İKİ SERBESTLİK DERECELİ STABİLİZASYON PLATFORMUNUN POZİSYON KONTROLÜ

Burak AKGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2006
ANKARA

İKİ SERBESTLİK DERECELİ STABİLİZASYON PLATFORMUNUN POZİSYON KONTROLÜ

Burak AKGÜN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2006
ANKARA

Burak AKGÜN tarafından hazırlanan İKİ SERBESTLİK DERECELİ STABİLİZASYON PLATFORMUNUN POZİSYON KONTROLÜ adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mehmet EROĞLU
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. Kemal ÖZGÖREN

Üye : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

Üye : Prof. Dr. Yücel ERCAN

Üye : Doç. Dr. Şefaattin YÜKSEL

Üye : Y. Doç. Dr. Metin SALAMCI

Tarih : _____

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Burak AKGÜN

İKİ SERBESTLİK DERECELİ STABİLİZASYON PLATFORMUNUN POZİSYON KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)

Burak AKGÜN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2006

ÖZET

Bu çalışmada hidrolik pistonlar vasıtası ile iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformunun pozisyon kontrolü çalışılmış ve sistemin bağlı bulunduğu ortamın hareketine karşı üst tablanın sabit olması sağlanmaya çalışılmıştır. Durum geri beslemeli kontrol ve PID kontrolcü ile kontrol yöntemleri sistem üzerinde denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Matlab® programında Simulink ortamında modellenen sistemin, çalışma bölgesi boyunca güncelleşen denklemlerle lineer sistem modeli elde edilmiştir. İki serbestlik derecesi için de 0,003 rad'dan az açısal sapma ve 0,5 s'den az sürede yerleşim elde edilmiştir. Güncelleştirme işleminin PID kontrolde valf konum sinyalinde gürültüye neden olduğu ve sistem denklemlerinin güncelleme aralığı artırıldığında sistemin çıkışının zaman cevabında kötüleşmeye neden olduğu görülmüştür. Durum geri beslemeli kontrol ile PID kontrol karşılaştırıldığında da güncelleştime aralığı ile lineerleştirme işleminin valf sinyalinde gürültü etkisi yaratmasından dolayı durum geri beslemeli kontrolün daha uygun sonuç verdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : **914.1.091**
Anahtar Kelimeler : **Stabilizasyon, pozisyon kontrolü**
Sayfa Adedi : **97**
Tez Yöneticisi : **Prof. Dr. Mehmet EROĞLU**

POSITION CONTROL OF A TWO DEGREES OF FREEDOM STABILIZATION PLATFORM
(M.Sc. Thesis)

Burak AKGÜN

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
June 2006

ABSTRACT

In this study, position control of a two degrees of freedom stabilization platform with hydraulic pistons has been examined and the upper table of the system has been expected to be stabilized against environmental movements. State feedback and PID control methods have been tested on the system and results were compared. Linearized model of the system that has been modeled in Matlab® Simulink was found by updating the equations around the working point. Angular deviation and settling time were found less than 0,003 rad and 0,5 s for both degree of freedoms. It was observed that updating operation causes noise at valve response in PID control and rising of updating interval causes the system time response getting worse. Finally it has been found that because of the noise effect of linearizing operation with updating interval, state feedback leads to better results according to the valve input signal, when compared with PID control.

Science Code : 914.1.091
Key Words : Stabilization, position control
Page Number: 97
Adviser : Prof. Dr. Mehmet EROĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve hiçbir bilgiyi eksik etmeyen değerli Hocam Prof. Dr. Mehmet EROĞLU' na, yüksek lisans öğrenimim sırasında çalışmalarımın aksamaması için bana her türlü kolaylığı sağlayan ve her ne kadar başvurulan kurumlarca sonuçlandırılmasa da projenin hayata geçirilmesi için olanaklar sunan "Mak Ticaret Ltd. Şti." Genel Müdürü Mehmet Ali KARATOKUŞ' a ve Genel Müdür Yardımcısı Murat YETKİN' e, gerek lisans gerek yüksek lisans olsun çalışmalarımı başarıyla tamamlamam için beraber gezip eğlenmek yerine çalışmam gerektiğini söylediğimde beni her zaman anlayışla karşılayan değerli arkadaşım Bircan TOPALOĞLU'na, hepsinden önemlisi tüm öğrenim hayatım boyunca hiçbir fedakarlığı ve çalışırken masamdan bol vitaminli meyveleri eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. MEKANİK SİSTEM 5

3. SİSTEM MODELLENMESİ 7

3.1. Mekanizmanın Modellenmesi 7

3.2. Hidrolik Pistonun Modellenmesi 10

3.3. Mekanik Sistemin Modellenmesi 16

4. SİSTEMİN LİNEERLEŞTİRİLMESİ 22

4.1. Alt Eksen Dinamik Denkleminin Lineerleştirilmesi 22

4.2. Üst Eksen Dinamik Denkleminin Lineerleştirilmesi 27

5. SİSTEMİN KONTROLÜ 32

5.1. Durum Geri Beslemeli Kontrol 34

5.2. PID Kontrol 65

5.3. Nonliner Model ile PID Kontrol 76

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 80

KAYNAKLAR 83

Sayfa

EKLER 85
EK-1 Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı 86
EK-2 PID kontrol : Matlab® programı 92

ÖZGEÇMİŞ 97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.1. Kontrol tiplerinin sistemin birim basamak zaman cevabı üzerine etkileri 66

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. İki eksenli stabilizasyon platformunun yapısı..... 6

Şekil 3.1. Tek serbestlik derecesi için mekanizma modelinin yandan görünüşü..... 7

Şekil 3.2. Tüm mekanizma modeli ve parametreler 7

Şekil 3.3. Hidrolik servo sistem 10

Şekil 3.4. Valf orifis alanı 11

Şekil 5.1. İki eksenli stabilizasyon platformu açık çevrim blok diyagramı 32

Şekil 5.2. Alt eksen için basamak giriş konum-zaman cevabı (lineer durum)..... 33

Şekil 5.3. Üst eksen için basamak giriş konum-zaman cevabı (lineer durum) 34

Şekil 5.4. Üst Durum geri beslemeli kontrol için blok diyagramı 35

Şekil 5.5. Alt eksene etkiyen bozucu açı girişi teta-1^{*} 41

Şekil 5.6. Üst eksene etkiyen bozucu açı girişi teta-2^{*} 41

Şekil 5.7. Alt eksenin 0,6 rad başlangıç açısına karşın durağan durumda lineerleştirilmiş modelinin bozucu olmadan konum zaman cevabı 42

Şekil 5.8. Üst eksenin 0,3 rad başlangıç açısına karşın durağan durumda lineerleştirilmiş modelinin bozucu olmadan konum zaman cevabı 43

Şekil 5.9. Aynı düzlemde konum-zaman cevaplarının gösterimi 43

Şekil 5.10. Alt eksende 0,6 rad başlangıç konumuyla bozucu giriş için durağan duruma göre lineerleştirilmiş modelin cevabı..... 44

Şekil 5.11. Üst eksende 0,3 rad başlangıç konumuyla bozucu giriş için durağan duruma göre lineerleştirilmiş modelin konum-zaman cevabı..... 45

Şekil 5.12. Aynı düzlemde konum-zaman cevaplarının gösterimi 45

Şekil 5.13. Alt eksenin durum geri beslemeli kontrolcü ile Matlab® Simulink benzetimi..... 47

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.14. Üst eksenin durum geri beslemeli kontrolcü ile Matlab® Simulink benzetimi 48

Şekil 5.15. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen konum-zaman cevabı 49

Şekil 5.16. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen hız-zaman cevabı 49

Şekil 5.17. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen konum-zaman cevabı 50

Şekil 5.18. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen hız-zaman cevabı 50

Şekil 5.19. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı 51

Şekil 5.20. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı 51

Şekil 5.21. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen konum-zaman cevabı 52

Şekil 5.22. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen hız-zaman cevabı 52

Şekil 5.23. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen konum-zaman cevabı 53

Şekil 5.24. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen hız-zaman cevabı 53

Şekil 5.25. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı 54

Şekil 5.26. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı 54

Şekil 5.27. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum-zaman cevabı 55

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.28. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen hız-zaman cevabı 56

Şekil 5.29. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum-zaman cevabı 56

Şekil 5.30. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen hız-zaman cevabı 57

Şekil 5.31. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum-zaman cevabı (ayrıntı)..... 57

Şekil 5.32. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum-zaman cevabı (ayrıntı) 58

Şekil 5.33. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı 58

Şekil 5.34. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı 59

Şekil 5.35. Değişik kutup noktası değerleri için alt eksen konum-zaman cevabı..... 60

Şekil 5.36. Değişik kutup noktası değerleri için üst eksen konum-zaman cevabı 61

Şekil 5.37. Güncelleme aralığı 0,025 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması 62

Şekil 5.38. Güncelleme aralığı 0,025 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması..... 62

Şekil 5.39. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması 63

Şekil 5.40. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması..... 64

Şekil 5.41. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen valf makarasının konum-zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması..... 64

Şekil 5.42. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen valf makarasının konum-zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması..... 65

Şekil 5.43. PID kontrolcü yapısı ve sisteme uygulanışı..... 67

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.44. Sistemin PID kontrolcü ile Matlab ® Simulink benzetimi 68

Şekil 5.45. Oransal kontrolün alt eksen konum zaman cevabına etkisi 69

Şekil 5.46. Oransal kontrolün üst eksen konum zaman cevabına etkisi 70

Şekil 5.47. K_p = 5 iken alt eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı..... 71

Şekil 5.48. K_p = 5 iken üst eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı 71

Şekil 5.49. K_p = 5 iken üst eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı..... 72

Şekil 5.50. K_p = 5 iken üst eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı..... 72

Şekil 5.51. K_p = 5, K_i =750, K_d = 250 iken alt eksenin PID kontrol ile konum – zaman cevabı..... 73

Şekil 5.52. K_p = 5, K_i =750, K_d = 85 iken üst eksenin PID kontrol ile konum – zaman cevabı..... 74

Şekil 5.53. K_p = 5, K_i =750, K_d = 250 iken alt eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı..... 75

Şekil 5.54. K_p = 5, K_i =750, K_d = 85 iken üst eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı..... 75

Şekil 5.55. Tek serbestlik derecesi için doğrusal olmayan sistem modeli ve PID kontrolcünün uygulanışı..... 76

Şekil 5.56. K_p = 5 ve K_i =750 iken alt eksenin PI kontrol ile konum – zaman cevabı (Nonlineer durum) 77

Şekil 5.57. K_p = 5 ve K_i =750, K_d = 250 iken alt eksenin PID kontrol ile Konum – zaman cevabı (Nonlineer durum)..... 78

Şekil 5.58. K_p = 5, K_i =750, K_d = 250 iken alt eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı (Nonlineer durum) 79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklama**
J	Polar atalet momenti, $Kg.m^2$
M	Kütle, Kg
θ	Açısal yerdeğiştirme, rad
$\dot{\theta}$	Açısal hız, rad/s
$\ddot{\theta}$	Açısal ivme, rad/s^2
c	Jirasyon yarıçapı, m
l	Moment kolu, m
$\mathbf{B_t}$	Viskoz rotasyon sürtünme katsayısı, N.m.s/rad
$\mathbf{B_p}$	Viskoz lineer sürtünme katsayısı, N.s/m
$\mathbf{A_p}$	Piston tesir alanı, m^2
P	Basınç, MPa
u	Giriş sinyali, m
y	Piston konumu, m
q	Kütlesel debi, kg/s
$\mathbf{c_d}$	Valf sabiti, kg/ m^3
W	Sızıntı katsayısı, m.s
ρ	Yoğunluk, kg/m^3
g	Yerçekimi ivmesi, m/s^2
L	Lagrange fonksiyoneli
$\mathbf{T^*}$	Kinetik ko-enerji
V	Potansiyel enerji
f	Fonksiyon
L	Lagrange fonksiyoneli

Simgeler	**Açıklama**
$\mathbf{K_p}$	Oransal kontrol kazancı
$\mathbf{K_I}$	İntegral kontrol kazancı
$\mathbf{K_d}$	Türevsel kontrol kazancı

Kısaltmalar	**Açıklama**
PID	Oransal-Integral-Türevsel Kontrol
PI	Oransal-Integral Kontrol
PD	Oransal-Türevsel Kontrol
cos	Kosinüs
sin	Sinüs

1. GİRİŞ

Otomatik kontrol, mühendisler için artık vazgeçilmez bir konudur. Eski çağlardan beri insanların kontrol edebilme isteği artık bir ihtiyaca dönüşmüş ve olmazsa olmazları arasında yerini almıştır. En basitinden günlük hayatta, belki hiç akla gelmese de, kullanılan alet ve makinelerin birçoğunda otomatik kontrol kullanılmaktadır. Asıl ilgilenilen konu ise kontrol sistemlerinin endüstri içindeki kullanım alanları ve bunların hangi yöntemlerle nasıl uygulandığı ve geliştirildiğidir.

Kontrol sistemlerinin uygulama alanları çok geniştir. Tasarlanan sistemlerden belirli bir davranışı göstermesi beklenmektedir. Beklenen davranışa göre de farklı tipte kontrol yöntemi uygulanmaktadır. Verilen referans girişe karşılık çıkışın aynı davranışı göstermesi beklendiği zaman sistemin servo özelliğinin incelenmesi gerektiği gibi, sistemin dış etkilere karşı tepkisizliğini görmek için de regülatör özelliğine bakılır. Sistemler de bu tip beklentilere göre farklı disiplinlerle kontrol edilebilir. Önceleri transfer fonksiyonu yaklaşımı ile çözülen kontrol sistemleri problemleri, şimdilerde durum değişkenleri yöntemi ile daha düzgün bir biçimde kontrol edilebilmektedir. Transfer fonksiyonu yaklaşımında oransal (Proportional), oransal-türevsel (Proportional-Derivative → PD) ve oransal-integral-türevsel (Proportional-Integral-Derivative→ PID) kontrolcüler uygulanabildiği gibi faz ilerlemeli (Phase Lead), faz gerilemeli (Phase Lag) ve faz ilerlemeli-gerilemeli (Lead-Lag) kontrolcüler de uygulanabilmektedir. Durum değişkenleri yaklaşımında ise kutup yerleştirme ve hatanın integrali ile kontrol yöntemleri mevcuttur [1].

Kontrol sistemlerinde kullanılan kontrol araçları farklı tiplerde olabilir. Bilgisayarlarda sistemlerin kontrolü elektronik ortamda yapıldığı gibi tamamen mekanik olarak çalışan kontrol sistemleri de mevcuttur. Kontrol araçlarının seçiminde sistemlerin ihtiyaçları ve yapısı da düşünülmelidir. Temel kontrol tipleri olarak hidrolik kontrol, pnömatik kontrol ve elektronik kontrol sıralanabilir. Bunlar kontrol sistemlerinde farklı disiplinlerde uygulanabilirler.

Bu çalışmada hidrolik pistonlar kullanıldığından bunun avantajlarını ve dezavantajlarını belirtmekte fayda vardır.

Avantajları:

1- Büyük yüklerde kullanılabilir.
2- Mekanizma durdurduğunda belirli pozisyonda kilitli durabilir (rijitliği yüksektir).
3- Girişlere karşılık hızlı cevap verebilir.

Dezavantajları:

1- Hidrolik sistem pahalıdır.
2- Bakım problemi vardır. Toza, kire karşı önlem almak gerekir.
3- Kullanılan akışkan için geri dönüş hattına ihtiyaç vardır.
4- Dönel eklemlerde yüksek hız elde edilememektedir.
5- Hidrolik akışkanlar yanıcıdır.

Endüstride stabilizasyon, oldukça gerekli ve birçok alanda çalışılan bir konudur. Bu alanda yapılan çalışmalarda sistemlerin dış etkenlere karşı tepkisizliği kontrol edilmektedir [2, 3, 4, 5]. Balkan, Başçuhadar ve Gürcan (2001) belirli bir parkurda ilerleyen silahlı bir aracın dış hareketine karşı namlusunun belirli bir pozisyonda stabilizasyonu sağlamak için hidrolik servo kontrol kullanmışlardır [6, 7, 8]. Bir diğer stabilizasyon çalışması olarak da Hatip (1994), Stewart polatformu biçiminde altı serbestlik dereceli bir stabilizasyon platformu tasarlamış ve üzerine yerleştirilen roket lançerinin, dış bozucu girişlere karşı stabilize şekilde kalmasını sağlamıştır [9].

Hidrolik kontrolün uygulanmasında, kullanılan valflerin de önemleri büyüktür. Valf seçimi kontrol sistem tasarımında çok önemlidir. Ayrıca bu önemin yanında valfin tasarımı da sistemde istenilen performansı gösterebilmesi açısından çok önemlidir. Değişik tiplerde tasarlanan valfler kontrol aygıtı olarak yaygınca kullanılmaktadır. Açık merkezli, kapalı merkezli, 3 yollu, 4 yollu ve kanat-nozul tipli tasarımlar valflerde değişik ihtiyaçlara göre kullanılmaktadır. Bunların tasarımları ve seçimleri

de ayrı uzmanlık ve çalışma konusunu teşkil etmektedir. Tasarlanan sisteme göre yükün yer eğrileri çıkartılıp maksimum gerekli güç hesaplanabilir ve valf seçimleri yapılabilir [10].

Bu çalışmada iki serbestlik dereceli bir sistemin üst tablasının stabilizasyonu çalışılmıştır. Tek serbestlik derecesinde kontrol, kullanıldığı yere göre sistemin ihtiyacını karşılayamayabilir. Örneğin yukarda verilen namlu örneğinde namlunun bahsedilen eksenden başka gövdenin sağa sola yaptığı hareketlerden dolayı da ikinci eksenin stabilize edilmesi gerekmektedir. Başka bir örnek verilirse, gemi üzerinde kullanılan bir sistemin yere göre yatay kalması istenebilir. Sistemin yatay kalmasını istemek demek, geminin yaptığı ve bu isteği bozan tüm hareketlerin sisteme bozucu olarak alınacağı anlamına gelir. Yani gemiye çarpan dalgaların gemiyi bir eksende çevirmesi sistemin pozisyonunu bozabilir. Aynı şekilde geminin rotası nedeni ile yaptığı hareketler de bu pozisyonu bozabilir. İşte bu çalışma böyle bir sistem düşünülerek yapılmış ve iki eksenin birlikte çalışması durumunda üst tablanın sabit kalması istemine göre kontrol tipleri uygulanmıştır [7, 8].

Kontrol sistemlerinin tasarlanmasında dinamik modellemenin de önemi büyüktür. Sistemin dinamik davranışını matematiksel olarak modellemek için ileri dinamik yöntemleri kullanılabilir. Hamilton Prensibi [1] ve Lagrange Denklemleri yöntemleri, ileri dinamikte sistemlerin dinamik modellerinin matematiksel olarak ifade edilmesinde sıkça kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemlerle elde edilen dinamik denklemler her ne kadar nonlineer olsa da yine kullanılan belirli yöntemlerle çalışma bölgesi sınırlarında bu denklemler lineerleştirilerek istenilen kontrol mantığı ile rahatça çözebilecek duruma gelinebilmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde iki eksenli stabilizasyon platformu için düşünülen mekanik sistem tanıtılmıştır. Mekanizma yapısı ve mekanizmanın hareket şekli bu bölümde incelenmiştir.

[1] Hamilton prensibine göre sistemin kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkının integrali bir t_1 anından bir t_2 anına giderken sıfıra gider.

Üçüncü bölümde sistemin modellenmesi yapılmıştır. Sistem modellenmesi dinamik denklemlerle ifade edilmiştir. Önce mekanizmanın modeli incelenmiş, hangi elemanlardan oluştuğu gösterilmiştir. Kontrol için kullanılacak olan hidrolik sistemin

de modeli dinamik denklemlerle ifade edildikten sonra mekanik sistemin dinamik denklemleri elde edilmiştir. Son olarak da bu denklemler birleştirilerek sistemi ifade eden dinamik denklemler bulunmuştur.

Dördüncü bölümde sistemin lineer olmayan dinamik denklemlerini lineerleştirmek için çalışmalar yapılmıştır. Lineer kontrol yöntemleri, lineer olmayan sistemlere uygulanamadığından sistemin çalışma noktası boyunca denklemler lineerleştirilmiş ve bu işi yapacak bir bilgisayar programı hazırlanmıştır.

Çalışmanın beşinci bölümünde, elde edilmiş olan sistem dinamiğini ifade eden denklemler kullanılarak çeşitli kontrol disiplinleri denenmiştir. Kontrol edilmemiş sistemin verdiği cevaba göre ilk olarak durum değişkenlerinin geri beslemesiyle yapılan durum geri beslemeli kontrol uygulanmış ve çeşitli geri besleme kazançları denenerek sistemden alınan cevabı nasıl etkilediği gözlemlenmiştir. Daha sonra PID kontrol uygulamasına geçilmiş, önce oransal kontrol denenip peşine integral ve türevsel kontrolün sisteme nasıl etki ettiği gözlemlenmiştir. PID kontrol, nonlineer sistem modeli için de uygulanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tüm bu kontrol sistemi tasarımları Matlab® programı kullanılarak Simulink ile modellenmiş ve grafiklerle sistem cevapları gösterilmiştir.

2. MEKANİK SİSTEM

Düşünülen iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformu 3 ana kısımdan meydana gelmektedir :

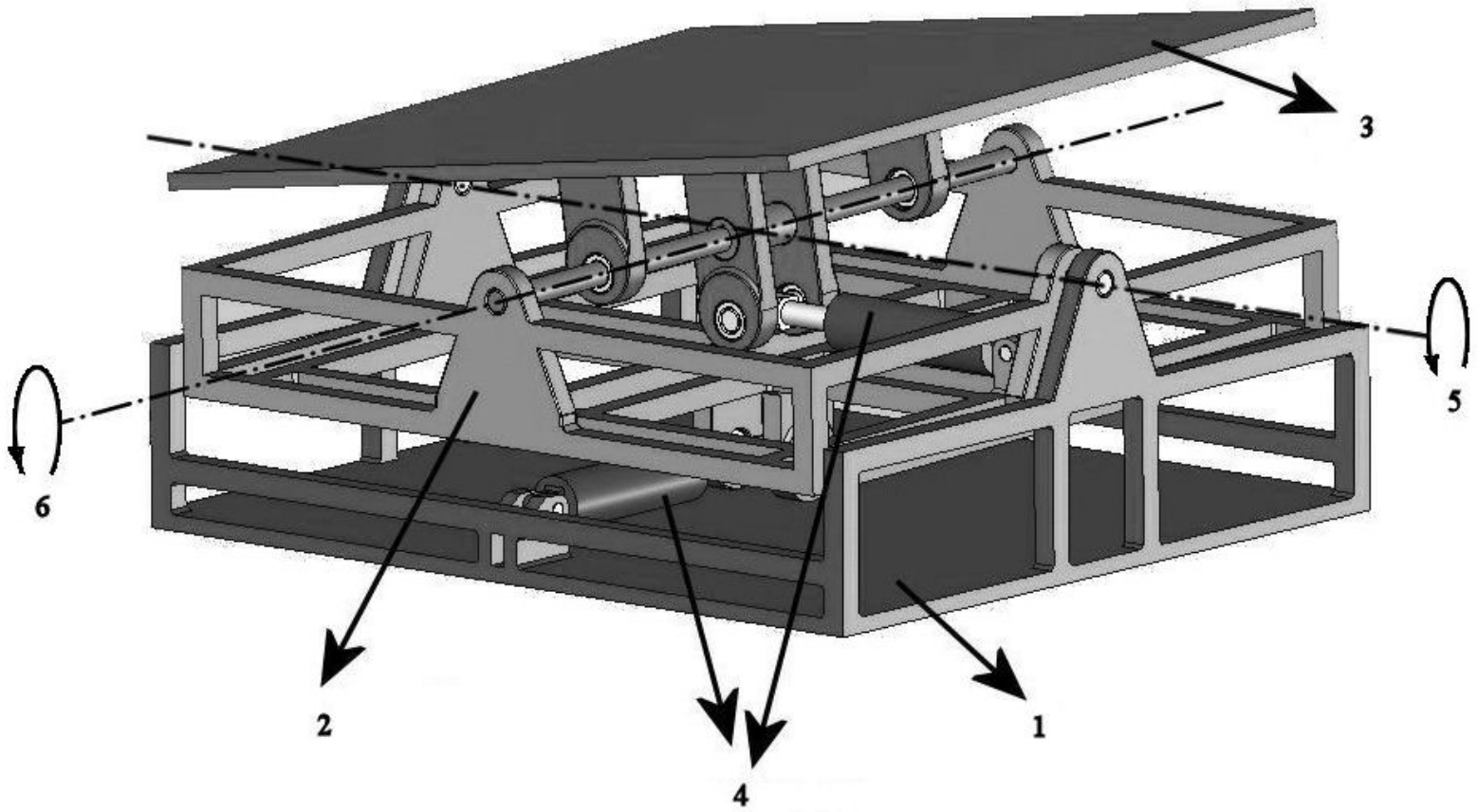
1- Alt taban, kullanılacağı yerdeki bağlantı tabanıdır.

2- Ara tabla, sistemin birinci serbestlik derecesini oluşturan eksende hareket eden tabladır.

3- Üst tabla, birinci serbestlik derecesindeki ara tablaya, ona dik eksende bağlı ve hem birinci hem ikinci eksenin hareketini alan en üst tabladır. Stabilize halde kalması beklenen yüzeydir.

Mekanik olarak sistem elemanlarının hareketleri ise hidrolik pistonlar sayesinde sağlanır. Her iki eksenin hareketini sağlamak için iki adet hidrolik piston düşünülmüştür. Eksenlerdeki dönme hareketleri, belirli moment kollarıyla bu pistonlar sayesinde tablalara iletilir ve hareket sağlanmış olur. Her iki hidrolik pistonun arka bağlantı mafsalları da hareket ettirdikleri tablanın bir önceki tablasına bağlanmıştır. Üst tabla, iki dönme ekseninde de hareket ettiği için bu eksenlerin birbiri ile uyumlu olması açısından çakışmaları sağlanmıştır. Şekil 2.1.'de iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformu için düşünülen mekanik tasarım görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi birinci eksen ile ikinci eksen birbirini kesmektedir. Böylece üst tablanın her iki eksene göre de dönüş yarıçapı aynıdır.

Şekilde görülen sistemde tasarım ayrıntılarına yer verilmemiştir. Bu çalışma teorik bir çalışma olduğundan imalat ayrıntıları çalışma dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla sistemde valfler, akışkan hortumları, profil ayrıntıları, bağlantı ayrıntıları, hidrolik piston ayrıntıları ve diğer tüm ayrıntılar kapsam dışı bırakılmış, sitemin nasıl çalıştığını gösteren minimum görsel kriterler eklenerek çalışmaya katılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere arka mafsalı alt tablaya bağlı olan alttaki piston ara tablayı hareket ettirmektedir. Arka mafsalı ara tablaya bağlı olan piston da üst tablayı hareket ettirmektedir. Böylece iki eksende de hareket sağlanarak iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformu elde edilmiş olunur.



Şekil 2.1. İki eksenli stabilizasyon platformu sistem yapısı

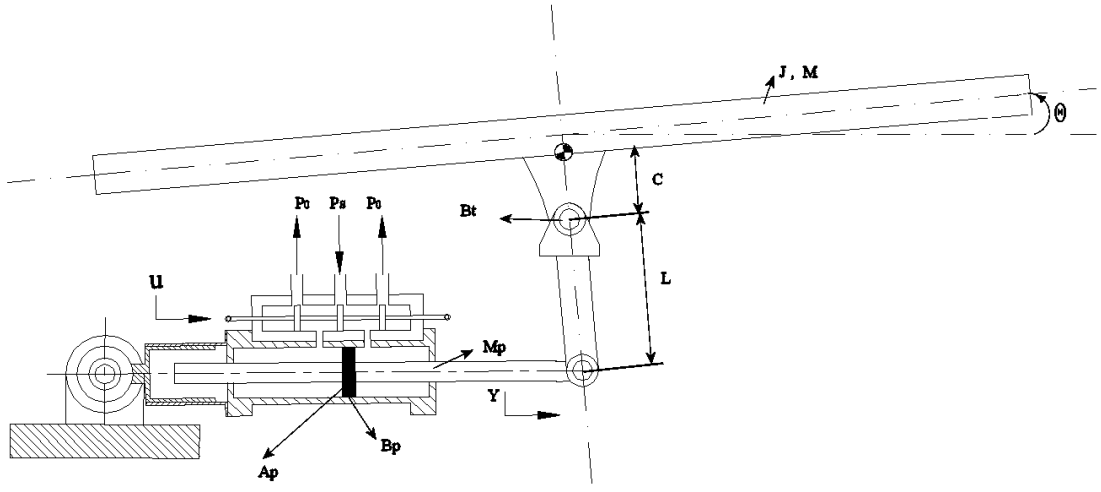
1. Alt Tabla 2. Ara Tabla 3. Üst Tabla 4. Hidrolik Pistonlar 5. Birinci Dönme Ekseni 6. İkinci Dönme Ekseni

3. SİSTEMİN MODELLENMESİ

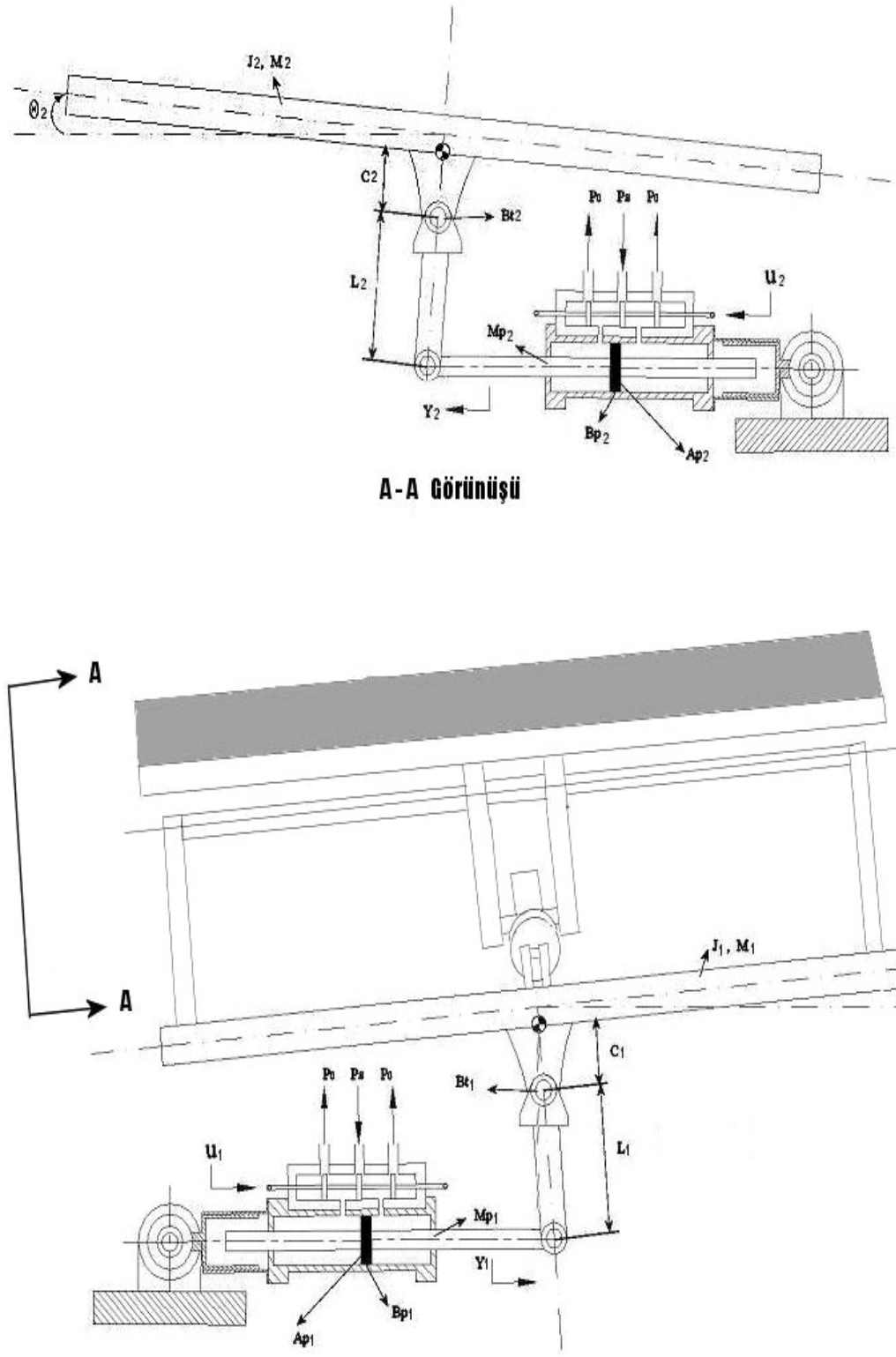
3.1. Mekanizmanın Modellenmesi

Sistemin modellenmesinden önce hareketi belirleyen parametrelerin tanıtılmasında yarar vardır. Bu parametreler, dinamik denklemlerin çıkarılmasında direkt olarak kullanılacaktır ve sitemin hareketinin tanımlayıcı unsurlar olacaktır.

Önceki bölümde iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformunun mekanik olarak modeli verilmişti. Burada ise mekanizma modeli çıkarılacaktır. Sistem, birbirine dik eksenli olarak çalışan iki platformdan oluştuğundan aynı düzlemde tüm sistemin mekanizma modelini göstermek mümkün değildir. Bu nedenle tek serbestlik derecesini simgeleyen mekanizma modeli gösterilecek ve diğer eksen de bu model üzerinden çalışılacaktır. Gösterimde parametrelerin indisleri gösterilmeyecek, ancak denklemlere geçildiğinde eksenleri ayırt etmek için bu indisler parametrelere eklenecektir. Şekil 3.1'de sistemin tek ekseni için mekanizma modelinin yandan görünüşü görülmektedir.



Şekil 3.1 Tek serbestlik derecesi için mekanizma modelinin yandan görünüşü



Şekil 3.2 Tüm mekanizma modeli ve parametreler

Şekil 3.2'de verilen model genel olarak her iki ekseni de göstermektedir ve parametrelerde alt veya üst indisler belirtilmiştir. Parametrelerin tanımladığı değerler şunlardır (eksen indisleri belirtilmeksizin) :

J : Hidrolik pistonun hareket ettirdiği tablanın döndüğü eksene göre polar atalet momenti (kg m^2)

M : Hidrolik pistonun hareket ettirdiği tablanın döndürdüğü kütle (kg)

θ : Her eksendeki açısal yer değiştirme (rad)

c : Dönme ekseni ile dönen kütlenin ağırlık merkezi arası uzaklık (m)

l : Hidrolik pistonun tabla moment koluna bağlandığı mafsal ile dönme ekseni arasındaki uzaklık (m)

B_t : Tablanın döndüğü mafsaldaki viskoz sürtünme (Nms/rad)

M_p : Piston kütlesi (kg)

B_p : Piston ile silindir arasındaki viskoz sürtünme (Ns/m)

A_p : Piston tesir alanı (m^2)

P_s : Kaynak basıncı (MPa)

P_0 : Geri dönüş hattı basıncı (MPa)

u : Valf giriş sinyali (Sistemde giriş sinyali) (m)

y : Piston konumu (m)

Burada belirtilen parametrelerin dışında sistemin kinematik çözümünde pistonun yatayla yaptığı açının da bilinmesi gerekir. Ancak sistemin hareketi sırasında pistonun yatayla yaptığı açı çok küçük değerdedir. Dolayısıyla pistonun, arka mafsalına göre yaptığı çok küçük dönme hareketinin ortaya çıkardığı atalet kuvveti ihmal edilebilir [11, 12].

Piston ile tabla arasındaki kinematik denklem şöyle ifade edilebilir :

$$y = l \sin\theta \tag{3.1}$$

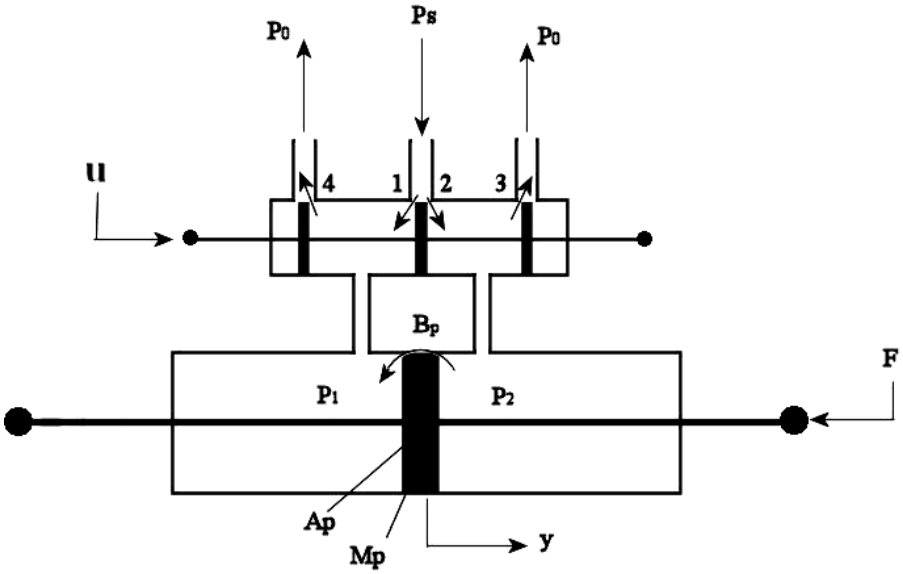
Bu denklem dinamik modelin çıkarılması sırasında hareketi tanımlayacaktır.

3.2. Hidrolik Pistonun Modellenmesi

Sistemin genel matematik modelini çıkarmadan önce kendi içinde ayrı bir sistem olan hidrolik valf-piston ikilisinin dinamik denklemini çıkartmakta fayda vardır. Ogata, K., hidrolik servo sistemin dinamik modeli üzerine denklem çıkarmış ve lineerleştirilmiş halde ele almıştır [13]. Hidrolik servo sistem için çıkarılan denklemler de yine Ogata, K.'nun hazırladığı denklemlerdir. Keleş ve Ercan (2000) çalışmalarında ucuz olan selenoid valfler ile de servo sistemler oluşturulabileceğini belirtmiş ve şöyle demişlerdir [14].

"Puls genişliği modülasyonu, elektronikte özellikle haberleşme alanında ve motorların hız kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Yükün düşük hızlarda sürüldüğü hidrolik sistemlerde karşılaşılan tutukluk ve hız düşmesi problemlerine çözüm getirdiği ve bilgisayar uygulamalarına uygun olduğu için hidrolik kontrolde de kullanımı gündeme gelmiştir. Bu teknik sayesinde, servo valfa göre daha ucuz bir valf olan, selenoid varflerle servo sistemler oluşturulabilmektedir."

Şekil 3.3'de iki serbestlik dereceli stabilizasyon platformunda kullanılan hidrolik servo sistemin mekanizması görülmektedir [13, 15].



Şekil 3.3. Hidrolik servo sistem

P_s : Kaynak basıncı (MPa)

P_0 : Dönüş hattı basıncı (MPa)

P_1, P_2 : Silindir taraflarındaki basınçlar (MPa)

u : Valf makarasının pozisyonu (m)

y : Pistonun pozisyonu (m)

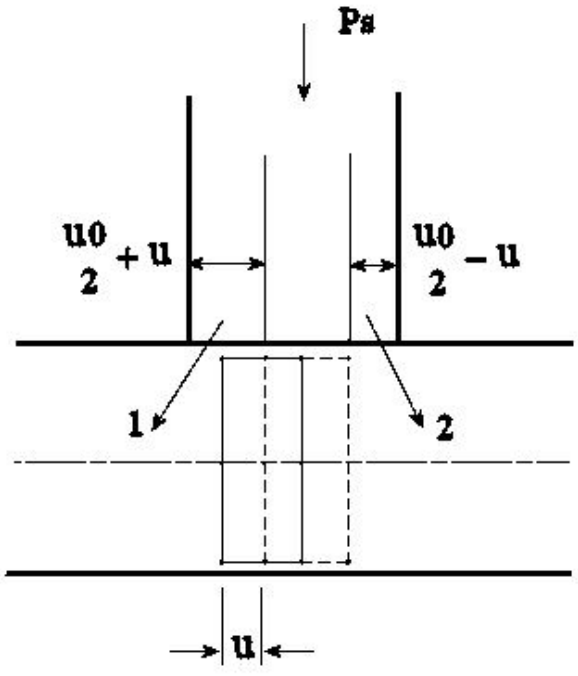
B_p : Piston ile silindir arasındaki viskoz sürtünme (N s/m)

A_p : Piston tesir alanı (m^2)

M_p : Piston kütlesi (kg)

F : Pistona gelen kuvvet (N)

Şekil 3.3'de de görüldüğü gibi 4 yollu valf kullanılmaktadır. Tork motoru tarafından valf makarası sola doğru sürüldüğünde 2 numaralı orifis açılır ve hidrolik silindirin sağ tarafı basınçlı yağ ile dolar. Silindirin diğer tarafındaki yağın basıncı ise çok düşük mertebededir. Silindirin iki tarafındaki basınç farkından dolayı piston sola doğru hareket eder. Şekil 3.4'te valf orifis alanının büyütülmüş hali görülmektedir [13].



Şekil 3.4. Valf orifis alanı

Bu tip bir valf yapısı ile çok büyük güçler küçük bir pilot valf ile küçük güçler kullanılarak kontrol edilebilmektedir. Valf denklemleri çıkarılırken kullanılan akışkan sıkıştırılamaz kabul edilecek ve valfteki sürtünme kuvveti ile valf makarasının ataleti ihmal edilecektir. Orifis alanları da makara deplasmanı ile doğru orantılıdır. Orifis alanları, port numaraları ile adlandırılacaktır. Dolayısıyla orifisten geçen debiler de yine port numaraları ile adlandırılacaktır. Valf simetrik olduğundan 1 ve 3 numaralı portlar ile 2 ve 4 numaralı portların orifis alanları eşittir.

$$A_1 = A_3 = w\left(\frac{u_0}{2} + u\right) \tag{3.2}$$

$$A_2 = A_4 = w\left(\frac{u_0}{2} - u\right) \tag{3.3}$$

$$q_1 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\left(P_s - P_1\right)\right)} \tag{3.4}$$

$$q_2 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\left(P_s - P_2\right)\right)} \tag{3.5}$$

$$q_3 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\left(P_2 - P_0\right)\right)} = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\frac{2P_2}{\rho}} \tag{3.6}$$

$$q_4 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\left(\frac{2}{\rho}\left(P_1 - P_0\right)\right)} = c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} \tag{3.7}$$

$$q = q_1 - q_4 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_s - P_1\right)} - c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} \tag{3.8}$$

$$q = q_3 - q_2 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\frac{2P_2}{\rho}} - c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_s - P_2\right)} \tag{3.9}$$

$q_1 = q_3$ ve $q_2 = q_4$ (Sıkıştırılamaz akışkan)

Dolayısıyla buradan ;

$P_s - P_1 = P_2$ yada

$P_s = P_1 + P_2$ elde edilir. (3.10)

Silindirin iki tarafı arasındaki basınç farkı yük basıncını oluşturur. Buradan ;

$$P_y = P_1 - P_2 \tag{3.11}$$

elde edilir. Bu denklemden de piston alanının iki tarafında kalan basınçlar da elde edilebilir.

$$P_1 = \frac{P_s + P_y}{2} \tag{3.12}$$

ve

$$P_2 = \frac{P_s - P_y}{2} \tag{3.13}$$

elde edilir.

Yukarıda elde edilen eşitliklerden debi denklemleri P_s ve P_y cinsinden yazalabilir. Eş. 3.8'de bu değerler yerine koyulduğunda aşağıdaki yeni denklem elde edilir.

$$q = q_1 - q_4 = c_d w\left(\frac{u_0}{2} + u\right)\sqrt{\frac{P_s - P_y}{\rho}} - c_d w\left(\frac{u_0}{2} - u\right)\sqrt{\frac{P_s + P_y}{\rho}} = f\left(u, P_y\right) \tag{3.14}$$

Lineer olmayan bu denklemin, $u = \tilde{u}$, $P_y = \tilde{P}_y$ ve $q = \tilde{q}$ noktalarında lineerleştirilmesi gerekmektedir.

$$q - \tilde{q} = a(u - \tilde{u}) + b(P_y - \tilde{P}_y) \tag{3.15}$$

Burada ;

$\tilde{q} = f(\tilde{u}, \tilde{P}_y)$ ve

$$a = \left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_{u=\tilde{u}, P_y=\tilde{P}_y} = c_d w \sqrt{\frac{P_s - \tilde{P}_y}{\rho}} + c_d w \sqrt{\frac{P_s + \tilde{P}_y}{\rho}} \tag{3.16}$$

$$b = \left.\frac{\partial f}{\partial P_L}\right|_{u=\tilde{u}, P_y=\tilde{P}_y} = -\left[\frac{c_d w}{2\sqrt{\rho}\sqrt{P_s - P_y}}\left(\frac{u_0}{2} + \tilde{u}\right) + \frac{c_d w}{2\sqrt{\rho}\sqrt{P_s + P_y}}\left(\frac{u_0}{2} - \tilde{u}\right)\right] \tag{3.17}$$

Eş.3.16 ve Eş. 3.17'deki a ve b katsayıları valf katsayılarıdır. Çalışma bölgesi küçük aralıkta ve $\tilde{u} = 0$, $\tilde{P}_y = 0$ ve $\tilde{q} = 0$ olduğundan aşağıdaki lineerleştirilmiş denklem elde edilir.

$$q = K_1 u - K_2 P_y = f(u, P_y) \tag{3.18}$$

Burada K_1 ve K_2 aşağıda verilmiştir.

$$K_1 = 2c_d w \sqrt{\frac{P_s}{\rho}} > 0 \tag{3.19}$$

$$K_2 = 2c_d w \sqrt{\frac{2}{\rho}} \frac{u_0}{4\sqrt{2P_s}} > 0 \tag{3.20}$$

Debi iki parça halinde yazılırsa;

$$q = q_y + q_s \quad \text{olur.} \tag{3.21}$$

Burada ;

q_y = Yük debisi (kg/s)
q_s = Sızıntı debisi (kg/s)

Hidrolik akışkan sıkıştırılamaz kabul edildiğinden sıkıştırılabilirlik debisi hesaba katılmamıştır. Dolayısıyla denklemlerde bu iki debi hesaba katılacaktır. q_y *ve* q_s için debi denklemleri yazılacak olursa aşağıdakiler elde edilir.

$$q_y = A_P \rho \frac{dy}{dt} \tag{3.22}$$

Burada A_p piston kesit alanı (m^2), ρ akışkan yoğunluğu (kg/m^3) ve dy (m) piston deplasmanıdır.

$$q_s = WP_y \tag{3.23}$$

Burada W sistemdeki sızıntı katsayısıdır. Yük debisi ve sızıntı debisi denklemleri Eş. 3.21'de yerlerine koyulduğunda ;

$$q = A_p \rho \frac{dy}{dt} + WP_y \qquad \text{denklemi elde edilir.} \tag{3.24}$$

Bu denklem Eş. 3.18'te yerine konulduğunda aşağıdaki halini alır.

$$q = K_1 u - K_2 P_y = A_p \rho \frac{dy}{dt} + WP_y \tag{3.25}$$

$$A_p \rho \frac{dy}{dt} + (W + K_2) P_y = K_1 u \tag{3.26}$$

Eş. 3.26 hidrolik sistemin dinamik denklemi olup burada u sistemin girişi ve $\frac{dy}{dt}$ de sistemin çıkışıdır [13].

3.3. Mekanik Sistemin Modellenmesi

Bu kısımda daha önce Şekil 3.1'de modeli verilen mekanizmanın dinamik modeli çıkarılacaktır. Burada söz konusu sistem hidrolik pistonun hareket ettirdiği mekanizmadır. Şekil 2.1.'den de görüleceği üzere alttaki piston ara tablayı hareket ettirmektedir. Ara tablanın üzerinde de aynı sistem bulunmaktadır, ancak ara tablaya bağlı piston da üst tablaya verdiği hareketin yanında ara tablanın hareketinden de etkilenir. Dolayısıyla üst tablanın hareketi iki pistonun da etkisi ele alınarak bulunacaktır.

Sistemin dinamik denklemi bulunurken Lagrange Denklemleri kullanılacaktır. Daha sonra denklem belirli çalışma bölgeleri için lineerleştirilecektir. Dinamik modeller hazırlanırken alt ve üst sistemi birbirinden ayırmak için "1" ve "2" numaralı alt indisler kullanılacaktır. Bu indisleri kullanarak sistemin kinetik koenerji ve potansiyel enerjisi aşağıdaki gibi bulunur. Bunlar da Lagrange fonksiyonelinde yerine konulur.

Lagrange fonksiyoneli ;

$$L = T^* - V \tag{3.27}$$

Kinetik ko-enerji ;

$$T^* = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_{p1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2\theta_1 + \frac{1}{2} M_{p2} \left[\left(l_2 \dot{\theta}_1 \cos\theta_1 \right)^2 + \left(l_2 \dot{\theta}_2 \cos\theta_2 \right)^2 \right] \tag{3.28}$$

Potansiyel Enerji ;

$$V = -M_1 g(l_1 + c_1)\cos\theta_1 - M_2 g[(l_2 + c_2)\cos\theta_1 + (l_2 + c_2)\cos\theta_2] \tag{3.29}$$

Eş. 3.28 ve Eş. 3.29 Lagrange fonksiyonelinde yerine konulursa aşağıdaki halini alır.

$$L = \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} M_{p1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \cos^2\theta_1 + \frac{1}{2} M_{p2}\left[\left(l_2 \dot{\theta}_1 \cos\theta_1\right)^2 + \left(l_2 \dot{\theta}_2 \cos\theta_2\right)^2\right] +$$

$$+ M_1 g(l_1 + c_1)\cos\theta_1 + M_2 g[(l_2 + c_2)\cos\theta_1 + (l_2 + c_2)\cos\theta_2] \tag{3.30}$$

Genelleştirilmiş koordinatlar θ_1 ve θ_2 'dir.

θ_1 için Lagrange denklemi:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = Q_1 \tag{3.31}$$

Burada Q_1, sisteme sadece bir $\delta\theta_1$ varyasyonu verildiğinde dış kuvvetler tarafından yapılan işin $\delta\theta_1$ varyasyonuna oranı olarak tanımlanabilir. Yani $\delta\theta_1$ varyasyonu boyunca uygulanan kuvvettir.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = J_1 \dot{\theta}_1 + M_{p1} l_1^2 \dot{\theta}_1 \cos^2\theta_1 + M_{p2} l_2^2 \dot{\theta}_1 \cos^2\theta_1 \tag{3.32}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \left(-\frac{1}{2} M_{p1} l_1^2 \dot{\theta}_1^2 - \frac{1}{2} M_{p2} l_2^2 \dot{\theta}_1^2\right)\sin 2\theta_1 - M_1 g(l_1 + c_1)\sin\theta_1 - M_2 g(l_2 + c_2)\sin\theta_1 \tag{3.33}$$

Eş. 3.32 ve Eş. 3.33, Eş. 3.31'de yerine konulur.

$$\left(J_1 + M_{p1} l_1^2 \cos^2\theta_1 + M_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_1\right)\ddot{\theta}_1 - \left(\frac{M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2}{2}\sin 2\theta_1\right)\dot{\theta}_1^2 +$$

$$+ M_1 g(l_1 + c_1)\sin\theta_1 + M_2 g(l_2 + c_2)\sin\theta_1 = Q_1 \tag{3.34}$$

$$Q_1 = \left(P_{y1} A_{p1} - B_{p1} \dot{y}_{p1} \right) l_1 \cos\theta_1 - B_{t1} \dot{\theta}_1$$

$$= \left(P_{y1} A_{p1} l_1 - B_{p1} l_1^2 \dot{\theta}_1 \cos\theta_1 \right) \cos\theta_1 - B_{t1} \dot{\theta}_1 \tag{3.35}$$

Eş. 3.35, Eş. 3.34'te yerine konulup P_y çekilirse denklem aşağıdaki halini alır.

$$P_{y1} = \left[\frac{J_1 + \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\cos^2\theta_1}{A_{p1} l_1 \cos\theta_1} \right] \ddot{\theta} + \left[\frac{B_{p1} l_1^2 \cos^2\theta_1 + B_{t1}}{A_{p1} l_1 \cos\theta_1} \right] \dot{\theta}_1$$

$$+ \left[\frac{M_1 g(l_1 + c_1) + M_2 g(l_2 + c_2)}{A_{p1} l_1 \cos\theta_1} - \frac{\left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\dot{\theta}_1^2}{A_{p1} l_1} \right] \sin\theta_1 \tag{3.36}$$

Bu yük basıncı denklemi, Eş. 3.26'da yerine konulup düzenlendiğinde valfteki *u(t)* girişine karşılık çıkışı veren ifade elde edilir.

$$\ddot{\theta}_1 = \left[\frac{-A_{p1}^2 \rho l_1^2 \cos\theta_1}{(W + K_2)\left(J_1 + \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\cos^2\theta_1\right)} - \frac{B_{p1} l_1^2 \cos^2\theta_1 + B_{t1}}{J_1 + \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\cos^2\theta_1} \right] \dot{\theta}_1 -$$

$$- \left[\frac{M_1 g(l_1 + c_1) + M_2 g(l_2 + c_2) - \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\dot{\theta}_1^2 \cos\theta_1}{J_1 + \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\cos^2\theta_1} \right] \sin\theta_1$$

$$+ \left[\frac{K_1 A_{p1} l_1 \cos\theta_1}{(W + K_2)\left(J_1 + \left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)\cos^2\theta_1\right)} \right] u_1(t) \tag{3.37}$$

Eş. 3.37, ikinci eksenin hareketini sağlayan üst ekseni de ilk eksende döndüren sistemin, yani komple alt sistemin dinamik denklemidir ve görüldüğü gibi lineer değildir.

θ_2 için Lagrange denklemi:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}\right)-\frac{\partial L}{\partial \theta_2}=Q_2 \tag{3.38}$$

Burada Q_2, sisteme sadece bir $\delta\theta_2$ varyasyonu verildiğinde dış kuvvetler tarafından yapılan işin $\delta\theta_2$ varyasyonuna oranı olarak tanımlanabilir. Yani $\delta\theta_2$ varyasyonu boyunca uygulanan kuvvettir.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2}=J_1\dot{\theta}_2+M_{p2}l_2^2\dot{\theta}_2\cos^2\theta_2 \tag{3.39}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2}=-M_{p2}l_2^2\dot{\theta}_2^{\,2}\sin\theta_1\cos\theta_2-M_2g\left(l_2+c_2\right)\sin\theta_2 \tag{3.40}$$

Eş. 3.39 ve Eş. 3.40, Eş. 3.38'de yerine konulur.

$$\left(J_2+M_{p2}l_2^2\cos^2\theta_2\right)\ddot{\theta}_2+\left[M_2g\left(l_2+c_2\right)-M_{p2}l_2^2\dot{\theta}_2^{\,2}\cos\theta_2\right]\sin\theta_2=Q_2 \tag{3.41}$$

$$Q_2=\left(P_{y2}A_{p2}-B_{p2}\dot{y}_{p2}\right)l_2\cos\theta_2-B_{t2}\dot{\theta}_2$$

$$=\left(P_{y2}A_{p2}l_2-B_{p2}l_2^2\dot{\theta}_2\cos\theta_2\right)\cos\theta_2-B_{t2}\dot{\theta}_2 \tag{3.42}$$

Yine bu yük basıncı denklemi, Eş. 3.26'da yerine konulup düzenlendiğinde valfteki *u(t)* girişine karşılık çıkışı veren ifade elde edilir.

$$\ddot{\theta}_2 = \left[\frac{-A_{p2}^2 \rho l_2^2 \cos\theta_2}{(W+K_2)(J_2 + M_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_2)} - \frac{B_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_2 + B_{t2}}{J_2 + M_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_2} \right] \dot{\theta}_2 -$$

$$\left[\frac{M_2 g(l_2 + c_2) - M_{p2} l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \cos\theta_2}{J_2 + M_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_2} \right] \sin\theta_2 + \left[\frac{K_1 A_{p2} l_2 \cos\theta_2}{(W+K_2)(J_2 + M_{p2} l_2^2 \cos^2\theta_2)} \right] u_2(t) \tag{3.43}$$

Eş. 3.43, ikinci eksenin hareketini sağlayan üst eksenin dinamik denklemidir ve görüldüğü gibi lineer değildir.

Bulunan denklemlerden sonra sistem elemanlarının sayısal değerleri yerlerine konularak son halleri elde edilebilir. Lineer olmayan bu denklemlerin son halleri kullanılarak da lineerleştirme çalışmaları yapılacaktır. Sayısal değerler aşağıdaki gibidir.

$M_1 = 255\,\text{kg}$	$M_2 = 180\,\text{kg}$
$M_{p1} = 2{,}8\,\text{kg}$	$M_{p2} = 2{,}8\,\text{kg}$
$J_1 = 26{,}25\,\text{kg m}^2$	$J_2 = 14\,\text{kg m}^2$
$B_{p1} = 40\,\text{N s/m}$	$B_{p2} = 40\,\text{N s/m}$
$B_{t1} = 4\,\text{kg m}^2/\text{s}$	$B_{t2} = 4\,\text{kg m}^2/\text{s}$
$A_{p1} = 0{,}0012\,\text{m}^2$	$A_{p2} = 0{,}0012\,\text{m}^2$
$c_1 = 0{,}078\,\text{m}$	$c_2 = 0{,}15\,\text{m}$
$l_1 = 0{,}28\,\text{m}$	$l_2 = 0{,}1\,\text{m}$
$W = 8{,}4\times10^{-12}\,\text{m s}$	$K_1 = 0{,}52\,\text{kg/m s}$
$K_2 = 2{,}595\times10^{-10}\,\text{m s}$	$\rho = 870\,\text{kg/m}^3$
$g = 9{,}81\,\text{m/s}^2$	

Alt sistemin dinamik denklemi;

$$\ddot{\theta}_1 = \left[\frac{-98{,}22\times10^{-6}\cos\theta_1}{70{,}3\times10^{-10}+66{,}61\times10^{-12}\cos^2\theta_1} - \frac{3{,}136\cos^2\theta_1+4}{26{,}25+0{,}247\cos^2\theta_1} \right]\dot{\theta}_1 -$$

$$-\left[\frac{1337-0{,}247\dot{\theta}_1^{\,2}\cos\theta_1}{26{,}25+0{,}247\cos^2\theta_1} \right]\sin\theta_1 + \left[\frac{0{,}000175\cos\theta_1}{70{,}3\times10^{-10}+66{,}61\times10^{-12}\cos^2\theta_1} \right]u_1(t) \qquad (3.44)$$

Üst sistemin dinamik denklemi;

$$\ddot{\theta}_2 = \left[\frac{-12{,}53\times10^{-6}\cos\theta_2}{\left(37{,}5\times10^{-10}+7{,}50\times10^{-12}\cos^2\theta_2\right)} - \frac{0{,}4\cos^2\theta_2+4}{14+0{,}028\cos^2\theta_2} \right]\dot{\theta}_2 -$$

$$\left[\frac{441{,}45-0{,}028\dot{\theta}_2^{\,2}\cos\theta_2}{14+0{,}028\cos^2\theta_2} \right]\sin\theta_2 + \left[\frac{0{,}0000624\cos\theta_2}{\left(37{,}5\times10^{-10}+7{,}50\times10^{-12}\cos^2\theta_2\right)} \right]u_2(t) \qquad (3.45)$$

4. SİSTEMİN LİNEERLEŞTİRİLMESİ

Mühendislik sistemlerinde ele alınan elemanlar genel olarak lineer olmayan davranışlar gösterirler. Bu elemanlar kullanılarak elde edilen dinamik denklemler de doğal olarak lineer değildir. Ancak otomatik kontrol mantığında bilinen ve sık kullanılan yöntemler lineer olmayan sistemlere uygulanamaz. Bu nedenle de tüm sistem tek nokta etrafında çalışıyormuş gibi düşünerek değil, anlık çalışma bölgelerinde yol boyunca sürekli güncelleştirilerek lineerleştirilir. Bir çalışma noktasında bilinen değerlere göre yapılan lineerleştirme işleminde o noktadan belirli küçük sapmalar dahilinde sistemin kontrolü yapılabilir. Çalışma bölgeleri güncellenerek yol boyunca lineerleştirme yapılarak sistem kontrol edilebilir. [16-17].

4.1. Alt Eksen Dinamik Denkleminin Lineerleştirilmesi

Lineerleştirme işleminden önce dinamik denklemin bir tarafı sıfır ve giriş sinyali katsayısı bir olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir.

$$f_1\left(\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, u_1\right) = 0 \tag{4.1}$$

$$\left[\frac{R_1}{\cos\theta_1} + R_2\cos\theta_1\right]\ddot{\theta}_1 + \left[R_3 + R_4\cos\theta_1 + \frac{R_5}{\cos\theta_1}\right]\dot{\theta}_1 +$$

$$+\left[\frac{R_6}{\cos\theta_1} - R_2\,\dot{\theta}_1^{\,2}\right]\sin\theta_1 - u_1(t) = f_1 = 0 \tag{4.2}$$

Burada;

$$R_1 = \frac{J_1\left(W + K_2\right)}{K_1 A_{p1} l_1} \tag{4.3}$$

$$R_2 = \frac{(W + K_2)\left(M_{p1} l_1^2 + M_{p2} l_2^2\right)}{K_1 A_{p1} l_1} \tag{4.4}$$

$$R_3 = \frac{A_{p1} \rho l_1}{K_1} \tag{4.5}$$

$$R_4 = \frac{B_{p1} l_1 (W + K_2)}{K_1 A_{p1}} \tag{4.6}$$

$$R_5 = \frac{B_{t1} (W + K_2)}{K_1 A_{p1} l_1} \tag{4.7}$$

$$R_6 = \frac{(W + K_2)[M_1 g(l_1 + c_1) + M_2 g(l_2 + c_2)]}{K_1 A_{p1} l_1} \tag{4.8}$$

şeklinde verilmektedir.

Eş. 4.2 çalışma noktasında da geçerli olacaktır. Çalışma noktası "$_0$" indisi ile gösterilirse bu noktada sistem denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\left[\frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2 \cos\theta_{10}\right]\ddot{\theta}_{10} + \left[R_3 + R_4 \cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}}\right]\dot{\theta}_{10} +$$

$$+\left[\frac{R_6}{\cos\theta_{10}} - R_2 \dot{\theta}_{10}^2\right]\sin\theta_{10} - u_{10} = 0 \tag{4.9}$$

Eş. 4.9'un sistem değişkenlerine göre kısmi türevleri alınırsa;

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial \ddot{\theta}_1}\right|_0 = \frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2 \cos\theta_{10} \tag{4.10}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_1}\right|_0 = R_3 + R_4 \cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}} - 2R_2 \dot{\theta}_{10} \sin\theta_{10} \tag{4.11}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial \theta_1}\right|_0 = \left(\frac{R_1 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}} - R_2 \sin\theta_1\right)\ddot{\theta}_{10} - \left(R_4 \sin\theta_{10} - \frac{R_5 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}}\right)\dot{\theta}_{10} +$$

$$+ \frac{R_6}{\cos^2\theta_{10}} - R_2\,\dot{\theta}_1^{\,2}\cos\theta_{10} \qquad (4.12)$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial u_1}\right|_0 = -1 \qquad (4.13)$$

bulunur. Taylor açılımından denklemler yerine konularak lineerleştirmeye devam edilir.

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial \ddot{\theta}_1}\right)_0 \delta\ddot{\theta}_1 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial \dot{\theta}_1}\right)_0 \delta\dot{\theta}_1 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial \theta_1}\right)_0 \delta\theta_1 + \left(\frac{\partial f_1}{\partial u_1}\right)_0 \delta u_1 = 0 \qquad (4.14)$$

Eş. 4.14'teki türevin sapmaları değerleri, durağan durumda çalışan sistemlerdeki gibi ele alınamaz. Durağan durumda çalışan sistemlerde çalışma noktasındaki türevler sıfır olacağından türevin sapması ile sapmanın türevi birbirine eşit olur. Ancak bu sistem durağan durumda çalışacak gibi lineerleştirilmeyecektir. Daha önceden de bahsedildiği gibi yol boyunca lineerleştirme yapılacak ve anlık olarak en uygun kontrol kazançları elde edilecektir. Durağan durum etrafında çalışmayacağı için türevin sapması ile sapmanın türevi arasındaki ilişkinin de ele alınması gerekmektedir.

İkinci türevin sapmasıyla sapmanın ikinci türevi arasındaki ilişkiye bakılacak olunursa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\delta\left(\frac{d^2\theta_1}{dt^2}\right) = \frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_1) - \left(\frac{d^2\theta_1}{dt^2}\right)_0 \qquad (4.15)$$

Burada $\left(\frac{d^2\theta_1}{dt^2}\right)_0$ değeri Eş. 4.9'da çalışma noktasındaki sistem denkleminden çekerek elde edebilir.

$$\left(\frac{d^2\theta_1}{dt^2}\right)_0 = \frac{u_{10} - \left(R_3 + R_4\cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}}\right)\dot{\theta}_{10} - \left(\frac{R_6}{\cos\theta_{10}} - R_2\,\dot{\theta}_{10}^{\,2}\right)\sin\theta_{10}}{\frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2\cos\theta_{10}} = R_7 \quad (4.16)$$

$$\delta\left(\frac{d\theta_1}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(\delta\theta_1) - \left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)_0 \quad (4.17)$$

$\left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)_0$ değerini çekecek ekstra bir denklem yoktur. Ancak çalışma noktasındaki bu birinci türev değeri, nümerik iterasyon yollarıyla yeterince yakın hesaplanabilir. Elde edilen bu denklemler taylor serisi olarak açılan Eş. 4.14'te yerine konulursa;

$$\left(\frac{\partial f_1}{\partial\,\ddot{\theta}_1}\right)_0\left(\frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_1) - R_7\right) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial\,\dot{\theta}_1}\right)_0\left(\frac{d}{dt}(\delta\theta_1) - \left(\frac{d\theta_1}{dt}\right)_0\right) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial\theta_1}\right)_0\delta\theta_1 + \left(\frac{\partial f}{\partial u_1}\right)_0\delta u_1 = 0 \quad (4.18)$$

$$\delta\theta_1 = \theta_1 - \theta_{10} \quad (4.19)$$

$$\delta u_1 = u_1 - u_{10} \quad (4.20)$$

buradan da Eş. 4.18 düzenlenirse;

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial\,\ddot{\theta}_1}\right|_0\frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_1) + \left.\frac{\partial f_1}{\partial\,\dot{\theta}_1}\right|_0\frac{d}{dt}(\delta\theta_1) + \left.\frac{\partial f_1}{\partial\theta_1}\right|_0\delta\theta_1 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial u_1}\right|_0\delta u_1 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial\,\ddot{\theta}_1}\right|_0 R_7 + \left.\frac{\partial f_1}{\partial\,\dot{\theta}_1}\right|_0\dot{\theta}_{10} \quad (4.21)$$

$$\left(\frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2\cos\theta_{10}\right)\ddot{\theta}_1 + \left(R_3 + R_4\cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}} - 2R_2\,\dot{\theta}_{10}\sin\theta_{10}\right)\dot{\theta}_1 +$$

$$+\left[\left(\frac{R_1 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}} - R_2 \sin\theta_{10}\right)R_7 - \left(R_4 \sin\theta_{10} - \frac{R_5 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}}\right)\dot{\theta}_{10} + \frac{R_6}{\cos^2\theta_{10}} - R_2\,\dot{\theta}_{10}^{\,2}\cos\theta_{10}\right]\theta_1 -$$

$$-u_1(t) = \left(\frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2\cos\theta_{10}\right)R_7 + \left(R_3 + R_4\cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}} - 2R_2\,\dot{\theta}_{10}\sin\theta_{10}\right)\dot{\theta}_{10} \tag{4.22}$$

elde edilir. Bu denklemdeki karmaşıklığı önlemek için belirli kısımlar tanımlanabilir.

$$S_1 = \frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2\cos\theta_{10} \tag{4.23}$$

$$S_2 = R_3 + R_4\cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}} - 2R_2\,\dot{\theta}_{10}\sin\theta_{10} \tag{4.24}$$

$$S_3 = \left[\left(\frac{R_1 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}} - R_2 \sin\theta_{10}\right)R_7 - \left(R_4 \sin\theta_{10} - \frac{R_5 \sin\theta_{10}}{\cos^2\theta_{10}}\right)\dot{\theta}_{10} + \frac{R_6}{\cos^2\theta_{10}} - R_2\,\dot{\theta}_{10}^{\,2}\cos\theta_{10}\right] \tag{4.25}$$

$$S_4 = \left(\frac{R_1}{\cos\theta_{10}} + R_2\cos\theta_{10}\right)R_7 + \left(R_3 + R_4\cos\theta_{10} + \frac{R_5}{\cos\theta_{10}} - 2R_2\,\dot{\theta}_{10}\sin\theta_{10}\right) \tag{4.26}$$

Buradan ;

$$S_1\,\ddot{\theta}_1 + S_2\,\dot{\theta}_1 + S_3\theta_1 = u_1(t) + S_4 \tag{4.27}$$

$$\overline{u_1}(t) = \frac{u_1(t) + S_4}{S_1} \tag{4.28}$$

$$\ddot{\theta}_1 = \left(\frac{-S_2}{S_1}\right)\dot{\theta}_1 + \left(\frac{-S_3}{S_1}\right)\theta_1 + \overline{u_1}(t) \tag{4.29}$$

elde edilir. Eş. 4.29, alt sistemin lineerleştirilmiş denklemidir.

4.2. Üst Eksen Dinamik Denkleminin Lineerleştirilmesi

Üst eksende de lineerleştirme işleminden önce dinamik denklemin bir tarafı sıfır ve giriş sinyali katsayısı bir olacak şekilde yeniden düzenlenmiştir.

$$f_2\left(\ddot{\theta}_2, \dot{\theta}_2, \theta_2, u_2\right) = 0 \tag{4.30}$$

$$\left[\frac{N_1}{\cos\theta_2} + N_2\cos\theta_2\right]\ddot{\theta}_2 + \left[N_3 + N_4\cos\theta_2 + \frac{N_5}{\cos\theta_2}\right]\dot{\theta}_2 +$$

$$+\left[\frac{N_6}{\cos\theta_2} - N_2\dot{\theta}_2^{\,2}\right]\sin\theta_2 - u_2(t) = f_2 = 0 \tag{4.31}$$

Burada;

$$N_1 = \frac{J_2(W + K_2)}{K_1 A_{p2} l_2} \tag{4.32}$$

$$N_2 = \frac{(W + K_2)(M_{p2} l_2)}{K_1 A_{p2}} \tag{4.33}$$

$$N_3 = \frac{A_{p2}\rho l_2}{K_1} \tag{4.34}$$

$$N_4 = \frac{B_{p2} l_2 (W + K_2)}{K_1 A_{p2}} \tag{4.35}$$

$$N_5 = \frac{B_{t2}(W + K_2)}{K_1 A_{p2} l_2} \tag{4.36}$$

$$N_6 = \frac{M_2 g (W + K_2)(l_2 + c_2)}{K_1 A_{p2} l_2} \tag{4.37}$$

şeklinde verilmektedir.

Eş. 4.31 çalışma noktasında da geçerli olacaktır. Çalışma noktası "$_0$" indisi ile gösterilirse bu noktada sistem denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\left[\frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20}\right]\ddot{\theta}_{20} + \left[N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}}\right]\dot{\theta}_{20} +$$

$$+\left[\frac{N_6}{\cos\theta_{20}} - N_2\dot{\theta}_{20}^{2}\right]\sin\theta_{20} - u_{20} = 0 \tag{4.38}$$

Eş. 4.38' in sistem değişkenlerine göre kısmi türevleri alınırsa;

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial \ddot{\theta}_2}\right|_0 = \frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20} \tag{4.39}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}_2}\right|_0 = N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}} - 2N_2\dot{\theta}_{20}\sin\theta_{20} \tag{4.40}$$

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2}\right|_0 = \left(\frac{N_1\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\sin\theta_2\right)\ddot{\theta}_{20} - \left(N_4\sin\theta_{20} - \frac{N_5\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}}\right)\dot{\theta}_{20} +$$

$$+\frac{N_6}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\dot{\theta}_{20}^{2}\cos\theta_{20} \tag{4.41}$$

$$\left.\frac{\partial f_1}{\partial u_1}\right|_0 = -1 \tag{4.42}$$

bulunur. Taylor açılımından denklemler yerine konularak lineerleştirmeye devam edilir.

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial \ddot{\theta}_2}\right)_0 \delta\ddot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}_2}\right)_0 \delta\dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2}\right)_0 \delta\theta_2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial u_2}\right)_0 \delta u_2 = 0 \tag{4.43}$$

Üst sistem için de durağan durum etrafında çalışmayacağı için türevin sapması ile sapmanın türevi arasındaki ilişkinin de ele alınması gerekmektedir.

$$\delta\left(\frac{d^2\theta_2}{dt^2}\right) = \frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_2) - \left(\frac{d^2\theta_2}{dt^2}\right)_0 \tag{4.44}$$

Burada $\left(\frac{d^2\theta_2}{dt^2}\right)_0$ değeri Eş. 4.38'de çalışma noktasındaki sistem denkleminden çekilerek elde edilebilir.

$$\left(\frac{d^2\theta_2}{dt^2}\right)_0 = \frac{u_{20} - \left(N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}}\right)\dot{\theta}_{20} - \left(\frac{N_6}{\cos\theta_{20}} - N_2\dot{\theta}_{20}^2\right)\sin\theta_{20}}{\frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20}} = N_7 \tag{4.45}$$

$$\delta\left(\frac{d\theta_2}{dt}\right) = \frac{d}{dt}(\delta\theta_2) - \left(\frac{d\theta_2}{dt}\right)_0 \tag{4.46}$$

$\left(\frac{d\theta_2}{dt}\right)_0$ değerini çekecek ekstra bir denklem yoktur. Ancak çalışma noktasındaki bu birinci türev değeri, nümerik iterasyon yollarıyla yeterince yakın hesaplanabilir. Elde edilen bu denklemler taylor serisi olarak açılan Eş. 4.43'de yerine koyarsak;

$$\left(\frac{\partial f_2}{\partial \ddot{\theta}_2}\right)_0 \left(\frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_2) - N_7\right) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}_2}\right)_0 \left(\frac{d}{dt}(\delta\theta_2) - \left(\frac{d\theta_2}{dt}\right)_0\right) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2}\right)_0 \delta\theta_2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial u_2}\right)_0 \delta u_2 = 0 \tag{4.47}$$

$$\delta\theta_2 = \theta_2 - \theta_{20} \tag{4.48}$$

$$\delta u_2 = u_2 - u_{20} \tag{4.49}$$

buradan da Eş. 4.47 düzenlenirse;

$$\left.\frac{\partial f_2}{\partial \ddot{\theta}_2}\right|_0 \frac{d^2}{dt^2}(\delta\theta_2) + \left.\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}_2}\right|_0 \frac{d}{dt}(\delta\theta_2) + \left.\frac{\partial f_2}{\partial \theta_2}\right|_0 \delta\theta_2 + \left.\frac{\partial f_2}{\partial u_2}\right|_0 \delta u_2 = \left.\frac{\partial f_2}{\partial \ddot{\theta}_2}\right|_0 N_7 + \left.\frac{\partial f_2}{\partial \dot{\theta}_2}\right|_0 \dot{\theta}_{20} \tag{4.50}$$

$$\left(\frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20}\right)\ddot{\theta}_2 + \left(N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}} - 2N_2\dot{\theta}_{20}\sin\theta_{20}\right)\dot{\theta}_2 +$$

$$+\left[\left(\frac{N_1\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\sin\theta_{20}\right)N_7 - \left(N_4\sin\theta_{20} - \frac{N_5\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}}\right)\dot{\theta}_{20} + \frac{N_6}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\dot{\theta}_{20}^{\,2}\cos\theta_{20}\right]\theta_2 -$$

$$-u_2(t) = \left(\frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20}\right)N_7 + \left(N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}} - 2N_2\dot{\theta}_{20}\sin\theta_{20}\right)\dot{\theta}_{20} \tag{4.51}$$

elde edilir. Bu denklemdeki karmaşıklığı önlemek için belirli kısımlar tanımlanabilir.

$$G_1 = \frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20} \tag{4.52}$$

$$G_2 = N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}} - 2N_2\dot{\theta}_{20}\sin\theta_{20} \tag{4.53}$$

$$G_3 = \left[\left(\frac{N_1\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\sin\theta_{20}\right)N_7 - \left(N_4\sin\theta_{20} - \frac{N_5\sin\theta_{20}}{\cos^2\theta_{20}}\right)\dot{\theta}_{20} + \frac{N_6}{\cos^2\theta_{20}} - N_2\dot{\theta}_{20}^{\,2}\cos\theta_{20}\right] \tag{4.54}$$

$$G_4 = \left(\frac{N_1}{\cos\theta_{20}} + N_2\cos\theta_{20}\right)N_7 + \left(N_3 + N_4\cos\theta_{20} + \frac{N_5}{\cos\theta_{20}} - 2N_2\dot{\theta}_{20}\sin\theta_{20}\right) \tag{4.55}$$

Buradan ;

$$G_1 \ddot{\theta}_2 + G_2 \dot{\theta}_2 + G_3 \theta_2 = u_2(t) + G_4 \tag{4.56}$$

$$\overline{u_2}(t) = \frac{u_2(t) + G_4}{G_1} \tag{4.57}$$

$$\ddot{\theta}_2 = \left(\frac{-G_2}{G_1}\right)\dot{\theta}_2 + \left(\frac{-G_3}{G_1}\right)\theta_2 + \overline{u_2}(t) \tag{4.58}$$

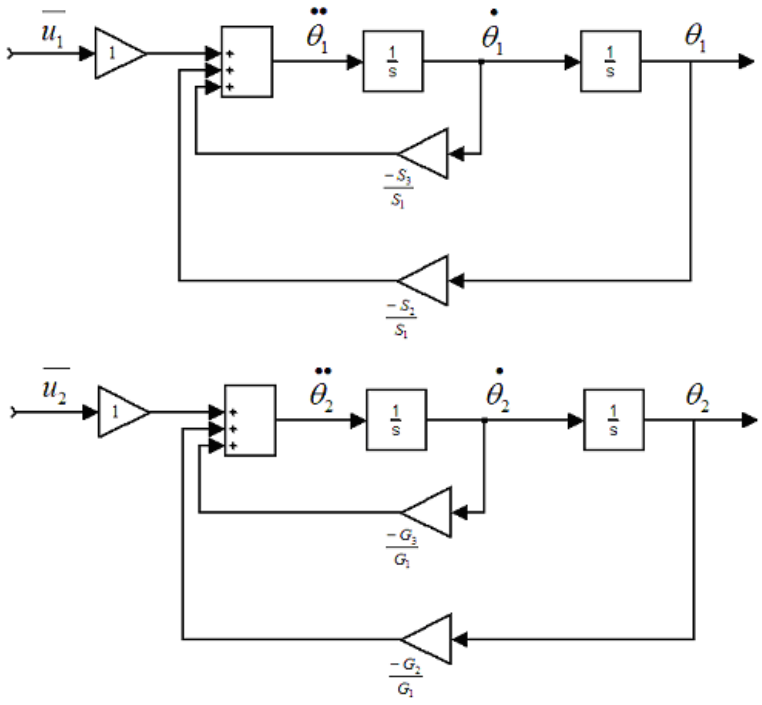
elde edilir. Eş. 4.58, alt sistemin lineerleştirilmiş denklemidir. Alt ve üst sistemin lineerleştirilmiş dinamik denklemleri homojen matris formda yazıldığında da aşağıdaki sistem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-S_3}{S_1} & \frac{-S_2}{S_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-G_3}{G_1} & \frac{-G_2}{G_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{u_1}(t) \\ \overline{u_2}(t) \end{bmatrix} \tag{4.59}$$

5. SİSTEMİN KONTROLÜ

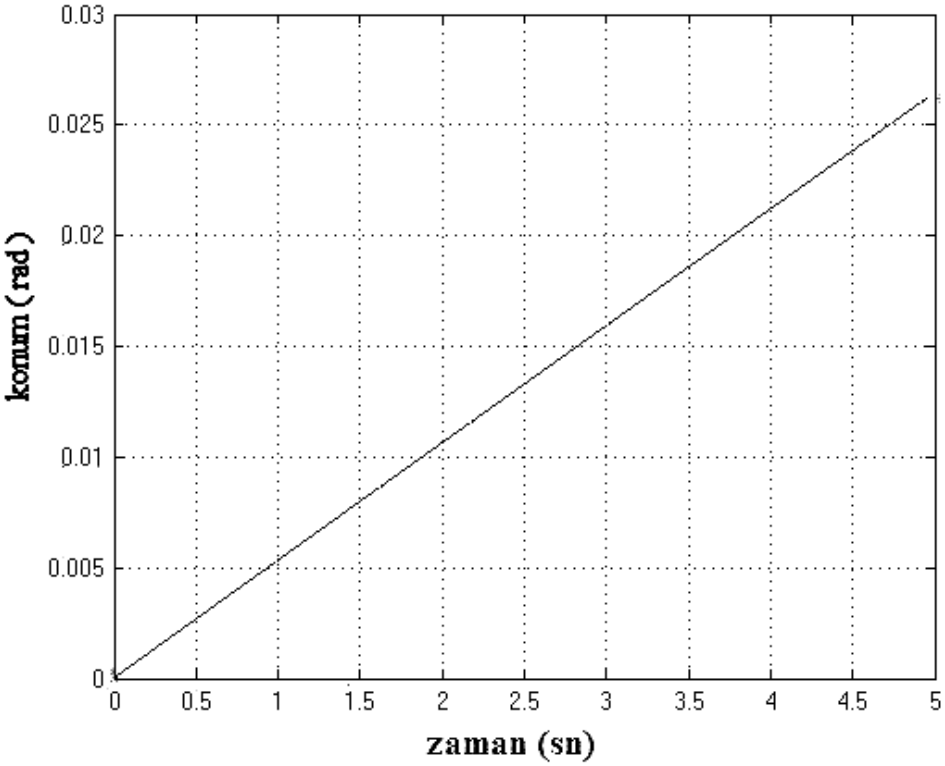
İki eksenli stabilizasyon platformunun dinamik denklemleri lineerleştirilmiş olarak modern kontrol tekniklerinin alışılmış yöntemlerinin uygulanabileceği hale gelmiştir. Sistemin iki valf makarası pozisyonu girişiyle birbirinden bağımsız iki açı çıkışları kontrol edilmektedir. Bu kontrol iki türlü sağlanacaktır. Birinci yöntem durum değişkenleri yöntemini kullanarak yapılan durum geri beslemeli kontroldür. Kullanılacak diğer yöntem ise PID kontroldür. Her iki durumda da kontrol stratejisi, geri besleme ile elde edilen hata sinyalinin sistemin dinamik davranışının beklenen şekle gelmesi için kullanılmasıdır.

Sistemi kontrol etmeden önce açık çevrim blok diyagramı ve açık çevrim cevabına bakılmalıdır. İki eksenli stabilizasyon platformunun blok diyagram modeli Şekil 5.1'de verilmiştir. Sistemin iki girişi ve bağımsız iki çıkışı görülmektedir. İki çıkış açıları da farklı kazançlarla birbirlerinden bağımsız girişlere ve kontrollere sahiptir. Ancak bütünlük açısından tek modelde ele alınmıştır [1].



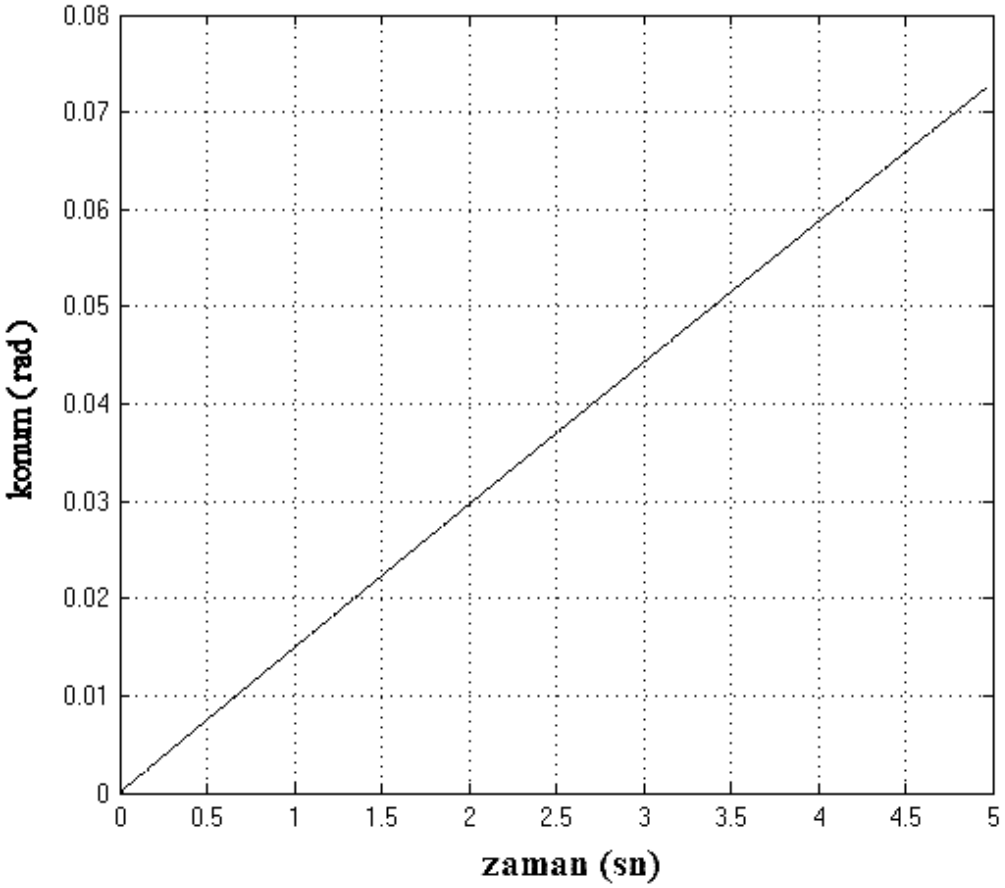
Şekil 5.1. İki eksenli stabilizasyon platformu açık çevrim blok diyagramı

Sistemin açık çevrim cevabında verilen bir girişe karşı çıkış değerine bakılacaktır. Sistem, çalışmıyor durumdayken üst tabla, monte edildiği yerin hareketini yapar. Örneğin iki eksenli stabilizasyon platformu çalışmaz konumdayken bulunduğu ortam bir eksende sinüsoidal bir dalga hareketi yapıyorken diğer eksende de rampa giriş gibi hareket ediyorsa bu durumda üst platfom da eksenlerin yaptığı hareketi sanki ortam ile platform yekpare parçaymış gibi hareket eder. Eğer sistem açık çevrim şeklinde çalıştırılırsa giriş sinyali olan valf makarası sürgüsünün basamak girişine karşı sistemin cevabı da açık çevrim cevabını verir. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te iki eksen için basamak girişleri açık çevrim cevapları görülmektedir.



Şekil 5.2. Alt eksen için basamak giriş konum-zaman cevabı (lineer durum)

Şekil 5.2'de verilen alt eksen için birim basamak cevabı valf makarasının maksimum açıklığı basamak giriş olarak verilerek elde edilmiştir. Açık çevrim sistem şekilden de görüldüğü gibi stabilize edici bir özellik taşımamaktadır. Bu giriş, sistemin durağan durum etrafında çalıştığı an baz alınarak oluşturulmuştur. Gerçek sistemde ise aynı basamak giriş, parabolik olarak eğimi artan bir eğri şeklinde çıkış verecektir.



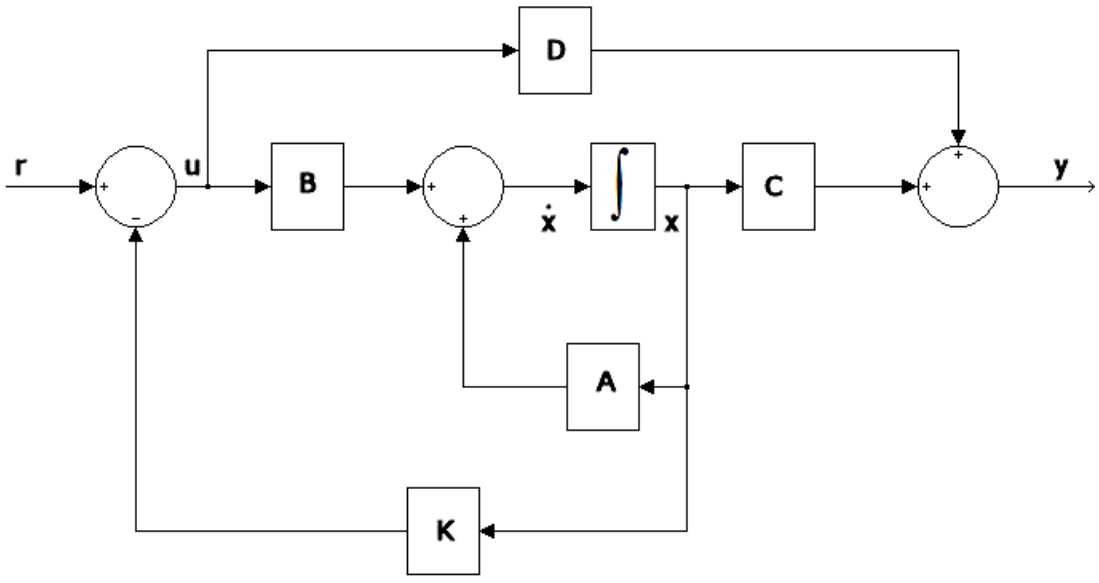
Şekil 5.3. Üst eksen için basamak giriş konum-zaman cevabı (lineer durum)

5.1. Durum Geri Beslemeli Kontrol

Modern kontrolün mühendislik sistemlerinde uygulanması durum geri beslemeli kontrol ile sağlanmaktadır. Durum geri beslemeli kontrolde amaç diğer klasik kontrol yöntemlerindeki gibi çıkışı sabit kazançlarla geri beslemek yerine durum değişkenlerinin ölçülerek geri besleme sinyali oluşturulması ve bu sinyallerin beklenen davranışa göre kazançlarının bulunmasıyla istenilen çıkışın alınmasıdır [1]. Durum geri beslemeli kontrolde geri beslenen değerler olan durum değişkenleri her sistemde ölçülemeyebilir. Bu nedenle bazı tip kontrol sistemi tasarımlarında gözlemciler kullanılmaktadır. Gözlemci aslında varolan sistemin bir kopyasıdır. Durum değişkeninin ölçülemediği durumlarda ölçüm aletlerinin yerine kullanılan ve değişkenin değerlerinin tahmin edildiği ve karşılaştırıldığı bir sistemdir. Ancak iki

eksenli stabilizasyon platformunda elde ettiğimiz durum değişkenleri açı ve açısal hız olduğundan jiroskop vasıtası ile kolaylıkla ölçülebilen değişkenlerdir. Jiroskop ile açısal hız ve buradan da integral alınarak açı bilgisi elde edilebilir. Dolayısıyla bu tip bir sistem için gözlemci kullanmaya gerek yoktur. Şekil 5.4'te durum geri beslemeli kontrolün yapısı görülmektedir.

Durum geri beslemeli kontrol uygulanarak tasarlanacak kontrol sisteminde izlenecek yöntem kutup yerleştirme yöntemidir. Bu yöntemde kontrol edilmiş halde sistemden beklenen davranışta sanal düzlemde kutuplar yerleştirilerek buralardan geri besleme sinyallerinin çarpılacağı kazançlar bulunmaktadır. Sistemden beklenen çıkışlar için kutupların yerleşimi deneme yanılma yöntemiyle bulunabilmektedir. Elde edilen kutup değerlerinden sistemin karakteristik denklemi elde edilebilmekte ve buradan kazanç matrisi hesaplanabilmektedir.



Şekil 5.4. Durum geri beslemeli kontrol için blok diyagramı

Durum geri beslemeli kontrol sistemin tipini geliştirmez. Bu durumda genellikle integralli durum geri beslemeli kontrol kullanılır. Hata sinyalinin integrali alınarak sisteme yeni bir kazançla eklenir. Ancak bu yöntem genellikle servo sistemler için kullanılmaktadır. Durum geri beslemeli kontrol, regülatör özellikli sistemler için tek başına kullanılarak istenilen kontrolü sağladığından iki eksenli stabilizasyon

platformunun durum geri beslemeli kontrolünde hata sinyalinin integrali kullanılmayacaktır.

Sistemi ifade eden denklem aşağıdaki şekilde yazılırsa;

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \tag{5.1}$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \dot{\theta}_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} \tag{5.3}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \dfrac{-S_3}{S_1} & \dfrac{-S_2}{S_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dfrac{-G_3}{G_1} & \dfrac{-G_2}{G_1} \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{42} \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

$$u = \begin{bmatrix} \overline{u_1}(t) \\ \overline{u_2}(t) \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

Durum geri beslemeli kontrol ile durum değişkenleri K kazanç matrisi ile geri beslenmektedir. Bu durumda kontrol edilen sistemde kontrol sinyali Eş. 5.7'deki gibi elde edilir.

$$u(t) = -Kx(t) + r(t) \tag{5.7}$$

Burada *r(t)* sinyali referans giriştir. Sistem regülatör özellikli olduğu için referans giriş sıfırdır. Çıkış değeri sıfır yapılmaya çalışılmaktadır. Dolayısıyla ;

$u(t) = -Kx(t)$ şeklinde elde edilir. (5.8)

Burada;

$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$ şeklinde verilmektedir. (5.9)

K geri besleme kazanç matrisi ile beraber durum geri besleme sinyali ile birlikte Eş. 5.1 yeniden düzenlenirse;

$\frac{dx(t)}{dt} = (A - BK)x(t)$ elde edilir. (5.10)

Burada K kazancının hesaplanmasından önce sistemin kontrol edilebilirliğine bakmak gereklidir. Bu nedenle *M* matrisi hesaplanır. Bu matrisin rankı, sistemin derecesine eşitse sistem kontrol edilebilir demektir.

$$M = \begin{bmatrix} B & AB & A^2 & .. & .. & A^{n-1}B \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Burada ele alınan sistem iki girişli ve iki çıkışlıdır, dolayısıyla her biri için ayrı ayrı kontrol edilebilirlik matrislerinin rankları 2 çıkmaktadır. Bu sonuç, sistem tek konfigürasyonlu olmadığı için direkt olarak yazılmıştır. Yol boyunca yapılan

lineerleştirme nedeni ile A ve B matrisleri sürekli güncellenmekte ve kontrol edilebilirlik matrisi de sürekli güncellenmektedir.

Kutup yerleştirme operasyonunda öncelikle tasarım şartları belirlenmeli ve bu şartları karşılayacak uygun kutup değerleri hesaplanmalıdır. İki eksenli stabilizasyon platformu için iki eksenden de beklenen davranış aşağıdaki gibidir :

1. Sistem sürekli durumda durağan olmalıdır.
2. Sistem, sürekli cevabına 0,5 saniyeden az bir sürede ulaşmalıdır.
3. Başlangıç şartlarını takiben dış bozucu girişe karşın sürekli cevapta çıkış açıları θ_1 ve θ_2 0,003 radyanı (0° 10') geçmeyecektir.

2 numaralı şartın yerine getirilmesi için $sI - A + BK$ matrisinin öz değerlerine bakılması gerekmektedir. 2 x 2 boyuttaki geri besleme matrisi K'nın değerleri, her eksen bağımsız çalıştığı için iki ayrı kutup bölgesi seçerek bulunmalıdır. Yani alt eksen için ayrı kutup değeri çifti, üst eksen için de ayrı kutup değeri çifti olmak zorundadır. Çünkü alt ve üst sistemlerin parametreleri farklı değerlerdedir. Kutup değerlerinin sanal düzlemde simetrik ve sanal değerde olması gerekmektedir. Alt eksen dinamiğini tayin edecek kutup çifti sanal düzlemin sol tarafında kompleks değerde olmalıdır. Aynı şekilde üst eksen için de kutup değerleri kompleks olmalıdır. Kutup değerlerinin seçiminde sistemden beklenen cevap hızına göre yerleşim yapılmalıdır. Kutupların sanal düzlemin soluna kaydıkça geçici cevap süresini azalttıkları bilinmektedir (Sola yaklaşan kutup değeri sönüm açısını düşürmekte, dolayısıyla da bu açının kosinüs değeri olan sönümleme katsayısı da artarak cevap hızını artırarak süreyi azaltmaktadır.). Ancak avantajlı durumların dezavantajları da bulunmaktadır. Kutup değerini sola kaydırmak, beraberinde yüksek kazanç değerlerine ve valf makarasının sürülmesini sağlayan kontrol voltajında ani zıplamalara neden olur. Bu şekil kontrolör davranışları da kontrol sisteminin ömrü açısından hiç de uygun olmayabilir.

Sistemden beklenen şartları sağlayacak olan kutup değerleri aşağıdaki gibi olursa;

$$s_1 = \mu_1 \quad , \quad s_2 = \mu_2 \tag{5.12}$$

ve buradan da karakteristik polinom aşağıdaki gibi yazılırsa;

$s^2 + a_1 s + a_2 = 0$ şeklinde ifade edilir (5.13)

$sI - A + BK$ matrisinin determinantı durum geri beslemeli kontrol edilen sistemin karakteristik polinomunu verir. Buradan da aynı dereceye sahip iki polinomun katsayıları eşlenerek kazanç matrisi K'nın değerleri hesaplanabilir.

$$\left|sI - A_1 + B_1 K_1\right| = \begin{vmatrix} s & -1 \\ \dfrac{S_3}{S_1} + k_{11} b_{21} & s + \dfrac{S_2}{S_1} + k_{12} b_{21} \end{vmatrix} =$$

$$s^2 + \left(\frac{S_2}{S_1} + k_{12} b_{21}\right) s + \frac{S_3}{S_1} + k_{11} b_{21} = 0 \tag{5.14}$$

$$a_{11} = \left(\frac{S_2}{S_1} + k_{12} b_{21}\right) = 0 \quad \text{ve} \quad a_{12} = \frac{S_3}{S_1} + k_{11} b_{21} = 0 \tag{5.15}$$

$$k_{11} = \frac{\left(a_{12} - \dfrac{S_3}{S_1}\right)}{b_{21}} \text{ ve } k_{12} = \frac{\left(a_{11} - \dfrac{S_2}{S_1}\right)}{b_{21}} \text{ şeklinde elde edilir.} \tag{5.16}$$

Burada A_1, B_1 ve K_1 matrisleri ile a_{11} ile a_{12} katsayıları alt sistemi ifade etmektedir. Aynı şekilde üst sistem için de denklemler elde edilebilir.

$$\left|sI - A_2 + B_2 K_2\right| = \begin{vmatrix} s & -1 \\ \dfrac{G_3}{G_1} + k_{21} b_{42} & s + \dfrac{G_2}{G_1} + k_{22} b_{42} \end{vmatrix} =$$

$$s^2 + \left(\frac{G_2}{G_1} + k_{22} b_{42} \right) s + \frac{G_3}{G_1} + k_{21} b_{42} = 0 \tag{5.17}$$

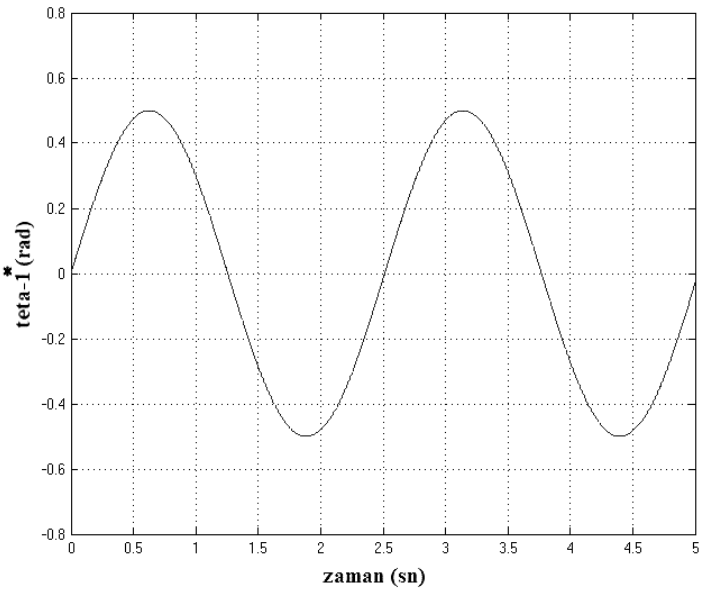
$$a_{21} = \left(\frac{G_2}{G_1} + k_{22} b_{42} \right) = 0 \quad \text{ve} \quad a_{22} = \frac{G_3}{G_1} + k_{21} b_{42} = 0 \tag{5.18}$$

$$k_{21} = \frac{\left(a_{22} - \frac{G_3}{G_1} \right)}{b_{42}} \text{ ve } k_{22} = \frac{\left(a_{21} - \frac{G_2}{G_1} \right)}{b_{42}} \text{ şeklinde elde edilir.} \tag{5.19}$$

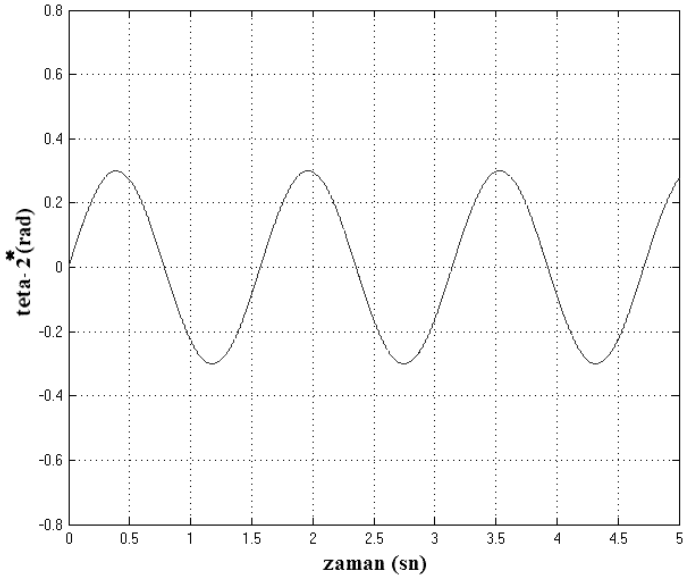
$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\left(a_{12} - \frac{S_3}{S_1} \right)}{b_{21}} & \frac{\left(a_{11} - \frac{S_2}{S_1} \right)}{b_{21}} \\ \frac{\left(a_{22} - \frac{G_3}{G_1} \right)}{b_{42}} & \frac{\left(a_{21} - \frac{G_2}{G_1} \right)}{b_{42}} \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Bu noktadan sonra yapılacak işlem istenilen şartları sağlayacak kutup noktaları deneyip sistemin cevabına bakmaktır. Caner ve Eroğlu (2004) çalışmalarında güncelleme parametreleri girilebilen kutup yerleşimi için bilgisayar programı hazırlamışlardır [18]. Kolaylık sağladığından bu çalışmada da Matlab® ortamında bir bilgisayar programı hazırlanmıştır [17, 18]. Bu bilgisayar programında seçilen kutup değerlerine göre beklenen karakteristik denklem hesaplanmaktadır. Aynı zamanda dış ortamın hareketi açı girişi olarak tanımlanmıştır. Sistem bu bozucu girişe göre yol boyunca sistem parametrelerini hesaplamakta ve geri besleme kazançlarını da bu şekilde bulmaktadır. Güncelleme aralığı olarak 0,005 saniye seçilmiştir. Bölüm 4'te verildiği üzere lineerleştirme işlemleri esnasında karışık denklemler içinde çalışma noktasındaki açısal ivme ve açısal hıza gerek duyulmuştur. Çalışma noktasındaki açısal ivme değeri, genel sistem denkleminden çekilmiş ve açısal hız cinsinden ifade edilmiştir ancak bu bölümde açısal hızın çekileceği bir denklem olmadığı ve bu noktada sayısal yöntemler kullanılarak bu noktadaki değerin hesaplanacağı söylenilmiştir. Yazılan programda da sayısal yöntem kullanılmıştır. Çalışma

noktasının bir nokta uzağındaki değer bilinmemektedir. Dolayısıyla bu noktada sayısal yöntemlerden geri farklar yöntemi seçilmiştir. Sonuç olarak çalışma noktasındaki açısal hız değeri, yol boyunca çalışılan nokta ile önceki çalışma noktasındaki değerin arasındaki farkın, arada geçen süreye, yani 0,005 saniyeye oranı şeklinde hesaplanmıştır [1].



Şekil 5.5. Alt eksene etkiyen bozucu açı girişi teta-1*

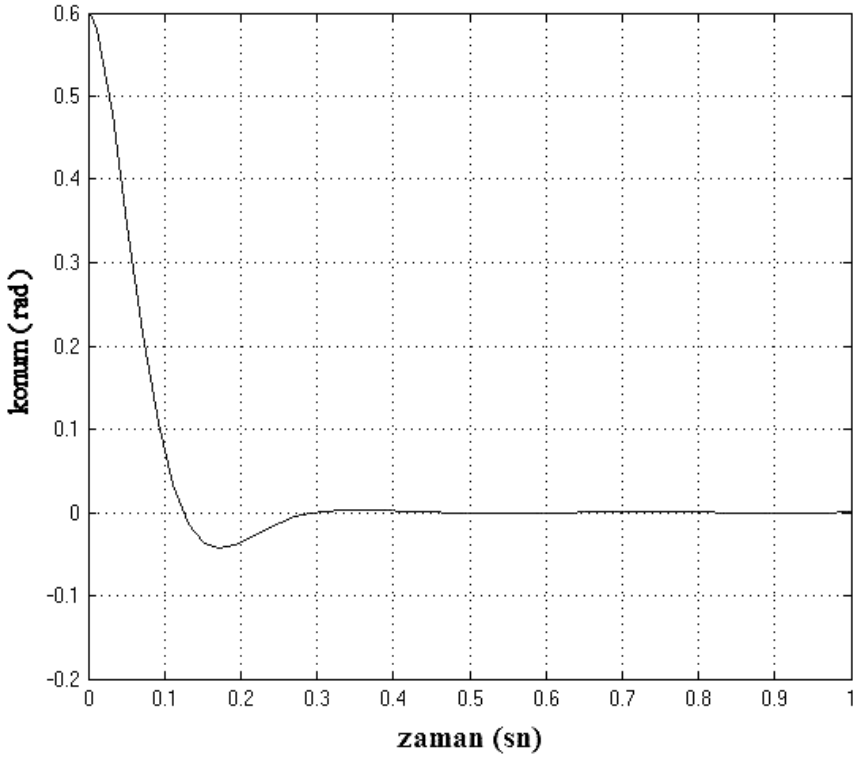


Şekil 5.6. Üst eksene etkiyen bozucu açı girişi teta-2*

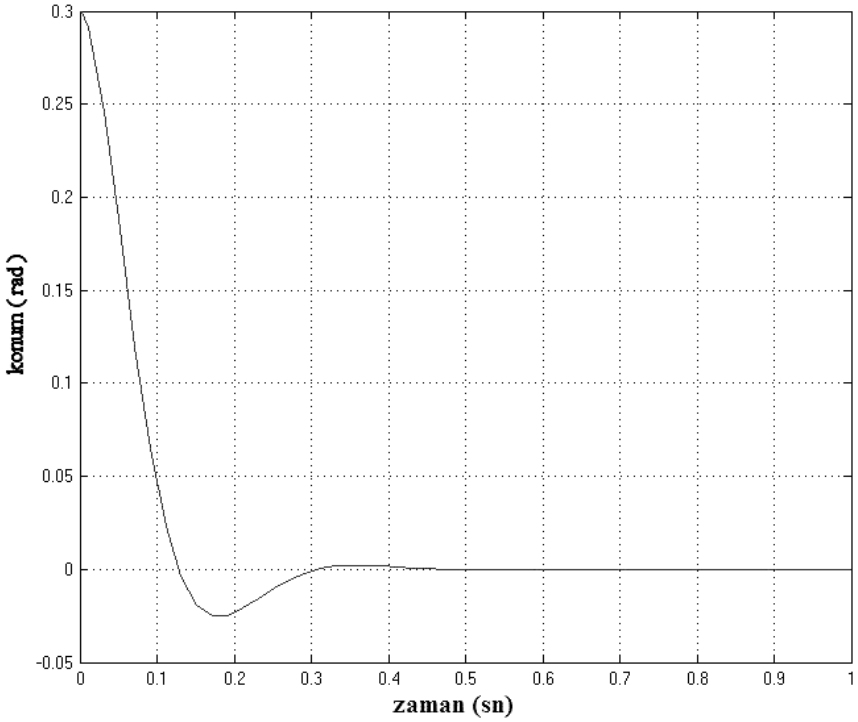
Şekil 5.5'te alta eksenin pozisyonunu bozan bozucu açı giriş görülmektedir. Bu giriş, genliği maksimum 0,5 radyan ve frekansı 2,5 rad/s olan sinüsoidal bir dalga hareketidir. Bu bozucu girişe karşı sistemden durağan durumda pozisyonundan maksimum 0,003 radyanlık bir sapma yapması beklenmektedir.

Şekil 5.6'da da üst eksenin pozisyonunu bozan bozucu açı giriş görülmektedir. Bu giriş, genliği maksimum 0,3 radyan ve frekansı 4 rad/s olan sinüsoidal bir dalga hareketidir. Bu bozucu girişe karşı sistemden durağan durumda pozisyonundan maksimum 0,003 radyanlık bir sapma yapması beklenmektedir.

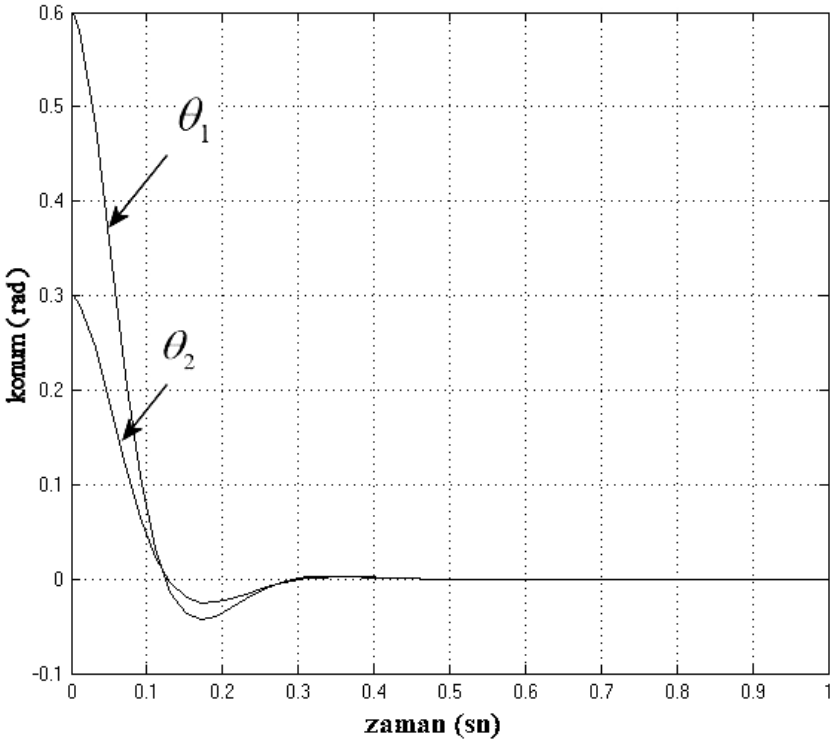
Sistemin sürekli güncelleme yapmadan durağan durum etrafında lineerleştirilmiş sistemin bozucu olmadan verdiği cevaba bakılacak olunursa alt eksen için 0,6 radyan ve üst eksen için de 0,3 radyanlık bir başlangıç konumu için Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki cevaplar elde edilir. Şekil 5.9'da bu iki cevap aynı düzlemde görülmektedir.



Şekil 5.7. Alt eksenin 0,6 rad başlangıç açısına karşın durağan durumda lineerleştirilmiş modelinin bozucu olmadan konum zaman cevabı



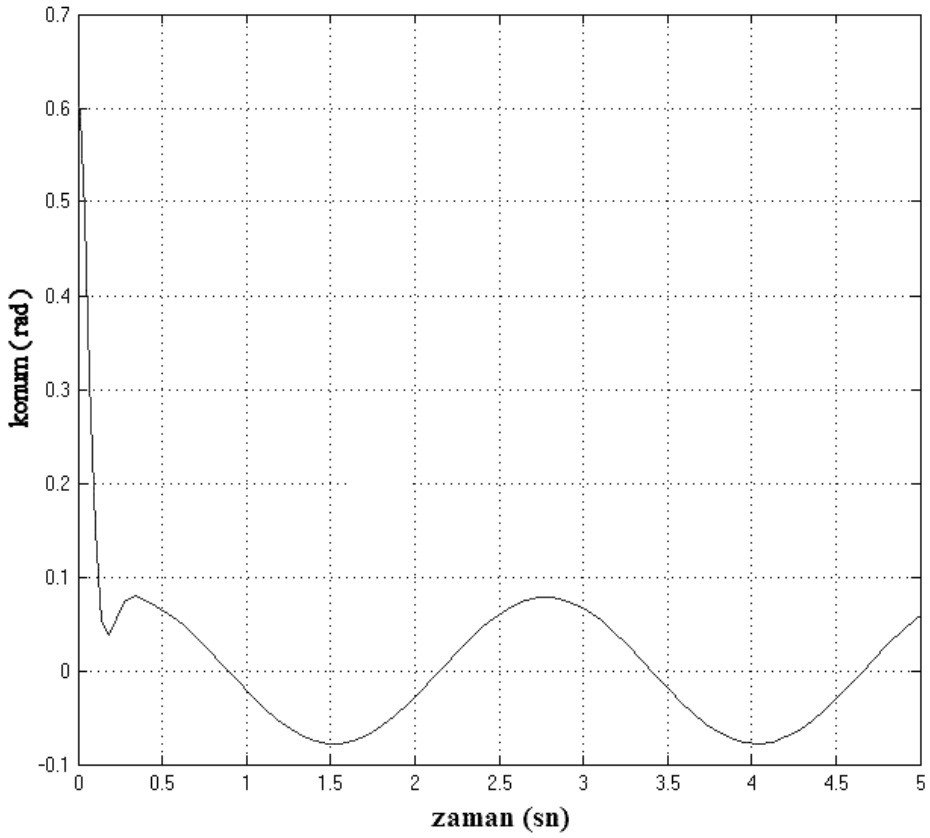
Şekil 5.8. Üst eksenin 0,3 rad başlangıç açısına karşın durağan durumda lineerleştirilmiş modelinin bozucu olmadan konum-zaman cevabı



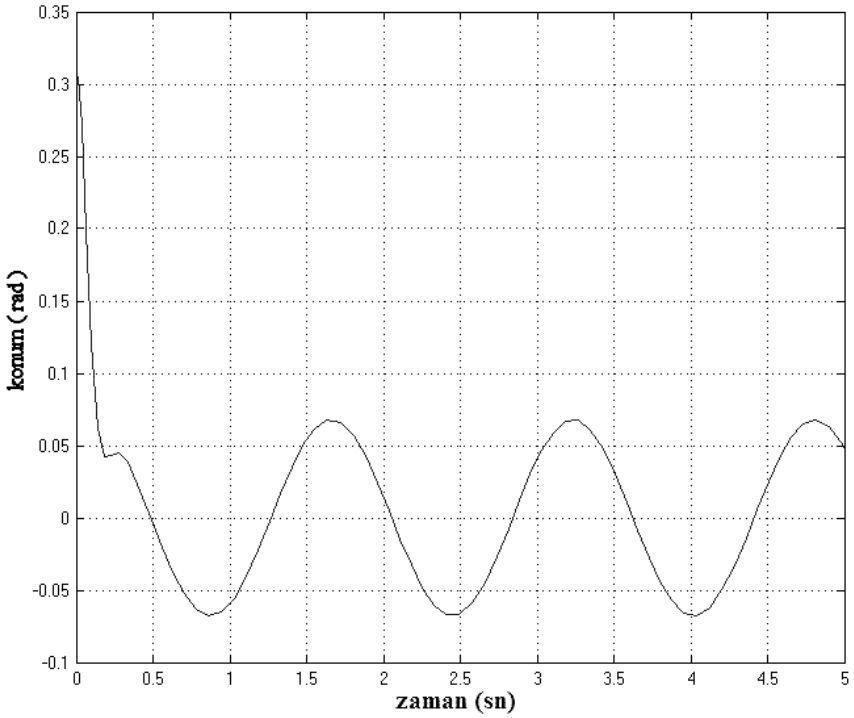
Şekil 5.9. Aynı düzlemde konum-zaman cevaplarının gösterimi

Şekil 5.9'da iki eksen için de sistemin beklenen şartları sağladığı görülmektedir. Ancak bu yeterli ve gerçekçi bir uygulama değildir. Çünkü bu durumda sistem sadece çalıştığı andaki pozisyonu sıfırlamaktan başka bir şey yapmamaktadır. Böyle bir durumda sistemin sadece başlangıç şartlarında lineerleştirildiği katsayılarla elde edilen modele bozucu giriş verildiğinde sistemden alınacak cevaba da bakmak gerekir.

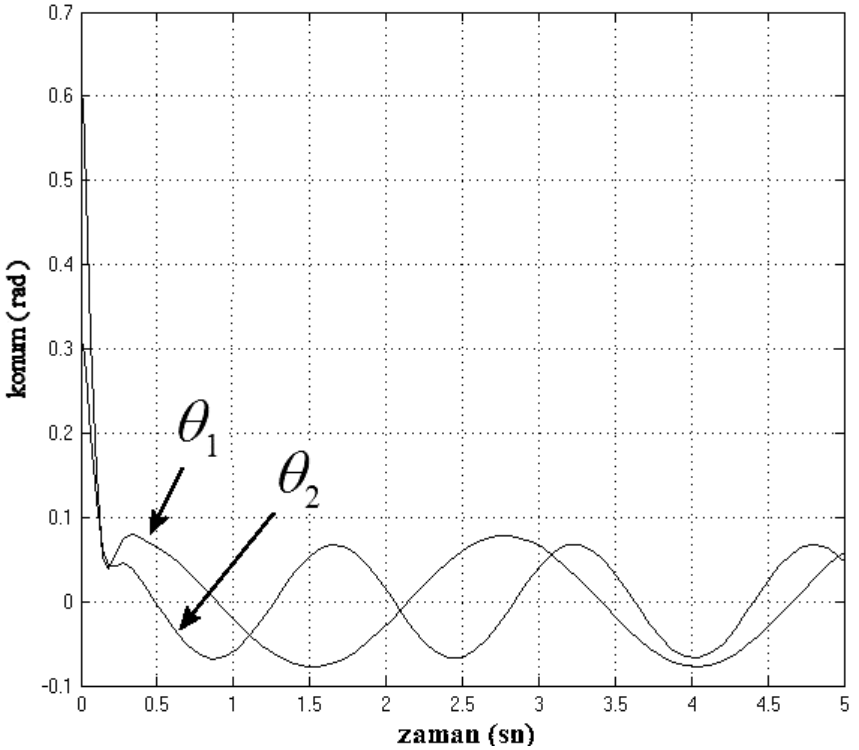
Alt eksen için Şekil 5.5 ve üst sistem için de Şekil 5.6'daki bozucu açı girişleri sisteme dahil edildiğinde yine alt eksen için 0,6 radyan ve üst eksen için de 0,3 radyan başlangıç konumu için sistemden alınan cevaplar aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.10. Alt eksende 0,6 rad başlangıç konumuyla bozucu giriş için durağan duruma göre lineerleştirilmiş modelin cevabı



Şekil 5.11. Üst eksende 0,3 rad başlangıç konumuyla bozucu giriş için durağan duruma göre lineerleştirilmiş modelin konum-zaman cevabı

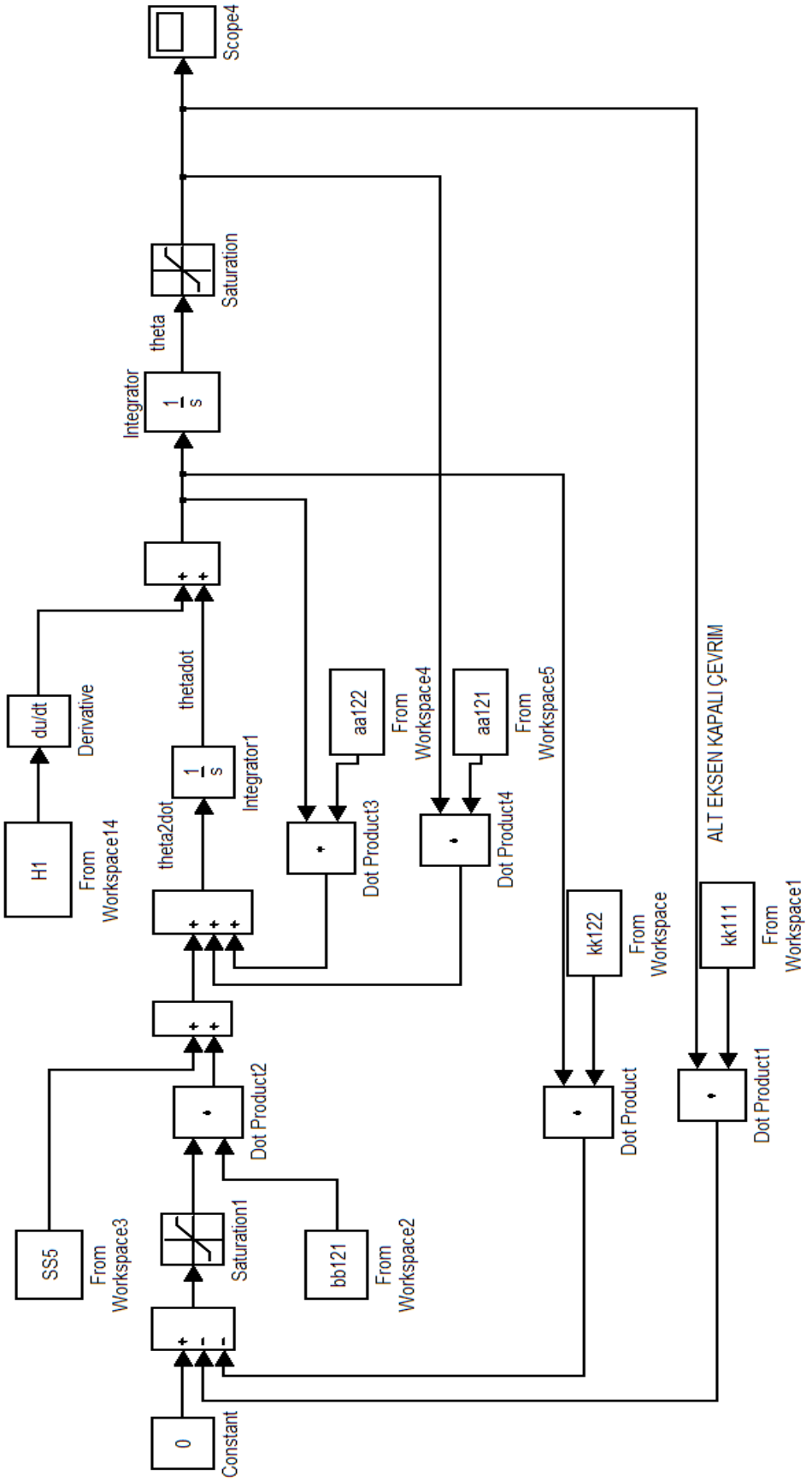


Şekil 5.12. Aynı düzlemde konum-zaman cevaplarının gösterimi

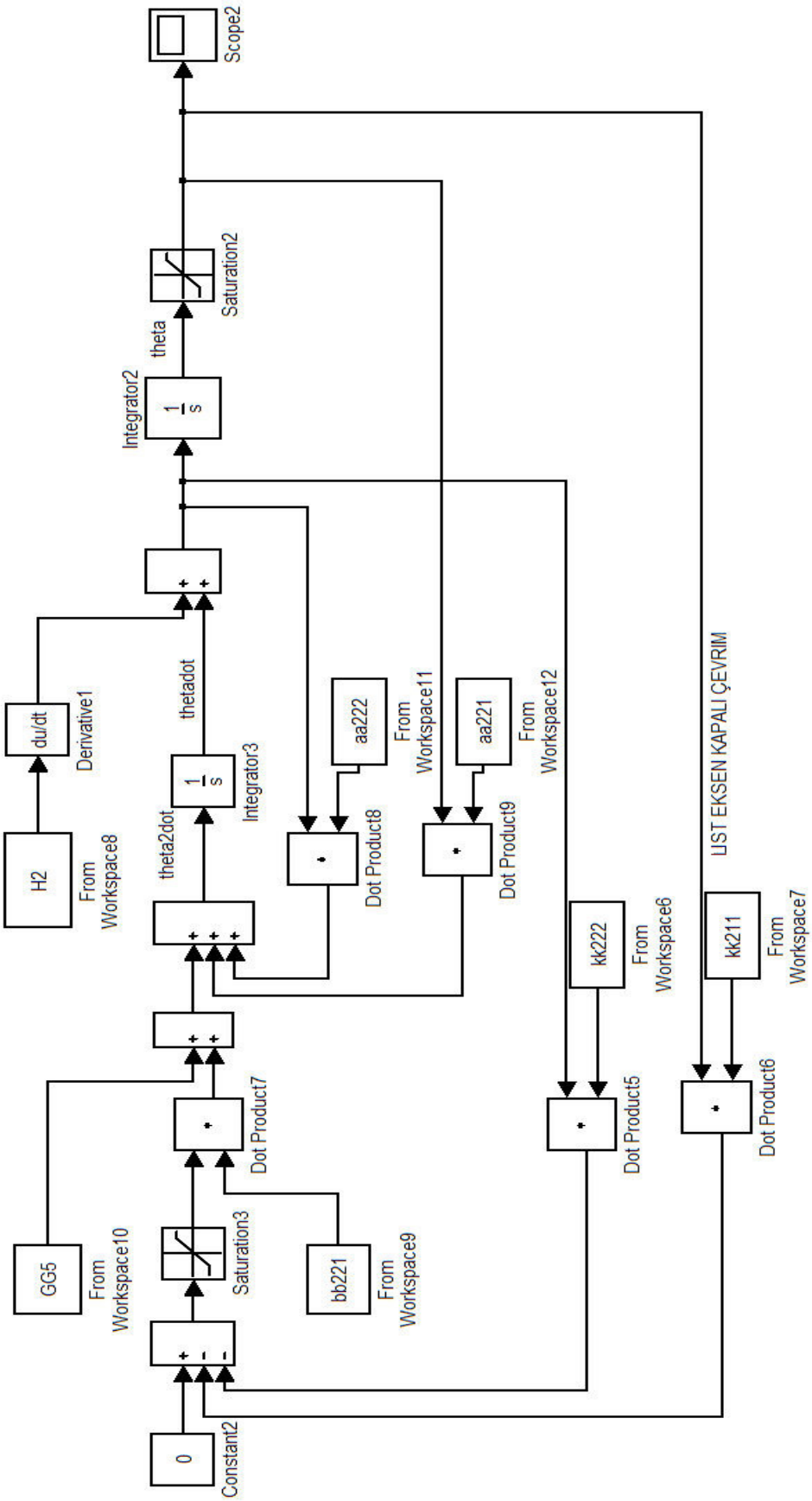
Şekil 5.10'da alt sistemin durağan durum etrafında lineerleştirilmiş modeline Şekil 5.5'te verilen bozucu giriş eklenmiş ve cevabına bakılmıştır. Aynı şekilde üst sistemin de durağan durum etrafında lineerleştirilmiş modeline Şekil 5.6'da verilen bozucu giriş eklenmiş ve cevabına bakılmıştır.

Şekil 5.12 göstermektedir ki durağan durum etrafında yapılan lineerleştirme bozucu girişlere karşı kazançlar bu model için yeterli olmasına rağmen beklenen cevap alınamamaktadır. Sistem dinamiğini ifade eden matris elemanları sadece durağan durumu ifade etmektedir. Sistem durağan durum dışına çıkarak giderek lineer olmayan davranışa geçtiğinde bu denklemlerle aslında tam anlamıyla kendi kendini kandıran bir sisteme dönüşmektedir. Alt eksende 0,5 radyan genlikli bozucu giriş 0,078 radyan maksimum genlikli sinüsoidal hataya neden olmaktadır. Aynı şekilde üst eksende de 0,3 radyan bozucu giriş 0,068 radyan maksimum genlikli sinüsoidal hataya neden olmaktadır. Bu sürekli durum hatalarında sistem, bozucu girişe karşı kendini düzeltememekte, maksimum izin verilebilecek kadar olması gereken tabla pozisyonu sapması, sinüsoidal bir biçimde kabul edilemeyecek şekilde değişmektedir.

Güncellenerek lineerleştirilen dinamik modelin cevabına geçerken durum geri beslemeli sistem için sanal düzlemde kutup noktaları seçilmektedir. Kutup yerleştirme yöntemiyle sistemden beklenen şartları sağlayan geri besleme kazançları hesaplanmaktadır. Hem alt eksen, hem de üst eksen için aynı geri besleme cevapları beklenmektedir. Değişik kutup noktalarında sistemin cevabı incelenecektir. Matlab® programı ile yapılan simülasyonda sistemin kutup değeri programa girilmektedir. Bu kutup noktasına göre sistem, daha önce de belirtildiği gibi 0,005 s aralıklarla sürekli olarak geri besleme kazançlarını hesaplayarak yeni cevaplar bu kazançlarla bulunmaktadır. Yazılan programda kazanç değerleri ve sistem matris değerleri zaman değerine karşılık sonuç değerleri olarak matris şeklinde girilmiştir. Blok diyagramındaki bloklar programdaki değişken isimlerine göre adlandırılmıştır. Blok ismi, programda geçen parametreyi tanımlamaktadır [19, 20, 21].



Şekil 5.13. Alt eksenin durum geri beslemeli kontrolcü ile Matlab® Simulink benzetimi

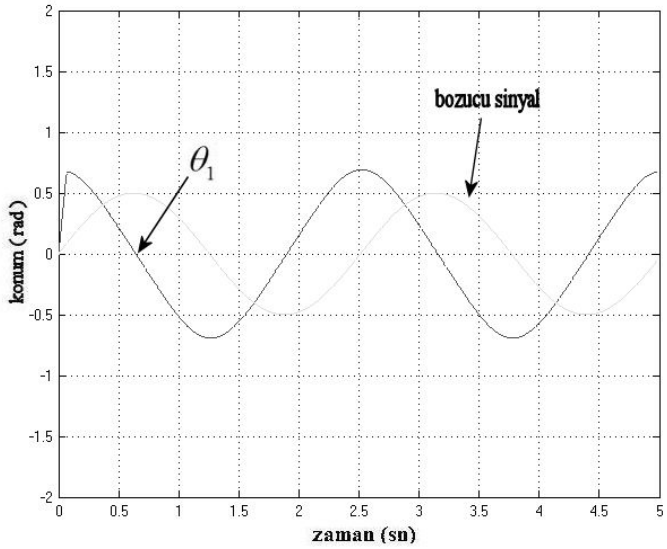


Şekil 5.14. Üst eksenin durum geri beslemeli kontrolcü ile Matlab® Simulink benzetimi

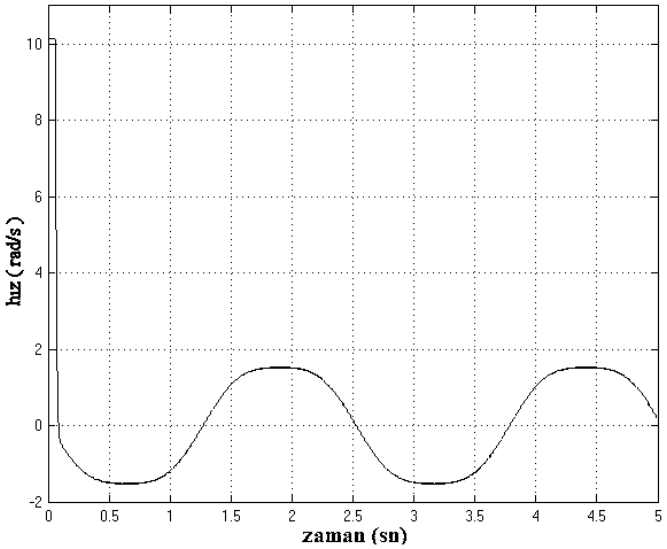
Sistem aşağıdaki kutup noktası seçilerek yine Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'daki bozucu sinyaller sisteme girilecektir ve sistemin bu kazançlarla nasıl cevap verdiğine bakılacaktır.

$\mu_1 = -150 + 50i$

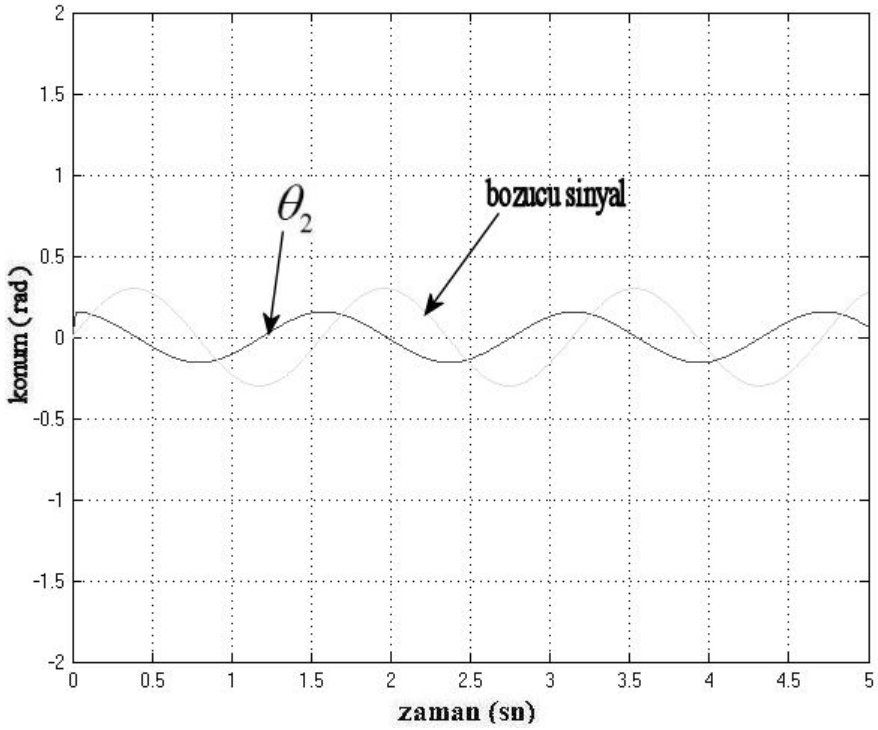
$\mu_2 = -150 - 50i$



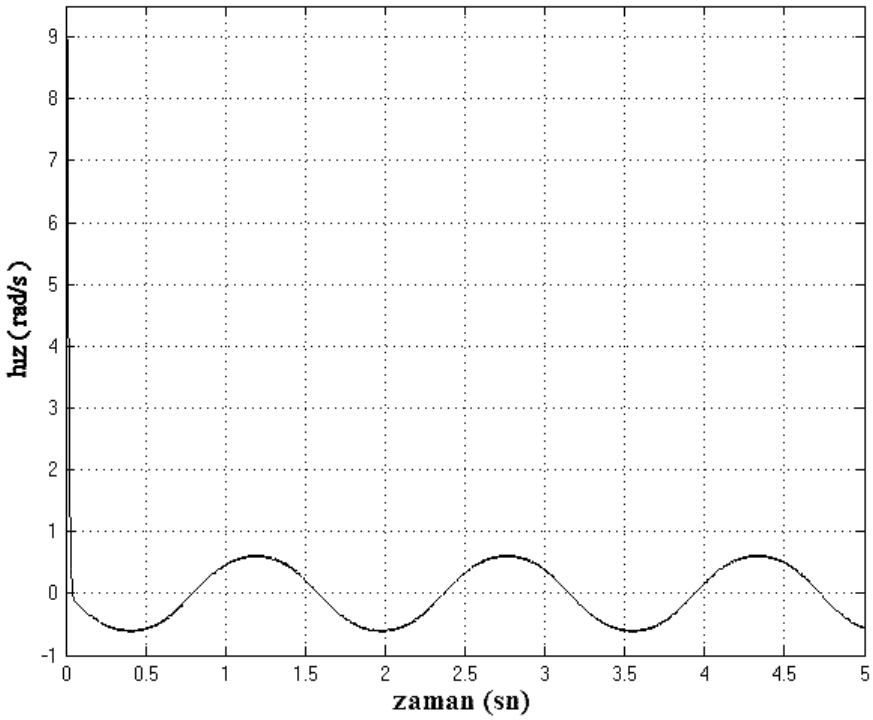
Şekil 5.15. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen konum-zaman cevabı



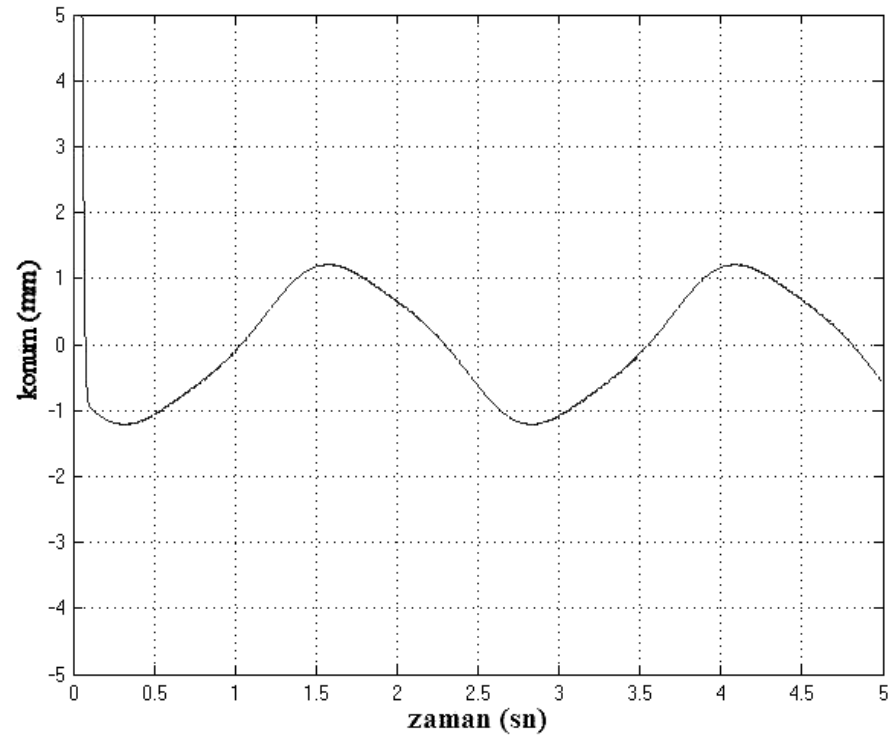
Şekil 5.16. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen hız-zaman cevabı



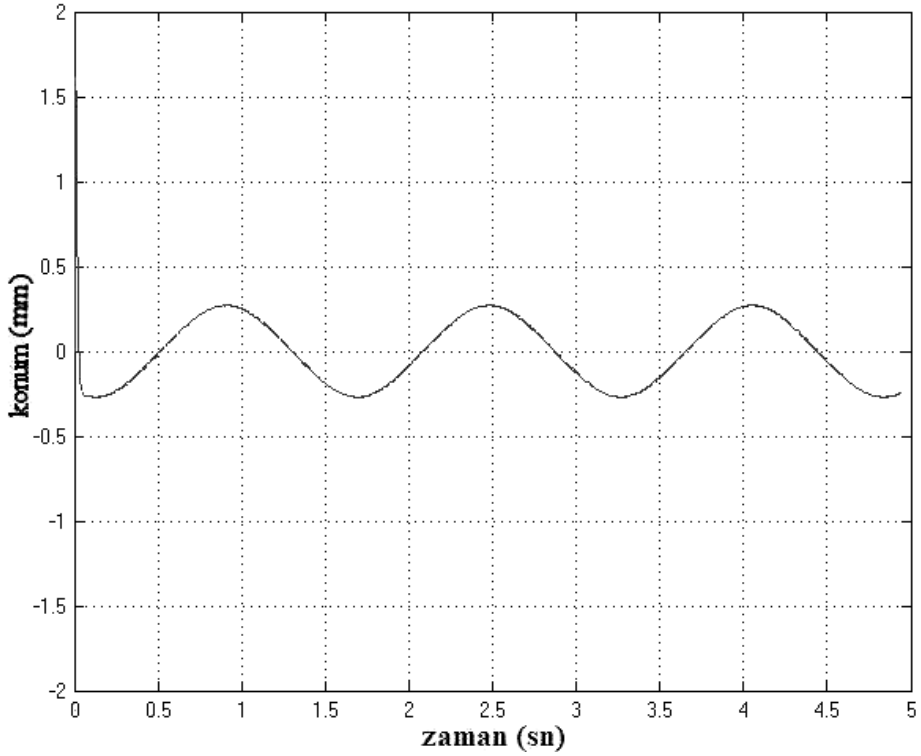
Şekil 5.17. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen konum-zaman cevabı



Şekil 5.18. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken bozucu girişe karşı üst-eksen hız-zaman cevabı



Şekil 5.19. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı

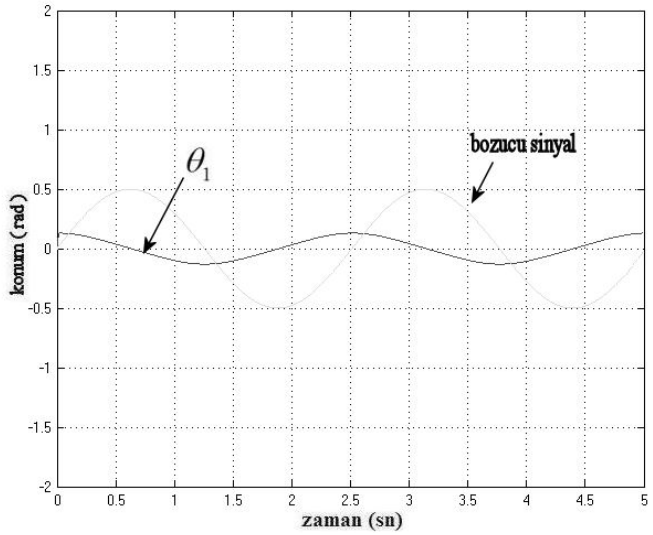


Şekil 5.20. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı

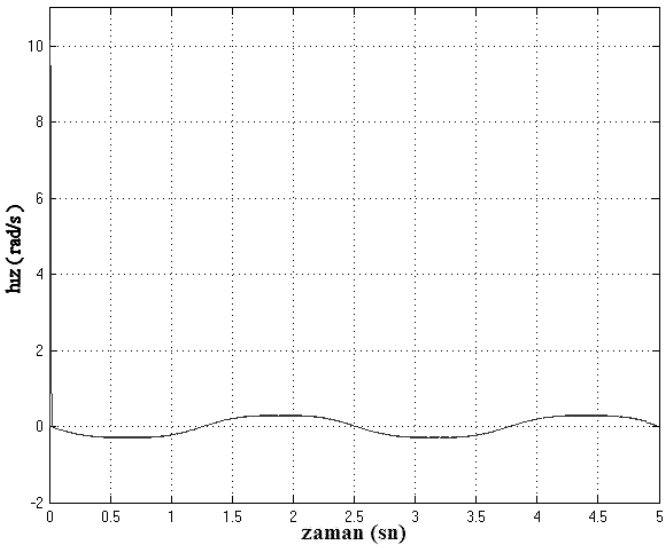
Seçilen kutup noktasında sistem beklenenden kötü sonuçlar vermektedir. Konum-zaman cevaplarında yüksek aşmalar meydana gelmekte ve sistem bozucu girişlere karşı kendini toparlayamamaktadır. Yeni bir kutup noktası sanal düzlemde sola kaydırılarak yeni bir değer denenmelidir.

$\mu_1 = -350 + 100i$

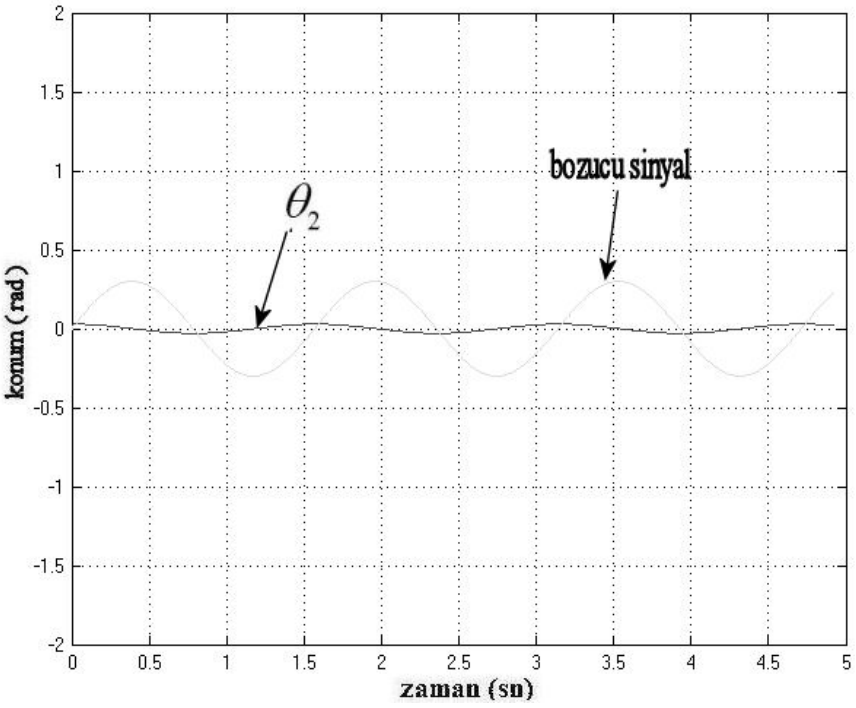
$\mu_2 = -350 - 100i$



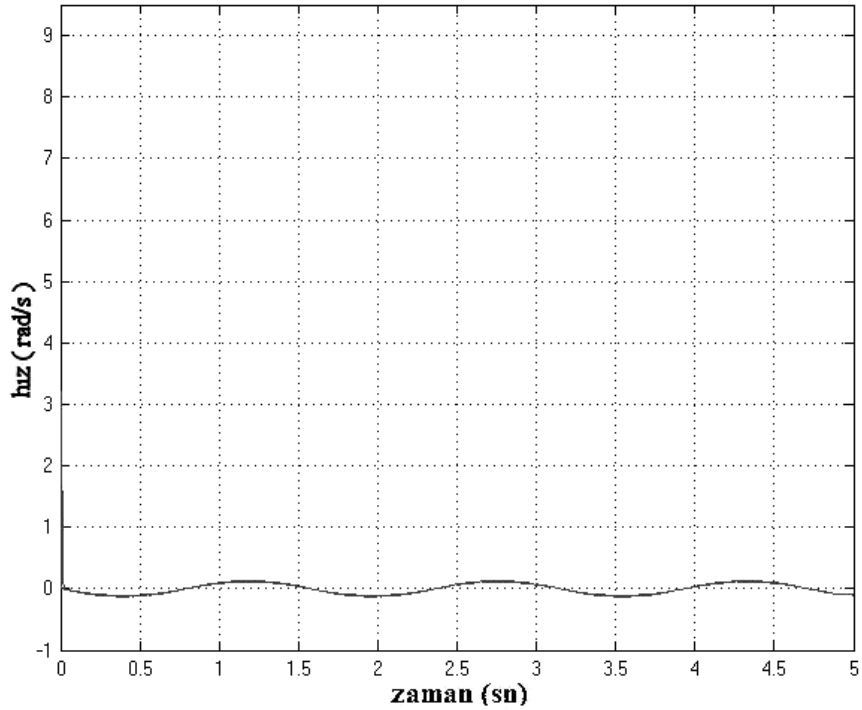
Şekil 5.21. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen konum-zaman cevabı



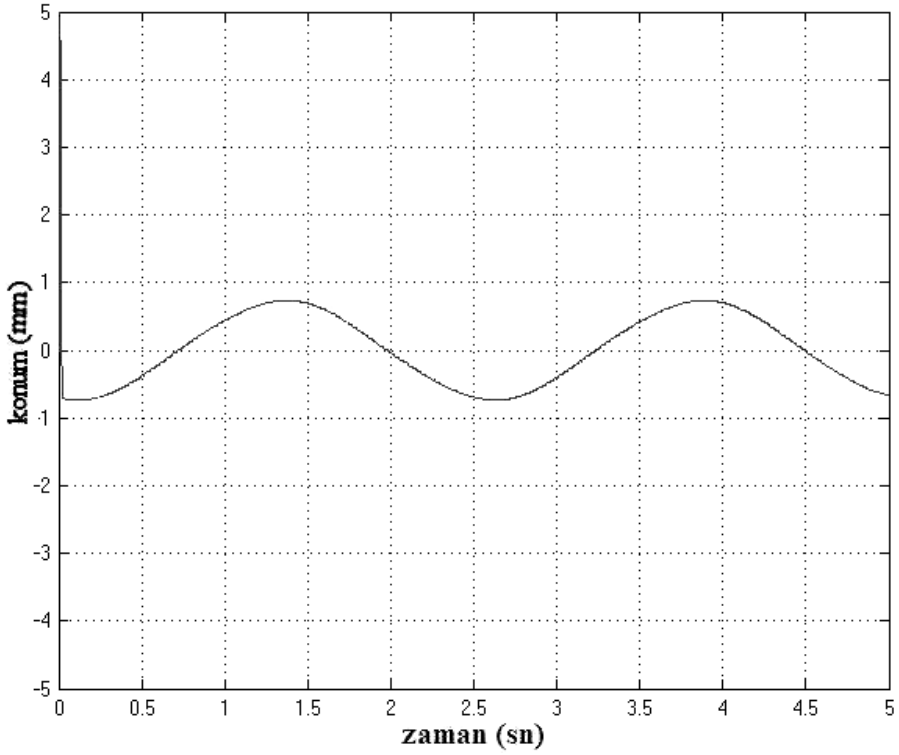
Şekil 5.22. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı alt eksen hız-zaman cevabı



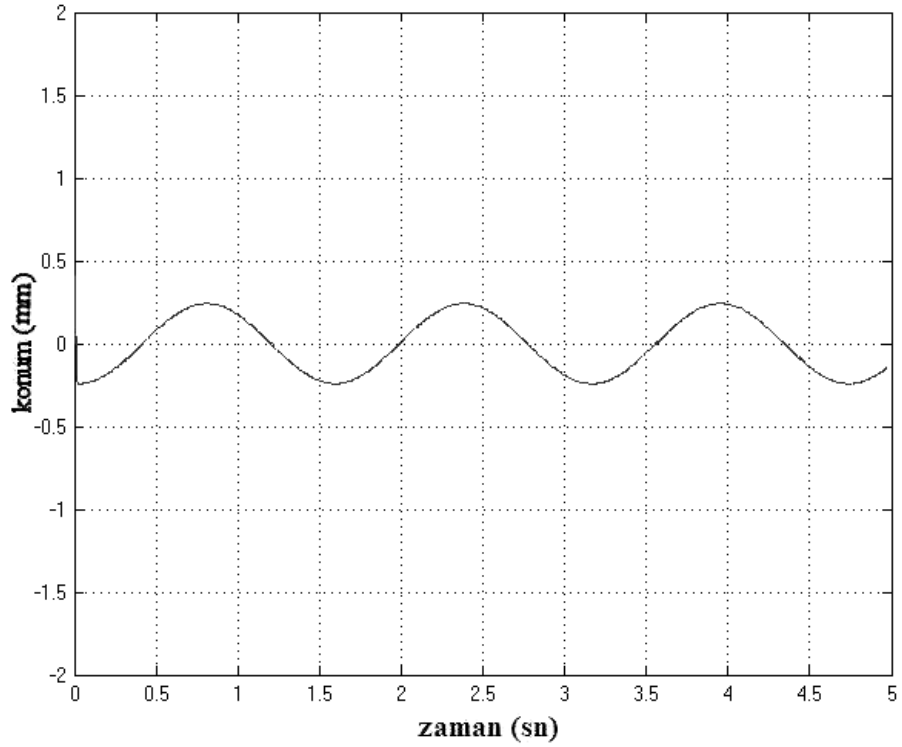
Şekil 5.23 $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen konum-zaman cevabı



Şekil 5.24. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken bozucu girişe karşı üst eksen hız-zaman cevabı



Şekil 5.25. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı

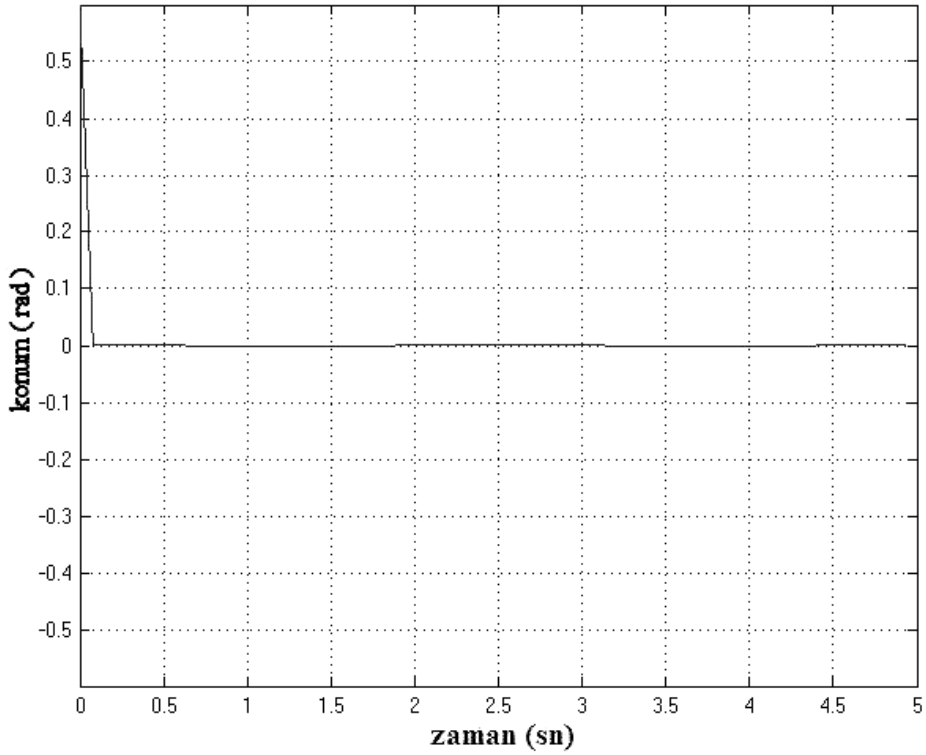


Şekil 5.26. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı

Seçilen kutup noktasında sistem yine beklenenden kötü sonuçlar vermektedir. Konum-zaman cevaplarında bu kutup için de yüksek aşmalar meydana gelmekte ve sistem bozucu girişlere karşı yeterlice kendini toparlayamamaktadır. Sürekli durumda sapmanın maksimum değeri yaklaşık olarak 0,03 radyandır. Yeni bir kutup noktası sanal düzlemde sola kaydırılarak yeni bir değer denenmelidir. Aradaki kademeleri daha fazla göstermemek için şartı sağlayan kutup noktası olarak aşağıdaki noktalar yazılabilir. Bu kısımda bozucu giriş grafikte gösterilmeyecektir. Ancak grafikler yine bozucu girişe karşı çizilmiştir.

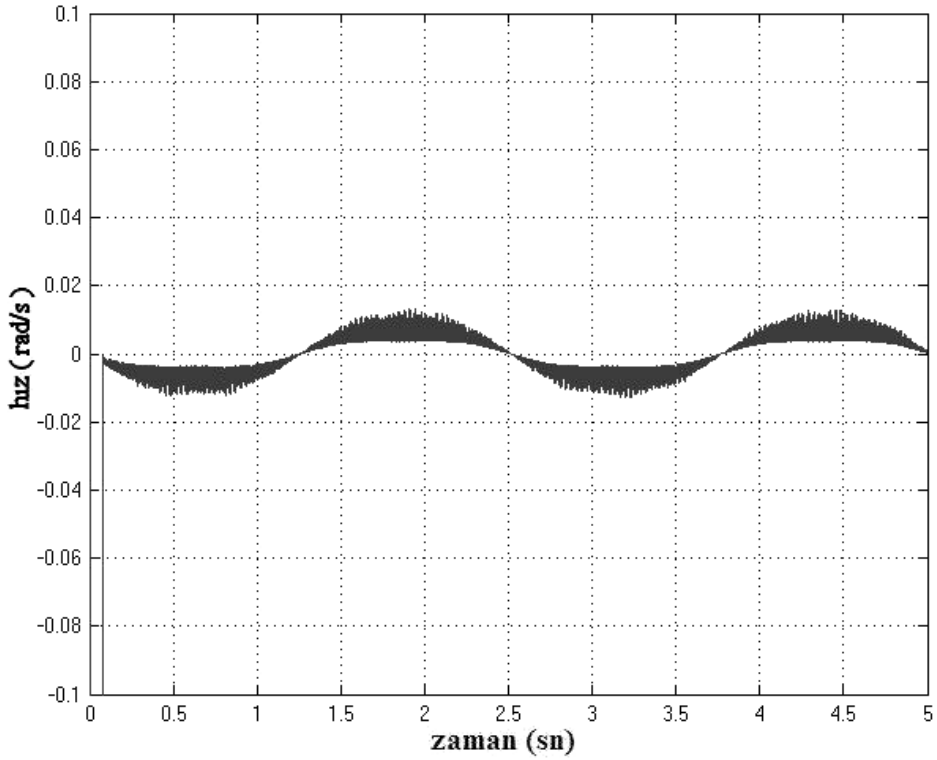
$\mu_1 = -2400 + 800i$

$\mu_2 = -2400 - 800i$

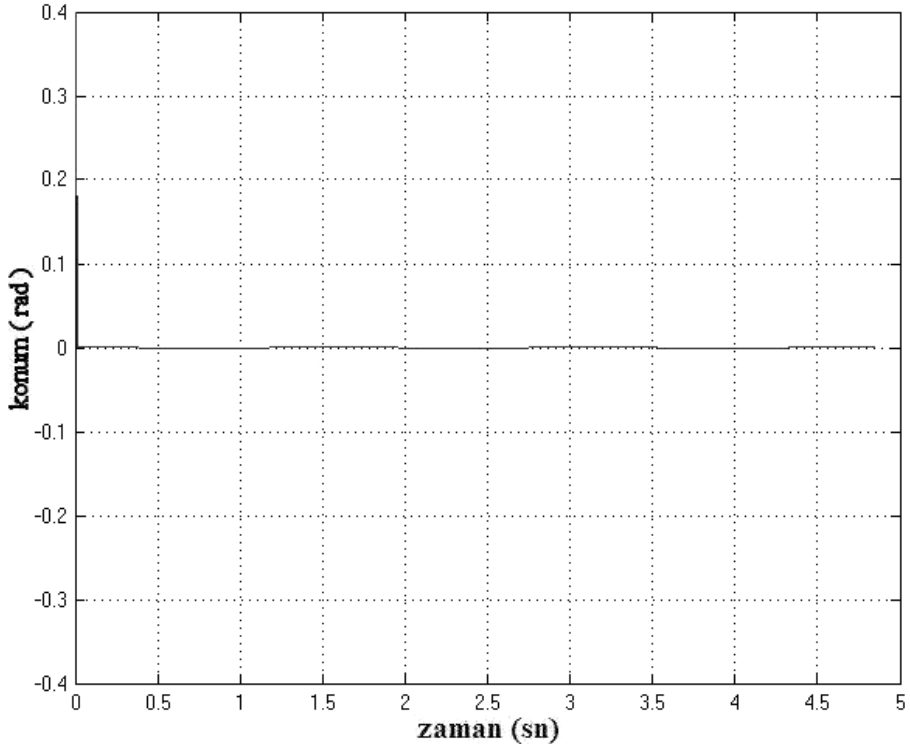


Şekil 5.27. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum-zaman cevabı

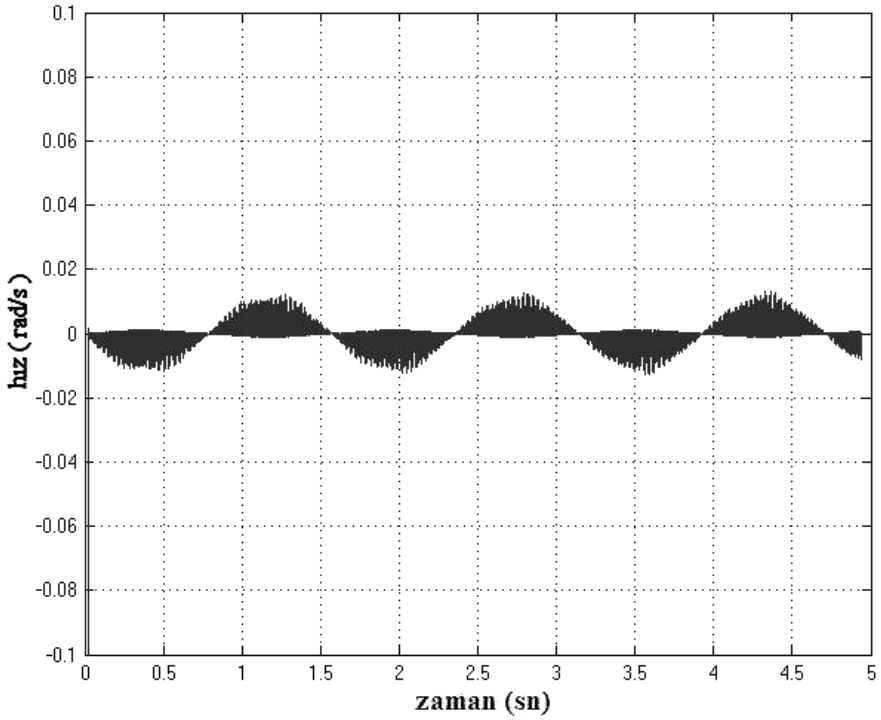
Seçilen bu kutup değerinin cevabına bakılırken alt eksenin başlangıç açısı 0,6 rad seçilmiştir. Sinüsoidal hatanın maksimum değeri 0,0027 rad olarak bulunmuştur. Sistem de 0,1 saniyeden önce bu sapma değerine düşmektedir.



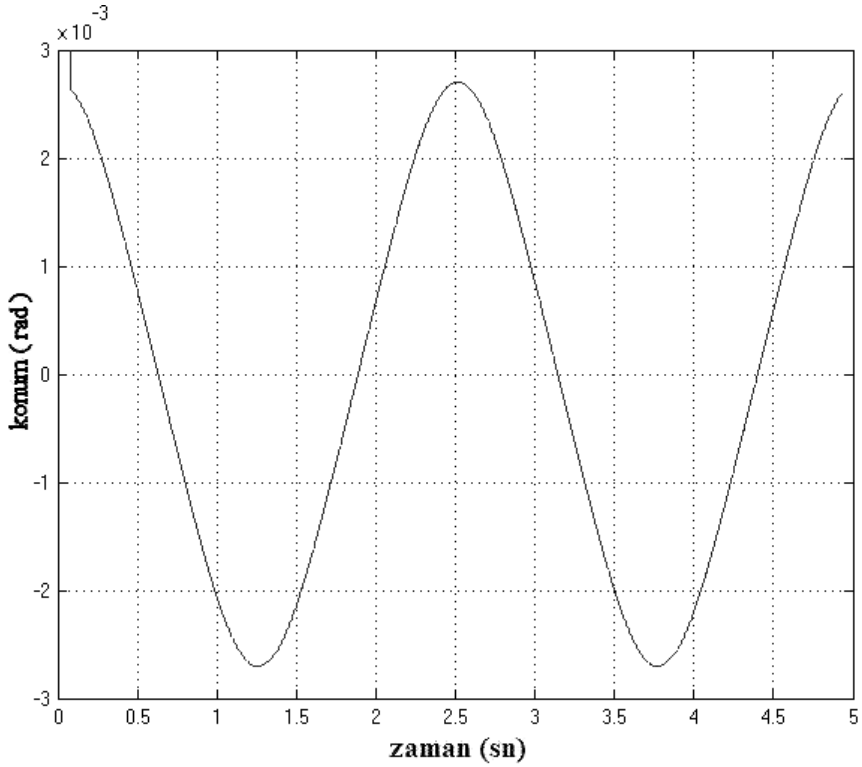
Şekil 5.28. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen hız-zaman cevabı



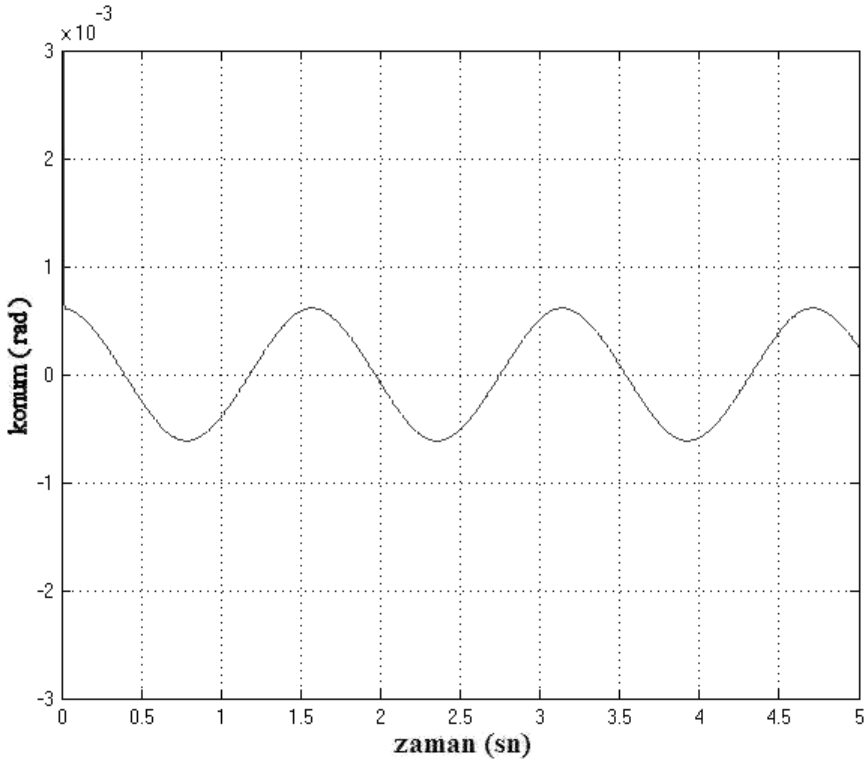
Şekil 5.29. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum-zaman cevabı



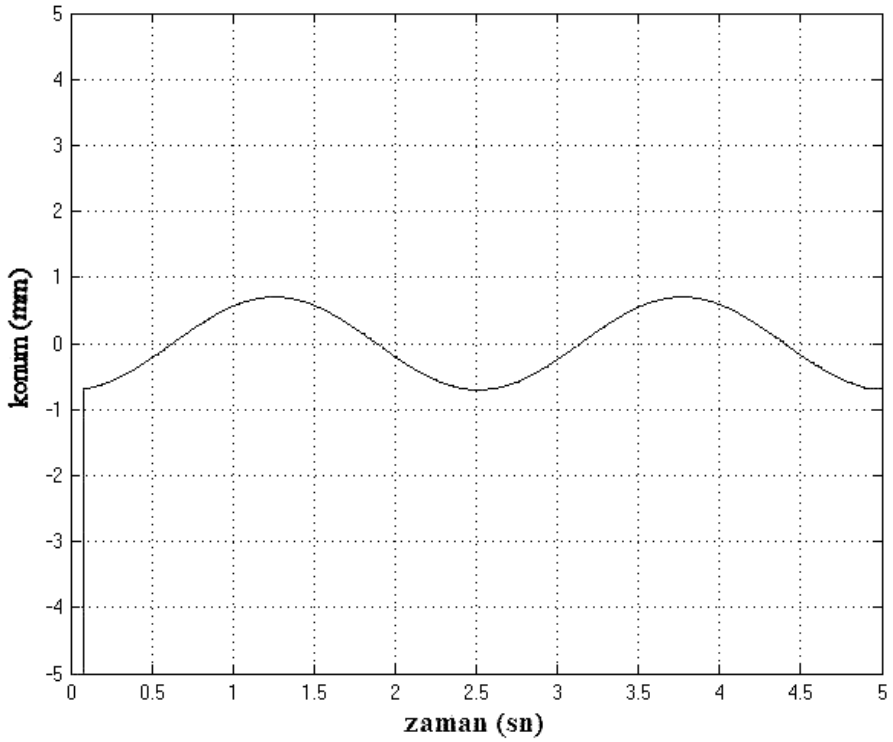
Şekil 5.30. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen hız-zaman cevabı



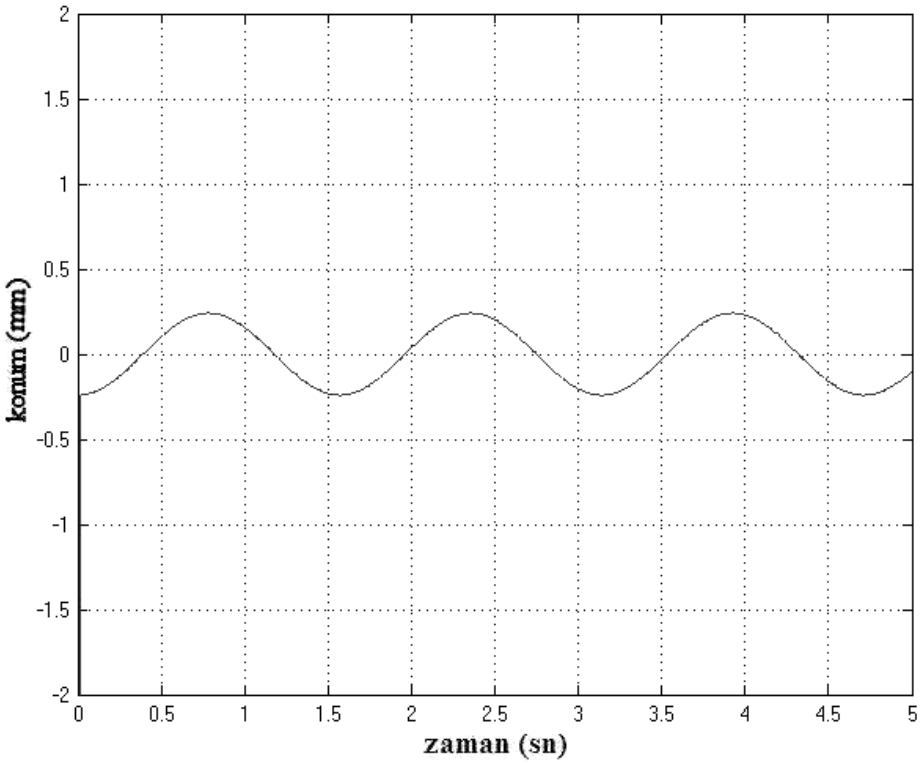
Şekil 5.31. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum-zaman cevabı (ayrıntı)



Şekil 5.32. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum-zaman cevabı (ayrıntı)

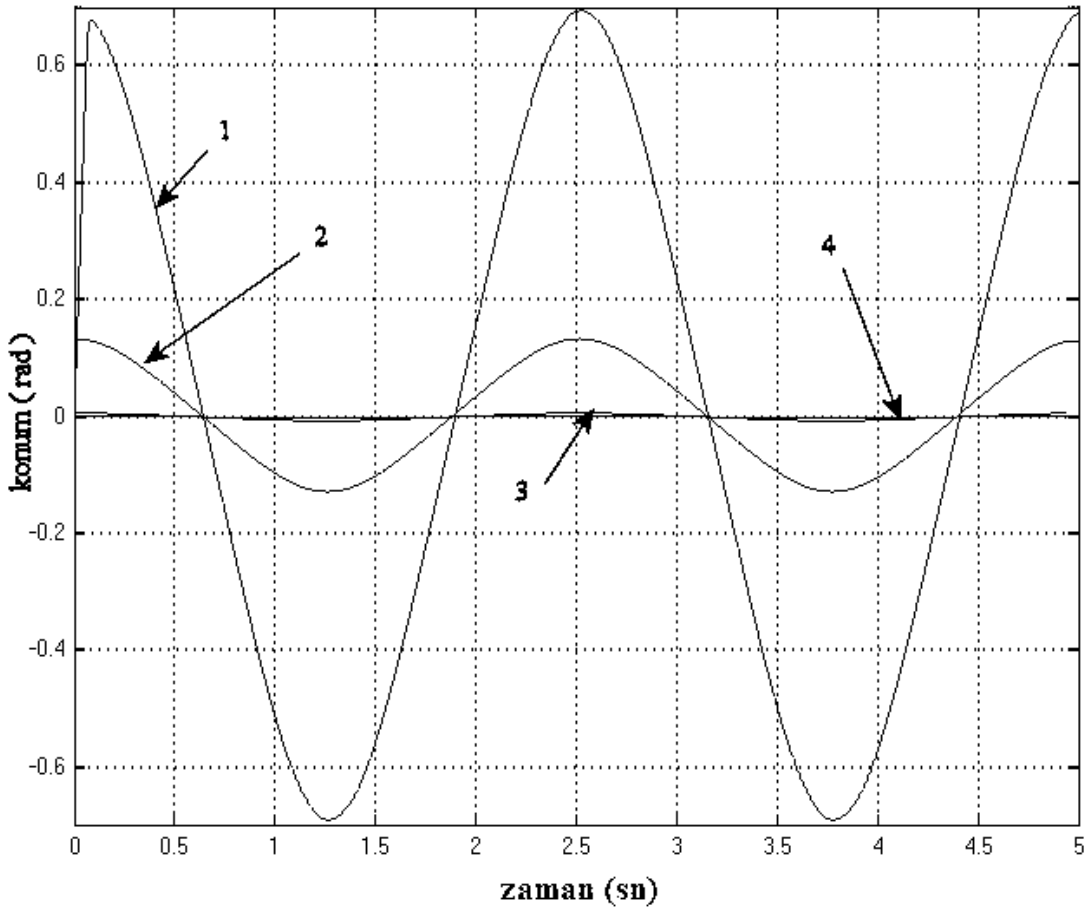


Şekil 5.33. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen valf makarası konum-zaman cevabı



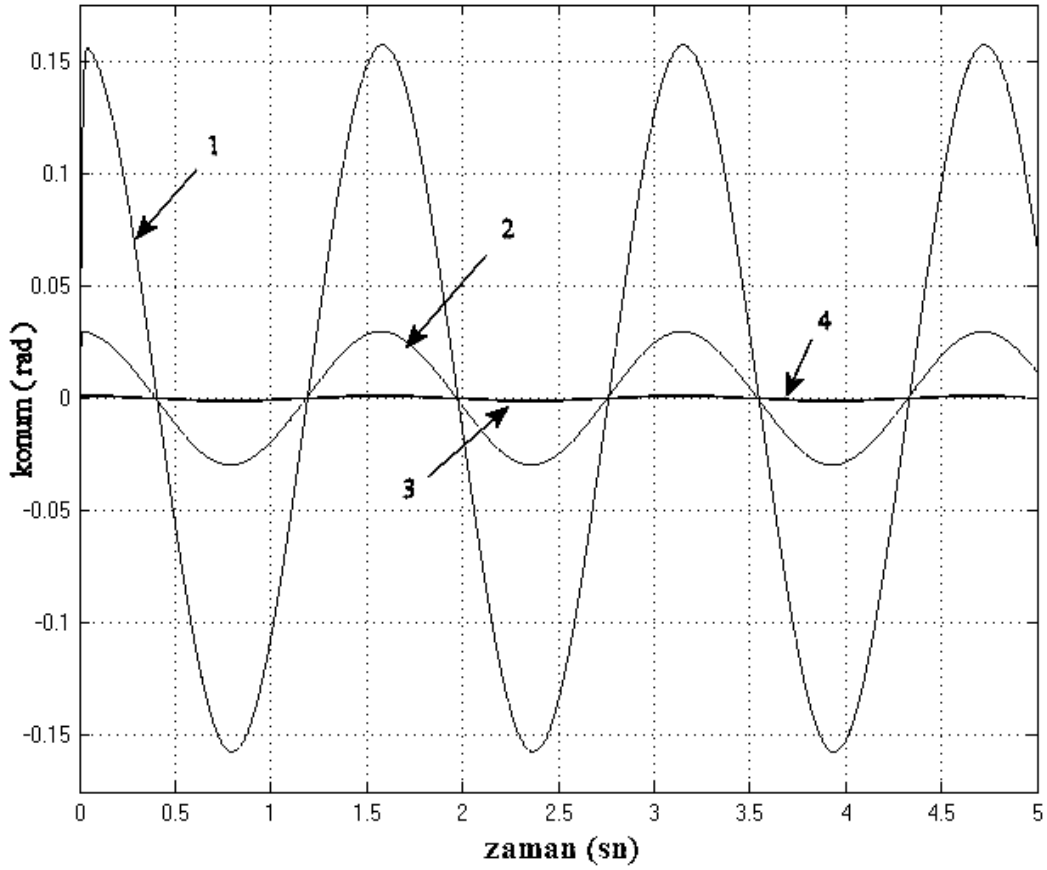
Şekil 5.34. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen valf makarası konum-zaman cevabı

Görüldüğü üzere sistem, seçilen kutup noktası sol tarafa yaklaştırıldıkça beklenen cevaba yaklaşmaktadır. Son seçilen kutup noktasında bozucu girişe karşı sistem kendini stabilize etmeye çalışmakta ve alt ile üst eksene göre dönen tablayı yatayda sabit tutmaya çalışmaktadır. Son seçilen kutup noktası $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ için çıkış açıları istenen maksimum hata değerinin altındadır.. Bu kutup noktasında alt eksenin çıkış değeri θ_1 açısı sürekli durumda sinüsoidal olarak maksimum 0,0027 radyan hata vermektedir. Sistemin sinüsoidal bozucu girişe karşı sürekli durum hatasında maksimum 0,003 radyan sapmaya kadar izin vardır. Aynı şekilde θ_2 açısı da sürekli durumda 0,0006 radyan sapma yapmaktadır. Sistem başlangıç konumunda başlangıç açısal hızları sıfırken ve alt eksen için 0,6 rad başlangıç açısında ve üst eksen için 0,4 rad başlangıç açısında da 0,5 s'den önce istenilen konumuna gelmektedir.



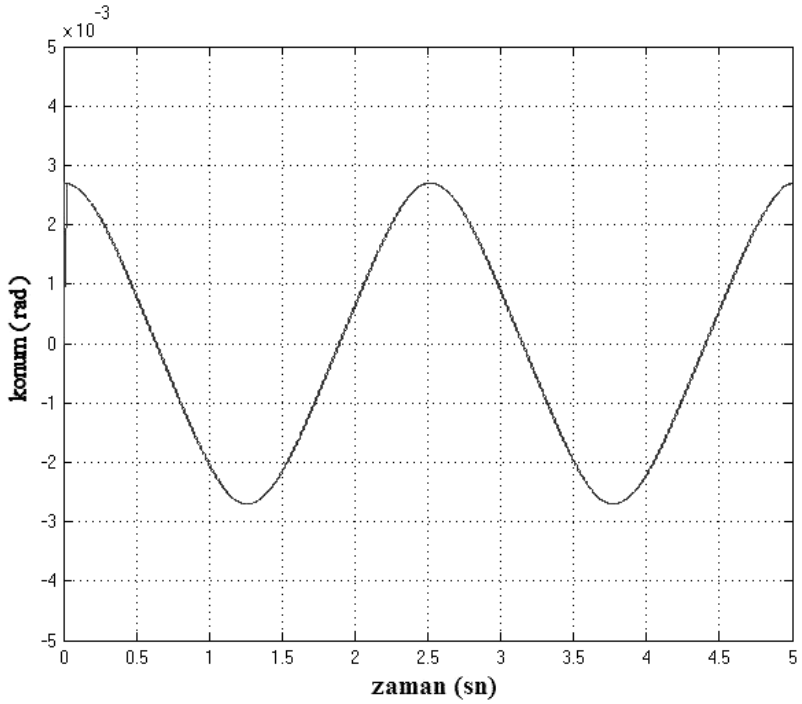
Şekil 5.35. Değişik kutup noktası değerleri için alt eksen konum-zaman cevabı
1. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ 2. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ 3. $\mu_{1,2} = -1500 \pm 600i$
4. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$

Şekil 5.35'te alt eksen için kutup noktasının kaydırılmasının sistemin konum-zaman cevabına etkisi görülmektedir. Seçilen ilk kutup noktası orijine yakın bölgededir. Sistem cevabı 1 numarayla gösterilmiştir. Daha sonra ikinci bir nokta denenmiştir ve cevabı da 2 numara ile gösterilmektedir. Denenen bu iki kutup noktası sistem cevabı üzerinde yeterli geri besleme kazancını oluşturamamakta, dolayısıyla sistem beklenildiği gibi kontrol edilememektedir. 3 numaralı noktada sistem beklenen cevaba gitgide yaklaşmıştır ve son olarak 4 numara ile yapılan yerleştirme ile istenilen davranışı verebilecek geri besleme kazançlarını sağlayabilecek duruma gelmiştir.

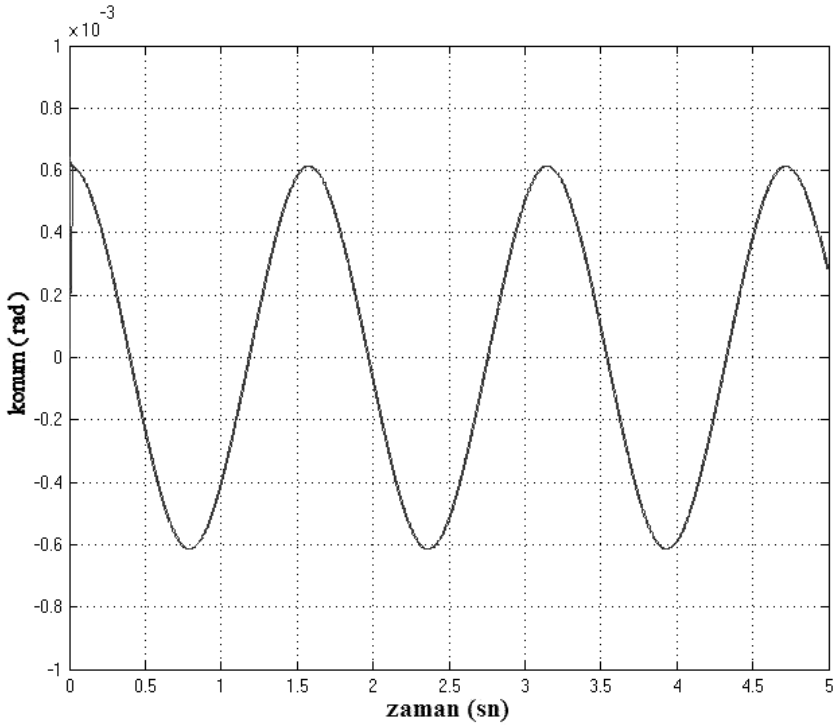


Şekil 5.36. Değişik kutup noktası değerleri için üst eksen konum-zaman cevabı
1. $\mu_{1,2} = -150 \pm 50i$ 2. $\mu_{1,2} = -350 \pm 100i$ 3. $\mu_{1,2} = -1500 \pm 600i$
4. $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$

Şu ana kadar yapılan simülasyonlarda sistem her 0,005 s'de parametrelerini ve dolayısıyla kazanç değerlerini güncellemektedir. 0,005 s oldukça dar bir aralıktır ve lineerleştirme işlemi için de uygundur. Güncelleme aralığının 0,005 s'den daha geniş bir zaman aralığında yapıldığı düşünülerek simülasyon yenilenebilir [17]. Böylece parametrelerin güncelleme aralığı zamansal olarak artırıldığında sistem cevabının nasıl değiştiği de görülerek bu konu hakkında da yorumlar yapılabilir. Parametre güncelleme aralığı 0,025 s olarak ayarlandıktan sonra simülasyona devam edilmiştir.

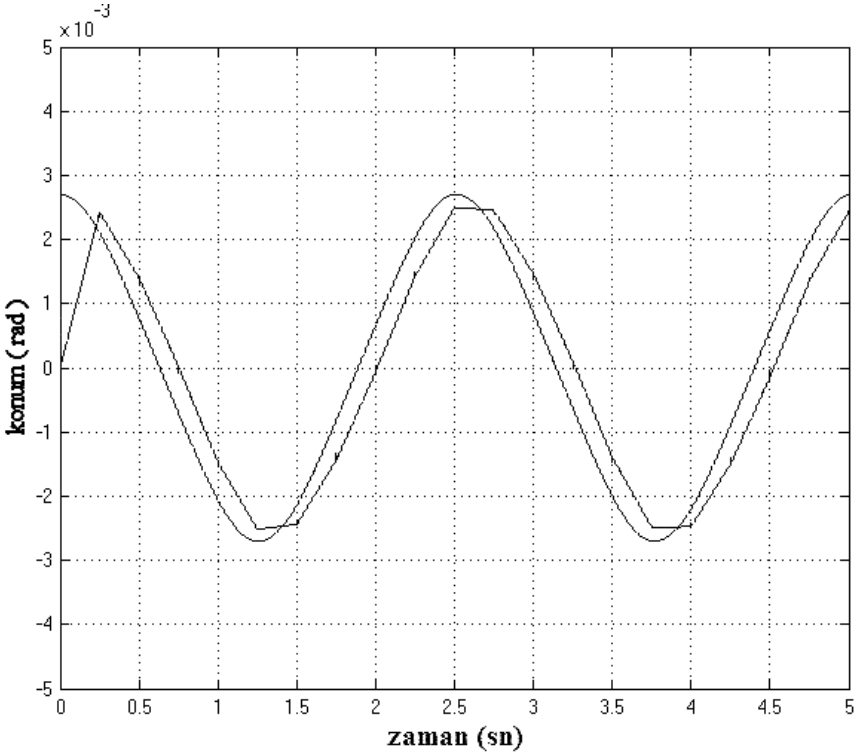


Şekil 5.37. Güncelleme aralığı 0,025 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması



Şekil 5.38. Güncelleme aralığı 0,025 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması

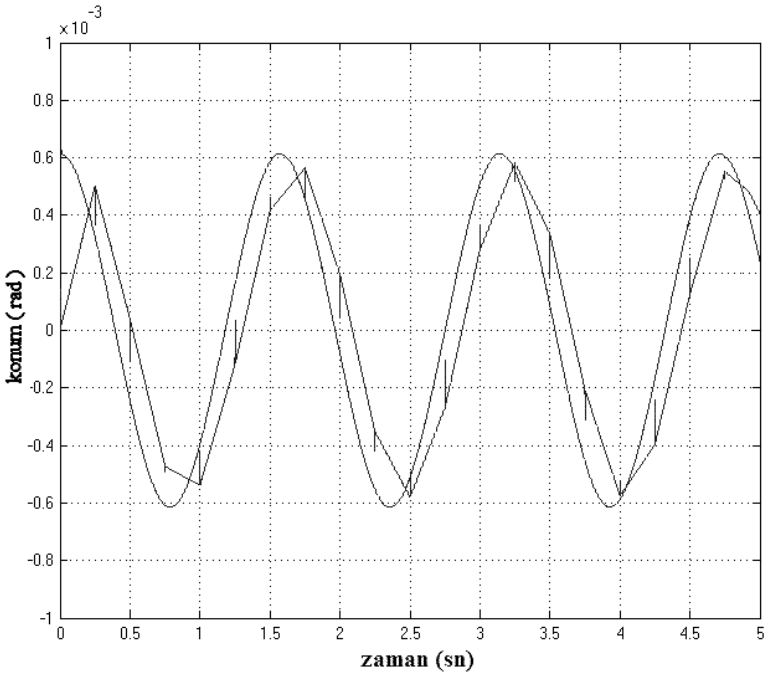
Şekil 5.37 ve Şekil 5.38'den de görüldüğü üzere parametre güncelleme aralığı 0,005 s'den 0,025 s'ye çıkartıldığında alt ve üst eksenlerin konum-zaman cevaplarında hissedilir bir değişiklik meydana gelmemektedir. Görüldüğü üzere konum zaman cevapları üst üste çakışmakta ve birbirleri arasında gecikme zamanları fark edilememektedir. Buradan 0,025s'nin de yeterli bir güncelleme aralığı olabileceği sonucu çıkmaktadır. Güncelleme zamanı 0,25 s olduğunda sistemin cevabına tekrar bakılacak olursa bu sefer hissedilir değişiklikler olduğu görülür.



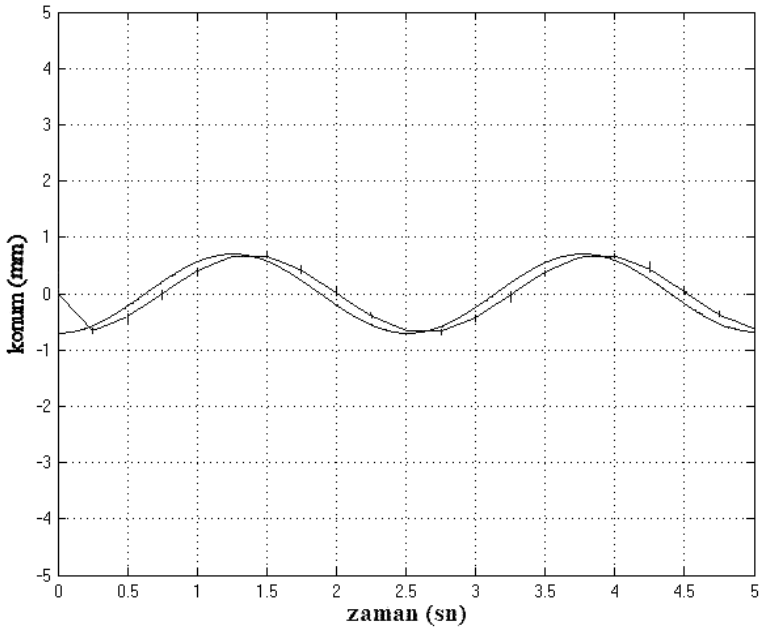
Şekil 5.39. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması

Şekil 5.39 ve Şekil 5.40'tan da görüldüğü gibi parametre güncelleme aralığı 0,25s'ye çıkarıldığında alt ve üst eksenlerin konum-zaman cevaplarında fark edilir değişiklikler meydana gelmekte ve daha ani hareketler ile cevaplarda sıçramalar meydana gelmektedir. Burada genlik çok küçük olduğundan dinamik davranış üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır ancak kontrol sinyalindeki ani sıçramalar yine ani akım değişikliklerine yol açabilir. Bu da istenmeyen bir durumdur. Dolayısıyla sistem sürekli güncellendiğinde güncelleme zaman aralığını

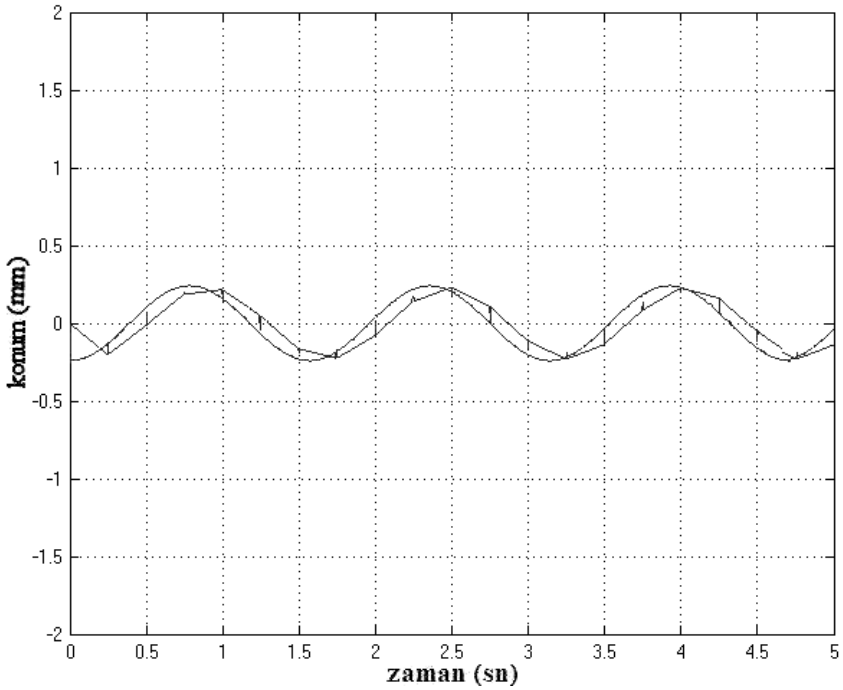
mümkün olduğunca düşük tutmakta yarar vardır. Bu da kontrol sisteminde durum değişkenlerini ölçen uygun aletlerin çözünürlüklerine bağlıdır.



Şekil 5.40. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen konum zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması



Şekil 5.41. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken alt eksen valf makarasının konum-zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması



Şekil 5.42. Güncelleme aralığı 0,25 s ve $\mu_{1,2} = -2400 \pm 800i$ iken üst eksen valf makarasının konum-zaman cevabının ilk durumla karşılaştırılması

5.2. PID Kontrol

PID kontrol, endüstriyel kontrol sistemlerinde en çok kullanılan kontrol tipidir. Tasarlanan sistemler için piyasada PID kontrolcüleri bulmak oldukça kolaydır. Esnek bir kontrol tipi olduğu için oldukça yaygındır [22].

PID kontrolcü, daha önceden de belirtildiği gibi oransal, integral ve türevsel devrelerin bütünüdür. Amaç, düz oransal kontroldeki gibi sadece hata sinyalini belirli bir kazançla çarpmak değildir. Hata sinyalinin türevi ve integrali de alınarak bunlar da belirli kazançlarla çarpılıp kontrol sinyaline eklenmektedir. Barındırdığı üç işlemin de kendi özellikleri, avantajları ve dezavantajları vardır. Bu yüzden PID kontrolcüler, barındırdığı kontrol tiplerinin ayrı ayrı avantajlarını kullanarak bir tipin dezavantajını diğer tipin avantajı ile ortadan kaldırmaya çalışır [1].

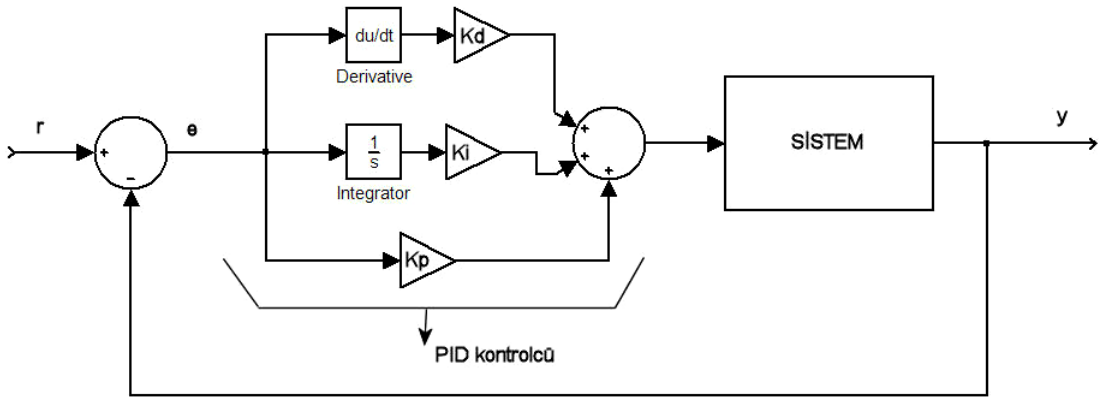
Bilindiği gibi en basit kontrol oransal kontroldür. Bu yolda çıkış sinyali geri beslenerek referans girişten çıkartılır ve hata sinyali elde edilir. Bu sinyal bir K kazancı ile çarpılarak kontrol sinyali sisteme verilir. Böylece çıkış ile giriş arasında oransal bir durum söz konusudur. Oransal kontrolde sürekli rejim hatası azalır ancak aşım artar. Bu kontrol tek başına çoğu zaman yeterli değildir. Oransal kontrolde kazancı artırarak olumsuzluklarını örtmeye çalışmak da kontrolcüye aşırı yüklenmek demek olduğundan doğru bir yöntem değildir. Bu nedenle integral ve türevsel yöntemler sisteme dahil edilir.

Oransal kontrole türevsel kontrol de eklenirse, PD kontrol elde edilir. Bu kontrolde türevsel kısım oransal kontrolün açığını kapatmaya çalışır ve yerleşim zamanı ile aşım miktarını azaltır. Ancak sürekli durum üzerinde büyük bir etki yapmaz. Türevsel yerine integral kullanıldığında ise PI kontrol elde edilir ve bu kontrolde de aşım artmasına rağmen sürekli durum hatası giderilmektedir. Dolayısıyla tüm bu kontrol tiplerinin özelliklerini kullanmak için PID kontrolcüler kullanılır. Sistemin aşma miktarı ve yerleşme zamanı azaltılırken aynı zamanda sürekli durum hatası da giderilmiş olur.

Çizelge 5.1. Kontrol tiplerinin sistemin birim basamak zaman cevabı üzerine etkileri

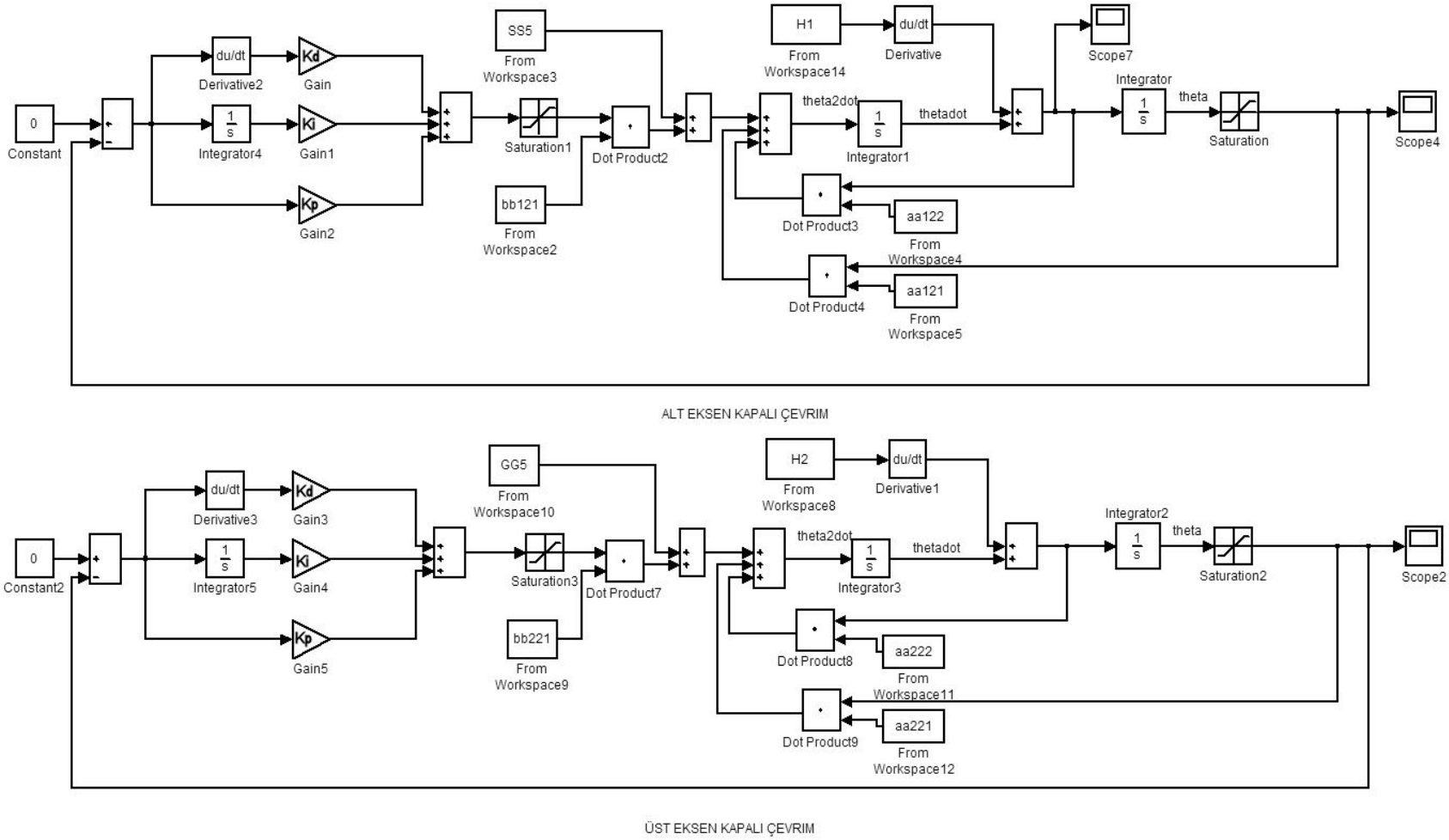
İkinci Dereceden Tip 0 Sistem	Yükseliş Zamanı	Aşım Miktarı	Yerleşim Zamanı	Sürekli Durum Hatası
Oransal Kontrol	Azalır	Artar	Az etkiler	Azalır
Integral Kontrol	Azalır	Artar	Artar	Elenir
Türevsel Kontrol	Az etkiler	Azalır	Azalır	Az etkiler

Çizelge 5.1'de 3 kontrolcünün de ikinci dereceden tip 0 sistemin birim basamak zaman cevabına etkileri görülmektedir. PID kontrolcü ile bu özellikler birleştirilerek her kontrolcü için kazançlar bulunarak istenilen performans sağlanmaya çalışılır. Köklerin yer eğrisi yada faz bölgesi yöntemleri kullanılarak bu kazançlar çeşitli denemelerle bulunabilir. Tek sonuç yoktur. Sonsuz çözüm vardır. Uygun olan çözüm seçilerek sistem bu şekilde kontrol edilebilir [15, 19].



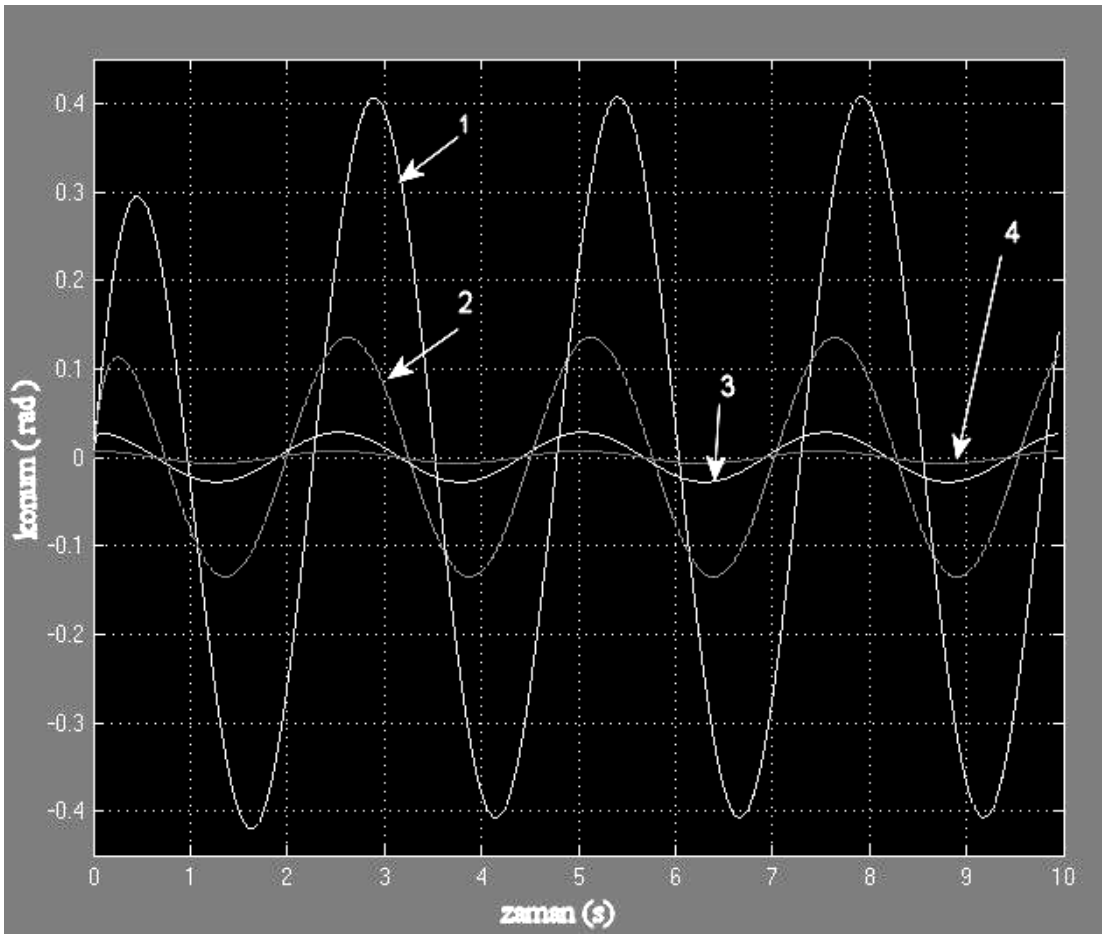
Şekil 5.43. PID kontrolcü yapısı ve sisteme uygulanışı

Modern kontrol sistemlerinde PID kontrolcü için PD ve PI kontroller denenerek uygun katsayılar elde edilmeye çalışılıp bunların kombinasyonu kullanılarak sistemin cevabına bakılmakta ve istenilen şartları sağlayıp sağlamadığı araştırılmaktadır. Bu çalışmada köklerin yer eğrisini kullanarak tek tek PD ve PI kontrolcü kazançlarının hesaplanmasına değinilmeyecektir. PD ve PI kontrolcü tasarımlarında deneme yanılma yoluyla birçok değer bulunabilir ve köklerin yer eğrisine göre belirli değerler denenerek cevaba bakılmaktadır. Chang, Hsieh ve Hwang (2002) kendi kendine kazanç değerlerini hesaplayan PID kontrolcü üzerine çalışmalar yapmıştır [23]. Mevcut sistem, bulunduğu ortamın hareketine bağlı olarak sürekli güncellendiğinden deneme yanılma sayısına bağlı olarak bir de güncellenme sayısı kadar bunun çarpıldığı düşünülürse çok zaman alıcı bir çalışma olacaktır. Bu nedenle PID kontrolcü tasarımında sistem parametreleri yörünge boyunca yine güncelleşerek lineerleştirilecek, fakat yörünge boyunca tüm noktalarda sistemi kontrol edebilen sabit parametreli PID kontrolcü kazançları bulunmaya çalışılacaktır. İlk olarak sisteme oransal kontrol eklenerek cevabına bakılacak ve bu cevaba göre türevsel ve integral kontrolcü eklenecektir. Çeşitli kazançlarda sistemin cevabı incelenecektir.



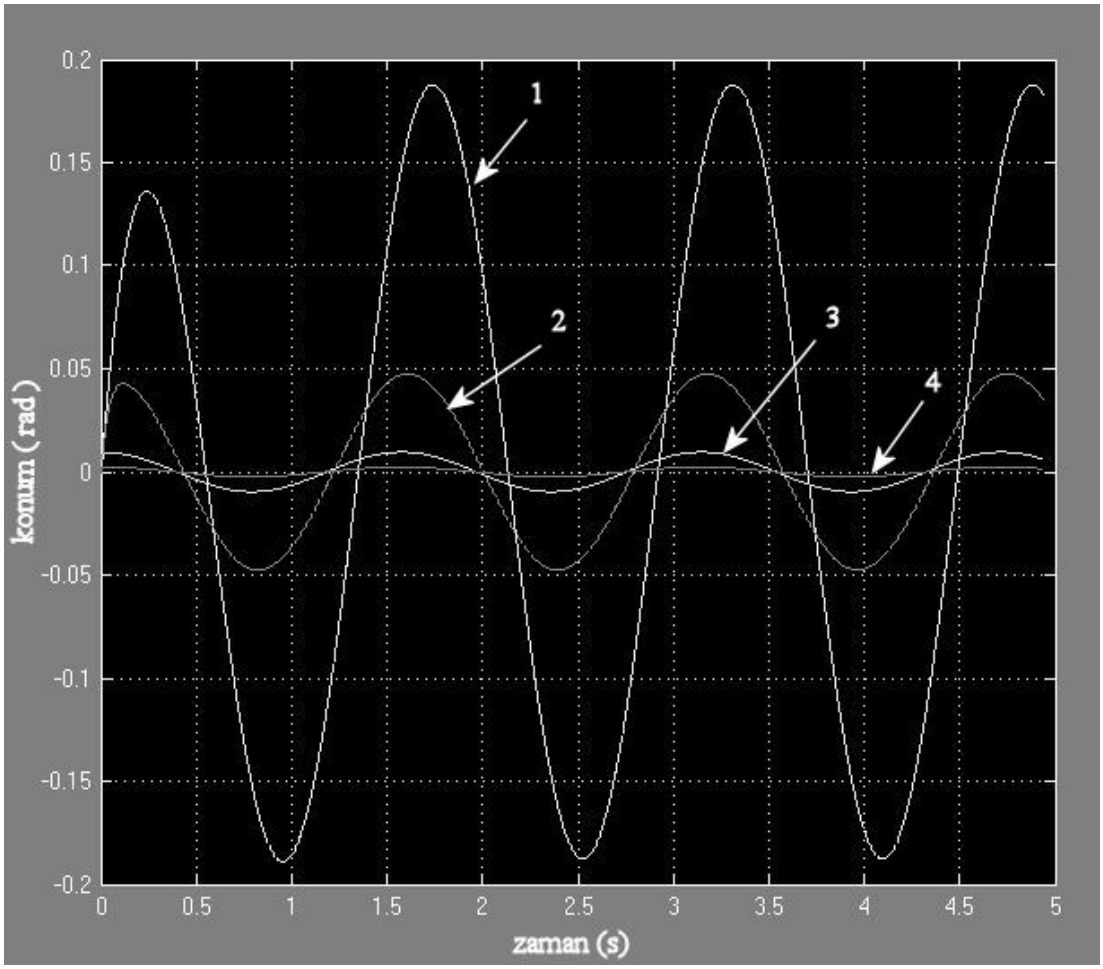
Şekil 5.44. Sistemin PID kontrolcü ile Matlab® Simulink benzetimi

Sistemin açık çevrim cevabı Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmişti. Sadece oransal kontrolcü ile farklı kazançlar için aynı ortam hareketine karşı platformun zaman cevabı ise aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.45. Oransal kontrolün alt eksen konum zaman cevabına etkisi
1. $K_p = 1$ 2. $K_p = 5$ 3. $K_p = 25$ 4. $K_p = 100$

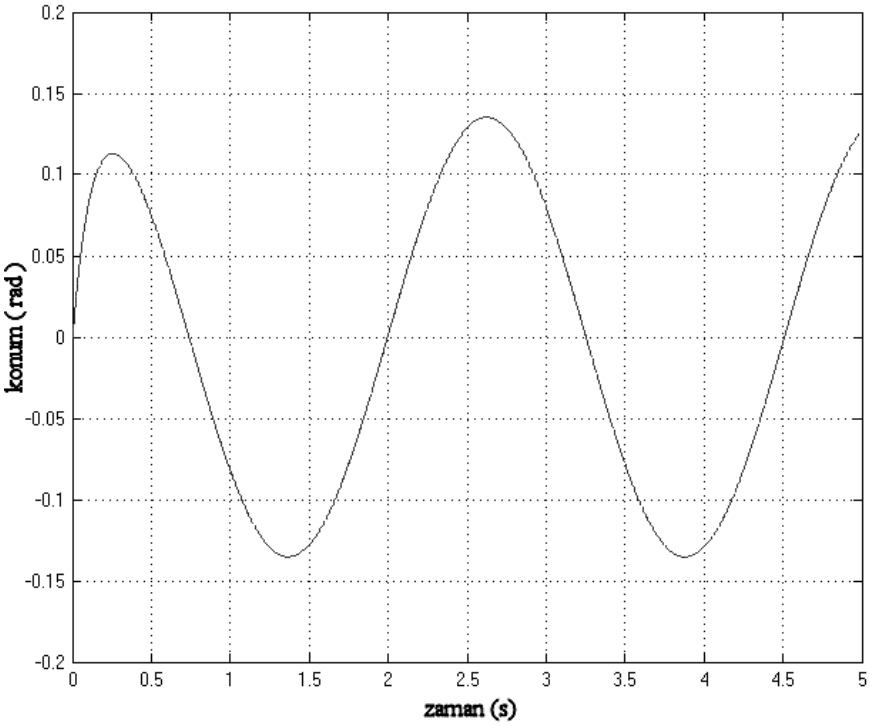
Şekil 5.45'ten de görüldüğü üzere K_p oransal kontrol kazancı arttığı zaman sistem cevabı iyileşmektedir. Ancak başlangıç anında sistemin gerçekte veremeyeceği ani yükselmeler görülmektedir. Ani yükselmeler türevsel kontrolle ve hata miktarı da integral kontrolcü kullanılarak sistem istenilen davranışa getirilebilir. Bunun için değişik kazanç değerleri denenmiştir.



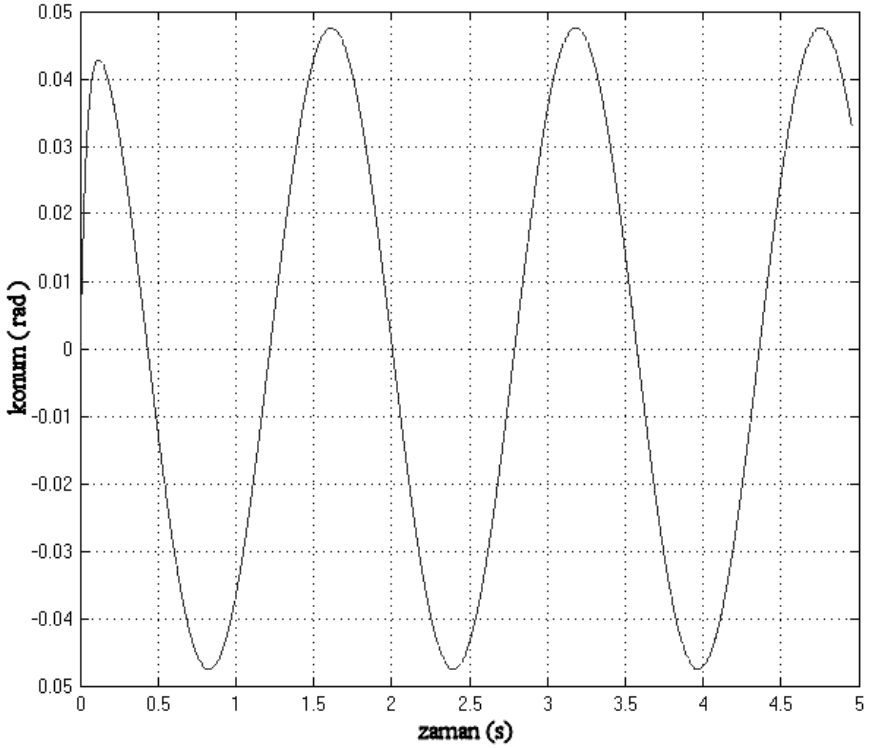
Şekil 5.46. Oransal kontrolün üst eksen konum zaman cevabına etkisi
1. $K_p = 1$ 2. $K_p = 5$ 3. $K_p = 25$ 4. $K_p = 100$

Aynı şekilde Şekil 5.46'da da oransal kontrol kazancı K_p arttığında sistem cevabının iyileştiği görülmektedir. Ancak üst eksende de sadece oransal kontrolde kazanç değeri yüksek olmadıkça gerçekçi geçici cevap alınamamaktadır. Bu nedenle hem alt hem de üst eksenin kontrolünde oransal kontrol kazancı düşük tutulacak, istenilen davranışlar da integral ve türevsel kontrolcüler eklenerek elde edilmeye çalışılacaktır.

Her iki eksen için de $K_p = 5$ iken konum zaman cevaplarına bakılacak olunursa Şekil 5.47 ve Şekil 5.48 elde edilir.

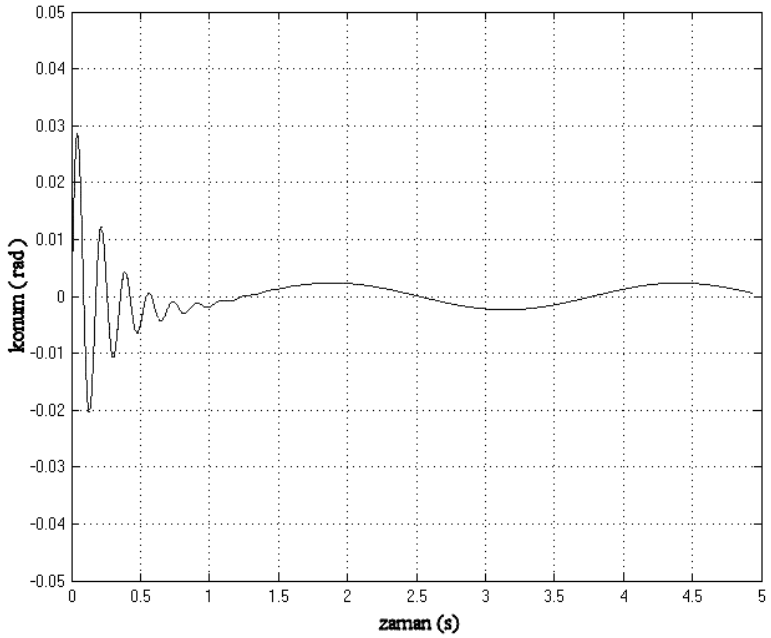


Şekil 5.47. $K_p = 5$ iken alt eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı

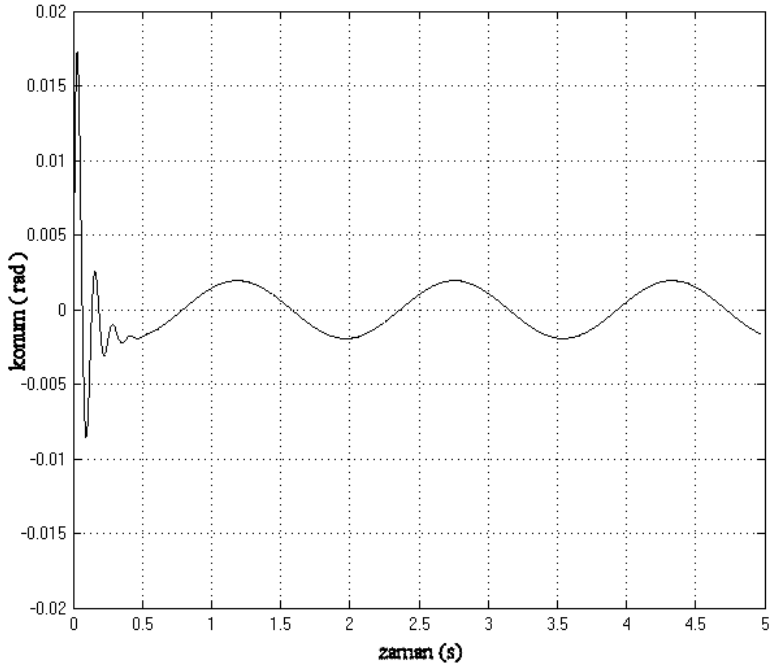


Şekil 5.48. $K_p = 5$ iken üst eksenin oransal kontrol ile konum – zaman cevabı

Elde edilen bu konum-zaman cevaplarında hata miktarının büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle hata miktarı integral kontrolcü eklenerek giderilmeye çalışılacaktır.



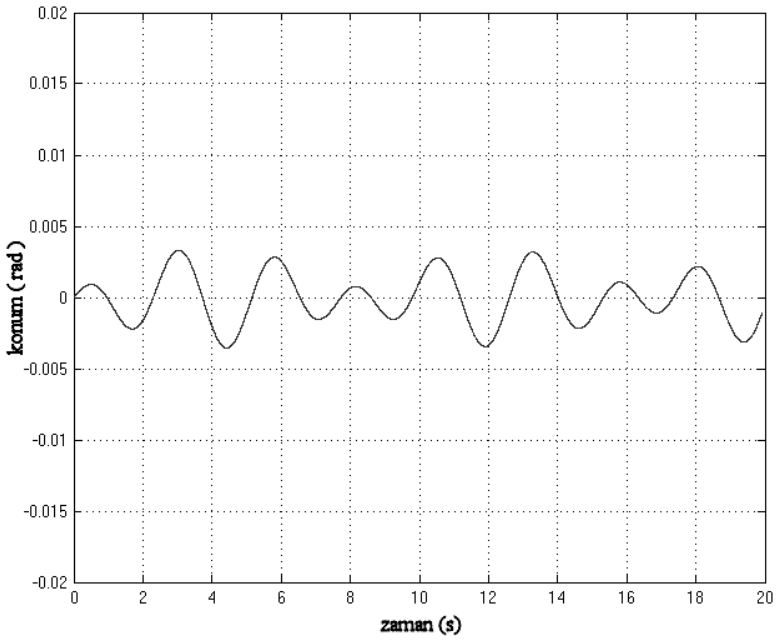
Şekil 5.49. $K_p = 5$ ve $K_i = 750$ iken alt eksenin PI kontrol ile konum – zaman cevabı



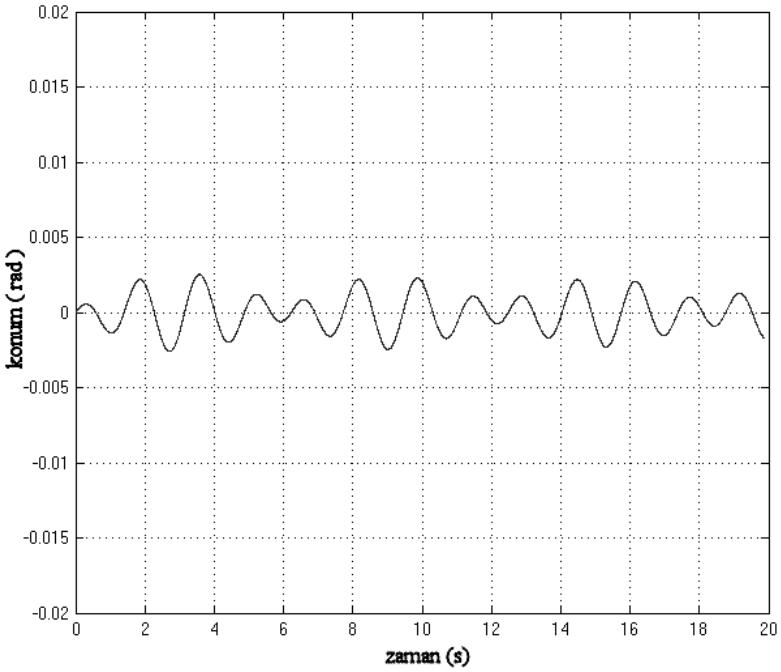
Şekil 5.50. $K_p = 5$ ve $K_i = 750$ iken üst eksenin PI kontrol ile konum – zaman cevabı

Sisteme integral kontrolcü eklendiğinde sürekli durumda hatayı istenilen seviyeye indirdiği gözlemlenmiştir. Burada integral kontrolcü kazancı küçük değerlerden başlanarak deneme yapılmış ve istenilen hata değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Kontrol sistemlerinde integral kontrolcünün sürekli durum hatasını elimine ettiği daha önceden de belirtilmiştir ancak buradaki sürekli durum hatası, sistemin sürekli değişken ortam konumundan kaynaklanmaktadır. 0,003 rad değerindeki maksimum sürekli durum hatası sistem için kabul edilebilir düzeyde kabul edilmiştir.

Integral kontrol her ne kadar sürekli durum hatasını istenilen seviyeye indirse de geçici cevapta açım değeri çok yüksektir. Bunu azaltmak için sisteme türevsel kontrol de eklemek gerekmektedir. Dolayısıyla sonuç olarak tasarlanan kontrolcü PID kontrolcü olmuş olacaktır.



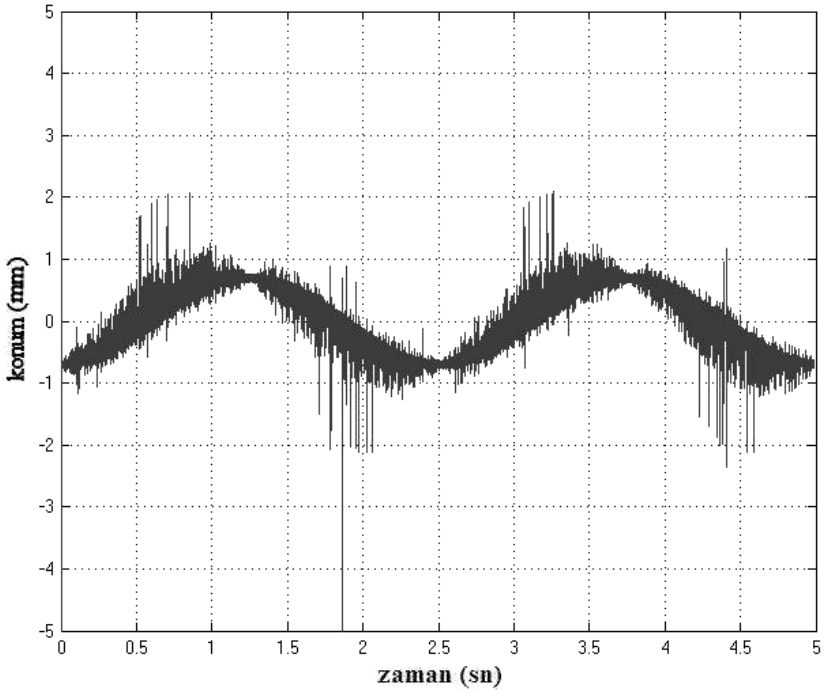
Şekil 5.51. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 250$ iken alt eksenin PID kontrol ile konum – zaman cevabı



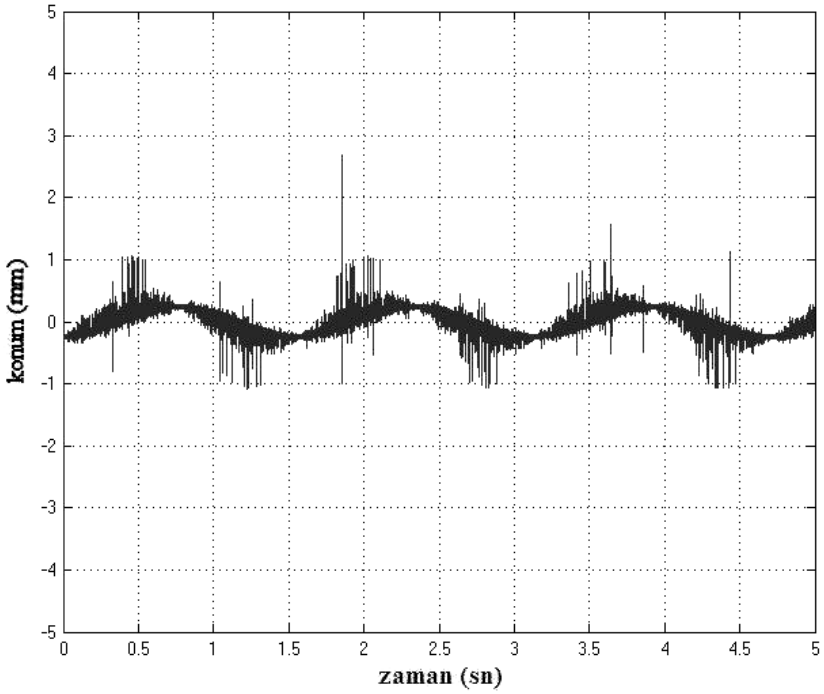
Şekil 5.52. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 85$ iken üst eksenin PID kontrol ile konum – zaman cevabı

Şekil 5.51 ve Şekil 5.52'den görüldüğü üzere alt eksen kontrolüne $K_d = 250$ ve üst eksen kontrolüne $K_d = 85$ değerinde türevsel kontrol kazançları eklendiğinde sistem istenilen cevaba ulaşmaktadır. PID kontroldeki cevap da durum değişkeni geri besleme yönteminde elde edilen sonuç gibi amaca ulaşmaktadır. Ancak sadece çıkışın zaman cevabına bakmak yeterince doğru bir yaklaşım değildir. Kıyaslama için sistemin girişinin zaman cevaplarına da bakmak daha doğru olur.

Şekil 5.53 ve Şekil 5.54'te PID kontrolde valf makaralarının konum zaman cevapları görülmektedir. Görüldüğü üzere konum zaman cevabında yüksek frekansta titreşim söz konusudur. Her ne kadar küçük genlikli titreşim frekansları diter sinyali olarak valfin rahat çalışması için sisteme eklense de bu denli yüksek genlikleri genellikle pratikte elde etmek güçtür. Sistem tasarımında valfin kütlesi ihmal edildiğinden durum geri beslemeli kontrolde verdiği zaman cevabı kontrol açısından daha uygun ve kolaydır.



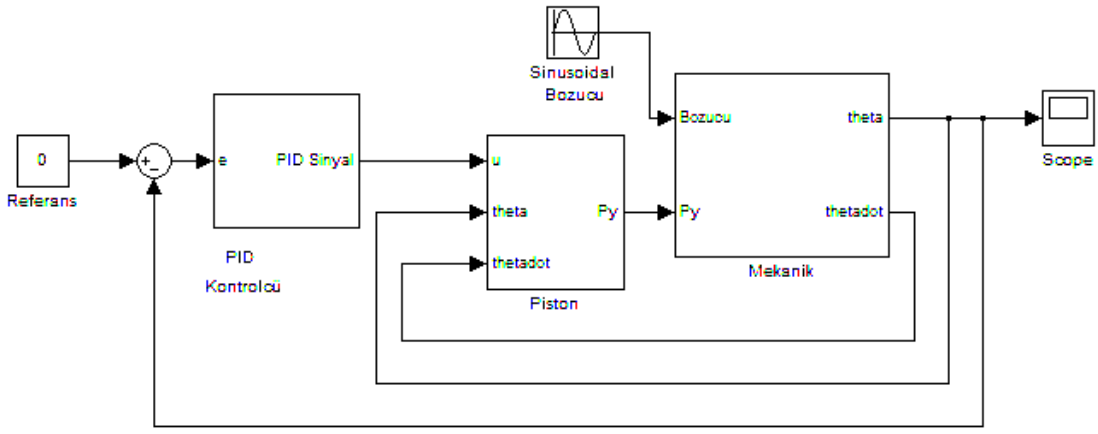
Şekil 5.53. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 250$ iken alt eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı



Şekil 5.54. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 85$ iken üst eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı

5.3. Nonlineer Model ile PID Kontrol

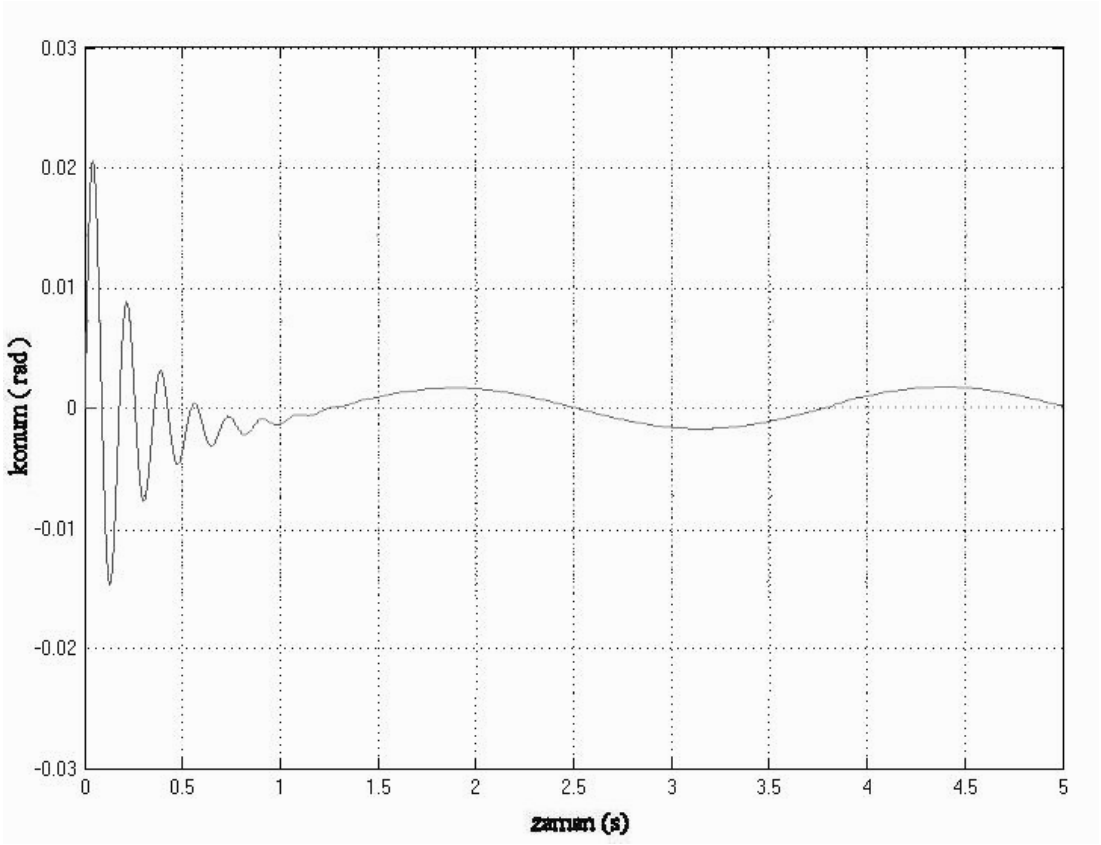
Lineer modeller ile yapılan simulasyonlar sistemlerin nasıl davranacağı üzerine fikir vermektedir. Bu kısımda yapılmak istenen ise lineerleştirilmiş modele PID kontrol uygulandığında elde edilen cevabın, nonlineer sistem modeline uygulandığında gerçekte nasıl cevap verdiğidir. Lineerleştirilmiş modelde güncelleme zaman aralığı ve sayısal olarak da geri farklar yöntemi kullanıldığından valflerin konum zaman cevabında gürültüye neden olmuştur. Nonlineer modelde güncelleme yöntemi olmayacağından valflerin konum zaman cevabı da karşılaştırılacaktır.



Şekil 5.55. Tek serbestlik derecesi için doğrusal olmayan sistem modeli ve PID kontrolcünün uygulanışı

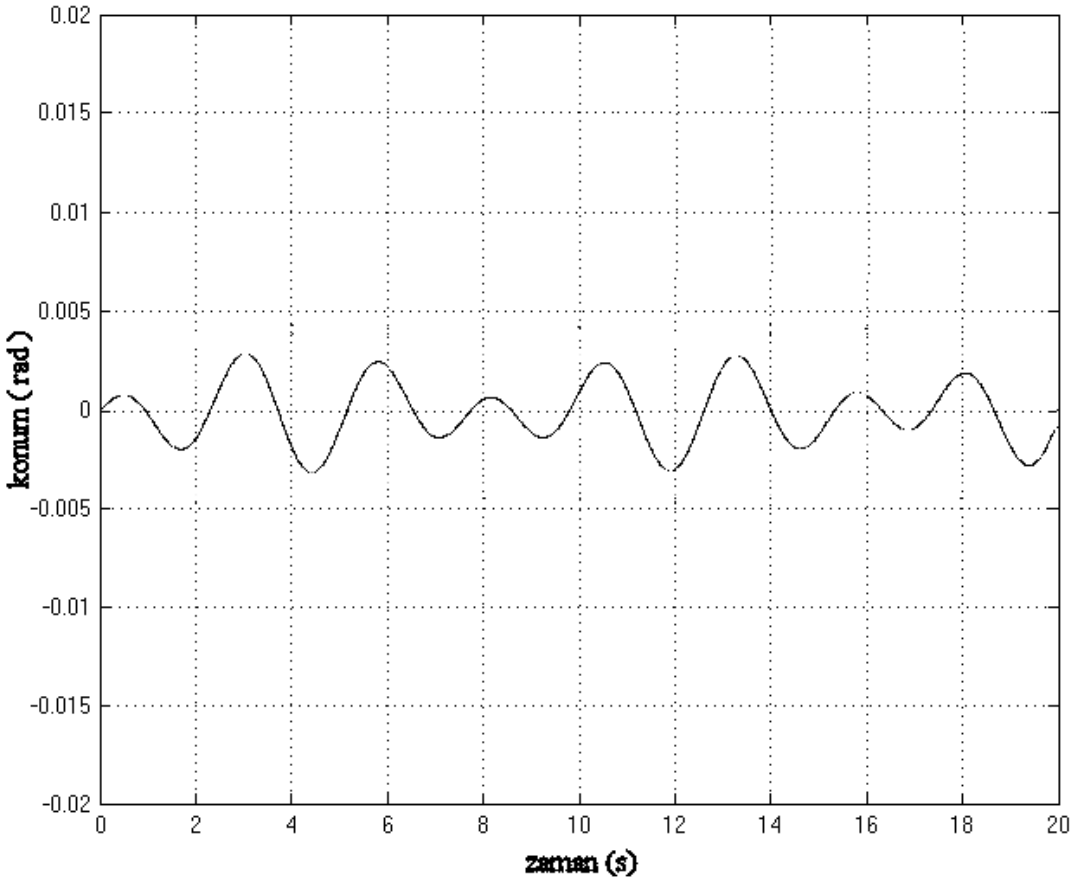
Şekil 5.55'te verilen tek serbestlik derecesi için nonlineer sistem modeline, önceki kısımdaki gibi PID kontrol uygulanacak ve sonuçlar karşılaştırılacaktır. K_p = 5, K_i =750 ve K_d = 250 iken elde edilen konum-zaman cevabı bu modelde de uygulanacak, parametreleri ayarlanan kontrolcünün, nonlineer modelde nasıl performans gösterdiğine bakılacaktır. Nonlineer sistem modelindeki alt sistem blokları görülmektedir. Bu bloklar ayrıca açılmakta ve nonlineer sistem denklemlerinin modellerini barındırmaktadır. Aynı şekilde sisteme sinusoidal bir bozucu açı girişi etki ettiği düşünülmüş ve türevi alınarak açısal hız kısmından sisteme eklenmiştir.

Karşılaştırma için yapılacak olan nonlineer sistem cevabı analizi, sadece alt serbestlik derecesi için ele alınacaktır. Sistem yapıları aynı olduğundan karşılaştırma için alt serbestlik derecesinin lineer ve nonlineer modellerinin karşılaştırılması yeterlidir.



Şekil 5.56. $K_p = 5$ ve $K_i = 750$ iken alt eksenin PI kontrol ile konum – zaman cevabı (Nonlineer durum)

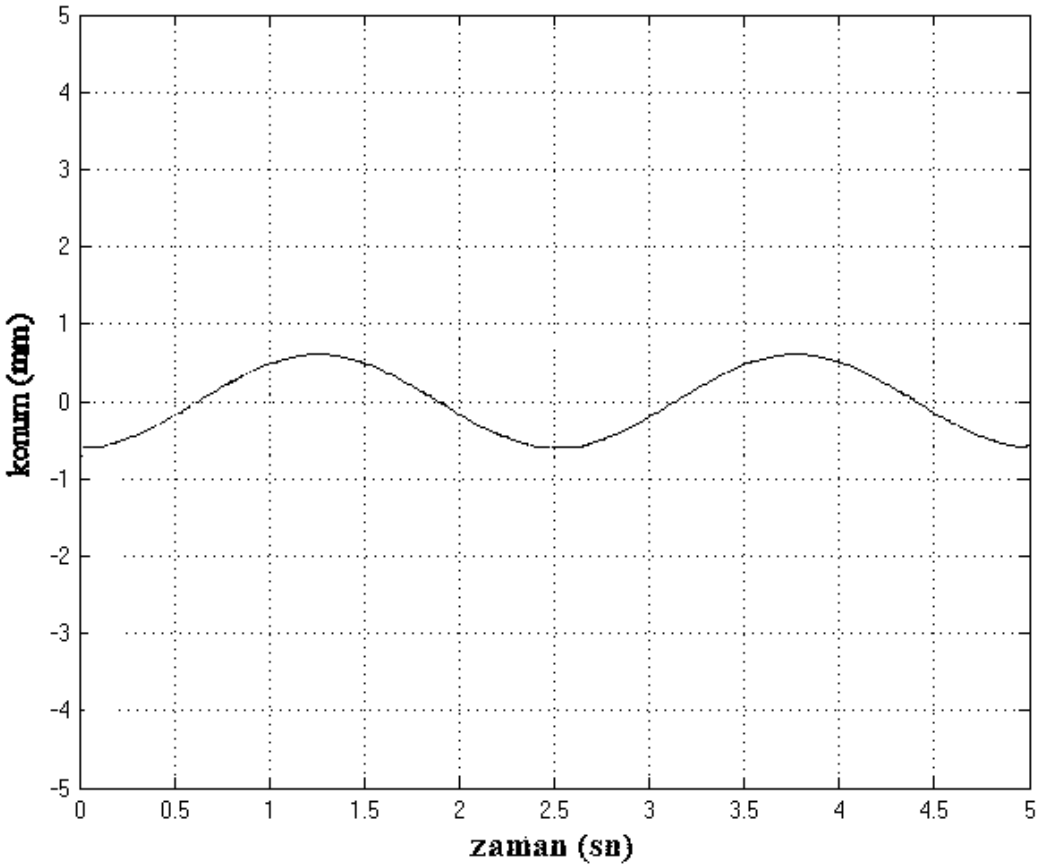
Şekil 5.56'ta görüldüğü üzere nonlineer modelde de aynı kazanç değerleri ile PI kontrol için benzer cevap elde edilmiştir. Sistemin ilk çalışma anındaki aşım, nonlineer modelde daha az olmasına rağmen yine de istenilen değerde değildir. Güncellenerek lineerleştirme olmadığından daha gerçekçi bir cevap elde edilmiştir. Ancak istenilen tasarım şartlarını sağlaması amacıyla türevsel kontrol de eklenecektir.



Şekil 5.57. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 250$ iken alt eksenin PID kontrol ile konum – zaman cevabı (Nonlineer durum)

Şekil 5.57'de PID nonlineer modele PID kontrolcü eklenmişken lineer modeldeki aynı kazançlarla elde edilen konum zaman cevabı gösterilmiştir. PI kontrolcüde olduğu gibi burada da iki model arasında cevapların benzer çıktığı görülmektedir. Bu da lineer modelin, teorik olarak nonlineer gerçekçi modelin davranışını iyi yansıttığını göstermektedir.

Lineer modelin PID kontrolünde valf giriş sinyalinde ortaya çıkan gürültünün nonlineer sistemde olup olmayacağına yine nonlineer sistemin valf sinyali konum zaman cevabı alınarak bakılır.



Şekil 5.58. $K_p = 5$, $K_i = 750$, $K_d = 250$ iken alt eksenin valf makarasının PID kontrol ile konum-zaman cevabı (Nonlineer durum)

Şekil 5.58'den de görüldüğü üzere nonlineer sistemde geri farklar yöntemi ile sayısal yöntem kullanılmadığından çok küçük aralıklarla elde edilen güncelleştirmenin valfte yarattığı yüksek frekanslı gürültü etkisi ortaya çıkmamıştır. Valf sinyali gürültü etkisi olmadan hidrolik sistemi sürmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

İki eksenli stabilizasyon platformunun pozisyon kontrolünün tasarlandığı bu çalışmada durum geri besleme ve PID kontrolcü ile geri besleme yöntemleri kullanılmış ve sistemin monte edildiği yüzeyin iki eksende yaptığı harekete karşı üst tablanın kendini yatayda sabit tutması sağlanmaya çalışılmıştır. Çalışılan sistem için hidrolik valf modellenmiş ve sistemin mekanik modeli ile birleştirilerek komple sistem dinamik denklemi elde edilmiştir. Bu denklemler ile Matlab® programında Simulink ortamında sistemin modeli çıkartılmış ve kontrolcü tipleri burada uygulanmıştır.

Durum geri beslemeli kontrolde kutup yerleştirme yönteminin avantajları ve kolay tasarım uygulanabilirliği vardır. Bunlar da sistemin kontrol sisteminin tasarımında kendini göstermiştir. Kutup noktası sanal düzlemde yerleştirilerek ve istenilen değer elde edinceye kadar kaydırılarak tasarım kriterlerini sağlayan noktalardan biri bulunmuştur. Tasarımcı için kolaylık açısından kutup yerleştirme operasyonunun bu yönünün bir avantaj olduğu görülmüştür. Ancak sistem gecikme cevabını iyileştirmek için kutup noktasını kaydırırken kazançların çok fazla da büyümemesi gerektiği görülmektedir. Bu durum fiziksel olarak kontrol aygıtı olan hidrolik valfte ani akım değişikliklerine ve güçlü yükseltici ihtiyacına neden olabilir. Ayrıca mevcut tasarlanan durum geri beslemeli kontrolde düzgün dağılımlı olan valf sinyalinde ani değişiklikler görülmesine rağmen fiziksel olarak valfin de bir kütlesi olacağı ve bununla beraber yüksek kazancın yüksek akım çekeceği ve kütlesi de hesaba katılan valfin durum cevabının değişeceğini de tasarımcı göz önüne almalıdır. Fiziksel olarak prototip üretiminde daha gerçekçi çıkışlar ve daha gerçekçi kontrol sinyali elde etmek için sistemde tasarlanan sistemde birebir kullanılacak deneysel verilerle parametreleri elde edilmiş bir valfin de dinamik denklemi kullanılmalıdır.

Bu çalışmada durum geri beslemeli kontrolün dışında uygulanan PID kontrolde ise oransal kontrolün tek başına çok yüksek kazançlar olmadığı sürece yeterli olmadığı görülmüştür. Çok yüksek kazançlar yukarda da değinildiği gibi yüksek akım gerektireceğinden düşük oransal kazanç katsayısı kullanılıp mevcut hatayı istenilen

seviyeye indirmek amacı ile integral kontrolcü kullanılmış ve hatayı düzelttiği görülmüştür. Ancak integral kontrolcünün yerleşme zamanını artırma etkisinden dolayı PI kontrolcünün de yüksek kazançlar uygulanmadan eksik kaldığı görülmüş ve yerleşme zamanını azaltıp sönümlemeyi artırmak için türevsel kontrol eklenerek PID kontrolün çok yüksek kazançlar gerekmeden sistemi istenilen düzeyde kontrol edebildiği görülmüştür. Ancak kazançlar çok yüksek olmasa da PID kontrolde giriş sinyalinin durum geri beslemeli kontrole göre daha salınımlı olduğu ve yüksek frekansta büyük genlikli ani değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir. Mevcut modelde valf makarasının kütlesi ihmal edilmiştir ancak gerçek sistemde kütlenin ataleti nedeni ile bu davranış tipi kontrolde olumsuzluklara neden olacak ve bu haldeki durumda elde edilen kontrolden daha kötü cevap alınacaktır ancak bu durum da hatanın integrali ile geri besleme yöntemi kullanılarak sınırlayıcı uygulayarak da aşılabilir. Dolayısı ile tasarımcı fiziksel olarak da kontrol edileceği sırada valfi komple modellemelidir.

Bu çalışmada tasarlanan kontrol sistemlerinde sistemin bulunduğu zeminin iki eksende sinüsoidal bir hareket yaptığı varsayılarak bu hareket boyunca sistem denklemi sürekli güncellenmiştir. Bunun için Matlab® ortamında bir güncelleme programı hazırlanmıştır. Bu program, eksenlerin sinüsoidal hareketine bağlı olarak lineerleştirilmiş denklemdeki sistem parametrelerini her çalışma noktasında hesaplamakta ve sistemi güncel tutmaktadır. Bunun için de bir güncelleme aralığı kullanılmıştır. Bu güncelleme aralığı sıklığında sistem parametreleri sürekli güncellenerek her nokta için sürekli kutup yerleştirme operasyonu yapılmış ve bu kutup değerleri Simulink'te hazırlanmış sistem modeline gönderilmiştir. Buradan da sistem cevabı alınmıştır. Parametrelerin güncelleme sıklığı değiştirildiğinde sistem cevabının nasıl etkilendiğini araştırmak amacı ile de güncelleme sıklığı azaltılmış ve sistem cevabını olumsuz etkilediği, sıklığın artmasının sistemi daha gerçekçi kontrole yaklaştırdığı görülmüştür. Parametre sıklığını aşırı küçük tutmak fiziki olarak kontrolde zorluklara neden olabilir ve gerçek sistemin bağlı olduğu mikroişlemcinin yapacağı işlemleri artıracağı için bazı yavaşlamalara neden olabilir. Ancak bunu yaparken sistemin ihtiyacı olan hassasiyet de unutulmamalıdır.

Dolayısıyla tasarımcı kontrol sistemini maliyet-ihtiyaç-hassasiyet üçgeni içinde tutmalı ve aşırı tasarımın olumsuzluklarını da düşünmelidir.

Hazırlanan programda farklı sistem parametreleri girilerek yeni denemeler yapılabilmekte, güncelleme sayısı değiştirilebilmekte ve kutup değeri istenilen noktaya kaydırılarak simülasyonlar elde edilebilmektedir.

Genel olarak sistemin lineerleştirilmiş modelinde PID kontrolde güncelleştirme yöntemi, sayısal analiz yöntemleri kullanılarak farklar yöntemi valf sinyalinde yüksek frekansta gürültüye neden olduğu, ancak sistemin dinamiği nedeniyle valfin bu yüksek frekansta titreşiminin açısal konuma fazla etki etmediği görülmüştür. Ayrıca düşük seçilen debinin, cılız kalarak sistemin kontrolü için yüksek kazanç değerleri gerektirdiği ortaya çıkmıştır. Nonlineer sistem modeli kurularak aynı kazançlar bu sisteme de uygulanmış, çok küçük aralıklarla sayısal yöntemlerle lineerleştirilen denklemler kullanılmadığından yüksek frekanslı gürültü sinyalinin gerçekte ortaya çıkmadığı görülmüştür. Dolayısıyla daha yüksek güncelleme aralığı kullanılarak yumuşak geçişler ile lineerleştirme yöntemi, gürültüye neden olmayacak şekilde ayarlanabilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Kuo, B. C., "Automatic Control Systems, 7th ed.", ***Wiley***, New York, 2-9, 664-714, 794-802 (1995).

2. Choi, K. B., Cho, G.Y., Shinshi, T. And Shimokohme A., "Stabilization of One Degree of Freedom Control Type Levitation Table with Permament Magnet Repulsive Forces", ***Mecharonics***, 13: 587-603 (2003).

3. Park, Y., "Robust and Optimal AttitudeStabilization of Spacecraft with External Disturbances", ***Aerospace Science and Tehnology***, 9: 253-259 (2005).

4. Crossland, P., "The Effect of Roll Stabilisation Controllers on Warship Operational Performance", ***Control Engineering Practice***, 11: 423-431 (2003).

5. Astafourov, P. M., Phedoseev, S. V., Khakhanov, U. A. And Avakian S. V., "Unified Stabilized Platform for the International Project (Space Solar Patrol), ***Phys. Chem. Earth***, 25 (5-6): 447-451 (2000).

6. Gürcan, M. B., Başçuhadar, İ. Ve Balkan, T., "Servo Denetimli Hidrolik Sistemlerin Benzetimi", ***II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi***, İzmir, 455-471 (2001).

7. Gürcan, M. B., Başçuhadar, İ. Ve Balkan, T., "Hidrolik Sistemlerin Matlab® - RTWT ile Gerçek Zamanlı Denetimi", ***II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi***, İzmir, 59-70 (2001).

8. Öner, H. E., Gürcan, M. B., Başçuhadar, İ. Ve Balkan, T., "Hidrolik Simülatör Tasarımı", ***II. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi***, İzmir, 239-252 (2001).

9. Hatip, Ö. E., "Dynamics and Control of a Stabilized Platform", Doktora Tezi, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 20-61 (1994).

10. Ercan, Y., "Akışkan Gücü Kontrolü Teorisi, 1. Baskı", ***Gazi Üniversitesi Yayınevi***, Ankara, 3-36 (1995).

11. Franklin, G., Powel, J. D. And Naeini, A.E., "Feedback Control of Dynamic Systems, 4th ed.", ***Prentice Hall***, New Jersey, 135-156 (2002).

12. Clark, R. N., "Control System Dynamics", ***Cambridge University Press***, New York, 202-237 (1996).

13. Ogata, K., "Modern Control Engineering, 3rd ed.", ***Prentice Hall***, New Jersey, 255-261, 669-703, 786-893 (1997).

14. Keleş, Ö. Ve Ercan, Y., "Puls Genişliği Modülasyonlu Elektrohidrolik Bir Servo Sisteminin Teorik İncelenmesi", ***Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.***, 15 (2): 49-69 (2000).

15. Şengirgin, M., "Elektrohidrolik Valf Denetimli Motor Sisteminde Açısal Hız Denetimi", ***III. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi ve Sergisi***, İzmir, 391-399 (2003).

16. Ercan, Y., "Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Dinamiği, 2. Baskı", ***Literatür Yayıncılık***, İstanbul, 254-259 (2003).

17. Caner, U., "İki Serbestlik Dereceli Robot Kolunun Dinamik Analiz ve Kontrol Simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 24-27, 37-56, 66-73 (2002).

18. Caner, U. Ve Eroğlu, M., "Robot Kol Denetim Tasarımı İçin Durum Değişkenleri Geri Beslemeli ve Tümlevli Denetimci Yaklaşımı", ***Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.***, 19 (3): 335-342 (2004).

19. Bingül, Z., "Matlab ve Simulink'le Modelleme / Kontrol I", ***Birsen Yayınevi***, İstanbul, 137-269 (2005).

20. Bingül, Z., "Matlab ve Simulink'le Modelleme / Kontrol II", ***Birsen Yayınevi***, İstanbul, 236-318 (2006).

21. Tewari, A., "Modern Control Design: With Matlab and Simulink", ***Wiley***, New York, 228-251 (2002).

22. Aström, K. J., Albertos, P. And Quevedo J., "PID Control", ***Control Engineering Practice***, 9: 1159-1161 (2001).

23. Chang, W. D., Hwang, R. C. And Hsieh, J. G., "A Self Tuning PID Control For a Class of Nonlinear Systems Based On The Lyapunov Approach", ***Journal of Process Control***, 12: 233-242 (2002).

EKLER

EK-1 Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

Ekte sunulan bu program iki eksenli stabilizasyon platformunun, bulunduğu ortamın hareketini izole etmeye çalışarak üst tablasını stabil şekilde sabit tutmaya çalışması için yol boyunca sistemi güncelleyerek durum geri besleme kazanç değerlerini bulmak amacıyla yazılmıştır. Sistem parametreleri programda değiştirilebilir ve güncelleme aralığı da ayarlanabilir.

İki eksenli stabilizasyon platformunun dinamik modeli ve kontrol sistemi Matlab® programında Simulink kullanılarak modellenmiştir. Program "m-file" olarak yazılmıştır. Dolayısıyla her defasında programı baştan yazmaya gerek yoktur ve program çalıştırılmadan önce bu dosya üzerinde gerekli değişiklikler yapılabilir. Çalıştırılan programdan alınan bilgiler Simulink modeline aktarılmakta ve burada yapılan hesaplar sonucu istenilen çıkışlar grafik olarak tez içerisinde sunulmaktadır.

EK-1 (Devam) Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

```
Durum Geri Beslemeli Kontrol

>> %IKI EKSENLI STABILIZASYON SISTEMI PARAMETRELERI%
M1=255;%KOMPLE SISTEM KUTLESI (kg)%
M2=180;%UST SISTEM KUTLESI (kg)%
MP1=2.8;%ALT PISTON KUTLESI (kg)%
MP2=2.8;%UST PISTON KUTLESI (kg)%
J1=26.25;%ALT SISTEM KUTLE ATALET MOMENTI (kg.m2)%
J2=14;%UST SISTEM KUTLE ATALET MOMENTI (kg.m2)%
BP1=40;%ALT PISTON VISKOS SURTUNMESI (N.s/m)%
BP2=40;%UST PISTON VISKOS SURTUNMESI (N.s/m)%
BT1=4;%ALT SISTEM DONME EKSENI SURTUNMESI ( kg.m2/S )%
BT2=4;%UST SISTEM DONME EKSENI SURTUNMESI ( kg.m2/s )%
AP1=0.0012;%ALT PISTON TESIR ALANI ( m2 )%
AP2=0.0012;%UST PISTON TESIR ALANI ( m2 )%
c1=0.078;%ALT DONME EKSENI ILE AGIRLIK MERKEZI ARASI MESAFE ( m )%
c2=0.15;%UST DONME EKSENI ILE AGIRLIK MERKEZI ARASI MESAFE ( m )%
L1=0.28;%ALT MOMENT KOLU ( m )%
L2=0.1;%UST MOMENT KOLU ( m )%
W=8.4*(10^-12);%HIDROLIK VALF SABITI ( m.s )%
K1=0.52;%HIDROLIK VALF SABITI (kg/m.s)%
K2=2.595*(10^-10);%HIDROLIK VALF SABITI ( m.s )%
p=870;%HIDROLIK AKISKAN OZKUTLESI ( kg/m3 )%
g=9.81;%YERCEKIMI IVMESI ( m/s2 )%

%*****************ALT EKSEN*****************%
t(1)=0;
TET1(1)=0;
OM1(1)=0;
ALP1(1)=0;
TH1(1)=0;
th(1)=0;

R1=(W+K2)*J1/(K1*AP1*L1);
R2=(W+K2)*((MP1*L1*L1)+(MP2*L2*L2))/(K1*AP1*L1);
R3=AP1*p*L1/K1;
R4=BP1*L1*(W+K2)/(K1*AP1);
R5=BT1*(W+K2)/(K1*AP1*L1);
R6=((M1*g*(L1+c1))+(M2*g*(L2+c2)))*(W+K2)/(K1*AP1*L1);
U111(1)=((R1/cos(TET1(1)))+(R2*cos(TET1(1))))*ALP1(1);
U112(1)=(R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/cos(TET1(1))))*OM1(1);
U113(1)=((R6/cos(TET1(1)))-(R2*OM1(1)*OM1(1)))*sin(TET1(1));
UU1(1)=U111(1)+U112(1)+U113(1);
R7(1)=(-
((((R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/(cos(TET1(1)))))*OM1(1))+(((R6/((cos(TE
T1(1)))^2))-((R2*((OM1(1))^2))))*sin(TET1(1))))-
UU1(1)))/((R1/cos(TET1(1)))+(R2*cos(TET1(1))));
S1(1)=(R1/cos(TET1(1)))+R2*cos(TET1(1));
S2(1)=R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/(cos(TET1(1))))-
(2*R2*(sin(TET1(1)))*OM1(1));
S3(1)=((((R1*sin(TET1(1)))/((cos(TET1(1)))^2))-
(R2*sin(TET1(1))))*R7(1))-(((R4*sin(TET1(1)))-
((R5*sin(TET1(1)))/((cos(TET1(1)))^2)))*OM1(1))+(R6/((cos(TET1(1)))^
2))-((R2*cos(TET1(1)))*((OM1(1))^2));
```

EK-1 (Devam) Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

```
S4(1)=(S1(1)*R7(1))+(S2(1)*OM1(1));
S5(1)=S4(1)/S1(1);
b121(1)=1/S1(1);

a111=0;
a112=1;
a121(1)=(-S3(1)/S1(1));
a122(1)=(-S2(1)/S1(1));

mu111=input('KUTUP NOKTASININ REEL DEGERINI GIRINIZ     :  ');
mu112=input('KUTUP NOKTASININ SANAL DEGERINI GIRINIZ    :  ');
mu11=-mu111+mu112*i;
mu12=-mu111-mu112*i;
J1=[mu11 0;0 mu12];
JJ1=poly(J1);
JJ1S2=JJ1(1);
JJ1S1=JJ1(2);
JJ1S0=JJ1(3);

k11(1)=((JJ1S0)+a121(1))/b121(1);
k12(1)=(JJ1S1+a122(1))/b121(1);

%******************** UST EKSEN*********************%
TET2(1)=0;
OM2(1)=0;
ALP2(1)=0;
TH2(1)=0;

N1=(W+K2)*J2/(K1*AP2*L2);
N2=(W+K2)*(MP2*L2)/(K1*AP2*L2);
N3=AP2*p*L2/K1;
N4=BP2*L2*(W+K2)/(K1*AP2);
N5=BT2*(W+K2)/(K1*AP2*L2);
N6=M2*g*(L2+c2)*(W+K2)/(K1*AP2*L2);
U211(1)=((N1/cos(TET2(1)))+(N2*cos(TET2(1))))*ALP2(1);
U212(1)=(N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/cos(TET2(1))))*OM2(1);
U213(1)=((N6/cos(TET2(1)))-(N2*OM2(1)*OM2(1)))*sin(TET2(1));
UU2(1)=U211(1)+U212(1)+U213(1);
N7(1)=(-
((((N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/(cos(TET2(1)))))*OM2(1))+(((N6/((cos(TE
T2(1)))^2))-((N2*((OM2(1))^2)))*sin(TET2(1))))-
UU2(1)))/((N1/cos(TET2(1)))+(N2*cos(TET2(1))));
G1(1)=(N1/cos(TET2(1)))+N2*cos(TET2(1));
G2(1)=N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/(cos(TET2(1))))-
(2*N2*(sin(TET2(1)))*OM2(1));
G3(1)=((((N1*sin(TET2(1)))/((cos(TET2(1)))^2))-
(N2*sin(TET2(1))))*N7(1))-(((N4*sin(TET2(1)))-
((N5*sin(TET2(1)))/((cos(TET2(1)))^2)))*OM2(1))+(N6/((cos(TET2(1)))^
2))-((N2*cos(TET2(1)))*((OM2(1))^2));
G4(1)=(G1(1)*N7(1))+(G2(1)*OM2(1));
G5(1)=G4(1)/G1(1);
b221(1)=1/G1(1);

a211=0;
a212=1;
```

EK-1 (Devam) Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

```
a221(1)=(-G3(1)/G1(1));
a222(1)=(-G2(1)/G1(1));

mu211=mu111;
mu212=mu112;
mu21=-mu211+mu212*i;
mu22=-mu211-mu212*i;
J2=[mu21 0;0 mu22];
JJ2=poly(J2);
JJ2S2=JJ2(1);
JJ2S1=JJ2(2);
JJ2S0=JJ2(3);

k21(1)=((JJ2S0)+a221(1))/b221(1);
k22(1)=(JJ2S1+a222(1))/b221(1);

for I=2:1000,

t(I)=0.5*(I-1);
th(I)=0.005*(I-1);
TET1(I)=0.5*sin(2.5*t(I));
TH1(I)=0.5*sin(2.5*th(I));
OM1(I)=(TET1(I)-TET1(I-1))/0.5;
ALP1(I)=(OM1(I)-OM1(I-1))/0.5;
U111(I)=((R1/cos(TET1(I)))+(R2*cos(TET1(I))))*ALP1(I);
U112(I)=(R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/cos(TET1(I))))*OM1(I);
U113(I)=((R6/cos(TET1(I)))-(R2*OM1(I)*OM1(I)))*sin(TET1(I));
UU1(I)=U111(I)+U112(I)+U113(I);
R7(I)=(-
((((R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/(cos(TET1(I)))))*OM1(I))+(((R6/((cos(TE
T1(I)))^2))-((R2*((OM1(I))^2))))*sin(TET1(I))))-
UU1(I)))/((R1/cos(TET1(I)))+(R2*cos(TET1(I))));
S1(I)=(R1/cos(TET1(I)))+R2*cos(TET1(I));
S2(I)=R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/(cos(TET1(I))))-
(2*R2*(sin(TET1(I)))*OM1(I));
S3(I)=((((R1*sin(TET1(I)))/((cos(TET1(I)))^2))-
(R2*sin(TET1(I))))*R7(I))-(((R4*sin(TET1(I)))-
((R5*sin(TET1(I)))/((cos(TET1(I)))^2)))*OM1(I))+(R6/((cos(TET1(I)))^
2))-((R2*cos(TET1(I)))*((OM1(I))^2));
S4(I)=(S1(I)*R7(I))+(S2(I)*OM1(I));
S5(I)=S4(I)/S1(I);
b121(I)=1/S1(I);

a121(I)=(-S3(I)/S1(I));
a122(I)=(-S2(I)/S1(I));

k11(I)=((JJ1S0)+a121(I))/b121(I);
k12(I)=(JJ1S1+a122(I))/b121(I);

TET2(I)=0.3*sin(4*t(I));
TH2(I)=0.3*sin(4*th(I));
```

EK-1 (Devam) Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

```
OM2(I)=(TET2(I)-TET2(I-1))/0.5;
ALP2(I)=(OM2(I)-OM2(I-1))/0.5;
U211(I)=((N1/cos(TET2(I)))+(N2*cos(TET2(I))))*ALP2(I);
U212(I)=(N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/cos(TET2(I))))*OM2(I);
U213(I)=((N6/cos(TET2(I)))-(N2*OM2(I)*OM2(I)))*sin(TET2(I));
UU2(I)=U211(I)+U212(I)+U213(I);
N7(I)=(-
((((N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/(cos(TET2(I)))))*OM2(I))+(((N6/((cos(TE
T2(I)))^2))-((N2*((OM2(I))^2))))*sin(TET2(I))))-
UU2(I)))/((N1/cos(TET2(I)))+(N2*cos(TET2(I))));
G1(I)=(N1/cos(TET2(I)))+N2*cos(TET2(I));
G2(I)=N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/(cos(TET2(I))))-
(2*N2*(sin(TET2(I)))*OM2(I));
G3(I)=((((N1*sin(TET2(I)))/((cos(TET2(I)))^2))-
(N2*sin(TET2(I))))*N7(I))-(((N4*sin(TET2(I)))-
((N5*sin(TET2(I)))/((cos(TET2(I)))^2)))*OM2(I))+(N6/((cos(TET2(I)))^
2))-((N2*cos(TET2(I)))*((OM2(I))^2));
G4(I)=(G1(I)*N7(I))+(G2(I)*OM2(I));
G5(I)=G4(I)/G1(I);
b221(I)=1/G1(I);

a221(I)=(-G3(I)/G1(I));
a222(I)=(-G2(I)/G1(I));

k21(I)=((JJ2S0)+a221(I))/b221(I);
k22(I)=(JJ2S1+a222(I))/b221(I);

end

tt=transpose(t);
tth=transpose(th);

TTH1=transpose(TH1);
H1=[tth TTH1];

TS1=transpose(S1);
SS1=[tt TS1];

TS2=transpose(S2);
SS2=[tt TS2];

TS3=transpose(S3);
SS3=[tt TS3];

TS4=transpose(S4);
SS4=[tt TS4];

TS5=transpose(S5);
SS5=[tt TS5];

Ta121=transpose(a121);
aa121=[tt Ta121];

Ta122=transpose(a122);
aa122=[tt Ta122];
```

EK-1 (Devam) Durum geri besleme ile kontrol : Matlab® programı

```
TUU1=transpose(UU1);
UU1G=[tt TUU1];

TR7=transpose(R7);
RR7=[tt TR7];

kk11=transpose(k11);
kk111=[tt kk11];

kk12=transpose(k12);
kk122=[tt kk12];

tb121=transpose(b121);
bb121=[tt tb121];

TTH2=transpose(TH2);
H2=[tth TTH2];

TG1=transpose(G1);
GG1=[tt TG1];

TG2=transpose(G2);
GG2=[tt TG2];

TG3=transpose(G3);
GG3=[tt TG3];

TG4=transpose(G4);
GG4=[tt TG4];

TG5=transpose(G5);
GG5=[tt TG5];

Ta221=transpose(a221);
aa221=[tt Ta221];

Ta222=transpose(a222);
aa222=[tt Ta222];

TUU2=transpose(UU2);
UU2G=[tt TUU2];

TN7=transpose(N7);
NN7=[tt TN7];

kk21=transpose(k21);
kk211=[tt kk21];

kk22=transpose(k22);
kk222=[tt kk22];

tb221=transpose(b221);
bb221=[tt tb221];

%*****************************************************%
```

EK-2 PID kontrol : Matlab® programı

```
%IKI EKSENLI STABILIZASYON PLATFORMU KUTUP YERLESTIRME PROGRAMI%
%IKI EKSENLI STABILIZASYON SISTEMI PARAMETRELERI%
M1=255;%KOMPLE SISTEM KUTLESI (kg)%
M2=180;%UST SISTEM KUTLESI (kg)%
MP1=2.8;%ALT PISTON KUTLESI (kg)%
MP2=2.8;%UST PISTON KUTLESI (kg)%
J1=26.25;%ALT SISTEM KUTLE ATALET MOMENTI (kg.m2)%
J2=14;%UST SISTEM KUTLE ATALET MOMENTI (kg.m2)%
BP1=40;%ALT PISTON VISKOS SURTUNMESI (N.s/m)%
BP2=40;%UST PISTON VISKOS SURTUNMESI (N.s/m)%
BT1=4;%ALT SISTEM DONME EKSENI SURTUNMESI ( kg.m2/S )%
BT2=4;%UST SISTEM DONME EKSENI SURTUNMESI ( kg.m2/s )%
AP1=0.0012;%ALT PISTON TESIR ALANI ( m2 )%
AP2=0.0012;%UST PISTON TESIR ALANI ( m2 )%
c1=0.078;%ALT DONME EKSENI ILE AGIRLIK MERKEZI ARASI MESAFE ( m )%
c2=0.15;%UST DONME EKSENI ILE AGIRLIK MERKEZI ARASI MESAFE ( m )%
L1=0.28;%ALT MOMENT KOLU ( m )%
L2=0.1;%UST MOMENT KOLU ( m )%
W=8.4*(10^-12);%HIDROLIK VALF SABITI ( m.s )%
K1=0.52;%HIDROLIK VALF SABITI (kg/m.s)%
K2=2.595*(10^-10);%HIDROLIK VALF SABITI ( m.s )%
p=870;%HIDROLIK AKISKAN OZKUTLESI ( kg/m3 )%
g=9.81;%YERCEKIMI IVMESI ( m/s2 )%

%*****************ALT EKSEN*****************%
t(1)=0;
TET1(1)=0;
OM1(1)=0;
ALP1(1)=0;

kpk=input('ORANSAL KAZANC KATSAYISINI GIRINIZ   :   ');
kik=input('INTEGRAL KAZANC KATSAYISINI GIRINIZ  :   ');
kdk=input('TUREVSEL KAZANC KATSAYISINI GIRINIZ  :   ');

kp(1)=kpk;
ki(1)=kik;
kd(1)=kdk;

R1=(W+K2)*J1/(K1*AP1*L1);
R2=(W+K2)*((MP1*L1*L1)+(MP2*L2*L2))/(K1*AP1*L1);
R3=AP1*p*L1/K1;
R4=BP1*L1*(W+K2)/(K1*AP1);
R5=BT1*(W+K2)/(K1*AP1*L1);
R6=((M1*g*(L1+c1))+(M2*g*(L2+c2)))*(W+K2)/(K1*AP1*L1);
U111(1)=((R1/cos(TET1(1)))+(R2*cos(TET1(1))))*ALP1(1);
U112(1)=(R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/cos(TET1(1))))*OM1(1);
U113(1)=((R6/cos(TET1(1)))-(R2*OM1(1)*OM1(1)))*sin(TET1(1));
UU1(1)=U111(1)+U112(1)+U113(1);
R7(1)=(-
((((R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/(cos(TET1(1)))))*OM1(1))+(((R6/((cos(TE
T1(1)))^2))-((R2*((OM1(1))^2))))*sin(TET1(1))))-
UU1(1)))/((R1/cos(TET1(1)))+(R2*cos(TET1(1))));
S1(1)=(R1/cos(TET1(1)))+R2*cos(TET1(1));
S2(1)=R3+(R4*cos(TET1(1)))+(R5/(cos(TET1(1))))-
(2*R2*(sin(TET1(1)))*OM1(1));
```

EK-2 (Devam) PID kontrol : Matlab® programı

```
S3(1)=((((R1*sin(TET1(1)))/((cos(TET1(1)))^2))-
(R2*sin(TET1(1))))*R7(1))-(((R4*sin(TET1(1)))-
((R5*sin(TET1(1)))/((cos(TET1(1)))^2)))*OM1(1))+(R6/((cos(TET1(1)))^
2))-((R2*cos(TET1(1)))*((OM1(1))^2));
S4(1)=(S1(1)*R7(1))+(S2(1)*OM1(1));
S5(1)=S4(1)/S1(1);
b121(1)=1/S1(1);

a111=0;
a112=1;
a121(1)=(-S3(1)/S1(1));
a122(1)=(-S2(1)/S1(1));

%******************** UST EKSEN*********************%
TET2(1)=0;
OM2(1)=0;
ALP2(1)=0;

N1=(W+K2)*J2/(K1*AP2*L2);
N2=(W+K2)*(MP2*L2)/(K1*AP2*L2);
N3=AP2*p*L2/K1;
N4=BP2*L2*(W+K2)/(K1*AP2);
N5=BT2*(W+K2)/(K1*AP2*L2);
N6=M2*g*(L2+c2)*(W+K2)/(K1*AP2*L2);
U211(1)=((N1/cos(TET2(1)))+(N2*cos(TET2(1))))*ALP2(1);
U212(1)=(N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/cos(TET2(1))))*OM2(1);
U213(1)=((N6/cos(TET2(1)))-(N2*OM2(1)*OM2(1)))*sin(TET2(1));
UU2(1)=U211(1)+U212(1)+U213(1);
N7(1)=(-
((((N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/(cos(TET2(1)))))*OM2(1))+(((N6/((cos(TE
T2(1)))^2))-((N2*((OM2(1))^2))))*sin(TET2(1))))-
UU2(1)))/((N1/cos(TET2(1)))+(N2*cos(TET2(1))));
G1(1)=(N1/cos(TET2(1)))+N2*cos(TET2(1));
G2(1)=N3+(N4*cos(TET2(1)))+(N5/(cos(TET2(1))))-
(2*N2*(sin(TET2(1)))*OM2(1));
G3(1)=((((N1*sin(TET2(1)))/((cos(TET2(1)))^2))-
(N2*sin(TET2(1))))*N7(1))-(((N4*sin(TET2(1)))-
((N5*sin(TET2(1)))/((cos(TET2(1)))^2)))*OM2(1))+(N6/((cos(TET2(1)))^
2))-((N2*cos(TET2(1)))*((OM2(1))^2));
G4(1)=(G1(1)*N7(1))+(G2(1)*OM2(1));
G5(1)=G4(1)/G1(1);
b221(1)=1/G1(1);

a211=0;
a212=1;
a221(1)=(-G3(1)/G1(1));
a222(1)=(-G2(1)/G1(1));

for I=2:10000,

kp(I)=kpk;
ki(I)=kik;
kd(I)=kdk;
t(I)=0.005*(I-1);
TET1(I)=0.5*sin(2.5*t(I));
```

EK-2 (Devam) PID kontrol : Matlab® programı

```
OM1(I)=(TET1(I)-TET1(I-1))/0.005;
ALP1(I)=(OM1(I)-OM1(I-1))/0.005;
U111(I)=((R1/cos(TET1(I)))+(R2*cos(TET1(I))))*ALP1(I);
U112(I)=(R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/cos(TET1(I))))*OM1(I);
U113(I)=((R6/cos(TET1(I)))-(R2*OM1(I)*OM1(I)))*sin(TET1(I));
UU1(I)=U111(I)+U112(I)+U113(I);
R7(I)=(-
((((R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/(cos(TET1(I)))))*OM1(I))+(((R6/((cos(TE
T1(I)))^2))-((R2*((OM1(I))^2))))*sin(TET1(I))))-
UU1(I)))/((R1/cos(TET1(I)))+(R2*cos(TET1(I))));
S1(I)=(R1/cos(TET1(I)))+R2*cos(TET1(I));
S2(I)=R3+(R4*cos(TET1(I)))+(R5/(cos(TET1(I))))-
(2*R2*(sin(TET1(I)))*OM1(I));
S3(I)=((((R1*sin(TET1(I)))/((cos(TET1(I)))^2))-
(R2*sin(TET1(I))))*R7(I))-(((R4*sin(TET1(I)))-
((R5*sin(TET1(I)))/((cos(TET1(I)))^2)))*OM1(I))+(R6/((cos(TET1(I)))^
2))-((R2*cos(TET1(I)))*((OM1(I))^2));
S4(I)=(S1(I)*R7(I))+(S2(I)*OM1(I));
S5(I)=S4(I)/S1(I);
b121(I)=1/S1(I);

a121(I)=(-S3(I)/S1(I));
a122(I)=(-S2(I)/S1(I));

TET2(I)=0.3*sin(4*t(I));
OM2(I)=(TET2(I)-TET2(I-1))/0.005;
ALP2(I)=(OM2(I)-OM2(I-1))/0.005;
U211(I)=((N1/cos(TET2(I)))+(N2*cos(TET2(I))))*ALP2(I);
U212(I)=(N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/cos(TET2(I))))*OM2(I);
U213(I)=((N6/cos(TET2(I)))-(N2*OM2(I)*OM2(I)))*sin(TET2(I));
UU2(I)=U211(I)+U212(I)+U213(I);
N7(I)=(-
((((N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/(cos(TET2(I)))))*OM2(I))+(((N6/((cos(TE
T2(I)))^2))-((N2*((OM2(I))^2))))*sin(TET2(I))))-
UU2(I)))/((N1/cos(TET2(I)))+(N2*cos(TET2(I))));
G1(I)=(N1/cos(TET2(I)))+N2*cos(TET2(I));
G2(I)=N3+(N4*cos(TET2(I)))+(N5/(cos(TET2(I))))-
(2*N2*(sin(TET2(I)))*OM2(I));
G3(I)=((((N1*sin(TET2(I)))/((cos(TET2(I)))^2))-
(N2*sin(TET2(I))))*N7(I))-(((N4*sin(TET2(I)))-
((N5*sin(TET2(I)))/((cos(TET2(I)))^2)))*OM2(I))+(N6/((cos(TET2(I)))^
2))-((N2*cos(TET2(I)))*((OM2(I))^2));
G4(I)=(G1(I)*N7(I))+(G2(I)*OM2(I));
G5(I)=G4(I)/G1(I);
b221(I)=1/G1(I);

a221(I)=(-G3(I)/G1(I));
a222(I)=(-G2(I)/G1(I));

end

tt=transpose(t);

TETT1=transpose(TET1);
H1=[tt TETT1];
```

EK-2 (Devam) PID kontrol : Matlab® programı

```
TS1=transpose(S1);
SS1=[tt TS1];

TS2=transpose(S2);
SS2=[tt TS2];

TS3=transpose(S3);
SS3=[tt TS3];

TS4=transpose(S4);
SS4=[tt TS4];

TS5=transpose(S5);
SS5=[tt TS5];

Ta121=transpose(a121);
aa121=[tt Ta121];

Ta122=transpose(a122);
aa122=[tt Ta122];

TUU1=transpose(UU1);
UU1G=[tt TUU1];

TR7=transpose(R7);
RR7=[tt TR7];

tb121=transpose(b121);
bb121=[tt tb121];

TETT2=transpose(TET2);
H2=[tt TETT2];

TG1=transpose(G1);
GG1=[tt TG1];

TG2=transpose(G2);
GG2=[tt TG2];

TG3=transpose(G3);
GG3=[tt TG3];

TG4=transpose(G4);
GG4=[tt TG4];

TG5=transpose(G5);
GG5=[tt TG5];

Ta221=transpose(a221);
aa221=[tt Ta221];

Ta222=transpose(a222);
aa222=[tt Ta222];

TUU2=transpose(UU2);
```

EK-2 (Devam) PID kontrol : Matlab® programı

```
UU2G=[tt TUU2];

TN7=transpose(N7);
NN7=[tt TN7];

tb221=transpose(b221);
bb221=[tt tb221];

kpp=transpose(kp);
KP=[tt kpp];

kii=transpose(ki);
KI=[tt kii];

kdd=transpose(kd);
KD=[tt kdd];

%************************************************%
```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKGÜN, Burak

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 07.09.1981 Samsun

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (312) 287 80 55

Faks : 0 (312) 385 55 12

e-mail : burock2000@yahoo.com

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet tarihi**
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makine Mühendisliği	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2003
Lise	Samsun Anadolu Lisesi	1996

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
2003-2006	Mak Ticaret Ltd. Şti.	Kalite Güv. Müd.

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Mekanik tasarımlar, Karikatür, Futbol, Basketbol, Mizah