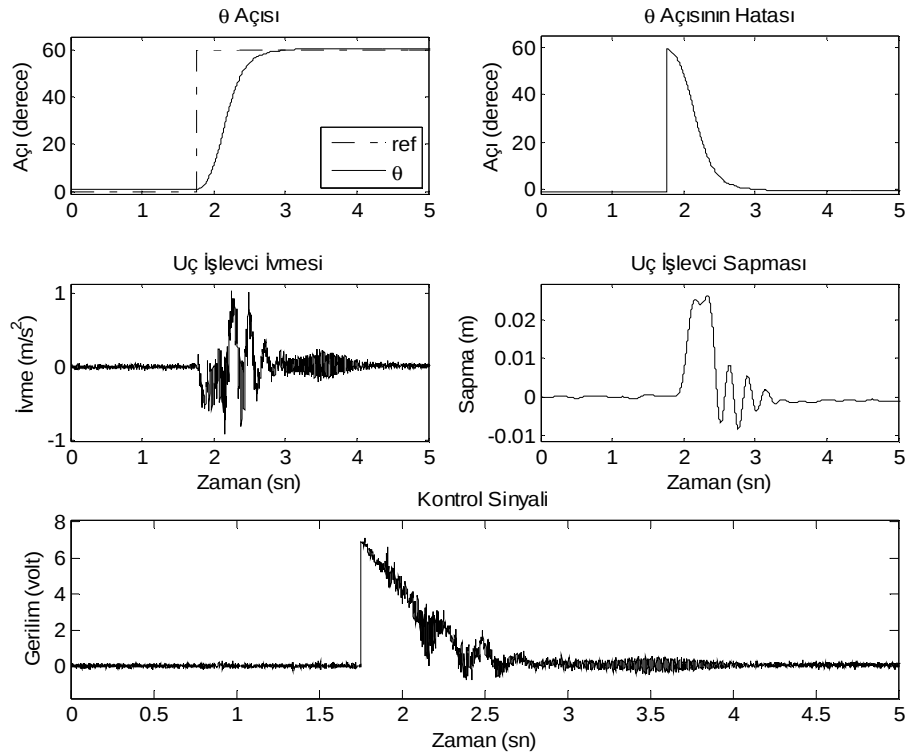
Robot kolu için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün performansını test etmek için birçok deney yapılmış olup bu deneyler üç gruba ayrılmıştır. Birinci grupta, esnek bağlı robot kolunu konum kontrolü deneyleri yapılmış olup, robot koluna birim basamak girişi uygulanmıştır. İkinci grupta, yörünge takibi deneyleri yapılmış olup, robota referans olarak sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmıştır. Üçüncü grupta, geliştirilen kontrolörün kararlılığını test edebilmek için, robot koluna birim dürtü ve bozucu darbe girişleri verilmiş ve sistemin bu girişler karşısında oluşturduğu çıkışlar incelenmiştir. Yapılan bütün deneyler ayrı başlıklar altında toplanmış, deney sonuçları karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

6.6.2.1. Esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için konum kontrolü deneyleri

Bu başlık altında esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolörle yapılan konum kontrolü deneyleri bulunmaktadır. Şekil 6.38 – 6.39’ da görüleceği üzere esnek bağlı robotun konum kontrolü deneylerinde robot koluna doksan ve altmış derecelik iki farklı birim basamak girişi verilmiştir. Ve bu durumda robotun dönme açısı θ , uç işlevcinin ivmesi $\ddot{\alpha}$ ve sapma miktarı δ , son olarak kontrolörün oluşturduğu kontrol sinyali incelenmiştir. Şekillerde görülen deneylerde elde edilen deney sonuçları Tablo 6.16’ da verilmiştir. Yapılan deneylerde, beklenildiği gibi uygulanan birim basamak fonksiyonunun son değeri arttırıldığında, uç işlevcideki oluşan hatalar ve sistemin oturma zamanı artmaktadır.



Şekil 6. 38: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı



Şekil 6. 39: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı

Tablo 6. 16: Durum geri beslemeli kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

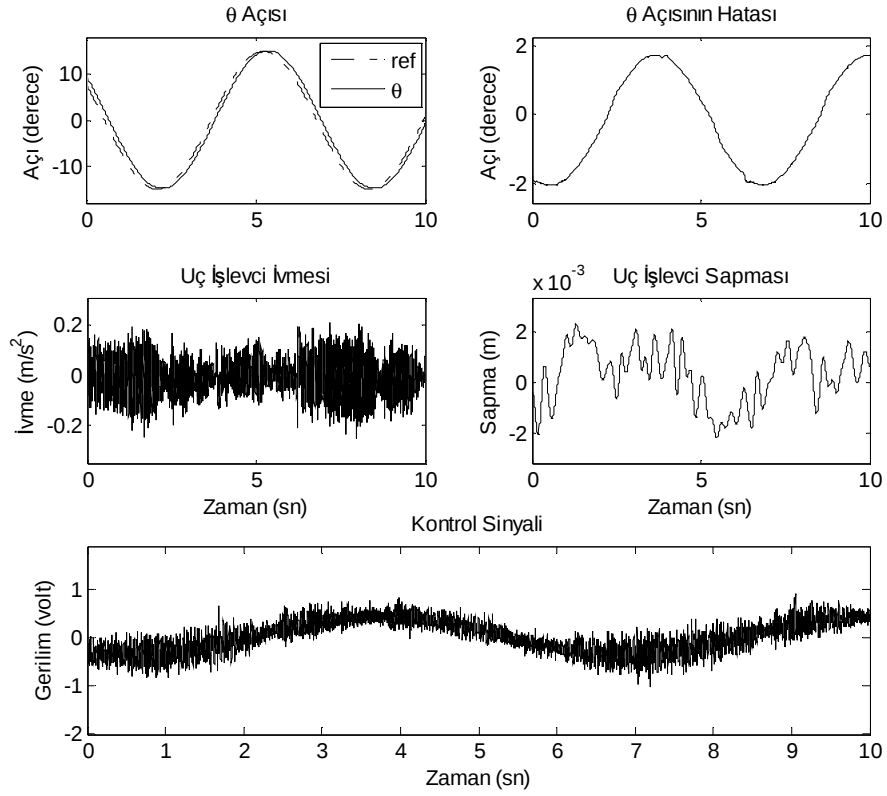
Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Oluşan Hatanın Tepe Değeri		Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	θ	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 60°' lik Birim Basamak Girişi	0.94	1.29	0	1.02	0.026	0.35	0
DENEY 2 90°' lik Birim Basamak Girişi	0.97	1.53	0	1.15	0.037	0.4	0

Tabloda da görüleceği üzere robot koluna uygulanan ve son değeri 90° olan birim basamak fonksiyonu girişi için, robot uç işlevcisinin sapma miktarında en büyük 0.037 m ve ivmesinde en büyük 1.15 m/s² değerinde hatalar oluşmaktadır. Geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör, 90°' lik birim basamak girişi için robot uç işlevcisini 1.53 saniye gibi kısa bir sürede istenilen konuma getirmiştir.

6.6.2.2. Esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolör için yörünge takibi deneyleri

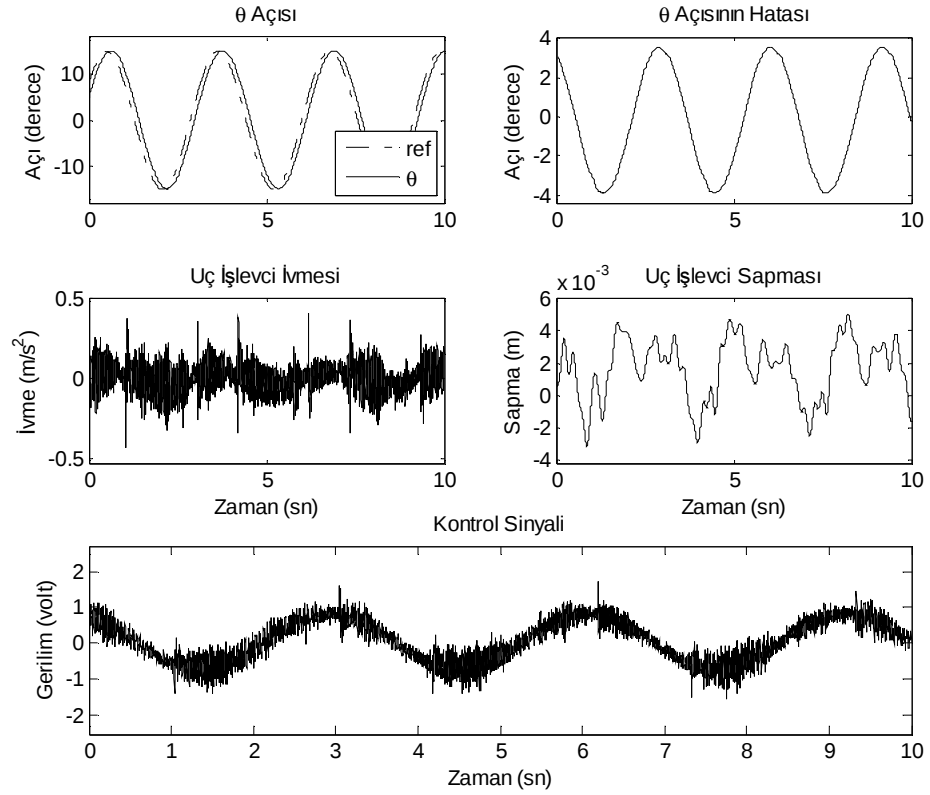
Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörle yapılan yörünge takibi deneylerine yer verilmektedir. Robot koluna sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmıştır. Bahsedilen yörüngeler ayrı başlıklar altında incelenip ayrı ayrı değerlendirilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır.

6.6.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri



Şekil 6. 40: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(1rd)$)

Esnek bağlı robot koluna, Şekil 6.40 ve 6.41’ de görüldüğü üzere iki farklı referans giriş sinyali uygulanıp, bu sinyaller karşısında sistem çıkışında oluşan motor dönme açısı θ , uç işlevci sapma miktarı δ ve uç işlevci ivmesinde $\ddot{\alpha}$ oluşan hatalar incelenmiş, elde edilen deney sonuçları Tablo 6.17’ de verilmiştir. Beklenildiği gibi uygulanan sinüzoidal sinyalin referansı artırıldığında, uç işlevcide oluşan hatalar artmaktadır. Tabloda görüleceği üzere 15 volt genlikli 1 rad/sn frekansa sahip referans sinyal robot koluna uygulandığında, uç işlevci sapmasında en büyük 0.0023 m, uç işlevci ivmesinde 0.19 m/s^2 ve motor dönme açısında 1.7° lik hatalar oluşmaktadır. Görüleceği üzere geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör istenilen referans 0.1 saniye gibi küçük bir faz farkı ile izlemektedir.



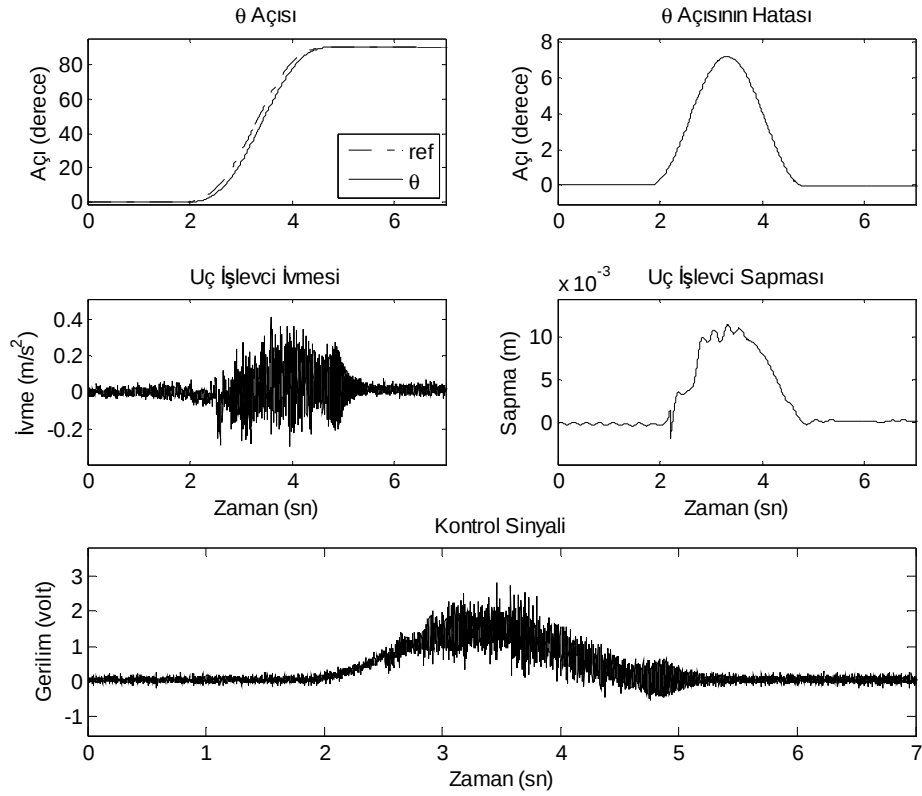
Şekil 6. 41: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(2\text{rd})$)

Tablo 6. 17: Durum geri beslemeli kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

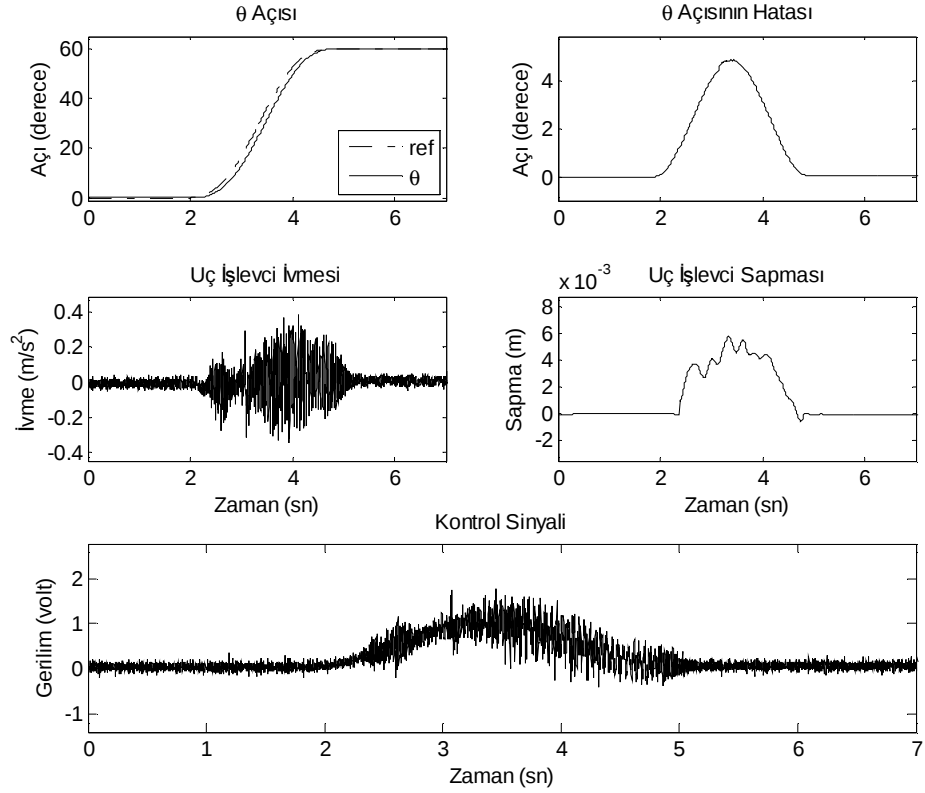
Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	
DENEY 1 Referans Sinyal: $15\sin(1\text{rd})$	0.19	0.0023	1.7	0.1
DENEY 2 Referans Sinyal: $15\sin(2\text{rd})$	0.38	0.005	3.54	0.15

6.6.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun durum geri beslemeli kontrolörle yapılan kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde, iki farklı kane fonksiyonu tasarlanmıştır. Bu yörüngelerin her ikisinin de başlangıç pozisyonları aynı olmasına karşın, bitiş pozisyonları 90° ve 60° olarak belirlenmiştir. Her iki yörüngede robot koluna uygulanıp elde edilen sonuçlar Tablo 6.18’ de gösterilmiştir. Şekil 6.42 ve 6.43, sisteme uygulanan kane fonksiyonlarının çıkış grafiklerini göstermektedir. Verilen şekillerden ve tablodan görüleceği üzere, kane fonksiyonun son konumu arttıkça uç işlevcide ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır. Görüleceği üzere son konumu 90° olan kane fonksiyonu robot koluna uygulandığında, θ açısında en büyük 7.2 derece, uç işlevci sapma miktarında en büyük 0.011 m ve uç işlevci ivmesinde 0.41 m/s^2 değerinde hatalar oluşmaktadır.



Şekil 6. 42: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)



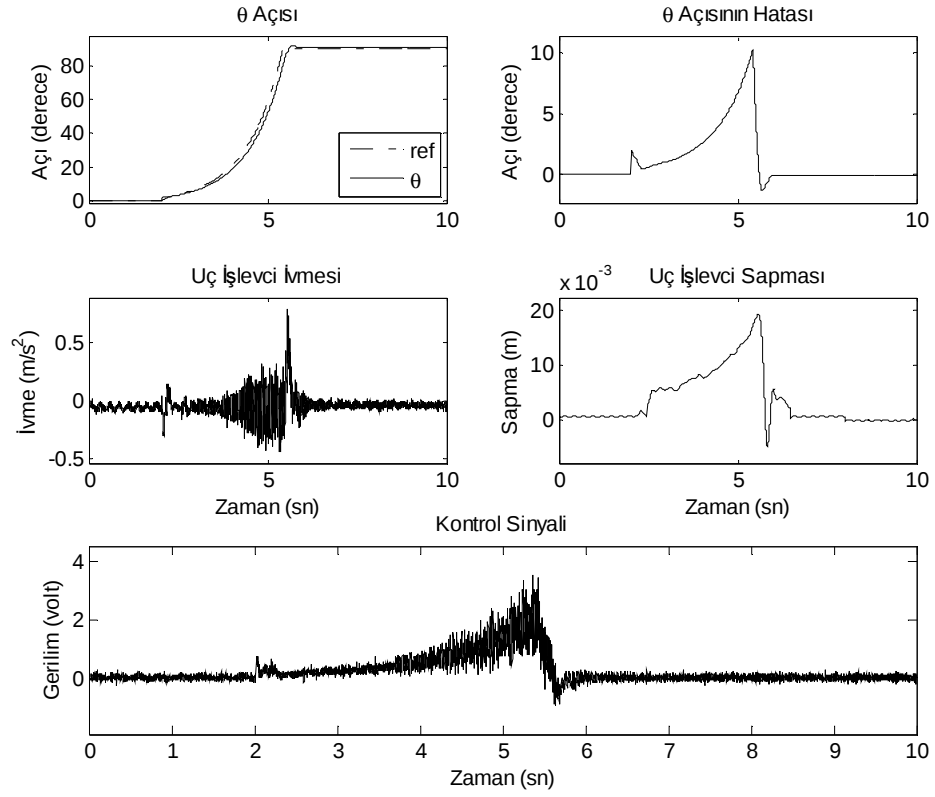
Şekil 6. 43: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)

Tablo 6. 18: Durum geri beslemeli kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 60°	0.38	0.0057	4.9	0.1	0.2
DENEY 2 Son Konum: 90°	0.41	0.011	7.2	0.1	0.28

Ayrıca görüleceği üzere robot kolunun motor dönme açısındaki, kalıcı durum hataları motor dişlisinin ortalama diş boşluğu olan 0.5 dereceden oldukça küçük olarak elde edilmiştir.

6.6.2.2.3. Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi



Şekil 6. 44: Üstel fonksiyon yörünge takibi deneyi

Tablo 6. 19: Durum geri beslemeli kontrolörün üstel fonksiyon yörünge takibi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 90°	0.78	0.019	10.3	0.15	0.25

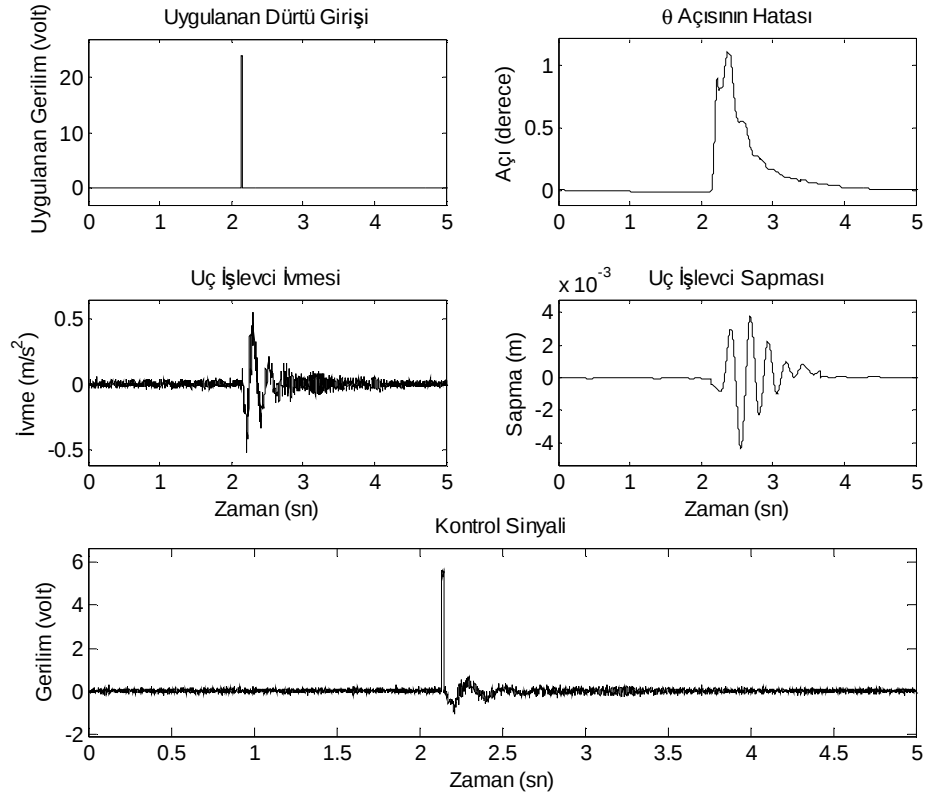
Şekil 6.44' de görüleceği üzere esnek bağlı robot koluna başlangıç pozisyonu 0 bitiş pozisyonu 90° olan üstel fonksiyon referans giriş olarak uygulanmıştır. Tablo 6.19' da görüleceği üzere robot kolu referans yörüngeyi, uç işlevcidaki sapma miktarı en büyük 0.019 m, ve motor dönme açısındaki hata değeri en büyük 10.3 derece olacak

şekilde takip etmiştir. Ayrıca giriş olarak verilen referans yörünge takip edilirken motor dönme açısında 0.15 saniyelik faz farkı oluşmaktadır.

6.6.2.3. Durum geri beslemeli kontrolörün kararlılığının test edilmesi

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörün kararlılığının test edilebilmesi için yapılan deneylere yer verilmiştir. Sisteme dürtü girişi ve bozucu darbe girişi verilirken sistemin bu girişler sonrasında ürettiği çıkışlar incelenip yorumlanmıştır.

6.6.2.3.1. Durum geri beslemeli kontrolörün dürtü girişi deneyi



Şekil 6. 45: Birim dürtü yanıtı deneyi

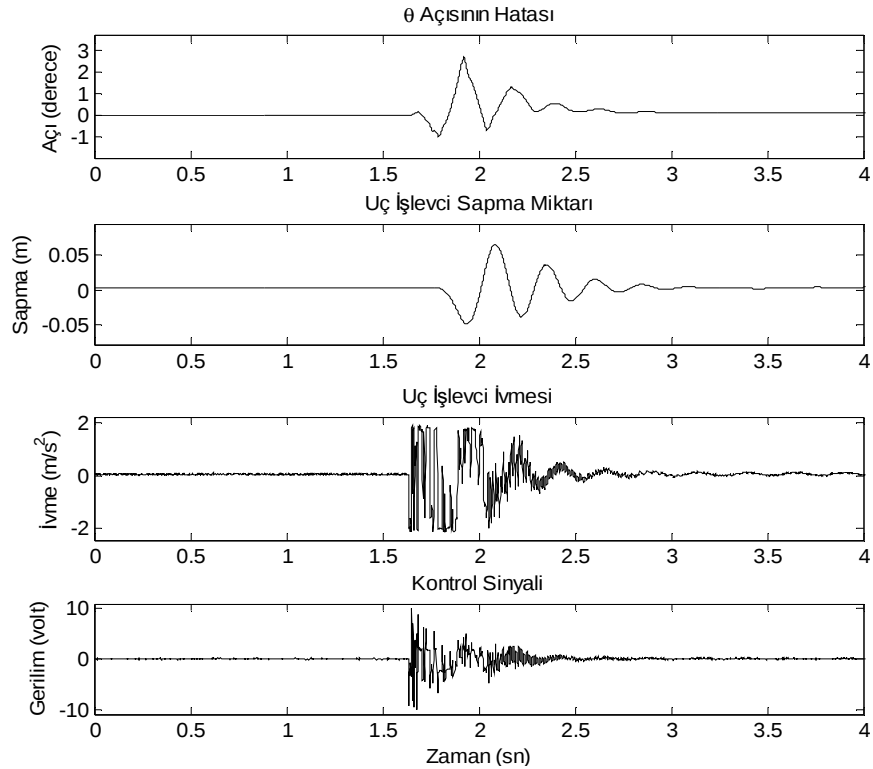
Şekil 6.45' de görüleceği üzere robot koluna dürtü girişi olarak uygulanan ve anlık olarak verilen 24 voltluk gerilim motor dönme açısında 1.1 derece, uç işlevci sapma miktarında 0.044 m ve uç işlevci ivmesinde 0.55 m/s^2 değerinde hatalar oluşmasında sebep olmuştur. Ancak Tablo 6.20' de verildiği gibi geliştirilen durum geri beslemeli

kontrolör 1.05 saniyede oluşan hataları ortadan kaldırarak sistemi başlangıç konumunda sabitlemeyi başarmıştır.

Tablo 6. 20: Durum geri beslemeli kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	0.95	1.05	0.55	0.044	1.1	0.001	0

6.6.2.3.2. Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi



Şekil 6. 46: Bozucu darbe girişi deneyi

Şekil 6.46’ da görüldüğü üzere esnek bağlı robot kolunun uç işlevcisine bozucu darbe girişi uygulanmış, deney sonucunda elde edilen veriler Tablo 6.21’ de

gösterilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarından görüleceği üzere, durum geri beslemeli kontrolör robot uç işlevcisine uygulanan bozucu darbe girişi sonrasında θ açısını 1.4 saniyede, sapma miktarını δ 1.8 saniyede başlangıç konumu olan sıfıra getirerek sistemi kontrol edebilmiştir. Ayrıca, uygulanan bozucu darbe girişi nedeniyle uç işlevci sapmasında en büyük 0.064 m, θ açısında en büyük 2.8°'lik hatalar oluşmaktadır. Görüldüğü gibi durum geri beslemeli kontrolör robotun uç işlevcisine uygulanan bozucu darbeyi kısa sürede sönümleyip, uç işlevcide oluşan sapmayı kontrol ederek kararlı yapısını korumaya devam etmektedir.

Tablo 6. 21: Durum geri beslemeli kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	1.4	1.8	1.9	0.064	2.8	0.13	0

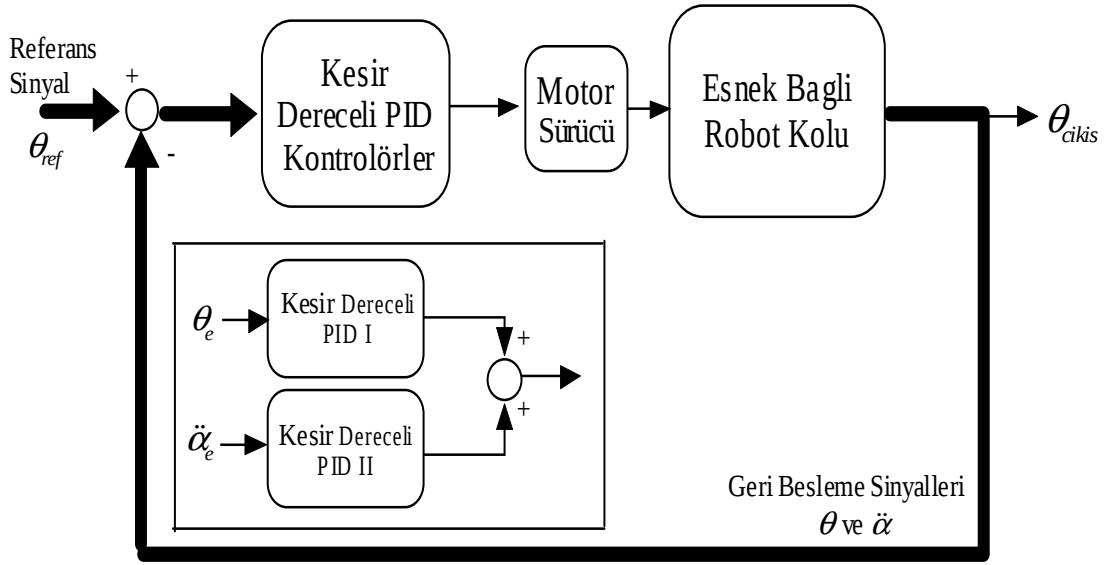
6.7. Esnek Bağlı Robot Kolunun Kesir Dereceli PID Kontrol Yöntemiyle Kontrol Edilmesi

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi konusu incelenecektir. Geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün, kontrolör şeması, blok diyagramları, kontrolörün simulink yapısı ayrı başlıklar altında verilecek, ayrıca kontrolörün performansının test edilebilmesi için yapılan deneyler, deneylerin sonuçları ve bunların karşılaştırılması farklı kısımlarda işlenecektir.

6.7.1. Kesir dereceli PID kontrolör yapısı ve blok diyagramları

Daha önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi esnek bağlı robot kolu, tek girişli ve iki çıkışlı bir sistem olup robotun girişi, motora uygulanan gerilim, çıkışları ise motorun dönme açısı ve bağın uç işlevcisinin sapma miktarıdır. Geliştirilen kontrol

yöntemlerinde genel olarak bu iki bilgi geri besleme yapılarak kontrolör tasarlanır. Ancak eğer geliştirilen esnek bağı robot kolu modeli incelenirse, esnek bağı sapma miktarı, bağı döner tabla ile birleşme noktasında ki bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Bağı titreşimi, uç noktada bulunan bir ivme sensörü ile ölçülmektedir. Ve anlaşılacağı üzere bağda oluşan titreşimleri sönümlemek bağı sapmasının azalması anlamında gelmektedir. Bu nedenle kontrolör yapısında motor dönme açısıyla beraber, bağı uç noktasında ki ivme geri beslenmiştir.



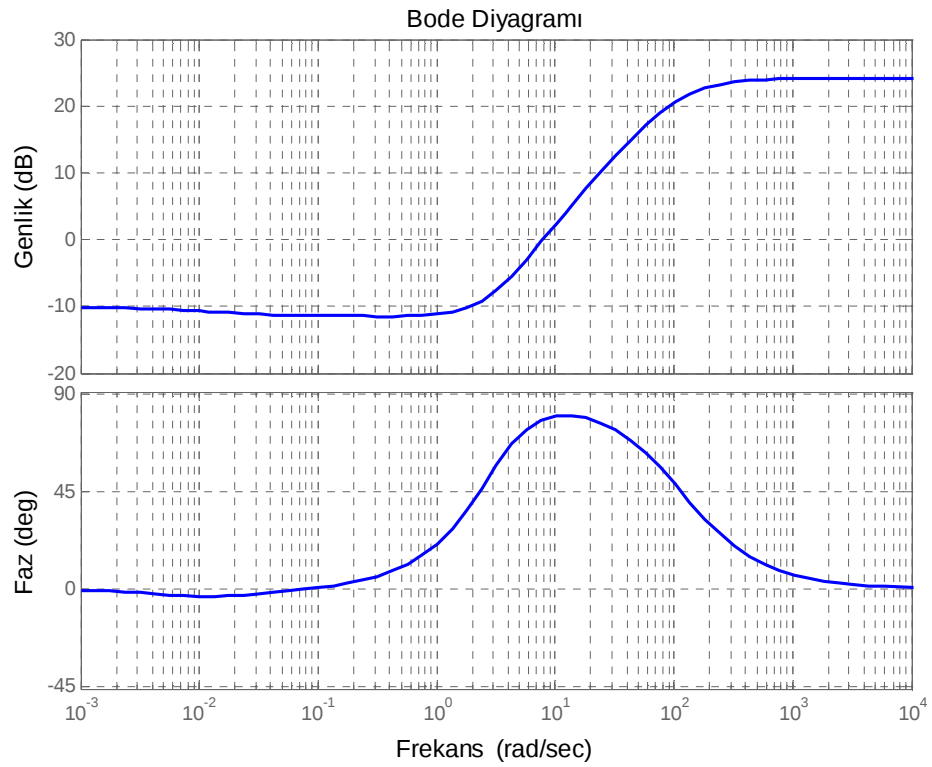
Şekil 6. 47: Kesir dereceli PID kontrolörün kontrol şeması

Şekil 6.47' de görüleceği üzere, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör yapısında iki farklı kesir dereceli PID kontrolör yer almaktadır. Bu kontrolörlerden birincisi motor dönme açısının hatasını giriş olarak alır ve buna göre bir çıkış üretir. İkincisi, esnek bağı uç noktasında ki ivmenin hatasını geri besleme olarak alır ve bu girişe göre kontrolör yapısında bulunan parametrelere göre bir çıkış üretir. Sisteme uygulanacak olan kontrol sinyali bu iki kontrolörün çıkışının toplanması ile elde edilir. Bahsedildiği üzere bu iki farklı kontrolörün farklı kontrolör parametreleri bulunmaktadır. Bu parametreler sayesinde her iki kontrolör için farklı transfer fonksiyonları oluşmaktadır. Geliştirilen iki farklı kesir dereceli PID kontrolör için Crone hesapsal yaklaşım yöntemine göre elde edilen yaklaşık transfer fonksiyonları, Denklem 6.3 ve 6.4' de gösterildiği gibidir.

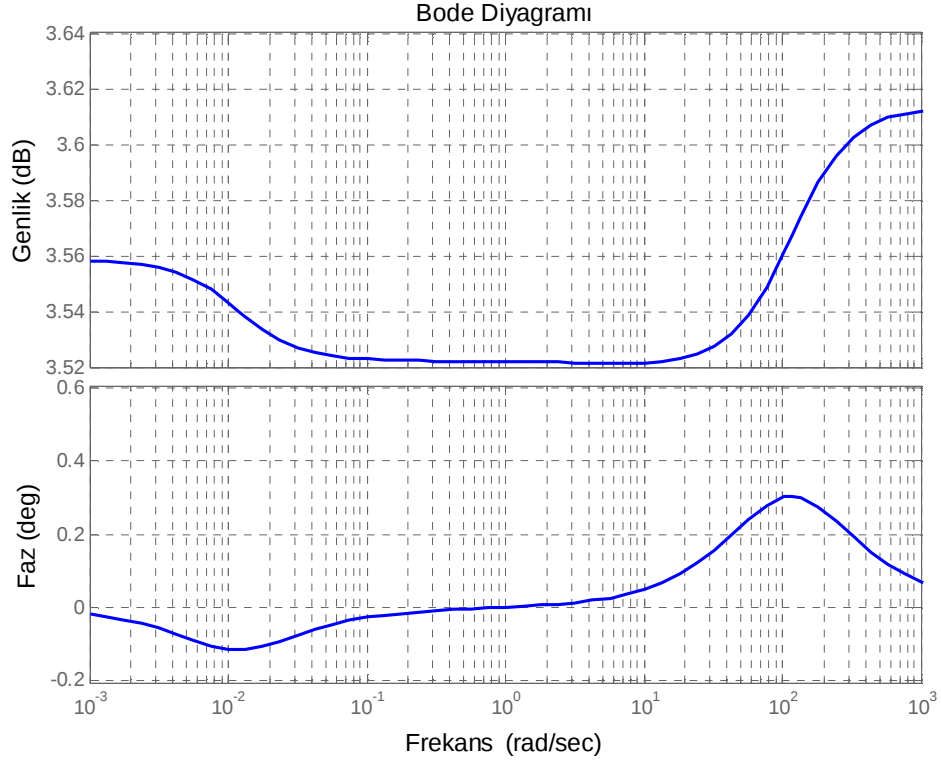
$$TF_{FOPID\ I} = \frac{16.1s^6 + 190.6s^5 + 776.7s^4 + 1269s^3 + 519.5s^2 + 65.1s + 0.77}{s^6 + 127.9s^5 + 1357s^4 + 4087s^3 + 1844s^2 + 236.4s + 2.51} \quad (6.3)$$

$$TF_{FOPID\ II} = \frac{1.51s^6 + 192s^5 + 2036s^4 + 6131s^3 + 2767s^2 + 354.7s + 3.78}{s^6 + 127.9s^5 + 1357s^4 + 4087s^3 + 1844s^2 + 236.4s + 2.51} \quad (6.4)$$

Kesir dereceli PID kontrolörlerin, Denklem 6.3 ve 6.4’ de verilen yaklaşık transfer fonksiyonlarına göre oluşan bode diyagramları Şekil 6.48 ve 6.49’ da gösterildiği gibidir.



Şekil 6. 48: Kesir dereceli PID I bode diyagramı



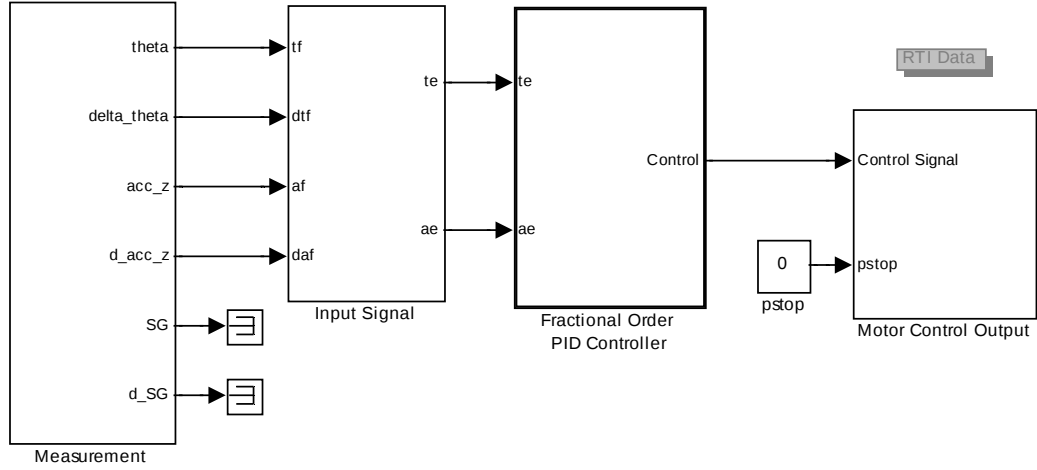
Şekil 6. 49: Kesir dereceli PID II bode diyagramı

Şekillerde gösterilen kesir dereceli PID I ve kesir dereceli PID II kontrolörlerinin, bode diyagramları ekte yer alan ve bölüm 6.4' tasarlanan PID I ve PID II kontrolörlerinden farkı, bode diyagramlarından da görüleceği üzere kesir dereceli PID kontrolörler yüksek ve düşük frekanslardaki çalışma frekanslarında PID kontrolörden daha kararlı bir yapı göstermektedir.

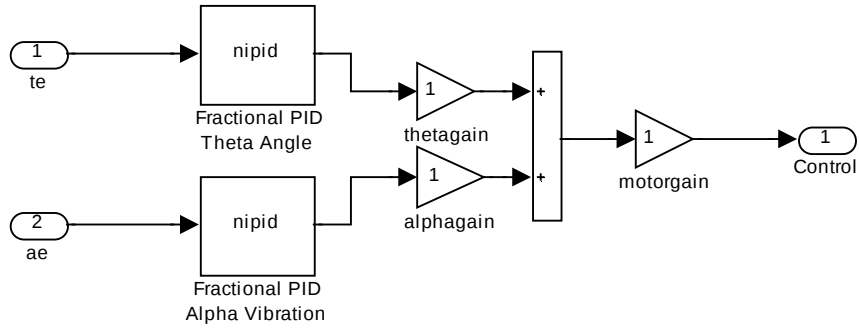
Geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör Matlab/Simulink ortamında tasarlanmış olup, dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla esnek bağlı robot koluna uygulanmıştır.

Şekil 6.50' de görüleceği üzere, simulink' te geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör dört ana bloktan oluşmaktadır. Bunlardan ölçüm bloğu, gerekli geri besleme sinyallerini ölçer. Giriş bloğu, sisteme istenilen referans sinyalin verilmesini sağlar. Kontrolör bloğu, kesir dereceli PID kontrolörün geliştirildiği ve robot kolunun kontrol edilebilmesi için üretilmesi gereken kontrol sinyalinin üretildiği bloktur. Çıkış bloğu ise kontrolör bloğunun ürettiği kontrol sinyalini hareketi sağlayan

motora uygulayan bloktur. Şekil 6.51’ de simulink’ te oluşturulan kesir dereceli PID kontrolör yapısı bulunmaktadır.



Şekil 6. 50: Kesir dereceli PID kontrolörün simulink blokları



Şekil 6. 51: Simulink’ te oluşturulan kesir dereceli PID kontrolör yapısı

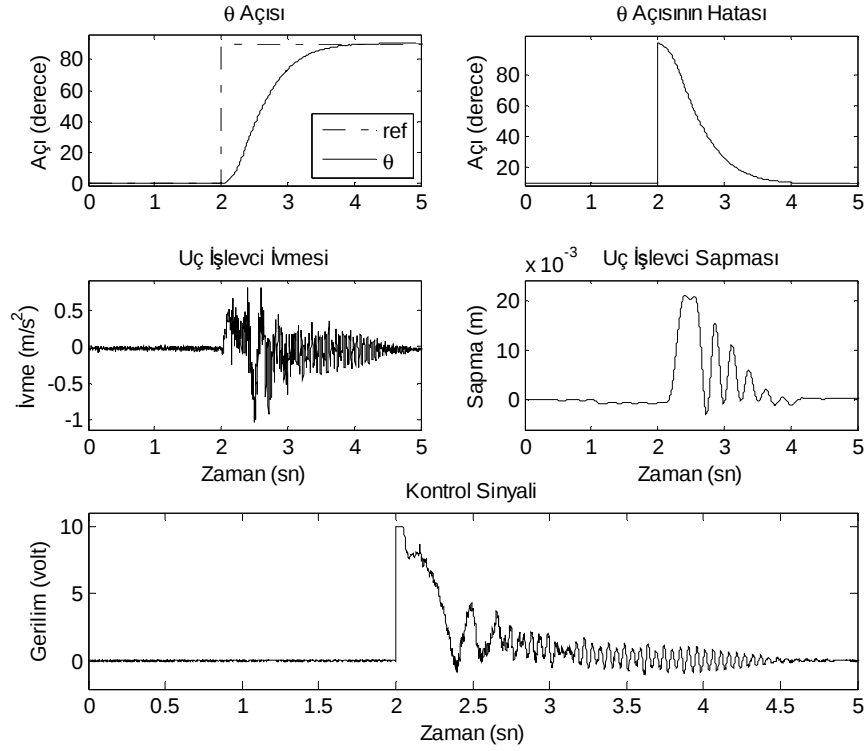
6.7.2. Kesir dereceli PID kontrol yöntemi için deneysel sonuçlar ve sonuçların karşılaştırılması

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun, kesir dereceli PID kontrolör için yapılan deneyleri ve elde edilen deney sonuçları verilecektir.

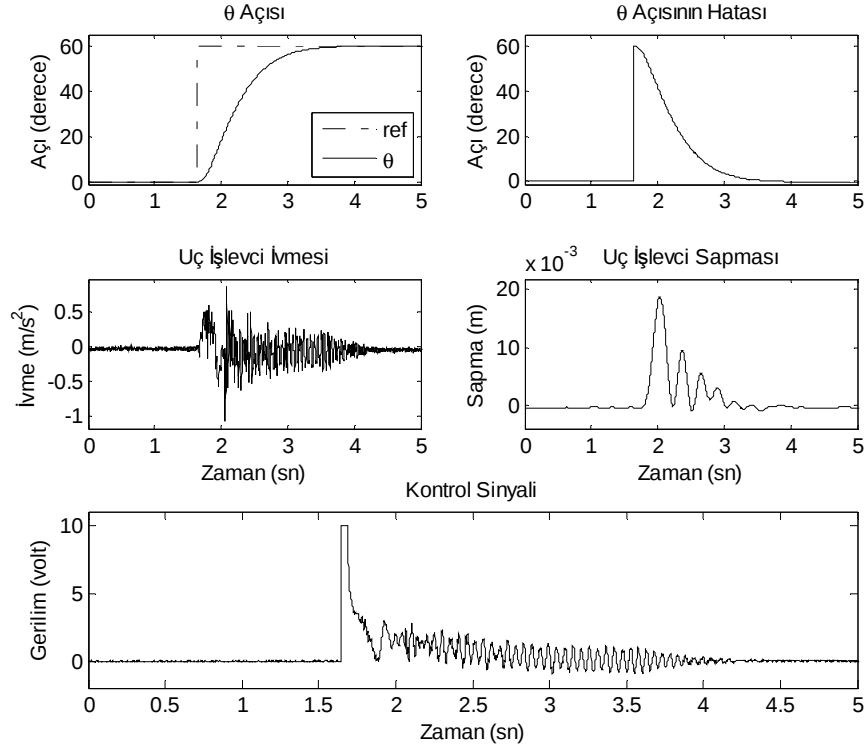
Kesir dereceli PID kontrolörün kontrol performansının test edilebilmesi için yapılan deneyler dört ana grupta incelenebilir. İlk grupta esnek bağlı robot kolunun konum kontrolü deneyleri yapılmakta bunun için robota birim basamak sinyali verilmektedir. İkinci grupta, robota referans olarak sinüzoidal, kane fonksiyonu yörüngeleri verilerek yörünge takibi deneyleri yapılmaktadır. Ve son grupta

kontrolörün kararlılığının test edilebilmesi için birim dürtü ve bozucu darbe girişleri verilmiştir. Yapılan bütün deneyler ayrı başlıklar altında karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

6.7.2.1. Esnek bağlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için konum kontrolü deneyleri



Şekil 6. 52: 90°' lik birim basamak girişi yanıtı



Şekil 6. 53: 60°' lik birim basamak girişi yanıtı

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün birim basamak fonksiyonu girişi deneyleri verilmiştir. Şekil 6.52 ve 6.53' te robot koluna uygulanan ve son değeri sırasıyla 90 ve 60° olan iki birim basamak fonksiyonu için elde edilen sistem çıkışları gösterilmiştir. Ve elde edilen sonuçlar Tablo 6.22' de gösterilmiştir. Deney sonuçlarında görüleceği üzere uygulanan girişin son değeri artırıldığında, uç işlevcide oluşan hatalar ve sistemin toplam oturma zamanı artmaktadır. Deney 2' deki sonuçlara göre robot koluna son değeri 90° olan bir birim basamak fonksiyonu uygulandığında, robot kolu uç işlevcisinin sapma miktarı 0.02 m değerine kadar çıkmaktadır. Ve geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör toplam 1.58 saniye gibi kısa bir sürede robot kolunu istenilen konuma getirmeyi başarmış ve uç işlevcide oluşan titreşimleri sönmülmüştür. İstenilen konuma giderken motor dönme açısı olan θ açısında herhangi bir aşma meydana gelmeyip. Sistemin kalıcı durum hatası 0.25 derece olarak elde edilmiştir ve bu hata kullanılan dişli kutusunun ortalama diş boşluğu değerinden oldukça küçüktür.

Tablo 6. 22: Kesir dereceli PID kontrolörün birim basamak girişi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

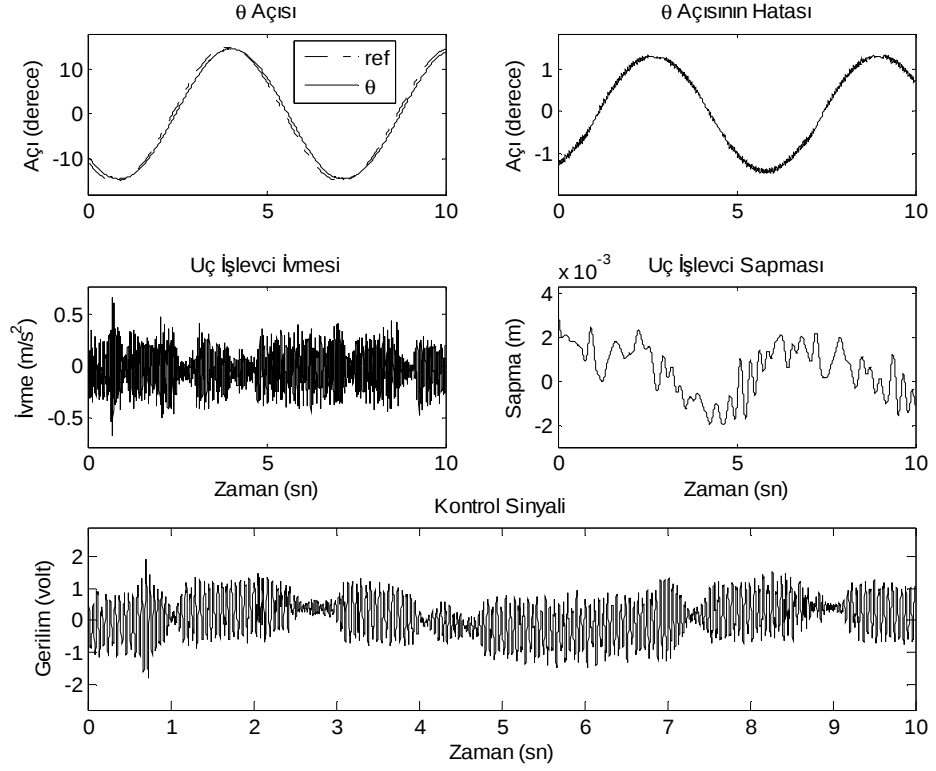
Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Oluşan Hatanın Tepe Değeri		Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	θ	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 60°' lik Birim Basamak Girişi	1.55	1.2	0	1	0.018	0.2	0
DENEY 2 90°' lik Birim Basamak Girişi	1.58	1.52	0	1.04	0.02	0.25	0

6.7.2.2. Esnek bağlı robot kolunun kesir dereceli PID kontrolör için yörünge takibi deneyleri

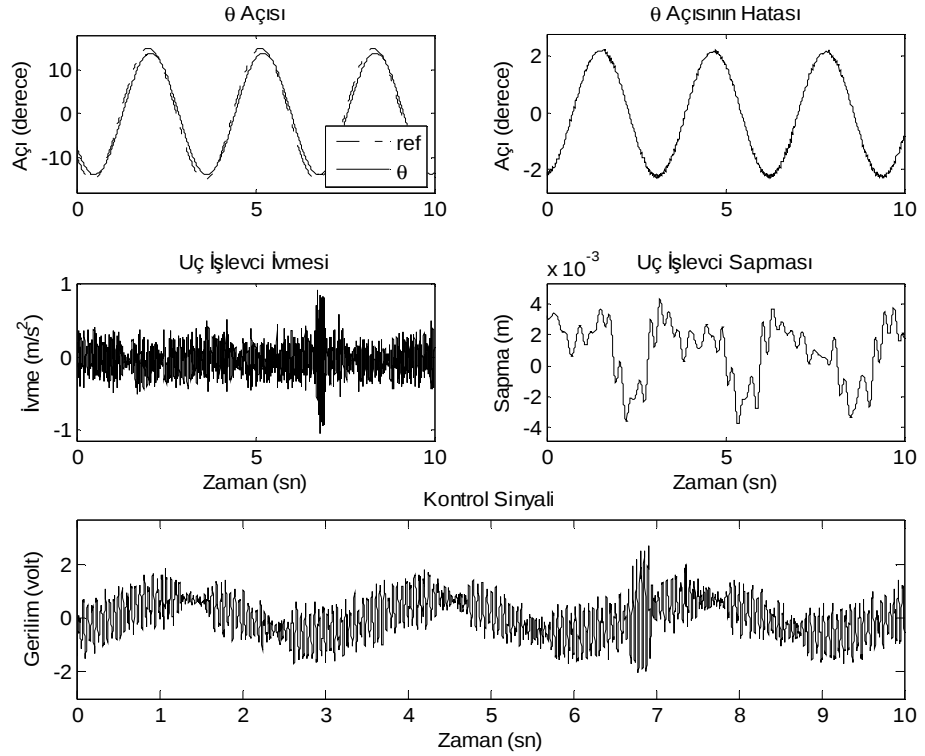
Bu kısımda esnek bağlı robot kolunun, kesir dereceli PID kontrolör için yörünge takibi deneylerine yer verilmiştir. Robot koluna sırasıyla sinüzoidal, kane fonksiyonu ve üstel fonksiyon yörüngeleri uygulanmıştır. Uygulanan yörüngeler ve elde edilen sonuçlar ayrı başlıklar altında değerlendirilip, yorumlanmıştır.

6.7.2.2.1. Sinüzoidal yörünge takibi deneyleri

Esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi deneyi için farklı frekansta iki referans sinyal oluşturulmuş ve sistemin bu farklı sinyaller için oluşturduğu cevaplar incelenmiştir. Şekil 6.54 ve 6.55, farklı frekanslardaki sinüzoidal yörüngeler için robot kolunun çıkışlarını göstermektedir. Görüleceği üzere robot koluna 15 derece genlikli 1 rad/s ve 2 rad/s frekanslarında iki farklı referans sinyal uygulanmıştır. Tablo 6.11' de uygulanan referans sinyal sonrasında esnek bağlı robot kolunun oluşturduğu sistem çıkışları verilmiştir.



Şekil 6. 54: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(1rd)$)



Şekil 6. 55: Sinüzoidal yörünge takibi deneyi (Referans Sinyal: $15\sin(2rd)$)

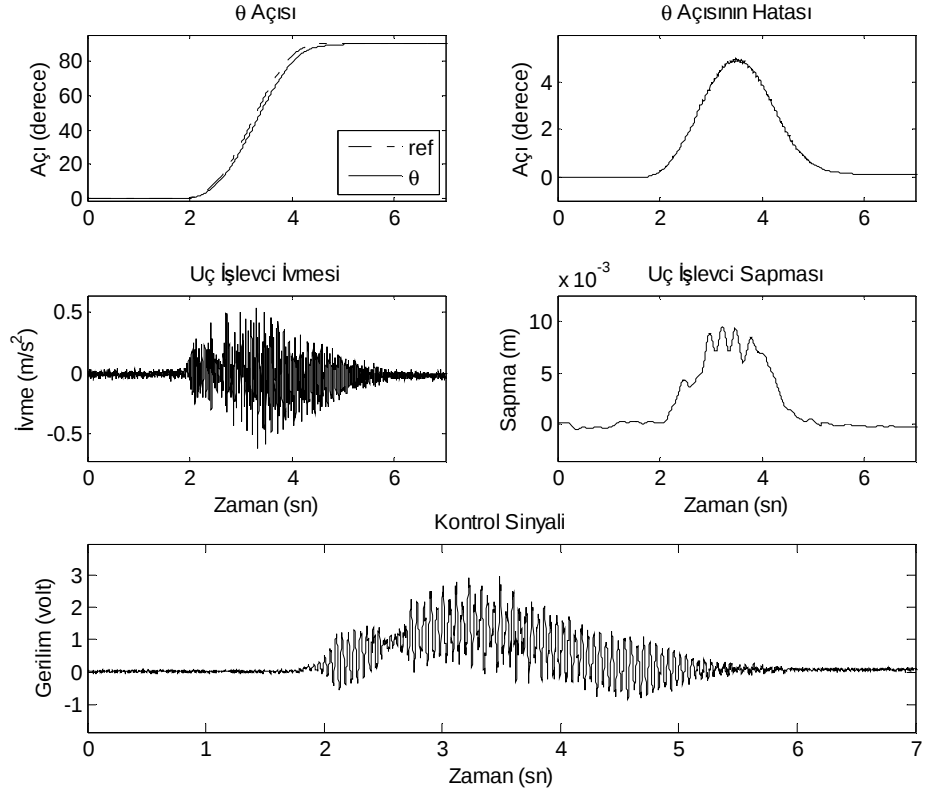
Elde edilen sonuçlar incelenecek olur ise, robot koluna uygulanan referans sinyalin frekansı arttıkça, robot kolu uç işlevcisinde oluşan sapma miktarı, uç işlevcinin ivmesi ve motor dönme açısında oluşan hatalar artmaktadır. Tablodan görüleceği üzere, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, verilen 15 derece genlikli 1 rad/s frekanstaki referans yörüngeyi izlerken, uç işlevci sapmasında en büyük 0.0019 m ve motor dönme açısında en büyük 1.3°' lik hatalar oluşmuştur. Ve sistemin faz kayması 0.08 saniye olarak elde edilmiştir. Görüleceği üzere kesir dereceli PID kontrolörle, sinüzoidal yörünge takibinde oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6. 23: Kesir dereceli PID kontrolörün sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

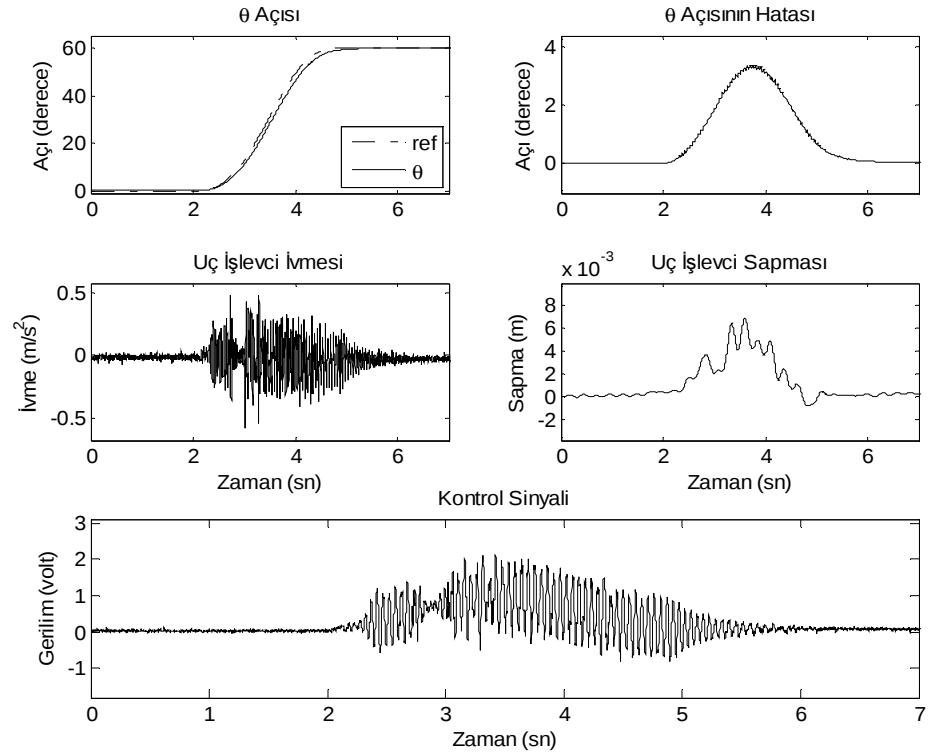
Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	
DENEY 1 Referans Sinyal: 15sin(1rd)	0.62	0.0019	1.1	0.08
DENEY 2 Referans Sinyal: 15sin(2rd)	1	0.0045	2.09	0.08

6.7.2.2.2. Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri

Bu bölümde esnek bağlı robot kolunun, kesir dereceli PID kontrolörle gerçekleştirilen, kane fonksiyonu yörünge takibi deneyleri verilemektedir. Burada Şekil 6.56 ve 6. 57' de görüldüğü gibi robot koluna uygulanan iki farklı kane fonksiyonu yörüngesi mevcuttur. Bunlardan birincisinde yörünge 0 pozisyonundan başlayıp 90°' ye ikincisinde ise yine aynı pozisyondan başlayıp 60°' ye oturmaktadır. Beklendiği gibi, kane fonksiyonu yörüngesinde tanımlanan aynı sürede kat edilecek mesafe arttırıldığında yani son konum 90°' ye çıkarıldığında, robot uç işlevcisinde oluşan hatalar artmaktadır.



Şekil 6. 56: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 90°)



Şekil 6. 57: Kane fonksiyonu yörünge takibi deneyi (Son Konum: 60°)

Tablo 6. 24: Kesir dereceli PID kontrolörün kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)	θ Açısı Kalıcı Durum Hatası (derece)
	$\ddot{a}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)		
DENEY 1 Son Konum: 60°	0.58	0.006	3.4	0.08	0.08
DENEY 2 Son Konum: 90°	0.54	0.0095	4.98	0.07	0.03

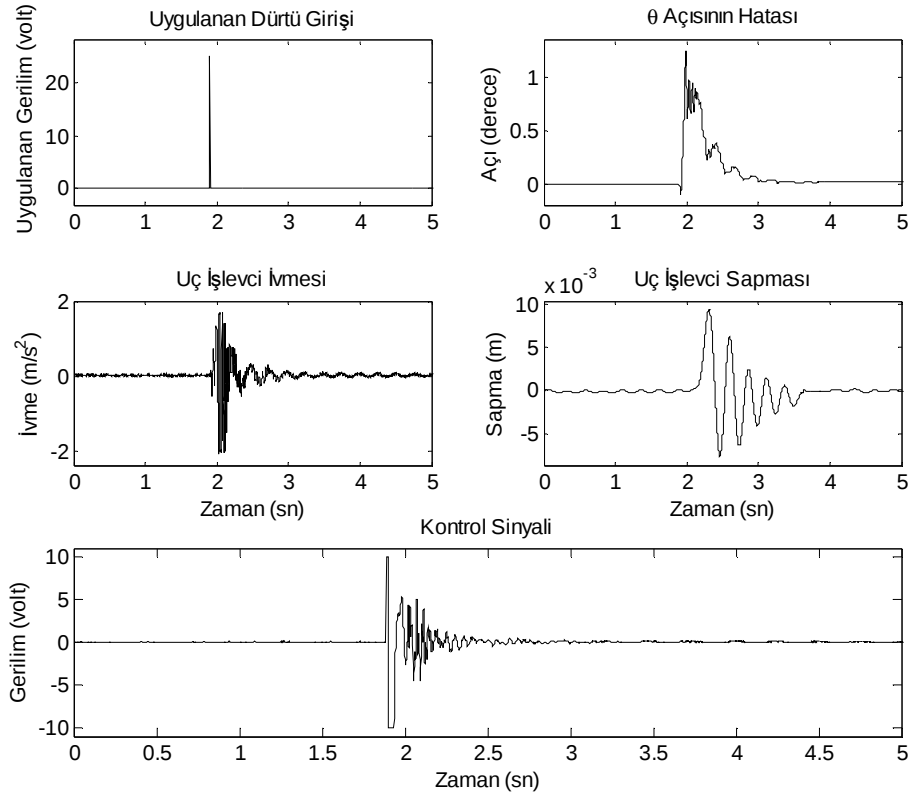
Tablo 6.24’ de elden edilen sonuçlardan görüleceği üzere, robot kolu son konumu 90° olan referans yörüngeyi izlerken, uç işlevcinin sapmasında en büyük 0.0095 m ivmesinde en büyük 0.54 m/s² ve θ açısında en büyük 4.98°’ lik hatalar oluşmaktadır. Bununla birlikte robotun kalıcı durum hatası 0.03 derece ve istenilen yörüngeye giderken oluşturduğu faz farkı 0.07 saniye olarak elde edilmiştir.

6.7.2.3. Kesir dereceli PID kontrolörün kararlılığının test edilmesi

Bu bölümde esnek bağlı robot koluna dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri verilerek geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün kararlılığı test edilecektir. Her iki giriş ayrı başlıklar altında incelenecek ve oluşan sonuçlar karşılaştırılacaktır.

6.7.2.3.1. Kesir dereceli PID kontrolörün dürtü girişi deneyi

Şekil 6.58’ de görüldüğü üzere esnek bağlı robot koluna 24 volt genlikli anlık bir dürtü girişi uygulanıp esnek bağlı robot kolunun çıkışları gözlemlenmiştir. Elde edilen deneysel veriler Tablo 6.25’ de gösterilmiştir. Deney sonuçlarından görüleceği üzere kesir dereceli PID kontrolör, 1.3 saniyelik kısa bir sürede esnek bağdaki titreşimleri sönmüleyerek, sistemi başlangıç pozisyonu olan konuma getirmiştir. Bu esnada uygulanan dürtü fonksiyonu uç işlevcinin sapmasında 0.0094 m, θ açısında ise 1.24 dereceye kadar ulaşan hatalar meydana getirmiştir.



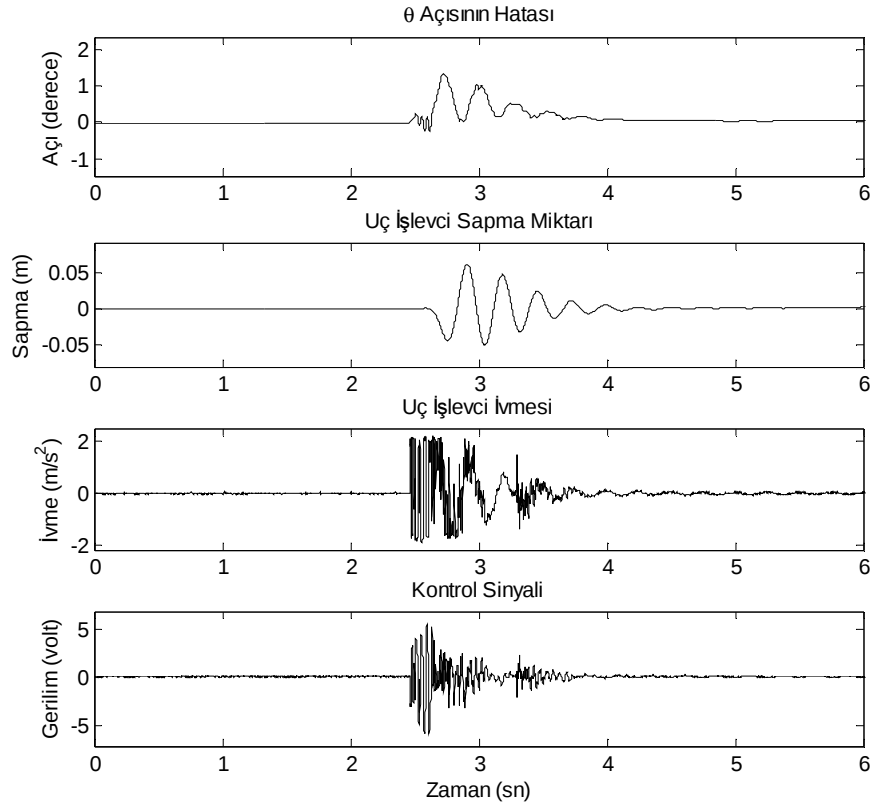
Şekil 6. 58: Birim dürtü yanıtı deneyi

Tablo 6. 25: Kesir dereceli PID kontrolörün birim dürtü yanıtı deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	0.7	1.3	1.9	0.0094	1.24	0.02	0

Geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, uygulanan dürtü girişi karşısında oldukça başarılı bir performans sergilemiştir.

6.7.2.3.2. Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyi



Şekil 6. 59: Bozucu darbe girişi deneyi

Tablo 6. 26: Kesir dereceli PID kontrolörün bozucu darbe girişi deneyinde elde edilen deney sonuçları

Yapılan Deneyler	Oturma Zamanı (s)		Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	θ (derece)	δ (m)
DENEY 1 24 Voltluk Dürtü Girişi	1.44	1.78	1.9	0.06	1.35	0.03	0

Bu bölümde, esnek bağlı robot kolunun uç işlevcisine bozucu darbe girişi verilip sistemin bu giriş karşısındaki davranışı incelenmiştir. Tablo 6.26’ da ki deney sonuçlarından görüleceği üzere, robot koluna uygulanan bozucu darbe, robot uç işlevcisinde 0.06 m sapma ve 1.9 m/s² ivme oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca θ

açısında 1.35° lik hata oluşturmuştur. Ancak geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör, robot kolunda oluşan hataları toplam 1.78 saniyede yok ederek robotun kararlı hale dönmesini sağlamış ve başlangıç konumunda 0.03° lik kalıcı durum hatasıyla tutmayı başarmıştır.

6.8. Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolü İçin Uygulanan Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu başlık altında, esnek bağı robot kolu kontrolü için geliştirilen farklı kontrolörlerin karşılaştırılmasına yer verilecektir.

Bölüm 4' de esnek bağı robot kolu matematiksel olarak modellemiştir. Bölüm 6' da ise bölüm 2' de fiziksel özellikleri anlatılan ve test düzeneğı olarak hazırlanan esnek bağı robot kolunun çeşitli kontrolörler için kontrolü gerçekleştirilmiştir. Esnek bağı robot kolunun kontrolünde sırasıyla, PID kontrolör, bulanık mantık kontrolör, durum geri beslemeli kontrolör ve kesir dereceli PID kontrolörler kullanılmıştır.

Esnek bağı robot kolunun kontrolü için geliştirilen farklı kontrolörlerin birbirleri arasında karşılaştırılabilmeleri için, robot koluyla birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler sırasıyla, konum kontrolü deneyleri, yörünge takibi deneyleri ve kontrolörün kararlılığını test edebilmek için yapılan deneylerdir. Yapılan deneylerde, robot koluna, birim basamak fonksiyonu, sinüzoidal yörünge, kane fonksiyonu yörüngesi, üstel fonksiyon yörüngesi ve dürtü girişı gibi çeşitli referans sinyaller verilerek geliştirilen kontrolörlerin performansları test edilmiştir. Ayrıca robot kolu uç işlevcisine bozucu darbe girişleri uygulanarak kontrolörlerin kararlılık testleri yapılmıştır. Yapılan bütün deneylerin sonuçları ilgili başlıklar altında değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Bu bölümde, esnek bağı robot koluna uygulanan bütün kontrolörler karşılaştırılacak, yapılacak olan karşılaştırma, kontrolörlerin sinüzoidal yörünge cevapları ve birim basamak fonksiyonu cevapları üzerinden yapılacaktır. Bunun için kontrolörlerin

birim basamak fonksiyonu ve sinüzoidal yörünge cevapları ayrı grafiklerde toplanıp ayrı tablolarda karşılaştırılmıştır.

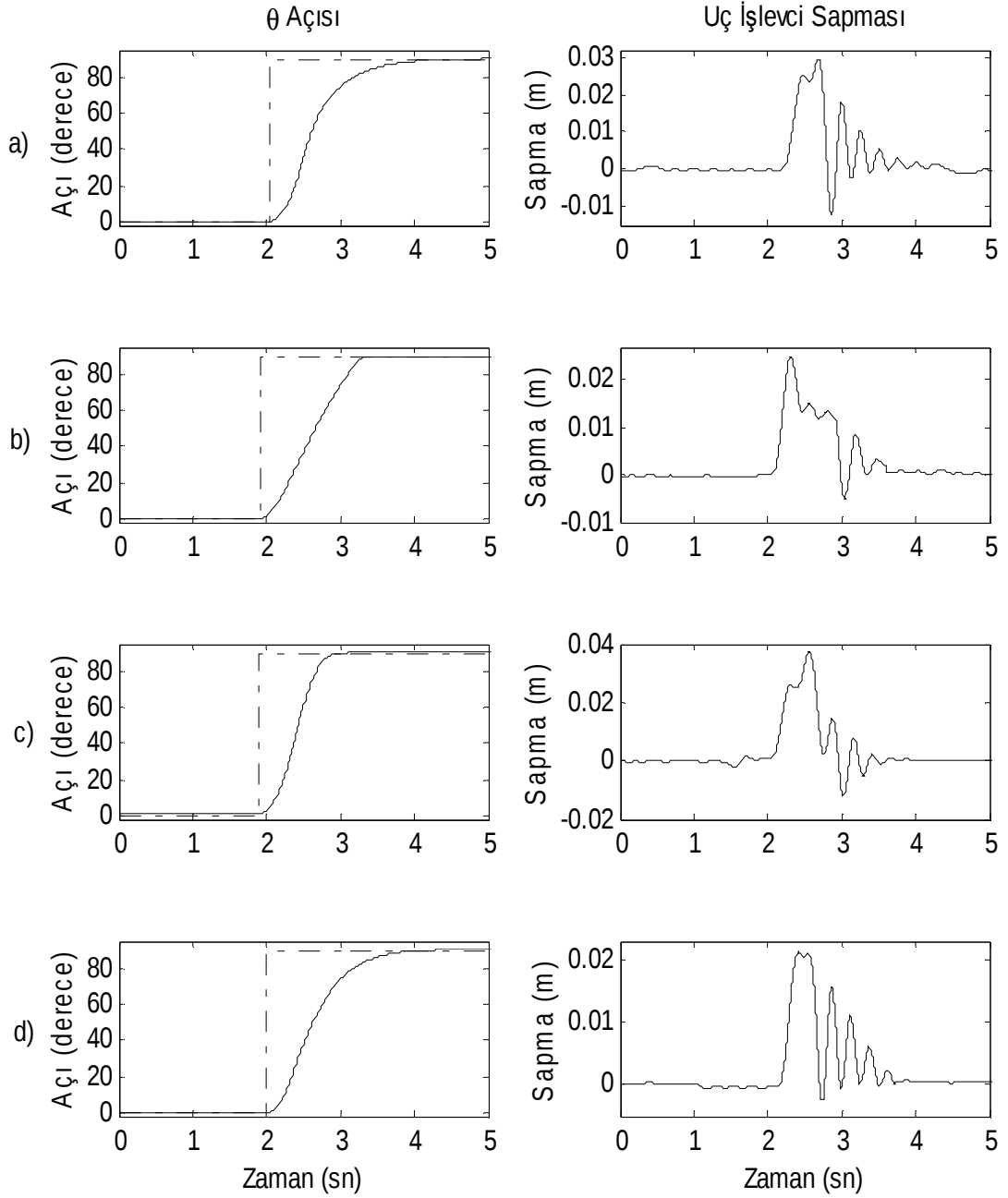
6.8.1. Geliştirilen kontrolörlerin birim basamak girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması

Bu kısımda esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen farklı kontrolörlerin birim basamak girişi yanıtlarına yer verilmiştir.

Bilindiği gibi esnek bağlı robot kolu tek girişi ve iki çıkışı olan bir sistemdir. Robot kolunun girişi motor voltajı v , çıkışları ise motor dönme açısı θ ve uç işlevci sapma miktarıdır δ . Şekil 6.60’ da görüleceği üzere robot koluna son değeri 90° olan birim basamak girişleri verilip elde edilen sistem çıkışları çizdirilmiştir.

Tablo 6. 27: Esnek bağlı robot kolunun farklı kontrolörler için birim basamak girişi deney sonuçları

Kullanılan Kontrolör	Oturma Zamanı (s)		Aşım Miktarı (%)	Oluşan Hatanın Tepe Değeri		Etkin Sapma Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	Kalıcı Durum Hatası	
	θ	δ	θ	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	$\frac{\sqrt{\sum(\delta e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(CS)^2}}{N}$	θ (derece)	δ (m)
PID Kontrolör	1.78	2.17	0	1.52	0.03	0.00060	0.0189	0.17	0
Bulanık Mantık Kontrolör	1.35	1.55	0	1.22	0.025	0.00005	0.0068	0.05	0
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.97	1.53	0	1.15	0.037	0.00066	0.0173	0.4	0
Kesir Dereceli PID Kontrolör	1.58	1.52	0	1.04	0.02	0.00042	0.0145	0.25	0



Şekil 6. 60: Esnek bağlı robot kolunun birim basamak girişi deneyleri
a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı
c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Tablo 6.27’ de esnek bağlı robot kolunun farklı kontrolörler için yapılan birim basamak deneylerinin deney sonuçları gösterilmektedir. Elde edilen deney sonuçlarından kolaylıkla görülmektedir ki, esnek bağa uygulanan birim basamak girişi sonrası, giriş olarak verilen 90°’ lik değere en hızlı ulaşan kontrolör durum geri beslemeli kontrolördür. Ancak robot kolunun kontrolünde kullanılan kesir dereceli

PID kontrolörde verilen değere durum geri beslemeli kontrolör kadar hızlı oturmaktadır. Bunun yanında, durum geri beslemeli kontrolörle yapılan birim basamak girişi deneyinde, robot uç işlevcisi istenilen değere otururken, diğer kontrolörlerle yapılan deneylerden daha çok sapma oluşturmuş ve sonucunda istenilen değere oturmuştur. Durum geri beslemeli kontrolörle yapılan deneyde robot uç işlevcisinde en büyük 0.037 m sapma meydana gelmiştir. Kesir dereceli PID kontrolörle yapılan birim basamak fonksiyonu girişi deneylerinde ise, robot uç işlevcisinde, diğer kontrolörlerle yapılan deneylerdekine göre çok daha küçük sapmalar oluşmuştur. Kesir dereceli PID kontrolör, istenilen değere otururken, uç işlevcide en büyük 0.02 m sapma meydana gelmiş ve kısa bir sürede sönümlenerek uç işlevcideki titreşim sona erdirilmiştir. Esnek bağlı robot kolunun bulanık mantık kontrolörle yapılan birim basamak girişi deneyi Şekil 6.60 – b’ de gösterilmektedir. Görüleceği üzere, robot kolunun uç işlevcisinin oturma zamanı 2.2 saniye ve θ açısının oturma zamanı ise 1.35 saniye olarak elde edilmiştir. Ayrıca, bulanık mantık kontrolör uç işlevci sapmasında oluşan hataların büyüklüğü anlamında en az kesir dereceli PID kontrolör kadar başarılı sonuçlar üretmektedir. Dikkat edilirse, bulanık mantık kontrolör ile yapılan deneyde uç işlevcisinde oluşan hata değeri, kesir dereceli PID kontrolördekine göre sadece 0.005 m daha fazladır. Bu sonuçla beraber, esnek bağlı robot kolu kontrolünde bulanık mantık kontrolörün de kesir dereceli PID kontrolör kadar hassas çalıştığı söylenebilmektedir.

Bunlara ek olarak, eğer esnek bağlı robot kolunun kontrolü için geliştirilen kontrolörleri genel bir değerlendirmeye tabi tutmak istersek, birkaç tane kriter belirleyip, maliyet fonksiyonları oluşturarak kontrolörler arasında hangisinin en iyi kontrolör olduğu konusunda fikir edinebiliriz. Burada kriter olarak, θ açısının oturma zamanını ve uç işlevcinin etkin sapma değerini alabiliriz. Uç işlevcinin etkin sapma değeri,

$$\text{Etkin değer} = \sqrt{\sum (xe)^2 / N} \quad (6.5)$$

Denklem 6.4’ de gösterilen formül ile hesaplanmış ve Tablo 6.27’ de gösterilmiştir. Burada, N toplanan veri sayısını, xe ise hata değerini göstermektedir. Burada maliyet

fonksiyonu oluşturulurken belirlenen kriterlerin normalize edilmesi gerekmektedir. Normalizasyon işlemi, kontrolör cevapları arasında bulunan herhangi bir kriterde en büyük olan cevap baz alınarak diğer cevapların bu en büyük olana bölünmesi ile yapılmaktadır. Bu şekilde yapılan normalizasyon işlemi sonrasında belirlenen kriterler olan motor dönme açısının oturma zamanları ve uç işlevci etkin sapma değerleri Tablo 6.28’ de verilmiştir.

Tablo 6. 28: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Birim basamak cevabı)

Kullanılan Kontrolör	θ Açısı Oturma Zamanı	Etkin Sapma Değeri
PID Kontrolör	1	0.9090
Bulanık Mantık Kontrolör	0.7584	0.0757
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.5449	1
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.8876	0.6363

Tablo 6.28’ de görüldüğü gibi belirlenen kriterlerin normalizasyonu yapıldıktan sonra maliyet fonksiyonları üç farklı şekilde oluşturulmuştur. Ayrıca, bütün kontrolörler birim basamak cevabında herhangi bir aşma meydana getirmediği için bu kriter maliyet fonksiyonu hesabına katılmamıştır.

$$ML_1 = 0.3(ST\theta) + 0.7(RMS\delta e) \quad (6. 6)$$

$$ML_2 = 0.5(ST\theta) + 0.5(RMS\delta e) \quad (6. 7)$$

$$ML_3 = 0.7(ST\theta) + 0.3(RMS\delta e) \quad (6. 8)$$

Denklem 6.6 – 6.8’ de oluşturulan maliyet fonksiyonları gösterilmiştir. Burada, $ST\theta$, motor dönme açısının oturma zamanını, $RMS\delta e$ ise etkin sapma değerini simgelemektedir. Denklemlerde görüleceği üzere, ML_1 ’ de uç işlevcinin etkin sapma miktarı, ML_3 ’ de motor dönme açısının oturma zamanı göz önünde tutulmuş ve ML_2 ’ de ise bu iki kriter aynı oranda baskın olarak hesaba katılmıştır. Geliştirilen

kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları için ürettikleri sonuçlar Tablo 6.29’ verilmiştir.

Tablo 6. 29: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Birim basamak cevabı)

Kullanılan Kontrolör	ML_1	ML_2	ML_3
Bulanık Mantık Kontrolör	0.2805	0.4170	0.5536
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.7117	0.7619	0.8122
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.8635	0.7725	0.6814
PID Kontrolör	0.9363	0.9545	0.9727

Oluşturulan maliyet fonksiyonlarına göre, geliştirilen kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolörler, oluşturulan bütün maliyet fonksiyonlarında daha iyi sonuçlar üretmişlerdir. Söz konusu iki kriterde aynı derecede baskın olur ise bulanık mantık kontrolör, en iyi sonuçları üretmiştir. Buna göre kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolörün esnek bağlı robot kolu kontrolündeki en iyi kontrolörler olduğu söylenebilmektedir.

Bunların dışında, geliştirilen kontrolörlerden kesir dereceli PID kontrolör ile PID kontrolörü birim basamak girişi deneyi için karşılaştıracak olur isek, PID kontrolörün, toplam oturma zamanının, kesir dereceli PID kontrolörün oturma zamanına göre 0.59 saniye daha fazla olduğu görülmektedir. PID kontrolörle yapılan birim basamak girişi deneyinde, uç işlevcide meydana gelen sapma miktarının, kesir dereceli PID kontrolörünkine göre 0.01 m daha fazla olarak elde edilmiştir. Geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün yaklaşık transfer fonksiyonuna göre elde edilen bode diyagramları bölüm 6.7.1’ de yer almaktadır. PID kontrolörün ise PID parametrelerine göre elde edilen transfer fonksiyonlarının bode diyagramları ekte yer almaktadır. Eğer bu iki kontrolör için elde edilen bode diyagramlarına bakılarak bir yorum yapmak gerekirse, kesir dereceli PID kontrolörün yüksek ve düşük

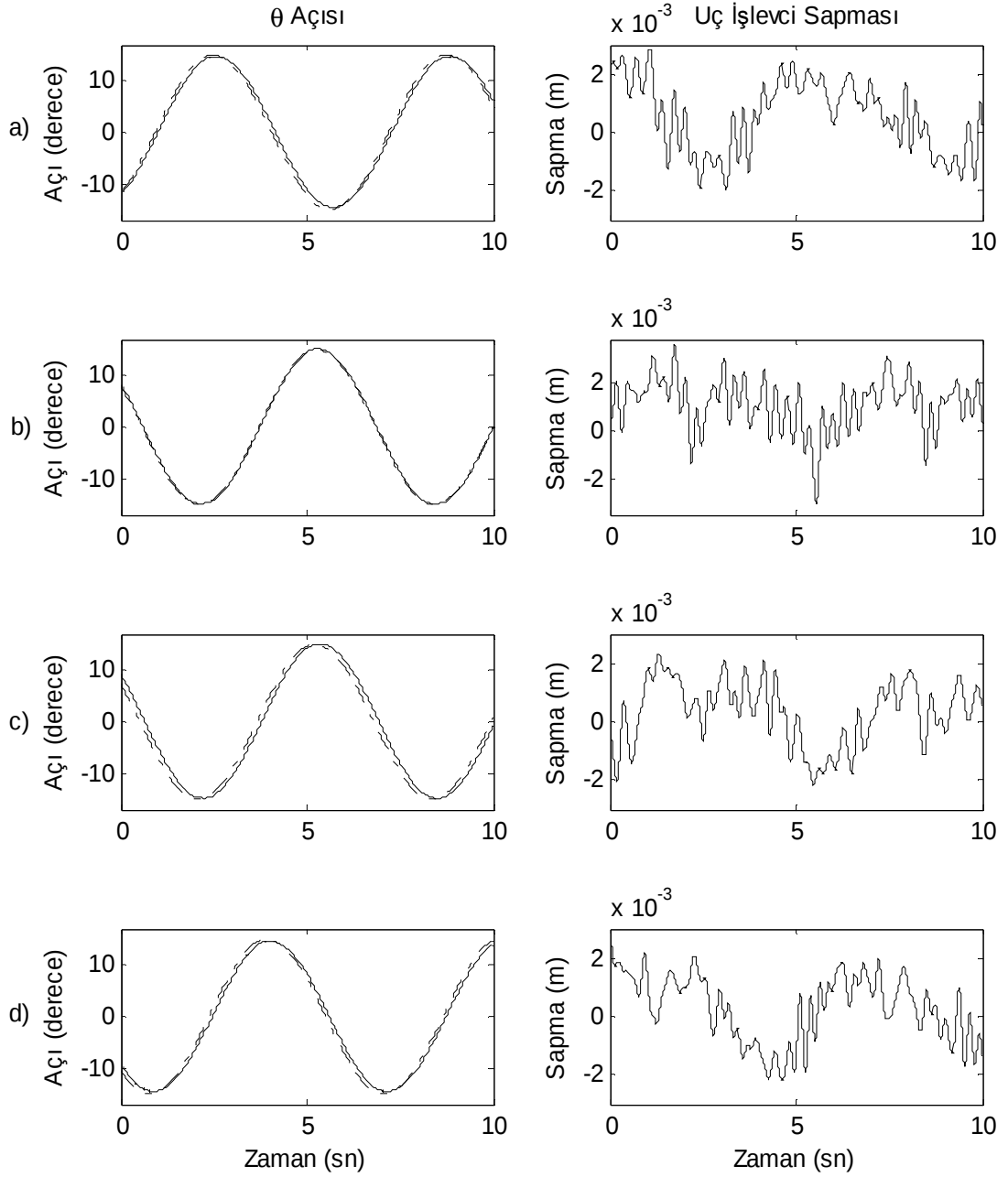
frekanslarda PID kontrolöre göre daha iyi cevaplar üreteceği kolaylıkla söylenebilmektedir. Bunun yanında her iki kontrolörde 10^{-1} ve 10^1 frekansları aralığında benzer çalışabilmektedir. Ancak, esnek bağlı robot kolu sistemine uygulanan birim basamak fonksiyonu çok yüksek ve çok düşük frekans aralıklarını içerdiği için geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörün, PID kontrolöre göre daha iyi bir sonuç üretmesi beklenen bir durumdur.

Bunlara ek olarak, kullanılan bütün kontrolörler için yapılan birim basamak fonksiyonu deneyinde, geliştirilen bütün kontrolörler motor dönme açısında herhangi bir aşmaya sebebiyet vermemişlerdir ve oldukça kararlı bir şekilde istenilen değere belirli bir kalıcı durum hatasıyla oturmuşlardır. Kontrolörlerin kalıcı durum hataları açısından karşılaştıracak olur isek, en çok kalıcı durum hatası durum geri beslemeli kontrolörde, en az kalıcı durum hatası ise bulanık mantık kontrolörde meydana gelmiştir. Fakat motora bağlı olan planet dişli sisteminin yüksüz durumdaki ortalama diş boşluğunun 0.5 derece olduğu göz önünde bulundurulduğunda, birim basamak girişi sonrası motor dönme açısında oluşan kalıcı durum hatalarının, söz konusu diş boşluğundan oldukça küçük hatalar oldukları görülmektedir.

6.8.2. Geliştirilen kontrolörlerin sinüzoidal yörünge girişi deneyleri ve sonuçların karşılaştırılması

Bu başlık altında, esnek bağlı robot kolunun, geliştirilen bütün kontrolörler için yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneylerine yer verilmiştir.

Bilindiği gibi robot kolunun çıkışları olan uç işlevcinin sapma miktarı δ , ve motor dönme açısıdır θ . Robota uygulanan 15 derece genlikli ve 1 rad/s frekansa sahip referans sinyal için robot kolunun kullanılan bütün kontrolörler için çıkışları Şekil 6.61’ de gösterilmektedir. Yapılan deneyler için elde edilen deney sonuçları ise, Tablo 6.30’ da verilmiştir.



Şekil 6. 61: Esnek bağı robot kolunun sinüzoidal yörünge deneyleri
a) PID kontrolör cevabı b) Bulanık mantık kontrolör cevabı
c) Durum geri beslemeli kontrolör cevabı d) Kesir dereceli PID kontrolör cevabı

Tablo 6.30' da elde edilen deney sonuçlarına göre, verilen referans yörüngeyi takibi sırasında uç işlevcide meydana gelen sapma miktarı en az, kesir dereceli PID kontrolörde, en çok, bulanık mantık kontrolörde meydana gelmiştir. Ancak kullanılan bütün kontrolörlerle yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde esnek bağın uç işlevcisinde meydana gelen sapma miktarı 0.0035 metreyi geçmemiştir. Uç

işlevci sapması geliştirilen kesir dereceli PID kontrolörde en büyük 0.0019 m, bulanık mantık kontrolörde ise en büyük 0.0032 m olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlarla beraber esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi sırasında, kullanılan bütün kontrolörlerin uç işlevci sapmasında yüksek hassasiyet elde ettikleri söylenebilmektedir.

Tablo 6. 30: Esnek bağlı robot kolunun farklı kontrolörler için sinüzoidal yörünge takibi deney sonuçları

Kullanılan Kontrolör	Oluşan Hatanın Tepe Değeri			Etkin Sapma Miktarı	Etkin θ_e Değeri	Etkin Kontrol Sinyali Değeri	θ Açısında Oluşan Faz Farkı (s)
	$\ddot{\alpha}$ (m/s ²)	δ (m)	θ (derece)	$\frac{\sqrt{\sum(\delta e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(\theta e)^2}}{N}$	$\frac{\sqrt{\sum(CS)^2}}{N}$	
PID Kontrolör	0.5	0.0025	1.3	0.000133	0.0107	0.0048	0.07
Bulanık Mantık Kontrolör	0.43	0.0032	0.44	0.000107	0.0028	0.0035	0.03
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.19	0.0023	1.7	0.000124	0.0140	0.0051	0.1
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.62	0.0019	1.1	0.000113	0.0097	0.0042	0.08

Tabloda görüldüğü üzere, 15 derece genlik ve 1 rad/sn frekansa sahip sinüzoidal yörünge takibi sırasında, kullanılan kontrolöre göre motor dönme açısında farklı genliklerde hatalar meydana gelmektedir. Motor dönme açısında en az hata bulanık mantık kontrolörle, en fazla hata ise durum geri beslemeli kontrolörle elde edilmiştir. Geliştirilen bulanık mantık kontrolörle yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneyinde, motor dönme açısında 0.44 derece, durum geri beslemeli kontrolörle yapılan yörünge takibi deneyinde ise 1.7 derece hata oluşmuştur. Tabloda

görüldüğü üzere esnek bağlı robot kolu kontrolü için tasarlanan bütün kontrolörler için, motor dönme açısında en fazla 1.7 derece hata oluşmuştur. Ve bu, geliştirilen kontrolörlerin oldukça iyi sonuçlarla referans yörüngeyi takip edebilmesi anlamına gelmektedir. Kullanılan kontrolörler istenilen referans yörüngeyi takip ederken belirli bir faz farkı ile takip etmektedir. Görüleceği üzere, robot kolunun istenilen referans yörüngeyi takip ederken oluşturduğu faz farkı motor dönme açısında hatalara sebep olmaktadır ve en fazla faz farkı olan sistemde en fazla hata oluşmaktadır.

Bunların dışında, esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi deneyinde kullanılan bütün kontrolörlerin genel bir karşılaştırmasını yapmak için, robotun yörünge takibi sırasında elde edilen çıkışları olan titreşim miktarı ve θe değeri değerlendirme kriterleri olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu kriterler, Denklem 6.5' e göre düzenlenip etkin değerleri elde edilmiştir. Tablo 6.29' da, etkin sapma miktarı ve etkin θe değeri gösterilmiştir. Bütün kontrolörlerin karşılaştırılabilmesi için, belirlenen kriterlerin daha önce anlatıldığı gibi normalizasyon işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Tablo 6.31' de, belirlenen kriterlerin normalize edilmiş değerleri gösterilmiştir.

Tablo 6. 31: Değerlendirme kriterlerinin normalizasyon değerleri (Sinüzoidal yörünge takibi)

Kullanılan Kontrolör	Etkin θe Değeri	Etkin Sapma Değeri
PID Kontrolör	0.7642	1
Bulanık Mantık Kontrolör	0.2	0.8045
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	1	0.9323
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.6928	0.8496

Belirlenen değerlendirme kriterlerinin tabloda görüldüğü gibi elde edilmesinde sonra, bu kriterler için üç farklı maliyet fonksiyonları oluşturulmuştur.

$$ML_4 = 0.3(RMS\theta e) + 0.7(RMS\delta e) \quad (6.9)$$

$$ML_5 = 0.5(RMS\theta_e) + 0.5(RMS\delta_e) \quad (6.10)$$

$$ML_6 = 0.7(RMS\theta_e) + 0.3(RMS\delta_e) \quad (6.11)$$

Denklem 6.9 – 6.11’ de kontrolörlerin karşılaştırılması için oluşturulan maliyet fonksiyonları gösterilmiştir. Burada, $RMS\theta_e$, motor dönme açısı hatasının etkin değerini, $RMS\delta_e$ ise etkin sapma değerini ifade etmektedir. Denklemlerde görüleceği üzere, ML_4 ’ de uç işlevcinin etkin sapma miktarı, ML_6 ’ da etkin motor dönme açısı hatası daha fazla oranda hesaba katılmıştır. ML_2 ’ de ise bu iki kriter aynı oranda baskın olarak hesaba katılmıştır. Esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde kullanılan kontrolörlerin oluşturulan maliyet fonksiyonları sonucunda ürettikleri sonuçlar Tablo 6.32’ de gösterilmiştir.

Tablo 6. 32: Kullanılan kontrolörlerin belirlenen maliyet fonksiyonları ve kriterler için ürettiği sonuçlar (Sinüzoidal yörünge takibi)

Kullanılan Kontrolör	ML_4	ML_5	ML_6
Bulanık Mantık Kontrolör	0.6231	0.5022	0.3813
Kesir Dereceli PID Kontrolör	0.8026	0.7712	0.7398
PID Kontrolör	0.9293	0.8821	0.8349
Durum Geri Beslemeli Kontrolör	0.9526	0.9662	0.9797

Tablo 6.32’ de görüldüğü üzere, esnek bağlı robot kolunun sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde, oluşturulan maliyet fonksiyonlarının hepsi için bulanık mantık kontrolör en iyi sonuçları üretmiştir. Bulanık mantık kontrolörden sonra en iyi sonuçları üreten kontrolör ise kesir dereceli PID kontrolör olmuştur. Ayrıca geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör, durum kazançlarının doğrusal karesel düzenleyici (LQR) yöntemiyle elde edilmemesinden ötürü bulanık mantık ve kesir dereceli PID kontrolörler kadar iyi sonuçlar üretememiştir. Geliştirilen PID kontrolör ise oluşturulan maliyet fonksiyonları için diğer kontrolörler arasında en kötü

cevapları üreten kontrolör olmasına rağmen, Şekil 6.61' e bakıldığında sinüzoidal yörünge takibinde ürettiği cevapların yeterli düzeyde olduğu görülmektedir.

Yapılan sinüzoidal yöünge takibi deney sonuçlarından görüleceği üzere, esnek bağı robot kolunun uç işlevcisinin saptması ve motor dönme açısında oluşan hatalar göz önüne alındığında kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolör sinüzoidal yörünge takibi deneylerinde diğer kontrolörlere göre üstünlük kurmaktadırlar. Kesir dereceli PID kontrolörün geniş frekans aralığı ve bulanık mantık kontrolörün doğrusal olmayan yapıdaki sistemleri kontrol etme kabiliyeti sayesinde söz konusu kontrolörlerin diğerlerine göre üstünlük kurmaları beklenen bir sonuçtur. Geliştirilen PID ve durum geri beslemeli kontrolörler ise yapılan sinüzoidal yörünge takibi deneyinde, herhangi bir sistem çıkışının daha üstün olarak kontrol edilmesi anlamında diğer kontrolörlere göre üstünlük kuramamalarına rağmen istenilen referans yörüngeyi oldukça iyi sonuçlarla takip edebilmektedirler.

Bu bölümde, esnek bağı robot kolu kontrolü için geliştirilen bütün kontrolörlerle, konum kontrolü, yörünge takibi deneyleri yapılmış olup, geliştirilen kontrolörlerin kararlılıklarını kontrol edebilmek amacıyla robot koluna dürtü girişi ve bozucu darbe girişleri verilmiştir. Yapılan bütün deneylerin sonuçlarına bakılarak ve mekanizmadaki doğrusal olmayan sürtünmeler, planet dişli sistemindeki diş boşlukları ve esnek bağı doğrusal olmayan yapısı göz önünde tutulduğunda, geliştirilen bütün kontrolörlerin robot kolunu istenilen konuma belirli hızlarda ve belirli hassasiyetlerde getirdiği, verilen referans yörüngeleri belirli hatalarla izledikleri ve kararlı yapılarını bozmayarak başarılı sonuçlar elde ettiklerini kolaylıkla söyleyebiliriz.

Ancak, bu kontrolörler arasında, geniş frekans aralıklarında çalışma özelliği bulunan kesir dereceli PID ve doğrusal olmayan bir yapıya sahip olan bulanık mantık kontrolörle yapılan deneylerde diğer kontrolörlere göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen durum geri beslemeli kontrolör doğrusal yapısı ve durum kazançlarının deneme yanılma yoluyla elde edilmiş olup, bu katsayıları iyileştirmedeki optimizasyon eksiklikleri nedeniyle bu kontrolör ile yüksek

hassasiyete ulaşamamıştır ancak verilen referanslara yüksek hızlarla ulaşılabilir. Yine doğrusal bir kontrolör olan PID kontrolör ise oldukça iyi sonuçlar üretmesine rağmen, PID parametrelerinin deneme yanılma metoduyla elde edilmesindeki eksiklikler nedeniyle, doğrusal olmayan bir sistem olan esnek bağlı robot kolunun kontrolünde belirli bir hassasiyet ve hız seviyesinde kalmış, kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolör kadar başarılı olamamıştır.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, günümüzün önemli kontrol problemleri arasında bulunan robot kollarındaki esneklik ve titreşim sönümlemesi konusu incelenmiştir. Söz konusu konuların incelenebilmesi amacıyla, esnek eklemli ve esnek bağlı robot kollarının öncelikle katı modelleri bilgisayar ortamında tasarlanmış ve daha sonra bahsedilen robot kolları üretilerek, laboratuvar test düzenekleri oluşturulmuştur.

Basit olarak, esnek eklemli robot kolu, rijit bir eklemin iki tarafından yaylar yardımıyla döner bir tablaya bağlanmasıyla, esnek bağlı robot kolu ise, çok esnek bir çubuğun döner bir tabla üzerine montaj edilmesiyle oluşturulmuştur. Her iki robot kolunda da amaç robot uç işlevcisinin küçük hareketler karşısında büyük sapmalar ve esnemeler meydana getirmesini sağlamaktır. Böylelikle tek eklemli robot kolunun iki farklı şekilde eklem esnekliği artırılmış modelleri oluşturulmuştur. Çalışmanın amacı ise, bahsedildiği gibi esnekliği fazla olan robot kolunun uç işlevcisinin, verilen referans sinyalleri yüksek hassasiyetle takip edebilmesini sağlamak ve uç işlevcide oluşan titreşimleri aktif olarak sönümlemektir.

Laboratuvar test düzenekleri oluşturulan, esnek eklemli ve esnek bağlı robot kolları matematiksel olarak modellenip, enerji tabanlı Lagrangian yöntemiyle robot kollarının hareket denklemleri elde edilmiştir. Ayrıca esnek eklemli robot kolunun, yay sabitleri değiştirilerek robot kolunun eklem esnekliği kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Robot kollarının eklem esnekliğinin değiştirilebilmesi kontrolör performansını test etmek açısından oldukça önemlidir.

Esnek eklemli ve esnek bağlı robot kollarının kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla, PID, bulanık mantık, durum geri besleme ve kesir dereceli PID kontrol yöntemleri incelenmiştir ve uygulanmıştır. Bahsedilen kontrol yöntemleri Matlab/Simulink

ortamında geliştirilip, bu ortamla uyumlu çalışabilen dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla robot koluna uygulanmıştır.

Esnek eklemlili ve esnek bağı robot kolları için tasarlanan kontrolörlerin test edebilmek amacıyla birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler genel olarak üç ana başlık altında incelenmiştir. Bunlar; konum kontrolü deneyleri, yörünge takibi kontrolü deneyleri ve kontrolörün kararlılığını ve gürbüzlüğünü test edebilmek için yapılan deneylerdir. Konum kontrolü deneylerinde, robotlara birim basamak fonksiyonu uygulanarak robotların uygulanan referansa giderken oluşturdukları sistem çıkışları incelenmiştir. Yörünge takibi deneylerinde, üç ana referans yörünge kullanılmıştır. Bunlar; sinüzoidal yörünge, kane fonksiyonu yörüngesi ve üstel fonksiyon yörüngesidir. Yörünge takibi deneylerinde, robotların uygulanan referans yörüngeyi ne derecede takip ettikleri ve bu esnada oluşan hatalar incelenmiştir. Esnek eklemlili ve esnek bağı robot kolları için tasarlanan kontrolörlerin gürbüzlük ve kararlılık testlerini yapmak amacıyla robot kollarına dürtü fonksiyonu ve bozucu darbe girişleri uygulanıp robot kolların davranışları incelenmiştir.

Esnek eklemlili robot kolu kontrolü için geliştirilen kontrolörlerle yapılan deneyler, robot kolunun model parametreleri olan eklem uzunluğu, yay sabiti değiştirilerek tekrarlanmış ve geliştirilen kontrolörlerin model parametreleri değiştirildiğinde verdiği cevaplar incelenmiştir. Daha öncede anlatıldığı gibi esnek eklemlili robot kolunda eklem uzunluğunu arttırmak ve yay sabitini azaltmak, eklemin salınım frekansını ve rijitliğini azaltmaktadır. Bunun tam tersi yapılır ise, robot ekleminin salınım frekansı ve rijitliği artmaktadır. Geliştirilen kontrolörlerin performansının, eklemin rijitliğine bağı olarak büyük ölçüde değiştiği yapılan deneylerde görülmüştür. Beklenildiği gibi esnek eklemin rijitliği azalırsa geliştirilen kontrolörün performansı azalmakta, rijitlik arttırılırsa kontrol performansı artmaktadır. Burada kontrolörün kontrol performansından kasıt, sistemin oturma zamanı, kalıcı durum hatası, uç işlevcide oluşan titreşimler ve sistemin faz farkıdır.

Esnek eklemlili robot kolunda, eklem uzunluğunu ve yay sabitini değiştirerek oluşturulan deney düzenekleri için kontrolörler ayrı ayrı denenmişlerdir. Yapılan

deneylerde elde edilen bütün sonuçlar değerlendirilecek olur ise, yüksek ve düşük frekanslardaki kontrol kabiliyeti nedeniyle, geliştirilen kesir dereceli PID kontrolör ve çeşitli kural tabanları, farklı aralıklardaki üyelik fonksiyonları ve doğrusal olmayan yapısı sayesinde, geliştirilen bulanık mantık kontrolör, esnek eklemli robot kolu kontrolü için en iyi sonuçları üretmişlerdir. Ancak, esnek eklemli robot kolu mekanizmasının doğrusal olmayan yapısı, mekanizmada oluşan doğrusal olmayan sürtünmeler, planet dişlideki diş boşlukları düşünüldüğünde, geliştirilen doğrusal yapıdaki PID ve durum geri beslemeli kontrolörlerde, kontrolör parametrelerinin deneme yanılma metoduyla elde edilmelerine ve bu parametrelerdeki optimizasyon eksikliklerine rağmen, oldukça iyi sonuçlar üretmişlerdir. Bunlara ek olarak, esnek eklemli robot kolu kontrolü için geliştirilen kontrolörler arasında, model parametrelerinin değiştirilmesiyle yapılan deneylerde, kesir dereceli PID ve bulanık mantık kontrolörler oldukça gürbüz bir yapıya sahip olduklarını ispatlamışlardır.

Esnek eklemli robot kolu için yapılan deneyler, esnek bağlı robot kolu için de uygulanmış olup, esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen kontrolörler de bu farklı deneylerin yapılmasıyla test edilmişlerdir. Esnek eklemli robot kolunda olduğu gibi, esnek bağlı robot kolu için geliştirilen kontrolörler arasında en iyi sonuçlar, bulanık mantık ve kesir dereceli PID kontrolörler ile elde edilmiştir. Bu iki kontrolör, her iki robot kolu için, uç işlevicide ve motor dönme açısından en az hata ile verilen referansı başarıyla takip etmişlerdir. Esnek bağlı robot kolu kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli ve PID kontrolör de oldukça başarılı sonuçlar elde etmelerine rağmen, robot uç işlevcisinde oluşan hataları bulanık mantık ve kesir dereceli PID kontrolörde olduğu kadar sönümleyememişlerdir.

Bu tez çalışmasında, bulanık mantık kontrolörün üyelik fonksiyonları, üyelik fonksiyonlarının aralıkları ve kural tabloları, kesir dereceli PID, durum geri beslemeli ve PID kontrolörlerin kontrolör kat sayıları deneme yanılma yöntemiyle elde edilmiş olup, defalarca yapılan deneylerle optimize edilmiştir. Ancak elde edilen bu kontrolör parametrelerinin geliştirilen kontrolörler için en uygun parametreler oldukları tam olarak söylenememektedir. Deneme yanılma yöntemleriyle elde edilen

parametreler için robot kollarının oluşturdıkları sonuçlar ilgili başlıklar altında verildiği gibidir ve sonuçlar birbirleri aralarında karşılaştırılarak yorumlanmışlardır.

En uygun kontrol parametrelerinin bulunabilmesi için yapılması gerekenler şu şekilde özetlenebilir. Esnek eklemlili ve esnek bağı robot kollarının matematiksel modellerinin bilgisayar ortamında oluşturulması ve gerçek robot kolu modelleriyle doğrulanmaları gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi için gerçek robot kollarına çeşitli girişler verilerek birçok deney yapılmalıdır. Elde edilen sistem çıkışları, bilgisayardaki robot modelinin çıkışları ile karşılaştırılarak çeşitli model doğrulama algoritmaları yardımıyla doğrulanmalıdır. Bahsedilen model doğrulama işlemi yapıldıktan sonra çeşitli optimizasyon teknikleri ile kontrolör parametreleri gerçek modele en uygun olacak şekilde elde edilebilir.

Daha önce de bahsedildiği üzere, esnek eklemlili ve esnek bağı robot kollarının kontrolü için geliştirilen durum geri beslemeli kontrolörlerin kontrol parametreleri deneme yanılma yöntemiyle bulunmuş olup, kontrol performansı açısından belirli bir seviyede kalmışlardır. Doğrulanmış robot kolu modelleri sayesinde durum geri beslemeli kontrolörlerin durum kazançları doğrusal karesel düzenleyici yardımıyla elde edilip, esnek yapı robot kolu kontrolü için daha iyi bir kontrol performansı üretmeleri sağlanabilir. Aynı şekilde, bulanık mantık kontrolörlerin üyelik fonksiyonları optimize edilebilir.

Bunların dışında, esnek eklemlili ve esnek bağı robotların kontrolü için geliştirilen kontrolörlerin performanslarını arttırmak için dişleri arasında boşluk bulunmayan dişli sistemleri veya harmonik sürücüler kullanılabilir.

Ayrıca bu tez çalışması kapsamında geliştirilen, esnek eklemlili ve esnek bağı robot kolu sistemleri, lisans, lisansüstü öğrencileri ve araştırmacıların esnek yapı robot kolu kontrolü konusunda yeni teknikleri inceleyebilmeleri, araştırabilmeleri ve uygulayabilmeleri için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Li, J., “Dynamic Modeling and Control of Rigid and Flexible Robot Manipulators”, Doktora Tezi, **College of Engineering at the University of Central Florida**, Orlando, Florida, (1997).
- [2] Meirovitch, L., “Dynamics and Control of Structures”, **Wiley**, (1990).
- [3] Dado, M., H., F., Soni, A., H., “Dynamic response analysis of 2-R robot with flexible joints”, **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 4**, 479–483, (1987).
- [4] Queiroz, M., S., Donepudi, S., Burg, T., Dawson, D., M., “Model-based control of rigid-link flexible joint robots: an experimental evaluation”, **Robotica**, 16, 11–21, (1998).
- [5] Spong, M., W., “Modeling and control of elastic joints robots”, **ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, 109, 310–319, (1987).
- [6] Yang, G., B., Donath, M., “Dynamic model of a one link robot manipulator with both structural and joint flexibility”, **Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 476–481, (1988).
- [7] Tzou, H., S., “Nonlinear structural dynamics of space manipulators with elastic joints”, **International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis**, 4, 117–123, (1989).
- [8] Tomei, P., “Tracking control of flexible joint robots with uncertain parameters and disturbances”, **IEEE Transactions on Automatic Control**, 39, 1067–1072, (1994).
- [9] Yue, S., G., Yu, Y., Q., Bai, S., X., “Flexible rotor beam element for robot manipulators with link and joint flexibility”, **Mechanism and Machine Theory**, 32 (2), 209–219, (1997).
- [10] Farid, M., Lukaiewicz, S., A., “Dynamic modeling of spatial manipulators with flexible links and joints”, **Computers and Structures**, 75, 419–437, (2000).
- [11] Li, D., Zu, J., W., Goldenberg, A., A., “Dynamic modeling and mode analysis of flexible-link, flexible-joint robot”, **Mechanism and Machine Theory**, 33 (7), 1031–1044, (1998).

- [12] Bahrami, M., Rahi, A., “Tip dynamic response of elastic joint manipulators subjected to a stochastic base excitation”, *JSME International Journal Series C*, 46 (4), 1502–1508, (2003).
- [13] Korayem, M., H., Basu, A., “Dynamic load carrying capacity of mobile-base flexible joint manipulators”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25 (1–2), 62–70, (2005).
- [14] Zhang, D., G., Angeles, J., “Impact dynamics of flexible joint robots”, *Journal of Computer and Structures*, 83, 25-33, (2005).
- [15] Akhtaruzzaman, M., Akmeliawati, R., Wai Yee, T., “Modeling and Control of a Multi Degree of Freedom Flexible Joint Manipulator”, *Second International Conference on Computer and Electrical Engineering ICCEE*, 249- 254, (2009).
- [16] Rafieian, F., Liu, Z., Hazel, B., “Dynamic model and modal testing for vibration analysis of robotic grinding process with a 6DOF flexible-joint manipulator”, *International Conference on Mechatronics and Automation*, 2793- 2798, (2009).
- [17] Rotary Flexible Joint User Manual, *Quanser Incorporated*, Markham, Canada, (2008).
- [18] Cannon, R., H., Schmitz, E., “Initial experiments on end-point control of a flexible one-link robot”, *The International Journal of Robotics Research*, 3 (3), 62–75, (1984).
- [19] Bayo, E., “Timoshenko versus Bernoulli beam theories for the control of flexible robots”, *Proceeding of IASTED International Symposium on Applied Control and Identification*, 178–182, (1986).
- [20] Wang, P., K., C. , Wei, J., D., “Vibration in a moving flexible robot arm”, *Journal of Sound and Vibration*, 116 (1), 149–160, (1987).
- [21] Tomei, P., Tornambe, A., “Approximate modeling of robots having elastic links”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 18 (5), 831–840, (1988).
- [22] Krishnamurthy, K., “Dynamic modelling of a flexible cylindrical manipulator”, *Journal of Sound and Vibration*, 132, 143–154, (1989).
- [23] Bellezza, F., Lanari, L., Ulivi, G., “Exact modeling of the flexible slewing link”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 734–739, (1990).

- [24] Tadikonda, S., S., K., Baruh, H., “Dynamics and control of a translating flexible beam with a prismatic joint”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 114, 422–427, (1992).
- [25] Ravichandran, T., Pang, G., Wang, D., “Robust h-infinity optimal control of a single flexible link”, *Control Theory and Advanced Technology*, 9 (4), 887–908, (1993).
- [26] Jnifene, A., Fahim, A., “A computed torque/time delay approach to the end-point control of a one-link flexible manipulator”, *Dynamics and Control*, 7 (2), 171–189, (1997).
- [27] Karray, F., Tafazolli, S., Guealeb, W., “Robust tracking of lightweight manipulator systems”, *Nonlinear Dynamics*, 20 (2), 169–179, (1999).
- [28] Wedding, D., K., Eltimsahy, A., “Flexible link control using multiple forward paths, multiple rbf neural networks in a direct control application”, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 4, 2619–2624, (2000).
- [29] Nagaraj, B., P., Nataraju, B., S., Chandrasekhar, D., N., “Nondimensional parameters for the dynamics of a single flexible link”, *International Conference on Theoretical, Applied, Computational and Experimental Mechanics (ICTACEM)*, Kharagpur, India, (2001)
- [30] Martins, J., Botto, M., A., Sa da Costa, J., “Modeling flexible beams for robotic manipulators”, *Multibody System Dynamics*, 7 (1), 79–100, (2002).
- [31] Martins, J., M., Mohamed, Z., Tokhi, M., O., Sa da Costa, J., Botto, M., A., “Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator systems”, *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 150 (4), 401–411, (2003).
- [32] Tso, S., K., Yang, T., W., Xu, W., L., Sun, Z., Q., “Vibration control for a flexible link robot arm with deflection feedback”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 38, 51–62, (2003).
- [33] Dwivedy, S., K., Kar, R., C., “Nonlinear dynamics of a cantilever beam carrying an attached mass with 1:3:9 internal resonances”, *Nonlinear Dynamics*, 31 (1), 49–72, (2003).
- [34] Dwivedy, S., K., Kar, R., C., “Simultaneous combination and 1:3:5 internal resonances in a parametrically excited beam-mass system”, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 38 (4), 585–596, (2003).
- [35] Coleman, M., P., McSweeney, L., A., “Analysis and computation of the vibration spectrum of Cartesian flexible manipulator”, *Journal of Sound and Vibration*, 274 (1/2), 445–454, (2004).

- [36] Nagarajan, S., Turcic, D., A., “Lagrangian formulation of the equations of motion for the elastic mechanisms with mutual dependence between rigid body and elastic motions, Part 1: Element level equations, and Part II: System equations”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 112 (2), 203–214, ve 215–224, (1990).
- [37] Moulin, H., Bayo, E., “On the accuracy of end-point trajectory tracking for flexible arms by noncausal inverse dynamic solutions”, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 113, 320–324, (1991).
- [38] Theodore, R., J., Ghosal, A., “Comparison of the assumed modes and finite element models for flexible multi-link manipulators”, *The International Journal of Robotics Research*, 14 (2), 91–111, (1995).
- [39] Tokhi, M., O., Mohamed, Z., Shaheed, M., H., “Dynamic characterisation of a flexible manipulator system”, *Robotica*, 19, 571–580, (2001).
- [40] Martins, J., M., Mohamed, Z., Tokhi, M., O., Sa da Costa, J., Botto, M., A., “Approaches for dynamic modelling of flexible manipulator systems”, *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications*, 150 (4), 401–411, (2003).
- [41] Mohamed, Z., Tokhi, M., O., “Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator”, *Mechatronics*, 14, 69–90, (2004).
- [42] Khalil, W., Gautier, M., “Modeling of mechanical systems with lumped elasticity”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4, 3964–3969, (2000).
- [43] Nissing, D., “A vibration damped flexible robot: identification and parameter optimization”, *Proceedings of the American Control Conference*, 3, 1715–1719, (2000).
- [44] Raboud, D., W., Lipsett, A., W., Faulkner, M., G., Diep, J., “Stability evaluation of very flexible cantilever beams”, *International Journal of Nonlinear Mechanics*, 36, 1109–1122, (2001).
- [45] Megahed, S., M., Hamza, K., T., “Modeling and simulation of planar flexible link manipulators with rigid tip connections to revolute joints”, *Robotica*, 22, 285–300, (2004).
- [46] Merabet, A., Gu, J., “Robust nonlinear predictive control with modeling uncertainties and unknown disturbance for single-link flexible joint robot”, *7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 1516 - 1521, (2008).

- [47] Zain, B., A., M, Tokhi, M., O., Salleh, S., M., “Dynamic Modelling of a Single-Link Flexible Manipulator Using Parametric Techniques with Genetic Algorithms”, *Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation*, 373 - 378, (2009).
- [48] Ahmad, M., A., Zawawi, M., A., Mohamed, Z., “Effect of Beam's Length on the Dynamic Modelling of Flexible Manipulator System”, *11th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, 356 - 361 , (2009).
- [49] Basher, H., A., “Modeling and simulation of flexible robot manipulator with a prismatic joint”, *IEEE Proceedings SoutheastCon*, 255 - 260, (2007).
- [50] Heidari, H. R., Korayem, M., H., Haghpanahi, M., Feliu Batlle, V., “A new nonlinear finite element model for the dynamic modeling of flexible link manipulators undergoing large deflections”, *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 375 – 380, 2011.
- [51] Karkoub, M., A., “Modeling and m-synthesis robust control of flexible manipulators: An integrated approach”, Yüksek Lisans Tezi, *The Faculty of The Graduate School of The University of Minesota*, (1994)
- [52] Zhang G., Furusho J., “PID Controller Design for Flexible Joint Robots”, *Nihon Kikai Gakkai Undo to Shindo no Seigyo Shinpojiumu Koen Ronbunshu*, 6, 284-289, (1999)
- [53] Tzu Ho, M., Wei Tu, Y., “PID Controller Design for a Flexible-Link Manipulator”, *44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 6841-6846, (2005).
- [54] Akyuz I., H., Yolacan, E., Ertunc H., M., Bingul Z., “PID and State feedback control of single-link flexible joint robot manipulator”, *IEEE Conference on Mechatronics*, Istanbul, 409-414, (2011).
- [55] Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G., “State feedback controller for flexible joint robots: A globally stable approach implemented on DLR's light-weight robots, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2, 1087 – 1093, (2000).
- [56] Lim, S., Y., Hu, J., Dawson, D., M., Queiroz, M., “A partial state feedback controller for trajectory tracking of rigid-link flexible-joint robots using an observed backstepping approach”, *Proceedings of the American Control Conference*, 6, 4300 – 4304, (1995).
- [57] Cannon, R., H., Schmitz, E., Jr., “Initial experiments on the end-point control of a flexible one-link robot”. *International Journal of Robotics Research*, 3, 62-75, (1984).

- [58] Trautman, C., Wang, D., “Experimental control of a single flexible link with a shoulder joint”, ***IEEE International Conference On Robotic and Automation***, 1, 1235-1241, (1995).
- [59] Taloe, S., E., Kolhe, J., P., Phadke, S., B., “Extended-State-Observer-Based Control of Flexible-Joint System With Experimental Validation”, ***IEEE Transactions on Industrial Electronics***, 1411 – 1419, (2010).
- [60] Ahmad, M., A., Ismail, R., Ramli, M., S., Zawawi, M., A., Hambali, N., Abd Ghani, N., M., “Vibration control of flexible joint manipulator using input shaping with PD-type Fuzzy Logic Control, ***IEEE International Symposium on Industrial Electronics***, 1184 – 1189, (2009).
- [61] Farivar, F., Shoorehdeli, M., A., Nekoui, M., A., Teshnehlab, M., “Sliding Mode Control of Flexible Joint Using Gaussian Radial Basis Function Neural Networks”, ***International Conference on Computer and Electrical Engineering***, 856 – 860, (2008).
- [62] Orłowska-Kowalska, T., Szabat, K., “Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of a Drive System with Flexible Joint”, ***IEEE 32nd Annual Conference on Industrial Electronics***, 994 – 999, (2006).
- [63] Che-Min O., Jung-Shan L., “Nonlinear adaptive backstepping control design of flexible-joint robotic manipulators”, ***8th Asian Control Conference (ASCC)***, 1352 – 1357, (2011).
- [64] Khorasani, K., “Adaptive control of flexible-joint robots”, ***IEEE Transactions on Robotics and Automation***, 8, 250 - 267, (1992).
- [65] Seidi, M., Markazi, A., “Model-Based Fuzzy control of flexible joint manipulator: A LMI approach”, ***5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications***, 1 – 5, (2008).
- [66] Akyuz, I., H., Kizir, S., Bingul, Z., Fuzzy logic control of single-link flexible joint manipulator, ***IEEE Conference on Industrial Technology***, 306-311, Auburn/USA, (2011).
- [67] Zadeh, L., A., “Fuzzy Sets”, ***Information and Control***, 8, 338-353, (1965).
- [68] Karahan O., Kizir S., Bingül Z., “Yüksek Hassasiyetli Stewart Platformunun Kesir Dereceli PID Yöntemiyle Kontrolü ve Yörünge Takibi”, ***Türkiye Otomatik Kontrol Konferansı TOK’10***, 314-319, Gebze/Kocaeli, 21-23 Eylül (2010).
- [69] Oldham, K., B., Spanier, J., “The Fractional Calculus: Theory and Applications, Differentiation and Integration to Arbitrary Order”, ***Academic Press Inc.***, (1974).

- [70] Arijit, B., Swagatam, D., Ajith, A., Sambarta, D., “Design of Fractional-Order Controllers with An Improved Differential Evolution”, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 22, 343-350, (2009).
- [71] Oustaloup, A., “La Commande CRONE: Commande Robuste d’Ordre Non Entier”, **Herme`s**, Paris, 1991.
- [72] Ho, M.,T., Tu, Y., W., “Position control of a single-link flexible manipulator using H_∞-Based PID control Control Theory and Applications”, **IEEE Proceedings of Control Theory and Applications**, 615 - 622 , 26 Eylül (2006).
- [73] Zain, B., Tokhi, M., O., Toha, S., F., “PID-Based Control of a Single-Link Flexible Manipulator in Vertical Motion with Genetic Optimisation”, **Third UKSim European Symposium on Computer Modeling and Simulation**, 355 – 360, 25-27 Kasım (2009).
- [74] Atashzar, S., F., Talebi, H., A., Towhidkhah, F., “A robust feedback linearization approach for tracking control of flexible-link manipulators using an EKF disturbance estimator”, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 1791 – 1796, 4-7 Temmuz (2010).
- [75] Baroudi, M., Saad, M., Ghie, W., “State-feedback and Linear Quadratic regulator applied to a single-link flexible manipulator”, **IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)**, 1381 – 1386, 19-23 Aralık (2009).
- [76] Solihin, M., I., Wahyudi, Legowo, A., Akmeliawati, R., ”Comparison of LQR and PSO-based state feedback controller for tracking control of a flexible link manipulator”, **IEEE International Conference on Information Management and Engineering (ICIME)**, 2, 354 – 358, 16-18 Nisan (2010).
- [77] Zebin, T., Alam, M., S., “Dynamic modeling and fuzzy logic control of a two-link flexible manipulator using genetic optimization techniques”, **13th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)**, 418 – 423, 23-25 Aralık (2010).
- [78] Moudgal, V., G., Passino, K., M., Yurkovich, S., “Rule-based control for a flexible-link robot”, **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 92 – 405, Aralık (1994).
- [79] Nikpay, N., Aliyari Shoorehdeli, M., Teshnehlab, M., “Adaptive intelligent control of flexible link robot arm”, **8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics**, 653 – 658, 10-11 Eylül (2010).
- [80] Lih-Chang L., Ting-Wang Y., “Rigid model-based neural network control of flexible-link manipulators”, **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 595 – 602, Ağustos (1996).

- [81] Arisoy, A., Gokasan, M., Bogosyan, O., S., “Sliding Mode Based Position Control of a Flexible-Link Arm”, **12th International Power Electronics and Motion Control Conference**, 402 – 407, (2006).
- [82] Zhang, Y., Fenglin L., Fuchun, S., “Adaptive sliding mode control for one-link flexible manipulators with H_∞ tracking performance”, **Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation**, 6, 4971 – 4975, 15-19 Temmuz (2004).

EKLER

EK-A

FAULHABER 2444 S024B BLDC Servo Motor Özellikleri



Brushless DC-Servomotors

11,8 mNm

For combination with
Gearheads:
23/1, 26/1, 30/1, 38/3
Encoders:
IE2 - 64 ... 512, 5500, 5540
Drive Electronics:
SC ..., BLDC ..., MCBL ...

Series 2444 ... B

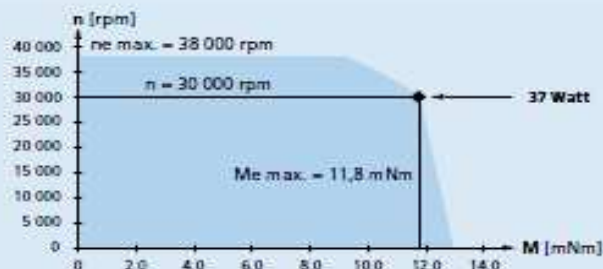
	2444 S	024 B	048 B	
1 Nominal voltage	U_N	24	48	Volt
2 Terminal resistance, phase-phase	R	2,1	8,4	Ω
3 Output power ¹⁾	P_{2max}	36	37	W
4 Efficiency	η_{max}	77	77	%
5 No-load speed	n_0	23 000	22 500	rpm
6 No-load current (with shaft ø 10 mm)	I_0	0,184	0,088	A
7 Stall torque	M_H	1,11	1,15	mNm
8 Friction torque, static	C_0	1,00	1,00	mNm
9 Friction torque, dynamic	C_0	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$	mNm/rpm
10 Speed constant	K_n	974	473	rpm/V
11 Back-EMF constant	K_E	1,026	2,115	mV/rpm
12 Torque constant	K_t	9,8	20,2	mNm/A
13 Current constant	K_i	0,102	0,050	A/mNm
14 Slope of n-M curve	$\Delta n / \Delta M$	209	197	rpm/mNm
15 Terminal inductance, phase-phase	L	180	760	μH
16 Mechanical time constant	τ_m	14	13	ms
17 Rotor inertia	J	6,5	6,5	gcm ²
18 Angular acceleration	α_{max}	171	177	10^3 rad/s^2
19 Thermal resistance	R_{th1} / R_{th2}	4,1 / 14,8		K/W
20 Thermal time constant	τ_{th1} / τ_{th2}	16 / 680		s
21 Operating temperature range		-30 ... +125		°C
22 Shaft bearings		ball bearings, preloaded		
23 Shaft load max.:				
- radial at 3 000/20 000 rpm (6 mm from mounting flange)		30 / 17		N
- axial at 3 000/20 000 rpm (push on only)		15 / 10		N
- axial at standstill (push on only)		57		N
24 Shaft play:				
- radial	$\leq$	0,015		mm
- axial	$=$	0		mm
25 Housing material		aluminium, black anodized		
26 Weight		100		g
27 Direction of rotation		electronically reversible		

Recommended values - mathematically independent of each other

28 Speed up to ²⁾	n_{2max}	38 000	38 000	rpm
29 Torque up to ¹⁾²⁾	M_{2max}	11,4	11,8	mNm
30 Current up to ¹⁾²⁾	I_{2max}	1,37	0,69	A

¹⁾ at 30 000 rpm

²⁾ thermal resistance R_{th2} by 55% reduced



EK-B

FAULHABER 246:1 Planet Dişli Özellikleri

FAULHABER

Planetary Gearheads

4,5 Nm

For combination with:
DC-Motors:
2342, 2642, 2657, 3557
Brushless DC-Servomotors:
2232 BSL, 2248 BSL, 2444, 3056, 3564

Series 30/1

	30/1
Housing material	metal
Geartrain material	steel ¹⁾
Recommended max. input speed for:	
- continuous operation	4 000 rpm
Backlash, at no-load	< 1"
Bearings on output shaft	ball bearings
Shaft load, max:	
- radial (15 mm from mounting face)	< 150 N
- axial	< 150 N
Shaft press fit force, max.	< 200 N
Shaft play:	
- radial (15 mm from mounting face)	< 0,03 mm
- axial	< 0,15 mm
Operating temperature range	-30 ... +100 °C

Specifications

reduction ratio (nominal)	weight without motor	length without motor L2	length with motor ¹⁾						output torque		direction of rotation (reversible)	efficiency %
			2444 S	2342 S 2642 W	3056 K	2657 W 3557 K	3564 K		continuous operation	intermittent operation		
	g	mm	L1 mm	L1 mm	L1 mm	L1 mm	L1 mm	M max. Nm	M max. Nm	M max. Nm		
3,71:1	107	27,1	71,1	69,1	84,5	85,5	92,5	1,5	3,0	=	=	88
9,7:1 ²⁾	139	35,1	79,1	77,1	92,5	93,5	100,5	4,5	6,0	=	=	80
14:1	139	35,1	79,1	77,1	92,5	93,5	100,5	0,35 (4,5)	0,5 (6,0)	=	=	80
23:1 ²⁾	139	35,1	79,1	77,1	92,5	93,5	100,5	4,5	6,0	=	=	80
43:1	171	43,1	87,1	85,1	100,6	101,6	108,6	1,2 (4,5)	1,6 (6,0)	=	=	70
66:1	171	43,1	87,1	85,1	100,6	101,6	108,6	1,8 (4,5)	2,4 (6,0)	=	=	70
86:1 ²⁾	171	43,1	87,1	85,1	100,6	101,6	108,6	4,5	6,0	=	=	70
134:1	203	51,2	95,2	93,2	108,6	109,6	116,6	3,5 (4,5)	4,5 (6,0)	=	=	60
159:1	203	51,2	95,2	93,2	108,6	109,6	116,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	60
246:1	203	51,2	95,2	93,2	108,6	109,6	116,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	60
415:1	235	59,2	103,2	101,2	116,6	117,6	124,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	55
592:1	235	59,2	103,2	101,2	116,6	117,6	124,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	55
989:1	235	59,2	103,2	101,2	116,6	117,6	124,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	55
1 526:1	235	59,2	103,2	101,2	116,6	117,6	124,6	4,5 (4,5)	6,0 (6,0)	=	=	55

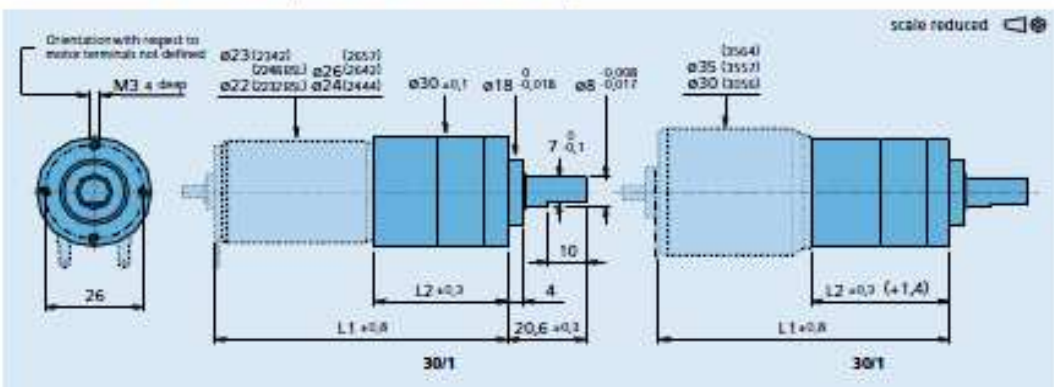
¹⁾ Gearheads with ratio > 14:1 have plastic gears in the input stage. For extended life performance, the gearheads are available with all steel gears and heavy duty lubricant as type 30/1 S.

The values for the torque rating indicated in parentheses, are for gearheads, type 30/1 S with all steel gears.

²⁾ Gearheads with ratio 9,7:1 - 23:1 - 86:1 are available only as type 30/1 S.

³⁾ Length L1 with motor:
2232 S ... BSL = L2 + 32,4 mm
2248 S ... BSL = L2 + 48 mm

Note: The reduction ratios are rounded, the exact values are available on request.



EK-C

FAULHABER HEDL 5540 I06 Optik Kodlayıcı Özellikleri

FAULHABER

Encoders

Optical Encoders with Line Driver

Features:
500 Lines per revolution
3 Channels + complementary outputs
Digital output
Line driver

Series 5540

		HEDL 5540	
Lines per revolution	N	500	
Signal output, square wave		2+1 index and complementary outputs	channels
Supply voltage	V _{CC}	4.5 ... 5.5	V DC
Current consumption, typical (V _{CC} = 5 V DC)	I _{CC}	57	mA
Pulse width	P	180 ± 35	°
Index pulse width	P ₀	90 ± 35	°
Phase shift, channel A to B	φ	90 ± 15	°
Logic state width	S	90 ± 35	°
Cycle	C	360 ± 5.5	°
Signal risetime, typical	t _{rise}	0.25 / 0.25	µs
Frequency range	f	up to 100	kHz
Inertia of code disc	J	0.6	gcm ²
Operating temperature range		0 ... +70	°C
¹⁾ Velocity (rpm) = f (Hz) x 60/N			

Ordering Information

Encoder type	number of channels	lines per revolution	For combination with:
HEDL 5540 A	2+1	500	DC-Motors and DC-Motor-Tachos Series 2230, 2233, 2251 2342 2642, 2657 3242, 3257, 3557, 3863 brushless DC-Servomotors Series 2036, 2057, 2444, 3056, 3564

The housing dimensions of the HEDL encoder are the same as the HEDS/HEDM encoders, but there is a ribbon cable instead of plain connector pins.

Suggested Line Receivers: AM26LS32, SN75175, MC3486

Features

These incremental shaft encoders in combination with the DC-Motors and Brushless DC-Servomotors are designed for the indication and control of both shaft velocity and direction of rotation as well as for positioning.

A LED source and lens system transmits collimated light through a low inertia metal disc to give two channels with 90° phase shift.

The index pulse is synchronized with the channel B.
Each encoder channel provides complementary output signals.

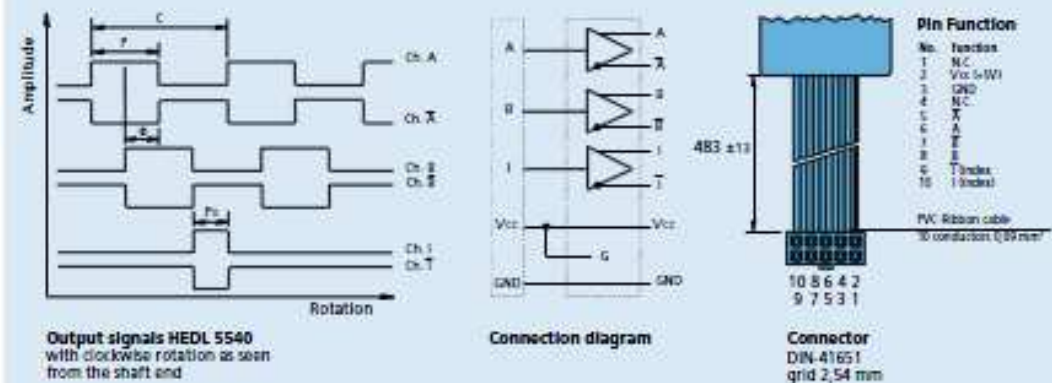
The single 5 volt supply and the digital output signals are interfaced with a connector.

The line driver offers enhanced performance when the encoder is used in noisy environments, or when it is required to drive long distances.

Motor with ball bearings are recommended for continuous operation at low and high speeds and for elevated radial shaft load.

Details for the motors and suitable reduction gearheads are on separate catalogue pages.

Output signals / Circuit diagram / Connector information



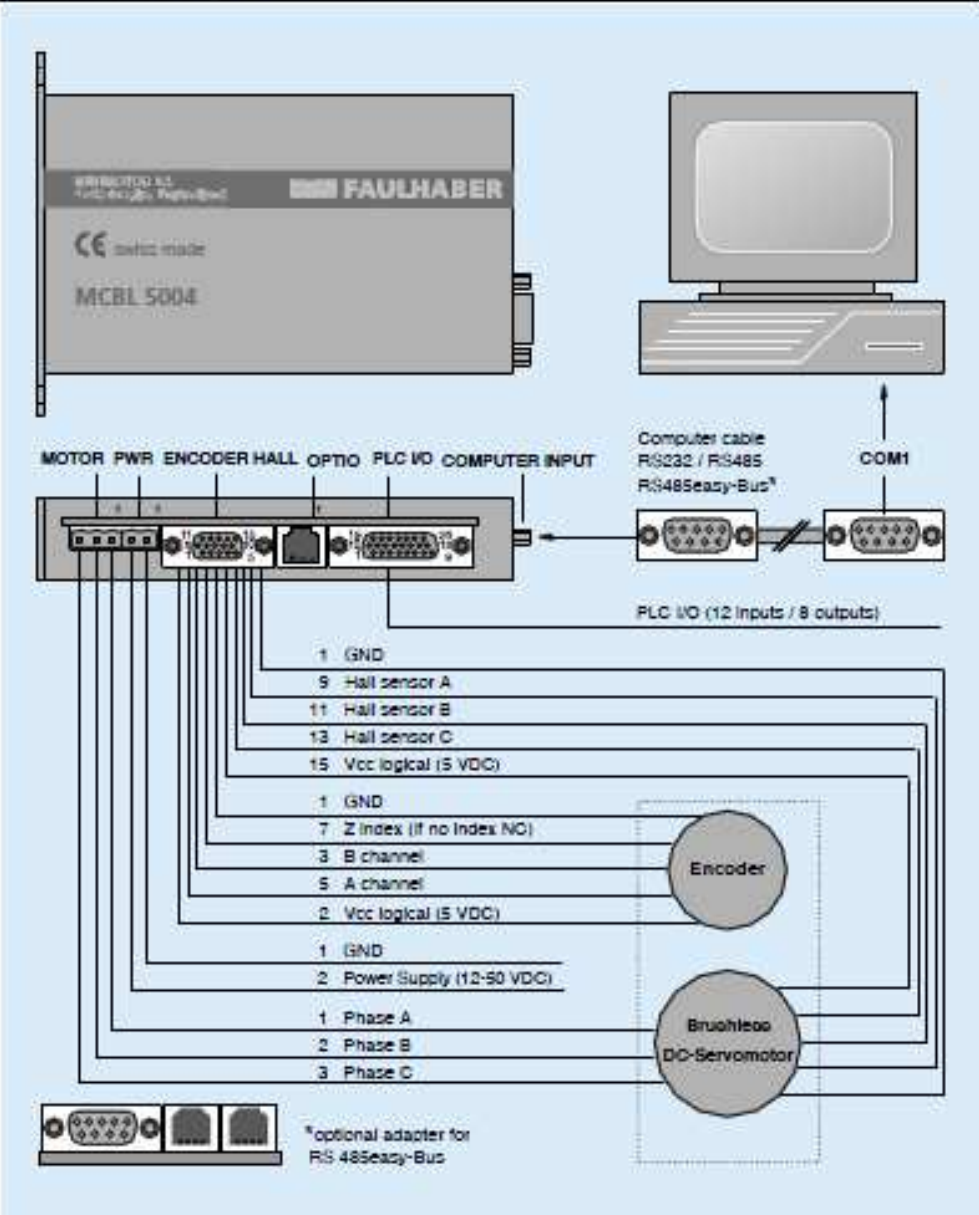
EK-D

FAULHABER MCBL 5004 BLDC Servo Motor Sürücü Özellikleri



Start-up procedure

6. Connection diagram for MCBL 5004

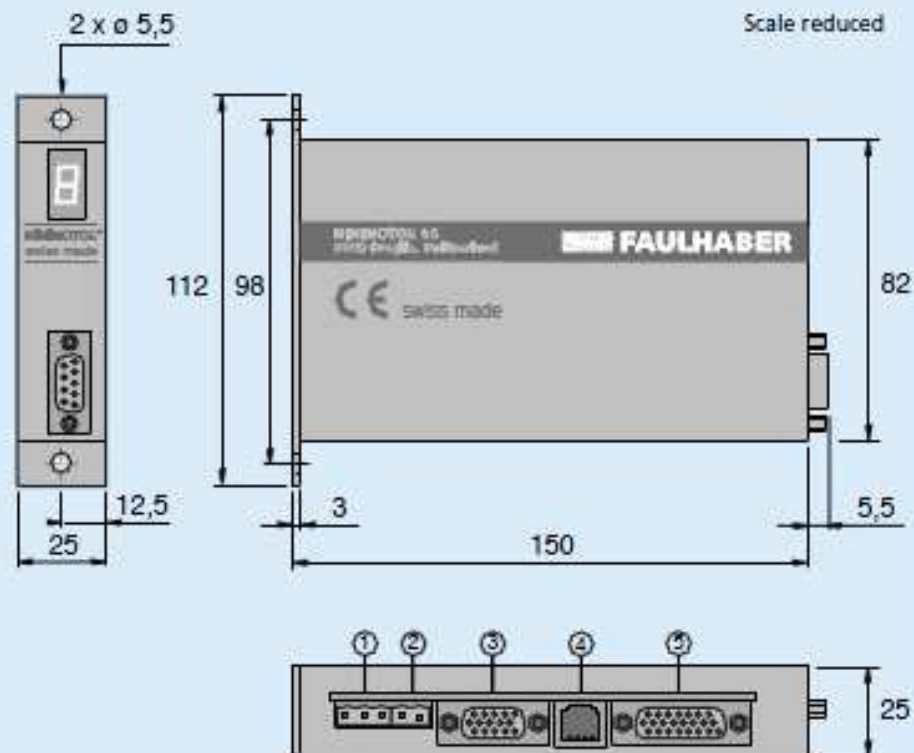


Technical information

3. Technical data	MCBL 5004	MCDC 5004	
Electrical data			
Supply voltage	12 ÷ 50	12 ÷ 50	V DC
PWM switching frequency	20	20	kHz
Max. continuous output current	4	4	A
Max. peak output current	10	10	A
Max. encoder frequency	200	200	kHz
Software data			
Program memory (16 bit access)	256 x 8	256 x 8	kbyte
Sampling period	500	500	µs
Number of programs	15	15	
Lines per program	50	50	
Number of indexes	50	50	
Communication data			
Interface	RS232 / RS485 / RS485easy-Bus		
Status display	7 segment display		
Inputs (5V pull-up standard, optional 24V pull-down)	12		
Outputs (6 x 50V/500mA open collector, 2 x TTL level)	8		
Program and parameter editor	Integrated ASCII terminal		
Program up-date	via serial interface		
Application and parameter save / load	via serial interface		
Starting position function	via encoder Z-index / via external sensor		
Temperature rating			
Operating temperature	0 ... + 55		°C
Storage temperature	-20 ... + 80		°C
Weight / Dimensions			
Weight:	370		g
Dimensions: see diagram on page 5			

Dimensions

4. Dimensions for MCBL 5004 and MCDC 5004



Connection for MCBL 5004

- ① Motor
- ② Power supply
- ③ Encoder¹⁾ and Hall sensors
- ④ Input for special function
- ⑤ Digital Input / Output

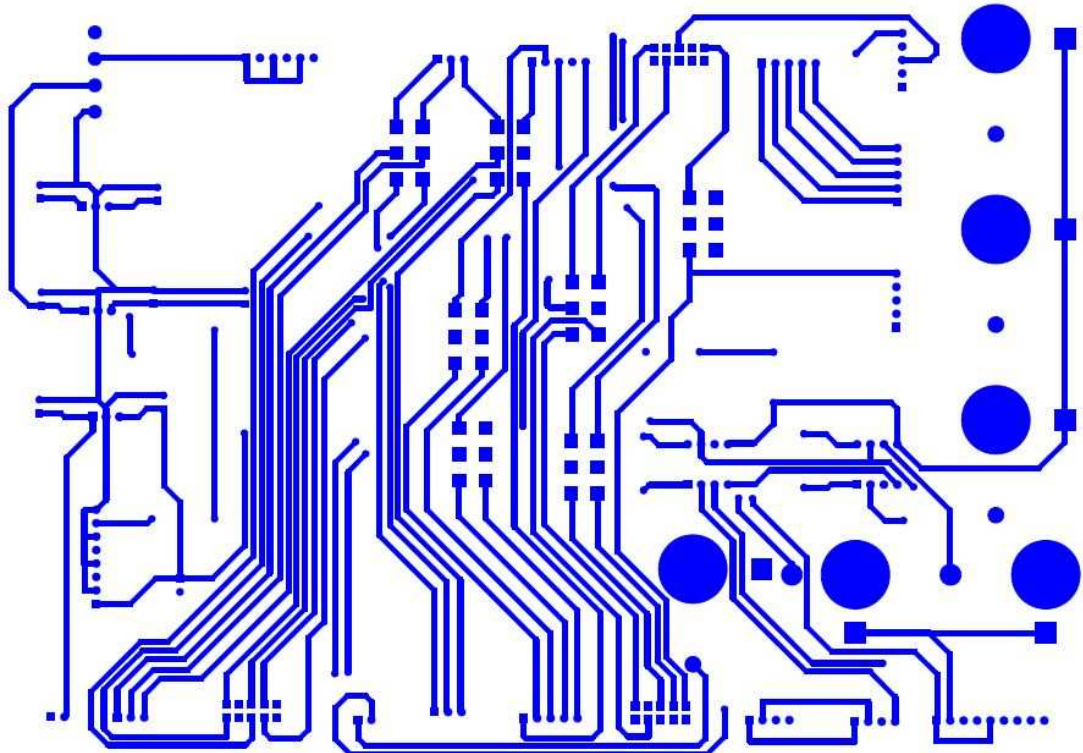
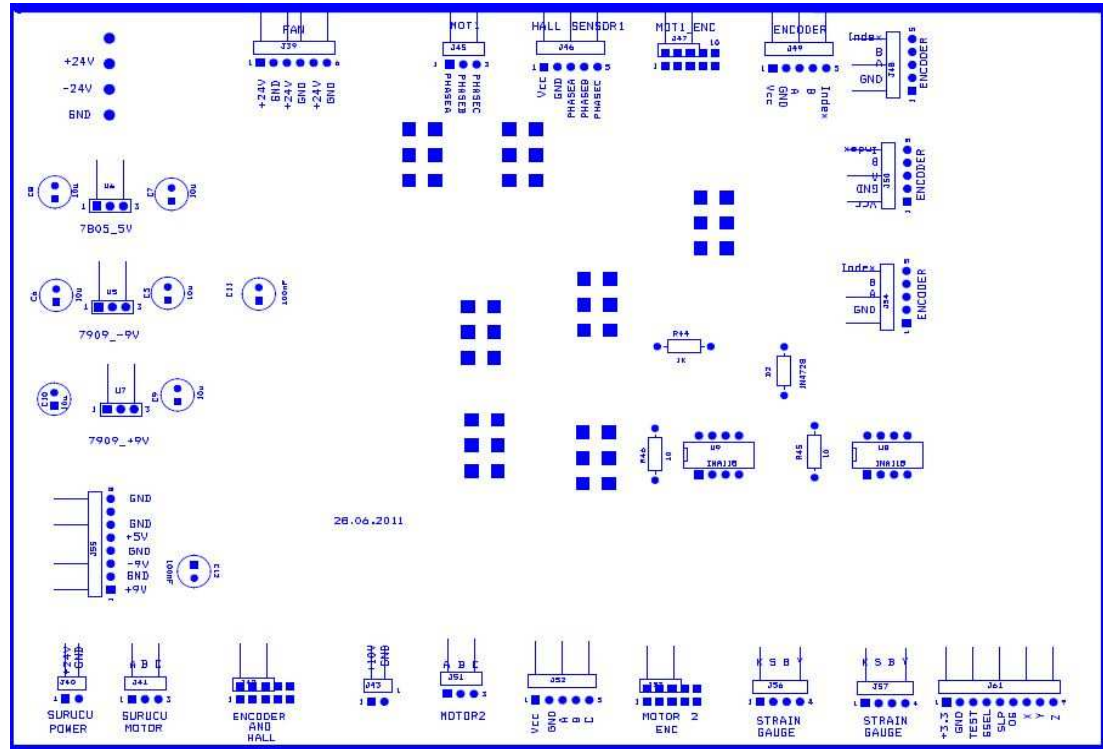
Connection for MCDC 5004

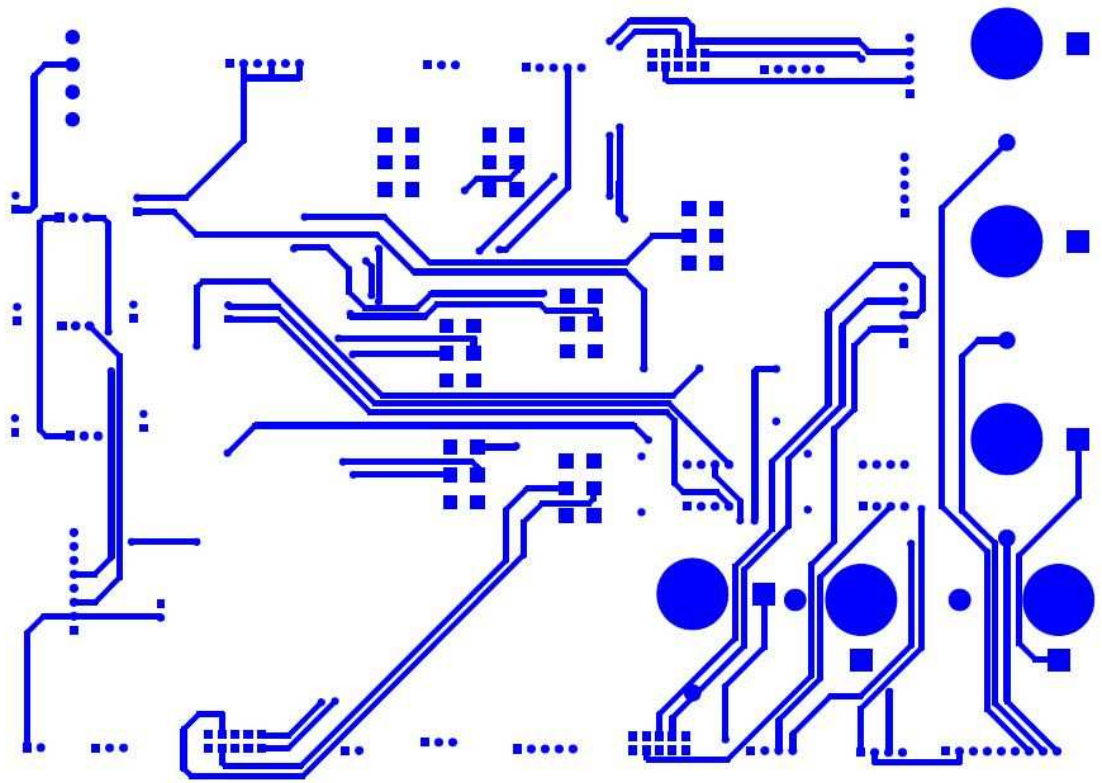
- ① Motor
- ② Power supply
- ③ Encoder¹⁾
- ④ Input for special function
- ⑤ Digital Input / Output

¹⁾ Line driver encoders for noisy environments or long distances can be used.

EK-E

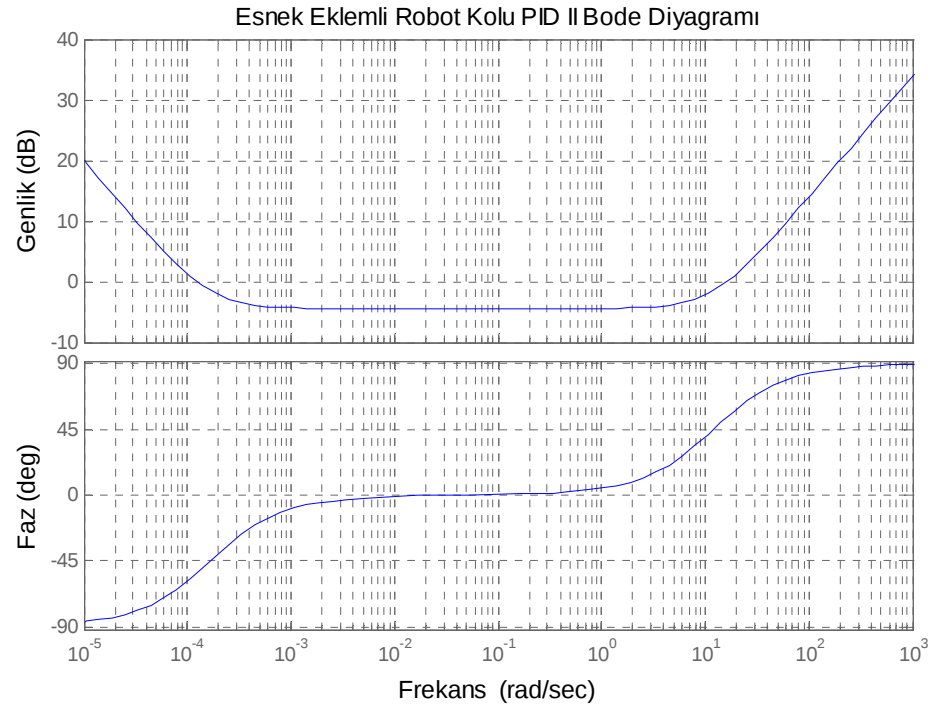
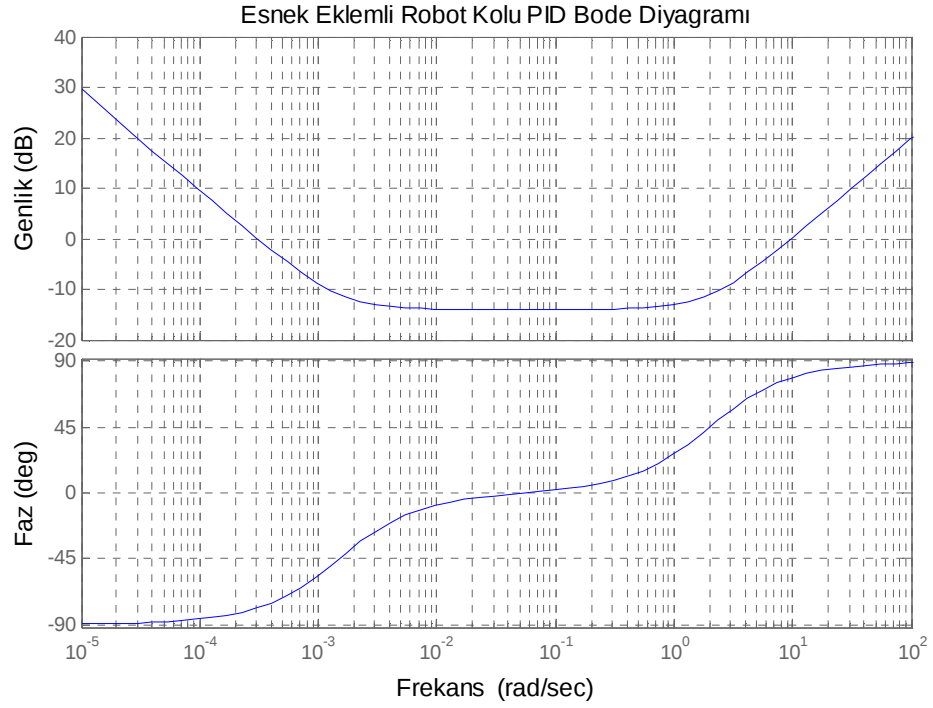
Dağıtım Kartı Devresinin Komponent Yerleşimi, Üst ve Alttan Görünüşleri

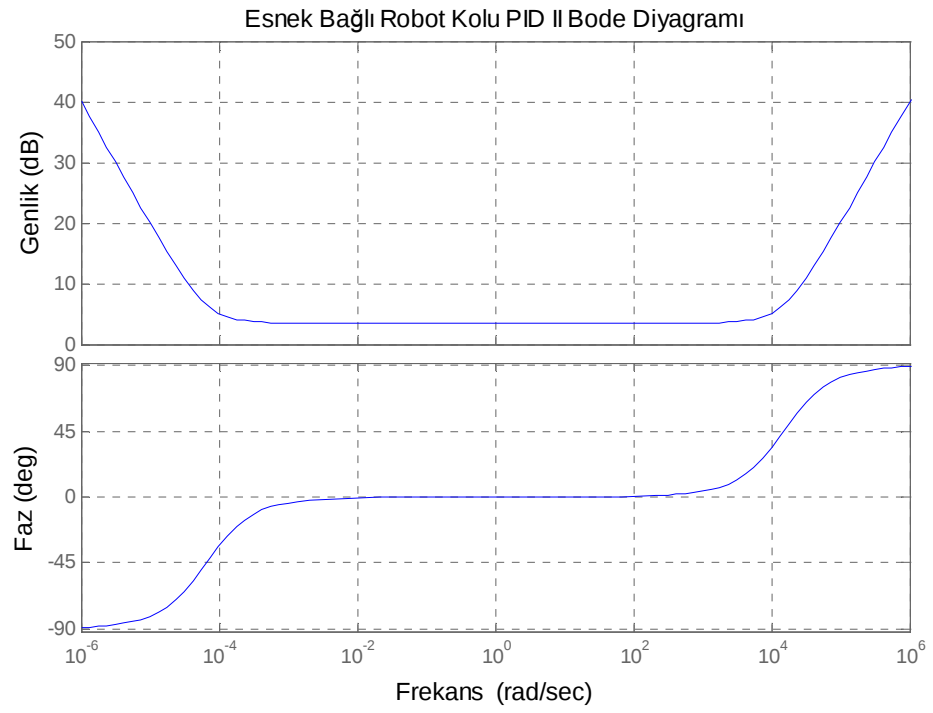
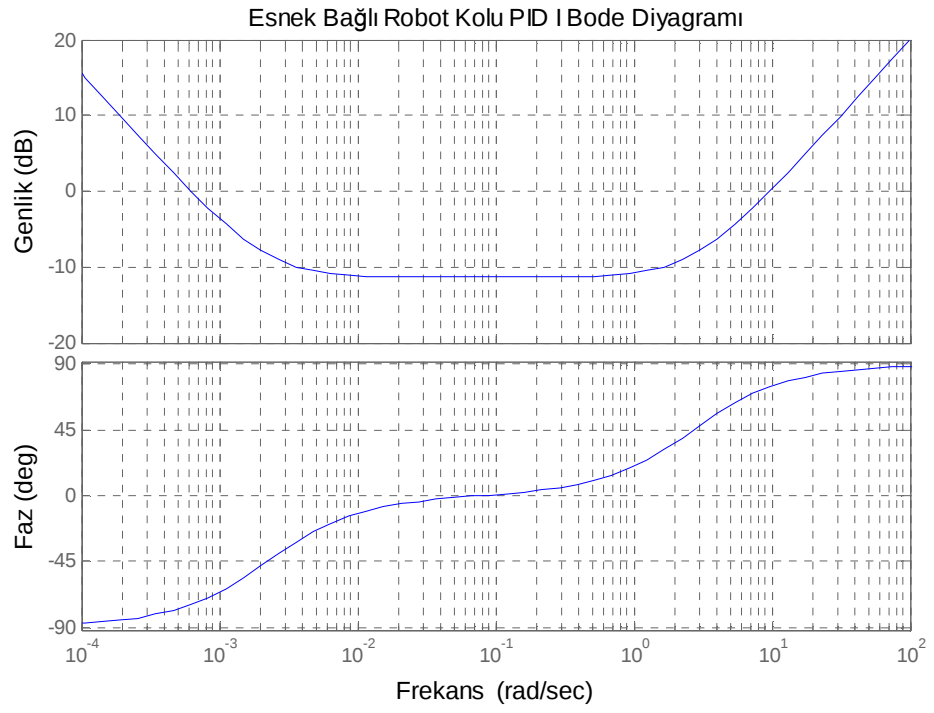




EK-F

Esnek bağı ve esnek eklemli robot kollarının PID kontrolörleri için elde edilen bode diyagramları





EK-G

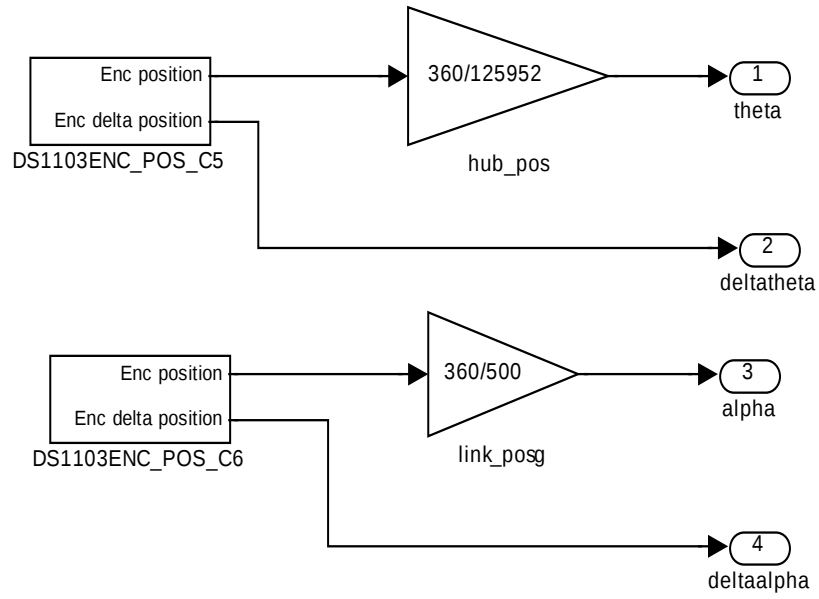
Kane fonksiyonunun matematiksel ifadesi

$$y(t) = y_0 + (y_f - y_0) \frac{t - t_0}{t_f - t_0} - \frac{y_f - y_0}{2\pi} \sin(2\pi \frac{t - t_0}{t_f - t_0})$$

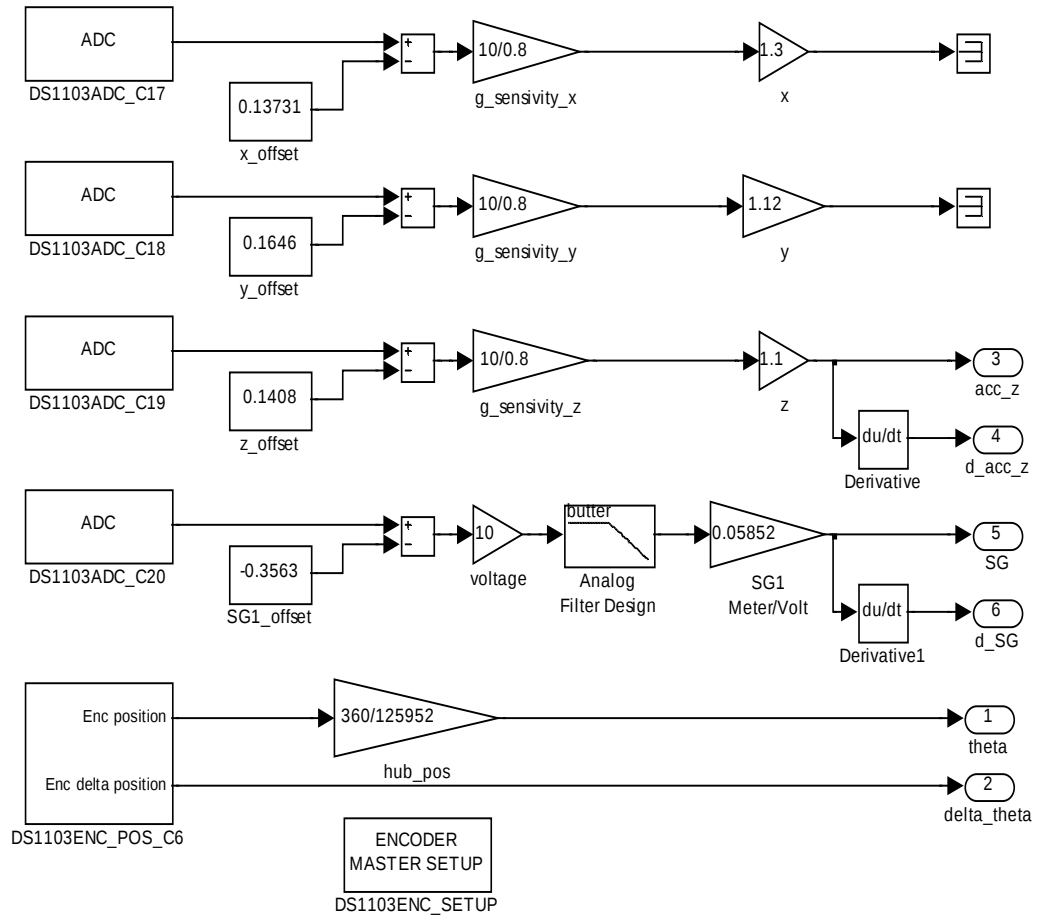
Burada, $y(t)$ pozisyon fonksiyonu, y_0 başlangıç pozisyonu, y_f bitiş pozisyonu, t zaman, t_0 başlangıç zamanı, t_f ise bitiş zamanını ifade etmektedir.

EK-J

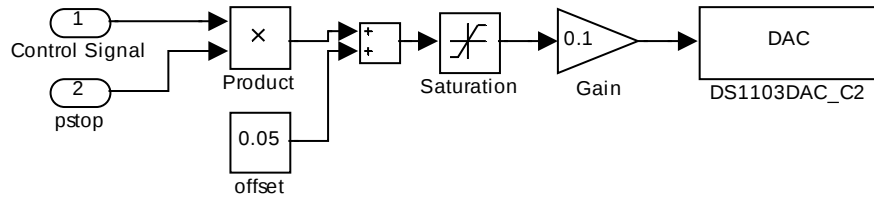
Kontrolör yapılarında kullanılan diğer simulink blokları



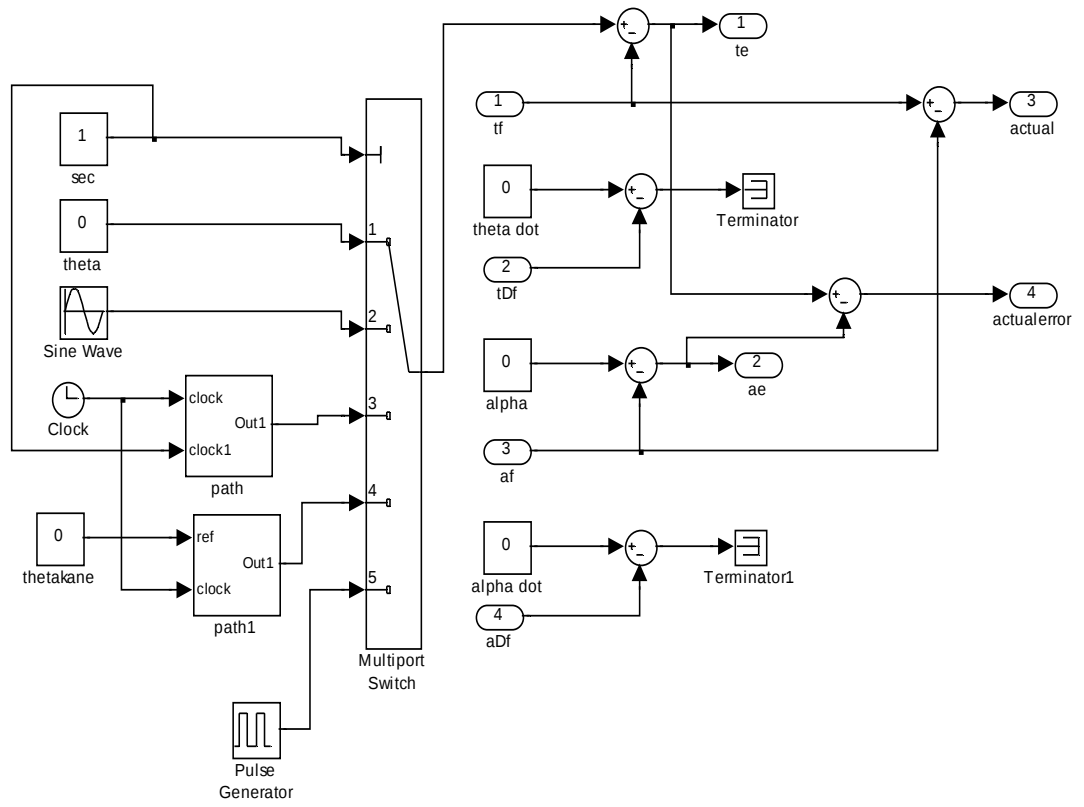
Esnek eklemlı robot kolu kontrolör yapısında kullanılan ölçüm bloğunun içyapısı



Esnek bağı robot kolu kontrolör yapısında kullanılan ölçüm bloğunun iç yapısı



Bütün kontrolörlerde kullanılan çıkış bloğu iç yapısı



Bütün kontrolörlerde kullanılan giriş bloğu iç yapısı

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Zafer BİNGÜL, Selçuk KİZİR, İsmail H. AKYÜZ, “Tek Eklemlili Esnek Robot Kolunun Modellenmesi, Tasarımı ve Bulanık Mantık ile Kontrolü”, **Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı**, 13-16 Ekim 2009, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2009.

İsmail H. AKYÜZ, Selçuk KİZİR, Zafer BİNGÜL, “Tek Eklemlili Esnek Bağlı Robot Kolunun Modellenmesi, Tasarımı ve Bulanık Mantık ile Kontrolü”, **Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı**, 21-23 Eylül 2010, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze 2010.

İsmail H. AKYÜZ, Muharrem YILMAZ, “Mechatronics Engineering Education at Kocaeli University”, **11th International Workshop on Research and Education in Mechatronics**, Ostrava, Çek Cumhuriyeti, 211-217, 2010.

İsmail H. AKYÜZ, Selçuk KİZİR, Zafer BİNGÜL, “Fuzzy Logic Control of Single Link Flexible Joint Manipulator”, **IEEE ICIT-SSST 2011, International Conference on Industrial Technology & 43rd Southeastern Symposium on System Theory**, Auburn, Alabama, Amerika Birleşik Devletleri, 306- 311, 2011.

İsmail H. AKYÜZ, Ersin YOLAÇAN, H. Metin ERTUNÇ, Zafer BİNGÜL, “PID and State-Feedback Control of Single Link Flexible Joint Manipulator”, **ICM 2011, IEEE International Conference on Mechatronics**, İstanbul, Türkiye, 2011.

İsmail H. AKYÜZ, Ali YÜKSEL, Zafer BİNGÜL, “Modeling and Control Of A Rigid-Link Flexible Joint Robot Manipulator”, **12th International Workshop on Research and Education in Mechatronics**, Kocaeli, Türkiye, 2011.

İsmail H. AKYÜZ, Zafer BİNGÜL, Selçuk KİZİR, “Cascade Fuzzy Logic Control of Single-Link Flexible Joint Manipulator”, **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, (Basım Tarihi: 04/2012).

ÖZGEÇMİŞ

İsmail Hakkı AKYÜZ, Ocak 1986, Trabzon doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun’ da tamamlamıştır. 2004 yılında kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’ nden 2009 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2010 yılında, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü’ nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen görevine devam etmektedir.

Elektromekanik sistem tasarımı, kontrol sistemleri, robotik ve otomasyon uygulamaları, elektronik devre tasarımı, CAD/CAM uygulamaları, PLC ve DSP konularıyla ilgilenmektedir.