

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**X-Y EKSENLİ KAYIŞ-KASNAK SERVO SİSTEMİN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayhan POLAT**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

OCAK 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**X-Y EKSENLİ KAYIŞ-KASNAK SERVO SİSTEMİN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ayhan POLAT
504061102**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 29 Aralık 2008
Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2009**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin GÖKAŞAN(İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Hakan TEMELTAŞ(İTÜ)
Prof. Dr. Ata MUĞAN(İTÜ)**

ŞUBAT 2009

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışması sırasında birlikte çalıştığımız ve her konuda yardımını esirgemeyen hocam Prof. Dr. Metin Gökaşan'a, çalışma sırasında mekanik sistem ile ilgili her konuda yardımcı olan teknisyen Alev Keskin'e, verdiği destek için TÜBİTAK-BİDEB'e, hayatım boyunca beni her zaman destekleyen aileme, hep yanımda olan değerli dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2008

Ayhan POLAT
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. SERVO SİSTEMİN İNCELENMESİ.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor.....	6
2.2.1 SMSM'larda kullanılan sürekli mıknatıslar.....	7
2.3 Resolver.....	8
2.4 Sürücü.....	9
2.5 Kontrolör	10
3. SERVO SİSTEMİN MODELLENMESİ.....	13
3.1 Kayış Kasnak Servo Sisteminin Matematiksel Modeli.....	13
3.2 Sürtünme	14
3.2.1 Kayış-kasnak servo sistemlerde sürtünme etkisi	15
3.2.2 Hızın bir fonksiyonu olarak, sürtünme	15
3.2.3 Sürtünme davranışı	17
3.2.3.1 Durağan hızda sürtünme:	17
3.2.3.2 Statik sürtünme ve kopma kuvveti	17
3.2.3.3 Sürtünme gecikmesi	17
3.3 Sürtünme Modelleri.....	17
3.3.1 Statik sürtünme modelleri	17
3.3.2 Dinamik sürtünme modelleri	20
3.3.2.1 LuGre modeli	20
3.4 Sürtünme Kuvvetinin Deneysel Yöntem ile Elde Edilmesi	22
3.4.1 LuGre modeli katsayıların hesaplanması	23
4. SERVO SİSTEMİN KONTROLÜ	29
4.1 Giriş.....	29
4.2 PD Kontrolör	30
4.2.1 PD kontrolör tasarımı	31
4.3 PID Kontrolör.....	37
4.3.1 PID kontrolör tasarımı	38
4.4 PD+ Kontrolör.....	47
4.4.1 LuGre modeli tabanlı sürtünme kompanzasyonu (PD+L).....	47
4.4.2 Tablo tabanlı sürtünme kompazyonu (PD+T)	55
4.5 Uyarlamalı Kontrol	62
4.5.1 Uyarlamalı kontrolör tasarımı	65
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR	75
EKLER.....	77

KISALTMALAR

DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
SMSM	: Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor
PD	: Proportional Derivative
PI	: Proportional Integral
PID	: Proportional Integral-Derivative
PD+L	: LuGre Tabanlı Sürtünme Kompazyonu
PD+T	: Tablo Tabanlı Sürtünme Kompanzasyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : LuGre sürtünme modeli katsayıları.....	24
Çizelge A.1 : Motor parametreleri.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : X-y tablanın mekanik çizimi.	5
Şekil 2.2 : Servo sistemin temel yapısı.....	6
Şekil 2.3 : Sürekli mıknatısların karakteristikleri.....	7
Şekil 2.4 : Resolverın şematik gösterimi.	9
Şekil 2.5 : Moment kontrolü kipinde sürücü kontrol yapısı.	10
Şekil 2.6 : DS1102 kontrolörün yapısı.	11
Şekil 2.7 : Sürücünün bağlantı şeması.....	12
Şekil 3.1 : Kayış-kasnak sisteminin yapısı.	13
Şekil 3.2 : Temas yüzeyinin mikroskobik görünümü.....	15
Şekil 3.3 : Stribeck eğrisi.....	16
Şekil 3.4 : Statik sürtünme modelleri (a) Coulomb sürtünme (b) Coulomb artı viskoz sürtünme (c) yapışma (stiction) artı Coulomb artı viskoz sürtünme (d) Stribeck etkisi eğrisi.....	18
Şekil 3.5 : Yüzey kılcallarının görünümü.....	20
Şekil 3.6 : Eksen 1 ve eksen 2 için sürtünme kuvveti sonuçları.....	23
Şekil 3.7 : Uydurulan eğri ve gerçek eğri.....	24
Şekil 3.8 : 1. eksen ileri ve geri yönde sistem ve model hızı.....	25
Şekil 3.9 : 2. eksen ileri ve geri yönde sistem ve model hızı.....	25
Şekil 3.10 : 1. eksen için model ve sürtünme/hız eğrisi.....	26
Şekil 3.11 : 2. eksen için model ve sistem sürtünme/hız eğrisi.....	26
Şekil 4.1 : Kompanze edilmemiş sistemin köklerinin yer eğrisi.....	32
Şekil 4.2 : Kompanze edilmemiş sistemin basamak cevabı.....	32
Şekil 4.3 : PD kompanze edilmiş sistemin köklerinin yer eğrisi.....	34
Şekil 4.4 : PD kompanze edilmiş sistemin basamak cevabı.....	34
Şekil 4.5 : 1. eksen PD kontrol; basamak cevapları.....	35
Şekil 4.6 : 1. eksen PD kontrol; gerçek sistem hızı.....	35
Şekil 4.7 : 1. eksen PD kontrol gerçek sistem kontrol işareti.....	35
Şekil 4.8 : 2. eksen PD kontrol; basamak cevapları.....	36
Şekil 4.9 : 2. eksen PD kontrol; gerçek sistem hızı.....	36
Şekil 4.10 : 2. eksen PD kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.....	36
Şekil 4.11 : PID kontrolörün blok gösterimi.....	37
Şekil 4.12 : PID kompanze edilmiş modelin köklerinin yer eğrisi.....	39
Şekil 4.13 : PID kompanze edilmiş modelin basamak cevabı.....	40
Şekil 4.14 : 1. eksen PID kontrol; basamak cevapları.....	40
Şekil 4.15 : 1. eksen PID kontrol; gerçek sistem hızı.....	41
Şekil 4.16 : 1. eksen PID kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.....	41
Şekil 4.17 : 2. eksen PID kontrol; basamak cevapları.....	42
Şekil 4.18 : 2. eksen PID kontrol; gerçek sistem hızı.....	42
Şekil 4.19 : 2. eksen PID kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.....	42
Şekil 4.20 : PID kontrolörün daire referansı takibi.....	43
Şekil 4.21 : PID kontrol; sistem cevabının tekrarlanabilirliği.....	44

Şekil 4.22 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, gerçek sistem konumu.	44
Şekil 4.23 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	44
Şekil 4.24 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	45
Şekil 4.25 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.	45
Şekil 4.26 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.	45
Şekil 4.27 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	46
Şekil 4.28 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	46
Şekil 4.29 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.	46
Şekil 4.30 : PD+ kontrolör blok gösterimi.	47
Şekil 4.31 : 1. eksen PD+L kontrol; basamak cevabı.	48
Şekil 4.32 : 1. eksen PD+L kontrol; sistem hızı.	48
Şekil 4.33 : 1. eksen PD+L kontrol; kontrol işareti.	48
Şekil 4.34 : 1. eksen PD+L kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.	49
Şekil 4.35 : 2. eksen PD+L kontrol; basamak cevabı.	49
Şekil 4.36 : 2. eksen PD+L kontrol; sistem hızı.	50
Şekil 4.37 : 2. eksen PD+L kontrol; kontrol işareti.	50
Şekil 4.38 : 2. eksen PD+L kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.	50
Şekil 4.39 : PD+L kontrolörün daire şeklinde referansı takibi.	51
Şekil 4.40 : PD+L kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.	51
Şekil 4.41 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.	52
Şekil 4.42 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	52
Şekil 4.43 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	52
Şekil 4.44 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.	53
Şekil 4.45 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.	53
Şekil 4.46 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.	53
Şekil 4.47 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	54
Şekil 4.48 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	54
Şekil 4.49 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.	54
Şekil 4.50 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.	54
Şekil 4.51 : 1. eksen PD+T kontrol; basamak cevabı.	55
Şekil 4.52 : 1. eksen PD+T kontrol; sistem hızı.	56
Şekil 4.53 : 1. eksen PD+T kontrol; kontrol işareti.	56
Şekil 4.54 : 1. eksen PD+T kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.	56
Şekil 4.55 : 2. eksen PD+T kontrol; basamak cevabı.	57
Şekil 4.56 : 2. eksen PD+T kontrol; sistem hızı.	57
Şekil 4.57 : 2. eksen PD+T kontrol; kontrol işareti.	57
Şekil 4.58 : 2. eksen PD+T kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.	58
Şekil 4.59 : PD+T kontrolörün, daire şeklinde referansı takibi.	58
Şekil 4.60 : PD+T kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.	59
Şekil 4.61 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.	59
Şekil 4.62 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	59
Şekil 4.63 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	60
Şekil 4.64 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.	60
Şekil 4.65 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.	60
Şekil 4.66 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.	61
Şekil 4.67 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, takip hatası.	61
Şekil 4.68 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.	61

Şekil 4.69 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.....	61
Şekil 4.70 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.	62
Şekil 4.71 : Uyarlamalı kontrol blok gösterimi.	65
Şekil 4.72 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; sistem konumu.	66
Şekil 4.73 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; takip hatası.....	66
Şekil 4.74 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; sistem hızı.....	66
Şekil 4.75 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; kontrol işareti.....	66
Şekil 4.76 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti kestirimi	67
Şekil 4.77 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; kütle kestirimi.....	67
Şekil 4.78 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; Coulomb sürtünme katsayısı kestirimi.	67
Şekil 4.79 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; viskoz sürtünme katsayısı kestirimi.....	68
Şekil 4.80 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; sistem konumu.....	68
Şekil 4.81 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; takip hatası.....	68
Şekil 4.82 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; sistem hızı.....	69
Şekil 4.83 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kontrol işareti.....	69
Şekil 4.84 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti kestirimi	69
Şekil 4.85 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kütle kestirimi.....	70
Şekil 4.86 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; Coulomb sürtünme katsayısı kestirimi.	70
Şekil 4.87 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; viskoz sürtünme katsayısı kestirimi.....	70
Şekil 4.88 : Uyarlamalı kontrolörün, daire şeklinde referansı takibi.....	71
Şekil 4.89 : Uyarlamalı kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.	71
Şekil B.1 : ControlDesk arayüzü görüntüleri.....	79
Şekil C.1 : Hız limit; Simulink modeli.....	80
Şekil C.2 : 1. eksen PD+T kontrol; Simulink modeli.....	80
Şekil C.3 : 1. eksen PD+T kontrol; Simulink modeli/sürtünme kompanzasyonu bloğu.....	80
Şekil C.4 : PD+L kontrol; Simulink modeli/sürtünme kompanzasyonu bloğu.....	81
Şekil C.5 : LuGre modeli; Simulink modeli.....	81
Şekil C.6 : X-y tabla PD+ kontrol; daire şeklinde referans, Simulink modeli.	82
Şekil C.7 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; Simulink modeli.	82
Şekil C.8 : 1. eksen uyarlamalı kontrol Simulink modeli/uyarlama bloğu.	83

SEMBOL LİSTESİ

k_t	: motor moment sabiti
J_m	: motor eylemsizliği
R	: kasnak yarıçapı
v	: doğrusal hız
x	: doğrusal konum
a	: doğrusal ivme
θ	: açısal konum
ω	: açısal hız.
z	: kılcalların ortalama sapması
F_c	: Coulomb sürtünme katsayısı
F_N	: normal kuvvet
F_v	: viskoz sürtünme katsayısı
F_{st}	: yapışma (stiction) sürtünme katsayısı
v_s	: Stribeck hızı
F_S	: sürtünme kuvveti
F_{Sc}	: Coulomb sürtünme kuvveti
F_{Sv}	: viskoz sürtünme kuvveti
F_{uy}	: uygulanan kuvvet
σ_0	: rijitlik katsayısı
σ_1	: sönüm katsayısı
v_s	: stribeck hızı
m	: kütle
vi	: gerilim/akım oranı
M	: moment
F	: motor kuvveti
F_{uy}	: yüke uygulanan kuvvet
$\bar{P}, \bar{\gamma}$	: parametre kestirimleri.
P, γ	: nominal parametre değerleri
$\tilde{P}, \tilde{\gamma}$	: parametre hataları
σ	: yakınsama oranı
Γ_1, g	: uyarılama kazanç matrisleri
e	: hata
i_q	: motor q bileşeni akımı

X-Y EKSENLİ KAYIŞ-KASNAK SERVO SİSTEMİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Kayış kasnak sistemi ile sürülen x-y tablalarda karşılaşılan en önemli yük etkisi doğrusal olmayan terimler içeren sürtünme kuvvetidir. Bu sürtünme kuvveti etkisi kontrolör tasarımı karmaşıktır ve de sistemin hassas kontrolüne engel olmaktadır. Ayrıca parametre belirsizlikleri ve sistemin mekanik aksamında var olan sorunlar da bu tarz sistemlerin hassas kontrolünü zorlaştırmakta ve x-y tablalar için oldukça önemli bir kistas olan sistem cevabının tekrarlanabilirliğini azaltmaktadır.

Çalışmada sürtünmenin modellenmesinde en kapsamlı sürtünme modellerinden biri olan LuGre sürtünme modeli esas alınarak, sisteme ait bir sürtünme modeli elde edilmiş ve doğruluğu test edilmiştir.

Kayış kasnak servo sistemin kontrolüne dair temel olarak iki, toplam beş çeşit kontrol yöntemi önerilmiştir. Doğrusal kontrol yöntemleri olarak PD ve PID kontrolör önerilmiştir. Sürtünme kompazyonuna dayalı yöntemler olarak ise LuGre modeli tabanlı ve tablo tabanlı olmak üzere iki tip PD+ kontrolör ve ayrıca uyarlamalı kontrolör servo sisteme uygulanmıştır. Bu yöntemlerden PD+ yöntemler iyi sonuç verse de istenilen takip hatası ve sistem cevabı tekrarlanabilirliğini sağlayamamıştır. Bu nedenlerden ötürü uyarlamalı geribesleme doğrusallaştıran kontrolör x-y tablanın hassas kontrolünde kullanılmıştır. Bu uyarlamalı kontrolör aynı zamanda sürtünme ve kütle parametrelerinin kestirimini de yapmaktadır.

x-y tabla için önerilen beş yöntem arasında en iyi sonuçları, geliştirilen uyarlamalı kontrol yöntemi vermiştir. Uyarlamalı kontrol yöntemi sistem parametrelerini an be an güncelleyerek hesapladığı gibi, servo sistemin hassas konum kontrolünü de sağlamıştır. Aynı zamanda sistem cevabının tekrarlanabilirliğini de azaltıp, servo sistemi endüstriyel kullanıma uygun bir hale getirmiştir.

MODELLING AND CONTROL OF BELT-DRIVEN X-Y AXIS SERVO SYSTEM

SUMMARY

Belt driven x-y tables mostly suffer from friction force, which has nonlinear dynamic effects on system. These effects of friction yield to complex controller design and low accuracy. Moreover, parametric uncertainties and abnormalities on the mechanical part of the system, make the accurate control of such systems difficult and decrease the repeatability of the system response which is an essential criteria for a belt-driven x-y table. Therefore, friction must be modelled perfectly.

In this thesis study, friction model and parameters are obtained based on, one of the most comprehensive friction models, LuGre friction model. Beside, the precision of the model is approved.

For control of belt-driven servo system, mainly two, in all five control methods are introduced. As linear control methods, PD and PID controllers are used in the study. As friction compensation based methods, LuGre friction model and look-up-table based PD+ controllers also an adaptive controller applied as a control technique, to the belt-driven servo system. Among these control techniques, ever though PD+ controllers gave good results for step input, they could not provide the desired tracking response and repeatability, because off flexible structures of friction parameters. Due to these reasons, an adaptive feedback linearization method is applied to the x-y table. This adaptive controller estimates friction and load parameters as well.

Between proposed control techniques in the thesis, the best results are obtained with adaptive controller. Adaptive control method, provided both desired accuracy and repeatability for the belt-driven servo system, made the system ready for industrial usage.

1. GİRİŞ

Vidalı mil veya kayış kasnak düzeni ile sürülebilen x-y tabla sistemleri endüstride lazer kesme, CNC tezgâhlar gibi yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik isteyen birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Çalışmada doğrusal kayış kasnak sistemi ile sürülen sürekli mıknatıslı senkron motorlar ile donatılmış, 120×120 cm'lik x-y tabla kullanılmıştır.

X-Y tablalarda kayış-kasnak sisteminin kullanılmasının temel avantajları yüksek hız ve verimlilik, geniş çalışma alanı ve düşük maliyettir. Fakat kayış esnekliği ve sürtünme kuvveti takip hatalarının vidalı mile göre artmasına, hassasiyet ve tekrarlanabilirliğin azalmasına neden olur. [1]

X-Y tabla kontrolünde karşılaşılan en önemli bozucu etkilerinden biri doğrusal olmayan yapıdaki sürtünme kuvvetidir. Sürtünme etkisi servo sistemlerde kontrol performansının zayıflaması takip hataları, tekrarlanabilirliğin azalması ve limit çevrimi gibi istenmeyen durumlara sebep olur[2]. Tüm bu nedenlerden ötürü sürtünme kuvvetinin modellenmesi ve kompanzasyonu, kontrol mühendisliği açısından ilgi çeken bir konu haline gelmiştir.

Servo sistemlerin hassas kontrolü için sürtünme etkisi doğru bir şekilde modellenmelidir, fakat sürtünme kuvvetinin modellenmesi zor ve halen tam olarak anlaşılamamış bir konudur. Klasik sürtünme modelleri temel olarak Coulomb, viskoz sürtünme ve Stribeck etkisinden oluşur [2]. Klasik sürtünme modelleri, değişken kopma kuvveti, histerisiz ve yapışma (stiction) gibi sürtünmenin dinamik karakteristiklerini açıklamakta yetersiz kalır. Sürtünmenin dinamik etkilerini de veren yapışma(stiction) sırasında sürtünmenin yay benzeri davranışını açıklayan bir model Dahl tarafından önerilmiştir[3]. Canudas ve diğ [4] LuGre sürtünme modeli adı altında, sürtünmenin dinamik ve statik etkilerini modelleyen yeni bir sürtünme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada da yararlanılacak olan LuGre sürtünme modeli, sürtünmenin birçok doğrusal olmayan ve dinamik davranışına açıklama getiren kapsamlı bir sürtünme modelidir.

Servo sistemler üzerindeki sürtünme etkisinin ortadan kaldırılması ve yörünge takibi konusunda doğrusal kontrol teknikleri yeterli çözümleri sunamamaktadır [2,5]. Doğrusal kontrolörler yüksek kazançlı kontrole yol açar ve kontrolörün pratikte uygulanabilirliğini sınırlar. Çalışmada da doğrusal kontrolörlerin bu olumsuzlukları x-y tablaya uygulanarak gözlemlenecektir. Bu tarz sistemlerde amaç, bir kontrol yöntemi geliştirip sürtünme etkisini yok ederken, kararlılığa etki etmemek olmalıdır. Servo sistemlerde sürtünme kompanzasyonu yapabilmek için birçok yöntem önerilmiştir. [4]'te sürtünme kuvvetini direkt kompanze eden bir gözlemleyici tasarımı yapılmıştır. Fakat bu yöntemde hassas konum kontrolü gerçekleştirebilmek için sürtünme parametrelerinin doğru bir şekilde bulunması gerekmektedir. Ancak sürtünme parametreleri gerçek sistemlerde kesin olarak bulunamaz, çünkü sürtünme kuvveti parametreleri, ortamın sıcaklığına, nemine, yüzeyin durumuna ve hatta mekanik sistemin güvenilirliğine göre sürekli değişiklik göstermektedir. Bu nedenden ötürü x-y tablada sürtünme kompazyonu yapabilmek için bu değişiklikleri kontrol işaretine an be an yansıtabilen uyarlamalı kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. [6]'da LuGre modeline dayalı, bir uyarlamalı kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde, sürtünme kuvvetinin nominal değerlerinin bilindiği varsayımı altında, sürtünme değişimlerini uyarlayan tek parametrelili bir uyarlamalı kontrolör dizaynı yapılmıştır. Fakat daha önce de belirtildiği gibi nominal değerlerinin mutlak bir biçimde bilinmesi mümkün değildir. [7,8]'de LuGre modeli değiştirilerek uyarlamalı kontrol yöntemleri uygulanmıştır. LuGre sürtünme modeline dayalı uyarlamalı kontrol yöntemlerinde kılcalların ortalama sapmasının da gözlemlenmesi gerektiğinden, karmaşık kontrol kuralları ile karşıya karşıya kalınır. Bu nedenlerden ötürü, hassasiyetten az da olsa ödün verilerek, daha basit sürtünme modelleri tercih edilebilir [9]. Çalışmada, basit bir sürtünme modeli temel alınarak, Boğosyan ve Gökaşan tarafından geliştirilen uyarlamalı kontrol yöntemi [10] kullanılacaktır.

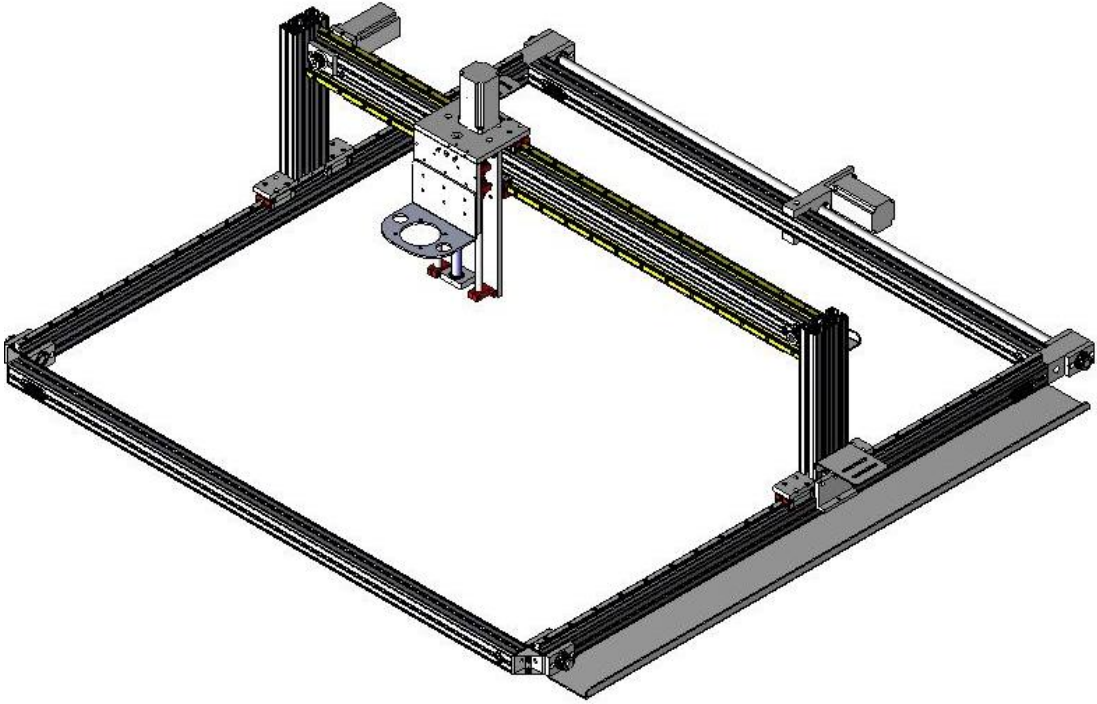
Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de üzerinde çalışılan servo sistemin detaylı bir tanıtımı yapılacaktır. Bölüm 3'de sistemin her iki eksen için de matematiksel modeli elde edilecek ve sürtünme etkisi detaylı biçimde incelenerek; en küçük kareler yaklaşımı ile LuGre modeli katsayıları bulunarak sürtünme modellenecek ve modelin doğruluğu test edilecektir. Bölüm 4'te x-y tabla için beş farklı kontrol yöntemi önerilecek ve sistemin basamak girişe karşılık cevabı ve

yörünge takibi yetenekleri incelencektir. Öncelikle doğrusal PD ve PID kontrolörlerden uygulamada yararlanılacaktır. Fakat doğrusal kontrolörün yukarıda belirtilen eksiklikleri nedeni ile sürtünme kompanzasyonu dayalı yöntemlere başvurulacaktır. İlk olarak Bölüm 3'te bulunan parametreler ve sürtünme kuvveti yardımı ile PD+ sürtünme kompanzasyonu yapılacaktır. Daha sonra geliştirilen uyarlamalı kontrol yönteminin [10] x-y tabla üzerinde uygulaması yapılacaktır. Son bölüm de ise çalışma sonucunda varılan sonuçlar verilecek ve çalışmayı ilerletebilmek için yapılabilecek yeni çalışmalara değinilecektir.

2. SERVO SİSTEMİN İNCELENMESİ

2.1 Giriş

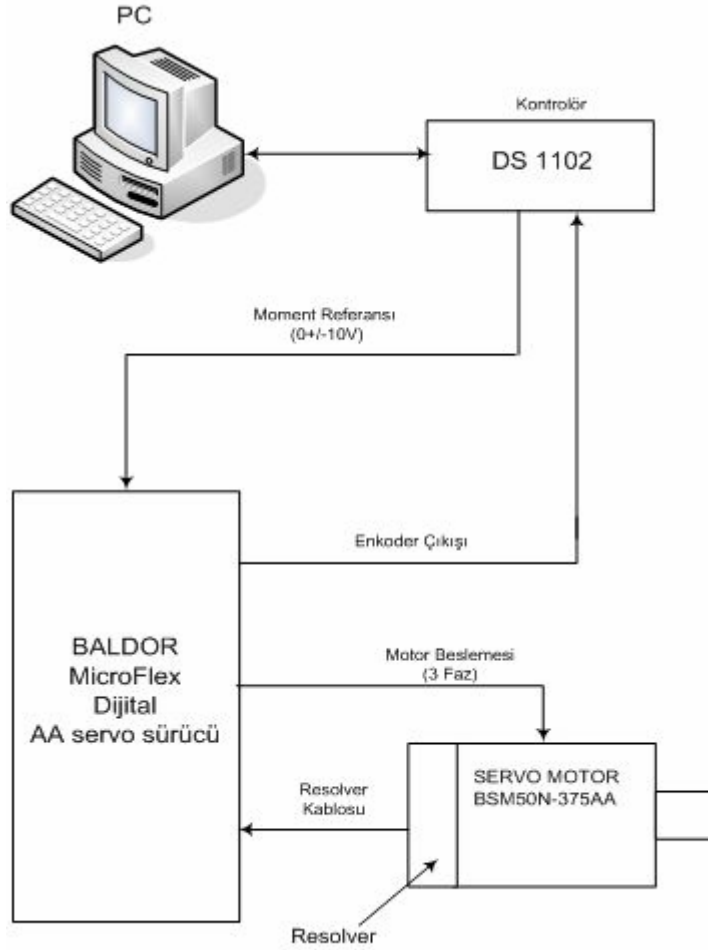
Çalışmada kullanılacak olan x-y tabla şekil 2.1'de görüldüğü üzere kayış kasnak sistemi ile sürülen x ve y düzleminde bulunan iki eksen oluşmaktadır.



Şekil 2.1 : X-y tablanın mekanik çizimi.

Tablanın x-y düzlemindeki hareketi birbirinden bağımsız iki eksenin hareketi ile meydana gelmektedir. Yükün x düzlemindeki hareketi birinci eksene bağlı sürekli mıknatıslı senkron motor ile sağlanmaktadır. Kayış kasnak düzeni yardımı ile motorun dairesel hareketi doğrusal harekete dönüştürülerek yükün konumuna etki edilir. Y ekseninin yani köprüyü taşıyan eksenin yapısı ise biraz daha karmaşıktır. Bu eksen birbirine paralel iki adet kayış kasnak düzeni ile sürülür. SMSM ise eksenlerden ayrı bir yerde, hız düşürücü kayış ve bir şaft ile eksenlerin hareketini sağlayan kasnaklara hareketi iletir. Çalışma boyunca x eksenini birinci eksen, y eksenini ise ikinci eksen olarak da adlandırılacaktır.

Tüm bu servo sistemi yüzlerce parça meydana getirmiş olsada, şekil 2.2'den de görüleceği üzere, servo sistem temel olarak motor, resolver, sürücü ve kontrolör ve bilgisayar olmak üzere beş elemandan oluşmaktadır.



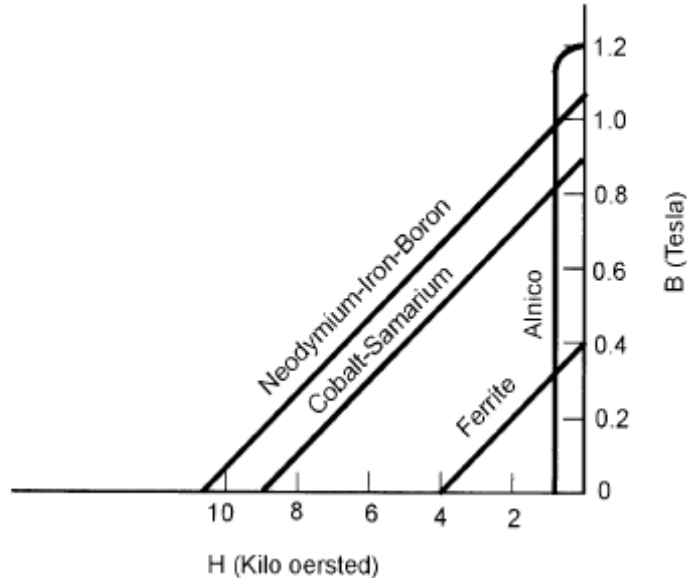
Şekil 2.2 : Servo sistemin temel yapısı.

2.2 Sürekli Mıknatıslı Senkron Motor

Bir sürekli mıknatıslı senkron motorun rotorunda d.a. alan sargısı yerine sürekli mıknatıslar vardır. Alan bakır kaybının yok edilmesi ile güç yoğunluğu artırılır ve düşük rotor eylemsizliği sağlanır [11]. Sürekli mıknatıslı senkron motorlar, düşük bir eylemsizlik ile yüksek ivmelenme sağladığından, günümüzde servo sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Motorun düşük eylemsizliğini sağlayan en önemli etken rotor yapısında kullanılan sürekli mıknatısın türüdür.

2.2.1 SMSM'larda kullanılan sürekli mıknatıslar

Sürekli mıknatısın özellikleri ve doğru malzemenin seçimi, motorun tasarımında büyük öneme sahiptir. Şekil 2.3'te bazı sürekli mıknatısların karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 2.3 : Sürekli mıknatısların karakteristikleri.

Alnico yüksek çalışma sıcaklığına, iyi bir termal dengeye, yüksek akı yoğunluğuna sahiptir, fakat düşük sıfırlayıcı kuvvet ile birlikte karesel $B-H$ karakteristiği en büyük dezavantajıdır. Bu tip karakteristik, Alnico'nun sürekli demanyetizasyonun yüksek olmasına ve bu nedenle SMSM'da kullanımının uygun olmamasına yol açar. Baryum ve Stronsiyum ferritleri, sürekli mıknatıs olarak yaygın biçimde kullanılırlar. Ferrit ucuzdur, üretimi kolaydır, yüksek sıcaklıklarda (400°C) kullanılabilir. Baryum ve Stronsiyum ferritleri doğrusal manyetik demanyetizasyon eğrisine sahiptir fakat remanansı (B_r) düşüktür. Bu nedenle SMSM'da kullanılırsa makinanın ağırlığı ve hacmi büyüyecektir. Kobalt-Samarium (CoSm) demir-nikel-kobalt ve samariumdan oluşur. CoSm manyetiğinin yüksek remanansı, yüksek enerji yoğunluğu ve lineer demanyetizasyon eğrisi vardır. Çalışma sıcaklığı (300°C) kadar çıkar, aynı zamanda sıcaklık dengesi (herbir $^{\circ}\text{C}$ için B'deki % değişim) oldukça iyidir (-0.03%). Fakat Samarium'un zor elde edilebilir bir element olmasında dolayı malzeme çok pahalıdır. Neodim-Demir-Bor (Nd-Fe-B) manyetiği en yüksek enerji yoğunluğu ve remanansa ve çok iyi bir artık mıknatıslanımaya (gidergenlik) sahiptir. Temel dezavantajı ise düşük çalışma sıcaklığına (150°C) sahip olması ve eğer koruyucu kılıf uygulanmaz

ise oksitlenmeye açık olmasıdır. Bunun yanında CoSm ye göre daha düşük (-0.13%) sıcaklık dengesine sahiptir. Malzeme ferrite göre daha pahalıdır fakat yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması ve motorun ağırlığını azaltması sebebiyle kullanımı SMSMlarda çok yaygındır. [11]

SMSM'un düşük eylemsizliğin yanında diğer avantajları yüklenme aralığının daha geniş olması ve komütatöre ihtiyaç duymaması, iyi bir kontrol karakteristiğine sahip olmasıdır. En büyük dezavantajları ise maliyetinin yüksek olması ve alan akı kontrolünün esnekliğinin ortadan kalkmasıdır [12].

Çalışmada kullanılan SMSM Baldor BSM50N-375AA tipi dört kutuplu (iki kutup çifti) servo motordur. Rotorda Neodim-Demir-Bor sürekli mıknatısı kullanılmıştır. Yüksek enerji kapasiteli Nd-Fe-B manyetikler yardımı ile servo motor dayanıklı ve kuvvetli bir tasarım sahiptir. Motor parametreleri Ek A. şekil A.1'de verilmiştir.

2.3 Resolver

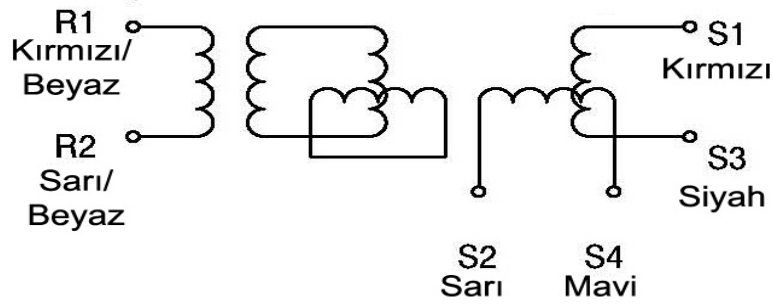
Hassas konum veya hız kontrolü yapabilmek için öncelikle hassas ve doğru bir şekilde konum ve hız ölçülebilmelidir. Servo sistemlerde ölçülen büyüklükler çok hızlı değişebildiği için, geribesleme elemanları fazladan bir öneme haizdir. Geribesleme elemanları için iki önemli karakteristik vardır; çözünürlük ve hassasiyet.

Bir geribesleme elemanının çözünürlüğü, motor milinin bir turuna karşılık kaç adet ölçüm basamağı olduğudur. Örneğin bir artımlı enkoderin çözünürlüğü, rotor bir tur döndüğünde oluşan darbe sayısıdır. Resolver gibi analog geribesleme cihazlarında ise, çözünürlük ilgili resolver-dijital dönüştürücüler olarak adlandırılır.

Bir geri besleme elemanının hassasiyeti ise bir ölçüm basamağı içerisinde konum bilgisi sapması olarak tanımlanır. Bir resolverın hassasiyeti, sargı dağılımına, hava aralığının dışmerkezliliğine, hava aralığı akısının düzgünlüğüne ve resolver şaftının esnekliğine ve motor şaftı ile kuplajına bağlıdır.

Temel bazı geribesleme elemanları, takogeneratör, potansiyometre, enkoder ve resolverlardır. Tez çalışmasında kullanılan sistemde her iki motorda da geribesleme elemanı olarak, resolver kullanılmıştır.

Resolver görünüş olarak, senkroya benzer, fakat elektriksel yapıları farklıdır. Resolver da iki stator sargısı ve bir veya iki rotor sargısı bulunur. Ve bu sargılar birbirine göre 90°'lik açıyla yerleştirilir. X-y tabla sistemindeki motorlarda kullanılan 4096×4, 16384 çözünürlüklü, ±11 basamak hassasiyetli resolverın şematik gösterimi şekil 2.4'de verilmiştir. Birinci ve ikinci sargıların bağıl konumları değiştikçe, çıkış açının sinüsü olarak değişir. Sargıların birbirine göre 90° lik açı ile yerleşmiş olması, giriş gerilimi ve frekansındaki değişimleri önemsiz hale getirir, dolayısı ile resolver çevredeki gürültüden etkilenmez ve hassasiyet kaybı olmadan işaret uzak mesafelere aktarılabilir. Bu geribesleme elemanının en önemli avantajları, yüksek hassasiyet, düşük elektriksel hata ve düşük sinüs sapmasıdır. Fakat resolverın çıkışı analog işarettir ve dijital hareket sistemlerinde kullanılabilmesi için resolver-dijital dönüştürüye ihtiyaç duyar. Bu durum, maliyetlerin artmasına ve yüksek frekanslı çalışmanın kısıtlanmasına yol açar [11].



Şekil 2.4 : Resolverın şematik gösterimi.

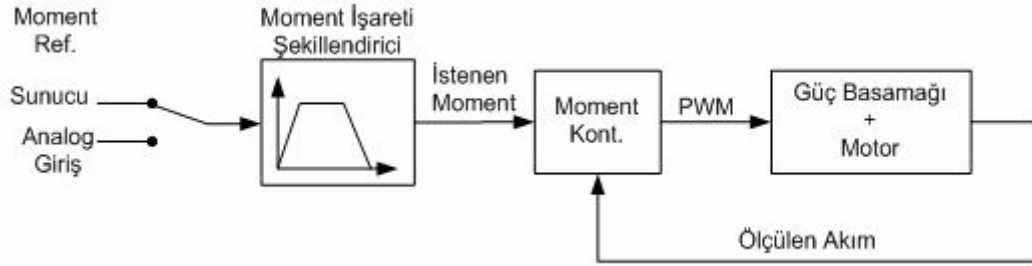
2.4 Sürücü

Çalışmada Baldor-MicroFlex sürücüler kullanılmıştır. MicroFlex tek eksenli, alternatif akım fırçasız motor sürücüsüdür. 16KHz'lik Space Vector Modulation ve 62.5 mikrosaniyelik akım döngüsü yenilemesi ile dinamik performans sağlayabilmektedir. Darbe genişlik modülasyonu yerine SVM kullanarak IGBT'lerin kontrol edilmesi ile anahtarlama kayıpları ve harmonikleri azaltarak servo motorun %15 daha hızlı çalışmasını sağlanmaktadır [13].

MicroFlex sürücü, akım(moment), hız ve pozisyon kontrolü kiplerinde çalışabilmektedir. Çalışmada sürücü akım (moment) kontrolü yapacak şekilde ayarlanmıştır. Tork referansı Workbench V5 den, activex kontrol kullanan bir hosttan veya bir analog girişten elde edilir. Çalışmada, DS 1102 den elde edilen

analog girişler tork referansı olarak kullanılacaktır. Moment işareti şekillendirici belirlenen moment hedefleri (referans değerler) doğrultusunda değişen, istenilen moment işaretini üretir. Moment kontrolörü bir PI kontrolördür, motora uygulanacak akımı belirler, bu akım gerçek motor akımıyla karşılaştırılarak (sensörlerin ölçtüğü akım) darbe genişlik modülasyonu (DGM) işareti üretilir ve bu DGM işareti yardımı ile sürücüdeki güç elektroniği elemanları sürülür. Şekil 2.5'te moment kontrolü kipinde iken sürücünün kontrol yapısı verilmiştir [13].

Şekil 2.7'de sürücünün bağlantı şeması verilmiştir. Motor ve sürücünün beslemesi X1'den sağlanmaktadır. Motorun konum ve hız bilgileri, X8 konnektörü vasıtası ile alınmaktadır, bu bilgilerin aynısı enkoder çıkışından (X7) DS 1102 kontrol kartına iletilir. Kontrolörden istenen analog giriş ise X3 konnektörü ile sürücüye iletilir. [13]



Şekil 2.5 : Moment kontrolü kipinde sürücü kontrol yapısı.

2.5 Kontrolör

Sistem DSP tabanlı dSPACE DS1102 kontrol kartı ile kontrol edilmektedir. Matlab/Simulink'te oluşturulan kontrol kodları dSPACE'in geliştirme ortamında derlenip DSP'ye yüklenmektedir.

DSPACE yüksek hızlı gerçek zamanda simülasyonlar için tasarlanmış çok etkili bir pakettir. Donanım Texas Instruments'ın gezer noktalı işlemcisi tabanlı DSP kontrolör kartından oluşmaktadır. DS 1102 birçok I/O birimi ile bağımsız bir kontrol birimidir.

- A/D ve D/A dönüşümü için 4 kanal
- 10 dijital I/O
- DGM üretimi için 10 bağımsız kanal
- 2 artımlı enkoder arayüzü
- Bir donanım kesme

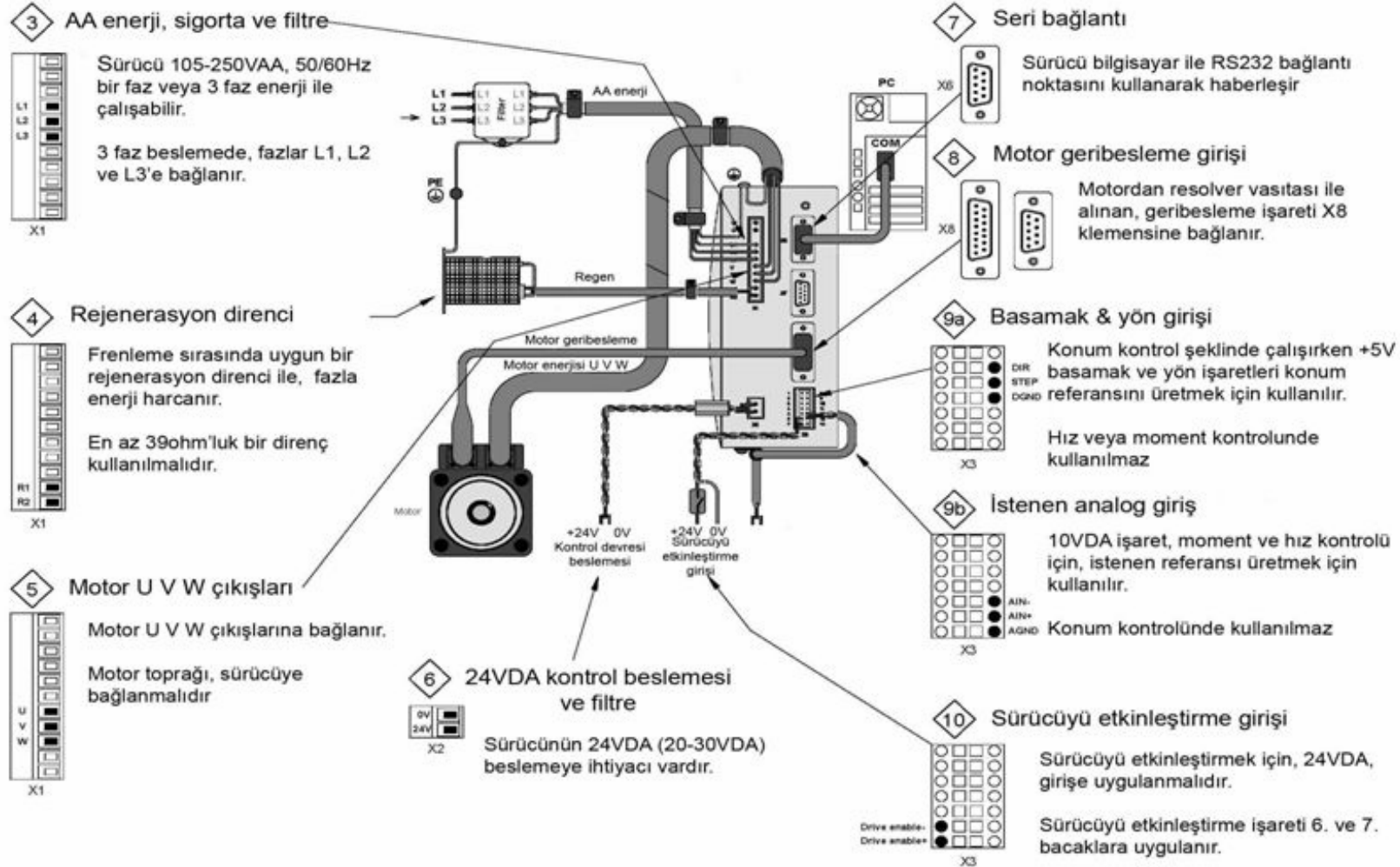
DSPACE yazılımı ise

- ControlDesk dSPACE kartın idare eden, grafiksel kullanıcı arayüzüdür. Oluşturulan kontrol kodunun başlatılmasına sistemden alınan sonuçların izlenmesine ve parametreler üzerinde değişiklik yapılabilmesine olanak sağlar. Şekil B.1'de sistemin kontrolü için oluşturulan bazı ControlDesk arayüzü görüntüleri verilmiştir.
- Real-Time Library (RTlib 1102), DS 1102'yi programlamak için gereken tüm fonksiyonları içerir. [14]

Şekil 2.6'dan da görüleceği üzere kontrolörün iki enkoder girişi olduğundan en fazla iki eksen kontrolü yapılabilmektedir. Sürücünün enkoder çıkışları kontrolörün enkoder girişine bağlanmaktadır. Sürücünün etkinleştirilmesi ise dijital I/O portundan sağlanmaktadır. Tüm bu bağlantılar için sürücü ve kontrolör arasındaki gerekli kablolar yapılmalıdır.



Şekil 2.6 : DS1102 kontrolörün yapısı.

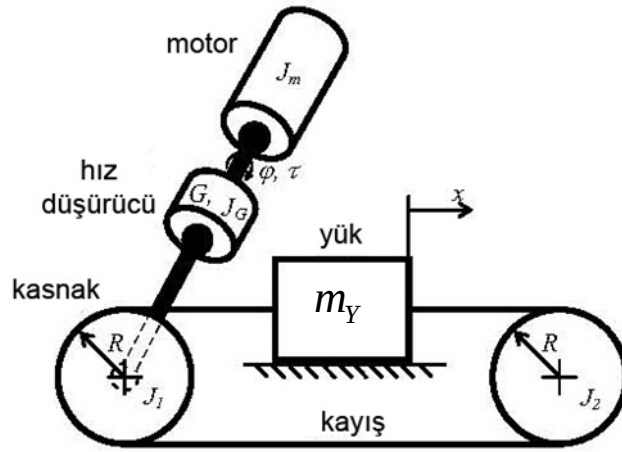


Şekil 2.7 : Sürücünün bağlantı şeması.

3. SERVO SİSTEMİN MODELLENMESİ

3.1 Kayış Kasnak Servo Sisteminin Matematiksel Modeli

Servo sistemlerde hassas kontrol ve sürtünme kompanzasyonu yapabilmek için sistemin doğru bir şekilde modellenmesi çok önemlidir. Şekil 3.1'de bir eksen için kayış-kasnak sisteminin yapısı verilmiştir



Şekil 3.1 : Kayış-kasnak sisteminin yapısı.

Servo sistem, dişli-kayış ile sürülen yük ve buna çevirme oranı G olan hız düşürücü ile bağlı motor ve kayıştan oluşmaktadır. Dişli-kayış motorun dairesel hareketini, doğrusal harekete çevirir ve yükün doğrusal olarak ivmelenmesini sağlar. Her iki eksen de şekil 3.1' dekiye benzer bir yapıdadır. Tek farklılık birinci ekseninde hız düşürücü kayış kullanılmaz iken, ikinci ekseninde daha yüksek moment sağlayabilmek için çevirme oranı iki olan hız düşürücü kayış kullanılmıştır.

Sistemin modeli, bazı kabuller altında elde edilecektir, bunlar;

- Motor ihmal edilebilir bir gecikme ile dinamik moment cevabı sağlayabilmektedir.
- Motor şaftı ve kasnak arasındaki bağlantı pektir.
- Dişler arasında boşluk yoktur.

- Bu tarz sistemlerin modellenmesinde genellikle kayıştan kaynaklanan yay etkisi de modele dâhil edilir, fakat sistemde doğrusal konum ölçebilen cihazlar olmadığından, çalışmada yay etkisi göz önüne alınmayacaktır [1].

O halde sistemin matematiksel modeli denklem (3.1)'deki gibidir.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (3.1a)$$

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = M - M_Y \quad (3.1b)$$

$$F_Y = m_Y \frac{d^2x}{dt^2} + F_S \quad (3.1c)$$

Burada θ ve ω rotorun açısal konumu ve hızı, x yükün doğrusal konumu, J_m motorun eylemsizliği, M ve M_Y motor ve yük momentleri, F_Y ve F_S yük ve sürtünme kuvvetleri, m_Y ise kayış kasnak sisteminin hareket ettirdiği yükün ağırlığıdır.

Kayış-kasnak servo sistemlerde en önemli yük etkisi doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olan sürtünme kuvvetidir (F_S), hassas bir kontrol için sürtünmenin çok iyi bir şekilde modellenmesi şarttır.

3.2 Sürtünme

Sürtünme, su başıncılı ve havalı silindirler, yataklamalar, iletim elemanları ve tekerlekler gibi birçok makine elemanında meydana gelebilir.

Sürtünme makine mühendisliğinin çalışma alanı gibi görülse de, kontrol mühendisliği için de çok önemlidir. Kontrol mühendislerinin çalışma konularına örnek olarak, yüksek hassasiyetli servo sistemler, robotlar, havalı ve su başıncılı silindirleri verebiliriz. Sürtünme, yüksek dereceden doğrusalsızlık içerir ve bu durum kararlı hal hatalarına, limit çevrimine ve zayıf performansa neden olabilir. Bu nedenlerden ötürü sürtünme kontrol mühendisleri için de yüksek öneme sahiptir. Sürtünme kuvveti, yüzey büyüklüğü, geometrisi, ilingesi, sürtünen maddenin cinsi, parçaların hızı, yer değiştirmesi ve yağlamanın olup olmaması gibi birçok değişkene bağlıdır [15].

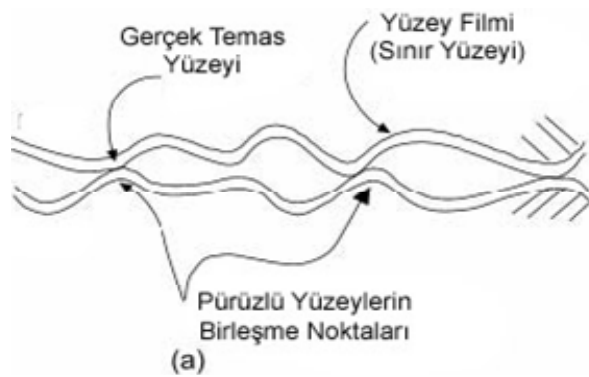
3.2.1 Kayış-kasnak servo sistemlerde sürtünme etkisi

Sürtünmenin, tüm çalışma şekillerinde servo sistemlerin sistem dinamikleri üzerinde etkisi vardır. Sürtünme tüm frekanslarda sönüm etkisine yol açar, kontrol aralığına etki eder. Üst limitlerde sürtünmenin zaman optimal kontrol dizaynı üzerinde etkisi vardır ve sürtünme hızın ve gücün limitlerini belirler. Servo sistemin çalışması sırasında, sürtünme sistem dinamiklerinin değişmesine, hatta motorun ürettiği momenti dahi yenip sistemin yavaşlamasına ve durmasına neden olabilir. Bu nedenle, sürtünmenin kompanze edilebilmesi için öncelikle doğru bir şekilde modellenmesi gerekir [12].

3.2.2 Hızın bir fonksiyonu olarak, sürtünme

Sürtünmenin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle temas halindeki yüzeylerin yapıları göz önüne alınmalıdır. Temas halindeki yüzeyler, mikroskobik düzeyde incelenirse, düz olarak kabul edilen yüzeylerin aslında pürüzlü oldukları görülmektedir. Sürtünmenin oluşmasındaki temel etken yüzeylerdeki bu pürüzlerdir.

Şekil 3.2' den de görüleceği üzere iki yüzey arasındaki gerçek temas, noktasal olarak iki pürüzün birleştiği yerde oluşur. Temas alanının deformasyonu, yük arttıkça artar ve iki yüzey arasındaki birleşme noktası genişler fakat kayma mukavemeti sabit kalır.

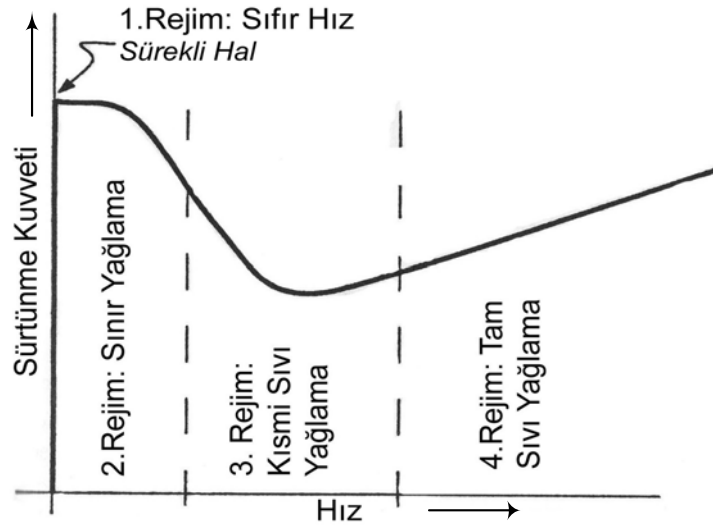


Şekil 3.2 : Temas yüzeyinin mikroskobik görünümü.

Temas yüzeyi genellikle yağlanmaktadır. Yağ temas halindeki iki metal yüzey arasında bir sıvı bariyer oluşturarak, sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır. Eğer yağlama yapılmaz ise yüzeyde oksitlenme meydana gelebilir ve sınır yüzeyi olarak, oksit film oluşur. Sistem yağlanmış ise, yağ ve katkı maddeleri, sınır yüzeyi oluşturur. Sınır

yüzeyi katıdır, fakat kayma mukavemeti çok düşük olduğundan, kayma bu filmde meydana gelir. Sürtünme kuvveti, yük ile şekli bozulan, pürüzlü temas noktalarının kayma mukavemetiyle orantılıdır. Sınır katmanını, düşük kayma mukavemetine sahip ise sürtünme de düşük olacaktır [2].

Yağlanmış temas yüzeylerinde hıza bağlı olarak dört rejim vardır. Bu dört rejim, ivmelenen bir sistemde kontrolörün karşılaşacağı dinamikleri oluşturur. Şekil 3.3 Stribeck eğrisi olarak da bilinir.



Şekil 3.3 : Stribeck eğrisi.

- Statik Sürtünme:

Durağan halden, ivmelenmeye çalışan sistemi engelleyen kuvvettir. Genellikle kinetik sürtünmeden büyüktür ve hızdan bağımsızdır. Pürüzlü temas noktalarının plastik deformasyonu nedeniyle oluşur.

- Sınır yağlama:

Yağlama statik sürtünmeyi azaltır. Bu bölgedeki sürtünme kuvveti katı-katı teması olduğundan 3. ve 4. rejimden yüksektir.

- Kısmi sıvı yağlama:

Bu rejimde, hem yağın viskozitesi, hem de pürüzlü birleşme noktaları sürtünmenin meydana gelmesini sağlar.

- Tam sıvı yağlama:

Katı-katı temas tamamen önlenir. Sürtünme yağın hidrodinamiğine bağlıdır.

Bir rejimden diğetine geçiş oldukça karmaşıktır. Dolayısıyla sürtünmeyi sadece hızın bir fonksiyonu olarak tanımlayamayız [2].

3.2.3 Sürtünme davranışı

Sürtünme kuvvetinin davranışı uzun yıllardır araştırılmaktadır. Sürtünme ile ilgili yapılmış bazı deneysel gözlemler aşağıda verilmiştir.

3.2.3.1 Durağan hızda sürtünme:

Sabit hızda hareket için hızın bir fonksiyonu olan sürtünme kuvveti, Stribeck eğrisi olarak adlandırılır. Düşük hızlarda, sürtünme kuvvetindeki azalmaya da Stribeck etkisi denir. Sürtünme ile hız arasındaki ilişki uygulamaya bağlıdır ve malzemeye, sıcaklığa ve birçok etkene göre değişiklik gösterebilir.

3.2.3.2 Statik sürtünme ve kopma kuvveti

Statik sürtünme iki yüzey birbirine yapışık halde iken meydana gelir. Statik sürtünmeyi yenip, sistemi ivmelendirecek kuvvete kopma-kuvveti denir. Oturma süresi ise sistemin hareketsiz kaldığı süredir. Uygulanan kuvvetin eğimi arttıkça, kopma-kuvveti ve oturma süresi düşecektir.

3.2.3.3 Sürtünme gecikmesi

Hızdaki değişime karşılık, sürtünmedeki değişim ile arasındaki gecikmedir. Sürtünme gecikmesi yağlayıcının viskozitesi arttıkça artar.

Tüm bu sürtünme davranışlarından görüleceği üzere sürtünme kuvvetinin davranışı dinamiktir. Bu neden ile hassas kontrol için dinamik sürtünme modelleri kullanılmalıdır [15].

3.3 Sürtünme Modelleri

Sürtünme modelleri, statik ve dinamik sürtünme modelleri olmak üzere ikiye ayırabilir.

3.3.1 Statik sürtünme modelleri

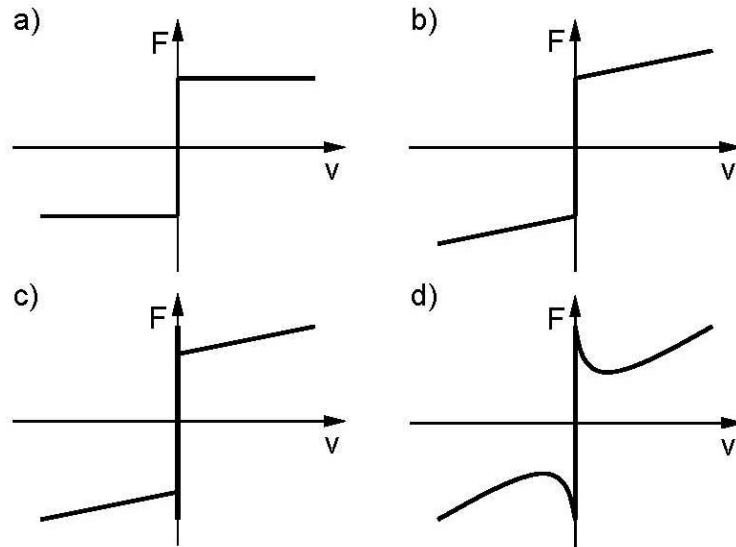
Klasik sürtünme modelleri farklı bileşenlerden oluşur. Temel düşünce sürtünme harekete karşıdır ve genliği hızdan ve temas yüzeyinden bağımsızdır.

$$F_{s_c} = F_c \operatorname{sgn}(v) \quad (3.2)$$

Coulomb sürtünmesi denklem (3.2)'deki gibi ifade edilir, burada Coulomb sürtünme kuvveti katsayısı F_c , normal yük F_N ile orantılıdır. F_{s_c} Coulomb sürtünme kuvvetidir.

$$F_c = \mu F_N. \quad (3.3)$$

Coulomb sürtünme şekil 3.4 (a)'da verilmiştir. Görüleceği üzere Coulomb sürtünme modeli sıfır hız için sürtünme kuvvetini veremez. Sadece sıfır, $+F_c$ ve $-F_c$ değerlerini alabilir. Coulomb sürtünme modeli basitliğinden dolayı sürtünme kompozisyonunda sık olarak kullanılır.



Şekil 3.4 : Statik sürtünme modelleri (a) Coulomb sürtünme (b) Coulomb artı viskoz sürtünme (c) yapışma (stiction) artı Coulomb artı viskoz sürtünme (d) Stribeck etkisi eğrisi.

Hidrodinamik teorisinin gelişmesi ile yağlama da kullanılan maddelerin viskozitesinin sürtünmeye yol açtığı ortaya çıkmıştır.

$$F_{s_v} = F_v v \quad (3.4)$$

Viskoz sürtünme kuvveti denklem (3.4)'deki gibi ifade edilir. Burada, F_{s_v} viskoz sürtünme kuvveti, F_v ise viskoz sürtünme katsayısıdır. Şekil 3.4 (b) de viskoz artı Coulomb sürtünmesi görülmektedir.

Statik sürtünme durağan halde varolan sürtünmeyi tanımlar. Sıfır hızda statik sürtünme uygulanan kuvveti etkisiz hale getirerek sistemin hareket etmesine karşı koyar. Ne zaman ki sisteme uygulanan kuvvet statik sürtünmeyi yener, sistem o anda ivmelenmeye başlar. Statik sürtünme kuvveti Coulomb sürtünmesinden daha fazladır.

Dolayısıyla durağan haldeki sürtünmeyi sadece hızın bir fonksiyonu olarak ifade edemeyiz. Eğer uygulanan kuvvet F_{uy} ise, statik sürtünmeyi denklem (3.5) te verilen şekilde tanımlayabiliriz.

$$F = \begin{cases} F_{uy} & \text{eğer } v = 0 \text{ ve } |F_{uy}| < F_{st} \\ F_{st} \operatorname{sgn}(F_{uy}) & \text{eğer } v = 0 \text{ ve } |F_{uy}| \geq F_{st} \end{cases} \quad (3.5)$$

Denklem (3.6) de görüleceği üzere sürtünme statik kuvveti, hıza değil uygulanan kuvvete bağlıdır. Burada F_{st} statik sürtünme katsayısıdır.

Klasik sürtünme bileşenleri birleştirildiğinde şekil 3.4(c) ortaya çıkacaktır. Stribeck sürtünme kuvvetinin şekil 3.4(c)'deki gibi süreksiz azalmadığını, şekil 3.4(d) deki gibi hıza bağlılığın sürekli olduğunu gözlemlemiştir. Ve buna Stribeck sürtünmesi denmiştir. Klasik modellerden daha genel bir sürtünme modeli denklem (3.6)' de verilmiştir.

$$F = \begin{cases} F(v) & \text{eğer } v \neq 0 \\ F_{uy} & \text{eğer } v = 0 \text{ ve } |F_{uy}| < F_s \\ F_{st} \operatorname{sgn}(F_{uy}) & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (3.6)$$

Burada $F(v)$ gelişigüzel bir fonksiyondur, şekil 3.4(d) deki gibi olabilir. $F(v)$ yi parametrik hale getirebilmek için birçok yöntem önerilmiştir. Doğrusal olmayışın genel bir ifadesi denklem (3.7)'deki gibi verilebilir.

$$F_s(v) = F_c + (F_{st} - F_c) e^{-|v/v_s|^{\delta_s}} + F_v v \quad (3.7)$$

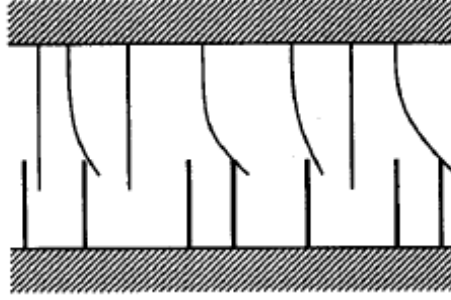
Burada v_s Stribeck hızıdır.

3.3.2 Dinamik sürtünme modelleri

3.3.2.1 LuGre modeli

LuGre modelinde, şekil 3.5'te belirtildiği gibi sürtünmeye yol açan iki yüzeyin birbiriyle elastik kılcallar ile temas halinde oldukları varsayılır. Yüzeye teğet bir kuvvet uygulandığında bu kılcallar bir yay gibi hareket edeceklerdir. Kılcalların bu hareketi sürtünme kuvvetinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. [4]

Eğer yüzeye uygulanan teğet kuvvet yeterli büyüklükte ise bazı kılcallar o kadar çok sapacaklardır ki, birbirlerinden ayrılacaklar ve kaymaya başlayacaklardır. Bu noktada uygulanan kuvvet durağan sürtünmeyi yenecek ve yük ivmelenmeye başlayacaktır.



Şekil 3.5 : Yüzey kılcallarının görünümü.

Kılcalların ortalama hareketi z ile ifade edilir ve denklem (3.8)'de kılcalların ortalama hareketi verilmiştir.

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{|v|}{g(v)} z \quad (3.8)$$

Burada v iki yüzeyin bağıl hızı, $g(v)$ ise Stribeck etkisini tanımlayan bir fonksiyondur.

$$z_{ss} = \frac{v}{|v|} g(v) = g(v) \text{sgn}(v) \quad (3.9)$$

z , sürekli halde denklem (3.9)'daki gibidir. Sürekli halde kılcalların ortalama bükülmesi, hıza bağlıdır. Düşük hızlarda z de düşüktür. Bu da demektir ki sürekli hal bükülmesi artan hız ile azalır. g fonksiyonu maddenin özellikleri, yağlama, sıcaklık gibi bir çok değişkene bağlıdır. Dolayısıyla simetrik değildir yani hareketin

yönüne bağlıdır. Hız arttığında, tipik yataklama sürtünmesi için $g(v)$, $g(0)$ dan monoton olarak azalacaktır. Bu da Stribeck etkisine karşılık düşer.

LuGre modeli Stribeck etkisinin modellenmesinde oldukça başarılıdır. Model ayrıca değişken kopma-noktası kuvveti ve sürtünme gecikmesini de dinamik olarak modelleyebilmektedir. Tüm bu nedenlerden ötürü çalışmada oluşturulacak olan sürtünme modelinde dinamik LuGre modeli kullanılacaktır.

Kılcalların bükülmesinin(kıvrılmasının) neden olduğu sürtünme kuvveti denklem (3.10)'da verilmiştir.

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} \quad (3.10)$$

Burada σ_0 rijitlik, σ_1 ise sönüm katsayısıdır. Bu ifadeye ek olarak bir de hız ile orantılı viskoz sürtünme terimi eklenir ise, sürtünme kuvveti denklem (3.11)'deki gibi elde edilir.

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + F_v v \quad (3.11)$$

Stribeck etkisini tanımlayacak olan g fonksiyonu ise denklem (3.12)'deki gibidir.

$$\sigma_0 g(v) = F_c + (F_{st} - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \quad (3.12)$$

Burada, F_{st} statik sürtünme seviyesi, F_c Coulomb sürtünme seviyesi, v_s ise Stribeck hızıdır.

Sürekli hal için ise sürtünme ve hız arasındaki ilişki (3.13) denklemiyle verilir. İleride sürtünme modeli parametrelerinin bulunmasında bu eşitlik kullanılacaktır.

$$F_{ss}(v) = \sigma_0 g(v) \operatorname{sgn}(v) + F_v v = F_c \operatorname{sgn}(v) + (F_{st} - F_c) e^{-(v/v_s)^2} \operatorname{sgn}(v) + F_v v \quad (3.13)$$

Yapışma (stiction) rejiminde doğrusallaştırma yapılacak olursa denklem (3.14) elde edilir [4].

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + (\sigma_1 + \sigma_2) \frac{dx}{dt} + \sigma_0 x = 0 \quad (3.14)$$

Denklem (3.14) sistemin ikinci dereceden sönümlü bir sistem gibi davrandığını belirtmektedir.

3.4 Sürtünme Kuvvetinin Deneysel Yöntem ile Elde Edilmesi

Sürtünme kuvvetinin elde edilmesinin en genel yolu, hızı sabit tutarak ivmelenme etkisinin ortadan kaldırılması ve buradan sürtünme kuvvetinin kolayca elde edilmesine dayanır. Çalışmada mekanik kısıtlamalardan dolayı bu mümkün olmadığından, hızdan ivmenin hesaplanması yolu seçilerek sürtünme kuvveti elde edilecek ve bu elde edilen kuvvet eğrisinden model parametrelerinin hesaplanması yoluna gidilecektir.

Sistemin matematiksel model ifadesinden sürtünme momenti denklem (3.15)'teki gibi elde edilir.

$$M_s = M - J_m \frac{d\omega}{dt} - J_y \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (3.15)$$

Burada M_s sürtünme momenti, M motor momenti J_m, J_y ise motor ve yük eylemsizlikleridir. Moment ifadesinden kuvvete geçecek olursak, sürtünme kuvveti denklem (3.16) şeklinde elde edilir.

$$F_s = F - m_m \frac{dv}{dt} - m_y \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.16)$$

Burada motor eylemsizliği m_m yükün eylemsizliğinden çok küçük olduğu için ihmal edilecek ve çalışmanın devamında kayış kasnak sistemine bağlı toplam yük m ile ifade edilecektir. Buna göre sürtünme kuvvetinin matematiksel modeli denklem (3.17)'deki gibi elde edilir.

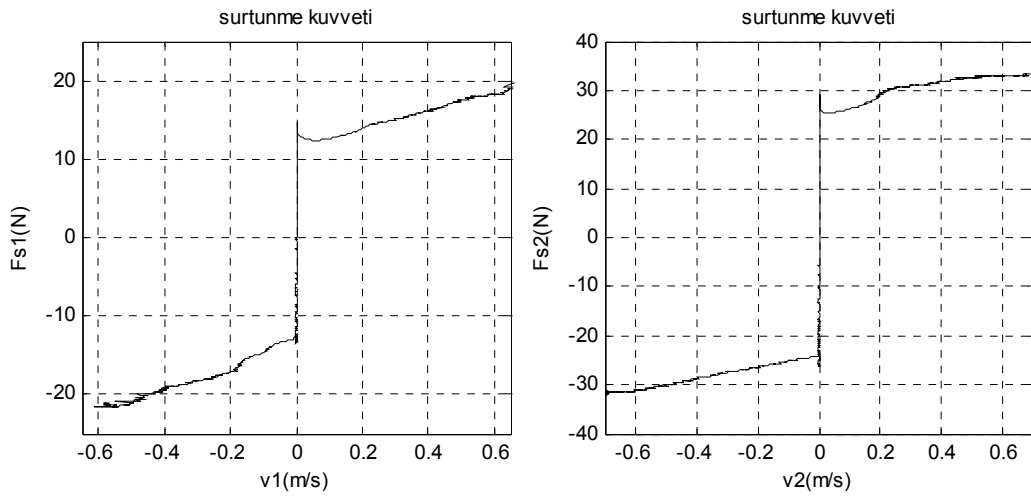
$$F_s = F - ma \quad (3.17)$$

Burada F motor kuvveti, a yükün ivmesidir.

Sürtünme kuvvetinin elde edilebilmesi için motorun belirli eğimlerde rampa biçiminde moment üretmesi sağlanmıştır. Hız sabit tutulamadığından, ivmenin hızdan yola çıkarak hesaplanması gerekmektedir. Çalışmada ivme hızın türevi alınarak hesaplanacaktır. Ancak türev elemanı nedeniyle, hız ve ivme işaretleri çok fazla gürültü içerdiğinden, elde edilen bilgi sürtünmenin elde edilmesinde kullanılmaya uygun değildir. Bu neden ile Matlab/Curve Fitting Toolbox kullanılarak, doğrusal en küçük kareler yöntemi yardımı ile hız için yedinci

dereceden doğrusal bir polinom uydurulmuş ve bu polinomun türevi alınarak her iki eksen için de ileri ve geri yönlerde yaklaşık ivme değeri hesaplanmıştır.

Hesaplanan ivme yardımı ile her iki eksen için denklem (3.17) kullanılarak F_s sürtünme kuvvetleri şekil 3.6'daki gibi elde edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken önemli nokta şekil 3.6'dan da görüleceği üzere sürtünme kuvvetinin hareketin yönüne bağlı olarak farklılık gösterdiğiidir. Bu nedenle her iki eksen için de sürtünme kuvveti her iki yönde de ayrı ayrı hesaplanmıştır.



Şekil 3.6 : Eksen 1 ve eksen 2 için sürtünme kuvveti sonuçları.

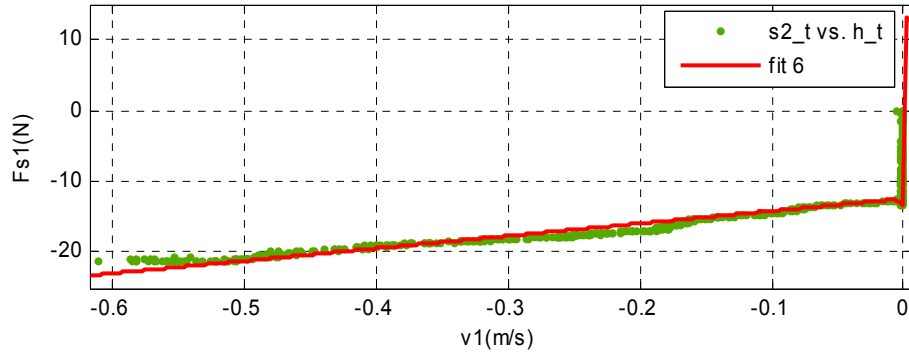
3.4.1 LuGre modeli katsayıların hesaplanması

Her iki eksen için de sürtünme kuvveti grafikleri elde edildikten sonraki adım, şekil 3.6'daki grafiklerden yola çıkarak, LuGre modelinin katsayılarının hesaplanması ve sistem modeli oluşturarak, model üzerinde bu katsayıların doğruluğunun sınanmasıdır. Hesaplanan katsayılar, çizelge 3.1'de verilmiştir. σ_0 katsayısı 10^5 olarak seçilmiştir. σ_1 katsayısı ise (3.14) denkleminde sönüm oranını 0.5 yapacak şekilde seçilmiştir. Katsayıların hesaplanmasında Matlab/Curve Fitting Toolbox'tan yararlanılmıştır. Hesaplamalar, LuGre modelinin kararlı-hal için verilen denklem (3.13) kullanılarak doğrusal olmayan en küçük kareler yaklaşımı yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.1 : LuGre sürtünme modeli katsayıları.

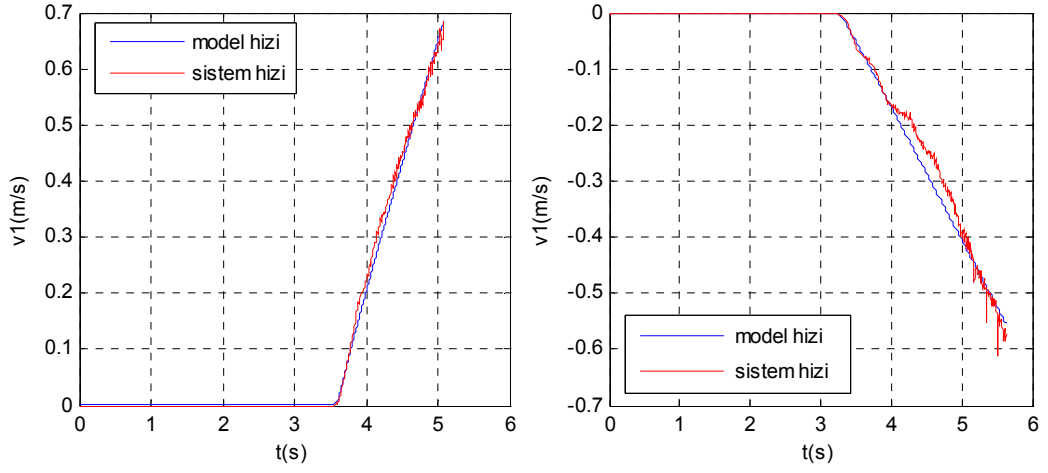
Parametre	Eksen 1		Eksen 2		Birim
	İleri	Geri	İleri	Geri	
σ_0	10^5	10^5	10^5	10^5	$[N/m]$
σ_1	$\sqrt{10^5}$	$\sqrt{10^5}$	$\sqrt{10^5}$	$\sqrt{10^5}$	$[Ns/m]$
σ_2	9.64	10.45	14.4	12.1	$[Ns/m]$
F_c	12.45	12.54	25.2	24.12	$[N]$
F_{st}	14.8	13.6	29.1	28.28	$[N]$
v_s	0.0053	0.0042	0.0061	0.0022	$[m/s]$

Şekil 3.7'de eksen 2 için negatif yöndeki sürtünme grafiği ve Curve Fitting Toolbox'ın hesapladığı katsayıların oluşturduğu grafikler verilmiştir.

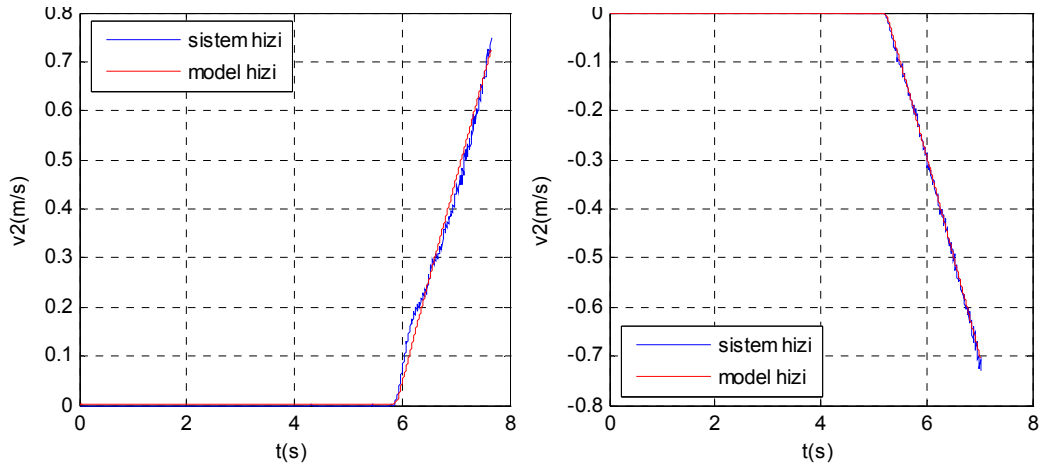


Şekil 3.7 : Uydurulan eğri ve gerçek eğri.

Curve fitting toolbox'ta uydurulan eğrinin doğruluğunu gördükten sonra, bir sonraki adımda MATLAB/Simulink'te sistemin ve sürtünme kuvvetinin bir modeli oluşturarak, parametrelerin ve LuGre modelinin doğruluğu test edilmiş ve sonuçlar şekil 3.8 ve 3.9'da verilmiştir. Ek C, şekil C.5'te, Simulink'te oluşturulan simulasyon modeli verilmiştir.



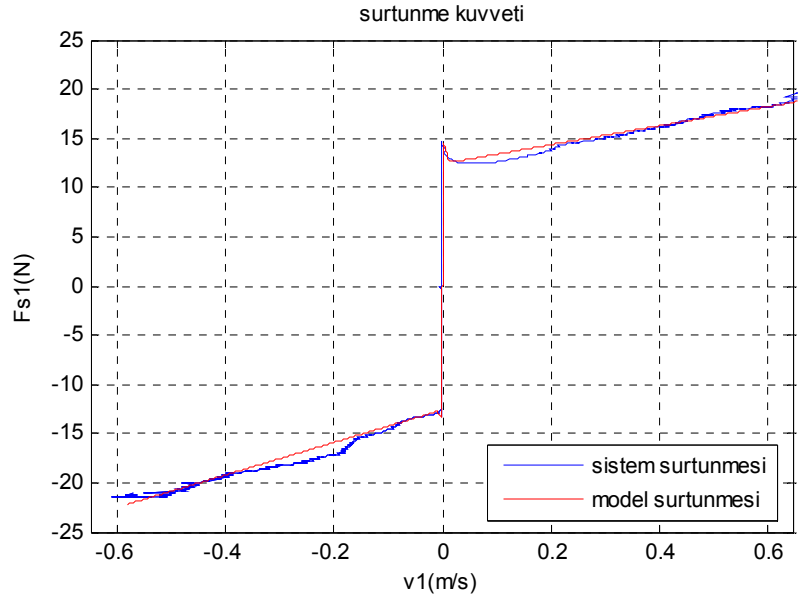
Şekil 3.8 : 1. eksen ileri ve geri yönde sistem ve model hızı.



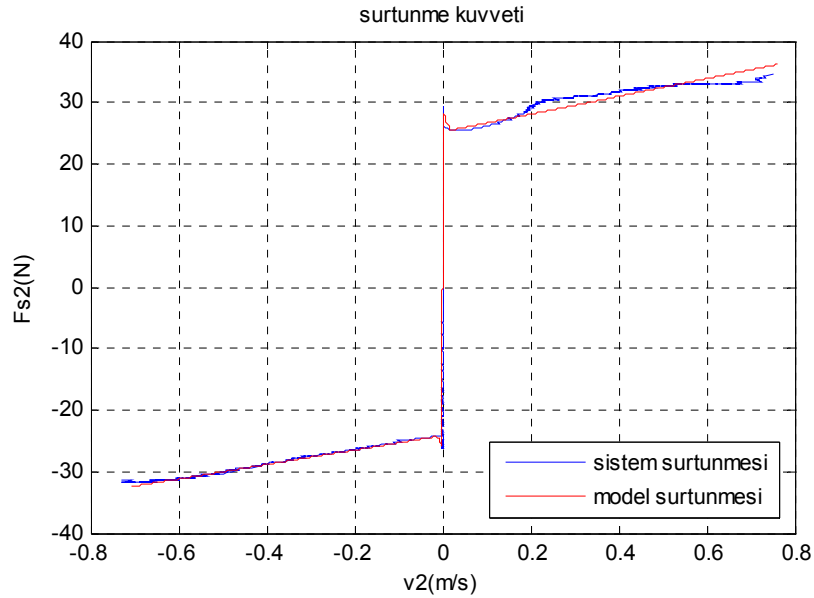
Şekil 3.9 : 2. eksen ileri ve geri yönde sistem ve model hızı.

Şekil 3.8 ve 3.9'dan da görüleceği üzere gerçek sistemin hızı ile oluşturulan modelin hızı birbiriyle örtüşmektedir. Her iki ekseninde, model ve gerçek sistemde yük aynı kuvvet değerinde (kopma kuvveti) ivmelenmeye başlamış ve yaklaşık aynı hız değerine ulaşmıştır. Şekil 3.8'de görülen gerçek sistem hız eğrisindeki bozulma mekanik aksamda var olan bir takım sorunlardan veya yağlamadan kaynaklanabilmektedir. Sistemde yağlama el ile rastgele yapıldığından yüzey üzerinde yağ dağılımı her noktada eşit değildir. Ayrıca sistemde kullanılan iki motor kasnaklar motor miline yanlış çakıldığı için yalpa yapmaktadırlar.

Şekil 3.10 ve 3.11 de ise model ve gerçek sistem için elde edilen ileri ve geri yönde sürtünme/hız eğrileri birleştirilerek eksenlerin her iki yönde de sürtünme/hız grafikleri çizdirilip LuGre sürtünme modelinin ve parametrelerin doğruluğu bir kez daha test edilmiştir.



Şekil 3.10 : 1. eksen için model ve sürtünme/hız eğrisi.



Şekil 3.11 : 2. eksen için model ve sistem sürtünme/hız eğrisi.

Şekil 3.10 ve 3.11 den görüleceği üzere, LuGre modeli sonuçları ile gerçek sistem sonuçları sürtünme/hız eğrileri için de birbirlerine oldukça yakındır. Hız zaman eğrisinde görülen doğrusalsızlıklar sürtünme/hız grafiğinde de görülmüştür. Yukarıdaki model ve sistem grafiklerinden modelin ve parametrelerin doğruluğu test edilmiş ve onaylanmıştır.

Her iki eksen de ileri ve geri yönde sürtünme eğrileri birbirleriyle yaklaşık aynı gözükmesine rağmen sürtünme modeli katsayıları farklıdır. Hassas kontrol için sürtünme her iki yönde ayrı ayrı modellenmeli ve katsayıları hesaplanmalıdır. Elde

edilen sürtünme kuvveti eğrisi ve LuGre modeli Bölüm 4'te kontrolör tasarımında ve sürtünme kuvvetinin kompanze edilmesinde kullanılacaktır.

4. SERVO SİSTEMİN KONTROLÜ

4.1 Giriş

Modern endüstriyel kayış kasanak servo sistem uygulamaları, yüksek hızlı, hassas konum yörünge takibi gerektirmektedir. Tahrik sistemindeki güç iletim elemanları frekansa bağlı karakteristiklere sahiptir bu nedenle rezonans frekansına bağlı olarak, mekanik sistemde titreşimler meydana gelebilir [12]. Ötesinde kayış-kasnak servo sistemlerde hassas kontrolü ve tekrarlanabilirliği sağlamak için sistemdeki sürtünme etkileri kompanse edilmelidir. Fakat sürtünme modeli Bölüm 3'de de değinildiği gibi doğrusal olmayan terimler içermektedir bu durum da kontrolör tasarımı oldukça karmaşık bir hale getirmektedir.

Çalışmada, öncelikle kök yer eğrisi yöntemi kullanılarak doğrusal PD, PID kontrolör tasarımları yapılacaktır. Sürtünme kompanzasyonu PD+ ve uyarlamalı kontrolörler kullanarak yapılacaktır. PD+ kontrolde sürtünme kompanzasyonu iki ayrı yöntem ile uygulanacaktır. İlk yöntemde 3. bölümde elde edilen sürtünme kuvveti eğrisi ve look-up table kullanılarak sürtünme değerleri elde edilecektir. İkinci yöntemde ise LuGre modeli ve parametreleri kullanılarak sürtünme kuvveti elde edilecektir. İki farklı yöntem ile elde edilen sürtünme kuvveti ile sistemdeki sürtünme etkisi kompanse edilecektir. Son olarak ise uyarlamalı kontrol yöntemi sisteme uygulanacaktır.

Çalışmada kullanılan kayış-kasnak servo sistemde her iki eksen için de çalışma aralığı yaklaşık 105 cm dir. Fakat sistemde bu değer aşılabacağı takdirde, yükü frenleyip çarpmayı engelleyecek donanımlar olmadığından, rulmanlar ve kayışlar gibi mekanik aksamda herhangi bir zarar vermemek için birinci ve ikinci eksene en fazla 0.5 m genlikli basamak giriş uygulanacak ve doğrusal hızın herhangi bir çalışma anında $\pm 0.9 \text{ m/s}$ 'yi geçmemesine dikkat edilecektir. Hızı sınırlandırmak için oluşturulan Simulink bloğu şekil C.1'de verilmiştir. Yörünge takibi için ise her iki eksene de 0.5m genlikli sinüs işareti uygulanacak ve takip hatasının 10mm yi geçmemesi ve tekrarlanabilirliğin 1mm üzerine çıkmaması istenecektir.

4.2 PD Kontrolör

Köklerin yer eğrisi yöntemi kullanılarak kontrolör tasarımları yapılacağından öncelikle sistemin basamak cevabı karakteristiklerinin tanımlanması gerekmektedir.

- Yükselme zamanı (T_r): Dalga şeklinin, son değerin %10'undan %90'ına ulaşması için gereken süredir.
- Tepe zamanı (T_p): İlk veya ve maksimum tepe değerine ulaşmak için gereken süredir.
- Yüzde aşım: (%OS): Tepe zamanında, cevabın kararlı hal veya son değeri ne kadar aştığıdır, kararlı hal değerinin yüzdesi şeklinde ifade edilir.
- Yerleşme zamanı (T_s): Geçici sönümlü osilasyonların kararlı hal değerinin $\pm 2\%$ 'sine ulaşması ve oturması için gereken süredir.
- Kararlı hal hatası (e_{ss}): Sürekli halde referans girişi ile cevabın son değeri arasındaki farktır.

Oransal ve türev elemanından oluşan PD kontrolör sistemin geçici hal davranışını iyileştirir. Türev elemanı hatanın türevini aldığından, geçici halde oransal elemandan çok daha büyük bir işaret üretir. Bu da hızlı sistem cevabının elde edilmesini sağlar. Hata sıfıra yaklaştıkça türevi de sıfıra yaklaşacağından, türev elemanının çıkışı kazanca göre ihmal edilebilir bir noktaya gelir. [16]

s-düzleminde uygun bir kapalı-çevrim kutup yerleşimi seçilerek, sistemin geçici hal davranışı iyileştirilebilir. Bu nokta kök yereğrisi üzerinde ise ufak bir kazanç ayarı yeterli olacaktır. Eğer kök yereğrisi üzerinde değil ise, kök yereğrisi yeniden oluşturulmalıdır, böylece kompanze edilmiş yeni kök yereğrisi istenen kapalı çevrim kutuplarından geçecektir. Sistemi hızlandırmanın bir yöntemi, ileri yola sıfır eklemektir. Bunu sağlayacak kompanzatörün transfer fonksiyonu denklem (4.1)'de verilmiştir.

$$G_c(s) = s + z_c \quad (4.1)$$

Bu fonksiyon, türev elemanı ve saf kazancın toplamından oluşmaktadır ve ideal türev veya PD kontrolör olarak adlandırılmaktadır.

PD kontrolörün yüzde aşım üzerinde etkisi yoktur, PD kontrolör yerleşme ve tepe zamanını azaltır, ayrıca kararlı hal hatası üzerinde de azaltıcı etkisi vardır. Genellikle, geçici hal cavabındaki bir iyileşme, kararlı hal hatasının azalmasına yol açar. PD kontrolörün transfer fonksiyonu denklem (4.2)'deki gibidir [16].

$$G_C(s) = K_P + K_D s \quad (4.2)$$

4.2.1 PD kontrolör tasarımı

Kontrolör tasarımında modelleme sürtünmenin sadece viskoz sürtünmeden oluştuğu varsayım altında yapılacaktır. Buna göre birinci eksen için kayış-kasnak sisteminin açık çevrim transfer fonksiyonu denklem (4.3)'deki gibidir.

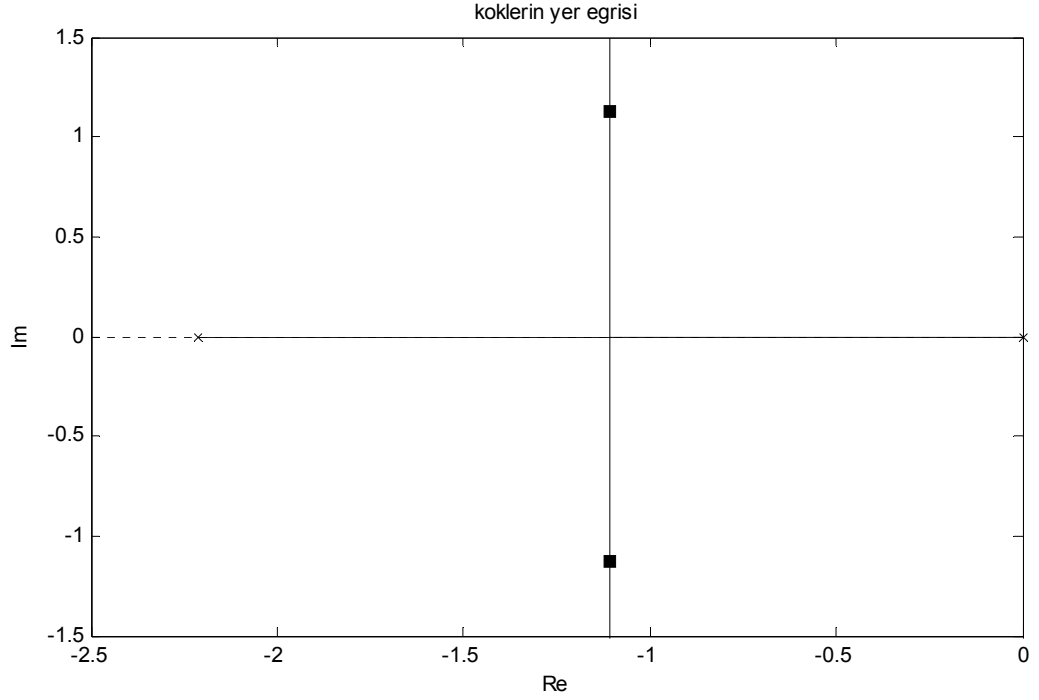
$$G(s) = \frac{K * kt / (vi * r)}{ms^2 + F_v s} = \frac{K \times 46.08}{4.7s^2 + 10.45s} = \frac{K \times 9.758}{s^2 + 2.213s} \quad (4.3)$$

Burada vi sürücü ve kontrolör arasındaki gerilim/akım oranıdır. r kasnak yarıçapıdır. Kompanze edilmemiş sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu ise denklem (4.4)'deki gibidir.

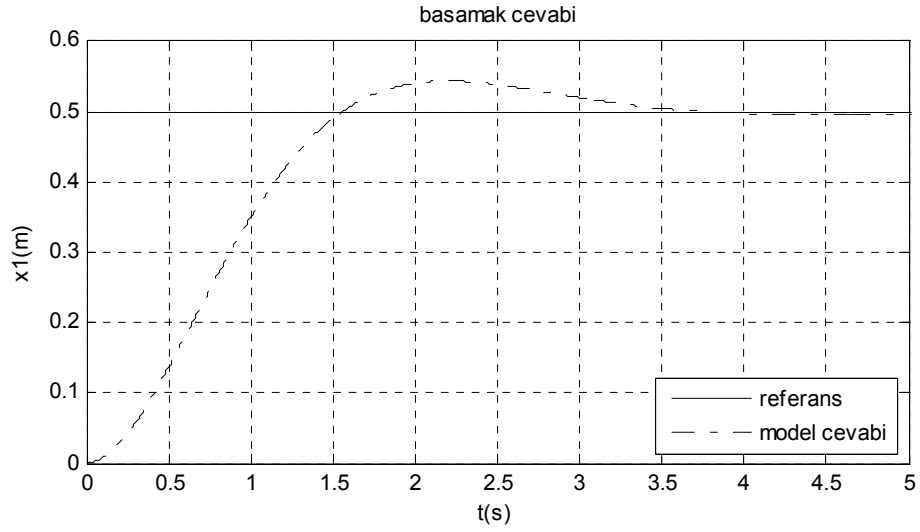
$$G(s) = \frac{K \times 9.758}{s^2 + 2.213s + K \times 9.758} \quad (4.4)$$

Gerçek sistemde Coulomb ve yapışma (stiction) sürtünme kuvvetinin etkisi yüzde aşımı bastıracağından dolayı, sistemin basitleştirilmiş modelinin basamak cevabının sönüm oranı 0.7'ye karşılık düşen %4.6 aşımlı olması istenmektedir, Ayrıca yukarıda belirtilen eksiklikler nedeni ile sistemin mekanik aksamına zarar vermemek için, basamak cevabının çok hızlı olmamasına dikkat edilecektir. Bu neden ile basamak cevabının tepe zamanının da 1s'den az olmaması istenmektedir.

Kompanze edilmemiş sistemin %4.6 aşımlı olmasını sağlayacak kazanç değeri $K = 0.3347$ olarak bulunmuştur. Bu sistemin yerleşme zamanı 3.78s tepe zamanı ise 2.783s dir. Diğer basamak cevabı karakteristikleri ise doğal frekans; $\omega_n = 1.58$, sönüm oranı; $\zeta = 0.7$, yükselme zamanı, $T_r = 1.35s$ dir. Şekil 4.1'de kompanze edilmemiş sistemin köklerinin yer eğrisi şekil 4.2'de ise basamak cevabı verilmiştir.



Şekil 4.1 : Kompanze edilmemiş sistemin köklerinin yer eğrisi.



Şekil 4.2 : Kompanze edilmemiş sistemin basamak cevabı.

Bir sonraki aşamada istenilen geçici hal davranışını sağlayacak PD kontrolör tasarlanacaktır. Tepe zamanını 1.1s'ye çekmek için PD kontrolörün K_{PD1} ve $K_{D_{PD1}}$ kazançları bulunmalıdır. Bunun için öncelikle, kompanze edilmiş baskın kutupların yeri tespit edilmelidir.

Baskın kutbun sanal ve reel kısımları denklem (4.5) ve (4.6)'daki gibi bulunmuştur.

$$\omega_d = \frac{\pi}{T_p} = \frac{3.14}{1.1} = 2.85, \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{\omega_d}{\tan 134.4^\circ} = -2.79 \quad (4.6)$$

O halde kompanze edilmiş baskın kutup denklem (4.7)'deki gibi elde edilecektir.

$$p_{1,2} = -2.79 \mp 2.85i \quad (4.7)$$

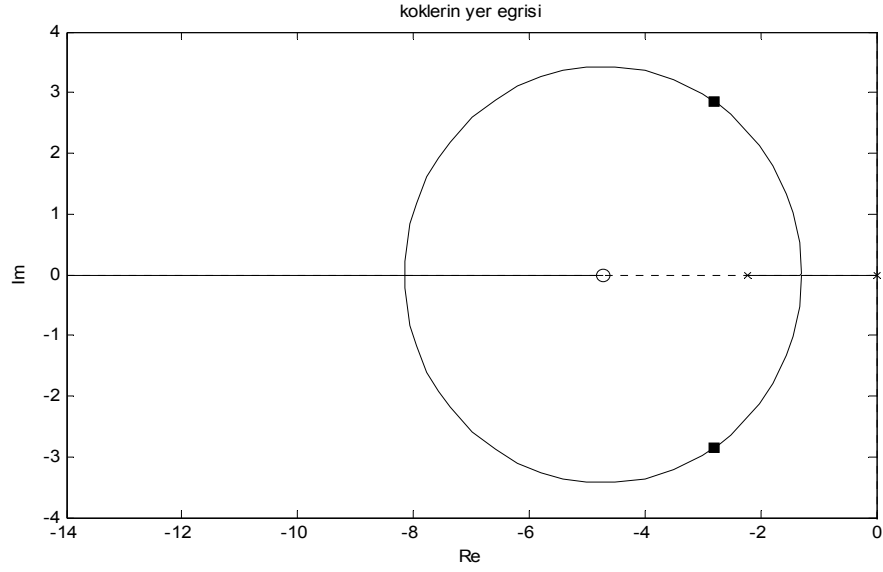
Bu aşamadan sonra kontrolörün sıfırının yeri tespit edilmelidir. Kompanze edilmemiş sistemin kutuplarından baskın kutba çizilen doğruların açılarının toplamı -235.84° dir. O halde sistemin sıfırın baskın kutupla yaptığı açı $235.84^\circ - 180^\circ = 55.84^\circ$ olmalıdır. Kontrolörün sıfırının $-z_c$ de olduğunu kabul edersek,

$$\tan 55.84 = \frac{2.85}{z_c - 8.13} \Rightarrow z_c = 4.72 \quad (4.8)$$

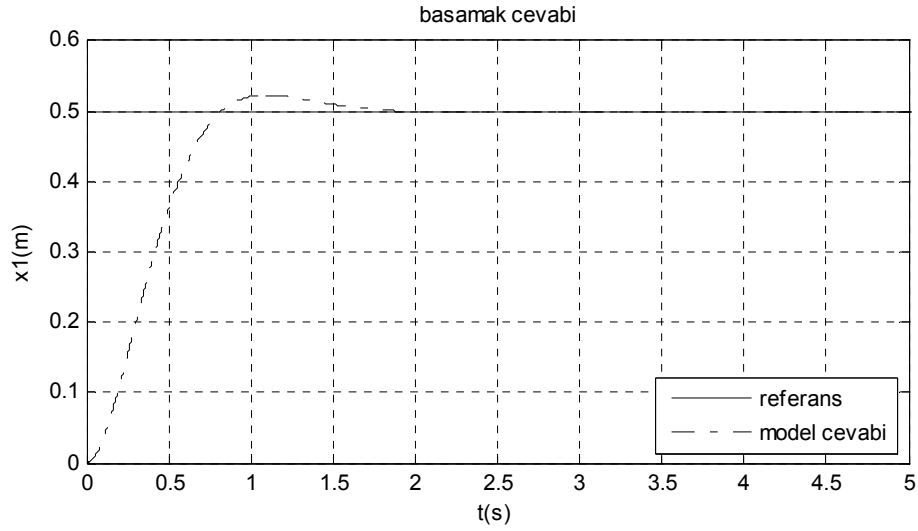
z_c denklem (4.8)'deki gibi bulunacaktır. K değeri ise Matlab/RItool yardımı ile 0.345 olarak elde edilmiştir o halde, PD kontrolörün transfer fonksiyonu, denklem (4.9)'daki gibidir.

$$G_{PD}(s) = K(z_c + s) = 0.345(4.72 + s) = 1.6276 + 0.345s \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'dan birinci eksen için PD kontrolör katsayıları $K_{P_{PD1}} = 1.6276$, $K_{D_{PD1}} = 0.345$ olarak bulunmuştur. Şekil 4.3'te PD kompanze edilmiş modelin köklerinin yer eğrisi, şekil 4.4'de ise modelin basamak cevabı verilmiştir. Şekil 4.4'te basamak cevabından da görüleceği üzere cevabın, tepe ve yerleşme zamanı azaltılmış, bu sırada aşım değerinde herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir.



Şekil 4.3 : PD kompanze edilmiş sistemin köklerinin yer eğrisi.

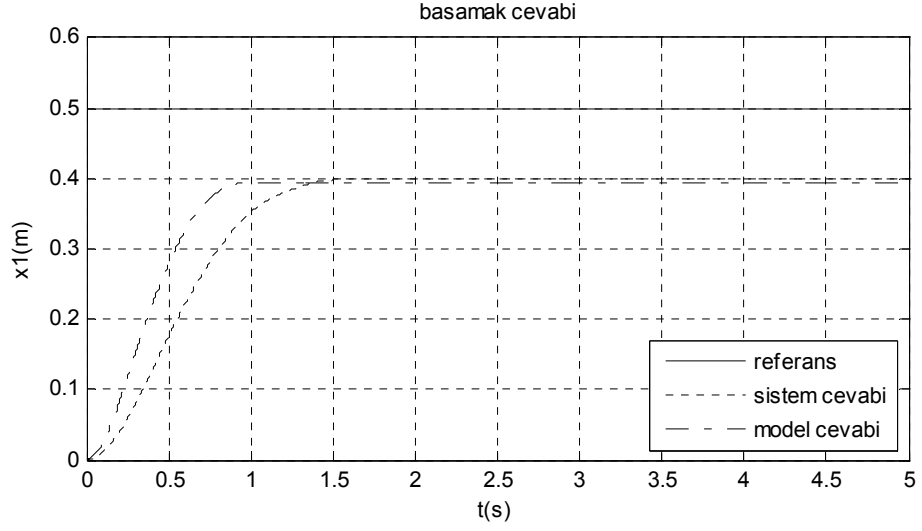


Şekil 4.4 : PD kompanze edilmiş sistemin basamak cevabı.

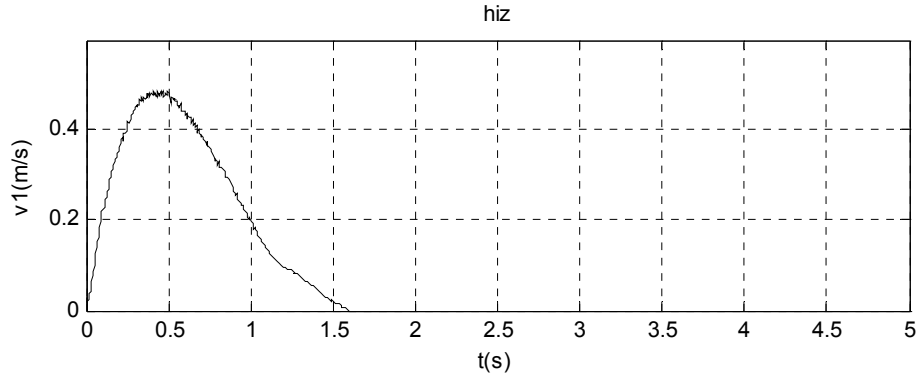
Kompanze edilmiş sistemin tepe değeri 0.526m, yüzde aşımı %4.6, doğal frekansı 3.99, sönüm oranı 0.7, yerleşme zamanı 1.5sn, yükselme zamanı 0.53s, sürekli hal hatası 0m, tepe zamanı 1.1s, dir.

İkinci eksen için de aynı yöntemler takip edilerek, PD kontrolör katsayıları, $K_{PD2} = 1.4106$, $K_{D_{PD2}} = 0.3921$ olarak hesaplanmıştır.

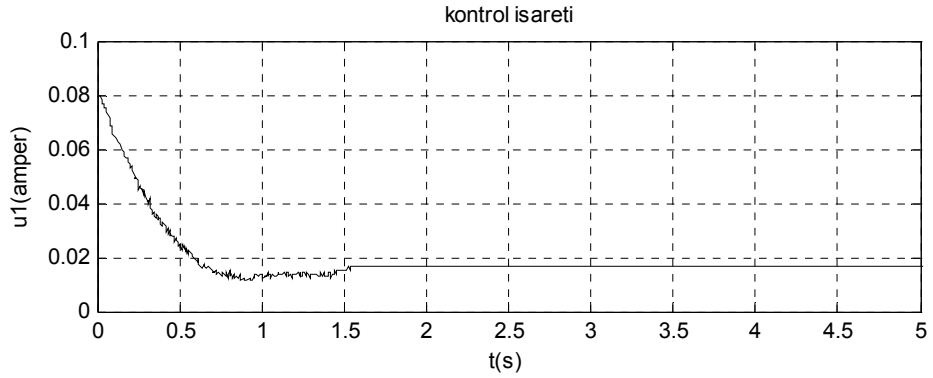
Tasarlanan PD kontrolörler gerçek sisteme uygulandığında birinci eksen için şekil 4.5,4.6 ve 4.7 de verilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.5 : 1. eksen PD kontrol; basamak cevapları.

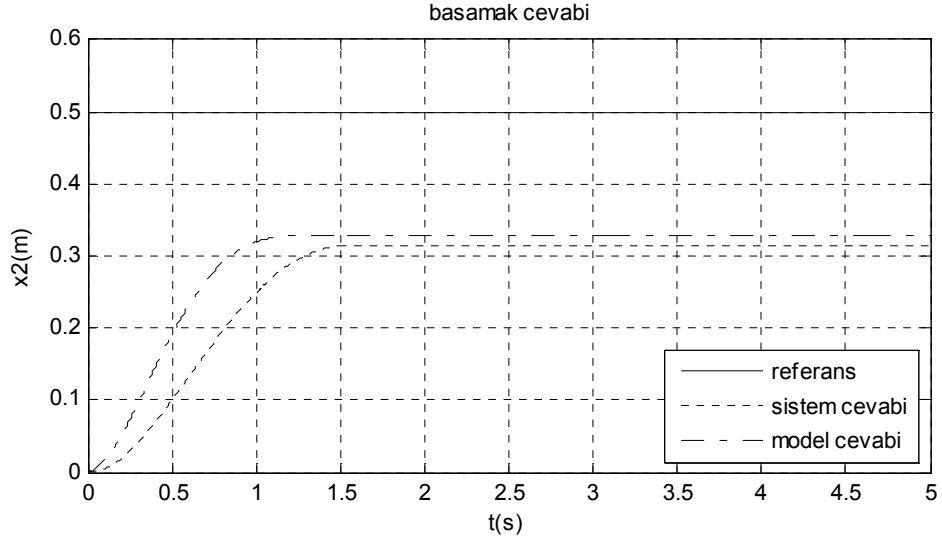


Şekil 4.6 : 1. eksen PD kontrol; gerçek sistem hızı.

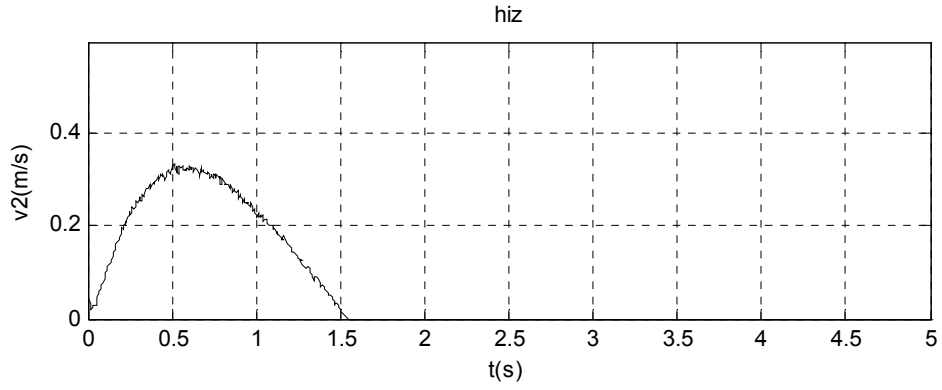


Şekil 4.7 : 1. eksen PD kontrol gerçek sistem kontrol işareti.

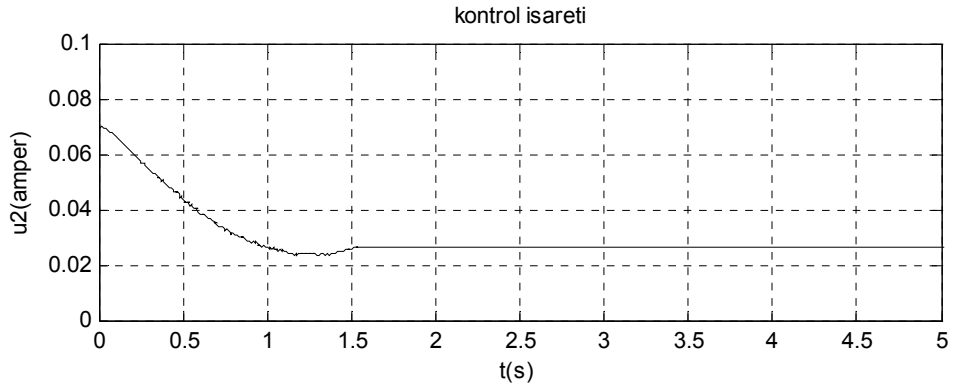
İkinci eksen için ise tasarlanan PD kontrolör gerçek sisteme uygulandığında 0.5m genlikli basamak girişe karşılık şekil 4.8,4.9 ve 4.10'da verilen sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.8 : 2. eksen PD kontrol; basamak cevapları.



Şekil 4.9 : 2. eksen PD kontrol; gerçek sistem hızı.



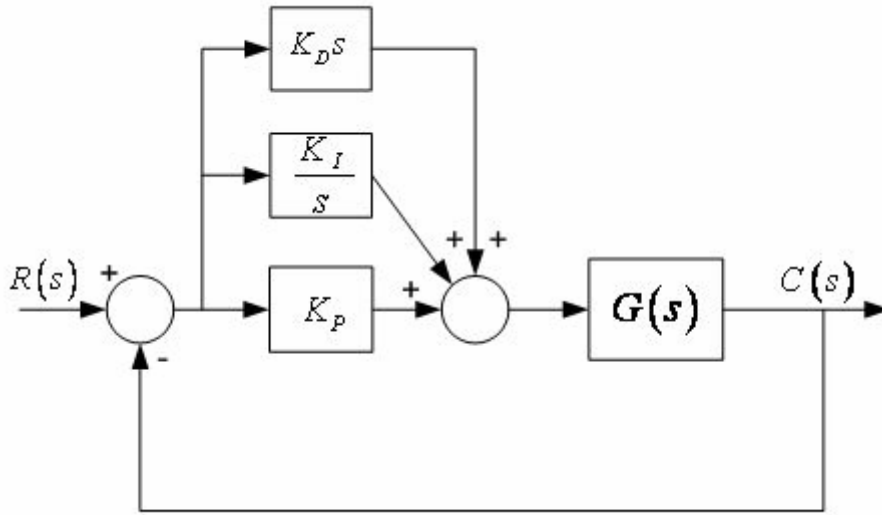
Şekil 4.10 : 2. eksen PD kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.

PD kontrolör gerçek sisteme uygulandığında, sürtünme kuvveti etkisinin aşımı bastırdığı gibi, birinci eksen için 0.1m'lik, ikinci eksen için ise 0.18m'lik sürekli hal hatasına da yol açtığı gözlemlenmiştir. Model ve gerçek sistem sürekli hal hataları birbirine yakındır, fakat birinci eksen için model basamak cevabının yerleşme zamanının 1.05s olduğu görülürken gerçek sistem basamak cevabının 1.49s olduğu

gözlemlenmiştir. Bundan sonraki bölümlerde oluşan bu sürekli hal hatası, PD kontrolöre entegral terimi eklenerek yani bir başka deyişle doğrusal PID kontrolör tasarlanarak ve PD+ kontrol ile sürtünme kompanzasyonu yapılarak ortadan kaldırılmaya çalışılacaktır.

4.3 PID Kontrolör

PID tip kontrolörler günümüzde halen çok yaygın olarak kullanılan doğrusal kontrolördür. Bir PID kontrolörün temel blok şeması şekil 4.11'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere PID kontrolör 3 tür eleman içeri; oransal, türevsel ve entegral eleman.



Şekil 4.11 : PID kontrolörün blok gösterimi.

- Oransal Elemanı:

$$u(t) = K_p e(t) \Rightarrow P(s) = K_p \quad (4.10)$$

Burada $u(t)$ kontrolör çıkışı, $e(t)$ referans işareti ile çıkış arasındaki fark, $P(s)$ ise oransal elemanın transfer fonksiyonudur. Oransal eleman, hatayı azaltır, fakat sürekli-hal hatasını tamamen yok edemez. Ayrıca sistem cevabını hızlandırarak, yüzde aşımın artmasına neden olur.

- Entegral elemanı:

$$u(t) = \frac{K}{T_I} \int_0^t e(\eta) d\eta \Rightarrow I(s) = \frac{K}{T_I} s \quad (4.11)$$

Burada T_I entegral zamanıdır, ayrıca $\frac{K}{T_I} = K_I$ dır.

Entegral elemanı kararlı-hal hatasını yok eder.

- Türev elemanı:

$$u(t) = KT_D \dot{e}(t) \Rightarrow D(s) = KT_D s \quad (4.12)$$

Burada T_D türev zamanıdır. $KT_D = K_D$ dır. Türev elemanı yüzde aşımı azaltır fakat kontrolör cevabı yavaşlar.

Bir PID kontrolörün tranfer fonksiyonu denklem (4.13)'daki gibidir.

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_P s + K_I + K_D s^2}{s} = \frac{K_D \left(s^2 + \frac{K_P}{K_D} s + \frac{K_I}{K_D} \right)}{s} \quad (4.13)$$

Denklem (4.13)'den de görüleceği üzere bir PID kontrolörün iki sıfırı bir de orijinde kutbu vardır.

4.3.1 PID kontrolör tasarımı

PID kontrolör tasarımında öncelikle, istenilen geçici hal davranışını karşılayacak PD kontrolör tasarlanacaktır. Daha sonra bu tasarımdan yola çıkarak, istenilen sürekli hal davranışını sağlayacak PI kontrolör tasarlanacaktır. Tasarlanan iki kontrolörden yola çıkarak, PID kontrolöre ait, K_P , K_I ve K_D katsayıları hesaplanacaktır [16].

PD kontrolör basitleştirilmiş modelde iyi sonuç verirken, gerçek sisteme uygulandığında, sürtünme etkisinden dolayı sürekli hal hataları meydana gelmiştir. Bu nedenle, oluşan sürekli hal hatalarını yok edecek bir PI kontrolöre ihtiyaç vardır. PI kontrolörün transfer fonksiyonu denklem (4.14)'deki gibidir.

$$G_C(s) = K_{P_{PI}} + \frac{K_{I_{PI}}}{s} \quad (4.14)$$

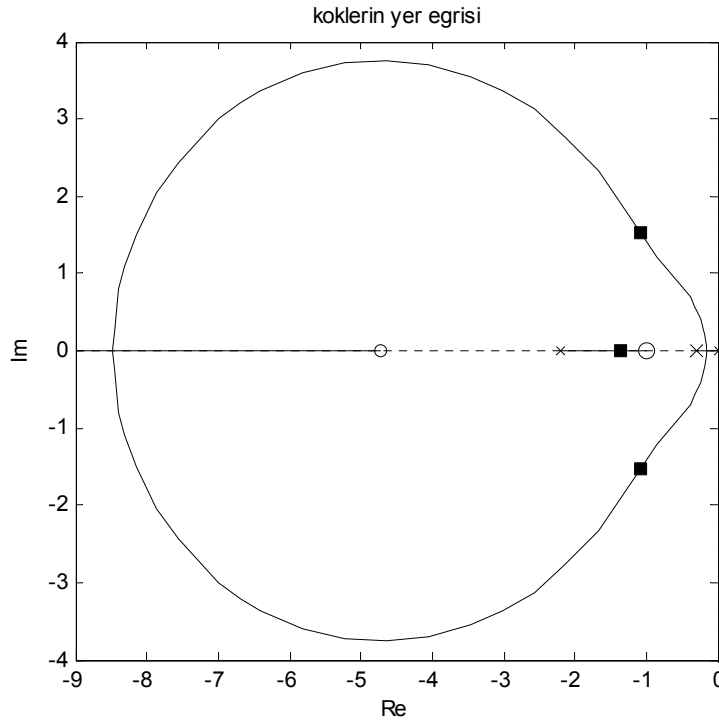
PI kontrolör ileri yol transfer fonksiyonuna $s = -K_{I_{PI}}/K_{P_{PI}}$ 'de bir sıfır ve $s = 0$ 'da bir kutup ekler, bu kutup sistem tipini bir artırarak sürekli hal hatasını bir merteye iyileştirir. PI kontrolör, sistem kararlı kaldığı sürece, sürekli hal hatasını sıfırlar.

Tasarımda bölüm 4.2.1'de hesaplanan PD kontrolör katsayıları kullanılacaktır. Bu tasarlanan PD kontrolör yardımı ile tepe zamanını azaltılmıştı fakat sistemde

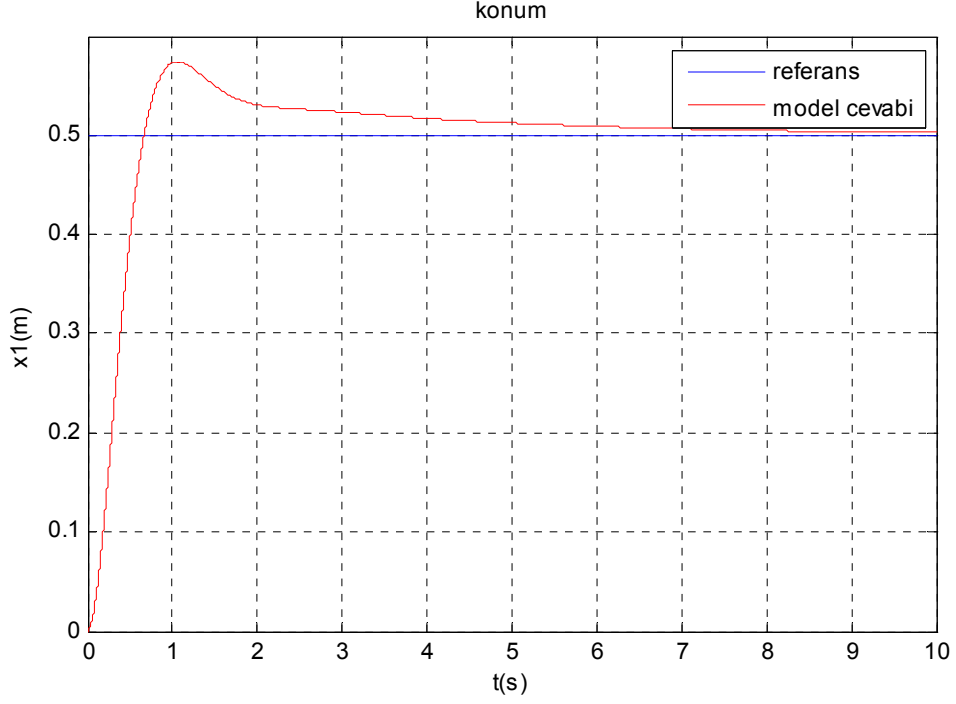
sürtünme, etkili bir bozucu olduğundan, tam sürtünme modelinin eklenmesi ile sürekli hal hataları meydana gelmiş idi. Bu sürekli hal hataları herhangi bir ideal sıfır ile ortadan kaldırılacaktır. PI kontrolörün sıfırı orijine yakın bir noktada, -0.3'te seçilir, transfer fonksiyonu denklem (4.15) ile verilmiştir.

$$G_{PI}(s) = \frac{s+0.3}{s} \quad (4.15)$$

Kazanç ise MATLAB/Rltool yardımı ile 1 olarak hesaplanmıştır. O halde birinci eksen için PI kontrolör katsayıları $K_{P_{PI1}} = 1$, $K_{I_{PI1}} = 0.3$ dir. PID kontrolör ile kompanze edilmiş modelin köklerinin yer eğrisi şekil 4.12'de basamak cevabı ise şekil 4.13'te görülmektedir.

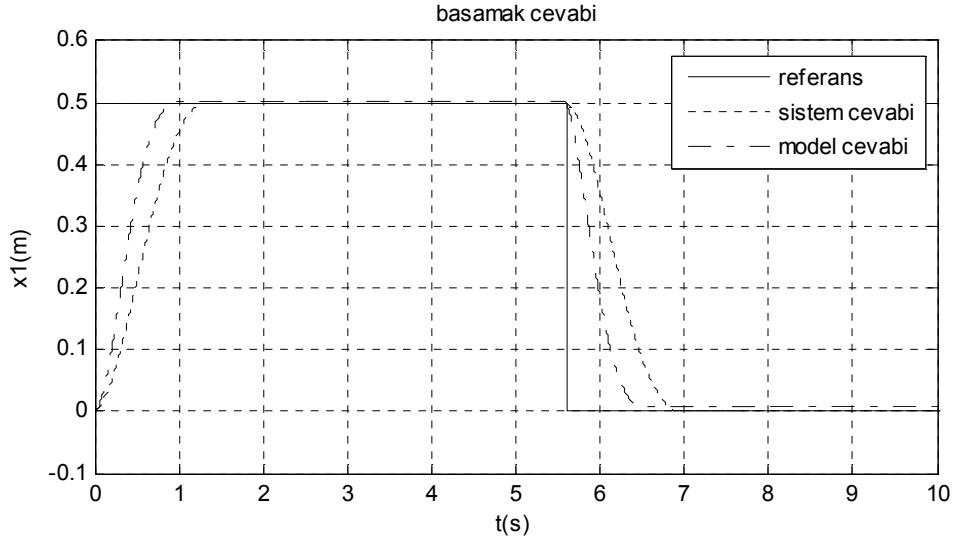


Şekil 4.12 : PID kompanze edilmiş modelin köklerinin yer eğrisi.

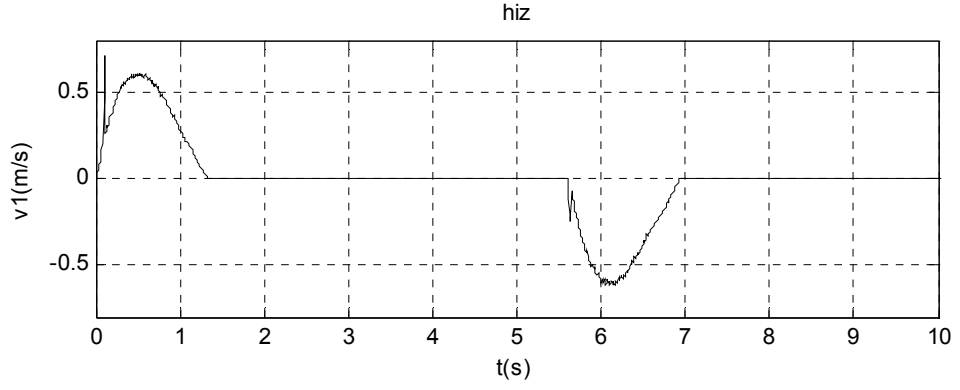


Şekil 4.13 : PID kompanze edilmiş modelin basamak cevabı.

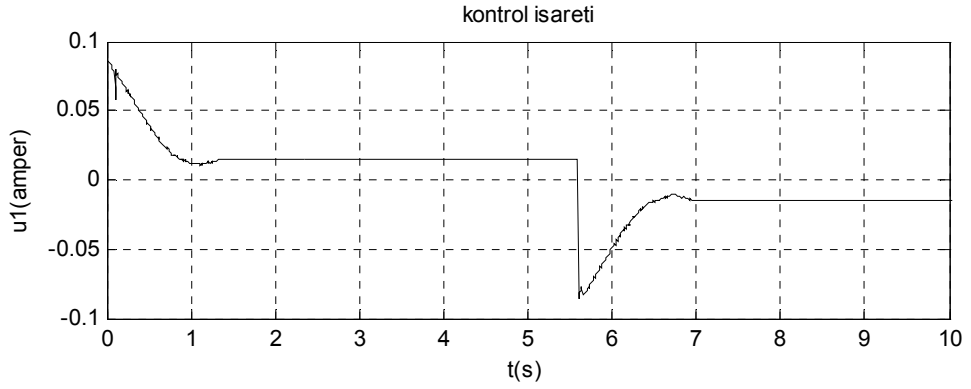
Tasarlanan PD ve PI kontrolörlerden yola çıkılarak, denklem (4.15)'ten birinci eksen için PID kontrolör katsayıları, $K_{P_{PID1}} = 1.7311$, $K_{I_{PID1}} = 0.4883$ ve $K_{D_{PID1}} = 0.345$ olarak bulunmuştur. Tasarlanan PID kontrolör modele ve gerçek sisteme uygulandığında ise birinci eksen için elde edilen sonuçlar, şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.14 : 1. eksen PID kontrol; basamak cevapları.



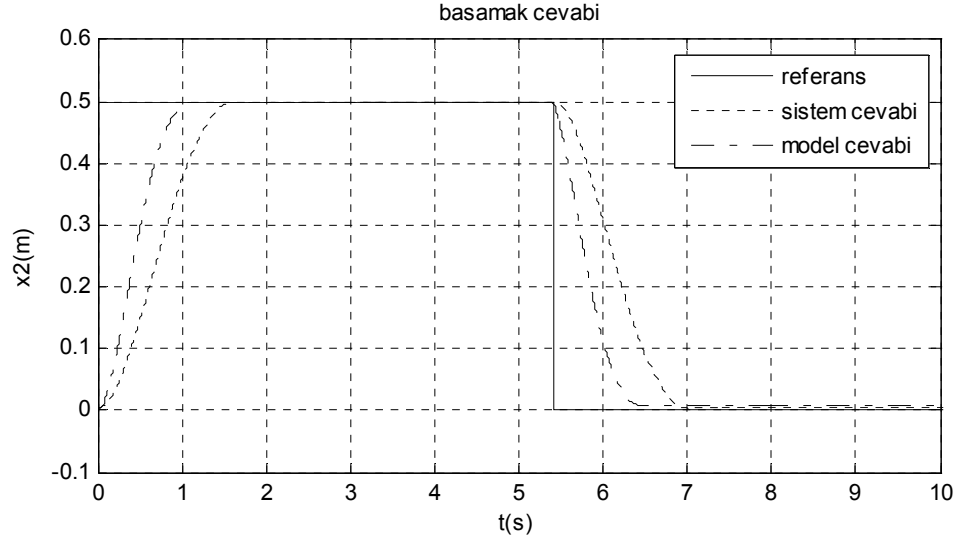
Şekil 4.15 : 1. eksen PID kontrol; gerçek sistem hızı.



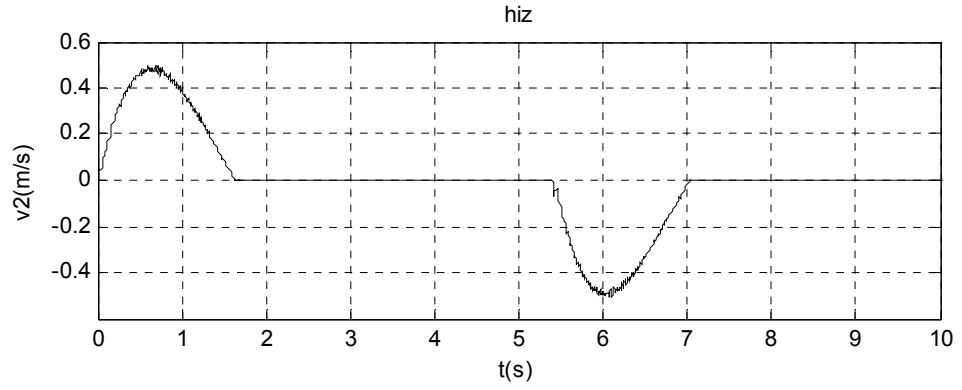
Şekil 4.16 : 1. eksen PID kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.

Birinci eksen için model basamak cevabının, tepe zamanı pozitif yönde 1.1s, negatif yönde ise 1.05s dir. Model basamak cevabının, sürekli hal hatası pozitif yönde 0m, negatif yönde ise 0.007m dir. Gerçek sistemin basamak cevabının tepe zamanının pozitif ve negatif yönde 1.32s, sürekli hal hatasının ise pozitif yönde 0.0015m, negatif yönde ise 0.00151m olduğu görülmüştür.

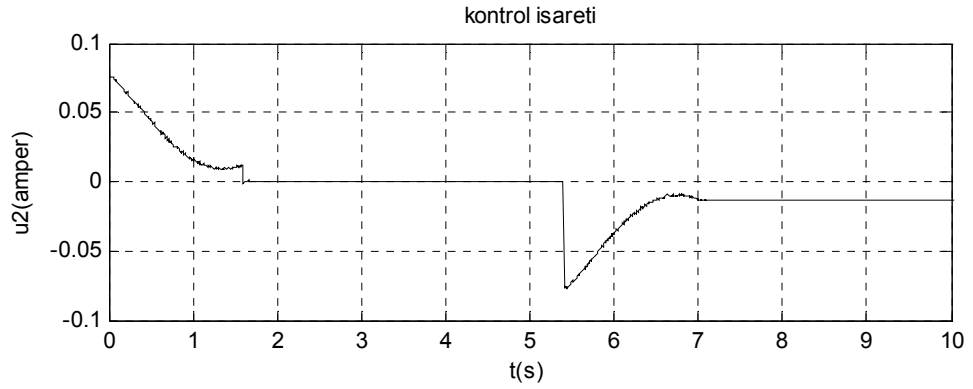
İkinci eksen için de yine benzer yöntem takip edilerek, öncelikle PI kontrolör katsayıları $K_{P_{PI2}} = 1.028$, $K_{I_{PI2}} = 0.2485$ olarak hesaplanmıştır, PI ve PD kontrolörlerden yola çıkarak PID kontrolör katsayıları ise denklem (4.15)'ten $K_{P_{PID2}} = 1.5475$, $K_{I_{PID2}} = 0.3505$ ve $K_{D_{PID2}} = 0.4031$ olarak hesaplanmış ve sisteme uygulanmıştır. Şekil 4.17'de ikinci eksen için model ve sistem basamak cevapları, şekil 4.18 ve 4.19'da ise gerçek sistem hız ve kontrol işareti verilmiştir.



Şekil 4.17 : 2. eksen PID kontrol; basamak cevapları.



Şekil 4.18 : 2. eksen PID kontrol; gerçek sistem hızı.

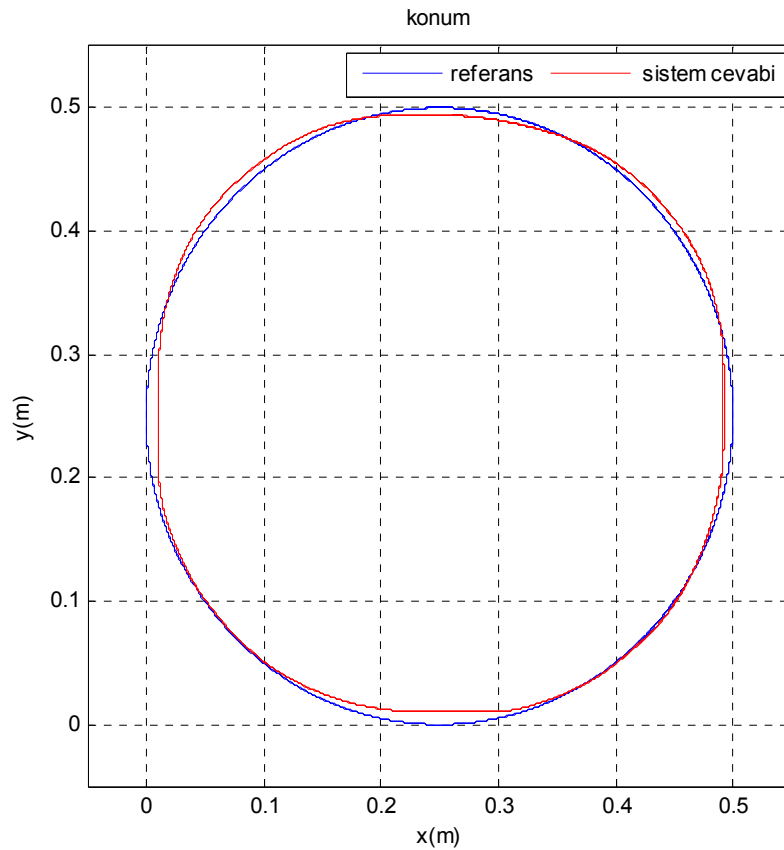


Şekil 4.19 : 2. eksen PID kontrol; gerçek sistem kontrol işareti.

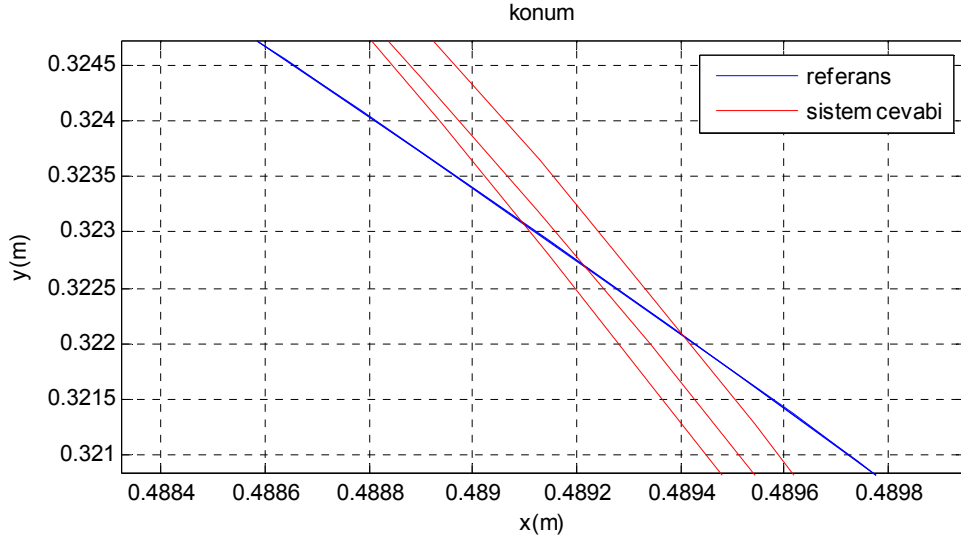
İkinci eksen için gerçek sistemin basamak cevabının tepe zamanı ileri yönde 1.61s, geri yönde 1.595s, sürekli hal hatası ileri yönde -0.00023m geri yönde ise 0.0029m dir. Model basamak cevabının tepe zamanı ileri yönde 1.12s, geri yönde 1.04s, sürekli hal hatası ileri yönde 0m, geri yönde ise 0.007m dir.

PID kontrolörün basamak girişe karşılık iyi sonuç verdiği ve sürekli hal hatalarını azalttığı gözlemlenmiştir. Bir sonraki aşamada ise PID kontrolörün sinüs işaretini takip etmesi istenecektir.

Her iki eksene de sinüs dalga referansı vererek, servo sisteme daire çizdirilmek istendiğinde ortaya çıkan sonuçlar şekil 4.20, gerçek sistem cevabının tekrarlanabilirliği ise şekil 4.21'deki gibidir. PID kontrolör sinüs işaretini iyi takip edemediğinden bulunan PID kontrolör katsayılarının artırılması gerekmektedir. Fakat katsayılar arttırıldıkça kontrol işareti de zorlanacak ve sistem kararsızlığa gidecektir. Buna göre birinci eksen için PID kontrolör katsayıları, $K_{P_{PID1}} = 8.9$, $K_{I_{PID1}} = 3.5$, $K_{D_{PID1}} = 3.1$, ikinci eksen için PID kontrolör katsayıları, $K_{P_{PID2}} = 10$, $K_{I_{PID2}} = 4.1$, $K_{D_{PID2}} = 4.6$ olarak tekrar hesaplanmıştır.

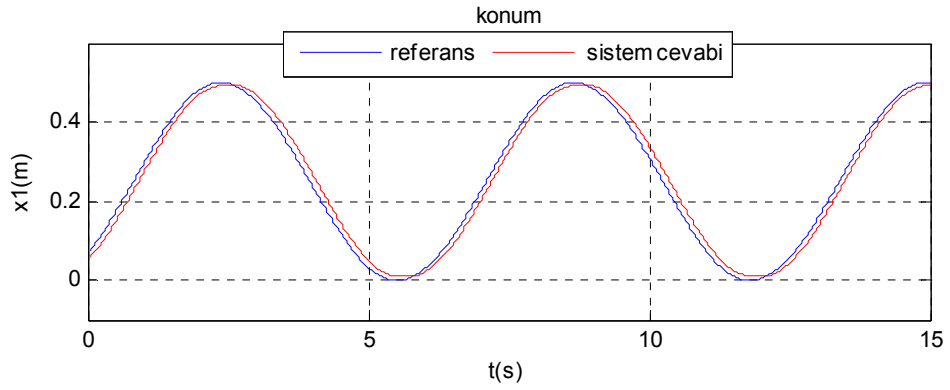


Şekil 4.20 : PID kontrolörün daire referansı takibi.

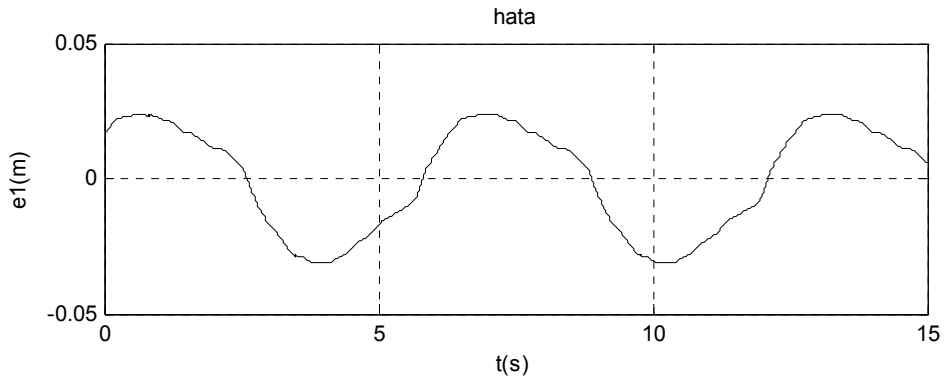


Şekil 4.21 : PID kontrol; sistem cevabının tekrarlanabilirliği.

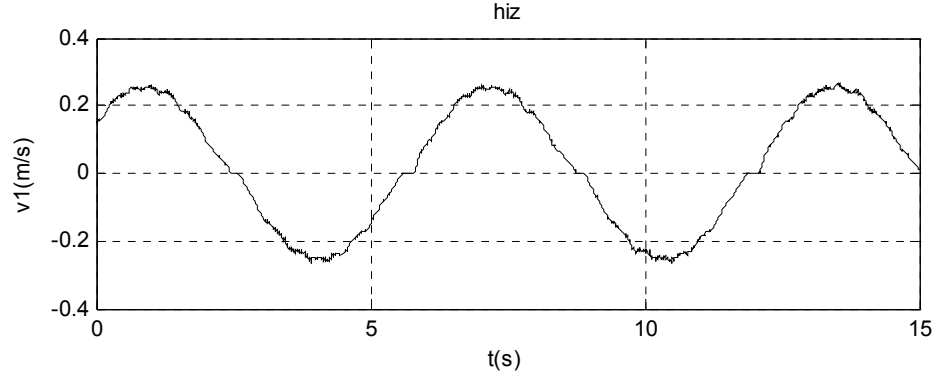
Sonuçları birinci ve ikinci eksen için ayrı ayrı inceleyecek olursak, birinci eksen için sonuçlar şekil 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25'te verilmiştir.



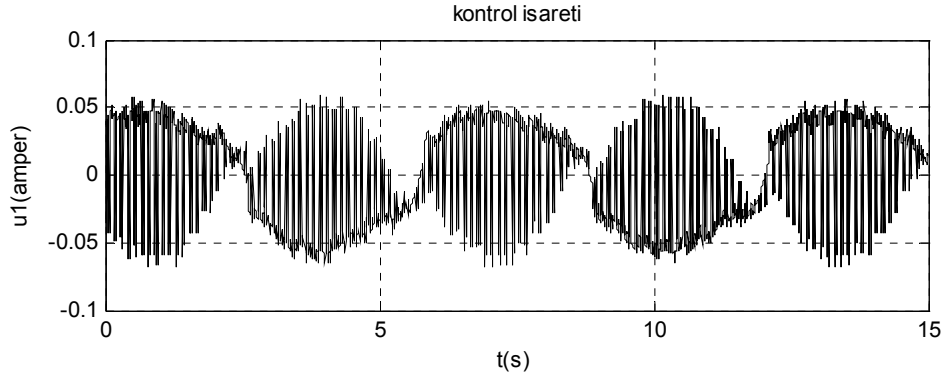
Şekil 4.22 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, gerçek sistem konumu.



Şekil 4.23 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, takip hatası.

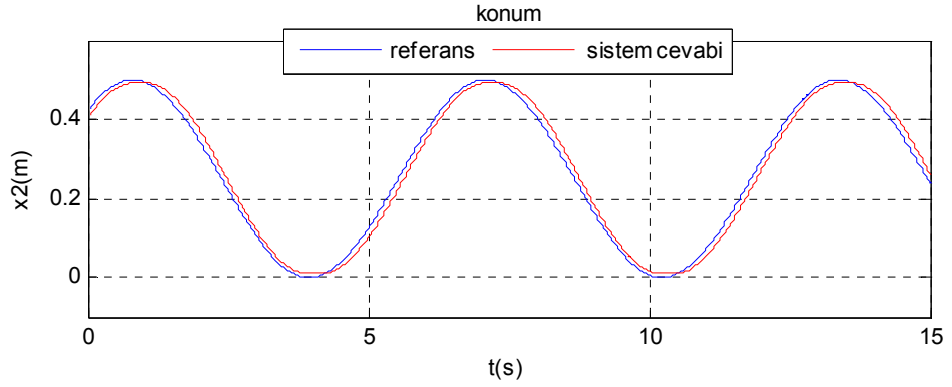


Şekil 4.24 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.

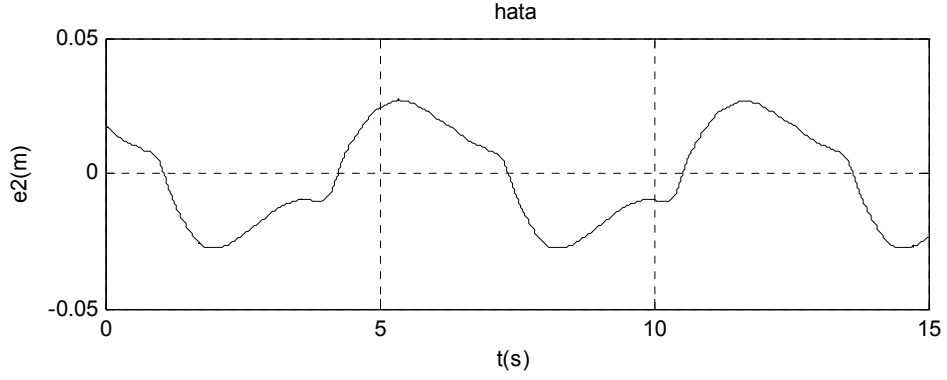


Şekil 4.25 : 1. eksen PID kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.

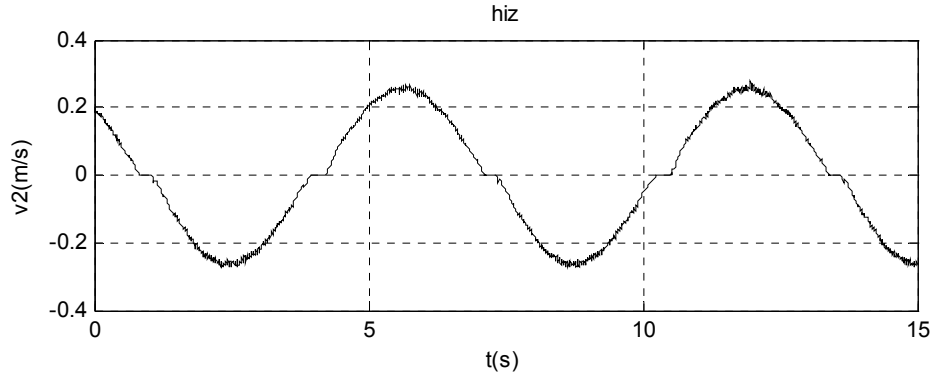
İkinci eksen için sonuçlar ise şekil 4.26, 4.27 4.28 ve 4.29 ‘da verilmiştir.



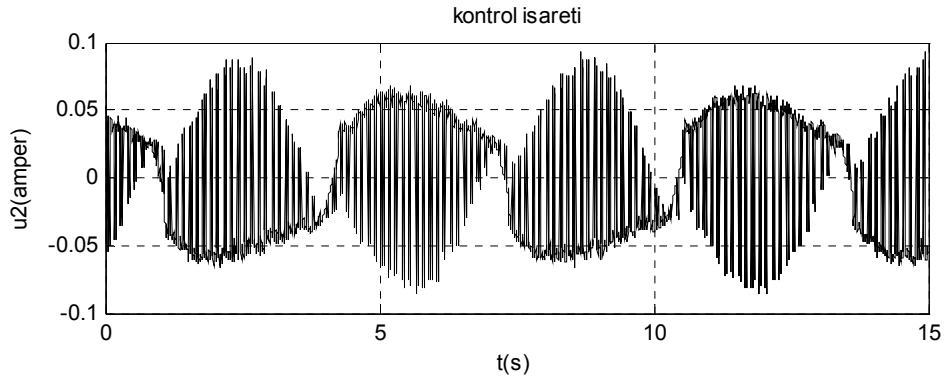
Şekil 4.26 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.



Şekil 4.27 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, takip hatası.



Şekil 4.28 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.



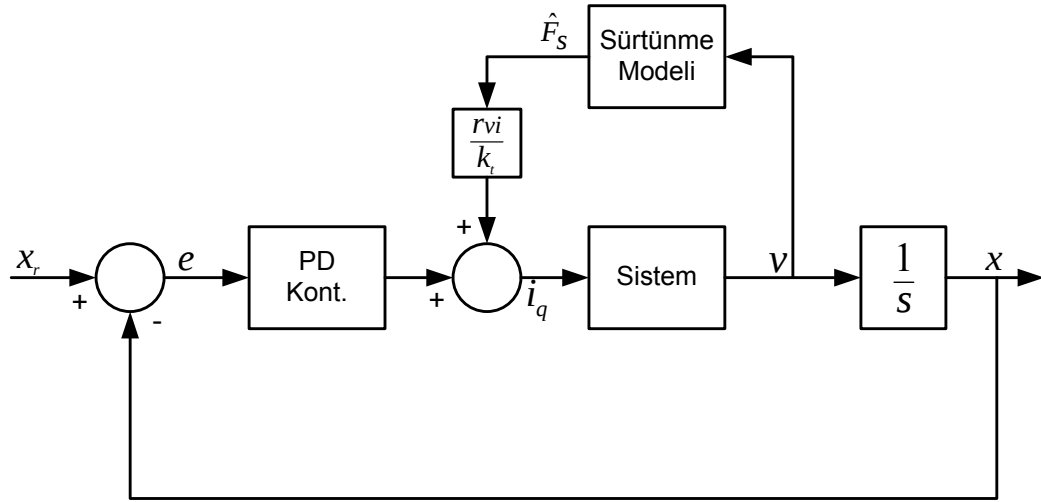
Şekil 4.29 : 2. eksen PID kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.

Yukarıda verilen şekillerden de görüleceği üzere, PID kontrolör basamak cevaba karşılık iyi cevap verse de sinüs işareti takibi yapma yeteneği yoktur. Her iki eksen için de yaklaşık 2cm'lik takip hatası meydana gelmiş ve sistem x-y düzleminde ideal daireden çok farklı bir şekil çizmiştir. Ayrıca sistem cevabının tekrarlanabilirliği de istenilen düzeyde değildir.

Doğrusal kontrolörün kayış-kasnak servo sistemde iyi sonuç vermediği görülmüştür. Bu neden ile geribesleme doğrusallaştırma yöntemi ile PD+ kontrolör servo sisteme uygulanacaktır.

4.4 PD+ Kontrolör

Sistem cevabını istenilen seviyeye çekmenin bir yolu da doğrusal olmayan sürtünmeyi kompanse etmekten geçer, böylece sistem doğrusallaştırılır ve klasik bir PD kontrolör ile kontrol edilebilir hale gelir. PD+ kontrol model-tabanlı bir kontrol yöntemidir. Şekil 4.30'da PD+ kontrolörün genel blok şeması verilmiştir.

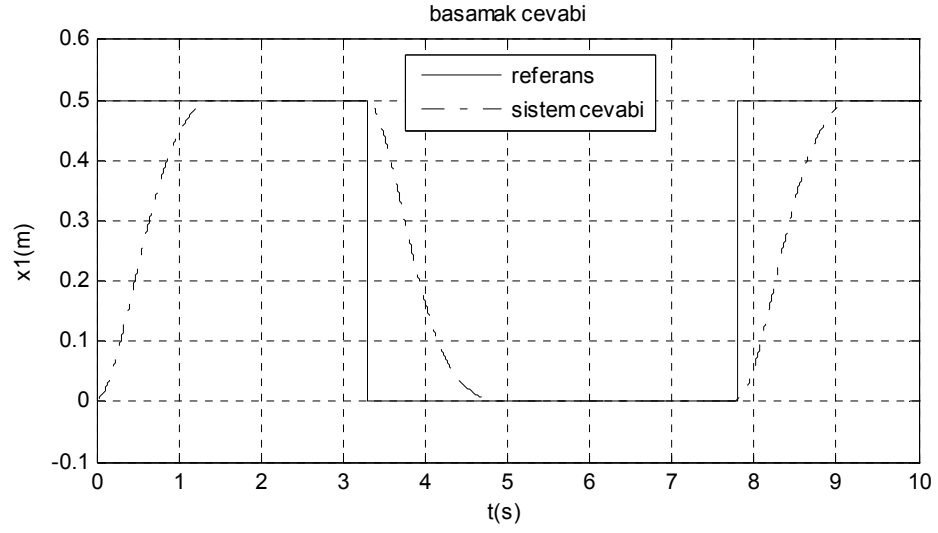


Şekil 4.30 : PD+ kontrolör blok gösterimi.

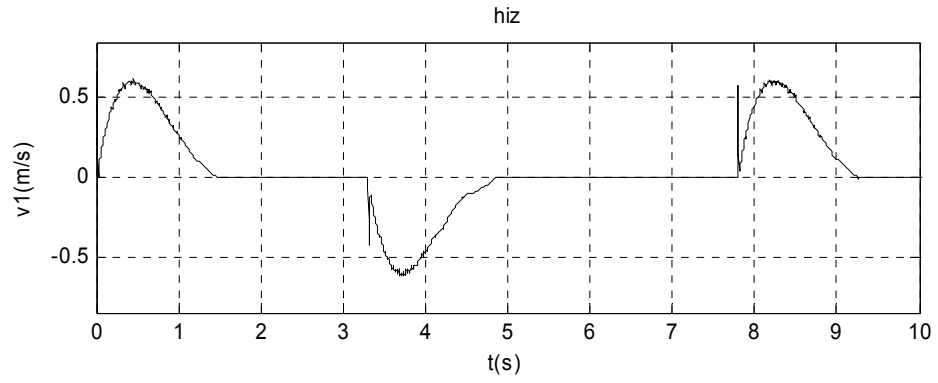
Sürtünme kompanzasyonu çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak yapılacaktır, öncelikle her iki eksen için de bölüm 3.3.1'de elde edilen LuGre modeli ve çizelge 3.1'de verilen katsayıları kullanılarak giriş işareti hız çıkış işareti sürtünme kuvveti olan bir model elde edilerek sürtünme kompanse edilecektir. Daha sonra ise yine bölüm 3.4'de bulmuş olduğumuz sürtünme eğrileri look up table kullanılarak giriş hız, çıkışı sürtünme kuvveti olan tablo haline getirilecek ve sürtünme kompanse edilecektir.

4.4.1 LuGre modeli tabanlı sürtünme kompanzasyonu (PD+L)

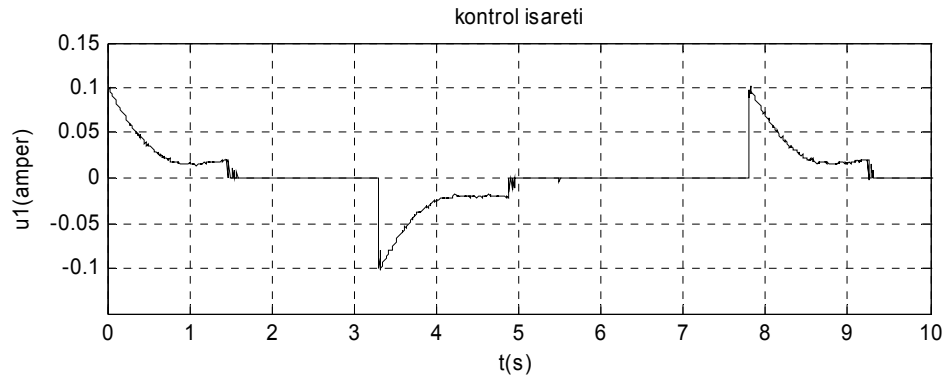
Birinci eksen için, PD+L kontrolörde sistem cevabının kritik sönümlü olması için kontrolör katsayıları $K_p = 1.6276$, $K_D = 0.59$ olarak tasarlanmış ve gerçek sisteme uygulanmıştır. Şekil 4.31'de LuGre modeli kullanılarak birinci eksen için 0.5m'lik basamak girişe karşılık elde edilen sistem cevabı verilmiştir. Şekil 4.32-4.33 ve 4.34'de ise sisteme ait hız, kontrol işareti ve kompanse edilen sürtünme kuvvetinin eğrileri verilmiştir. PD+L kontrolörün MATLAB/Simulink'te oluşturulan modeli şekil C.4'te verilmiştir.



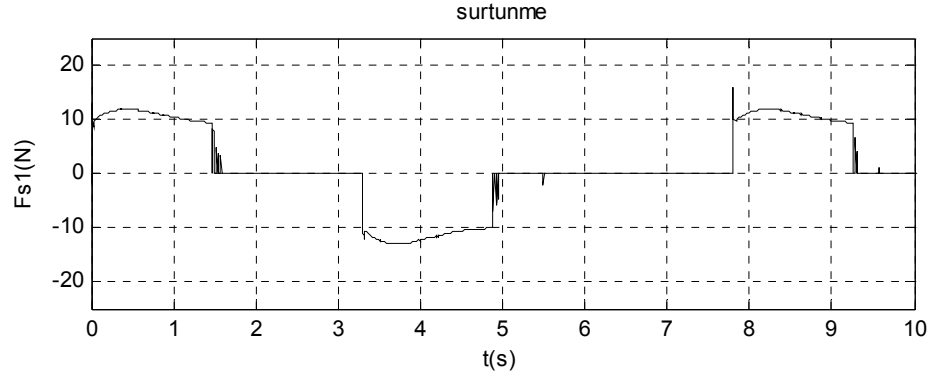
Şekil 4.31 : 1. eksen PD+L kontrol; basamak cevabı.



Şekil 4.32 : 1. eksen PD+L kontrol; sistem hızı.



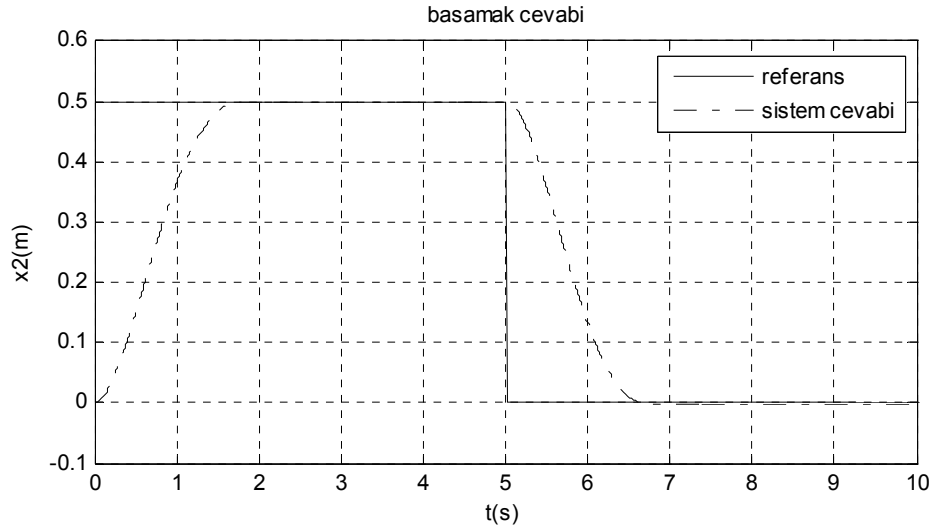
Şekil 4.33 : 1. eksen PD+L kontrol; kontrol işareti.



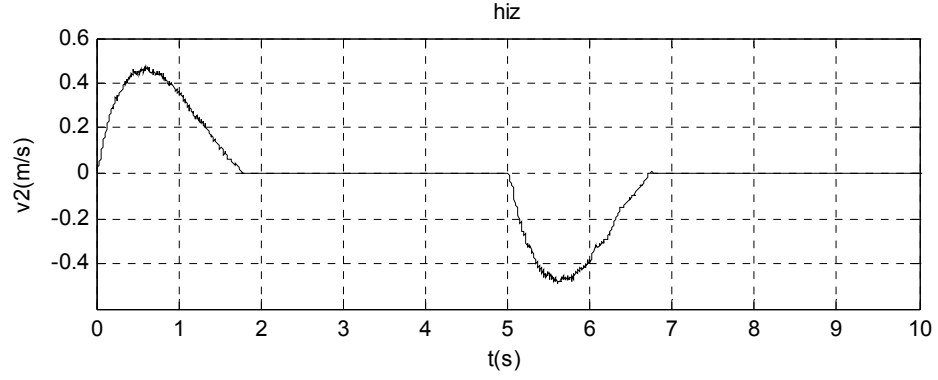
Şekil 4.34 : 1. eksen PD+L kontrol; kompanse edilen sürtünme kuvveti.

Elde edilen sonuçlara göre sistem cevabının sürekli hal hatası, ileri yönde 0.00004m geri yönde 0.00016m, tepe zamanı ileri yönde 1.45s, geri yönde 1.5s, aşım ileri ve geri yönde 0.0000005m olarak tespit edilmiştir.

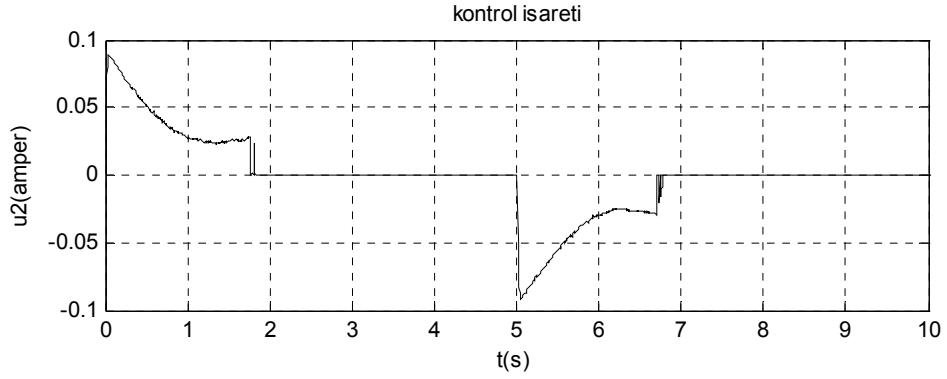
İkinci eksen için de benzer şekilde sistem cevabının kritik sönümlü olabilmesi için PD kontrolör katsayıları $K_p = 1.3021$, $K_D = 0.6149$ olarak tasarlanmıştır. Buna göre elde edilen sistem cevapları, şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38'de verilmişlerdir.



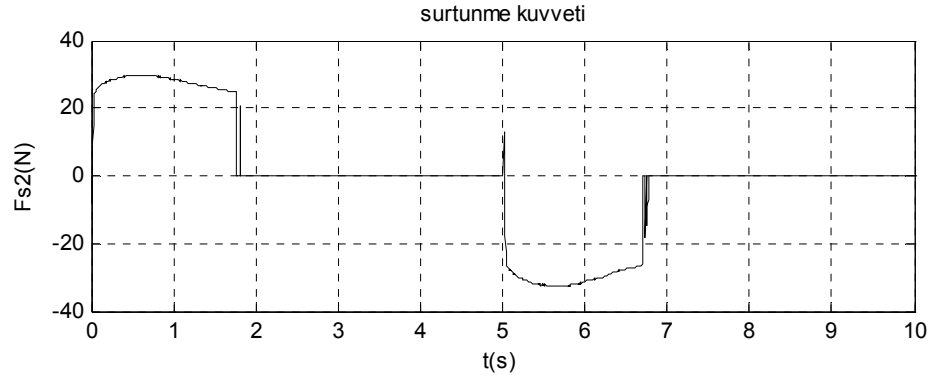
Şekil 4.35 : 2. eksen PD+L kontrol; basamak cevabı.



Şekil 4.36 : 2. eksen PD+L kontrol; sistem hızı.



Şekil 4.37 : 2. eksen PD+L kontrol; kontrol işareti

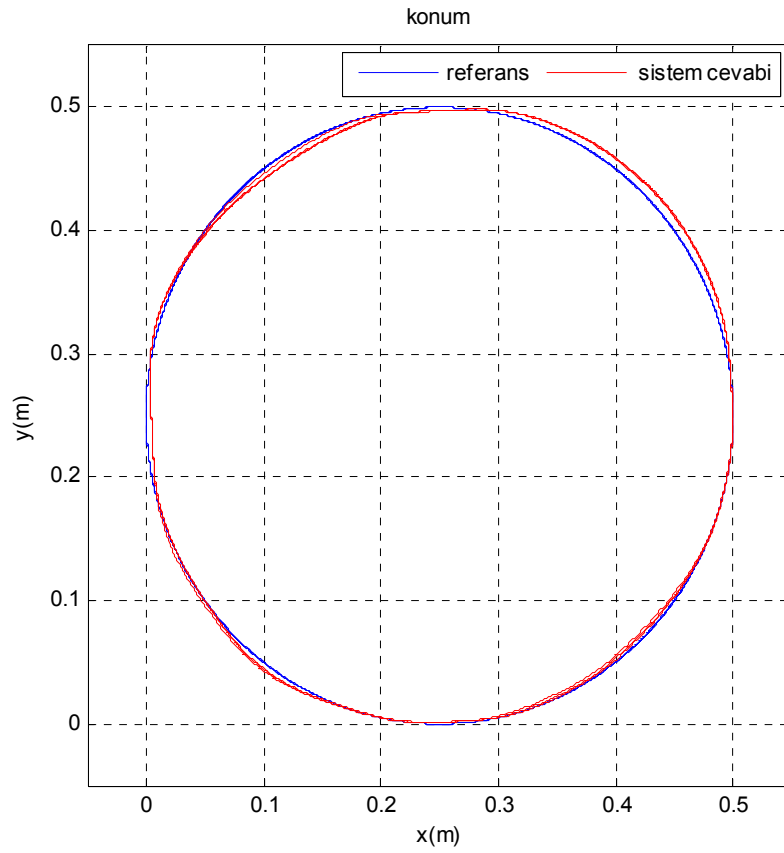


Şekil 4.38 : 2. eksen PD+L kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.

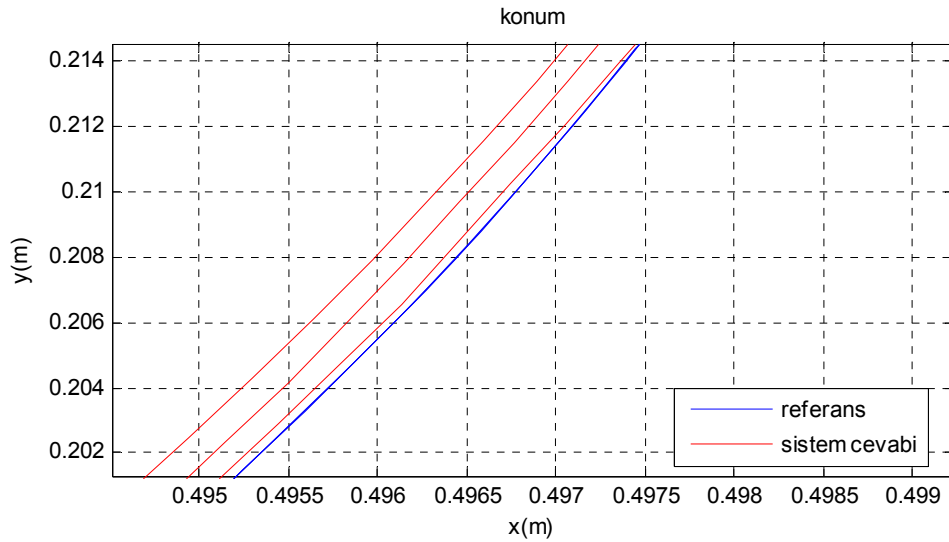
İkinci eksen için gerçek sistem basamak cevabının sürekli hal hatası ileri yönde 0.0004m, geri yönde 0.0015m, tepe zamanı ileri yönde 1.78s geri yönde 1.71s, ve ileri ve geri yönde aşım 0.00003m olarak tespit edilmiştir.

PD+L kontrolün basamak girişi için iyi sonuç verdiği tespit edildikten sonra bir sonraki aşamada PD+L kontrolörün daire şeklinde referansı takip yeteneği gözlenecektir. Her iki eksen için bölüm 4.2.1'de bulunan PD kontrolör katsayıları kullanarak, kayış-kasnak sisteminin daire şeklindeki referans işaretini takip etmesi

istendiğinde elde edilen sistem cevabı şekil 4.39'da, sistem cevabının tekrarlanabilirliği ise şekil 4.40'da verilmiştir.



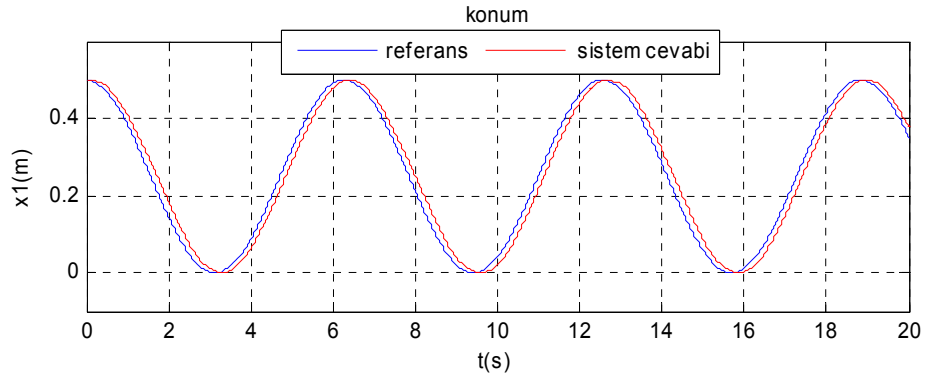
Şekil 4.39 : PD+L kontrolörün daire şeklinde referansı takibi.



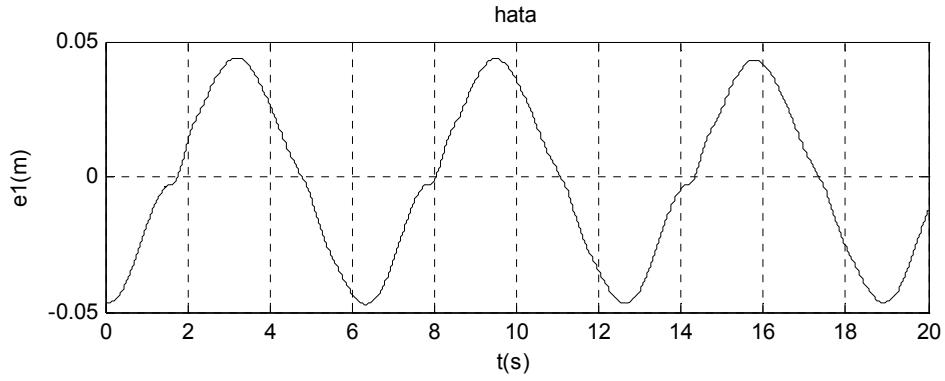
Şekil 4.40 : PD+L kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.

Dairesel hareket sırasında birinci ve ikinci eksenin davranışları da her bir eksen için ayrı ayrı incelenmiştir. Buna göre birinci eksen için yörünge takibi ve takip hatası

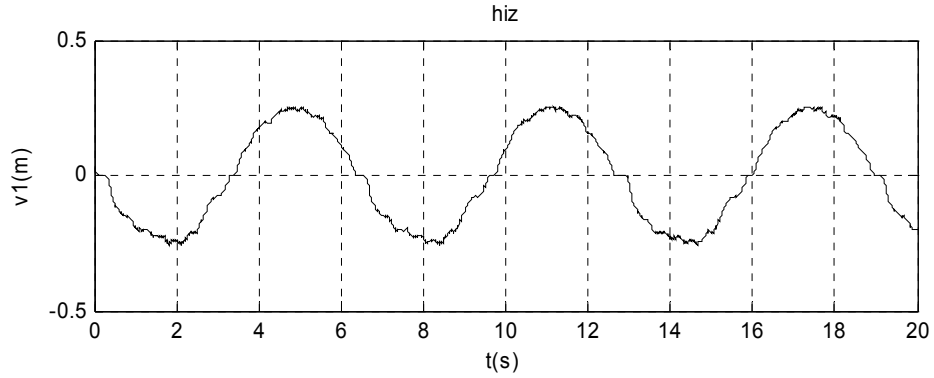
şekil 4.41 ve 4.42'de, sisteme ait hız, kontrol işareti ve kompanze edilen sürtünme kuvveti grafikleri şekil 4.43, 4.44 ve 4.45'te verilmiştir.



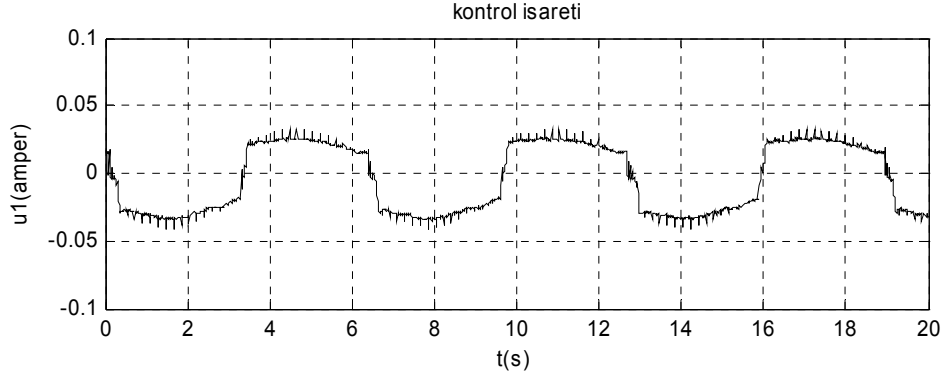
Şekil 4.41 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.



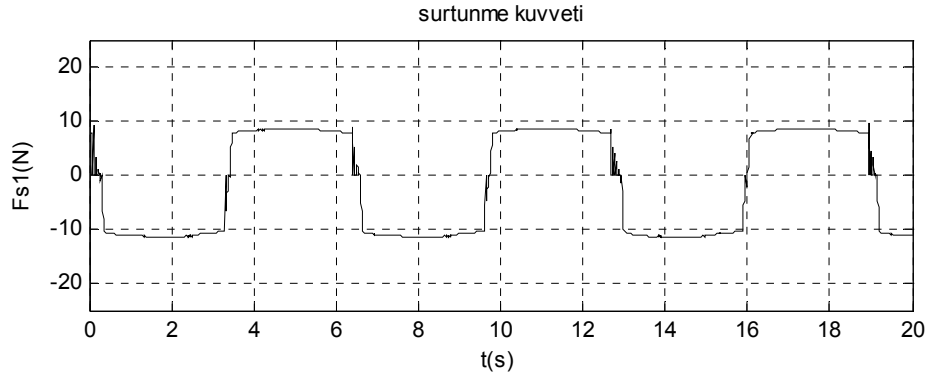
Şekil 4.42 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, takip hatası.



Şekil 4.43 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.

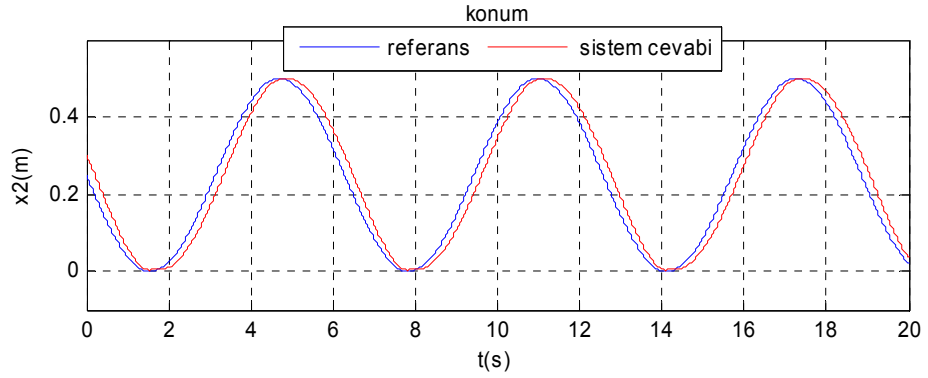


Şekil 4.44 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.

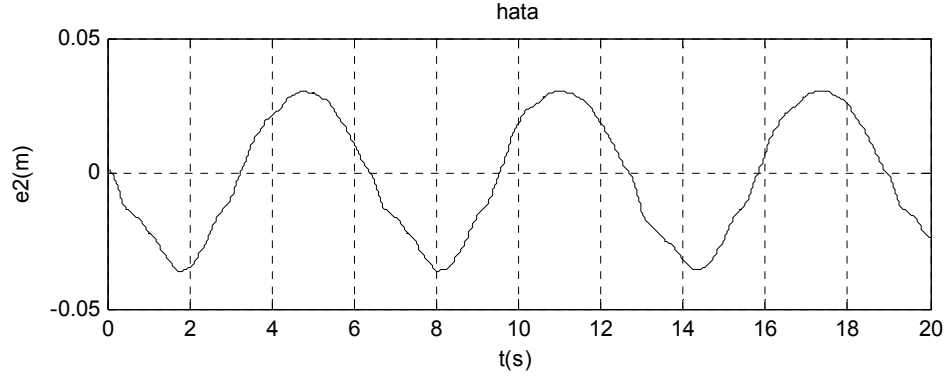


Şekil 4.45 : 1. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.

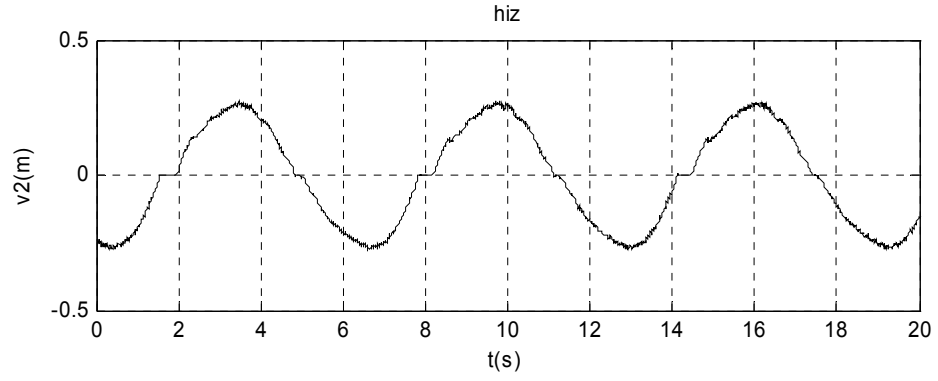
Buna göre ikinci eksen için yörünge takibi ve takip hatası şekil 4.46 ve 4.47'de, sisteme ait hız, kontrol işareti ve kompanze edilen sürtünme kuvveti grafikleri şekil 4.48, 4.49 ve 4.50'de verilmiştir.



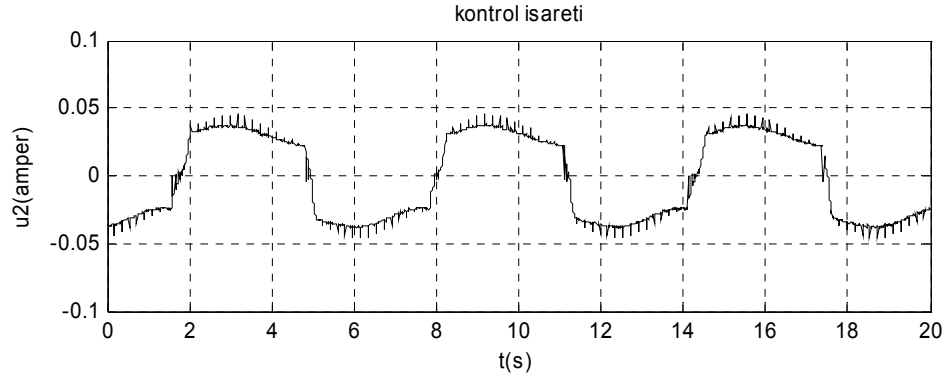
Şekil 4.46 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.



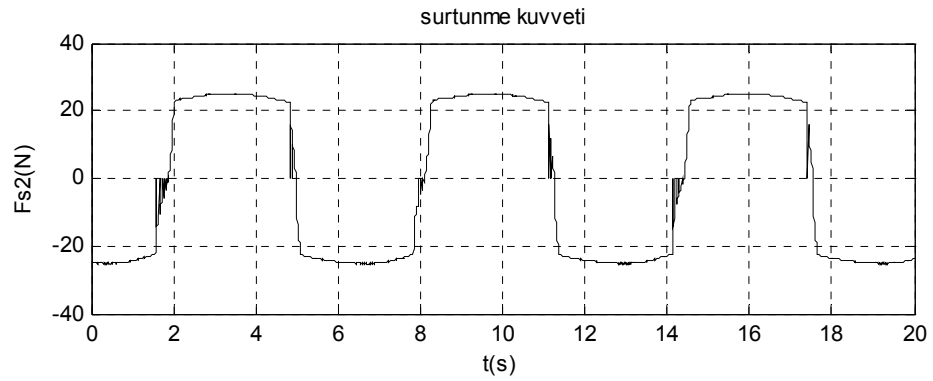
Şekil 4.47 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, takip hatası.



Şekil 4.48 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.



Şekil 4.49 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.



Şekil 4.50 : 2. eksen PD+L kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.

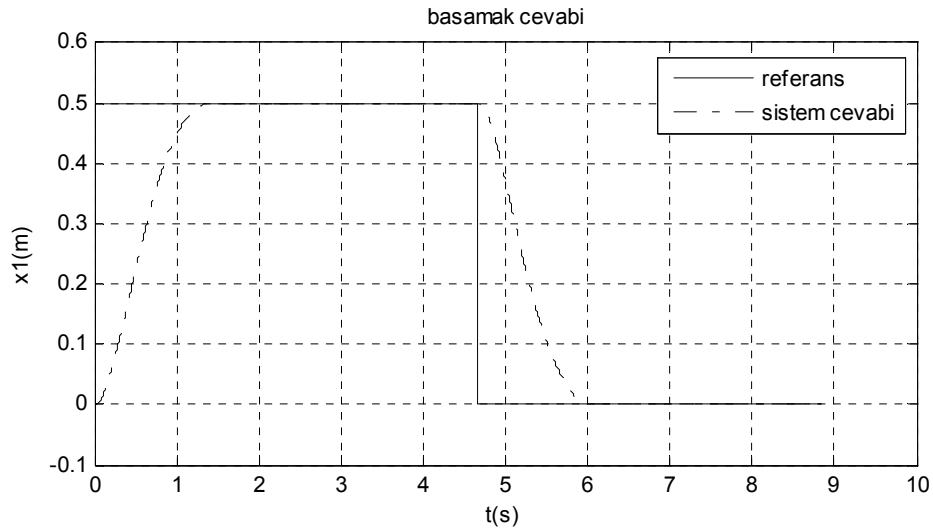
Elde edilen sonuçlara göre PD+L kontrolörün doğrusal PID kontrolöre göre sinüs işaretini daha iyi takip ettiği gözlemlenmiştir. Fakat kontrolörün x-y ekseninde çizmiş olduğu daire yine ideale yakın değildir. Ayrıca sistem cevabının tekrarlanabilirliği de istenen düzeyde değildir.

PD+L kontrolörlerin beklendiği kadar iyi sonuç vermediği gözlemlenmiştir. Bu sorunun temel nedeni şekil 3.10 ve 3.11' de görüldüğü gibi gerçek sistemde, artan hızla sürtünme kuvveti arasında belirli bir oran olmamasındandır. Ayrıca sürtünme kuvveti sıcaklığa, yüzeyin durumuna ve mekanik sistemin güvenilirliğine göre değişmektedir, bu da sürtünmenin LuGre eğrisinden sapmasına yol açmaktadır.

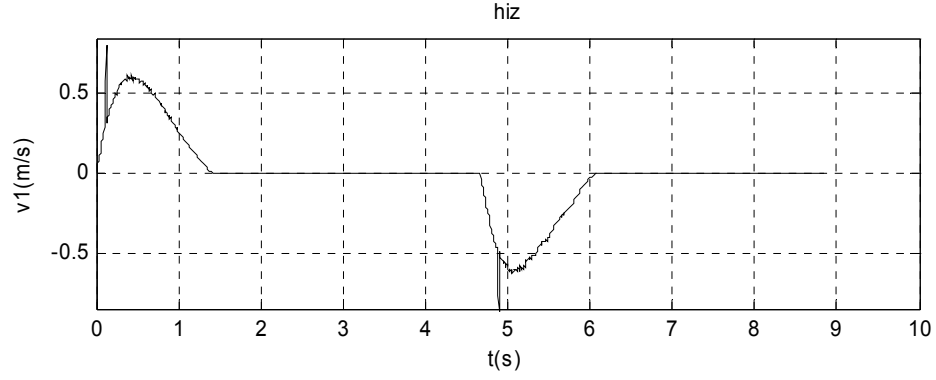
4.4.2 Tablo tabanlı sürtünme kompazyonu (PD+T)

PD+T kontrolör de bölüm 3.4'te elde edilen sürtünme kuvveti/hız dataları tablo şeklinde girilerek, tablonun o andaki hıza karşılık, sürtünme kuvvetinin değerini üretmesi sağlanmıştır.

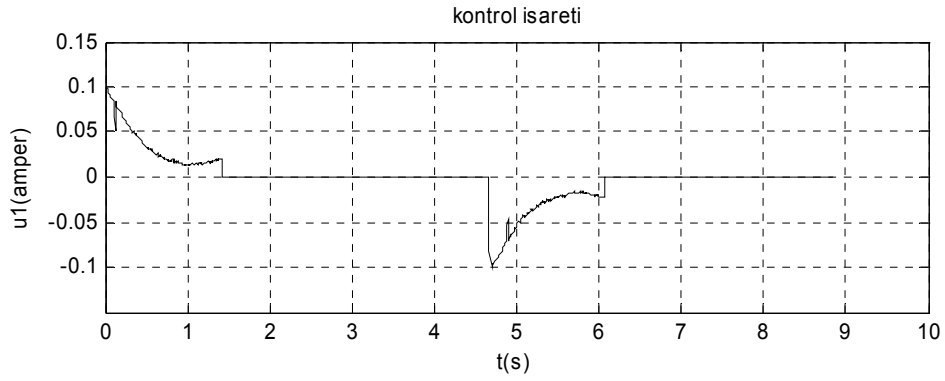
Birinci eksen için, sürtünme kuvvetinin tablo yardımı ile saptanması ile elde edilen gerçek sisteme ait basamak cevabı şekil 4.51'de verilmiştir. Gerçek sisteme ait, hız, kontrol işareti ve kompanze edilen sürtünme kuvveti, şekil 4.52, 4.53 ve 4.54'te verilmiştir. MATLAB/Simulink'te oluşturulan model ise Ek C, şekil C.4-C5'te verilmiştir.



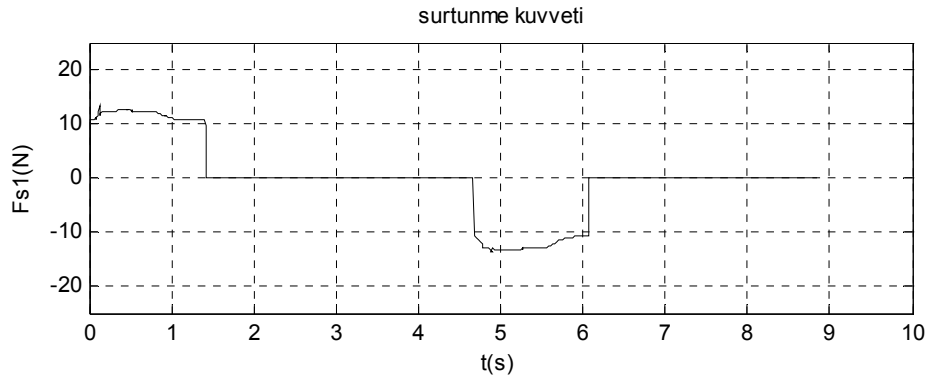
Şekil 4.51 : 1. eksen PD+T kontrol; basamak cevabı.



Şekil 4.52 : 1. eksen PD+T kontrol; sistem hızı.



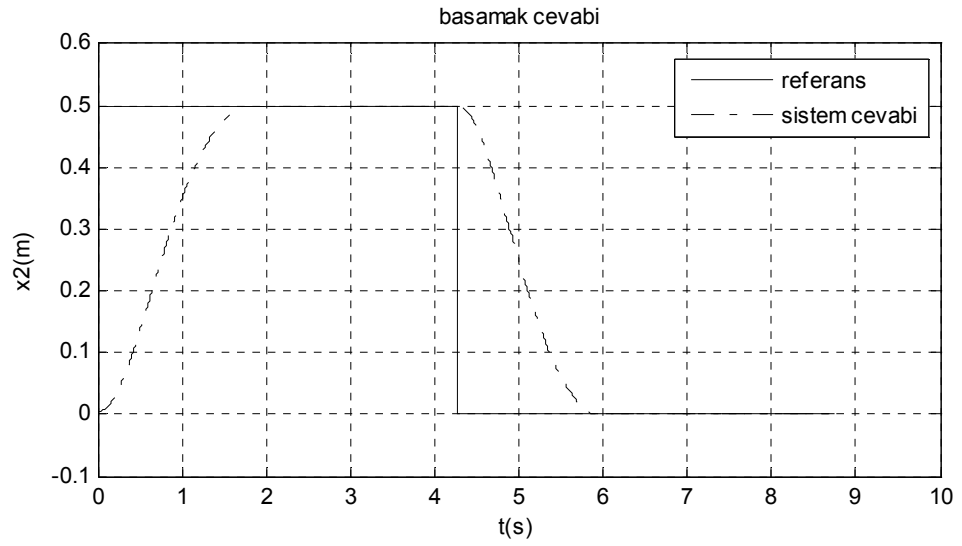
Şekil 4.53 : 1. eksen PD+T kontrol; kontrol işareti.



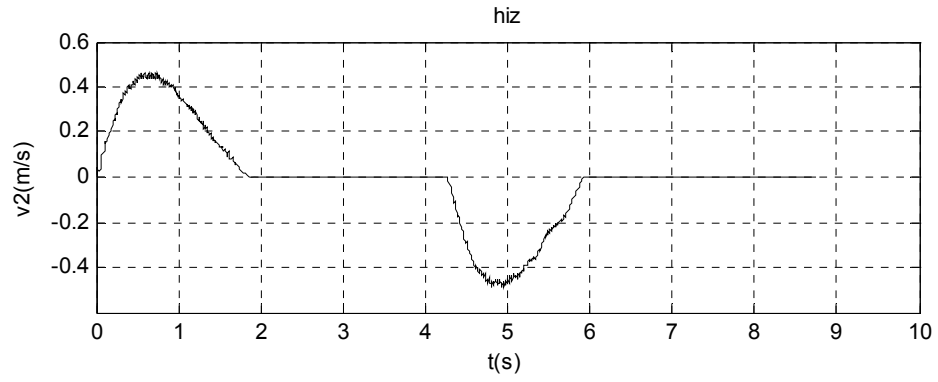
Şekil 4.54 : 1. eksen PD+T kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.

Buna göre birinci eksen için gerçek sistemin basamak cevabının sürekli hal hatası ileri yönde 0.00012m, geri yönde 0.00032mdir. Cevabın tepe zamanı ileri yönde 1.42s geri yönde 1.40s, aşım ise ileri ve geri yönde 0.000014m dir.

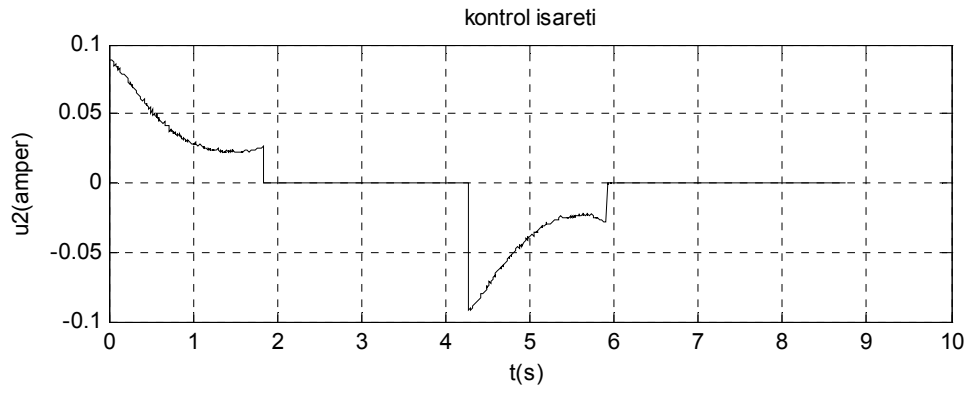
İkinci eksen için ise 50cm genlikli basamak girişe karşılık sistem cevabı, hızı ve kontrol işareti şekil 4.55, 4.56 ve 4.57'deki gibi elde edilmiştir. Şekil 4.58 de ise kompanze edilen yani eksene etki eden sürtünme kuvvetinin grafiği verilmiştir.



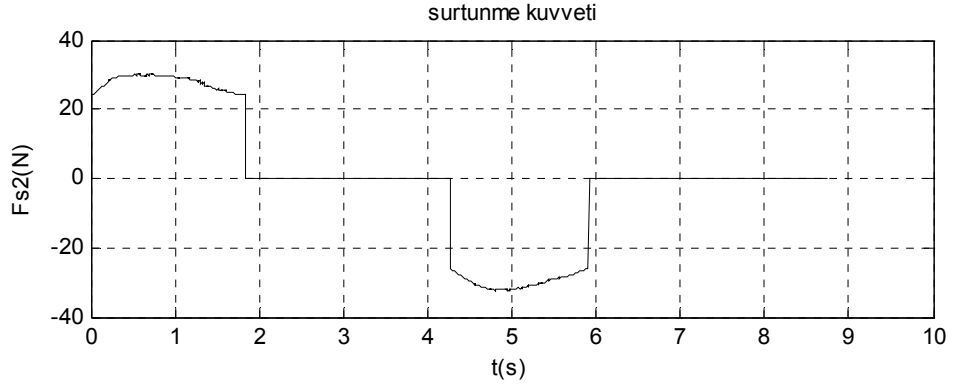
Şekil 4.55 : 2. eksen PD+T kontrol; basamak cevabı.



Şekil 4.56 : 2. eksen PD+T kontrol; sistem hızı.



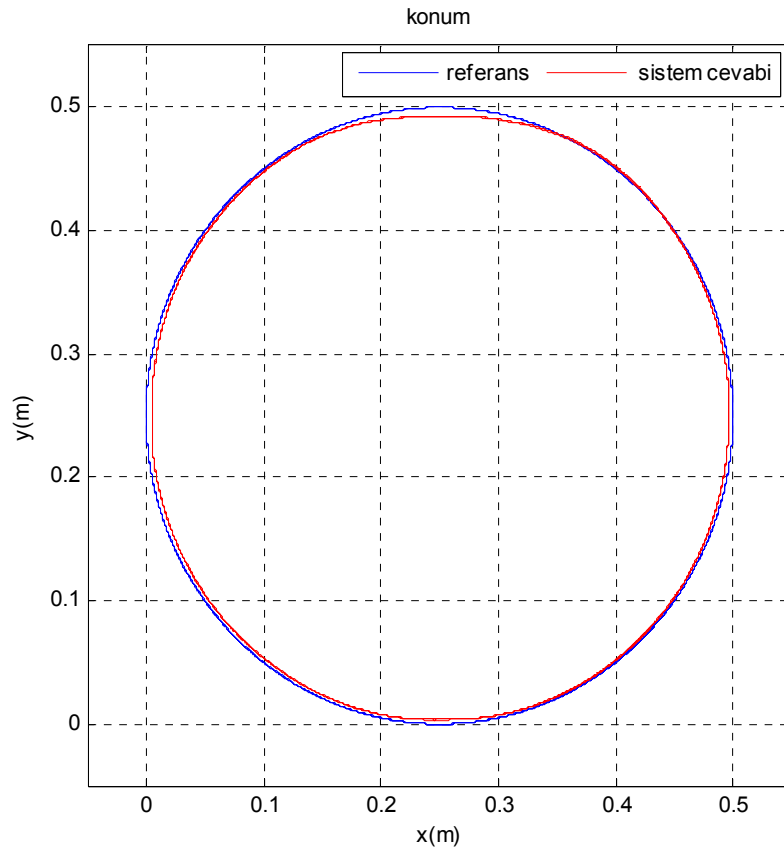
Şekil 4.57 : 2. eksen PD+T kontrol; kontrol işareti.



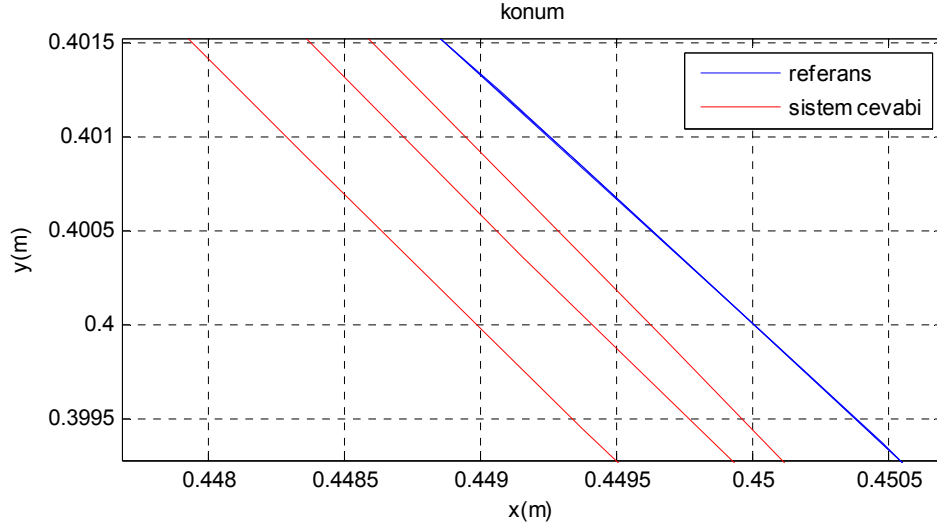
Şekil 4.58 : 2. eksen PD+T kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti.

İkinci eksen için sistem basamak cevabının sürekli hal hatası ileri yönde 0.0003m geri yönde 0.0012m, tepe zamanı ileri yönde 1.78s geri yönde 1.65s, aşım ileri 0.00005m ve geri yönde 0.0001m dir.

Daha sonra her iki eksene de referans işaret olarak sinüs dalgası uygulanarak bu iki eksenin x-y düzleminde bir daire çizmesi istenecektir. Sürtünmenin tablo yardımı ile kompanze edilmesi durumunda sistemin çizdiği daire şekil 4.59’da verilmiştir.

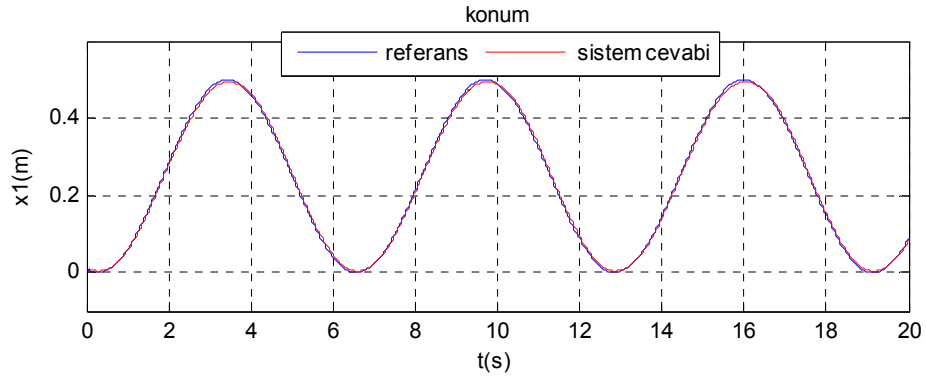


Şekil 4.59 : PD+T kontrolörün, daire şeklinde referansı takibi.

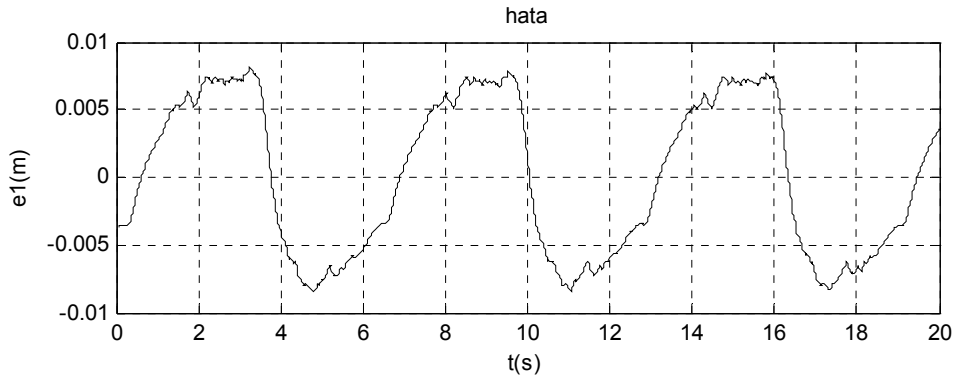


Şekil 4.60 : PD+T kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.

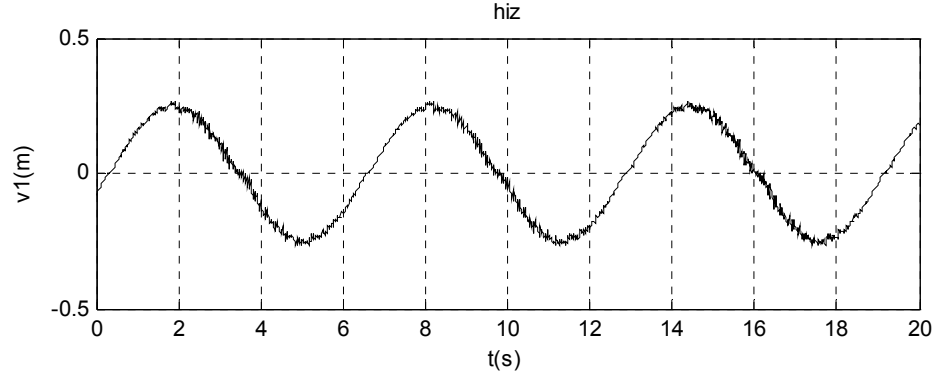
Şekil 4.60' da ise PD+T kontrol kullanıldığında sistem cevabının tekrarlanabilirliği verilmiştir. Daha sonra eksenlerin sinüs referansını takipleri ayrı ayrı incelenmiştir. Birinci eksene ait sistem cevabı ve işaret izleme hatası şekil 4.61 ve 4.62'de verilmiştir. Sistem cevabına ait hız, kontrol işareti ve kompanse edilen sürtünme kuvveti grafikleri şekil 4.63, 4.64 ve 4.65'te gösterilmiştir.



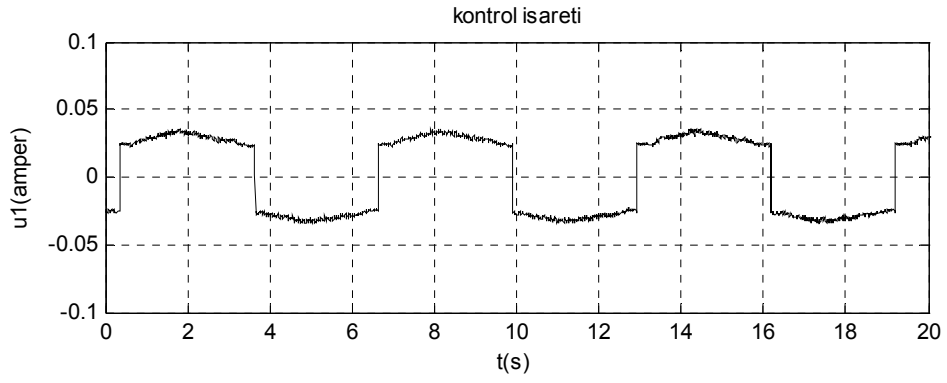
Şekil 4.61 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.



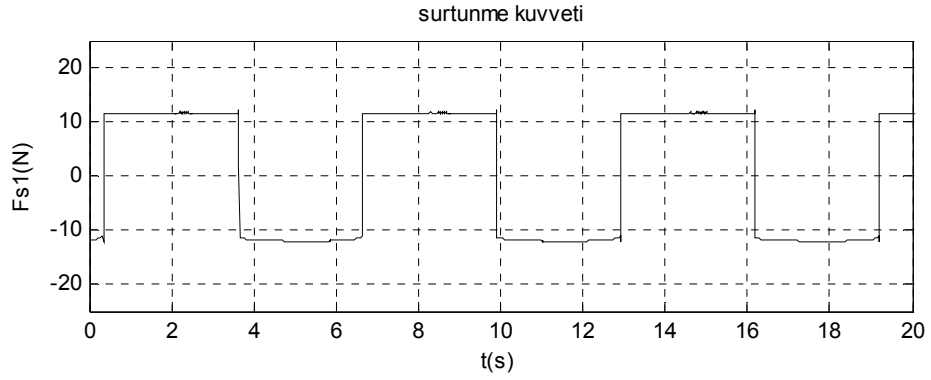
Şekil 4.62 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, takip hatası.



Şekil 4.63 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.

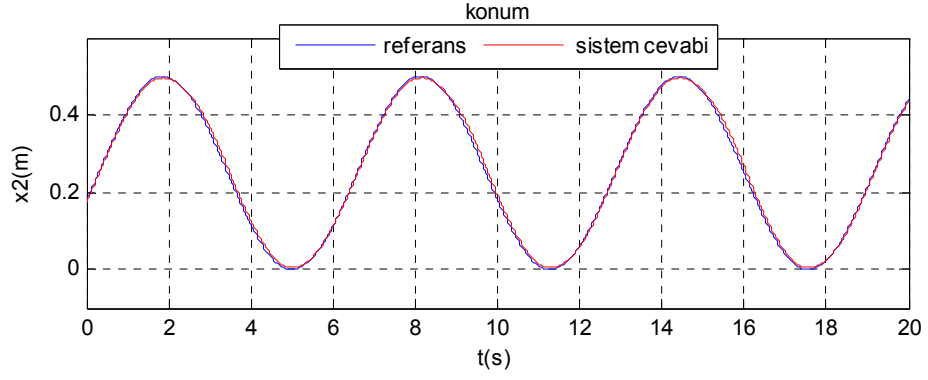


Şekil 4.64 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.

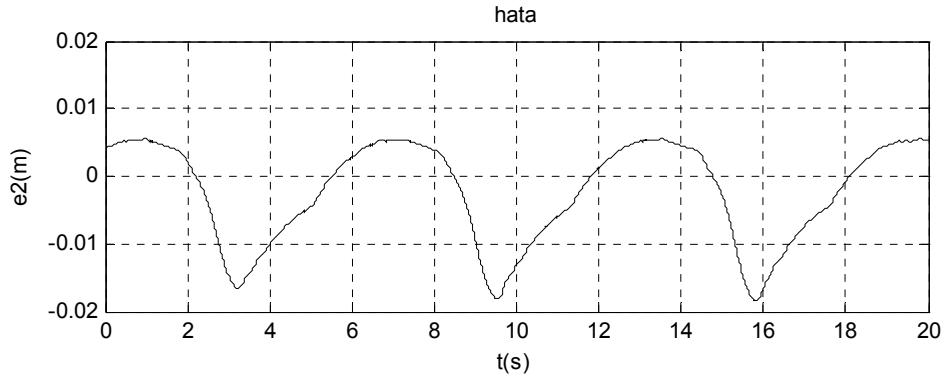


Şekil 4.65 : 1. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.

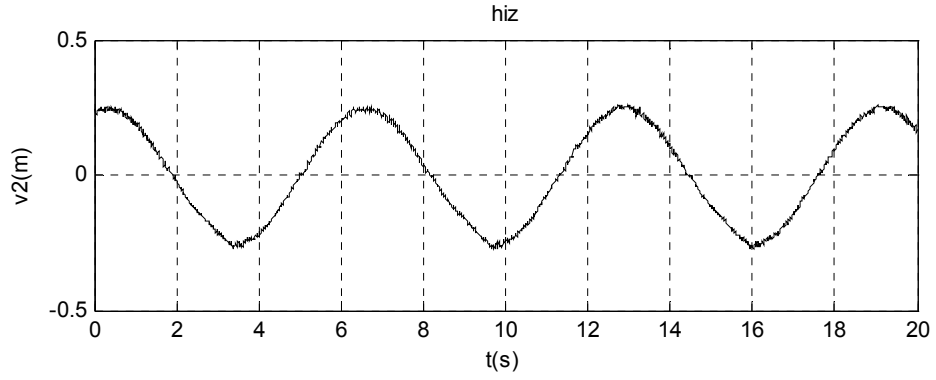
İkinci eksene ait sistem cevabı ve işaret izleme hatası şekil 4.66 ve 4.67'da verilmiştir. Sistem cevabına ait hız, kontrol işareti ve kompanze edilen sürtünme kuvvetinin grafikleri şekil 4.68, 4.69 ve 4.70'de gösterilmiştir.



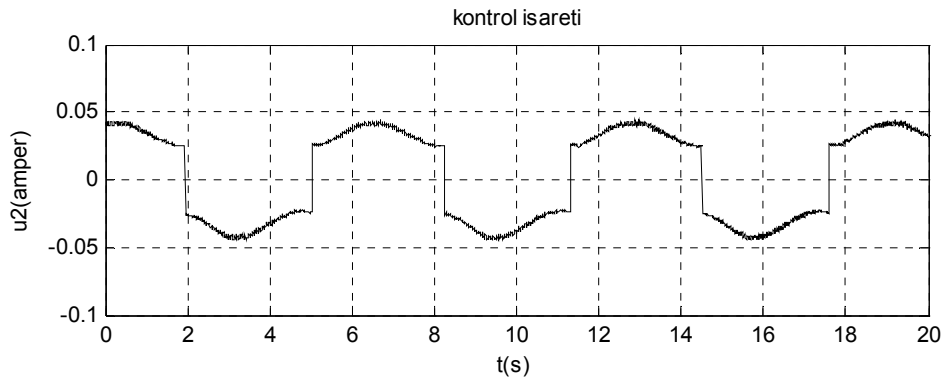
Şekil 4.66 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem konumu.



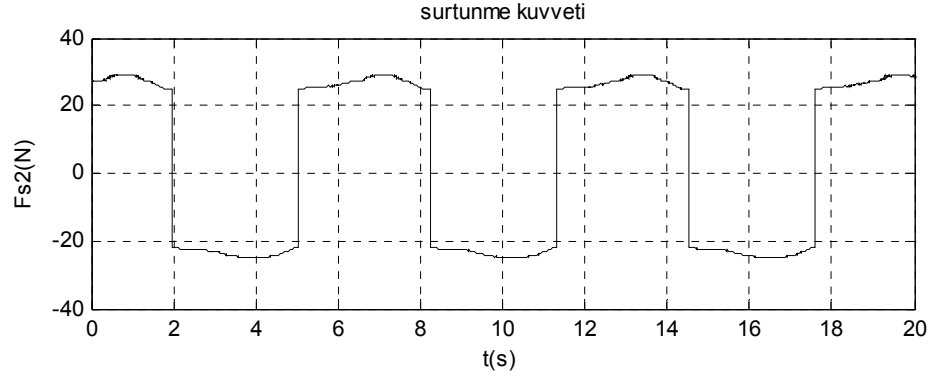
Şekil 4.67 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, takip hatası.



Şekil 4.68 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, sistem hızı.



Şekil 4.69 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kontrol işareti.



Şekil 4.70 : 2. eksen PD+T kontrol; sinüs takibi, kompanze edilen sürtünme kuvveti.

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere PD+T kontrolör hem basamak girişe hem de sinüs takibine, PD+L kontrolöre oranla daha iyi cevap vermiştir. Sistem cevabının tekrarlanabilirliği ise PD+L kontrolöre çok yakındır. Sürtünme kuvveti dış etkenlere bağlı olarak sürekli olarak değiştiğinden, PD+T kontrolör ile de istenilen sonuçlar elde edilememiştir.

4.5 Uyarlamalı Kontrol

Tüm uyarlamalı sistemler, değişen koşullara göre kendini adapte eder ve sistem parametrelerinin an be an güncellenmesini sağlarlar. Uyarlamalı kontrol tekniği sürtünme kuvvetindeki, mekanik aksamdaki ve yükün ağırlığındaki belirsizlikler nedeni ile kayış-kasnak servo sistemlerde kullanılmaya uygundur.

Çalışmada kontrolör tasarımı karmaşıklığını ortadan kaldırmak ve basitleştirmek için sürtünme modeli sadece Coulomb ve viskoz sürtünmeden oluşacak şekilde tasarlanacaktır. Uyarlamalı kontrol yöntemi ile sürtünme kuvvetinden kaynaklanan doğrusalsızlıklar ortadan kaldırılacak ayrıca kütle belirsizliği de yok edilecektir. Model tabanlı uyarlamalı kontrolör [10]'da sunulan yönteme göre geliştirilecektir.

Sistemin matematiksel modelini denklem 4.16'daki şekilde tekrar yazacak olursak.

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4.16a)$$

$$m \frac{dv}{dt} + F_v v + F_c \text{sign}(v) = \frac{k_t}{r \times v_i} i_q \quad (4.16b)$$

Burada k_t moment sabiti, r kasnak yarıçapı, i_q ise motor akımıdır. Kayış kasnak sistemi için hareket denklemi denklem (4.17)'deki gibidir,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{k_t}{m \times r \times v i} i_q - \frac{F_v}{m} v - \frac{F_c}{m} \text{sign}(v) + \xi \quad (4.17)$$

Bu denklemi regresör ve parametre vektörlerinden oluşacak şekilde tekrar yazacak olursak,

$$\frac{dv}{dt} = WP + \gamma i_q \quad (4.18)$$

Burada regresör terimi denklem (4.19a) daki gibidir.

$$W^T = \begin{bmatrix} -v & -\text{sign}(v) \end{bmatrix} \quad (4.19a)$$

Parametre terimleri ise denklem (4.19b)'de verilmiştir

$$P = \begin{bmatrix} \frac{F_v}{m} \\ \frac{F_c}{m} \end{bmatrix} \quad (4.19b)$$

$$\gamma = \frac{k_t}{m \times r \times v i}$$

(4.17) denklemi denklem (4.20)'deki gibi de yazılabilir,

$$\frac{dv}{dt} = W^T \bar{P} + \bar{\gamma} i_q - W^T \tilde{P} - \tilde{\gamma} i_q \quad (4.20)$$

Burada $\bar{P}, \bar{\gamma}$ parametre kestirimleri, P, γ gerçek parametreler ve $\tilde{P}, \tilde{\gamma}$ parametre hatalarıdır. Parametre hataları denklem (4.21)'deki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= \bar{P} - P \\ \tilde{\gamma} &= \bar{\gamma} - \gamma \end{aligned} \quad (4.21)$$

v , denklem (4.22) ye eşitlenerek,

$$v = \bar{\gamma} i_q + W^T \bar{P} \quad (4.22)$$

Kontrol değişkeni i_q denklem (4.23) deki gibi elde edilir.

$$i_q = \frac{v - W^T \bar{P}}{\bar{\gamma}} \quad (4.23)$$

Eğer parametreler gerçek değerlerine yakınsarlarsa, sistem asimptotik olarak doğrusal hale gelir. Bir sonraki aşama yörünge takibi yapabilmek için uygun v seçilmesi ve parametre kestirimi için güncelleme kuralının belirlenmesidir.

Çalışmada v denklem (4.24)'de verilen şekilde bir PD kontrolör olarak seçilecektir.

$$v = \dot{v}_r + K_D(v_r - v) + K_P(x_r - x) \quad (4.24)$$

Burada v_r ve x_r istenen hız ve konum değerleri $x_r - x = e$ konum hatası, $v_r - v = \dot{e}$ hız hatasıdır. Asimptotik davranışın yakınsama oranı σ , kritik sönümü sağlayacak şekilde seçilecektir. Kontrolör katsayıları ise denklem (4.25)'te belirtilen şekilde seçilecektir.

$$K_P = \sigma^2 \quad K_D = 2\sigma \quad (4.25)$$

Buna göre hata denklemi, denklem (4.26) daki gibi elde edilir.

$$\ddot{e} + 2\sigma\dot{e} + \sigma^2 e - W^T \tilde{P} - i_q \tilde{\gamma} = 0 \quad (4.26)$$

Güncelleme kuralının belirlenmesi için bir Lyapunov fonksiyonu denklem (4.27)'deki gibi seçilmelidir.

$$V = (\dot{e} + \sigma e)^2 + 2\sigma^2 e^2 + \tilde{P}^T \Gamma^{-1} \tilde{P} + \tilde{\gamma}^T \frac{1}{g} \tilde{\gamma} \quad (4.27)$$

Bu Lyapunov fonksiyonunun türevi ise

$$\dot{V} = 2(\dot{e} + \sigma e)(\dot{e} + \sigma \dot{e}) + 4\sigma^2 e \dot{e} + 2\tilde{P}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{P}} + 2\tilde{\gamma}^T \frac{1}{g} \dot{\tilde{\gamma}} \quad (4.28)$$

şeklindedir. Burada Γ mutlak pozitif uyarılama kazanç matrisidir. Denklem (4.28)'den yola çıkarak güncelleme kuralı, denklem (4.29)'deki gibi bulunacaktır.

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{P}} &= \dot{\tilde{P}} = -\Gamma(\dot{e} + \sigma e)W \\ \dot{\tilde{\gamma}} &= \dot{\tilde{\gamma}} = -g(\dot{e} + \sigma e)i_q \end{aligned} \quad (4.29)$$

Parametre kestirimleri ise denklem (4.30)'da belirtilen şekildedir.

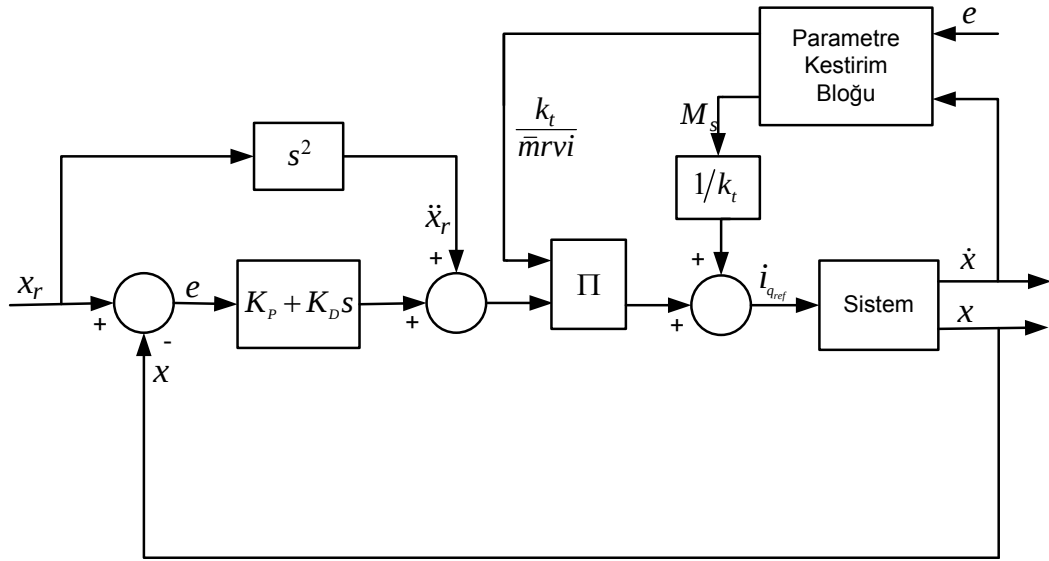
$$\begin{aligned} \bar{P} &= -\Gamma_1 W(\dot{e} + \sigma e) - \Gamma_2 \int W(\dot{e} + \sigma e) dt \\ \bar{\gamma} &= -g_1(\dot{e} + \sigma e)i_q - g_2 \int (\dot{e} + \sigma e)i_q dt \end{aligned} \quad (4.30)$$

Kontrol değişkeni i_q ise denklem (4.31)'de verilmiştir.

$$i_q = \frac{(\ddot{x}_r + K_p e + K_D \dot{e}) + \frac{\bar{F}_v}{\bar{m}} v + \frac{\bar{F}_c}{\bar{m}} \text{sign}(v)}{\frac{k_t}{\bar{m} \times r \times v i}} \quad (4.31)$$

4.5.1 Uyarlamalı kontrolör tasarımı

Denklem (4.30)'da verilen kontrol değişkeni kullanılarak oluşturulan blok diyagramı şekil 4.73'te verilmiştir.

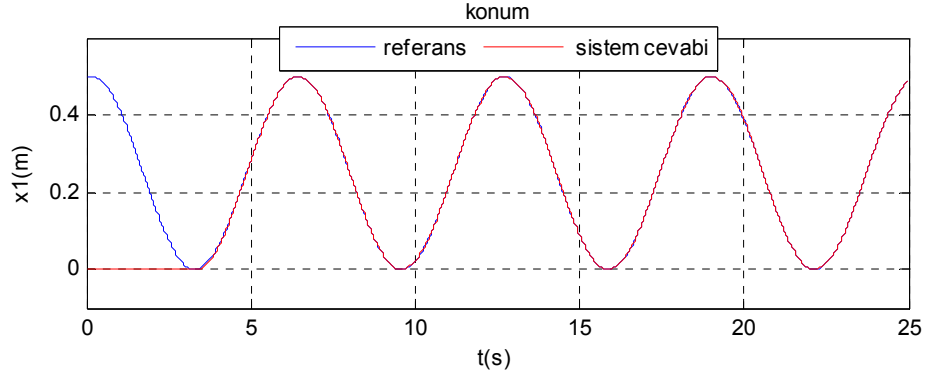


Şekil 4.71 : Uyarlamalı kontrol blok gösterimi.

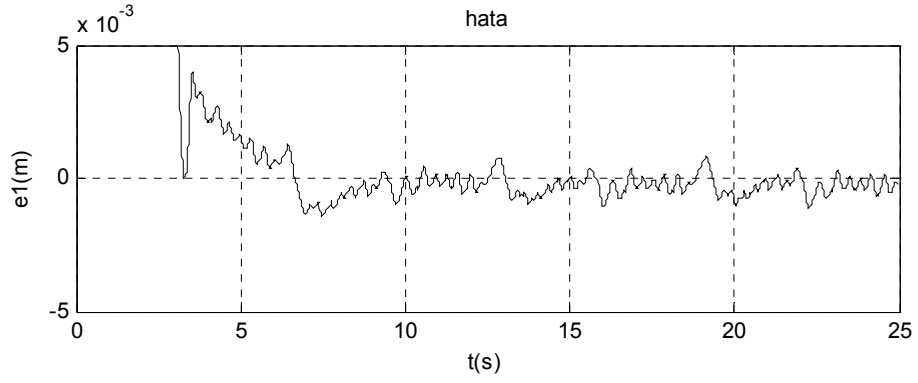
Şekil 4.71'te de görüleceği üzere uyarlamalı kontrol sistemi, doğrusal bir kontrolör ve doğrusal olmayan sürtünme etkisini kompanze eden uyarlama kısmından oluşmaktadır. Uyarlamalı kontrolörün tasarımında Coulomb ve viskoz sürtünme katsayıları kestirimi ile sürtünme kuvveti kestirimi gerçekleştirilecek ve geribesleme kompanzasyonu uygulanacaktır. Simulink'te oluşturulan uyarlamalı kontrol bloğu EK C. şekil C.6 ve C.7'de verilmiştir.

Birinci eksen için PD kontrolör katsayıları $\sigma = 20$ 'ye göre seçilmiştir, uyarlama bloğu kazançları ise. $\Gamma_{11} = \Gamma_{12} = 20$ $\Gamma_{21} = \Gamma_{22} = 20$ ve $g_1 = g_2 = 10$ seçilmiştir.

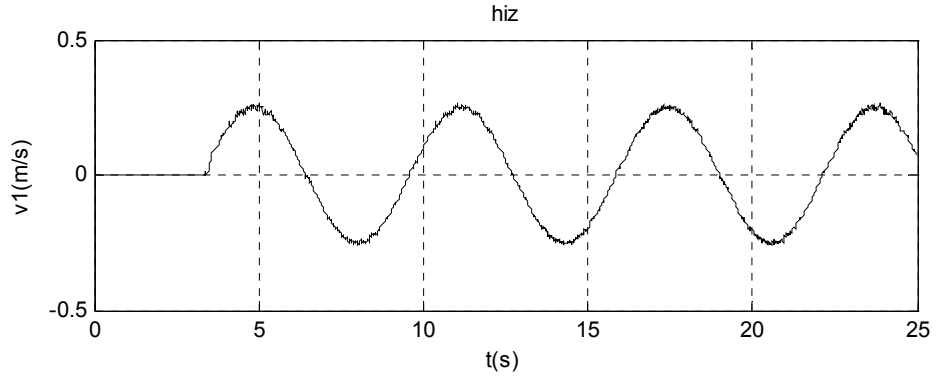
F_c, F_v 'nin ilk değerleri 0, kütle'nin ilk değeri ise nominal değeri olan 4.722 olarak alınmıştır. Tasarlanan uyarlamalı kontrolör birinci eksene uygulandığında elde edilen sonuçlar, sistemin sinüs işaretini takibi ve takip hatası şekil 4.72 ve 4.73'te verilmiştir. Birinci eksene ait hız ve kontrol işareti ise şekil 4.74 ve 4.75'de verilmiştir.



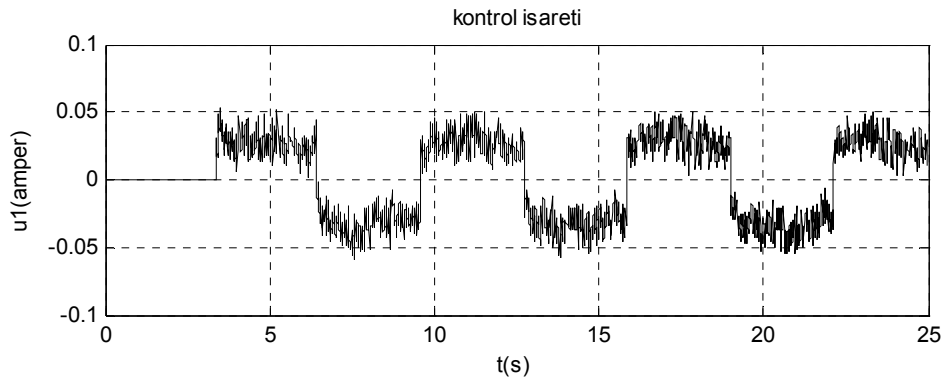
Şekil 4.72 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; sistem konumu.



Şekil 4.73 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; takip hatası.

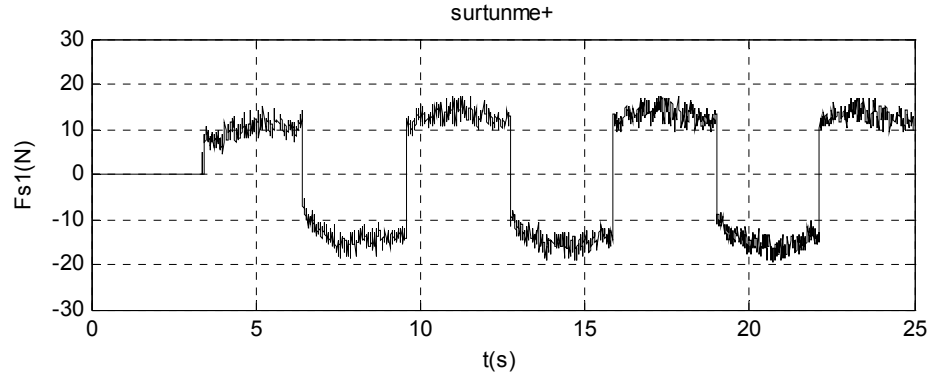


Şekil 4.74 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; sistem hızı.

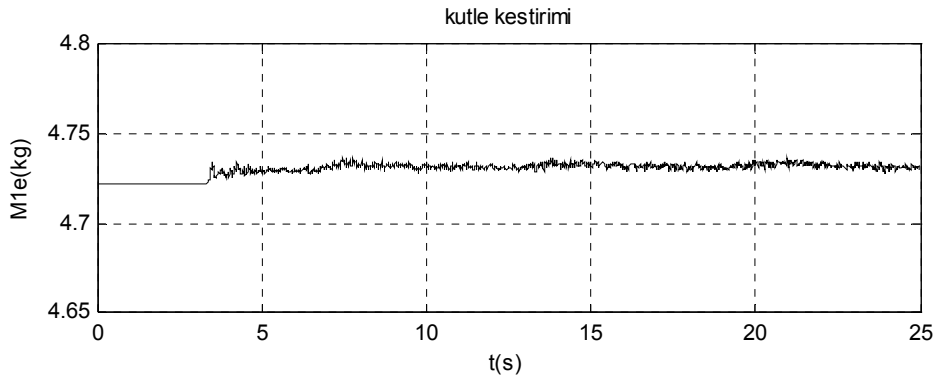


Şekil 4.75 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; kontrol işareti.

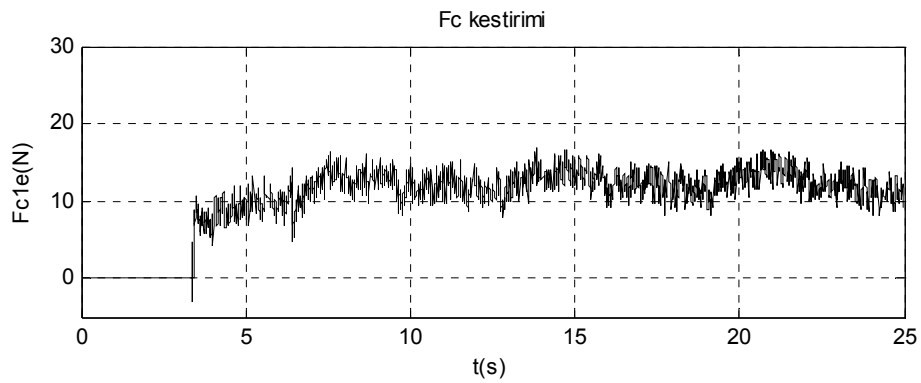
Parametre kestirimi sonucu birinci eksen için bulunan Coulomb, viskoz sürtünme ve kütle parametreleri Şekil 4.77, 4.78 ve 4.79'da verilmiştir. Elde edilen Coulomb ve viskoz sürtünme parametrelerinden ise Şekil 4.76'daki kompanze edilen sürtünme kuvveti bulunmuştur.



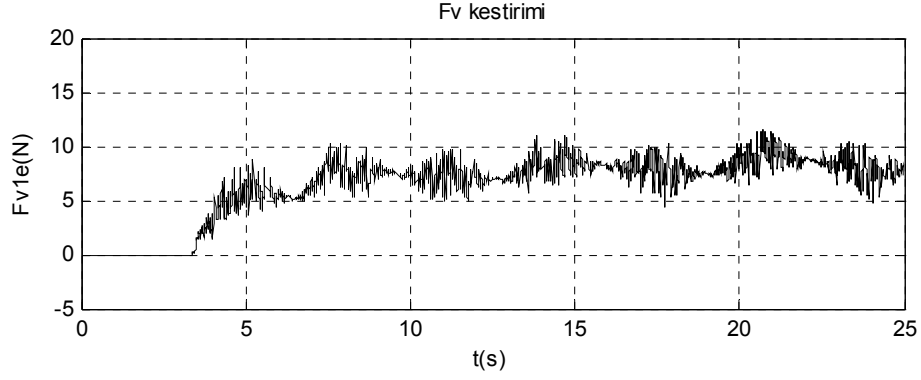
Şekil 4.76 : 1.eksen uyarlamalı kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti kestirimi



Şekil 4.77 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; kütle kestirimi.

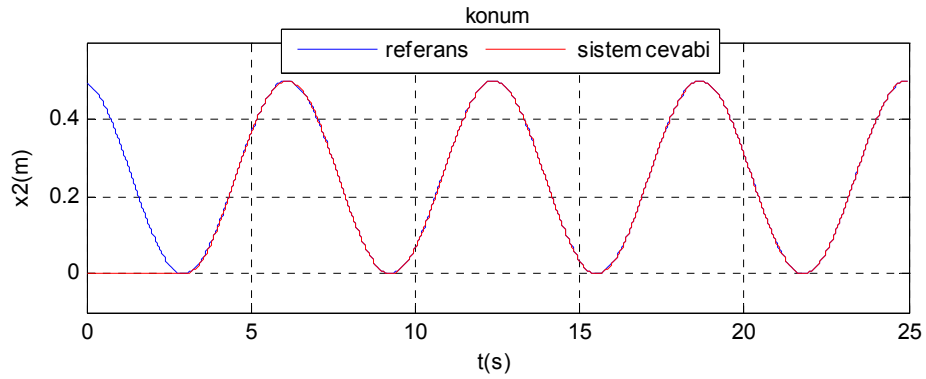


Şekil 4.78 : 1.eksen uyarlamalı kontrol; Coulomb sürtünme katsayısı kestirimi.

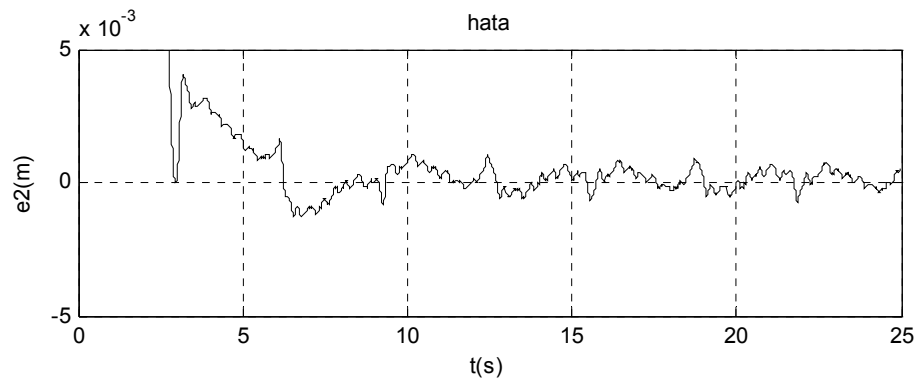


Şekil 4.79 : 1. eksen uyarlamalı kontrol; viskoz sürtünme katsayısı kestirimi.

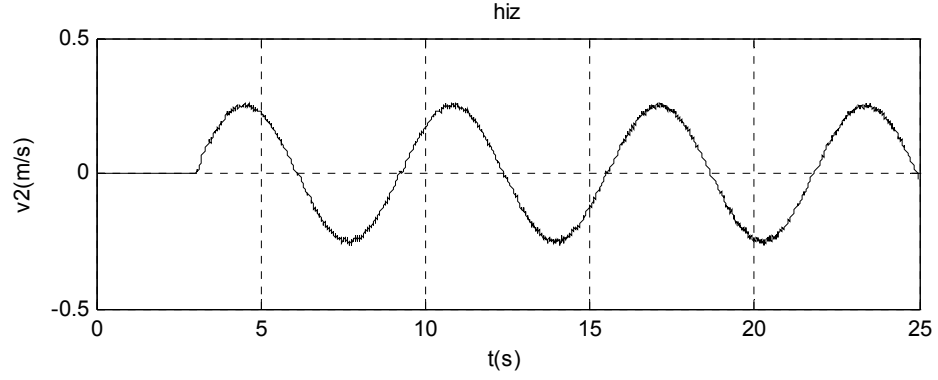
İkinci eksen için PD kontrolör katsayıları $\sigma = 22$ 'ya göre, uyarlama bloğu kazançları ise. $\Gamma_{11} = \Gamma_{12} = 15$ $\Gamma_{21} = \Gamma_{22} = 10$ ve $g_1 = g_2 = 10$ olarak seçilmiştir. F_c, F_v 'nin ilk değerleri 0 olarak, kütlenin ilk değeri ise nominal değeri olan 11.93 olarak alınmıştır. Tasarlanan uyarlamalı kontrolör ikinci eksene uygulandığında elde edilen sonuçlar, sistemin sinüs işaretini takibi ve takip hatası şekil 4.80 ve 4.81'de verilmiştir. Birinci eksene ait hız ve kontrol işareti ise şekil 4.82 ve 4.83'te verilmiştir.



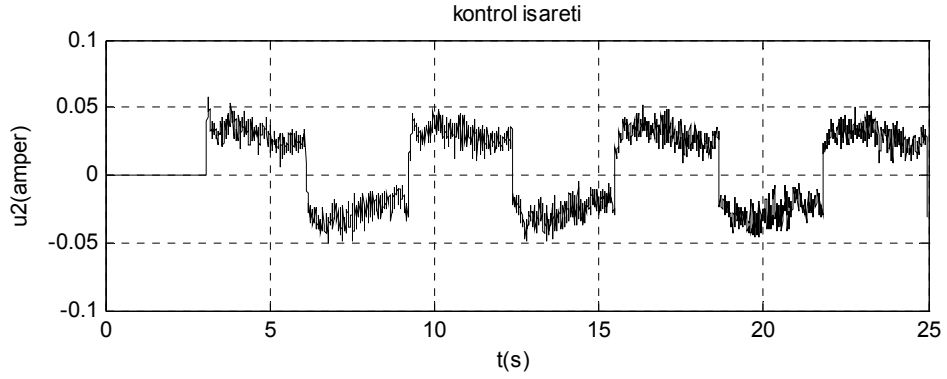
Şekil 4.80 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; sistem konumu.



Şekil 4.81 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; takip hatası.

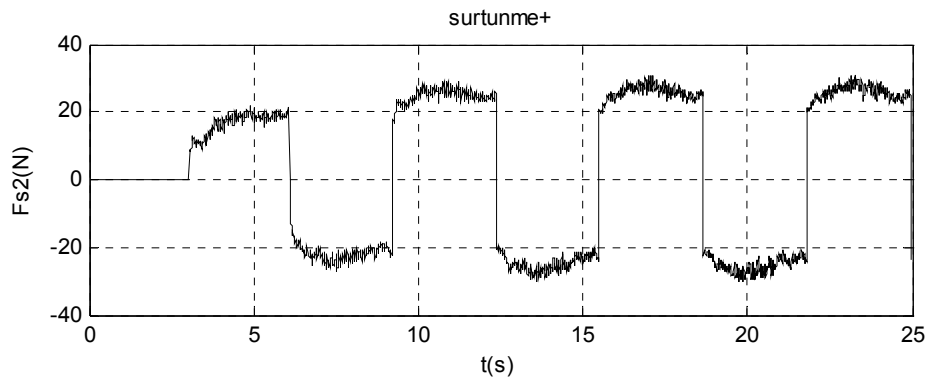


Şekil 4.82 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; sistem hızı.

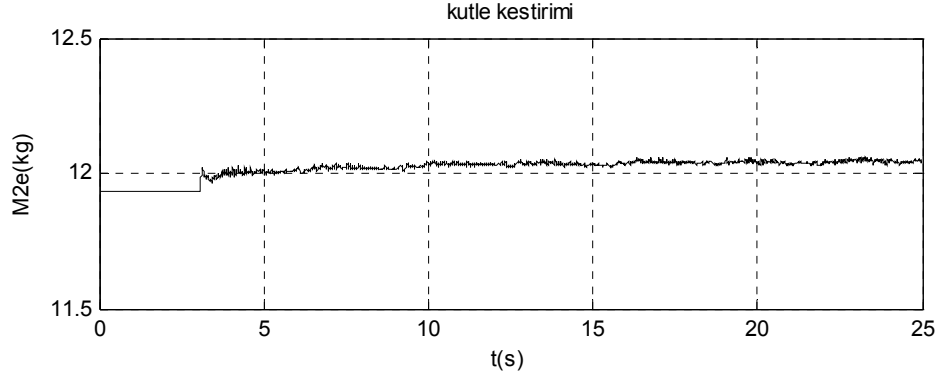


Şekil 4.83 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kontrol işareti.

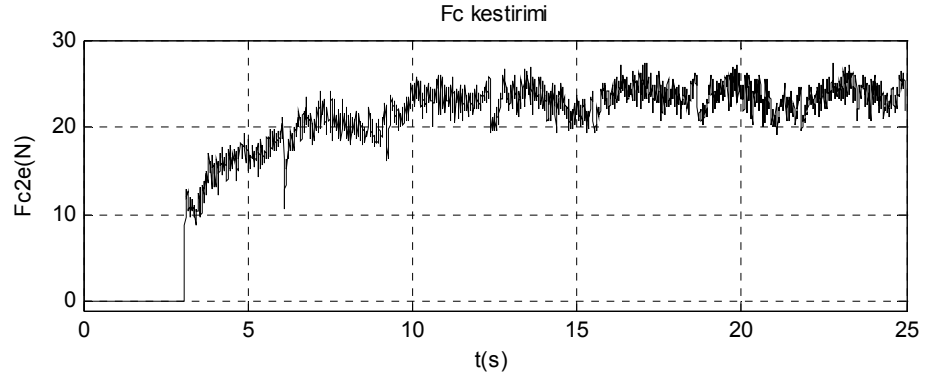
Parametre kestirimi sonucu bulunan Coulomb, viskoz sürtünme ve kütle parametreleri şekil 4.85, 4.86 ve 4.87'de verilmiştir. Elde edilen Coulomb ve viskoz sürtünme parametrelerinden yola çıkarak ise şekil 4.84'deki kompanze edilen sürtünme kuvveti bulunmuştur.



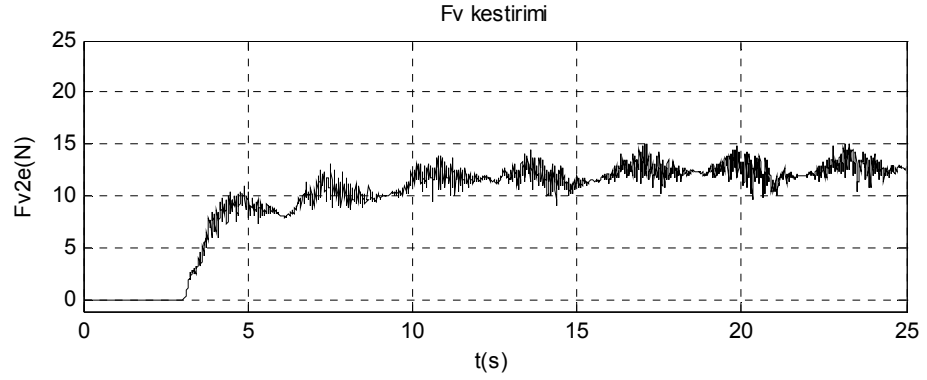
Şekil 4.84 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kompanze edilen sürtünme kuvveti kestirimi



Şekil 4.85 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; kütle kestirimi.

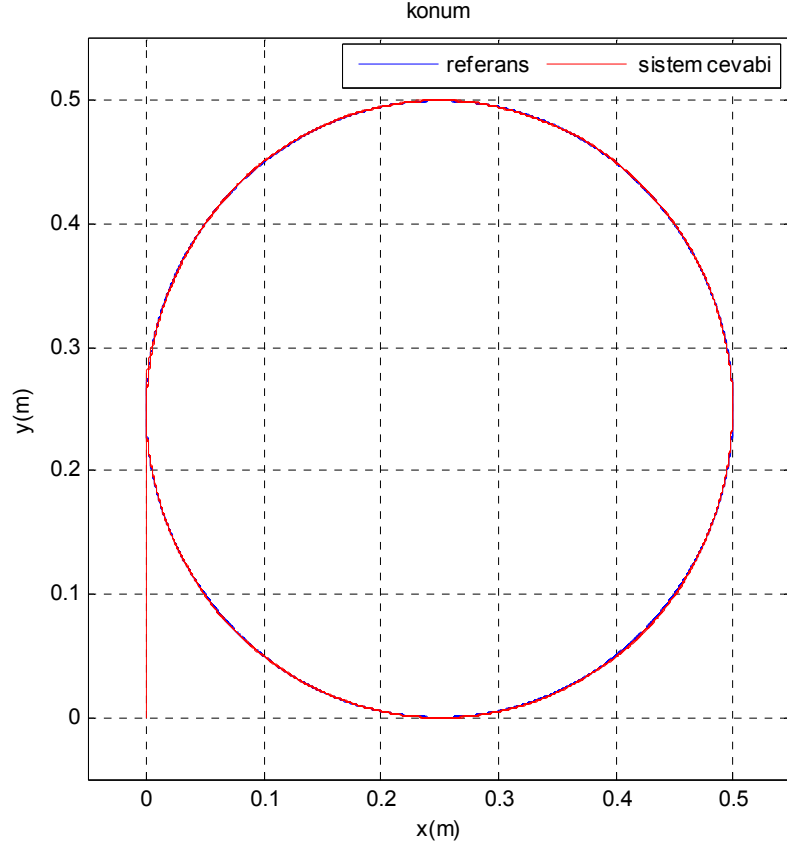


Şekil 4.86 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; Coulomb sürtünme katsayısı kestirimi.



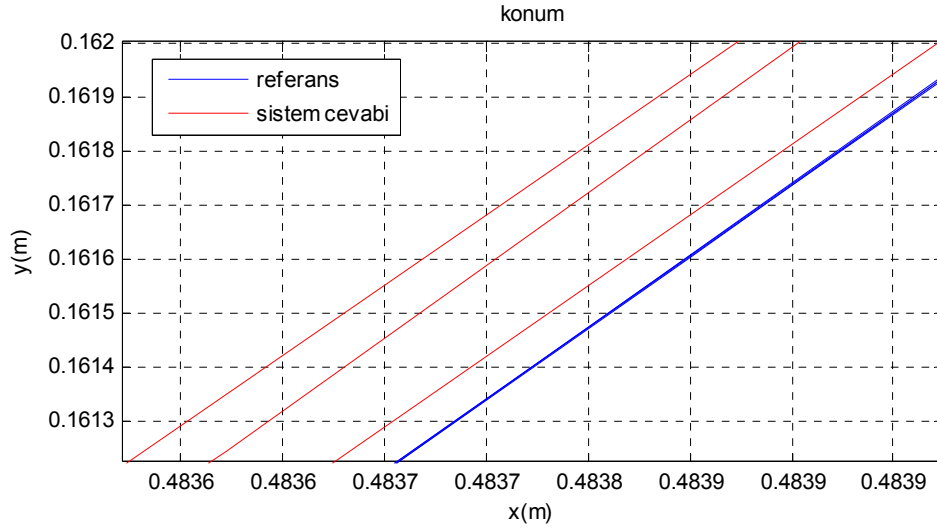
Şekil 4.87 : 2. eksen uyarlamalı kontrol; viskoz sürtünme katsayısı kestirimi.

Daha sonra her iki eksene de referans işaret olarak sinüs dalgası uygulanarak ve bu iki eksenin x-y düzleminde bir daire çizmesi istenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 4.88'de verilmiştir.



Şekil 4.88 : Uyarlamalı kontrolörün, daire şeklinde referansı takibi.

Sistem cevabının tekrarlanabilirliği ise şekil 4.89'da verilmiştir.



Şekil 4.89 : Uyarlamalı kontrolörün sistem cevabının tekrarlanabilirliği.

Önerilen uyarlamalı kontrol yöntemi, kayış-kasnak servo sisteme ait sonuçlardan da görüleceği üzere, sistemdeki belirsizlikleri ve doğrusalsızlıkları an be an

parametreleri uyarlayarak ortadan kaldırmış ve sisteme uygulanan tüm kontrol yöntemleri içinde en doğru sonuçların elde edilmesini sağlamıştır.

Şekil 4.88'den de görüleceği üzere uygulanan kontrol yöntemleri arasında en ideale yakın daire, uyarlamalı kontrol yöntemi kullanılarak çizdirilmiştir. Sistem cevabının tekrarlanabilirliği ise diğer önerilen yöntemlere nazaran, uyarlamalı kontrol için çok iyi ve istenilen düzeydedir. Eksenlere ait sonuçları ayrı ayrı incelediğimizde, her iki eksen için de sistem cevabının sinüs işaretini düşük bir hata ile takip ettiği gözlemlenmiştir; takip hatası 1mm'nin altına çekilmiştir.

Kestirilen parametrelerin 3. bölümde bulunan parametre değerlerine yakınsadığı birinci eksen için şekil 4.77, 4.78, 4.79'dan, ikinci eksen için şekil 4.85, 4.86 4.87'dan görülmektedir. Örneğin Coulomb sürtünme birinci eksen için ileri ve geri yönde 12.45 ve 12.54 olarak bulunmuş iken, parametre kestirim değerleri de bu değerlere çok yakın çıkmıştır. Böylece 3. bölümde bulunan parametrelerin doğruluğu bir kez daha kanıtlanmıştır. Parametre kestirimlerinden yola çıkarak kompanze edilen sürtünme kuvvetinin ise şekil 3.6'da elde edilen sürtünme kuvveti sonuçlarına yakın olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada endüstride oldukça geniş kullanım alanı bulan kayış-kasnak sistemi ile sürülen bir x-y tablanın modellenmesi, özellikle de sürtünmenin modellenmesi, ele alınmış ve sistemin istenen performansa ulaşabilmesi için farklı kontrol yöntemleri önerilmiştir. Sistemin 0.5m genlikli basamak cevaba verdiği cevaplar incelenmiş ve ek olarak her iki eksene de referans olarak 0.5m genlikli sinüs işareti verilerek x-y düzleminde daire çizmesi istenmiştir.

Kayış kasnak servo sistemde kontrol tasarımını zorlaştıran en önemli etken doğrusal olmayan terimler içeren sürtünme kuvvetidir. Bu nedenle çalışmada ağırlık öncelikle sürtünme doğru bir şekilde modellenmesine daha sonra ise bu modellenen sürtünmenin değişik yöntemler ile kompanze edilmesine verilmiştir. 3. bölümde sürtünme modellenmiş LuGre sürtünme modeline ait parametreler bulunmuş ve modelin doğruluğu onaylanmıştır.

Çalışmada beş farklı kontrol yöntemi önerilmiştir. İlk olarak, sürtünme sadece viskoz sürtünmeden oluşacak şekilde modellenerek sistem modeli elde edilmiş ve PD kontrolör tasarımı yapılmıştır. PD kontrolör basamak giriş cevabı, beklenildiği gibi, yetersiz kalmış ve istenenleri sağlayamamıştır. Daha sonra sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak için doğrusal bir PID kontrolör tasarlanmıştır. PID kontrolörün basamak cevabının istenilenleri sağladığı gözlemlenmiş iken, sinüs işaretini takip edemediği dolayısıyla x-y düzleminde ideal bir daire çizdiremediği de gözlemlenmiştir. Diğer önerilen kontrol yöntemleri sürtünme kompazyonuna dayalı model tabanlı PD+ kontrolördür. Bu yöntem ile geribesleme kompazyonu yapılarak sürtünme etkisini ortadan kaldırmak amaçlanmıştır. Sürtünme kompazyonu için öncelikle LuGre sürtünme modeli tabanlı PD+ kontrolör sisteme uygulanmıştır bu yöntem PID kontrolörden daha iyi sonuç verse de x-y tablanın çizdiği daire istenilenleri karşılayamamıştır. Bir diğer PD+ yöntem de ise tablo tabanlı sürtünme kompanzasyon yapılmıştır. Bu yöntemde ideale yakın 8mm'lik hata ile daire çizdirilse de sistem cevabının tekrarlanabilirliği istenilen seviyeye gelememiştir. Model tabanlı PD+ kontrolörlerin istenilen sistem cevabını sağlayamamasının en

önemli nedenleri modellenemeyen dinamik etkiler ve sürtünmenin harekete, sıcaklığa ve mekanik sistemin güvenilirliğine göre değişmesidir. Bu nedenlerden ötürü servo sistem için sürtünmenin viskoz ve Coulomb sürtünmeden meydana geldiği kabulü altında model tabanlı uyarlamalı kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem ile sürtünmenin doğrusal olmayan etkileri ve parametre belirsizlikleri geliştirilen parametre kestirimi yöntemi yardımı ile ortadan kaldırılmıştır. Sürtünme kuvvetinin dinamik etkileri ihmal edilmesine rağmen, servo sisteme x-y düzleminde ideale oldukça yakın, her iki eksen içinde 1mm'nin de altında takip hatası ile daire çizdirilmiş ve sistem cevabının tekrarlanabilirliği milimetrenin onda birine kadar düşürülmüştür. Sonuç olarak kayış-kasnak sistemi ile sürülen x-y tabla için en uygun kontrol yönteminin uyarlamalı kontrol olduğu görülmüştür.

Çalışmanın ilerletilmesi için önerilenler, öncelikle kontrol tasarımını karmaşıktırsa da daha iyi sonuca ulaşabilmek için uyarlamalı kontrolde, sürtünme modelinin kapsamlı LuGre modeli şeklinde göz önüne alınması ve uyarlamalı kontrol yönteminin uygulanmasıdır. Bir diğer öneri ise eğer sisteme doğrusal konum ve hız ölçekbilen cihazlar eklenir ise, kayış-kasnak düzeninden kaynaklanan yay etkisinin de göz önüne alınarak, sistemin tekrardan modellenmesi ve kontrolüdür. Böylece yay etkisi de uyarlamalı kontrol ile ortadan kaldırılabilir. Ayrıca kayış-kasnak sistemlerinde kayan kipli kontrol de uygulanabileceği ve iyi sonuçlar alınabildiği [1] bilinmektedir. Buna göre çalışmada kullanılan x-y tabla için kayan kipli kontrol algoritması da geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Hace, A., Jezernik, K. and Sabanovç, A.,** 2005. SMC with Disturbance Observer for a Linear Belt-Drive. *IEEE ISIE 2005*, June 20-23, 2005, Dubrovnik, Croatia.
- [2] **Armstrong-Helouvry, B.,** 1991. Control of Machines with Friction. Kluwer, Boston, MA.
- [3] **Dahl, P.,** 1968. A Solid Friction Model. *Aerospace Corp. Technical Report TOR-0158(3107-18)*, El Segundo, CA.
- [4] **Canudas de Wit, C., Olsson, H., Alstrom, K.J., and Lischinsky, P.** 1995. A new model for control of systems with friction. *IEEE Trans. Automat.Contr.*, Vol **40**, pp 419-425, Mart 1995.
- [5] **Xie, W.F.,** 2007. Sliding-mode-observer-based adaptive control for servo actuator with friction. *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol **54**, no 3, June 2007.
- [6] **Canudas de Wit, C. and Lischinsky, P.** 1997. Adaptive Friction Compensation with Partially Known Dynamic Friction Model. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing.* Vol **11**, pp 65-80.
- [7] **Lu, L., Yao, B., Wnag, Q., and Chen, Z.,** 2008. Adaptive Robust Linear Motor Systems with Dynamic Friction Compensation Using modified LuGre model. *Proceeding of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.* July 2-5. China.
- [8] **Dixit, A. and Suryanarayanan, S.,** 2008. Adaptive Observers for Servo Systems with Friction. *2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control* September 3-5..Texas.
- [9] **Wei, L.X., Wang, X, Wang, H.R., Wang, P.G.,** 2008 Adaptive Backstepping Fuzzy Control for X-Y Table with Friction. *Proceeding of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics.* Shanghai, 26-29 August.
- [10] **Boğosyan, S.O., Gökaşan, M.** 1995. Adaptive torque ripple minimization of permanent magnet synchronous motors for direct drive applications. *Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95.*
- [11] **Bose, B.K.,** 2002. Modern Power Electronics and ac Drives. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA.
- [12] **Selezneva, A.,** 2007. Modelling and sythesis of tracking control for the belt-drive system. *Master's Thesis,* Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland.
- [13] **MN-1919.** 2006. MicroFlex Installation Manual.

- [14] **Thimmalapura, S.**, 2004. Identification and compensation of friction for a dual stage positioning system. *Master's Thesis* Texas A&M University, Texas, USA.
- [15] **Olsson, H., Alstrom, K.J., Canudas de Wit, C., Gafvert, M. and Lischinsky, P.**, 1997. Friction Models and Friction Compensation.
- [16] **Nise, N.S.**, 2004. Control Systems Engineering, Fourth Edition. Wiley, USA

EKLER

EK A : Motor Parametreleri

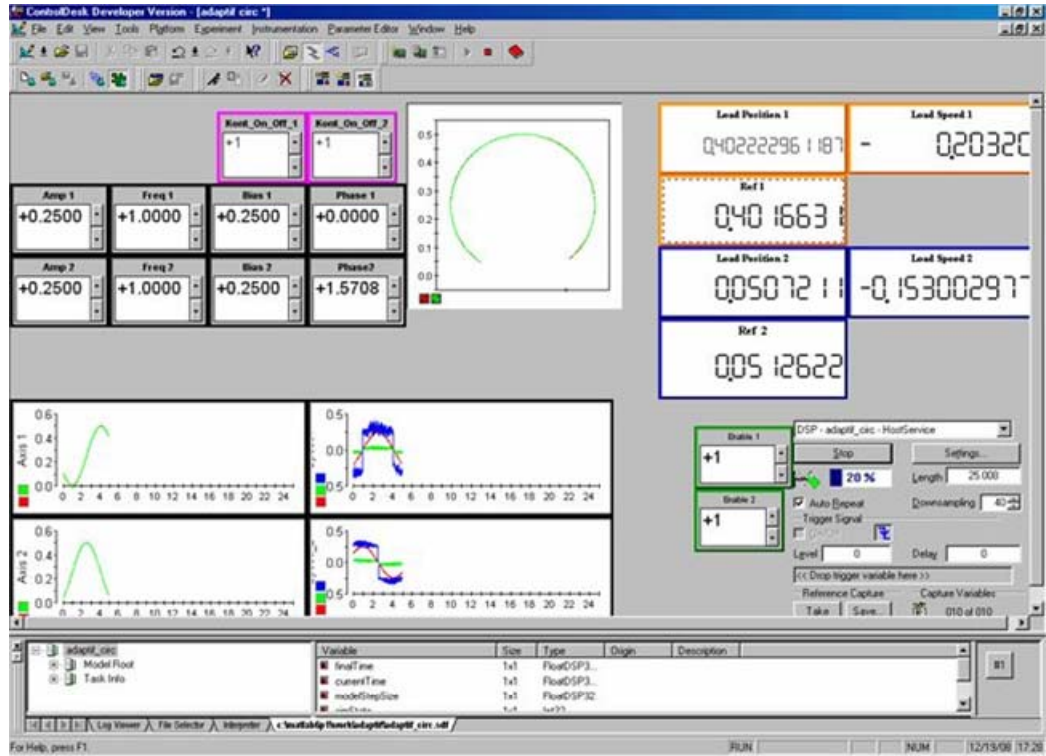
EK B : Controldesk Görünümleri

EK C : Simulink Modelleri

EK A.**Çizelge A.1 : Motor parametreleri.**

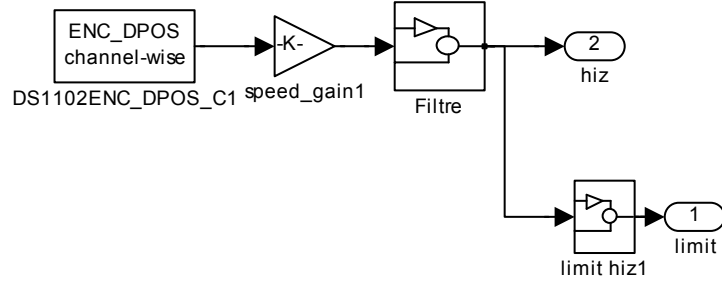
Parametre	Birim	BSM50N-375AA
Sürekli Moment	$[N - m]$	1.36
Sürekli Akım	$[amp]$	2.38
Tepe Akımı	$[amp]$	8
Tepe Momenti	$[N - m]$	5.44
Mekanik Zaman Sabiti	$[msn]$	0.30
Elektrik Zaman Sabiti	$[msn]$	1.8
Anma Hızı@300 volt	$[rpm]$	4000
Anma Hızı@160 volt	$[rpm]$	2130
Isıl Direnç	$[^{\circ}C / watt]$	1.8
Elektriksel parametreler		
Moment Sabiti	$[N - m / amp]$	0.72
Gerilim Sabiti	$[V_{rms} / krpm]$	43.8
Direnç	$[ohm]$	8.5
Endüktans	$[mH]$	16
Mekanik parametreler		
Eylemsizlik	$[Kg - cm^2]$	0.18
Maksimum Hız	$[rpm]$	10000
Kutup Sayısı		4

EK. B

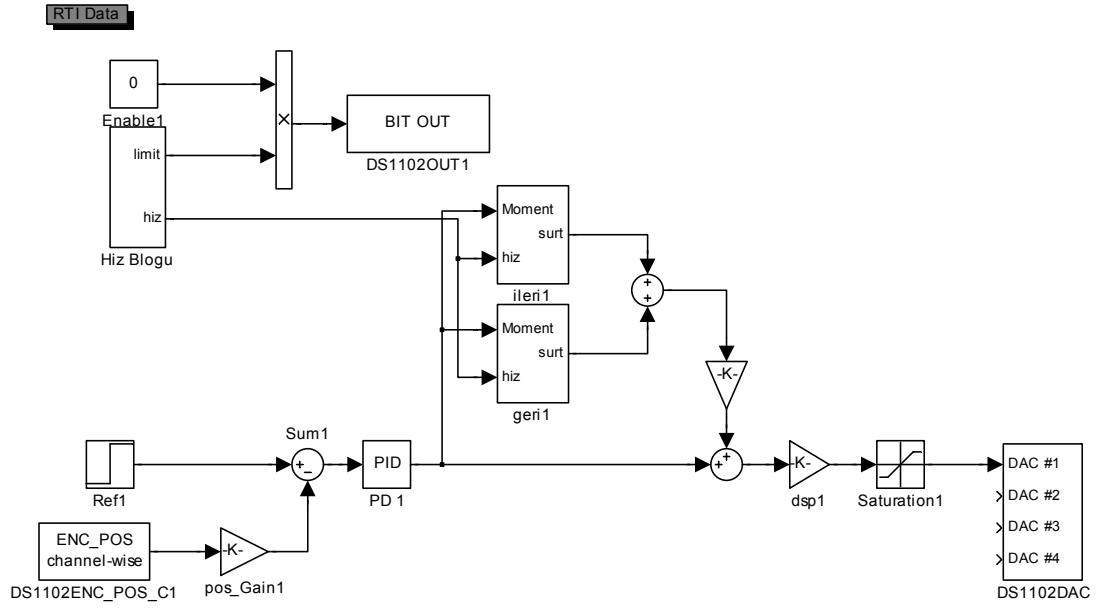


Şekil B.1 : ControlDesk arayüzü görünümü

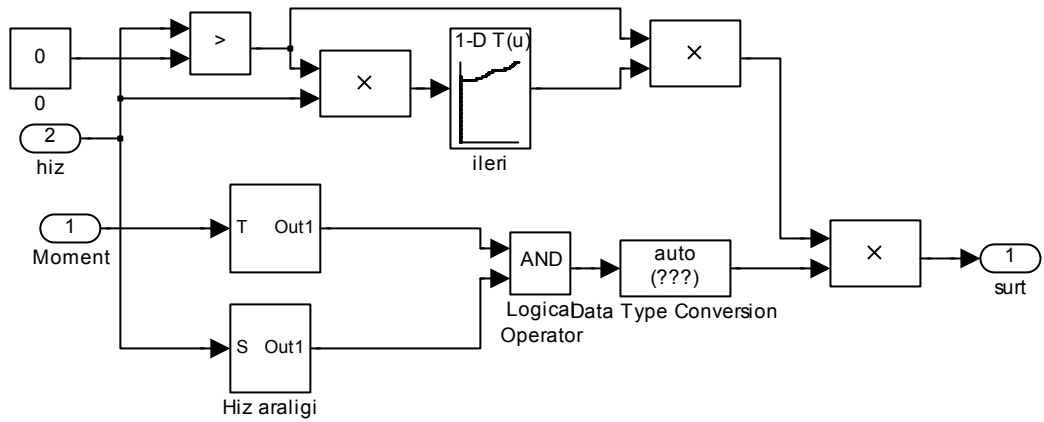
EK. C



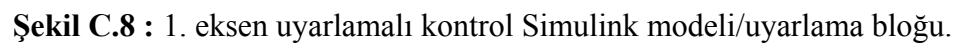
Şekil C.1 : Hız limit; Simulink modeli.



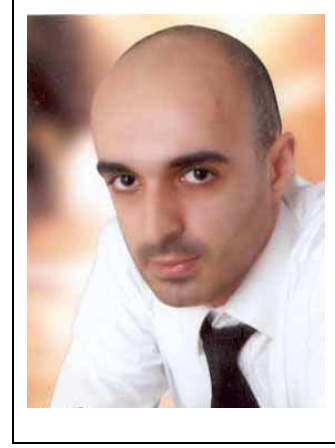
Şekil C.2 : 1. eksen PD+T kontrol; Simulink modeli



Şekil C.3 : 1. eksen PD+T kontrol; Simulink modeli/sürtünme kompanzasyonu bloğu.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ayhan Polat
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul - 05.09.1983
Adres: 34714 Kadıköy/İstanbul
Lisans Üniversitesi: Elektrik Mühendisliği - İstanbul Teknik Üniversitesi