KAYAN KİPLİ DENETİM KULLANILARAK ESNEK BİR KİRİŞİN AKTİF TİTREŞİM KONTROLU

Mehmet İTİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2005
ANKARA

KAYAN KİPLİ DENETİM KULLANILARAK ESNEK BİR KİRİŞİN AKTİF TİTREŞİM KONTROLU

Mehmet İTİK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2005
ANKARA

Mehmet İTİK tarafından hazırlanan KAYAN KİPLİ DENETİM KULLANILARAK ESNEK BİR KİRİŞİN AKTİF TİTREŞİM KONTROLU adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Metin U. SALAMCI
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Yaşar T. HONDUR

Üye : Prof. Dr. M. Kemal ÖZGÖREN (ODTÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Metin U. SALAMCI

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i

ABSTRACT ii

TEŞEKKÜR iii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ iv

ŞEKİLLERİN LİSTESİ v

RESİMLERİN LİSTESİ viii

SİMGELER VE KISALTMALAR x

1. GİRİŞ 1

2. KAYAN KİPLİ DENETİM 8

2.1. Doğrusal Sistemler İçin KKD Tasarımı 11

2.1.1. Faz değişkenleri kullanarak KKD tasarımı 11

2.1.2. Düzenli yapı kullanarak KKD tasarımı 14

2.1.3. Uyum koşulu tipi belirsizlik durumunda KKD tasarımı 16

2.2. Doğrusal Olmayan Sistemler İçin KKD Tasarımı 19

2.2.1. Faz değişkenleri kullanarak kayma yüzeyi tasarımı 20

2.2.2. Düzenli yapı kullanarak kayma yüzeyi tasarımı 21

2.2.3. Doğrusal olmayan sistemler için denetçi tasarımı 22

2.3. Çıtırtının Önlenmesi 23

2.4. Gözlemci Tasarımı 24

2.5. Kütle, Yay, Amortisör Sistemi için KKD Tasarımı 26

3. ESNEK KİRİŞİN MODELLENMESİ 33

3.1. Euler-Bernoulli Kiriş Modeli 33

3.2. Esnek Kirişin Modal Modellenmesi 38

3.2.1. PZT'siz esnek kiriş 38

3.2.2. PZT tahrik elemanlarının modellenmesi 41

3.2.3. Esnek kiriş modelinin durum değişkenleri formuna dönüştürülmesi 45

4. BENZETİM SONUÇLARI 47

4.1. Kirişin İlk İki Titreşim Modunun Modellenmesi ve Kontrolu 48

4.1.1. Gözlemci tasarımı 50

4.1.2. Denetçi tasarımı 55

4.2. Kirişin İlk Üç Titreşim Modunun Modellenmesi ve Kontrolu 64

4.2.1. Gözlemci tasarımı 67

4.2.2. Denetçi tasarımı 72

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 81

5.1. Deneysel Sistem 81

5.2. Deney Sonuçları 85

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 88

KAYNAKLAR 91
EKLER 95
EK-1 96
EK-2 99
EK-3 104
EK-4 110
ÖZGEÇMİŞ 130

KAYAN KİPLİ DENETİM KULLANILARAK ESNEK BİR KİRİŞİN AKTİF TİTREŞİM KONTROLU

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet İTİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ekim 2005

ÖZET

Bu çalışmada, esnek bir yapının ilk iki ve üç modunun titreşimini sönümlemek için kayan kipli denetçi tasarlanmış ve sisteme uygulanmıştır. Sistem olarak bir ucu ankastre diğer ucu serbest alüminyum bir kiriş kullanılmıştır. Euler-Bernoulli metodu kullanılarak kirişin sonsuz boyutlu matematiksel modeli elde edilmiş ve varsayılmış modlar metodu kullanılarak sistemin sonlu matematiksel modeli türetilmiştir. Boyutu belirli modelin durumları fiziksel olarak ölçülebilen nicelikler olmadığı için, kirişin uç noktasının deplasmanı ölçülerek tasarlanan gözlemci ile durum değişkenleri tahmin edilmiştir. Elde edilen modeller ve tasarlanan denetçiler kullanılarak, sistemin kişisel bir bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Daha sonra tasarlanan kayan kipli denetçi deneysel kiriş sistemine uygulanmış ve tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir.

Bilim Kodu : **940**
Anahtar Kelimeler : **Titreşim kontrolu, Kayan kipli denetim, Esnek yapılar**
Sayfa Adedi : **130**
Tez Yöneticisi : **Yrd. Doç. Dr. Metin U. SALAMCI**

ACTIVE VIBRATION CONTROL OF A FLEXIBLE BEAM USING SLIDING MODE CONTROL

(M.Sc. Thesis)

Mehmet İTİK

GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
October 2005

ABSTRACT

In this study, sliding mode control is designed and applied to a flexible structure to suppress the first two and three vibration modes. A clamped-free flexible aluminum beam structure is used as the system model. The infinite dimensional mathematical model of the beam is obtained by using the Euler-Bernoulli method and a finite dimensional model is derived by using the Assumed Modes Method. Since the states of the finite dimensional model are not physically measurable quantities, an observer is designed to estimate these states by measuring the tip deflection of the beam. By using observed states and designed controllers, the model of the system is simulated in the computer environment. The designed sliding mode control is then applied to the experimental beam system and satisfactory results are obtained.

Science Code : 940
Key Words : Vibration control, Sliding mode control, Flexible structures
Page Number: 130
Adviser : Assist. Prof. Dr. Metin U. SALAMCI

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca benden maddi manevi hiçbir desteğini esirgemeyen ve beni yönlendiren tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Metin U. SALAMCI'ya, sorularıma hiç usanmadan yanıt veren Arş. Gör. Tuncay KARAÇAY'a, deneysel çalışmalarımın yapılmasında gece gündüz demeden bana yardımcı olan arkadaşım Arş. Gör. F. Demet ÜLKER'e, manevi desteklerini hiçbir zaman unutamayacağım ailem, özellikle ağabeyim İsmail İTİK, arkadaşım Hakan ÇAĞLAYAN'a, kapılarını bana bıkmadan açan halam Vicdan AKSOY ve eniştem Nadir AKSOY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca maddi desteklerinden dolayı "The British Council"e teşekkür ederim.

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 4.1. Esnek kiriş sisteminin parametreleri 47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. İki Lyapunov kararlı sistemden oluşan bir asimptotik kararlı değişken yapılı sistem 9

Şekil 2.2. İki kararsız sistemden oluşan bir asimptotik kararlı değişken yapılı sistem 10

Şekil 2.3. Kayma yüzeyi üzerinde çıtırtı oluşumu Titreşim sistemleri 14

Şekil 2.4. İşaret fonksiyonuna diferansiyel yaklaşımı 24

Şekil 2.5. Sistemin 5 cm'lik deplasman için serbest cevabı 28

Şekil 2.6. Gözlemci ve gerçek sistem cevabı 29

Şekil 2.7. Kontrol edilmiş sistem cevabı 29

Şekil 2.8. Sisteme uygulanan denetim sinyali 30

Şekil 2.9. Belirsizlik eklenmiş kontrolsüz sistem cevabı 31

Şekil 2.10. Belirsizlik içeren sistemin için kontrol edilmiş cevabı 31

Şekil 2.11. Belirsizlik içeren sisteme uygulanan kontrol girişi 32

Şekil 3.1. Esnek kirişin küçük eleman kesiti 33

Şekil 3.2. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest kirişin şematik gösterimi 36

Şekil 3.3a. Esnek kirişin ilk mod şekli 37

Şekil 3.3b. Esnek kirişin ikinci mod şekli 37

Şekil 3.3c. Esnek kirişin üçüncü mod şekli 38

Şekil 3.4. Esnek kiriş üzerindeki PZT konfigrasyonu 41

Şekil 3.5. Doğrusal gerinim dağılımı gösterimi 44

Şekil 4.1. İlk iki titreşim modu modeli için sistemin serbest cevabı 49

Şekil 4.2. Kirişin ilk iki mod frekans cevabı 49

Şekil 4.3. $w = 10$ seçildiği durum için gözlemci cevabı 51

Şekil 4.4. $w = 30$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 52

Şekil 4.5. $w = 50$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 53

Şekil 4.6. $w = 80$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 54

Şekil 4.7. İlk iki mod için sistemin denetim uygulanmış deplasmanı 57

Şekil 4.8. İlk iki mod için kirişe uygulanan denetim sinyali 57

Şekil 4.9. İlk iki mod için sisteme tasarlanan kayma yüzeyi $\sigma(x)$ 58

Şekil 4.10. İlk iki mod için denetçi sınırlaması uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı 58

Şekil 4.11. İlk iki mod için sınırlama uygulanmış denetim sinyali 59

Şekil 4.12. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme tasarlanan denetçi uygulandığında sistemin cevabı 60

Şekil 4.13. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan denetim sinyali ... 61

Şekil 4.14. İlk iki mod için sınırlanmış denetim sinyali uygulandığında sistem cevabı 61

Şekil 4.15. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali 62

Şekil 4.16. İlk iki mod için belirsizlik içeren sistemin belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan denetçi uygulandığında cevabı 62

Şekil 4.17. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan sisteme uygulanan denetim sinyali 63

Şekil 4.18. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan sınırlandırılmış denetim sinyali uygulandığında belirsizlik içeren sistem cevabı 63

Şekil 4.19. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan sınırlandırılmış denetim sinyali 64

Şekil 4.20. İlk üç mod modeli için sistemin serbest cevabı 65

Şekil 4.21. Esnek kirişin ilk üç mod için frekans cevabı 66

Şekil 4.22. $w = 80$ seçildiği durum için gözlemci cevabı 68

Şekil 4.23. $w = 100$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 69

Şekil 4.24. $w = 150$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 70

Şekil 4.25. $w = 175$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı 71

Şekil 4.26. İlk üç mod için sistemin denetim uygulanmış deplasmanı 74

Şekil 4.27. İlk üç mod için kirişe uygulanan denetim sinyali 74

Şekil 4.28. İlk üç mod için sisteme tasarlanan kayma yüzeyi $\sigma(x)$ 75

Şekil 4.29. İlk üç mod için denetçi sınırlaması uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı 75

Şekil 4.30. İlk üç mod için sınırlama uygulanmış denetim sinyali 76

Şekil 4.31. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme tasarlanan denetçi uygulandığında sistemin cevabı 77

Şekil 4.32. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan denetim sinyali ... 78

Şekil 4.33. İlk üç mod için sınırlanmış denetim sinyali uygulandığında sistem cevabı 78

Şekil 4.34. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali 79

Şekil 4.35. İlk üç mod için belirsizlik içeren sistemin belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan denetçi uygulandığında cevabı..... 79

Şekil 4.36. İlk üç mod için belirsizlik dikkate alınmadan sisteme uygulanan denetim sinyali 80

Şekil 5.1. C programının akış diyagramı 84

Şekil 5.2. Deney sisteminin şematik görünümü..... 85

Şekil 5.3. Esnek kirişin serbest cevabı 86

Şekil 5.4. Denetim uygulanmış sistem cevabı 86

Şekil 5.5. Sisteme uygulanan denetim sinyali..... 86

Şekil 5.6. Tekrarlayan iki bozucu giriş uygulandığında sistem cevabı..... 87

Şekil 5.7. Tekrarlayan üç bozucu giriş uygulandığında sistem cevabı 87

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Çalışmada kullanılan esnek kiriş sistemi 82

Resim 5.2. Piezoelektrik yamalar..... 82

Resim 5.3. Keyence Lazer konum ölçer 83

Resim 5.4. Sensor Tech SS10 dört kanallı programlanabilir denetçi 83

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
$\mathbf{C}$	Kayma yüzeyi eğimi
$\boldsymbol{\sigma}$	Kayma yüzeyi
$\boldsymbol{\xi}$	Sönüm katsayısı
$\boldsymbol{\omega}$	Doğal frekans
$\mathbf{x}$	Durum değişkeni
$\mathbf{z}$	Dönüştürülmüş durum değişkeni
$\mathbf{u_{eq}}$	Eşdeğerleyen denetçi
$\mathbf{u_n}$	Yüksek frekanslı denetçi
$\mathbf{u}$	Toplam denetçi
$\boldsymbol{\rho(x,t)}$	Yüksek frekanslı denetçi katsayısı
$\boldsymbol{\Delta}$	Belirsizlik vektörü
$\mathbf{k_i}$	Belirsizlik sınırı
$\mathbf{f(x)}$	Doğrusal olmayan bir fonksiyon
$\mathbf{g(x)}$	Doğrusal olmayan kontrol girişi fonksiyonu
$\boldsymbol{\lambda}$	Sistemin öz değeri
$\boldsymbol{\delta}$	Sabit pozitif bir sayı
$\mathbf{x_d}$	Referans giriş
$\mathbf{V(x)}$	Kuadratik Lyapunov fonksiyonu
$\mathbf{W}$	Simetrik pozitif tanımlı matris
$\mathbf{y}$	Sistem çıkışı
$\mathbf{A}$	Simetrik sistem matrisi
$\mathbf{B}$	Kontrol matrisi
$\mathbf{L}$	Gözlemci kazanç matrisi
$\mathbf{\hat{x}}$	Tahmini durum değişkeni
$\mathbf{e}$	Hata

$\mathbf{A_b}$	Kiriş kesit alanı, m^2
$\boldsymbol{\rho_b}$	Kiriş malzemesi yoğunluğu, kg/m^3
$\mathbf{E_b}$	Kiriş elastiklik modülü,
$\mathbf{I_b}$	Kiriş atalet momenti
$\mathbf{w_b}$	Kiriş genişliği
$\mathbf{t_b}$	Kiriş kalınlığı
$\mathbf{L}$	Kiriş uzunluğu
$\mathbf{S}$	Kesme kuvveti
$\mathbf{M}$	Eğilme momenti
$\boldsymbol{\omega_c}$	Kesme frekansı
$\mathbf{K_b}$	Kiriş kayma sabiti
$\mathbf{G_b}$	Kayma elastiklik modülü
$\boldsymbol{\Phi_i}$	Mod şekil fonksiyonu
$\mathbf{q_i}$	Modal koordinat
$\mathbf{T}$	Kirişin kinetik enerjisi
$\mathbf{m_{ij}^b}$	Simetrik kütle matrisi
$\mathbf{k_{ij}^b}$	Simetrik esneklik matrisi
$\mathbf{d_{31a}}$	PZT şarj sabiti
$\mathbf{t_a}$	PZT kalınlığı
$\mathbf{E_a}$	PZT elastiklik modülü
$\boldsymbol{\varepsilon_a}$	PZT gerinmesi
$\boldsymbol{\sigma_a}$	PZT gerilmesi
$\mathbf{w_a}$	PZT genişliği
$\mathbf{U_a}$	PZT potansiyel enerjisi
$\boldsymbol{\varepsilon_{tb}^s}$	Kiriş yüzeyinde oluşan gerinme
$\mathbf{V(t)}$	PZT'lere uygulanan elektrik gerilimi
$\bar{\mathbf{t}}$	Kalınlık oranı
$\mathbf{k_{ij}^p}$	PZT esneklik matrisi
$\mathbf{C_p}$	PZT sabiti

Kısaltmalar	Açıklama
KKD	Kayan kipli denetim
PZT	Lead-Zirconate-Titanate
LQG	Linear Quadratic Gaussian
QFT	Quantative Feedback Theory

1. GİRİŞ

Hareketli ve/veya esnek elemanlara sahip sistemler için önemli bir araştırma konusu olan titreşim; insan hayatındaki konforu olumsuz etkilemesinin yanı sıra, sistemleri oluşturan elemanların malzemelerinde zamanla yorulmaya sebep olarak sistemlerin kullanım ömrünü de kısaltmaktadır. Her ne kadar genelde daha rijit malzemeler kullanılarak sistemin titreşimleri azaltılabilse de, bu malzemelerin çoğunlukla ağır malzemeler oluşu sebebiyle sistemin hantallaşması ve enerji tüketimini arttırması yüzünden günümüzde tercih edilmemekte, tam aksine daha hafif, az yer kaplayan, hızlı ve az enerji tüketen sistemlere yönelinmektedir. Bu ise, titreşim konusunu daha güncel bir araştırma konusu haline getirmektedir.

Araştırmalarda, temel amaç sistemlerdeki titreşimlerin azaltılması veya kısa süre içerisinde sönümlenerek baskılanması olduğundan, titreşim kontrolu birçok mühendislik uygulamasında önemli yer tutmaktadır. Titreşimin azaltılması veya sönümlenmesine bağlı olarak titreşim kontrolu iki farklı alanda incelenebilir. Bunlar; pasif titreşim kontrolu ve aktif titreşim kontroludur. Pasif titreşim kontrolunda sistemdeki titreşimin sönümü pasif sönümleyiciler (amortisör v.b.) ya da yeterli viskoelastisedeki malzemeler ile artırılarak sistemde oluşan titreşimler azaltılır. Bu yöntemle sistemin ağırlığı ve hacmi artış gösterdiğinden, havacılık ve uzay endüstrisi, küçük parçaların imalatı ve montajında kullanılan robot kolları gibi hafiflik, sınırlı yer ve hızlılık istenilen sistemlerde tercih edilmemektedir. Fakat ilave enerjiye ihtiyaç duyulmaması ve yüksek frekanslı titreşim modlarını sönümlemesi nedeniyle iyi bir yöntemdir. Aktif titreşim kontrolunda ise sisteme tahrik elemanı ve algılayıcılar ilave edilir. Bu titreşim kontrol yönteminin temel işleyiş prensibi, algılayıcıların sistemdeki titreşim hareketinin algılayarak denetim sistemine geri besleme sinyali olarak iletmesi ve denetleyicide titreşimi baskılayacak denetim sinyalinin elde edilerek tahrik elemanına gönderilmesidir. Böylece sistemin titreşim hareketi uygulanan/geliştirilen denetim girdisi ile kontrol edilmiş olur.

Son yıllarda aktif titreşim kontrolu üzerine yapılan çalışmalar birçok yeni nesil tahrik elemanı ve algılayıcının gelişmesine öncü olmuştur. Piezoelektrik malzemeler, yapı

hafızalı alaşımlar (shape memory alloys), elektro-reolojik akışkanlar (Electro-rheological Fluids) gibi yeni nesil malzemeler, hafif olmaları, az yer kaplamaları, esnek sistemlere kolayca monte edilebilmeleri ve hızlı cevap verebilmelerinden dolayı aktif titreşim kontrolu uygulamalarında önemli yer tutmaktadırlar.

Piezoelektrik malzemeler üzerlerine uygulanan elektrik gerilimini algılar ve elektrik geriliminden dolayı içyapılarında oluşan gerinmeden dolayı uzayıp kısalırlar. Bu şekilde, üzerine yapıştırıldığı veya içine gömüldüğü esnek yapıda tahrik elemanı görevi görürler. Bunun aksine üzerine uygulanan kuvvetten dolayı oluşan iç gerinmenin elektrik gerilimine dönüştürülmesi ile de algılayıcı görevi görürler. Piezoelektrik malzemeler arasında tahrik elemanı ve algılayıcı olarak çoğunlukla PZT (Lead-Zirconate-Titanate) adı verilen piezo seramik malzemeler kullanılır.

Son zamanlarda esnek sistemler ve bu sistemlerdeki titreşimlerin aktif kontrolu konusunda yapılan çalışmalar dikkate alınarak, esnek sistemlerin aktif kontrolu için yeni bir denetim algoritması geliştirilmesi ve bu algoritmanın deneysel olarak incelenmesi bu çalışmanın temel amacı olmuştur. Bu çalışmada; esnek, bir ucu ankastre diğer ucu serbest alüminyum bir kirişin titreşimlerinin piezo seramik (PZT) tahrik elemanları kullanarak Kayan Kipli Denetim (KKD) ile aktif kontrolu'nü içermektedir. Çalışmada algılayıcı olarak lazer konum algılayıcı kullanılmıştır. KKD algoritmasının oluşturulması için esnek kiriş, Euler-Bernoulli kiriş denklemi kullanılarak modellenmiştir. Kirişin ilk iki ve ilk üç titreşim modu için tasarlanan KKD algoritmasında gerekli olan esnek kiriş sisteminin durum değişkenlerinin elde edilmesi için Lazer konum algılayıcı ile ölçülen kirişin uç noktasının deplasmanı kullanılarak Luenberger gözlemcisi tasarlanmıştır. Geliştirilen KKD algoritmasının geçerliliği yapılan bilgisayar benzetimleri ile sınanmıştır. Elde edilen sonuçlar daha sonra deneysel sisteme uygulanmıştır.

Bu çalışmanın bölümleri kısaca şunlardır; bu çalışmanın dayandığı daha önceki çalışmalar bu bölümde irdelendikten sonra, çalışmanın ikinci bölümünde titreşim kontrolunda kullanılacak kayan kipli denetim teorisi anlatılmaktadır. 3. bölümde esnek kirişin modellenmesi için gerekli olan temel bilgiler verilmektedir. 4. bölümde

esnek kirişin modeli ve denetçi tasarlanarak bilgisayar benzetim sonuçları verilmektedir. Çalışmanın 5. bölümünde ise elde edilen benzetim sonuçları dikkate alınarak geliştirilen denetim algoritması deneysel sisteme uygulanmaktadır. Son bölümde ise tartışma ve sonuçlara değinilerek benzetim sonuçları ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmakta ve daha sonraki çalışmalara yol gösterilmektedir.

Esnek Sistemlerin Modellenmesi ve Kontrolu:

Esnek sistemlerin modellenmesi ve kontrolu konusuna son zamanlarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi gösterilmektedir. Özellikle tahrik elemanlarında yaşanan gelişmeler ve PZT tahrik elemanlarının titreşim kontrolu uygulamalarında kullanımının iyi sonuçlar vermesi aktif titreşim kontrolu üzerine yapılan çalışmaların sayısında artışa sebep olmuştur. Yapısal titreşimlerin kontrolu üzerine yapılan çalışmalarda, yeni kontrol tekniklerinin vereceği sonuçları daha kolay görebilmek için araştırmacılar çoğunlukla sistem olarak, yapıların temel elemanı olan kirişleri kullanmayı tercih etmişler ve tasarladıkları denetçileri esnek kirişler üzerinde denemişlerdir.

Esnek kirişlerin modellenmesinde farklı metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar arasında en yaygın olarak kullanılanları; Euler-Bernoulli kiriş denklemi ile varsayılmış modlar yönteminin sentezi ve sonlu elemanlar metodudur. Çalışmalardaki farklılıklar genellikle uygulanan kontrol tekniği ve deneysel sistemde ortaya çıkmaktadır. Pota ve Petersen (1) yaptıkları çalışmada, bir ucu ankastre diğer ucu serbest esnek bir kirişi ilk iki titreşim modu için Euler-Bernoulli ve varsayılmış modlar yöntemi kullanarak modellemişler ve optimal LQG denetçi ile kiriş titreşimlerini sönümlemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmada tahrik elemanı olarak PZT yamalar, algılayıcı olarak ivme ölçücü kullanmışlardır. Pota ve diğerleri (2) yine aynı sistem üzerine yaptıkları çalışmalarında bu kez kirişin ilk üç titreşim modunu tasarladıkları RLC elektrik devresinin dirençlerini değiştirerek, kirişin sönümünü artıracak şekilde PZT yamalara giden gerilimi ayarlayarak kontrol etmişlerdir.

Choi ve Park (3) çalışmalarında bir ucu ankastre diğer ucu serbest kirişin ucuna kütle bağlayarak sisteme QFT denetçisi uygulamışlardır. Sistemi modellemede Euler-Bernoulli ve varsayılmış modlar yöntemini kullanmışlar ve uç noktaya yerleştirilen kütlenin model ve uygulanan denetçinin performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Choi ve diğerleri (4-6) sonraki çalışmalarında bu sonuçları tek ve iki uzuvlu esnek robot kollarının kontrolunda kullanmışlardır. Kollardaki esnemeden dolayı istenen koordinatların yakalanması için farklı denetim tekniklerini uygulamışlardır.

Esnek robot kollarının titreşimleri üzerine yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Konunun önemi ve sanayinin robotlara olan gereksinimi, araştırmacıların ilgisini bu alana çekmiştir. Li, Zu ve Goldenberg (7) çalışmalarında esnek tek uzuvlu ve esnek mafsallı bir robot kolunun modellenmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. Fung ve Lee (8) çalışmalarında tek uzuvlu esnek bir robot kolunun titreşimlerini zamanla değişen kayma yüzeyi kullanan değişken yapılı denetçi (Variable Structure Control) kullanarak kontrol etmişlerdir. Fung ve Lee sistemde tahrik elemanı olarak sadece elektrik motoru kullanmışlardır. Bunun yanında Öke ve Istafanopulos (9), Liu ve diğerlerinin (10) çalışmaları da robot kollarındaki titreşimlerin kontrolu üzerine yapılmış ilgi çekici araştırmalar arasında gösterilebilir.

Son zamanlarda esnek sistemlerin titreşim kontrolu uygulamalarında en yaygın kullanılan tahrik elemanları PZT yamalardır. PZT yamalar çoğunlukla esnek sistemlerin üzerilerine küçük parçalar halinde yapıştırılarak kullanılırlar. Fakat bazı çalışmalarda esnek yapıların yüzeyi tümüyle PZT yamalarla kaplanarak sistemin davranışları hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır (11-17). Bu çalışmalarda PZT'lerin sistem modeline etkileri ve denetim sinyaline verdikleri cevaplar araştırılmış ve sistemin performansına etkileri gözlenmiştir. Zhou ve Wang (13) çalışmalarında doğrusal olmayan deformasyona uğrayan esnek kirişin titreşimlerini geri besleme denetim kullanarak kontrol etmiştir. Çalışmada kirişin tüm yüzeyi PZT'ler ile kaplanmıştır. Wang ve Huang (14) yine kirişin tüm yüzeyini PZT'ler ile kaplayarak kirişin her bir modunun titreşimlerini ayrı ayrı kontrol edecek bir denetçi kullanmışlardır.

Bazı araştırmacılar tasarladıkları denetçileri kompleks yapılar üzerinde denemişlerdir. Sinha ve Pai (18) çalışmalarında esnek kirişlerden oluşan bir kafes sisteminin titreşimlerini tahmini durum değişkenlerini kullanarak kayan kipli denetim ve H_∞/μ sentezini kullanarak benzetim bazında kontrol etmiştir.

Literatürde, Euler-Bernoulli ve varsayılmış modlar yöntemi kullanılarak yapılan sistem modellemesinin yanı sıra, esnek sistemlerin modellenmesinde farklı tekniklerin kullanımına da rastlanmaktadır. Gaudenzi ve diğerleri (19) çalışmalarında esnek bir kirişi sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemişlerdir. Modellemeyi yaparken kiriş üzerine yapıştırılmış PZT tahrik elemanı ve algılayıcıların sistem modeline etkisi de incelenmiştir. Ülker (20) çalışmasında yine esnek bir kirişin modelini sistem tanılama (System Identification) yöntemi ile elde etmiş ve tasarladığı H_∞ denetçisi ile kiriş titreşimlerini sönümlemiştir. Bazı araştırmacılar ise denetçileri Euler-Bernoulli metodu kullanarak elde ettikleri kısmı diferansiyel denklemi kullanarak tasarlamışlardır (21,22).

Esnek sistemlerin modellenmesi ve kontrolu üzerine yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde sürmekte ve titreşim sorununu makinelerden ve yapılardan uzaklaştırabilmek için en önemli araştırma alanlarından biri olmaya devam etmektedir.

Kayan Kipli Denetim:

Değişken yapılı sistemler teorisi ve özel bir alanı olan kayan kipli denetim ilk kez 1960'lı yılların başında Rus bilim adamları Emelyanov ve Barbashin tarafından Rusya'da ortaya çıkarılmış olmasına rağmen 1970'li yılların sonlarına kadar sadece Rusya içinde kalmış ve Rus bilim adamları tarafından araştırmalarında kullanılmıştır. Kayan Kipli Denetimin Rusya dışına çıkması ilk kez 1976'da Itkis (23)'in kitabının ingilizce olarak yayınlanması ve bundan daha önemlisi 1977 yılında Utkin (24) çalışmasının IEEE Transactions on Automatic Control dergisinde yayınlanması ile olmuştur. Bu çalışması kontrol bilimi üzerine çalışan bilim adamları arasında büyük yankı bulmuştur. Utkin bu çalışmasında değişken yapılı sistemlerden bahsederek Kayan Kipli Denetim'e geçiş yapmış ve doğrusal zamanla değişmeyen sistemler,

doğrusal zamanla değişen sistemler, doğrusal olmayan sistemler ve bozucu giriş içeren sistemler için KKD tasarımını teorik olarak anlatmış ve bunun yanında o güne dek Rusya'da değişken yapılı sistemler ve KKD üzerine yapılmış çalışmaları içeren geniş kapsamlı bir literatür taraması da sunmuştur. Utkin'in ilk kitabının ingilizce olarak yayınlanmasının ardından diğer bilim adamlarının bu konu üzerine yaptığı çalışmalar hız kazanmış ve kısa süre içinde sonuçlar alınmaya başlanmıştır.

Slotine ve Sastry (25) KKD kullanarak doğrusal olmayan sistemlerin yörünge izlemeli kontrolu üzerine teorik bir çalışma yapmışlar ve elde ettikleri sonuçları bir robot kolunun yörünge kontrolunda uygulamışlardır. Slotine (26) diğer çalışmasında doğrusal olmayan sistemler için geliştirdiği yeni bir kayma yüzeyi tasarım metodundan bahsetmiştir. Ayrıca Slotine ve diğerleri (27) çalışmalarında değişken yapılı sistemler teorisini denetçi tasarımının yanında gözlemci tasarımında da kullanılabileceğini ve böylece sistemlere bozucu girişler olması durumunda bu gözlemcilerin daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir.

Zinober ve diğerleri (28) çalışmalarında çok giriş ve çıkışlı sistemler için KKD tasarımını ele almışlar ve ayrıca bu sistemler için KKD tasarımını kolaylaştıran bir bilgisayar programı yazmıştır. Bu bilgisayar programı daha sonra birçok araştırmacı tarafından benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

Bazı araştırmacılar kayan kipli denetimi diğer kontrol metotları ile birleştirerek etkili denetçiler tasarlamışlardır. Slotine ve Coetsee (29) çalışmalarında adaptif kontrol ile kayan kipli denetimin sentezinden yararlanarak doğrusal olmayan sistemler için adaptif kayan kipli denetçi tasarım metodu öngörmüşlerdir. Young ve Özguner (30) çalışmalarında doğrusal sistemler için optimal kayan kipli denetçi tasarımını incelemişlerdir.

DeCarlo ve diğerleri (31) doğrusal olmayan çok değişkenli sistemler için KKD tasarım yöntemlerini içeren kapsamlı bir çalışma ile bu konu üzerine çalışma yapmakta olan birçok araştırmacıya katkıda bulunmuşlardır. Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolunda yaşanan güçlükler araştırmacıları farklı yollara itmiştir.

Salamcı (32), Salamcı, Özgören ve Banks (33) çalışmalarında doğrusal olmayan sistemleri ardışık doğrusal zamanla değişen sistemler halinde modelleyerek, zamanla değişen yeni bir kayma yüzeyi tasarım metodunu öngörmüşlerdir. Yine Salamcı (32), Banks, Salamcı ve McCaffrey (34) çalışmalarında doğrusal olmayan sistemler için kararlı manifold teoremini kullanarak doğrusal olmayan kayma yüzeyleri geliştirmişlerdir.

Kayan kipli denetim üzerine birçok kitap yayınlanmıştır. Slotine (35) "Applied Nonlinear Control" adlı kitabında kayan kipli denetime bir bölüm ayırmış ve burada doğrusal olmayan sistemler için kayma yüzeyi tasarımı, denetçi tasarımını ele almıştır. Değişken yapılı sistemler ve kayan kipli denetim üzerine bugüne kadar yapılmış en içerikli çalışmalardan birisi de Utkin'in "Sliding Modes in Control and Optimization" adlı kitabıdır (36). Son yıllarda kayan kipli denetim üzerine yayınlanmış iki yeni kitap bulunmaktadır. Spurgeon ve Edwards (37) kitaplarında doğrusal zamanla değişmeyen sistemler üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Perruquetti ve Barbot (38) kayan kipli denetim üzerine son zamanlarda yapılmış yenilikleri içeren çeşitli çalışmaları kitaplarında toplamışlardır.

Değişken yapılı sistemler ve kayan kipli denetim üzerine daha birçok teorik ve uygulamalı çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki bu konu gelecekte de aktif bir araştırma alanı oluşturacaktır.

2. KAYAN KİPLİ DENETİM

Değişken yapılı kontrol sistemleri (Variable Structure Control Systems), sistemin durum değişkenleri kullanılarak belirli kurallar çerçevesinde denetçi yapısının kontrol işlemi esnasında kasten değiştirilmesi ile elde edilir. Başka bir değişle, denetim algoritması uygulandığında, sistemin hareket denklemleri tek bir diferansiyel denklem yerine aynı sistemi tarif eden iki diferansiyel denklem olarak ortaya çıkar.

Değişken yapılı sistemlerin matematiksel ifadesi için aşağıda ikinci mertebe bir sistem örnek olarak incelenmektedir. Eş. 2.1 ile verilen örnekte ikinci mertebe bir diferansiyel denklemdeki katsayı, farklı değerler almaktadır (24).

$$\ddot{x} = -\psi\, x \qquad [2.1]$$

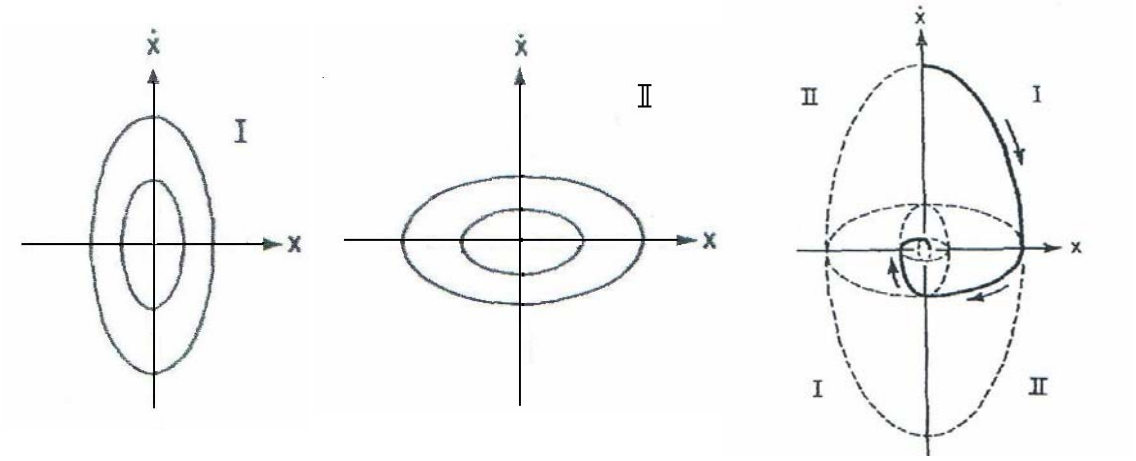
x 'in katsayısı ψ için iki farklı yapı belirlenirse,

$$\psi = \alpha_1^2 \text{ ve } \psi = \alpha_2^2 \qquad (\alpha_1^2 > \alpha_2^2)$$

Sistemin faz portresi elipslerden oluşmaktadır (Şekil 2.1a, b). Sistemin asimptotik kararlı olmadığı şekillerden görülmektedir. Fakat sistemin koordinat eksenleri üzerindeki yapısı değiştirilerek sistem asimptotik kararlı hale getirilebilir. Buna Değişim Mantığı (Switching Logic) adı verilir. Bu mantığa göre,

$$\psi = \begin{cases} \alpha_1^2, & x\dot{x} > 0 \quad \text{ise,} \\ \alpha_2^2, & x\dot{x} < 0 \quad \text{ise.} \end{cases} \qquad [2.2]$$

olarak değiştirilsin. Bu değişim uygulandığında sistemin faz portreleri Şekil2.1c'deki hali alır. Şekilden de görüleceği gibi sistem yapısı değiştirildikçe sistem asimptotik olarak kararlı hale gelmektedir.



(a) (b) (c)

Şekil 2.1. İki Lyapunov kararlı sistemden oluşan bir asimptotik kararlı değişken yapılı sistem (24)

Eş. 2.1 ile verilen sisteme negatif sönüm eklendiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

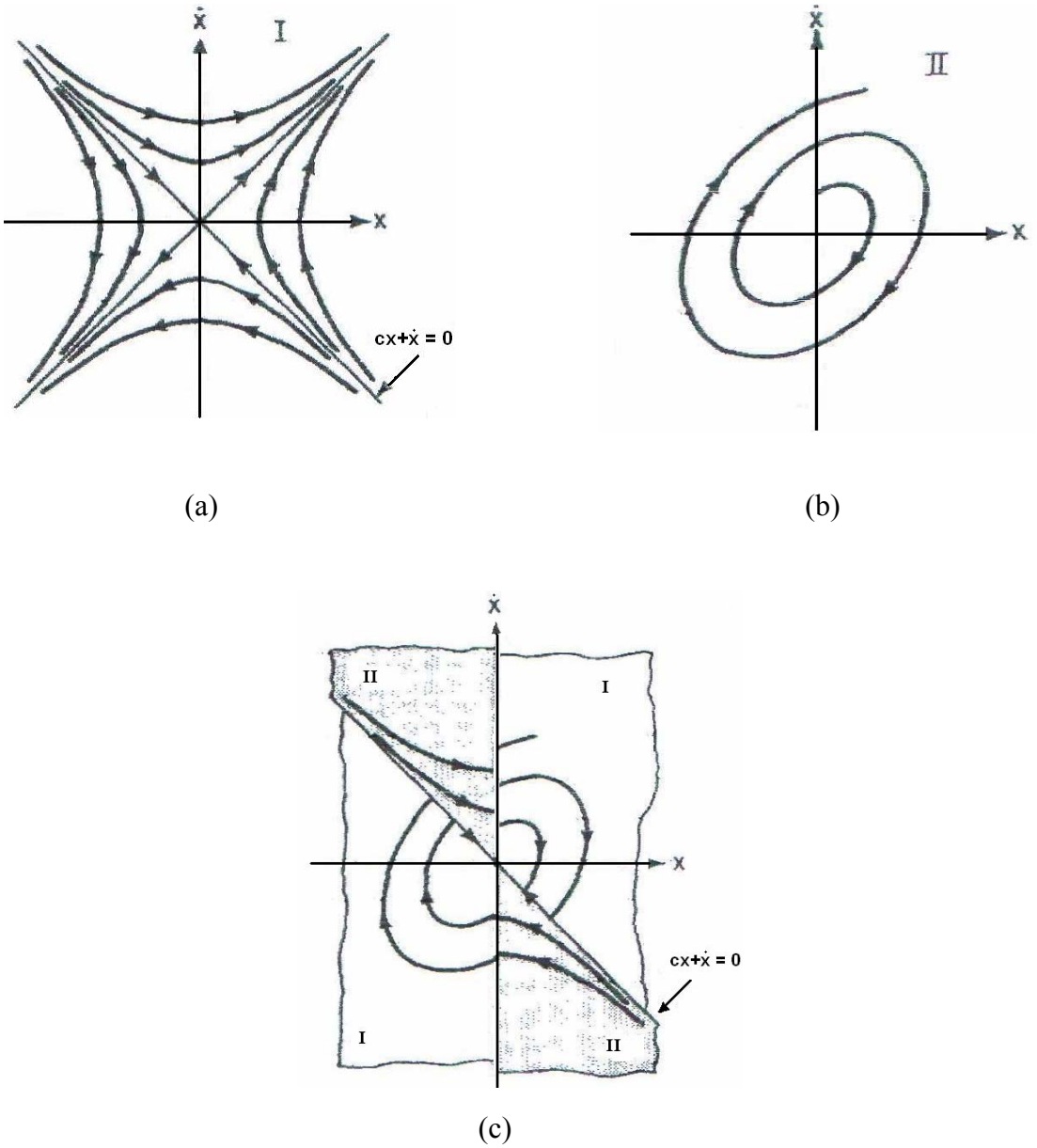
$$\ddot{x} - \xi \dot{x} + \psi x = 0 \qquad [2.3]$$

Sistem görüldüğü gibi Hurwitz Kriterini sağlamadığı için kararsızdır. Bu durumda sistem parametrelerinden ψ, α ve $-\alpha$ olarak değiştirilse bile sistem kararsız davranışını koruyacaktır (Şekil 2.2a, b). Şekil 2.2a'da görülmektedir ki, sistemi asimptotik kararlı hale getirmek için faz yörüngeleri, sistem parametresi $\psi = -\alpha$ olduğu durumda sistemin kararlı öz vektörü (eigenvector) olan σ yüzeyine çekilmelidir (Şekil 2.2c). Bu durum için değişim mantığı aşağıdaki gibi tanımlanırsa,

$$\sigma = cx + \dot{x} \qquad [2.4]$$

$$\psi = \begin{cases} \alpha, & x\sigma > 0 \quad \text{ise;} \\ -\alpha, & x\sigma < 0 \quad \text{ise.} \end{cases} \qquad [2.5]$$

Bu yüzeye (σ) kayma yüzeyi (Sliding Surface) adı verilir. Sistem yörüngeleri kayma yüzeyine geldiğinde $\sigma = 0$ olur ve sistem yörüngeleri kayma yüzeyi doğrultusunda hareket etmeye zorlanır.



Şekil 2.2. İki kararsız sistemden oluşan bir asimptotik kararlı değişken yapılı sistem (24)

Her iki örnekte de görüldüğü üzere, sistem parametrelerinin değişimi ile birlikte, aynı sistemi tarif etmek üzere birden farklı diferansiyel denklem elde edilmekte, bu ise değişken yapılı sistem tanımı ile verilmektedir. Değişken yapılı sistemde, diferansiyel denklemlerden biri veya hepsi teker teker ele alındığında kararsız davranış sergilese bile, sistem bütün olarak ele alındığında kararlı davranış elde edilebilmektedir. Sistemin doğal faz yörüngelerinden farklı gerçekleşen bu harekete "Kayan Kip" (Sliding Mode) adı verilir. $\sigma = 0$ eşitliği sistemin kayma yüzeyi

üzerindeki davranışını verir ve kayma yüzeyi üzerinde sistem davranışını c parametresi, yani kayma yüzeyi eğimi belirler. Sistem davranışının sistem parametrelerinden ve bozucu girişlerden bağımsız olması, zamanla değişen sistemlerin (Time Varying Systems) kontrol edilmesinde ve sisteme dışardan uygulanan bozucu girişlerin bertaraf edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Kayan Kipli Denetim'de kontrol girişi u'nun amacı ikinci örnekte anlatıldığı gibi sistemi kayma yüzeyine çekmek ve sistemi kayma yüzeyi üzerinde tutmaktır. Bu amaçla sistemin denetçi girdisi iki kısımdan oluşur. Bunlar (a) sistemi kayma yüzeyi üzerine yönelten ve sistemin bu yüzey denklemi ile tanımlanabilir hale getiren, diğer bir ifade ile sistemi kayma yüzeyi dinamiğine eşdeğer yapan, eşdeğerleyen denetçi u_{eq} (Equivalent Control) ve (b) sistemi sürekli yüzey üzerinde kalmaya zorlayan yüksek frekanslı denetçi u_n'dir.

$$u = u_{eq} + u_n \qquad [2.6]$$

Değişken yapılı sistemlerin avantajları dikkate alınarak, bu çalışmada ele alınan Kayan Kipli Denetim algoritması tasarımı bu bölümde sırasıyla doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için ele alınmaktadır. Doğrusal sistemler için ayrıca sistemin uyum koşulu tipi (Matching Condition) belirsizlik içermesi durumunda KKD tasarımı genel olarak işlenmektedir. Sistemin durum değişkenlerinin ölçülemediği koşullarda denetçi algoritması için gerekli olan durum değişkenlerinin elde edilebilmesi için gözlemci (Observer) tasarımına bu bölümde ayrıca değinilmektedir. KKD tasarımının daha iyi anlaşılabilmesi için bir örnek kütle, yay, amortisör sisteminin titreşim kontrolune KKD uygulanmaktadır.

2.1 Doğrusal Sistemler İçin KKD Tasarımı

2.1.1 Faz değişkenleri kullanarak KKD tasarımı

Faz değişkenleri formunda yazılmış tek giriş ve tek çıkışlı doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem Eş. 2.7 ile verilmiştir.

$$\dot{x}_i = x_{i+1}\,, \qquad i = 1,2,\cdots,n-1$$
$$\dot{x}_n = \sum_{j=1}^{n} -a_j x_j + bu \qquad [2.7]$$

Sistem matris formunda gösterilirse,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \cdots & -a_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b \end{bmatrix} u \qquad [2.8]$$

Bu tip bir sistem için kayma yüzeyi,

$$\sigma(x) = x_n + \sum_{j=1}^{n-1} c_j x_j \quad = x_n + c_{n-1}x_{n-1} + \ldots.. + c_2 x_2 + c_1 x_1 \qquad [2.9]$$

Eş. 2.9'daki c_j katsayıları sabit sayılar olup sistemin kararlı davranışını sağlayacak şekilde seçilir. Bu amaçla, sistemin kayma yüzeyi üzerindeki davranışı analiz edilmektedir. Sistem kayma yüzeyine ulaştığında $\sigma(x) = 0$ olur. Sistem kayma yüzeyi üzerinde kaldığında, $\sigma(x)$ 'in türevi de sıfıra eşit olacaktır.

$$\dot{\sigma}(x) = 0 \qquad [2.10]$$

Eş. 2.9'dan elde edilen yeni sisteme indirgenmiş sistem (Reduced Order System) adı verilir. İndirgenmiş sistem,

$$\dot{x}_i = x_{i+1}\,, \qquad i = 1,2,\cdots,n-2$$
$$\dot{x}_{n-1} = \sum_{j=1}^{n-1} -c_j x_j \qquad [2.11]$$

Eş. 2.11'de görüldüğü gibi indirgenmiş sistemde kontrol girişi bulunmamaktadır. İndirgenmiş sistem matris formunda gösterilirse,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -c_1 & -c_2 & -c_3 & \cdots & -c_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{bmatrix} = A_s x \qquad [2.12]$$

İndirgenmiş sistemin kararlı olması için A_s matrisinin tüm öz değerlerinin gerçek kısımları negatif olmalıdır. Yani kayma yüzeyi katsayıları c_j'ler Routh-Hurwitz kriterini sağlamalıdır. Diğer bir ifade ile,

$$P(\lambda) = \lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + ... + c_2\lambda + c_1 \quad = 0 \qquad [2.13]$$

Eş. 2.13 ile verilen karakteristik polinoma sistemin istenen öz değerleri yerleştirir ve her bir öz değer için $P(\lambda) = 0$ eşitlik takımları birlikte çözülürse kayma yüzeyi katsayıları c_j'ler bulunur. Eşdeğerleyen denetçi u_{eq}, kayma yüzeyinin türevinin sıfıra eşitlenmesi ve sistem eşitliğinin son elemanı $\dot{x}_n$'lerin eşitlenmesiyle bulunan u, kontrol girişine eşittir.

$$u_{eq}(t) = 1/b\Big[\sum_{j=1}^{n} a_j x_j - \sum_{j=1}^{n-1} c_j x_{j+1} \Big] \qquad [2.14]$$

Toplam kontrol,

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \qquad [2.15]$$

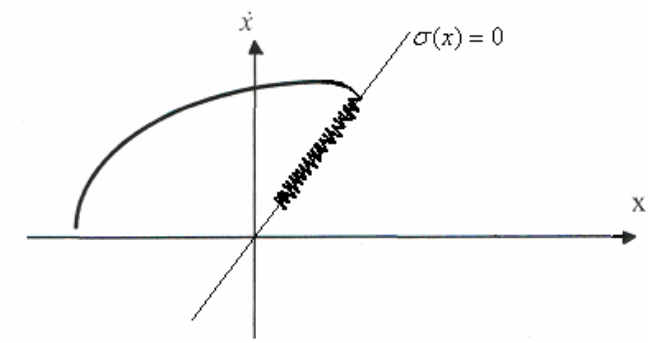
Yüksek frekanslı kontrolun seçimi, sistem kararlılığını sağlayacak pozitif tanımlı Lyapunov fonksiyonunun türevini daima negatif yapacak şekilde yapılır. Pozitif tanımlı bir Lyapunov fonksiyonu Eş. 2.16'daki gibi seçilebilir.

$$V(x) = \frac{1}{2}[\sigma(x)]^2 \qquad [2.16]$$

Eşdeğerleyen denetçiye ek olarak, toplam kontrolun diğer kısmı Eş. 2.17'deki gibi seçilirse Lyapunov fonksiyonunun türevini daima negatif tanımlı yapma şartı sağlanmış olur.

$$u_n(t) = -\rho(t,x)sign(\sigma) \qquad [2.17]$$

Yüksek frekans kontrol kısmı u_n kayma yüzeyinin işareti ve $\rho(t,x)$ çarpımının negatifinden oluşmaktadır. $\rho(t,x)$ fonksiyonu doğrusal zamanla değişmeyen sistemler için genel olarak sabit sayı seçilir. Seçilen sabit sayı, sistemin kayma yüzeyine ilerleme hızı ile ilişkilidir. Sabit arttıkça sistem kayma yüzeyine daha hızlı ilerler fakat katsayının yüksek seçilmesi kayma yüzeyi üzerindeki yüksek frekanslı çıtırtının (chattering) genliğini artırır (Şekil 2.3). Kayma yüzeyi üzerinde oluşan çıtırtı fiziksel olarak tahrik elemanına gönderilen denetim sinyalinin çok sık yön değiştirdiğini gösterir. Bu sıklıkla yön değiştirme hareketini çoğu tahrik elemanı ile elde etmek mümkün olmadığı için kontrol uygulamalarında çıtırtı oluşumu istenmez.



Şekil 2.3. Kayma yüzeyi üzerinde çıtırtı oluşumu (35)

2.1.2 Düzenli yapı kullanarak KKD tasarımı

Doğrusal zamanla değişmeyen tek giriş ve çıkışlı bir sistem genel olarak Eş. 2.18 ile ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} u \qquad [2.18]$$

Bu sisteme kayan kipli denetçi tasarlamak için sistem bir T, koordinat dönüşüm matrisi kullanılarak düzenli yapıya (Regular Form) dönüştürülürse,

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{a}_{11} & \widetilde{a}_{12} & \cdots & \widetilde{a}_{1n} \\ \widetilde{a}_{21} & \widetilde{a}_{22} & \cdots & \widetilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \widetilde{a}_{n1} & \widetilde{a}_{n2} & \cdots & \widetilde{a}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ b_2 \end{bmatrix} u = \widetilde{A}\, z + \widetilde{B}\, u \qquad [2.19]$$

Eş. 2.19 ile verilmiş sistemde, dönüştürülmüş sistem $z = Tx$ olur. z vektörünün katsayılarını veren dönüştürülmüş sistemde, $\widetilde{A}$ ve $\widetilde{B}$ matrisleri,

$$\widetilde{A} = T^{-1} A T \qquad [2.20]$$

$$\widetilde{B} = T^{-1} B \qquad [2.21]$$

Dönüşüm matrisi T, $\widetilde{B}$ matrisini Eş. 2.19'de verilen yapıyı sağlayacak şekilde seçilir. Böylelikle, dönüştürülmüş yeni sistem kontrol girişi olan ve olmayan iki kısma ayrılır ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \widetilde{A}_{11} z_1 + \widetilde{A}_{12} z_2 \\ \dot{z}_2 &= \widetilde{A}_{21} z_1 + \widetilde{A}_{22} z_2 + b_2 u \end{aligned} \qquad [2.22]$$

Eş. 2.22 ile verilen yeni sistem için kayma yüzeyi,

$$\sigma(z) = z_2 + c z_1 \qquad [2.23]$$

Sistem kayma yüzeyi üzerinde iken $\sigma(z) = 0$ 'dır.

$$z_2 = -c z_1 \qquad [2.24]$$

$$\dot{z}_2 = -c \dot{z}_1 \qquad [2.25]$$

Elde edilen eşitlikler dönüştürülmüş sistemin kontrol içermeyen kısmında yerine konursa,

$$\dot{z}_1 = (\widetilde{A}_{11} - \widetilde{A}_{12}c)z_1 \qquad [2.26]$$

Burada sistemin kararlı olması için $(\widetilde{A}_{11} - \widetilde{A}_{12}c)$ matrisinin öz değerlerinin gerçek kısımlarının negatif olması gereklidir. c matrisi, Eş. 2.26 ile ifade edilen indirgenmiş sistemin öz değerleri negatif gerçek kısma sahip olacak şekilde belirlenir. Eşdeğerleyen denetçi u_{eq} ise, dönüştürülmüş sistemin kontrol girişi olan kısmından elde edilir.

$$u_{eq}(t) = B_2^{-1}\left(-[c(\widetilde{A}_{11} - \widetilde{A}_{12}c) + \widetilde{A}_{21}]z_1 - \widetilde{A}_{22}z_2\right) \qquad [2.27]$$

Toplam kontrol $u_{eq}(t)$ ile $u_n(t)$ 'in toplamından oluşur.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t)$$
$$u_n(t) = -\rho(t,x)\,sign(\sigma) \qquad [2.28]$$

Sonuç olarak elde edilen kontrolun x'in fonksiyonu olması gereklidir. Bu yüzden elde edilen kayma yüzeyi, geri dönüşüm yapılarak x'in bir fonksiyonu olarak elde edilmelidir. $\rho(t,x)$ faz değişkenlerinde olduğu gibi sabit bir sayı seçilebilir.

2.1.3 Uyum koşulu tipi belirsizlik durumunda KKD tasarımı

Sistemdeki belirsizliklerin kontrol vektörü ile aynı yönde olması halinde, bu belirsizliklere "Uyum koşulu" (Matching Condition) tipi belirsizlik adı verilir. Uyum koşulu tipi belirsizlikler içeren sistemlerin kontrolunda KKD büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Sistemdeki belirsizlikler göz önünde bulundurularak yapılan KKD tasarımı, belirsizliklerin sınırları belli olduğu durumlarda etkindir. Uyum koşulu tipi belirsizlik içeren tek giriş ve tek çıkışlı n'inci mertebeden bir sistem için KKD tasarımı aşağıdaki gibi özetlenebilir. Böyle bir sistemin hareket denklemi genel olarak,

$$\dot{x} = (A + \Delta A)x + Bu(t) \qquad [2.29]$$

Burada;

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \cdots & -a_n \end{bmatrix},\quad \Delta A=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\Delta a_1 & -\Delta a_2 & -\Delta a_3 & \cdots & -\Delta a_n \end{bmatrix},\quad B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(A,B) çifti kontrol edilebilir, ΔA zamanla değişen ve B vektörü doğrultusunda sistem parametrelerinden kaynaklanan belirsizliktir. Bu sistem için kayma yüzeyi,

$$\sigma(x)=x_n+\sum_{j=1}^{n-1}c_j x_j \quad =x_n+c_{n-1}x_{n-1}+.....+c_2x_2+c_1x_1 \qquad [2.30]$$

fonksiyonu ile belirlenir. Kayma yüzeyi üzerinde; $\sigma(x)=0$ ve $\dot{\sigma}(x)=0$'dır. Bu durumda, kayma yüzeyinden elde edilen indirgenmiş sistem aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -c_1 & -c_2 & \cdots & -c_{n-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \end{bmatrix} \qquad [2.31]$$

İndirgenmiş sistemin kararlılığı için Eş. 2.32 ile verilen polinom Routh-Hurwitz koşulunu sağlamalıdır.

$$P(\lambda)=\lambda^{n-1}+c_{n-1}\lambda^{n-2}+.....+c_2\lambda+c_1 \quad =0 \qquad [2.32]$$

Bu polinom her bir istenen öz değer için çözülürse c_j katsayıları hesaplanır. Kayma yüzeyinin tasarımı faz değişkenleri için yapılanla aynıdır. Ancak sistemde bulunan belirsizliğin giderilmesi için denetçi tasarımı, sistem belirsizliklerini giderecek şekilde yapılmalıdır. Uyum koşulu tipi belirsizlik bulunduran sistem eşitlikleri,

$$\dot{x}_i=x_{i+1} \qquad i=1,2,\cdots,n-1$$
$$\dot{x}_n=-\sum_{j=1}^{n}(a_j+\Delta_j(t))x_j+u(t) \qquad [2.33]$$

Sistem belirsizliğinin fonksiyonu bilinmemekte fakat belirsizliğin hangi aralıklarda olduğu bilinmektedir.

$$k_i^- < \Delta_i(t) < k_i^+ \qquad [2.34]$$

Burada, k_i^- ve k_i^+ sabitler olup belirsizliğin sınırlarını oluşturmaktadır. Kayma yüzeyi fonksiyonunun türevi alınırsa,

$$\dot{\sigma}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} c_i x_{i+1} - \sum_{i=1}^{n} (a_i + \Delta_i(t)) x_i + u(t) \qquad [2.35]$$

Eş. 2.34'deki *u(t)*, toplam kontroldur.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \qquad [2.36]$$

Eş değer kontrol aşağıdaki gibi seçilir.

$$u_{eq}(t) = a_1 x_1 + \sum_{i=2}^{n} (a_i - c_{i-1}) x_i \qquad [2.37]$$

Eş. 2.36 ve Eş. 2.37, Eş.2.35'de yerine konursa,

$$\dot{\sigma}(t) = -\sum_{i=1}^{n-1} \Delta_i(t) x_i + u_n(t) \qquad [2.38]$$

Buradan süreksiz kontrol kısmı için iki yaklaşıma ulaşılabilir. Bu yaklaşımlardan birincisi,

$$\rho(t,x) \geq \left| \sum_{i=1}^{n} \Delta_i(t) x_i \right| + \eta \qquad [2.39]$$

Burada, η pozitif küçük bir sayıdır. $\Delta_i(t)$ bilinmemekte olup sadece hangi sınırlar arasında bulunduğu bilinmektedir. $\Delta_i(t)$ bilinmediği için $\rho(t,x)$ in seçimi,

$$\rho(t,x) = \sum_{i=1}^{n} \max \left\{ \left| k_i^- \right|, \left| k_i^+ \right| \right\} |x_i| + \eta \qquad [2.40]$$

olarak yapılır. Kayan kipli denetimin süreksiz kısmı,

$$u_n = -\rho(t,x)sign(\sigma) \qquad [2.41]$$

Süreksiz denetçiyi seçmede ikinci yaklaşım ise Eş. 2.42 ile verilmiştir.

$$u_n = \sum_{i=1}^{n} k_i x_i - \eta sign(\sigma) \qquad [2.42]$$

Belirsizlik sınırları aşağıdaki gibi seçilir,

$$k_i = \begin{cases} k_i^-, & \sigma x_i > 0 \quad \text{ise,} \\ k_i^+, & \sigma x_i < 0 \quad \text{ise.} \end{cases} \qquad [2.43]$$

2.2 Doğrusal Olmayan Sistemler İçin KKD Tasarımı

Doğrusal olmayan sistemlerde kayma yüzeyi tasarımı doğrusal sistemlerdeki gibi her zaman sıradan değildir. Fakat bazı durumlar için doğrusal sistemlerde kullanılan kayma yüzeyi tasarım yöntemleri doğrusal olmayan sistemlere de uygulanabilir. Bu bölümde Eş. 2.44 ile verilen tipteki tek giriş ve çıkışlı doğrusal olmayan sistemler için kayma yüzeyi tasarımı ele alınmaktadır.

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u(t) \qquad [2.44]$$

Burada $x \in R^n$, $f(x) \in R^{nxn}$, $g(x) \in R^{nx1}$ boyutludur. Yukarıdaki sistem için kayma yüzeyi fonksiyonu $\sigma(x)$ olsun. Kayma yüzeyi üzerinde $\sigma(x) = 0$ ve $\dot{\sigma}(x) = 0$ olur. Sisteme kararlı bir kayma yüzeyi tasarlamak için indirgenmiş sistemin kararlı davranmasını sağlamak gereklidir. İndirgenmiş sistemi elde etmek için,

$$\dot{\sigma}(x) = \frac{\partial \sigma(x)}{\partial x}\dot{x} = 0 \qquad [2.45]$$

Eş. 2.44'ten,

$$\dot{\sigma}(x) = \frac{\partial \sigma(x)}{\partial x}[f(x) + g(x)u] = 0 \qquad [2.46]$$

Eş. 2.46, eşdeğerleyen kontrol u_{eq} için çözülürse,

$$u_{eq} = -\left[\frac{\partial\sigma(x)}{\partial x} g(x)\right]^{-1} \frac{\partial\sigma(x)}{\partial x} f(x) \qquad [2.47]$$

Böylece indirgenmiş sistem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{x} = \left[I - g(x)\left[\frac{\partial\sigma(x)}{\partial x} g(x)\right]^{-1} \frac{\partial\sigma(x)}{\partial x}\right] f(x) \qquad [2.48]$$

Kayma yüzeyi indirgenmiş sistemin karalılığı sağlanacak şekilde tasarlanır. Fakat Eş.2.48, indirgenmiş sistemin kararlılığını sağlayacak bir kayma yüzeyi seçimine elverişli değildir. Bu yüzden Eş. 2.44 ile belirtilen sistem, genellikle doğrusal sistemlerde olduğu gibi kayma yüzeyi tasarımını kolaylaştıracak formlara dönüştürülür.

2.2.1 Faz değişkenleri kullanarak kayma yüzeyi tasarımı

Doğrusal sistemlerde olduğu gibi, tek girişli doğrusal olmayan bir sistem için kontrol edilebilir kanonik form aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1} \qquad i = 1,2,\cdots,n-1 \\ \dot{x}_n &= f(x) + g(x)u \end{aligned} \qquad [2.49]$$

Burada $f(x) \in R$ ve $g(x) \in R$'dir ve $\forall x$ için $g(x) \neq 0$ olduğu kabul edilmiştir. $(n-1)$ boyutlu doğrusal sistem için kayma yüzeyi fonksiyonu,

$$\sigma(x) = x_n + \sum_{j=1}^{n-1} c_j x_j \ , \qquad c_j = sabit. \qquad [2.50]$$

Sistem kayma yüzeyi üzerine harekete zorlandığında aşağıdaki hali alır.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= x_{i+1} \qquad i = 1,2,\cdots,n-2 \\ \dot{x}_{n-1} &= \sum_{j=1}^{n-1} - c_j x_j \end{aligned} \qquad [2.51]$$

Kararlı bir davranış için kayma yüzeyinin eğimleri aşağıdaki polinomun Routh-Hurwitz koşulunu sağlayacağı şekilde seçilir.

$$p(\lambda) = \lambda^{n-1} + c_{n-1}\lambda^{n-2} + ... + c_2\lambda + c_1 \qquad [2.52]$$

Doğrusal olmayan sistemler için faz değişkenleri kullanarak kayma yüzeyi tasarımı doğrusal sistemler ile aynıdır. Fakat burada genel bir doğrusal olmayan sistemi faz değişkenleri formuna getirecek tekil olmayan bir dönüşüm kullanmak gereklidir. Bu dönüşüm matrisini bulmak bazı durumlarda zor olabilir. Hatta bazı sistemler için bu dönüşüm gerçekleştirilemez (32, 33).

2.2.2 Düzenli yapı kullanarak kayma yüzeyi tasarımı

Doğrusal olmayan sistem düzenli yapıda aşağıdaki gibi gösterilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x) \\ \dot{x}_2 &= f_2(x) + g(x)u \end{aligned} \qquad [2.53]$$

Burada, $x_1 \in R^{n-1}$, $x_2 \in R$, $u \in R$, $g(x) \in R$ ve $g(x)$ tekil olmayan bir matristir. Bu sistem için kayma yüzeyi doğrusal ya da doğrusal olmayabilir. Doğrusal kayma yüzeyi tasarımı doğrusal sistemlerinki ile aynıdır. Kayma yüzeyinin eğimleri aşağıdaki indirgenmiş sistemin kararlılığını sağlayacak şekilde yapılır.

$$\dot{x}_1 = f_1(x) = f_1(x_1, -C_2^{-1}C_1x_1) \qquad [2.54]$$

Doğrusal olmayan kayma yüzeyi tasarımında ise kayma yüzeyi fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilir,

$$\sigma(x) = x_2 + \sigma_1(x_1) \qquad [2.55]$$

Burada $\sigma_1(x_1)$, x_1'in doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Kayma yüzeyi üzerinde $\sigma(x)=0$ olur. Böylece indirgenmiş sistem,

$$\dot{x}_1 = f_1(x) = f_1(x_1, -\sigma_1(x_1)) \qquad [2.56]$$

$\sigma_1(x_1)$, sistemi kararlı yapacak şekilde seçilmelidir. Bu durumda sistemin kararlılığını sağlayacak $\sigma_1(x_1)$ seçimi güç olacaktır. Bunun için doğrusal olmayan sistemler için aşağıdaki yöntemin kullanılması büyük kolaylık sağlamaktadır (35). Eş. 2.53 ile belirtilen doğrusal olmayan sistem için kayma yüzeyi fonksiyonu,

$$\sigma(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta\right)^{n-1} x(t) \qquad [2.57]$$

Burada *n* sistemin derecesini belirtmektedir. δ ise pozitif bir sabittir. Eğer sistemde bir referans giriş var ise yukarıdaki eşitlik şu hali alır,

$$\sigma(x) = \left(\frac{d}{dt} + \delta\right)^{n-1} \tilde{x}(t) \qquad [2.58]$$

Burada $\tilde{x} = x - x_d$ 'dir ve x_d sistemin referans girişidir.

2.2.3 Doğrusal olmayan sistemler için denetçi tasarımı

Kayma yüzeyi tasarımından sonra değişken yapılı kontrol sistemlerin ikinci aşaması olan denetçi tasarımı gelmektedir (32). Kayma yüzeyi yakınında, sistemi kayma yüzeyi üzerine yönlendirecek kontrol aşağıdaki eşitlikten elde edilebilir.

$$\begin{aligned} &\dot{\sigma}_i(x) > 0 \quad \text{eger} \quad \sigma_i(x) < 0 \quad \text{ise,} \\ &\dot{\sigma}_i(x) < 0 \quad \text{eger} \quad \sigma_i(x) > 0 \quad \text{ise.} \end{aligned} \qquad [2.59]$$

yada başka bir ifadeyle,

$$\sigma_i(x)\dot{\sigma}_i(x) < 0 \qquad [2.60]$$

Daha genel bir ifade için kayma yüzeyinden uzakta kuadratik bir Lyapunov fonksiyonu seçilir.

$$V(x,\sigma(x)) = \sigma^T(x) W \sigma(x) \qquad [2.61]$$

Burada W, simetrik pozitif tanımlı bir matristir. Sistemi kayma yüzeyi üzerine çekecek denetçiyi bulmak için,

$$\dot{V}(x,\sigma(x)) = \dot{\sigma}^T(x) W \sigma(x) + \sigma^T(x) W \dot{\sigma}(x) = 2\dot{\sigma}^T(x) W \dot{\sigma}(x) = 2\sigma^T(x) W \frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} \dot{x} \qquad [2.62]$$

Matematiksel ifadelerin yerine konulması ile Eş. 2.62 elde edilir.

$$\dot{V}(x,\sigma(x)) = 2\sigma^T(x) W \left(\frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} f(x) + \frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} g(x) u \right) \qquad [2.63]$$

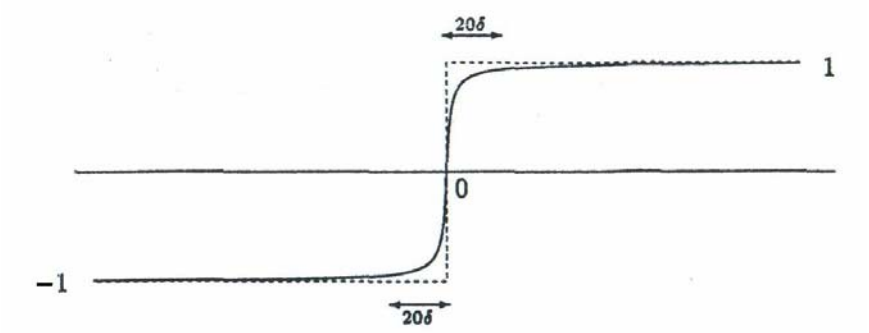
Burada denetçi *u,* Eş. 2.63'ü $\sigma(x) \neq 0$ için negatif tanımlı yapacak şekilde seçilir. Genellikle $W = I$ olarak seçilir.

2.3 Çıtırtının Önlenmesi

KKD'nin yüksek frekans kısmında bulunan işaret (signum) fonksiyonu kontrolde süreksizlik oluşturur. İşaret fonksiyonunun katsayısı $\rho(t,x)$'nin yüksek seçilmesi sistemin kayma yüzeyine daha hızlı ulaşmasını sağlasa da, kayma yüzeyi üzerinde yüksek genlikli çıtırtı oluşumuna sebep olmaktadır. $\rho(t,x)$'nin düşük seçilmesi durumunda ise sistem cevabı yavaşlayacak yani denetimin performansı düşecektir. Her iki durum da kontrol uygulamalarında istenmemektedir. Kayma yüzeyinde çıtırtı oluşmasına süreksiz bir fonksiyon olan işaret fonksiyonu neden olmaktadır. Yüksek frekanslı denetçi kısmında işaret fonksiyonu yerine Eş. 2.64 ile verilen işaret fonksiyonuna yakın bir fonksiyon ele alınabilir (37).

$$\nu(\sigma) = \sigma / (|\sigma| + \delta) \qquad [2.64]$$

Burada, δ çok küçük pozitif bir sabittir. Şekil 2.4'den de görüldüğü gibi $\delta \to 0$ giderken, $\nu(\sigma) \to sign(\sigma)$ 'ya gitmektedir. İşaret fonksiyonu kullanarak sistemin kayma yüzeyi üzerinde süreksiz hareketlerle tutmak yerine, Eş. 2.64'deki yaklaşımla sistem kayma yüzeyi üzerinde sürekli yörüngelerle kontrol edebilir. Fakat δ 'nin büyük seçilmesi kontrolun hassasiyetini ve gürbüzlüğünü azaltacaktır.



Şekil 2.4. İşaret fonksiyonuna diferansiyel yaklaşımı (37)

2.4 Gözlemci Tasarımı

KKD tasarımında kayma yüzeyi ve denetçi algoritmaları sistemin durum değişkenlerinin ölçülebildiği varsayımı ile türetilmektedir. Oysa, bazı gerçek uygulamalarda, sistem durum değişkenlerinin bir kısmı (veya çoğu) ölçülememektedir. Bu durumda, kayma yüzeyi ve KKD tasarımı için ölçülebilen durum değişkenlerinden faydalanılarak diğer durum değişkenlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için bir yöntem de Gözlemci (Observer) tasarımıdır. Doğrusal zamanla değişmeyen n'inci mertebe bir sistem için gözlemci tasarımı aşağıda özetlenmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \qquad [2.65]$$

Sistemde $x \in R^n$ boyutlu bir vektör, $A \in R^{nxn}$ $B \in R^{nxm}$ ve $C \in R^{kxn}$ boyutlu matrislerdir. Sistemde (A,B) kontrol edilebilir ve (A,C) gözlenebilir çiftlerdir.

Sistem çıkışının ölçülebildiği göz önüne alınırsa, bu durumda gözlemci sistem eşitliği aşağıdaki gibi verilir (39),

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad [2.66]$$

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \quad [2.67]$$

Burada $\hat{x}$, tahmin edilen durum değişkenlerini belirtmektedir. Gözlemci sistemin kararlı olması için $(A - LC)$ matrisinin öz değerlerinin gerçek kısımlarının negatif olması gereklidir. Gözlemcinin öz değerlerinin olması istenilen yerlerden yola çıkılarak L matrisi bulanabilir. Gözlemci tasarımında önemli olan diğer husus ise tahmin edilen durumların gerçek durumlara en hızlı şekilde yaklaşmasını garantilemektir. Bunun için gözlemcinin öz değerleri sanal eksende, kontrol edilmiş sistemin öz değerlerinin bulunulması istenilen konumlarından daha solda seçilmelidir. Fakat gözlemci öz değerlerinin fazla büyük seçilmesi durumunda ölçüm gürültüsünün etkisi de artacaktır. Gerçek durum değişkenleri ve tahmini durum değişkenleri arasındaki fark hatayı verir.

$$e = x - \hat{x} \quad [2.68]$$

Gözlemcinin tasarımı hatanın en kısa sürede sıfıra gitmesini sağlayacak şekilde yapılmalıdır.

$$\lim_{t\to\infty} e \to 0, \qquad \lim_{t\to\infty} \hat{x} \to x \quad [2.69]$$

Sistem durum değişkenleri ölçülemediği zaman KKD tasarımı gözlemci sistem kullanılarak, tahmin edilen durum değişkenleri cinsinden yapılır. Yani elde edilen kayma yüzeyi zaman ve tahmini durum değişkenlerinin fonksiyonudur.

$$\sigma = \sigma(t, \hat{x}) \quad [2.70]$$

Denetçi tasarımı tahmin edilen durumlar cinsinden ifade edilen kayma yüzeyi kullanılarak önceki bölümlerde bahsedildiği gibi yapılır.

2.5 Kütle, Yay, Amortisör Sistemi için KKD Tasarımı

Yukarıda anlatılan KKD tasarımı süreci, bu bölümde kütle, yay ve amortisörden oluşan bir örnek sistem üzerinde uygulanmaktadır. Sistemin doğal frekansı, $\omega = 4\,\text{rad/sn}$ ve sönüm oranı, $\xi = 0{,}007$ olarak seçilmiş, sistemin tüm durum değişkenlerinin ölçülemediği kabul edilmiştir. KKD'nin etkisinin görülmesi açısından sistemin sönümü küçük seçilmiştir. Bu durumda sistem denklemi Eş. 2.71'deki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} &\ddot{x} + 0{,}056\dot{x} + 16x = u \\ &y = x \end{aligned} \qquad [2.71]$$

Sistem faz değişkenleri cinsinden yazılırsa,

$$\begin{aligned} &\dot{x}_1 = x_2 \\ &\dot{x}_2 = -0{,}056x_2 - 16x_1 + u \\ &ve \\ &y = x_1 \end{aligned} \qquad [2.72]$$

Burada x, kütlenin yer değişimini, $\dot{x}$ ise, kütlenin hızını ifade etmektedir. Sistemde ölçülebilen tek parametre sistem çıkışı y, yani x_1'dir. Eş. 2.72 ile verilen sistem matris formunda yazılırsa,

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -16 & -0{,}056 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ &y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \qquad [2.73]$$

Sistemde ölçülemeyen durum değişkeni olduğu için KKD tasarımı sisteme bir gözlemci tasarlayarak yapılamaktadır. Sistem için genel gözlemci eşitliği,

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Bu + Ly \qquad [2.74]$$

Gözlemci eşitliğinde $L = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 \end{bmatrix}^T$'dir. Sistem parametreleri yerine konursa,

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 \\ -16 - l_2 & -0{,}056 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} y$$
$$\hat{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} \qquad [2.75]$$

$(A - LC)$ matrisinin öz değerleri $\lambda_1 = -20,\ \lambda_2 = -25$ olarak seçilirse gözlemci kazanç matrisinin elemanları $l_1 = 44{,}9440,\ l_2 = 481{,}4831$ olarak elde edilir. Bulunan değerler yerine konursa,

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -44{,}9440 & 1 \\ -497{,}4831 & -0{,}056 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 44{,}9440 \\ 481{,}4831 \end{bmatrix} y \qquad [2.76]$$

Kayma yüzeyi fonksiyonu,

$$\sigma(x) = x_2 + cx_1 \qquad [2.77]$$

Kayma yüzeyi üzerinde $\sigma(x) = 0$ ve $\dot{\sigma}(x) = 0$ olur.

$$x_2 = -cx_1$$
$$\dot{x}_2 = -c\dot{x}_1 \qquad [2.78]$$

Eş. 2.78, Eş. 2.73'te yerine konursa indirgenmiş sistemin kararlılığının sağlanması için $c > 0$ seçilmesi gereklidir. $c = 4$, seçilmesi bu şartı sağlar. c'nin seçimi istenen

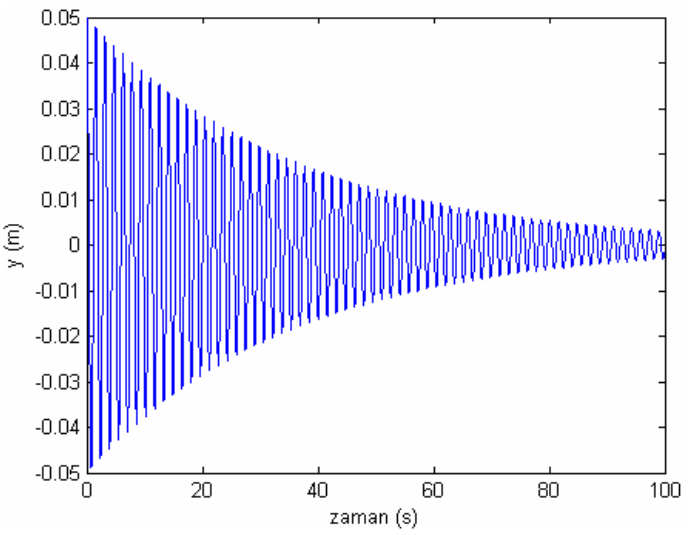
koşulu sağlaması şartıyla rasgeledir. Bu durumda sistem için elde edilen eşdeğerleyen kontrol girişi,

$$u_{eq} = 16x_1 - 3{,}944x_2 \qquad [2.79]$$

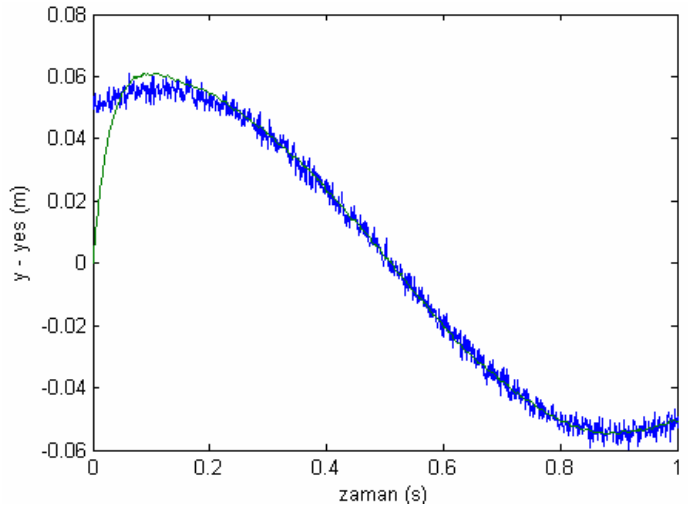
Toplam kontrol ise,

$$u(t) = u_{eq}(t) + \eta sign(\sigma) \qquad [2.80]$$

Burada η küçük negatif bir katsayıdır ve bu örnek için $\eta = -0{,}001$ olarak alınabilir. Kütle, yay, amortisör sistemine verilen 5 cm'lik başlangıç deplasmanı için kontrolsüz zaman cevabı ölçme gürültüsünün etkisi dikkate alınmadığı sürece Şekil 2.5'te görülmektedir. Sistemde ölçüm sinyalindeki gürültü oranının 0.01 olduğu kabulu yapılarak sisteme gözlemci tasarlandığında, gözlemcinin performansının iyi olduğu Şekil 2.6'da görülebilir.

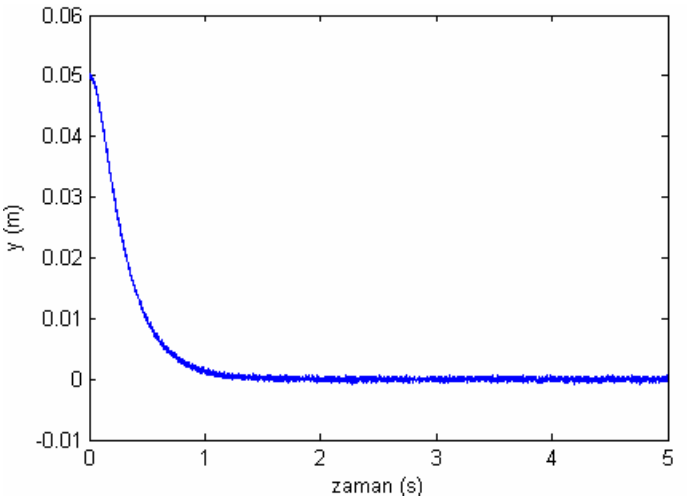


Şekil 2.5. Sistemin 5 cm'lik deplasman için serbest cevabı

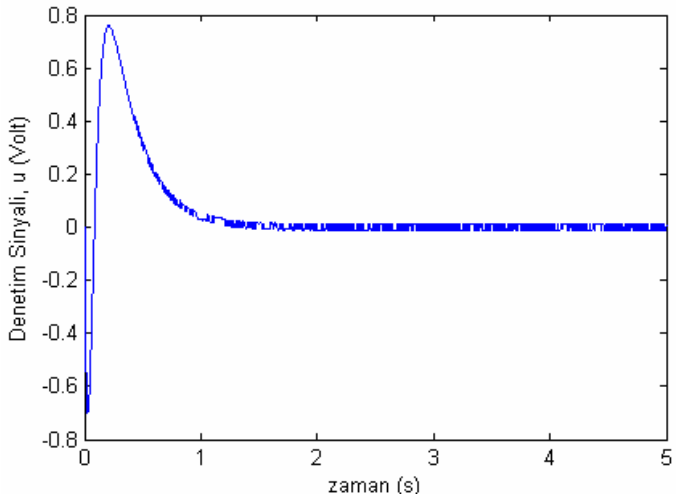


Şekil 2.6. Gözlemci ve gerçek sistem cevabı

Şekil 2.6'dan da görüldüğü üzere gözlemci kazancı ölçüm gürültüsü üzerinde büyük bir etki oluşturmamaktadır ve bu da seçilen gözlemci kazanç matrisinin denetçi tasarımı için uygun olduğunu göstermektedir. Tasarlanan kayan kipli denetçinin sisteme uygulanması ile elde edilen sistem cevabı Şekil 2.7 ile gösterilmektedir. Sisteme uygulanan kontrol girişi ise Şekil 2.8'de verilmektedir.



Şekil 2.7. Kontrol edilmiş sistem cevabı



Şekil 2.8. Sisteme uygulanan denetim sinyali.

Sisteme aşağıdaki gibi uyum koşulu tipi belirsizlik eklenirse;

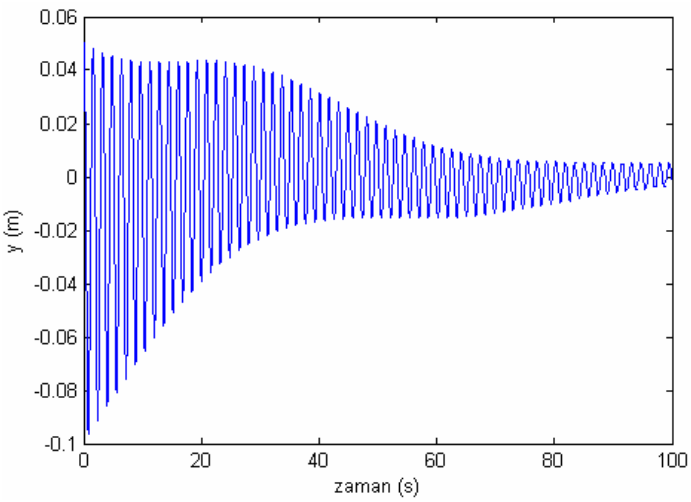
$$\Delta_1(t) = 0{,}035\sin(t)$$
$$\Delta_2(t) = 4\sin(4t) \qquad [2.81]$$

Bu durumda sistem,

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0 & 1\\ -16+\Delta_1 & -0{,}056+\Delta_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}u$$
$$y = \begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} \qquad [2.82]$$

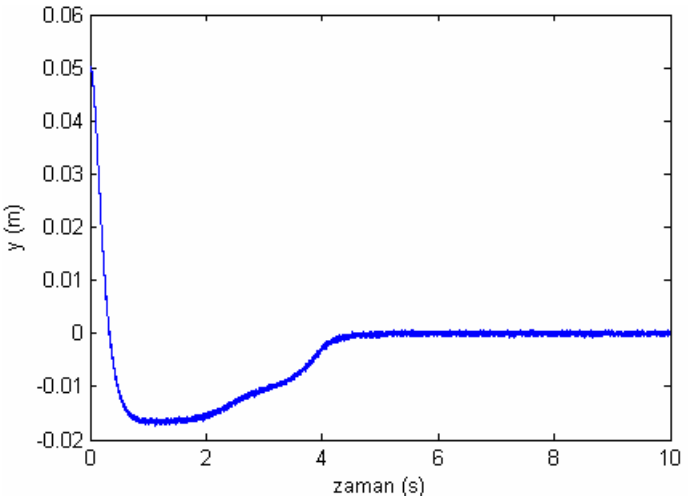
Denklemleri ile ifade edilir. Belirsizlik içeren sistemin kontrolsuz durumdaki $y = 5\,\text{cm}$ deplasmana verdiği cevap Şekil 2.9 ile verilmiştir. Sistemi kontrol etmek için Bölüm 2.3'deki yöntem kullanılırsa elde edilen toplam kontrol girişi,

$$u(t) = 16x_1 - 3{,}944x_2 - (0{,}03|x_1| + 2|x_2| + 0{,}05)sign(\sigma) \qquad [2.83]$$



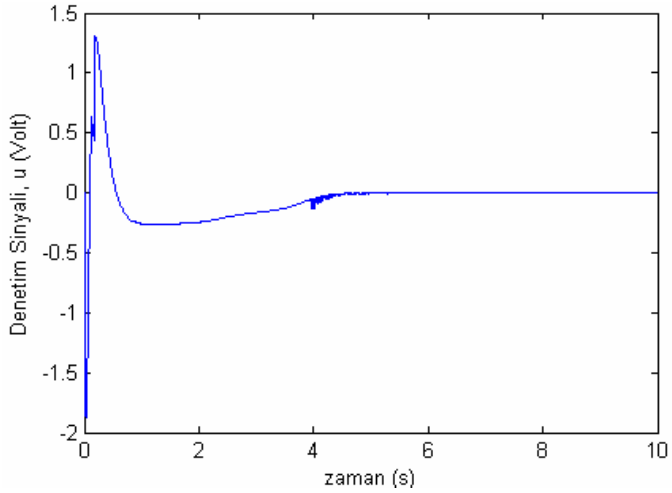
Şekil 2.9. Belirsizlik eklenmiş kontrolsuz sistem cevabı

5 cm başlangıç deplasmanı için kontrol edilmiş sistem cevabı ise Şekil 2.10'da görülmektedir.



Şekil 2.10. Belirsizlik içeren sistemin kontrol edilmiş cevabı

Sisteme uygulanan kontrol girişi Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekilden görülmektedir ki sistemde belirsizlik olması durumunda dahi kayan kipli denetim ile sistem yaklaşık 5 sn gibi kısa bir sürede kontrol edilebilmektedir.



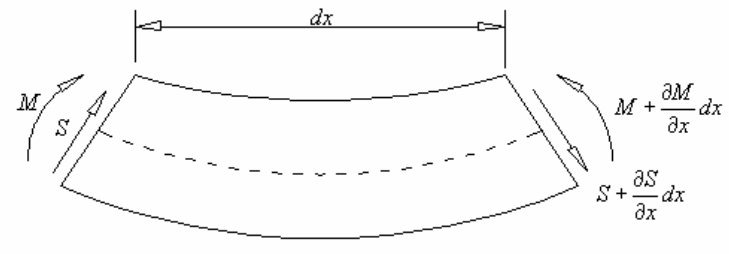
Şekil 2.11. Belirsizlik içeren sisteme uygulanan denetim sinyali

3. ESNEK KİRİŞİN MODELLENMESİ

Esnek kirişlerin modellenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında en önemlilileri; sonlu elemanlar analizi, sistem tanılama, Euler-Bernoulli kiriş modeli, Rayleigh-Ritz kiriş modelidir. Bu çalışmada bir ucu ankastre diğer ucu serbest esnek kirişin modellenmesi, Euler-Bernoulli kiriş modeli ve varsayılmış modlar (Assumed Mode) yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. İlk olarak sistemin Euler-Bernoulli modeli ile kiriş için sürekli sistem modeli elde edilmesi ve sistem parametreleri hesaplanması ele alınmakta daha sonra sistem modelinin adi diferansiyel denklem takımlarına dönüştürülmesi amacıyla varsayılmış modlar yöntemi açıklanmaktadır.

3.1 Euler-Bernoulli Kiriş Modeli

Esnek kiriş sistemleri için literatürde en yaygın olarak kullanılan metot Euler-Bernoulli kiriş modelidir. Euler-Bernoulli kiriş modeli ile sistemin doğrusal modelinin elde edilebilmesi için bazı kabuller yapılmıştır. Kirişin sadece yatay eksende titreşimi göz önüne alınmıştır. Bunun yanında dönme ataletinin etkisi ve dikey kayma deformasyonu etkileri göz önünde bulundurulmamıştır. Kirişin ekseni boyunca homojen olduğu ve kesit alanının değişmediği kabulü yapılmıştır. Şekil 3.1'de BC, kirişin titreşim anındaki merkez çizgisini göstermektedir. Herhangi bir x mesafesinde, t zamanına bağlı yer değişimi ise $y(t,x)$ ile gösterilmektedir. Kirişin yatay yöndeki titreşimleri göz önünde bulundurulduğu için yerçekiminin sebep olduğu kuvvetler ihmal edilmiştir (39).



Şekil 3.1. Esnek kirişin küçük eleman kesiti (39)

Şekil 3.1'de ayrıca *dx* uzunluğundaki eleman üzerindeki kuvvetler ve momentler de gösterilmektedir. Burada *S* ve *M* sırasıyla *x* kesitindeki kesme kuvveti ve eğilme momentidir. $\rho_b A_b dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$ kiriş elemanı üzerindeki atalet kuvveti olup, burada $\rho_b (kg/m^3)$, kiriş malzemesinin yoğunluğu ve $A_b (m^2)$, *x* ekseni boyunca kirişin kesit alanını vermektedir. Küçük niceliklerin çarpımı ihmal edilerek elemanın merkez çizgisi etrafında momentler alınır ve *Y* ekseni doğrultusunda kuvvet denkliği çözülürse,

$$Sdx + M - (M + \frac{\partial M}{\partial x} dx) = 0 \qquad [3.1]$$

veya,

$$S = \frac{\partial M}{\partial x} \qquad [3.2]$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \rho_b A_b \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \qquad [3.3]$$

Eğilme momenti ve eğim arasındaki ilişkiden ve kirişlerin statik yer değişiminin hesaplanmasında kullanılan yaklaşık eğim-uzunluk ilişkisinden,

$$M = -E_b I_b \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \qquad [3.4]$$

Burada E_b, kirişin elastiklik modülünü ve I_b, kesit alanının atalet momentini belirtmektedir. Eş. 3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4 birleştirilirse,

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}(E_b I_b \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}) = \rho_b A_b \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \qquad [3.5]$$

Eş. 3.5, esneklik rijitliği $E_b I_b$ ve birim ağırlık $\rho_b A_b$'nın *x*'in fonksiyonu olarak alınması ile hem uniform hem de uniform olmayan kirişler için kullanılabilir. Düzgün kesit alanlı kiriş için Eş. 3.5 aşağıdaki hali alır.

$$E_b I_b \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho_b A_b \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \qquad [3.6]$$

Eş. 3.6, Euler-Bernoulli kiriş modeli olarak adlandırılır. Sistem modeli kısmi diferansiyel denklemden oluşmaktadır ve sürekli bir sistemi ifade etmektedir. Modelde açıkça görülmektedir ki sistemde herhangi bir zorlama bulunmamaktadır. İleriki bölümlerde bu modele zorlama da eklenecektir. Serbest titreşimde *y(t,x)* zamanın harmonik bir fonksiyonudur (40). Böylelikle,

$$y(t,x) = Y(x)\sin(\omega t + \alpha) \qquad [3.7]$$

Eş. 3.7, Eş. 3.6'da yerine konursa,

$$\frac{d^4 Y}{dx^4} - \frac{\rho_b A_b \omega^3}{E_b I_b} Y = 0 \qquad [3.8]$$

Eş. 3.8 adi bir diferansiyel denklemdir. Eşitlik 4. dereceden olduğu için genel çözüm Y(x) dört adet sabit içerir. Eş. 3.8'in genel çözümü,

$$Y(x) = B_1 \sin(\lambda x) + B_2 \cos(\lambda x) + B_3 \sinh(\lambda x) + B_4 \cosh(\lambda x) \qquad [3.9]$$

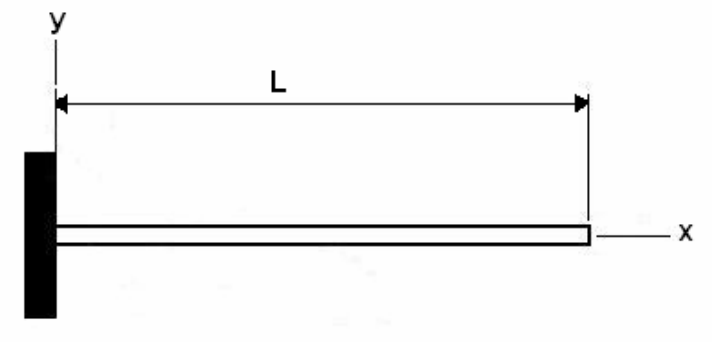
Burada,

$$\lambda^4 = \frac{\rho_b A_b \omega^2}{E_b I_b} \qquad [3.10]$$

B_1, B_2, B_3 ve $B4$ katsayılarının bulunması için kirişin sınır şartlarından yararlanılır. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest kiriş için sınır şartları:

Ankastre uç : $y = 0$, ve $\frac{dy}{dx} = 0$

Serbest uç : $\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$, ve $\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} = 0$



Şekil 3.2. Bir ucu ankastre diğer ucu serbest kirişin şematik gösterimi

Sınır şartları genel çözümde yerine konur ve gerekli işlemler yapılırsa bir ucu serbest diğer ucu ankastre kiriş için karakteristik denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\cos(\lambda L).\cosh(\lambda L) + 1 = 0 \qquad [3.11]$$

Eş. 3.11'in kökleri $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \cdots, \lambda_i$,

$$\lambda_1 L = 1.875, \lambda_2 L = 4.694, \lambda_3 L = 7.855, \cdots, \lambda_i L \cong (i - \frac{1}{2})\pi \text{ , } i \geq 4$$

olarak bulunur. Karakteristik denklemin çözümünden elde edilen kökler ile her bir titreşim modunun doğal frekansı Eş. 3.12 kullanılarak elde edilir.

$$\omega_i = \sqrt{\frac{E_b I_b}{\rho_b A_b}} \lambda_i^2 \qquad [3.12]$$

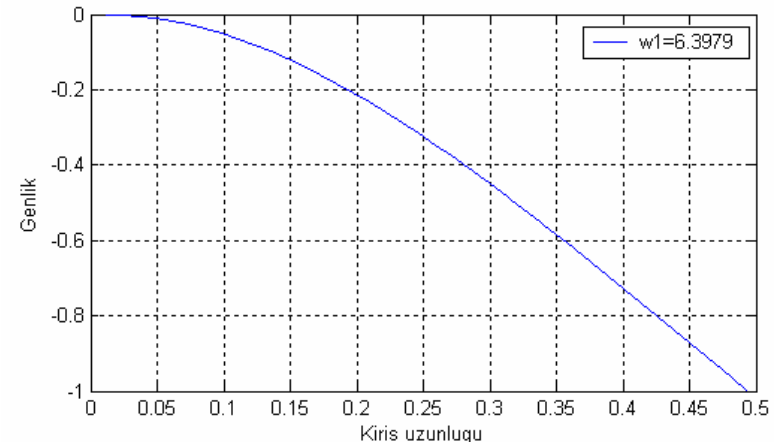
Ankastre kirişin i'nci mod şeklini veren mod şekil fonksiyonu tek bir sabit cinsinden,

$$\phi_i(x) = L(\cosh(\lambda_i x) - \cos(\lambda_i x) - k_i(\sinh(\lambda_i x) - \sin(\lambda_i x)) \qquad [3.13]$$

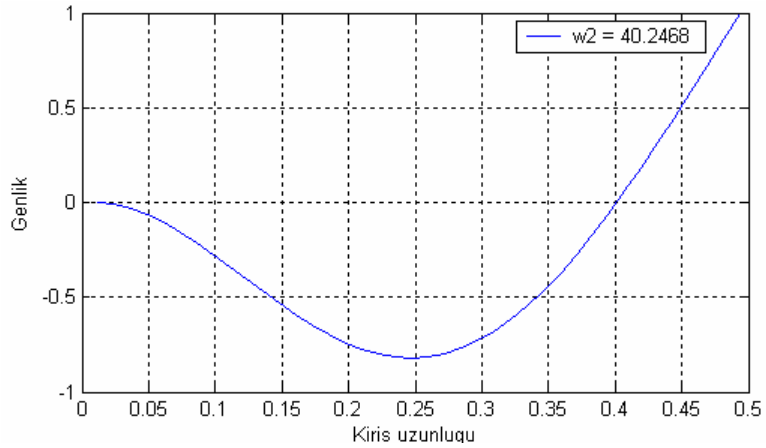
Burada,

$$k_i = \frac{\cosh(\lambda_i L) + \cos(\lambda_i L)}{\sinh(\lambda_i L) + \sin(\lambda_i L)} \qquad i = 1,2,\cdots,\infty \qquad [3.14]$$

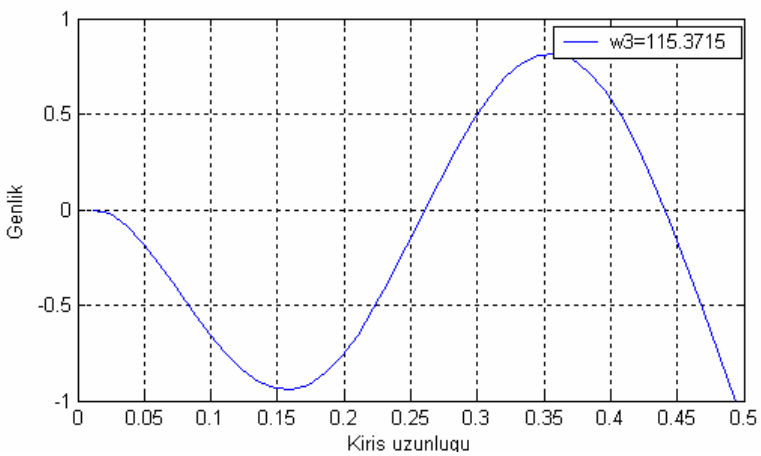
Bir ucu ankastre diğer ucu sabit kirişin ilk üç mod şekli Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3a. Esnek kirişin ilk mod şekli (Bu çalışmada ele alınan kiriş modeli için)



Şekil 3.3b. Esnek kirişin ikinci mod şekli (Bu çalışmada ele alınan kiriş modeli için)



Şekil 3.3c Esnek kirişin üçüncü mod şekli (Bu çalışmada ele alınan kiriş modeli için)

3.2 Esnek Kirişin Modal Modellenmesi

Bu bölümde esnek kirişin modal modelinin eldesi için enerji metodları kullanılmaktadır. PZT tahrik elemanlarının esnek kiriş modeli üzerindeki pasif ve aktif etkileri incelenmekte ve son olarak PZT tahrik elemanlı kirişin durum eşitlikleri türetilmektedir.

3.2.1 PZT'siz esnek kiriş

İnce uzun esnek kiriş için statik deformasyonlarda kirişin kayma deformasyonu ve dönme ataleti ihmal edilebilir. Bunlar ayrıca uzun ince esnek kirişlerin düşük frekans aralığındaki dinamik cevabında da göz ardı edilebilirler (41). Kayma modunun çok altındaki frekanslarda (20 faktörün altı için) kesme frekansı,

$$\omega_c = \left(\frac{K_b G_b}{\rho_b I_b} \right)^{1/2} \qquad [3.15]$$

Burada, K_b, G_b, I_b ve ρ_b sırasıyla kirişin kayma sabiti, kayma elastiklik modülü, kesit alanının atalet momenti ve kiriş malzemesinin yoğunluğudur. Bu çalışmada kullanılan kiriş için kesme frekansı $\omega_c = 12{,}5.10^6\ rad/s$ 'dir (40). Bahsedildiği gibi

$\omega_c / 20$'nin altındaki frekanslarda Euler-Bernoulli kiriş modelinin kullanımı uygundur. Bu çalışmada kirişin ilk iki ve üç titreşim modu ele alındığından üçüncü modun frekansı $\omega_c / 20$'nin altındadır ve Euler-Bernoulli kiriş modeli bu çalışma için uygun bir modeldir. Eş. 3.6 ile verilen Euler-Bernouli kiriş eşitliği zorlama içermemektedir. Dış zorlamalar $f(x,t)$ ile ifade edilirse zorlama içeren esnek kiriş için Euler-Bernoulli kiriş modeli aşağıdaki hali alır.

$$E_b I_b \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho_b A_b \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(x,t) \qquad [3.16]$$

Varsayılmış modlar metodu kullanılarak sürekli bir sistem olan kiriş denklemi sonsuz sayıdaki alt sisteme Taylor serisi yardımı ile açılırsa,

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \qquad [3.17]$$

Burada $\phi_i(x)$ ve $q_i(t)$, *i'nci* modun mod şekil fonksiyonu ve modal koordinatıdır. Esnek kirişin dinamik eşitliklerini elde etmek için enerji metotları kullanılırsa, sistemin kinetik enerjisi,

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} m_{ij}^b \dot{q}_i(t) \dot{q}_j(t) \qquad [3.18]$$

Burada kirişin simetrik kütle matrisi m_{ij}^b aşağıdaki gibi verilebilir.

$$m_{ij}^b = \int_0^L \rho_b A_b \phi_i(x) \phi_j(x) dx \qquad [3.19]$$

Burada L kirişin boyudur. Kirişin potansiyel enerjisi,

$$U_b = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} k_{ij}^b q_i(t) q_j(t) \qquad [3.20]$$

Buradaki simetrik esneklik matrisi k_{ij}^{b} aşağıdaki gibi verilir,

$$k_{ij}^{b} = \int_{0}^{L} E_b I_b \frac{d^2}{dx^2}\phi_i(x)\frac{d^2}{dx^2}\phi_j(x)dx \qquad [3.21]$$

Langrange eşitliğini kullanarak kirişin yatay titreşiminin modal eşitliği aşağıdaki gibi yazılır,

$$\sum_{j=1}^{\infty} m_{ij}^{b}\ddot{q}_j(t) + \sum_{j=1}^{\infty} k_{ij}^{b} q_j(t) = Q_i(t) \quad i = 1,2,...,\infty \qquad [3.22]$$

Burada $Q_i(t)$ genelleştirilmiş modal kuvvettir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q_i(t) = \int_{0}^{L} f(x,t)\phi_i(x)dx \qquad [3.23]$$

Bir ucu ankastre diğer ucu serbest kirişin mod şekilleri ile aşağıdaki ortogonal ilişkiler elde edilir,

$$\int_{0}^{L} \rho_b A_b \phi_i(x)\phi_j(x)dx = \begin{cases} 1 & i = j \quad \text{ise,} \\ 0 & i \neq j \quad \text{ise.} \end{cases}$$

$$\int_{0}^{L} \frac{d^2}{dx^2}\phi_i(x)\frac{d^2}{dx^2}\phi_j(x)dx = \frac{\lambda^4}{\rho_b A_b}\int_{0}^{L} \rho_b A_b \phi_i(x)\phi_j(x)dx \qquad [3.24]$$

Eş. 3.24 ile verilen ortogonal ilişkiler Eş. 3.23'e uygulanırsa,

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = Q_i(t) \qquad i = 1,2,...,\infty \qquad [3.25]$$

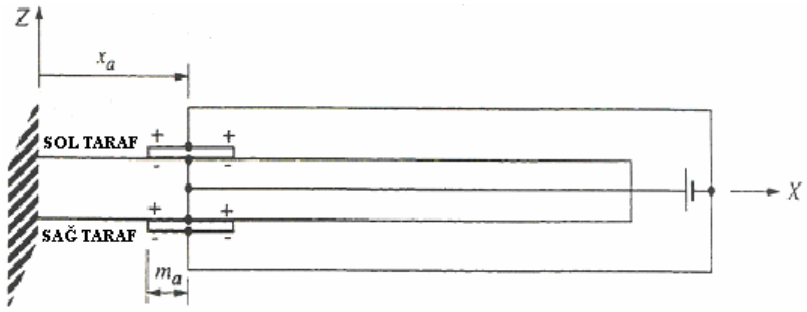
Sistemde doğal sönüm olduğu kabul edilirse sistem eşitliği aşağıdaki hali alır,

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = Q_i(t) \qquad i = 1,2,...,\infty \qquad [3.26]$$

Burada ξ_i, i'nci modun sönüm sabitidir.

3.2.2 PZT tahrik elemanlarının modellenmesi

Bir piezoelektrik malzemeye elektrik alan uygulandığında genişleme yada daralma hareketi gösterir. Esnek bir yapının üzerine yapıştırılan bir piezoelektrik elemana gerilim uygulandığında, bu özelliğinden dolayı esnek yapı üzerinde tahrik etkisi oluşturur. Bu bölümde PZT tahrik elemanlarının esnek yapının dinamik modeli üzerindeki etkisi incelenecektir. PZT tahrik elemanlarının modellenmesinde enerji metodu ile türetilen modal model ele alınacaktır. Esnek kiriş üzerinde her iki yüzeyine yapıştırılmış özdeş PZT tahrik elemanlarının şematik gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Esnek kiriş üzerindeki PZT konfigrasyonu

Kirişin eğilmesini sağlamak amacıyla PZT tahrik elemanları zıt polarite sağlanacak şekilde güç kaynağına bağlanır. Tahrik elemanları özdeş olduğundan ve her iki tarafa da simetrik yapıştırıldıklarından kirişin nötral ekseni değişmez. PZT tahrik elemanlarının modellenmesinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır,

- Piezoelektrik elemanlarda sıcaklığın yarattığı etkiler ihmal edilmiştir.
- PZT tahrik elemanını kirişe bağlamak için kullanılan yapıştırıcının kalınlığı ve esnekliği ihmal edilmiştir.
- PZT tahrik elemanlarının kirişe mükemmel şekilde yapıştığı kabul edilmiştir. Bu kabul ile PZT tahrik elemanı ile kiriş arasında bağıl bir hareket olmadığı ve böylelikle yapışma yüzeyinde kiriş ve PZT tahrik elemanlarının eşit gerinmeye sahip olduğu elde edilmektedir.

PZT'ler tarafından oluşturulan gerinme enerjisi esnek kirişin dinamik modeline modal kuvvetler ve esneklik olarak dahil edilebilir. V gerilimi altında kutuplaşan dikdörtgen yapılı PZT tahrik elemanında oluşan gerinim,

$$\Lambda = \frac{d_{31}}{t_a} V(t) \qquad [3.27]$$

Burada t_a ve d_{31a} sırasıyla PZT'nin kalınlığı ve gerinim sabitidir. PZT tahrik elemanı için toplam gerilim-gerinim ilişkisi,

$$\sigma_a = E_a\left[\varepsilon_a - \Lambda(x,y)\right] \qquad [3.28]$$

Burada E_a, ε_a, σ_a sırasıyla PZT'nin elastiklik modülü, gerinmesi ve gerilimidir. PZT'nin birim hacmi için sahip olduğu potansiyel enerji aşağıdaki gibi yazılır.

$$u_a = \int_0^{E_a} \sigma_a d\varepsilon_a \qquad [3.29]$$

Eş. 3.28, Eş. 3.29'da yerine konursa,

$$u_a = E_a\left[\frac{1}{2}\varepsilon_a^2 - \Lambda(x,y)\varepsilon_a\right] \qquad [3.30]$$

PZT'lerin sahip olduğu toplam potansiyel enerji,

$$U_a = 2\int_{x_a-m_a}^{x_a+m_a}\int_{t_b/2}^{-t_b/2}\int_{w_{a1}}^{w_{a2}} E_a\left[\frac{1}{2}\varepsilon_a^2 - \Lambda(x,y)\varepsilon_a\right] dydzdx \qquad [3.31]$$

Burada x_a ve m_a sırasıyla PZT'lerin x yönündeki orta noktasının pozisyonunu ve yarı boyunu, t_b ise kirişin kalınlığını belirtmektedir. w_{a1} ve w_{a2} PZT'nin y-ekseni

doğrultusundaki başlangıç ve bitiş noktalarının konumudur. Dikdörtgen kesit için $\psi(x)$ şekil fonksiyonu kullanılarak Eş. 3.31 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_a = 2\int_{x_a-m_a}^{x_a+m_a}\int_{t_b/2}^{-t_b/2} E_a w_a \left[\frac{1}{2}\varepsilon_a^2 - \Lambda(x,y)\varepsilon_a\right] dzdx \qquad [3.32]$$

PZT etkisinden dolayı oluşan ortalama gerinim,

$$\Lambda_a = \frac{d_{31}}{t_a}\psi(x)V(t) \qquad [3.33]$$

Daha önce bahsedildiği üzere yapılan mükemmel yapışma yaklaşımından dolayı yapışma yüzeyinde kiriş ile PZT'deki gerinim birbirine eşittir. Şekil 3.5'deki doğrusal gerinim dağılımı modelini kullanarak PZT'lerde oluşan gerinim aşağıdaki gibi bulunabilir,

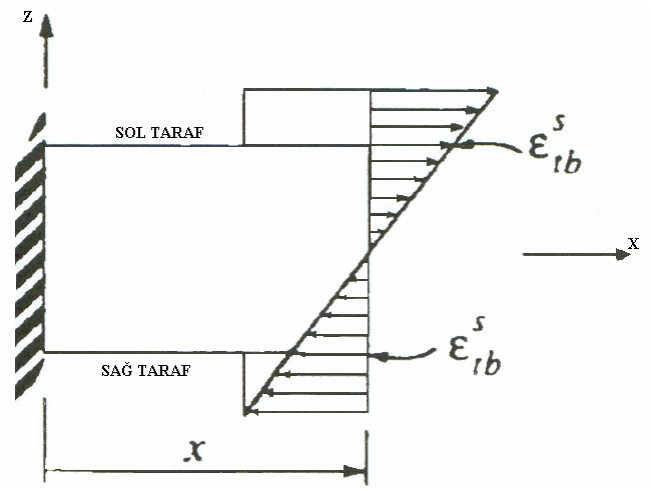
$$\varepsilon_a = \varepsilon_{tb}^s z(\frac{2}{t_b})sign(z); \qquad \frac{t_b}{2} \le |z| < \frac{t_b}{2} + t_a \qquad [3.34]$$

Burada ε_{tb}^s, PZT, diğer dış kuvvetler ve atalet kuvvetlerinin kiriş yüzeyi üzerinde oluşturduğu toplam gerinmedir. Toplam yüzey gerinimi Eş. 3.35 ile verilmektedir.

$$\varepsilon_{tb}^s = -\mathrm{sgn}(z)\frac{t_b}{2}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \qquad [3.35]$$

Eş. 3.35 kullanılarak kirişin sol yüzeyinde oluşan gerinme,

$$\varepsilon_{tb}^{ls} = -\frac{t_b}{2}\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \qquad [3.36]$$



Şekil 3.5. Doğrusal gerinim dağılımı gösterimi (Kaynak 40 esas alınarak yeniden çizilmiştir)

Son olarak Eş. 3.32 ve Eş. 3.3 kullanılarak PZT'lerin sahip olduğu toplam potansiyel enerji,

$$U_a = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}E_a w_a t_a t_b^2\right)\left(\frac{4}{3}\bar{t}^2 + 2\bar{t} + 1\right)\int_{x_z - m_a}^{x_z + m_a}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)^2 dx + \left(E_a w_a d_{31} t_b\right)(\bar{t} + 1)\int_{x_z - m_a}^{x_z + m_a}\psi\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}\right)V dx \quad [3.37]$$

Burada $\bar{t}$ kalınlık oranıdır ve aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\bar{t} = \frac{t_a}{t_b} \quad [3.38]$$

Modal açılımı kullanarak toplam potansiyel enerji aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$U_a = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty} q_i q_j k_{ij}^p - \sum_{i=1}^{\infty} Q_i q_i \quad [3.39]$$

PZT'lerin yarattığı modal esneklik k_{ij}^p ,

$$k_{ij}^p = \frac{1}{2}\left(E_a w_a t_a t_b^2\right)\left(\frac{4}{3}\bar{t}^2 + 2\bar{t} + 1\right)\int_{x_a - m_a}^{x_a + m_a}\left(\frac{d^2\phi_i}{dx^2}\right)\left(\frac{d\phi_j}{dx^2}\right)dx \quad [3.40]$$

PZT'lerin yarattığı modal kuvvet,

$$Q_i = C\left(\int_{x_a-m_a}^{x_a+m_a}\left(\frac{d^2\phi_i}{dx^2}\right)dx\right)V(x,t) \qquad [3.41]$$

Burada C sabiti kirişe ve PZT'lere bağlıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanır,

$$C = -(E_a w_a d_{31})(t_a + t_b)/\rho_b A_b L^3 \qquad [3.42]$$

PZT tahrik elemanları boyunca uygulanan gerilim sabittir. Bu sebeple PZT'ler tarafından uygulanan toplam modal kuvvet aşağıdaki şekilde yazılabilir,

$$Q_i = C\left[\phi_i'(x_1) - \phi_i'(x_2)\right]V(t) \qquad [3.43]$$

Burada ϕ_i' her bir titreşim modunun mod şekil fonksiyonunun x- konumuna gore türevini belirtmektedir.

3.2.3 Esnek kiriş modelinin durum değişkenleri formuna dönüştürülmesi

Denetçi tasarımında, sistem hareket denkleminin durum değişkenleri cinsinden ifade edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Eş. 3.43, Eş.3.2'da yerine konursa esnek kiriş sisteminin durum değişkenleri cinsinden modeli elde edilmiş olur.

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i\omega_i\dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = C\left[\phi_i'(x_1) - \phi_i'(x_2)\right]V(t), \qquad i = 1,2,\cdots,n \qquad [3.44]$$

Burada n titreşim modunu belirtmektedir.

Eş. 3.44 her bir titreşim modunu belirleyen adi diferansiyel denklemdir. Bu eşitlik, durum değişkenleri cinsinden matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_{2i-1} \\ \dot{q}_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -\omega_1^2 & -2\xi_1\omega_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & -\omega_i^2 & -2\xi_i\omega_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_{2i-1} \\ q_{2i} \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_1'(x_1) - \phi_1'(x_2) \\ \vdots \\ 0 \\ \phi_i'(x_1) - \phi_i'(x_2) \end{bmatrix} V(t) \qquad [3.45]$$

Görüldüğü üzere, elde edilen model, doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem modelidir. Bu model kullanılarak, Bölüm 4'de sistemin ilk iki ve üç titreşim modlarının baskılanması amacıyla KKD tasarlanmakta bilgisayar benzetimi yapılmakta, Bölüm 5'te ise ilk iki modun baskılanması amacıyla esnek kiriş sistemine uygulanmaktadır.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu çalışmada kullanılan esnek kiriş sisteminin hareket denklemleri Euler-Bernoulli yaklaşımı ve varsayılmış modlar yöntemi kullanılarak Eş. 3.45 gibi elde edilebilir. Eş. 3.45 esnek kiriş sisteminin i'nci moda kadar titreşim dinamiğini vermektedir. Bu bölümde, model olarak seçilen esnek kirişin ilk 2 ve ilk 3 modu dikkate alınarak denetim algoritması tasarlanmaktadır. Tasarım süreci şöyle özetlenebilir;

- Eş. 3.45 kullanılarak esnek kirişin i'nci moduna kadar (i=1,2,3) durum denklemlerinin elde edilmesi,
- Ölçülebilen durum (kirişin uç nokta deplasmanı) değeri kullanılarak, (sistemin kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik testinden sonra) uygun gözlemci tasarımı ve tasarlanan gözlemci vasıtasıyla sistemin durum değişkenlerinin elde edilmesi,
- Titreşimin aktif kontrolu için kayan kipli denetçi tasarımı ve sistem modeline uygulanması.

Bu çalışmada kullanılan kiriş modeline ait parametreler Çizelge 4.1 ile verilmektedir.

Çizelge 4.1. Esnek kiriş sisteminin parametreleri

Parametre	Değer
Kiriş uzunluğu, L	0,5 m
Kiriş genişliği, w_b	0,051 m
Kiriş kalınlığı, t_b	0,002 m
Kiriş yoğunluğu, ρ_b	2,480 kg/m^3
Kiriş elastiklik modülü, E_b	70x10^9 N/m^2
Piezo pozisyonu, l_1	0,026 m
Piezo pozisyonu, l_2	0,076 m
Şarj sabiti, d_{31}	-200x10^{-12} m/V
Piezo elastiklik modülü, E_a	60x10^9 N/m^2
Piezo genişliği, w_a	0,051 m
Piezo kalınlığı, t_a	6,1x10^{-4} m

Eş. 3.12 kullanılarak esnek kiriş sisteminin ilk üç modu için doğal frekansları $\omega_1 = 6{,}57\,Hz$, $\omega_2 = 41{,}2\,Hz$, $\omega_3 = 115{,}31\,Hz$ olarak hesaplanmıştır. Sistemin sönüm

katsayıları ise deneysel olarak belirlenebileceği gibi, benzer kiriş parametrelerine sahip değerler de kullanılabilir. Bu çalışmada, benzer yapıya sahip esnek sistemin sönüm katsayıları $\xi_i = 0{,}07$ (i=1,2,3) olarak kullanılmıştır (3). Sistem modelinin elde edilmesi için yazılan MATLAB programı EK-1'de verilmektedir.

4.1 Kirişin İlk İki Titreşim Modunun Modellenmesi ve Kontrolu

Eş. 3.45 ve sistemin yukarıda hesaplanan doğal frekansları ile sönüm katsayıları kullanılarak, kirişin ilk iki titreşim modu için elde edilen modeli Eş. 4.1 ile verilebilir.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1705{,}14 & -0{,}578 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -66976{,}58 & -3{,}623 \end{bmatrix} q + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}14 \\ 0 \\ 0{,}52 \end{bmatrix} u$$

$$y = [0{,}9879 \quad 0 \quad -0{,}9879 \quad 0]\, q \qquad [4.1]$$

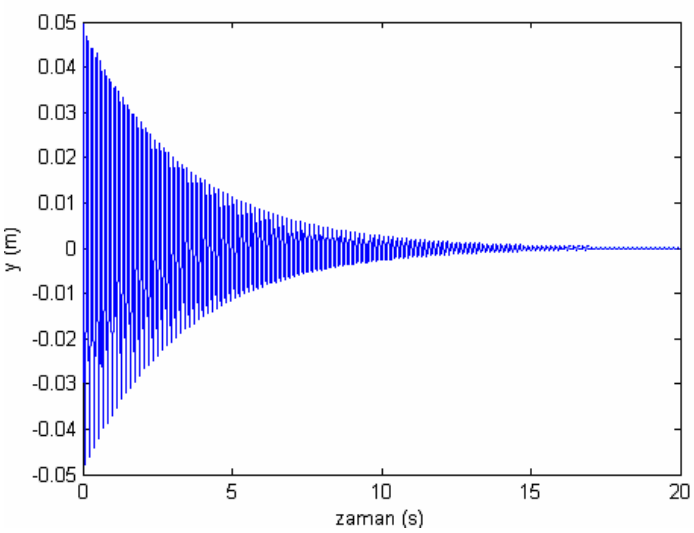
Burada, $q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4]^T$ esnek kirişin durum değişkenlerini (modal koordinatlar cinsinden), u PZT tahrik elemanlarına uygulanan elektrik gerilimini (kontrol girişi), y ise kirişin uç noktasının deplasmanını ifade etmektedir. Sisteme gözlemci ve denetçi tasarımı yapılabilmesi için öncelikle sistemin kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik testinin yapılması gerekmektedir. Sistemin kontrol edilebilirlik matrisi; $[B: \quad AB: \quad A^2B: \quad A^3B]$ incelendiğinde,

$$rank([B: \quad AB: \quad A^2B: \quad A^3B]) = 4 \qquad [4.2]$$

Sistemin gözlenebilirlik matrisi; $[C: \quad AC: \quad A^2C: \quad A^3C]$ incelendiğinde,

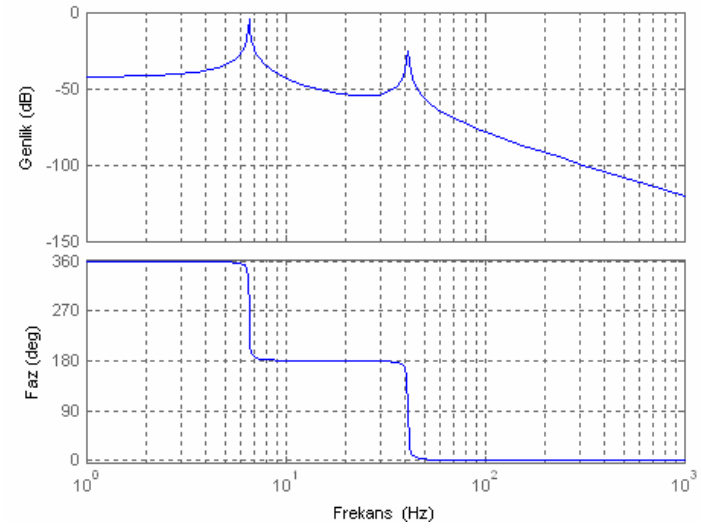
$$rank([C: \quad AC: \quad A^2C: \quad A^3C]) = 4 \qquad [4.3]$$

Olarak elde edilir. Buda sistemin kontrol edilebilir ve tamamen gözlenebilir olduğunu göstermektedir. Sistemin 5 cm için serbest haldeki cevabı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. İlk iki titreşim modu modeli için sistemin serbest cevabı

Sistemin serbest haldeki frekans cevabı ise Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Kirişin ilk iki mod frekans cevabı

Kayan kipli denetçi tasarımını kolaylaştırmak için, Bölüm 2'de ifade edildiği üzere sistemde $z = Tq$ koordinat dönüşümü yapılmaktadır. Burada amaç sistemi kontrol girişi olan ve olmayan iki alt kısma bölmektir. Sistem modelini Eş. 2.21 ile verilen sisteme dönüştürmek için seçilen dönüşüm matrisi,

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0{,}52 & 4 & -0{,}14 \\ 2 & 0{,}52 & 1 & -0{,}14 \\ 1 & 1{,}04 & 2 & -0{,}28 \\ 4 & 1 & 2 & -0{,}25 \end{bmatrix} \qquad [4.4]$$

Sistem, yeni koordinatlarda Eş. 4.5'teki gibi gösterilir.

$$\dot{z} = 10^5 \begin{bmatrix} 3{,}1095 & -1{,}6925 & -0{,}7087 & 0{,}0244 \\ 3{,}1104 & -1{,}6890 & -0{,}7109 & 0{,}0230 \\ 6{,}2211 & -3{,}3770 & -1{,}4225 & 0{,}0455 \\ 0{,}0545 & -0{,}0348 & -0{,}0099 & 0{,}0020 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} -0{,}3293 & 0{,}7684 & -0{,}2195 & 0 \end{bmatrix} z \qquad [4.5]$$

4.1.1 Gözlemci tasarımı

Esnek sistemin ilk iki titreşim modu için elde edilmiş modeline gözlemci tasarımı Bölüm 2.4'teki gibi yapılır. Gözlemci kutuplarının seçimini kolaylaştırmak için Eş. 4.6 ile verilen karakteristik denklemden faydalanılmıştır (39). Bu karakteristik denklemin özelliği, sistem kutuplarının ITAE performans endeksine göre optimum olarak belirlenebilmesidir.

$$s^4 + 1{,}21 w s^3 + 3{,}4 w^2 s^2 + 2{,}7 w^3 s + w^4 = 0 \qquad [4.6]$$

Eş. 4.5 ile verilen sistem için gözlemci kutupları, Eş. 4.6 ile verilen karakteristik denklemde, w katsayısı değiştirilmesinden elde edilen denklem kökleridir. Başka bir ifade ile, seçilen w parametresi ile elde edilen karakteristik denklemin kökleri gözlemci sistemin kutuplarının olması istenen yerlerini belirtmektedir. Burada ayrıca gözlemci sistemin kutuplarının farklı seçilmesi durumunda elde edilecek gözlemci kazanç matrislerinin, gözlemci sistemin performansına etkisinin gösterilmesi açısından MATLAB yazılımı kullanılarak 4 farklı deneme yapılmıştır. Sisteme gözlemci tasarımı yapılırken ayrıca ölçüm gürültüsünün ölçüm değerine 0.01

oranında etki ettiği göz önünde bulundurulmuştur. Aşağıda bu denemeler sonucunda elde edilen gözlemci sistemler ve performansları verilmiştir.

Deneme 1:

$w = 10$, (tasarım parametresi, program girdisi)

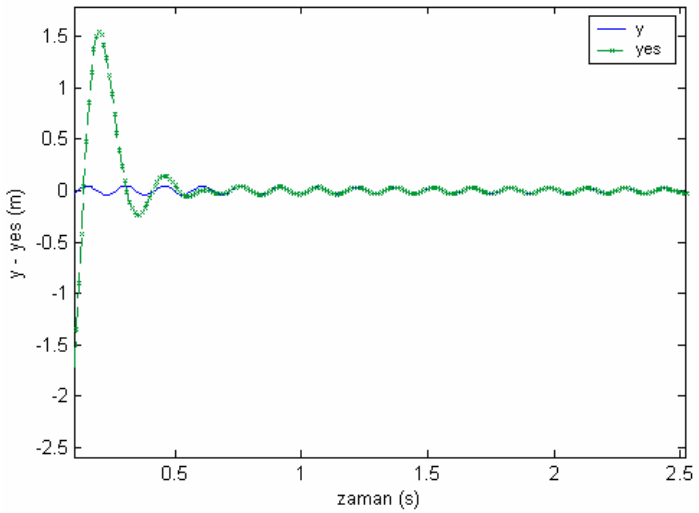
$r = \left[-8{,}4796 \pm 25{,}2598i \quad -12{,}5204 \pm 8{,}2828\,i\right]$, (Eş. 4.6'nın kutupları)

$L = 10^6\left[-0{,}956 \quad -0{,}9559 \quad -1{,}9118 \quad 0{,}0171\right]^T$, (Eş. 2.66'den elde edilmektedir)

seçildiğinde, Eş. 2.66 kullanılarak gözlemci sistemin denklemi Eş. 4.7'deki gibi elde edilir. Gözlemcinin cevabı Şekil 4.3'de verilmiştir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^6\begin{bmatrix} -0{,}0039 & 0{,}5653 & -0{,}2807 & 0{,}0024 \\ -0{,}0037 & 0{,}5656 & -0{,}2809 & 0{,}0023 \\ -0{,}0074 & 1{,}1312 & -0{,}5619 & 0{,}0046 \\ -0{,}0002 & 0{,}0097 & -0{,}0048 & 0{,}0002 \end{bmatrix}\hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}u + 10^6\begin{bmatrix} -0{,}9560 \\ -0{,}9559 \\ -1{,}9118 \\ -0{,}0171 \end{bmatrix}y \qquad [4.7]$$

$$y_{es} = \left[-0{,}3293 \quad 0{,}7684 \quad -0{,}2195 \quad 0\right]\hat{z}$$



Şekil 4.3. $w = 10$ seçildiği durum için gözlemci cevabı

Şekil 4.3'den, gözlemci sistemin performansı tatmin edici olmadığı görülmektedir. İlk anda gözlemci sistem fazla bir artış göstermiştir. Bu da diğer durum değişkenlerinin ilk anda doğru tahmin edilemediğini göstermektedir.

Deneme 2:

$w = 30$,

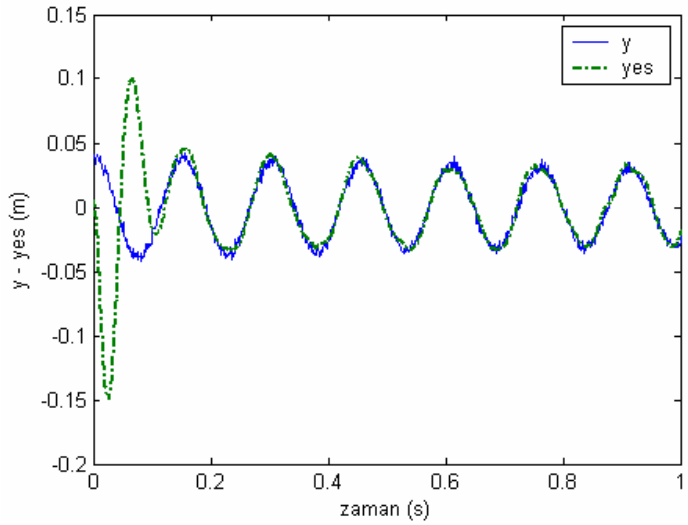
$r = \left[-25{,}4389 \pm 75{,}7795i \quad -37{,}5611 \pm 24{,}8483i \right]$,

$L = 10^6 \left[-0{,}8106 \quad -0{,}8102 \quad -1{,}6205 \quad -0{,}0147 \right]^T$,

seçildiğinde, benzer şekilde gözlemci sistemin eşitliği aşağıdaki gibi verilebilir. Bu durumda, gözlemcinin cevabı Şekil 4.4'de verilmiştir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^5 \begin{bmatrix} 0{,}4402 & 4{,}5358 & -2{,}4883 & 0{,}0244 \\ 0{,}4423 & 4{,}5365 & -2{,}4897 & 0{,}0230 \\ 0{,}8849 & 9{,}0742 & -4{,}9800 & 0{,}0455 \\ 0{,}0061 & 0{,}0780 & -0{,}0421 & 0{,}0020 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^6 \begin{bmatrix} -0{,}8106 \\ -0{,}8102 \\ -1{,}6205 \\ -0{,}0147 \end{bmatrix} y \qquad [4.8]$$

$$y_{es} = \left[-0{,}3293 \quad 0{,}7684 \quad -0{,}2195 \quad 0 \right] \hat{z}$$



Şekil 4.4. $w = 30$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı.

Şekil 4.4'de görülmektedir ki gözlemci sistemin performansı hala tatmin edici değildir. İlk anda gözlemci sistemden elde edilen çıkışın gerçek çıkışa nazaran aşmalar gösterdiği görülmektedir. Bu da diğer durum değişkenlerinin ilk anda doğru tahmin edilemediğini göstermektedir.

Deneme 3:

$$w = 50$$

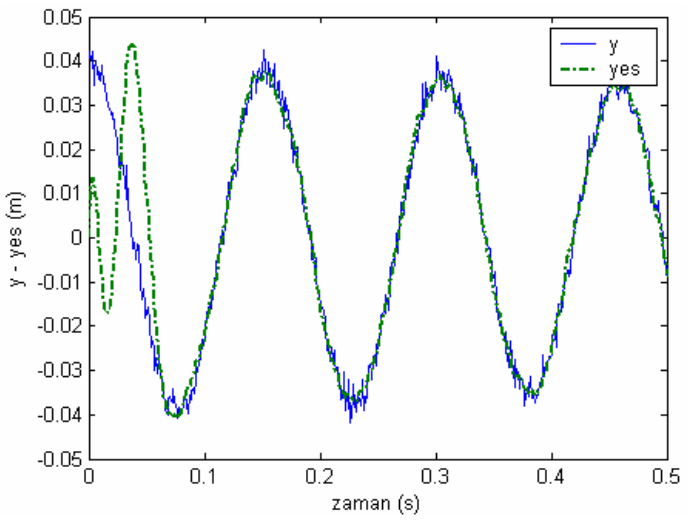
$$r = \left[-42{,}40 \pm 126{,}30i \quad -62{,}60 \pm 41{,}41i\right]$$

$$L = 10^5\left[-4{,}7851 \quad -4{,}7795 \quad -9{,}5602 \quad -0{,}0868\right]^T$$

seçildiğinde, gözlemci sistem Eş. 4.9 ile verilir. Gözlemcinin cevabı ise Şekil 4.5'te verilmiştir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^5\begin{bmatrix} 1{,}5337 & 1{,}9842 & -1{,}7592 & 0{,}0244 \\ 1{,}5365 & 1{,}9834 & -1{,}7602 & 0{,}0230 \\ 3{,}0729 & 3{,}9687 & -3{,}5213 & 0{,}0455 \\ 0{,}0259 & 0{,}0319 & -0{,}0289 & 0{,}0020 \end{bmatrix}\hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}u + 10^5\begin{bmatrix} -4{,}7851 \\ -4{,}7795 \\ -9{,}5602 \\ -0{,}0868 \end{bmatrix}y \qquad [4.9]$$

$$y_{es} = \left[-0{,}3293 \quad 0{,}7684 \quad -0{,}2195 \quad 0\right]\hat{z}$$



Şekil 4.5. $w = 50$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı

Deneme 4:

$$w = 80$$

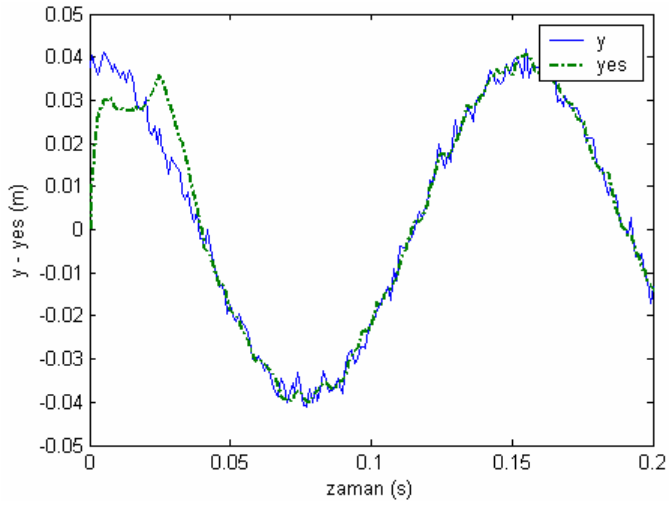
$$r = \left[-67{,}84 \pm 202{,}08i \quad -100{,}16 \pm 66{,}26i\right]$$

$$L = 10^5\left[5{,}374 \quad 5{,}381 \quad 10{,}758 \quad 0{,}105\right]^T$$

seçildiğinde, gözlemci sistem dinamiği Eş. 4.10 ile ifade edilebilir. Bu durumda elde edilen gözlemci cevabı ise Şekil 4.6'da verilmiştir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^6 \begin{bmatrix} 0{,}4879 & -0{,}5822 & 0{,}0471 & 0{,}00244 \\ 0{,}4882 & -0{,}5824 & 0{,}0470 & 0{,}00230 \\ 0{,}9764 & -1{,}1643 & 0{,}0939 & 0{,}00455 \\ 0{,}0089 & -0{,}0115 & 0{,}0013 & 0{,}00020 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^5 \begin{bmatrix} 5{,}374 \\ 5{,}381 \\ 10{,}758 \\ 0{,}105 \end{bmatrix} y$$

$$y_{es} = \begin{bmatrix} -0{,}3293 & 0{,}7684 & -0{,}2195 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} \qquad [4.10]$$



Şekil 4.6. $w = 80$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı

Deneme 4 ile elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, tasarlanan gözlemcinin sistem cevabını çok kısa bir sürede küçük bir aşma ile yakalayabildiği görülmektedir. Diğer yandan, ölçüm gürültüsünün etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Gözlemci kazancının arttırılması, sistem durum değişkenlerinin tahmin süresini kısaltırken, ölçüm gürültüsünden dolayı tahmin değerlerinin önemli sayılabilecek derecede yanlış elde edilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, gözlemci kazanç katsayısının hem ölçüm gürültüsü etkisini arttırmayacak hem de durum değişkenlerinin kısa sürede tahmin edilmesini sağlayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir.

Yukarıdaki benzetim sonuçlarından, 4'üncü denemede sistemin durum değişkenlerinin ölçüm gürültüsünün etkisini attırmadan en kısa sürede elde

edilebildiği görülmektedir. Gözlemciden elde edilen bu veriler kullanılarak, bir sonraki aşamada kayan kipli denetçi tasarımı gerçekleştirilmektedir.

4.1.2 Denetçi tasarımı

Gözlemciden elde edilen veriler kullanılarak belirlenen durum değişkenleri, hem kayma yüzeyi eğiminin belirlenmesinde hem de kayan kipli denetçi tasarımında kullanılmaktadır. KKD tasarımında kullanılacak sistem modeli Eş. 4.5 ile verilmiştir. KKD tasarımında; sistemde modelleme hatalarından kaynaklanan (uyum koşulu tipi) belirsizliklerin olduğu ve belirsizlik olmadığı iki ayrı durum dikkate alınmıştır. Belirsizlik içeren sistem modelinde, titreşimin doğal frekansları ve sönüm oranlarının belli bir aralıkta olacağı varsayılarak elde edilen belirsizlik bandı sistem modeline dahil edilmiştir. İlk iki titreşim modunun kontrolu için yazılmış MATLAB programı EK-2'de verilmiştir.

KKD tasarım sürecinde ilk aşama olan kayma yüzeyi tasarımı, Eş. 4.5 ile verilen sistem için Bölüm 2.1.2'deki gibi yapılabilir. Kayma yüzeyi eğiminin seçimi için Eş. 4.5 ile verilen sistem; kontrol girişinin olduğu ve olmadığı iki alt sistem olarak verilebilir.

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= 10^5 \begin{bmatrix} 3{,}1095 & -1{,}6925 & -0{,}7087 \\ 3{,}1104 & -1{,}6890 & -0{,}7109 \\ 6{,}2211 & -3{,}3770 & -1{,}4225 \end{bmatrix} z_1 + 10^5 \begin{bmatrix} 0{,}0244 \\ 0{,}0230 \\ 0{,}0455 \end{bmatrix} z_2 \\ \dot{z}_2 &= 10^5 \begin{bmatrix} 0{,}0545 & -0{,}0348 & -0{,}00099 \end{bmatrix} z_1 + 10^5 \begin{bmatrix} 0{,}0020 \end{bmatrix} z_2 + u \end{aligned} \qquad [4.11]$$

z_1 olarak verilen indirgenmiş sistemin öz değerleri $r_{ind} = [-5 \pm 175i \quad -20]$ olarak seçilirse, kayma yüzeyi fonksiyonu Eş. 4.12'deki gibi elde edilir.

$$\sigma(z) = \begin{bmatrix} -0{,}5361 & -2{,}0695 & 1{,}2935 & 1 \end{bmatrix} z \qquad [4.12]$$

Kayma yüzey denklemi, modal koordinat takımında aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma(q) = \begin{bmatrix} -14{,}7596 & -56{,}6832 & 35{,}4801 & 23{,}0275 \end{bmatrix} q \qquad [4.13]$$

Elde edilen kayma yüzeyi kullanılarak hesaplanan eşdeğerleyen denetçi, yeni koordinat takımında;

$$u_{eq} = \begin{bmatrix} 254{,}9466 & 19{,}8558 & -137{,}1589 & -25{,}7987 \end{bmatrix} z \qquad [4.14]$$

Modal koordinat takımında;

$$u_{eq} = \begin{bmatrix} 656{,}4 & 2780{,}4 & -1708{,}0 & -1063{,}6 \end{bmatrix} x \qquad [4.15]$$

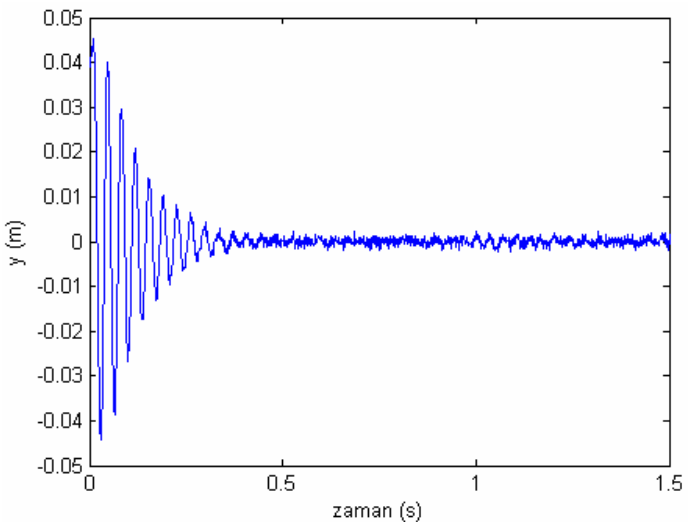
İle verilebilir. Eşdeğerleyen denetçinin görevi; sistem yörüngeleri kayma yüzeyi üzerinde değilse, bunu kayma yüzeyine yönlendirmektir. Kayam yüzeyine ulaştıktan sonra, sistem yörüngelerini kayma yüzeyi üzerinde tutmak için ise yüksek frekanslı denetçi kullanılır. Eş. 4.5 ile verilen sistem için yüksek frekanslı denetçi;

$$u_n = -k\, sign(\sigma) \qquad [4.16]$$

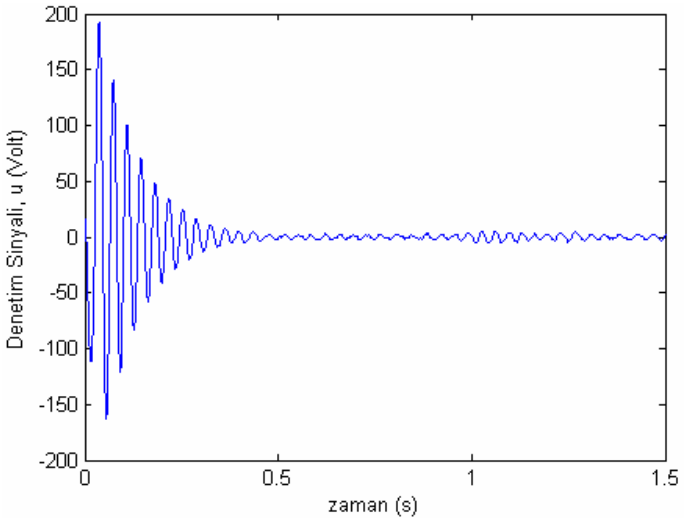
Burada k, küçük sabit bir sayıdır ve bu çalışma için $k = 0{,}5$ olarak seçilmiştir. $sign(\sigma)$ ise kayma yüzeyinin işaret fonksiyonudur. Böylelikle, sisteme uygulanan toplam denetim Eş.4.17 ile verilebilir.

$$u = u_{eq} + u_n \qquad [4.17]$$

Tasarlanan denetçi Eş. 4.1 ile verilen modele 5 cm'lik ilk deplasman verilerek uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı Şekil 4.7'de görüldüğü gibi olur. Kirişe uygulanan denetçi sinyali Şekil 4.8'de, tasarlanan kayma yüzeyinin zamanla değişimi ise Şekil 4.9 ile verilmiştir.

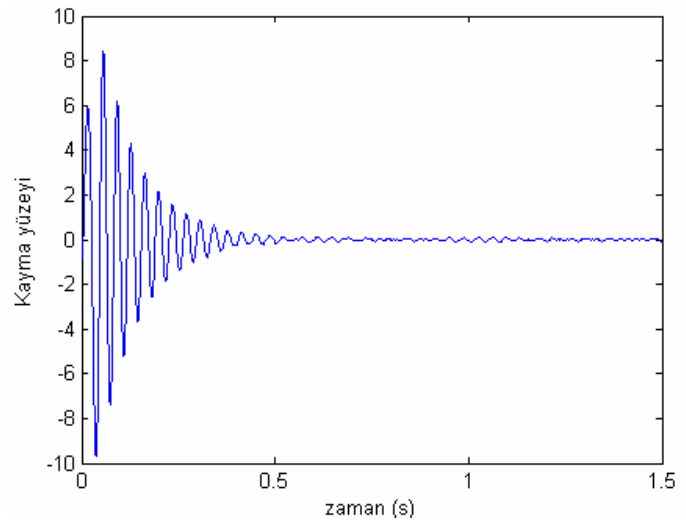


Şekil 4.7. İlk iki mod için sistemin denetim uygulanmış deplasmanı



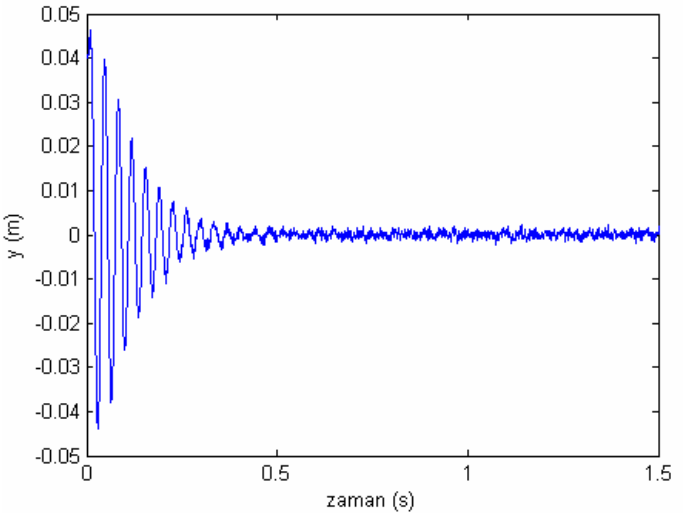
Şekil 4.8. İlk iki mod için kirişe uygulanan denetim sinyali

Benzetim sonuçlarında, kontrol girişinde her hangi bir sınırlamanın olmadığı varsayılmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda sisteme uygulanacak olan denetim sinyali ±150 V ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, denetim sinyalindeki sınırlamanın etkisini benzetim sonuçlarında da görebilmek amacıyla, sisteme uygulanan denetçi sinyali ±150 V'ta sınırlanırılarak benzetim sonuçları yinelenmiştir. Denetim sinyalindeki sınırlamanın sistem kararlılığı ve performansı üzerindeki etkisi (42-44)'da incelenmiştir.

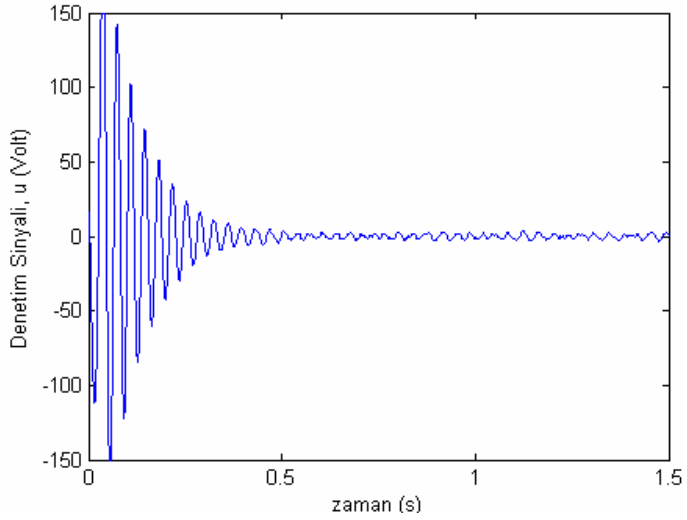


Şekil 4.9. İlk iki mod için sisteme tasarlanan kayma yüzeyi $\sigma(x)$

Sınırlandırılmış denetim girişi kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçları Şekil 4.10 ve 4.11'de verilmektedir. Görüldüğü üzere, denetim sinyali ±150 V ile sınırlandırıldığında, performansta neredeyse herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Bunun temel sebebi ise, sınırlamanın çok kısa zaman aralığında yapılmış olmasıdır.



Şekil 4.10. İlk iki mod için denetçi sınırlaması uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı



Şekil 4.11. İlk iki mod için sınırlama uygulanmış denetim sinyali

Sistem parametrelerinde belirsizlik olduğu varsayılır ise, sistemi kontrol etmek için tasarlanan denetçide bazı değişiklikler yapılması gerekir. Sistem parametreleri olan doğal frekanslar ve sönüm oranlarına belirsizlik eklenmesi durumunda sistem modeli aşağıdaki gibi alınabilir. Sistemdeki belirsizlik, uyum koşulu tipi belirsizliktir. Belirsizliklerin tam olarak değeri bilinmemekte fakat alt ve üst sınırlarının bilindiği kabul edilmektedir. Esnek kiriş sisteminin her bir modunun doğal frekansında %2'lik ve sönüm oranında ise %0.1'lik belirsizlik olduğu göz önünde bulunarak elde edilen dönüştürülmüş model Eş. 4.18'deki gibi verilmiştir.

$$\dot{z} = 10^5 \begin{bmatrix} 3{,}1095 & -1{,}6925 & -0{,}7087 & 0{,}0244 \\ 3{,}1104 & -1{,}6890 & -0{,}7109 & 0{,}0230 \\ 6{,}2211 & -3{,}3770 & -1{,}4225 & 0{,}0455 \\ 0{,}0545+\Delta_1 & -0{,}0348+\Delta_2 & -0{,}0099+\Delta_3 & 0{,}0020+\Delta_4 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \qquad [4.18]$$

$$y = \begin{bmatrix} -0{,}3293 & 0{,}7684 & -0{,}2195 & 0 \end{bmatrix} z$$

Burada belirsizliklerin sınırları, $-5.10^{-8} < \Delta_1 < 5.10^{-8}$, $-5.10^{-8} < \Delta_2 < 5.10^{-8}$, $-2.10^{-8} < \Delta_3 < 2.10^{-8}$, $-4.10^{-8} < \Delta_4 < 4.10^{-8}$ olarak elde edilmiştir. Belirsizlik içeren sistemler için KKD tasarımında, kayma yüzeyi tasarımı ve eşdeğerleyen denetçi tasarımı belirsizlik içermeyen sistemler ile aynıdır. Belirsizlikler yüksek

frekanslı denetçinin tasarımında göz önünde bulundurulur ve yüksek frekanslı denetçi katsayısı seçimi Bölüm 2.1.3'teki gibi yapılır. Eş. 4.18 ile verilen belirsizlik içeren esnek kiriş modeli için kayma yüzeyi,

$$\sigma(q) = \begin{bmatrix} -14{,}7596 & -56{,}6832 & 35{,}4801 & 23{,}0275 \end{bmatrix} q \qquad [4.19]$$

Sistem için tasarlanan eşdeğerleyen denetçi ise,

$$u_{eq} = \begin{bmatrix} 656{,}4 & 2780{,}4 & -1708{,}0 & -1063{,}6 \end{bmatrix} q \qquad [4.20]$$

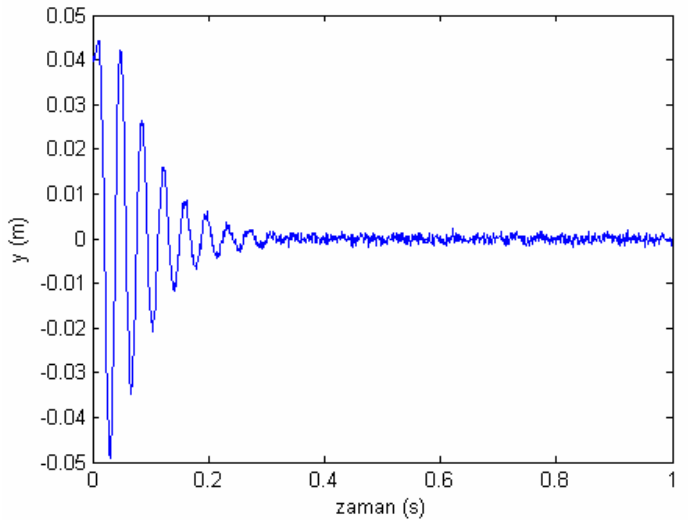
Yüksek frekanslı denetçi ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$u_n = -\rho(q,t)\, sign(\sigma) \qquad [4.21]$$

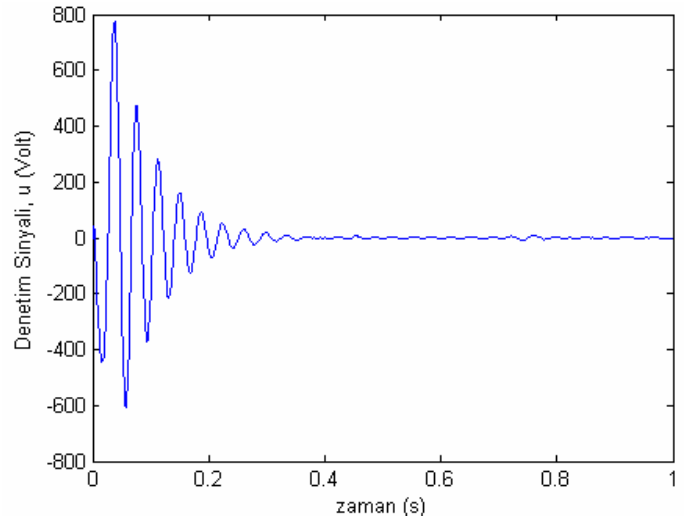
Burada,

$$\rho(q,t) = \begin{bmatrix} 0{,}0005 & 0{,}0005 & 0{,}0002 & 0{,}0004 \end{bmatrix} T^{-1} |q| \qquad [4.22]$$

Sisteme uygulanan toplam denetim eşdeğerleyen denetçi ve yüksek frekanslı denetçinin toplamından oluşur. Belirsizlik içeren sistem için tasarlanan denetçi sisteme uygulandığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.12'de, sisteme uygulanan denetim sinyali ise Şekil 4.13'de verilmiştir.

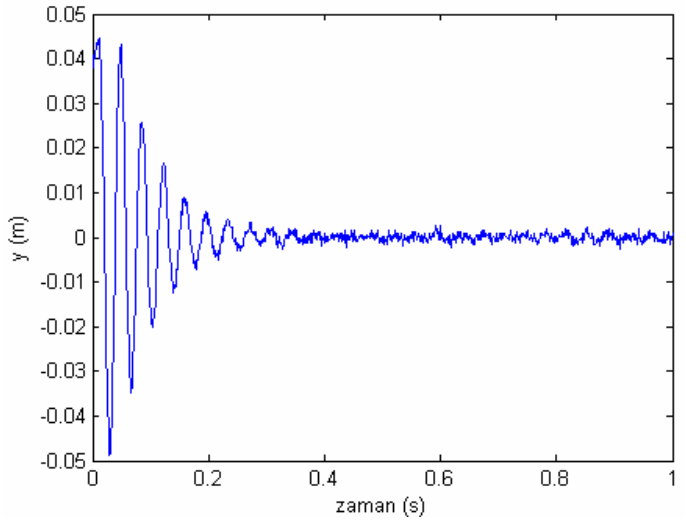


Şekil 4.12. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme tasarlanan denetçi uygulandığında sistemin cevabı

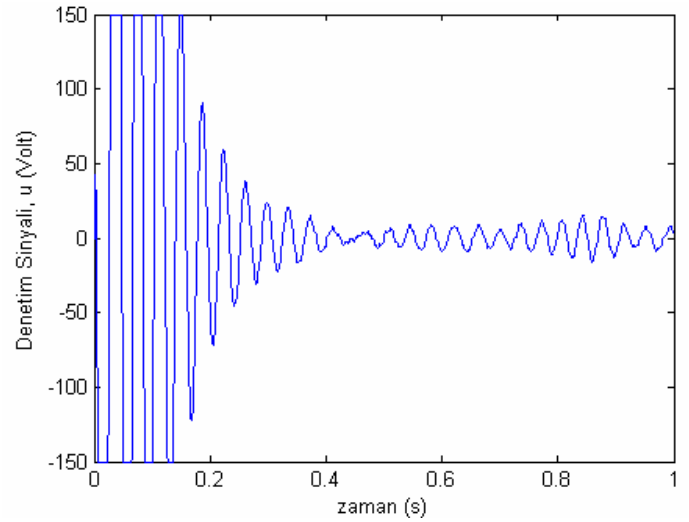


Şekil 4.13. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan denetim sinyali

Daha öncede belirtildiği gibi sisteme uygulanan gerilim ±150 V ile sınırlanmış olduğundan benzetim çalışmalarında da bu göz önünde bulundurulursa elde edilen esnek kirişin uç noktasının deplasmanı Şekil 4.14'deki gibi olur. Sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali ise Şekil 4.15 ile verilmiştir. Görüldüğü üzere, sistemdeki belirsizliklere rağmen KKD, esnek kiriş sistemindeki titreşimi aktif bir şekilde baskılayabilmektedir.

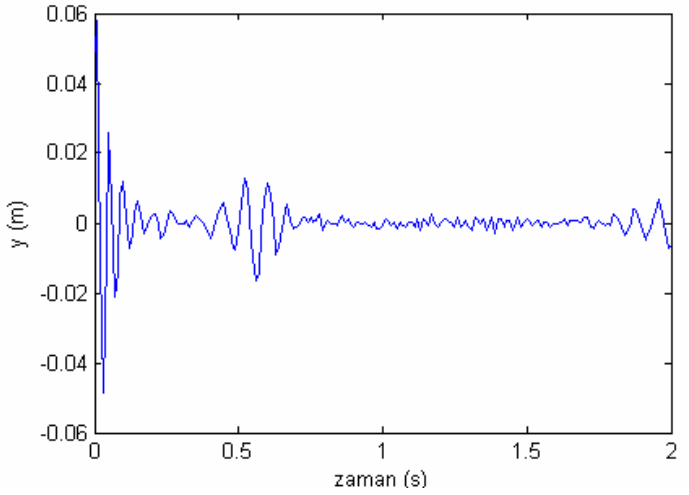


Şekil 4.14. İlk iki mod için sınırlanmış denetim sinyali uygulandığında sistem cevabı



Şekil 4.15. İlk iki mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali

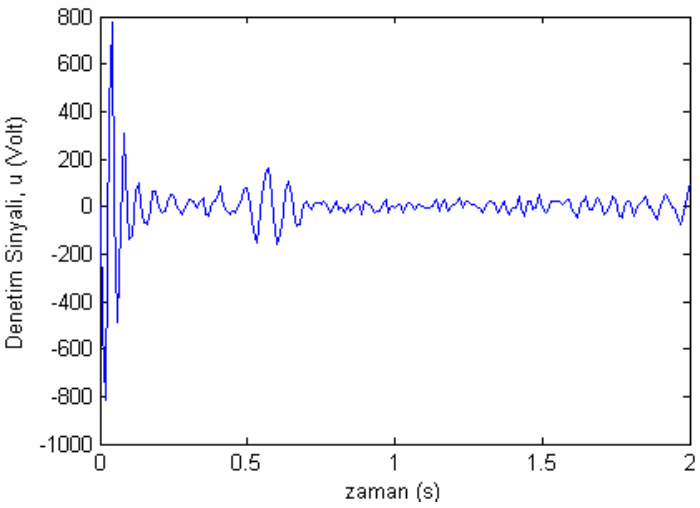
Yukarıda yapılan benzetimlerde denetçi belirsizlik içeren sistem için belirsizlik sınırları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Sistem parametrelerindeki belirsizlikler dikkate alınmadığı durum için tasarlanan denetçi belirsizlik içeren sisteme uygulandığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.16'da verilmektedir.



Şekil 4.16. İlk iki mod için belirsizlik içeren sistemin belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan denetçi uygulandığında cevabı

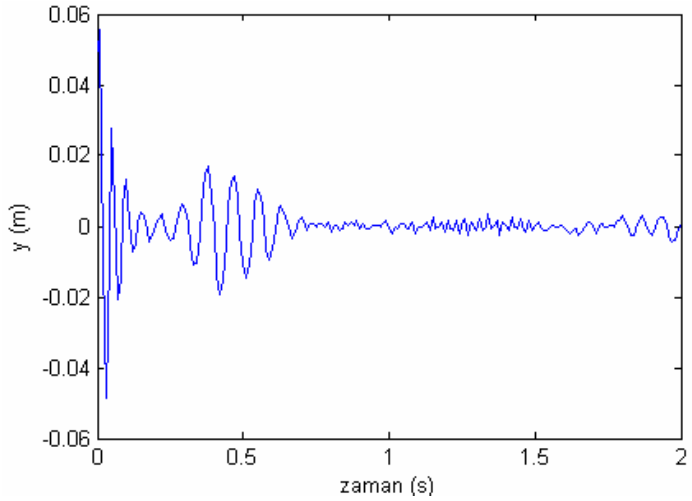
Şekil 4.16'da kiriş. uç noktasının deplasmanının sıfıra gitmediği görülmektedir. Bunun sebebi sistemdeki belirsizliklerin dikkate alınmamış olmasıdır. Sisteme

uygulanan denetçi girişi ise Şekil 4.17'de verilmiştir. Yine aynı şekilde denetçi sinyalinin de sıfıra ulaşmadığı şekilden görülmektedir.

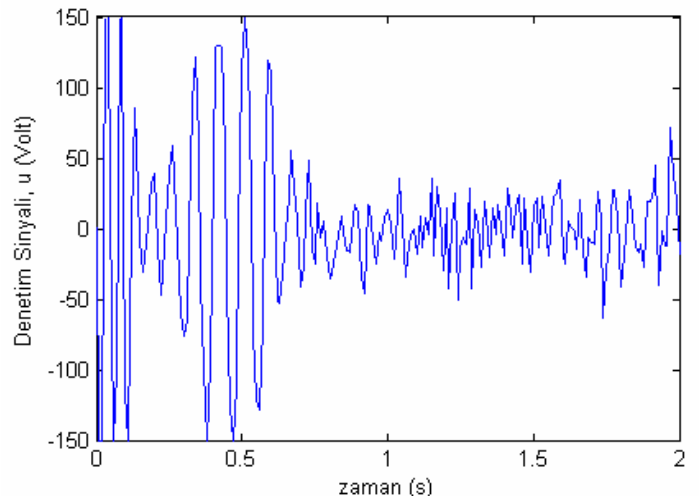


Şekil 4.17. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan sisteme uygulanan denetim sinyali

Sistemdeki belirsizlikler dikkate alınmadığı durum için tasarlanan KKD girişine ±150 V sınırlaması uygulanırsa elde edilen sistem cevabı Şekil 4.18'de, denetim sinyali ise Şekil 4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.18. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan sınırlandırılmış denetim sinyali uygulandığında belirsizlik içeren sistem cevabı



Şekil 4.19. İlk iki mod için belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan sınırlandırılmış denetim sinyali

Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'dan denetim girişinde sınırlama yapmanın sistemin kararlılığına herhangi bir etki yapmadığı görülmüştür.

4.2 Kirişin İlk Üç Titreşim Modunun Modellenmesi ve Kontrolu

Sistemin ilk üç titreşim modunun dinamik modelinin elde edilmesi ilk iki titreşim modu için yapılan işlemler ile benzerdir. Yine Eş. 3.45 ve sistemin hesaplanan doğal frekansları ile sönüm katsayıları kullanılarak kirişin ilk üç titreşim modu için elde edilen modeli Eş. 4.23 ile verilmektedir.

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1705{,}12 & -0{,}58 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -66976{,}5 & -3{,}62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -524945{,}0 & -10{,}15 \end{bmatrix} q + \begin{bmatrix} 0 \\ 0{,}14 \\ 0 \\ 0{,}52 \\ 0 \\ 0{,}60 \end{bmatrix} u \qquad [4.23]$$

$$y = [0{,}9879 \quad 0 \quad -0{,}9879 \quad 0 \quad 0{,}9879 \quad 0]\, q$$

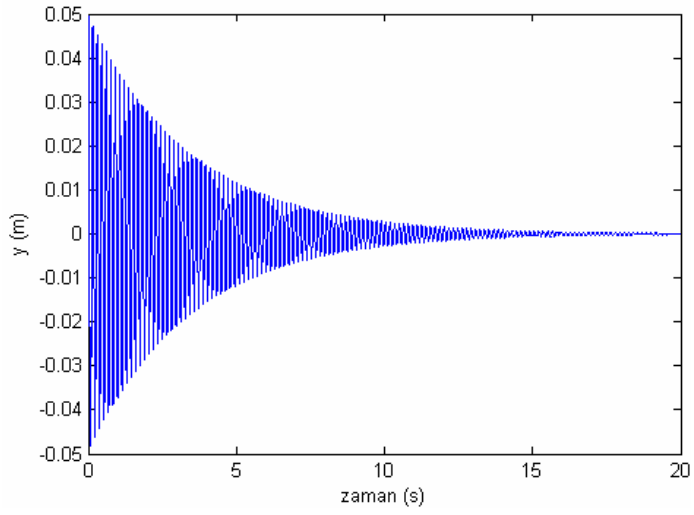
Burada, $q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]^T$ esnek kirişin durum değişkenlerini (modal koordinatlar cinsinden), u PZT tahrik elemanlarına uygulanan elektrik gerilimini (kontrol girişi), y ise kirişin uç noktasının deplasmanını ifade etmektedir. Sisteme gözlemci ve denetçi tasarımı yapılabilmesi için öncelikle sistemin kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik testinin yapılması gerekmektedir. Sistemin kontrol edilebilirlik matrisi; $[B: \quad AB: \quad A^2B: \quad A^3B: \quad A^4B: \quad A^5B]$ incelendiğinde,

$$rank([B: \quad AB: \quad A^2B: \quad A^3B: \quad A^4B: \quad A^5B]) = 6 \qquad [4.24]$$

Sistemin gözlenebilirlik matrisi; $[C: \quad AC: \quad A^2C: \quad A^3C: \quad A^4C: \quad A^5C]$ incelendiğinde,

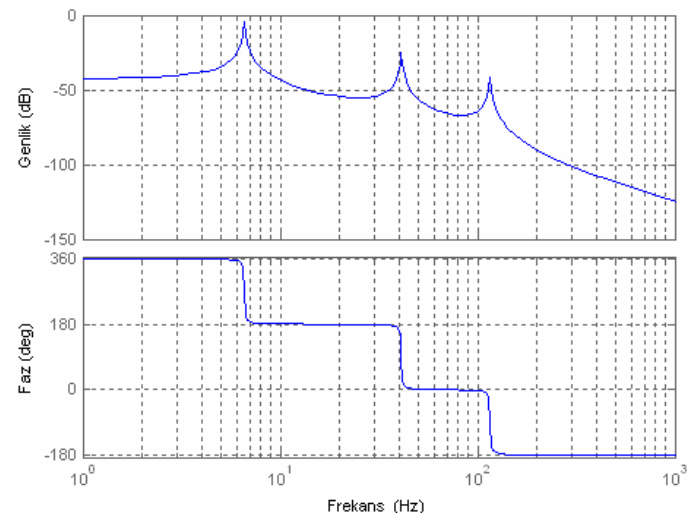
$$rank([C: \quad AC: \quad A^2C: \quad A^3C: \quad A^4C: \quad A^5C]) = 6 \qquad [4.25]$$

Olarak elde edilir. Buda sistemin kontrol edilebilir ve tamamen gözlenebilir olduğunu göstermektedir. Sistemin 5 cm için serbest haldeki cevabı Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20. İlk üç mod modeli için sistemin serbest cevabı

Esnek kirişin ilk üç titreşim modu için frekans cevabı ise Şekil 4.21 ile verilmektedir.



Şekil 4.21. Esnek kirişin ilk üç mod için frekans cevabı

Sisteme kayan kipli denetçi tasarımını kolaylaştırmak için, Bölüm 2'de ifade edildiği üzere sistemde $z = Tq$ koordinat dönüşümü yapılmaktadır. Burada amaç sistemi kontrol girişi olan ve olmayan iki alt kısma bölmektir. Sistem modelini Eş. 2.21 ile verilen sisteme dönüştürmek için seçilen dönüşüm matrisi,

$$T = \begin{bmatrix} 2 & 0{,}0714 & 1 & 0{,}019 & 2 & -0{,}033 \\ 2 & 0{,}285 & 2 & 0{,}057 & 1 & -0{,}115 \\ 2 & 0{,}142 & 1 & 0{,}038 & 3 & -0{,}066 \\ 4 & 0{,}071 & 2 & 0{,}057 & 1 & -0{,}066 \\ 3 & 0{,}143 & 4 & 0{,}077 & 2 & -0{,}099 \\ 1 & 0{,}214 & 1 & 0{,}057 & 1 & -0{,}083 \end{bmatrix} \qquad [4.26]$$

Sistem, yeni koordinatlarda Eş. 4.27'deki gibi gösterilir.

$$\dot{z} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0237 & -0{,}3508 & 0{,}7024 & -0{,}2613 & 0{,}0869 & 0{,}0216 \\ 0{,}0495 & -1{,}2018 & 2{,}4760 & -0{,}9285 & 0{,}3309 & 0{,}0250 \\ 0{,}0293 & -0{,}6948 & 1{,}4186 & -0{,}5204 & 0{,}1738 & 0{,}0293 \\ -0{,}0787 & -0{,}6964 & 1{,}5101 & -0{,}4678 & 0{,}1214 & 0{,}0249 \\ -0{,}0729 & -1{,}0474 & 2{,}2243 & -0{,}7255 & 0{,}2094 & 0{,}0416 \\ -0{,}0517 & -0{,}8619 & 1{,}8432 & -0{,}6237 & 0{,}1942 & 0{,}0164 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \qquad [4.27]$$

$$y = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6840 & 0{,}4560 & -0{,}5320 & 0 \end{bmatrix} z$$

4.2.1 Gözlemci tasarımı

Esnek sistemin ilk üç titreşim modu için elde edilmiş modeline gözlemci tasarımı Bölüm 2.4'teki gibi yapılır. Gözlemci kutuplarının seçimini kolaylaştırmak için Eş. 4.28 ile verilen karakteristik denklemden faydalanılmıştır (39).

$$s^6 + 3{,}25w\,s^5 + 6{,}60w^2\,s^4 + 8{,}60w^3\,s^3 + 7{,}45w^4\,s^2 + 3{,}95w^5\,s + w^6 = 0 \qquad [4.28]$$

Eş. 4.27 ile verilen sistem için gözlemci kutupları, Eş. 4.28 ile verilen karakteristik denklemde, w katsayısı değiştirilmesinden elde edilen denklem kökleridir. Başka bir ifade ile, seçilen w parametresi ile elde edilen karakteristik denklemin kökleri gözlemci sistemin kutuplarının olması istenen yerlerini belirtmektedir. Burada ayrıca gözlemci sistemin kutuplarının farklı seçilmesi durumunda elde edilecek gözlemci kazanç matrislerinin, gözlemci sistemin performansına etkisinin gösterilmesi açısından MATLAB yazılımı kullanılarak 4 farklı deneme yapılmıştır. İlk iki mod için yapılan benzetim çalışmalarındaki gibi, gürültünün ölçüm sinyaline olan etkisi 0.01 oranında alınmıştır. Aşağıda bu denemeler sonucunda elde edilen gözlemci sistemler ve performansları verilmiştir.

Deneme 1:

$w = 80$,

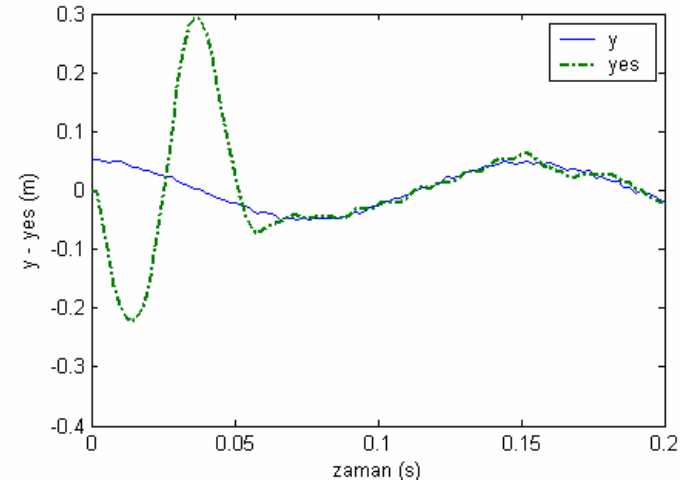
$r = 10^2[-0{,}4958 \pm 2{,}0214i \quad -0{,}9288 \pm 1{,}2525i \quad -1{,}1754 \pm 0{,}4596i]$,

$L = 10^4[1{,}5504 \quad 5{,}1068 \quad 3{,}0460 \quad 2{,}9536 \quad 4{,}4508 \quad 3{,}6695]$,

seçildiğinde, Eş. 2.66 kullanılarak gözlemci sistemin denklemi Eş. 4.29'daki gibi elde edilir. Gözlemcinin cevabı Şekil 4.22'de verilmiştir. Şekil 4.22'den, gözlemci sistemin performansının kötü olduğu görülmektedir. İlk anda gözlemci sistem fazla artış göstermiştir. Bu da diğer durum değişkenlerinin ilk anda doğru tahmin edilemediğini göstermektedir. Dolayısıyla bu da denetçi sinyalini etkileyecektir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0237 & -0{,}3509 & 0{,}7025 & -0{,}2613 & 0{,}0869 & 0{,}0217 \\ 0{,}0496 & -1{,}2019 & 2{,}4761 & -0{,}9285 & 0{,}3309 & 0{,}0250 \\ 0{,}0293 & -0{,}6948 & 1{,}4186 & -0{,}5204 & 0{,}1739 & 0{,}0293 \\ -0{,}0788 & -0{,}6965 & 1{,}5101 & -0{,}4678 & 0{,}1215 & 0{,}0250 \\ -0{,}0730 & -1{,}0475 & 2{,}2244 & -0{,}7256 & 0{,}2095 & 0{,}0416 \\ -0{,}0517 & -0{,}8619 & 1{,}8432 & -0{,}6237 & 0{,}1942 & 0{,}0165 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^4 \begin{bmatrix} 1{,}5504 \\ 5{,}1068 \\ 3{,}0460 \\ 2{,}9536 \\ 4{,}4508 \\ 3{,}6695 \end{bmatrix} y$$

$$y_{es} = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6839 & 0{,}4560 & -0{,}5319 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} \qquad [4.29]$$



Şekil 4.22. $w = 80$ seçildiği durum için gözlemci cevabı

Deneme 2:

$w = 100$,

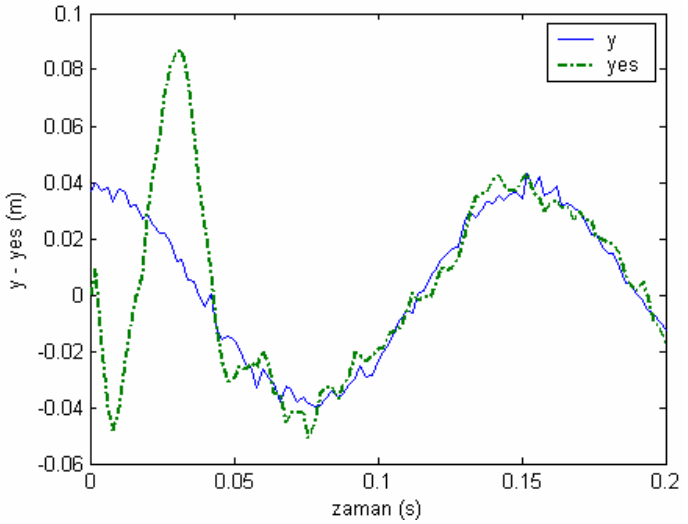
$r = 10^2[-0{,}6197 \pm 2{,}5267i \quad -1{,}1610 \pm 1{,}5657i \quad -1{,}4693 \pm 0{,}5745i]$,

$L = 10^4[1{,}2670 \quad 4{,}0619 \quad 2{,}4690 \quad 2{,}3553 \quad 3{,}5512 \quad 2{,}9269]$,

seçildiğinde, benzer şekilde gözlemci sistemin eşitliği Eş. 4.30'daki gibi verilebilir. Bu durumda, gözlemcinin cevabı Şekil 4.23'de verilmiştir. Şekil 4.23'de görülmektedir ki gözlemci sistemin performansı hala tatmin edici değildir. Gözlemci sistemin yüksek artışlardan sonra sistem cevabına ulaşması istenmediği için bu denemede elde edilen gözlemci tercih edilemez.

$$\dot{\hat{z}} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}2163 & -0{,}1583 & -0{,}1641 & -0{,}8390 & 0{,}7609 & 0{,}0217 \\ 0{,}6669 & -0{,}5845 & -0{,}3020 & -2{,}7805 & 2{,}4916 & 0{,}0250 \\ 0{,}4046 & -0{,}3196 & -0{,}2700 & -1{,}6462 & 1{,}4873 & 0{,}0293 \\ 0{,}2792 & -0{,}3385 & -0{,}1007 & -1{,}5417 & 1{,}3744 & 0{,}0250 \\ 0{,}4668 & -0{,}5077 & -0{,}2044 & -2{,}3447 & 2{,}0985 & 0{,}0416 \\ 0{,}3931 & -0{,}4171 & -0{,}1586 & -1{,}9583 & 1{,}7512 & 0{,}0165 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^4 \begin{bmatrix} 1{,}2670 \\ 4{,}0619 \\ 2{,}4690 \\ 2{,}3553 \\ 3{,}5512 \\ 2{,}9269 \end{bmatrix} y$$

$$y_{es} = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6839 & 0{,}4560 & -0{,}5319 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} \qquad [4.30]$$



Şekil 4.23. $w = 100$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı

Deneme 3:

$w = 150$,

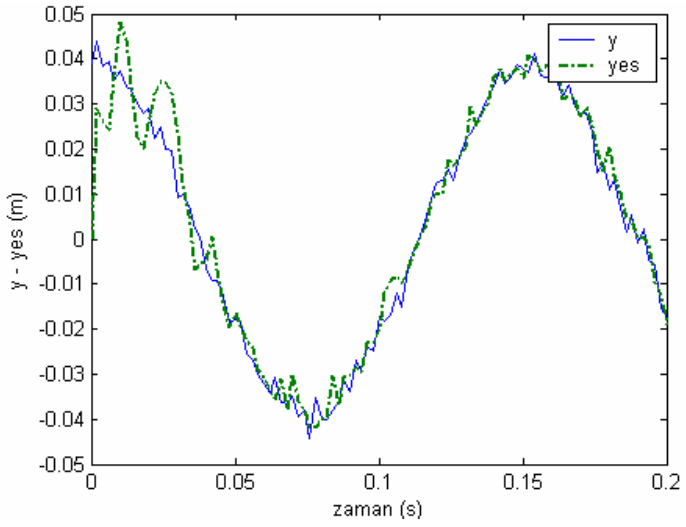
$r = 10^2[-0{,}9296 \pm 3{,}7901i \quad -1{,}7415 \pm 2{,}3485i \quad -2{,}2039 \pm 0{,}8618i]$,

$L = 10^4[0{,}4611 \quad 1{,}1917 \quad 0{,}8080 \quad 0{,}5346 \quad 0{,}8443 \quad 0{,}8276]$,

seçildiğinde, gözlemci sistem Eş. 4.31 ile verilir. Gözlemcinin cevabı ise Şekil 4.24'de verilmiştir. Şekil 4.24'den görüldüğü gibi, gözlemcinin performansında iyileşmeler vardır. Gözlemci ilk anda fazla artış göstermemekte ve kısa sürede gerçek sistem cevabına ulaşmaktadır.

$$\dot{\hat{z}} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0938 & -0{,}2808 & 0{,}3871 & -0{,}4716 & 0{,}3322 & 0{,}0217 \\ 0{,}2307 & -1{,}0208 & 1{,}6610 & -1{,}4718 & 0{,}9648 & 0{,}0250 \\ 0{,}1521 & -0{,}5720 & 0{,}8660 & -0{,}8888 & 0{,}6037 & 0{,}0293 \\ 0{,}0025 & -0{,}6152 & 1{,}1445 & -0{,}7116 & 0{,}4058 & 0{,}0250 \\ 0{,}0554 & -0{,}9191 & 1{,}6469 & -1{,}1105 & 0{,}6586 & 0{,}0416 \\ 0{,}0741 & -0{,}7361 & 1{,}2772 & -1{,}0011 & 0{,}6345 & 0{,}0165 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}4611 \\ 1{,}1917 \\ 0{,}8080 \\ 0{,}5346 \\ 0{,}8443 \\ 0{,}8276 \end{bmatrix} y$$

$$y_{es} = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6839 & 0{,}4560 & -0{,}5319 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} \qquad [4.31]$$



Şekil 4.24. $w = 150$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı

Deneme 4:

$w = 175$,

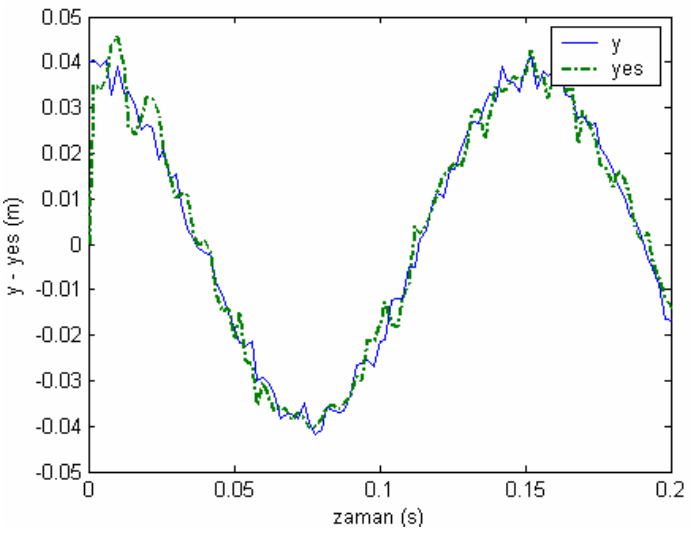
$r = 10^2[-1{,}0845 \pm 4{,}4218i \quad -2{,}0318 \pm 2{,}7399i \quad -2{,}5712 \pm 1{,}0054i]$,

$L = 10^3[1{,}8904 \quad 2{,}5499 \quad 1{,}9692 \quad -2{,}9339 \quad -3{,}3630 \quad 0{,}9467]$,

Seçildiğinde, gözlemci sistem dinamiği Eş. 4.32 ile ifade edilebilir. Bu durumda elde edilen gözlemci cevabı ise Şekil 4.25'de verilmiştir. Şekil 4.25'te görüldüğü gibi gözlemci sistemin performansında $w = 150$ şeçildiği duruma göre fazla bir değişiklik olmamıştır. Aşmada görülen azalmanın yanı sıra yerleşme zamanında küçük bir iyileşme gözlenmiştir.

$$\dot{\hat{z}} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0525 & -0{,}3222 & 0{,}5732 & -0{,}3475 & 0{,}1875 & 0{,}0217 \\ 0{,}0883 & -1{,}1631 & 2{,}3017 & -1{,}0448 & 0{,}4666 & 0{,}0250 \\ 0{,}0592 & -0{,}6649 & 1{,}2840 & -0{,}6102 & 0{,}2786 & 0{,}0293 \\ -0{,}1233 & -0{,}7411 & 1{,}7108 & -0{,}3341 & -0{,}0346 & 0{,}0250 \\ -0{,}1241 & -1{,}0986 & 2{,}4544 & -0{,}5722 & 0{,}0306 & 0{,}0416 \\ -0{,}0373 & -0{,}8475 & 1{,}7785 & -0{,}6669 & 0{,}2446 & 0{,}0165 \end{bmatrix} \hat{z} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u + 10^3 \begin{bmatrix} 1{,}8904 \\ 2{,}5499 \\ 1{,}9692 \\ -2{,}9339 \\ -3{,}3630 \\ 0{,}9467 \end{bmatrix} y$$

$$y_{es} = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6839 & 0{,}4560 & -0{,}5319 & 0 \end{bmatrix} \hat{z} \qquad [4.32]$$



Şekil 4.25. $w = 175$ Seçildiği durum için gözlemci cevabı

Sistemin ilk üç titreşim modunun kontrolu için KKD tasarımında kullanılan sistemin durum değişkenleri Eş. 4.32 ile verilen gözlemci sistem kullanılarak elde edilebilir. W parametresinin daha fazla artırılması sistemi kontrol etmek için harcanan denetim sinyalinin artmasına sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı gözlemci sistemin kutuplarının fazla büyük olması istenmez.

Yukarıdaki benzetim sonuçlarından, 4'üncü denemede sistemin durum değişkenlerinin ölçüm gürültüsünün etkisini attırmadan en kısa sürede elde edilebildiği görülmektedir. Gözlemciden elde edilen bu veriler kullanılarak, bir sonraki aşamada kayan kipli denetçi tasarımı gerçekleştirilmektedir.

4.2.2 Denetçi tasarımı

Gözlemciden elde edilen veriler kullanılarak belirlenen durum değişkenleri, hem kayma yüzeyi eğiminin belirlenmesinde hem de kayan kipli denetçi tasarımında kullanılmaktadır. KKD tasarımında kullanılacak sistem modeli Eş. 4.27 ile verilmiştir. KKD tasarımında; sistemde modelleme hatalarından kaynaklanan (uyum koşulu tipi) belirsizliklerin olduğu ve belirsizlik olmadığı iki ayrı durum dikkate alınmıştır. Belirsizlik içeren sistem modelinde, titreşimin doğal frekansları ve sönüm oranlarının belli bir aralıkta olacağı varsayılarak elde edilen belirsizlik bandı sistem modeline dahil edilmiştir. İlk üç titreşim modunun kontrolu için yazılmış MATLAB programı EK-3'de verilmiştir.

KKD tasarım sürecinde ilk aşama olan kayma yüzeyi tasarımı, Eş. 4.27 ile verilen sistem için Bölüm 2.1.2'deki gibi yapılabilir. Kayma yüzeyi eğiminin seçimi için Eş. 4.27 ile verilen sistem; kontrol girişinin olduğu ve olmadığı iki alt sistem olarak Eş. 4.33'deki gibi verilebilir.

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0237 & -0{,}3508 & 0{,}7024 & -0{,}2613 & 0{,}0869 \\ 0{,}0495 & -1{,}2018 & 2{,}4760 & -0{,}9285 & 0{,}3309 \\ 0{,}0293 & -0{,}6948 & 1{,}4186 & -0{,}5204 & 0{,}1738 \\ -0{,}0787 & -0{,}6964 & 1{,}5101 & -0{,}4678 & 0{,}1214 \\ -0{,}0729 & -1{,}0474 & 2{,}2243 & -0{,}7255 & 0{,}2094 \end{bmatrix} z_1 + 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0216 \\ 0{,}0250 \\ 0{,}0293 \\ 0{,}0249 \\ 0{,}0416 \end{bmatrix} z_2 \\ \dot{z}_2 &= 10^4 \begin{bmatrix} -0{,}0517 & -0{,}8619 & 1{,}8432 & -0{,}6237 & 0{,}1942 \end{bmatrix} z_1 + 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0164 \end{bmatrix} z_2 + u \end{aligned} \qquad [4.33]$$

z_1, olarak verilen indirgenmiş sistemin öz değerleri $r_{ind} = [-3 \pm 800i \quad -2 \pm 100i \quad -50]$ olarak seçilirse, kayma yüzeyi denklemi Eş. 4.34'deki gibi elde edilir.

$$\sigma(z) = \begin{bmatrix} 1{,}4354 & -0{,}5000 & -1{,}4196 & -0{,}1308 & 0{,}3462 & 1{,}0 \end{bmatrix} z \qquad [4.34]$$

Kayma yüzey denklemi, modal koordinat takımında aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\sigma(q) = \begin{bmatrix} 88{,}3936 & -24{,}6957 & -61{,}9338 & -11{,}9507 & -0{,}2967 & 46{,}60 \end{bmatrix} q \qquad [4.35]$$

Elde edilen kayma yüzeyi kullanılarak hesaplanan eşdeğerleyen denetçi, yeni koordinat takımında;

$$u_{eq} = 10^3 \begin{bmatrix} 0{,}9900 & 0{,}4980 & -1{,}7225 & -0{,}1418 & 0{,}3670 & -0{,}0457 \end{bmatrix} z \qquad [4.36]$$

Modal koordinat takımında;

$$u_{eq} = 10^3 \begin{bmatrix} 7{,}0234 & 5{,}6189 & -3{,}0909 & -1{,}8613 & -2{,}5027 & -3{,}1593 \end{bmatrix} q \qquad [4.37]$$

İle verilebilir. Eşdeğerleyen denetçinin görevi; sistem yörüngeleri kayma yüzeyi üzerinde değilse, bunu kayma yüzeyine yönlendirmektir. Kayma yüzeyine ulaştıktan sonra, sistem yörüngelerini kayma yüzeyi üzerinde tutmak için ise yüksek frekanslı denetçi kullanılır. Eş. 4.27 ile verilen sistem için yüksek frekanslı denetçi;

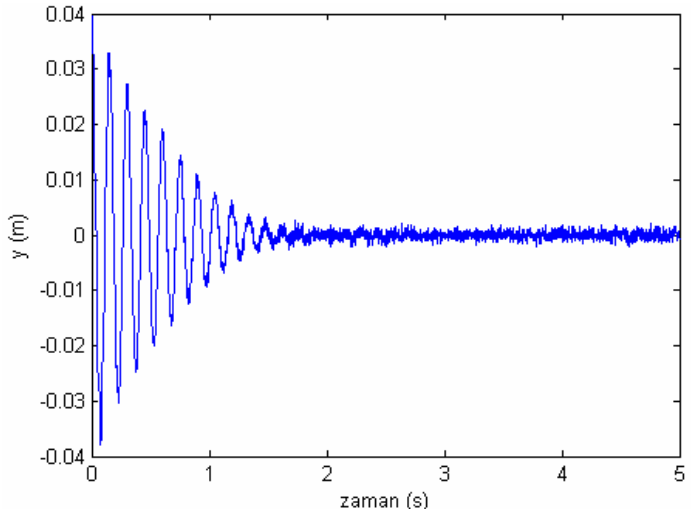
$$u_n = -k\, sign(\sigma) \qquad [4.38]$$

Burada k, küçük sabit bir sayıdır ve bu çalışma için $k = 0{,}5$ olarak seçilmiştir. $sign(\sigma)$ ise kayma yüzeyinin işaret fonksiyonudur. Böylelikle, sisteme uygulanan toplam denetim Eş.4.39 ile verilebilir.

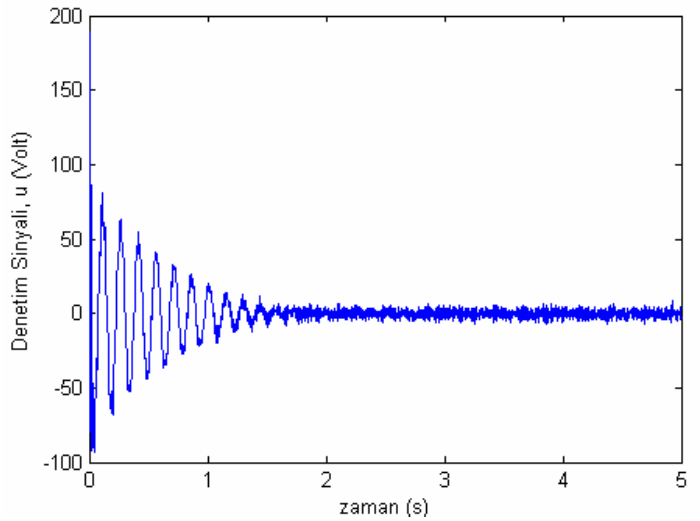
$$u = u_{eq} + u_n \qquad [4.39]$$

Tasarlanan denetçi Eş. 4.23 ile verilen modele 5 cm'lik ilk deplasman verilerek uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı Şekil 4.26'da görüldüğü gibi olur. Kirişe uygulanan denetçi sinyali Şekil 4.27'de, tasarlanan kayma yüzeyinin zamanla değişimi ise Şekil 4.28 ile verilmiştir.

Benzetim sonuçlarında, kontrol girişinde her hangi bir sınırlamanın olmadığı varsayılmıştır. Ancak deneysel çalışmalarda sisteme uygulanacak olan denetim sinyali ±150 V ile sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, denetim sinyalindeki sınırlamanın etkisini benzetim sonuçlarında da görebilmek amacıyla, sisteme uygulanan denetçi sinyali ±150 V'ta sınırlanırılarak benzetim sonuçları yinelenmiştir. Denetim sinyalindeki sınırlamanın sistem kararlılığı ve performansı üzerindeki etkisi (41-43)'da incelenmiştir.

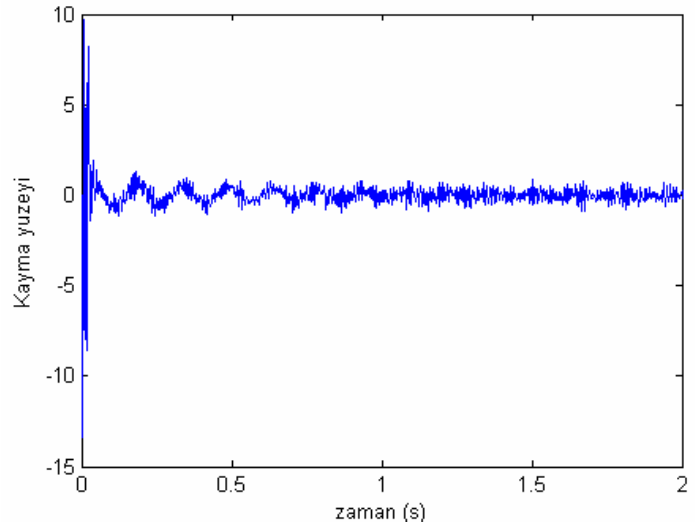


Şekil 4.26. İlk üç mod için sistemin denetim uygulanmış deplasmanı

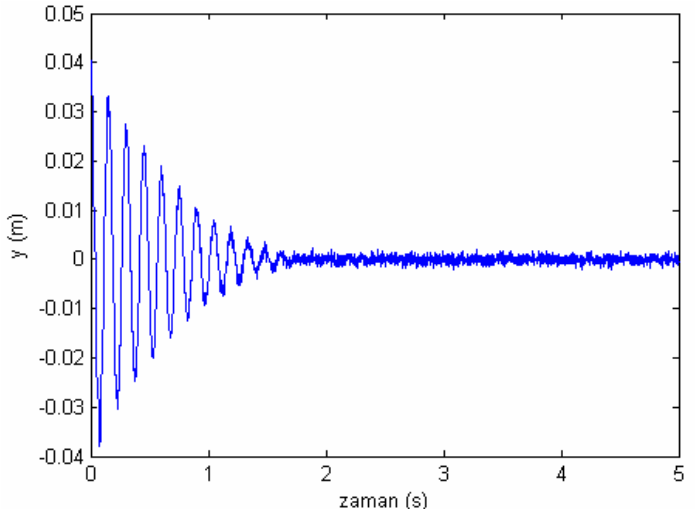


Şekil 4.27. İlk üç mod için kirişe uygulanan denetim sinyali

Sınırlandırılmış denetim girişi kullanılarak elde edilen sisten cevabı Şekil 4.29 ve denetim sinyali ise Şekil 4.30'da verilmektedir. Görüldüğü üzere, denetim sinyali ±150 V ile sınırlandırıldığında, performansta neredeyse herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Bunun temel sebebi ise, sisteme uygulanan gerilimin çok kısa bir süre ±150 V sınırının üzerinde olmasıdır.

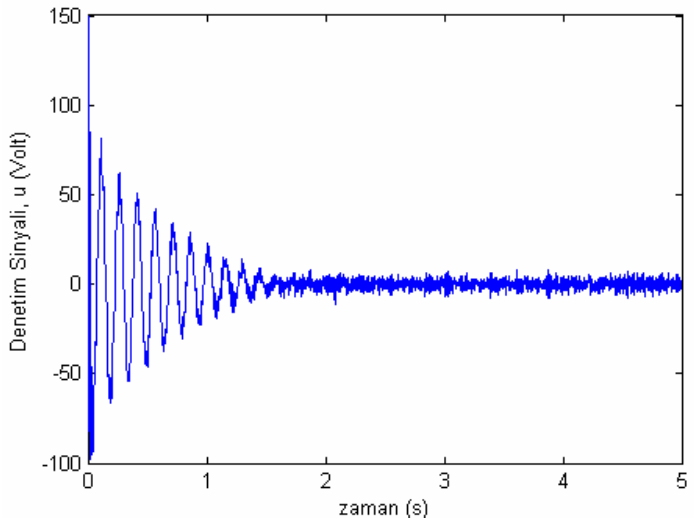


Şekil 4.28. İlk üç mod için sisteme tasarlanan kayma yüzeyi $\sigma(x)$



Şekil 4.29. İlk üç mod için denetçi sınırlaması uygulandığında kirişin uç noktasının deplasmanı

Sistem parametrelerinde belirsizlik olduğu varsayılır ise, sistemi kontrol etmek için tasarlanan denetçide bazı değişiklikler yapılması gerekir. Sistem parametreleri olan doğal frekanslar ve sönüm oranlarına belirsizlik eklenmesi durumunda sistem modeli aşağıdaki gibi alınabilir. Sistemdeki belirsizlik, uyum koşulu tipi belirsizliktir. Belirsizliklerin tam olarak değeri bilinmemekte fakat alt ve üst sınırlarının bilindiği kabul edilmektedir. Esnek kiriş sisteminin her bir modunun doğal frekansında %2'lik ve sönüm oranında ise %0.1'lik belirsizlik olduğu göz önünde bulunarak elde edilen dönüştürülmüş model Eş. 4.40'deki gibi verilmiştir.



Şekil 4.30. İlk üç mod için sınırlama uygulanmış denetim sinyali

$$\dot{z} = 10^4 \begin{bmatrix} 0{,}0237 & -0{,}3508 & 0{,}7024 & -0{,}2613 & 0{,}0869 & 0{,}0216 \\ 0{,}0495 & -1{,}2018 & 2{,}4760 & -0{,}9285 & 0{,}3309 & 0{,}0250 \\ 0{,}0293 & -0{,}6948 & 1{,}4186 & -0{,}5204 & 0{,}1738 & 0{,}0293 \\ -0{,}0787 & -0{,}6964 & 1{,}5101 & -0{,}4678 & 0{,}1214 & 0{,}0249 \\ -0{,}0729 & -1{,}0474 & 2{,}2243 & -0{,}7255 & 0{,}2094 & 0{,}0416 \\ -0{,}0517+\Delta_1 & -0{,}8619+\Delta_2 & 1{,}8432+\Delta_3 & -0{,}6237+\Delta_4 & 0{,}1942+\Delta_5 & 0{,}0164+\Delta_6 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} -0{,}1520 & -0{,}1520 & 0{,}6840 & 0{,}4560 & -0{,}5320 & 0 \end{bmatrix} z \qquad [4.40]$$

Burada belirsizliklerin sınırları, $-5.10^{-6} < \Delta_1 < 5.10^{-6}$, $-5.10^{-6} < \Delta_2 < 5.10^{-6}$, $-2.10^{-6} < \Delta_3 < 2.10^{-6}$, $-4.10^{-6} < \Delta_4 < 4.10^{-6}$, $-4.10^{-6} < \Delta_5 < 4.10^{-6}$, $-1.10^{-6} < \Delta_6 < 1.10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. Belirsizlik içeren sistemler için KKD

tasarımında, kayma yüzeyi tasarımı ve eşdeğerleyen denetçi tasarımı belirsizlik içermeyen sistemler ile aynıdır. Belirsizlikler yüksek frekanslı denetçinin tasarımında göz önünde bulundurulur ve yüksek frekanslı denetçi katsayısı seçimi Bölüm 2.1.3'teki gibi yapılır. Eş. 4.40 ile verilen belirsizlik içeren esnek kiriş modeli için kayma yüzeyi,

$$\sigma(q) = \begin{bmatrix} 88{,}3936 & -24{,}6957 & -61{,}9338 & -11{,}9507 & -0{,}2967 & 46{,}60 \end{bmatrix} q \qquad [4.41]$$

Sistem için tasarlanan eşdeğerleyen denetçi ise,

$$u_{eq} = 10^3 \begin{bmatrix} 7{,}0234 & 5{,}6189 & -3{,}0909 & -1{,}8613 & -2{,}5027 & -3{,}1593 \end{bmatrix} q \qquad [4.42]$$

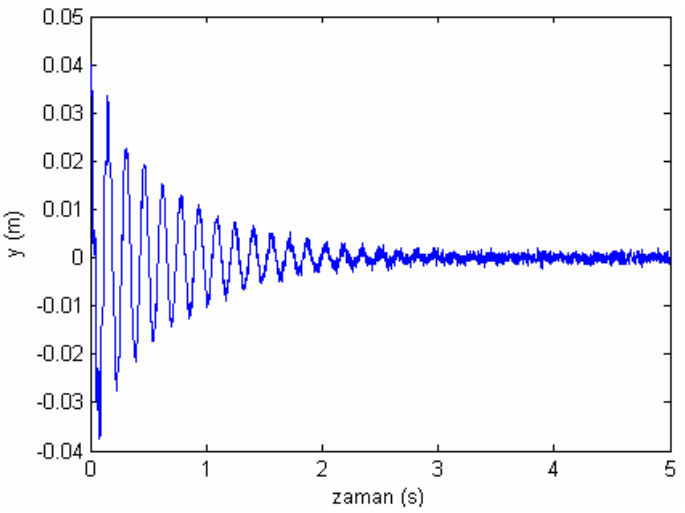
Yüksek frekanslı denetçi ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$u_n = -\rho(q,t)\, sign(\sigma) \qquad [4.43]$$

Burada,

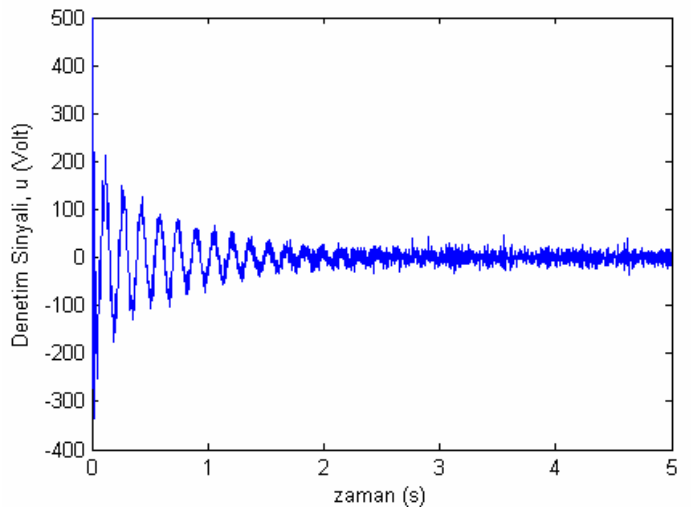
$$\rho(q,t) = \begin{bmatrix} 0{,}05 & 0{,}05 & 0{,}02 & 0{,}04 & 0{,}04 & 0{,}01 \end{bmatrix} T^{-1} |q| \qquad [4.44]$$

Sisteme uygulanan toplam denetim eşdeğerleyen denetçi ve yüksek frekanslı denetçinin toplamından oluşur. Belirsizlik içeren sistem için tasarlanan denetçi sisteme uygulandığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.31'de, sisteme uygulanan denetim sinyali ise Şekil 4.32'de verilmiştir.

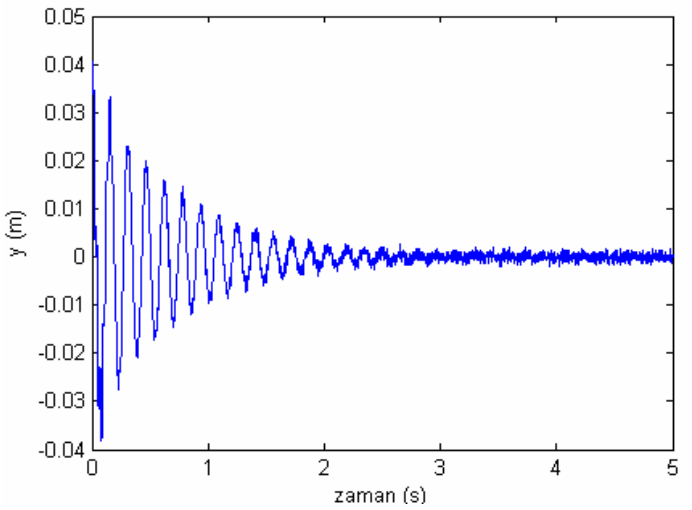


Şekil 4.31. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme tasarlanan denetçi uygulandığında sistemin cevabı

Daha öncede belirtildiği gibi sisteme uygulanan gerilim ±150 V ile sınırlanmış olduğundan benzetim çalışmalarında da bu göz önünde bulundurulursa elde edilen esnek kirişin uç noktasının deplasmanı Şekil 4.33'deki gibi olur. Sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali ise Şekil 4.34 ile verilmiştir. Görüldüğü üzere, sistemdeki belirsizliklere rağmen KKD, esnek kiriş sistemindeki titreşimi aktif bir şekilde baskılayabilmektedir.



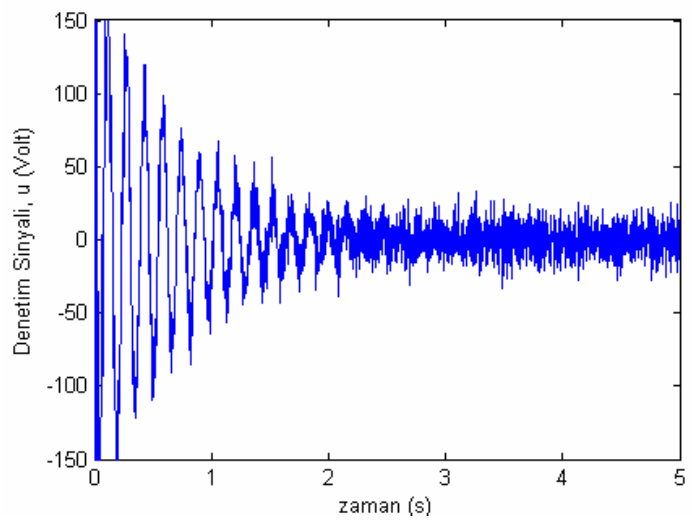
Şekil 4.32. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan denetim sinyali



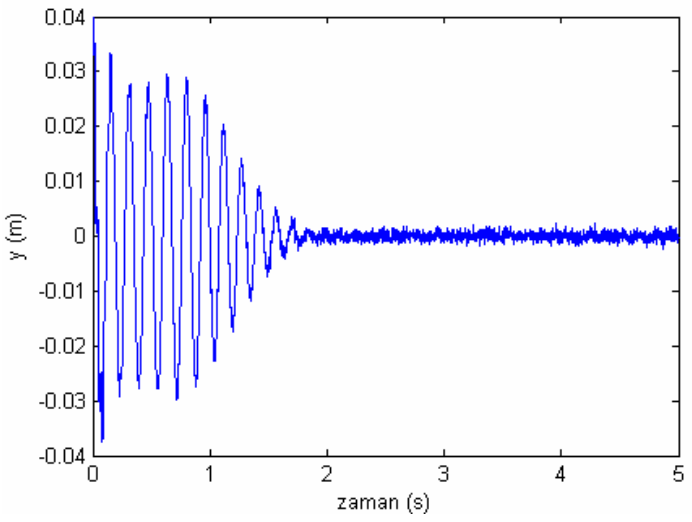
Şekil 4.33. İlk üç mod için sınırlanmış denetim sinyali uygulandığında sistem cevabı

Yukarıda yapılan benzetimlerde denetçi belirsizlik içeren sistem için belirsizlik sınırları göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Sistem parametrelerindeki

belirsizlikler dikkate alınmadığı durum için tasarlanan denetçi belirsizlik içeren sisteme uygulandığında elde edilen sistem cevabı Şekil 4.35'de verilmektedir.



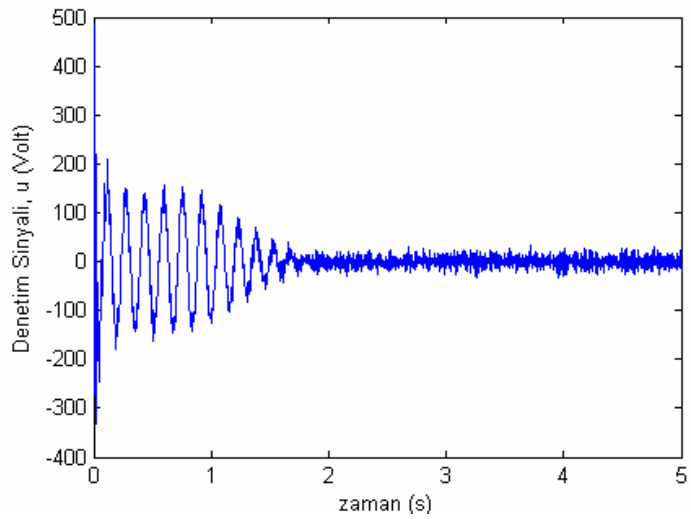
Şekil 4.34. İlk üç mod için belirsizlik içeren sisteme uygulanan sınırlandırılmış denetim sinyali



Şekil 4.35. İlk üç mod için belirsizlik içeren sistemin belirsizlik dikkate alınmadan tasarlanan denetçi uygulandığında cevabı

Şekil 4.35'da kiriş. uç noktasının deplasmanının sıfıra gitmediği ve bir dalgalanma sergilediği görülmektedir. Bunun sebebi sistemdeki belirsizliklerin dikkate alınmamış olmasıdır. Sisteme uygulanan denetçi girişi ise Şekil 4.36'de verilmiştir.

Yine aynı şekilde denetçi sinyalinin de sıfıra ulaşmadığı ve dalgalandığı şekilden görülmektedir.



Şekil 4.36. İlk üç mod için belirsizlik dikkate alınmadan sisteme uygulanan denetim sinyali

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bölüm 4'de gerçekleştirilen KKD tasarımı ve benzetim sonuçlarının geçerliliği, bu bölümde gerçek kiriş sistemine uygulanarak deneysel sonuçlar elde edilmek suretiyle test edilmektedir. Deneysel çalışmalar, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık Mühendisliği Bölümü laboratuarlarında kurulu olan düzenek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek üzerinde daha önce Ülker (20) tarafından farklı denetim yöntemleri tasarlanarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile daha önce elde edilen sonuçlar ise (45-47)'da yayınlanmıştır.

Bu bölümde ayrıca deneysel sistemde kullanılan ekipmanlar, veri toplama ve kontrol algoritmasını içeren bilgisayar programı tanıtılmaktadır.

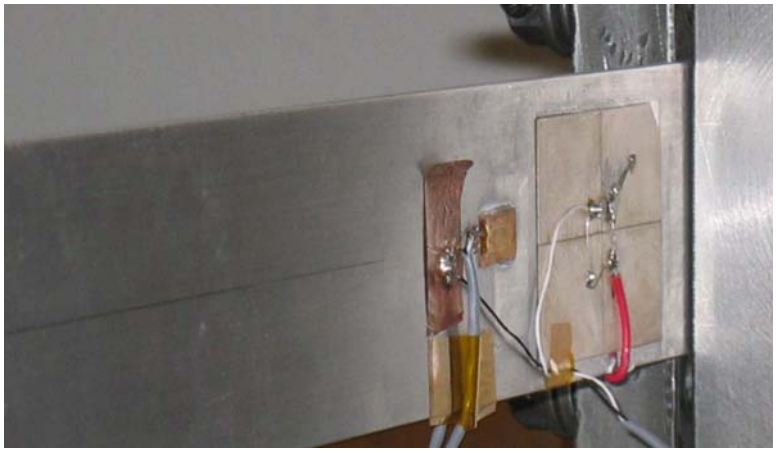
5.1 Deneysel Sistem

Resim 5.1'de esnek kiriş sistemi görülmektedir. Deney düzeneğinde bir ucu ankastre diğer ucu serbest alüminyum bir kiriş kullanılmıştır. Tahrik elemanı olarak kirişin her iki yanına simetrik olarak yapıştırılmış 25 mm x 20 mm x 0.5 mm boyutlarında 4'er adet Sensor Tech BM500 tipinde PZT (Lead-Zirconate- Titanate) yamalar yapıştırılmıştır (Resim 5.2). PZT yamaların maksimum çalışma frekansı 1400 Hz'dir. Kiriş titreşimlerinde ilk üç titreşim modu göz önünde bulundurulduğu için kullanılan PZT'ler çalışma frekansı için uygundur. Kirişin uç noktasının deplasmanı Keyence lazer konum ölçer ile ölçülmüştür (Resim 5.3). Keyence lazer konum ölçer 30 mm uzaklıktan ± 15 mm aralığında konum ölçebilme yeteneğine sahiptir. Örnekleme frekansı 1024 μs'dir. Çözünürlüğü 3 μm olup, 24 VDC gerilim ve maksimum 400mA'de çalışmaktadır. Elde edilen benzetim sonuçları C programlama dilinde yazılmış bir bilgisayar programı kullanılarak intel işlemcili ve 64 MB RAM içeren Sensor Tech SS10 dört kanallı programlanabilir denetçi ile esnek kiriş sistemine uygulanmıştır (Resim 5.4). Sensor Tech SS10 sisteminin ana amacı esnek kirişin ölçülen uç nokta deplasman verilerinin toplanması ve bu veriler ile elde edilen denetçi sinyalinin eş zamanlı olarak hesaplanarak piezoelektrik yamalara

gönderilmesini sağlamaktır. Sensor Tech SS10 network ile bağlanmış Linux Redhat 6.2 işletim sistemi ile çalışan bir ana bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Bu bilgisayarda C dilinde yazılmış olan veri toplama ve denetim algoritmasını içeren program çalıştırılır ve network aracılığı ile Sensor Tech SS10' a aktarılır. Daha sonra burada deney süresi girildikten sonra deney başlatılır. Elde edilen veriler ana bilgisayarda bir dosyaya yazdırılır. C programlama dili ile yazılmış olan bilgisayar programının akış şeması Şekil 5.1'de görülmektedir. Ayrıca C dilinde yazılan program EK-4'te verilmiştir.



Resim 5.1. Çalışmada kullanılan esnek kiriş sistemi



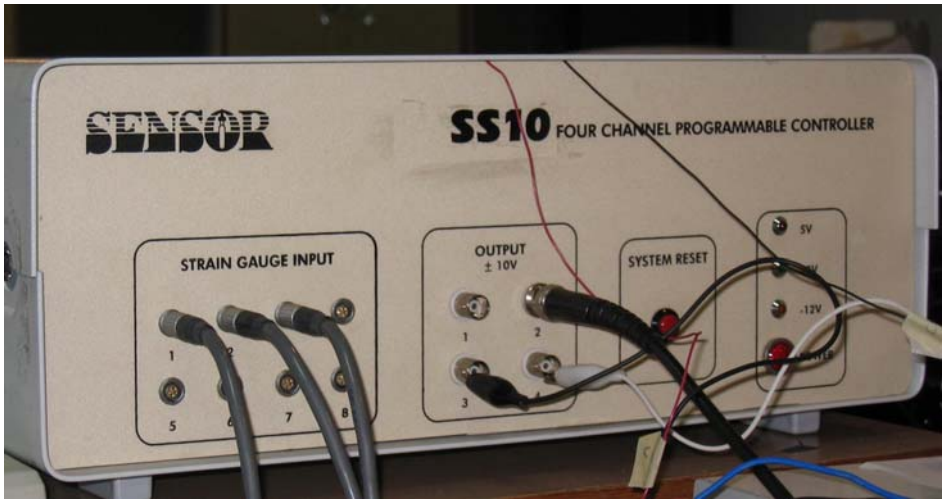
Resim 5.2. Piezoelektrik yamalar.

Sensor Tech SS10 bu işlemleri yaparken elde edilen sinyalleri gönderir ve alırken analogtan dijitale ve dijitalden analoga dönüşüm yapan kartlar kullanılır. Bu kartların

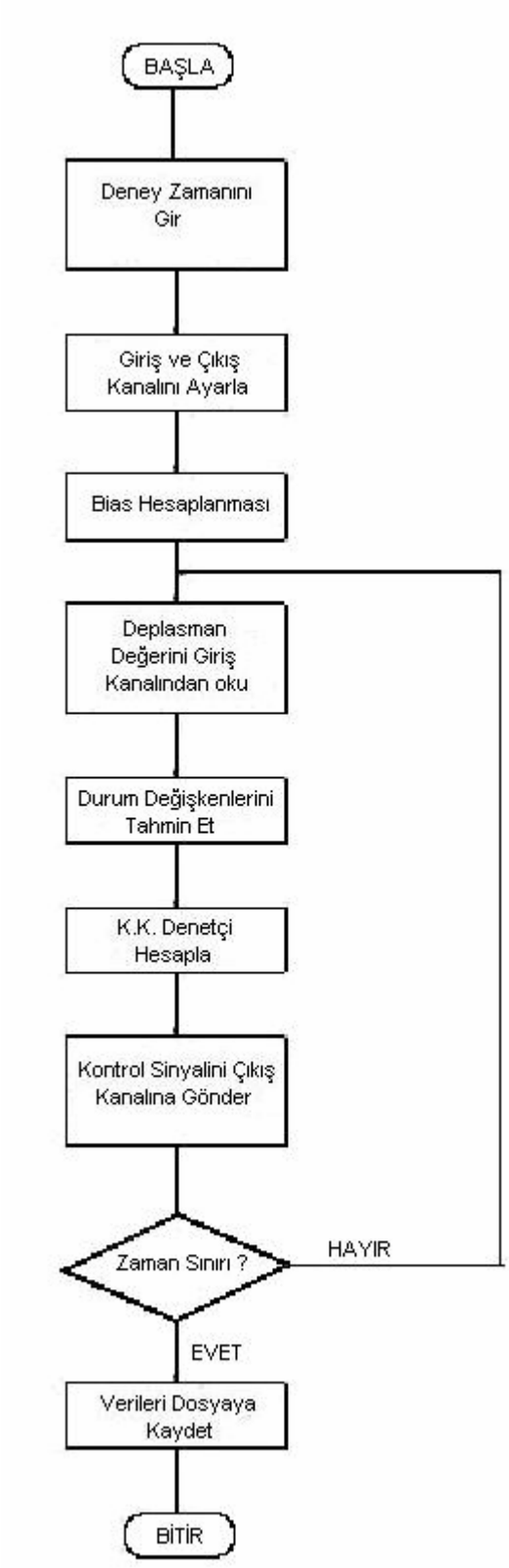
çalışma voltajı ±10 V aralığındadır. Bu gerilim değeri PZT yamalar için düşük olduğundan dolayı SS10 dan çıkan sinyal Sensor Tech SA10 yüksek gerilim güç yükseltici aracılığıyla 15 kat artırılır ve elde edilen gerilim PZT yamalara uygulanır.



Resim 5.3. Keyence lazer konum ölçer

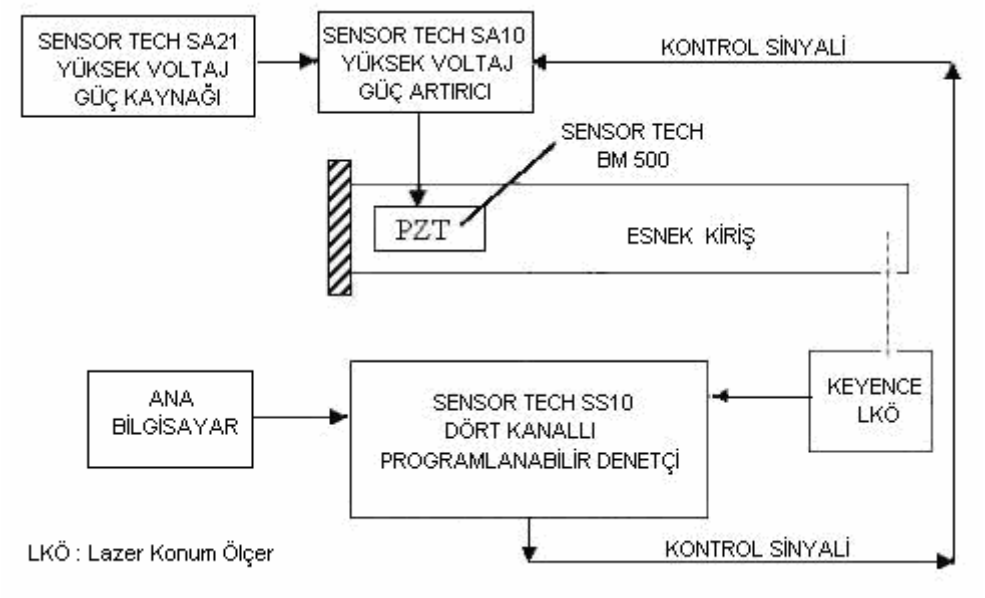


Resim 5.4. Sensor Tech SS10 dört kanallı programlanabilir denetçi



Şekil 5.1. C programının akış diyagramı

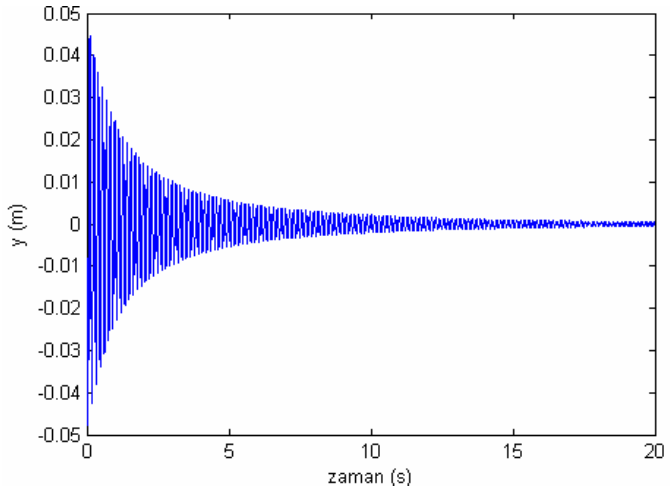
Deney sisteminin şematik görünümü Şekil 5.2'de verilmiştir.



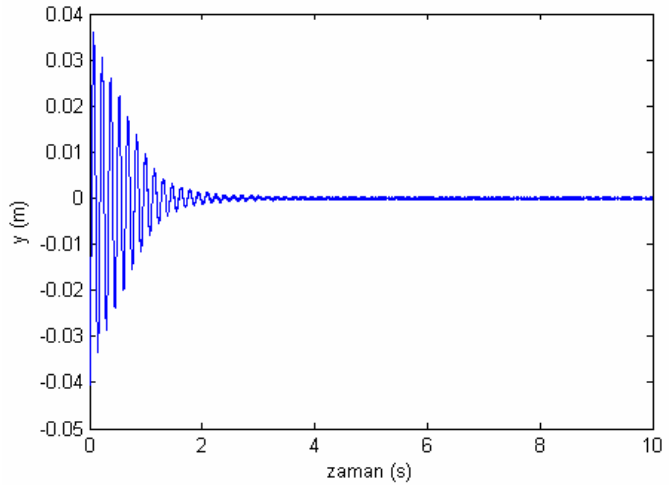
Şekil 5.2. Deney sisteminin şematik görünümü

5.2 Deney Sonuçları

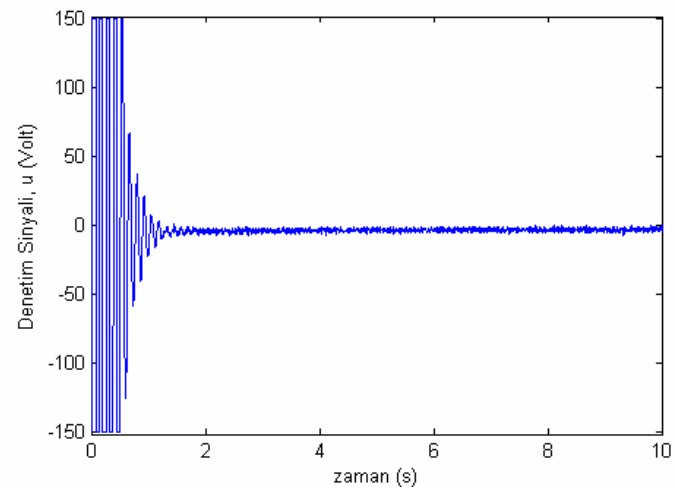
Elde edilen benzetim sonuçları yazılan C programı ile ana bilgisayarda aktarılmıştır. Uygulanan denetçinin sistemin titreşimlerinin sönümlediğini rahatça gözleyebilmek için kirişin uç noktasına başlangıç deplasmanı verilmiş ve sistem çalıştırılmıştır. Sistemden elde edilen serbest titreşim hareketini içeren kiriş uç noktası deplasmanının zamana göre değişimi Şekil 5.3'de verilmektedir. Sistem modelinden elde edilen serbest titreşim hareketleri Şekil 4.1 (ilk iki titreşim modunu içeren model) ve Şekil 4.20 (ilk üç titreşim modu içeren model) gerçek sistem cevabı ile karşılaştırıldığında, büyük yaklaşımla modelin gerçek sistemi temsil ettiği görülmektedir. Şekil 5.4'de ise ilk iki titreşim modu dikkate alınarak geliştirilen sistem modeli için tasarlanan KKD uygulanmış gerçek sistemin cevabı verilmektedir. Sisteme uygulanan denetim girişi ise Şekil 5.5 ile verilmiştir. PZT'ye uygulanabilecek gerilim, ±150 V ile sınırlandırıldığından, deneysel çalışmalarda bu gerilim değer aralığı kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Esnek kirişin serbest cevabı

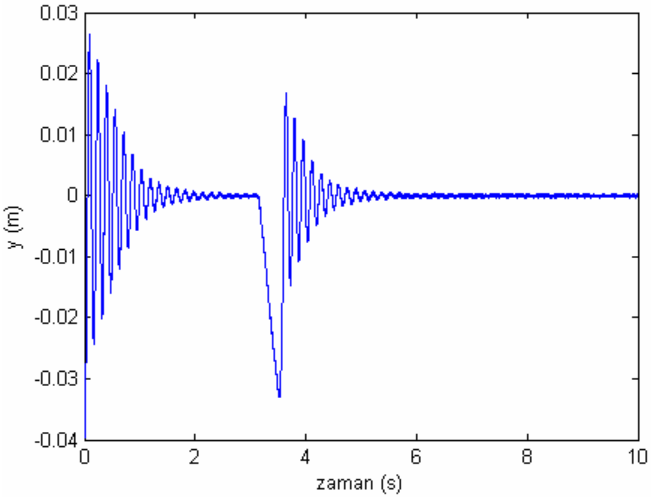


Şekil 5.4. Denetim uygulanmış sistem cevabı

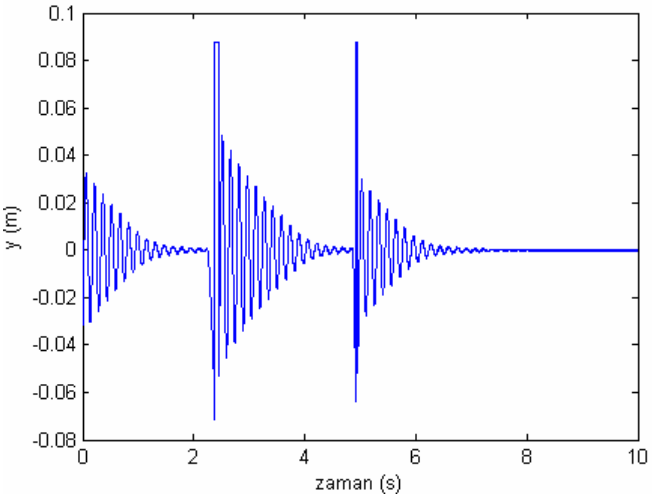


Şekil 5.5 Sisteme uygulanan denetim sinyali

Sisteme uygulanan farklı girişlerin denetçi tarafından kontrol edildiğinin daha kolay görülmesi açısından sisteme bozucu ard arda girişler verilmiş ve buna denetçinin vereceği cevaplar izlenmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de tekrarlanan bozucular şeklinde kirişe verilen girişlere karşı denetçinin performansı görülmektedir.



Şekil 5.6 Tekrarlayan iki bozucu giriş uygulandığında sistem cevabı



Şekil 5.7 Tekrarlayan üç bozucu giriş uygulandığında sistem cevabı

Sisteme tekrarlayan bozucular uygulandığı durumda dahi KKD'nin etkili bir şekilde sistem titreşimlerini sönümleyebildiği şekillerden açıkça görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı esnek yapıların titreşimlerinin aktif olarak sönümlenmesi için etkili bir KKD algoritması geliştirmektir. Bunun için bir ucu ankastre diğer ucu serbest alüminyum esnek bir kiriş sistemi ele alınmıştır. Sistemde tahrik elemanı olarak PZT yamalar, algılayıcı olarak ise lazer konum ölçer kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında KKD tasarımı ve esnek kirişin Euler-Bernoulli ile varsayılmış modlar yöntemi kullanılarak modellenmesi hakkında teorik bilgiler verilmiştir. Daha sonra bu teorik bilgiler çalışmada kullanılan esnek kiriş sistemine uygulanarak, kirişin ilk iki ve ilk üç titreşim modunun dinamik modeli elde edilmiştir. Sistem modelleri temel alınarak KKD tasarımında gerekli olan sistem durum değişkenleri, tasarlanan Luenberger gözlemcisi aracılığı ile elde edilmiştir. Gözlemci tasarımında ölçüm gürültüsünün durum değişkenlerine etkisi de incelenmiştir. Gözlemci kazanç matrisinin seçiminin yüksek yapılması halinde ölçüm gürültüsünün sistem durum değişkenlerinin tahmin edilmesine olumsuz etkidiği, fakat gözlemci kazancının yeteri kadar yüksek seçilmemesi halinde ise durum değişkenlerinin tahmin edilme süresinin arttığı görülmüştür. Sistemin doğal frekansları ve sönüm katsayıları teorik olarak hesaplandığı için olabilecek yanılmalardan dolayı sistemde belirsizlikler olduğu göz önünde bulundurulmuş ve sistem belirsizliklerinin sınırları dikkate alınarak ayrıca KKD tasarımı yapılmıştır. Yapılan tüm çalışmaların bilgisayar ortamında MATLAB paket programı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçlarından tasarlanan KKD'lerin kiriş titreşimini kısa sürede sönümleyebildiği görülmüştür. Fakat belirsizlik içeren sisteme, sistemdeki belirsizlikler dikkate alınmadan tasarlanan KKD uygulandığında, denetçinin kötü sonuç verdiği kirişin titreşimini tam olarak sönümleyemediği görülmüştür.

Elde edilen benzetim sonuçları Ortadoğu Teknik Üniversitesi Havacılık Mühendisliği Bölümü titreşim laboratuarında bulunan test düzeneği üzerinde imkanlar dahilinde uygulanabilmiştir. Test düzeneğinin başka ekipler tarafında da kullanılması ve test düzeneği sorumlusunun sınırlı zamanı olması, elde edilen

benzetim sonuçlarından kirişin ilk iki titreşim modu için tasarlanan KKD'nin deneysel olarak sisteme uygulanmasına olanak tanımıştır.

Benzetim sonuçlarının deneysel sisteme uygulanabilmesi için veri toplama ve denetim algoritmasını içeren C dilinde yazılmış bir program kullanılmıştır. C programına veri girişini ve programın çıkışını sisteme Sensor Tech SS10 dört kanallı programlanabilir denetçi sistemi sağlamıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda elde edilen verilerin benzetim çalışmalarıyla örtüştüğü gözlemlenmiştir. Tasarlanan KKD, kirişin ilk iki modunun titreşimini kısa bir sürede sönümleyebilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak kirişe verilen yüksek genlikli deplasmana rağmen KKD'nin kirişin ilk iki titreşim modunun kontrolunda etkili bir performans sergilediği söylenebilir.

Esnek sistemlerin titreşimleri ve kontrolu çok geniş kapsamlı bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Çalışmanın ileri aşamalarında yapılabilecek çok farklı işlemler bulunmaktadır. Bu çalışmada uygulanamamış olan sistem modelindeki uyum koşulu tipi belirsizlik olması durumunda tasarlanan KKD denetçi deneysel olarak kirişe uygulanabilir. Bunun yanında sistemdeki belirsizliklerin uyum koşulu tipi olmadığı durum da ayrıca ele alınabilir. Sistemin içerdiği belirsizliklerin uyum koşulu tipi olmaması durumunda KKD tasarımı doğrusal matris eşitsizliği (Linear Matrix Inequality, LMI) yöntemi kullanılarak yapılabilmektedir.

Bu çalışmada sistemin durum değişkenlerinin elde edilmesi için gözlemci tasarlanmıştır. Gözlemci tasarımında geri belseme sinyali olarak sadece lazer konum ölçer ile elde edilen kirişin uç noktasının deplasmanı kullanılmıştır. Bu yöntem düşük frekanslı titreşim modları için uygundur. Fakat yüksek frekanslı yani daha üst seviye titreşim modları ile çalışmayı gerektiren uygulamalarda sadece kirişin uç noktasının ölçülerek durum değişkenlerinin elde edilmesi hatalara sebep olacaktır. Bunun için ileriki çalışmalarda algılayıcı olarak PZT algılayıcılar kullanılabilir. PZT algılayıcılar sayesinde sistemin yüksek frekanslı titreşim modlarının durum değişkenleri daha doğru şekilde elde edilebilir. Fakat bu yöntemin dezavantajı ise oldukça pahalı sistemler gerektirmesidir.

Çalışmada kullanılan Euler-Bernoulli ve varsayılmış modlar yöntemi ile sistem modeli elde edilirken yapılan kabuller sonucunda doğrusal bir sistem modeli elde edilmiştir. İleriki çalışmalarda kiriş ve tahrik elemanlarının doğrusal olmayan modelleri elde edilerek oluşturulan doğrusal olmayan sistem modeline farklı denetim teknikleri uygulanabilir. Ya da son zamanlarda araştırmacıların büyük ilgi duyduğu sistemin kısmı diferansiyel denklemler durumundaki modelini kullanarak sisteme denetçi tasarımı üzerine çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Petersen, I. R., Pota, H. R., "Minimax LQG optimal control of a flexible System", ***Control Engineering Practice***, 11: 1273-1287 (2003).

2. Pota, H. R., Moheimani, S. O. R., Smith, M., "Resonant controllers for smart structures", ***Smart Materials and Structures***, 11: 1-8 (2002).

3. Choi, S. B., Cho, S. S., Park, Y. P., "Vibration and position tracking control of piezoceramic-based smart structures via QFT", ***Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control***, 121: 27-33 (1999).

4. Kim, H. K., Choi, S. B. and Thompson, B. S., "Compliant control of two link flexible manipulator featuring piezoelectric actuators", ***Mechanism and Machine Theory***, 36: 411-424 (2001).

5. Shin, H. C. and Choi, S. B., "Position control of two link flexible manipulator featuring piezoelectric actuators and sensors", ***Mechatronics***, 11: 707-729 (2001).

6. Choi, S. B. and Cheon, J. W., "Vibration control of a single-link flexible arm subjected to disturbances", ***Journal of Sound and Vibration***, 271: 1147-1156 (2004).

7. Li, D., Zu, J. W. and Goldenberg, A. A., "Dynamic modeling and mode analysis of flexible-link, flexible joint robots", ***Mechanisims and Machine Theory***, 33(7): 1031-1044 (1998).

8. Fung, E. H. K., Lee, C. K. M., "Variable structure tracking control of a single – link flexible arm using time-varying sliding surface", ***Journal of Robotic Systems***, 16(12): 715-726 (1999).

9. Öke, G. and Istefanapulos, Y., "Tip position control of a two-link flexible robot based on nonlinear deflection feedback", ***Chaos, Solutions and Fractals***, 17: 499-504 (2003).

10. Liu, Z., Jalili, N., Dadfarnia, M., Dawson, D. M., "A reduced order observer based piezoelectric control of flexible cartesian (scara) robot manipulator", ***ASME Proceedings of IMECE*** , New Orleans, 98-104 (2002).

11. Takigami, T., Oshima, K. and Hayakawa Y., "Application of self-sensing actuator to control of a cantilever beam", ***Proceedings of the American Control Conference*,** New Mexico, 1867-1872 (1997).

12. Park, C. H., "Dynamics modeling of beams with shunted piezoelectric elements", ***Journal of Sound and Vibration***, 268: 115-129 (2003).

13. Zhou, Y. H. and Wang, J., "Vibration control of piezoelectric beam-type plates with geometrically nonlinear deformation", ***Int. Journal of Non-linear Mechanics***, 39: 909-920 (2004).

14. Wang, D. A., Huang, Y. M., "Modal space vibration control of a beam by using the feedforward and feedback control loops", ***Int. Journal of Mechanical Sciences***, 44: 1-19 (2002).

15. Wang, D. A., Huang, Y. M., " Application of discrete-time variable structure control in the vibration reduction of a flexible structure", ***Journal of Sound and Vibration***, 261: 483-501 (2003).

16. Bona, B., Indri, M. and Tornambe, A., "Flexible piezoelectric structures-approximate motion equations and control algorithms", ***IEEE Transactions on Automatic Control***, 42(1): 94-101 (1997).

17. Lara, A., Bruch, Jr., Sloss, J. M., Sadek, I. S., Adali, S., "Vibration damping in beams via piezo actuation using optimal boundary control" ***International Journal of Solids and Structures***, 37: 6537-6554 (2000).

18. Sinha, A., Pai, M. C., "sliding mode control of vibration in a flexible structure via estimated states and H_∞/μ techniques", ***Proceedings of the American Control Conference***, 1118-1123 (2000).

19. Gaudenzi, P., Carbonaro, R., Benzi, E., "Control of beam vibrations by means of piezoelectric devices: theory and experiments", ***Composite Structures***, 50: 373-379 (2000).

20. Ülker, F. D., "Active vibration control of smart structures", Yüksek Lisans Tezi, ***ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 48-60 (2003).

21. Ge, S. S., Lee, T. H., Zhu, G., Hong, F., "Variable structure control of a distributed parameter flexible beam", ***Journal of Robotic Systems***, 18(1): 17-27, (2001).

22. Cavallo, A., Maria, G. D., Setola, R., "A sliding manifold approach for vibration reduction of flexible systems", ***Automatica***, 35: 1689-1696 (1999).

23. Itkis, U., "Control Systems of Variable Structure", ***Wiley***, Newyork, (1976).

24. Utkin, V. I., "Variable structure systems with sliding modes", ***IEEE Transactions on Automatic Control***, 22(2): 212-222 (1977).

25. Slotine, J. J. E. and Sastry, S. S., "Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with applications to robot manipulators", ***Int. J. Control***, 39(2): 382-394 (1983).

26. Slotine, J. J. E., "Sliding controller design for nonlinear systems", ***Int. J. Control***, 40(2): 421-434 (1984).

27. Slotine, J. J. E., Hedrick, J. K. and Misava, E. A., "On sliding mode observers", ***A.S.M.E. Journal of Dyn. Sys., Meas. and Cont.***, 109(3): 245-252 (1986).

28. Zinober, A. S. I. and Dorling, C. M., "Hyperplane Design and CAD of Variable Structure Control Systems", ***Peter Peregrinus***, Stevenage UK., 52-75 (1990).

29. Slotine, J. J. E. and Coetsee, J. A., "Adaptive sliding controller synthesis for nonlinear systems", ***Int. J. Control***, 43(6): 1186-1198 (1986).

30. Young, K. D., Özgüner, Ü., "Sliding-mode design for robust linear optimal control", ***Automatica***, 33(7): 1313-1323 (1997).

31. Decarlo, R. A., Zak, S. H., Matthews, G. P., "Variable structure control of nonlinear multivariable systems", ***Proceedings of IEEE***, 76(3): 212-232 (1988).

32. Salamci, M. U., "Two new switching surface design techniques for nonlinear systems with their applications to missile control" Doktora Tezi, ***ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 11-50 (1999).

33. Salamcı, M. U., Özgören, K. and Banks, S. P., "Sliding Mode Control with Optimal Sliding Surfaces for a Missile Autopilot Design", ***AIAA J. of Guid., Cont. and Dyn.***, 23(4): 719-727 (2000).

34. Banks, S. P., Salamcı, M. U. and McCaffrey, D. "Non-local stabilization of nonlinear systems using switching manifolds", ***Int. Journal of System Science***, 31(2): 243-254 (2000).

35. Slotine J. J and Li, W., "Applied Nonlinear Control", ***Prentice Hall***, Englewood Cliffs NJ, 276-294 (1984).

36. Utkin, V. I., "Sliding Modes in Control and Optimization", ***Springer Verlag***, Berlin, 46-125 (1992).

37. Spurgeon, S. K., Edwards, C., "Sliding Mode Control: Theory and Applications", ***Taylor& Francis***, London, 23-87 (1998).

38. Perruquetti, W. and Barbot, J. P., "Sliding Mode Control in Engineering", ***Marcel&Dekker***, Newyork, 118-145 (2002).

39. Dazzo, J. J. and Houpis, C. H., "Linear Control System Design", ***Mc Graw Hill***, 2nd Ed., Ohio USA, 530-534 (1981).

40. Warburton, G. B., "The Dynamical Behaviour of Structures", ***Pergamon***, Oxford, 79-121 (1964).

41. Koma, Y. A., "Active vibration control of smart structures using piezoelements", Doktora Tezi, ***Faculty of Graduate Studies and Research Carleton University***, Ontario, 23-65 (1997).

42. Grognard, F., Sepulchre, R. and Bastin, G. "Improving the performance of low-gain designs for bounded control of linear systems", ***Automatica*****,** 38: 1777-1782 (2002).

43. Lin, Z. "Global control of linear systems with saturating actuators", ***Automatica***, 34(7): 897-905 (1998).

44. Saberi, A., Lin, Z. and Teel, A., "Control of linear systems with saturating actuators", ***IEEE Transactions on Automatic Control***, 41(3): 368-378 (1996).

45. İtik, M., Salamcı, M. U., "Kayan kipli denetim ile esnek bir sistemin titreşim kontrolu", ***12. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu***, Kayseri, 409-414 (2005).

46. İtik, M., Salamcı, M. U., Ülker, F. D., "Vibration supression of an elastic beam via sliding mode control", ***Int. Conference on Vibration Problems (ICOVP) Semposium***, İstanbul, Turkey, (2005)

47. İtik, M., Salamcı, M. U., Ülker, F. D. and Yaman, Y., "Active vibration suppression of a flexible beam via sliding mode and H_∞ control", ***IEEE International Conference on Control Applications***, Sevilla, Spain, (2005)

48. Four-Channel Programmable Controller User Manual, ***Sensor Technology Limited*****,** Ontario, Canada, (2002).

EKLER

EK-1 Sistem Modelinin Elde Edilmesi İçin Yazılmış Matlab Programı

```
%%%  SİSTEM PARAMETRELERİ  %%%%

tb = 0.002;              % Kiriş kalınlığı
tp = 0.00061;            % PZT kalınlığı
b  = 0.051;              % Kiriş ve PZT genişliği
L  = 0.507-.013;         % Kiriş uzunluğu
l0 = 0.026;              % PZT Başlama konumu
l1 = 0.076;              % PZT Bitiş konumu
rhob = 2840;             % Kiriş malzemesi yoğunluğu (kg/m^3)
rhop = 7730;             % PZT malzemesi yoğunluğu  (kg/m^3)
rhobAb = b*rhob*tb;      % Kirişin birim ağırlığı
Eb = 70e9;               % Kiriş Elastiklik modulü (Pascal)
Ep = 60e9;               % PZT Elastiklik modulü (Pascal)
Ib = b*tb^3/12;          % Kirişin atalet momenti
EIb = Eb*Ib;
EIc = EIb + Ep*Ip;
d31 = -200e-12;          % PZT sabiti m/V
Ca = 1/2*(b*Ep*d31*(tb+tp));

%%% Mode Şekilleri %%%

betL = [1.875 4.694 7.854 10.995 14.1372 17.2787 20.420];  % Karakteristik denk.
%Kökleri %(cosh(betL)+sinh(betL)+1 = 0)
bet1 = betL(1,1)/L;
bet2 = betL(1,2)/L;
bet3 = betL(1,3)/L;
bet4 = betL(1,4)/L;
syms x
% 1. Tireşim modu
ki1=(cosh(bet1*L)+cos(bet1*L))/(sinh(bet1*L)+sin(bet1*L));
```

```
phi1=L*(cosh(bet1*x)-cos(bet1*x)-ki1*(sinh(bet1*x)-sin(bet1*x)));  % 1. mod şekil
%fonk.
dphi1=diff(phi1);  % Mod şekil fonk. türevi

% 2. Titreşim modu
ki2=(cosh(bet2*L)+cos(bet2*L))/(sinh(bet2*L)+sin(bet2*L));
phi2=L*(cosh(bet2*x)-cos(bet2*x)-ki2*(sinh(bet2*x)-sin(bet2*x))); % 2. mod şekil
%fonk.
dphi2=diff(phi2);  % 2. mod şekil fonk. türevi

% 3. Titreşim modu
ki3=(cosh(bet3*L)+cos(bet3*L))/(sinh(bet3*L)+sin(bet3*L));
phi3=L*(cosh(bet3*x)-cos(bet3*x)-ki3*(sinh(bet3*x)-sin(bet3*x)));  % 3. mod şekil
%fonk.
dphi3=diff(phi3); % 3. mod şekil fonk. türevi

% Teorik doğal frekanslar (rad/sn)
w1=(sqrt(Eb*Ib/rhobAb)*bet1^2)%  mod 1
w2=(sqrt(Eb*Ib/rhobAb)*bet2^2)  %  mod 2
w3=(sqrt(Eb*Ib/rhobAb)*bet3^2);  %  mod 3

% Sönüm oranları
zeta1=7.e-3;  %  mod 1
zeta2=7.e-3;  %  mod 2
zeta3=7.e-3;  %  mod 3
%Durum değişkenleri formunda sistem xdot= Ax+Bu  ve  y=Cx
format long
% Matris A
A=  [0 1 0 0 0 0 ;
      -w1^2  -2*zeta1*w1 0 0 0 0  ;
       0  0 0 1 0 0  ;
       0 0 -w2^2  -2*zeta2*w2 0 0  ;
```

```
        0 0 0 0 0 1 ;
        0 0 0 0  -w3^2  -2*zeta3*w3];
%  B matrisi  B=Ca/(rhobAb*L^3)*[dphi1(l0) - dphi1(l1) ; .....]
for x=l0;
   b10=eval(dphi1);
   b20=eval(dphi2);
   b30=eval(dphi3);
end
for x=l1;
   b11=eval(dphi1);
   b21=eval(dphi2);
   b31=eval(dphi3);
end
for x=L;
   c1=eval(phi1);
   c2=eval(phi2);
   c3=eval(phi3);
end

B=Ca/(rhobAb*L^3)*[0; b10-b11; 0 ; b20-b21;  0 ; b30-b31 ]; % Matris B
C=[c1  0  c2  0  c3  0 ]; % Matris C
x0=[0.05;0;0;0;0;0]; % Başlangıç değerleri  x1=0.05
sys = ss(A,B,C,[0]);
initial(sys,x0);  %  5 cm başlangıç deplasmanına verdiği cevap
pause;
bode(sys);     % Sistemin frekans cevabı
```

EK-2 İlk İki Modun Kayan Kipli Denetimi İçin Yazılmış Matlab Programı

```
function xdot1 = kontrol2mod(t,x1);

% Sistem matrisleri
A=1.0e+005 *[0   0.000010    0      0;-0.01705123099232   -0.00000578103907      0
0;0    0    0   0.000010;0   0  -0.66976583554691  -0.00003623176835];
B=[0; 14; 0; 52];
C=[0.9879   0  -0.9879   0];

%Dönüşüm matrisi ve sistem
T=[1 52 4  -14; 2  52  1  -14; 1  104  2  -28; 4   1  2 (1-14)/52];
Atr=T*A*inv(T);
Btr=T*B;
Ctr=C*inv(T);

%Gözlemci kazanç matrisinin seçimi
w=80;
op=[1 2.1*w  3.4*w^2  2.7*w^3 w^4]; % Karakteristik denklem
r=roots(op);
Pobs=[2*r]; % Gözlemcinin Kutupları
L = acker(Atr',Ctr',Pobs); %Gözlemci kazanç matrisi
l1=L(1); l2=L(2); l3=L(3); l4=L(4);

%Gözlemci sistem matrisleri
Aes=Atr-L'*Ctr;
Bes=Btr;
Ces=Ctr;

%Kayma yüzeyi seçimi
A11=Atr(1:3,1:3);
A12=Atr(1:3,4);
```

```
Pred=[-10+175i   -10-175i   -20];  % İndirgenmiş sistemin kutupları
ccs = acker(A11,A12,Pred);
scx=[ccs 1];  %Kayma yüzeyi matrisi
sigm01=scx*[x1(5);x1(6);x1(7);x1(8)];
kc01 = -0.5;% Kayma yüzeyi katsayısı

%Sistem çıkışı
nn = (10e-4)*(sin(2*pi*50*t)+sin(2*pi*120*t)+2*randn(size(t)));
y=Ctr*[x1(1);x1(2);x1(3);x1(4)]+nn;

%Denetçi
coneq=-inv(scx*Btr)*scx*Atr*[x1(5);x1(6);x1(7);x1(8)];
con =coneq+kc01*sign(sigm01);  % total control

% PZT Tahrik elemanı gerilim sınırlaması
if con< -150
  con = -150;
elseif con > 150
       con = 150;
   else
       con = con;
   end
end

%Atr matrisi elemanları

at11=Atr(1,1);  at12=Atr(1,2);  at13=Atr(1,3);  at14=Atr(1,4);
at21=Atr(2,1);  at22=Atr(2,2);  at23=Atr(2,3);  at24=Atr(2,4);
at31=Atr(3,1);  at32=Atr(3,2);  at33=Atr(3,3);  at34=Atr(3,4);
at41=Atr(4,1);  at42=Atr(4,2);  at43=Atr(4,3);  at44=Atr(4,4);
 %Aes matrisi elemanları
a11=Aes(1,1);  a12=Aes(1,2);  a13=Aes(1,3);  a14=Aes(1,4);
```

```
a21=Aes(2,1);  a22=Aes(2,2);  a23=Aes(2,3);  a24=Aes(2,4);
a31=Aes(3,1);  a32=Aes(3,2);  a33=Aes(3,3);  a34=Aes(3,4);
a41=Aes(4,1);  a42=Aes(4,2);  a43=Aes(4,3);  a44=Aes(4,4);

%Sistem diferansiyel denklemi
xdot1 =[at11*x1(1)+at12*x1(2)+at13*x1(3)+at14*x1(4)
      at21*x1(1)+at22*x1(2)+at23*x1(3)+at24*x1(4)
      at31*x1(1)+at32*x1(2)+at33*x1(3)+at34*x1(4)
      at41*x1(1)+at42*x1(2)+at43*x1(3)+at44*x1(4)+con
      a11*x1(5)+a12*x1(6)+a13*x1(7)+a14*x1(8)+l1*y+nn
      a21*x1(5)+a22*x1(6)+a23*x1(7)+a24*x1(8)+l2*y+nn
      a31*x1(5)+a32*x1(6)+a33*x1(7)+a34*x1(8)+l3*y+nn
      a41*x1(5)+a42*x1(6)+a43*x1(7)+a44*x1(8)+l4*y+nn+con];

clear

t = 0:0.001:5;  % Başlangıç, artış aralığı ve bitiş süresi

% Başlangıç Değerleri
z01 =0.05; z02 = 0; z03 = 0; z04 = 0;
x05 = 0; x06 = 0; x07 = 0; x08 = 0;

T=[1 52 4  -14; 2  52  1  -14; 1  104  2  -28; 4   1  2 (1-14)/52];
x00=T*[z01;z01;z03;z04];
x0 = [x00; x05 ; x06; x07; x08];

% Diferansiyel denklemin nümerik çözümü

[x]= ode4('Kontrol2mod',t,x0);
x1 = x(:,1);
x2 = x(:,2);
x3 = x(:,3);
```

```
x4 = x(:,4);
x5 = x(:,5);
x6 = x(:,6);
x7 = x(:,7);
x8 = x(:,8);

%Sistem parametreleri
A=1.0e+005 *[0   0.000010    0      0;-0.01705123099232   -0.00000578103907      0
0;0    0    0   0.000010;0   0  -0.66976583554691  -0.00003623176835];
B=[0; 14; 0; 52];
C=[0.9879   0  -0.9879   0];
Atr=T*A*inv(T);
Btr=T*B;
Ctr=C*inv(T);
A11=Atr(1:3,1:3);
A12=Atr(1:3,4);
Pred=[-5+175i   -5-175i   -20];
ccs = acker(A11,A12,Pred);
scx=[ccs 1];
kc01 = -0.5;

for i= 1:length(t)
   sigm1(i)=scx*inv(T)*[x5(i);x6(i);x7(i);x8(i)];
   coneq(i)=-inv(scx*Btr)*scx*Atr*inv(T)*[x5(i);x6(i);x7(i);x8(i)];  % Eşdeğerleyen
denetçi
   con(i)=coneq(i)+kc01*sign(sigm1(i));   % Toplam denetçi
   nn(i) = (3*10e-5)*(sin(2*pi*50*t(i))+sin(2*pi*120*t(i))+2*randn(size(t(i))));
   yy(i) = Ctr*[x1(i);x2(i);x3(i);x4(i)]+nn(i);  % Çıkış
   yes(i)= Ctr * [x5(i);x6(i);x7(i);x8(i)]; % Gözlemci çıkışı

if con(i)< -150
  con(i) = -150;
```

```
 elseif con(i) > 150
     con(i) = 150;
 else
     con(i) = con(i);
 end
end
end

plot(t,con);
legend('Denetim');
pause;
plot(t,sigm1);
legend('Kayma Yüzeyi');
pause;
plot(t,yy,t,yes);
legend('y -yest');
pause;
```

EK-3 İlk Üç Modun Kayan Kipli Denetimi İçin Yazılmış Matlab Programı

```
function xdot1 = Kontrol3mod(t,x1);

%Sistem matrisleri
A=1.0e+005 *[0  0.000010   0   0   0   0;-0.01705123099232  -0.00000578103907
0      0      0      0;0      0      0   0.000010   0      0;0      0  -0.66976583554691  -
0.00003623176835      0      0;  0   0      0      0      0   0.00001;  0   0      0   0  -
5.24945524329594  -0.00010143437424];
B=[0 ;14; 0; 52; 0; 60.4];
C=[0.9879   0  -0.9879   0   0.9879   0];

%Dönüşüm matrisi ve sistem
T=[2 1/14  1  1/52  2  -2/60.4; 2   4/14  2  3/52  1  -7/60.4;  2  2/14  1  2/52  3  -4/60.4
; 4  1/14  2  3/52  1  -4/60.4; 3  2/14  4   4/52  2  -6/60.4; 1  3/14  1  3/52  1  -5/60.4];
Atr=T*A*inv(T);
Btr=T*B;
Ctr=C*inv(T);

%Gözlemci kazanç matrisinin seçimi
w=175;
op=[1 3.25*w 6.60*w^2 8.60*w^3 7.45*w^4 3.95*w^5 w^6];
r=roots(op);
Pobs=[2*r];
L = acker(Atr',Ctr',Pobs); %Gözlemci kazanç matrisi
l1=L(1); l2=L(2); l3=L(3); l4=L(4); l5=L(5);  l6=L(6);

%Gözlemci sistem
Aes=Atr-L'*Ctr;
Bes=Btr;
Ces=Ctr;
%Kayma yüzeyinin seçimi
```

```
A11=Atr(1:5,1:5);
A12=Atr(1:5,6);
Pred=[-3+800i  -3-800i  -2+100i  -2-100i  -50];  %İndirgenmiş sistemin kutupları
ccs = acker(A11,A12,Pred);
scx=[ccs 1];  %Kayma yüzeyi matrisi
sigm01=scx*[x1(7);x1(8);x1(9);x1(10);x1(11);x1(12)];
kc01 = -1;

%Sistem çıkışı
nn = (3*10e-5)*(sin(2*pi*50*t)+sin(2*pi*120*t)+2*randn(size(t)));
y=Ctr*[x1(1);x1(2);x1(3);x1(4);x1(5);x1(6)]+nn;

%Denetçi
coneq=-inv(scx*Btr)*scx*Atr*[x1(7);x1(8);x1(9);x1(10);x1(11);x1(12)];
con =coneq+kc01*sign(sigm01));  %Toplam Denetçi

% PZT tahrik elemanlarındaki gerilim sınırlaması
if con< -150
  con = -150;
elseif con > 150
       con = 150;
   else
       con = con;
   end
end

%Atr
at11=Atr(1,1);    at12=Atr(1,2);    at13=Atr(1,3);    at14=Atr(1,4);      at15=Atr(1,5);
at16=Atr(1,6);
at21=Atr(2,1);    at22=Atr(2,2);    at23=Atr(2,3);    at24=Atr(2,4);      at25=Atr(2,5);
at26=Atr(2,6);
```

```
at31=Atr(3,1);  at32=Atr(3,2);  at33=Atr(3,3);  at34=Atr(3,4);  at35=Atr(3,5);
at36=Atr(3,6);
at41=Atr(4,1);  at42=Atr(4,2);  at43=Atr(4,3);  at44=Atr(4,4);  at45=Atr(4,5);
at46=Atr(4,6);
at51=Atr(5,1);  at52=Atr(5,2);  at53=Atr(5,3);  at54=Atr(5,4);  at55=Atr(5,5);
at56=Atr(5,6);
at61=Atr(6,1);  at62=Atr(6,2);  at63=Atr(6,3);  at64=Atr(6,4);  at65=Atr(6,5);
at66=Atr(6,6);

%Aes=A-L*C
a11=Aes(1,1);  a12=Aes(1,2);  a13=Aes(1,3);  a14=Aes(1,4);  a15=Aes(1,5);
a16=Aes(1,6);
a21=Aes(2,1);  a22=Aes(2,2);  a23=Aes(2,3);  a24=Aes(2,4);  a25=Aes(2,5);
a26=Aes(2,6);
a31=Aes(3,1);  a32=Aes(3,2);  a33=Aes(3,3);  a34=Aes(3,4);  a35=Aes(3,5);
a36=Aes(3,6);
a41=Aes(4,1);  a42=Aes(4,2);  a43=Aes(4,3);  a44=Aes(4,4);  a45=Aes(4,5);
a46=Aes(4,6);
a51=Aes(5,1);  a52=Aes(5,2);  a53=Aes(5,3);  a54=Aes(5,4);  a55=Aes(5,5);
a56=Aes(5,6);
a61=Aes(6,1);  a62=Aes(6,2);  a63=Aes(6,3);  a64=Aes(6,4);  a65=Aes(6,5);
a66=Aes(6,6);

%Sistem diferansiyel denklemi
xdot1 =[at11*x1(1)+at12*x1(2)+at13*x1(3)+at14*x1(4)+at15*x1(5)+at16*x1(6)
at21*x1(1)+at22*x1(2)+at23*x1(3)+at24*x1(4)+at25*x1(5)+at26*x1(6)
at31*x1(1)+at32*x1(2)+at33*x1(3)+at34*x1(4)+at35*x1(5)+at36*x1(6)
at41*x1(1)+at42*x1(2)+at43*x1(3)+at44*x1(4)+at45*x1(5)+at46*x1(6)
at51*x1(1)+at52*x1(2)+at53*x1(3)+at54*x1(4)+at55*x1(5)+at56*x1(6)
at61*x1(1)+at62*x1(2)+at63*x1(3)+at64*x1(4)+at65*x1(5)+at66*x1(6)+con
a11*x1(7)+a12*x1(8)+a13*x1(9)+a14*x1(10)+a15*x1(11)+a16*x1(12)+l1*y+nn
a21*x1(7)+a22*x1(8)+a23*x1(9)+a24*x1(10)+a25*x1(11)+a26*x1(12)+l2*y+nn
```

```
a31*x1(7)+a32*x1(8)+a33*x1(9)+a34*x1(10)+a35*x1(11)+a36*x1(12)+l3*y+nn
a41*x1(7)+a42*x1(8)+a43*x1(9)+a44*x1(10)+a45*x1(11)+a46*x1(12)+l4*y+nn
a51*x1(7)+a52*x1(8)+a53*x1(9)+a54*x1(10)+a55*x1(11)+a56*x1(12)+l5*y+nn
a61*x1(7)+a62*x1(8)+a63*x1(9)+a64*x1(10)+a65*x1(11)+a66*x1(12)+l6*y+nn+c
on];

clear

t = 0:0.002:5;  % Başlangıç, artış ve bitiş süresi

% Başlangıç değerleri

x01 =0.05; x02 = 0; x03 = 0; x04 = 0; x05 = 0; x06 = 0;
x07 = 0; x08 = 0; x09 = 0; x010 = 0; x011 = 0; x012 = 0;

T=[2 1/14  1  1/52  2  -2/60.4; 2  4/14  2  3/52  1  -7/60.4;  2  2/14  1  2/52  3  -4/60.4
; 4  1/14  2  3/52  1  -4/60.4; 3  2/14  4  4/52  2  -6/60.4; 1  3/14  1  3/52  1  -5/60.4];

x00=T*[x01 ; x02; x03; x04; x05 ; x06];
x0 = [ x00; x07; x08; x09; x010; x011; x012];

% Diferansiyel denklemin nümerik çözümü
[x]= ode4('Kontrol3mod',t,x0);
x1 = x(:,1);
x2 = x(:,2);
x3 = x(:,3);
x4 = x(:,4);
x5 = x(:,5);
x6 = x(:,6);
x7 = x(:,7);
x8 = x(:,8);
x9 = x(:,9);
```

```
x10 = x(:,10);
x11 = x(:,11);
x12 = x(:,12);

%Sistem matrisleri
A=1.0e+005 *[0  0.000010   0    0   0   0;-0.01705123099232  -0.00000578103907
0      0      0      0;0      0      0    0.000010    0      0;0    0  -0.66976583554691  -
0.00003623176835     0      0;  0    0     0     0     0    0.00001;  0    0     0    0   -
5.24945524329594  -0.00010143437424];
B=[0 ;14; 0; 52; 0; 60.4];
C=[0.9879   0  -0.9879   0   0.9879   0];
Atr=T*A*inv(T);
Btr=T*B;
Ctr=C*inv(T);

% Kayma yüzeyi
A11=Atr(1:5,1:5);
A12=Atr(1:5,6);
Pred=[-3+800i  -3-800i  -2+100i  -2-100i  -50];
ccs = acker(A11,A12,Pred);
scx=[ccs 1];
delt01 = 0.001;
kc01 = -1;

for i= 1:length(t)
   sigm1(i)=scx*inv(T)*[x7(i);x8(i);x9(i); x10(i);x11(i);x12(i)];
   coneq(i)=-inv(scx*Btr)*scx*Atr*inv(T)*[x7(i);x8(i);x9(i);     x10(i);x11(i);x12(i)];
%Eşdeğerleyen denetçi
   con(i)=coneq(i)+kc01*sign(sigm1(i)));   %Toplam denetçi
   nn(i) = (3*10e-5)*(sin(2*pi*50*t(i))+sin(2*pi*120*t(i))+2*randn(size(t(i))));
   yy(i) = Ctr*[x1(i);x2(i);x3(i);x4(i);x5(i);x6(i)]+nn(i);  % Çıkış
   yes(i)= Ctr*[x7(i);x8(i);x9(i); x10(i);x11(i);x12(i)]; % Gözlemci çıkışı
```

```
 if con(i)< -150
  con(i) = -150;
  elseif con(i) > 150
      con(i) = 150;
  else
      con(i) = con(i);
  end
end
end

plot(t,con);
legend('Denetim');
pause;
plot(t,sigm1);
legend('Kayma Yüzeyi');
pause;
plot(t,yy,t,yes);
legend('y -yest');
```

EK- 4 Veri Toplama ve Kontrol İçin Yazılmış C Programı

```
/*============================================================
                Esnek Kiriş Veri Toplama ve Kontrol C Programı
============================================================*/

#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <sys/io.h>
#include <sys/perm.h>
#include <stdlib.h>
#include <termios.h>
#include <unistd.h>
#include <signal.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/stat.h>
#include <fcntl.h>
#include <termios.h>
#include <string.h>
#include <time.h>
#include <math.h>

/****** Register Address, ADC & DAC of SBC0486 ******/

#define CFGINDEX 0x350
#define CFGPORT 0x351
#define ADCDONE 0x352
#define DACPORT 0x353
#define ADC_CONTROL 0x356
#define ADC_DATA_LOWBYTE 0x356
#define ADC_DATA_HIBYTE 0x357
#define HI_CLAMP_PT     4095  /* Çıkış üst limiti*/
#define LO_CLAMP_PT     0     /* Çıkış alt limiti*/
```

```
#define TIME_LIMIT 10
/*#define dt 5./16250.*/
#define dt 30./96570.
/*#define dt 10./19220.*/
/*#define dt 10./14440.*/
#define NAmax 16
#define NImax 8
#define NOmax 4
#define pi 3.14159

void Initialize_IOPort(void);
void Initialize_CFGINDEX_CFGPORT(void);
void Differential(float*, float*, float*, int);
void DAC_Update(int,int);
int ADC_Sample(int);
void Initialize_DAC();
void RungeKutta(float *,float*);
int NA,NO,NI,K;
float A[NAmax][NAmax],L[NAmax][NImax];
float B[NAmax][NImax];
float C[NOmax][NAmax];
float D[NOmax][NImax];
float AD_I[NImax];
float AD_Iold[NImax];
int Port_DAC[NOmax];
int st1[540000],st2[540000],st3[540000],frc[540000],cont_signal[540000];
/*int  freq[540000];*/
float tm[540000],out[540000],state[540000];
```

```
/**** Register Address Sonu, ADC & DAC, SBC0486 ****/

unsigned int DAC_Port = 0x3000;
unsigned int ADC_Port = 0x48;

void AD_DA_test(void);
void Choose_input_channel(void);
void Choose_output_channel(void);
void Show_Channel(void);
long int Cycle_number=0;

/********************* Linux Sinyali ******************/
void SigHandler(int SigNum)
{
        FILE * fp;
        int i;
        float time;
        Initialize_DAC();
        time = Cycle_number*dt;
        printf("Experiment is done! at t= %f ",time);
        printf("\n Writing data to file is done!");
        fp=fopen("fin.txt","wt");
        for(i=0;i<Cycle_number;i++)
        {
        fprintf(fp,"%f %f %f %d \n",tm[i],out[i],state[i],cont_signal[i]);
/*      fprintf(fp,"%d  %d %d \n",st1[i],st2[i],cont_signal[i]);*/
        }
        fclose(fp);
        printf("\n Cycle_number= %ld.", Cycle_number);
        Cycle_number=0;
        Choose_input_channel();
        Choose_output_channel();
```

```
        Show_Channel();
        alarm(TIME_LIMIT); /* Exit if it exceeds certain time */
        printf("\nTest will last 120 seconds!\n");
return;
 }

void Choose_input_channel(void)
{
        int ch;
        struct termios old, new;
        tcgetattr(0, &old);
        new = old;
        new.c_lflag &= ~ICANON;
        new.c_cc[VMIN] = 1;
        new.c_cc[VTIME] = 0;
        tcsetattr(0, TCSANOW, &new);

        /*0x48 -- ADC 0;
          0x49 -- ADC 1;
          0x4A -- ADC 2;
          0x4B -- ADC 3;
          0x4C -- ADC 4;
          0x4D -- ADC 5;
          0x4E -- ADC 6;
          0x4F -- ADC 7;*/

/*******  Giriş Kanalı   *******/
        printf("\nInputing 'n' will end the AD-DA test.");
        printf("\nInput the Channel Number of STRAIN GAUGE INPUT or n:");

     do {
        ch = getchar();
```

```
        printf("\n Your INPUT is : %c\n", ch);

       }while((ch != '1') && (ch != '2') && (ch != '3') && (ch != '4')
          && (ch != '5') && (ch != '6') && (ch != '7') && (ch != '8') && (ch != 'n'));

    if(ch == '1') ADC_Port = 0x48;
    else if(ch == '2') ADC_Port = 0x49;
    else if(ch == '3') ADC_Port = 0x4A;
    else if(ch == '4') ADC_Port = 0x4B;
    else if(ch == '5') ADC_Port = 0x4C;
    else if(ch == '6') ADC_Port = 0x4D;
    else if(ch == '7') ADC_Port = 0x4E;
    else if(ch == '8') ADC_Port = 0x4F;
    else if(ch == 'n')
        {
                tcsetattr(0, TCSANOW, &old);
          exit(EXIT_SUCCESS);
        }
        tcsetattr(0, TCSANOW, &old);
}
void Choose_output_channel(void)
{
        int ch;
        struct termios old, new;
        tcgetattr(0, &old);
        new = old;
        new.c_lflag &= ~ICANON;
        new.c_cc[VMIN] = 1;
        new.c_cc[VTIME] = 0;
        tcsetattr(0, TCSANOW, &new);

        /*0x3000 -- DAC 0
```

```
            0x7000 -- DAC 1
            0x0b000 -- DAC 2
          0x0f000 -- DAC 3*/

/*******   Çıkış Kanalı   *******/

          printf("\nInputing 'n' will end the AD-DA test.");
          printf("\nInput the Channel Number of OUTPUT or n:");
          do {
                    ch = getchar();
                    printf("\n Your INPUT is : %c\n", ch);
          }while((ch != '1') && (ch != '2') && (ch != '3') && (ch != '4') && (ch != 'n'));

       if(ch == '1') DAC_Port = 0x3000;
       else if(ch == '2') DAC_Port = 0x7000;
       else if(ch == '3') DAC_Port = 0xb000;
       else if(ch == '4') DAC_Port = 0xf000;
       else if(ch == 'n')
          {
          tcsetattr(0, TCSANOW, &old);
          exit(EXIT_SUCCESS);
       }

            tcsetattr(0, TCSANOW, &old);

}
void Show_Channel(void)
{
        if (ADC_Port == 0x48) printf("\n Sampling ADC 0 or Strain Gauge Input 1
\n");
    else if (ADC_Port == 0x49) printf("\n Sampling ADC 1 or Strain Gauge Input
2\n");
```

```
    else if (ADC_Port == 0x4A) printf("\n Sampling ADC 2 or Strain Gauge Input
3\n");
    else if (ADC_Port == 0x4B) printf("\n Sampling ADC 3 or Strain Gauge Input
4\n");
    else if (ADC_Port == 0x4C) printf("\n Sampling ADC 4 or Strain Gauge Input
5\n");
    else if (ADC_Port == 0x4D) printf("\n Sampling ADC 5 or Strain Gauge Input 6
\n");
    else if (ADC_Port == 0x4E) printf("\n Sampling ADC 6 or Strain Gauge Input
7\n");
    else if (ADC_Port == 0x4F) printf("\n Sampling ADC 7 or Strain Gauge Input
8\n");
    else printf("\n  ADC-Port address is wrong! \n");

    if (DAC_Port == 0x3000) printf("\n Updating DAC 0 or OUTPUT 1\n");
    else if (DAC_Port == 0x7000) printf("\n Updating DAC 1 or OUTPUT 2\n");
    else if (DAC_Port == 0xb000) printf("\n Updating DAC 2 or OUTPUT 3\n");
    else if (DAC_Port == 0xf000) printf("\n Updating DAC 3 or OUTPUT 4\n");
    else printf("\n  DAC-Port address is wrong! \n");
return;
}
void Register_Signal(void)
{
        if(signal(SIGALRM, SigHandler) == SIG_ERR)
        {
                printf("\nCouldn't register signal handler!\n");
                exit(EXIT_FAILURE);
        }
}
/********************* Linux Sinyali ********************/
int main( void )
{
```

```
        Register_Signal();
        Initialize_IOPort();
        Initialize_CFGINDEX_CFGPORT();
        Initialize_DAC();
        AD_DA_test();
return 0;
}
void Initialize_IOPort()
{
        if((iopl(3)) == -1)
        {
                printf("\nThe iopl(...) is not called rightly!\n");
        exit(EXIT_FAILURE);
        }
        printf("\nInitialize_IOPort()...passed!\n");
}
void Initialize_CFGINDEX_CFGPORT()
{
        unsigned int OriginalState;
        outb(0x00, CFGINDEX);         /*  CFGINDEX Register of SBC0486  */

        OriginalState = inb(CFGPORT);  /*  CFGPORT Register of SBC0486  */

/* LED4 OFF, RS232 for COM1 and COM2 of SBC0486 */

        outb((OriginalState & 0x0f), CFGPORT);

        printf("\nInitialize CFGINDEX & CFGPORT...passed!\n");
        printf("\nLED4 OFF, RS232 for COM1 and COM2 of SBC0486\n");

}
```

```
void Initialize_DAC()
{
        int i;
        /*int Port_DAC[NOmax];
        for(i=0;i<NO;i++)
        {
        Choose_output_channel();
        Port_DAC[i]=DAC_Port;*/
        DAC_Update(2047,Port_DAC[i]); /* DAC SBC0486 = 2.5v, High
Voltage=0v */
}
void AD_DA_test()
{
/*      FILE *fpy;*/
        FILE *fp1;
        FILE *fp2;
        int AD_Input[NImax];
        int DA_OUT [NOmax];
        int i,j,k,s,force,strain[NImax];
        float frq,tmm;
        float u[NOmax],uT[NOmax],u_old[NOmax];
        float x[NAmax],ConU[NOmax][NAmax],ConUT[NOmax][NAmax];
float C[NO][NA];
        float S[NOmax][NAmax],ST[NOmax][NAmax];
        int Port_ADC[NImax];
        int Port_DAC[NOmax];
        float bias[NImax],coef,coefT;
        int bcn,bcmax=1000;
        printf("\nAD-DA test!\n");

/* Sistem Parametreleri ve dosyadan okutma */
        fp1=fopen("dk7m.txt","r");
```

```
   fp2=fopen("xs.txt","a");
   fscanf(fp1,"%d",&NI);
   fscanf(fp1,"%d",&NO);
   fscanf(fp1,"%d",&NA);
   /*fscanf(fp1,"%d",&K);*/

   K=-0.5.;
   for(i=0;i<NA;i++)
 {
            for (j=0;j<NA;j++)
        {
        fscanf(fp1,"%f",&A[i][j]);
             }
 }

for(i=0;i<NA;i++)
 {
        for (j=0;j<NO;j++)
        {
        fscanf(fp1,"%f",&B[i][j]);
             }
 }
   for(i=0;i<NA;i++)
 {
        for (j=0;j<NI;j++)
        {
        fscanf(fp1,"%f",&L[i][j]);
             }
 }

for(i=0;i<NO;i++)
 {
```

```
        for (j=0;j<NA;j++)
        {
        fscanf(fp1,"%f",&S[i][j]);
        }
 }
for(i=0;i<NO;i++)
 {
        for (j=0;j<NA;j++)
        {
        fscanf(fp1,"%f",&ST[i][j]);
        }
 }

   for(i=0;i<NO;i++)
 {
        for (j=0;j<NA;j++)
        {
fscanf(fp1,"%f",&ConU[i][j]);
        }
 }


for(i=0;i<NO;i++)
 {
        for (j=0;j<NA;j++)
        {
fscanf(fp1,"%f",&ConUT[i][j]);
        }
 }

   for(i=0;i<NI+1;i++)
   {
```

```
                Choose_input_channel();
                Port_ADC[i]=ADC_Port;
                AD_Iold[i]=0;
        }

        for(i=0;i<NO;i++)
        {
                Choose_output_channel();
                Port_DAC[i]=DAC_Port;
        }

/*      for(i=0;i<NO;i++)
        {
        for(j=0;j<NA;j++)
        {
      printf("\n A= %f",ConU[i][j]);
        }
        }*/

        Show_Channel();
        Cycle_number=0;
printf("\nTest will last %d seconds!\n",TIME_LIMIT);
/*      alarm(TIME_LIMIT); Exit if it exceeds certain time */
        Initialize_DAC();
/*      fp=fopen("mimodata1.txt","wt");*/
        for(k=0;k<NA;k++)
        {
                x[k]=0.05;
        }

/*C[0][0]=1.;
C[0][1]=0.;
```

```
C[0][2]=1.;
C[0][1]=0.;*/
                x[0]=0.0;
                x[1]=0.0;
                x[2]=0.0;
                x[3]=0.0;
for(i=0;i<NI+1;i++) bias[i]=0;
for(bcn=0;bcn<bcmax;bcn++)
{
                for(i=0;i<NI+1;i++)
                {
                        AD_Input[i] = ADC_Sample(Port_ADC[i]);
                        bias[i]+=AD_Input[i];
                }
}

for(i=0;i<NI+1;i++) bias[i]=bias[i]/bcmax;
printf("bias1= %f bias2=%f",bias[0],bias[1]);

printf("\nENTER 0 TO EXIT 1 TO CONTINUE\n");
scanf("%d",&i);
if(i==0)return;
alarm(TIME_LIMIT);

        for(k=0;k<NO;k++)
        {
                u_old[k]=0;
        }
do {
        for(k=0;k<NO;k++)
        {
                u[k]=0.;
```

```
            uT[k]=0.;
            DA_OUT[k]=0;
        }

        for(i=0;i<NI+1;i++)
        {
            AD_Input[i] = ADC_Sample(Port_ADC[i]);

AD_I[i] = 30.*(AD_Input[i] - bias[i]);*/
/*strain[i]=AD_I[i];*/

        }
        AD_I[0] = (5./100000.)*(AD_Input[0] -bias[0] );
        /*AD_I[0] = (5./100.);*/
        AD_I[1] = (AD_Input[1] - bias[1] );
        AD_I[2] = (AD_Input[2] - bias[2] );

strain[0]=AD_I[0];
strain[1]=AD_I[1];
strain[2]=AD_I[2];

/* Durum değişkenlerinin Elde Edilmesi ve Denetim Girişi Hesaplaması */

RungeKutta(x,u_old);
x[0]=x[0];
x[1]=x[1];
x[2]=x[2];
x[3]=x[3];

        /*      for(j=0;j<NA;j++)
                    {
                y[0]+=C[0][j]*x[j];
```

```
                    }*/
/*printf("\n %f  %f %f %f",AD_I[0],x[0],x[1],x[2]);*/
for(s=0;s<NO;s++)
   {
            coefT = 0.000001;
            coef  = 0.000001;

            for(j=0;j<NA;j++)
              {
            coef+=S[s][j]*x[j];
            coefT+=ST[s][j]*x[j];
            u[s]+=ConU[s][j]*x[j];
            uT[s]+=ConUT[s][j]*x[j];
              }
            /*coef = coef/(abs(coef)+0.0001);
            coefT = coefT/(abs(coefT)+0.00001);*/
                if(coef > 0) coef = +1;
                else if(coef < 0) coef = -1;
                else coef =0;
                if(coefT > 0) coefT = +1;
                else if(coefT < 0) coefT = -1;
                else coefT =0;

                u[s]+=K*coef;
              uT[s]+=K*coefT;

                tmm=Cycle_number*dt;
                DA_OUT[s] = -204.7*uT[s]+2047;

                if(DA_OUT[s] > 4095) DA_OUT[s] = 4095;
                else if(DA_OUT[s] < 0) DA_OUT[s] = 0;
                DAC_Update(DA_OUT[s],Port_DAC[s]);
```

```
                /* if(DA_OUT[s+1] > 4095) DA_OUT[s] = 4095;
                    else if(DA_OUT[s+1] < 0) DA_OUT[s] = 0;
                    DAC_Update(DA_OUT[s+1],Port_DAC[s+1]);*/
}

/*printf("\n uT= %f... x= %f ... u= %f",uT[0],x[2],u[0]);*/
tm[Cycle_number]=AD_I[0];
out[Cycle_number]=u[0];
state[Cycle_number]=x[1];
frc[Cycle_number]=force;
cont_signal[Cycle_number]=DA_OUT[0];
/*freq[Cycle_number]=AD_Input[3];*/
        for(i=0;i<NO;i++) u_old[i]=u[i];
        for(i=0;i<NI+1;i++) AD_Iold[i]=AD_I[i];
        Cycle_number++;
}
while (1);
/*fclose(fpy);*/
 return;
}

void RungeKutta(float x[],float u_old[])

{

int i,idx;
float xp1[NAmax];
float xp2[NAmax];
float xp3[NAmax];
float slp1[NAmax] , slp2[NA] , slp3[NA] , slp4[NA];
float difr[NA];
```

```
/*printf("\n x1= %f...x2= %f... x3= %f x4=%f",x[0],x[1],x[2],x[3]);*/
/*printf("\n u= %f... ",u_old[0]);*/
        idx = 1;
      Differential(x,u_old,difr,idx);
      for(i=0;i<NA;i++)
            {
            slp1[i] = difr[i];
        xp1[i]  = x[i] + slp1[i]*dt/2.;
            }
        idx = 2;
      Differential(xp1,u_old, difr,idx);
      for(i=0;i<NA;i++)
            {
            slp2[i] = difr[i];
        xp2[i]  = x[i] + slp2[i]*dt/2.;
            }
      Differential(xp2, u_old, difr, idx);
      for(i=0;i<NA;i++)
            {
            slp3[i] = difr[i];
        xp3[i]  = x[i] + slp3[i]*dt;
            }
        idx = 3;
      Differential(xp3, u_old, difr,idx);
      for(i=0;i<NA;i++)
            {
            slp4[i] = difr[i];
                  difr[i] = (slp1[i]+2.*(slp2[i]+slp3[i])+slp4[i])/6.;
            x[i]      = x[i] + difr[i]*dt;
            }
```

```
/*printf("\n x1= %f...x2= %f... x3= %f x4=%f",x[0],x[1],x[2],x[3]);*/
return ;
}

void Differential(float x[], float u_old[], float difr[],int inx)

{
int i,j,s;
float sl,y[NOmax];
                for(i=0;i<NI;i++)
                {
                        if(inx == 1) y[i] = AD_Iold[i];
                        if(inx == 2) y[i] = (AD_I[i]+AD_Iold[i])/2.;
                        if(inx == 3) y[i] = AD_I[i];
                }

                for(i=0;i<NA;i++)
        {
                        sl = 0.;
                        for(j=0;j<NA;j++)
                {
                        sl+=A[i][j]*x[j];
                }

                    for(s=0;s<NO;s++)
                     {
                       sl+=B[i][s]*u_old[s];
                        }

                for(s=0;s<NI;s++)
                       {
                        sl+=L[i][s]*y[s];
```

```
                    }
                        difr[i] = sl;
                }

/*printf("\n s1= %f...s2= %f... s3= %f s4=%f",difr[0],difr[1],difr[2],difr[3]);*/

return ;
}

void DAC_Update(int DA_Output,int DAC_Port)
{
        int loop;
        int DACDATA;

/*  0 to 0V; 2047/2048 to 2.5V; 4095 to +5V for DAC of SBC0486 */
/*  Load input register A, all DAC register updated of MAX525  */
/* 0x3000 -- DAC 0
  0x7000 -- DAC 1
  0x0b000 -- DAC 2
  0x0f000 -- DAC 3
*/
        DA_Output = DA_Output | DAC_Port;
        Test_bit = 0x8000;

/************ Send data to D/A serially ***************/

        for(loop = 15; loop >= 0; loop --)
        {
                if(Test_bit & DA_Output) DACDATA = 0x01;
                else DACDATA = 0x00;
                outb((DACDATA | 0x04), DACPORT); /* DACCS = 0; DACCLK =
0 */
```

```
                Test_bit = Test_bit >> 1;
                outb((0x06 | DACDATA), DACPORT); /* DACCS = 0; DACCLK =
1 */
        }
        outb(0x02, DACPORT); /* DACCS = 1; DACCLK = 1 */

 /***************** DAC of SBC0486  end ***************/
```

ÖZGEÇMİŞ

Tez çalışmasını yapan Mehmet İTİK 21.06.1981 tarihinde İzmir'in Tire ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Tire'de tamamladıktan sonra 1998 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2002 yılında Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Şubat 2003 döneminde Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır.