

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cenk KARAMAN

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

EYLÜL 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR KONTROLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cenk KARAMAN
(504101106)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Sıddık Murat YEŞİLOĞLU

EYLÜL 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504101106 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Cenk KARAMAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR KONTROLÜ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. S. Murat YEŞİLOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ö. Turay KAYMAKÇI.....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Eylül 2015
Savunma Tarihi : 28 Eylül 2015

Eşime, Oğluma ve Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada değerli vaktini, bilgi ve deneyimini, desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Yrd. Doç. Dr. S. Murat Yeşiloğlu'na, laboratuarda çalışma imkanı sağlayan ve tecrübelerini paylaşan sayın Prof. Dr. Zafer Bingül'e, çalışma arkadaşlarım Haluk Özakyol, Orkun Yılmaz ve Ethem Kelekçi'ye, hayatta her konuda motivasyon kaynağı olan değerli arkadaşım Erdem Yanık'a, her aşamada hep yanımda olan en büyük mutluluk kaynağım Eşime, hayatım boyunca aldığım her kararda desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme, gönülden teşekkür ederim.

Eylül 2015

Cenk KARAMAN
(Mekatronik Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxv
1. GİRİŞ	1
2. ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR SİSTEMİNİN TANITIMI.....	3
2.1 Fiziksel Sistemin Tanıtımı	3
2.2 Fiziksel Sistemde Parametre Tahmini	5
3. ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖRÜN DİNAMİK DENKLEMLERİ.....	13
3.1 Sistemin Doğrusal Olmayan Matematiksel Modeli	13
3.2 Sistemin Doğrusallaştırılmış Matematiksel Modeli	18
4. ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖRÜN KOTROLÜ	21
4.1 PID Kontrol.....	21
4.2 Doğrusallaştırılmış Sistem Modeli ve Kontrolü	26
4.3 Sistemin Gözlenebilirliği ve Kontrol Edilebilirliği.....	29
4.4 Kutup Yerleştirme ile Regülasyon ve Referans Takibi.....	30
4.5 Doğrusal Karesel Düzenleyici ile Regülasyon ve Referans Takibi	38
4.5.1 Doğrusal karesel optimal kontrol denklemlerinin çıkarılması.....	38
4.5.2 Doğrusal karesel optimal kontrol ve kararlılık.....	41
4.5.3 Doğrusal karesel optimal kontrol ağırlık matrislerinin seçimi.....	42
4.5.4 Esnek eklemli manipulatörün doğrusal karesel optimal kontrolü.....	43
4.5.5 Doğrusal karesel optimal kontrol ve integral etkisi.....	48
4.6 Gözleyici İle Durum Tahmini ve Kontrol.....	50
4.6.1 Gözleyici tasarımı.....	51
4.6.2 Gözleyici tahminleri kullanılarak doğrusal karesel optimal kontrol.....	56
4.6.3 Kalman Filtresi tahminleri kullanılarak doğrusal karesel optimal kontrol....	61
4.7 Esnek Eklemli Manipulatörün Gerçek Zamanlı Kontrolü.....	66
4.7.1 Ackermann metodu ile durum geribeslemeli kontrol.....	66
4.7.2 Doğrusal karesel regülatör yöntemi ile durum geribeslemeli kontrol.....	68
4.7.3 Gözleyici tasarımı.....	71
4.7.4 Gözleyici tasarımı ve LQR metodu ile durum geribeslemeli kontrol	74
4.7.5 Kalman filtresi ile durum tahmini	77
4.7.6 Kalman filtresi ve LQR metodu ile durum geribeslemeli kontrol	80
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	85
EKLER.....	89
ÖZGEÇMİŞ	101

KISALTMALAR

LQR	: Linear Quadratic Regulator (Doğrusal Karesel Düzenleyici)
EKF	: Extended Kalman Filter (Genişletilmiş Kalman Filtresi)
ARE	: Algebraic Riccati Equation (Cebirsel Riccati Denklemi)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel)
BLDC	: Fırçasız doğru akım motoru

SEMBOLLER

α	: Çubuğun salınım açısı
$\dot{\alpha}$	: Çubuğun salınım açısal hızı
$\ddot{\alpha}$	: Çubuğun salınım açısal ivmesi
α_0	: Çubuğun tabla eksenine ile sistem hareketsiz iken yaptığı açı
θ	: Tablanın dönme açısı
$\dot{\theta}$	: Tablanın dönme açısal hızı
$\ddot{\theta}$	: Tablanın dönme açısal ivmesi
x_1	: Tablanın dönme açısının durum değişkeni ifadesi
x_2	: Çubuğun salınım açısının durum değişkeni ifadesi
x_3	: Tablanın dönme açısal hızının durum değişkeni ifadesi
x_4	: Çubuğun salınım açısal hızının durum değişkeni ifadesi
$\dot{x}_1$	: Tablanın dönme açısının durum değişkeni ifadesinin türevi
$\dot{x}_2$	: Çubuğun salınım açısının durum değişkeni ifadesinin türevi
$\dot{x}_3$	: Tablanın dönme açısal hızının durum değişkeni ifadesinin türevi
$\dot{x}_4$	: Çubuğun salınım açısal hızının durum değişkeni ifadesinin türevi
J_{tabla}	: Tablanın eylemsizlik momenti
$J_{\text{çubuk}}$	: Rijit çubuğun eylemsizlik momenti
k	: Yay sabiti
R_m	: Motor direnci
B_m	: Motor sürtünme katsayısı
B_a	: Rijit çubuk ile tabla arasındaki sürtünme katsayısı
η_m	: Motor verimi
η_g	: Motor dişli verimi
K_g	: Motor dişli oranı
K_m	: Geri elektromotor kuvvet sabiti
K_t	: Tork sabiti
L_0	: Gerilmemiş yay uzunluğu
A	: Birinci yayın tabla üzerindeki bağlantı noktası
B	: İkinci yayın tabla üzerindeki bağlantı noktası
C	: Yayların rijit çubuk üzerindeki bağlantı noktası
O	: Rijit çubuğun tabla üzerindeki dönme noktası
R_L	: Çubuk üzerindeki yay bağlama noktasının O noktasına uzaklığı
r_t	: A ve B noktalarının dönme merkezine dik uzaklığı
d_t	: A ve B noktalarının dönme merkezine yatay uzaklığı
KE	: Sistemin toplam kinetik enerjisi
PE	: Sistemin toplam potansiyel enerjisi
τ	: Motor tarafından tablaya uygulanan tork

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sistemde kullanılan parametrelerin değerleri ve birimleri.....	5
Çizelge 2.2 : Toplanan data'lara göre tahmin edilen parametre değ'eri.....	10
Çizelge 2.3 : Toplanan data'lara göre tahmin edilen parametre değ'eri.....	11

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Esnek eklemli manipülatör test düzeneği.....	3
Şekil 2.2 : CLP1103 Giriş/Çıkış Birimi.....	4
Şekil 2.3 : Salınım datalarının toplandığı esnek eklemli manipülatör	6
Şekil 2.4 : Çubuğun salınım datası, salınıma başlangıç açısı durumu = 46.8°	6
Şekil 2.5 : Çubuğun salınım datası, salınıma başlangıç açısı durumu = 33.66°	7
Şekil 2.6 : Çubuğun salınım datası, salınıma başlangıç açısı durumu = 20.34°	7
Şekil 2.7 : MATLAB/SIMULINK kontrol ve tahmin araç kutuları menajeri.....	8
Şekil 2.8 : MATLAB/SIMULINK kontrol ve tahmin araç kutuları menajeri.....	8
Şekil 2.9 : Parametre tahmini sırasında kullanılan sistem modeli	9
Şekil 2.10 : Data Seti 2 için Toplanan ve tahmin edilen dataların çizdirilmesi.....	9
Şekil 2.11 : Ba ve Jtabla parametrelerinin tahmini sırasında kullanılan sistem girişi.....	10
Şekil 2.12 : Ba ve Jtabla parametrelerinin tahmin edilmesi sonucu sistem cevabı ...	11
Şekil 3.1 : Matematiksel denklemdeki sabit ve değişkenlerin tanımlanması	13
Şekil 3.2 : Matematiksel denklemdeki sabit ve değişkenlerin tanımlanması	14
Şekil 3.3 : Doğrusal model ve doğrusal olmayan modelin karşılaştırılması.	20
Şekil 4.1 : PID kontrolörün genel uygulaması.....	22
Şekil 4.2 : PID kontrolün MATLAB/SIMULINK'te dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kartında gerçekleşmesi için oluşturulan model.	22
Şekil 4.3 : MATLAB/SIMULINK ortamında fiziksel sistem için hazırlanan modelin kontrolör iç yapısı.	23
Şekil 4.4 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun cevaplarının karşılaştırılması.	23
Şekil 4.5 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun çubuğun salınım cevapları için karşılaştırılması.....	24
Şekil 4.6 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun döner tabla açısı hataları için karşılaştırılması.	24
Şekil 4.7 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun çubuk salınım açısı hataları için karşılaştırılması.	25
Şekil 4.8 : Tasarlanan giriş sinyali sistemin simülasyon cevabı.....	25
Şekil 4.9 : Sinüsoidal giriş sinyali sistemin simülasyon cevabı.	26
Şekil 4.10 : Açık çevrim sistemin durum uzay matrisleri ile gösterimi.	27
Şekil 4.11 : Esnek eklemli manipülatör sisteminin kök-yer eğrisi.....	28
Şekil 4.12 : Esnek eklemli manipülatörün 1° 'lik ilk durum cevabı.....	28
Şekil 4.13 : Durum geri besleme ile regülasyon.	31
Şekil 4.14 : Durum geribesleme ile referansın takip edilmesi.	31
Şekil 4.15 : Ackermann metodu ile yerleştirilen kutuplara göre sistemin başlangıç durumu için durum cevapları.....	34
Şekil 4.16 : Ackermann metodu ile kutupların yerleştirilmesi için gereken kontrol girişi.	35
Şekil 4.17 : Ackermann metodu ile referans takibi.	35
Şekil 4.18 : Sistem çıkışının, referans değerine oturması için girişe önçarpım uygulanması.	36
Şekil 4.19 : Ackermann Metodu ile girişine önçarpım uygulanması sonucu referans takibi.	37
Şekil 4.20 : Doğrusal ve doğrusal olmayan sistem modelleri için uygulanan durum geribeslemelerinin karşılaştırılması.	37
Şekil 4.21 : $R = 0.001$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.	43

Şekil 4.22 : $R = 0.01$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	44
Şekil 4.23 : $R = 1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	44
Şekil 4.24 : $R = 10$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	45
Şekil 4.25 : $Q = 0.1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	45
Şekil 4.26 : $Q = 1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	46
Şekil 4.27 : $Q = 10$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	46
Şekil 4.28 : $Q = 100$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.....	47
Şekil 4.29 : $R = 10, Q = 100$ için referans sinyalin takip edilmesi.	47
Şekil 4.30 : Doğrusal karesel optimal kontrol ve integral etkisi şeması.	48
Şekil 4.31 : İntegral etkisi ile uygulanan optimal kontrolün, kare dalga referansı için çıkış simülasyonu.	50
Şekil 4.32 : Gözleyici sisteminin blok şeması.	52
Şekil 4.33 : Esnek eklemli manipülatör durumlarının gözleyici ile tahmin edilmesi.	54
Şekil 4.34 : Tahmin edilen durumların yakınlaştırılmış halleri.	54
Şekil 4.35 : Doğrusal olmayan modelin θ , α durumlarının gözleyici ile tahmini.	55
Şekil 4.36 : Doğrusal olmayan modelin θ , α durumlarının gözleyici ile tahmini	55
Şekil 4.37 : Gözleyici ile doğrusal karesel optimal kontrol şeması.	57
Şekil 4.38 : Durum tahmini ile kare referans sinyalini takip edilmesi.	58
Şekil 4.39 : Durum tahmini ile kare referans sinyalinin takip edilmesi ilk 4 sn.	58
Şekil 4.40 : Durum tahmini ile yapılan optimal kontrolün, sistemin kendi durumlarının kullanılmasıyla yapılan optimal kontrolle karşılaştırılması,.....	59
Şekil 4.41 : Doğrusal olmayan sistem modeli için θ durumunun tahmin edilmesi.	59
Şekil 4.42 : Doğrusal olmayan sistem modeli için α durumunun tahmini.	60
Şekil 4.43 : Doğrusal olmayan sistem modeli için θ ve α durumlarının tahmini.	60
Şekil 4.44 : Doğrusal olmayan sistem modeli için sistem çıkışı ve çubuk salınım açısı .60	
Şekil 4.45 : Nonlinear model ve linear model tahmini ile referans takibi.	63
Şekil 4.46 : Nonlinear model ve linear model tahmini ile referans takibi θ durumu.....	64
Şekil 4.47 : Nonlinear model ve linear model tahmini ile referans takibi α durumu.	64
Şekil 4.48 : Nonlinear model ve linear model tahmini ile referans takibi θ durumu.....	65
Şekil 4.49 : Nonlinear model ve linear model tahmini ile referans takibi α durumu.	65
Şekil 4.50 : Gerçek zamanlı sistem ve Model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi θ durumu.	66
Şekil 4.51 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi α durumu.	67
Şekil 4.52 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi θ durumu.	67
Şekil 4.53 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi α durumu.	68
Şekil 4.54 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi θ .69	
Şekil 4.55 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi α .69	
Şekil 4.56 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi θ .70	
Şekil 4.57 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi α .70	
Şekil 4.58 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı θ .71	
Şekil 4.59 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Gürültülü durum).....	72
Şekil 4.60 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum).....	72
Şekil 4.61 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı θ .73	
Şekil 4.62 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Gürültülü durum).....	73
Şekil 4.63 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum).....	74

Şekil 4.64 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi θ durumu.....	75
Şekil 4.65 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi α durumu.....	75
Şekil 4.66 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi θ durumu.....	76
Şekil 4.67 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi α durumu. (Gürültülü durum)	76
Şekil 4.68 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum)	77
Şekil 4.69 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini θ durumu.....	78
Şekil 4.70 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini α durumu.	78
Şekil 4.71 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini θ durumu.....	79
Şekil 4.72 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini α durumu. (Gürültülü durum).....	79
Şekil 4.73 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum).....	80
Şekil 4.74 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi θ durumu.	80
Şekil 4.75 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi α durumu.	81
Şekil 4.76 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi θ durumu.	81
Şekil 4.77 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi α durumu.	82
Şekil A.1 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.	90
Şekil A.2 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	90
Şekil A.3 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	91
Şekil A.4 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	91
Şekil A.5 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.	92
Şekil A.6 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.	92
Şekil A.7 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	93
Şekil A.8 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.	93
Şekil A.9 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	94
Şekil A.10 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	94
Şekil A.11 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.	95
Şekil A.12 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	95
Şekil A.13 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	96
Şekil A.14 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	96
Şekil A.15 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	97
Şekil A.16 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı	97
Şekil A.17 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	98
Şekil A.18 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	98
Şekil A.19 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.....	99
Şekil A.20 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.....	99

ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR KONTROLÜ

ÖZET

Çağımızda; gelişen bilimsel ve teknolojik olgular, ileri tasarım kriterlerinin ve kontrol yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Robotlar söz konusu olduğunda bu yöntemlerin gelişmişliği ve karmaşıklığı, robotun görev tanımına ve performans kriterine göre değişmektedir. Çoğu sistemlerde olduğu gibi robotlarda da enerji verimliliği, hız , tekrarlanabilirlik önemli performans kriterlerinden bazılarıdır. Esnek eklemlili sistemler bu kriterlerin sağlanmasına imkan sağlamakta birlikte, titreşim kontrolü ve pozisyon kontrolü problemlerini ortaya çıkarmaktadır.

Teorik olarak rijit yapıli sistemlerin, malzemelerin karakteristik yapısının mühendislik hesaplarında basitleştirilmesiyle dış kuvvetler ve momentler etkisi altında esnemediği varsayılır. Endüstriyel robotların veya mekanizmaların güç aktarım sistemlerinde burulma (torsional) titreşimi meydana getirecek parçalar bulunmaktadır. Aktarım organlarındaki hız ve tork dağılımını sağlayan dişliler; hareketin tendon benzeri veya kablolarla sağlandığı sistemler, uzun şaft ile tork aktarımı yapılan sistemler, hidrolik ya da pnömatik eyleyicilerle hareket sağlanan sistemler eklemde esnekliğe neden olan durumlar arasında sayılabilmektedir.

Robotik sistemlerin uç işlevcilerinin ve eklemlerinin istenilen yörüngeye ya da pozisyona yüksek hassasiyet ile konumlanması istenildiğinde genellikle rijit ve ağır bağlar kullanılmaktadır. Kullanılan rijit malzemeler sistemin ağırlığını arttırmakta ve artan ağırlıklar yüksek eylemsizlik momentine yol açmaktadır, bu durum düşük manevra kabiliyetine ve enerji kaybına neden olmaktadır. Bir anlamda enerjinin, taşınan yükten daha çok sistemin diğer kısımlarının hareketi için harcanmasına neden olmaktadır. Staubli RX60 , 6 eksenli seri robotun 45 kg olması ve taşıma kapasitesinin 3,5 kg olması, örnek olarak gösterilebilir.

Sağlık alanında daha çok mikrorobotik cerrahide kullanılan cihazlarda, tendon benzeri kablolarla birlikte eklemde esneklik sağlanması, damarların veya iç organların içerisine müdahale edilmesini kolaylaştırmaktadır. Yine eklemlerde herhangi bir eyleyici bulunmaması hafiflik, hacimde küçülme sağlayarak çalışma koşullarını iyileştirmektedir, esnek yapı kazanan eklemde hedef noktaya varması sırasında izleyeceği yörüngeden minimum derecede dahi sapmaması ve titreşimsiz olması gerekmektedir.

Özellikle eklemde esnek olmasının yanında, robot kolu gibi ekipmanların da esnek olduğu sistemlere daha çok uzay mekikleri rastlanmaktadır. Uzay istasyonlarında, istasyon dışındaki uzay görevleri, uzaktan kontrol edilebilen manipülatörler ile yerine getirilmektedir. Bu manipülatörleri oluşturan parçaların hafif olması, mekiğin fırlatılması esnasındaki yükünün de hafif olması anlamına gelmektedir ve göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. Uzay robotlarının eklemlerinde hafif bir komponent olan ve güç aktarımı sırasında kullanılan harmonik dişli (harmonic drive) mekanizması, kompakt yapısı, yüksek torkta çalışma imkanı, geniş sıcaklık aralığında çalışabilmesi ve tekrarlanabilirliği açısından tercih edilmektedir. Eklemde esneklik meydana gelen uzay robotunun uç işlevcisinin titreşim kontrolü, gerçekleştireceği hassas görevlerde önem kazanmaktadır.

Sistemlerde eklemlere eklenen esnek yapılar, rijit yapıli sistemlerin dinamik denklemlerinin çıkarılmasını sağlayan Lagrange denklemindeki genelleştirilmiş

koordinatlara ekstradan bir değişken tanımlamayı gerektirir. Mekanik sisteme eklenen yeni serbestlik derecesi ile sistem derecesi artarken, sistemin kontrol girişı yahut tahrik eleman sayısı aynı kalmaktadır. Bu şekildeki sistemler eksik tahrikli sistem olarak adlandırılmaktadır. Esnek eklemlı sistemlerde; genelleştirilmiş koordinatlara eklenen yeni serbestlik derecesi, ekleme tahrik veren motor pozisyonu ile ekleme bağlı olan uç işlemci arasında statik durumda iken pozisyon farkı, dinamik durumda ise osilasyon olarak dūřünülebilir. Laboratuvar çalışmalarında bolca üzerinde durulan tek eklemlı ve çift eklemlı ters sarkaç sistemleri eksik tahrikli sistemlere örnek olarak verilebilir, sadece çubukları stabil duruma getiren araba tahrik edilirken sarkaçların eklemlerinde herhangi bir tahrik elemanı bulunmamaktadır, böylece aynı zamanda sistemin ağırlığı ve boyutları küçülmektedir.

Esnek eklemlı sistemlerde istenilen yörüngeyi takibinin sağlanması için geribesleme, uygulanacak kontrol algoritması için çok önemlidir. Yapılacak kontrol türüne göre başlıca geribildirim elemanı olarak enkoderler, eklem tork sensörleri, kuvvet sensörleri, stress ölçerler, ivmeölçer ve yüksek hızlı kameralar sayılabilmektedir. Esnek yapılı sistemlerde; tüm durumlarını ölçmek için kullanılacak sensör sayısı, rijit robotlarda kullanılması gereken sensör sayısından daha fazla olmasını gerektirmektedir.

Durgun durumda iken robotun uç işlevcisinin pozisyonunun, hedeflenen konum koordinatlarından sapması ya da robotun uç işlevcisinin hareketi sırasında belirlenen yörünge boyunca yaptığı salınım, esnek yapılı sistemlerde kontrol problemi olarak ele alınmaktadır. Bu kontrol problemlerini çözmek için bu tez kapsamında, ilk önce endüstride sıkça kullanılan ve uygulaması kolay yöntemlerden biri olan Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrol hem fiziksel sistem üzerinde hem de matematiksel model üzerinde uygulanmıştır. Daha sonra Durum GeriBeslemeli kontrol yöntemi çeşitli metodlar ile, doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri üzerinde simülasyon ortamında uygulanmıştır. Durumların sistemin oturma zamanı, yükselme zamanı gibi kriterleri göz önünde bulundurularak kapalı çevrim kutuplarından yola çıkılmasıyla gerçekleştirilen durum geribeslemesi yöntemi bu metodlardan bir tanesidir. Bir başka metod; durumları ve girişleri, sistemin performans kriterini minimize edecek şekilde ayarlayan Doğrusal Karesel Düzenleyici (DKD/LQR) kullanılmasıyla geribeslenen durumların katsayılarının bulunması yöntemidir. Bunun dışında sistemde ölçülmesi mümkün olmayan durumlar için gözleyici tasarımı yapılmış ve gözleyici modelinden elde edilen durumlar ile durum geribesleme kontrolü yapılmıştır. Son olarak sistemin girişine ve çıkışına rasgele gürültü uygulanmıştır, gürültülü sistemden durum tahmini Kalman filtresi ile yapılmış ve yine bu durumlar geribeslenerek durum geribeslemesi kontrolü yapılmıştır.

Tezin giriş bölümünde esnekliğin mekanizmalardaki avantaj ve dezavantajları, esnek yapılı robot kollarının kullanım alanları gibi konular işlenmiş ve esnek robot kolları hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm 2’ de esnek eklemlı manipülatör için oluşturulan test düzeneği, mekanizmaların hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri, mekanizmaların tasarlanması ve fiziksel özellikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölümde 3’te esnek eklemlı manipülatörün matematiksel olarak modellenmesini, hareket denklemlerinin çıkarılmasını, esnek eklemlı manipülatöre ait parametrelerin gerçek sistemden toplanan datalar ile tahminin yapılmasını içermektedir. Bölüm 4’te esnek eklemlı robot kolunun doğrusal ve doğrusal olmayan sistem modelleri üzerinden kontrol edilmesi, kullanılan kontrol yöntemleri hakkında genel bilgi verilmesi, geliştirilen kontrol algoritmalarının elde

edilen matematiksel model üzerinde MATLAB/SIMULINK kullanılarak uygulanması, simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması konuları işlenmiştir.

MANIPULATOR WITH FLEXIBLE JOINT AND CONTROL

SUMMARY

In our time, developing scientific and technological facts has required the development of advanced design criteria and control methods. In Robotics, development level and complexity of these methods depend on task description and performance criteria of the robot. In robotics studies, energy efficiency, reliability, repeatability and speed are some of the most important performance criterias as most systems have. Although flexible joint systems fulfil these criteria, they cause vibration and position control problems. Theoretically, in rigid system it is assumed that the characteristic structure of the material is not flexed under the external forces and moments because of simplifying engineering calculations. The power transmission system of industrial robots or mechanisms have parts cause torsional vibration. Gears provide speed and torque distribution in power transmission, tendon-based or cable-based systems, the systems that provide torque transmission with long shafts, hydraulic or pneumatic actuators, could be considered as flexibility on the joints of systems.

When robotic system's end effector and joints are aimed to locate desired trajectory or positioning with high precision, it is generally used heavy and rigid links. The rigid materials used increase the weight of the systems and it leads to high moment of inertia because of increased weight. Consequently, this situation causes to energy loss and low manoeuvrability, in other words, the energy is consumed by the heavy parts of the system instead of payload. For example, Staubli RX60, 6 -axis serial robot, can carry 3.5 kg payload, even though its weight is 45kg or KUKA KR 500 Fortec new generation serial robot has maximum 470 kg payload capacity although itself's weight is 2415 kg, it yields 19,46% of its own weight. The flexible structured based robots have payload capacities almost its own weight. For instance, the third generation of DLR Light-Weight Robot III weighs 13,5 kg and is able to loads up to 15 kg by using optimized Harmonic Drive gearbox mechanisms on joints, the DLR-RoboDrive Motor units, weight-decreased safety brakes, and a lot of electronics and sensors for communication and measurements.

In the field of health, especially in micro-robotic surgery, flexible joints ensured thanks to tendon-like cables, facilitate the manipulation inside the blood vessels or internal organs. Similarly, the absence of any actuator at joint, improves working conditions by providing lightness and reduction in volume. While flexible joint arrive at the desired point, it has to follow its trajectory without any deflection and vibration for completing its tasks like process of taking substances from ill body part

The bioinspired projects are frequently studied in research areas to make life easier and more effective than past. In other words, human-like robots, animal-like robots or insect-like robots are copied from our nature and our environment to improve life standarts. So it could be achieved if flexible parts were used. For instance, in robotic human hand has tendon based structure to make system lighter than the system is using motor units on the finger joints and to achieve to higher speeds while grasping, throwing tasks and so on. The dog-like robots are embodied with spring elements on joint section, it provides low energy/power consumption, a lot of different gait patterns and higher jumping skills

Systems which another equipment are flexible such as robot arm, besides flexible joint, is found mostly in the space shuttle. Space missions with outside spacecraft station can be performed with remote manipulators controlled in the space station in other words that's called teleoperative controlled robots. Apart from that, one of the important subjects during the launching of the shuttle, shuttle's weight has to be considered quite lightweight. If the parts that form the manipulator are lightweight, shuttle's load is lightweight during transportation.

To provide lightweightness and flexibility on joints, one of the important joint elements is the harmonic gear mechanism, which is lightweight component in the space robot joint and is used for power transmission, is preferred because of its compact structure and repeatable, working under high torque and in a wide temperature range. The vibration control of the end effector of the space robot that is occurred flexibility at its joint, become crucial in sensitive tasks.

According to mathematical aspect, in the Lagrange equation which allows to find dynamic equation of rigid structure systems, it is necessary that define extra variable to generalized coordinates because of flexible structure added to joint. The system's degree increases with a new degree of freedom added to mechanical system, whereas system's control input or the number of actuator element are still same. The system in this form is called underactuated system. In flexible joint system, while the new degree of freedom added to the generalized coordinates in static state can be called as a position difference between motor position actuated joint and end effector of joint, in dynamic state can be called as oscillation. Single and double joint inverted pendulum system, which is found mostly on laboratory studies, is one of example of underactuated systems. In this studies, just as a moving mechanism that keeps stick located above is actuated, any actuator is not equipped at pendulum joint so weight and size of the system is smaller.

Feedback is crucial for the control algorithm to be implemented for following desired trajectory in flexible joint systems. According to the type of control, encoders, joint torque sensors, force sensors, stress/strain gauges, accelerometer and high-speed cameras are some of feedback element. The number of sensors used to measure all status in flexible joint systems must be more than rigid robots have. The noise free measurements must be provided by using filters, expensive and good quality measurement elements. In flexible joint systems, the measurement elements must be chosen lightweight as well. The more the number of sensors and electric units are added on the joints the harder the system can be controlled.

Within the scope of this thesis, in introduction section of the thesis, advantages and disadvantages of flexibility in mechanisms, flexible structured robot arms application areas etc. were mentioned and studies about flexible robot arms were noted, which include inferences of the mathematical dynamics equations for different designed flexible joint robotic systems, besides different control methods from linear control methods to nonlinear control methods.

In section 2, test mechanism designed for flexible-joint, materials used for making mechanism and their properties such as spring elasticity constant, link lengths, joint and rotary table connection dimensions, system weights, motor specifications and capabilities besides designing process of mechanisms and general information about physical properties were mentioned. The control unit parts with input-output types, connection methods and chosen sensor properties were noticed.

In section 3, mathematical model of flexible-joint robot arm, deriving the equations of motion using by cosine theorem are mentioned. With using cosine theorem, the dynamic equation of the system was reached geometrically. The advantage of with using of this theorem is that the amount of elongation of spring length is independent from unforced spring length. The Lagrangian equation with partial derivation of the system states was employed to reach flexible joint manipulator system equations. Nonlinear system equations are linearized with using Taylor series' expansion and compare with Matlab's linmod function results. The state space form of the flexible joint manipulator system was arranged by using the yielding linearized system model that include rigid link's deflection angle, turning angle of rotary table and their derivatives in other words their angular speeds.

Parameters of the flexible-joint robot arm were obtained with physical system data, the angle of deflection of tip point, in other words vibration angle datas that collected from real time system were estimated by using parameter estimation toolbox in Simulink. After that the friction coefficient of encoder that connected to rigid link with elastic joint, similarly friction coefficient of gear box and motor block although inertias of rotational table and link were estimated thereby using genetic algorithm optimization method.

In section 4, applied control methods were mentioned. First, in the way of stability, observability and controllability of the system were examined. Then general information about linear and nonlinear control methods were explained which were applied to the system model. The control algorithms were implemented in obtained mathematical model by using MATLAB/SIMULINK. This control algorithms consist of linear control methods like, Proportional-Integral-Derivative Control (PID), linear quadratic optimal control. In elastic systems, the position error of robot's endpoint from desired location while the robot is steady state or oscillation at end point are taken into account as control problem. At first to solve this control problem, proportional-integrator-derivative (PID) control method, which is widely used in industry and easy to apply, is used both in physical and mathematical model. During implementation PID control, desired performance criterias are provided with supposing the fourth order system as second order system which consists dominant poles of the system. Then various state-feedback control methods were applied to linear and nonlinear models in simulation environment. One of these methods is the state feedback control model which was fulfilled by using close-loop poles effects rising and settling time criteria. Another is coefficient finding method using Linear-Quadratic Regulator (LQR) that adjusts states and inputs minimizing system's performance criteria.

Moreover observer was designed for non-measurable system states and state feedback control was implemented with states which were obtained from this observer model. Finally, random disturbance was applied to system's inputs and outputs, state estimation in disturbance system was implemented by Kalman filter and state feedback control was again implemented by feeding back these states.

The real time control implementation was realized by using dSPACE controller board and system model on Matlab/Simulink. All control methods mentioned above that are simulated in offline mode and founded state feedback gains were fulfilled in real time with the same parameters. The comparison results are discussed graphically and written.

1. GİRİŞ

Rijit yapılı robotların pozisyon kontrolü çok iyi bilinen ve tamamen anlaşılan bir konu olmuştur [1]. Robotlarda yapısal olarak ve mekaniksel özellik olarak daha yüksek performans beklendiği durumlarda esnek eklemlili robotlar ihtiyaçları karşılamaya başlamışlardır [2]. Uzay manipülatörlerindeki bazı yenilikler ve gereklilikler [3], eklemlili el modelleri [4] esnek eklem kullanılmasını gerektirmektedir. Bununla birlikte insanlarla robotların ev otomasyonu veya sağlık hizmetlerinde yer almasıyla birlikte iletişim halinde oldukları yani fiziksel temasın olduğu yerlerde esnek eklemlili sistemlerin kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir [5,6]. Rijit sistemlerin yerini almaya başlaması için esnek eklemlili robotlar ile ilgili ilk çalışmalar 80'lerin başında yapılmıştır [7]. Yapılan ilk çalışmalarda, daha çok sistemin dinamik modellenmesi üzerinde durulmuştur. Doğrusal yaklaşımlarla yapılan çalışmalardan sonra; doğrusal olmayan ilk kontrol yöntemi, tek ve esnek eklemlili robota doğrusal olmayan durum geribeslemesi ve hesaplanan Tork yöntemi ile uygulanmıştır [8,9]. Basit modellemelerden gittikçe karmaşık ve gerçeğe yaklaşan çalışmalar, Lagrange denklemleri ve Newton denklemleri kullanılarak yapılmaya başlanmıştır. Motor ve robot kolu arasındaki eklemden doğrusal olmayan etkiler, backlash etkisi ve motordaki dinamiklerin etkisi hesaba katılmıştır; daha sonraları hesaplamalara, doğrusal olmayan esneklik ve sürtünme de etkileri Harmonik dişli üzerinde çalışılarak eklenmiştir. [10-12]. Harmonik dişlilerin gittikçe kullanım alanı kazanması esnek eklem konusu üzerindeki çalışmaları arttırmıştır ve modellemelerde daha gerçekçi parametreler yer almaya başlamıştır.[13,14] Motora ait elektriksel ve mekaniksel parametrelerdeki belirsizlikler, sistem dinamiklerinde problem olarak incelenmiştir [15,16]. Modellemelerde doğrusal olmayan ifadelerin yer alması dışında sistemin serbestlik derecesinin artırılması yani iki veya daha fazla esnek eklemlili sistemlerin dinamik modellemeleri üzerinde de çalışılmıştır [17]. Altı serbestlik derecesi bulunan esnek eklemlili robotun zımparalama uygulaması sırasında dinamik modeli çıkarılmış ve titreşim analizleri yapılmıştır [18].

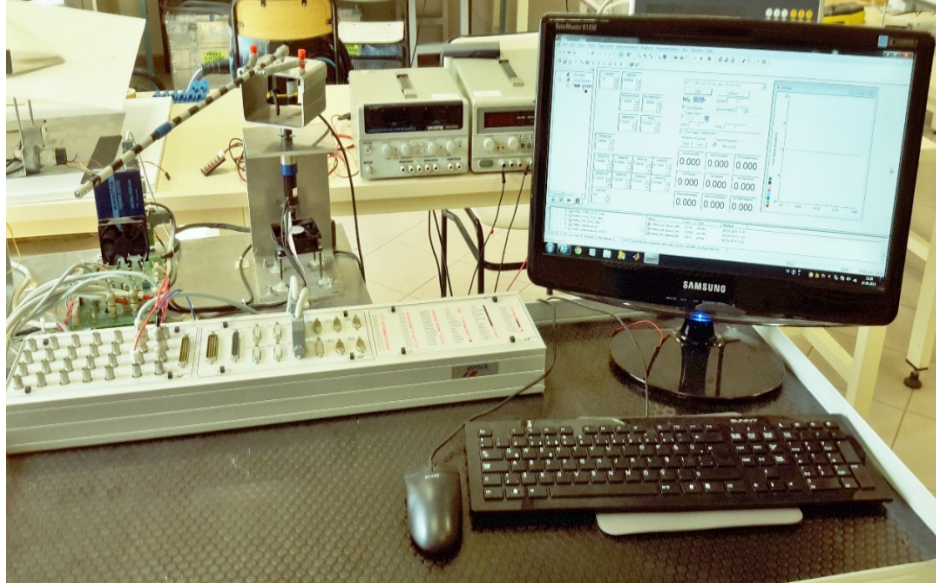
Esnek robot manipulatörler hakkında; sistem modelleme, sensör sistemlerinin seçimi ve kontrol algoritmaları konularını içeren literatür incelemeleri [19,20] numaralı makalelerde 1974-2005 yılları arası için ve 1984-2004 yılları arası için detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Esnek yapılı sistemler için kontrol iki kategoride incelenebilir, model tabanlı yaklaşım [21,22] ve modelden bağımsız yaklaşım. Model tabanlı yaklaşımda; kontrol edilecek sistemin fiziksel özelliklerinin ve titreşim etkilerinin çok iyi analiz edilmesi gerekmektedir, böylece ileri besleme ile sistemdeki titreşimler ortadan kaldırılabilir. Modelden bağımsız kontrol yaklaşımı daha çok geribeslemenin yapıldığı kontrol yöntemidir, sistemin durumlarının tahmin edilmesi ve geribeslenmesiyle kontrol girişi ayarlanmaktadır [23,24]. [20] de yapılan inceleme makalesinde yer alan kontrol şemaları arasında kısaca, hesaplamalı tork kontrolü, direkt ve indirekt uyarlamalı kontrol, tekil düzensizlik kontrolü (singular perturbation control), Lyapunov tabanlı kontrol, geribesleme ile doğrusallaştırma, sliding-mode kontrol, durum geribeslemeli kontrol, ileri beslemeli kontrol, PD kontrol, kuvvet kontrolleri, gözlemci tabanlı kontroller, model referans adaptif kontrol, optimal ve gürbüz kontrol, frekans uzayında kontrol, integral manifold; nöral ağlar [25] gibi akıllı kontroller sayılabilir. Bu sayılan kontrol yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan hibrid kontrolörler ile sistemdeki titreşimlerin minimize oranı arttırılmıştır [26]. En son düzenlenen inceleme; içinde sensörleri, modellemeleri, kontrol yapılarını; hem esnek eklemlili sistemler hem de esnek bağıli sistemler için konu almıştır [27].

2. ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖR SİSTEMİNİN TANITIMI

2.1 Fiziksel Sistemin Tanıtımı

Rijit çubuk esnek eklemlerli manipülatör düzeneği, rijit bir çubuğun döner tabla üstünde, çubuk ve tabla arasına iki adet yayın bağlanmasıyla eklemden esnekliğin sağlandığı bir sistemdir. (Şekil 2.1)'de gösterildiği üzere; esnek eklemin dönme açısı ile döner tablanın dönme açısını ölçen enkoderler, döner platforma hareket sağlayan motor ve motor sürücüsü, uygulanacak kontrol algoritmasının gerçekleştirilmesini sağlayan gerçek zamanlı kontrol kartı ve bilgisayar arayüzü; genel olarak sistemin parçalarını oluşturmaktadır.



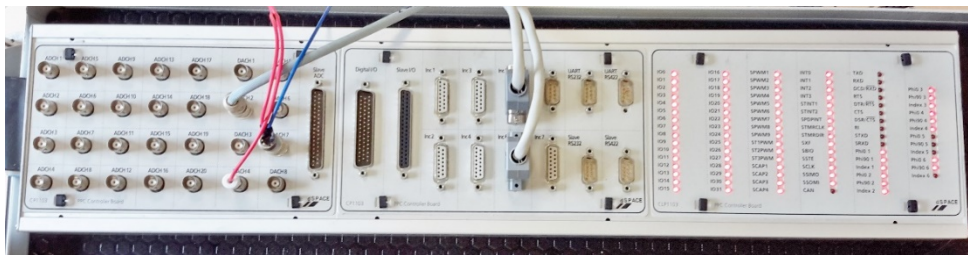
Şekil 2.1 : Esnek eklemlerli manipülatör test düzeneği.

Tasarlanan kontrolörün sisteme uygulanması ve sistemden geri besleme olarak alınan sinyallerin işlenmesi için dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı kullanılmıştır. Döner tablanın dolayısıyla esnek eklemlerli çubuğun, referans sinyali takip edebilmesi için sisteme uygulanacak tork, FAULHABER firmasına ait 36W gücünde, tutma momenti 111 nNm ve motor verimi %77 olan 2444S serisi fırçasız doğru akım motoru (BLDC) tarafından sağlanmaktadır. Motoru sürmek için motor sürücüsü FAULHABER MCBL 5004 serisi fırçasız doğru akım motor sürücüsü

sisteme dahil edilmiştir; kullanılan motor sürücüsü hız ve pozisyon modlarında çalışmayı mümkün kılmaktadır ve bilgisayarla RS232 üzerinden haberleşerek gerekli modların, sürücü parametrelerinin değişimi sağlanabilmektedir. Eklemdaki torku attırabilmek için 246:1 dişli oranı, ortalama 0.5° diş boşluğu ve %60 dişli verimi özelliklerini barındıran FAULHABER firmasına ait planet dişli motora eklenmiştir..

Esnek eklemli manipülatöre ait gerekli açı bilgilerini toplayabilmek için rijit çubuğun döner tablaya bağlandığı ekleme 2000 darbe/tur oranı yani 0.18° çözünürlüğe sahip KOYO marka enkoder kullanılmıştır. Döner tablaya hareket sağlayan motorun açısı; fırçasız doğru akım motorunun hemen arkasına eklenmiş 512 darbe/tur oranına sahip enkoder ile ölçülmektedir, motora eklenen planet dişliden dolayı döner tablanın dönme açısı için bir turda elde edilen darbe sayısı 125952 darbeye yükselmiştir. Eklemin dönme açısal hız bilgisine ve döner tablanın açısal hız bilgisine, açı değerlerinin türevlerinin alınmasıyla ulaşılmıştır.

Esnek eklemli manipülatör üzerinde uygulanacak kontrol algoritmaları MATLAB SIMULINK ortamında oluşturulmuş ve derlenmiştir. Derlenen kodlar, dSPACE DS1103 PPC gerçek zamanlı kontrol kartı kullanılarak kontrol sinyallerinin motora gönderilmesini ve enkoderlerden gelen sinyallerin bilgisayarda işlenmesini sağlamaktadır. dSPACE kontrol kartı; DS817 bağlantı kartı, CLP1103 giriş/çıkış arabiriminden oluşmaktadır. CLP1103 giriş/çıkış biriminde Şekil 2.2’de 20 adet ADC girişi, 8 adet DAC çıkışı, 7 adet enkoder arabirimi, seri haberleşme portu ve dijital giriş/çıkış portu bulunmaktadır.



Şekil 2.2 : CLP1103 Giriş/Çıkış Birimi

Esnek eklemli manipülatör sisteminde, rijit çubuğun ekleme bağlantı noktasından çubuğun uç işlevci noktası yönünde 0.121 m uzakta iki yay bağlanmıştır. Bu iki yayın diğer uçları, birbirinin simetrisi olacak uzaklıkta tablanın üzerinde yer almaktadır. Kullanılan yayların esneme katsayısı 58.86 N/m olarak seçilmiştir. Rijit eklem uzunluğu 0.6 m, ağırlığı 0.078 kg olarak ölçülmüş ve hesaplanan eylemsizlik momenti

yaklaşık 0.0052 kgm^2 olarak bulunmuştur. Döner tabla 0.6 kg olarak ölçülmüş ve eylemsizlik momenti yaklaşık 0.001243 kgm^2 olarak hesaplanmıştır. Döner tablanın hesaplanan eylemsizlik momentine, motorun ve planet dişlinin eylemsizlik momenti eklendiği zaman toplam bulunan ve tez sırasında kullanılan eylemsizlik momenti 0.039 kgm^2 olarak bulunmuştur.an görüntüsü yer almaktadır. Çizelge 2.1’de ise sistemde kullanılan parametreler ve değerleri yer almaktadır.

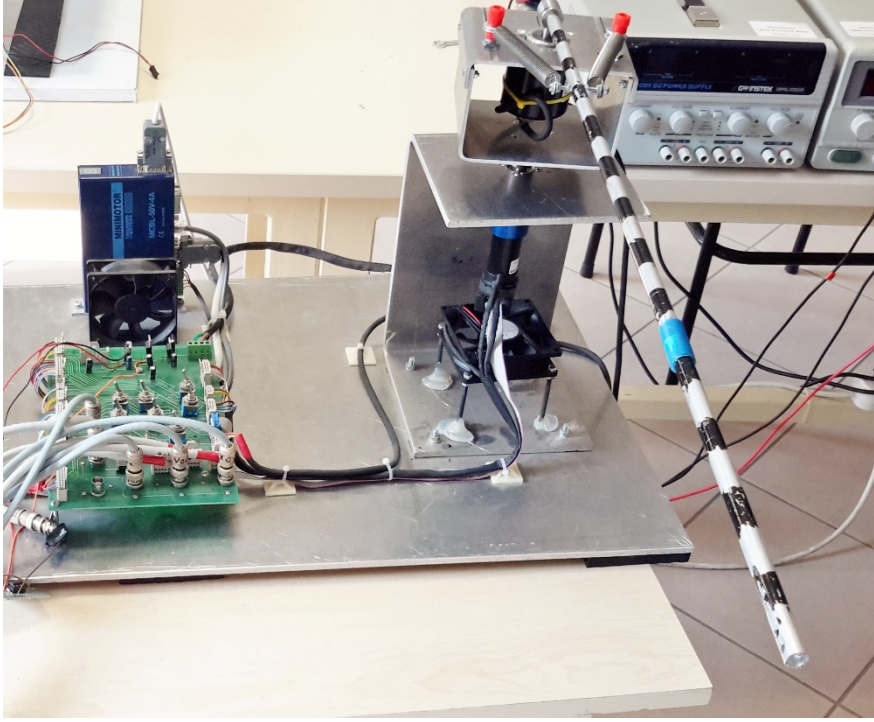
Çizelge 2.1 : Sistemde kullanılan parametrelerin değerleri ve birimleri

Sistem Parametreleri	Değerleri	Birimi
α_0	58.731	Derece
J_{tabla}	0.001243	kgm^2
J_{tabla2}	0.039	kgm^2
J_{cubuk}	0.0052	kgm^2
k	58.86	N/m
R_m	2.1	Ohm
B_m	0.004	Nsn^2/m
η_m	0.77	-
η_g	0.60	-
K_g	246:1	-
K_m	0.001026	Nm/A
K_t	0.0098	V/rad/sn
L_0	0.0057	m
R_L	0.117	m
r_t	0.015	m
$r_{t,k}$	0.015	m
d_t	0.02	m
L_{cubuk}	0.6	m
m_{cubuk}	0.078	kg
m_{tabla}	0.6	kg

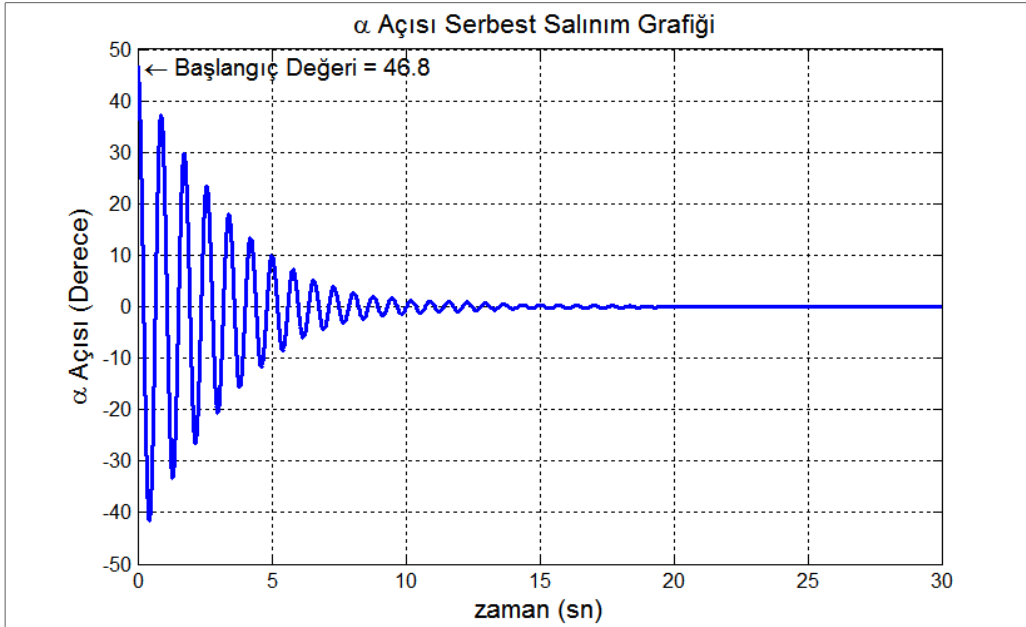
2.2 Fiziksel Sistemde Parametre Tahmini

Esnek eklemli manipülatörde bulunan ve hesaplanması sırasında hata olabileceği düşünülen parametreler için Matlab/Simulink’te bulunan kontrol ve tahmin aracı menajeri (Control and Estimation Tool Manager) kullanılmıştır. Tablanın sabit tutulup, sadece yaylarla tablaya bağlı bulunan çubuğun, belli bir başlangıç açısı ile serbest bırakılıp sönümlenmesi sırasında gerçek sistemden toplanan datalar, parametre tahminini gerçekleştiren programa girdi ve çıktı değerleri olarak kullanılmıştır. Aşağıda dataların toplandığı sistem ve çubuk salınım açısı dataları yer almaktadır;

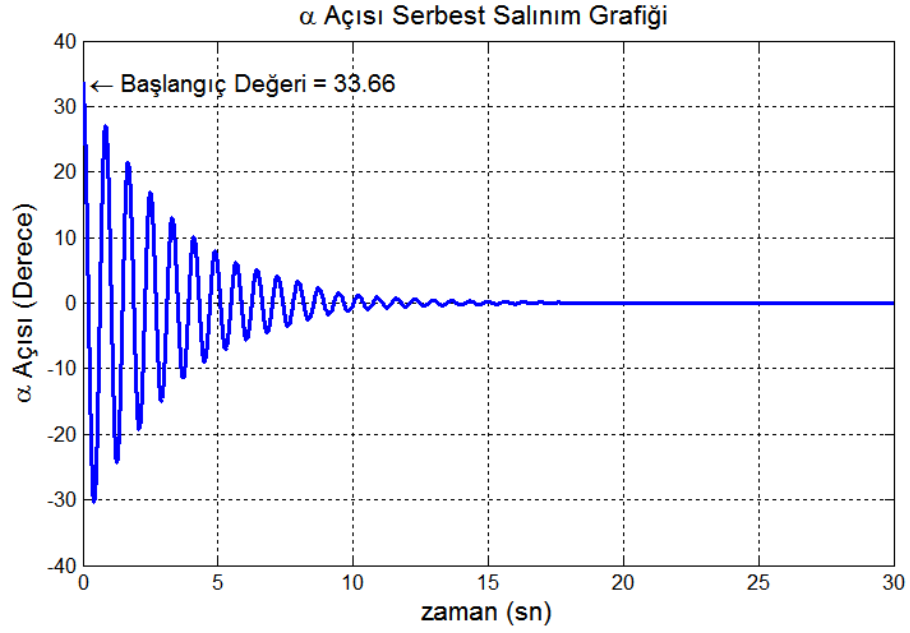
dataların birinci saniyesindeki değer, çubuğun salınımına başlaması sırasında serbest bırakıldığı değeri ifade etmektedir.



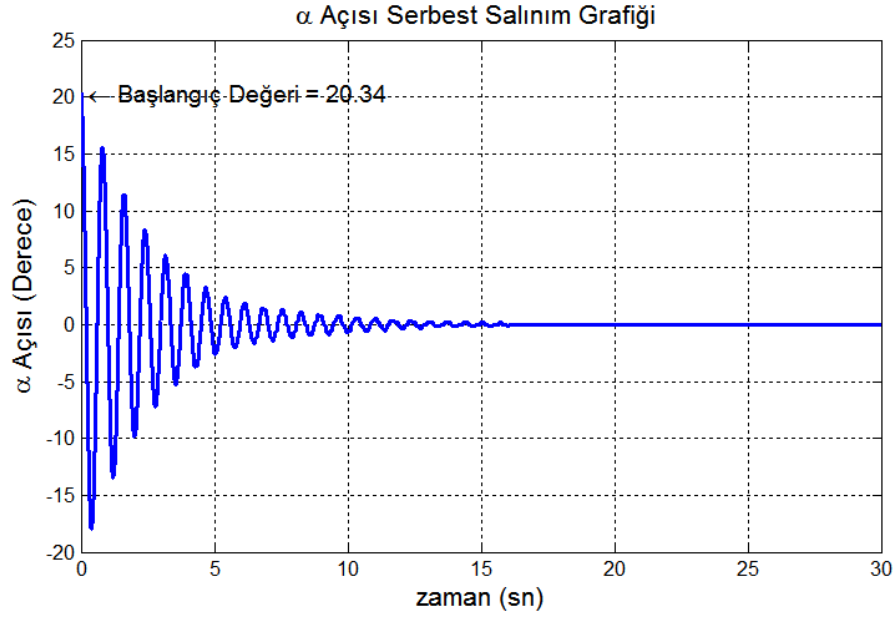
şekil 2.3 : Salınım datalarının toplandığı esnek eklemlı maniplatr



şekil 2.4 : Çubuğun salınım datası, salınımına başlangıç aı durumu = 46.8°

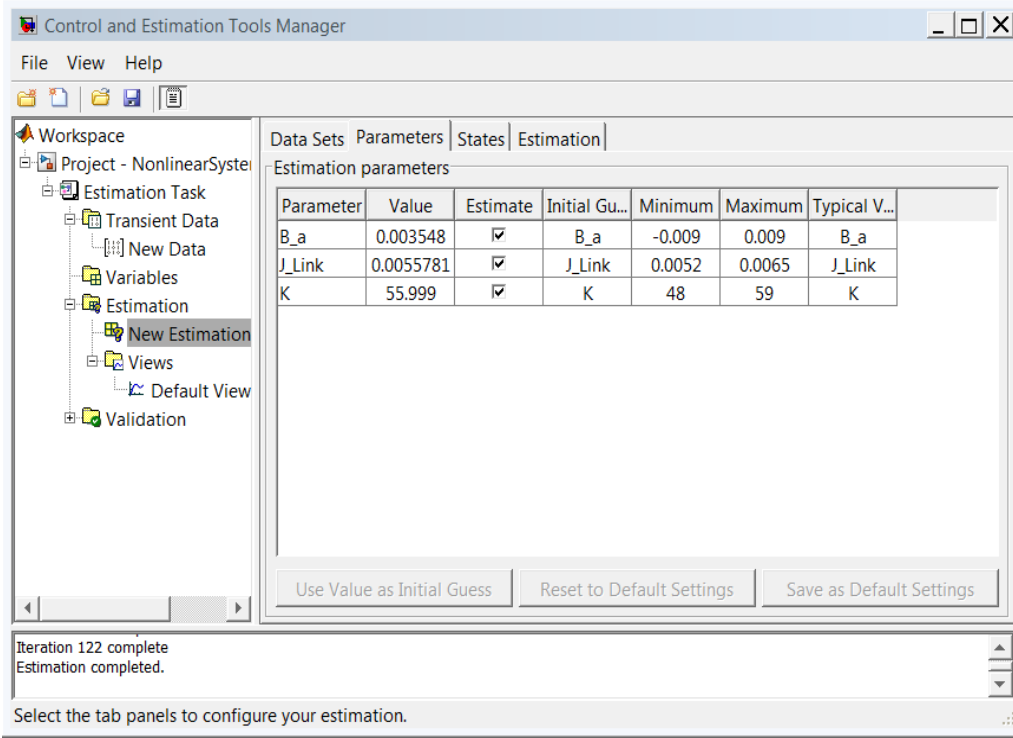


Şekil 2.5 : Çubuğun salınım datası, salınım başlangıç açısı durumu = 33.66°

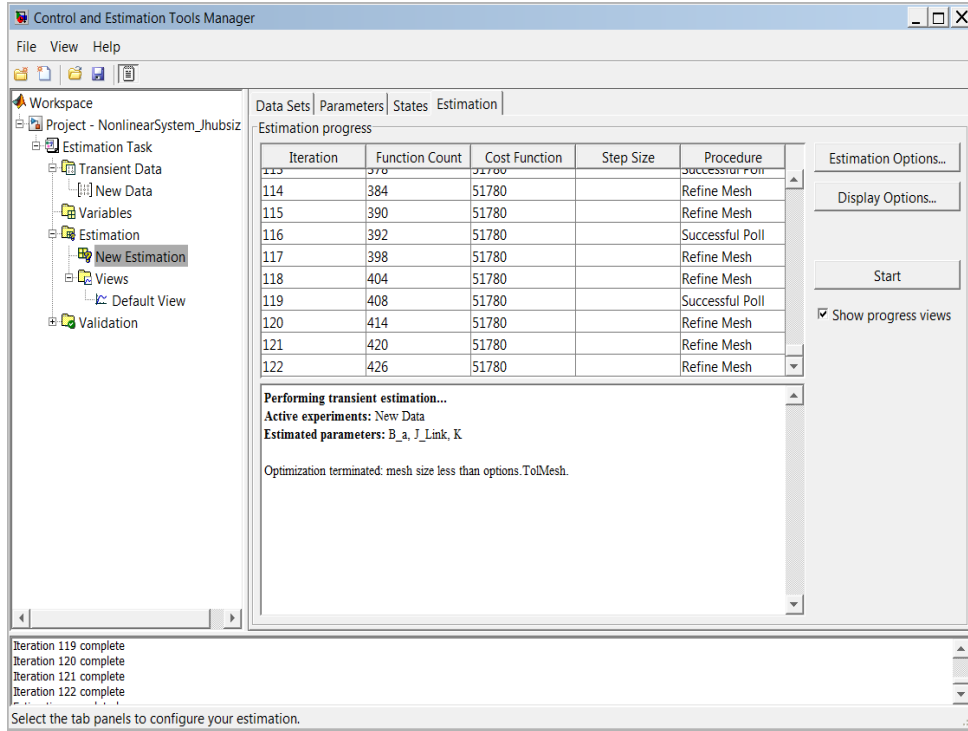


Şekil 2.6 : Çubuğun salınım datası, salınım başlangıç açısı durumu = 20.34°

Toplanan datalar ile tahmin yapılırken; eklemde yalnızca viskoz sürtünme olduğu varsayılarak, çubuğun eylemsizlik momenti, sürtünme katsayısı ve yayın esneklik katsayısı hesaplanmıştır, yapılan tahmin sırasında kullanılan MATLAB/SIMULINK aracına ait arayüz Şekil 2.7’de ve Şekil 2.8’de, tahmin edilecek parametreleri içeren sistem modeli de Şekil 2.9’da gösterilmektedir.



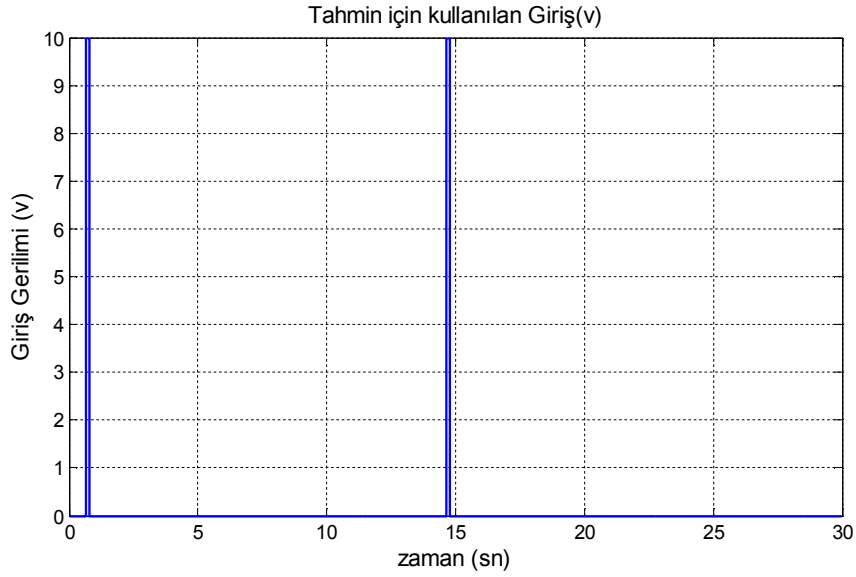
Şekil 2.7 : MATLAB/SIMULINK kontrol ve tahmin araç kutuları menajeri



Şekil 2.8 : MATLAB/SIMULINK kontrol ve tahmin araç kutuları menajeri

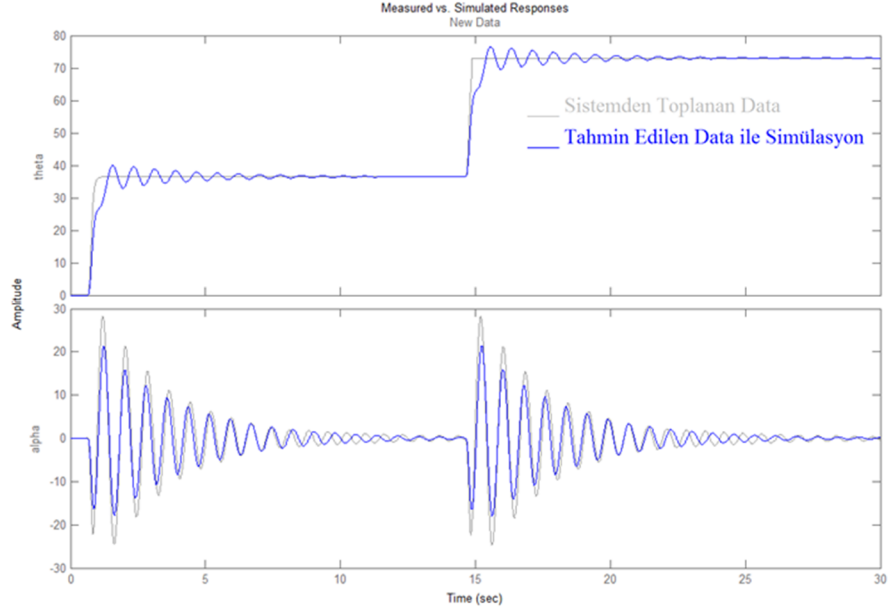
Çizelge 2.2 : Toplanan data'lara göre tahmin edilen parametre değ'eri

Tahmin Data Setleri	Tahmin Edilen Parametreler		
	B_a	J_{cubuk}	k
Data Seti 1	0,003548	0,0055781	55,999
Data Seti 2	0,0036	0,0055926	54,4
Data Seti 3	0,0041	0,0053007	56,511
Ortalama	0,00374933	0,00549047	55,63666667



Şekil 2.11 : B_a ve J_{tabla} parametrelerinin tahmini sırasında kullanılan sistem girişı

Çizelge 2.2' de elde edilen değ'eri kullanılarak bu sefer tablanın eylemsizlik momenti, motor sürtünme katsayısının tahmin edilebilmesi için fiziksel sisteme Şekil 2.11' deki giriş uygulanmış açık çevrim tabla açısı ve çubuk salınım açısı data'lari toplanmış ve MATLAB/SIMULINK tahmin aracında çalıştırılmıştır.



Şekil 2.12 : B_a ve J_{tabla} parametrelerinin tahmin edilmesi sonucu sistem cevabı

Tahminler sonucunda bulunan değerler kullanılarak sistem cevabı ve toplanan data üstüste çizdirildiğinde şekil 2.12 elde edilmektedir. Çizelge 2.3'te tahmin sonucu elde edilen parametreler bulunmaktadır.

Çizelge 2.3 : Toplanan datalara göre tahmin edilen parametre değerleri

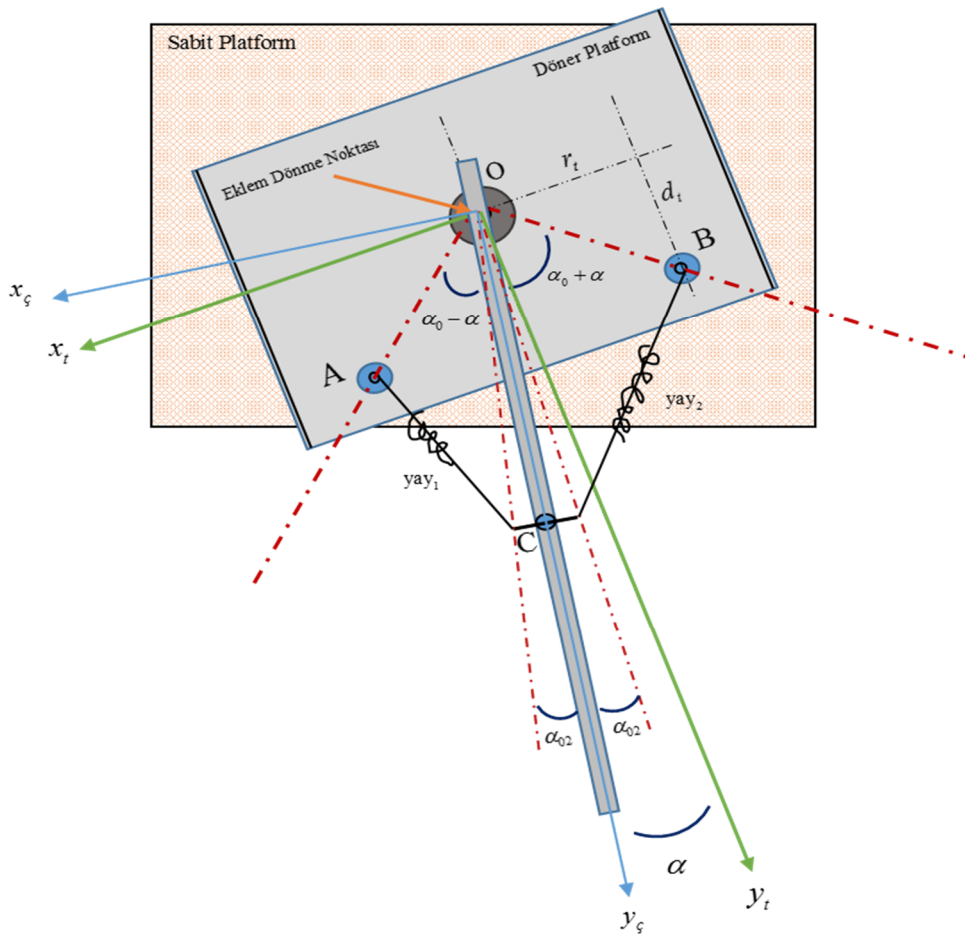
Tahmin Data Setleri	Tahmin Edilen Parametreler	
	B_t	J_{tabla}
Data Seti 1	0.004	0,0405354
Data Seti 2	0.003984	0,040138

Şekil 3.1’de bulunan α_0 sabiti; sistem hareketsiz durumda iken yayın uzunluğunun, kosinüs teoremine göre bulunması için kullanılacaktır. Rijit çubuk üzerindeki bağlantı noktası kaçıklığından dolayı α_0 açısına ulaşabilmek için α_{01} ve α_{02} sabit parametreleri; r_t yayın tablaya bağlantı noktasının dönme merkezine dik uzaklığı, d_t yayın tablaya bağlantı noktasının dönme merkezine yatay uzaklığı, r_{t_k} çubuk üzerindeki bağlantı noktası kaçıklığı ve R_L yayın çubuk üzerindeki bağlantı noktasının dönme merkezine olan uzaklığı olmak üzere Denklem 3.2 ve Denklem 3.3’ teki gibi tanımlanmıştır.

$$\alpha_{01} = \tan^{-1}(r_t/d_t) \quad (3.2)$$

$$\alpha_{02} = \tan^{-1}(r_{t_k}/R_L) \quad (3.3)$$

$$\alpha_0 = \alpha_{01} - \alpha_{02} \quad (3.4)$$



Şekil 3.2 : Matematiksel denklemdeki sabit ve değişkenlerin tanımlanması

Yayın, sistem dışında hiç bir kuvvet altında gerilmemiş olduğu durumda uzunluğu L_0 iken sisteme bağlı olduğu durumda uzunluğu birinci yay için L_1 , ikinci yay için L_2 'dir. L_1 ve L_2 yay uzunlukları sistem hareket ettikçe değişmektedir, bu uzunluklar; Denklem 3.5'de ve Denkem 3.6' te olduğu gibi yayın gerilmemiş sabit uzunluğu L_0 ve yayın boyundaki asıl değişimi ifade eden L_{N1} ve L_{N2} değişken uzunluklarının toplamından oluşmaktadır.

$$L_1 = L_{N1} + L_0 \quad (3.5)$$

$$L_2 = L_{N2} + L_0 \quad (3.6)$$

Sistem hareket halinde iken; Şekil 3.2'de gösterilen, tabla eksenleri ve rijit çubuk eksenleri arasında eklemlerdeki esneklikten doğan sapma ya da salınım açısı α kullanılarak ve L_1 , L_2 uzunlukları kosinüs teoreminden yararlanılarak Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'de olduğu şekilde bulunmuştur.

$$L_1^2 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 - 2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha) \quad (3.7)$$

$$L_2^2 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 - 2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \cdot \cos(\alpha_0 + \alpha) \quad (3.8)$$

Denklemlerdeki sabit parametreler Denklem 3.9 ve 3.10 ile yeniden belirtilebilir.

$$C_1 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 \quad (3.9)$$

$$C_2 = -2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \quad (3.10)$$

Denklem 3.9 ve 3.10'da kısaltılan sabit parametreler Denklem 3.7 ve 3.8' de tekrar yerine konulduğunda şu ifadeler ulaşılabilir.

$$L_1 = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} \quad (3.11)$$

$$L_2 = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} \quad (3.12)$$

Denklem 3.11 – 3.12’den yayın gerilmemiş uzunluğu L_0 çıkarıldığı zaman; sistem hareket halinde iken yayda meydana gelen asıl uzama miktarları L_{N1} ve L_{N2} bulunabilir.

$$L_{N1} = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} - L_0 \quad (3.13)$$

$$L_{N2} = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} - L_0 \quad (3.14)$$

Denklem 3.13 – 3.14 kullanılarak; sistemin yaylardan dolayı kazandığı toplam potansiyel enerjisi, Denklem 3.15’te gösterilmiştir.

$$PE = \frac{1}{2}k(L_{N1})^2 + \frac{1}{2}k(L_{N2})^2 \quad (3.15)$$

$$PE = \frac{1}{2}k \left(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha) - 2L_0\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} + L_0^2 \right) + \frac{1}{2}k \left(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha) - 2L_0\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} + L_0^2 \right) \quad (3.16)$$

Tablanın dönme açısı θ , çubuğun dönme ve salınım açısı toplamı $\theta + \alpha$ kullanılarak sistemin toplam kinetik enerjisi bulunmaktadır.

$$KE = \frac{1}{2}J_{tabla}\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}J_{cubuk}(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (3.17)$$

Kinetik enerji ve potansiyel enerji farkının, sistem değişkenlerine göre kısmi türevlerini alınmasıyla dinamik denklemin bulunmasını mümkün kılan Lagrange denklemi, L kinetik enerji ile potansiyel enerji farkını ifade etmekle birlikte Denklem 3.18’ deki şekilde yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \quad (3.18)$$

Sistem değişkenleri θ ve α için Denklem 3.18 uyarlanarak yeniden yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau - B_m \dot{\theta} \quad (3.19)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad (3.20)$$

Denklem 3.19 – 3.20’ de bulunan kısmi türevler alınarak sistemin dinamik denklemleri Denklem 3.21 – 3.22’ de gösterildiği gibi bulunur.

$$J_{cubuk}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{tabla}\ddot{\theta} = \tau - B_m\dot{\theta} \quad (3.21)$$

$$J_{cubuk}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + \frac{1}{2}k(\Gamma_{1\alpha} + \Gamma_{2\alpha}) = 0$$

$$\Gamma_{1\alpha} = \left(\sin(\alpha_0 + \alpha) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)}} - 1 \right) \right)$$

$$\Gamma_{2\alpha} = \left(\sin(\alpha_0 - \alpha) \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)}} \right) \right) \quad (3.22)$$

Denklem 3.21’ deki B_m ve τ parametreleri sırasıyla motor ve tabla arasındaki sürtünme katsayısı ve motor tarafından döner tablanın hareketini sağlamak için üretilen torku ifade etmektedir. Momentin, sistemin girişi olan gerilim $v(t)$ ile ilişkisi, dolayısıyla motor terminal akımı ile açısal hız arasındaki ifade Denklem 3.23 ve Denklem 3.24 ile ifade edilebilir.

$$i_m = \frac{v - K_m K_g \dot{\theta}}{R_m} \quad (3.23)$$

$$i_m = \frac{\tau}{K_t K_g} \quad (3.24)$$

Denklem 3.23’ta ve 3.24’da kullanılan parametreler, K_m motor hız sabitini, K_g planet dişlinin oranını K_t motor akım sabitini, R_m motor terminal direncini göstermektedir. Denklem 3.23’a ve Denklem 3.24’a motorun verimi η_m ve planet dişlinin verimi η_g eklenmesiyle; tork, gerilim ve açısal hız arasındaki bağıntı Denklem 3.25’teki şekilde bulunup Denklem 3.21’deki yerine konulabilir.

$$\tau = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m} v - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m}{R_m} \dot{\theta} \quad (3.25)$$

$$J_{cubuk}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{tabla}\ddot{\theta} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m} v - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m}{R_m} \dot{\theta} - \frac{B_m * R_m}{R_m} \dot{\theta} \quad (3.26)$$

Denklem 3.22 ve Denklem 3.26 kullanılarak doğrusal olmayan denklemler, durum değişkenleri cinsinden yazılabilir.

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{2} \frac{kC_2}{J_{tabla}} (\Gamma_{1\alpha} + \Gamma_{2\alpha}) + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{tabla}} v - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{tabla}} \dot{\theta} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} = & -\frac{1}{2} kC_2 (\Gamma_{1\alpha} + \Gamma_{2\alpha}) \left\{ \frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk} J_{tabla}} \right\} - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{tabla}} v + \dots \\ & + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{tabla}} \dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Durum değişkenleri; tablanın dönme açısı θ , çubuk salınım açısı α , dönme ve salınım açılarının türevleri yani açısal hızları $\dot{\theta}$, $\dot{\alpha}$ olarak alındığı takdirde sistemin durum değişkenleri; sabit parametrelerden oluşan $C_{\dot{\theta}}$ ve C_v kısaltmalarının yapılmasıyla birlikte aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$C_{\dot{\theta}} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{tabla}} \quad (3.29)$$

$$C_v = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{tabla}} \quad (3.30)$$

$$[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [\theta \ \alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\alpha}]^T \quad (3.31)$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.32)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{1}{2} \frac{kC_2}{J_{tabla}} (\Gamma_{1x_2} + \Gamma_{2x_2}) - C_{\dot{\theta}} x_3 \\ -\frac{1}{2} kC_2 (\Gamma_{1x_2} + \Gamma_{2x_2}) \left\{ \frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk} J_{tabla}} \right\} + C_{\dot{\theta}} x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_v \\ -C_v \end{bmatrix} v(t) \quad (3.33)$$

3.2 Sistemin Doğrusallaştırılmış Matematiksel Modeli

Esnek eklemlili manipülatör sisteminin dinamik denklemlerindeki doğrusallığı bozan ve Denklem 3.22'de bulunan trigonometrik ifadeler $\Gamma_{1\alpha}$ ve $\Gamma_{2\alpha}$; Denklem 3.34'teki Taylor serisinin ilk iki terimi kullanılarak $\alpha = 0$ civarında doğrusallaştırıldıktan sonra sistemin doğrusal dinamik denklemlerine aşağıdaki gibi ulaşılabilir.

$$(\Gamma_{1\alpha d} + \Gamma_{2\alpha d}) = f(\alpha) = f(x) + \frac{\partial f}{\partial \alpha}(x)(\alpha - x) \quad x = 0 \quad (3.34)$$

$$\begin{aligned}\Gamma_{1\alpha d} &= \sin(\alpha_0) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} - 1 \right) \alpha \\ \Gamma_{2\alpha d} &= \sin(\alpha_0) \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} \right) \alpha\end{aligned}\quad (3.35)$$

$$f(0) = (\Gamma_{1\alpha d} + \Gamma_{2\alpha d}) = 0$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \Gamma_{1\alpha}(0)}{\partial \alpha} &= \frac{L_0 C_2 \sin^2(\alpha_0)}{2(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0))^{3/2}} + \cos(\alpha_0) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} - 1 \right) \\ \frac{\partial \Gamma_{2\alpha}(0)}{\partial \alpha} &= \frac{L_0 C_2 \sin^2(\alpha_0)}{2(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0))^{3/2}} + \cos(\alpha_0) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} - 1 \right)\end{aligned}\quad (3.36)$$

$$\frac{\partial f(0)}{\partial \alpha} = \frac{\partial \Gamma_{1\alpha}(0)}{\partial \alpha} + \frac{\partial \Gamma_{2\alpha}(0)}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = 2 \left(\frac{L_0 C_2 \sin^2(\alpha_0)}{2(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0))^{3/2}} + \cos(\alpha_0) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} - 1 \right) \right) \alpha \quad (3.37)$$

Denklem 3.37'deki doğrusallaştırılmış ifadenin sabit kısmı için Denklem 3.38'deki $\Gamma_{\alpha d}$ kısaltması uygulanabilir. Doğrusallaştırmadan sonra sistemin dinamik denklemleri Denklem 3.39 – 3.40'da, durum uzayı gösterimi ise Denklem 3.41 'deki gibi gösterilebilir.

$$\Gamma_{\alpha d} = 2 \left(\frac{L_0 C_2 \sin^2(\alpha_0)}{2(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0))^{3/2}} + \cos(\alpha_0) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0)}} - 1 \right) \right) \quad (3.38)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{kC_2}{J_{tabla}} \Gamma_{\alpha d} \alpha + C_v v - C_{\dot{\theta}} \dot{\theta} \quad (3.39)$$

$$\ddot{\alpha} = -kC_2 \left\{ \frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk} J_{tabla}} \right\} \Gamma_{\alpha d} \alpha - C_v v + C_{\dot{\theta}} \dot{\theta} \quad (3.40)$$

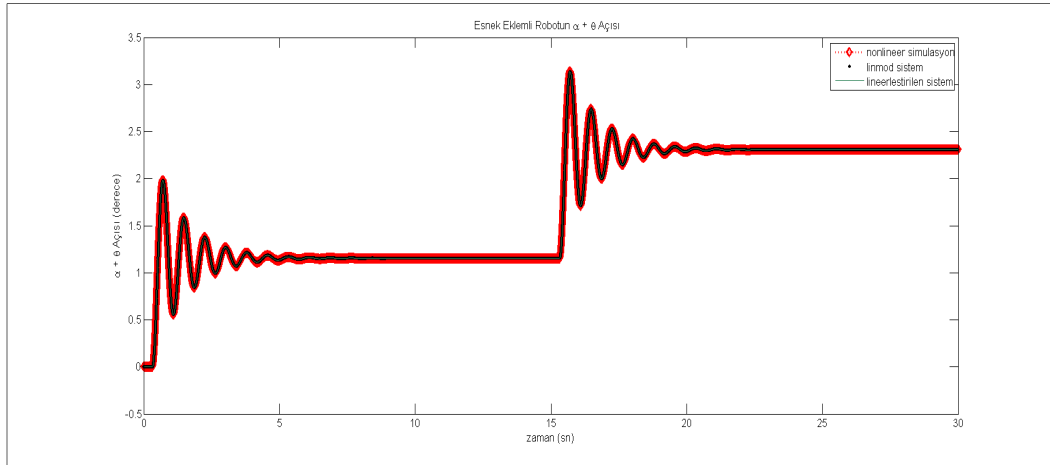
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & kC_2 \Gamma_{\alpha d} \left(\frac{1}{J_{tabla}} \right) & -C_{\dot{\theta}} & 0 \\ 0 & -kC_2 \Gamma_{\alpha d} \left(\frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk} J_{tabla}} \right) & C_{\dot{\theta}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_v \\ -C_v \end{bmatrix} v \quad (3.41)$$

Esnek eklemli manipülatöre ait, Bölüm 2.1 içindeki Çizelge 2.1 de bulunan sistem sabitleri yerine yazıldığı zaman, Denklem 3.42'deki sistemin sayısallaştırılmış doğrusal haline ulaşılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 8.233 & -3.401 & 0 \\ 0 & -69.611 & 3.401 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 13.0842 \\ -13.0842 \end{bmatrix} v(t) \quad (3.42)$$

Bu tez kapsamında sistem çıkışı; döner tablanın açısı θ ve rijit çubuğun salınım açısı α toplamı olarak alınarak, esnek eklemli manipülatör sistemini, tek girişli tek çıkışlı sistem durumuna getirilmiştir. Çıkışın durum uzay formu Denklem 3.43'deki gibidir.

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} \quad (3.43)$$



Şekil 3.3 : Doğrusal model ve doğrusal olmayan modelin karşılaştırılması.

Şekil 3.3' te sistemin doğrusal olmayan MATLAB/SIMULINK modeli, hem linmod komutu ile hem de Taylor Serisinden elde edilen lineer modelle karşılaştırılmıştır. Benzer sonuçlara ulaşıldığı Şekil 3.3'te görülmektedir. Tez boyunca kullanılacak olan doğrusallaştırılmış model Taylor serisi sonucunda bulunan ve Denklem (3.42) ve Denklem (3.43)'te yer alan durum uzayı modeli kullanılacaktır.

4. ESNEK EKLEMLİ MANİPÜLATÖRÜN KOTROLÜ

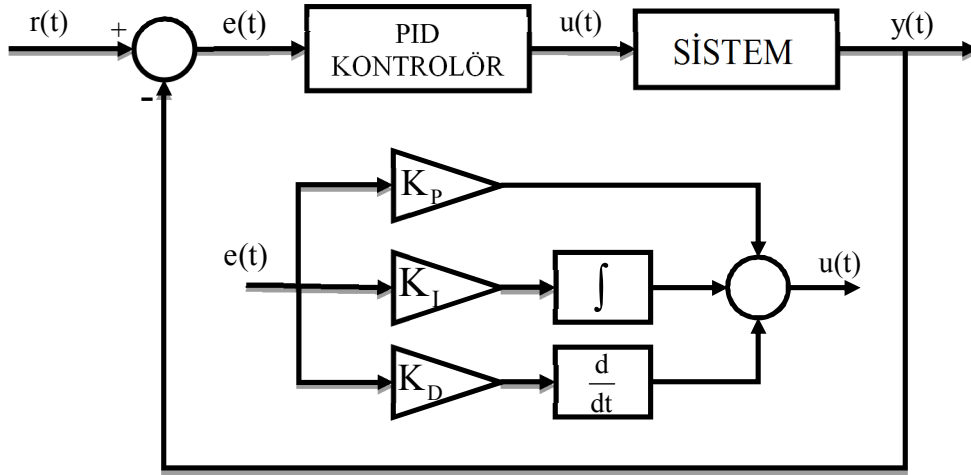
4.1 PID Kontrol

Endüstride çok sık kullanılan ve uygulaması basit kontrol yöntemlerinden olan Oransal-Integral-Türevsel PID kontrol, çıkış sinyallerinin geri beslenmesi ile giriş sinyali arasında oluşan hatayı minimize etmeyi amaçlamaktadır. Tek Girişli Tek Çıkışlı sistemlerde olduğu kadar Çok Girişli Çok Çıkışlı sistemlere de başarılı şekilde uygulanabilmektedir. P oransal parametresi mevcut anlık hatayı göz önünde bulundurup giriş sinyali ile çıkış sinyali arasındaki oranın azalmasını sağlamaktadır. I integral parametresi geçmiş hataların toplamı ifade eder, sistemin derecesini arttırmaktadır ve kalıcı durum hatasını sıfırlamak için kullanılır. D türevsel parametresi gelecekte öngörülen hataların tahmini olup, hata sinyalinin değişim hızıyla orantılı olarak kontrolör çıkışına etki eder, dolayısı ile hata değişiminin olmadığı durumlarda kontrolör çıkış üretmemektedir. Genel olarak bu kontrolörler ihtiyaç durumuna göre ; PI, PD, PID formlarında da sistemlerde kullanılabilirler. Matematiksel olarak kontrolör çıkışı; $e(t)$ hata sinyali, $r(t)$ giriş sinyali, $y(t)$ sistemin çıkış sinyali, $u(t)$ kontrolcü çıkış sinyali aynı zamanda sistem girişi, K_p, K_I, K_D PID kontrolcü katsayıları olmak üzere Denklem (4.1)'deki gibi ifade edilebilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

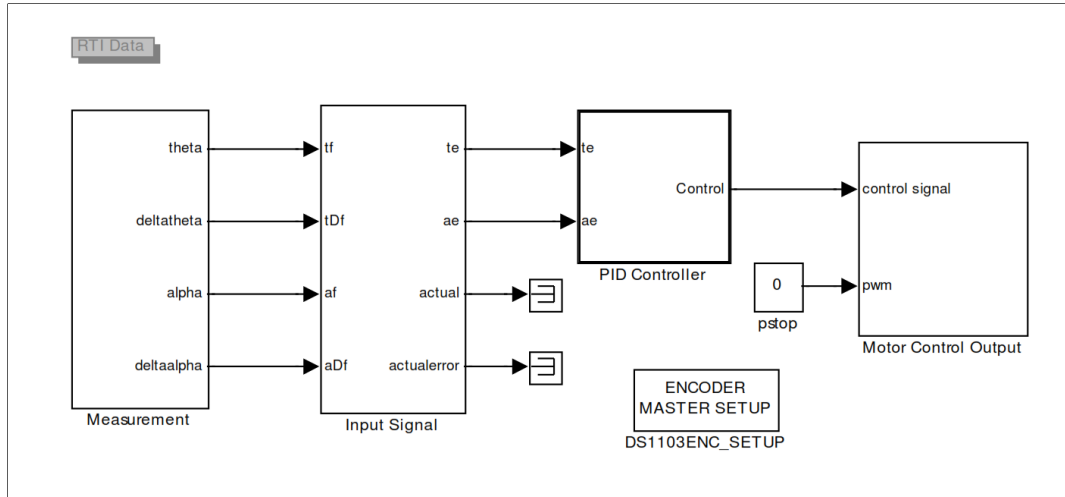
$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4.2)$$

PID kontrolcü katsayılarının bulunması için deneme-yanılma yöntemi, Ziegler-Nichols yöntemi, Cohen-Coon yöntemi ve Genetik algoritması, doğrusal karesel düzenleyici gibi optimizasyon algoritmaları ile yazılım yöntemleri şeklinde farklı yöntemler uygulanabilmektedir. Bir PID kontrolcüsü ile yapılan kapalı çevrim kontrolüne ait yapı Şekil 4.1'deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 4.1 : PID kontrolörün genel uygulanişı

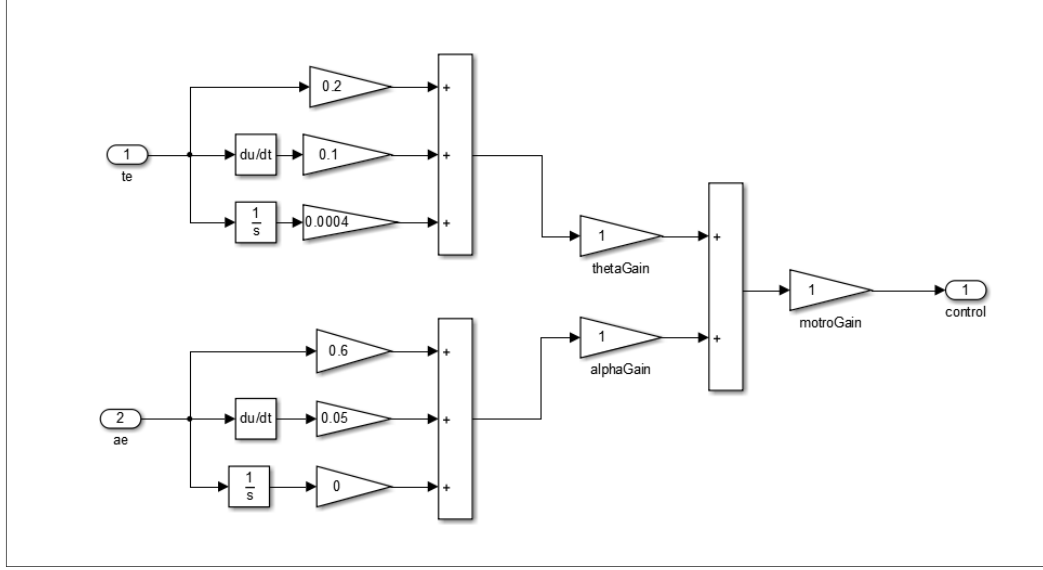
Esnek eklemlı manipölör sisteminde; $\alpha(t)$ çubuk salınım açısı, $\theta(t)$ döner tabla açısı olmak üzere iki adet sistem çıkışı, $v(t)$ motor giriş gerilimi olmak üzere bir sistem girişı bulunmaktadır. Çubuk salınım açısının referans ile farkı için uygulanan PID kontrolör çıkışı ile döner tabla açısının referansı ile farkı için uygulanan PID kontrolör çıkışı toplanarak esnek eklemlı manipölör sistemine kontrol girişı olarak uygulanmıştır, böylece sistem tek giriş tek çıkışlı sistem olarak düşünölmüştür. Matlab/Simulink ortamında dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı ile tasarlanmış olan PID kontrolör Şekil 4.2 de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : PID kontrolün MATLAB/SIMULINK'te dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kartında gerçekleşmesi için oluşturulan model.

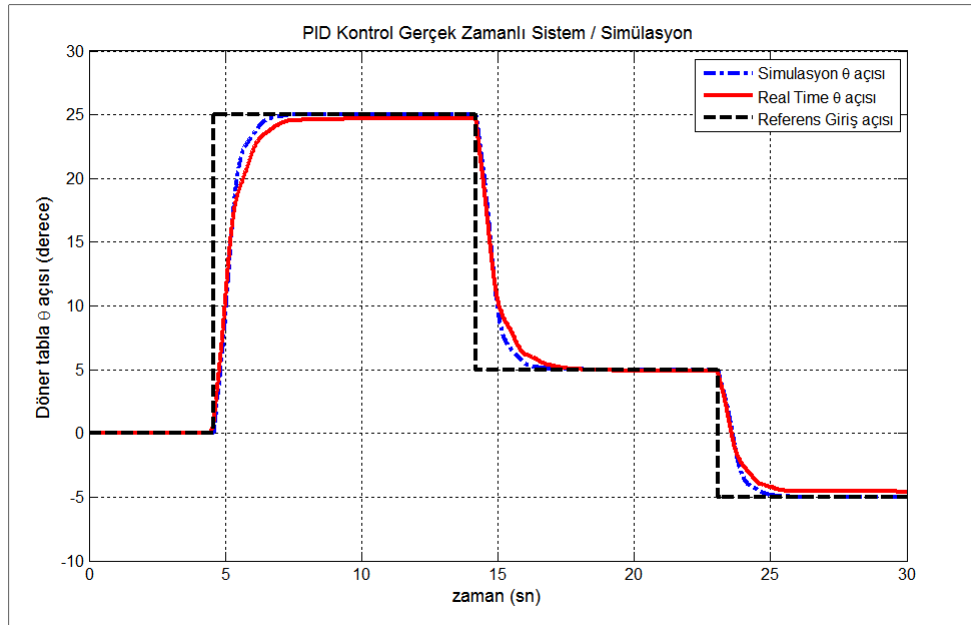
Ölçüm bloğu içinde bulunan ve enkoderlerden alınan açi ve açısal hız bilgileri, Giriş sinyali bloğu içinde bulunan referans sinyallerden çıkarılarak hata sinyalleri oluşturulmuş, PID kontrolör bloğu içinde bulunan kontrolör ve Şekil 4.3'de gösterilen

PID katsayıları ile çarpıldıktan sonra tekrar döner tablayı hareket ettiren motora giriş olarak uygulanmıştır.

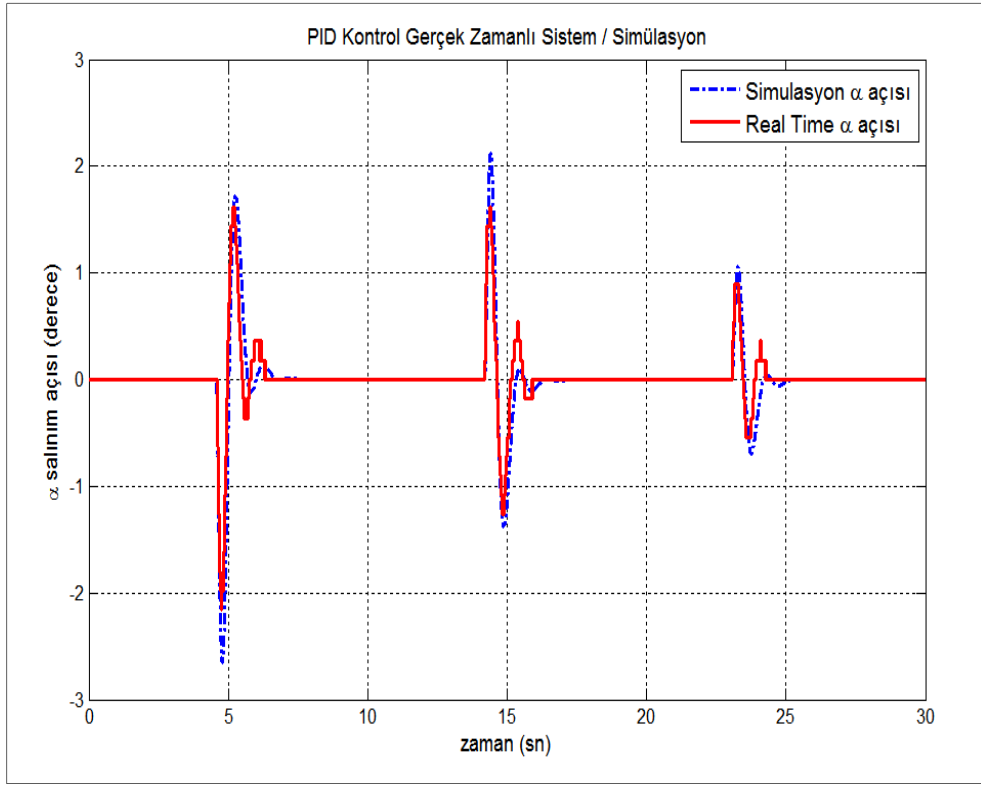


Şekil 4.3 : MATLAB/SIMULINK ortamında fiziksel sistem için hazırlanan modelin kontrolör iç yapısı.

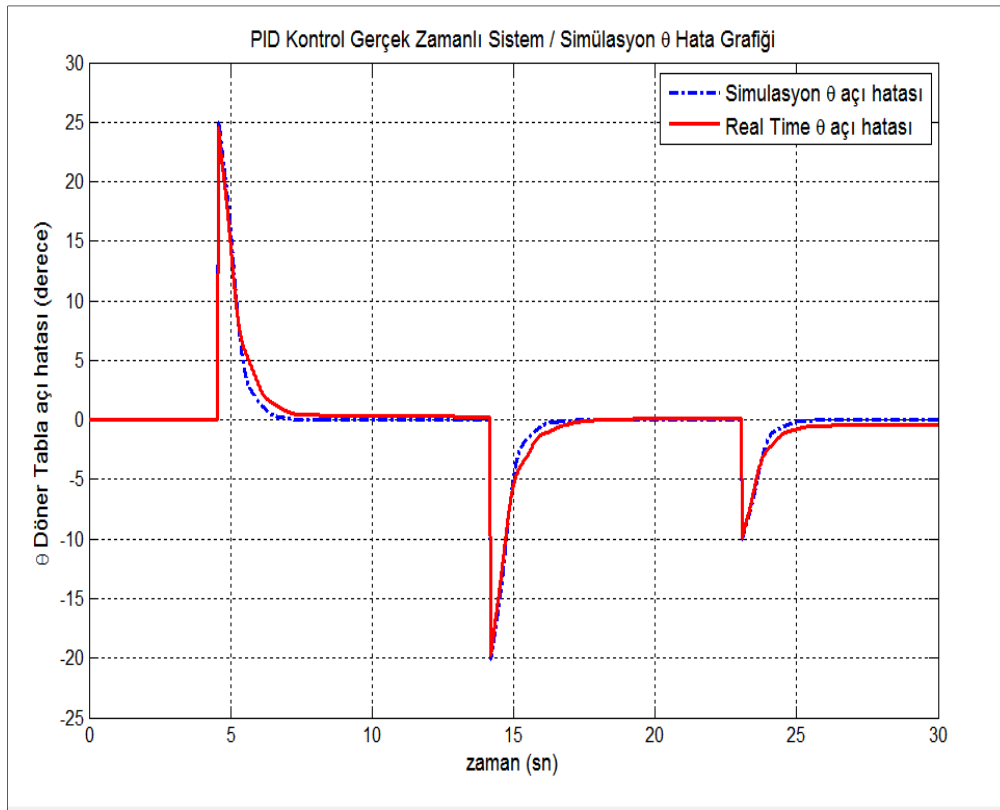
Doğrusal olmayan sistemin Matlab/Simülink'te tasarlanan matematiksel modeli kullanılarak aynı PID kontrolör yapısı uygulanmıştır, Bölüm 2.2 de anlatıldığı üzere tahmin edilen sistem parametreleri ile aynı sistem girişi için çalıştırılan simülasyon sonucu elde edilen grafikler karşılaştırılmıştır.



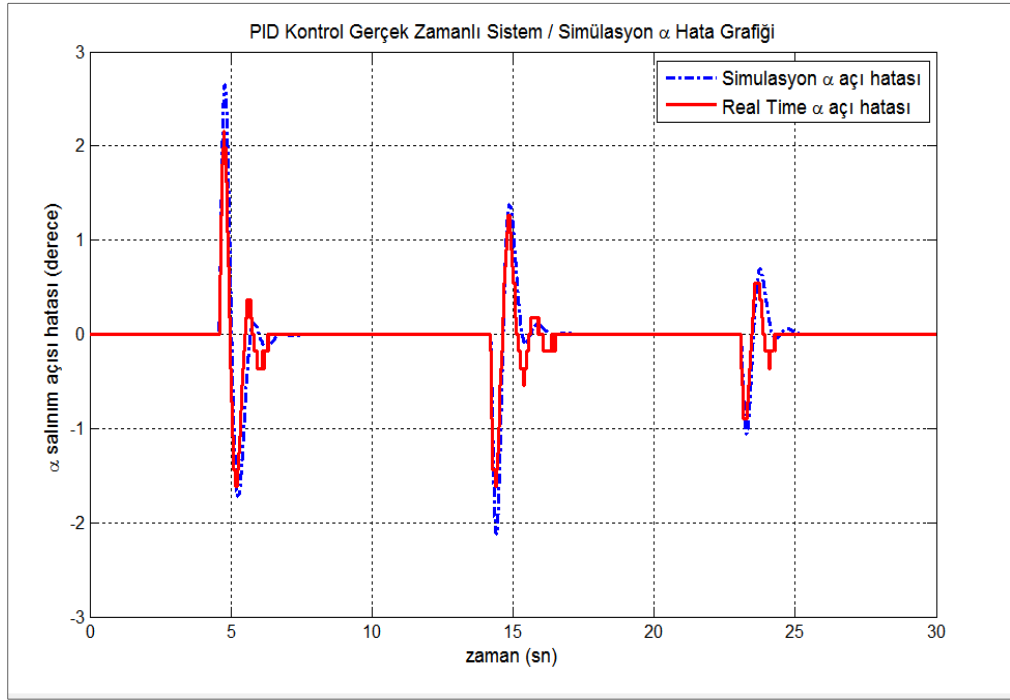
Şekil 4.4 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun cevaplarının karşılaştırılması.



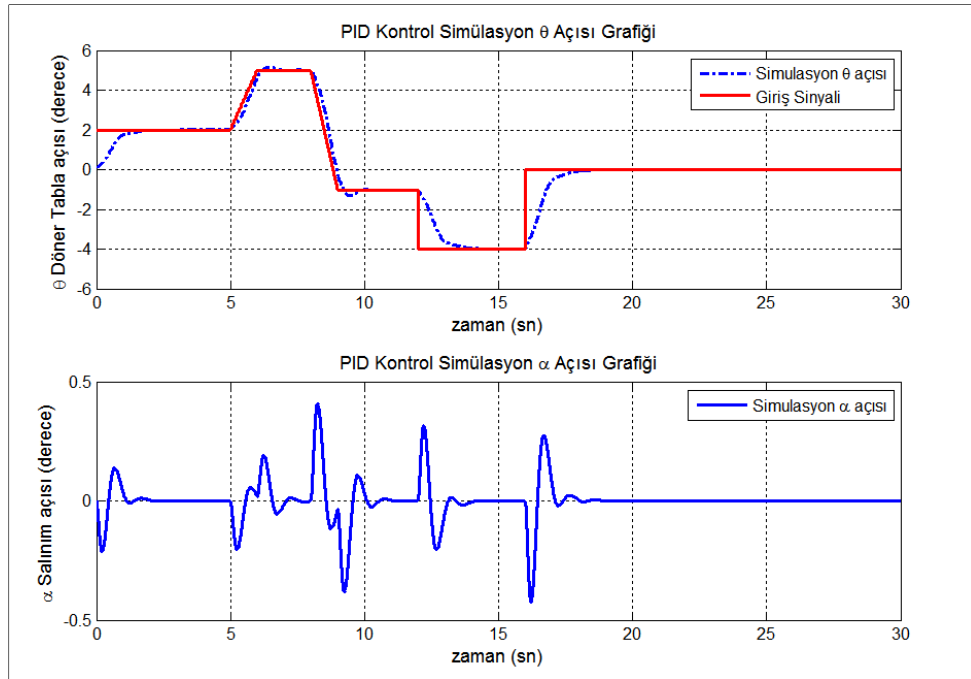
Şekil 4.5 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun çubuğun salınım cevapları için karşılaştırılması.



Şekil 4.6 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun döner tabla açısı hataları için karşılaştırılması.



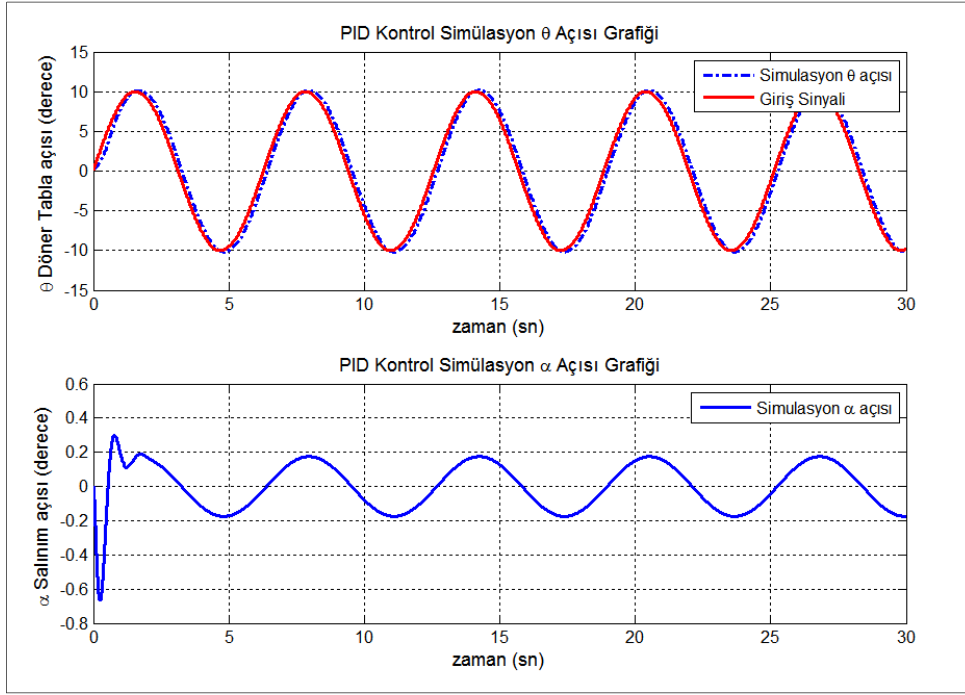
Şekil 4.7 : Fiziksel sistem ve doğrusal olmayan dinamik model simülasyonunun çubuk salınım açısı hataları için karşılaştırılması.



Şekil 4.8 : Tasarlanan giriş sinyaline sistemin simülasyon cevabı.

Şekil 4.4'ten Şekil 4.7'ye kadar karşılaştırılan sistem cevaplarından görüldüğü üzere yaklaşık 3.5 – 4 saniyelik oturma süresi gözlenmiştir. Simülasyon ve gerçek sistemden toplanan sistem cevabı dataları benzerlik göstermektedir. Daha kısa süredece kalıcı duruma oturması sağlanabilmesi uygun PID katsayıları seçilip kontrol yapılabilmektedir, fakat motora giren kontrol sinyali motor sürücünün giriş gerilim

aralığını aşabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Şekil 4.8’de ve Şekil 4.9’da sırasıyla; esnek eklemlili manipülatör sisteminin doğrusal olmayan sistem modeli için Matlab/Simulink’te, sinyal düzenleyici ile hazırlanmış sinyal ve sinüsoidal giriş sinyali sistem girişine uygulanmıştır, referans takibi incelenmiştir.



Şekil 4.9 : Sinüsoidal giriş sinyaline sistemin simülasyon cevabı.

4.2 Doğrusallaştırılmış Sistem Modeli ve Kontrolü

Rijit çubuk esnek eklemlili manipülatörün kontrolü, kontrol algoritmalarının Bölüm 3.2’ de bulunan sistemin doğrusallaştırılmış modeli üzerinde uygulanması ile sağlanmıştır. İlerleyen bölümlerde anlatılacağı üzere, durum uzayında durumların geri beslenmesiyle uygulanacak olan yöntemler; kutup yerleştirme ile durum geribesleme, doğrusal karesel düzenleyici ile optimal kontrol, gözleyici ile durum tahmini, gözleyici ile tahmin edilen durumların doğrusal karesel düzenleyici ile geribeslenmesi, durumların Kalman filtresi kullanılarak gürültüsüz ve gürültülü ortamlarda tahmini ve geribeslenmesi gibi alt başlıklar altında incelenecektir.

Zamanla değişmeyen lineer sistem Denklem 4.3 – 4.4’te gösterilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.3)$$

$$y = Cx + Du \quad (4.4)$$

Burada A sistem matrisi; o andaki durumların, durumların değişimini nasıl etkilediği ile ilgilidir, aynı zamanda e^{At} durum geçiş matrisi olarak da adlandırılmaktadır. B matrisi, kontrol matrisidir ve sistem girişinin durumların değişimini nasıl etkilediğini ifade eder. C matrisi sistemin çıkış matrisi olmakla beraber sistemin durumları ile sistemin çıkışı arasındaki ilişkiyi ifade eder. D matrisi ileri besleme matrisidir ve sistemin girişinin sistemin çıkışını direkt olarak etkilediğini gösterir. u sistem girişi ve x ise sistemin durumlarıdır.

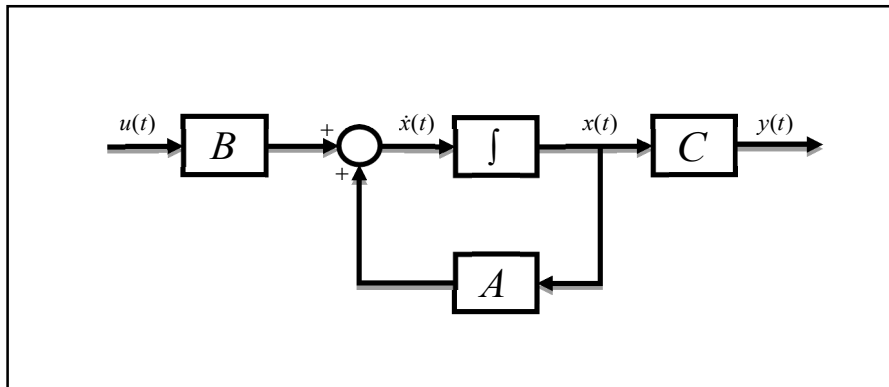
Esnek eklemli sistemin durum matrisleri Denklem 4.5'teki formda gösterilebilir. Sistem çıkışı; θ döner tabla dönme açısı ve α çubuk salınım açısının toplamı olarak ifade edilerek, sistem tek girişli tek çıkışlı sistem olarak modellenmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & kC_2\Gamma_{ad}\left(\frac{1}{J_{tabla}}\right) & -C_{\dot{\theta}} & 0 \\ 0 & -kC_2\Gamma_{ad}\left(\frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk}J_{tabla}}\right) & C_{\dot{\theta}} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_v \\ -C_v \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

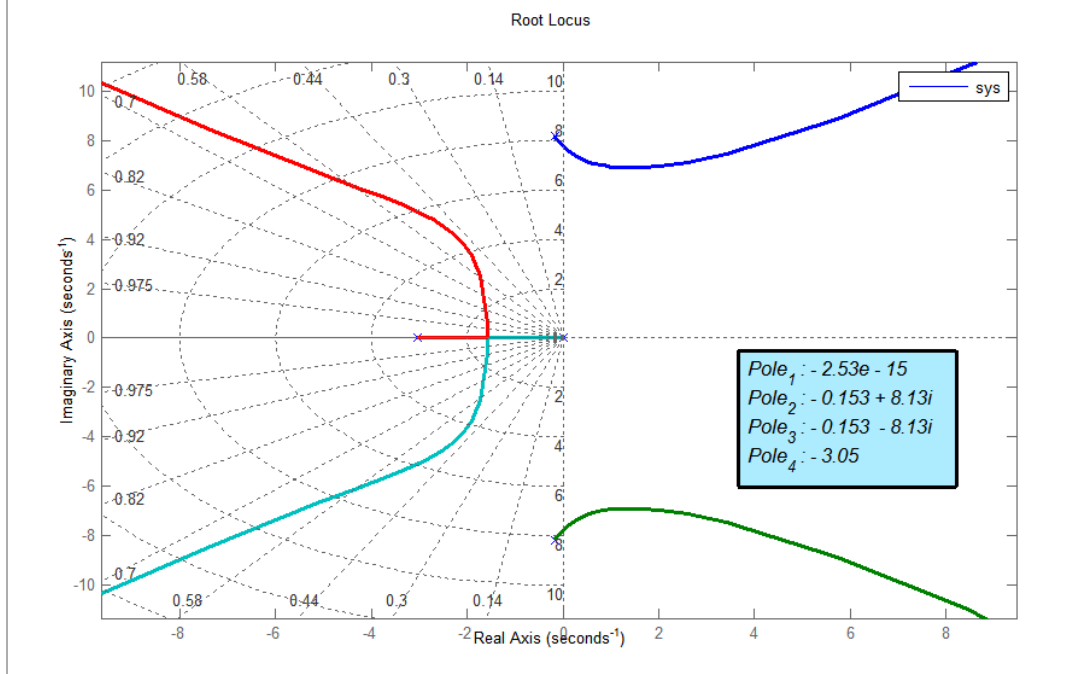
$$C = [1 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \quad (4.7)$$

$$D = [0] \quad (4.8)$$

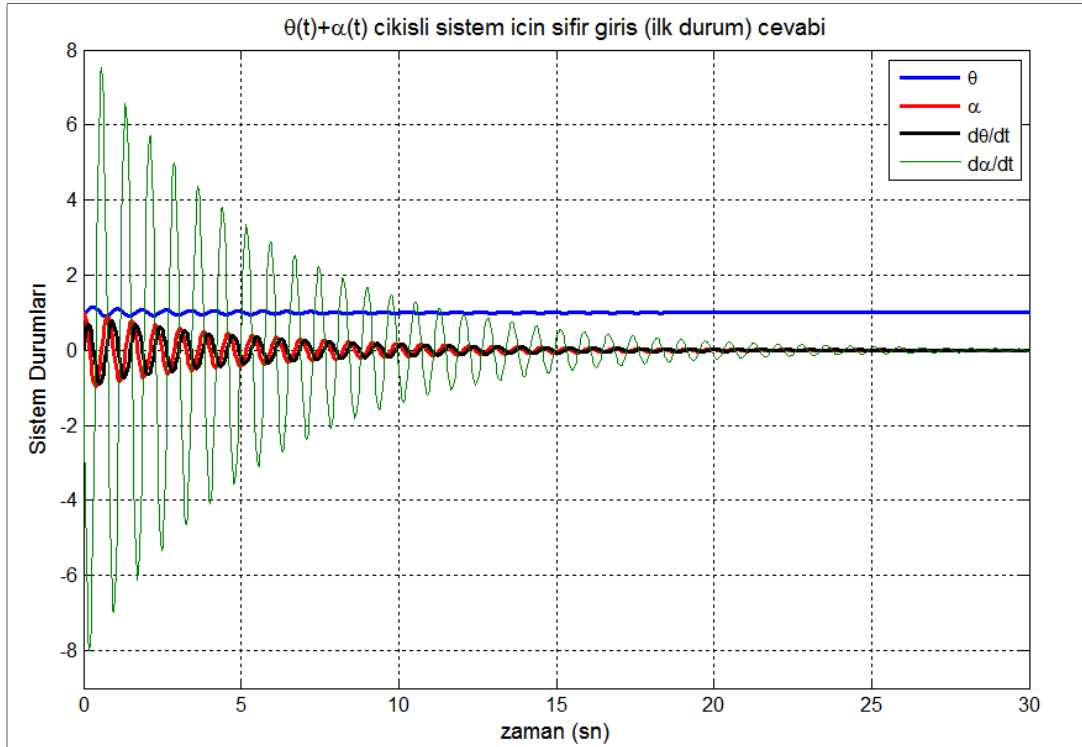


Şekil 4.10 : Açık çevrim sistemin durum uzay matrisleri ile gösterimi.

Esnek eklemli manipülatör sisteminin durum uzay matrislerinden yola çıkılarak, kök yer eğrisi Şekil 4.11'deki gibi çizdirilebilir. Bu eğriden görüleceği üzere; sistemin tüm kutupları, imajiner eksenin sol yarı düzleminde yer almaktadır, sistemin oturma süresi yaklaşık 26 saniyeye denk gelmektedir.



Şekil 4.11 : Esnek eklemli manipülatör sisteminin kök-yer eğrisi



Şekil 4.12 : Esnek eklemli manipülatörün 1°'lik ilk durum cevabı

Esnek eklemlı manipölatör için açık çevrim sistem ilk durum cevabı Şekil 4.12’ de gösterilmektedir. Sistemde çubuğun salınım açısı ve döner tablanın dönme açısı 1 derecelik başlangıç koşulu ile serbest bırakılmış ve sistem durumları olan çubuk salınım açısı ve açısal hızı ile döner tabla dönme açısı ve açısal hızı, 30 saniye boyunca sistem cevabı simule edilmiştir.

4.3 Sistemin Gözlenebilirliği ve Kontrol Edilebilirliği

Lineer zamanla değişmeyen doğrusal sistemlerde; sistemin bir durumu için, başlangıç durumuna $x(t_0)$, sistemin sınırlı zaman aralığındaki çıkışı $y(t)$, $t_0 < t < t_1$ tarafından ulaşılabiliriyorsa sistem gözlenebilirdir. Aynı zamanda $u(t)$ sistem girişinin de bilindiği varsayılmalıdır. Eğer bu koşul sistemin tüm durumları için başlangıç durumlarından ve başlangıç zamanından bağımsız herhangi bir andaki durumları için de geçerli ise sistem tamamen gözlenebilirdir. Gözlenebilirlik , sistem matrisi A’ya ve çıkış matrisi C’ye bağlıdır ve Denklem 4.9’daki biçimde gösterilir.

$$O_B = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Eğer gözlenebilirlik matrisi için $rank(O_B) = n$ yani full rank olursa sistemin tüm durumları gözlenebilirdir. Esnek eklemlı manipölatör için gözlenebilirlik matrisi Denklem 4.10 ile gösterilebilir.

$$O_B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -61.377 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -61.377 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$rank(O_B) = 4 \quad (4.11)$$

Sistemin gözlenebilirlik matrisinin rankı, sistemin durum sayısına eşit olduğu için sistemin tüm durumları gözlenebilirdir.

Sistemin durumlarından biri için, başlangıç durumunu $x(t_0)$, sınırlı bir zaman içinde ($t_0 < t < t_1$) istenilen başka bir zamandaki durumuna $x(t)$, bir giriş fonksiyonu

$u(t)$ ile transfer edebiliyorsa sistem kontrol edilebilirdir. Kontrol edilebilirlik, sistem matrisi A'ya ve kontrol matrisi B'ye bağlıdır (4.12).

$$O_c = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (4.12)$$

Esnek eklemli manipölörün kontrol edilebilirlik matrisi Denklem 4.13 teki gibi ifade edilir.

$$O_c = \begin{bmatrix} 0 & 13.08 & -44.5 & 43.61 \\ 0 & -13.08 & 44.5 & 759.45 \\ 13.08 & -44.5 & 43.61 & 218.05 \\ -13.08 & 44.5 & 759.45 & -2949.4 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\text{rank}(O_c) = 4 \quad (4.14)$$

Sistemin kontrol edilebilirlik matrisinin rankı, sistemin durum sayısına eşit olduğu için sistemin tüm durumları kontrol edilebilirdir.

4.4 Kutup Yerleştirme ile Regülasyon ve Referans Takibi

Kutup yerleştirme ile kontrol sistemin durumlarının geribeslenmesiyle veya sistem çıkışının geribeslenmesi ile gerçekleştirilebilir. Bir PID kontrolde sistemin çıkışlarından geribesleme alınırken, sistemin durumlarını içeren x vektörünün geri beslemesiyle durum geribeslemesi sağlanmış olur. Eğer sistemin tüm durumları kontrol edilebilirse, durum geribeslemesi ile sistemin kapalı çevrim kutupları istenilen bir kutuba yerleştirilebilmektedir. Durum geribeslemesi ile iki tip probleme çözüm getirilebilir. Birincisi, Denklem 4.15'de gösterilen ve sistemin durumlarını sıfıra götüren regülasyon problemi iken ikincisi, sistemin durumlarının bir referansı izlemesi problemidir (4.16).

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow x(t) \rightarrow 0 \quad (4.15)$$

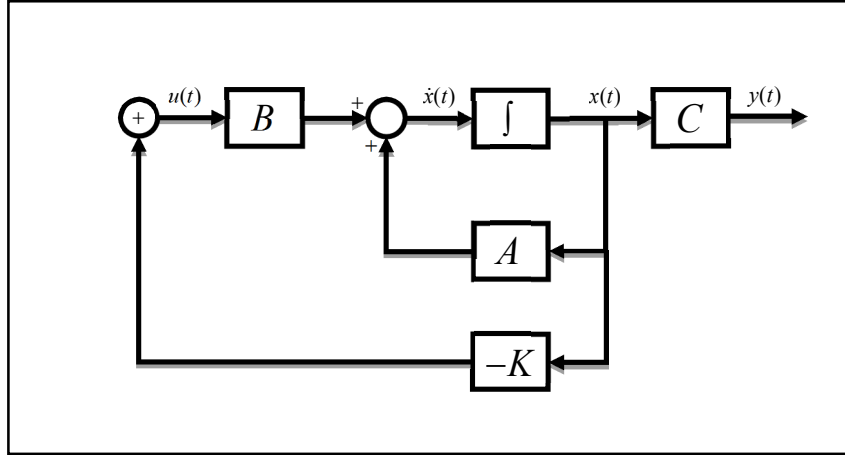
$$t \rightarrow \infty \Rightarrow x(t) \rightarrow r(t) \quad (4.16)$$

Durum geribeslemesinde sistemin mevcut kutupları istenilen kutba yerleştirmek için sisteme uygulanacak kontrol girişi $u(t)$, Denklem 4.17' deki gibi seçildiği takdirde kapalı çevrim dinamik sistemin yeni formu Denklem 4.17 – 4.18'deki şeklini alır.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (4.17)$$

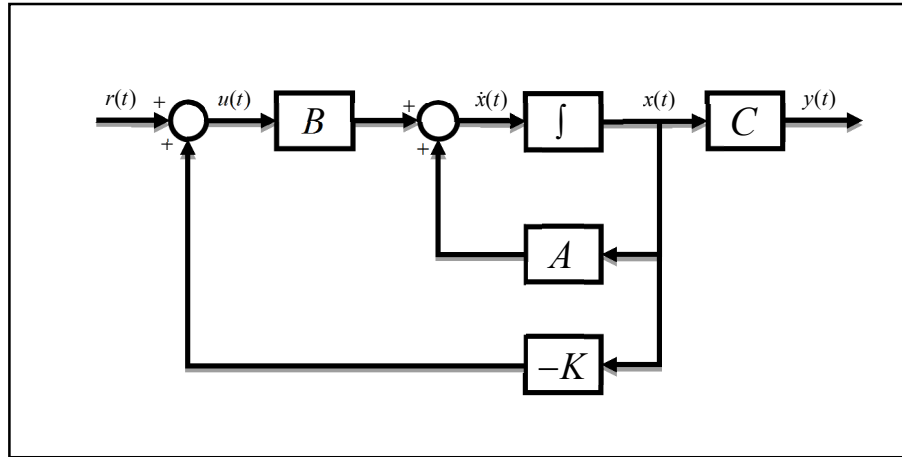
$$\dot{x} = Ax + B(-Kx) = (A - BK)x \quad (4.18)$$

$$y = Cx + D(-Kx) = (C - DK)x \quad (4.19)$$



Şekil 4.13 : Durum geri besleme ile regülasyon.

Şekil 4.14 ile ifade edilen referans girişin takip edilebilmesi için dinamik denklemin alması gereken form Denklem 4.20 – 4.22 ‘deki gibidir.



Şekil 4.14 : Durum geribesleme ile referansın takip edilmesi.

$$u(t) = r(t) - Kx(t) \quad (4.20)$$

$$\dot{x} = Ax + B(r - Kx) = (A - BK)x + Br \quad (4.21)$$

$$y = Cx + D(r - Kx) = (C - DK)x + Br \quad (4.22)$$

Kutup yerleştirme işlemi ile durum geribeslemesi yapılırken bazı varsayımlar ve gereklilikler söz konusudur. K kazancı en fazla durum sayısı n olan nx1 boyutlu olmalıdır; durumların hepsi, ölçülebilir ve kontrol edilebilir olmalıdır; yeni atanacak kutuplar kararlılık için sol yarı düzlemde seçilmelidir, atanacak kutuplar mevcut açık çevrim kutuplarından, kontrol girişini çok yükseltebileceğinden dolayı, çok uzakta seçilmemelidir.

Sistemin kapalı çevrim kutuplarını istenen kutuplara getirebilmek için gerekli K kazancını bulmak için üç farklı yaklaşım vardır.

1. Sistem matrisi A'yı , kontrol matrisi B'yi ve çıkış matrisi C'yi, kontrolör kanonik forma transformasyonunu gerçekleştirerek kutup yerleştirme yöntemi.
2. Direkt değişim metodu
3. Ackermann's formülü kullanılarak kutup yerleştirme yöntemi.

Esnek eklemlili manipülatörün kutup kazanç vektörünü bulmak için Ackermann formülünden yararlanılmıştır. Ackermann formülü kullanıldığında sistem matrisini diğer kanonik formlara çevirmek gerekmeyecektir. Ackermann formülü sonucunda sistemi kontrol etmeyi sağlayacak durum geribesleme katsayılarına Denklem 4.23 – 4.38 ile ulaşılabilir.

Sistemin hedeflenen karakteristik denklem eşitliği şu şekilde ifade edilebilir.

$$|sI - (A - BK)| = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) \quad (4.23)$$

$$\tilde{A} = (A - BK) \quad (4.24)$$

$$|sI - (A - BK)| = s^n + \beta_1 s^{n-1} + \beta_2 s^{n-2} + \dots + \beta_{n-1} s + \beta_n I = 0 \quad (4.25)$$

Cayley – Hamilton teoremine göre her sistem matrisi A, kendi karakteristik denklemini sağlamaktadır, öyle ise Denklem 4.26 yazılabilir.

$$\phi(\tilde{A}) = \tilde{A}^n + \beta_1 \tilde{A}^{n-1} + \beta_2 \tilde{A}^{n-2} + \dots + \beta_{n-1} \tilde{A} + \beta_n I = 0 \quad (4.26)$$

Denklem derecesinin n = 3 olduğu varsayılırsa Denklem 4.27 – 4.30 ile gösterilen eşitliklere ulaşılacaktır.

$$I = I \quad (4.27)$$

$$\tilde{A} = (A - BK) \quad (4.28)$$

$$\tilde{A}^2 = (A - BK)^2 = A^2 - ABK - BK\tilde{A} \quad (4.29)$$

$$\tilde{A}^3 = (A - BK)^3 = A^3 - A^2BK - ABK\tilde{A} - BK\tilde{A}^2 \quad (4.30)$$

Bulunan ifadeler, katsayıları ile çarpıldığında denklem şu formu alacaktır.

$$\phi(\tilde{A}) = \tilde{A}^3 + \beta_1\tilde{A}^2 + \beta_2\tilde{A} + \beta_3I = 0 \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} \phi(\tilde{A}) = A^3 + \beta_1A^2 + \beta_2A + \beta_3I - \beta_2BK - \beta_1ABK - \beta_1BK\tilde{A} - A^2BK \\ - ABK\tilde{A} - BK\tilde{A}^2 \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\phi(A) = A^3 + \beta_1A^2 + \beta_2A + \beta_3I \neq 0 \quad (4.33)$$

$$\phi(\tilde{A}) = \phi(A) - \beta_2BK - \beta_1ABK - \beta_1BK\tilde{A} - A^2BK - ABK\tilde{A} - BK\tilde{A}^2 = 0 \quad (4.34)$$

$$\phi(A) = B(\beta_2K + \beta_1K\tilde{A} + K\tilde{A}^2) + AB(K\tilde{A} + \beta_1K) + A^2BK \quad (4.35)$$

$$\phi(A) = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_2K + \beta_1K\tilde{A} + K\tilde{A}^2 \\ K\tilde{A} + \beta_1K \\ K \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

Sistem tamamen kontrol edilebiliyorsa kontrol edilebilir matrisinin rankı tamdır ve tersi alınabilir.

$$\begin{bmatrix} B & AB & A^2B \end{bmatrix}^{-1} \phi(A) = \begin{bmatrix} \beta_2K + \beta_1K\tilde{A} + K\tilde{A}^2 \\ K\tilde{A} + \beta_1K \\ K \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Bulunan Denklem 4.37'in her iki tarafının $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ vektörü ile çarpılmasından sonra K kazanç vektörü bulunabilir.

$$K^T = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} O_c^{-1} \phi(A) \quad (4.38)$$

Esnek eklemli manipülatöre ait sistemin baskın kutupları yani imajiner eksene yakın kutupları, istenilen oturma zamanını sağlayacak şekilde seçildiği zaman kutup yerleştirme ile regülasyon sağlanabilir. Baskın kutupları; ikinci dereceden bir sistemin

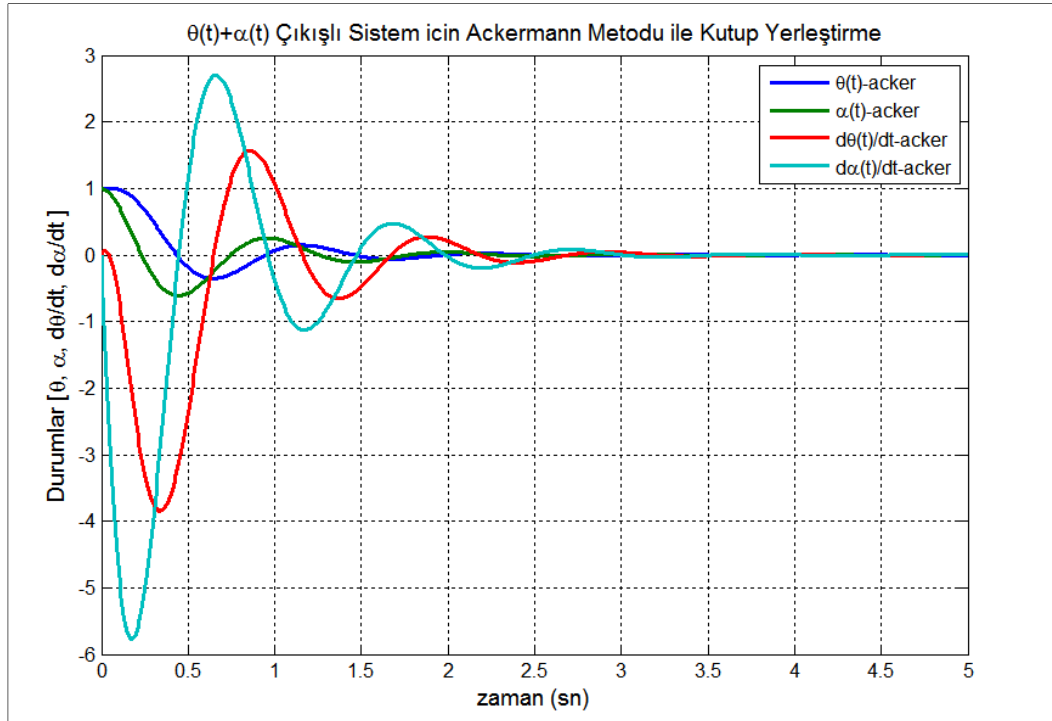
istenilen sistem kriterlerine göre seçme ve diğer kutupları sanal eksenden uzak seçme durumunda dördüncü dereceden sistem ikinci dereceden sisteme yakısayabilir, burada uzak kutupları seçerken $u(t)$ kontrol girişine dikkat etmek gerekir; çabuk sönümlenen sanal eksenden uzak kutuplara, sistemin kapalı çevrim kutuplarını yerleştirmek sisteme daha yüksek kontrol girişi gerektirecektir. Burada fiziksel sistemdeki sürücü girişi ± 10 V dikkate alınacaktır.

Sistemin baskın kutuplarını seçmek için karakteristik denklemini ikinci dereceden bir sistem gibi düşünerek yol almak gerekir. Karakteristik denklem Denklem 4.39' daki gibi ifade edilip sistemin yaklaşık 2.5-3 saniye içinde oturması için kutuplar bulunmuştur.

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (4.39)$$

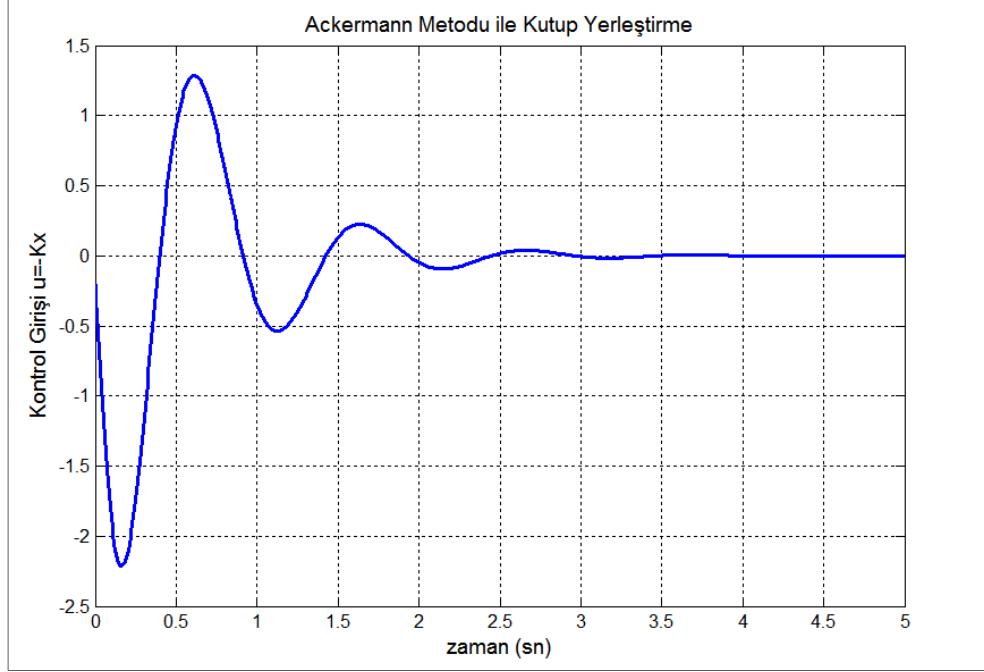
$$s_{1,2} = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \xi^2} \quad (4.40)$$

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (4.41)$$

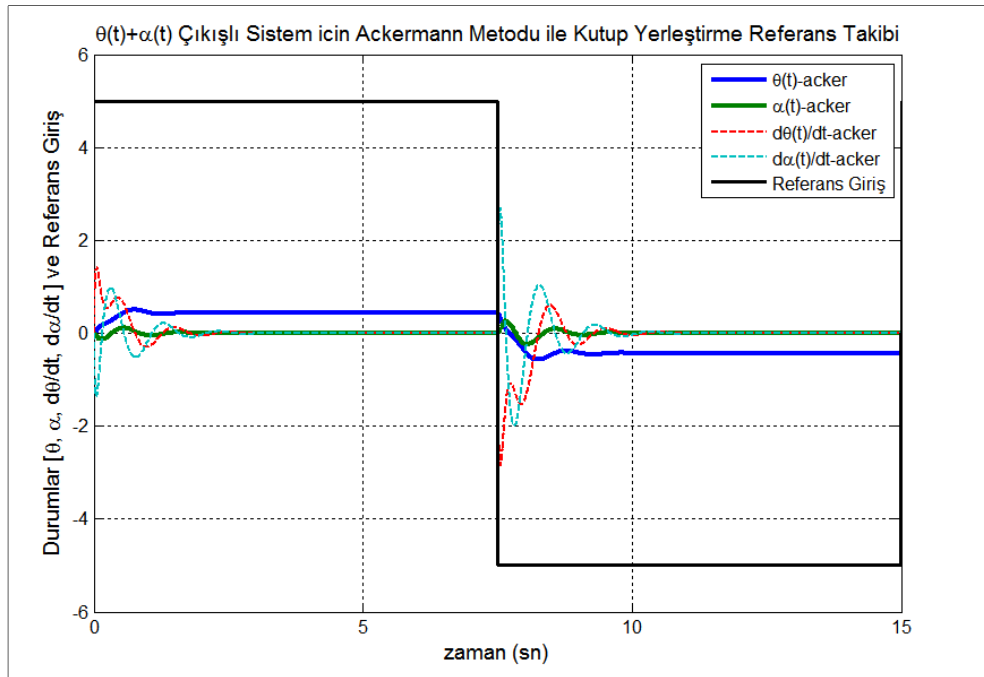


Şekil 4.15 : Ackermann metodu ile yerleştirilen kutuplara göre sistemin başlangıç durumu için durum cevapları.

Kapalı çevrim kutuplarının $[-1.7 \pm 6.13i, -14, -16]$ köklerine Ackermann metodu ile yerleştirilmesiyle Matlab/Simulink simülasyonunda elde edilen esnek eklemlı manipölätörün durumlarının grafiğı ve kontrolcü çıkışı grafiğı Şekil 4.15’de ve Şekil 4.16’ da gösterilmiştir; sistemin girişı sıfır iken, başlangıç koşulu olarak 1 derecelik açı uygulanmıştır.



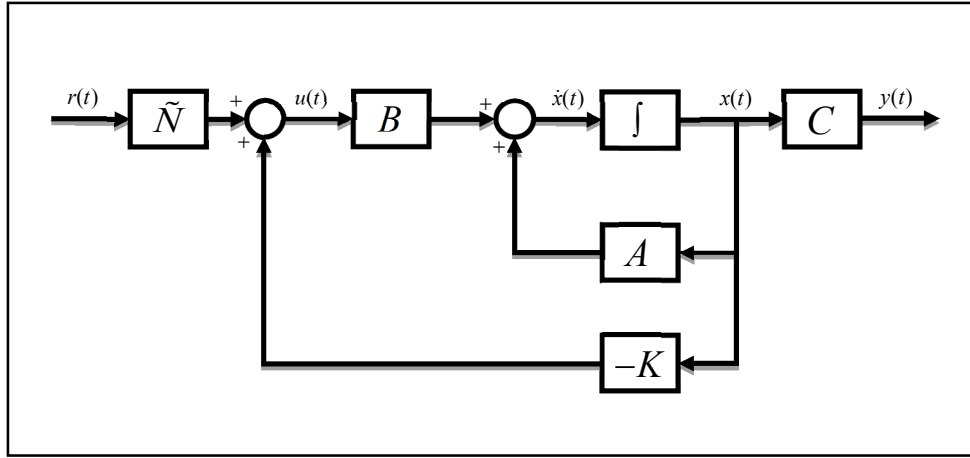
Şekil 4.16 : Ackermann metodu ile kutupların yerleştirilmesi için gereken kontrol girişı.



Şekil 4.17 : Ackermann metodu ile referans takibi.

Sistemin bir referansı takip etmesi için, regülasyon sırasında bulunan K kazanç vektörü kullanılarak sistem girişi olarak $u(t) = r(t) - K \cdot x(t)$ ifadesi kullanılmalıdır. Buna göre oluşturulan kare dalga referansı için durumların değişimi ve sistemin çıkışı Şekil 4.17'deki gibidir.

Referans takip etme sırasında çıkış kullanılarak değil de durumlar kullanıldığı için girişin bir ön çarpım işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Böylece çıkışı ifade eden durumlar bu çarpan sayesinde referans değere oturmuş olur. Şekil 4.18'de doğrusal sistemin $\tilde{N}$ ile çarpılmış hali gösterilmektedir. Denklem 4.42 – 4.45' te girişe uygulanacak önçarpımın ifadeleri yer almaktadır. Şekil 4.19' da $\tilde{N}$ uygulandıktan sonra sistemin çıkışı çizdirilmiştir.



Şekil 4.18 : Sistem çıkışının, referans değerine oturması için girişe önçarpım uygulanması.

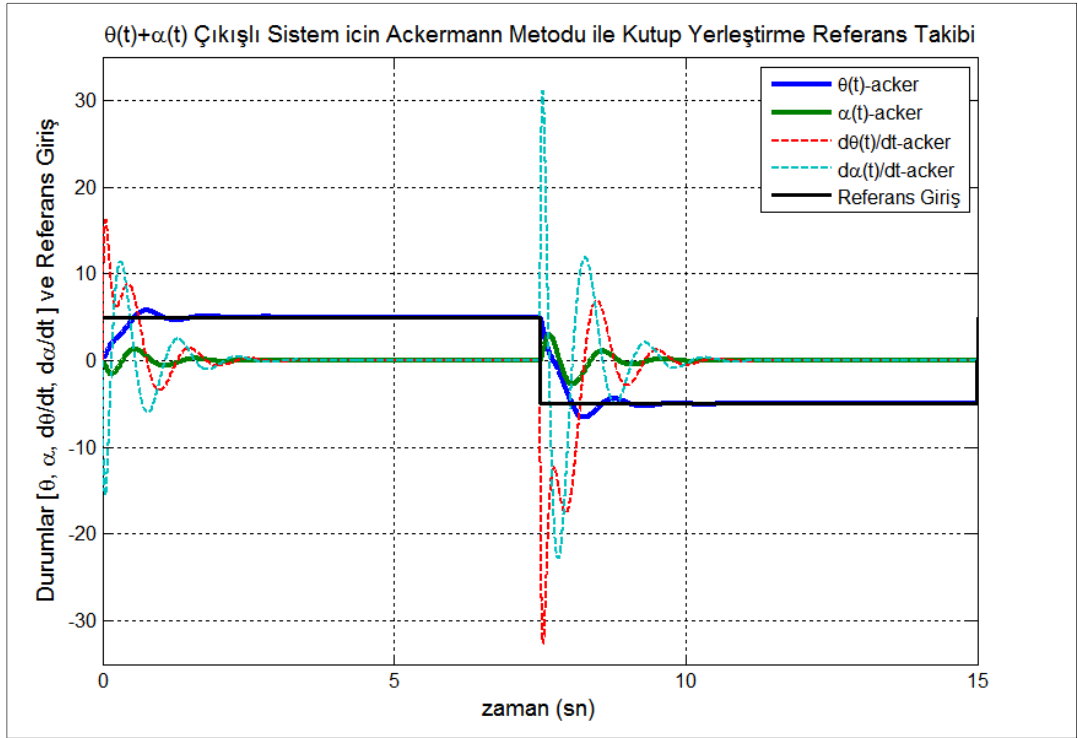
$$Y(S) = C(sI - (A - BK))^{-1}BU(s) \quad (4.42)$$

$$U(s) = \tilde{N}R(s) \quad (4.43)$$

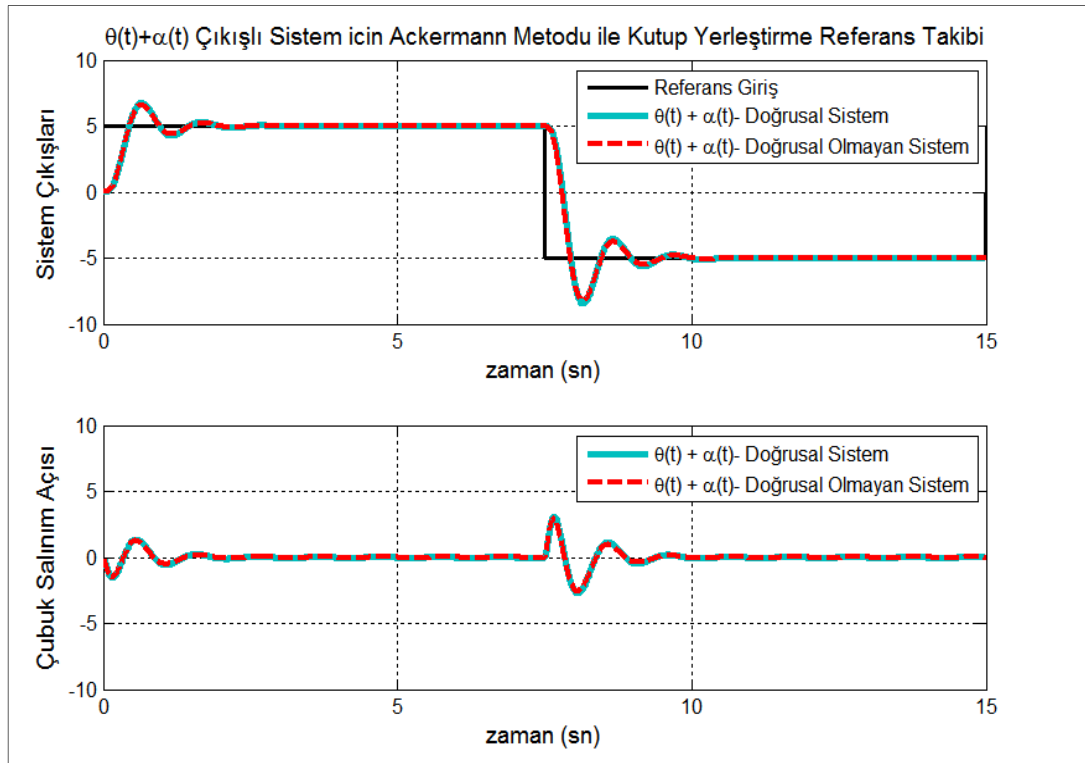
$$\frac{Y(S)}{R(S)} = C(sI - (A - BK))^{-1}B\tilde{N} = G_{cl}(s)\tilde{N} \quad (4.44)$$

Laplace dönüşümlerinde son değer teoremine göre $s=0$ için statik kazancı 1'e eşitleyerek denklem (mn) güncellenerek aşağıdaki sonuç bulunur.

$$\tilde{N} = G_{cl}(0)^{-1} = -(C(A - BK)^{-1}B)^{-1} \quad (4.45)$$



Şekil 4.19 : Ackermann Metodu ile girişine önçarpım uygulanması sonucu referans takibi.



Şekil 4.20 : Doğrusal ve doğrusal olmayan sistem modelleri için uygulanan durum geribeslemelerinin karşılaştırılması.

Şekil 4.19’ da sistemin durumlarından döner tabla açısının, sistemin referans girişini yakaladığı görülmektedir, böylece kalıcı durum hatası ortadan kalkmış durumdadır. Şekil 4.20’ de ise Matlab/Simulink ortamında oluşturulan doğrusal sistem modeli ile doğrusal olmayan sistem modeline uygulanan Ackermann kazançlarının sonuç üzerindeki etkileri birlikte çizdirilmiştir.

4.5 Doğrusal Karesel Düzenleyici ile Regülasyon ve Referans Takibi

4.5.1 Doğrusal karesel optimal kontrol denklemlerinin çıkarılması

Modern kontrol teorisi içinde geniş kullanım alanına sahip doğrusal karesel düzenleyici metodu veya diğer adıyla optimal durum geribesleme dizaynı, kolay uygulanabilirliği ve zamanla değişmeyen lineer sistemler için optimal çözümler üretebilmesi açısından tercih edilmektedir. Bu optimizasyon probleminde sistemde birbiri ile çelişen iki kriter arasında denge sağlanmaya çalışılır. Sistemin durumlarının sıfıra gitme hızının yani regülasyonun hızının arttırılması ile kullanılan kontrolcü girişinin $u=-Kx$ yani harcanan enerjinin az olması, bahsedilen iki kriteri oluşturmaktadır. Çok girişli çok çıkışlı sistemlerde, tek girişli tek çıkışlı sistemlerde olduğu kadar başarılı sonuçlar verebilmektedir.

LQR kontrolör sistem için verilen performans indeksini; durumları ve girişleri bir takım ağırlık matrisleri ile cezalandırarak minimize etmeye çalışır. Sistemin durumları ve sistemin girişi kullanılarak elde edilen performans indeksi şu şekilde ifade edilebilir, Denklem 4.46 – 4.47.

$$J = \int_0^{\infty} (y(t)^T y(t)) dt \quad (4.46)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + 2x(t)^T S u(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (4.47)$$

Yukarıdaki eşitliklerde Q durum kontrol matrisidir, sistemin durumlarının kendi aralarındaki önemliliğine göre değer alır yani Q matrisinin diagonal elemanları herbir durum için katsayı ifade eder ve bu katsayıların büyük olması , sistemin kapalı çevrim kutuplarının s domeninde daha sola kaymasını dolayısıyla ilgili durumların sıfıra daha hızlı yaklaşmasını sağlamaktadır. R matrisi, girişin cezalandırılması için gereken

matristir. Denklem 4.47'deki Q, S ve R ifadelerinin, sırasıyla Denklem 4.48 – 4.50 şeklinde seçilmesi mümkündür.

$$Q = C^T C; \quad Q^T = Q \geq 0 \quad (4.48)$$

$$S = C^T D \quad (4.49)$$

$$R = D^T D \quad R^T = R > 0 \quad (4.50)$$

Doğrusal karesel optimal kontrol problemini çözebilmek için öncelikle Denklem 4.51'de gösterilen Hamiltonian matrisinin oluşturulması gerekmektedir.

$$H = \frac{1}{2} [x(t)^T Q x(t) + 2x(t)^T S u(t) + u(t)^T R u(t)] + \lambda(t)^T [Ax + Bu] \quad (4.51)$$

Durumlar ve girişler arasındaki çarpaz çarpımı (cross product) cezalandırmak için kullanılan S matrisi, bu tez için kullanılmadığı için $S = 0$ alarak optimal kontrol girişi aşağıdaki Denklem 4.52 – 4.67 arasındaki adımlar izlenerek bulunur.

Giriş üzerinde herhangi bir kısıt olmadığı durumda Hamiltonian matrisinin girişe göre kısmi türevinin alınmasıyla optimal yani minimal değer bulunur,(4.52).

$$H = \frac{1}{2} [x(t)^T Q x(t) + 2x(t)^T S u(t) + u(t)^T R u(t)] + \lambda(t)^T [Ax + Bu] \quad (4.52)$$

Giriş üzerinde herhangi bir kısıt olmadığı durumda Hamiltonian matrisinin girişe göre kısmi türevinin alınmasıyla optimal yani minimal değer bulunur,(4.53).

$$\frac{\partial H}{\partial u} = Ru(t) + B^T \lambda(t) = 0 \quad (4.53)$$

Optimal kontrol giriş sinyali $u^*(t)$, Denklem 4.54 ile ifade edilebilir.

$$u^*(t) = -R^{-1} B^T \lambda(t) \quad (4.54)$$

Hamiltonian matrisinin durumlara göre kısmi türevinden ise kostate matrisi oluşmaktadır, Denklem 4.55.

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -(Qx(t) + A^T \lambda(t)) \quad (4.55)$$

Denklem 4.56' daki tahmin yapılarak ve zamana göre türevinin alınmasıyla Riccati diferansiyel denkleminde ulaşılabılır.

$$\lambda(t) = P(t)x(t) \quad (4.56)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{P}(t)x(t) + P(t)\dot{x}(t) \quad (4.57)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{P}(t)x(t) + P(t)(Ax(t) + Bu(t)) \quad (4.58)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \dot{P}(t)x(t) + P(t)(Ax(t) + BR^{-1}B^T\lambda(t)) \quad (4.59)$$

$$-(Qx(t) + A^TP(t)x(t)) = (\dot{P}(t) + P(t)A + P(t)BR^{-1}B^TP(t))x(t) \quad (4.60)$$

$$(\dot{P}(t) + P(t)A + A^TP(t) - P(t)BR^{-1}B^TP(t) + Q)x(t) = 0 \quad (4.61)$$

$$\dot{P}(t) + P(t)A + A^TP(t) - P(t)BR^{-1}B^TP(t) + Q = 0 \quad (4.62)$$

Performans indeksindeki üst sınırın sonsuz olmasıyla birlikte $P(t)$ matrisi sabit olmakta ve türevi $\dot{P}(t) \rightarrow 0$ olmaktadır. Sabit Q ve R matrisleri için Riccati diferansiyel denklemini, Cebirsel Riccati denklemine dönüşmektedir, (4.65).

$$J = \frac{1}{2}x(t_f)^T Mx(t_f) + \int_0^{t_f} (x(t)^T Qx(t) + u(t)^T Ru(t)) dt \quad (4.63)$$

$$J = \int_0^{\infty} (x(t)^T Qx(t) + u(t)^T Ru(t)) dt \quad (4.64)$$

$$tf \rightarrow \infty \quad \Rightarrow \quad PA + A^TP - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (4.65)$$

Kalıcı durum performansına bakıldığında; doğrusal karesel optimal kontrol probleminin ,doğrusal karesel regülasyon problemine dönüştüğü görülmektedir. Optimal kontrol giriş sinyali, K parametresi ile kısaltılarak, kapalı çevrim kararlılığı incelenebilir, (4.67).

$$u^*(t) = -(R^{-1}B^TP)x(t) \quad (4.66)$$

$$u^*(t) = -Kx(t) \quad (4.67)$$

Burada P matrisi simetrik matris seçilerek bulunabilir ve kesin pozitif matristir. A matrisinin 2x2 boyutlu bir matris olduğu varsayıldığında, P matrisi Denklem 4.68'deki şekilde seçilir ve eşitliğin çözümü ile P matrisinin elemanları bulunabilir.

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix} > 0 \quad (4.68)$$

Kapalı çevrim sistemi, optimal kontrol sinyali ile birlikte şu şekilde ifade edilebilir, (4.69).

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (4.69)$$

4.5.2 Doğrusal karesel optimal kontrol ve kararlılık

Doğrusal karesel optimal kontrolde; kapalı çevrim sistem kararlılığın kontrolü için, Lyapunov fonksiyonu ve bu fonksiyonun türevini kullanmak yeterlidir, (4.70) – (4.78).

$$V = x^T P x \quad (4.70)$$

$$\dot{V} = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (4.71)$$

$$\dot{V} = [(A - BK)x]^T P x + x^T P (A - BK)x \quad (4.72)$$

$$\dot{V} = x^T [(A - BK)^T P + P(A - BK)]x \quad (4.73)$$

$$\dot{V} = x^T [(PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q) - Q - PBR^{-1}B^T P] \quad (4.74)$$

$$\dot{V} = x^T [-Q - PBR^{-1}B^T P]x \quad (4.75)$$

Yukarıda Denklem 4.75'teki ifadenin kesin negatif matris olduğunu gösterilebilirse Lyapunov fonksiyonunun gereği yerine getirilmiş olur.

$$R > 0, \quad R^{-1} > 0, \quad P > 0, \quad Q \geq 0 \quad (4.76)$$

$$Q + PBR^{-1}B^T P > 0 \quad (4.77)$$

$$V > 0, \quad \dot{V} < 0 \quad (4.78)$$

Dolayısıyla lineer kapalı çevrim sistemler her zaman asimptotik olarak kararlı olur.

4.5.3 Doğrusal karesel optimal kontrol ağırlık matrislerinin seçimi

Kazançlar bulurken seçilmesi gereken Q ve R matrisleri için matris yapıları ve matris elemanlarının seçimi tipik olarak şu şekilde seçilebilir, Denklem 4.79 ve Denklem 4.80.

$$Q = \begin{bmatrix} \gamma q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \gamma q_n \end{bmatrix}, Q \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad (4.79)$$

$$R = \begin{bmatrix} \rho r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \rho r_m \end{bmatrix}, R \in \mathbb{R}^{m \times m} \quad (4.80)$$

M girişli, n durumlu sistemler için Q ve R matrislerinin bu şekilde seçilmesi; herbir sistem durumunun, optimizasyona dahil edilmesi anlamına gelir, γ ve ρ parametreleri sırasıyla durumları ve girişi cezalandırma katsayısı olarak düşünülebilir. Genel olarak çıkış matrisi C ile transpozunun çarpımı seçilerek durumlar üzerindeki minimize etme çabası çıkış üzerindeki minimize etme çabasına dönüşür, (4.81).

$$y^T y = x^T C^T C x = x^T Q x \quad (4.81)$$

Esnek eklemli manipülatör için çıkış denklemi ve Q matris elemanları Denklem 4.82 ve Denklem 4.83'teki gibi olur.

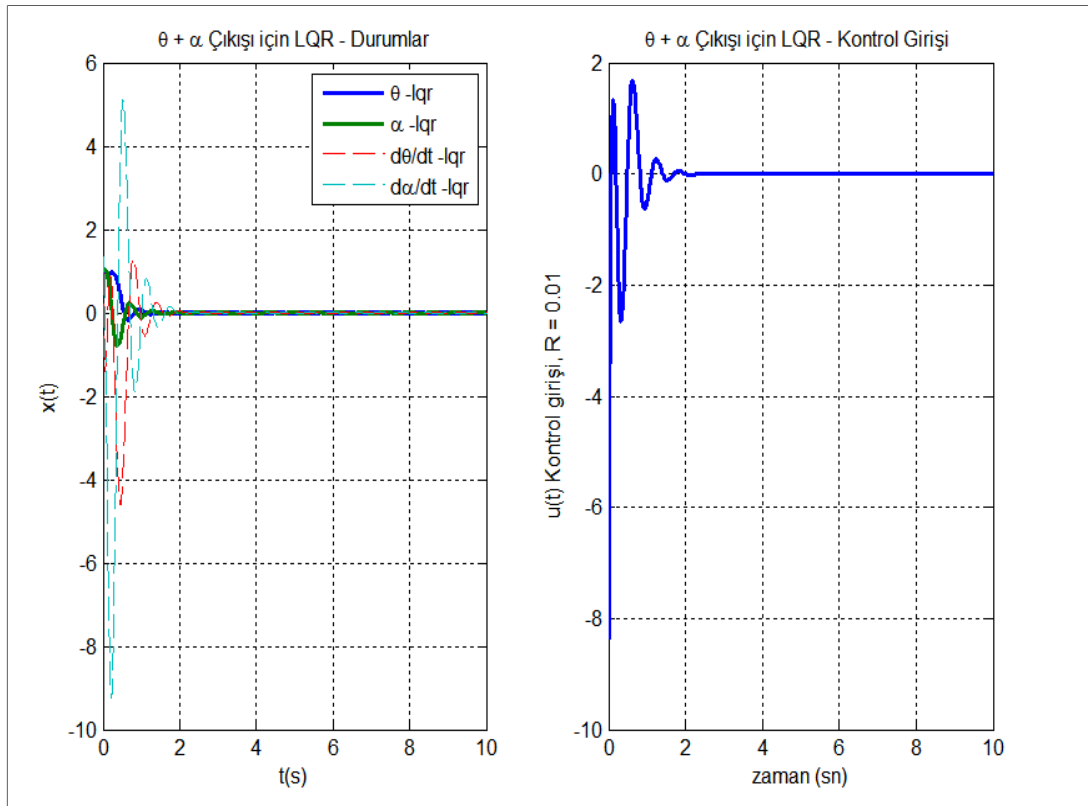
$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \alpha(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \dot{\alpha}(t) \end{bmatrix} = \theta(t) + \alpha(t) \quad (4.82)$$

$$C^T C = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.83)$$

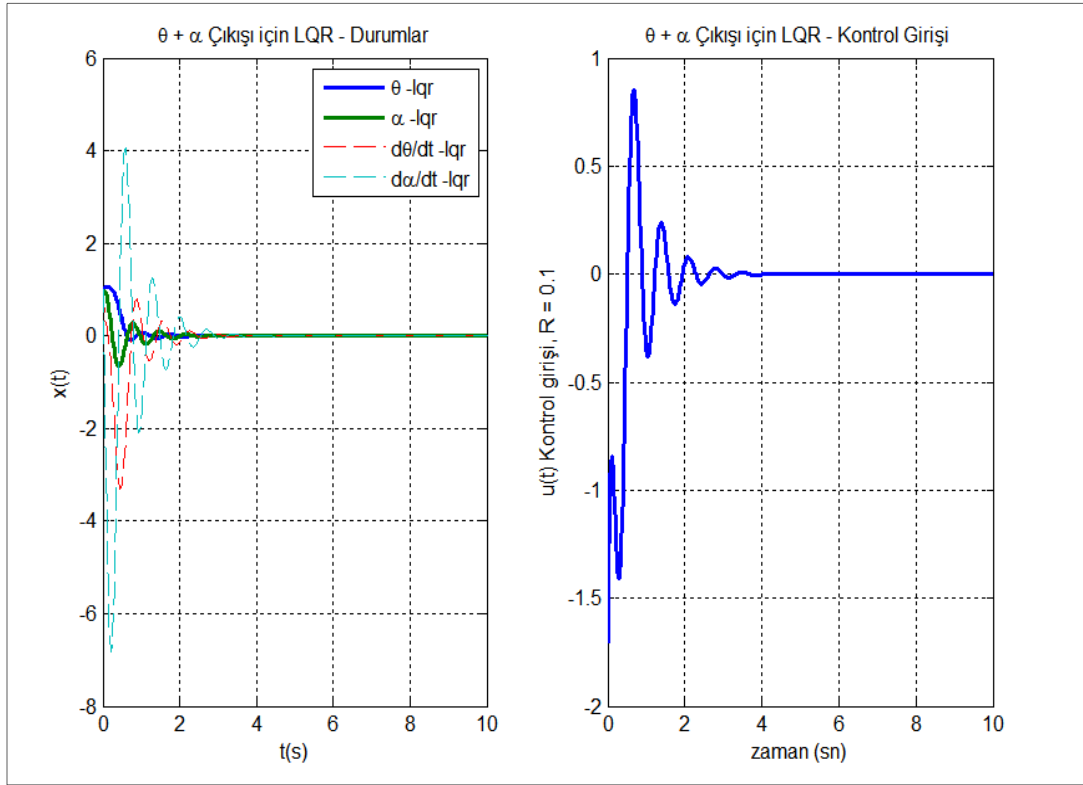
$Q > R$ seçilmesi regülasyonun hızlı olmasını sağlarken büyük kontrol giriş sinyali uygulamak anlamına gelir, tersi durumda ise daha az enerji harcanır fakat sistemin regülasyon hızı ya da bir referansı izleme hızı düşük olacaktır.

4.5.4 Esnek eklemlı manipülatörün doğrusal karesel optimal kontrolü

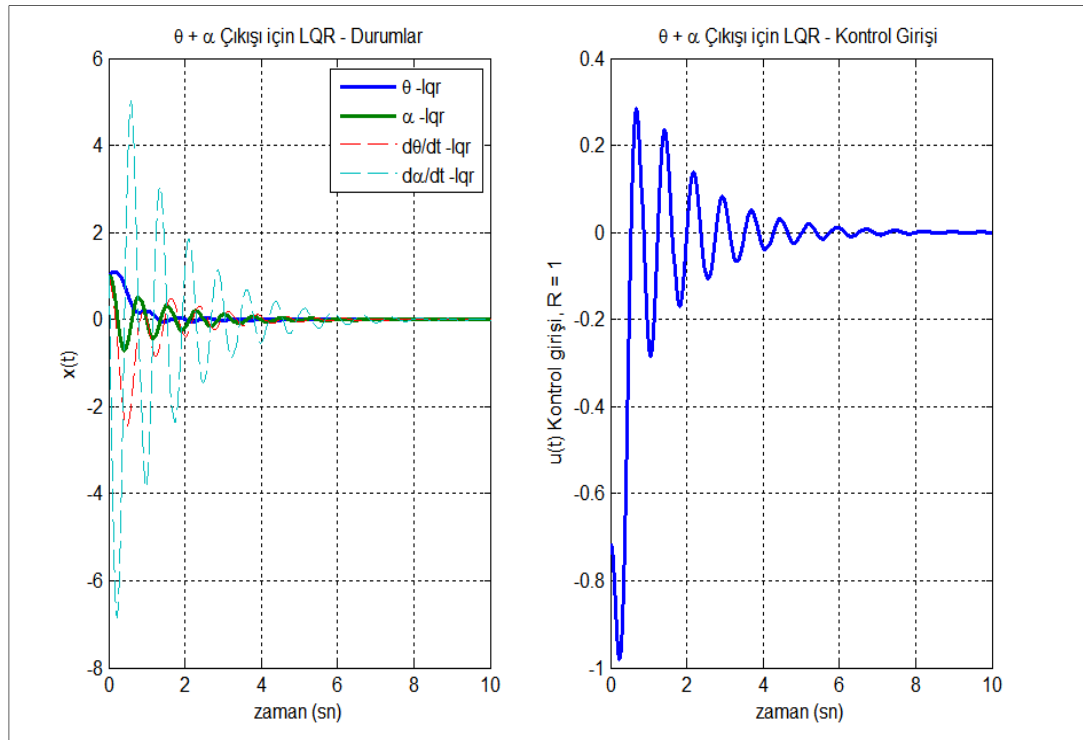
Esnek eklemlı manipülatörde, Q ve R matrislerinin bulunması için bir ağırlıklandırma döngüsü oluşturularak optimum regülasyon hızı ve kontrol girişı seçilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Öncelikle girişin ağırlık matrisi ile cezalandırılması simüle edilmiştir, daha sonra durumların cezalandırılması simüle edilmiştir.



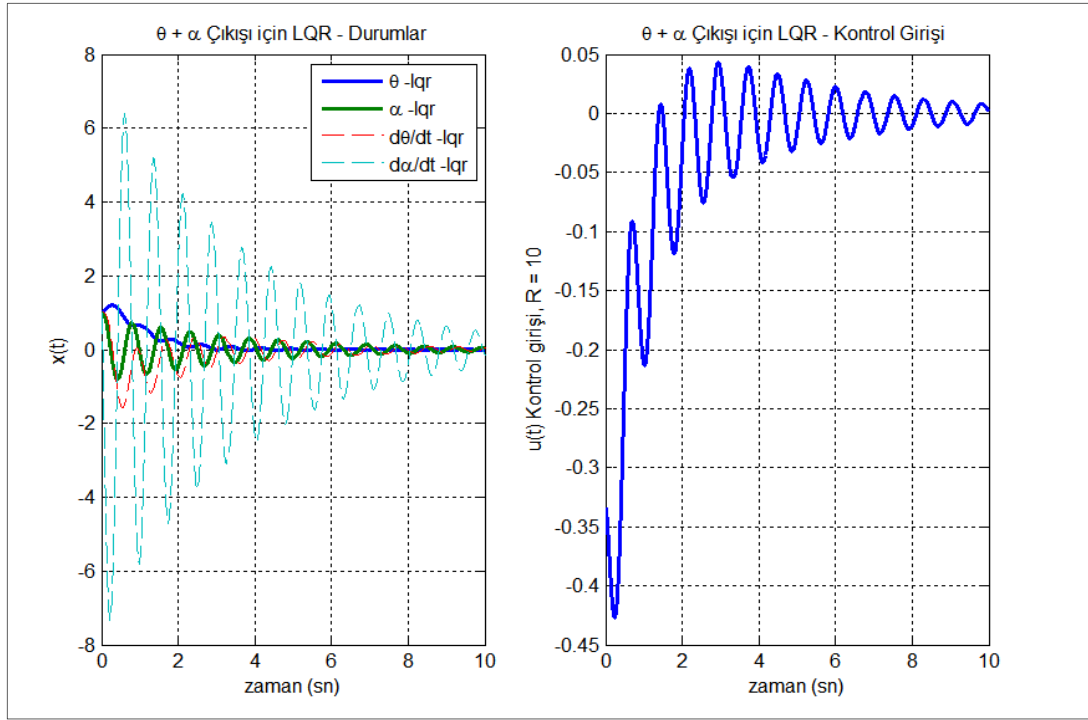
Şekil 4.21 : $R = 0.001$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.



Şekil 4.22 : $R = 0.01$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.

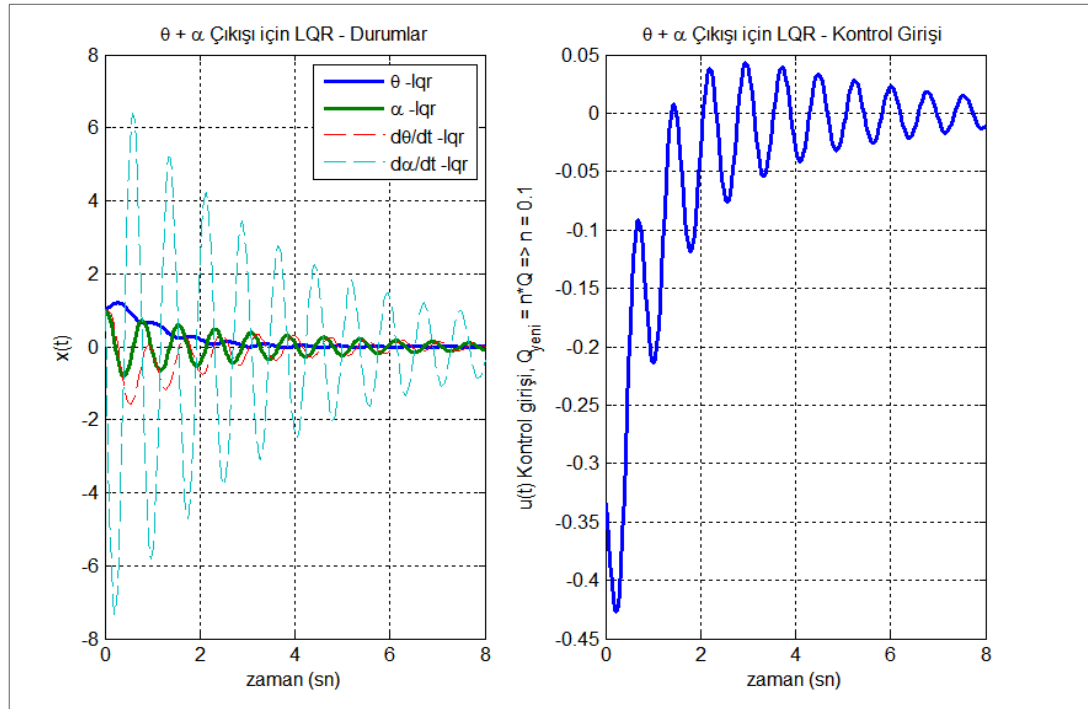


Şekil 4.23 : $R = 1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.

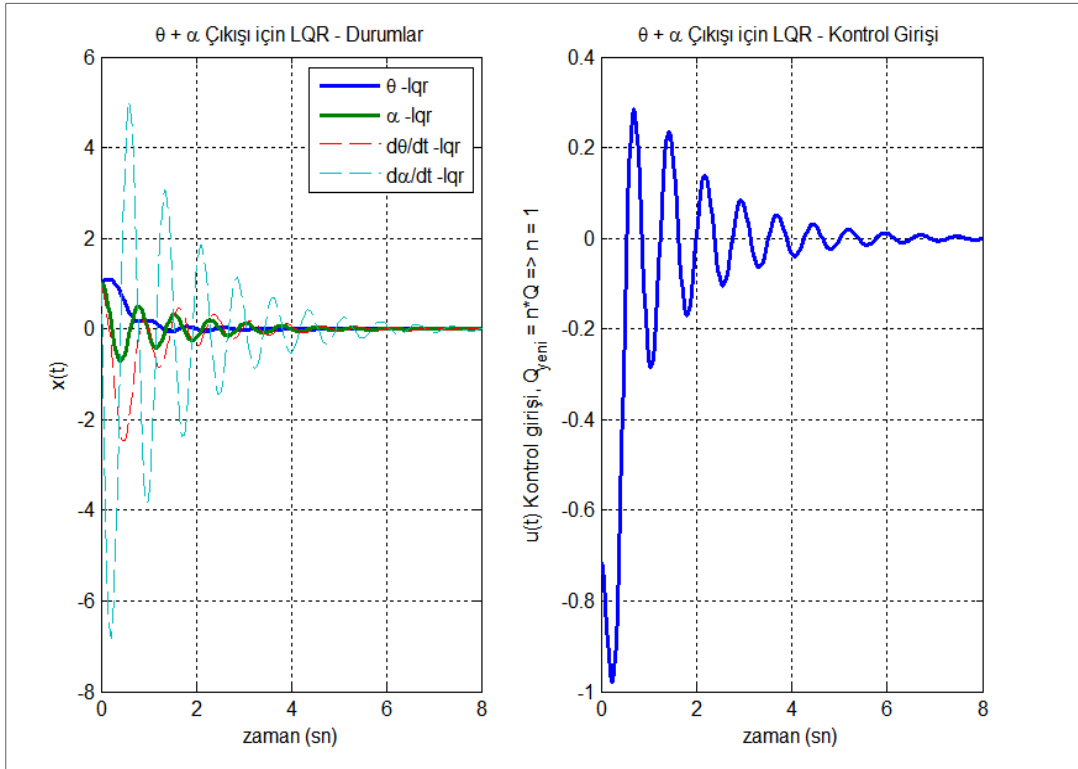


Şekil 4.24 : $R = 10$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.

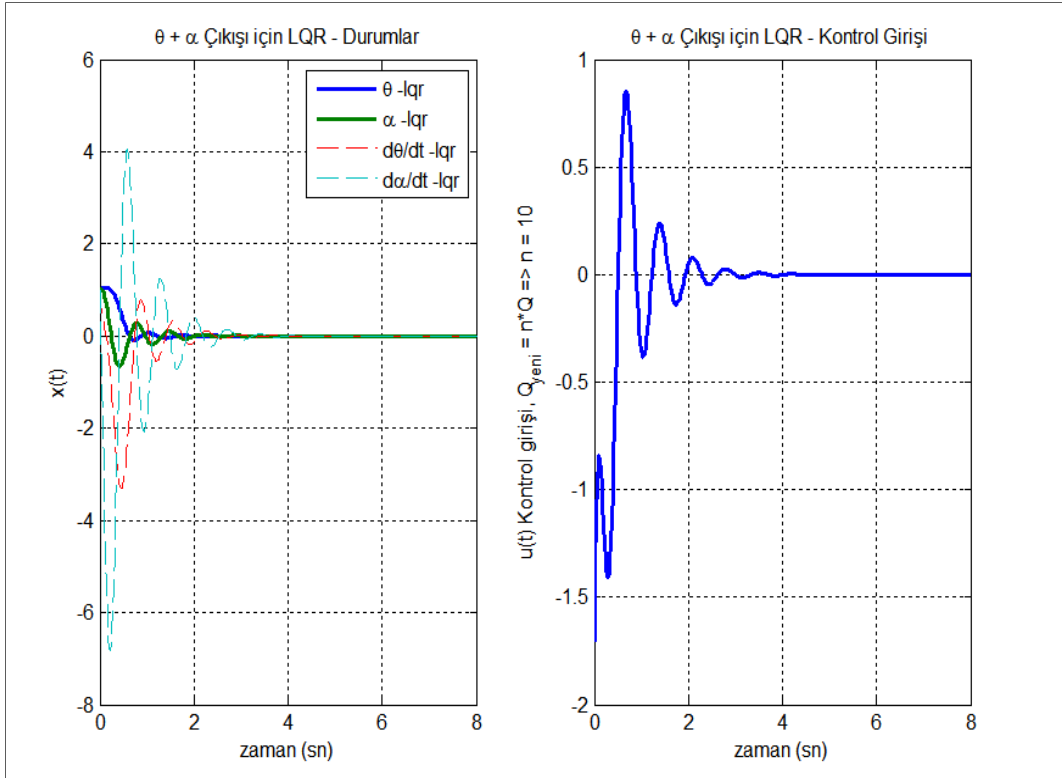
Şekiller 4.21 - 4.24' ten görüldüğü üzere; 1 derecelik başlangıç koşulu ile durumları regüle etmek için kontrol girişi için cezalandırma ağırlığı arttıkça, kontrol girişi değeri azalırken durumların oturma süreleri artmaktadır.



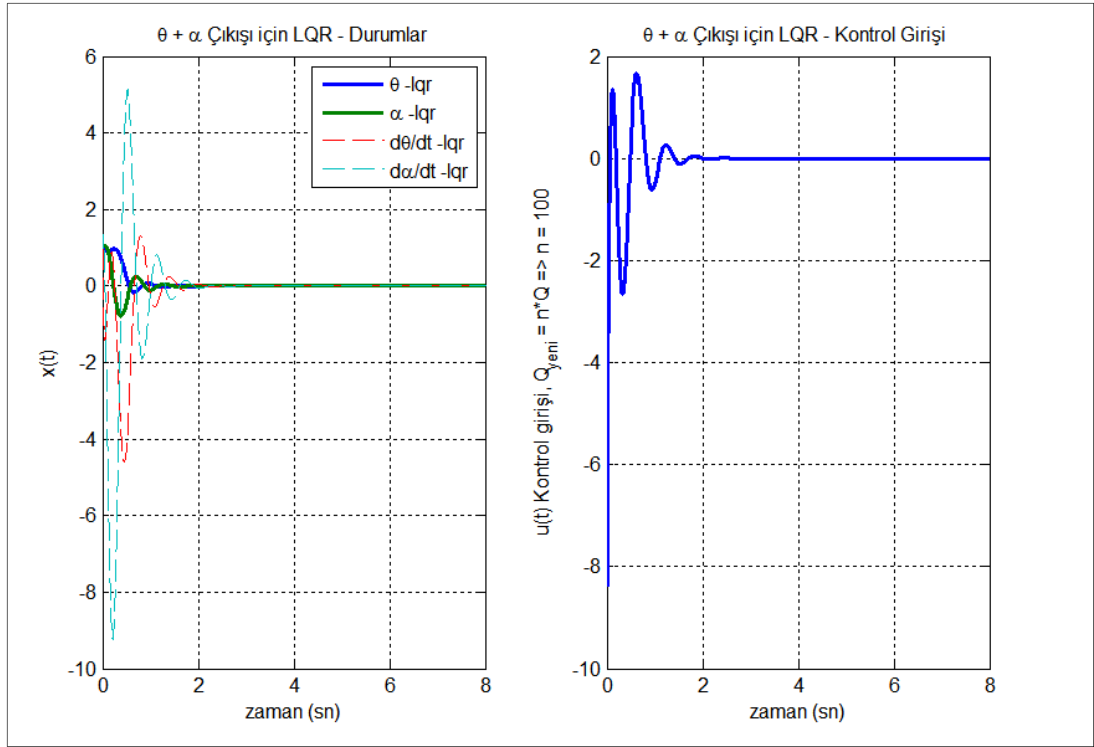
Şekil 4.25 : $Q = 0.1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.



Şekil 4.26 : $Q = 1$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.

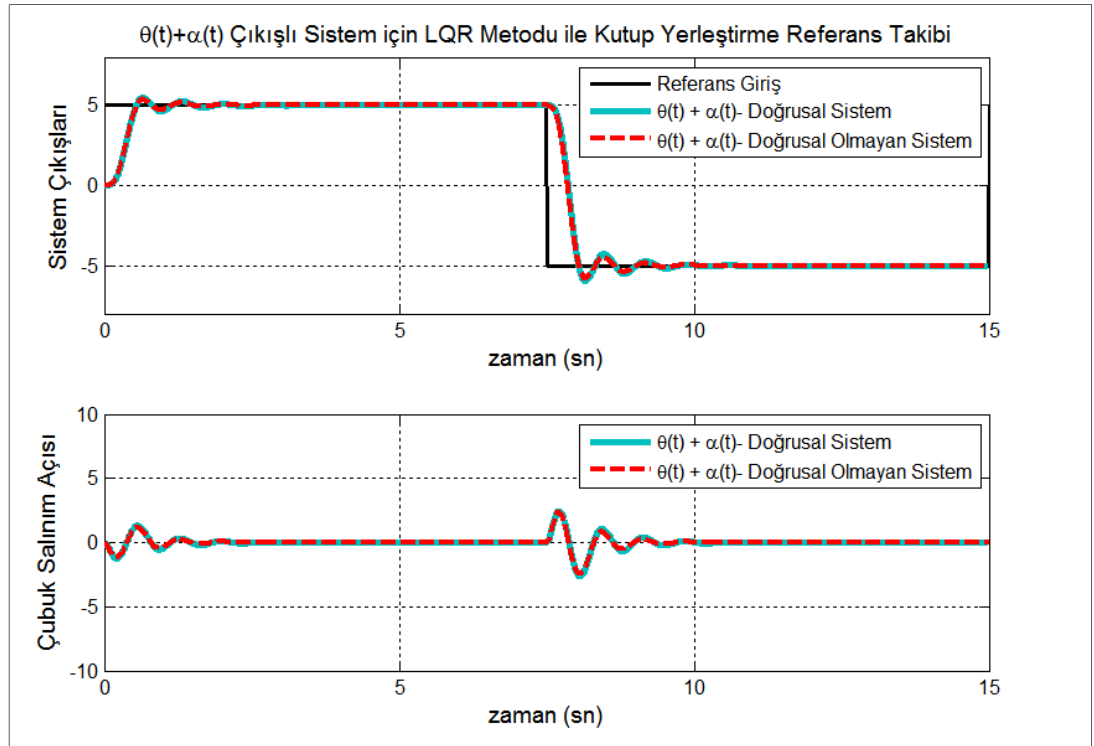


Şekil 4.27 : $Q = 10$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.



Şekil 4.28 : $Q = 100$ için sistem durumları ve sistem çıkışı.

Şekiller 4.25,4.26,4.27 ve 4.28’ de görüldüğü üzere durumları cezalandıran ağırlık matrisinin artması sistemin oturma zamanını azaltırken kontrol girişini arttırmaktadır.

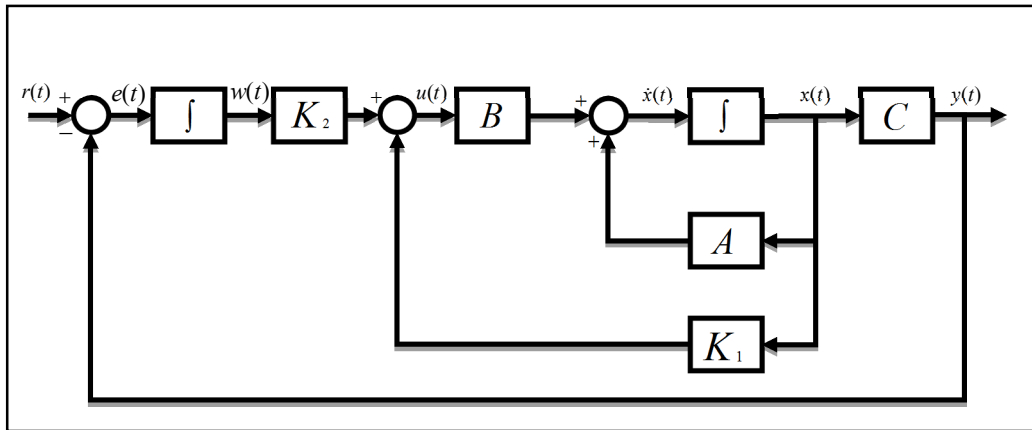


Şekil 4.29 : $R = 10$, $Q = 100$ için referans sinyalin takip edilmesi.

Oturma zamanı ve kontrol girişi için istenen kriterleri sağlayan katsayılar $R = 10$ ve Q matrisinin 100 ile çarpımı durumunda bulunmuştur. Bulunan optimal kazanç vektörü, referans sinyali takip etmek için hem doğrusal sistemde hem de doğrusal olmayan sistemde simüle edilmiş ve sonuçları üstte bulunan Şekil 4.29'da çizilmiştir.

4.5.5 Doğrusal karesel optimal kontrol ve integral etkisi

Kutup yerleştirme ile referans takibi sırasında bahsedilen; $\tilde{N}$ sabiti ile önçarpım işlemi yerine, integral etkisi ile ve yine gerekli katsayısı doğrusal karesel düzenleyici ile bulunabilen bir yöntem uygulamak mümkündür. Ön çarpım işlemine gerek kalmaksızın çıkış ile giriş arasındaki kalıcı durum hatası bu integral ile sıfırlanmış olmaktadır. Sistem matrislerinin durum uzay matrisi, ekstra bir durum olarak çıkış ile giriş arasındaki hatayı içeren hata durumunun eklenmesi ile birlikte Denklem 4.86 ve Denklem 4.87' deki gibi yeni bir form alır ve optimizasyon işlemine tabi tutulur, Şekil- 4.30.



Şekil 4.30 : Doğrusal karesel optimal kontrol ve integral etkisi şeması.

$$e = r - y \quad (4.84)$$

$$\dot{w} = e = r - Cx \quad (4.85)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r \quad (4.86)$$

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}u + \bar{B}_r r \quad \bar{x} \in \mathbb{R}^{n+k} \quad (4.87)$$

Yeni eklenen sistemin boyutu eklenen integratör sayısı k kadar artmış olur. Sistemin durum uzayındaki çıkış matrisine göre seçilen Q ağırlık matrisinin yeni formu, Denklem 4.90'de yer almaktadır.

$$y = \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & \gamma I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \quad (4.88)$$

$$y = \bar{C} \bar{x} \quad (4.89)$$

$$\bar{Q} = \bar{C}^T \bar{C} = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & \gamma^2 I \end{bmatrix} \quad (4.90)$$

$$u = -[K_1 \quad -K_2] \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} = -K_1 x + K_2 w = -K_1 x + K_2 \int_0^t e(\sigma) d\sigma \quad (4.91)$$

Yukarıdaki denklemler sonucunda yeni maliyet fonksiyonu denklem x teki şeklini alır ve Cebirsel Riccati denkleminin tercih edilen Q ve R matrislerinin seçilip çözülmesiyle K_1 ve K_2 kazançları Denklem 4.92 – 4.97' deki gibi bulunabilir.

$$\bar{J} = \int_0^\infty (\bar{x}^T \bar{Q} \bar{x} + u^T \bar{R} u) dt \quad (4.92)$$

$$u = -\bar{R}^{-1} \bar{B} \bar{P} \bar{x} \quad (4.93)$$

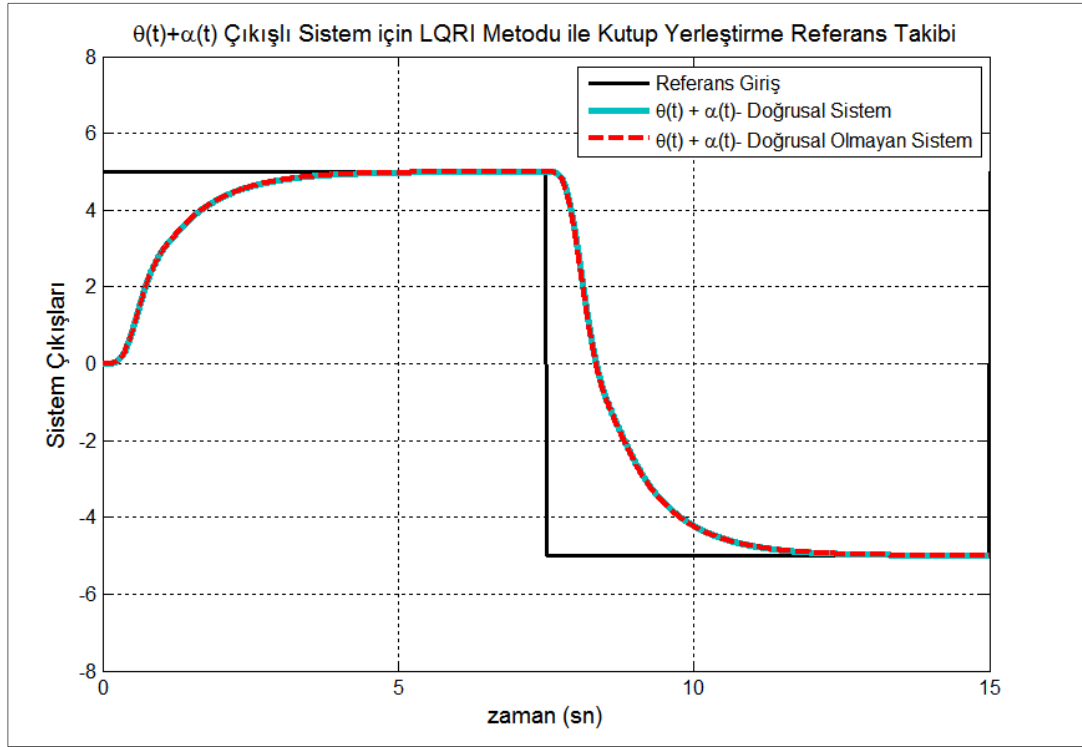
$$u = -\bar{R}^{-1} [B^T \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} \quad (4.94)$$

$$u = -\bar{R}^{-1} [B^T \quad 0] \begin{bmatrix} P_{11}x + P_{12}w \\ P_{21}x + P_{22}w \end{bmatrix} = -\bar{R}^{-1} B^T P_{11}x - \bar{R}^{-1} B^T P_{12}w \quad (4.95)$$

$$K_1 = \bar{R}^{-1} B^T P_{11} \quad (4.96)$$

$$K_2 = \bar{R}^{-1} B^T P_{12} \quad (4.97)$$

Şekil 4.31 de doğrusal sistem ve doğrusal olmayan sistemin integratör etkisiyle kalıcı durum hatasının, kare dalga referans girişe göre değişimini gösteren simülasyon sonucu yer almaktadır. Bu şekilden görüldüğü üzere, sistemin kalıcı durum hatası sıfırılanmıştır. Sistemin oturma zamanı yaklaşık 3.5-4 saniye aralığında olacak şekilde durum ve giriş ağırlık matrisleri seçilmiştir.



Şekil 4.31 : İntegral etkisi ile uygulanan optimal kontrolün, kare dalga referansı için çıkış simülasyonu.

4.6 Gözleyici ile Durum Tahmini ve Kontrol

Bölüm 3.2 ve bölüm 3.4 'te anlatılan kutup yerleştirme ve optimal kontrol yöntemlerinde; kontrol edilecek sistemin tüm durumlarının bilinmesi gerekmektedir. Esnek eklemli manipülatörün durumları olan; tablanın değişim açısının ve açısal hızının, aynı şekilde çubuğun sapma açısının ve açısal hızının bilinmesi gereklidir. Esnek eklemli manipülatörün fiziksel yapısında, çıkış açısını ölçmek için enkoder kullanılsa da açısal hızı ölçmek için ayrıca bir sensör kullanılmayıp; açı değerinin türevi alınarak ölçüm alınmış ve bu da ölçümün kalitesini etkilemiştir. Durum geribeslemesi ile kontrol yapılması istenildiğinde, tüm durumları ölçen sensör sistemi eklenmelidir, takometre kullanılması gibi. Sistemin küçüklüğü, sensörün büyüklüğü veya sistemin kapalılığı sisteme yeni sensör eklenmesini engellemekte olabilir ayrıca eklenecek olan her sensör maliyeti arttırabilir.

Yukarıdaki sebeplerden dolayı sistemin girişlerini ve çıkışlarını gözlemleyerek, ölçülmesi mümkün olmayan durumları tahmin etmek ve bu durumlardan faydalanarak sisteme kontrol uygulamak mümkündür. Gözleyicinin dezavantajları arasında,

doğrusal sistemlerde; sistem başladığında tahminlerde bir miktar hata olması ve sistemdeki gürültülerin, ani değişimlerin tahminleri olumsuz etkilemesi sayılabilir.

4.6.1 Gözleyici tasarımı

Gözleyici; sistemin durumunu tahmin etmek üzere oluşturulan, sistemi taklit eden başka bir sistemdir. Gözleyici sistem durumlarına $\tilde{x}$ denilecek olursa gözleyici sistem dinamiği Denklem 4.98'deki şekilde yazılabilir.

$$\dot{\tilde{x}} = \tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u + Ly \quad (4.98)$$

$$\tilde{y} = C\tilde{x} \quad (4.99)$$

Gözlenecek olan sistemin durumları ile gözleyici durumları arasındaki hata ve hata dinamiği aşağıdaki denklemler aracılığıyla incelenebilir, Denklem 4.100 – 4.102.

$$E \triangleq (x - \tilde{x}) \quad (4.100)$$

$$\dot{E} = (\dot{x} - \dot{\tilde{x}}) \quad (4.101)$$

$$\dot{E} = (Ax + Bu) - (\tilde{A}\tilde{x} + \tilde{B}u + Ly) \quad (4.102)$$

Denklem 4.102'ye $\tilde{A}x$ terimi eklenip çıkarılır ve $y = Cx$ değişimi yapılırsa denklem geliştirilebilir, Denklem 4.103 – 4.105.

$$\dot{E} = Ax - \tilde{A}x + \tilde{A}x - \tilde{A}\tilde{x} + Bu - \tilde{B}u - LCx \quad (4.103)$$

$$\dot{E} = (A - \tilde{A})x + \tilde{A}(x - \tilde{x}) + (B - \tilde{B})u - LCx \quad (4.104)$$

$$\dot{E} = \tilde{A}E + (A - \tilde{A} - LC)x + (B - \tilde{B})u \quad (4.105)$$

Hata dinamiğinin; gözlenen sistemin durumları x 'lerden bağımsız olarak yazılabilmesi ve giriş etkisinin de ortadan kaldırılabilmesi için Denklem 4.105' teki ifadeler şu şekilde yazılmalıdır, (4.106) – (4.107).

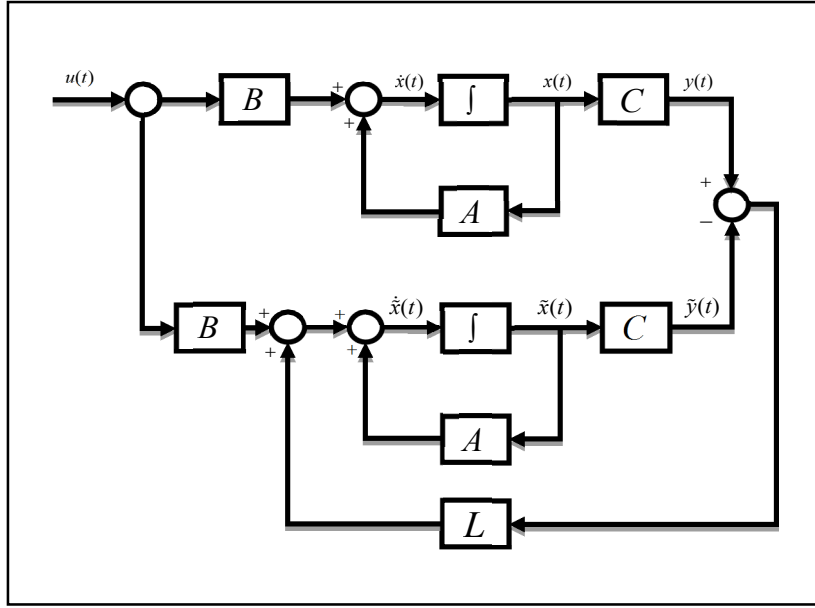
$$\tilde{A} = A - LC \quad (4.106)$$

$$\tilde{B} = B \quad (4.107)$$

Bu durumda hata dinamiği denklemi son halini alarak Denklem 4.109'daki gibi ifade edilebilir, gözleyiciye ait blok şeması Şekil 4.32'de yer almaktadır.

$$\dot{E} = \tilde{A}E = (A - LC)E \quad (4.108)$$

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + L(y - C\tilde{x}) \quad (4.109)$$



Şekil 4.32 : Gözleyici sisteminin blok şeması.

Gözleyici sistem oluşturulduğunda, gözleyici sisteminin durumlarının gözlenen sistem durumlarına yakınsaması ($\tilde{x} \rightarrow x$) yani gözlenen sistemin durumları ile arasında oluşan hatanın sıfıra gitmesi ($E(t) \rightarrow 0$) istenmektedir. Dolayısıyla hata dinamikleri için bir regülasyon problemi oluşturulması gerektiği düşünülebilir. Gözleyici durum denklemleri, gözlenen sistemin durumlarına çok benzemektedir, sadece $L(y - \tilde{y})$ terimini içermektedir. Gözleyici çıkışı ile sistem çıkışı arasındaki farkı ifade eden bu terim gözleyici durum dinamiğini hızlandırmakta veya yavaşlatmaktadır. Durum yakınsaması sağlandığında çıkışlar da birbirine eşit olacağı için gözlenen durum dinamikleri ile gözleyici durum dinamikleri birbirinin aynısı olur.

$$\tilde{x} = x \Rightarrow \tilde{y} = y \Rightarrow L(y - \tilde{y}) = 0 \quad (4.110)$$

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{x} \Rightarrow A\tilde{x} + Bu = Ax + Bu \quad (4.111)$$

Sistemde meydana gelen değişiklikler, gürültüler sonucunda $L(y - \tilde{y})$ terimi devreye girerek aradaki farkı giderir; gözleyicinin, sistemin davranışını takip etmesini yeniden

sağlar. Gözleyici tasarımı yaparken seçilecek olan L gözleyici kazanç vektörünü bulabilmek için kapalı çevrim gözleyici sisteminden ve özdeğer özelliklerinden yararlanmak mümkündür, (4.112).

$$\lambda(A - LC) = \lambda[(A - LC)^T] = \lambda(A^T - C^T L^T) \quad (4.112)$$

$$\tilde{A}^T = A^T - C^T L^T \quad (4.113)$$

L gözleyici kazancını, $\tilde{A}^T$ matrisinin kutuplarını yani kapalı çevrim kutuplarını sol yarı düzlemde yerleştirecek biçimde seçmek gereklidir. Kutup yerleştirme ne kadar sol tarafta olursa gözleyicinin durumlarının gözlenen sistemin durumlarını yakalaması o kadar hızlı olacaktır. Genel anlamda gözleyici kutupları, gözlenen sistemin dominant kutuplarından 5-10 kat hızlı seçilmekte ya da sistemin en hızlı kutbundan 5-10 kat seçilmektedir.

Gözleyici sisteminin kapalı çevrim kutuplarını istenen kutuplara getirebilmek için gerekli L kazancını bulmak için üç farklı yaklaşım vardır. Bu yöntemler; Sistem matrisi A'yı, kontrol matrisi B'yi ve çıkış matrisi C'yi, gözleyici kanonik forma transformasyonunu gerçekleştirerek kutup yerleştirme yöntemi, Direkt değişim metodu ve son olarak Ackermann formülü kullanılarak kutup yerleştirme yöntemi olarak sayılabilir.

Ackermann Formülü kullanılarak L kazancını bulmak için aşağıdaki Denklem 4.114 – 4.116 kullanılmalıdır. Denklem 4.115' te geçen μ_i terimi, kutupların yerleştirilmek istenen konumlarıdır ve tüm durumları gözleyebilen gözleyici için gözlenen sistemin durum sayısına eşittir.

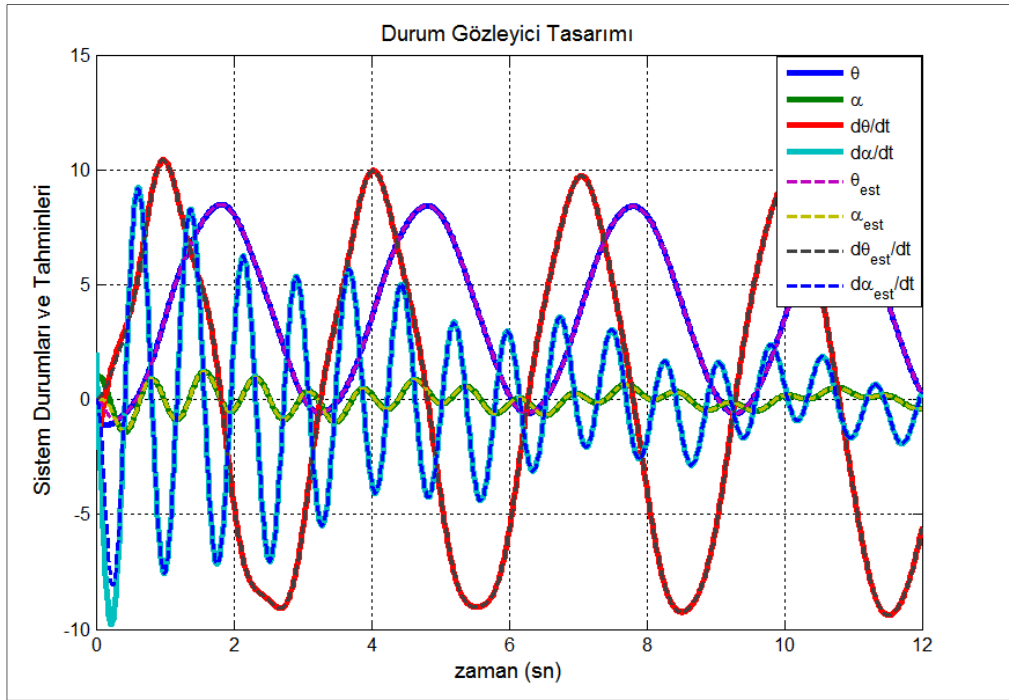
$$L = [L_1 \quad L_1 \quad \dots \quad L_n]^T \quad (4.114)$$

$$|sI - (A - LC)| = (s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) \quad (4.115)$$

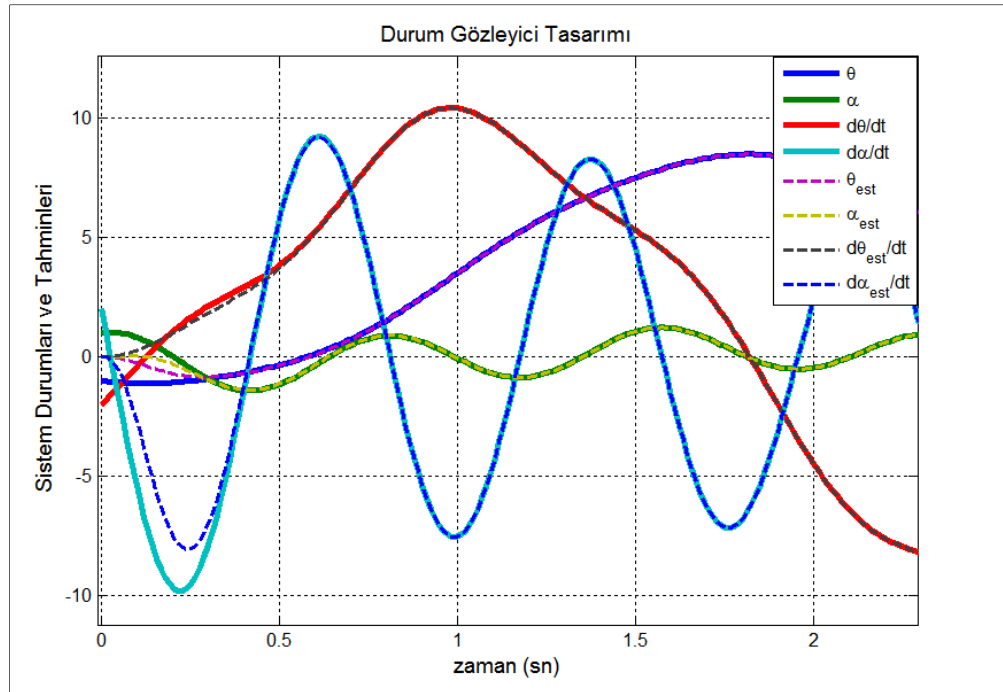
$$L = \phi(A) \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} = \phi(A) O_B^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.116)$$

Esnek eklemli manipülatörde gözleyici kutupları $[-11, -12, -13, -14]$ köklerine yerleştirilerek L gözleyici kazançları bulunmuş ve girişe 3 volt genlikli, periyodu 3 saniye olan sinusoidal sinyal uygulanmıştır. Açık çevrim sistem durumları ve tahmin

edilen sistem durumları; doğrusal sistem modeli için Şekil 4.33'teki gibi simüle edilmiştir.



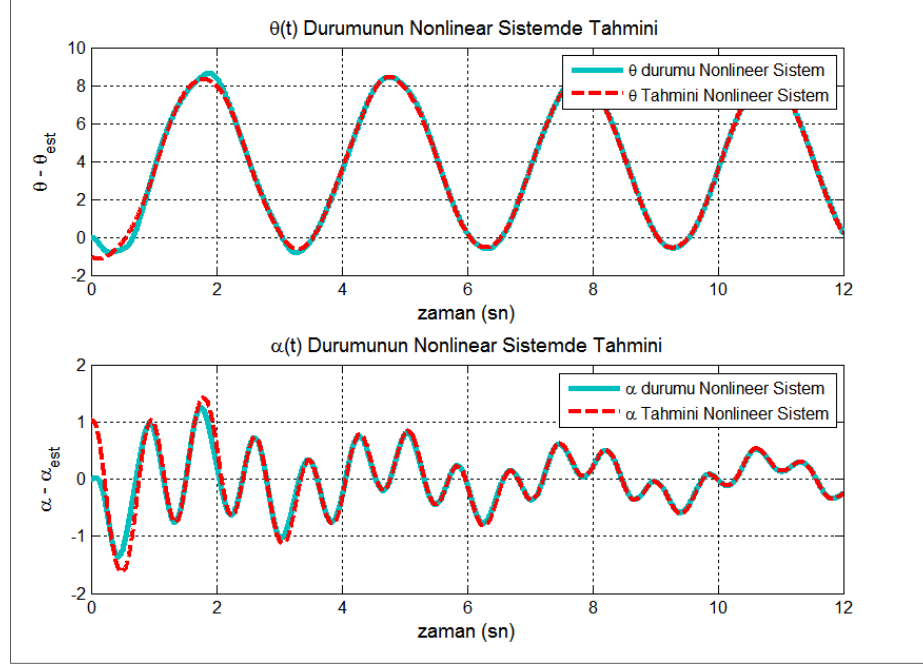
Şekil 4.33 : Esnek eklemlili manipölatör durumlarının gözleyici ile tahmin edilmesi.



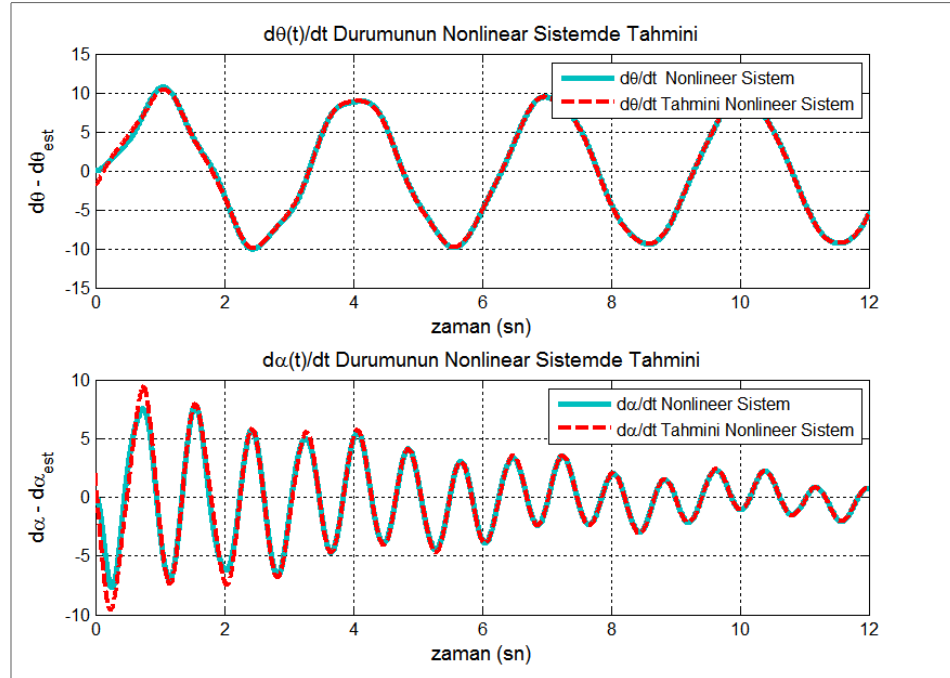
Şekil 4.34 : Tahmin edilen durumların yakınlştırılmış halleri.

Şekil 4.34'te de ilk 2 saniyesi genişletilmiş olan durum tahminlerinden görüldüğü üzere yaklaşık 0.4 saniye içinde tahmin edilen durumlar ile sistem durumları çakışık

hale gelmektedir. Bulunan L tahmin kazancı kullanılarak; sistemin doğrusal olmayan sistem modelinin durumları Matlab/ Simulinkte simüle edilmiştir, sistemin durumlarına ait simülasyon sonuçları Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da gösterilmiştir.



Şekil 4.35 : Doğrusal olmayan modelin θ , α durumlarının gözleyici ile tahmini.



Şekil 4.36 : Doğrusal olmayan modelin $\dot{\theta}$, $\dot{\alpha}$ durumlarının gözleyici ile tahmini

Nonlinear Sistemde durum tahmini yapıldığında tahminlerin, sistem durumlarını yakalaması doğrusal sistemde yapılan tahmine göre daha uzun sürdüğü görülmektedir.

4.6.2 Gözleyici tahminleri kullanılarak doğrusal karesel optimal kontrol

Sistem durumlarının ve gözleyici tahminlerinin farkı olan hatanın dengelenmesi ,aynı zamanda sistem durumlarının regüle edilmesi istenildiği zaman; sistem girişinin, Denklem 4.117' deki gibi seçilmesi gerekir. Bu durumda genel durum dinamikleri şeklinde ifade edilebilir, (4.121).

$$u = K\tilde{x} \quad (4.117)$$

$$e = (x - \tilde{x}) \Rightarrow \tilde{x} = x - e \quad (4.118)$$

$$\dot{x} = Ax - BK\tilde{x} = (A - BK)x + BKe \quad (4.119)$$

$$\dot{e} = (A - LC)e \quad (4.120)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0 & A - LC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix} \quad (4.121)$$

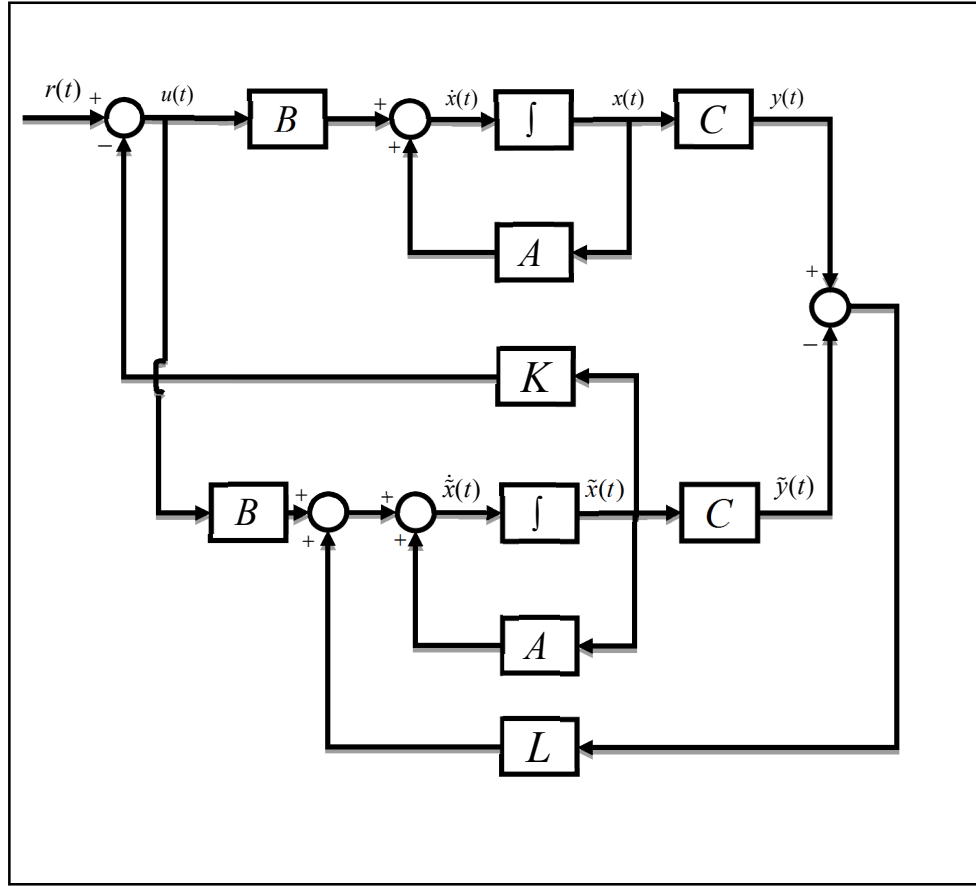
$$M = \begin{bmatrix} A - BK & BK \\ 0 & A - LC \end{bmatrix} \quad (4.122)$$

Elde edilen M matrisinin, özdeğerlerinin asimptotik kararlı olması durumunda; ayırma prensibi olarak adlandırılan yöntem uygulanabilir. Ayırma prensibi, sistemin durumları biliniyorsa kontrolcü tasarlanabileceğini, gözleyicilerin ise kontrol eyleminden bağımsız olarak dizayn edilebileceğini ifade etmektedir. M matrisi üst üçgen matris olduğu için asimptotik kararlılık için aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$Re(eig(A - BK)) < 0 \quad (4.123)$$

$$Re(eig(A - LC)) < 0 \quad (4.124)$$

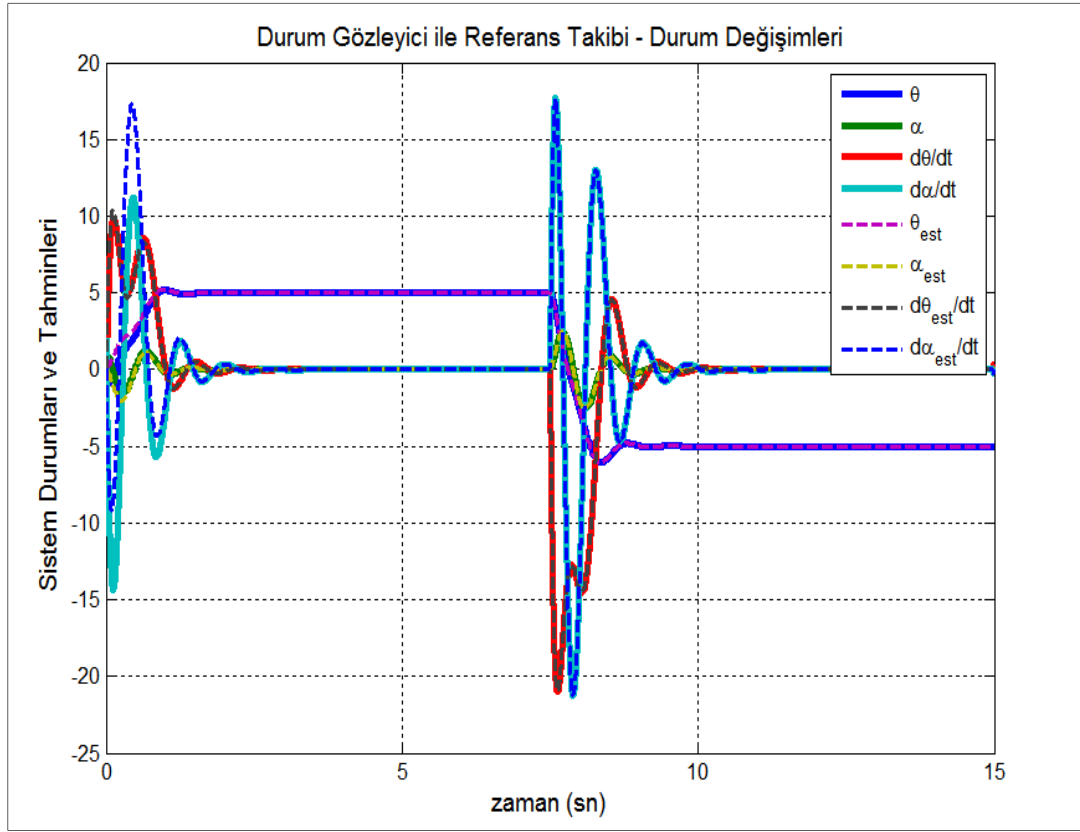
Bu durumda gözleyicinin tahmin ettiği durumlar ile K kontrolör kazanç vektörü çarpılarak, gözlenen sistemin durumlarının regülasyon ya da referans izleme problemi çözülebilir, Şekil 4.37.



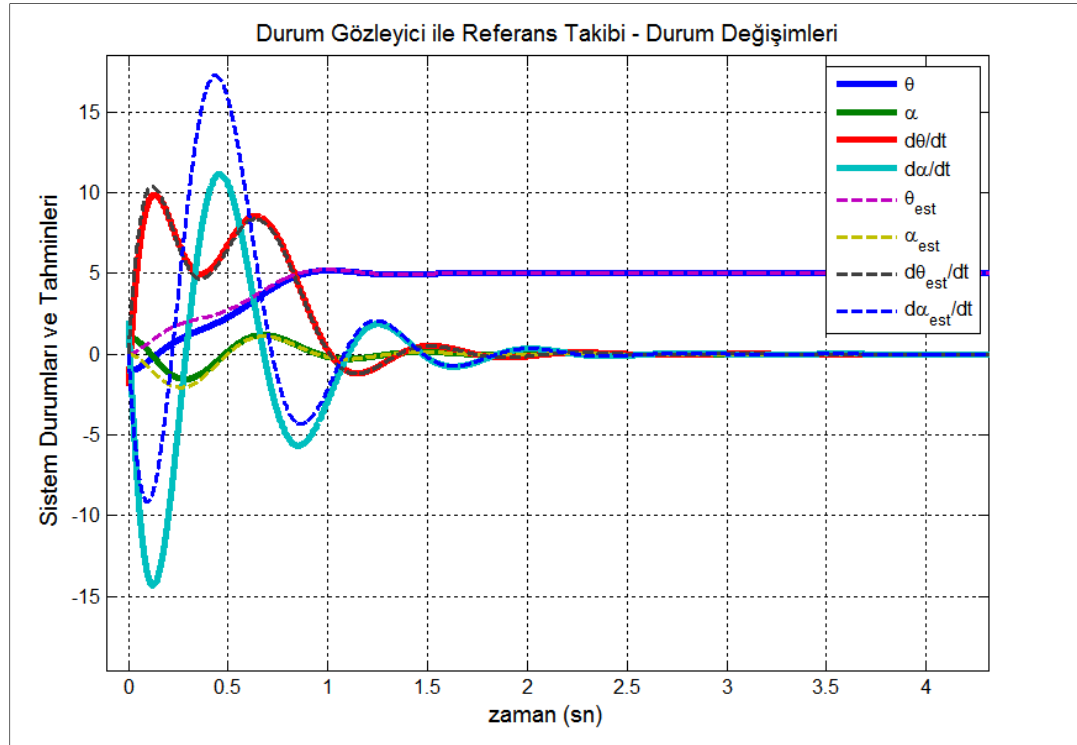
Şekil 4.37 : Gözleyici ile doğrusal karesel optimal kontrol şeması.

Esnek eklemli manipulatörde; tasarlanan gözleyici tahminleri kullanılarak, sistem durumlarının geri beslenmesi ve referansı takip etmesi için gerekli olan K kazancı, Bölüm 4.5.4 de bulunduğu şekilde kullanılarak Matlab/Simulink'te simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

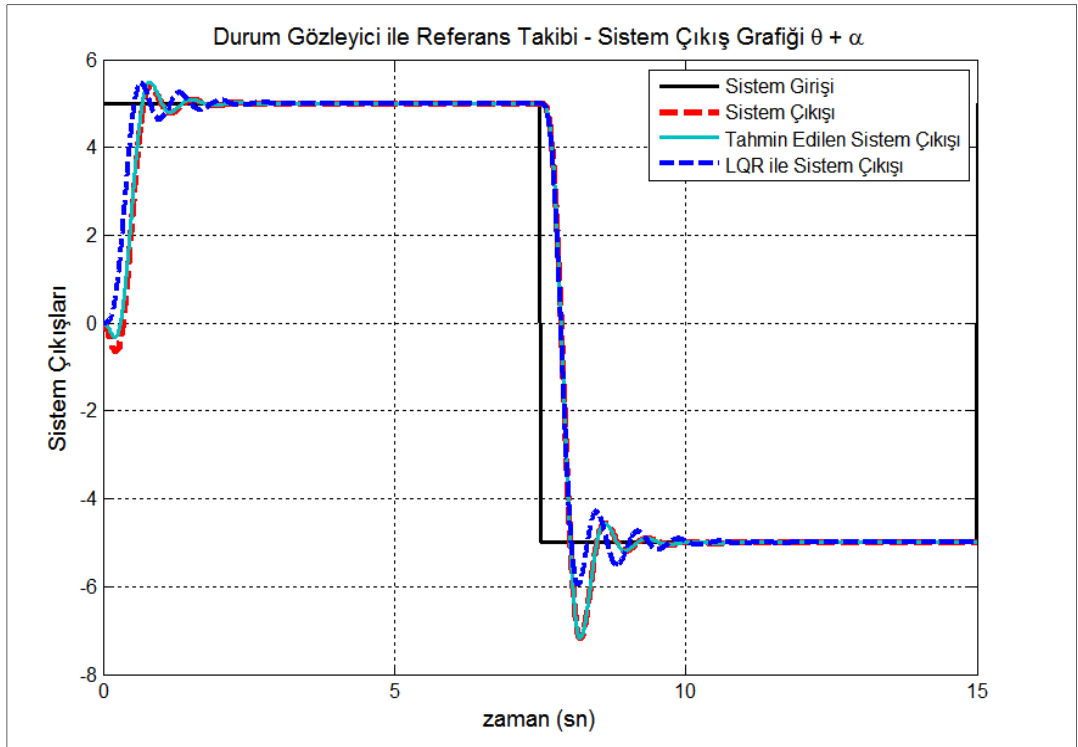
Tahmin edilen durumlar ile kare dalga referans takibine ait durumların değişimi Şekil 4.38 de verilmiştir, tahmin edilen durumlar kullanılarak elde edilen sistem çıkışı ile Bölüm 4.5.6 de doğrusal karesel düzenleyici elde edilen sistem çıkışı, Şekil 4.40'ta üst üste çizdirilmiştir. Son olarak doğrusal olmayan sistemin durumlarının tahmin edilmesi ve tahmin edilen durumların K optimal kazancı ile çarpılıp sistem çıkışının kontrolünü sağlayan durum için simülasyon sonuçlarına Şekil 4.41 de yer verilmiştir.



Şekil 4.38 : Durum tahmini ile kare referans sinyalini takip edilmesi.

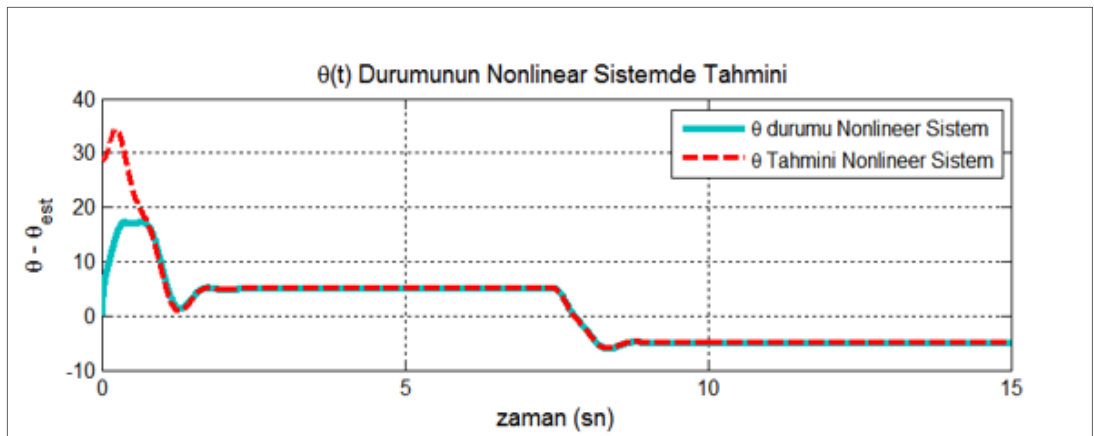


Şekil 4.39 : Durum tahmini ile kare referans sinyalinin takip edilmesi ilk 4 sn.

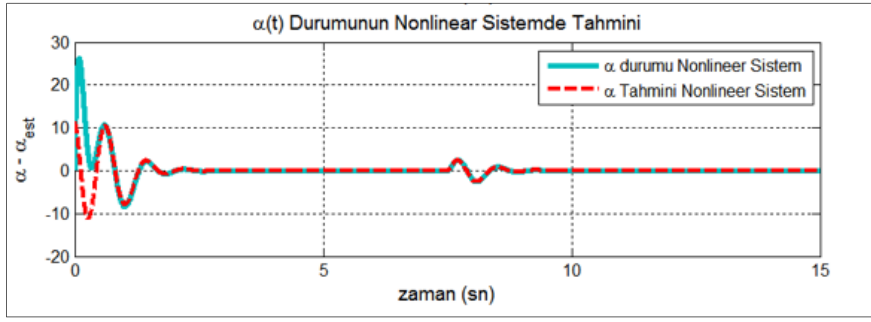


Şekil 4.40 : Durum tahmini ile yapılan optimal kontrolün, sistemin kendi durumlarının kullanılmasıyla yapılan optimal kontrolle karşılaştırılması.,

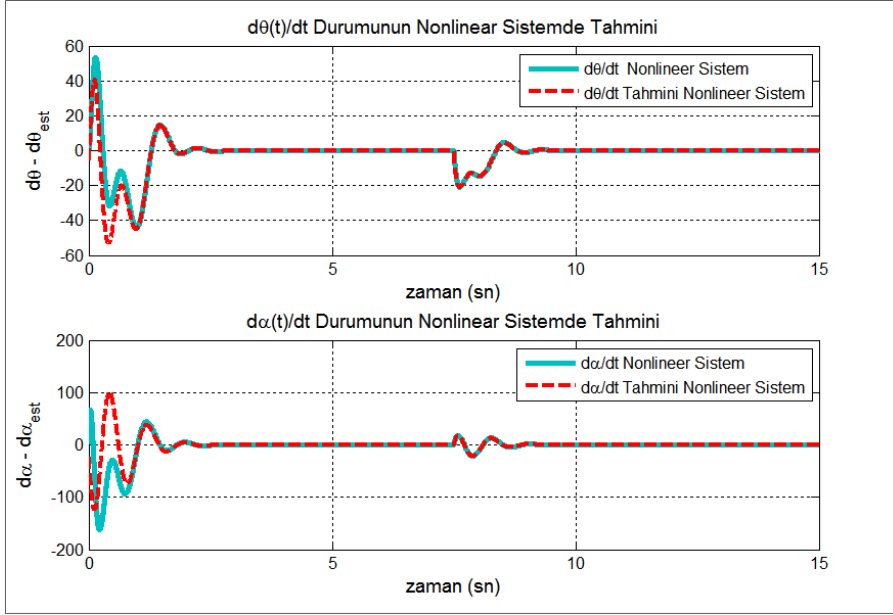
Üstteki Şekil 4.40'tan da görüleceği üzere, durumların tahmin edildiği sistemin çıkışı daha uzun sürede referans girişe oturmaktadır, Bölüm 4.5.4 te bulunan doğrusal karesel düzenleyicisi, sistemin mevcut durumlarını doğrudan kullanarak daha kısa sürede ve daha az aşım ile yörüngeye oturmaktadır. Sistemin tüm durumlarının; sensörlerle ölçülerek kontrol yapılmasının, daha doğru ve daha kısa zamanda sonuç vereceği aşikardır.



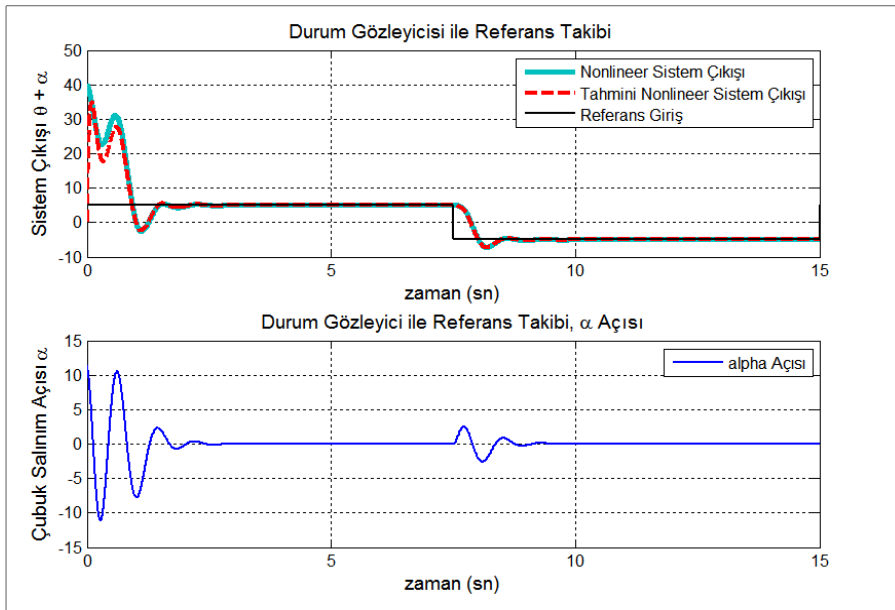
Şekil 4.41 : Doğrusal olmayan sistem modeli için θ durumunun tahmin edilmesi.



Şekil 4.42 : Doğrusal olmayan sistem modeli için α durumunun tahmini.



Şekil 4.43 : Doğrusal olmayan sistem modeli için $\dot{\theta}$ ve $\dot{\alpha}$ durumlarının tahmini.



Şekil 4.44 : Doğrusal olmayan sistem modeli için sistem çıkışı ve çubuk salınım açısı

Şekil 4.41 – Şekil 4.44 arasındaki grafiklerden görüldüğü üzere doğrusal olmayan sistemlerde; gözleyici tahminlerinin sistemin durumlarını yakalaması uzun sürmektedir. Gözleyici tarafından durumları tahmin edilen ana sistemin ilk koşulları bilinemeyeceği için; tahmin edilen durumlar ile kontrol yapılması, sistem durumları yakalanana kadar büyük açılı değerlerine, büyük kontrol girişine neden olabilmektedir.

4.6.3 Kalman Filtresi tahminleri kullanılarak doğrusal karesel optimal kontrol

Kalman filtresi yahut tahmincisi; sistemde bulunan gürültüleri veya ölçüm sırasında sensörlerden kaynaklanan gürültüleri de lineer denklemlerin içine katan bir durum gözleyici metodudur. Sisteme verilen giriş ve ölçülen gürültülü çıkışa bakarak sistemin gerçek çıkışını ve durumunu tahmin etmeye çalışır.

Sistemde var olan bazı dinamiklerin modelde dikkate alınmamış olması, kullanılan parametrelerin tam doğru seçilmemiş olması, sistem parametrelerinin zamanla değişmesi gibi durumlar, sistemin modelinde hata meydana getirmektedir ve gerçek sistemi tam olarak ifade edememektedir. Sensör ölçümlerinde hata olması veya ölçümlere gürültü karışması da sistemin kontrol edilmesi aşamasında sorun olmaktadır. Ölçüm sonuçlarını daha temiz hale getirmek ve sistemin dinamiklerini yöneten durum değişkenlerini tahmin etmek için Kalman filtresi kullanılabilir, Şekil 4.45.

Gürültü içeren doğrusal sistem dinamikleri Denklem 4.124 – 4.125’ teki şekilde ifade edilebilir.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw \quad (4.125)$$

$$y = Cx + v \quad (4.126)$$

Denklem 4.124 – 4.125’te yer alan w sistemin içindeki dinamikleri etkileyen gürültüdür, v ise sistemin çıkışının ölçümü sırasında gürültüyü temsil eder. Gürültüler sıfır-ortalımalı Gauss beyaz gürültüsüdür ve gürültüler birbirlerinden bağımsızdır, (4.127 – 4.128) .

$$p(w) = \frac{1}{\sqrt{n} \sqrt{2\pi} \sqrt{\det(Q_n)}} e^{-\frac{1}{2} w^T Q_n^{-1} w} \quad (4.127)$$

$$p(v) = \frac{1}{\sqrt[n]{2\pi} \sqrt{\det(R_n)}} e^{-\frac{1}{2}v^T R_n^{-1}v} \quad (4.128)$$

Kovaryans matrisleri arasındaki ilişki şu şekildedir.

$$E\{w(s)w^T(t)\} = Q_n \delta(t - s) \quad (4.129)$$

$$E\{v(s)w^T(t)\} = 0 \quad (4.130)$$

$$E\{v(s)v^T(t)\} = R_n \delta(t - s) \quad (4.131)$$

Durum tahmini yapacak olan gözleyici dinamiği Denklem 4.132 ile ifade edilir.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + Bu + L_K(y - \hat{y}) \quad (4.132)$$

L_K terimi Kalman kazancını ifade etmektedir, (4.133).

$$L_K = PC^T R_N^{-1} \quad (4.133)$$

P matrisi x durum vektörünün tahmin hatasının kovaryans matrisidir ve optimal kestirim problemini, $\hat{x}$ tahminin bu hatayı minimize edecek şekilde kurmak gereklidir, (4.134).

$$P = E\{[x(t) - \hat{x}(t)][x(t) - \hat{x}(t)]^T\} \quad (4.134)$$

P durum hata kovaryans matrisi simetrik olmalıdır ve filtreyi kararlı tutabilmesi için pozitif tanımlı olmalıdır. P matrisi Cebirsel Riccati Eşitliğine göre uygun Q_n ve R_n ağırlık matrislerinin seçilmesiyle bulunur, (4.135).

$$AP + PA^T + GQ_nG^T - PC^T R_n^{-1}CP = 0 \quad (4.135)$$

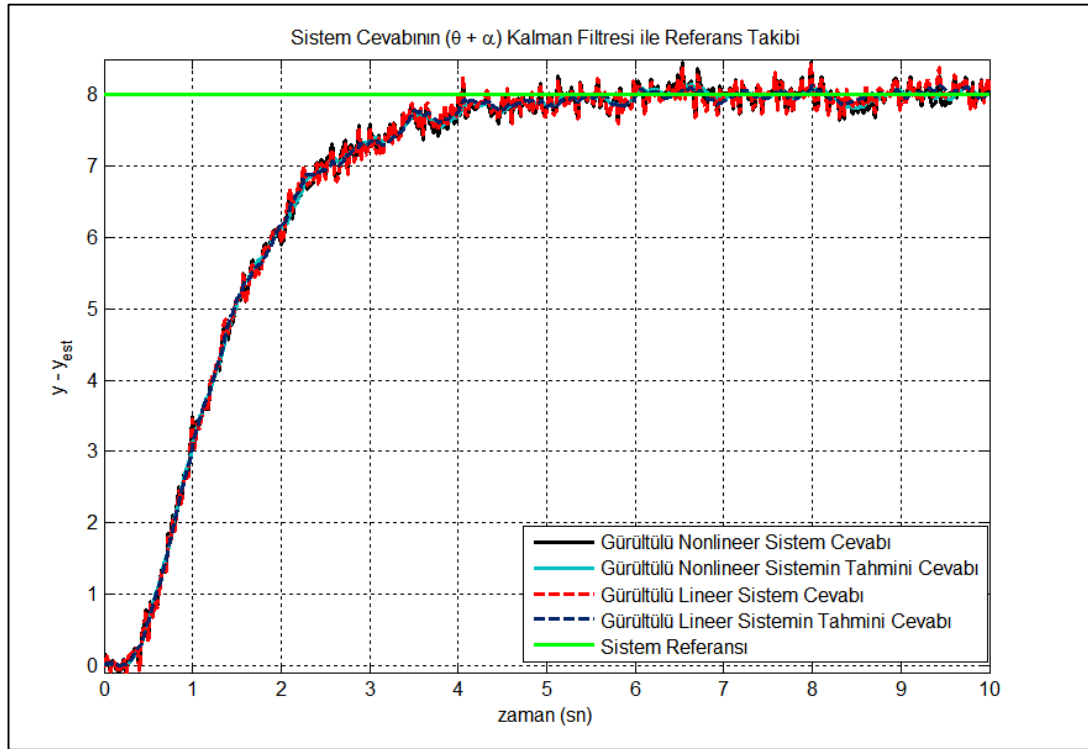
Q_n ve R_n gürültü kovaryans matrisleri seçilirken filtrelenecek istenilen gürültünün durumuna göre üç şekilde seçilebilir. Model ile ilgili sıkıntıların daha baskın olduğu durumlarda $Q_n > R_n$, ölçüm ile sıkıntıların daha fazla olduğu durumlarda $Q_n < R_n$, gürültülerin etkilerinin eşit olduğu durumlarda $Q_n = R_n$ olacak şekilde seçilmelidir.

Esnek eklemlerli manipülatör için Kalman filtresi kullanılarak öncelikle lineer sistem durumlarının gürültüsüz biçimde tahminleri yapılmış, daha sonra sistem girişine ve çıkışına Denklem 4.136 ve Denklem 4.137 de gösterilen Matlab ortamında rand

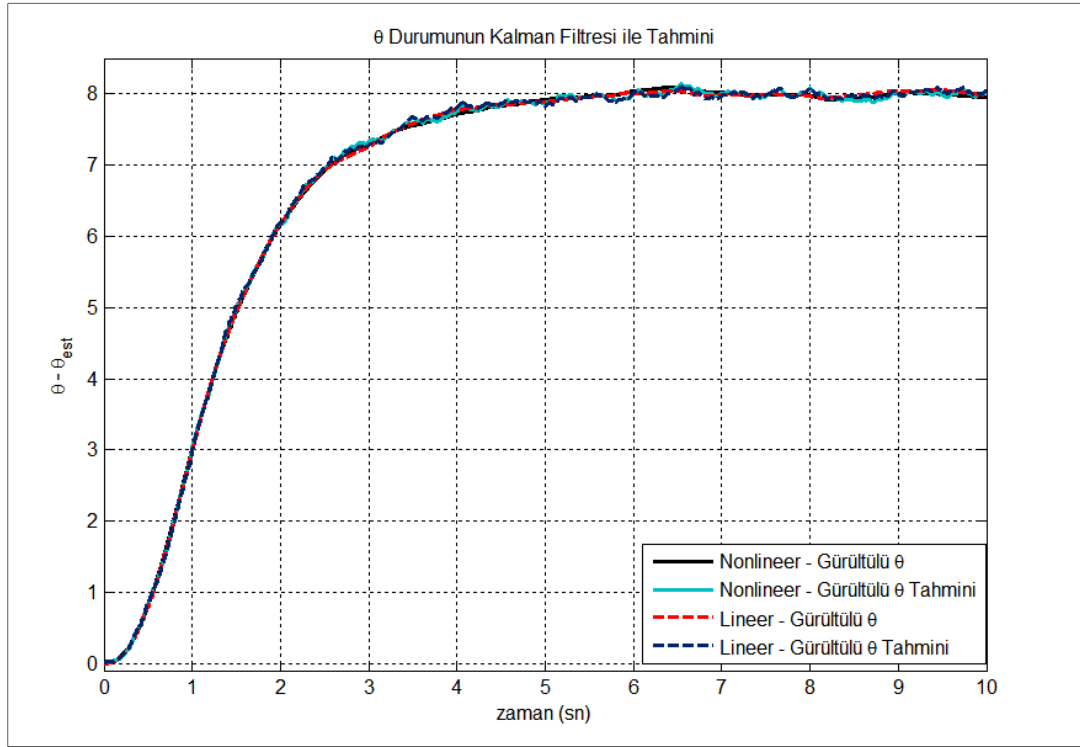
komutuyla rasgele gürültüler eklenmiştir. Eklenen gürültülerle birlikte sistem cevapları farklı kovaryans matrisleri dikkate alınarak, üst üste çizdirilmiştir. Sonuçlar Ek A'daki grafikler ile gösterilmiştir, grafiklerde sırasıyla sistem çıkışı, döner tabla dönme açısı θ , çubuk salınım açısı α , döner tabla dönme açısal hızı $\dot{\theta}$ ve çubuk salınım açısal hızları $\dot{\alpha}$ için çizdirilmiştir. Burada 10 derecelik bir başlangıç koşulu ile sistemin dengeye gelme hızı da doğrusal karesel optimal kontrol katsayılarına sağlanmıştır. Şekil 4.65 ve Şekil 4.69 arasındaki grafiklerde sistemin doğrusal olmayan modeli ve doğrusal modeline gürültüler eklenmiş ve Kalman filtresi ile tahmin edilen durumlar kullanılarak referans girişi takibi yapılmıştır.

$$w = 0.2 * rand(simülasyon zamanı) \quad (4.136)$$

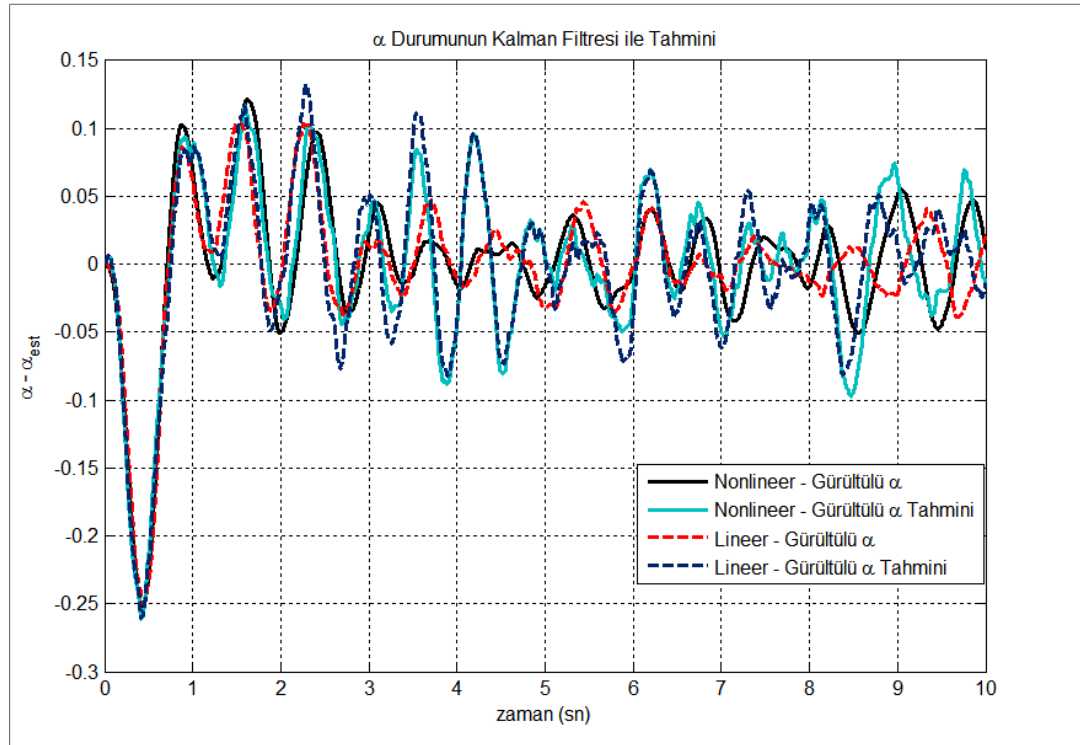
$$v = 0.2 * rand(simülasyon zamanı) \quad (4.137)$$



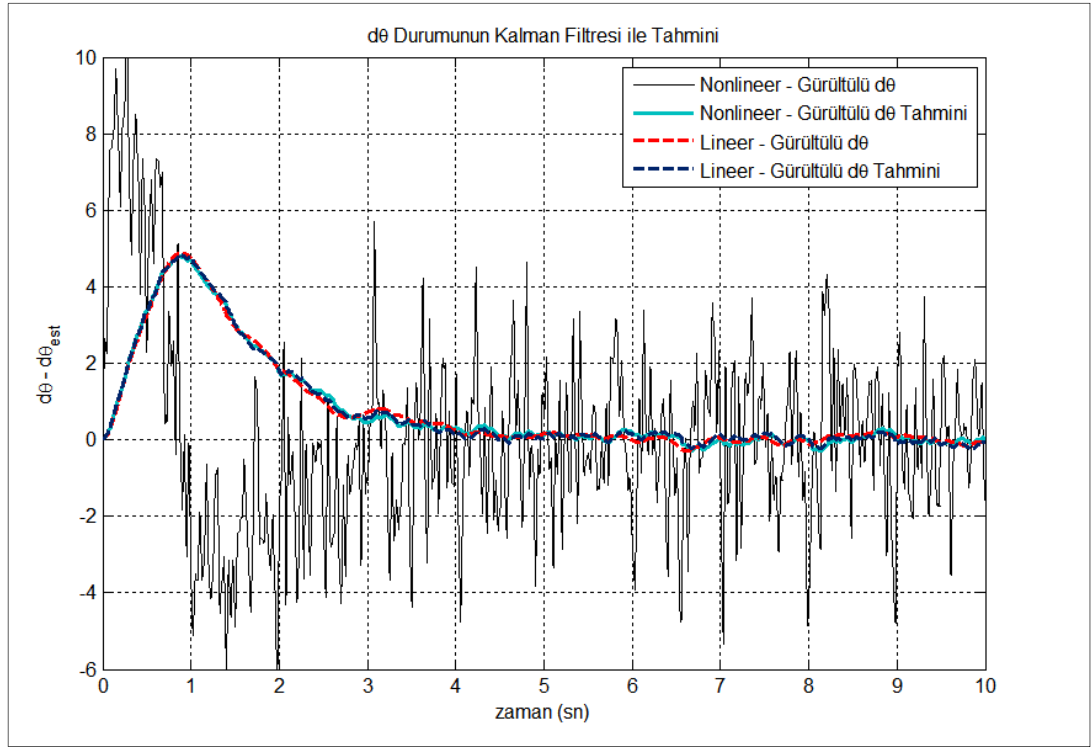
Şekil 4.45 : Nonlinear model ve lineer model tahmini ile referans takibi.



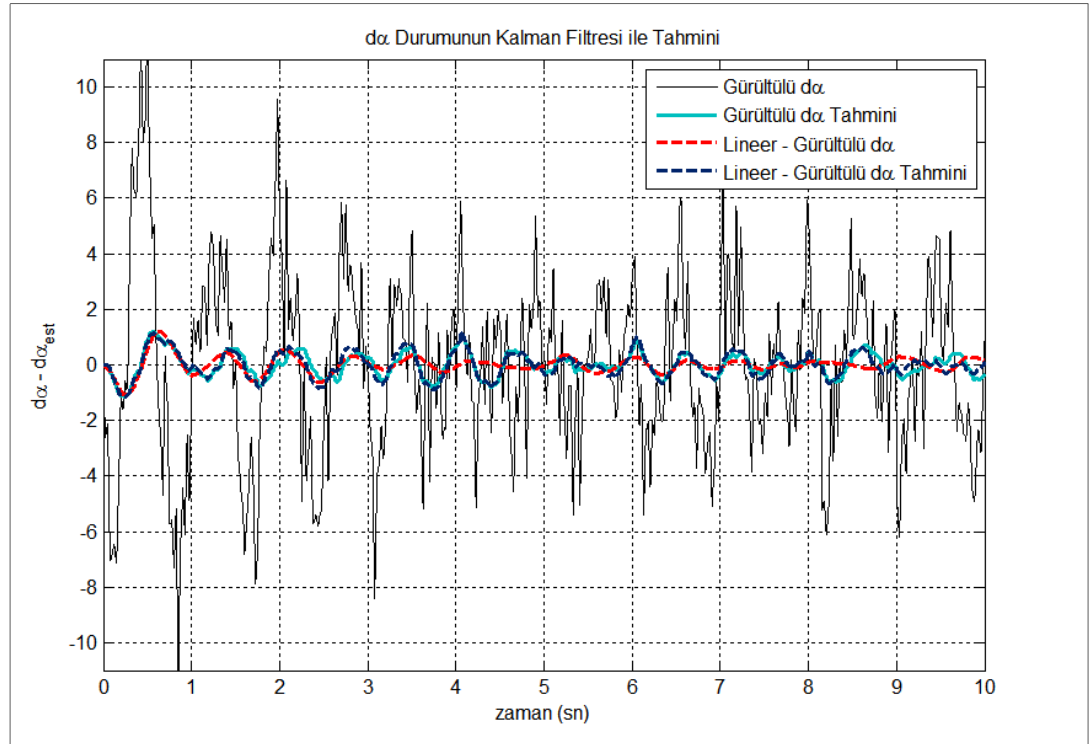
Şekil 4.46 : Nonlinear model ve lineer model tahmini ile referans takibi θ durumu.



Şekil 4.47 : Nonlinear model ve lineer model tahmini ile referans takibi α durumu.



Şekil 4.48 : Nonlinear model ve lineer model tahmini ile referans takibi $\dot{\theta}$ durumu.



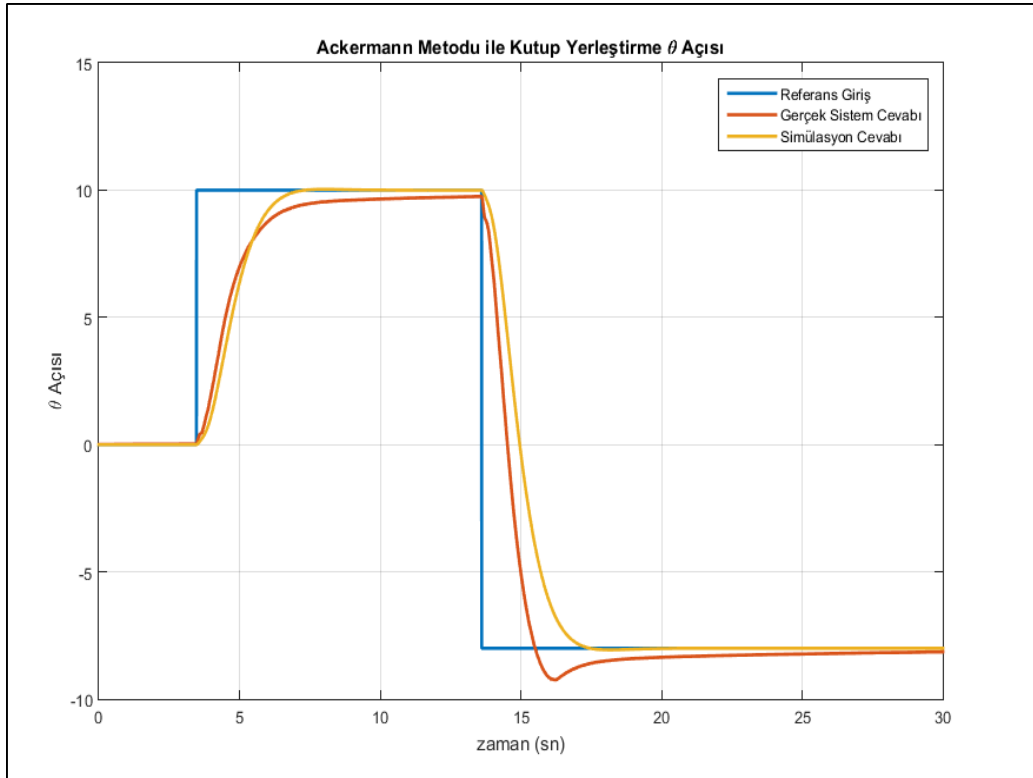
Şekil 4.49 : Nonlinear model ve lineer model tahmini ile referans takibi $\dot{\alpha}$ durumu.

Ek A'da bulunan grafiklerden görüleceği üzere Q_n ve R_n kovaryans matrislerinin farklı ağırlıklarda seçilmesi, gürültülü sistemin tahmini sırasında; tahmin edilen çıkışın ve tahmin edilen durumların, ya sistem modeline ya da gürültü modeline yaklaşmasına neden olmaktadır. En optimal regülasyon sonucuna, Şekil 4.65 ve Şekil 4.69 arasındaki grafiklerle gösterilen kovaryans matris değerleri $Q_n = 1000$ ve $R_n = 100$ değerlerinde ulaşılmıştır. Bu değerler kullanılarak; değeri 8 derece olan bir referans girişi uygulanmıştır, sonuçları Şekil 4.65 ve Şekil 4.69 arasındaki grafiklerde gösterilmiştir. Sistemin oturma zamanı, Bölüm 4.5.5'te anlatılan, integral etkisi ile doğrusal karesel optimal kontrol kazanç katsayıları ile sağlanmıştır.

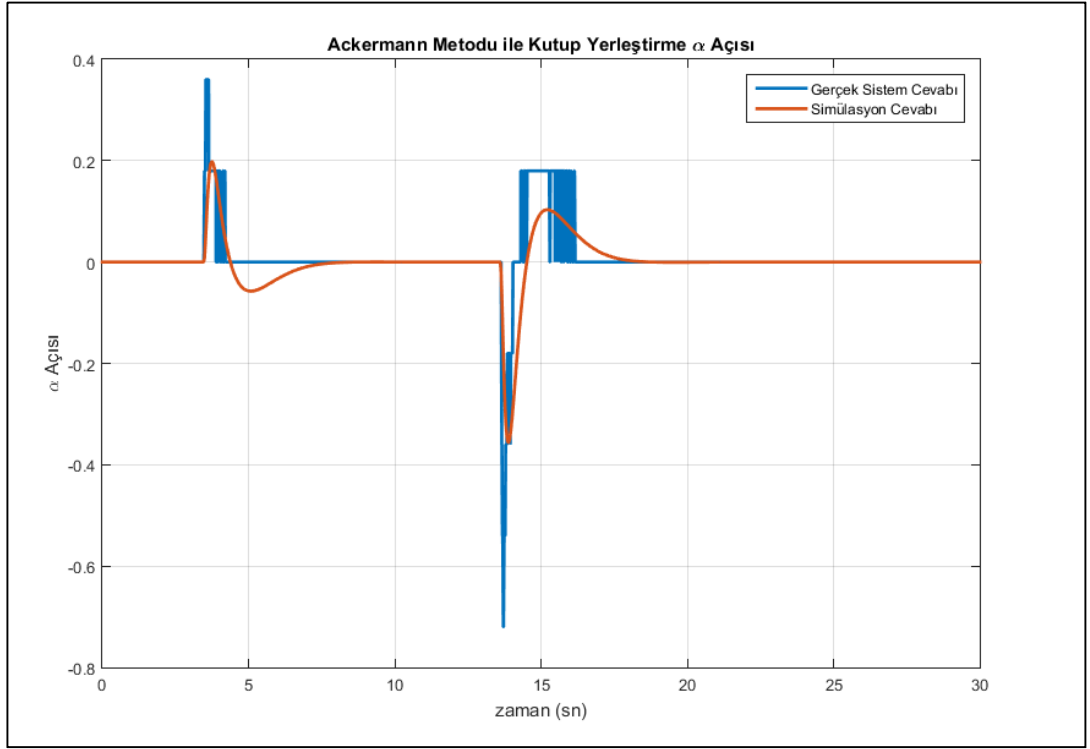
4.7 Esnek Eklemlı Manipulatörün Gerçek Zamanlı Kontrolü

4.7.1 Ackermann metodu ile durum geribeslemeli kontrol

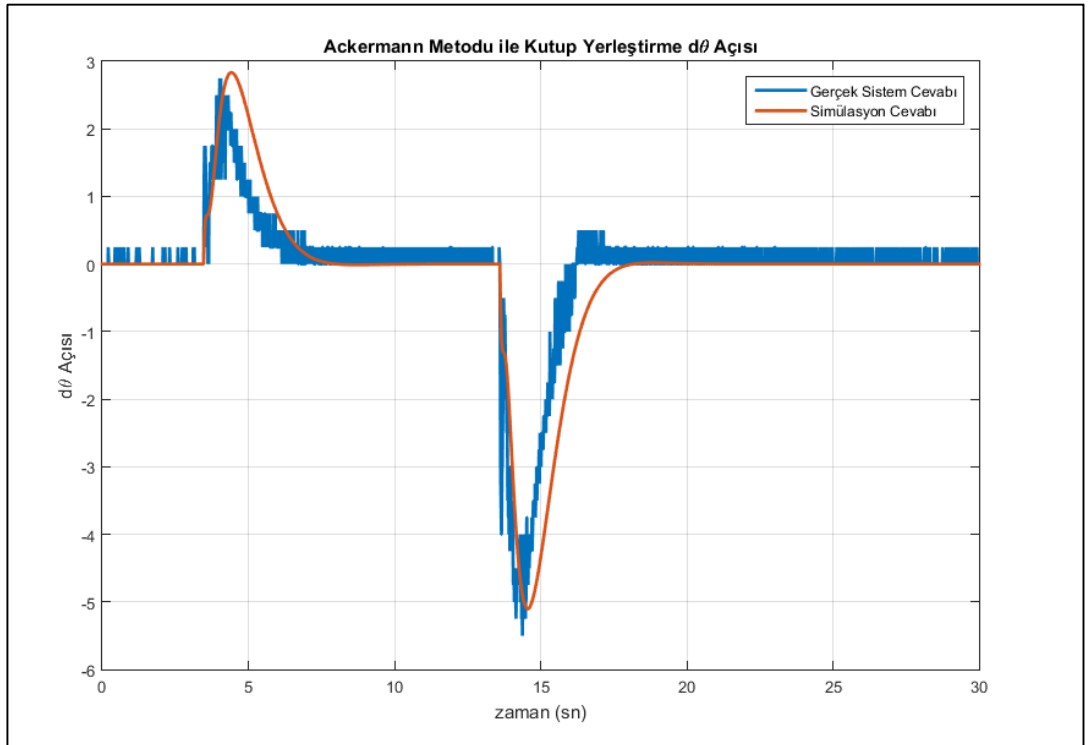
Gerçek zamanlı sistemde yapılan kontrol sırasında Bölüm 4.4 te sistemin doğrusal modeli üzerinde yapılan kutup yerleştirme için bulunan durum geri besleme katsayıları dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar gerçek zamanlı sistem için ve simülasyon sonuçları için üst üste Şekil 4.50 – Şekil 4.53 arasında çizdirilmiştir.



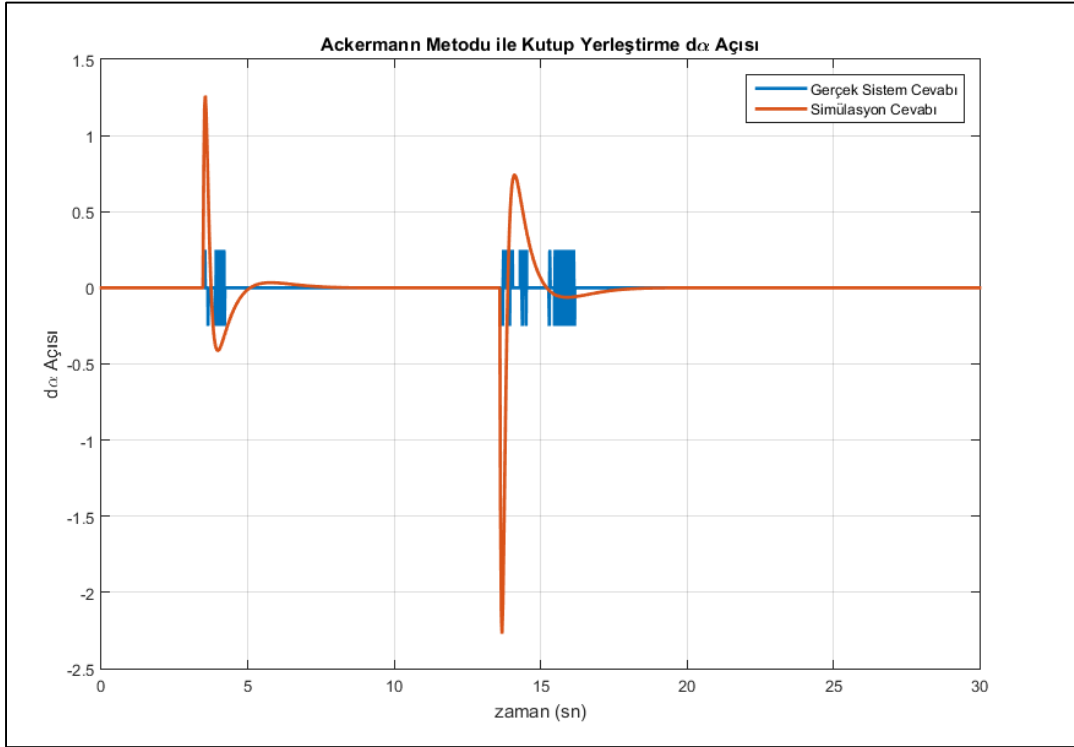
Şekil 4.50 : Gerçek zamanlı sistem ve Model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi θ durumu.



Şekil 4.51 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi α durumu.



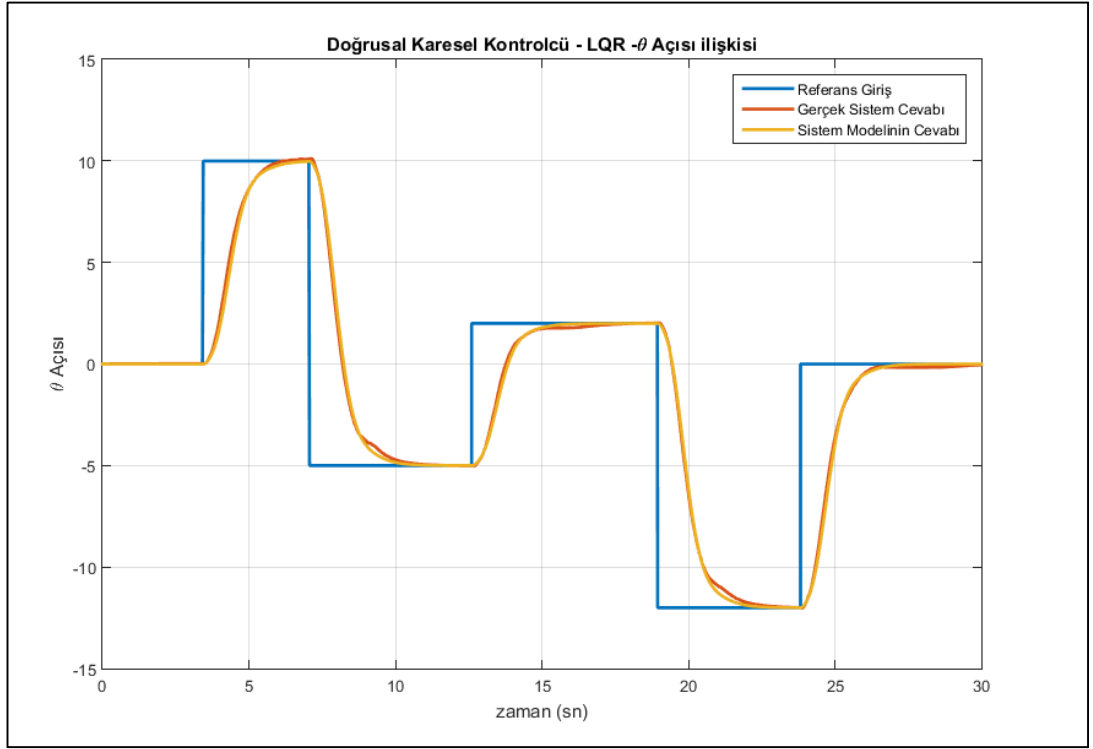
Şekil 4.52 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi $\dot{\theta}$ durumu.



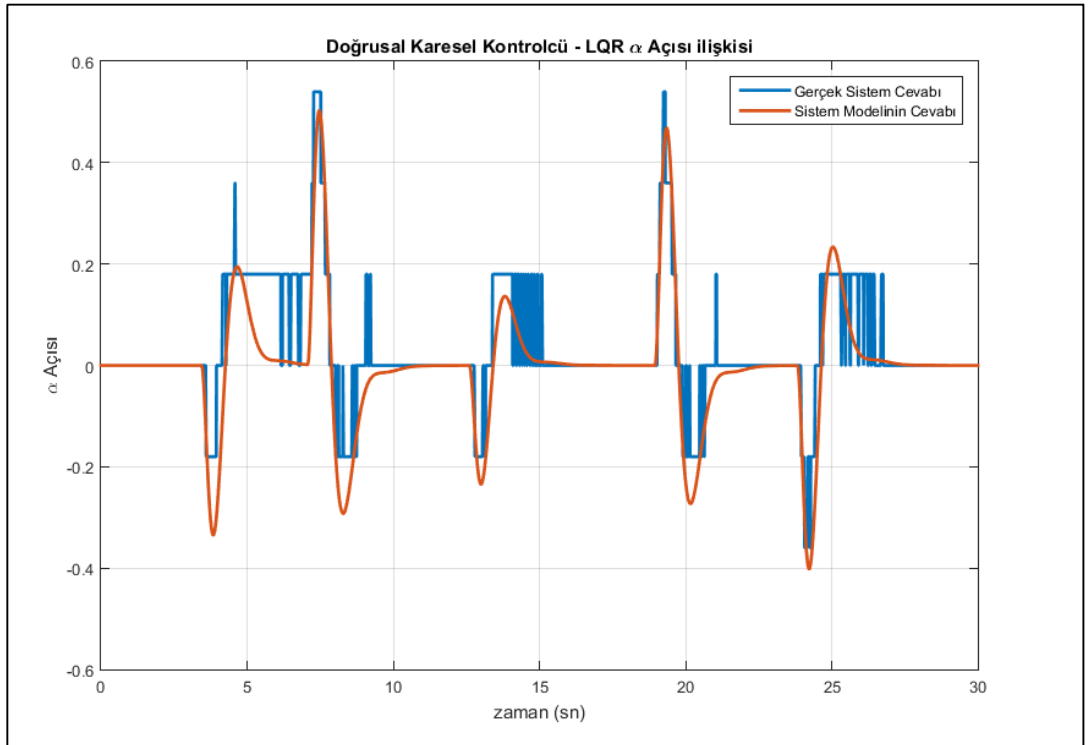
Şekil 4.53 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kutup yerleştirme ile referans takibi α durumu.

4.7.2 Doğrusal karesel regülatör yöntemi ile durum geribeslemeli kontrol

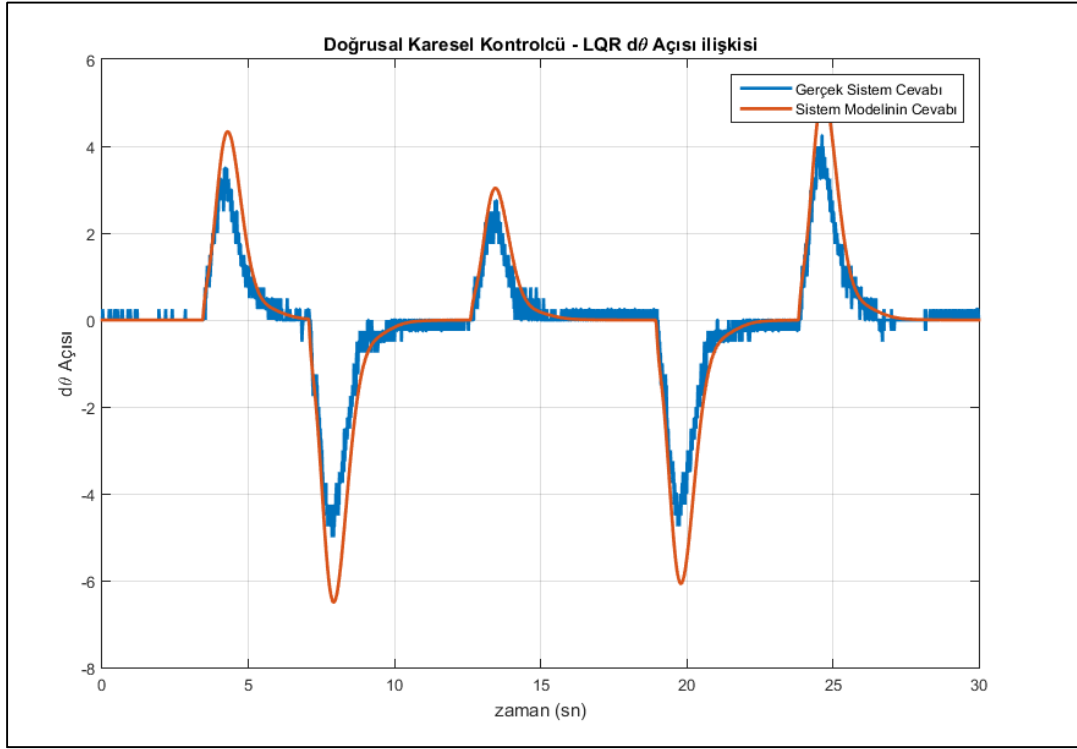
Doğrusal karesel düzenleyici ile optimal kontrol gerçek zamanlı sisteme uygulanmış ve sonuçlar Şekil 4.55 – Şekil 4.58 arasındaki grafiklerde yer almaktadır. Bölüm 4.5.5’te simülasyonda sistem modeline uygulanarak gerçekleştirilen ve bulunan optimal durum ve giriş ağırlık matrisleri ve sonucunda elde edilen geri besleme kazançları gerçek zamanlı sisteme birebir uygulanmıştır. Döner tablanın dönme açısı ve çubuğun salınım açıları simülasyonda ve uygulamada örtüşmüş, bu durumlara ait açısal hızlar ise benzer trendi yakalamışlardır.



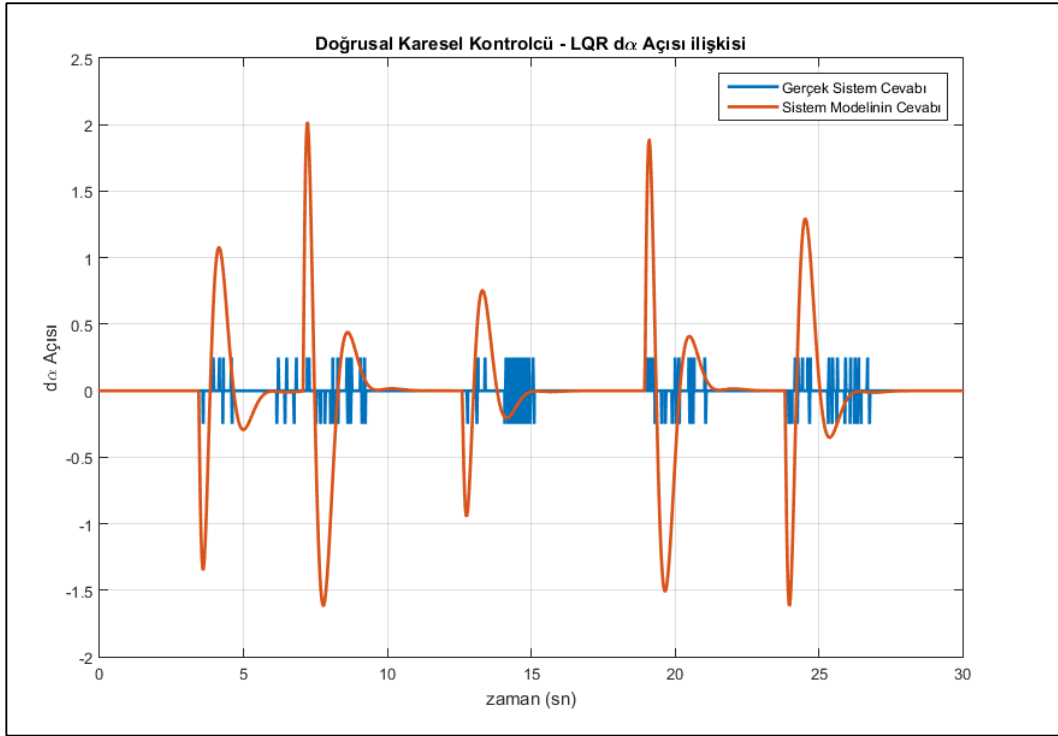
Şekil 4.54 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi θ durumu.



Şekil 4.55 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi α durumu.



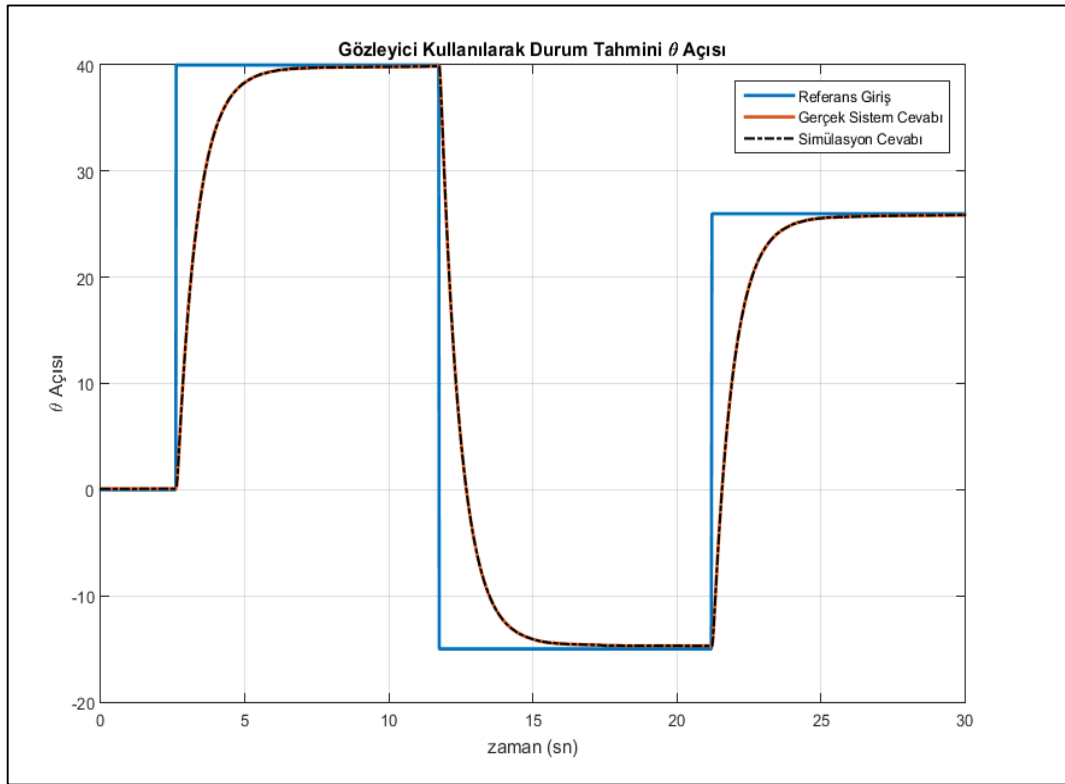
Şekil 4.56 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi θ durumu.



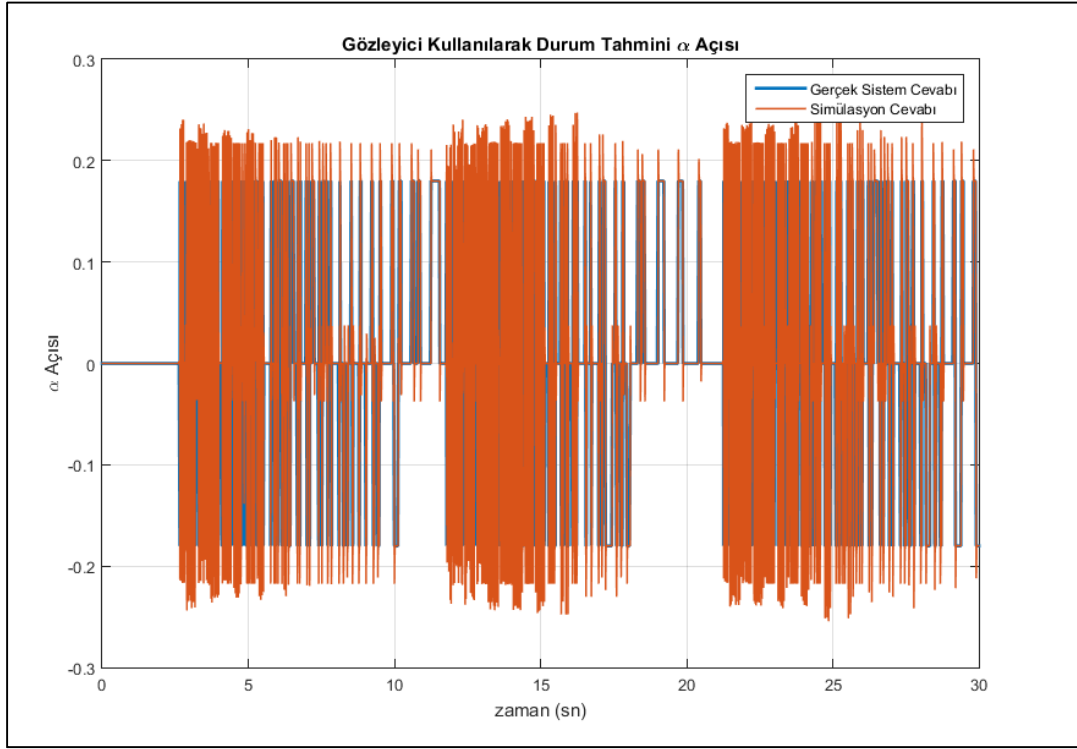
Şekil 4.57 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – LQR ile referans takibi α durumu.

4.7.3 Gözleyici tasarımı

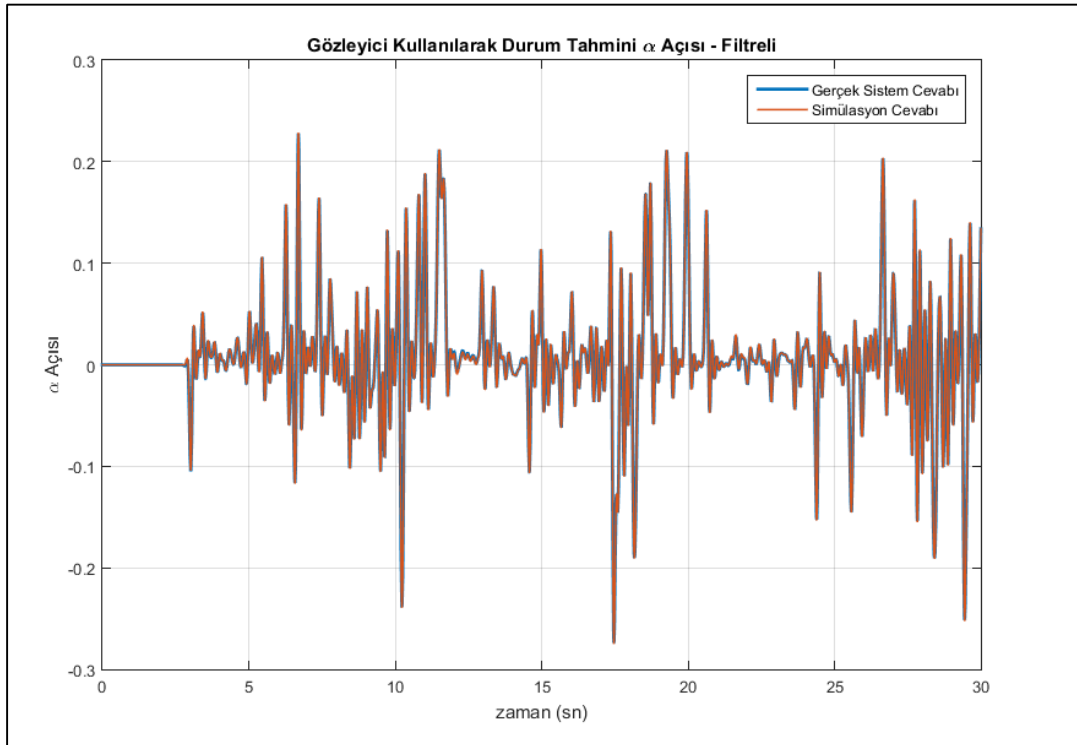
Gözleyici tasarımının gerçek zamanlı sistemde uygulanması sırasında Bölüm 4.6.2 deki gözleyici kutuplarına yerleşimi sağlayan parametreler kullanılmıştır. Burada Şekil 4.59’da görüleceği üzere sistemden halihazırda direkt olarak ölçülebilen tabla dönme açısı hatasız bir şekilde tahmin edilebilmişken Şekil 4.60’da çubuğun salınım açısı gürültülü bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Alçak geçiren bir filtre ile gürültülerden temizlenen salınım açısı Şekil 4.61’de gösterilmiştir. Burada tahmin sırasında bir yörünge izlenmesi öngörülmüş ve yörünge izlenimi sırasında sistemin doğrusal modeli kullanılarak durum tahminleri yapılmıştır. Şekil 4.62’de döner tabla açısal hızı tahmini ve Şekil 4.63 ve Şekil 4.64’te çubuğun salınım açısal hızları gürültülü bir şekilde ve gürültüden arındırılmış bir şekilde gösterilmektedir.



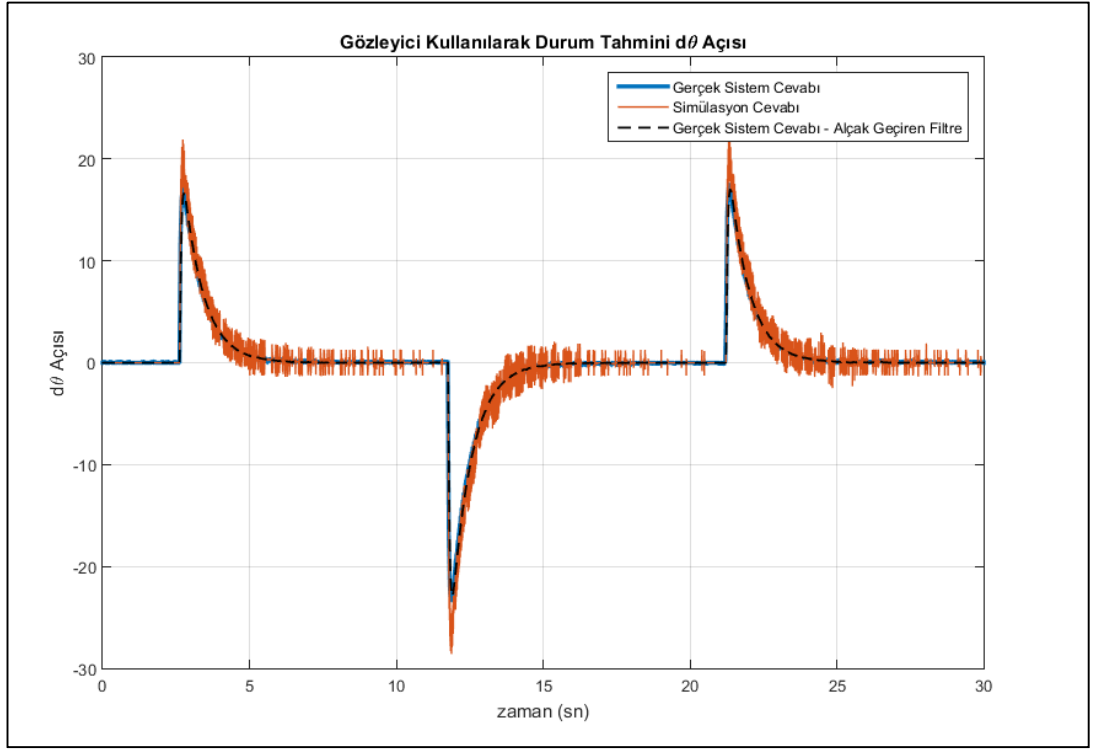
Şekil 4.58 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı θ durumu.



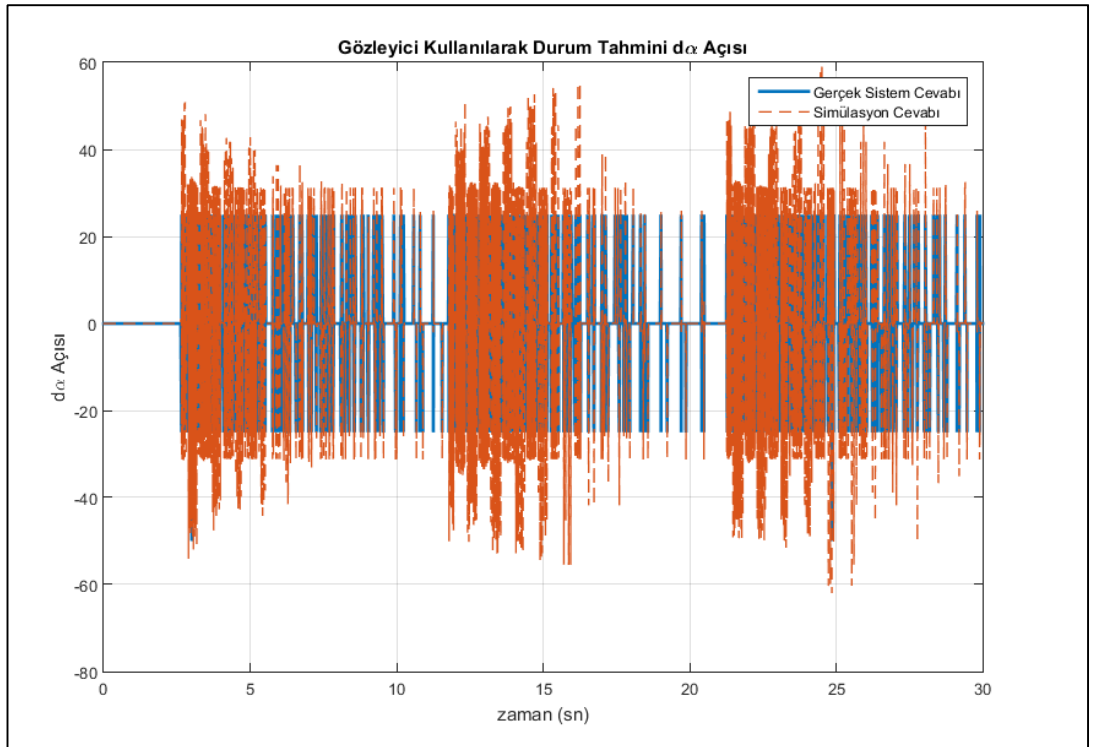
Şekil 4.59 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Gürültülü durum)



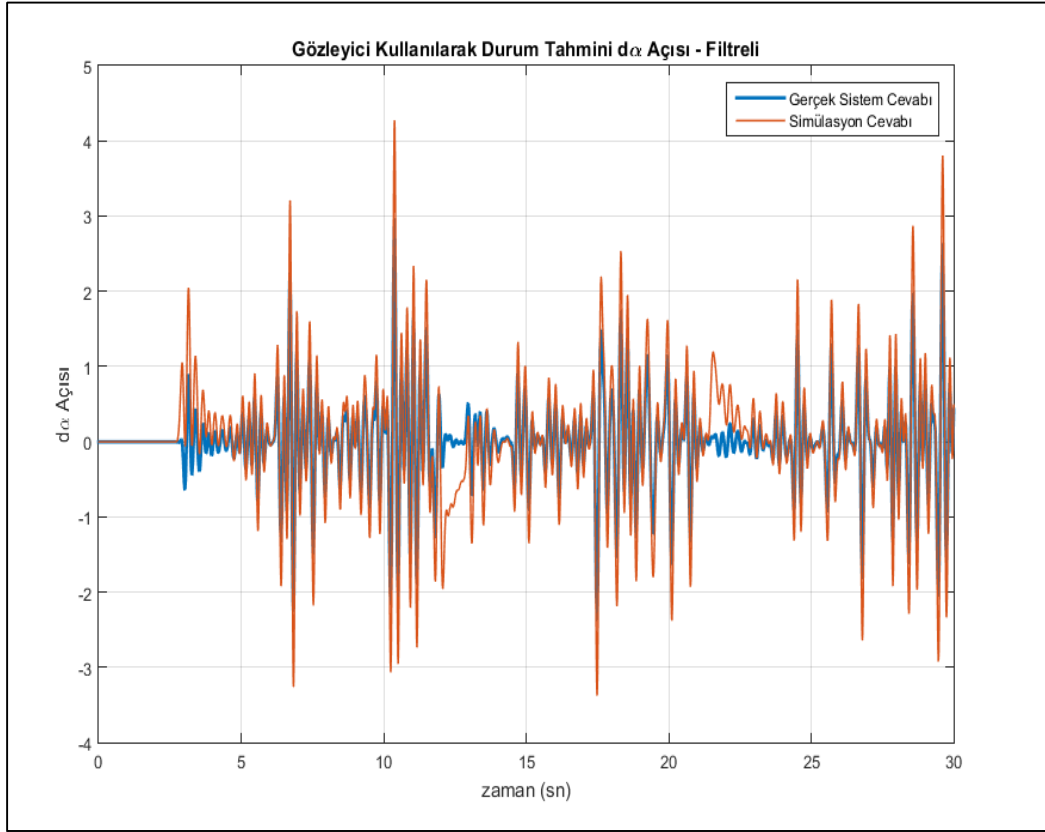
Şekil 4.60 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum)



Şekil 4.61 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı $\hat{\theta}$ durumu.



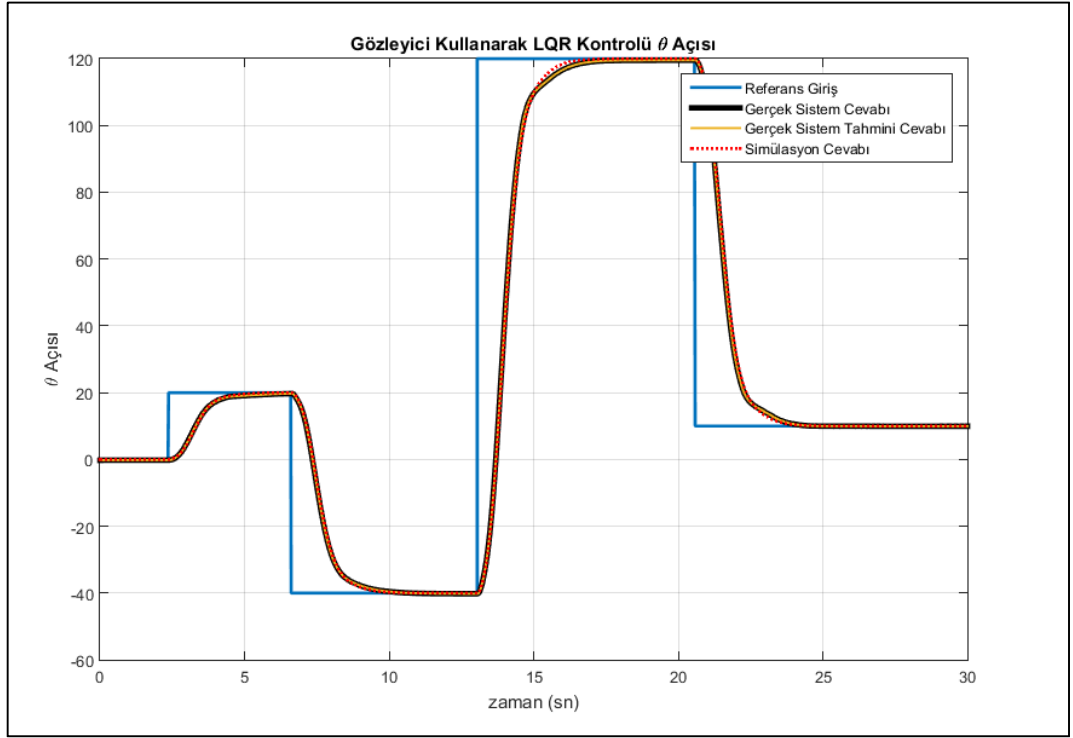
Şekil 4.62 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı $\hat{\alpha}$ durumu. (Gürültülü durum)



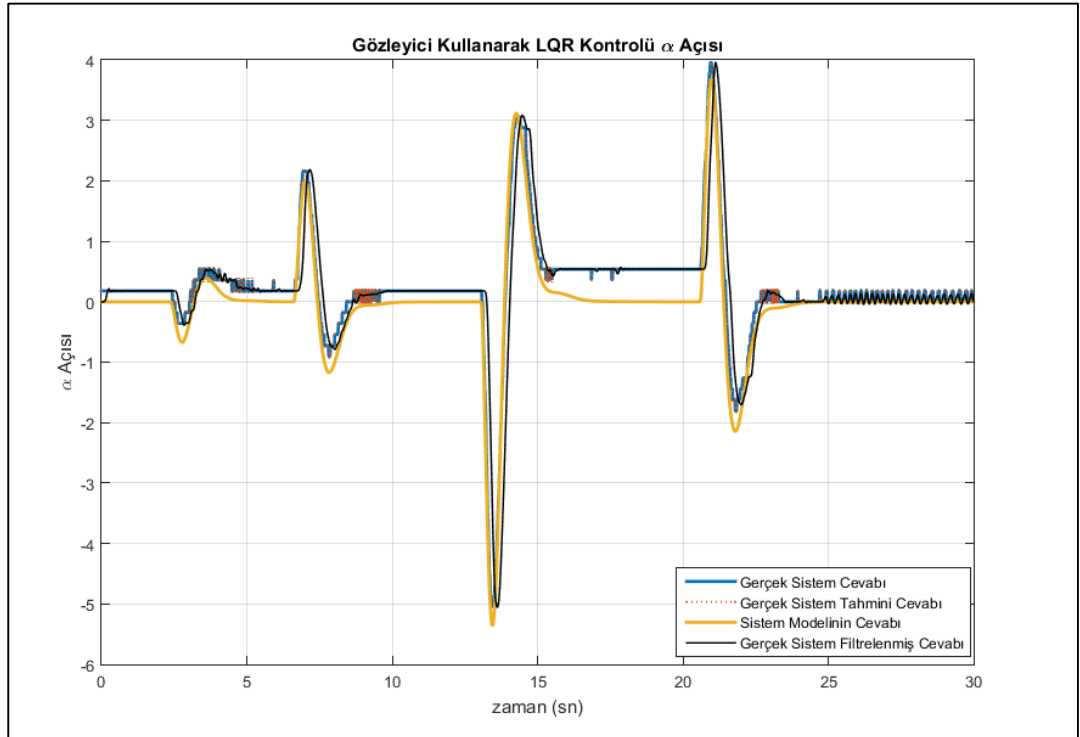
Şekil 4.63 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - Gözleyici tasarımı α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum)

4.7.4 Gözleyici tasarımı ve LQR metodu ile durum geribeslemeli kontrol

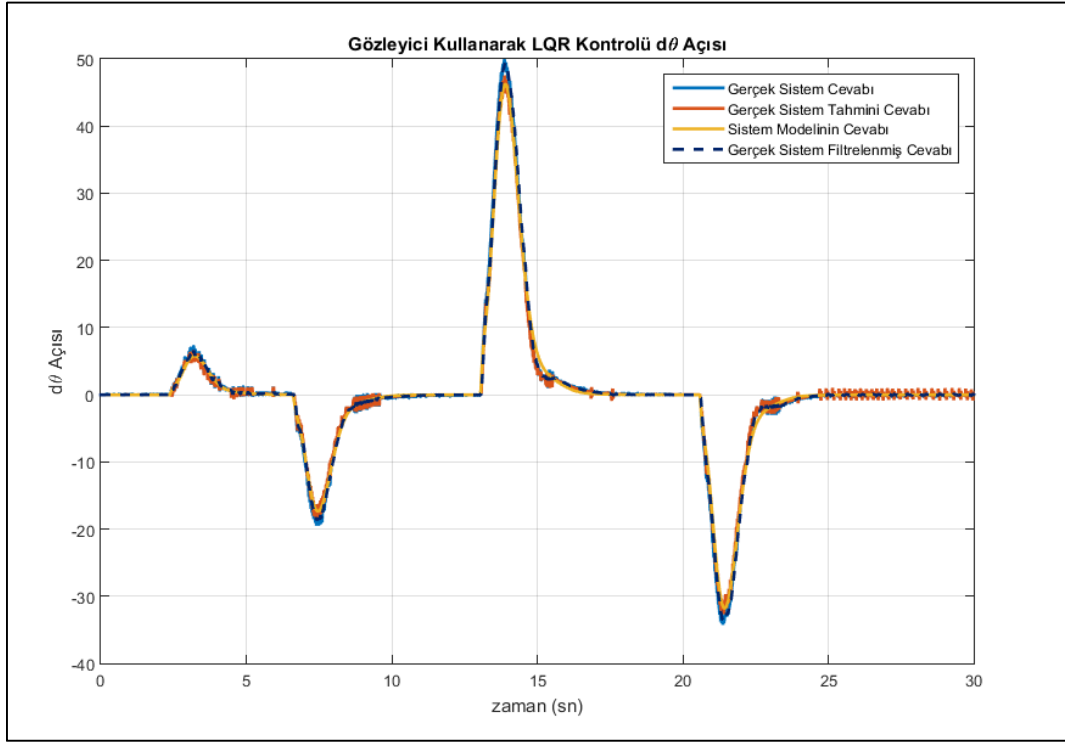
Bölüm 4.7.3'te elde edilen durum tahminleri kullanılarak ve Bölüm 4.6.2' de bulunan simülasyonlar sırasında durum geri besleme katsayıları aynı şekilde kullanılarak sistemin cevapları üst üste çizdirilmiştir. Şekil 4.65'te sisteme bir referans giriş uygulanmış ve sonucunda döner tabla açısının takibi gözlenmiştir. Gerçek sistemden datalar toplanırken aynı giriş model simülasyonunda gerçekleşmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 4.66'da çubuğun yörünge takibi sırasında salınım açısı gürültülü ve gürültüsüz bir şekilde gösterilmiştir. Döner tablanın açısal hızına ait simülasyon ve gerçek zamandaki cevapları Şekil 4.67'deki gibidir. Son olarak çubuğun salınım açısal hızları gürültülü bir şekilde ve alçak geçiren filtre ile filtrelenmiş halleri Şekil 4.68 ve Şekil 4.69'da çizdirilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere sistemin tüm durumlarının tahmini kullanılarak optimal kontrol uygulanması başarılı sonuç göstermiştir.



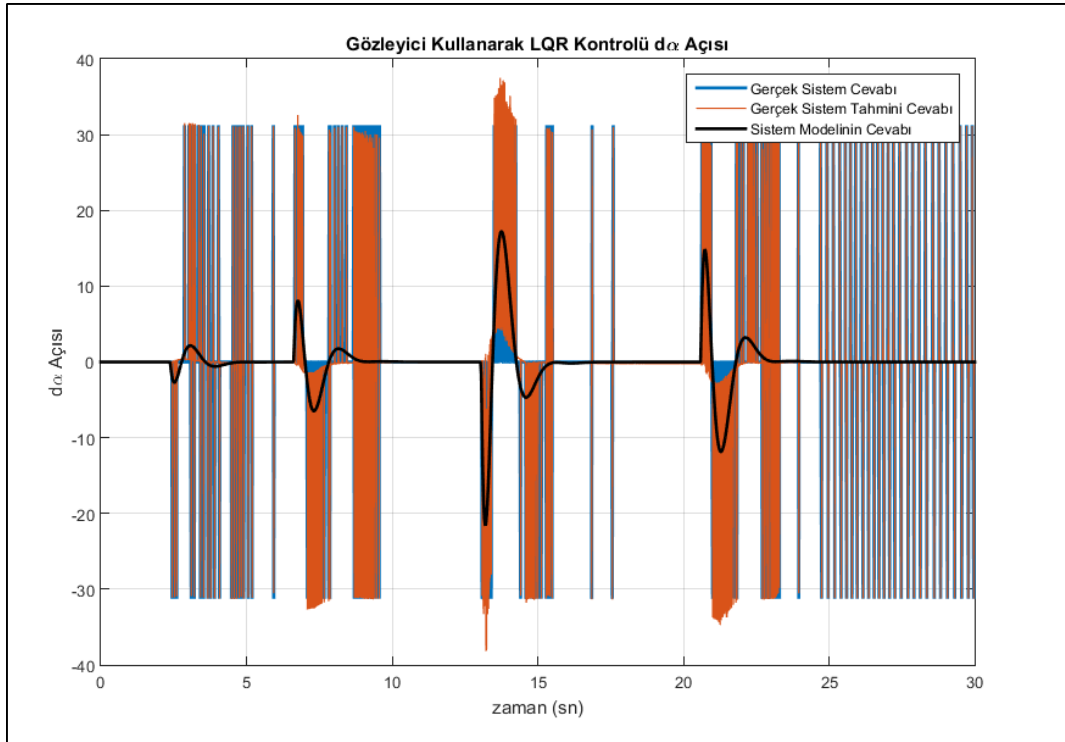
Şekil 4.64 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi θ durumu.



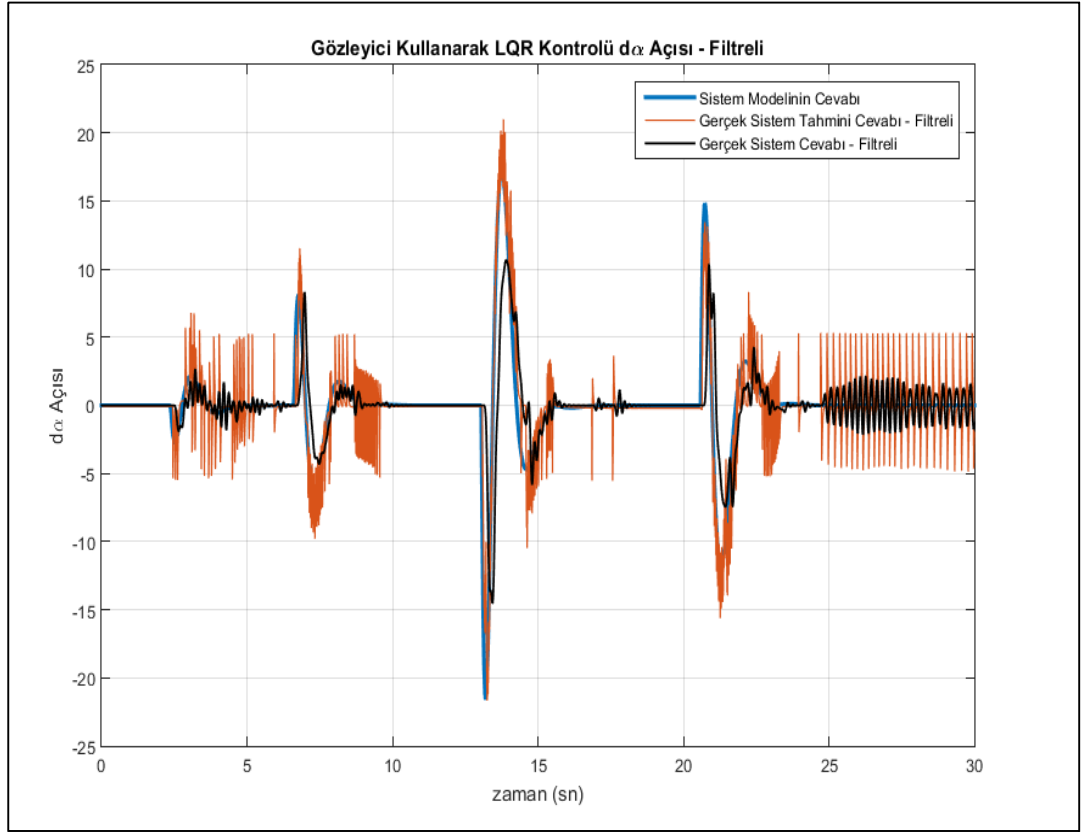
Şekil 4.65 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi α durumu.



Şekil 4.66 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi $\dot{\theta}$ durumu.



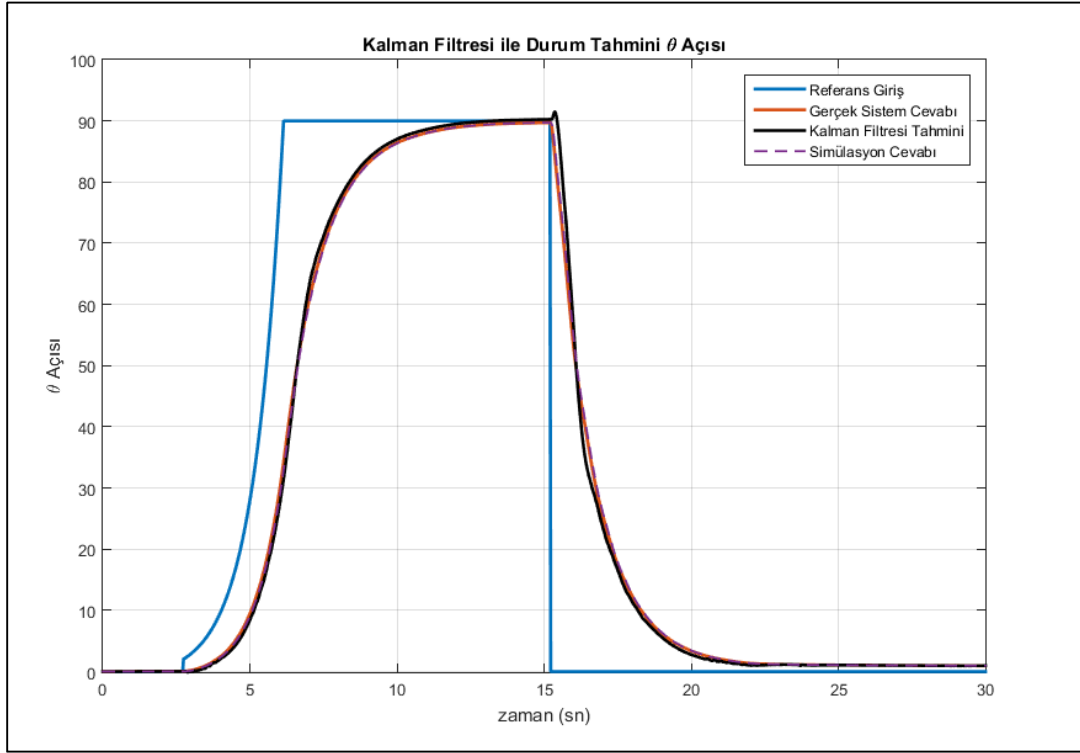
Şekil 4.67 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi $\dot{\alpha}$ durumu. (Gürültülü durum)



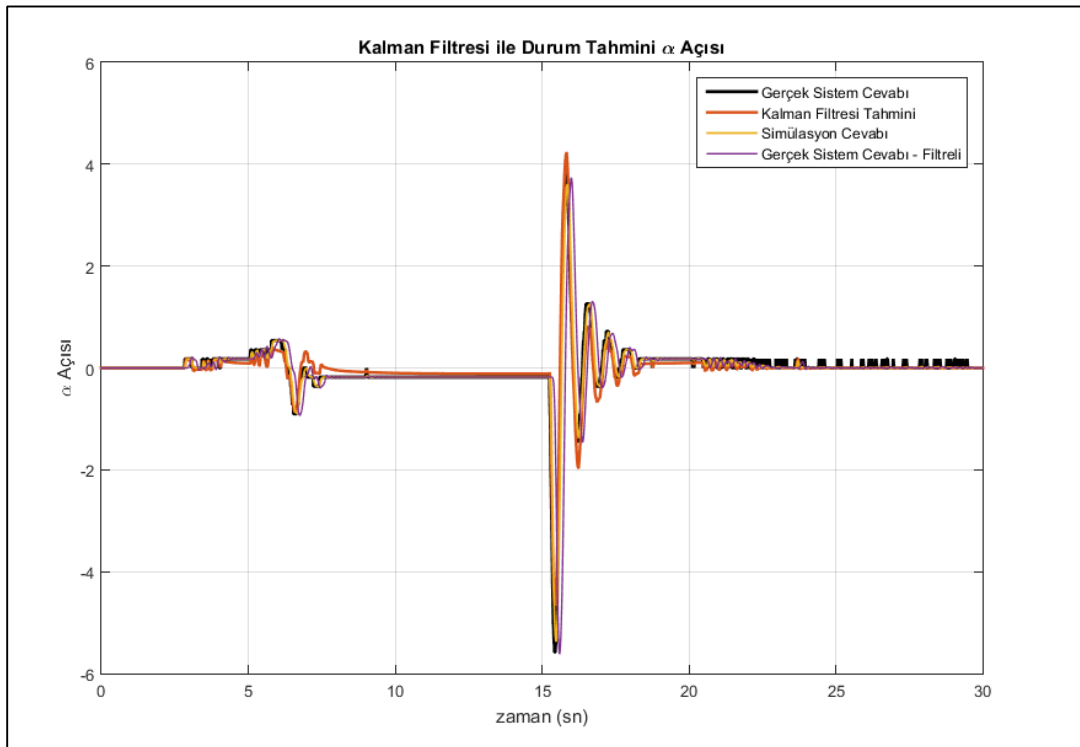
Şekil 4.68 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu - model tahmini ile LQR referans takibi α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum)

4.7.5 Kalman filtresi ile durum tahmini

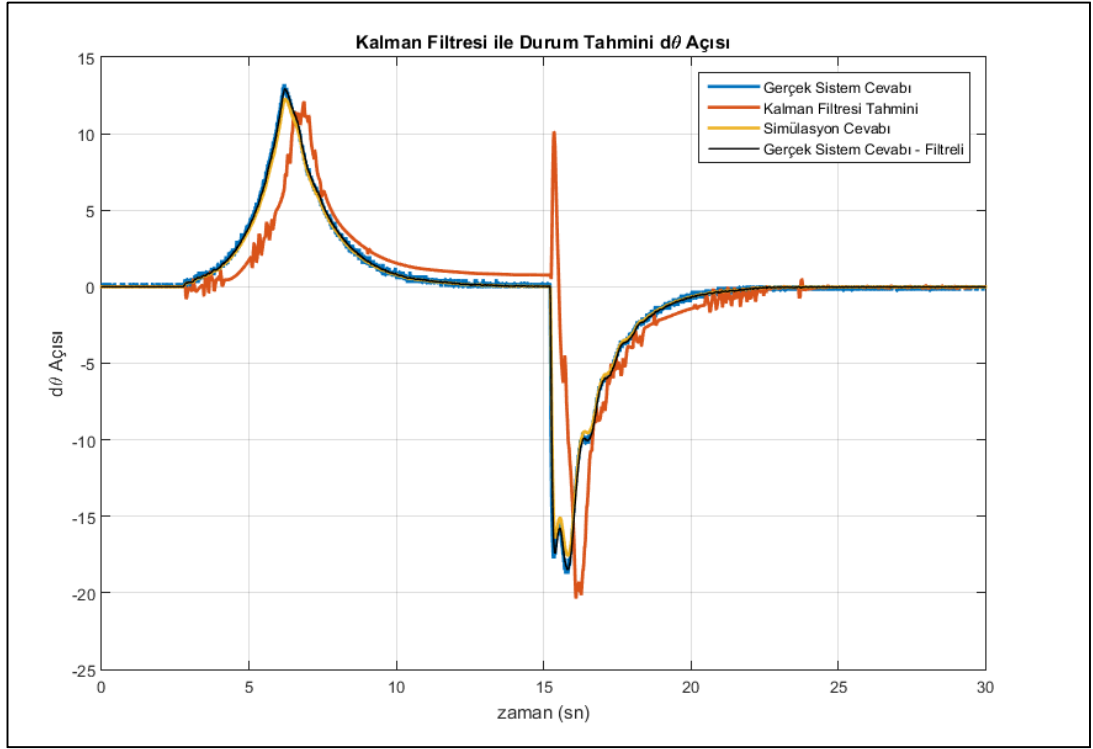
Kalman filtresinin sistemin durumlarındaki, sistemden kaynaklanan veya ölçümden kaynaklanan gürültülerden arındırılması için kullanıldığı Bölüm 4.6.3'te anlatılmış ve uygulanan beyaz gürültü ile simülasyon sonuçları gösterilmişti. Gerçek zamanlı uygulamada sistemin kendi gürültüleri kullanılarak, sistemin tüm durumlarının tahmin edilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.70'te verilen bir referans giriş için sistemin döner tabla açısını ifade eden durumun Kalman filtresi ile tahmini ve aynı giriş için Bölüm 4.6.3'te oluşturulan sistem için simülasyon sonucu karşılaştırılmıştır. Şekil 4.71'de sistemin salınım açısı için durum tahmini yapılmıştır. Döner tablanın açısal hızının Kalman filtresi ile tahmini Şekil 4.72'de gösterilmektedir, burada tahminin bir-iki saniyelik gecikmesi görülmektedir. Son olarak Şekil 4.73 ve Şekil 4.74'de çubuğun salınım açısal hızlarının tahminlerinin karşılaştırılmaları yapılmıştır.



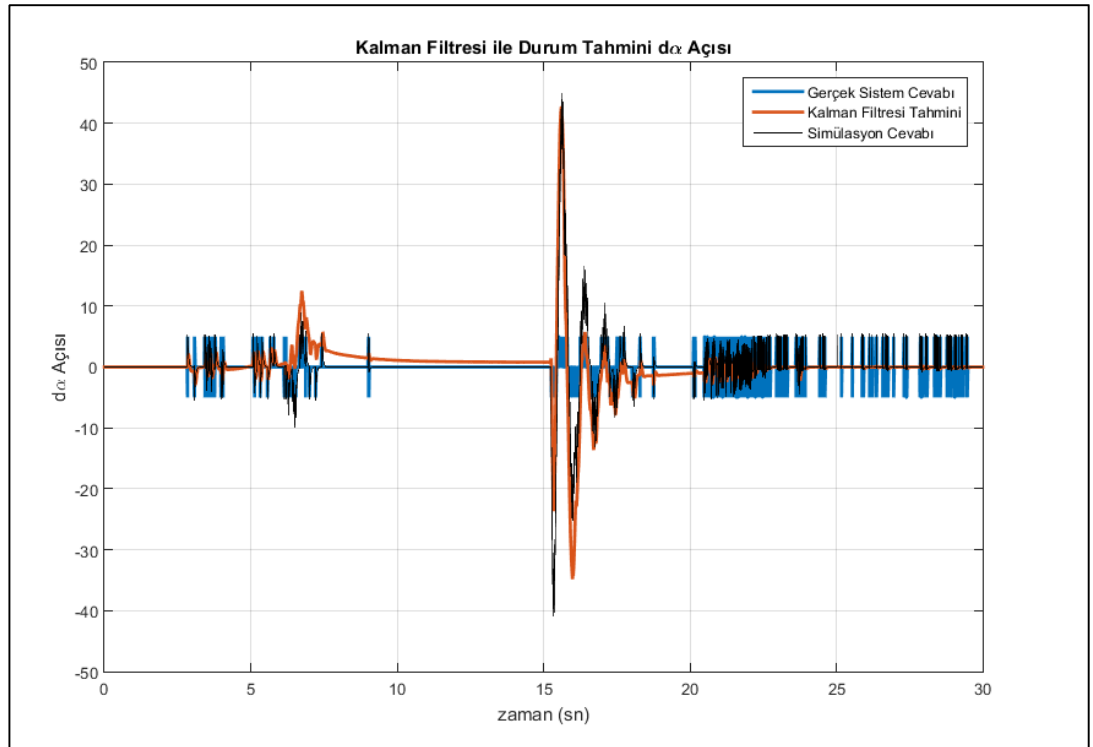
Şekil 4.69 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini θ durumu.



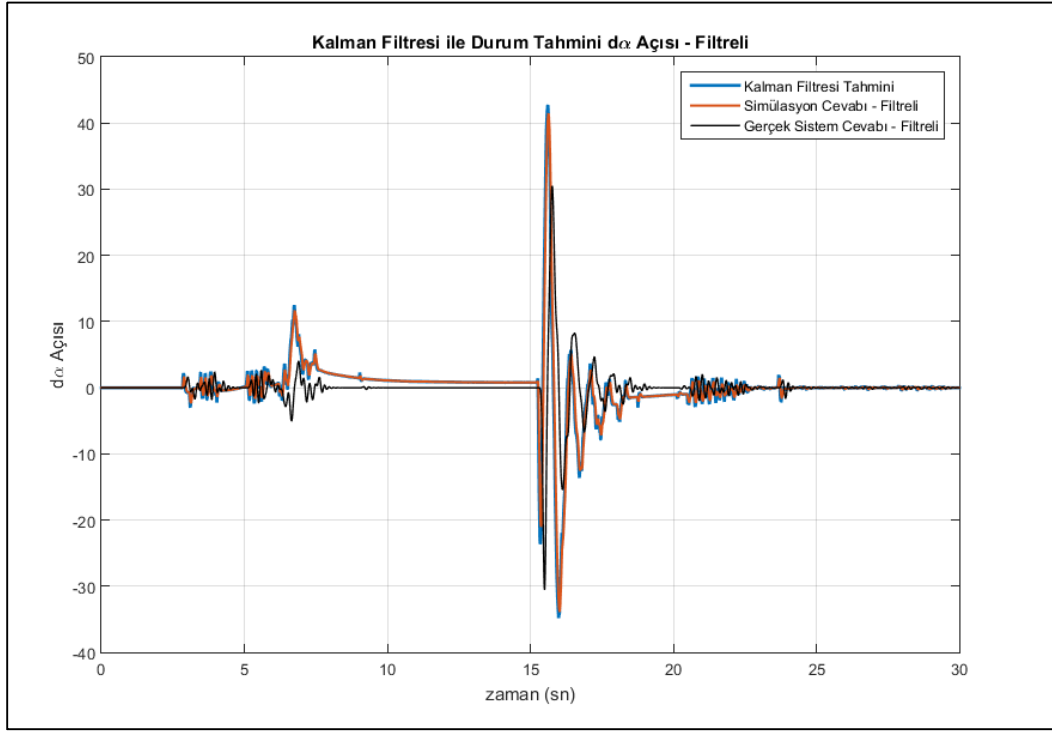
Şekil 4.70 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini α durumu.



Şekil 4.71 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini $\dot{\theta}$ durumu.

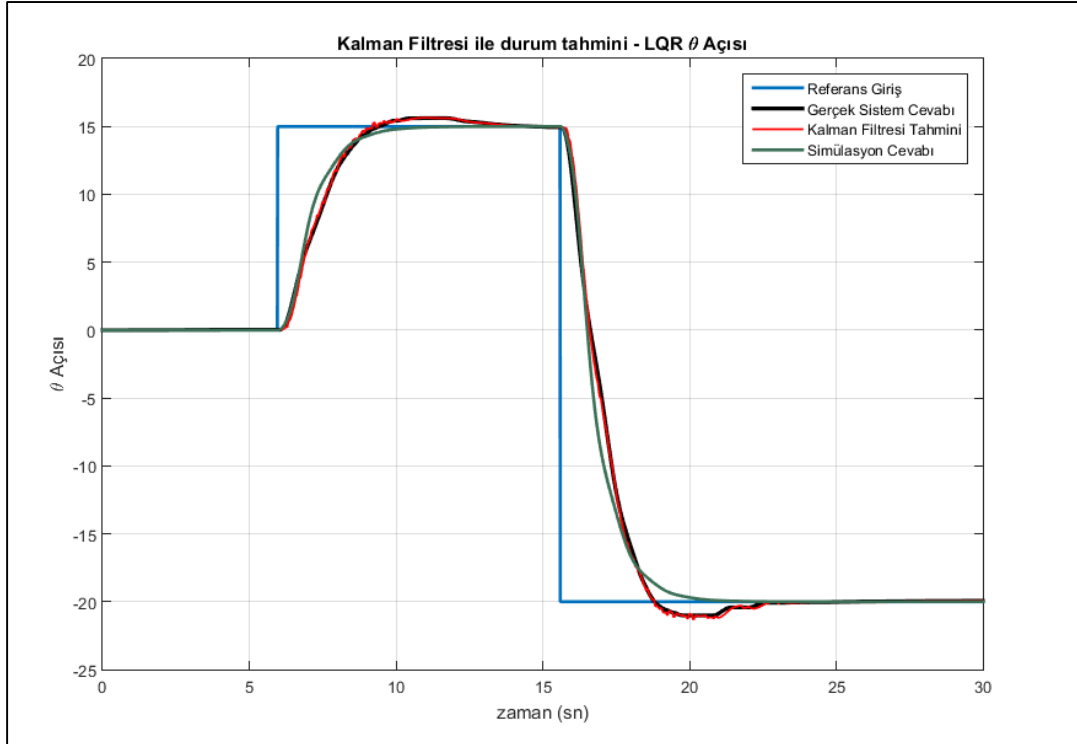


Şekil 4.72 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini $\dot{\alpha}$ durumu. (Gürültülü durum)

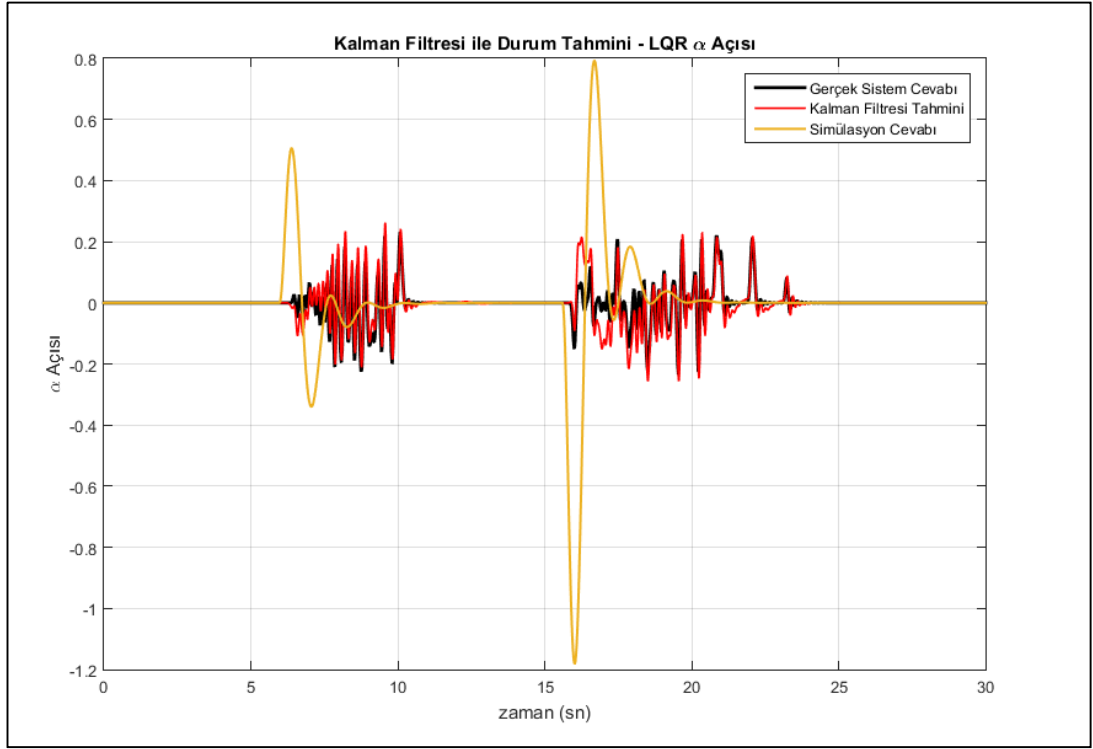


Şekil 4.73 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini α durumu. (Alçak geçiren Butterworth Filtreli durum)

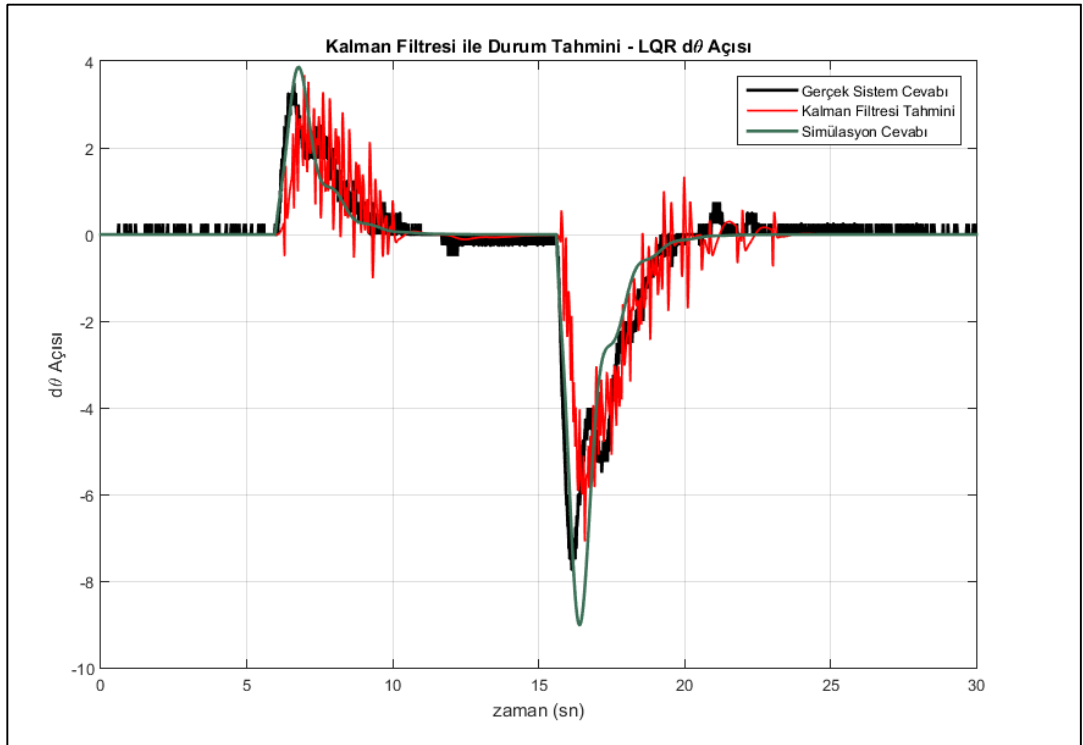
4.7.6 Kalman filtresi ve LQR metodu ile durum geribeslemeli kontrol



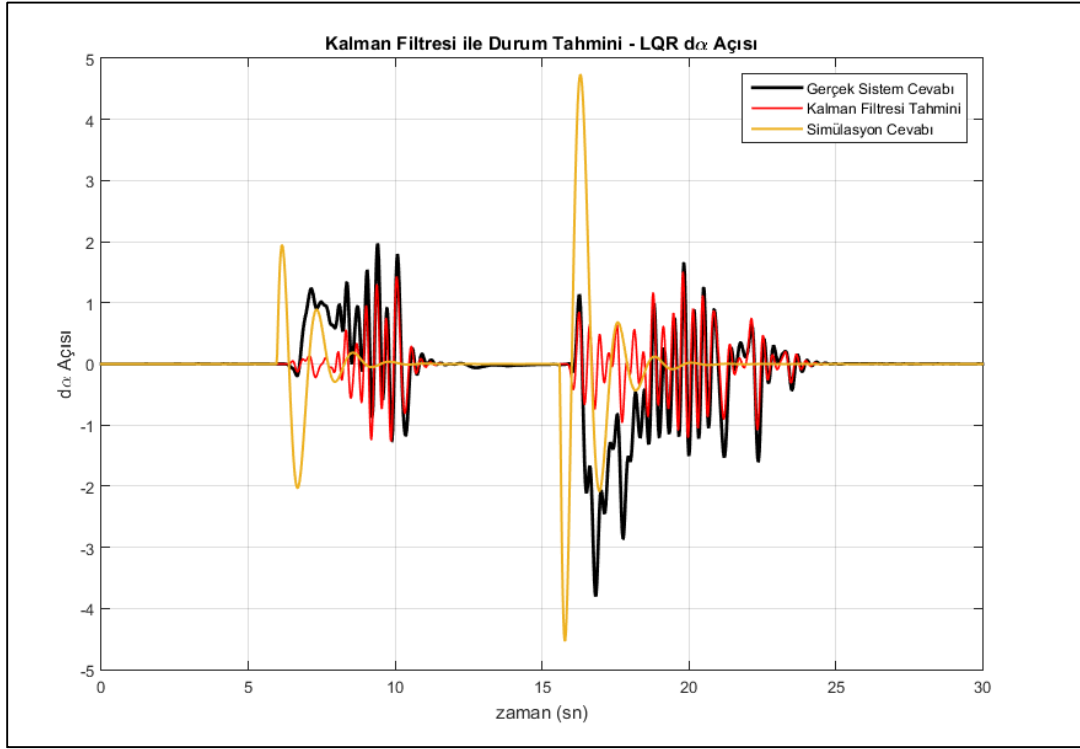
Şekil 4.74 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi θ durumu.



Şekil 4.75 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi α durumu.



Şekil 4.76 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi $\dot{\theta}$ durumu.



Şekil 4.77 : Gerçek zamanlı sistem ve model simülasyonu – Kalman filtresi ile durum tahmini ve LQR kontrol referans takibi α durumu.

Bölüm 4.7.5’te Kalman Filtresi ile tahmin edilen sistem durumları kullanılarak, doğrusal karesel optimal kontrol sisteme uygulanmış ve bir referansı takip etmesi sağlanmıştır. Gürültülerin yeteri kadar bastırılamaması dolayısıyla aynı değerler için Bölüm 4.6.3’te gerçekleştirilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığı zaman sistem cevabında aşma ve hatalar görülmektedir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Kullanılan kontrol yöntemlerinin sonuçları irdelendiğinde; bir sistemin tüm durumlarının ölçümünün sağlanabilmesi, o sistem için en doğru kontrol uygulanabilmesine imkan sağlamaktadır. Sistemde veya ölçümlerde bulunan gürültülerin, sistemi zaman zaman kararsızlığa götürebileceği göz önünde bulundurularak, bir filtre işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Kullanılacak olan filtrenin doğru tasarlanması, sistem cevabı üzerinde olumlu etki etmektedir. Yine filtrelerin durum tahmincisi olarak kullanılmasıyla, sistemden direk ölçülemeyen durumların tahmin edilmesi başarılı sonuçlar vermektedir. Bu tezde, sistemin dinamik matematiksel modeli Kosinüs teoremi ve Lagrange yöntemi kullanılarak elde edildikten sonra gerçek sistemden salınım dataları toplanarak sistem parametreleri Matlab/Simulink programı aracılığı ile tahmin edilmiştir. Tahmin edilen sistem parametreleri kullanılarak, doğrusallaştırılmış sistem modeli üzerinde durum geribesleme metodları uygulanmıştır. Öncelikle PID kontrol ve durum geribesleme kazançları için uygun değerler bulunabilmesi için Matlab/Simulink programı kullanılarak simülasyonlar çalıştırılmıştır, kontrolör katsayılarının bulunması sırasında statik kazançlar kullanılmıştır. Bu kazançlar gerçek zamanlı olarak esnek eklemlili manipülatör düzeneği üzerinde çalıştırılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. PID kontrol fiziksel esnek sistem üzerinde gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları ile fiziksel sistemden toplanan çıkış dataları örtüşmüştür. Kutup yerleştirme metodlarından olan Ackermann metodu; dördüncü dereceden olan esnek eklemlili manipülatör sisteminin iki kutbunun baskın olduğu diğer iki kutbunun pasif kutup olduğu düşünülerek uygulanmıştır. Simülasyonda ve gerçek zamanlı olarak çalıştırılan sistem cevapları örtüşmektedir. Doğrusal karesel düzenleyici olarak adlandırılan ve optimal kontrol konusu olan metod ile en başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Tüm durumların Luenberger tahmincisi ile tahmin edildiği gözlemci tasarımı; gerçek zamanlı sisteme bir kontrol girişi uygulanması ve durumların değişiminin başarıyla tahmin edilmesi ile denenmiştir, çubuğun salınım açısı ile tablanın dönme açısı hatasız bir şekilde sağlanmış, fakat bu terimlerin türevli ifadelerinin ölçüm gürültüsü ile etkilendiği görülmüştür. Tahmin edilen durumlar kullanılarak yine doğrusal karesel

düzenleyici metodu ile referans sinyal takibi kontrolü başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sistem giriş gürültüsünün ve ölçüm gürültülerini Kalman filtresi ile elimine edilerek sistem durumlarının tahmin edilmesi simülasyon ortamında başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş iken, gerçek zamanlı sistem üzerinde gürültüden arındırmada pek başarılı olunamamış fakat buna rağmen tahmin edilen sistem durumları, doğrusal karesel düzenleyici için geribesleme durumları olarak kullanılmış ve istenilen yörünge takip ettirilebilmiştir.

Bundan tezden sonra yapılacak çalışmalarda; sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan tüm dinamiklerinin göz önünde bulundurulması için sistemden çeşitli koşullarda toplanan datalarla, sistem parametrelerinin yanısıra sistem tanınması yapılması gerekmektedir. Çıkarılan fiziksel sistemin modeli, gerçek modele yakınsadıkça, uygulanacak kontrol algoritmalarının başarımları yükselmektedir. PID kontrol sırasında kazançların seçilmesi bununla birlikte doğrusal karesel düzenleyici kontrolü için durum ve giriş ağırlık matrislerinin seçilmesi, sistem değişimlerine adaptif olacak şekilde kontrol yöntemleri uygulanabilir; statik değerler ise Parçaçık Sürü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi gibi optimizasyon yöntemleri en uygun şekilde seçilebilir [28],[29].

KAYNAKLAR

- [1] **Siciliano, B.**, (1998). Control in Robotics: Open Problems and Future Directions, *Proc. IEEE Int. Conference Control Appl.*, vol.1, pp 81 – 85.
- [2] **Ozgoli, S.**, (2005). Position Control for Flexible Joint Robots in Presence of Actuator Saturation, Ph.D. Dissertation, Toosi University of Technology.
- [3] **Machida, K., Nishida, H., and Akita, K.** (1998). Precise Telerobotic System for Space Experiment on ETS-VII, *49.th Int. Astronautical Congress*, pp 1-10
- [4] **Liu, H., Meusel, P., Butterfass, J., and Hirzinger, G.** (1998). DLR's Multisensory Articulated Hand. Part II: The Parallel Torque/Position Control System, in *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Autom.*, pp. 2087-2093.
- [5] **Nakamura, T., Saga, N., and Kawamura, T.** (2003). Development of a Soft Manipulator Using a Smart Flexible Joint for Safe Contact with Humans, in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatron.* vol.1, pp. 441-446.
- [6] **Albu-Schäffer, A., Haddadin, S., Ott, Ch., Stemmer, A., Wimböck, T., and Hirzinger, G.** (2007). The DLR lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments, *Industrial Robot: An International Journal*, Vol. 34 Iss: 5, pp.376 - 385.
- [7] **Ficola, A., Marino, R., and S., Nicosia.** A Singular Perturbation Approach to the Control of Elastic Robots, *Proc.of the 21st Ann. Allerton Conf. on Commun., Contr. Comput.*, pp. 225-232.
- [8]. **Marino, R., and Spong, M.W.** (1986). Nonlinear Control Techniques for Flexible Joint Manipulators: A single link case study, in *Proc. IEEE International Conference on Robotics. Automation*, vol: 3, pp. 1030 – 1036.
- [9] **Forrest-Barlach, M., and Babcock, S.** (1987). Inverse Dynamics Position Control of a Compliant Manipulator, in *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol: 3, pp. 75-83.
- [10] **Readman, M.C., and Belanger, P.R.** (1990). Analysis and Control of a FJR, in *Proc. IEEE Conf. Decis. Contr.*, pp. 96-101.
- [11] **Murphy, S.H., Wen, J.T., and Saridis, G.N.** (1990). Simulation and Analysis of Flexibly Jointed Manipulators, *Proc. IEEE Conf. Decis. Contr.*, vol.2, pp. 545–550.
- [12] **Bridges, M.M., and Dawson, D.M.** (1995). Redesign of Robust Controllers for Rigid Link FJ Robotic Manipulators Actuated with Harmonic Drive, in *Proc. IEEE Contr. Theory Appl.*, vol.142, pp. 508-514.

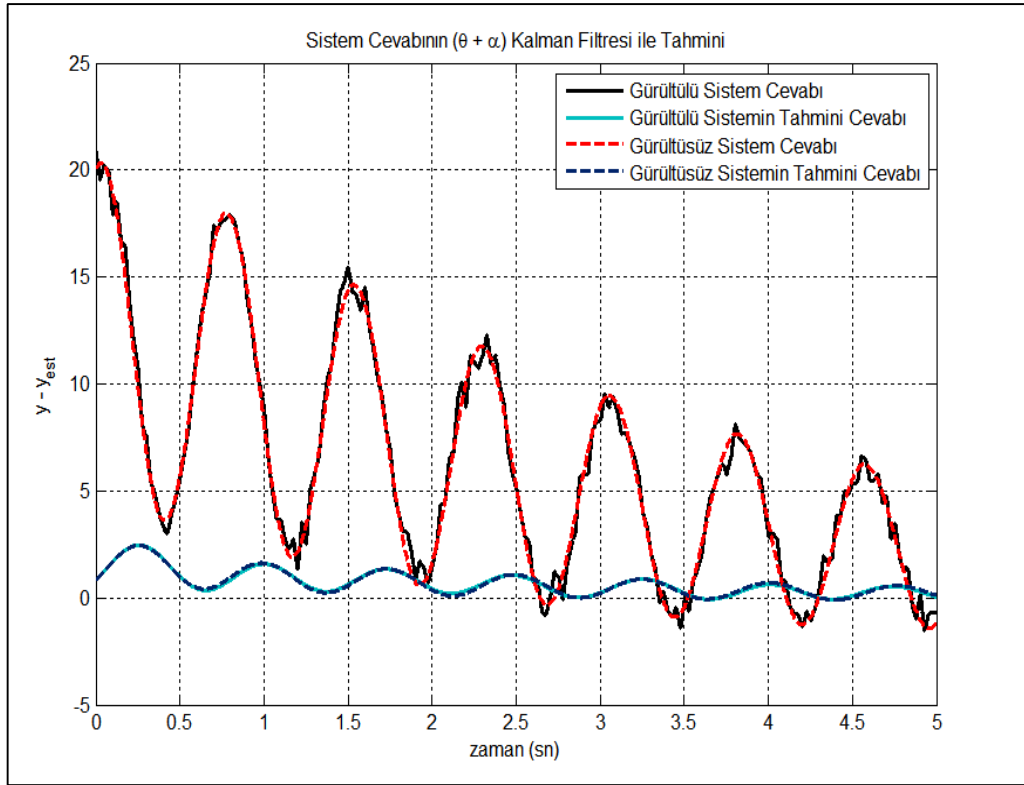
- [13] **Taghirad, H.D., and Belanger, P.R.** (1997). Robust Friction Compensation for harmonic Drive System, in *Proc.IEEE Int. Conf. Contr. Appl.*, pp. 547-551
- [14] **Taghirad, H.D., and Belanger, P.R.** (1997). H_{∞} -Based Robust Torque Control of Harmonic Drive Systems, in *Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Appl.*, pp. 990-994.
- [15] **Ailon, A., Gil, M., Choi, E., and Ahn B.** (1998). Stabilizing Robots with Uncertain Parameters Actuated by DC Motors with Flexible Coupling Shafts, in *Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Appl.*, vol.2, pp. 877-881.
- [16] **Ailon, A., Lozano, R., and Gil, M.,** (2000). Iterative Regulation of an Electrically Driven Flexible-Joint Robot with Model Uncertainty, in *IEEE Trans. Rob. Autom.*, Vol. 16, No. 6.
- [17] **Akhtaruzzaman, M., Akmeliawati, R., and Wai Yee, T.** (2009). Modeling and Control of a Multi Degree of Freedom Flexible Joint Manipulator, in *Second International Conference on Computer and Electrical Engineering ICCEE*, pp. 249- 254.
- [18] **Rafieian, F., Liu, Z., and Hazel, B.,** (2009). Dynamic model and modal testing for vibration analysis of robotic grinding process with a 6DOF flexible-joint manipulator, in *International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2793- 2798.
- [19] **Dwivedy, S.K. and Eberhard, P.** (2006). Dynamic analysis of flexible manipulators: a literature review, *J. of Mech. and Mach. Theo.*, 41, 749-777.
- [20] **Ozgoli, S. and Taghirad, H. D.** (2006). A Survey on The Control of Flexible Joint Robots, *Journal of Control*, Vol. 8, No. 4, pp. 1-15.
- [21] **Xie, B., and Yao, B.** (2005) Multi-objective optimization of tip tracking control using LMI, in *Congr. Expo in Proc. ASME Int. Mech. Eng.*, pp. 1533–1542.
- [22] **Talole, S.E., Kolhe, J.P., and Phadke, S.B.** (2010). Extended-stateobserver based control of flexible-joint system with experimental validation, in *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.57(4), pp. 1411–1419.
- [23] **Ahmad, M.A., Ramli, M.S., Raja Ismail, R.M.T., Hambali, N., and Zawawi, M.A.** (2009). The investigations of input shaping with optimal state feedback for vibration control of a flexible joint manipulator. In: *Proceedings of the International Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications*, pp. 446–451.
- [24] **Ulrich, S., and Sasiadek, J.Z.** (2011). Extended Kalman Filtering for Flexible Joint Space Robot Control, *American Control Conference on O'Farrell Street*.
- [25] **Cicero Pinheiro Gomes, S., da Rosa, V.S., and Albertini, Bd.C.** (2006). Active Control to flexible manipulators, in *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol.11(1), pp. 75–83.

- [26] **Chaoui, H., Gueaieb, W., Yagoub, M., and Sicard, P.** (2006). Hybrid neural fuzzy sliding mode control of flexible-joint manipulators with unknown dynamics, in *32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. IECON*, pp. 4082-4087.
- [27] **Kiang, C.T., Spowage, A., and Yoong, C.K.** (2015). Review of Control and Sensor System of Flexible Manipulator, in *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol.77 (1), pp. 187-213.
- [28] **Hamidi, J.** (2012). Control System Design Using Particle Swarm Optimization (PSO), in *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, vol.1 (6), pp 2231-2307.
- [29] **Hassani, K., and Lee, W.** (2014). Optimal Tuning of Linear Quadratic Regulators Using Quantum Particle Swarm Optimization, in *Proceedings of the Int. Conference of Control, Dynamic Systems, and Robotics*, pp 59 (1-8)

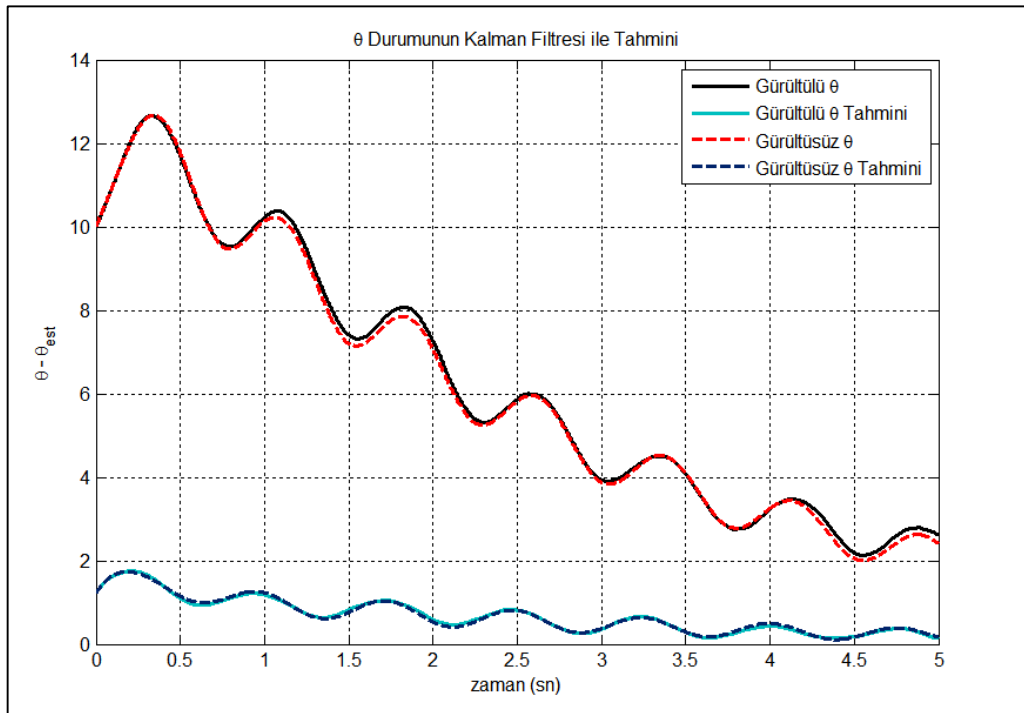
EKLER

EK A: Kalman Filtresi gürültü kovaryans matrislerinin sisteme etkisi

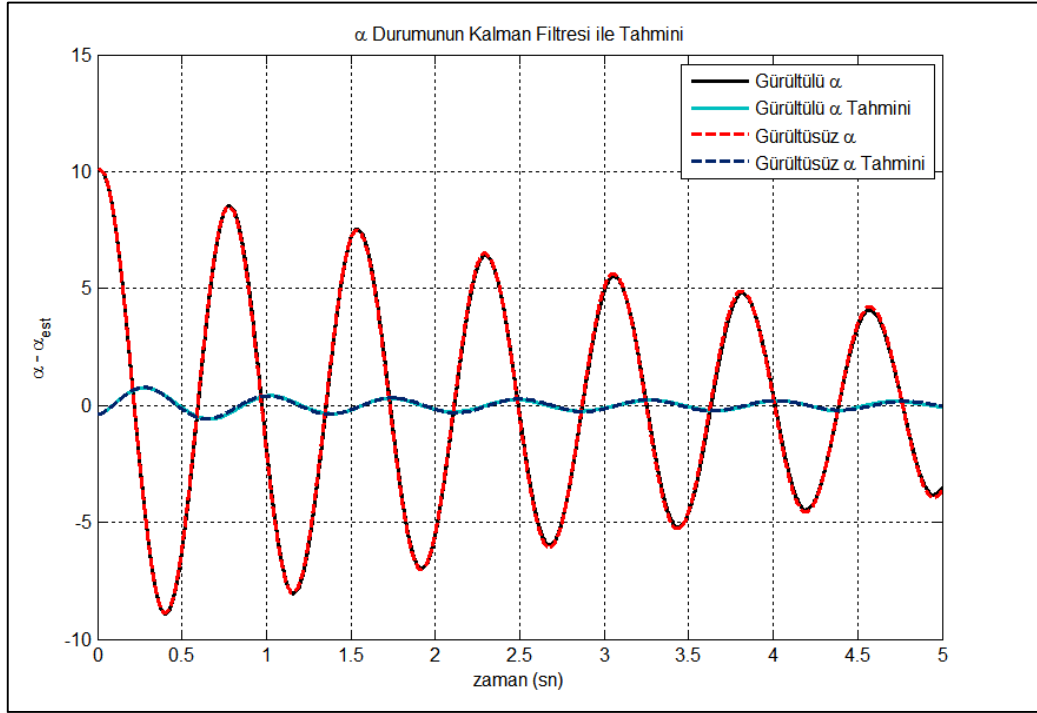
EK A



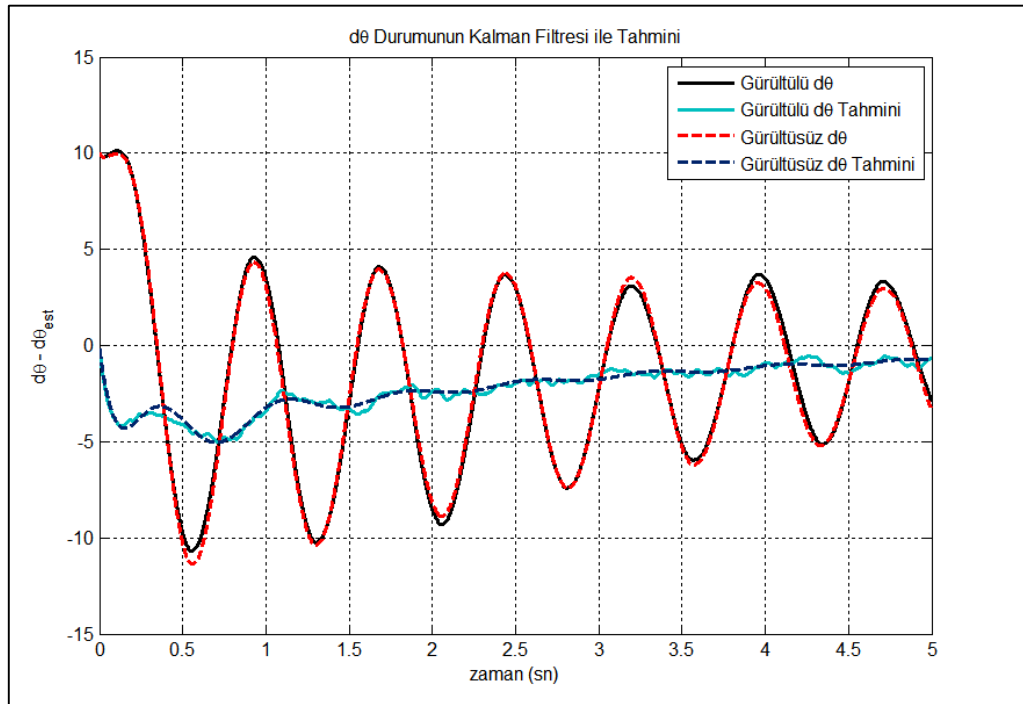
Şekil A.1 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.



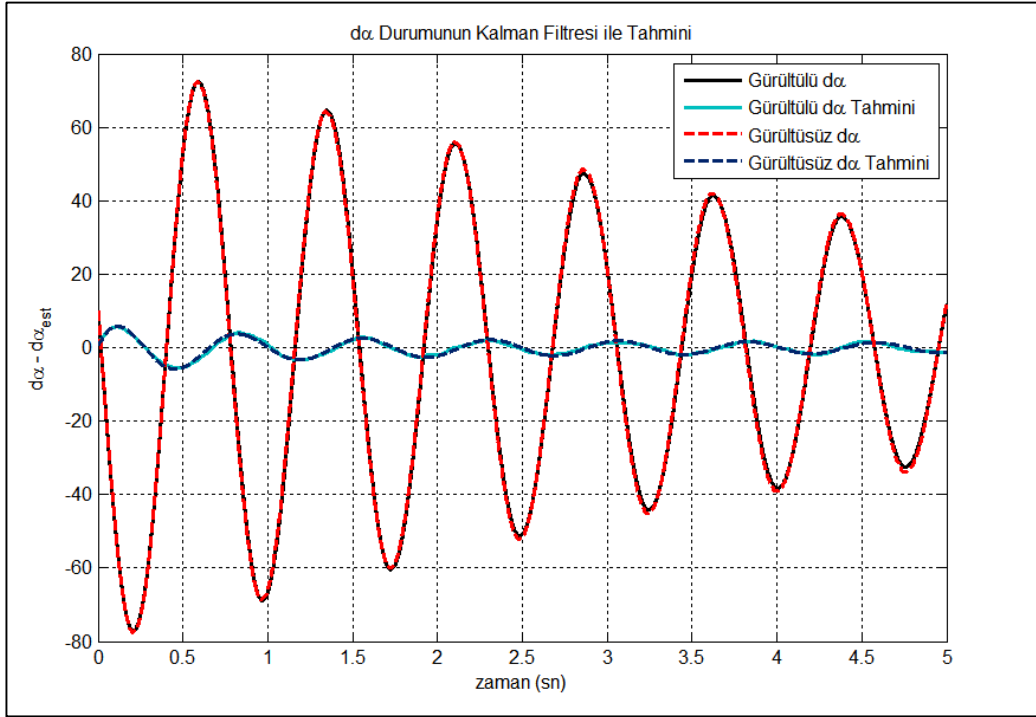
Şekil A.2 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.



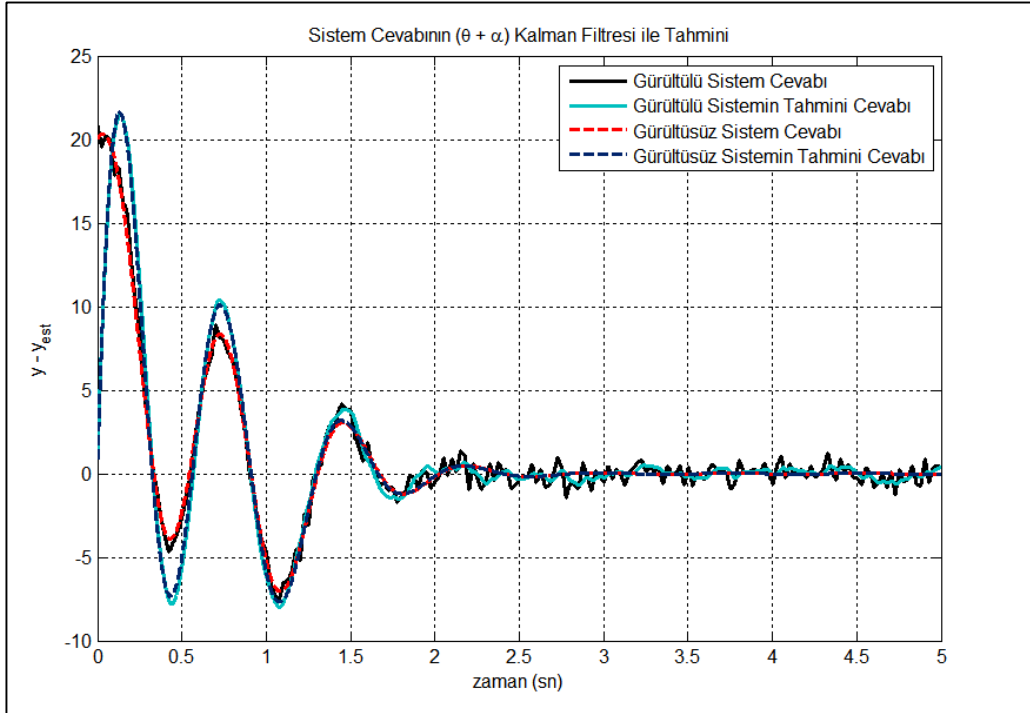
Şekil A.3 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



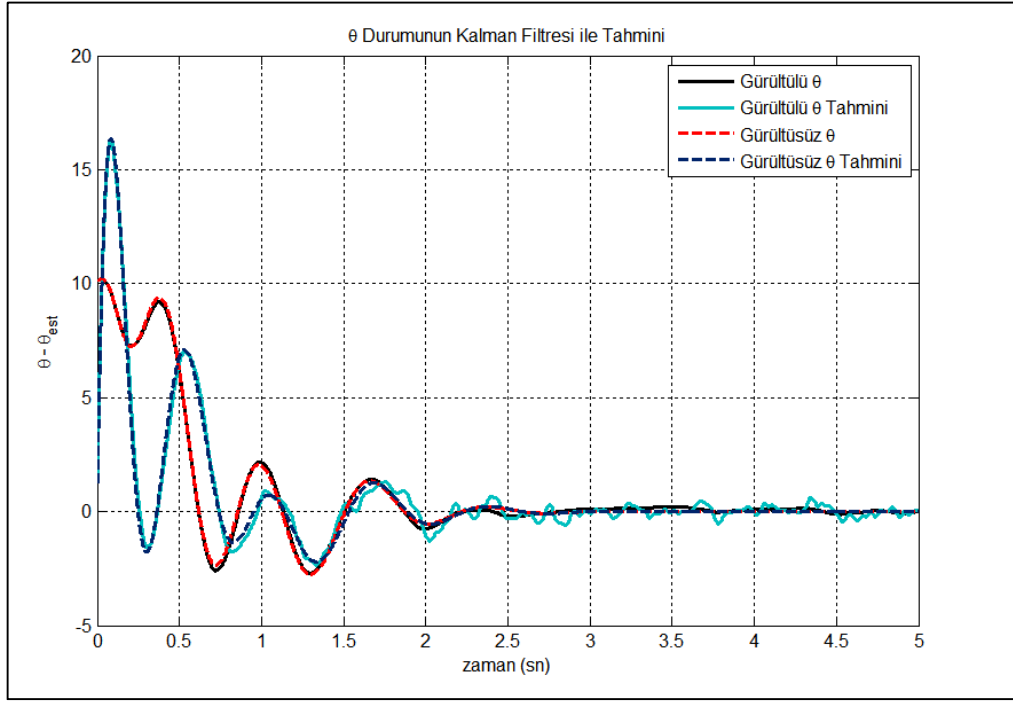
Şekil A.4 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz $\dot{\theta}$ tahmini.



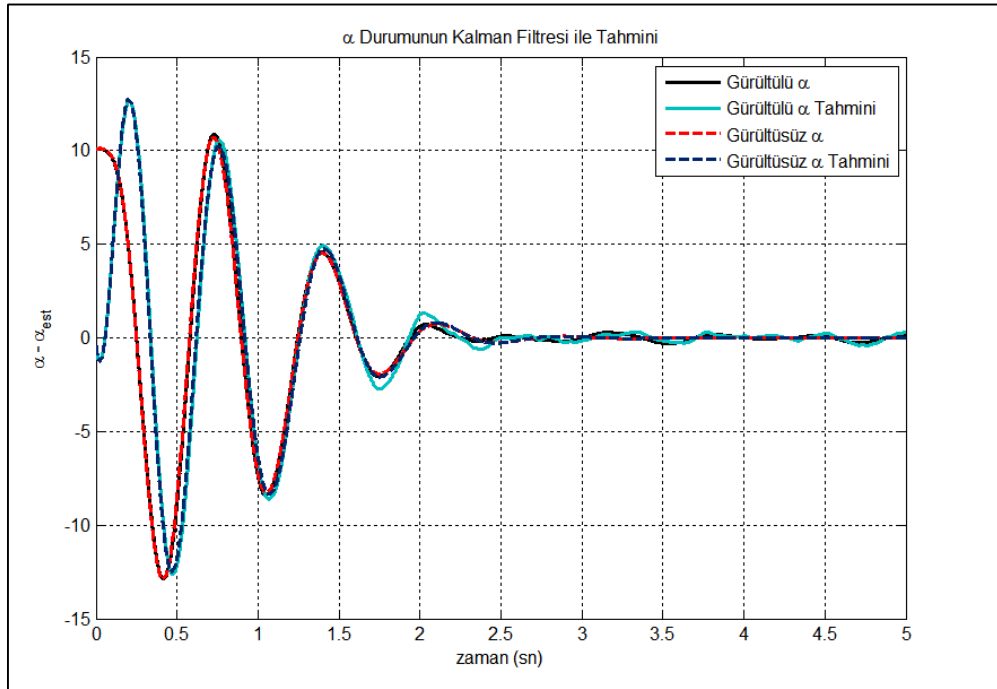
Şekil A.5 : $Q_n = 1$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



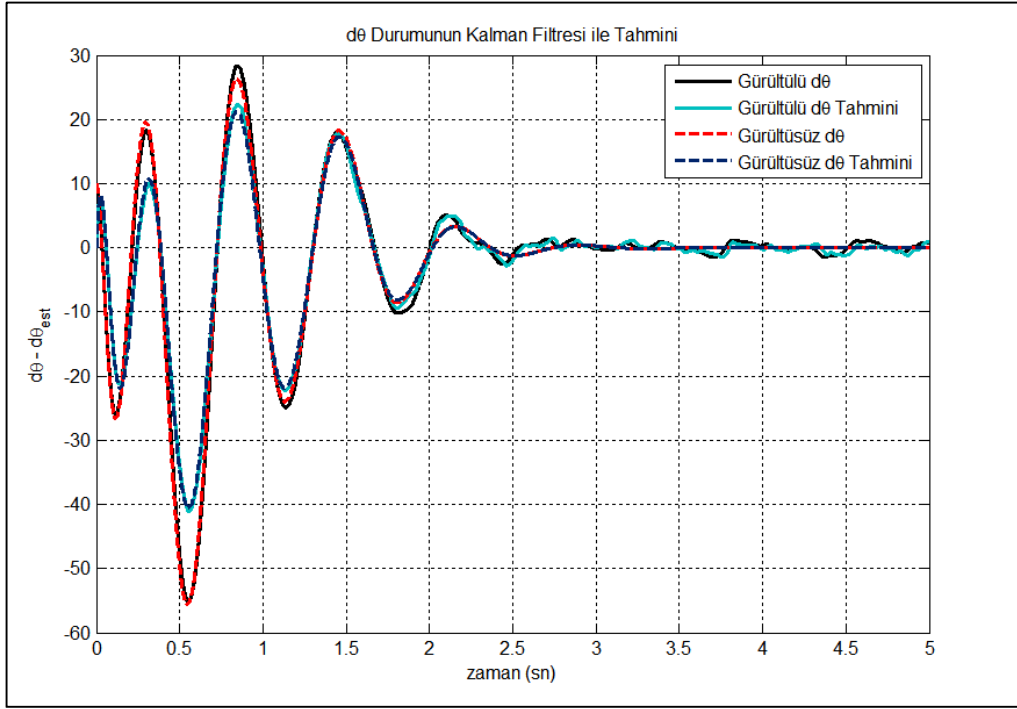
Şekil A.6 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.



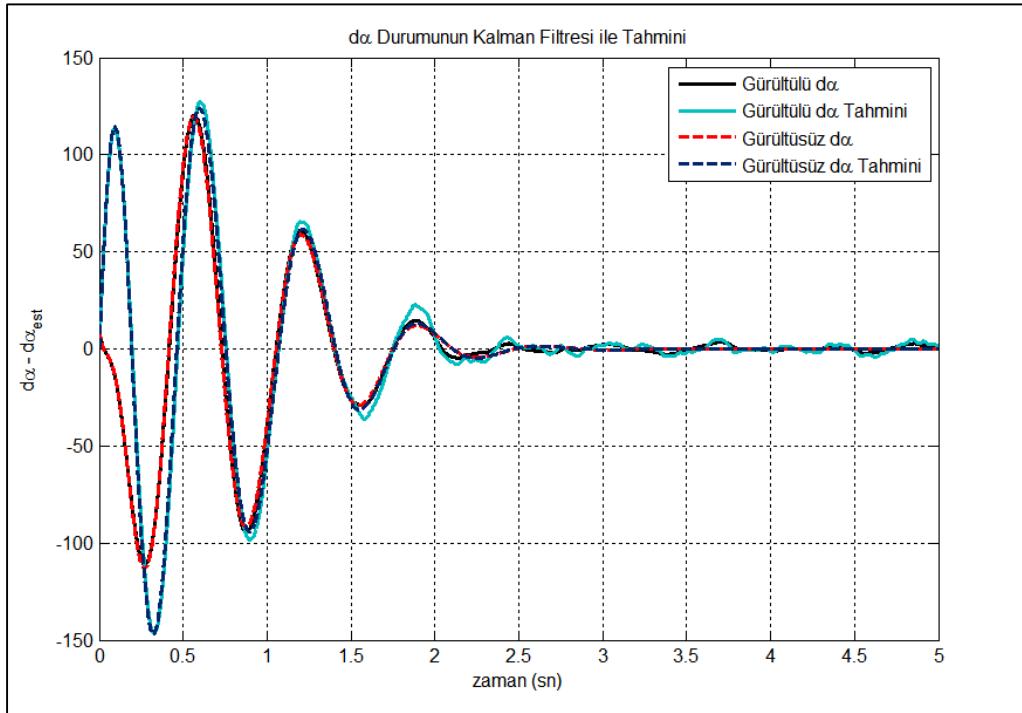
Şekil A.7 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.



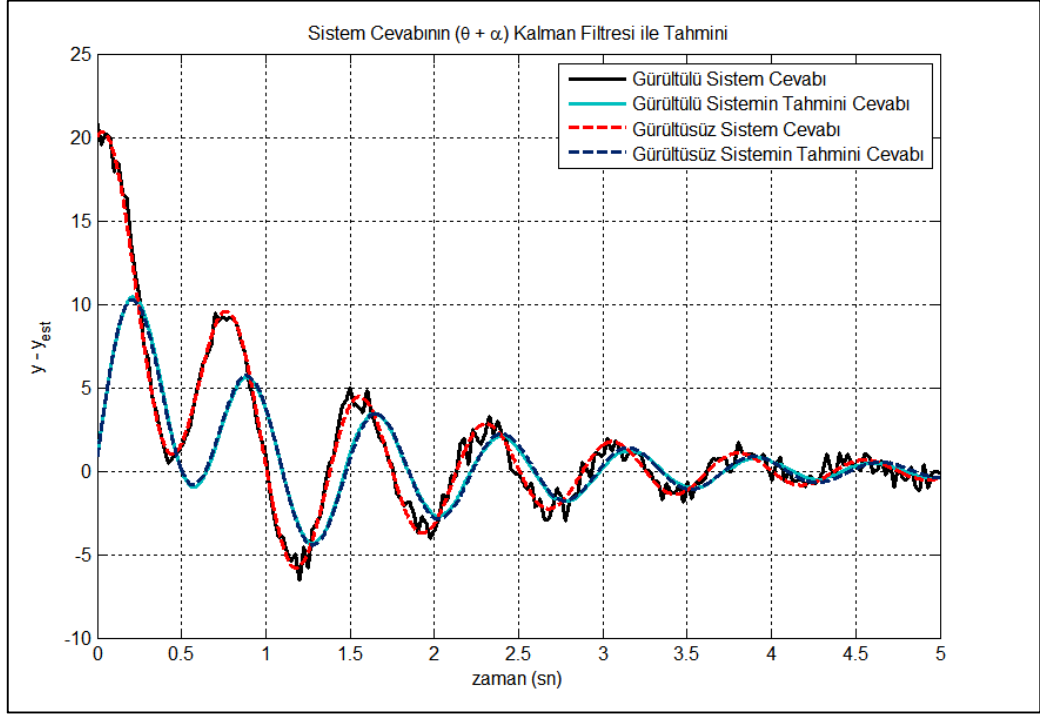
Şekil A.8 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



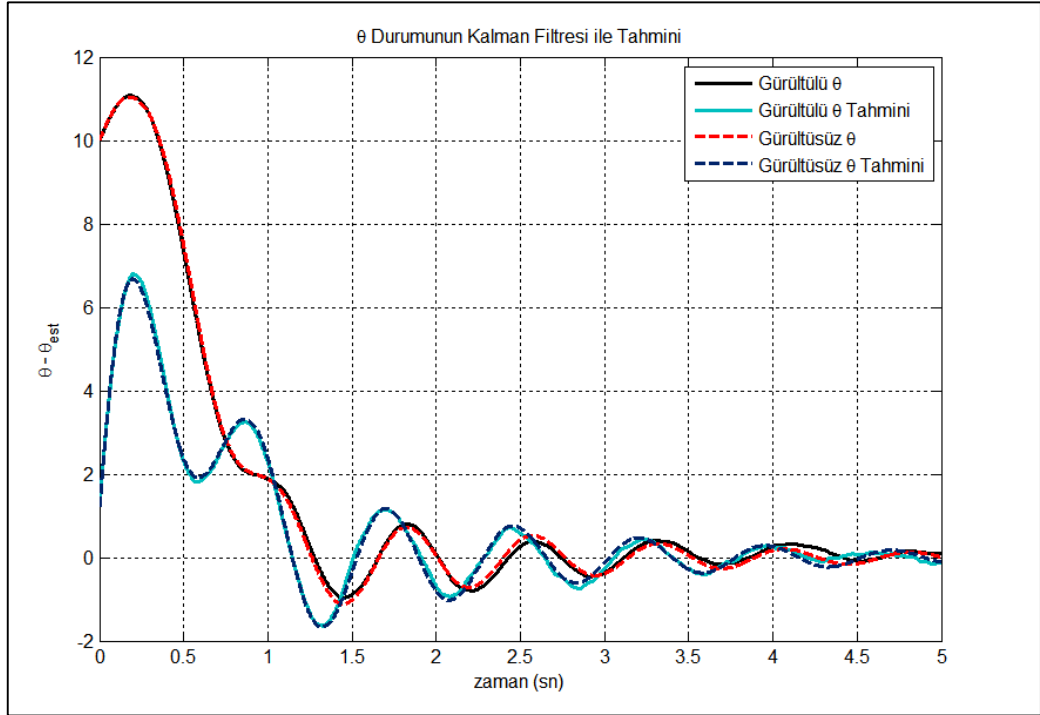
Şekil A.9 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz $\dot{\theta}$ tahmini.



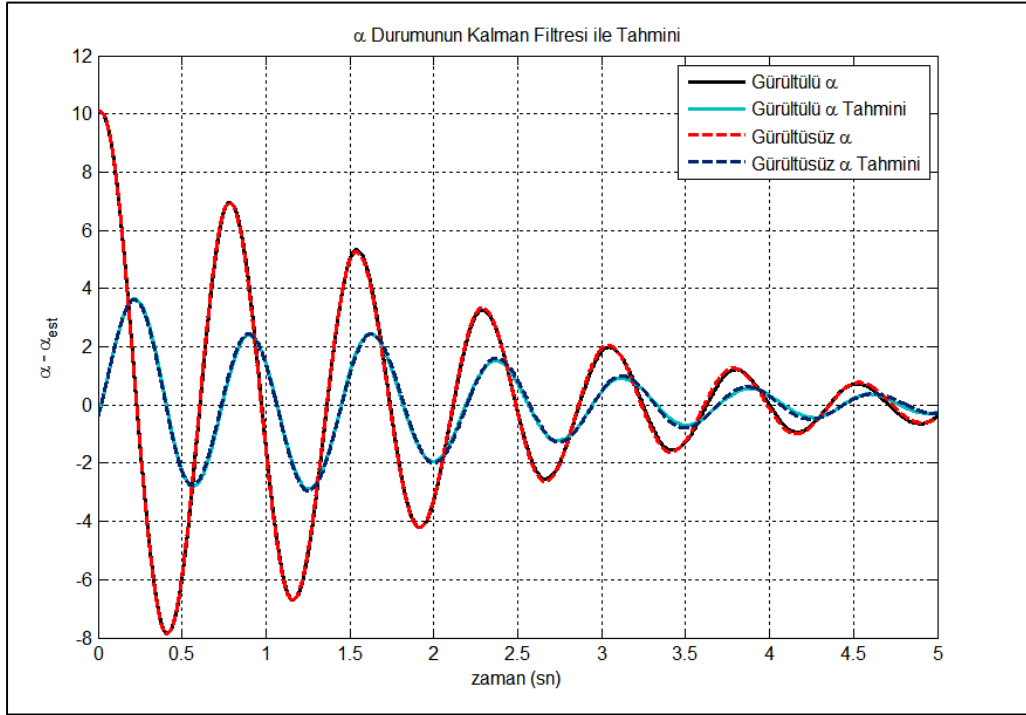
Şekil A.10 : $Q_n = 100$; $R_n = 1$ Gürültülü ve gürültüsüz $\dot{\alpha}$ tahmini.



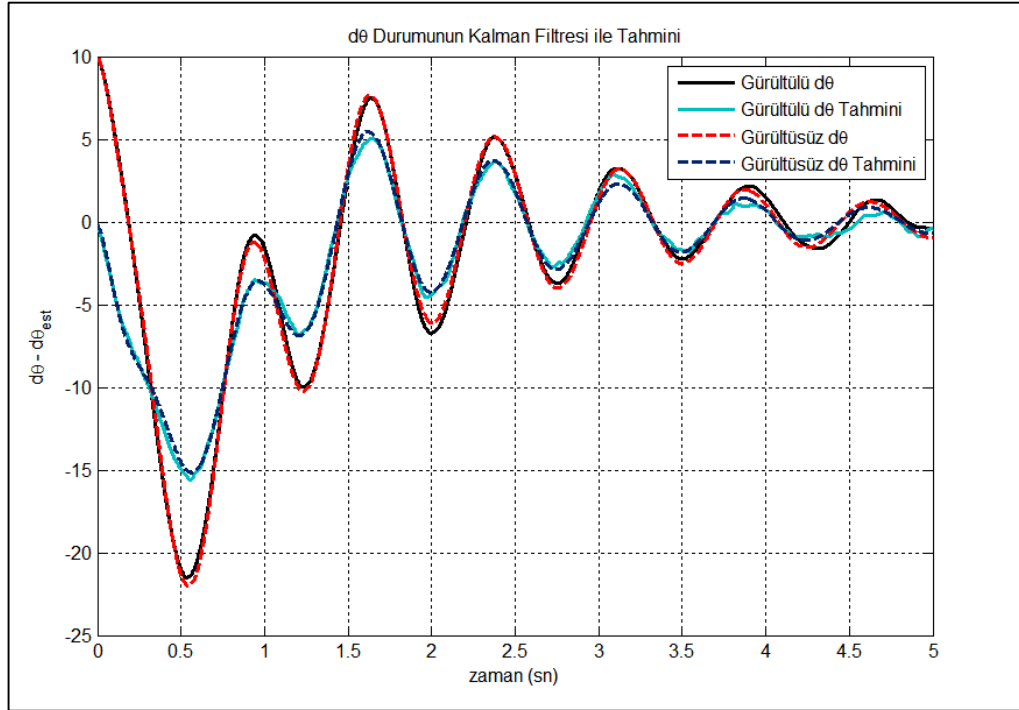
Şekil A.11 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.



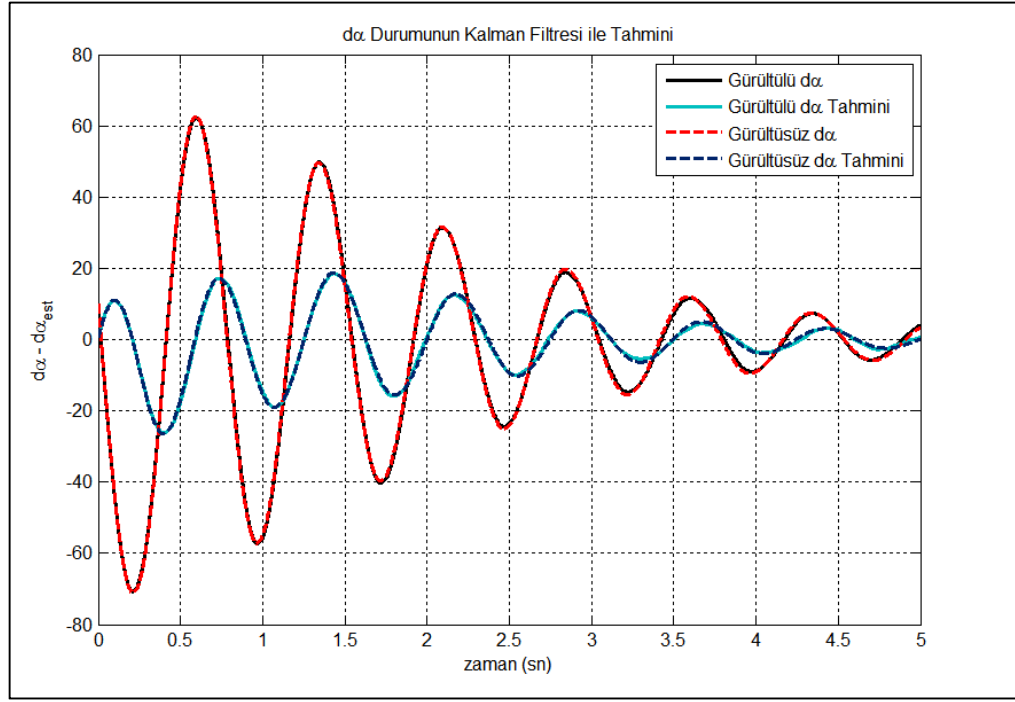
Şekil A.12 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.



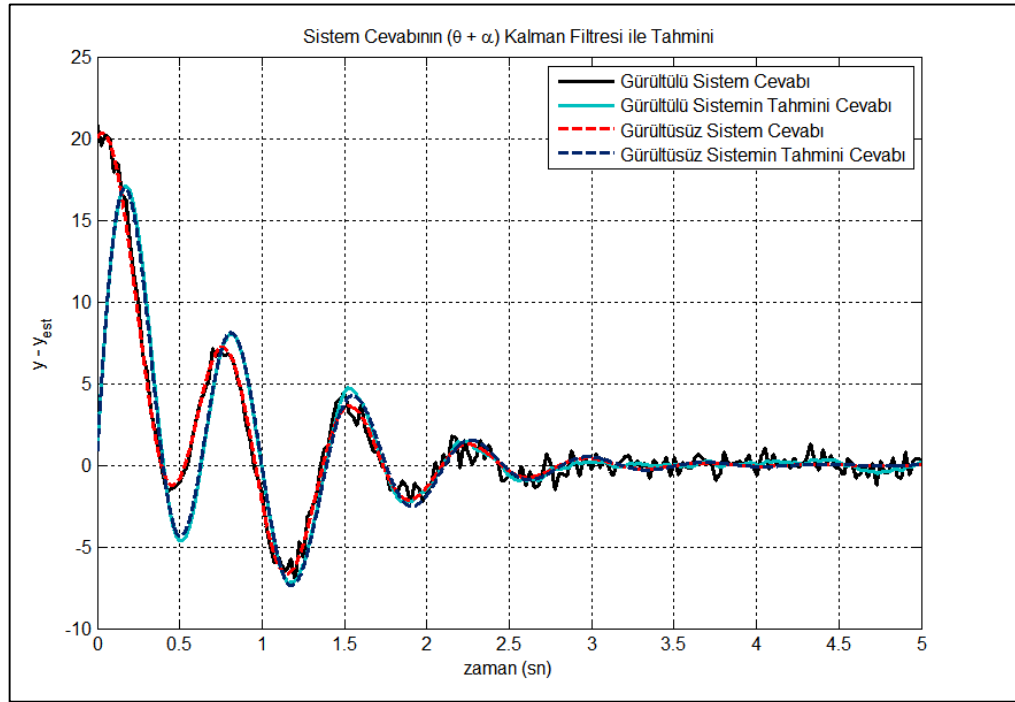
Şekil A.13 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



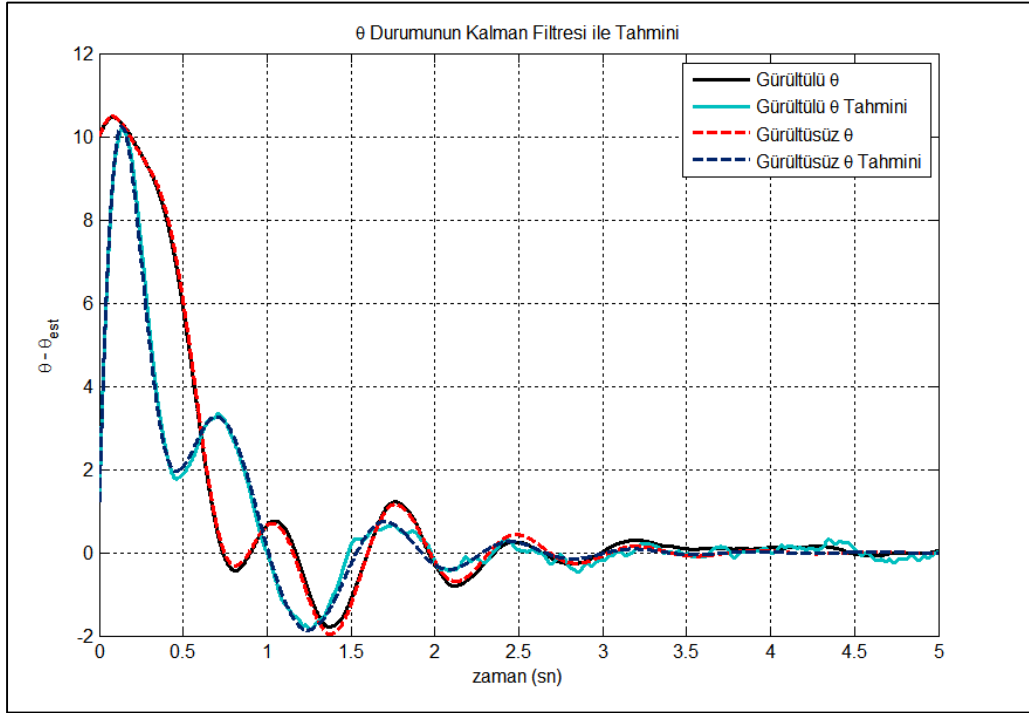
Şekil A.14 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.



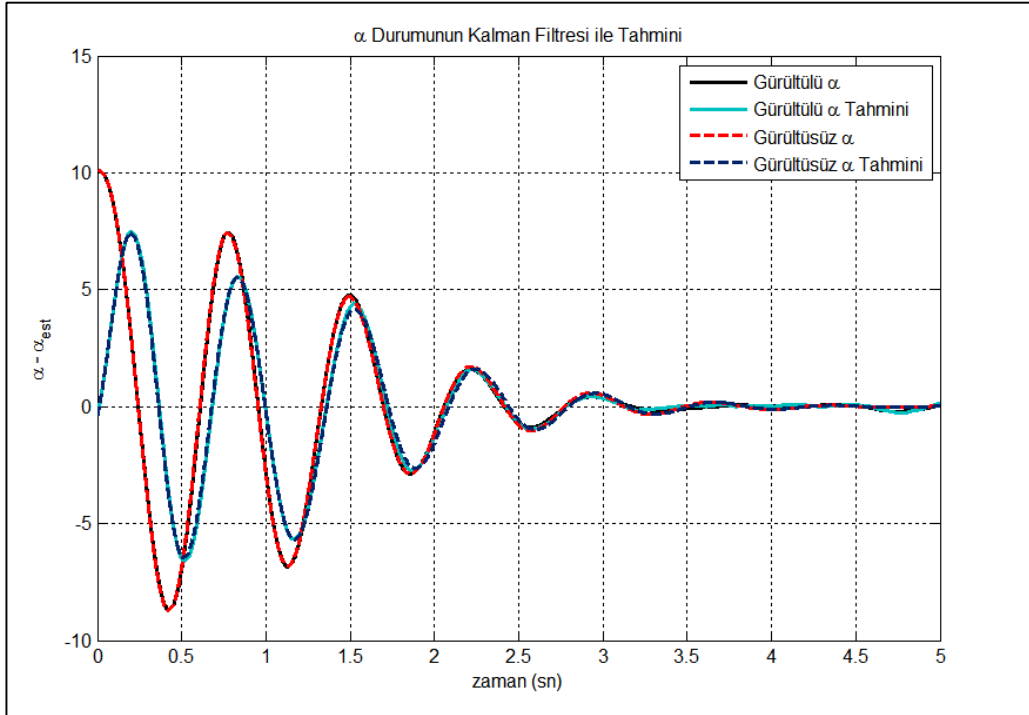
Şekil A.15 : $Q_n = 100$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



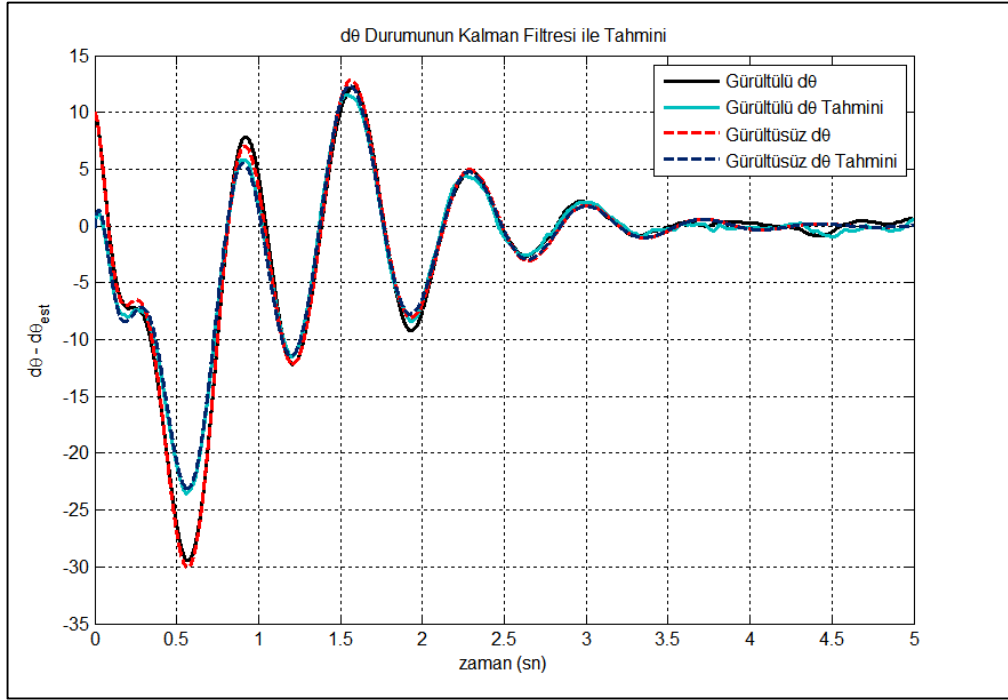
Şekil A.16 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz sistem cevabı tahmini.



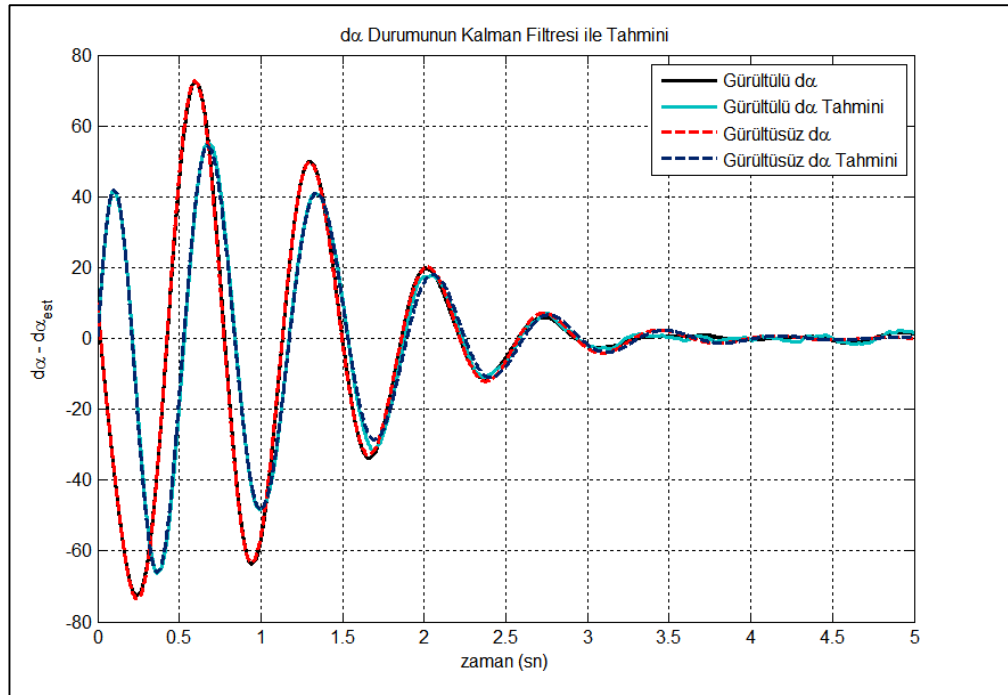
Şekil A.17 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz θ tahmini.



Şekil A.18 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz α tahmini.



Şekil A.19 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz $\dot{\theta}$ tahmini.



Şekil A.20 : $Q_n = 1000$; $R_n = 100$ Gürültülü ve gürültüsüz $\dot{\alpha}$ tahmini.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Cenk KARAMAN

Doğum Yeri ve Tarihi : Samsun 20.07.1986

E-Posta : cenk.karaman@kocaeli.edu.tr

Lisans : Kocaeli Üniversitesi
Mekatronik Mühendisliği (2010)
Hochschule Bochum (Çifte Diploma - 2010)

Mesleki Deneyim : Araş. Görevlisi - Gedik Üniv. (2011-2012)
Araş. Görevlisi – Abdullah Gül Üniv. (2012-2013)
Araş. Görevlisi – Kocaeli Üniv. (2014 - ...)

