T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ÇUBUK TİTREŞİMLERİNİN PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİLER İLE AKTİF KONTROLÜ

DENİZ SOFU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MAKİNE TEORİSİ VE KONTROL PROGRAMI

DANIŞMAN
DOÇ. DR. SEMİH SEZER

İSTANBUL, 2017

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ÇUBUK TİTREŞİMLERİNİN PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİLER İLE AKTİF KONTROLÜ

Deniz SOFU tarafından hazırlanan tez çalışması 20.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Semih SEZER

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Akademik eğitim ve yüksek lisans sürecimde gösterdiği anlayış ve destek için öncelikle tez danışmanım Doç. Dr. Semih SEZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Üniversitedeki öğretmenlerime, Doç. Dr. Cihan DEMİR'e ve deney aşamasındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Dr. İlkay KURT'a teşekkürlerimi iletirim.

Her zaman yanımda olan aileme, kardeşim ENİS, kuzenim YÜCEL ve YUUKO'ya içten teşekkür ederim.

Aralık, 2017

Deniz SOFU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xv

ÖZET xvi

ABSTRACT xviii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Orjinal Katkı 7

BÖLÜM 2

PİEZOELEKTRİK MALZEMELER VE AKILLI YAPILAR 8

2.1 Piezoelektriğin Tarihçesi 8
2.2 Akıllı Malzemeler ve Akıllı Yapılar 10
2.3 Akıllı Yapıların Bileşenleri 12
2.3.1 Aktüatörler 12
2.3.1.1 Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA) 12
2.3.1.2 Magnetostriktif Malzemeler (MS) 13
2.3.1.3 Magnetoreolojik Malzemeler (MR) 14
2.3.1.4 Piroelektrik Malzemeler 14
Yaygın Piroelektrik Malzemeler 14
2.3.1.5 Piezoelektrik Malzemeler 15
2.3.2 Sensörler 18
2.3.3 Kontrol Sistemleri 19
2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri 19

2.5 Elektrik, Mekanik ve Termal Sistemler Arasındaki Etkileşim 21
2.6 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları 21
2.6.1 Piezoelektrik Malzemelerin Uygulamaları 25

BÖLÜM 3

AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ 26

3.1 Titreşim 26
3.1.1 Titreşim Türleri 26
3.1.2 Titreşim Analizi 27
3.1.2.1 Titreşimlerin Sınıflandırılması 28
3.2 Kontrol Teorisi 30
3.2.1 PID kontrolcü teorisi 33
3.2.1.1 PID kontrolcü bileşenleri 35
3.2.1.2 PID parametre etkisi 35
3.2.2 Bulanık Mantık Kontrol 36
3.3 Titreşim Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması 40
3.4 Aktif Titreşim Kontrolü 41
3.4.1 Akıllı Yapılarda Aktif Titreşim Kontrolü 41
3.4.2 İki Serbestlik Dereceli Sistemin Analitik Çözümü 41

BÖLÜM 4

ANKASTRE KİRİŞ TİTREŞİMLERİ VE MODELLEMESİ 44

4.1 Ankastre Kirişlerde Eğilme Titreşimleri 45
4.1.1 Kirişin Titreşim Denklemi 49
4.2 Akıllı Kirişin Modellenmesi 50
4.2.1 Piezoelektrik Aktüatör Modeli 51
4.2.2 Piezoelektrik Sensör Modeli 52
4.2.3 Aktüatör İle Transfer Fonksiyonunun Elde Edilmesi 52
4.2.4 Aktüatör-Sensör İle Transfer Fonksiyonunun Elde Edilmesi 53
4.3 Durum-Uzay Analizi 55
4.3.1 Ankastre Kirişin Durum Uzayı Denklemleri 55
4.3.2 Piezoelektrik Aktüatörün Uyguladığı Kuvvetin Belirlenmesi 58
4.3.3 Tüm Modları Kapsayan Durum Uzayı Denklemi Yapısı 61
4.3.4 Bozucu Girişin Modele Eklenmesi 61
4.4 Ankastre Kirişin Mod Şekilleri 63
4.4.1 Teorik Mod Analizi 63
4.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ile Modal Analiz 64
4.5 Teorik Modelleme 65
4.5.1 Transfer Fonksiyonu ile Matlab/Simulink Modeli (1) 66
4.5.2 Durum-Uzay Denklemleri ile Modeli (2) 67
4.5.2.1 Rezonans durumu 71
4.5.3 Durum-Uzay Denklemlerinin ANSYS ile Elde Edildiği Model (3) 71
4.5.3.1 1. Mod Rezonans Durumu 76
4.5.3.2 2. Mod Rezonans Durumu 79

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA 80

5.1 Deney Sisteminin Hazırlanması 80
5.1.1 Piezoelektrik Yamaların Kiriş Üzerine Yapıştırılması 80
5.1.2 Bilgisayar Bağlantıları 83
5.2 Bulanık Mantık PID Kontrolcü Tasarımı 85
5.2.1 Lineer Bulanık Mantık PID Kontrolcü 87
5.2.2 Nonlineer Kontrol Yüzeyli Bulanık Mantık PID Kontrolcü 88
5.3 Deney Metodolojisi 90
5.3.1 Serbest Titreşim (1) 93
5.3.2 Sinyal Üretici İle Zorlanmış Titreşim (2) 97
5.3.3 Rezonans + Serbest Titreşim (3) 102
5.4 Uç Kısmına Ağırlık/Mıknatıs Eklenmesi (4) 106
5.5 Parametre Değişikliği İle Deneyin İlerletilmesi 112
5.5.1 Mesnet uzaklığının 15mm olması durumu 113
5.5.2 Mesnet uzaklığının 10mm olması durumu 116
5.5.3 Mesnet uzaklığının 5 mm olması durumu 119
5.5.4 Serbest Titreşimde K_P Parametre Değişikliği Etkisi 122
5.5.5 Zorlanmış Titreşim Kontrolünde Kontrolcülerin Karşılaştırılması 124
5.6 K_P Parametre Değişikliği İle Sonuç Grafikleri 126
5.7 Sonuç Karşılaştırma Çizelgeleri 128

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER 131

KAYNAKLAR 134

EK-A

PİEZOELEKTRİK MALZEME VERİ DÖNÜŞÜMLERİ 140

A-1 Genel Bilgiler 140
A-2 Rijitlik/Uyumluluk Matrisi 142
A-3 Elektrik Yüklenebilirlik Matrisi 145
A-4 Yoğunluk Girdisi 146
A-5 Piezoelektrik Sabit Matrisi 146

EK-B

ANSYS PARAMETRİK TASARIM DİLİ İLE AKILLI KİRİŞİN MODELLENMESİ 148

EK-C

BAŞARISIZ OLAN DENEMELER 150

EK-D

MATLAB/SİMULİNK MODELLERİ 151

EK-E

İKİNCİ AKTÜATÖR İLE KONTROL..... 152
ÖZGEÇMİŞ..... 154

SİMGE LİSTESİ

A_b	Kirişin kesit alanı
A_n	Sistem matrisi (Durum-uzay)
B_n	Giriş matrisi
b_a	Aktüatörün genişliği
b_s	Sensörün genişliği
C_n	Çıkış matrisi
C_a	Piezoelektrik aktüatör için moment-gerilim oranı sabiti
C_s	Piezoelektrik sensörün birim alanı için kapasitans
D_n	Doğrudan iletim matrisi
d_{31}	Piezoelektrik yük sabit (İsotropik düzlemde)
e_{31}	Piezoelektrik sabiti
E_b	Kiriş malzemesinin elastik modülü
E_a	Aktüatörün elastisite modülü
$f(t)$	Sistem üzerine uygulanan dış kuvvet
g_{31}	Voltaj sabiti
h_b	Kirişin kalınlığı
h_a	Aktüatörün kalınlığı
H	Heaviside fonksiyonu
I_b	Kirişin eğilme atalet momenti
K_P	Oransal kazanç katsayısı
K_I	İntegral kazancı katsayısı
K_D	Türevsel kazanç katsayısı
k_{31}	Eşleşme katsayısı
k_a	Piezoelektrik aktüatör sabiti
L	Kirişin uzunluğu
m	Kütle
M_a	Kiriş üzerine etkiyen eğilme momenti
$Q_s(t)$	Piezoelektrik sensörün elektrik yükü
$q_a(x,t)$	Toplam yayılı yük
R	Genelleştirilmiş konum fonksiyonu
s^E	Piezoelektrik malzemenin katılığı
V_a	Piezoelektrik yamaya uygulanan gerilim
v	Poisson oranı

w	Kirişin çökme yer değiştirmesi
x_a	Aktüatörün konumu
x_s	Sensörün konumu
α	Rayleigh sönüm katsayısı
β	Rayleigh sönüm katsayısı
$\Delta c_p(t)$	Piezoelektrik aktüatörün histerisis genliği
$\varepsilon_c(x,t)$	Sensördeki gerinim
ψ_n	Mod şekil fonksiyonu
ζ	Sönüm oranı
$\eta_n(t)$	Genelleştirilmiş yer değiştirme
ρ_b	Kiriş malzemesinin yoğunluğu
ω	Doğal frekans

KISALTMA LİSTESİ

ADC	Analog-to-Digital Converter
APC	American Piezo Ceramics
APDL	ANSYS Parametric Design Language
BMK	Bulanık Mantık Kontrol
BT	Barium Titanate
CM	Condition Monitoring
DAC	Digital-to-Analog Converter
DAQ	Data Acquisition
DSP	Digital Signal Processor
ER	Electrorheological
ES	Electro-strictive
FE	Finite-Element
LQG	Linear Quadratic Gaussian
LTI	Linear Time Invariant
PdM	Predictive Maintenance
PMN	Lead Magnesium Niobate
PT	Kursun Titanat
PVDF	Polyvinylidene Fluoride
PVF_2	Polyvinylidene DiFluoride = PVDF
PZN	Kurşun Çinko Niobat
PZT	Lead Zirconate Titanate = Kurşun Zirkonat Titanat
MR	Magnetorheological
MS	Magneto-strictive
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SMA	Shape Memory

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Şematik olarak akıllı yapılar 10
Şekil 2. 2 Akıllı yapı 11
Şekil 2. 3 Piezoelektrik etki (a) Mekanik basma gerilmesi altında; (b) Mekanik çekme gerilimi altında oluşan voltaj 15
Şekil 2. 4 Ters piezoelektrik etki (a) (b) Uygulanan elektrik alanın yönüne göre oluşan şekil değiştirme 15
Şekil 2. 5 Elektrik dipollerin şematik gösterilişi: (a) Polarizasyon öncesi (b) polarizasyon anında (c) polarizasyon sonrası [11] 20
Şekil 2. 6 Elektrik, mekanik ve termal sistemler arasındaki etkileşim [1] 21
Şekil 3. 1 Tek serbestlik dereceli basit bir sistem [11] 27
Şekil 3. 2 (a) Açık çevrim kontrol sistemi (b) Kapalı çevrim kontrol sistemi 31
Şekil 3. 3 Kapalı çevrim sistemin blok diyagramı [61] 32
Şekil 3. 4 (a) Basit bir PID kontrol sistemi (b) Sistemin blok diyagramı [61] 34
Şekil 3. 5 Bulanık mantık sisteminin genel durum gösterimi (sol) ve örneği (sağ) 37
Şekil 3. 6 Bir bulanık sistemin içyapısı [67] 37
Şekil 3. 7 Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları: a) Monotonik, b) Sigmoid, c) Üçgensel, d) Yamuk, e) Gasuss eğrisi 38
Şekil 3. 8 Ağırlık merkezi yöntemi ile netleştirme [67] 40
Şekil 3. 9 Titreşim kontrol sistemleri [69] 40
Şekil 3. 10 (a) İki serbestlik dereceli sistem ve (b) kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı 42
Şekil 4. 1 Üniform ankastre kiriş [11] 44
Şekil 4. 2 Euler-Bernoulli kiriş modeli [11] 45
Şekil 4. 3 Theta'nın grafiksel olarak çözümü 48
Şekil 4. 4 Piezoelektrik sensör ve aktüatör yapıştırılmış ankastre kiriş 50
Şekil 4. 5 Piezoelektrik aktüatör modeli – eğilme momenti 51
Şekil 4. 6 Piezoelektrik yama yapıştırılmış ankastre kiriş modeli [41] 56
Şekil 4. 7 Piezoelektrik aktüatörün boyutları [41] 57
Şekil 4. 8 Piezoelektrik yama modeli [41] 59
Şekil 4. 9 Modele bozucu girişin ilave edilmesi [41] 62
Şekil 4. 10 Ankastre kirişin normalize edilmiş mod şekilleri 63
Şekil 4. 11 Ankastre kirişin PZT'li eğilme mod şekilleri 64
Şekil 4. 12 Teorik modelleme yöntemi 65

Şekil 4. 13 Akıllı kirişin açık çevrim Simulink modeli 66
Şekil 4. 14 Kiriş modelinin açık çevrim cevabı 66
Şekil 4. 15 Akıllı kirişin kapalı çevrim Simulink modeli 67
Şekil 4. 16 Kapalı çevrim cevabı karşılaştırması, K_P=16 67
Şekil 4. 17 Akıllı kirişin Simulink Durum-uzay modeli 69
Şekil 4. 18 Durum-uzay modelinin açık çevrim cevabı 69
Şekil 4. 19 Durum-uzay modeli PID kontrol sensör cevabı, K_P=16 70
Şekil 4. 20 Durum-uzay modeli PID kontrol sensör cevabı, K_P=50 70
Şekil 4. 21 Zorlanmış titreşim kontrolü 1.mod rezonans durumu (129 rad/s), K_P=16 71
Şekil 4. 22 Akıllı kirişin ANSYS apdl modeli 72
Şekil 4. 23 ANSYS ile durum-uzay analizinin şematik akışı 72
Şekil 4. 24 ANSYS ile elde edilen durum-uzay denklemleri ile oluşturulan Matlab modeli 73
Şekil 4. 25 Serbest titreşim durumu sensör cevabı karşılaştırması PID kontrol, K_P=16 74
Şekil 4. 26 Sensör için X-yönündeki gerinme grafiği 74
Şekil 4. 27 Kirişin uç noktasının Z-yönündeki yer değiştirmesi 75
Şekil 4. 28 Birinci mod rezonans durumu sensör cevapları, K_P=2 ve K_P=16 76
Şekil 4. 29 1. Mod rezonans durumu kiriş ucunun yer değiştirmesi, K_P=2 ve K_P=16 77
Şekil 4. 30 1. Mod rezonans durumu X-yönündeki gerinme , K_P=2 ve K_P=16 78
Şekil 4. 31 İkinci mod rezonans durumu cevapları, K_P=2 ve K_P=16 79
Şekil 5. 1 PZT-5H Piezoelektrik yama 81
Şekil 5. 2 Piezoelektrik yamaların alüminyum yüzeyine yapıştırılması 81
Şekil 5. 3 Mekanik zorlama ile oluşan gerilim (15.5 Volt) 83
Şekil 5. 4 Deney düzeneğinin şematik gösterilişi 83
Şekil 5. 5 Deney düzeneği 84
Şekil 5. 6 SensorTech SA11 güç amplifikatörü 85
Şekil 5. 7 Simulink ile BMK tasarımı 86
Şekil 5. 8 Matlab'de tasarlanan Lineer BMK'nin ayarları 87
Şekil 5. 9 Lineer kontrol yüzeyi 88
Şekil 5. 10 Tasarlanan Nonlineer BMK'nin Matlab ayarları 89
Şekil 5. 11 Nonlineer kontrol yüzeyi 90
Şekil 5. 12 Deney yöntemi 91
Şekil 5. 13 Sinyal üretici (209 Hz frekansta sinyal ürettiği an) 92
Şekil 5. 14 Akıllı kiriş 92
Şekil 5. 15 Kiriş uç noktası 5 mm yerdeğiştirme başlangıcı ile serbest titreşim deneyinin şematik gösterimi 93
Şekil 5. 16 Lazer mesafe ölçer 93
Şekil 5. 17 Birinci mod sönüm oranı hesabı, açık çevrim cevabı yakınlaştırılarak elde edilmiştir 94
Şekil 5. 18 PID Kontrol ile aktüatöre uygulanan gerilim (üstte), ve sensör çıkış gerilimi karşılaştırma grafiği (altta), K_P=16 95
Şekil 5. 19 Bulanık PID Nonlineer kontrol ile aktüatöre uygulanan gerilim (üstte), ve sensör çıkış gerilimi karşılaştırma grafiği (altta), K_P=16 96
Şekil 5. 20 Sinyal üretici ile zorlanmış titreşim deneyinin şematik gösterimi 97
Şekil 5. 21 Kontrolcünün kapalı olduğu durumda rezonans başlangıcı grafikleri 98

Şekil 5. 22 Kontrolcü kapalı durumda iken 4. saniyede PID kontrolcü açıldığında aktüatörün devreye girmesi (üstte) ve titreşimlerin azalması (altta), K_P=16 99
Şekil 5. 23 Zorlanmış titreşim PID kontrol sensör cevabı (üstte) ve karşılaştırması 100
Şekil 5. 24 Zorlanmış titreşim Bulanık PID Nonlineer kontrol sensör cevabı (üstte) ve karşılaştırması 101
Şekil 5. 25 Matlab üzerinden oluşturulan serbest titreşim deneyinin şematik gösterimi 102
Şekil 5. 26 Gönderilen rezonans sinyalinin beşinci saniyede kesilmesiyle oluşan serbest titreşimin PID kontrolü, sensör ve aktüatör genlikleri 103
Şekil 5. 27 Rezonans sinyalinin kesilmesinin ardından oluşan serbest titreşim (üstte), yakınlaştırılmış grafik (altta) PID kontrol, K_P=16 104
Şekil 5. 28 Rezonans sinyalinin kesilmesinin ardından oluşan serbest titreşim (üstte), yakınlaştırılmış grafik (altta) Bulanık PID Nonlineer kontrol,K_P=16 105
Şekil 5. 29 Akıllı kirişin ucuna mıknatıs eklendiği deney düzeneğinin şematik gösterimi 106
Şekil 5. 30 Kirişin ucuna ağırlık eklenmesi, mıknatıs boyutları 20x10x5 mm 106
Şekil 5. 31 Mıknatıs eklenmiş kirişin serbest titreşim aktif kontrolü 107
Şekil 5. 32 Bulanık PID (NL) kontrol durumunda aktüatör gerilimi 108
Şekil 5. 33 Birinci mod rezonans durumu zorlanmış titreşim kontrolü 109
Şekil 5. 34 Kontrolcünün açılmasıyla genliklerin azalması ve aktüatör gerilimi, PID kontrol, K_P=16 110
Şekil 5. 35 Kontrolcünün açılmasıyla genliklerin azalması ve aktüatör gerilimi, Bulanık PID Nonlineer kontrol, K_P=16 111
Şekil 5. 36 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda serbest titreşim kontrolü 113
Şekil 5. 37 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü 114
Şekil 5. 38 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü 115
Şekil 5. 39 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda serbest titreşim kontrolü 116
Şekil 5. 40 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü 117
Şekil 5. 41 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü 118
Şekil 5. 42 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda serbest titreşim kontrolü 119
Şekil 5. 43 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü 120
Şekil 5. 44 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü 121
Şekil 5. 45 Mesnet uzaklığı 10mm iken K_P oransal kazanç katsayısı değişikliği durumları 122
Şekil 5. 46 Mesnet uzaklığı 10mm iken oransal kazanç katsayısı değişikliği durumları, K_P=8 ve K_P=12 123
Şekil 5. 47 Zorlanmış titreşim kontrolcü ve parametre değişikliği karşılaştırma grafikleri 124
Şekil 5. 48 Zorlanmış titreşim kontrolcü ve parametre değişikliği karşılaştırma grafikleri, K_P=8 ve K_P=12 125
Şekil 5. 49 PID kontrolcü ile K_P parametre değişikliğinde sonuçların karşılaştırılması 126

Şekil 5. 50 Bulanık PID Lineer kontrolcü (üstte) ve Bulanık PID Nonlineer kontrolcü (altta) ile K_P değeri değiştirilerek elde edilen sonuçların karşılaştırılması . 127
Şekil E.1 Akıllı çubuğun ikinci aktüatör ile kontrol edilmesi 152
Şekil E.2 Birinci aktüatör ile kontrol, K_P=4 153
Şekil E.3 İkinci aktüatör ile kontrol, K_P=4 153

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Akıllı malzeme çeşitleri [12] 12
Çizelge 2. 2 Piezoelektrik malzemeler 16
Çizelge 2. 3 Aktüatör teknolojisi seçimi [12] 17
Çizelge 2. 4 Aktüatör için akıllı malzemelerin karşılaştırması [50] 17
Çizelge 2. 5 Gerinim sensörü seçim kriterleri [12] 18
Çizelge 3. 1 Titreşimlerin sınıflandırılması 28
Çizelge 3. 2 Bağımsız bir PID parametresi artışının etkileri 35
Çizelge 3. 3 Bulanık kontrolün tarihsel gelişimi [66] 36
Çizelge 4. 1 θ'nın sabit değerleri 48
Çizelge 4. 2 Ankastre kirişin parametre değerleri 56
Çizelge 4. 3 Piezoelektrik aktüatör parametre değerleri 57
Çizelge 4. 4 Hesaplanan doğal frekans (Hz) sonuçları 64
Çizelge 5. 1 BM532 Piezoelektrik malzemenin özellikleri 82
Çizelge 5. 2 Lineer BMK kural tablosu 87
Çizelge 5. 3 Nonlineer BMK kural tablosu 89
Çizelge 5. 4 Zorlanmış titreşim kontrolünde K_P değişikliği etkisi 128
Çizelge 5. 5 Zorlanmış titreşim kontrolünde mesnet uzaklığı etkisi 129
Çizelge 5. 6 Serbest titreşim durumu için kontrolcü etkisinin karşılaştırması 130
Çizelge 6. 1 Zorlanmış titreşim durumunda genliklerin azaltılmasındaki başarı oranı . 132
Çizelge 6. 2 Serbest titreşimlerin sönümlenme zamanındaki azalma oranı 132

ÖZET

AKILLI ÇUBUK TİTREŞİMLERİNİN PİEZOELEKTRİK EYLEYİCİLER İLE AKTİF KONTROLÜ

Deniz SOFU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Semih SEZER

Aktif kontrol teknolojilerinin, mekanik sistemlerde titreşim kontrolü amacıyla kullanılması hakkında önemli araştırmalar yapılmıştır. Piezoelektrik elemanları aktif titreşim kontrolünde kullanmak, son yıllarda oldukça dikkat çekmiş bir çalışma alanıdır. Bu tez çalışmasında, akıllı bir kirişin üretimi ve piezoelektrik malzeme ile aktif titreşim kontrolü amaçlanmıştır.

Sayısal çalışmada, arka plandaki teoriler ve bilgilerin özetine yer verildikten sonra ele alınan sistem modellenmiştir. Kirişin hareket denklemi çözülerek mod şekil fonksiyonu ve doğal frekansları elde edilmiştir. Analitik ve sonlu elemanlar analiz programı ANSYS ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. ANSYS ve MATLAB yardımı ile oluşturulan akıllı kiriş modellerinin serbest ve zorlanmış titreşim kontrolü simulasyonları Simulink programı ile yapılmıştır.

Deneysel çalışmada, alüminyum çubuk yüzeyine yapıştırılan piezoelektrik yamalar hem algılayıcı hem eyleyici olarak kullanılmıştır. Tasarlanan PID ve bulanık PID kontrolcüler ile ankastre akıllı kirişin aktif titreşim kontrolü MATLAB/Simulink yazılımları üzerinden gerçekleştirilmiştir. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulanık PID kontrolcü ile % 95.6'ya varan oranlarda titreşimler sönümlenebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif titreşim kontrolü, piezoelektrik akıllı kiriş, sonlu elemanlar analizi, MATLAB/Simulink, bulanık PID kontrolcü

ABSTRACT

ACTIVE CONTROL OF SMART BEAM VIBRATIONS WITH PIEZOELECTRIC ACTUATORS

Deniz SOFU

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Semih SEZER

Over the last two decades, a great deal of research has been conducted on active control technologies to control vibrations of mechanical systems. Using piezoelectric components for active vibration control has gained a lot of interest in recent years. The studies in this thesis aimed to manufacture smart beam and perform an active vibration control with piezoelectric materials.

In the numerical study, background theories and brief information are summed up, followed by mathematical model of the system is developed. By solving the equations of beam motion, the mode shape function and natural frequencies of the system are obtained. Analytical and ANSYS finite element analysis results are compared. Active control of free and forced vibrations of smart beam models which is created by ANSYS and MATLAB are simulated by using Simulink program.

Experimental set-up consists of an aluminium beam surface bonded piezoelectric patches that used as an actuator and a sensor. Experimental study has been conducted to perform active vibration control with designed PID and Fuzzy PID controllers by using MATLAB/Simulink programs on this cantilever smart beam. The theoretical and experimental results are compared. It is observed that with the Fuzzy PID control algorithm up to 95.6% vibration suppression is achieved.

Keywords: Active vibration control, piezoelectric smart beam, finite element analysis, MATLAB/Simulink, fuzzy PID controller

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerle, mekanik sistemlerde meydana gelen titreşimler yay, amortisör ve denge ağırlıkları ile kontrol edilir. Bunlar titreşim izolasyon sisteminin pasif elemanlarıdır. Fakat birçok uygulamada istenen etkiye ulaşmada pasif kontrol sistemleri yetersiz kalmaktadır.

Yüksek hızlarda yüksek iş yükünü kaldıracak mekanik sistem tasarımı arzulanan durumdur; fakat bu durumda titreşim faktörü öne çıkmaktadır. Aktif titreşim yöntemleri istenmeyen titreşimleri gidermede kullanılabilir. Piezoelektrik elemanları aktif titreşim kontrolünde kullanmak, son yıllarda oldukça dikkat çekmiş bir çalışma alanıdır. Bu bölümde literatür özeti verilecektir. Akıllı yapılarda aktif titreşim kontrolü ve piezoelektrik malzemeler hakkında yapılmış önceki teorik ve deneysel çalışmalardan bahsedilecektir. İleriki bölümlerde piezoelektrik olgu, kontrol teorisi, akıllı yapılar ve titreşimler hakkında daha detaylı bilgi verilecektir.

İlk önce piezoelektriklik hakkındaki tarihsel gelişimlerin özeti sunulacaktır.

1.1 Literatür Özeti

Keşfinin üzerinden yüzyıldan fazla zaman geçmiş olan piezoelektriklik, bugün geniş uygulama alanlarıyla bilim ile mühendisliği birleştirmektedir. Bu keşfe giden yol piroelektrik olgusu ile başlar.

Isınan turmalin kristalindeki elektriklenme 18. Yüzyıldan beri bilinmekteydi. 1824'te Brewster bu etkiyi çeşitli kristallerde gözlemleyerek "piroelektriklik" olarak adlandırdı. Lord Kelvin piroelektrikliğin kalıcı polarizasyon sebebiyle olduğuna işaret etti. Teorisine

göre piroelektrik etki, bu polarizasyonun sıcaklık katsayısının basit bir göstergesiydi. Bundan dolayı bu etki elektrik ve termal sistemler arasındaki etkileşim olarak bilinmekteydi [1].

Piezoelektrik etki 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Pierre Curie önce piroelektriklik ve kristal simetrisi arasındaki ilişki üzerine çalışmıştır. Bu çalışma Curie kardeşlere basınç kuvvetiyle elektriklenmenin bulunmasının yanı sıra hangi kristal türlerinde bu etkinin beklendiği ve basınç kuvvetinin hangi doğrultuda uygulanması gerektiği hakkında yol göstermiştir. Curie kardeşler, daha sonraları piezoelektriklik olarak tanımlanacak bu olguyu tanımlayan ilk bilimsen yayını yazmıştır [2]. Aynı olgu Roşel tuzu ve turmalin gibi daha birçok kristalde bulunmuştur. Hankel "piezoelektriklik" ismini önermiştir [3]. Piezoelektriklik, elektrik ve mekanik sistemler arasındaki bir etkileşimdir. Doğru (direk) piezoelektrik etki, elektriksel olarak yüklenmenin bir mekanik zorlama tarafından gerçekleşmesidir. Bununla yakın ilişkili ters piezoelektrik etkide ise, kristal elektrik alana tabi tutulduğunda şekil değiştirir. Her iki etki de kristalin aynı temel özelliğinin belirtileridir. Doğru piezoelektrik etkinin keşfini takip eden yılda Lippmann [4] ters etkinin varlığını termodinamik hesaplamalardan öngörmüştür. Öngörüsü 1881 yılı sona ermeden Curie kardeşler tarafından doğrulanmıştır. Ardından yayınladıkları makalede ters ve doğru etki için kuvarsın piezoelektrik katsayısının aynı değerde olduğunu göstermişlerdir [1].

Piezoelektrik formülasyon daha detaylı olarak Pierre Duhem ve F. Pockels tarafından tamamlandı, fakat bu alandaki en aktif kişi Woldemar Voigt olmuştur. X-ray analiziyle kuvarsın piezoelektrik polarizasyonunu açıklayan atomik model Brag ve Gibbs (1925) tarafından çalışılmıştır [5].

Piezoelektrik etkinin ilk önemli uygulaması Birinci Dünya Savaşı sırasında Langvin tarafından denizaltılar için su içinde ses dalgası oluşturmak amacıyla geliştirilmiştir [6].

İkinci Dünya Savaşı sırasında, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Sovyetler Birliğinde gelişmiş kapasitör malzemeleri konusunda çalışan münferit araştırma gurupları, bazı seramik malzemelerin normal kesim kristallere göre 100 kat kadar daha yüksek dielektrik sabiti gösterdiğini keşfetti. Bu keşif doğal piezoelektrik malzemelerin 100 katı piezoelektrik ve dielektrik özellik sergileyen sentetik malzemelerin üretimine öncülük

etti. Etkileyici performans karakterine sahip kolay üretilebilen piezoelektrik seramiklerin bulunması, yoğun araştırmaların ve piezoelektrik aygıtların geliştirilmesi konusunun canlanmasına neden oldu. 1945 yılında baryum titanat BaTiO3'ın kolaylıkla piezoelektrik hale getirilip şekillendirilebileceği ve ucuz maliyette üretilebileceğinin fark edilmesiyle piyasa çıkmış oldu. Bu gelişmeler endüstriyel uygulamaların yolunu açtı. Bu zaman, piezoelektrikliğin modern tarihinin ve piezoelektrik seramik döneminin başlangıcı olarak adlandırılabilir. Aşağıdaki başarılı sonuçlar 1940-1950 yılları arasındaki dönemde elde edilmiştir [7]:

- Baryum titanat ailesi piezoseramiklerdeki ve kurşun zikronat titanat ailesindeki gelişmeler; bakınız [8]
- Elektro-mekanik aktiviteye sahip perovkit kristal yapılar konusundaki gelişmeler;
- Bu malzeme ailelerine metalik katkılar yaparak arzulanan dielektrik sabitler, piezoelektrik katsayılara vb.n ulaşmadaki gelişmeler.

Piezoelektrik malzemelerle, aktüatör (eyleyici) ve sensör (algılayıcı) amacı ile kullanılarak, ses ve titreşim kontrolü yapılabileceği 1980'li yıllarda kanıtlanmıştır. Bu alanda araştırmalar günümüzde de devam etmektedir. Ülkemizde piezoelektrik malzemeler üzerine ilk çalışmalar sayın Prof. Dr. M. Cengiz Dökmeci tarafından yapılmıştır. Bu konudaki ilk çalışmaları piezoelektrik malzemeden üretilen çubukların titreşim analizi üzerine yapmıştır [9], [10].

Son 15 yılda piezoelektrik temelli sistemlerin uygulamalarının günden güne büyümesi genel mahiyette daha fazla bilgisayar kontrollü tasarım ve daha hassas mekanik işleme odaklı bir yöne evrilmiştir. Sabit "makro" sistemlerden mobil "mikro/nano" sistemlere üretim süreçlerindeki gelişmeler, etkileyici özellikleri sayesinde bu sistemlerin uygulamalarında heyecan verici bir alan sunar. Yüksek tork ve hassas konum/hıza sahip inovatif minyatür motorların üretilebilmesi için piezoelektrik malzemelerin (özellikle piezoseramikler) uygulamalarda kullanılması, aktüatör/sensör gelişiminin heyecan verici bir örneğidir [11].

Aktif titreşim kontrolünün esas amacı doğrudan veya otomatik müdahale ile mekanik sistemin titreşim seviyelerini azaltmaktır. Aktif yapılar, değişimi algılayan sensörler ve bu

değişimi işleyerek istenen koşul için cevap üreten kontrolcü ile eşleşmiş aktüatörlerden oluşur. Literatürde yüksek entegrasyon kabiliyetine sahip aktüatör ve sensörlerden oluşan sistemler akıllı yapılar olarak adlandırılır. Aktif sistemin ana bileşeni, kontrol edilen sistemde dış uyarıcı olarak görev yapan aktüatördür. Aktif kontrol sistemlerinde kullanılan tipik aktüatörler hidrolik, pnömatik, elektrodinamik veya akıllı malzeme olarak piezoelektrik aktüatörlerdir [12]. Bu tezdeki deneysel çalışmada piezoelektrik yama aktüatör olarak kullanılmıştır.

Literatürdeki ankastre kiriş ve plakaların aktif titreşim kontrolü çalışmalarında yapı üzerine yerleştirilen piezoelektrik yamalar aktüatör olarak kullanılmıştır. Diğer bir piezoelektrik yama ya da gerinim ölçer de titreşimleri algılamak için kullanılabilir [12]. Kim, Varadan vd. (1996) piezoelektrik aktüatör ve sensöre sahip alüminyum ankastre kirişin FE modellemesi üzerine çalışma yapmıştır [13].

Gaudenzi, Carbonaro ve Benzi (2000) [14], akıllı yapılarda titreşim kontrolü problemini, konum ve hız kontrolü yaklaşımıyla sayısal ve deneysel olarak araştırmıştır. Sayısal simülasyon Euler-Bernoulli modeli üzerinde FE yöntemiyle geliştirilmiştir. Tek giriş-çıkışlı kapalı devre geribesleme kontrol sistemi kullanılmıştır. Çalışmanın sonuncunda ankastre kirişlerde titreşim azaltmada konum kontrolünün hız kontrolüne göre daha etkili oluğu sonucuna ulaşılmıştır.

Bruant, Coffignal, Lene ve Verge (2001) [15], piezoelektrik aygıtların optimal geometrilerine karar verme konusunda bir metodoloji geliştirmişlerdir. Halim ve Moheimani (2002) [16], esnek yapıların titreşimlerini baskılayan bir geribesleme kontrolcüsü geliştirmeyi amaçlamışlardır.

Gabbert, Trajkov ve Köppe (2002) [17] kontrol tasarımı MATLAB/SIMULINK tarafından gerçekleştirilen akıllı plakanın tasarım ve simülasyonunu çalışmalarında konu edinmişlerdir. Lin ve Nyang (2003) [18] farklı geribesleme kontrol yöntemlerinin etkinliğini incelemiştir. Fei (2005) [19] piezoelektrik aktüatör yapıştırılmış ankastre kiriş için şekil değiştirme geribesleme kontrolcüsü ile aktif titreşim kontrolü yöntemlerini incelemiştir. Vasques ve Rodrigues (2006) [20] piezoelektrik akıllı kirişlerin aktif titreşim kontrolü üzerine klasik kontrol stratejileri ve optimal kontrol stratejilerinin analiz ve karşılaştırmasını sunmuştur.

Çubuk ve plakaların aktif titreşim kontrolünde aktüatör ve sensörler için en uygun konumun tespiti araştırma konusu olmuştur. Sistemde aktüatör ve sensör pozisyonları önemli rol oynar. Yanlış yerleştirilmiş bir sensör/aktüatör çifti yetersiz gözlenebilirlik ve kontrol edilebilirliğe sebep olacaktır.

Piezoelektrik akıllı yapıların aktif kontrolünde, eğer aktüatörler optimal konuma yerleştirilirse kontrol performansını arttırıp, enerji kullanımını düşürmek mümkündür [15]. Peng (2005) [21], kontrol enerji gereksinimini minimize etmek için aktüatör konumu metodolojisi geliştirme konusunda çalışmış, dikdörtgen plaka üzerinde PZT yama yerlerinin optimizasyonu için performans kriterleri belirlemiştir. Ma ve Nejhad (2005) [22] akıllı yapıların hassas konumlandırma ve titreşim kontrolü üzerine çalışma yapmıştır. İki PID geribesleme ve iki adaptif ileribesleme kontrolcü deneysel olarak çalışılmıştır.

Gupta (2010) [23] akıllı çubuk ve plaka yapılarında yüzeye yerleştirilmiş piezoelektrik sensör ve aktüatör yamaları için optimal konum tablosu oluşturmuştur.

R.Barboni [24] ankastre çubuk üzerine yapıştırılmış yamaların en uygun konum ve piezoelektrik malzemenin geometrisinin bulunmasını analitik yaklaşımla incelemiştir. Çalışmada çubuğun her iki tarafına yapıştırılmış piezoelektrik yamalarla çubuk uyarılmıştır.

Padula ve Kincaid (1999) [25], sensör konumu problem ve çözümlerini içeren 1999 yılına kadar olan yayınları kapsayan bir özet rapor etmiştir.

Çalışkan [26] ve Şahin [27] ve çalışmalarını ankastre çubuk ve plakalar üzerine yapmıştır. Piezoelektrik aktüatör konumunu optimize etmek için teorik ve sayısal çalışmalar yürütmüşlerdir.

Kompozit malzemeler ve piezoelektrik aktüatör / sensörlerin entegrasyonu havacılık ve uzay uygulamaları için iyi bir adaydır [28]. Quek ve Ang (2001) [29] akıllı kompozit plakaların titreşim kontrolü üzerine çalışmıştır. Baillargeon ve Vel (2005) [30] PZT aktüatörler kullanarak deneysel ve sayısal modelleme ile adaptif ankastre kirişin titreşim sönümleme konusuna odaklanmıştır. Kontrol sistemi yer değiştirme geribesleme oranı üzerinden MATLAB/Simulink ve dSPACE dijital kontrolcü ile gerçekleştirilmiştir.

Akıllı yapılar ANSYS, ABAQUS gibi bilgisayar programları kullanarak gerçeğe çok yakın şekilde modellenip simüle edilebilirler. Deneysel çalışma gerçekleştirmeden önce sistemin dinamik davranışını anlamada ve incelemede simülasyonlar önemli rol oynar. Bilgisayar simülasyonları, sonlu elemanlar modeli oluşturulduktan sonra parametre değiştirerek birçok defa sistemin analizinin yapılmasına düşük maliyette olanak verir. Simülasyonda sunulan sonlu eleman modelini doğrulamak için deneyler yapılmalıdır. MATLAB ve NASTRAN kullanarak PZT aktüatör içeren yapıları modellemek için prosedür sunulmuştur [31].

Xu ve Koko (2004) [32] MATLAB Kontrol Sistemi Araçkutusu ile kontrolcü tasarımı kullanarak mesnetli akıllı çubuk için optimal kontrol tasarımını yapmıştır. Sensör - aktüatör yerleşiminin sisteme etkisini incelemişlerdir. Seba, Ni ve Lohmann (2006) [33] piezoelektrik aktüatör içeren akıllı kirşin ANSYS-MATLAB de elde edilen sayısal modeli üzerine çalışma yapmıştır.

Ge, Lee ve Gong (1999) [34] esnek SCARA Kartezyen robot sistemini piezoelektrik malzemeler ile birleştirmiştir. Dinamik model ve kontrolcü tasarımı incelenmiştir.

Jha ve Rower (2002) [35] PZT aktüatörler ve sinir ağları kullanarak aktif titreşim kontrolü üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır.

Ülker ve Nalbantoğlu (2003) [36] bir akıllı ankastre kiriş için piezoelektrik yama kullanarak serbest ve zorlamalı titreşimleri sönümleyen kontrolcü tasarlamışlardır.

Karagülle, Malgaca ve Öktem (2004) [37] PID kontrolü bir ankastre kirişin titreşim kontrolü için ANSYS model ve simülasyonuna entegre edilmesini gerçekleştirmiştir.

Trojanowski ve Wiciak (2009) [38] LabVIEW yazılımı ile PID kontrolcü tasarımının sinüzoidal kuvvetle uyarılan bir alüminyum plakaya entegrasyonu üzerine çalışmışlardır. İki piezoelektrik yama sensör olarak, üç piezoelektrik yama ise aktüatör olarak kullanılmıştır.

Yüksek lisans tezinde Kırcalı (2006) [39] H_{inf} metodu ile bir alüminyum akıllı çubuğun aktif kontrolü gerçekleştirmiş PZT malzemeden yapılmış aktüatör ve lazer mesafe ölçer ise sensör olarak kullanılmıştır. Akıllı çubuklarla ilgili yapılan son çalışmalar arasında, akıllı yapıların aktif titreşim kontrolü probleminin sonlu elemanlar modeli ile çözümlenmesi

(Malgaca [12]), ankastre bir kirişin aktif titreşim kontrolü (Kazancı [40]), elastik kiriş için LQG kontrolcü tasarımı (Ekrem (2015) [41]) bulunmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Titreşimlerin azaltılması amacıyla kontrol yöntemleri piezoelektrik yapılardan faydalanarak, sistemlere uygulanabilir. Bu tez çalışmasında, akıllı bir kirişin üretimi ve piezoelektrik malzeme ile aktif titreşim kontrolü amaçlanmıştır.

Aktif titreşim kontrolü için PID ve Bulanık PID Kontrolcü tasarlanarak, çeşitli parametre değişiklikleri ile kontrolcü performansının serbest ve zorlanmış titreşim durumları için incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda öncelikle teorik analiz yapılacak, ardından deneysel çalışma gerçekleştirilecektir. İlk aşamada klasik PID kontrolcü ile aynı etkiyi gösterecek lineer kontrol yüzeyine sahip bulanık PID kontrolcü tasarlanarak, aynı PID katsayılarında sonuçlar karşılaştırılabilecektir. Bulanık PID kontrolcü başarı ile uygulandığı takdirde nonlineer kontrol yüzeyi tasarımı ve bulanık mantık yöntemi değişikliği ile daha etkili titreşim kontrolü elde edilmeye çalışılacaktır.

1.3 Orjinal Katkı

Akıllı bir çubuk imal edilerek deneysel ve teorik olarak aktif kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Sonuçların birbiri ile uyumu gösterilmiştir.

Piezoelektrik yamalar hem kontrol hem sensör hem de tahrik amacı ile kullanılmıştır.

BÖLÜM 2

PİEZOELEKTRİK MALZEMELER VE AKILLI YAPILAR

Piezoelektriklik[1], uygulanan mekanik gerilime karşılık olarak bazı katı malzemelerde biriken elektriksel yüktür. Bu malzemeler, kristaller, bazı seramikler ve biyolojik madde olarak kemik, DNA, çeşitli proteinlerdir [42]. Kelime olarak piezoelektriklik, basınç elektrikliği anlamına gelir [43]. Daha sonraları piezoelektriklik olarak tanımlanacak bu olgu, ilk olarak 1880'de kristal yapılar üzerinde çeşitli deneyler yapan Fransız fizikçi Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir [2].

Bu bölümde önce piezoelektrikliğin tarihçesi, ardından akıllı yapılarda kullanılan piezoelektrik malzemeler ve uygulama alanları hakkına bilgi verilecektir.

2.1 Piezoelektriğin Tarihçesi

18. Yüzyılında Carolus Linnaeus ve Franz Aepinus kristaller ve bazı seramikler gibi birtakım malzemelerin sıcaklık değişiminde elektrik yükü oluşturduğunu gözlemledi. René Just Haüy ve Antoine César Becquerel daha sonra bu olayı incelemeye çalışsa da başarılı olamadılar [7].

1824'te Brewster bu etkiyi çeşitli kristallerde gözlemleyerek piroelektriklik[2] olarak adlandırdı. Lord Kelvin piroelektrikliğin kalıcı polarizasyon sebebiyle olduğuna işaret etti.

[1] Piezoelektriklik, köken bakımından Yunanca ezme ya da basma anlamına gelen πιέζειν piezein ve antik elektriksel yük kaynağı olan kehribar anlamındaki ἤλεκτρον ēlektron kelimelerinden türetilmiştir.

[2] "Piro-" ve "Piezo-" ön ekleri, sırasıya "ateş" ve "baskı" anlamındadır.

Teorisine göre piroelektrik etki, bu polarizasyonun sıcaklık katsayısının basit bir göstergesiydi. Bundan dolayı bu etki elektrik ve termal sistemler arasındaki etkileşim olarak bilinmekteydi [1].

Piezoelektrik etki 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Pierre Curie önce piroelektriklik ve kristal simetrisi arasındaki ilişki üzerine çalışmıştır. Bu çalışma Curie kardeşlere basınç kuvvetiyle elektriklenmenin bulunmasının yanı sıra hangi kristal türlerinde bu etkinin beklendiği ve basınç kuvvetinin hangi doğrultuda uygulanması gerektiği hakkında yol göstermiştir. Aynı olgu Roşel tuzu ve turmalin gibi daha birçok kristalde bulunmuştur. Hankel "piezoelektriklik" ismini önermiştir [3]. Piezoelektriklik, elektrik ve mekanik sistemler arasındaki bir etkileşimdir. Doğru (direk) piezoelektrik etki, elektriksel olarak yüklenmenin bir mekanik zorlama tarafından gerçekleşmesidir. Bununla yakın ilişkili ters piezoelektrik etkide ise, kristal elektrik alana tabi tutulduğunda şekil değiştirir. Her iki etki de kristalin aynı temel özelliğinin belirtileridir. Doğru piezoelektrik etkinin keşfini takip eden yılda Lippmann [4] ters etkinin varlığını termodinamik hesaplamalardan öngörmüştür. Öngörüsü 1881 yılı sona ermeden Curie kardeşler tarafından doğrulanmıştır. Ardından yayınladıkları makalede ters ve doğru etki için kuvarsın piezoelektrik katsayısının aynı değerde olduğunu göstermişlerdir [1].

Araştırmanın ilk 15 yılında piezoelektrik olgunun basit özellikleri gözlemlenerek, bu özellikleri kapsayan teori başarılı bir şekilde formüle edildi. 1895 yılı itibariyle piezoelektrik araştırma deneysel ve teorik bilgi bakımından sağlam bir şekle kavuştu. 1895 yılının teorisi halen güncel piezoelektrik teorisinin temelidir [1].

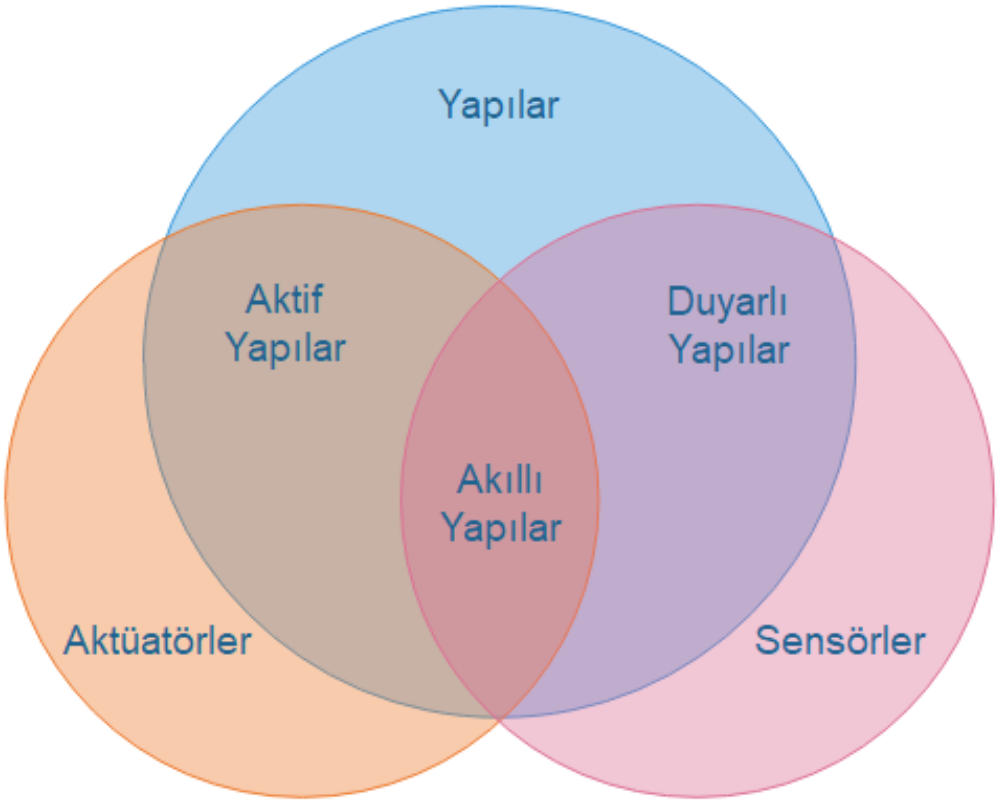
Piezoelektrik formülasyon daha detaylı olarak Pierre Duhem ve F. Pockels tarafından tamamlandı, fakat bu alandaki en aktif kişi Woldemar Voigt olmuştur. X-ray analiziyle kuvarsın piezoelektrik polarizasyonunu açıklayan atomik model Brag ve Gibbs (1925) tarafından çalışılmıştır [5].

İkinci Dünya Savaşı sırasında, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya ve Sovyetler Birliğinde gelişmiş kapasitör malzemeleri konusunda çalışan münferit araştırma gurupları, bazı seramik malzemelerin normal kesim kristallere göre 100 kat kadar daha yüksek dielektrik sabiti gösterdiğini keşfetti. Bu keşif doğal piezoelektrik malzemelerin 100 katı

piezoelektrik ve dielektrik özellik sergileyen sentetik malzemelerin üretimine öncülük etti. Etkileyici performans karakterine sahip kolay üretilebilen piezoelektrik seramiklerin bulunması, yoğun araştırmaların ve piezoelektrik aygıtların geliştirilmesi konusunun canlanmasına neden oldu. 1945 yılında baryum titanat BaTiO3'ın kolaylıkla piezoelektrik hale getirilip şekillendirilebileceği ve ucuz maliyette üretilebileceğinin fark edilmesiyle piyasa çıkmış oldu. Bu gelişmeler endüstriyel uygulamaların yolunu açtı. Bu zaman, piezoelektrikliğin modern tarihinin ve piezoelektrik seramikler döneminin başlangıcı olarak adlandırılabilir [7].

Piezoelektrikliğe ülke bazında yapılan katkılara bakılacak olursa, 1880–1898 yılları arasındaki yayınlar incelendiğinde teori öncesi aşamada bilim insanları Fransa'da 17, Almanya'da 13 yayın ortaya koymuştur. Teorik aşamada ise Almanya'da 21, Britanya'da 4, Fransa'da 2, İtalya'da 1 adet yayınla katkı sağlanmıştır [44].

2.2 Akıllı Malzemeler ve Akıllı Yapılar

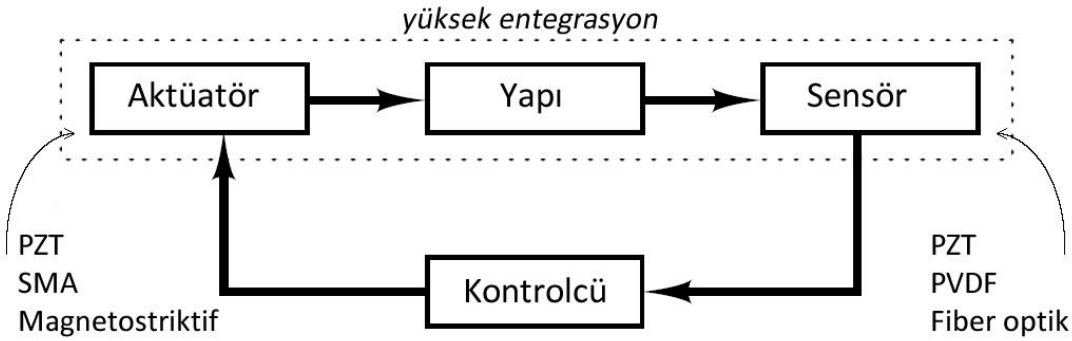


Şekil 2. 1 Şematik olarak akıllı yapılar

Bir akıllı yapının en basitçe tanımı, çevresel bir değişim algılayıp bu değişime cevap vermeyi içerir. Şematik olarak akıllı yapılar Şekil 2. 1'de gösterilmektedir. Genellikle bu işlem için elektronik yöntemden faydalanılır. Bu sürecin gerçekleşmesi için bir akıllı yapı aşağıdaki bileşenlere sahip olmalıdır:

- **Sensör(ler):** Sensörler ölçülmek istenen çevresel değişimleri izlemek ve değişen özellik ile orantılı sinyal üretmek için kullanılırlar.
- **Aktüatör(ler):** Aktüatörler istenilen tepkiye ulaşmak amacıyla akıllı yapının özelliklerini değiştirmek için kullanılır.
- **Kontrol Sistemi:** Kontrol sistemleri sensörün sinyalini sürekli izler, bir müdahale gerekip gerekmediğine karar vermek amacıyla bilgiyi işlerler. Eğer sisteme müdahale gerekliyse, ilgili aktüatöre sinyal iletilir.

Akıllı yapının şematik görüntüsü Şekil 2. 2'de gösterilmektedir. Eğer aktüatör ve sensör gurupları yapının farklı farklı yerlerinde bulunuyorsa, sistemden ayrı ele alınabilirler. Akıllı yapıların belirgin özelliği, aktüatör ve sensörler yapının içine dağıtılmış ve yapıyla bütünleşik olmasından dolayı ayrı modelleme imkânsızdır [12].



Şekil 2. 2 Akıllı yapı

Mekanik bakış açısıyla klasik yapısal malzemeler, gerilme ve şekil değiştirmeyle ilişkili elastik sabitleri ve sıcaklıkla şekildeğiştirmeyle ilişkili termal genleşme sabitleri ile tanımlanırlar. Akıllı malzemeler elektrik alan, manyetik alan, sıcaklık gibi farklı mekanizmaların ilişkisi ile şekil değiştirmenin oluşabildiği malzemelerdir. Akıllı malzeme çeşitleri ve uygulama alanları hakkında daha detaylı bilgiye referanslardaki [26], [36] ve [45] numaralı çalışmalardan ulaşılabilir [12].

Bu tez piezoelektrik malzemeleri kapsadığı için aktüatör ve sensör olarak kullanılan akıllı malzeme çeşitlerine sadece isim olarak kısaca değinilecektir.

2.3 Akıllı Yapıların Bileşenleri

2.3.1 Aktüatörler

Algılanan çevresel değişime uygun bir cevap oluşturmak için akıllı yapının içine birkaç farklı aktüatör katılabilir. Aktüatör olarak kullanılan çeşitli akıllı malzemeler harekete geçiren enerji bakımından Çizelge 2. 1'deki gibi sınıflandırılabilir [12].

Çizelge 2. 1 Akıllı malzeme çeşitleri [12]

Özellik	Aktüatörler	Harekete geçiren enerji	Aygıtlar
Şekil hafızalı	Nitinol	T, M	Şerit, Yaylı boru
Magnetostriktif	Terfenol-D	Ma	Çubuk, Yığın, Kablo
Piezoelektrik **Elektrostriktif**	BT, PZT PMN	E, M	Disk, Plaka, Yığın, Tüp, Silindir
Elektroreolojik		E	Plaka, Silindir
T: Termal enerji, M: Mekanik gerinim, Ma: Manyetik alan, E: Elektrik alan			

2.3.1.1 Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA)

"Şekil hafızalı" terimi, düşük sıcaklıkta deforme edilen bir malzemenin, yüksek sıcaklığa ısıtıldığı zaman tekrar eski şekline dönme yeteneğini tanımlar. Bu yetenek, "Termoelastik Martensitik Dönüşüm" adı verilen özel bir tip faz dönüşümü geçiren alaşımlarda gözlemlenir. Hafızadaki şekillerine geri dönüş esnasında aktüatör amaçlı kullanıma uygun miktarda kuvvet üretmektedirler. Şekil hafızalı alaşımın eski şekline geri dönebilmesi, bir miktar kütle ve güç mekanizması gerektirmektedir. Gerekli gücün ortaya çıkan kuvvete kıyasla oldukça düşük olması ise büyük avantaj sağlamaktadır. Fakat eski şekillerine geri dönüşlerinin oldukça yavaş olması bakımından dezavantajlıdırlar [46].

En bilinen SMA, NITINOL'dür. Şekil Hafızalı Alaşımlar titreşim kontrolünde az kullanılırlar. Esasen soğutmada olan zorluk sebebiyle, sadece düşük frekanslı ve düşük hassasiyetli uygulamalarda kullanılırlar. Termal periyodlar sırasındaki yorgunluk da ayrıca sorundur. Bazı SMA uygulamaları aşağıda listelenmiştir [12]:

- Otomobil Vitesleri: Soğuk havalarda yağ viskozitesindeki değişim sebebiyle otomatik viteslerin kontrolü.
- Amortisörler: Basınç valflerini kontrol ederek amortisörlerin düşük sıcaklık özelliklerini geliştirme.
- Küçük Pompalar: Lazer kontrolündeki bir şekil-hafızalı alaşım aktüatör, pompayı çalıştıran ankastre kirişi harekete geçirir.

2.3.1.2 Magnetostriktif Malzemeler (MS)

Magnetostriktivite, elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü bir transdüsyon işlemidir. Magnetostriktif malzemeler, bir manyetik alan etkisi içinde boyutlarında değişim gösterirler. Maksimum tepki malzeme sıkıştırıcı yüklere tabi tutulduğunda elde edilir. Magnetostriktif aktüatörler yük taşıma elemanlarında (tek başına sıkıştırıldığında) kullanılabilir olup, uzun ömürlüdürler. En bilineni TERFENOL-D'dir. Ayrıca yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda da kullanılmaktadır. Magnetostriktif malzemelerin kullanıldığı bazı uygulamalar şu şekilde verilebilir [12]:

- Hidrolik Valfler: 1kHz frekansta çalışan yüksek hız valfleri, 300 Hz de 3mm yer değişim yapar. 2000 Psi çalışma basıncında 100 Psi basınç değişimi meydana getirirler.
- Inchworm Motorları: 0.5 rpm devirde milden 12 Nm tork üreten motorlardır. Düşük frekanslı akustik transdüser, pompa ve mekanik sistemlerde uygulama alanı bulurlar.
- Helikopter Pervanesi: Kanatlarda aktif titreşim kontrolü için muhtemel uygulamalarda.

2.3.1.3 Magnetoreolojik Malzemeler (MR)

MR akışkanlar, mikron boyutlu manyetik parçacıklar içeren viskoz sıvılardır. Akışkanın elektrik alana maruz kalması, parçacıkların kutuplaşmasını kolaylaştırmakta ve elektrotlar arasında kayma deformasyonuna dayanıklı uzun zincirlerin oluşmasını sağlamaktadır. Bu etki tersinir ve çok hızlıdır (tepki bir milisaniyeden bile kısa zamanda gerçekleşir). Bazı akışkanlar bu davranışı elektrik alan etkisi altında gösterirler. Bu akışkanlar, elektroreolojik akışkan (ER) malzemeler olarak isimlendirilir. Fakat performansları MR akışkanlara kıyasla belirgin olarak düşüktür. ER malzemelerin bazı uygulamaları aşağıda yer almaktadır [12]:

- Statik Mod: Serbest bırakma mekanizmaları
- Kayma Modu: Kavrama mekanizmaları, ER akışkanlar elektrik alanın uygulanması veya kaldırılması ile artan ya da azalan viskozite tarafından mekanik olarak iki yüzeyi birleştirir.
- Sönümleme Aygıtları: Amortisörler.
- Değişken Akış Kontrolü: iki bölmeyi birbirinden ayıran gözenekli bir elektrottan akarken sıvının viskozitesinin ayarlanması akış hacmini kontrol eder.

2.3.1.4 Piroelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemelerde bazen bir sıcaklık değişimi malzemenin elektrik polarizasyonunu etkileyebilir, bu yüzden sıcaklık ve mekanik alanlar bağlantılanır. Bu olay "piroelektrik" etki olarak adlandırılır ve sıcaklık değişimine cevaben kristallerin anlık polarizasyonu olarak tanımlanır [47]. Bu malzemeler ayrıca "termopiezoelektrik" malzemeler olarak da adlandırılır. Bundan dolayı tüm piroelektrik malzemeler, piezoelektrik malzemelerin bir alt gurubu olarak değerlendirilebilir [5].

Yaygın Piroelektrik Malzemeler

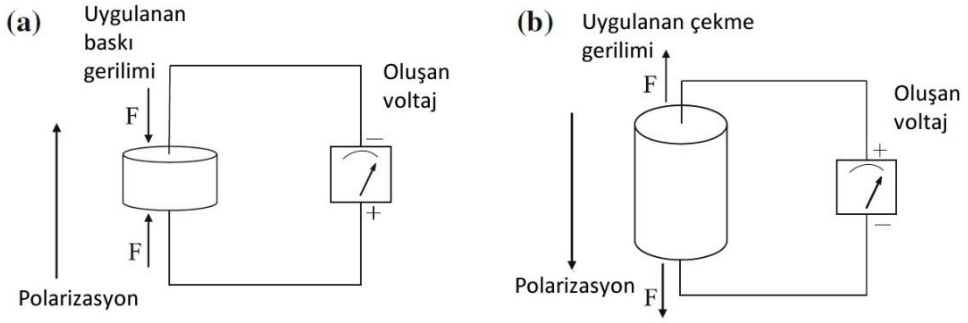
Triglisin sülfat, stronsiyum baryum niyobat, lityum tantalat, PVDF ve kurşun sirkonat bazlı seramikler yaygın piroelektrik malzemelerdendir [47]. Piezoelektrik malzemelere benzer olarak, elektrik alan etkisinde sıcaklık farkının oluşumu ters piroelektrikliktir [5].

Bu özellik elektrokalorik etki olarak isimlendirilir. Çoğu piroelektrik kristal için çok küçük bir değişiklik olmasına rağmen, Roşel tuzu gibi bazı malzemelerde kayda değer boyutlardadır. Piroelektrik-temelli yapılar ve aygıtlar, sıcaklıkla ilgili ölçümler ve kızılötesi saptama uygulamalarında kullanılırlar [48], [49], [11].

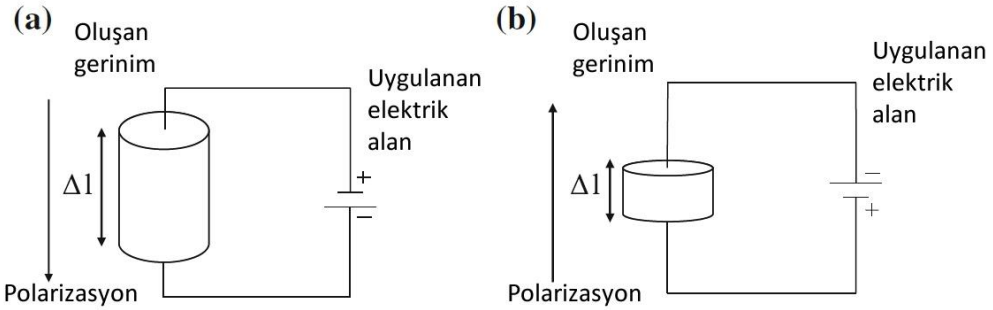
2.3.1.5 Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik malzemeler, elektrik alan altında %0.1'lik geri kazanılabilir gerinim-şekil değiştirmeye sahiptir. Bu malzemeler aktüatör ve sensör olarak kullanılabilir. Piezoelektrik davranış, doğru ve ters piezoelektrik etki olmak üzere iki belirgin şekilde meydana çıkar [12]:

- Doğru piezoelektrik etki: Bu etki bir piezoelektrik malzeme mekanik zorlama etkisi altında elektriksel olarak yüklendiği zaman gerçekleşir (Şekil 2. 3).
- Ters piezoelektrik etki: Bu etki ise bir piezoelektrik malzemenin elektrik alana tabi tutulduğunda şekil değiştirmesiyle gerçekleşir (Şekil 2. 4).



Şekil 2. 3 Piezoelektrik etki (a) Mekanik basma gerilmesi altında; (b) Mekanik çekme gerilimi altında oluşan voltaj



Şekil 2. 4 Ters piezoelektrik etki (a) (b) Uygulanan elektrik alanın yönüne göre oluşan şekil değiştirme

Titreşim kontrolünde kullanılan iki sınıf piezoelektrik malzeme vardır: piezoseramikler ve piezopolimerler. Piezoelektrik malzeme çeşitleri Çizelge 2. 2'deki gibi listelenebilir [12].

Çizelge 2. 2 Piezoelektrik malzemeler

Tür	Malzemeler
Tekli kristaller	Kuvars Kurşun Magnezyum Niyobat (PMN-PT ve PZN-PT)
Seramikler	Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) Kurşun Metaniyobat (LMN) Kurşun Titanat (LT) Kurşun Magnezyum Niyobat (PMN)
Polimerler	Poliviniliden Florür (PVDF)
Kompozitler	Seramik-polimer Cam-seramik

Piezopolimerler, yüksek voltaj gereksinimi ve sınırlı kontrol hâkimiyeti sebebiyle çoğunlukla sensör olarak kullanılırlar. En bilineni polivinilidenflorür (PVDF ve PVF2)'dür. Piezoseramikler aktüatör ve sensör olarak, ultrasonik uygulamalar da dâhil olmak üzere geniş frekans aralığında yaygın kullanılırlar. Nanometre boyutlarında yüksek hassasiyet için çok uygundurlar. En bilinen piezoseramik Kurşun Zirkonat Titanat (PZT)'dır. PZT malzemelerin kullanıldığı bazı uygulamalar listedeki gibidir:

- Sonar Transdüserler: Sualtı iletişimi ve görüntüleme sistemleri. Doğru ve ters piezoelektrik etkinin ikisinden de faydalanır.
- Ultrasonik Temizleyiciler: Piezoelektrik malzeme (ters piezoelektrik etkiyi kullanarak) ses enerjisini sıvı banyoya iletir. Kavitasyon adı verilen işlemle temizleme eylemi gerçekleşir.
- Yazıcı Kafaları: Mürekkep püskürtmeli yazıcılar (ters piezoelektrik etkiyi kullanarak), nozüllerin hızlı çalışması için piezoelektrik dizilme aktüatörleri kullanırlar. Dakikada 500 sayfa basma kapasitesine kadar çıkabilirler.

- Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM): STM, malzemelerin elektronik yapısının 3 boyutlu görüntüsünü üretir.

Performans parametrelerine göre aktüatörler için seçim kıstasları Çizelge 2. 3 ve malzeme karşılaştırması Çizelge 2. 4 'de görülmektedir [12].

Çizelge 2. 3 Aktüatör teknolojisi seçimi [12]

Performans parametresi	**Nitinol**	**Terfenol-D**	**PZT**
Eğilme yerdeğiştirme	Yüksek	Orta	Yüksek
Eğilme kuvveti	Düşük	Düşük	Orta
Ağırlık	Düşük	Yüksek	Düşük
Hacim	Düşük	Yüksek	Düşük
Maliyet	Orta	Yüksek	Düşük

Çizelge 2. 4 Aktüatör için akıllı malzemelerin karşılaştırması [50]

	PZT–5	**PVDF**	**PMN**	**Terfenol-D**	**Nitinol**
Mekanizma	Piezo seramik	Piezofilm	ES	MS	SMA
Maksimum Gerinim	% 0,13	% 0,07	% 0,1	% 0,2	% 2 – 8
Elastisite Modülü (GPa)	60,6	2	64,5	29,7	75(hi.temp)-28(lo.temp)
Yoğunluk Kg/m^3	7500	1780	7800	9250	7100
Sıcaklık Aralığı (°C)	-20 ile 200	Düşük	0 ile 40	Yüksek	-
Frekans Aralığı	0-100 MHz	0-10 MHz	100 kHz	<10 kHz	<5 Hz
Aktüatör Enerji Yoğunluğu J/kg	6.83	0.28	4.13	6.42	252-4032

2.3.2 Sensörler

Farklı çevresel değişkenleri ölçmek için çeşitli sensörler akıllı yapıya katılabilir. Akıllı yapıda kullanılan sensör tipi bir takım faktörlere bağlıdır:

- Ölçülebilen doğal özellikler: Radyasyon, manyetik, termal, kimyasal vb.n
- Sensör çıktısı: termal, manyetik, elektriksel, optik, mekanik vb.n
- Çevre: Aşındırıcı, termal, manyetik, elektriksel vb.n
- Operasyon özellikleri: hassasiyet, bant genişliği, lineerlik, ölçü boyu, mesafe vb.n

Akıllı yapılarda en çok kullanılan piezoelektrik, strengeç ve fiber optik gerinim sensörlerine kısaca değinilecektir. Bu sensörlerin performans parametrelerine bağlı seçme kriterleri Çizelge 2. 5'te verilmiştir [12].

Çizelge 2. 5 Gerinim sensörü seçim kriterleri [12]

Performans parametresi	Gerinim ölçer	Fiber optik	Piezoelektrik
Hassasiyet	Yüksek	Orta	Orta
Ölçü boyu	İstenen şekilde	Orta	Yüksek
Bant genişliği	Orta	Yüksek	Orta
Çözünürlük	Orta	Yüksek	Orta
Sıcaklık aralığı	Orta	Yüksek	Yüksek

Piezoelektrik sensörler, aktüatörler için tarif edilen aynı tip malzemeleri kullanırlar. Bu transdüserlerin çalışması özünde tersinir bir işlemdir. Deformasyona cevaben bir voltaj üreterek sensör gibi davranırlar. Özellikle piezopolimerler düşük katsayıları ve hafiflikleri sebebiyle çok iyi sensörler meydana getirirler.

Strengeçler, oturmuş bir teknoloji sunan basit ve ucuz sensörlerdir. Ayrık aygıtlar oldukları için komposit tipteki yapılara yerleştirilmeleri zor olabilir.

Fiber optik sensörler, oldukça küçük imal edilebilir ve komposit malzemelerin içine yapısal bozulma olmadan yerleştirilebilirler. Fiberlerin yüksek erime noktası ve camın

yüksek iç kuvvetleri sayesinde yüksek sıcaklık, titreşim ve azami yüklerde zorlu koşullarda çalışabilirler. Fiber optik sensörler ısı ve gerilimi algılamak için kullanılabilir [37]. Öte yandan bakım zayıflıkları, hantal kontrol sistemleri ve yüksek maliyetleri ile diğer akıllı malzemelere kıyasla daha az tercih edilmektedirler. Fabry-Perot ve lifli Bragg ızgara yaygın kullanılan fiber optiklerdir [46]. Fiber optik sensörler yapılarına göre intrinsic ve extrinsic sensörler şeklinde iki ayrı gruba ayrılırlar. Intrinsic sensörler; Fiberin kendisi algılayıcı olarak davranır ve yayılan ışık asla fiberi terk etmez. Extrinsic sensörler; Eğer fiber sadece ışığın iletilmesinde ve sistemle bağlantısında rol alıyorsa yani duyarlı eleman fiberin tümleşik bir parçası değilse bu şekilde adlandırılır. Extrinsic tipte, fiber iletimin aracı olarak hareket etmektedir [51].

2.3.3 Kontrol Sistemleri

Bir akıllı kontrol sistemi, sensör ve aktüatörler için geribesleme kontrolü sunar. Kontrol sistemi şu özelliklere sahip olmalıdır [12]:

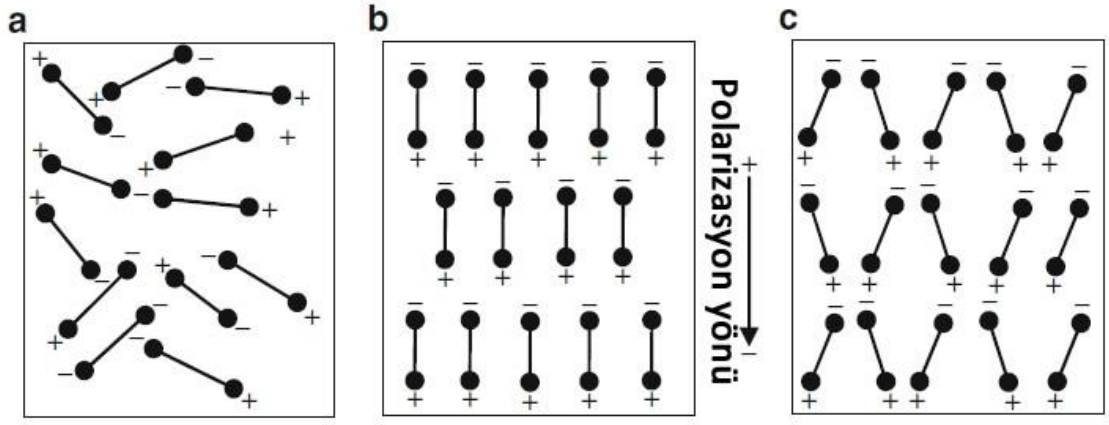
- Analog-dijital (ADC) ve dijital-analog (DAC) dönüştürücü.
- Giriş sinyali yükseltici, filtreleme ve çıkış güç kaynağı.
- Kontrol algoritması.
- Sayısal işaret işleyici (DSP).

2.4 Piezoelektrik Malzemelerin Özellikleri

Mekanik kuvvet etki etkisinde bazı kristal yapılı madensel maddeler elektriksel olarak kutuplaşır. Gerilim ve basınç karşı kutupta uygulanan kuvvetle orantılı potansiyel fark (voltaj) oluşturur. Bu ilişkinin tersi de doğrudur: Bir voltaj oluşturabilen kristal bir elektrik alana maruz kaldığında alanın gücü oranında ve elektrik alanın polaritesine göre uzar veya kısalır. Bu davranışlar sırasıyla "piezoelektrik etki" ve "tersinir piezoelektrik etki" olarak adlandırılır. Piezoelektrik malzemeler sonik ve ultrasonik sinyal üretme dâhil şaşırtıcı derecede çeşitli algılayıcı ve hareket uygulamalarına uyarlanmıştır. Bu uygulamaların birçoğu için kullanışlı başka alternatifler mevcut değildir [52].

Metal-oksit temelli piezoelektrik seramikler ve diğer insan yapımı malzemeler tasarımcılara piezoelektrik etki ve tersinir piezoelektrik etkiyi doğal malzemelerin uygun olmadığı uygulamalarda kullanmaya olanak sağlamıştır. Bir piezoelektrik elemanın yapısı (bileşimi), şekil ve ölçüleri zor istekleri karşılayacak şekilde uygun hale getirilebilir. İlave olarak, bu malzemeler fizikler olarak dayanıklı kimyasal olarak tepkimesiz ve üretimi nispeten ucuzdur [52].

Uygun yapıda bir seramik elamanı piezoelektrik hale getirmek için, eleman güçlü bir doğru akım elektriksel alana maruz bırakılır (Şekil 2. 5). Elektrik alan kaldırıldığında eleman kalıcı olarak kutuplanmış (poled) ve elektrik alan doğrultusunda uzatılmış olur. Sonradan, polarizasyon yönü boyunca olan sıkıştırma (basma) ya da polarizasyon yönüne dikey olan çekme(germe), polarizasyon voltajı olarak aynı kutuplu potansiyel fark meydana getirir. Polarizasyon boyunca olan çekme ya da kutuplama yönüne dik olan basma, polarizasyon gerilimine ters kutuplu gerilim oluşturur. Mekanik enerjinin elektrik enerjisine bu dönüşümü - jeneratör hareket -, yakıt ateşlemeli aygıtlar, statik piller ve diğer ürünlerde kullanılır [52].

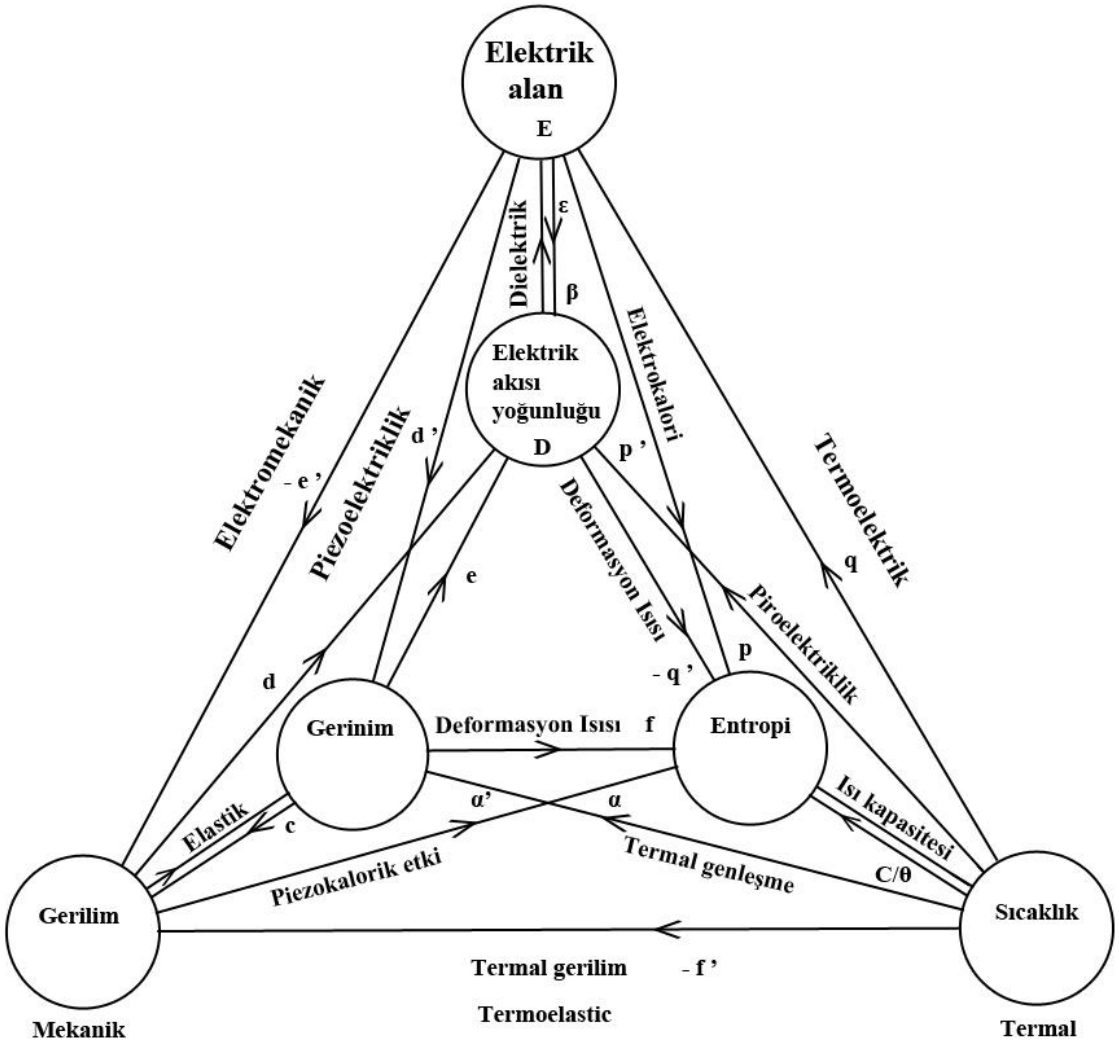


Şekil 2. 5 Elektrik dipollerin şematik gösterilişi: (a) Polarizasyon öncesi (b) polarizasyon anında (c) polarizasyon sonrası [11]

Eğer seramik elamana polarizasyon gerilimiyle aynı kutuplu ve aynı yönde bir gerilim uygulanırsa, eleman uzayıp çapı daralır. Eğer polarizasyon geriliminin tersi kutupta bir gerilim uygulanırsa, elaman kısalır ve genişler. Eğer değişken bir gerilim uygulanırsa, uygulanan gerilim frekansında periyodik uzayıp kısalır. Bu motor hareketidir, elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Bu prensip piezo elektrik motorlar, ses ve ultrason oluşturan aygıtlar ile diğer birçok ürüne uygulanmıştır [52].

2.5 Elektrik, Mekanik ve Termal Sistemler Arasındaki Etkileşim

Piezoelektriklik, elektrik ve mekanik sistemler arasında; piroelektrik ise elektrik ve termal sistemler arasındaki lineer bir etkileşimdir. Bu etkileşim Şekil 2. 6'de gösterilmektedir. Değişkenleri birleştiren aradaki çizgilerden tırnak işaretli çizgiler ters etkiyi, diğerleri direk etkiyi belirtmektedir [1].



Şekil 2. 6 Elektrik, mekanik ve termal sistemler arasındaki etkileşim [1]

2.6 Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları

Piezoelektrik özellik gösteren insan yapımı polikristal seramik malzemelerin üretimi İkinci Dünya Savaşı yıllarında gerçekleşmiştir. Kuvars ve diğer doğal kristaller mikrofon, ivmeölçer ve ultrasonik tansdüser gibi uygulama alanı bulmuştur. Bununla birlikte, insan

yapımı piezoelektrik malzemelerin ortaya çıkmasıyla bu uygulama alanı sonar, hidrofon, piezo-ateşleme sistemlerine kadar genişlemiştir [53].

Piezoelektrik malzemeler; elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren transdüserler, sensörler, aktüatörler ile telekomünikasyon için rezanatör ve filtreler gibi çeşitli aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemeler ayrıca, ekografik görüntüleme, yeni görüntüleme teknikleri, ultrasonik cerrahide minyatür sensörler ve işitme desteği gibi medikal uygulamalarda önemli rol oynamaktadır. Ulaşım endüstrisinde ise, sensör performans aygıtları, aktüatörler, hava yastığı sensörleri, mikropompalar ve mikro motorlarda kullanılmaktadır [53].

Keşfi ile birlikte, piezoelektrik etki; sesin üretim ve algılanması, yüksek voltaj ve frekanslarının oluşturulması, mikrodengeleme, ultra hassas optik odaklanma alanlarında kendisine birçok faydalı aplikasyon bulmuştur. Ayrıca, elektron yoğunluğu ile birtakım bilimsel aygıt tekniklerinde, STM, AFM, MTA, SNOM gibi tarayıcı prob mikroskoplarının temelini oluşturmaktadır. Günlük kullanımda ise çakmak ve bas-başlat propan mangallarda ateşleme kaynağı olarak karşımıza çıkar.

Piezoelektrik aygıtlar oldukça güvenilir, elektrik enerjisini fiziksel harekete dönüştürmede ucuz, elektromanyetik alan ve nem gibi çevresel faktörlere yüksek tolerans sergilerler [53].

Günümüzde piezoelektrik uygulamalar, akıllı malzemelerle titreşim kontrolü, havacılık-uzay uygulamalarının esnek yüzey ve yapıları, spor ekipmanlarında titreşim azaltma gibi alışılmışın dışında uygulamalar şeklinde karşımıza çıkmaktadır. Piezoelektrik aygıtlar, günlük olarak milyonlar tarafında kullanılmakta olan yazıcı, müzik seti, elektronik gitar ve gazlı çakmakların iç bileşenlerinde mevcuttur. Piezoelektrik seramik transüderler, adaptif yapılar için titreşim kontrolü uygulamaları ile fırlatma araçları, uzay platformları, hava taşıtları, denizaltı ve helikopter gibi modern uzay, sivil ve askeri sistemlerde birçok önemli akustik ses sönümleme uygulamalarında yer alırlar [53].

Piezoelektrik malzemelerden imal edilen bazı ürünler:

- Çeşitli şekillerde piezoelektrik seramikler
- Piezoelektrik tozlar
- Dizilme (stack) aktüatörleri
- Hava transdüserleri
- Sıvı atomlayıcılar / nebülizörler
- Piezoelektrik vızlayıcılar
- Disk eyleyiciler
- Stripe TM aktüatörleri
- Piezo ateşleyiciler

İmal edilen bu piezoelektrik tozlar, seramikler ve aygıtlar geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir:

- Ultrasonik tıbbi transdüserler (dönüştürücüler)
- Ultrasonik temizlik elemanları
- Ultrasonik kaynak bileşenleri
- NDT elemanları
- Akış kontrol ürünleri
- Seviye kontrol ürünleri
- İvmeölçerler
- Yakınlık algılayıcıları
- Frekans standartları
    - Kuvars saatler
    - Radyo santral ve alıcıları
- Yüksek voltaj ve güç kaynakları

    - Çakmaklar
    - Piezoelektrik transformatörler
- Sensörler
    - Sonar dalgaların üretim ve algılanması
    - Yüksek güç uygulamalarında, gücü gözlemlemek için (medikal tedavi, sonokemistri, endüstriyel işlemler)
    - Piezoelektrik mikrodengeleyiciler
    - Otomotivde, motor yönetim sistemleri
- Aktüatörler
    - Hoparlörler: Voltaj, piezoelektrik polimer filmin mekanik hareketine dönüştürülür.
    - Piezoelektrik motorlar
    - Akusto-optik modülatörler
    - Atomik kuvvet mikroskopları
    - Mürekkep püskürtmeli yazıcılar (inkjet)
    - Dizel motorlar

En çok kullanım alanı bulduğu sektörler:

- Havacılık sanayii
- Otomotiv
- Tüketici ürünleri
- Savunma sanayii
- Mühendislik ve tasarım
- Endüstriyel üretim
- Tıbbi aygıtlar
- Araştırma-geliştirme

2.6.1 Piezoelektrik Malzemelerin Uygulamaları

Piezoelektriklik malzemelerde doğal veya sentetik (yapay) olarak mevcuttur. Kuvars, Roşel tuzu, amonyum fosfat, parafin, kemik ve hatta ahşap bile yaygın olarak bulunun doğal piezoelektrik malzemelerden bazısıdır. Diğer taraftan, sentetik piezoelektrik malzemelere örnek olarak kurşun zirkonat titanat ($PbZrTiO_3$–$PbTiO_3$, "PZT" olarak bilinir), baryum titanat, baryum stronsiyum titanat (BaSTO), kurşun lantan zirkonat titanat (PLZT), lityum sülfat, poliviniliden florür (PVDF) ve PVDF kopolimerleri verilebilir [54]. Birçok ham piezoelektrik malzeme doğal olarak izotropiktir ve piezoelelektriklik üretmek için dipol etkiye sahip değildir. Bu yüzden, kutuplama adı verilen önemli bir işlemden geçmeleri gerekecektir. Bu işlemde malzeme içindeki moleküler dipolleri hizalamak için güçlü bir elektrik alan uygulanır [11].

Piezoelektrik malzemeler seramik ve polimer formu olmak üzere ikiye ayrılır. En popüler piezoelektrik seramik, PZT olup zirkonat-titanat oranında uygun değişiklikler yapılarak özellikleri spesifik uygulamalar için optimize edilebilir. Mekanik özellikleri bu malzemeleri jeneratör gibi çeşitli elektromanyetik transdüserler (örn. kıvılcım ateşleme, Solid-state bataryalar), sensörler (örn. ivmeölçerler ve basınç transdüserleri), ve aktüatörler (örn. pnömatik ve hidrolik valfler) için uygun kılar. Tüm seramik malzemeler içerisinde en yaygın kullanılanı harika özellikleri sebebiyle PZT seramiklerdir [55]. 1960lardan günümüze yapılan çalışmaların çoğu PZT malzemeler için uygulama geliştirme üzerine olsa da piezoelektrik yeni malzemelerin geliştirilmesi konusunda araştırmalar devam etmektedir. Bunlara, çok düşük sıcaklıklarda stronsiyum titanat ($SrTiO_3$) ‘daki muazzam piezoelektrik etkinin keşfi [56], ya da bor nitrür nanotüplerindeki piezoelektriklik örnek olarak verilebilir [57], [11].

BÖLÜM 3

AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

Bu bölümde öncelikle titreşim kavramının kısa bir özeti yapılacaktır. Bu konu hakkında kapsamlı bilgiye *Engineering Vibration* [58] ve *Simplified Handbook of Vibration Analysis* [59] kaynaklarından ulaşılabilir. Ardından kontrol teorisi ve aktif titreşim kontrolü konuları yer alacaktır.

3.1 Titreşim

Titreşim, bir denge noktası etrafında gerçekleşen mekanik salınımlar vasıtasıyla meydana gelen bir mekanik olaydır. Latince "vibrationem" (sallama, savurma anlamında ki) kelimesinden gelmektedir. Bu salınım örneğin bir sarkacın hareketinde olduğu gibi periyodik veya engebeli bir yolda giden tekerleğin hareketi gibi rastgele olabilir.

Titreşimin arzu edildiği durumlar vardır. Örneğin, bir diyapazonda, mobil telefonlarda, hoparlörlerde, üflemeli çalgı ve mızıkalarda dilin hareketinde titreşim arzulanan bir durumdur.

Fakat genellikle titreşimler arzulanmaz; istenmeyen ses meydana getirir, boşa enerji harcanır. Örneğin motorların, elektrik motorların, mekanik aygıtların çalışması sırasındaki titreşimler istenmez. Dikkatli tasarım ve üretim, istenmeyen titreşimleri en aza indirir.

3.1.1 Titreşim Türleri

Serbest titreşim, bir başlangıç hareketi verilerek serbestçe salınmaya bırakılan mekanik sistemlerde meydana gelen bir titreşimdir. Diyapazona vurmak ve salınmaya bırakmak

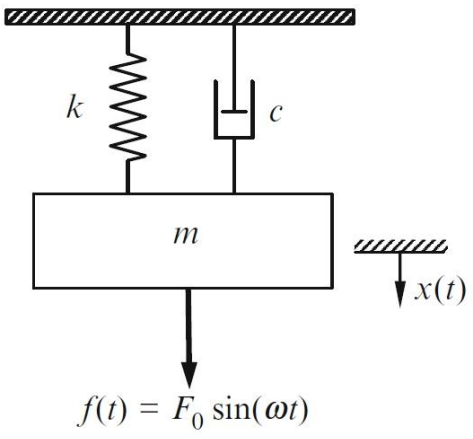
örnek olarak verilebilir. Mekanik sistem bir veya daha fazla kendi doğal frekansında titreşecek ve hareketsizlik haline geri dönecektir.

Zorlamalı titreşim zaman değişkenli bir bozucu kuvvetin (ağırlık, yer değiştirme veya hız) mekanik sisteme etki ettiği titreşim türüdür. Bozucu etki periyodik ve kararlı-durum girdi, transient girdi veya düzensiz girdi olabilir. Periyodik girdi harmonik veya harmonik olmayan olabilir. Dengesizlik sebebiyle sallanan bir çamaşır makinesi, bozuk yol veya motor tarafından oluşturulan araç titreşimleri, deprem sırasında bir binanın titreşimleri bu türe örnek verilebilir.

Sönümlü titreşim: Titreşim halindeki bir sitemin enerjisi sürtünmeler veya diğer dirençler tarafından tüketildiğinde, titreşimlerin sönümlendiği söylenir. Titreşimler gitgide azalır veya titreşimlerin frekans ya da şiddeti değişir veya kesilir ve sistem denge konumuna geri döner.

3.1.2 Titreşim Analizi

Titreşim analizi "Durum kontrol ve muayene" (CM) yönteminin kilit bileşenidir ve genellikle Kestirimci bakım[1] (PdM) olarak anılır. Titreşim analizi çoğunlukla fan, motor, pompa ve dişli kutusu gibi rotatif ekipmanlarda hata tespitinde kullanılır. Dengesizlik, yanlış ayarlama, mil yatak hataları, rezonans durumları tespit edilebilir.



Şekil 3. 1 Tek serbestlik dereceli basit bir sistem [11]

[1] Kestirimci bakım: Titreşim analizi, yağ analizi, sıcaklık analizi gibi yöntemleri kullanarak makine elemanlarındaki arızaları tespit ederek arızaları önlemeyi hedefleyen bakım yöntemidir.

Titreşim analizinin temelleri, basit kütle-yay-sönüm elemanı modeli (Şekil 3. 1) incelenerek anlaşılabilir. Otomobil gibi karmaşık bir yapı bile kütle-yay-sönüm modellerinin toplamı olarak modellenebilir.

Titreşimler ve analizi konusu çok daha detaylı olarak kaynaklardan [60] incelenebilir.

3.1.2.1 Titreşimlerin Sınıflandırılması

Tek serbestlik dereceli basit bir kütle-yay-sönüm elemanı sistemi (Şekil 3. 1) üzerinden titreşimlerin sınıflandırılmasını özetleyebiliriz. $F(t)$ sisteme etkiyen dış kuvvet ve c sönüm katsayısı olmak üzere, bu değerlere göre Çizelge 3. 1'deki gibi sınıflandırma yapılabilir.

Çizelge 3. 1 Titreşimlerin sınıflandırılması

a) Serbest sönümsüz titreşim	F(t) = 0; c = 0
b) Serbest sönümlü titreşim	F(t) = 0; c ≠ 0
c) Zorlanmış sönümsüz titreşim	F(t) ≠ 0; c = 0
d) Zorlanmış sönümlü titreşim	F(t) ≠ 0; c ≠ 0

Şekil 3. 1'deki tek serbestlik dereceli sistemi ele alırsak, harmonik bir dış kuvvet $f(t) = F_0 \sin(\omega t)$, m kütlesine etki etmektedir. F_0 uygulanan kuvvetin büyüklüğü ve ω ise frekansıdır. Newton'un ikinci prensibinden sistemin hareketinin diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi elde edilir;

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \sin(\omega t) \qquad (3.1)$$

Burada $x(t)$, m kütlesinin yer değiştirmesidir ve sistemin denge konumundan ölçülür. Süperpozisyon prensibi sistemde uygulanırsa, yerdeğiştirme $x(t)$ için şu genel çözüm kabul edilir;

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) \qquad (3.2)$$

$x_c(t)$, homojen çözüm olarak adlandırılır ve başlangıç şartları için olan çözümdür. Denklem (3.1)'de eşitliğin sağ tarafı sıfır yapılır. Özel çözüm denen $x_p(t)$, uyarıcı kuvvet

için çözümdür. Sözkonusu sistem için f'dir. Uyarıcı kuvvet $f(t)$ harmonik olduğu için özel çözüm $x_p(t)$'de harmonik ve aynı ω frekansına sahip olacaktır.

Genel çözüm (3.2) ele alındığında, homojen cevap $x_c(t)$ için aşağıdaki kabul yapılır;

$$x_c(t) = e^{st} \tag{3.3}$$

Homojen çözüm (3.3), hareket denkleminde (3.1) yerine koyulursa s bir sabit olmak üzere şu denklem elde edilir;

$$ms^2 + cs + k = 0 \tag{3.4}$$

$e^{st} \neq 0$ olduğu kabul edilerek, denklem (3.4)'e sistemin karakteristik denklemi adı verilir. Karakteristik denklemin kökleri, sistem parametreleri olan m, c ve k 'nın fonksiyonlarıdır. Bu parametrelerin değerlerine bağlı olarak üç durumla karşılaşılır; 1) iki farklı gerçek kök (aşırı sönümlü), 2) iki katlı gerçek kök (kritik sönümlü), 3) karmaşık eşlenik iki kök (az sönümlü) olması halidir. Karakteristik kökleri türü, hareket denklemini çözmeye ihtiyaç duymadan sistemin davranış ve birçok cevap karakteristiğini belirler.

Titreşen sistemlerde en çok tecrübe edilen durumun az sönümlü hali olduğu göz önüne alınacak olursa, bunun için karakteristik denklemin (3.4) her iki tarafı m ile bölünür. Elde edilen denklem, ikinci derece sistemin karakteristik denkleminin standart formu olarak adlandırılır;

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega_n}^2 = 0 \tag{3.5}$$

Burada ω_n doğal frekans ve ζ sönüm oranı olup şu şekilde tanımlanır;

$$\omega_n = \sqrt{k/m}\ ,\ \zeta = \frac{c}{c_r} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \tag{3.6}$$

İkinci derece denklemin (3.5) kökleri şu şekilde kolaylıkla bulunur;

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \tag{3.7}$$

Az sönümlü durum için çift eşlenik karmaşık kökün çıkması için $\zeta < 1$ olduğu kabul edilir. Bu durumda kökler (3.7) şu şekilde düzenlenebilir;

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d\ , j = \sqrt{-1} \tag{3.8}$$

Burada $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$ olup, sistemin sönümlü doğal frekansı olarak adlandırılır.

Dolayısı ile özel çözümün (3.3) genel biçimi aşağıdaki gibi yazılır;

$$x_c(t) = C_1 e^{s_1 t} + C_2 e^{s_2 t} = C_1 e^{(-\zeta\omega_n + j\omega_d)t} + C_2 e^{(-\zeta\omega_n - j\omega_d)t} \quad (3.9)$$

Burada yer alan C_1 ve C_2 sabitler olup, başlangıç şartlar kullanılarak belirlenebilirler. Euler özdeşliği[1] kullanılarak yapılan birkaç düzenlemenin ardından, çözüm (3.9) daha kompakt biçimde ifade edilebilir;

$$x_c(t) = \alpha e^{-\zeta\omega_n t}(\sin(\omega_d t + \beta)) \quad (3.10)$$

Buradaki α ve β sabitler olup, mevcut başlangıç şartları kullanılarak elde edilebilirler.

Uyarıcı kuvvete olan cevap yani özel çözüm $x_p(t)$ incelenecek olursa, denklemde (3.1) verilen girdi türüne (denklemin sağ tarafı) uyum sağlayacak aşağıdaki genel çözüm kabulü yapılabilir;

$$x_p(t) = X(\sin(\omega t - \phi)) \quad (3.11)$$

Bu çözüm (3.11), hareket denkleminde (3.1) yerine koyulup bazı düzenlemeler yapılırsa bilinmeyenler X ve ϕ aşağıdaki sonuçtan elde edilebilir;

$$X = \frac{F_0}{k\sqrt{((1-r^2)^2+(2\zeta r)^2)}}, \phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (3.12)$$

Buradaki X genlik ve ϕ ise faz olmak üzere, $r = \omega/\omega_n$ ise frekans oranı veya hız oranı olarak adlandırılır. Elde edilen çözümler (3.10) ve (3.11) süperpoze edilerek bitmiş çözüme ulaşılır;

$$x(t) = x_c(t) + x_p(t) = \alpha e^{-\zeta\omega_n t}(sin(\omega_d t + \beta)) + \frac{F_0}{k\sqrt{((1-r^2)^2+(2\zeta r)^2)}} sin\left(\omega t - tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right)\right) \quad (3.13)$$

Denklem (3.13) tek serbestlik dereceli genel sistem (Şekil 3. 1) için $x(t)$ çözümünü verir [11].

3.2 Kontrol Teorisi

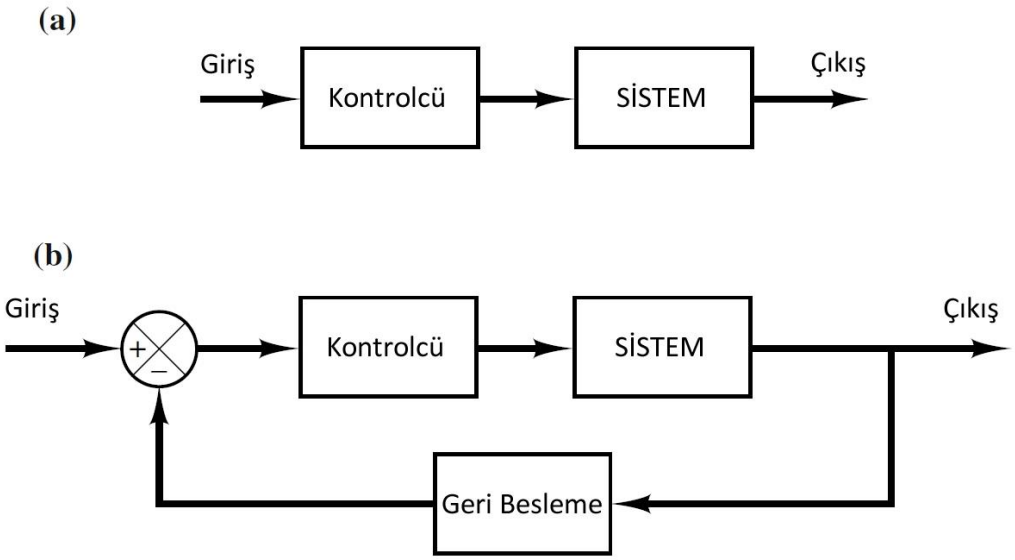
Bu tez kapalı çevrim geribeslemeli kontrol sistemi üzerine olduğu için, kullanılan PID kontrolün teorisine değinilecektir. Esnek yapılara uygulanan kontrol teorilerine

[1] $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$, $j = \sqrt{-1}$

derinlemesine bakış için literatürdeki çalışmalar incelenebilir, Ogata'nın *Modern Kontrol Mühendisliği* [61], Kuo'nun *Otomatik Kontrol Sistemleri* [62] ve Yüksel'in *Otomatik Kontrol* [63] kitaplarına başvurulabilir.

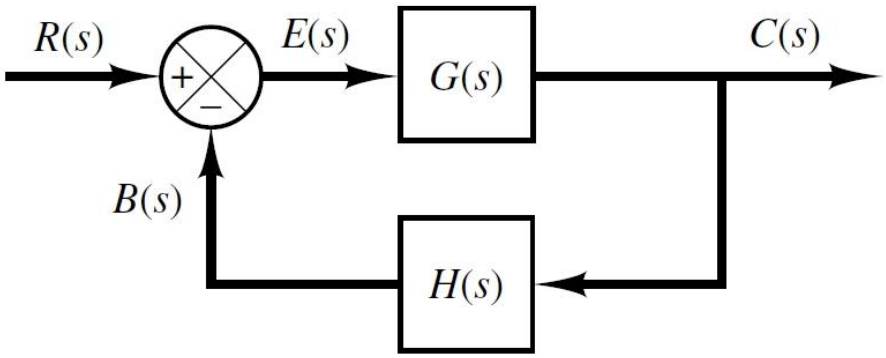
Günümüzde kullanılan kontrol teorileri, klasik kontrol teorisi (konvansiyonel kontrol teorisi olarak da bilinir), modern kontrol teorisi ve robust kontrol teorisidir. Klasik kontrol teorisi, sadece tek girdi ve tek çıktılı sistemlerde kullanılır, çoklu girdi-çıktılı sistemler için yetersiz kalır. Modern kontrol teorisi, sistemin diferansiyel denklemlerinin zaman bölgesi analizi temellidir. Gerçek kontrol sisteminin modeline dayandığı için modern kontrol teorisi kontrol sistemi tasarımını kolaylaştırmıştır. Fakat sistemin kararlılığı gerçek sistem ve modeli arasındaki hataya karşı duyarlıdır. Bu durum, modele göre tasarlanmış bir kontrolcü gerçek sisteme uygulandığında sistemin kararlı olmayabileceği anlamına gelir. Bu durumu önlemek için, öncelikle muhtemel hataların aralığı ayarlanarak kontrolcü bu şekilde tasarlanır. Eğer sistemin hatası öngörülen aralıkta kalırsa tasarlanan kontrol sistemi kararlı kalacaktır. Bu prensip temelli tasarım metodu robust kontrol teorisi olarak adlandırılır. Bu teori, hem frekans cevabı yaklaşımı hem de zaman bölgesi yaklaşımını kapsar. Matematiksel olarak karmaşık bir teoridir [61].

Kontrol sistemleri temel olarak açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere (Şekil 3. 2) ikiye ayrılabilir:



Şekil 3. 2 (a) Açık çevrim kontrol sistemi (b) Kapalı çevrim kontrol sistemi

- **Açık Çevrim Kontrol Sistemleri:** Bu sistemlerde çıkışın kontrol eylemi üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Diğer bir deyişle, bir açık çevrim kontrol sisteminde çıkış ne ölçülür ne de giriş ile karşılaştırmak üzere beslenir. Çamaşır makinesi bu sisteme örnek olarak verilebilir. Yıkama işleminin ardından makine, çıkış sinyalinin, yani çamaşırların temiz oluşunu ölçmez.
- **Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri:** Pratikte geribesleme ve kapalı çevrim kontrol birbirinin yerine kullanılabilen terimlerdir. Çıktı ile referans girdi değeri arasındaki tanımlanmış ilişkiyi karşılaştırarak koruyan ve bu farkı kontrol anlamında kullanan sistemlerdir. Kapalı çevrim kontrol sisteminde giriş sinyali ve geribesleme sinyali arasındaki fark, hatayı azaltmak ve sistemin çıktısını arzulanan değere getirmek için kontrolcüye beslenir. Kapalı çevrim kontrol her zaman sistem hatasını düşürmek için geribesleme kontrol işleminin kullanımını gerektirir [61].



Şekil 3. 3 Kapalı çevrim sistemin blok diyagramı [61]

Kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı Şekil 3. 3'de gösterilmiştir. İlgili sistemin performansını gösteren transfer fonksiyonu giriş $R(s)$ ve çıkış $C(s)$ için şu şekildedir;

$$C(s) = G(s)E(s) \tag{3.14}$$

$$E(s) = R(s) - B(s) = R(s) - H(s)C(s) \tag{3.15}$$

$E(s)$ denklemde yerine koyulursa;

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \tag{3.16}$$

$$\text{Transfer fonksiyonu} = \frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \tag{3.17}$$

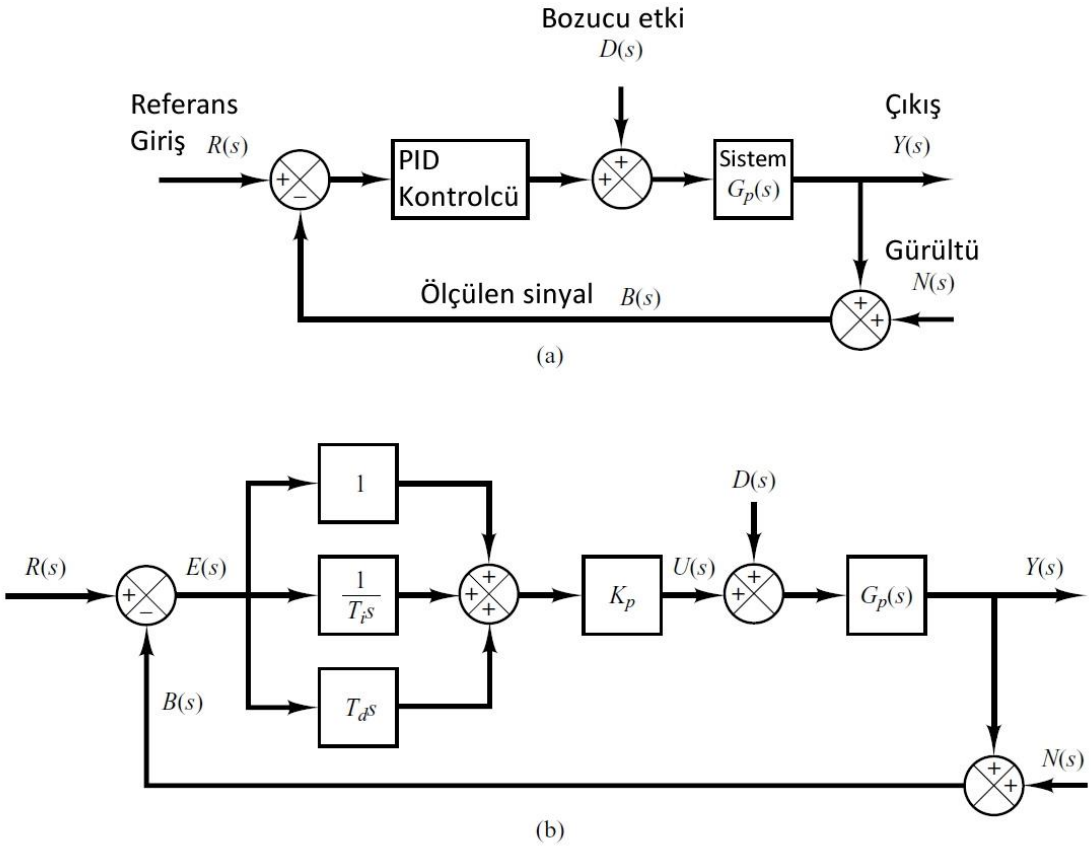
3.2.1 PID kontrolcü teorisi

Giriş sinyalinin oran-integral-türev değerlerini ve/veya bunların kombinasyonlarını alarak sistemlerin denetlenmesini sağlayan PID kontrolörler genel haliyle Şekil 3. 4'de yer almaktadır.

Günümüzde kullanılan endüstriyel kontrolcülerin yarıdan fazlasının PID kontrolcü veya modifiye edilmiş PID kontrolcü olduğu kayda değerdir. Birçok PID kontrolcü yerinde ayarlandığı için, literatürde çok çeşitli hesaplama kuralları önerilmiştir [61]. Ziegler-Nichols [64], Cohen-Coon, Chien Hrones Reswick, Wang-Juang-Chan yöntemleri en çok bilinenleridir [62]. Bu hesaplama yöntemlerini kullanarak, PID kontrolcünün hassas ve ince ayarı yerinde yapılabilir. Ayrıca, otomatik yöntemler de geliştirilmiştir ve bazı PID kontrolcüler onlayn otomatik ayar özelliklerine sahip olabilirler. I-PD kontrol ve çok serbestlik dereceli PID kontrol gibi PID kontrolün modifiye edilmiş halleri şuan endüstride kullanılmaktadır.

PID kontrolün kullanışlılığı, birçok kontrol sistemine genel uygulanabilirliğinde yatmaktadır. Özellikle, sistemin matematik modelinin bilinmediği ve bu nedenle analitik tasarım yöntemlerinin kullanılamadığı zaman PID kontrol en kullanışlı olduğunu kanıtlamıştır. Buna rağmen karşılaşılan birçok durumda optimal kontrolü sunmayabilmektedir [61].

Şekil 3. 4 (a)'da gürültü ve bozucu etkiye tabi tutulan bir PID kontrol sistemi gösterilmektedir. Aynı sistemin blok diyagramı Şekil 3. 4 (b)'de verilmiştir.



Şekil 3. 4 (a) Basit bir PID kontrol sistemi (b) Sistemin blok diyagramı [61]

PID kontrol sisteminin kontrol yasası veya çıkışı $u(t)$ şu şekildedir;

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^1 e(t)dt + K_D \frac{de}{dt} \tag{3.18}$$

Veya

$$u(t) = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t)dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \tag{3.19}$$

Buradan transfer fonksiyonu;

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{3.20}$$

olarak bulunur.

3.2.1.1 PID kontrolcü bileşenleri

Şekil 3. 4'de verildiği gibi bu kontrol sistemi üç kontrol sisteminin (P, I, D) birleşiminden meydana gelmiştir. Denklem (3.18)'de de görülebileceği gibi katsayı değerleri birbirinden bağımsızdır.

PID kontrolcünün 3 bileşeninin tamamının da tek bir sisteme uygulanma zorunluluğu yoktur, P, PI, PD ve PID olarak kullanılabilirler. Malgaca, diğer kontrolcülerin etkileriyle karşılaştırıldığında aktif kontrolcüyü mümkün olduğunca basit tutmak amacıyla bazı durumlarda PI kontrolcünün yeterli cevabı sunacağını belirtmiştir [12], [40].

3.2.1.2 PID parametre etkisi

İntegral kontrol, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarken türev kontrol de, yalnızca PI kontrolü kullanılması haline göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını arttırır. Buna göre PID kontrol sistemi, sistemde sıfır kalıcı durum hatası olan hızlı bir cevap sağlar. Burada K_P, T_i ve T_d parametrelerinin uygun bir ayarı ile uygun bir kontrol sağlanabilir. Eğer bu katsayılar, uygun bir şekilde ayarlanmayacak olursa, PID kontrolün sağlayacağı üstün özelliklerden yararlanılamaz [62].

PID kontrol için parametre etkisi Çizelge 3. 2'de özetlenmiştir [65]. Birbirinden bağımsız olarak K_P, K_I ve K_D parametreleri arttırıldığında ortaya çıkan etkiler şöyledir:

Çizelge 3. 2 Bağımsız bir PID parametresi artışının etkileri

Artan Parametre	Yükselme zamanı	Aşma	Oturma zamanı	Kararlı durum hatası	Kararlılık
$\boldsymbol{K_P}$	Azalır	Artar	Küçük etki	Azalır	Düşer
$\boldsymbol{K_I}$	Azalır	Artar	Artar	Yok edilir	Düşer
$\boldsymbol{K_D}$	Önemi az değişim	Azalır	Azalır	Etkilenmez	K_D Küçükse yükselir

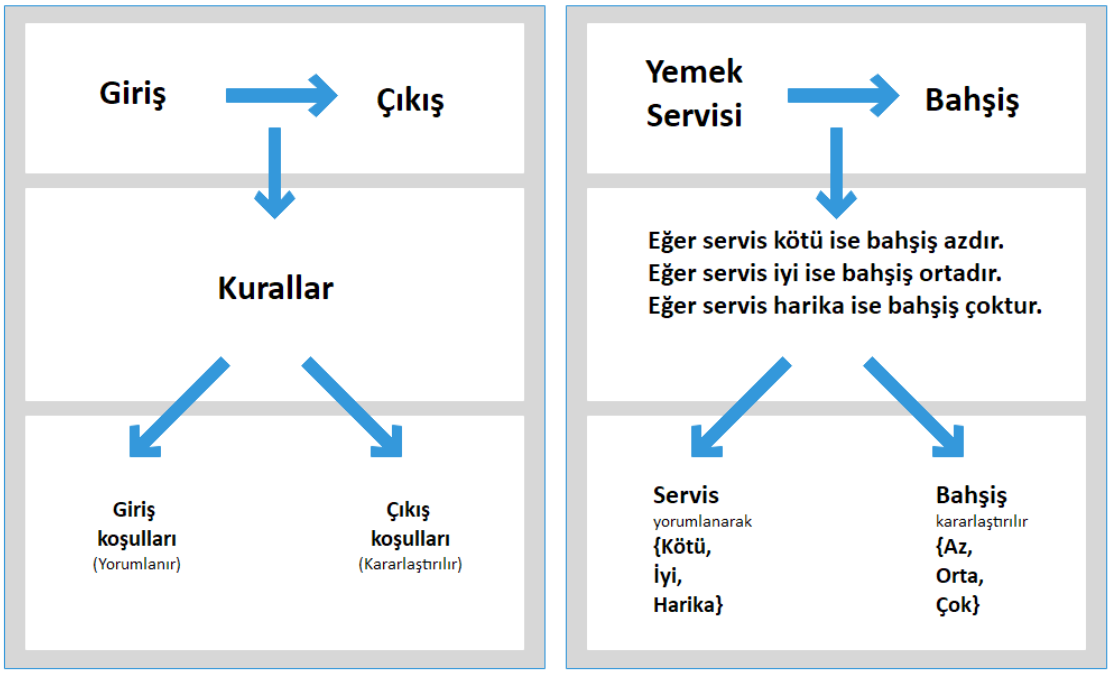
3.2.2 Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık mantık, literatürde ilk olarak Zadeh'in (1965) "Bulanık Kümeler (Fuzzy Sets)" isimli makalesi ile gündeme gelmiştir. BMK ile ilgili ilk çalışmalar ise Mamdani ve arkadaşları tarafından Zadeh'in (1973) "Bulanık kümeler teorisine dayanan dilsel yaklaşım ve sistem analizi" adlı makalesi sonrasında yapılmıştır. Daha sonra bu alandaki çalışmalar günümüze kadar peşi sıra gelmiştir. Bulanık kontrol sistemlerinin gelişmesinde önemli yer tutan bazı çalışmalar, Çizelge 3. 3'de sunulmuştur [66].

Çizelge 3. 3 Bulanık kontrolün tarihsel gelişimi [66]

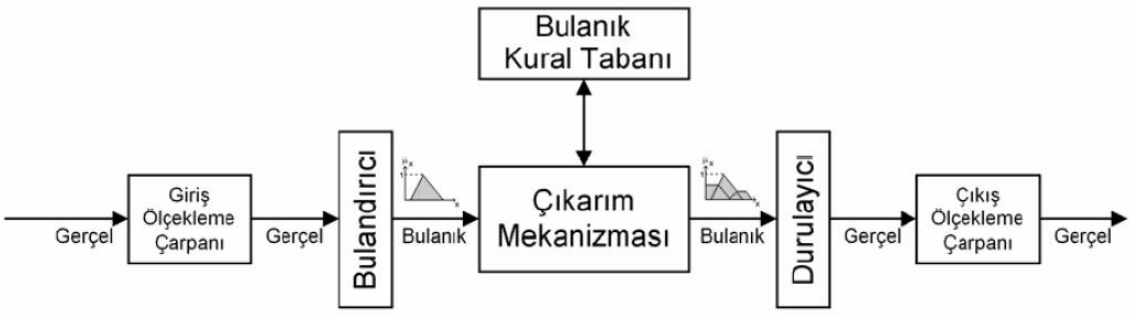
Yıl	Yazarlar	Çalışmanın Konusu
1973	Zadeh	Dilsel yaklaşım
1974	Mamadani ve Assilian	Buhar makinesinin kontrolü
1976	Rutherford	Kontrol algoritmalarının analizi
1977	Willaeys	Optimal bulanık kontrol
1980	Tong	Atık su arıtma sistemleri
1983	Hirota ve Pedrycz	Rastlantısal bulanık kümeler(kontrol)
1983	Takagi ve Sugeno	Bulanık kontrol kurallarının türetilmesi
1983	Yasunobu, Miyamoto	Öngörülü bulanık kontrol
1984	Sugeno ve Murakami	Model arabanın park kontrolü
1985	Kiszka, Grupta	Bulanık sistemlerin kararlılığı
1985	Togai ve Watanabe	Bulanık çipi
1986	Yamakawa	Bulanık kontrol donanım sistemi

Bulanık mantık temel olarak, insanın düşünme sistemi ve dilsel izah üzerine kurulmuştur. Genel durum ve belirgin bir örnek üzerinden açıklanacak olursa Şekil 3. 5'deki gibi gösterilebilir. Müşterinin yemek servisinden memnuniyetine göre davranışı örneklenmiştir.



Şekil 3. 5 Bulanık mantık sisteminin genel durum gösterimi (sol) ve örneği (sağ)

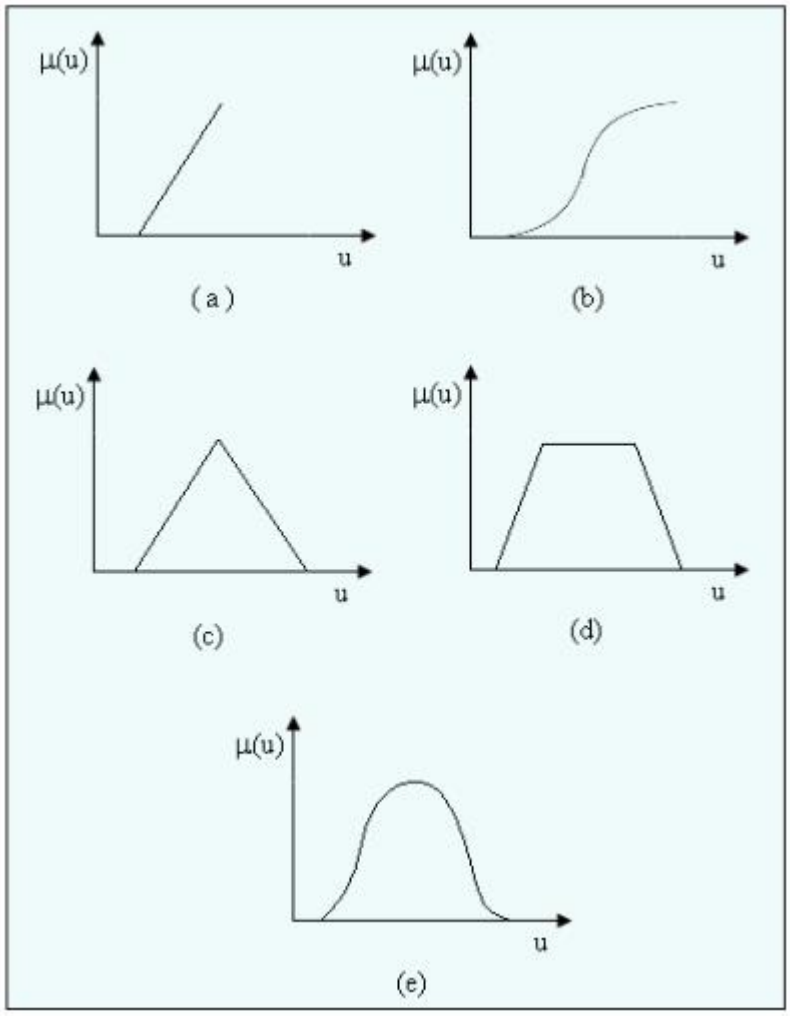
En basit bulanık sistemin ana yapıları bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasıdır. Kural tabanında, bulanık EĞER – İSE kuralları bulunur. Kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel bulanık sistem yapısı bulandırıcı ve durulayıcı (netleştirici) adı verilen iki birim daha içerir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelere dönüştürürken, durulayıcı, tersine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 3. 6'da verilmiştir [67].



Şekil 3. 6 Bir bulanık sistemin içyapısı [67]

Bulanık mantık ilkelerinin klasik kümelerden temel farkı, bir elemanın herhangi bir kümeye ait olması konusunda verilecek yanıtın klasik kümelerdeki gibi "evet" ya da "hayır" gibi kesin olmayıp, bu elemanın ilgili kümeye ait olma olasılığının 0 ile 1 arasında değerler alabilen sürekli bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesidir.

Bulanık modeller oluşturulurken değişik formlarda üyelik fonksiyonları seçilebilir. Üyelik fonksiyonunun tespiti, çok önemli bir basamaktır ve sistemin hassasiyetini belirler. Bu fonksiyonları oluşturmada özel bir kural yoktur. Fakat öncelikle, dilsel olarak ifade edilecek olan bölgelerin sayıları tespit edilmelidir. Örneğin, bir koşul önermesindeki dilsel niteleyiciler {Küçük, Orta, Büyük} bazı alanlarda yeterli olmayabilir. O zaman {Çok Küçük, Küçük, Orta, Büyük, Çok Büyük} daha fazla koşul ünitesi kullanılması gerekebilir. Daha sonraki hassasiyet ise, üyelik fonksiyonlarının şekilleriyle arttırılır. Yaygın üyelik fonksiyonları olarak monotonik, sigmoid, üçgen, yamuk, gauss eğrisi vb. fonksiyonlar sayılabilir. Şekil 3. 7'de yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları görülmektedir [67], [66].



Şekil 3. 7 Yaygın olarak kullanılan üyelik fonksiyonları: a) Monotonik, b) Sigmoid, c) Üçgensel, d) Yamuk, e) Gasuss eğrisi

Elde edilen bulanık model, bulanık kuralların türüne göre adlandırılır. Bulanık önermedeki sonuç ifadesinin yapısına göre bulanık kural tabanı dört farklı yapıda olabilmektedir. Kural tabanı tipleri aşağıdaki gibidir:

- Mamdani tipi bulanık kural (Tez çalışmasında kullanılmıştır.)
- Tekli tip bulanık kural
- Takagi – Sugeno tipi bulanık kural (Tez çalışmasında kullanılmıştır.)
- Tsukamoto tipi bulanık kural

Genel olarak Mamdani tipi bulanık kurallar aşağıdaki gibi yazılır;

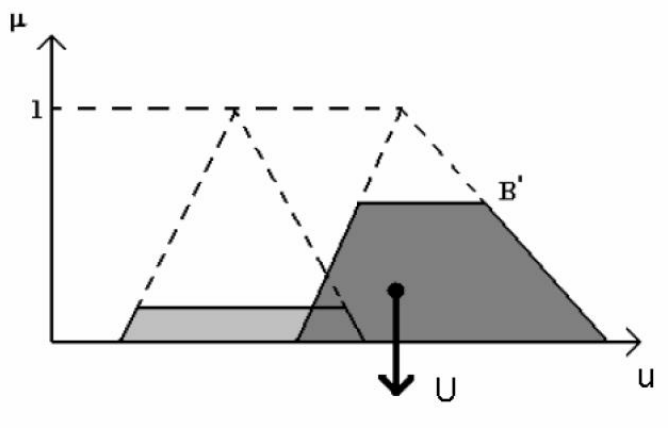
- Kural 1: **Eğer** $x = A_1$ ve $y = B_1$ **İse** $z = N_1$
- Kural 2: **Eğer** $x = A_2$ ve $y = B_2$ **İse** $z = N_2$

Burada x ve y, öncül kısımdaki girdi değişkenlerince tanımlanan koşullar, z ise soncul kısımdaki çıktı değişkenlerince tanımlanan sonuçlardır.

Netleştirici (Durulayıcı), çıkarım ünitesinden gönderilen kontrol işaretinin fiziksel ve kesin sayılara getirilmesini sağlamaktadır. Netleştirici (Durulayıcı) bu işlemi çeşitli yöntemlere göre yapabilir. Bunlardan bazıları [66]:

- Maksimum nokta yöntemi,
- Merkez (Centroid) yöntemi, (Tez çalışmasında kullanılmıştır.)
- Ağırlıklı ortalama yöntemi, (Tez çalışmasında kullanılmıştır.)
- Maksimum noktaların ortalaması yöntemi,
- En geniş alan merkezi yöntemi,
- İlk ve son yükseliş yöntemi.

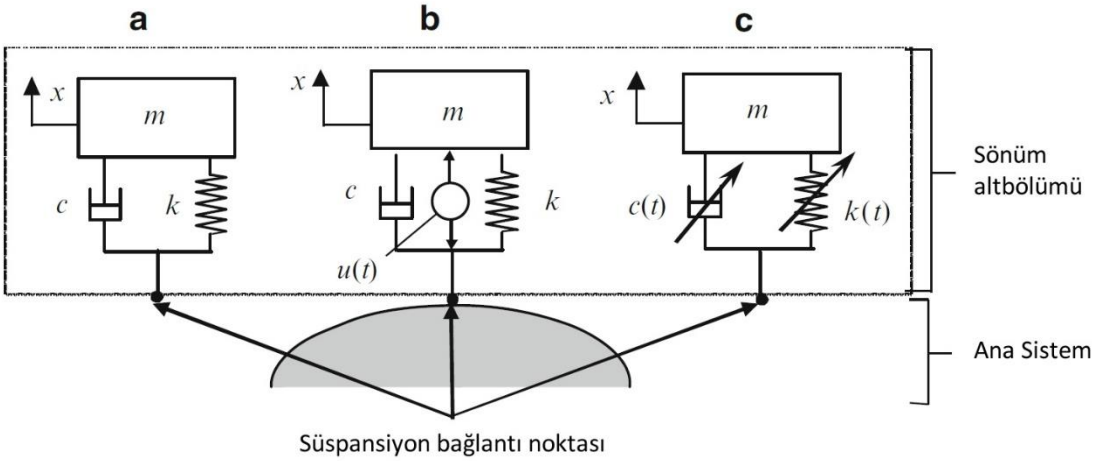
Merkez yöntemi, netleştirme (durulama) yöntemi olarak en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Matlab'da Mamdani tipi bulanık kural için varsayılan yöntemdir. Ağırlık merkezi hesaplanarak yapılmaktadır (Şekil 3. 8). Bu nedenle alan merkezi ya da ağırlık merkezi olarak da adlandırılır.



Şekil 3. 8 Ağırlık merkezi yöntemi ile netleştirme [67]

3.3 Titreşim Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması

Literatürde en çok kullanılan üç titreşim kontrol sistemi sınıflandırması; pasif, aktif ve yarı aktif olarak adlandırılır [68]. Şekil 3. 9'de (a) pasif, (b) aktif, (c) yarı aktif titreşim kontrol sisteminin karşılaştırması yer almaktadır [68]. Titreşim kontrol sisteminin görevini yerine getirebilmesi için gerekli dış güç miktarına bağlı olarak; titreşim kontrol sisteminin aktif, pasif veya yarı aktif olduğu söylenir [11].



Şekil 3. 9 Titreşim kontrol sistemleri [69]

Pasif titreşim kontrolü, yüksek kararsızlık sergileyen bozucu etkiler ile karşılaşıldığında yapısal uygulamalarda belirgin kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamaları gidermek amacı ile aktif titreşim kontrol sistemlerinden yararlanılır. Sönümleyici altbölümünün bir parçası olarak şekildeki gibi ilave bir aktif kuvvet dâhil edilir. Böylelikle sistemi bozucu etkilere karşı daha iyi cevap verebilir yapacak farklı algoritmalar kullanarak sistem kontrol edilir [68], [70], [11].

3.4 Aktif Titreşim Kontrolü

Aktif titreşim kontrolü, havacılık ve uzay mühendisliği [71], inşaat mühendisliği [72], makine mühendisliği [73] gibi farklı mühendislik alanlarında çeşitli yapılara uygulanabilir. O'Connor ve Lang (1998) [74] toplu parametreli çok serbestlik dereceli bir sistem olarak tek eklemli elastik robot kolunun modelini ortaya koymuştur. Aktif kontrol sisteme dalga sönümleme tekniği ile uygulanmıştır. Esnek robot kolunun konum kontrolüne hızlı cevap zamanı ve minimum kalıcı titreşimle ulaşılır.

3.4.1 Akıllı Yapılarda Aktif Titreşim Kontrolü

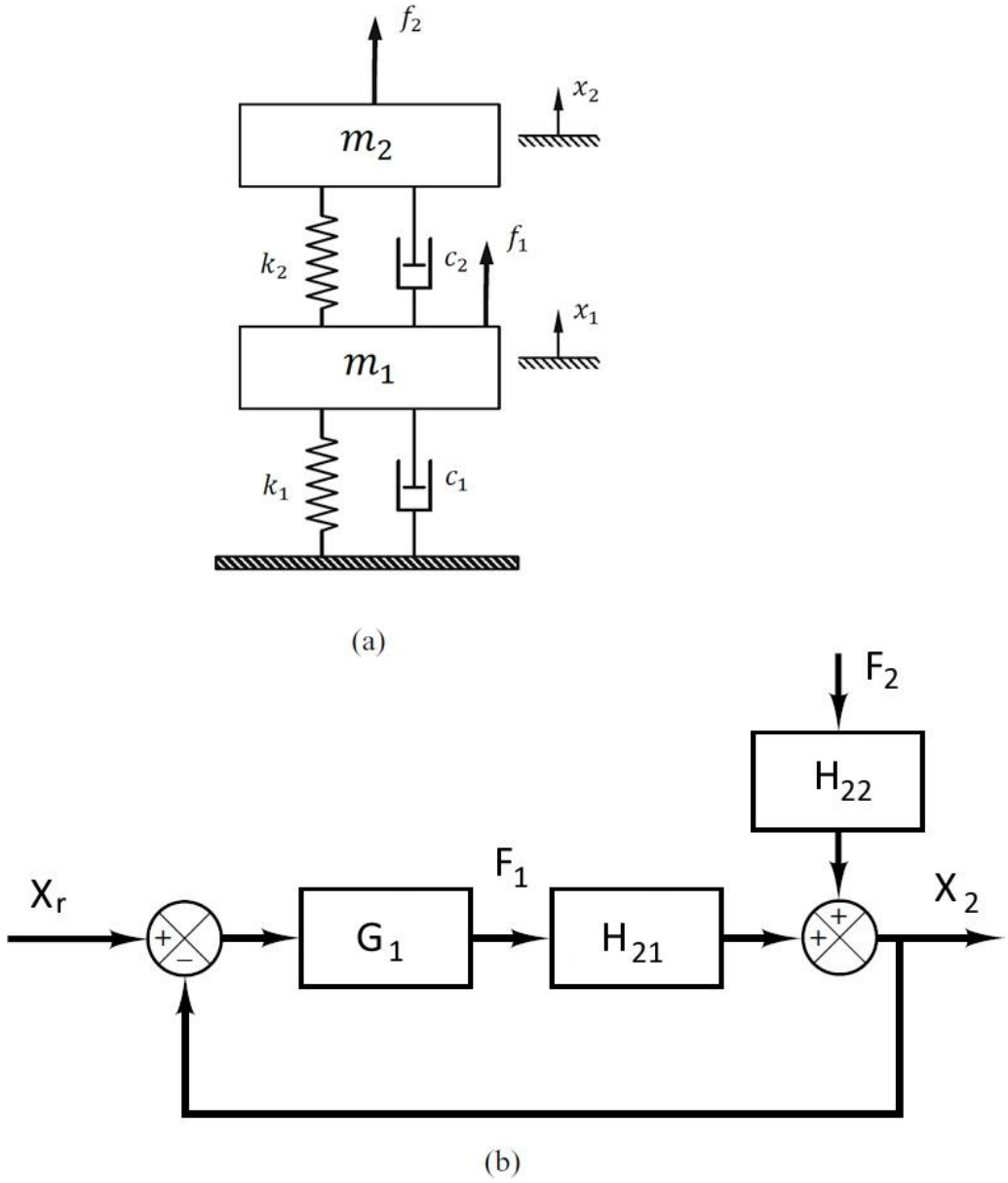
Akıllı yapılardaki aktif titreşim kontrolünü anlamak için, öncelikle 2 serbestlik dereceli sistemin titreşim kontrol problemi incelenecektir. Analitik sonuçlar Laplace dönüşümü ile elde edilmiştir. Kapalı devre titreşim kontrolünde giriş referans değeri sıfır olarak alınmıştır. Sensörde algılanan anlık şekil değiştirme verileri, sıfırdan çıkarılarak hata sinyal değeri bulunur. Hata değeri kontrol kazancı ile çarpılarak aktüatöre girdi olarak kullanılacak voltaj değeri hesaplanır. Bu işlemler kararlı durum değerine ulaşılana kadar devam eder [12].

3.4.2 İki Serbestlik Dereceli Sistemin Analitik Çözümü

Bu bölümde ele alınan sistem ve sistemin kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 3. 10'de gösterilmiştir [12]. Sistemde $m_1 = 1.2\ \text{kg}$, $m_2 = 1\ \text{kg}$, $k_1 = 350\ \text{N/m}$, $k_2 = 300\ \text{N/m}$, $c_1 = 4\ \text{Ns/m}$, $c_2 = 3\ \text{Ns/m}$ dir. Titreşim oluşturan kuvvet f_2, kontrol kuvveti f_1 olmaktadır. X_r , X_2 , F_1 ve F_2 sırasıyla referans girişin (x_r), çıkış yerdeğiştirmesinin (x_2), f_1 ve f_2 kuvvetlerinin Laplace dönüşümüdür. Kontrol eyleminin transfer fonksiyonu G_1 olup PID kontrol için şu şekildedir;

$$G_1(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{3.21}$$

K_P, K_I, K_D sırasıyla oran, integral ve türev sabitleridir [62]. F_1'den X_2'ye olan transfer fonksiyonu $H_{21}(s)$, ve F_2'den X_2'ye olan transfer fonksiyonu $H_{22}(s)$ dir. Referans giriş x_r titreşim kontrolü için 0 olarak alınmıştır. $x_e(t)$ hata sinyali olarak tanımlanır ve $x_e(t) = x_r(t) - x_2(t)$ dir [62]. Titreşim oluşturan kuvvet, birim basamak fonksiyonunun türevi olan birim impuls olarak alınmıştır ve $F_2(s) = 1$ dir.



Şekil 3. 10 (a) İki serbestlik dereceli sistem ve (b) kapalı çevrim kontrol sisteminin blok diyagramı

Lagrange denklemini uygulayarak [75], Şekil 3. 10 (a) ’daki sistemin matematiksel modeli şu şekilde bulunur;

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \qquad (3.22)$$

Ardından kütle, sönüm ve yay sabiti değerleri yerine koyularak, transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$H_{21}(s) = \frac{3(s+100)}{D(s)} \tag{3.23}$$

$$H_{22}(s) = \frac{\left(1.2s^2+7s+650\right)}{D(s)} \tag{3.24}$$

Burada

$$D(s) = 1.2s^4 + 10.6s^3 + 1022s^2 + 2250s + 105000 \tag{3.25}$$

$x_r(s) = 0$ ve $F_2(s) = 1$ yerlerine konulursa, Şekil 3. 10 (b)'deki kapalı çevrim sistemin transfer fonksiyonu bulunur;

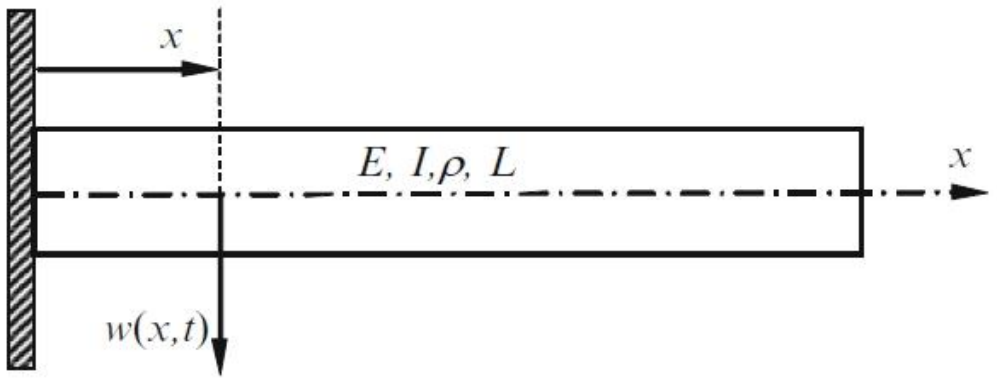
$$X_2(s) = \frac{s\left(1.2s^2+7s+650\right)}{sD(s)+3[K_D s^3+(K_P+100K_D)s^2+(100K_P+K_I)s+100K_I]} \tag{3.26}$$

$X_2(s)$ 'nin ters Laplace dönüşümü alınarak $x_2(t)$ bulunabilir.

BÖLÜM 4

ANKASTRE KİRİŞ TİTREŞİMLERİ VE MODELLEMESİ

Deneysel çalışmadaki üzerine piezoelektrik yama yapıştırılmış bir ucu ankastre diğer ucu serbest, enine titreşen yapı elastik kiriş olarak ele alınır. Bu bölümde ankastre kirişin modellemesine değinilecektir.



Şekil 4. 1 Üniform ankastre kiriş [11]

Modelleme doğruluğuna bağlı olarak kiriş teorileri birkaç guruba ayrılabilir, bunlardan bazıları [76]:

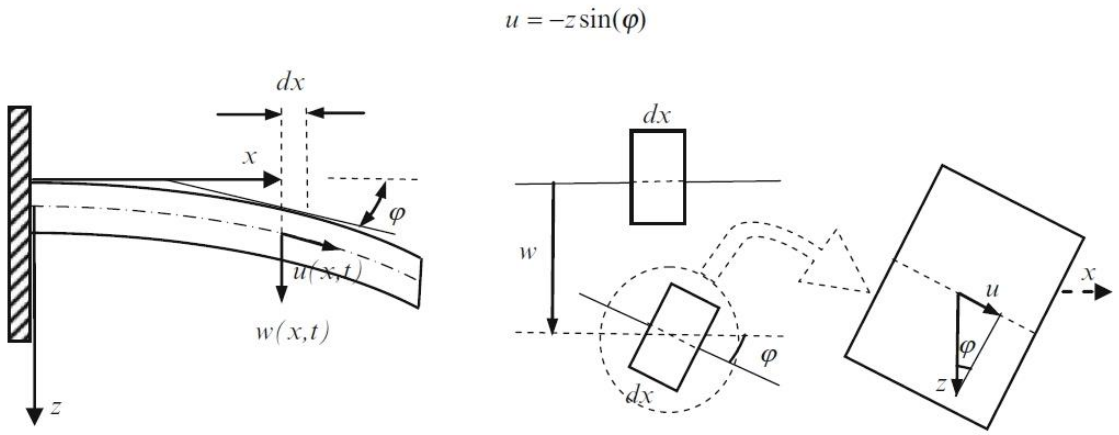
- Euler–Bernoulli kiriş teorisi
- Timoshenko teorisi
- 3-Boyutlu kiriş teorisi

Tez kapsamında elastik kiriş Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre modellenmektedir.

4.1 Ankastre Kirişlerde Eğilme Titreşimleri

Ankastre kiriş (Şekil 4. 1) sürekli bir kiriş olarak modellenebilir. Bu sistemler literatürde sürekli sistem olarak anılırlar. Sürekli sistemler teorik olarak sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Bu yüzden bu sistemlerde kirişin uzunluk boyunca oluşan çökme hareketi bir sürekli fonksiyon olarak ifade edilir. Sonsuz sayıda koordinatın, kirişin elastik çökme eğrisini oluşturur [41].

Kirişin hareket denklemlerini elde etmek için Şekil 4. 2'daki gibi kiriş modellenir. Burada x kirişin uzunluk boyunca eksenini, y kirişin hareket eksenini, $M(x,t)$ kirişin eğilme momentini, $\mathrm{V(x,t)}$ kesme kuvvetini, $\mathrm{f(x,t)}$ kiriş üzerine etkiyen yayılı kuvveti, $\mathrm{w(x,t)}$ kirişin y mesafesindeki değerini ifade eder. Kirişten sonsuz küçüklükte dx kadar parça alınarak sistemin serbest cisim diyagramı çizilir. Buradan Newton kanunu kullanılarak kuvvet ve moment denge eşitlikleri denklem (4.1) ve denklem (4.2)'deki gibi yazılır [41], [77].



Şekil 4. 2 Euler-Bernoulli kiriş modeli [11]

$$-\frac{\partial V}{\partial x}(x,t) + f(x,t) = \rho_b A_b(x)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \tag{4.1}$$

$$\frac{\partial M}{\partial x}(x,t) - V(x,t) = 0 \tag{4.2}$$

Denklem (4.1) ve denklem (4.2)'ye $V = \partial M/\partial x$ eşitliği ilave edilerek;

$$-\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}(x,t) + f(x,t) = \rho_b A_b(x)\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) \tag{4.3}$$

denklemi elde edilir. Eğilme momenti ve çökme arasındaki ilişki denklem (4.4)' de E_b malzemenin elastik modülünü, $I_b(x)$ kütlesel atalet momentini göstermek üzere denklem (4.3) yerine yazılırsa denklem (4.5) elde edilir;

$$M(x,t) = E_b I_b(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x,t) \tag{4.4}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[E_b I_b(x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}(x,t)\right] + \rho_b A_b(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = f(x,t) \tag{4.5}$$

Denklem düzenlenirse;

$$E_b I_b(x) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x,t) + \rho_b A_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = f(x,t) \tag{4.6}$$

Denklem (4.6)'da serbest titreşim için $f(x,t) = 0$ alınarak ankastre kirişin hareket denklemi şu şekilde elde edilir;

$$E_b I_b(x) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x,t) + \rho_b A_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x,t) = 0 \tag{4.7}$$

Bu eşitliğe göre hareket denklemi düzenlenerek serbest titreşim çözümü, değişkenlerin ayrılması yöntemiyle bulunur. Burada $W_b(x)$ konuma ve $T_b(t)$ zamana bağlı olan çökme iki farklı fonksiyon olarak ifade edilir;

$$\mathrm{w(x,t)} = W_b(x) T_b(t) \tag{4.8}$$

Denklem (4.8), denklem (4.7)'de yerine yazılırsa kiriş boyunca çökmeyi ifade eden mod şekil fonksiyonu ve kirişin doğal frekansı sırasıyla denklem (4.9) ve denklem (4.10)'daki gibi bulunur [78];

$$W(x) = A\cos\beta x + B\sin\beta x + C\cosh\beta x + D\sinh\beta x \tag{4.9}$$

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{E_b I_b}{\rho_b A_b}} \tag{4.10}$$

Denklem (4.9)' da belirtilen katsayılar kirişin bağlantı durumuna göre farklılık gösterir. Bir ucu serbest ankastre kirişte kullanılan sınır şartları $W(0)$ kirişin ankastre noktasındaki pozisyonu, $W'(0)$ ankastre noktasındaki hızı, $W''(L)$ kiriş ucundaki eğilme momentini ve $W'''(L)$ kiriş ucundaki kesme kuvvetini göstermek üzere şu şekilde yazılır;

$$W'(x) = A\beta\cosh\beta x + B\beta\sinh\beta x + C\beta\cos\beta x - D\beta\sin\beta x \tag{4.11}$$

$$W''(x) = A\beta^2\sinh\beta x + B\beta^2\cosh\beta x - C\beta^2\sin\beta x - D\beta^2\cos\beta x \tag{4.12}$$

$$W'''(x) = A\beta^3 \cosh \beta x + B\beta^3 \sinh \beta x - C\beta^3 \cos \beta x + D\beta^3 \sin \beta x \quad (4.13)$$

Ankastre kirişin için sınır şartları aşağıdaki gibi olup;

$$w(0,t) = 0 \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial w(0,t)}{\partial x} = 0 \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial^2 w(L,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial^3 w(L,t)}{\partial x^3} = 0 \quad (4.17)$$

Burada L kirişin uzunluğudur. Sınır şartları, (4.9) eşitliğinde yerine koyulursa aşağıdaki dört denklem elde edilir;

$$A + C = 0 \quad (4.18)$$

$$B + D = 0 \quad (4.19)$$

$$-A \cos \beta L - B \sin \beta L + C \cosh \beta L + D \sinh \beta L = 0 \quad (4.20)$$

$$A \cos \beta L - B \sin \beta L + C \cosh \beta L + D \sinh \beta L = 0 \quad (4.21)$$

İlk üç eşitlik sonuncu eşitlikte yerine koyulursa şu denkleme ulaşılır;

$$A\left[1 + \frac{(\cos \beta L + \cosh \beta L)^2}{(sin^2 \beta L + sinh^2 \beta L)}\right] = 0 \quad (4.22)$$

Denklemin sıfıra eşit olan çözümünden $A = 0$ ve $B = C = D = 0$ bulunur. Bu sonuçtan;

$$\left[\frac{(\cos \beta L + \cosh \beta L)^2}{(sin^2 \beta L + sinh^2 \beta L)}\right] = -1 \quad (4.23)$$

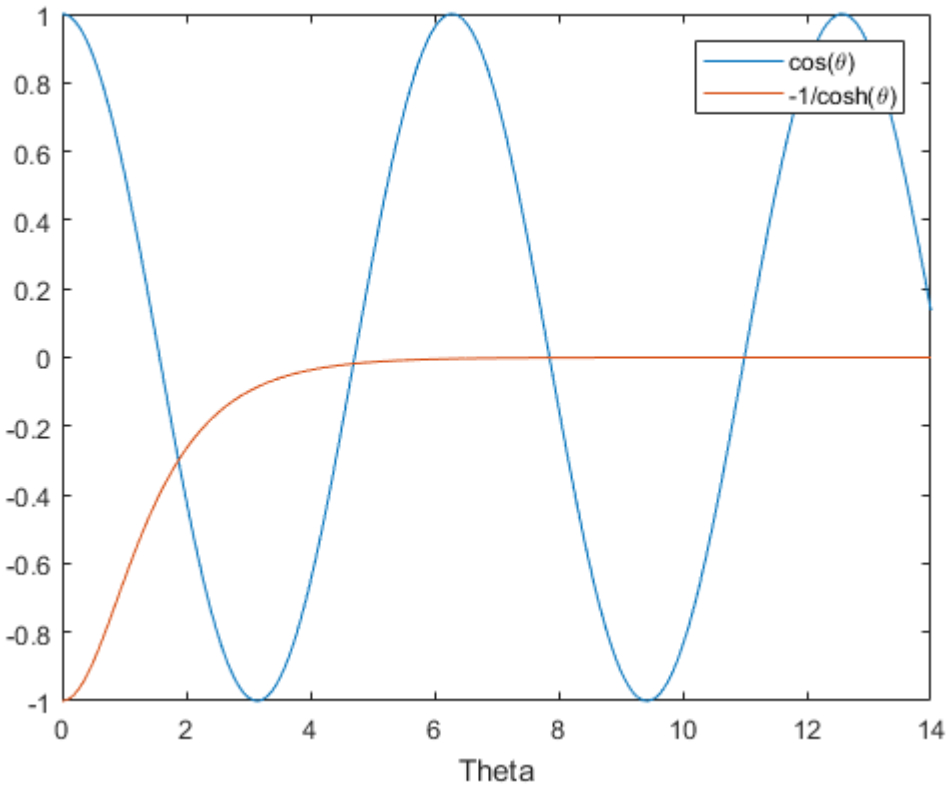
Elde edilir. βL'ye θ denilip, $\beta L = \theta$ dönüşümü ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa denklem (4.24) elde edilir;

$$\cos \theta \cosh \theta = -1 \quad (4.24)$$

Denklem (4.24) grafiksel olarak çözülür. Bunun için eşitliğin her iki tarafı θ için çizdirilir. Şekil 4. 3' de denklemin her iki tarafının çizimi gösterilmektedir. İki eğrinin kesişim noktaları θ değerlerini vermektedir (Çizelge 4. 1).

Çizelge 4. 1 θ'nın sabit değerleri

n	$\theta_n = \beta_n L$
1	1.875104069
2	4.694091133
3	7.85475743



Şekil 4. 3 Theta'nın grafiksel olarak çözümü

Denklem (4.11)'de belirtilen sınır koşulları altında denklem (4.7)' deki diferansiyel denklem çözüldüğünde ankastre kiriş için doğal frekans denklemi, β_n katsayısı ve mod şekil fonksiyonu sırasıyla denklem (4.25), denklem (4.26) ve denklem (4.27)' de elde edilmiştir. Denklemde bulunan *n* indisi mod sayısını belirtmektedir;

$$\omega_n = (\beta_n)^2 \sqrt{\frac{E_b I_b}{\rho_b A_b}} \tag{4.25}$$

$$\beta_n = \theta_n / L \tag{4.26}$$

$$\psi_n(x) = A_n \left[\cos \beta_n x - \cosh \beta_n x - \frac{\cos \theta_n + \cosh \theta_n}{\sin \theta_n + \sinh \theta_n} (\sin \beta_n x - \sinh \beta_n x) \right] \tag{4.27}$$

Denklem (4.27)'deki A_n sabiti, ortogonallik ilişkisi kullanılarak bulunur [79];

$$\int_0^L \psi_n \rho A \psi_n dx = 1 \tag{4.28}$$

Burada ρ ve A, sırasıyla yoğunluk ve kesit alanıdır. Denklem (4.27), denklem (4.28)'de yerine yazılırsa A_n sabiti elde edilir;

$$A_n = \sqrt{\frac{1}{\rho A I_n}} \tag{4.29}$$

Buradaki I_n basitçe integral olmaktadır;

$$I_n = \int_0^L (\psi_n)^2 dx \tag{4.30}$$

4.1.1 Kirişin Titreşim Denklemi

İkinci dereceden lineer bir mekanik sistemin titreşim denklemi m kütle, c sönüm ve k yay sabiti değeri olmak üzere Newton kanununa göre;

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \tag{4.31}$$

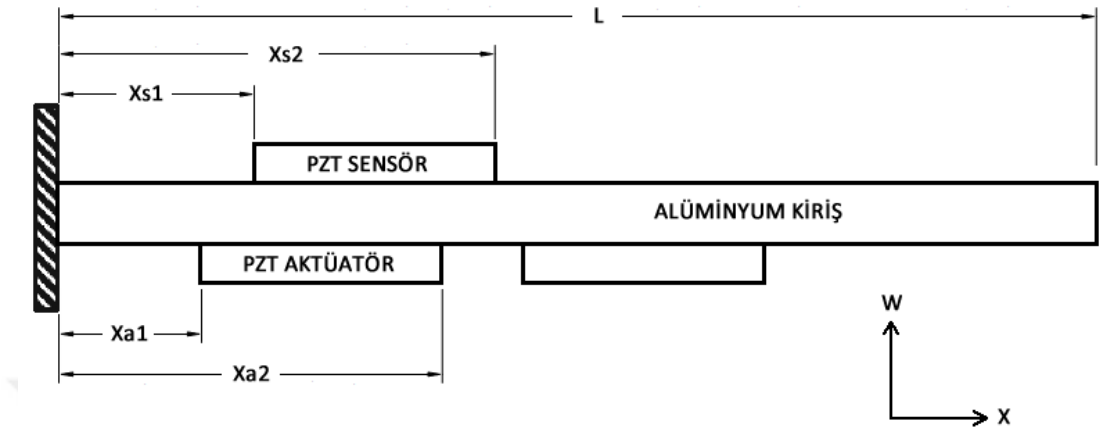
Yukarıdaki denklem yazılır. Denklem modal koordinatlarda incelenmek üzere doğal frekans ve sönüm oranı cinsinden yazılması gerekir.

Denklem (4.6)'daki hareket denklemi ve denklem (4.25)'deki doğal frekans denklemi esas alınarak denklem (4.32)'da modal koordinatlara dönüştürülmek üzere, ζ sönüm oranı, $\eta_n(t)$ modal yer değiştirme, $\dot{\eta}_n(t)$ modal hız, $\ddot{\eta}_n(t)$ modal ivme ve $f(t)$ kiriş üzerine uygulanan dış kuvvet olmak üzere titreşim denklemi elde edilir;

$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\zeta\omega_n\dot{\eta}_n(t) + {\omega_n}^2\eta_n(t) = f(t) \tag{4.32}$$

4.2 Akıllı Kirişin Modellenmesi

Üzerine üç adet piezoseramik yama yapıştırılmış akıllı kiriş modeli Şekil 4. 4'te gösterilmektedir. Kirişin bir ucu mesnetli diğer ucu ise serbesttir.



Şekil 4. 4 Piezoelektrik sensör ve aktüatör yapıştırılmış ankastre kiriş

Piezoelektrik aktüatör kaynaklı eğilme momenti denklem (4.6)'ya dâhil edilirse, kirişin sönümsüz hareketini tanımlayan kısmi diferansiyel denklem (4.33) elde edilir [80], [81] :

$$\rho_b A_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + E_b I_b \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = M_a \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} \quad (4.33)$$

Burada kiriş malzemesinin yoğunluğu ρ_b, kirişin kesit alanı A_b, kirişin elastisite modülü E_b, kirişin eğilme atalet momenti I_b, kirişin yer değiştirmesi w, kiriş üzerine etkiyen eğilme momenti M_a olmaktadır. R genelleştirilmiş konum fonksiyonudur.

$$R(x) = H(x - x_{a1}) - H(x - x_{a2}) \quad (4.34)$$

Denklem (4.34)'de H Heaviside fonksiyonu olup, x_{a1} ve x_{a2} aktüatörün konumudur [82].

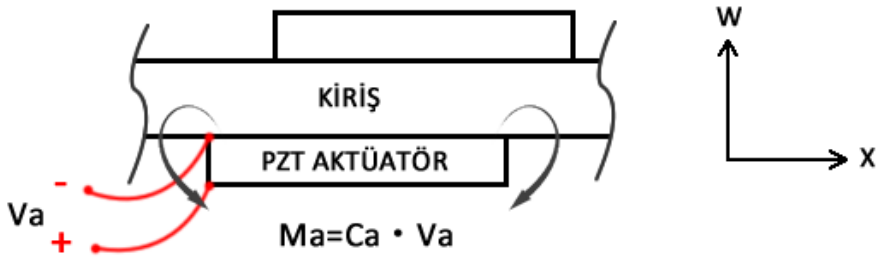
Kirişin yerdeğiştirmesi sonsuz seri ile ifade edilir:

$$w(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(x)\eta_n(t) \quad (4.35)$$

Burada $\psi_n(x)$ kirişin n'inci mod şekli ve $\eta_n(t)$ ise buna karşılık gelen genelleştirilmiş yer değiştirmedir.

4.2.1 Piezoelektrik Aktüatör Modeli

Kirişin alt yüzeyine yapıştırılmış piezoseramik yamanın aktüatör modeli Şekil 4. 5'te yer almaktadır. Piezoseramik yamaların aktüatör olarak tahrik kabiliyeti piezoelektrik sabit d_{31} tarafından kontrol edilmektedir. Piezoelektrik sabit d_{31}'in indisindeki 3, elektriksel yükün polarize yüzeylerde veya w-ekseni yönünde toplandığı anlamına gelmektedir; 1 ise kuvvetin boylamasına x-ekseni doğrultusunda oluşturulduğu anlamındadır.



Şekil 4. 5 Piezoelektrik aktüatör modeli – eğilme momenti

Piezoelektrik malzemenin polarizasyonu ile aynı yönde bir gerilim (V_a) uygulandığında, malzeme x-ekseni doğrultusunda uzar. Eğilme momenti (M_a) Şekil 4. 5'te gösterilmektedir. Polarizasyon yönüne ters V_a uygulanırsa, malzeme x-ekseni doğrultusunda kısalır. Gerilim tarafından endüklenen moment şu şekildedir [80];

$$M_a(t) = C_a V_a(t) \tag{4.36}$$

Buradaki sabit C_a denklem (4.37) ile hesaplanır:

$$C_a = \frac{1}{2} d_{31} E_a b_a (h_b + h_a) \tag{4.37}$$

Eşitlikte piezoseramik aktüatörün elastisite modülü E_a, isotropik düzlemde elektrik yük sabiti d_{31}, aktüatörün genişliği b_a, kirişin kalınlığı h_b, aktüatörün kalınlığı h_a olmaktadır.

Toplam yayılı yük $q_a(x,t)$ denklemi şöyledir;

$$M_a \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} = q_a(x,t) \tag{4.38}$$

4.2.2 Piezoelektrik Sensör Modeli

Kirişin yapısal şekil değiştirmesi piezoseramik sensörde mekanik gerinim oluşturur. Piezoelektrik sensörün elektrik yükü $Q_s(t)$, piezoseramik malzeme boyunca yayılı elektriksel yükün toplamının sensör genişliği b_s ile çarpımına eşittir [81]. Elektrik yükü dağılımı $q(x,t)$ şöyledir;

$$q(x,t) = \left(\frac{k_{31}^2}{g_{31}}\right) \varepsilon_c(x,t) \tag{4.39}$$

Burada eşleşme katsayısı k_{31}, voltaj sabiti g_{31}, sensördeki gerinim $\varepsilon_c(x,t)$ olmaktadır. Gerinim $\varepsilon_c(x,t)$ kirişin eğilmesi ile ilişkili olup denklem (4.40)'dan hesaplanır;

$$\varepsilon_c(x,t) = -\left(\frac{h_b}{2} + h_a\right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \tag{4.40}$$

Algılayıcı katmanda birikmiş toplam yük, piezoelektrik sensörün tüm yüzey alanında $q(x,t)$'nün integrali alınarak bulunur:

$$Q_s(t) = -b_s \int_{x_{s1}}^{x_{s2}} q(x,t)\, dx = -b_s \left(\frac{h_b}{2} + h_a\right) \left(\frac{k_{31}^2}{g_{31}}\right) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\Big|_{x_{s1}}^{x_{s2}} \tag{4.41}$$

4.2.3 Aktüatör İle Transfer Fonksiyonunun Elde Edilmesi

Denklem (4.35), denklem (4.33) 'de yerine koyulursa denklem (4.42) elde edilir [81];

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[\rho_b A_b \psi_n(x) \ddot{\eta}_n(t) + E_b I_b \dddot{\psi}_n(x) \eta_n(t)\right] = M_a(t) \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} \tag{4.42}$$

$\int_0^L \psi_n^2(x)dx = 1$, olduğu için denklem (4.42)'nin $\int_0^L \psi_n\,(x)dx$ ile integrali alınırsa;

$$\left(\rho_b A_b \int_0^L \psi_n^2\,(x)\, dx\right) \ddot{\eta}_n(t) + \left(E_b I_b \int_0^L \psi_n^2 \dddot{\psi}_n(x)\, dx\right) \eta_n(t) =$$

$$M_a(t) \int_0^L \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} \psi_n(x)\, dx \tag{4.43}$$

Burada;

$$\dddot{\psi}_n(x) = \theta_n^4 \psi_n(x) \tag{4.44}$$

Olup denklem (4.43) şu şekle dönüşür;

$$(\rho_b A_b) \ddot{\eta}_n(t) + E_b I_b \theta_n^4 \eta_n(t) = M_a(t) \int_0^L \frac{\partial^2 R(x)}{\partial x^2} \psi_n(x)\, dx \tag{4.45}$$

Böylece denklem (4.43), denklem (4.33)'ün ikinci derece haline sadeleştirilir;

$$\ddot{\eta_n}(t) + \omega_{dn}^2 \eta_n(t) = k_a\left[\dot{\psi}_n(x_{a2}) - \dot{\psi}_n(x_{a1})\right]V_a(t) \tag{4.46}$$

Burada

$$k_a = \left(\frac{1}{2} d_{31} E_a b_a (h_b + h_a)\right)/\rho_a A_a \tag{4.47}$$

olmaktadır. Sönüm ζ_n eklendiğinde denklem (4.46) son halini alır;

$$\ddot{\eta_n}(t) + 2\zeta_n \omega_{dn} \dot{\eta_n}(t) + \omega_{dn}^2 \eta_n(t) = k_a\left[\dot{\psi}_n(x_{a2}) - \dot{\psi}_n(x_{a1})\right]V_a(t) \tag{4.48}$$

Denklem (4.48) 'in Laplace dönüşümü alınır ve denklem (4.35)'de yerine koyulursa transfer fonksiyonu elde edilir:

$$\frac{w(x,s)}{V_a(s)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_a \psi_n(x)\left[\dot{\psi}_n(x_{a2}) - \dot{\psi}_n(x_{a1})\right]}{s^2 + 2\zeta_n \omega_{dn} s + {\omega_{dn}}^2} \tag{4.49}$$

4.2.4 Aktüatör-Sensör İle Transfer Fonksiyonunun Elde Edilmesi

Denklem (4.41)'deki sensörün toplam yükü,

$$Q_s(t) = -b_s \int_{x_{s1}}^{x_{s2}} q(x,t)\, dx = -b_s \left(\frac{h_b}{2} + h_a\right)\left(\frac{k_{31}^2}{g_{31}}\right) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\Big|_{x_{s1}}^{x_{s2}} \tag{4.50}$$

Sensör konumux_{s1} ve x_{s2} için hesaplanırsa;

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2}\Big|_{x_{s1}}^{x_{s2}} = \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t)\left[\dot{\psi}_n(x_{s2}) - \dot{\psi}_n(x_{s1})\right] \tag{4.51}$$

Denklem (4.52) elde edilir;

$$Q_s(t) = k_s \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t)\left[\dot{\psi}_n(x_{s2}) - \dot{\psi}_n(x_{s1})\right] \tag{4.52}$$

Burada

$$k_s = -b_s \left(\frac{h_b}{2} + h_a\right)\left(\frac{k_{31}^2}{g_{31}}\right) \tag{4.53}$$

olmaktadır. Gerilim $V_s(t)$ ve toplam yük $Q_s(t)$ arasındaki ilişki şöyledir [81];

$$V_s(t) = \frac{Q_s(t)}{C_s b_s (x_{s2} - x_{s1})} \tag{4.54}$$

Burada piezoelektrik sensörün birim alanı için kapasitans C_s, piezoelektrik sensörün yüzey alanı $b_s(x_{s2} - x_{s1})$ olmaktadır.

Eğer $Q_s(t)$, denklem (4.38)'de yerine koyulursa;

$$V_s(t) = \frac{k_s \sum_{n=1}^{\infty} \eta_n(t)[\dot{\psi}_n(x_{s2}) - \dot{\psi}_n(x_{s1})]}{C_s b_s(x_{s2} - x_{s1})} \tag{4.55}$$

Denklem (4.48)'den;

$$\eta_n(t) = \frac{k_a[\dot{\psi}_n(x_{a2}) - \dot{\psi}_n(x_{a1})]}{(s^2 + 2\zeta_n \omega_{dn} s + {\omega_{dn}}^2)} V_a(t) \tag{4.56}$$

elde edilir. Denklem (4.56), denklem (4.55)'de yerine yazılırsa, aktüatör giriş voltajına karşılık endüklenen piezoelektrik sensör gerilimi arasındaki transfer fonksiyonu denklem (4.57) 'ye ulaşılır:

$$\frac{V_s(s)}{V_a(s)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_s k_a \psi_n(x)[\dot{\psi}_n(x_{s2}) - \dot{\psi}_n(x_{s1})][\dot{\psi}_n(x_{a2}) - \psi_n(\dot{x}_{a1})]}{C_s b_s(x_{s2} - x_{s1})(s^2 + 2\zeta_n \omega_{dn} s + {\omega_{dn}}^2)} \tag{4.57}$$

4.3 Durum-Uzay Analizi

Durum-uzay analizi, kontrol sistemlerinin tasarım ve analizi için oldukça uygundur. Transfer fonksiyonu ile analize kıyasla avantajları olduğu için bu yöntem tercih edilmiştir.

Transfer fonksiyonu ile analizin dezavantajları:

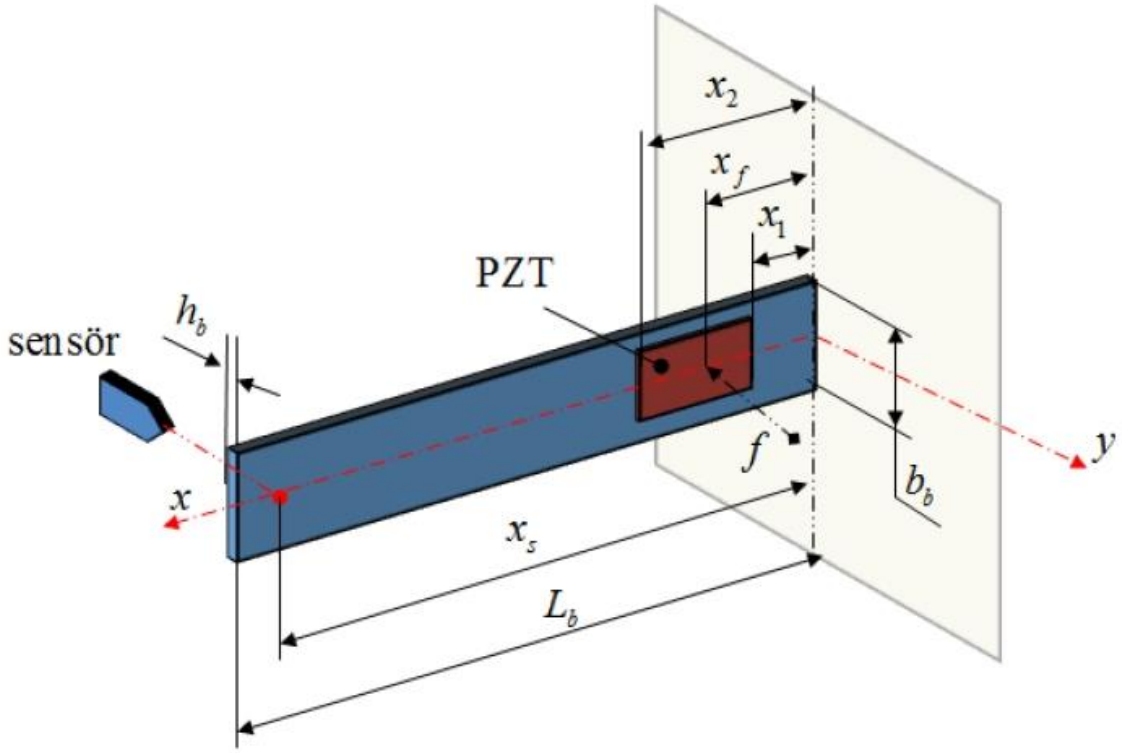
- Transfer fonksiyonu sıfır başlangıç şartında tanımlanmıştır.
- Lineer sistemlere uygulanabilir.
- Sistemin içyapısı hakkında bilgi vermez.
- Çoklu giriş-çoklu çıkış olduğu sistemlere uygulanamaz.
- Durum-uzay analizine kıyasla bilgisayarda transfer fonksiyonu analizi yapmak daha zordur.

Durum değişkenleri ile analizin avantajları:

- Nonlineer sistemlere de uygulanabilir.
- Doğrusal, zamandan bağımsız sistemlere uygulanabilir (Linear Time Invariant Systems).
- Çoklu giriş-çoklu çıkış olduğu sistemlere uygulanabilirler.
- Tek giriş-tek çıkış sistemler ile çok giriş-çıkışlı sistemler aynı şekilde ele alınır.
- Sistemin iç durumu hakkında bilgi verir.

4.3.1 Ankastre Kirişin Durum Uzayı Denklemleri

Üzerine piezoelektrik aktüatör yapıştırılmış ve sabitlenmiş ankastre kiriş Şekil 4. 6'de gösterilmiştir. Burada x koordinatı kiriş boylamasına, y ise kirişin titreşim hareketinin olduğu doğrultudadır. Kiriş üzerindeki piezoelektrik malzeme malzemenin aktif kısmının başlangıç noktası ve bitiş noktaları sırasıyla $x_1 \; ve \; x_2$ mesafeleri ile gösterilmiştir. Piezoelektrik malzemenin kirişe etkidiği tekil kuvvet f ve bu kuvvetin etkime noktası x_f ile gösterilmiştir. x_s sensörün bulunduğu konumu ifade etmektedir [41].



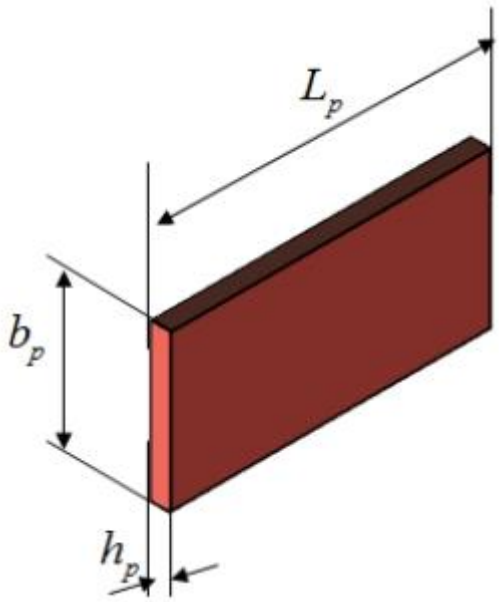
Şekil 4. 6 Piezoelektrik yama yapıştırılmış ankastre kiriş modeli [41]

Çizelge 4. 2 kirişe ait parametre değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4. 2 Ankastre kirişin parametre değerleri

Sembol	Anlamı	Değeri
$L_b \times b_b \times h_b$	Kiriş boyutları	$200.10^{-3} \times 30.10^{-3} \times 1.10^{-3}\ m$
ρ_b	Kiriş yoğunluğu	2700 kg/m^3
I_b	Kirişin eğilme atalet momenti	$2{,}5.10^{-12}\ m^4$
E_b	Kirişin elastisite modülü	$70.10^9\ N/m^2$
v	Kiriş için poisson oranı	0,35
x_1	PZT başlangıç konumu	$10.10^{-3}\ m$
x_2	PZT bitiş konumu	$35.10^{-3}\ m$
x_f	PZT tekil kuvvet konumu	$22{,}5.10^{-3}\ m$
x_s	Sensör konumu	$22{,}5.10^{-3}\ m$

Ankastre kiriş üzerine yapıştırılan piezoelektrik aktüatörün boyutları Şekil 4. 7'de gösterilmiştir. Burada piezoelektrik aktüatör boyu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla L_p, b_p, h_p ile gösterilmiştir. Çizelge 4. 3 piezoelektrik aktüatör parametre değerlerini göstermektedir.



Şekil 4. 7 Piezoelektrik aktüatörün boyutları [41]

Çizelge 4. 3 Piezoelektrik aktüatör parametre değerleri

Sembol	Anlamı	Değeri
$L_p \times b_p \times h_p$	PZT boyutları	$25.10^{-3} \times 25.10^{-3} \times 0{,}6.10^{-3}\ m$
A_p	PZT aktif alanı	$6.25 \times 10^{-4}\ m^2$
ρ_p	PZT yoğunluğu	$7650\ kg/m^3$
E_p	PZT elastisite modülü	$7{,}1.10^{10}\ N/m^2$
d_{31}	PZT yük sabiti	$-270.10^{-12}\ C/N$

Sürekli sistemlerde her bir elastik mod için denklem (4.32)' de elde edilen titreşim denklemi kullanılır. Bu denklemde bulunan $f(t)$ dış kuvvet, piezoelektrik aktüatörün oluşturduğu kuvvettir. Kontrol tasarımında bu kuvvet kontrol girişi olarak ele alınır. Modal koordinatlarda kuvvet sisteme, denklem (4.27)' de elde edilen mod şekil fonksiyonunun çarpımı şeklinde dâhil edilir;

$$\ddot{\eta_n}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{\eta_n}(t) + {\omega_n}^2\eta_n(t) = f(t)\psi_n(x_f) \qquad (4.58)$$

Genel haliyle durum uzayı denklemi aşağıdaki gibi yazılır;

$$\dot{x} = A_n x + B_n u \tag{4.59}$$

Burada x durum değişkenini, A_n sistem matrisini, B_n kontrol girişi matrisini ve u kontrol girişini ifade eder.

$$x = \begin{bmatrix} \eta_n(t) \\ \dot{\eta_n}(t) \end{bmatrix}, A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -{\omega_n}^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix}, B_n = \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_n(x_f) \end{bmatrix} \tag{4.60}$$

Ankastre kiriş üzerinde yer değiştirme ölçülüyorsa, yer değiştirme sensörün bulunduğu konumda her bir mod için modal yer değiştirme mod şekil fonksiyonunun çarpımının bir fonksiyonudur. Sürekli sistemlerde, sensör tarafından ölçülen yer değiştirme sistemin bütün mod frekansında oluşan yer değiştirmelerin toplamına eşittir kabulü yapılır.

$$y(x,t) = \sum_{i=n}^{\infty} \eta_n(t)\psi_n(x_s) \tag{4.61}$$

Buna göre çıkış yer değiştirme olarak ölçülürse, (4.62) durum uzayı yapısı esas alındığında çıkış (4.63) denklemi elde edilir;

$$y = C_n x \tag{4.62}$$

$$y = [C_n \quad 0]x \tag{4.63}$$

Sensör konumu x_s olarak gösterildiğinde, o konumdaki mod şekil fonksiyonunun değeri şu denklemden elde edilir;

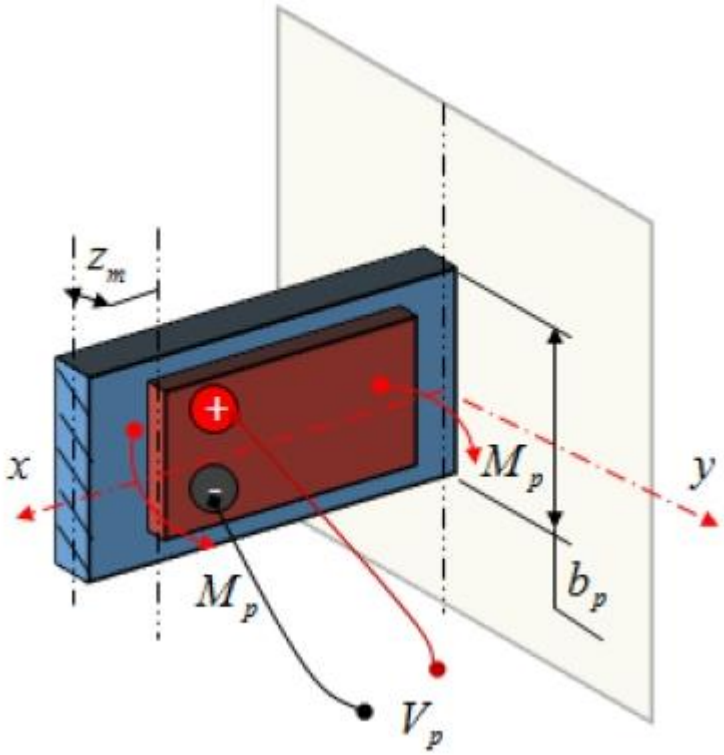
$$C = \psi_n(x_s) \tag{4.64}$$

4.3.2 Piezoelektrik Aktüatörün Uyguladığı Kuvvetin Belirlenmesi

Denklem (4.6) eşitliğinin sağ tarafında yer alan $f(t)$ kuvveti piezoelektrik yama tarafından oluşturulur. Kiriş üzerine yapıştırılan piezoelektrik yamanın şekil değiştirme altında oluşan moment etkisinin matematiksel modeli piezoelektriğin şekline göre değişir. Dikdörtgen kesitli bir piezoelektrik yamanın oluşturduğu moment etkisi (4.65) denkleminde V_p piezoelektrik malzemeye uygulanan gerilimi, z_m kiriş ve piezoelektrik malzemenin kalınlıklarının merkezler arası mesafesini, e_{31} piezoelektrik sabitini ve b_p piezoelektrik aktüatör genişliğini belirtmek üzere ifade edilmiştir [83]. Piezoelektrik

sabitinin birimi C/m^2 olup, denklem (4.69)'da d_{31} piezoelektrik yük sabitine dönüşümü gösterilmiştir.

$$M_p = -e_{31} V_p b_p z_m \tag{4.65}$$



Şekil 4. 8 Piezoelektrik yama modeli [41]

Piezoelektrik yama küçük yerdeğiştirme veya düşük voltaj değerlerinde lineer davranış gösterir. Voltaj değeri büyüdükçe nonlineer davranışlar gösterir. Fakat son yıllarda gelişen kontrol teknolojisi ve sürücü sistemleriyle nonlineer etkisi gösteren histerisiz durumu büyük oranda ortadan kaldırılmıştır. Tez kapsamında piezoelektrik eyleyicinin lineer olduğu kabul edilir. M_p çıkış momentini, C_p moment-gerilim oranını ve V_p piezoelektrik yamaya uygulanan gerilim eşitliğini göstermek üzere aşağıdaki denklem yazılır;

$$M_p(t) = C_p(t) V_p(t) \tag{4.66}$$

Yüksek gerilim altında piezoelektrik yama nonlineer özellik göstermesi durumunda (4.67) denklemi yazılır. Burada $c_p(t)$ ankastre kirişin malzeme özelliği ve geometrisine bağlı olan nominal sabitidir. $\Delta c_p(t)$ piezoelektrik eyleyicinin histerisis genliğini ifade eder;

$$M_p(t) = \left[c_p(t) + \Delta c_p(t)\right] V_p \tag{4.67}$$

Denklem (4.65)'den PZT' nin üreteceği moment aşağıdaki gibi yazılır;

$$M_p(t) = -e_{31} b_p z_m V_p \tag{4.68}$$

Denklem (4.69) ve piezoelektrik yamanın malzeme özellikleri kullanılarak $-e_{31}$ değerine ulaşılabilir. s^E piezoelektrik malzemenin katılığını, h_p ise piezoelektrik yamanın kalınlığını belirtir.

$$e_{31} = \frac{d_{31}}{s^E} \tag{4.69}$$

$$E_p = \frac{1}{s^E} \tag{4.70}$$

$$z_m = \frac{h_b}{2} + \frac{h_p}{2} \tag{4.71}$$

(4.68), (4.69), (4.70) ve (4.71) denklemleri düzenlendiğinde moment-gerilim katsayısı şu şekilde yazılır;

$$C_p = -d_{31} E_p b_p \left(\frac{h_b}{2} + \frac{h_p}{2}\right) \tag{4.72}$$

Denklem (4.66) incelendiğinde piezoelektrik yamanın moment etkisi yaptığı görülür. Kontrol uygulamasında kuvvet eşitliği kullanılacağından, moment eşitliğini kuvvet büyüklüğüne dönüştürmek için genelleştirilmiş kütle değerini hesaplayıp denkleme ilave edilmelidir. Genelleştirilmiş kiriş ve PZT kütleleri denklem (4.73)'deki gibi ortogonalite özelliği kullanılarak ifade edilir. Buradan sistemin yaklaşık olarak genelleştirilmiş kütle değeri denklem (4.74)'deki gibi yazılabilir [84].

$$l_i = \int_0^{L_b} E_b I_b \frac{d^2\psi_i}{dx^2} \frac{d^2\psi_j}{dx^2} dx + \int_0^{L_p} E_p I_p \frac{d^2\psi_i}{dx^2} \frac{d^2\psi_j}{dx^2} dx \tag{4.73}$$

$$l_i = \rho_b A_b {L_b}^3 {\omega_i}^2 \delta_{ij} + \rho_p A_p {L_p}^3 {\omega_i}^2 \delta_{ij},\ i \neq j \tag{4.74}$$

Modeldeki kuvvet değeri (4.75) denkleminde piezoelektrik aktüatör gerilimi, durum uzayı yapısında çarpan olarak gelecek şekilde yazılır. Son olarak elde edilen denklem (4.76) piezoelektrik aktüatörün elastik kirişe eklendiği eşitliği belirtir;

$$f(t) = \frac{M_p(t)}{l_i} \left[\dot{\psi}_n \left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right)\right] \tag{4.75}$$

$$f(t) = \frac{-d_{31}E_p b_p\left(\frac{h_b}{2}+\frac{h_p}{2}\right)V_p(t)}{\rho_b A_b {L_b}^3+\rho_p A_p {L_p}^3}\left[\dot{\psi}_n\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)\right] \quad (4.76)$$

4.3.3 Tüm Modları Kapsayan Durum Uzayı Denklemi Yapısı

Ankastre kiriş ve piezoelektrik aktüatörün oluşturduğu kuvvet birlikte düşünülerek tüm modları içeren durum uzayı modeli elde edilir. Denklem (4.27)'de esas alınan mod şekil fonksiyonunun denklem (4.77)'de türevi elde edilir. Türevi alınan mod şekil fonksiyonu (4.79) numaralı denklemde kullanılır;

$$\frac{d\psi_n}{dx} \quad (4.77)$$

Denklem (4.76)'da V_p kontrol girişi çarpan olarak yalnız bırakılırsa (4.78) ve (4.79) denklemleri elde edilir;

$$S_p = \frac{-d_{31}E_p b_p\left(\frac{h_b}{2}+\frac{h_p}{2}\right)}{\rho_b A_b {L_b}^3+\rho_p A_p {L_p}^3} \quad (4.78)$$

$$B1 = S_p\frac{d\psi_1}{dx}, B2 = S_p\frac{d\psi_2}{dx}, B3 = S_p\frac{d\psi_3}{dx} \quad (4.79)$$

Denklem (4.59) esas alındığında, denklem (4.60) kullanılarak tüm modları içeren durum uzayı yapısı denklem (4.80)' daki gibi elde edilir;

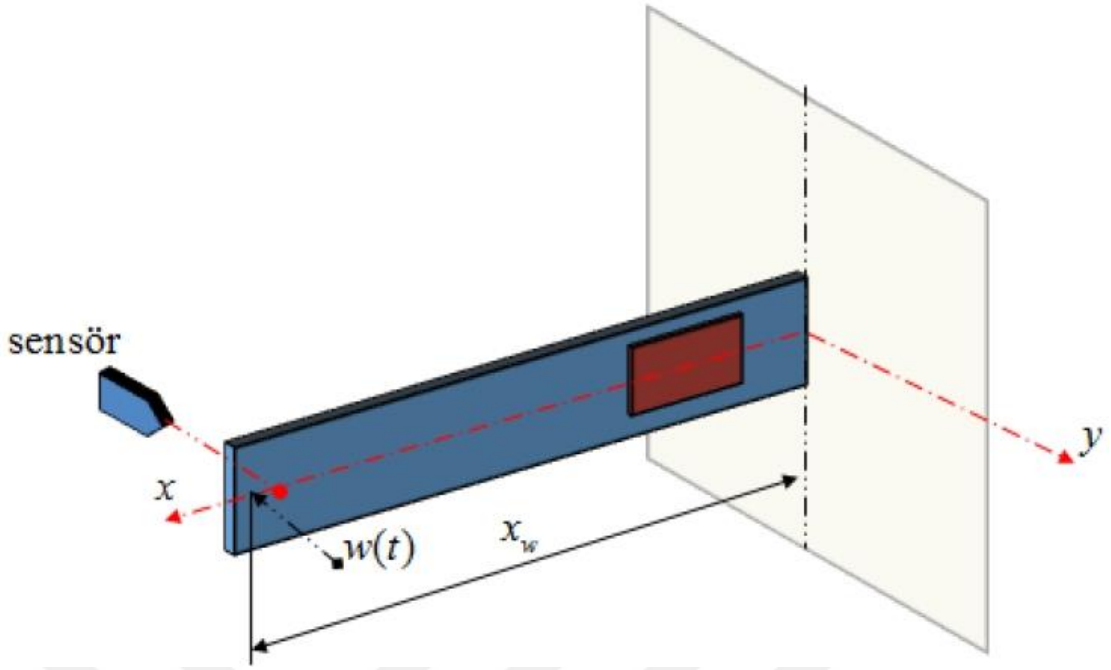
$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_1 & & 0\\ & A_2 & \\ 0 & & \ddots\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B_1\\B_2\\\vdots\end{bmatrix}u \quad (4.80)$$

Modelde sensörün yer değiştirme veya ivme ölçmesi durumuna göre çıkış denklemi değişir. Çıkış yer değiştirme ölçtüğünde çıkış durum uzayı yapısı aşağıdaki gibi elde edilir;

$$y = [\psi_1 \quad 0 \quad \psi_2 \quad 0 \quad \cdots]\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\end{bmatrix} \quad (4.81)$$

4.3.4 Bozucu Girişin Modele Eklenmesi

Modal hareket yapan sistemlerde durum uzayı denkleminde bozucu giriş tanımlamak gerekir. Şekil 4. 9 modele dâhil edilen bozucu giriş değişkenlerini gösterir. Bozucu giriş modal hareketin olduğu y eksen doğrultusunda ve belirli bir x_w mesafesinde tanımlanır [41].



Şekil 4. 9 Modele bozucu girişin ilave edilmesi [41]

Bozucu girişi etkidiğinde durum uzayı modeli denklem (4.82)'deki gibi tanımlanır. Burada D_w bozucu giriş noktasındaki mod şekil fonksiyonu matrisi, $w(t)$ ise bozucu giriş olarak ifade edilir. Bu sistemde bozucu giriş belirli frekansta harmonik bir fonksiyon şeklinde tanımlanır;

$$\dot{x_n}(t) = A_n x(t) + B_n u(t) + D_w w(t) \quad (4.82)$$

Bozucu giriş D_w modal koordinatlarda tanımlanması için denklem (4.27)'deki mod şekil fonksiyonu esas alınarak aşağıdaki eşitlik yazılır;

$$\psi_n(x_w) = A_n \left[cos\,\beta_n x_w - cosh\,\beta_n x_w - \frac{cos\,\theta_n + cosh\,\theta_n}{sin\,\theta_n + sinh\,\theta_n} (sin\,\beta_n x_w - sinh\,\beta_n x_w) \right] \quad (4.83)$$

Denklem (4.83)'de ifade edilen modal bozucu giriş karakteri matris biçiminde aşağıdaki gibi gösterilir;

$$D_{w_n} = \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_n(x_w) \end{bmatrix} \quad (4.84)$$

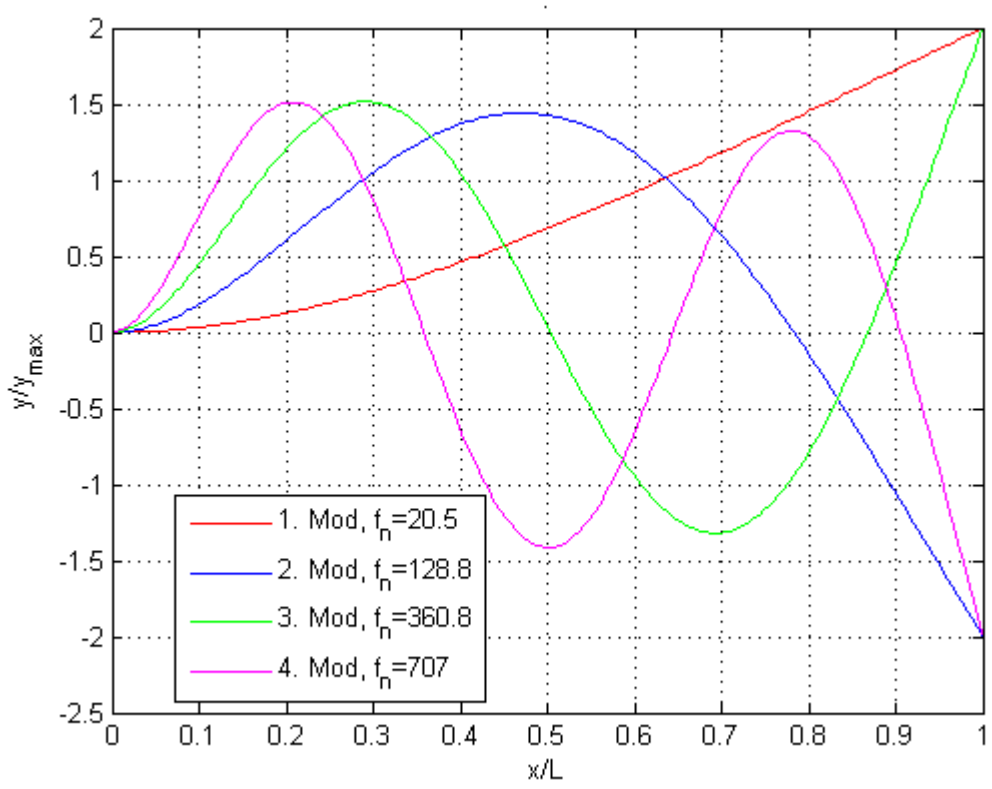
Sisteme bozucu giriş etkidiğinde çıkış denklemi değişmez. Sensör yer değiştirme ölçüyorsa denklem (4.63)'deki durum uzayı yapısı kullanılır.

4.4 Ankastre Kirişin Mod Şekilleri

Modal analiz hem teorik hem de sonlu elemanlar analiz programı ANSYS ile yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

4.4.1 Teorik Mod Analizi

Önceki alt başlıkta elde edilen mod şekil fonksiyonu denklemi (4.27) kullanılarak ankastre kirişin ilk dört mod için normalleştirilmiş mod şekil grafiği (Şekil 4. 10) MATLAB programı yardımı ile çizdirilmiştir. Her bir mod için teorik doğal frekans değerleri hesaplanmıştır.

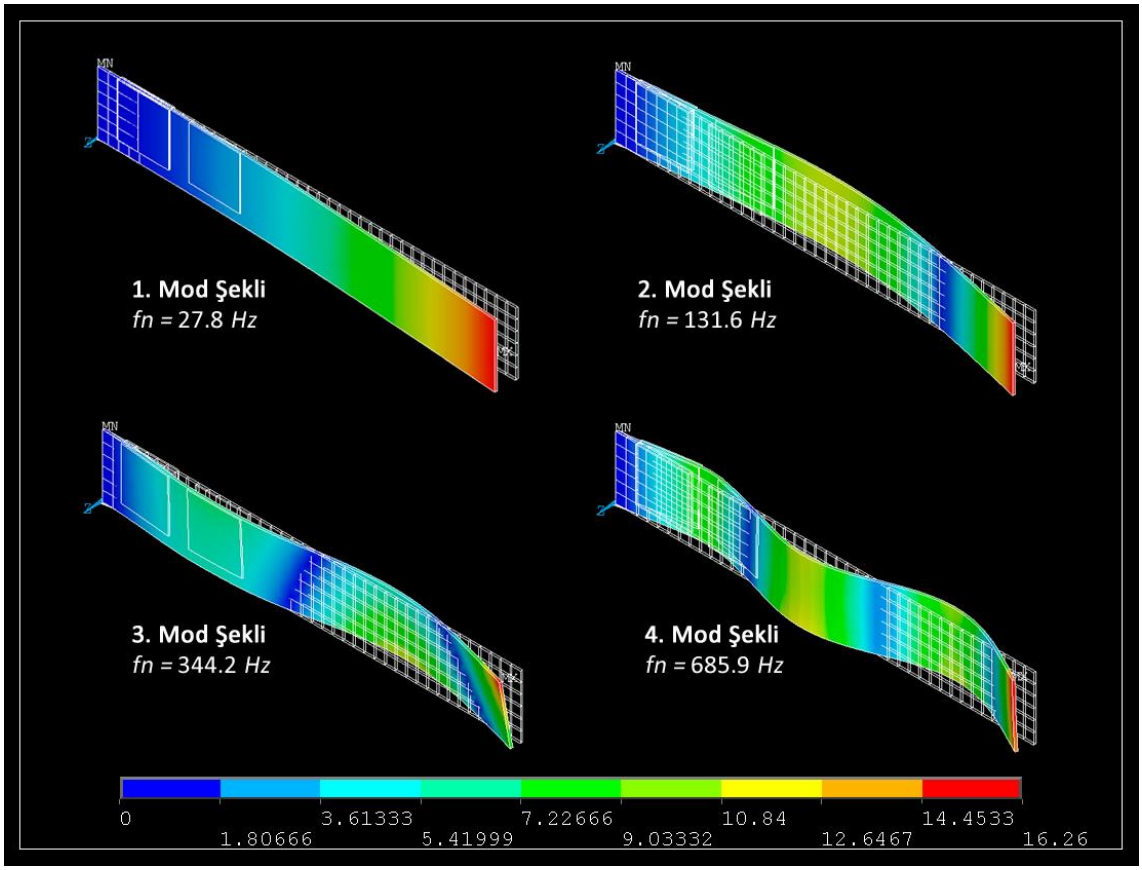


Şekil 4. 10 Ankastre kirişin normalize edilmiş mod şekilleri

Modal analiz sonucunda, kirişin titreşimi sırasında oluşan nodal düğüm noktaları görülmektedir. Piezoelektrik aktüatör ve sensör'ün işlevini doğru yapabilmesi için ankastre kirişin tasarım aşamasında sensör konumunun nodal noktalara denk gelmemesine dikkat edilmelidir.

4.4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemiyle ile Modal Analiz

Ankastre kiriş ANSYS parametrik tasarım dili (APDL) ile modellenip, Block Lanczos yöntemiyle modal analizi yapılmıştır. Sonuçlar değerlendirilmiştir. Daha sonra piezoelektrik yamalar modele dâhil edilerek analize devam edilmiştir. İlk dört eğilme mod şekli ve frekans değerleri Şekil 4. 11'daki gibi elde edilmiştir. İlk dört mod için doğal frekans karşılaştırması Çizelge 4. 4 hazırlanmıştır.



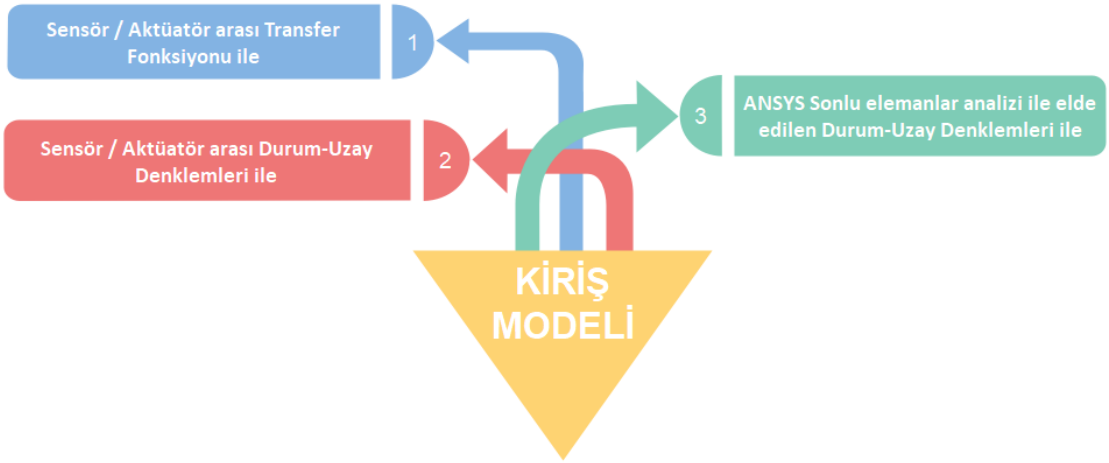
Şekil 4. 11 Ankastre kirişin PZT'li eğilme mod şekilleri

Çizelge 4. 4 Hesaplanan doğal frekans (Hz) sonuçları

Mod	Teorik model	SEA modeli	SEA modeli (PZT'li)
1	20.563	20.855	27.848
2	128.866	130.73	131.61
3	360.830	367.74	344.26
4	707.082	726.37	685.97

4.5 Teorik Modelleme

Matlab / Simulink ile ankastre akıllı kirişin titreşim kontrolü amacıyla modellemesi yapılmıştır. Transfer fonksiyonu analizi, durum-uzay analizi ve ANSYS ile durum-uzay analizi olmak üzere üç yöntemle (Şekil 4. 12) elde edilen kiriş modeline PID kontrol uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. 12 Teorik modelleme yöntemi

Teorik modellerde piezoelektrik yama ile mesnet arasındaki uzaklık 10mm olarak alınmıştır. Simulink modellerinde *Fixed-step ode4* çözücü ile çözüm yapılmıştır.

Ansys analizi için α ve β Rayleigh sönüm katsayıları gereklidir. Bu aşamada modelin sönüm oranı hakkında veri mevcut olmamakla birlikte, birinci ve ikinci mod için sönüm oranının %1 olması arzulanarak şu kabul yapıldığında;

$$\zeta_1 = \frac{\alpha}{2\omega_1} + \frac{\beta\omega_1}{2} \Rightarrow 0.01 = \frac{\alpha}{2(2\pi\times 27{,}8)} + \frac{\beta(2\pi\times 27{,}8)}{2} \tag{4.85}$$

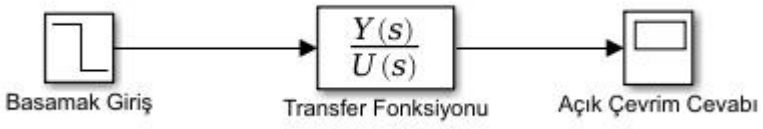
$$\zeta_2 = \frac{\alpha}{2\omega_2} + \frac{\beta\omega_2}{2} \Rightarrow 0.01 = \frac{\alpha}{2(2\pi\times 131{,}61)} + \frac{\beta(2\pi\times 131{,}61)}{2} \tag{4.86}$$

Elde edilen eşitlikler çözülünce α ve β sönüm katsayıları hesaplanmıştır:

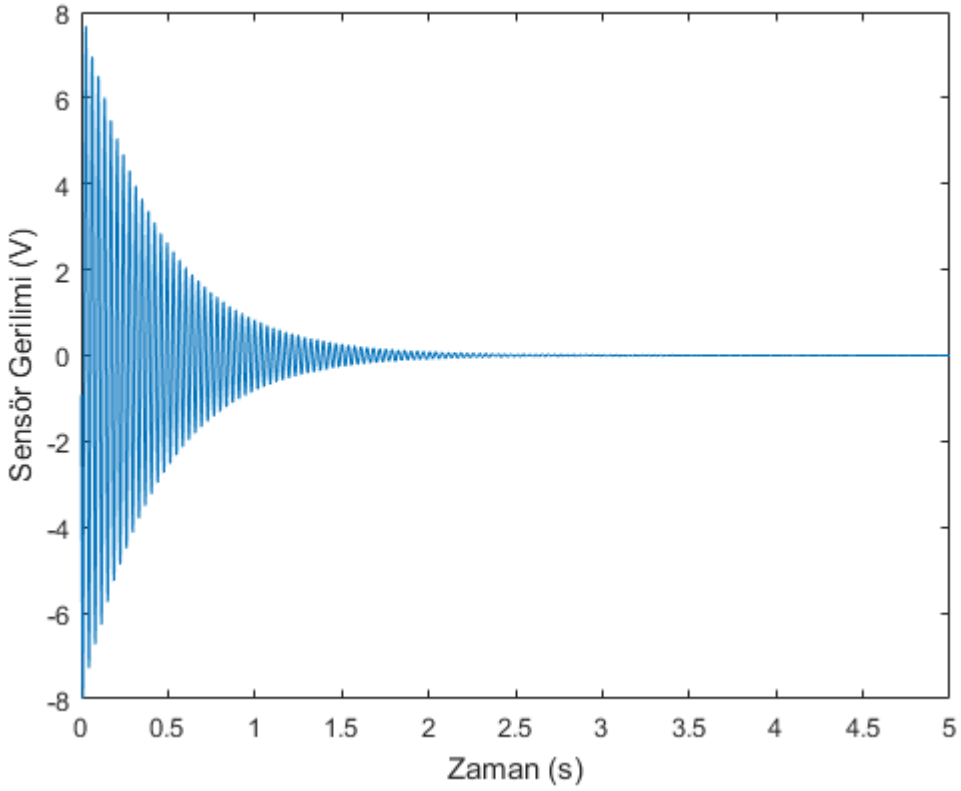
$$\alpha = 1{,}534\times 10^{-5};\ \beta = 3{,}0254 \tag{4.87}$$

4.5.1 Transfer Fonksiyonu ile Matlab/Simulink Modeli (1)

Piezoelektrik sensör çıkış voltajı ve aktüatör giriş voltajı arasındaki transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Denklem (4.57) kullanılarak, Matlab/Simulink'te *Transfer Fonksiyonu Bloğu*'na tanımlanır. Basamak giriş sinyali uygulanan sistemin açık çevrim Simulink modeli (Şekil 4. 13) ve cevabı Şekil 4. 14'de gösterilmektedir.

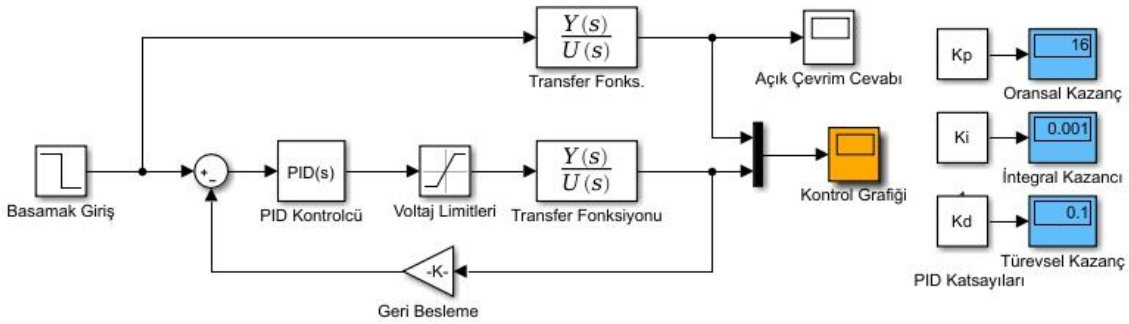


Şekil 4. 13 Akıllı kirişin açık çevrim Simulink modeli

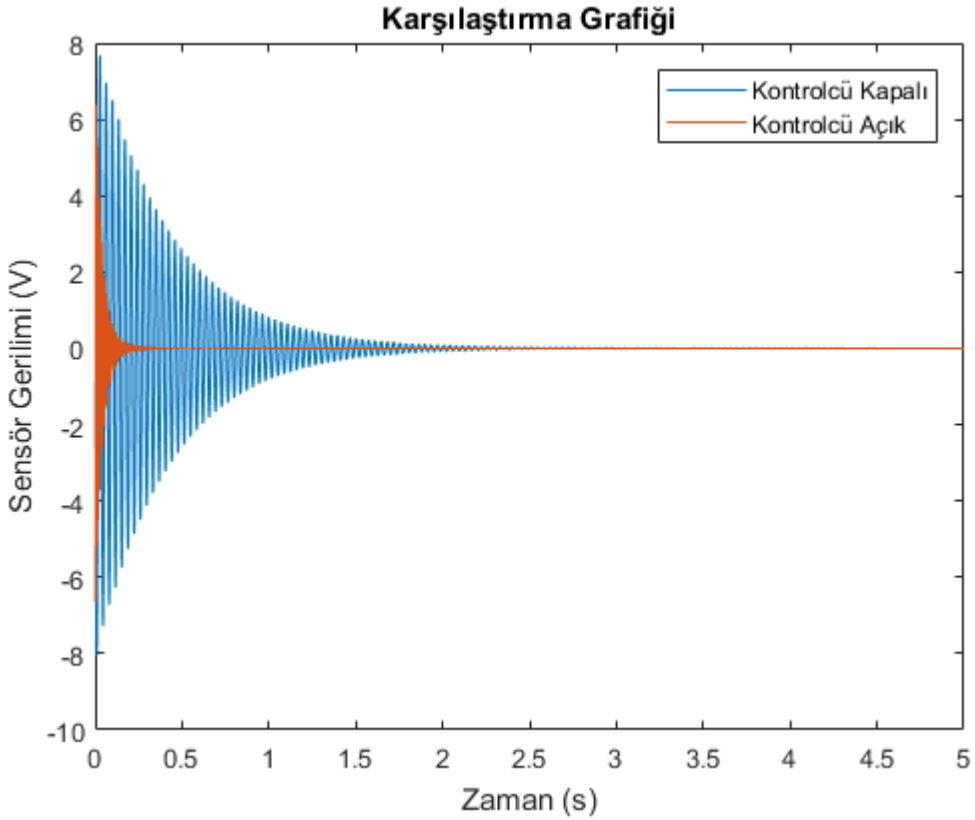


Şekil 4. 14 Kiriş modelinin açık çevrim cevabı

Bu modele PID kontrolcü eklenerek kapalı çevrim modeli oluşturulmuştur (Şekil 4. 15). Sistemin cevabı K_P=16, K_I=0.001, K_D=0.1 değerlerinde Şekil 4. 16'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4. 15 Akıllı kirişin kapalı çevrim Simulink modeli



Şekil 4. 16 Kapalı çevrim cevabı karşılaştırması, K_P=16

4.5.2 Durum-Uzay Denklemleri ile Modeli (2)

Önceki yöntemde olduğu gibi piezoelektrik aktüatör'e uygulanan voltaj giriş matrisi, sensörde oluşan voltaj çıkış matrisi olacak şekilde durum-uzay denklemleri elde edilmiştir. Bu amaçla denklem (4.57)'deki transfer fonksiyonu durum-uzay yapısına dönüştürülür. İkinci derece bir transfer fonksiyonun her modu için iki durum değişkeni gereklidir. İlk iki mod ve tek giriş için analiz yapılırsa, 4x4'lük bir sistem matrisi A ve 4x1'

lik bir giriş matrisi B'ye ihtiyaç vardır. Çıkış matrisi sensör gerilimidir. Kirişin durum uzay modeli şu şekildedir;

$$\dot{x} = Ax + BV_a \tag{4.88}$$

$$y = Cx \tag{4.89}$$

Burada durum değişkenleri şöyledir:

$$x_1 = \eta_1(t) \tag{4.90}$$

$$x_2 = \dot{\eta_1}(t) = \dot{x_1} \tag{4.91}$$

$$x_3 = \eta_2(t) \tag{4.92}$$

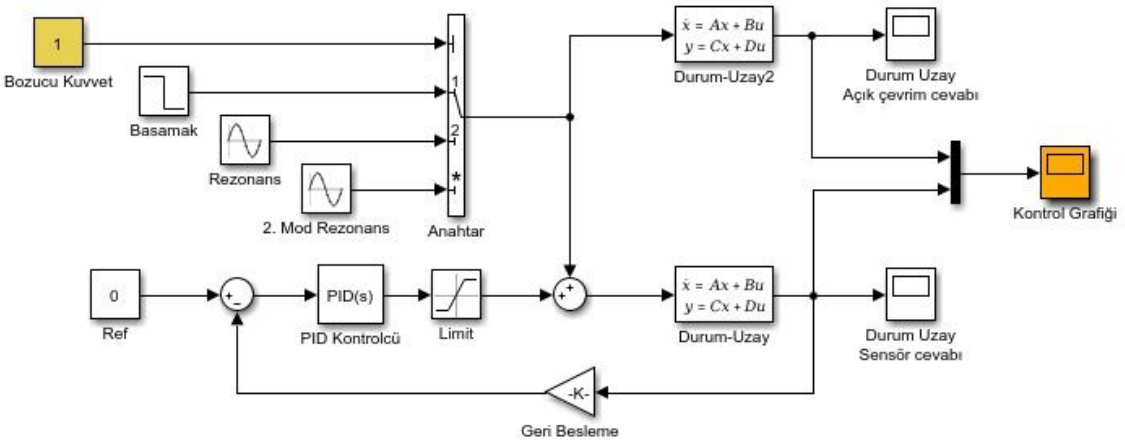
$$x_4 = \dot{\eta_2}(t) = \dot{x_3} \tag{4.93}$$

Denklem (4.88) ve (4.89)'deki durum uzay matrisleri açık yazılırsa:

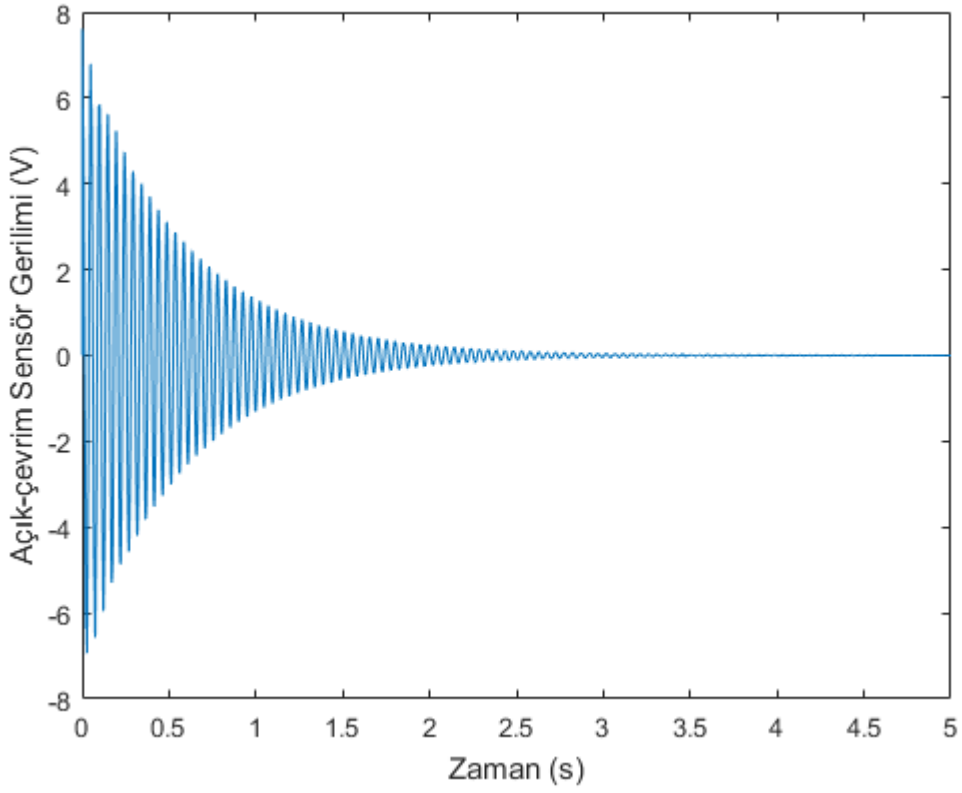
$$\begin{bmatrix} \dot{x_1} \\ \dot{x_2} \\ \dot{x_3} \\ \dot{x_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -{\omega_1}^2 & -2\zeta_1\omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -{\omega_2}^2 & -2\zeta_2\omega_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + k_a \begin{bmatrix} [\dot{\psi}_1(x_{a2}) - \dot{\psi}_1(x_{a1})] \\ 0 \\ [\dot{\psi}_2(x_{a2}) - \dot{\psi}_2(x_{a1})] \\ 0 \end{bmatrix} V_a(t) \tag{4.94}$$

$$y = \frac{k_s}{C_s b_s (x_{s2} - x_{s1})} \begin{bmatrix} (\dot{\psi}_1(x_{s2}) - \dot{\psi}_1(x_{s1})) & 0 & (\dot{\psi}_2(x_{a2}) - \dot{\psi}_2(x_{a1})) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \tag{4.95}$$

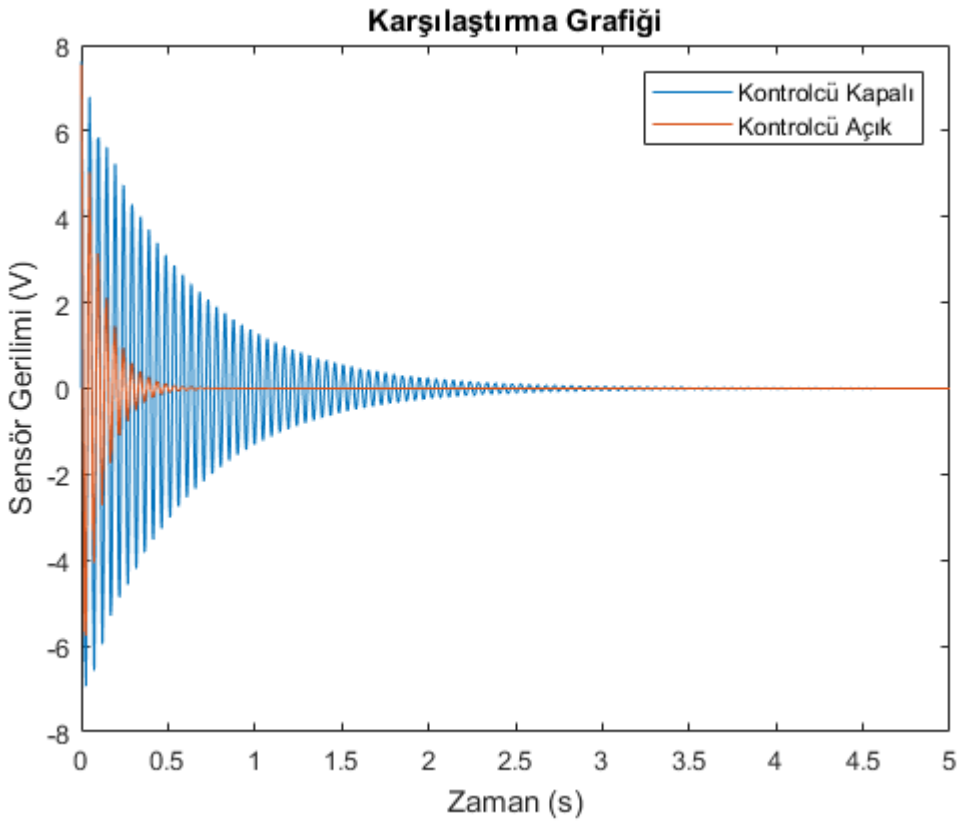
Matlab'de oluşturulan A, B, C ve D durum-uzay matrisleri *State-Space Bloğu*'na girilerek Simulink modeli (Şekil 4. 17) oluşturulmuştur. Basamak giriş için modelin simülasyonu yapıldığında açık çevrim cevabı Şekil 4. 18'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. PID kontrolcünün K_P=16 ve K_P=50 değerleri için sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 4. 19 ve Şekil 4. 20).



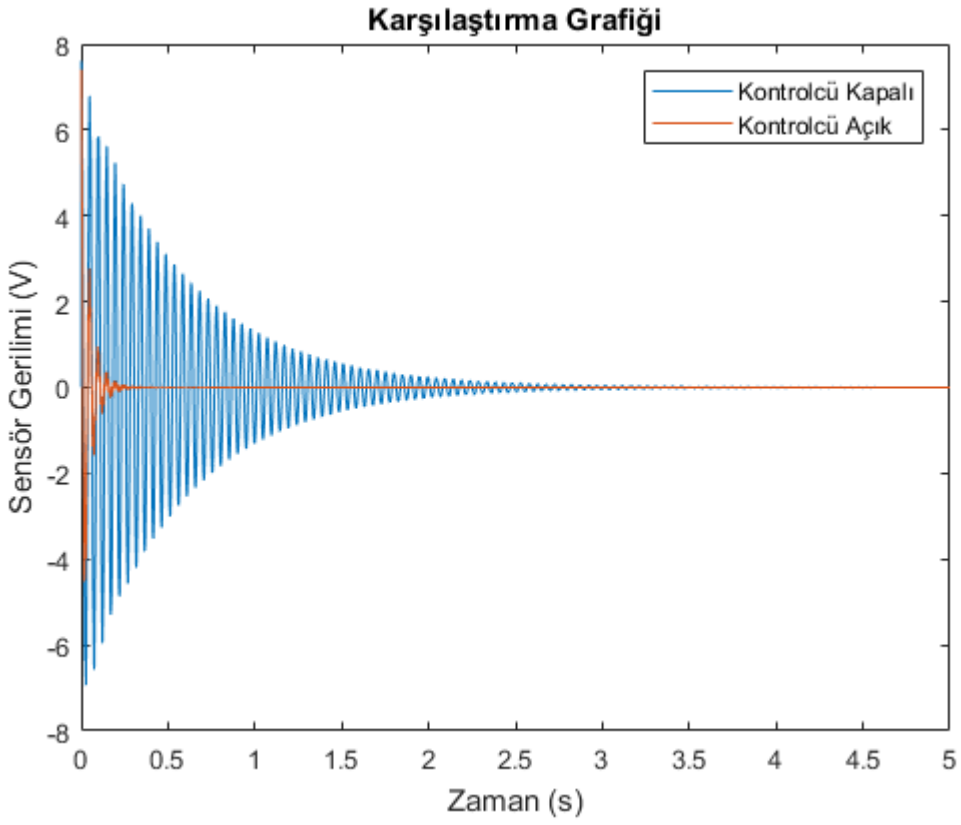
Şekil 4. 17 Akıllı kirişin Simulink Durum-uzay modeli



Şekil 4. 18 Durum-uzay modelinin açık çevrim cevabı



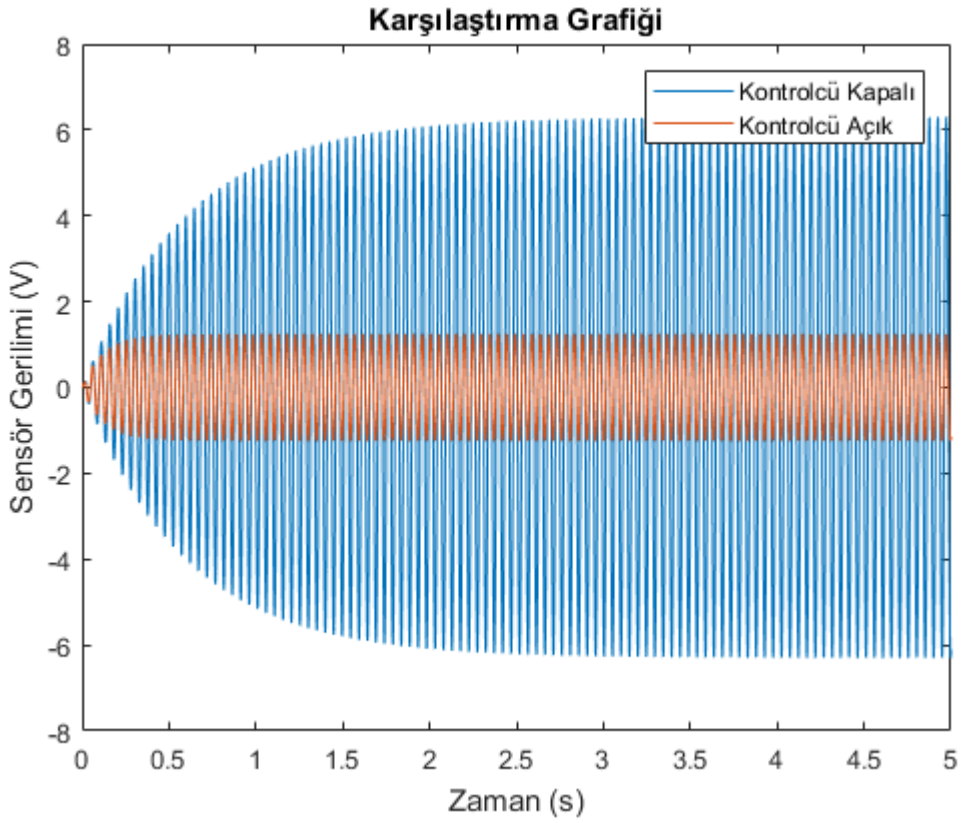
Şekil 4. 19 Durum-uzay modeli PID kontrol sensör cevabı, K_P=16



Şekil 4. 20 Durum-uzay modeli PID kontrol sensör cevabı, K_P=50

4.5.2.1 Rezonans durumu

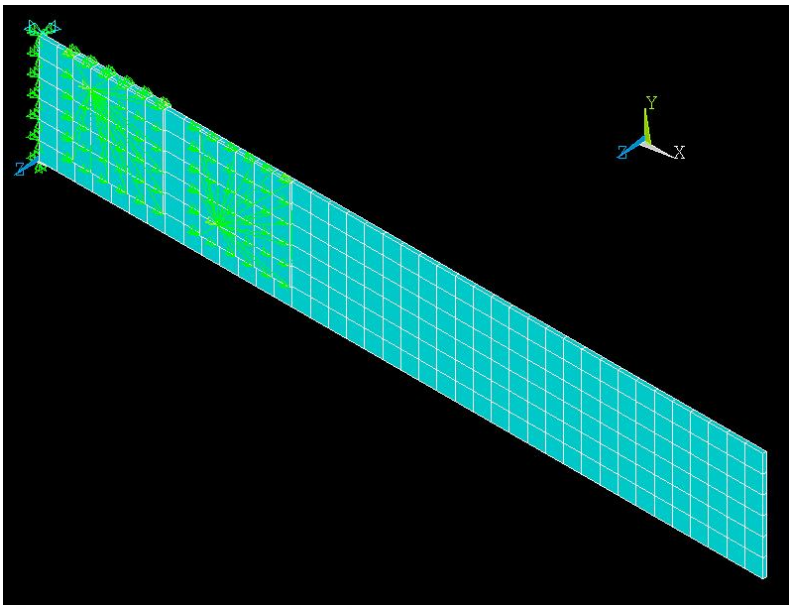
Simulink modeline birinci ve ikinci mod rezonans frekanslarında harmonik sinyal girişi yapılarak zorlanmış titreşim durumu için K_P=16 değerinde sonuçlar (Şekil 4. 21) elde edilmiştir.



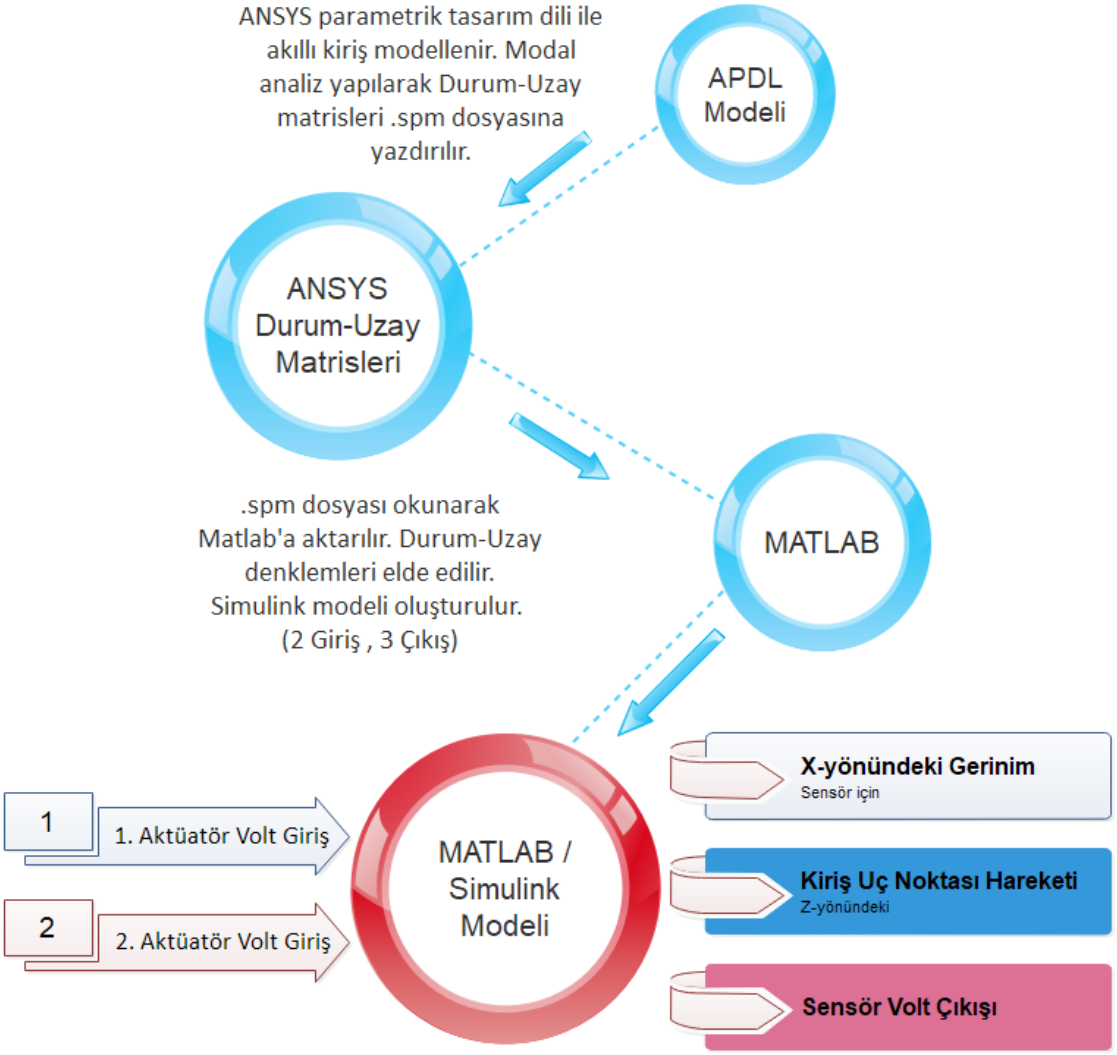
Şekil 4. 21 Zorlanmış titreşim kontrolü 1.mod rezonans durumu (129 rad/s), K_P=16

4.5.3 Durum-Uzay Denklemlerinin ANSYS ile Elde Edildiği Model (3)

Üçüncü yöntemde ise durum-uzay denklemleri ANSYS ve Matlab yardımı ile elde edilmiştir. Bu yöntemin akışı şematik olarak Şekil 4. 23'de özetlenmiştir. Önce akıllı kirişin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur (Şekil 4. 22). ANSYS için gerekli piezoelektrik malzeme veri dönüşümlerine EK-A'da, ANYSY ile kirişin modellenmesine EK-B'de değinilmiştir. APDL komutları kullanılarak istenilen B ve C matrisleri, A matrisi ile birlikte dosyaya yazdırılmıştır. Bu dosyadaki matrisler elle Matlab'e aktarılabilileceği gibi, m-file ile makro oluşturularak da aktarılabilir. Durum-uzay matrisleri ile Simulink modeli (Şekil 4. 24) *State-space* veya *LTI System bloğu* kullanılarak oluşturulabilir.

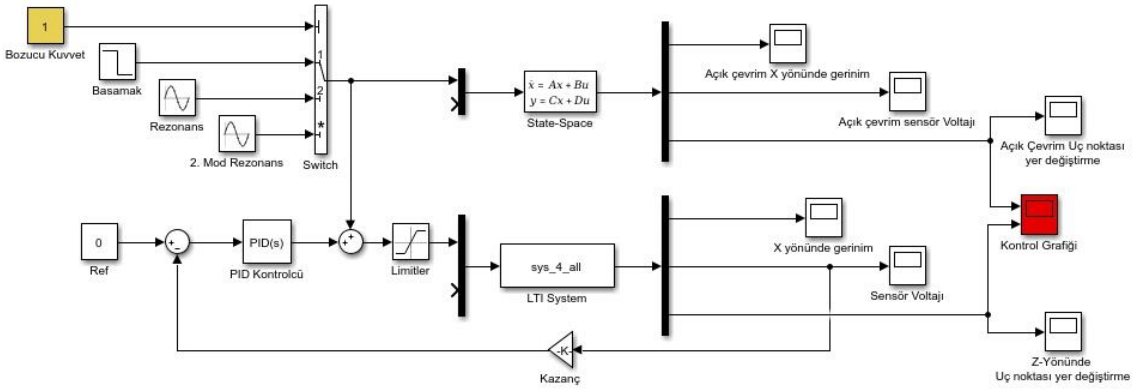


Şekil 4. 22 Akıllı kirişin ANSYS apdl modeli



Şekil 4. 23 ANSYS ile durum-uzay analizinin şematik akışı

ANSYS ile 2 giriş ve 3 çıkış olarak elde edilen durum-uzay denklemleri; birinci ve ikinci aktüatöre volt girişine karşılık, x-yönünde sensör gerinimi, z yönünde kirişin uç noktası hareketi ve sensör volt çıkışı olmaktadır. Birinci aktüatöre 120 Volt basamak girişi durumunda sistemin cevabı, birinci ve ikinci mod rezonans durumu cevapları kontrolcü açılarak simule edilmiştir.

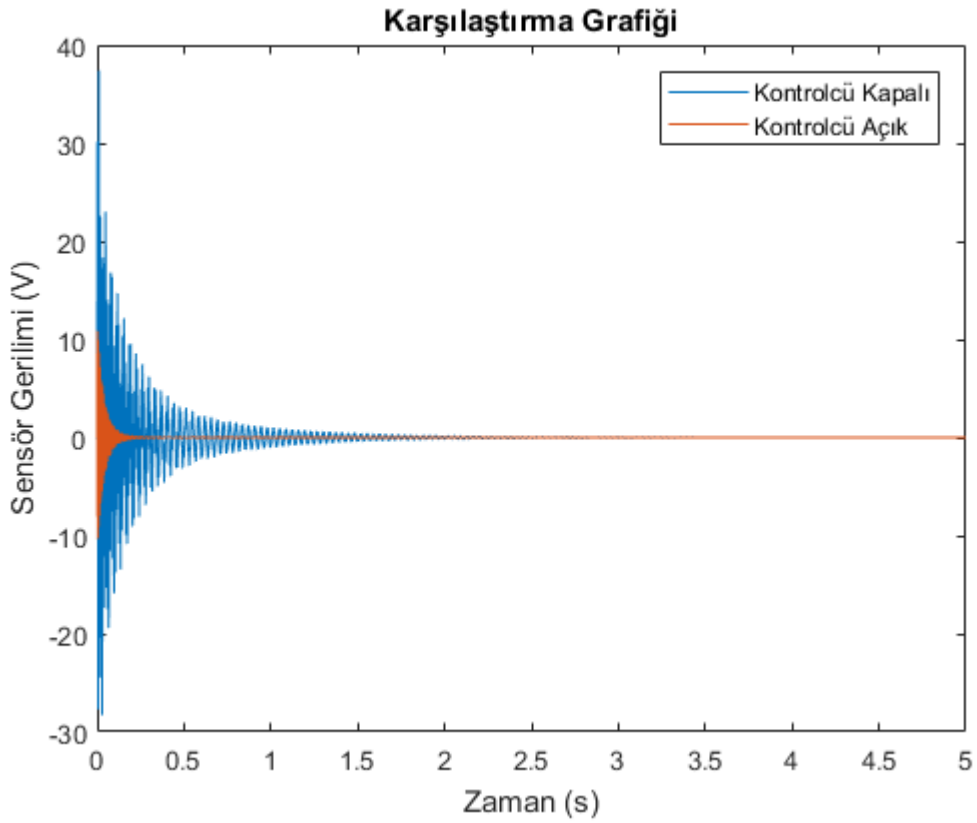


Şekil 4. 24 ANSYS ile elde edilen durum-uzay denklemleri ile oluşturulan Matlab modeli

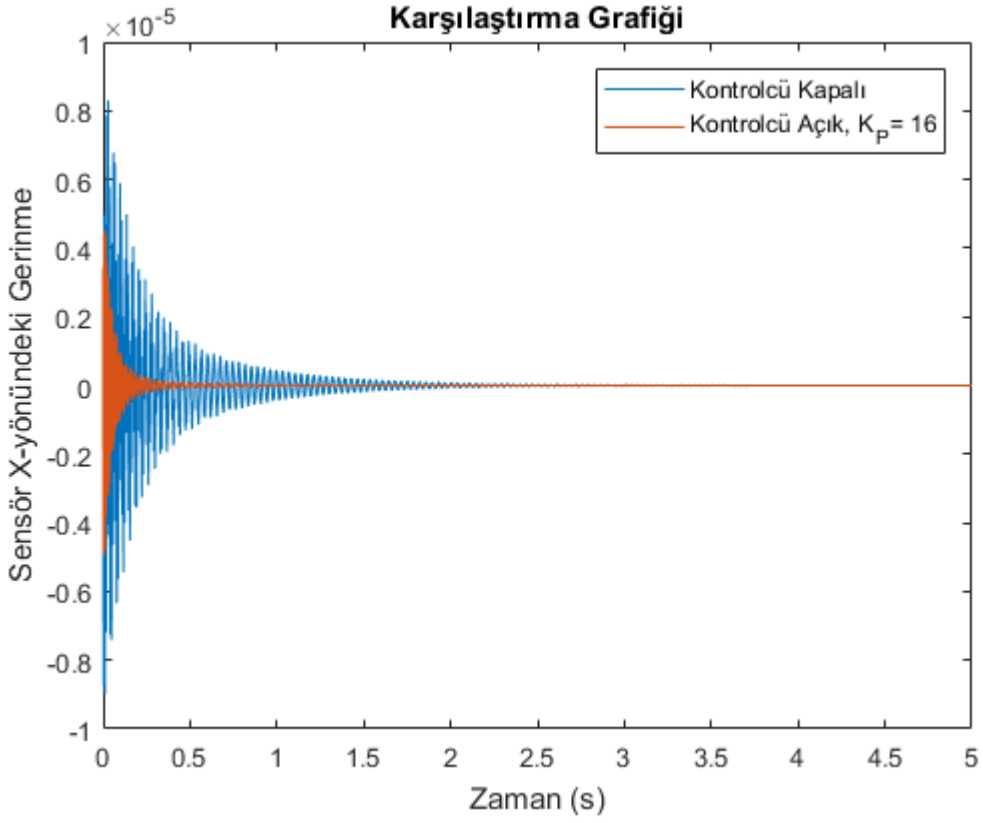
Sadece birinci aktüatör üzerinden tahrik ve kontrol sağlanması amacıyla, model üzerinde ikinci giriş boş bırakılmıştır. Her iki girişin ayrı ayrı veya aynı anda kullanılması da mümkündür. Farklı simülasyon senaryoları meydana getirilebilir.

Birinci giriş üzerinden basamak sinyali gönderildiğinde sensör cevabı, sensör için X-eksenindeki gerinme ve ankastre akıllı kirişin uç noktasının Z-ekseninde hareket grafikleri sırasıyla çizdirilmiştir (Şekil 4. 25, Şekil 4. 26 ve Şekil 4. 27).

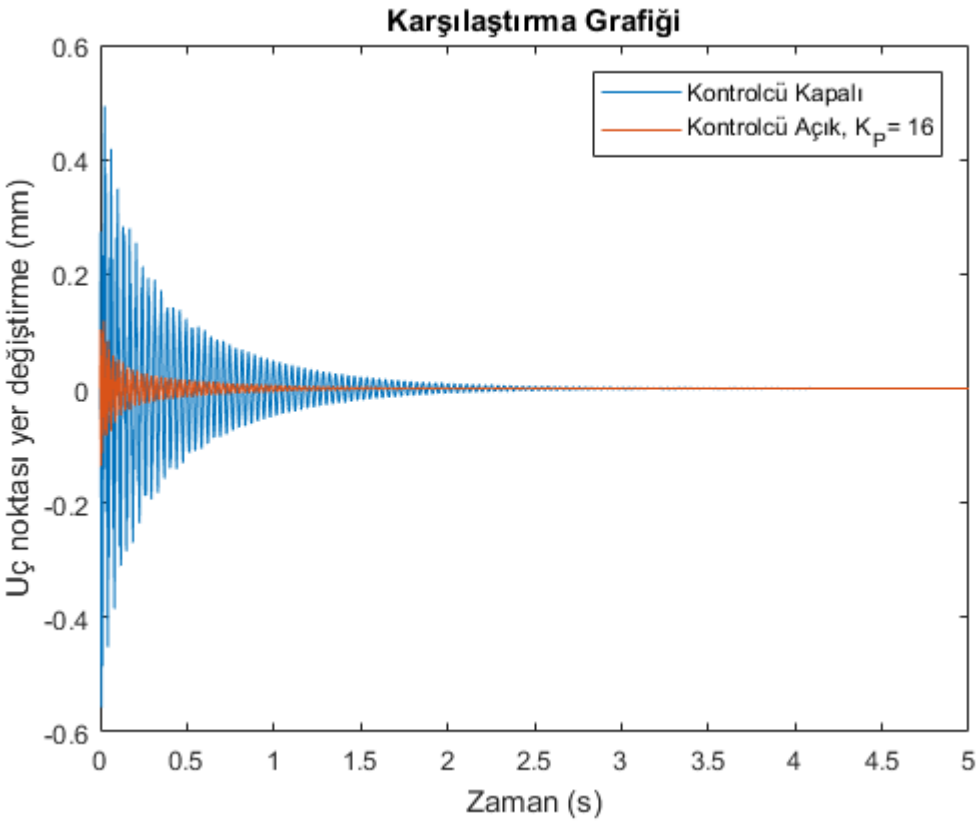
Rezonans durumunu simule etmek amacıyla anahtar 2 ‘ye ayarlanıp 1.mod zorlanmış titreşim kontrol simülasyonu yapılmıştır. Ardından 2.mod için de simülasyon tekrar edilmiştir. Rezonans frekanslarında gönderilen harmonik aktüatör sinyali için sensör cevabı, kirişin uç noktasının Z-ekseninde hareketi ve sensör için X-eksenindeki gerinme grafikleri sırasıyla Şekil 4. 28, Şekil 4. 29 ve Şekil 4. 30’da verilmiştir. İkinci mod rezonans durumu sensör cevabı Şekil 4. 31’da gösterilmektedir.



Şekil 4. 25 Serbest titreşim durumu sensör cevabı karşılaştırması PID kontrol, K_P=16

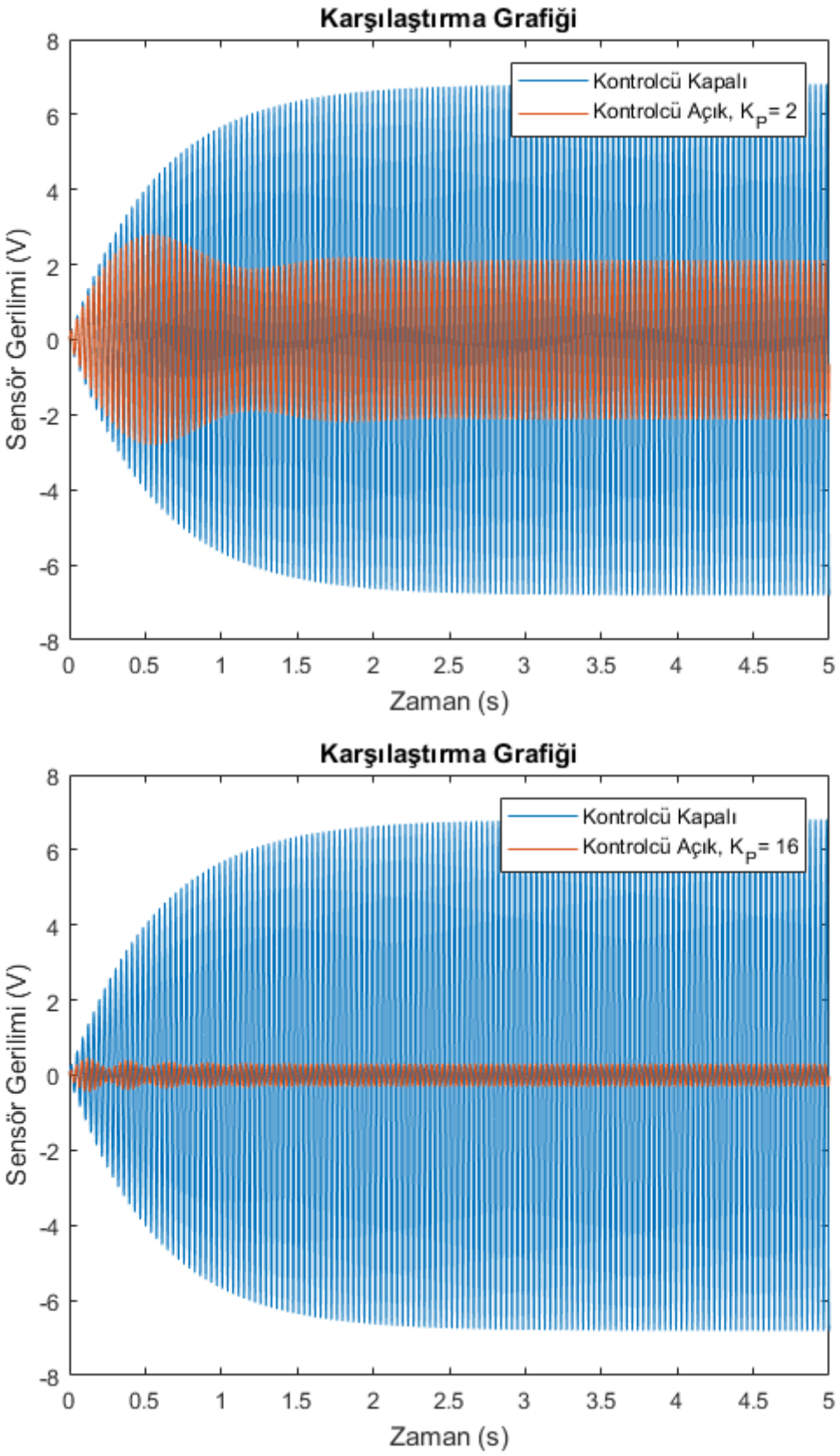


Şekil 4. 26 Sensör için X-yönündeki gerinme grafiği

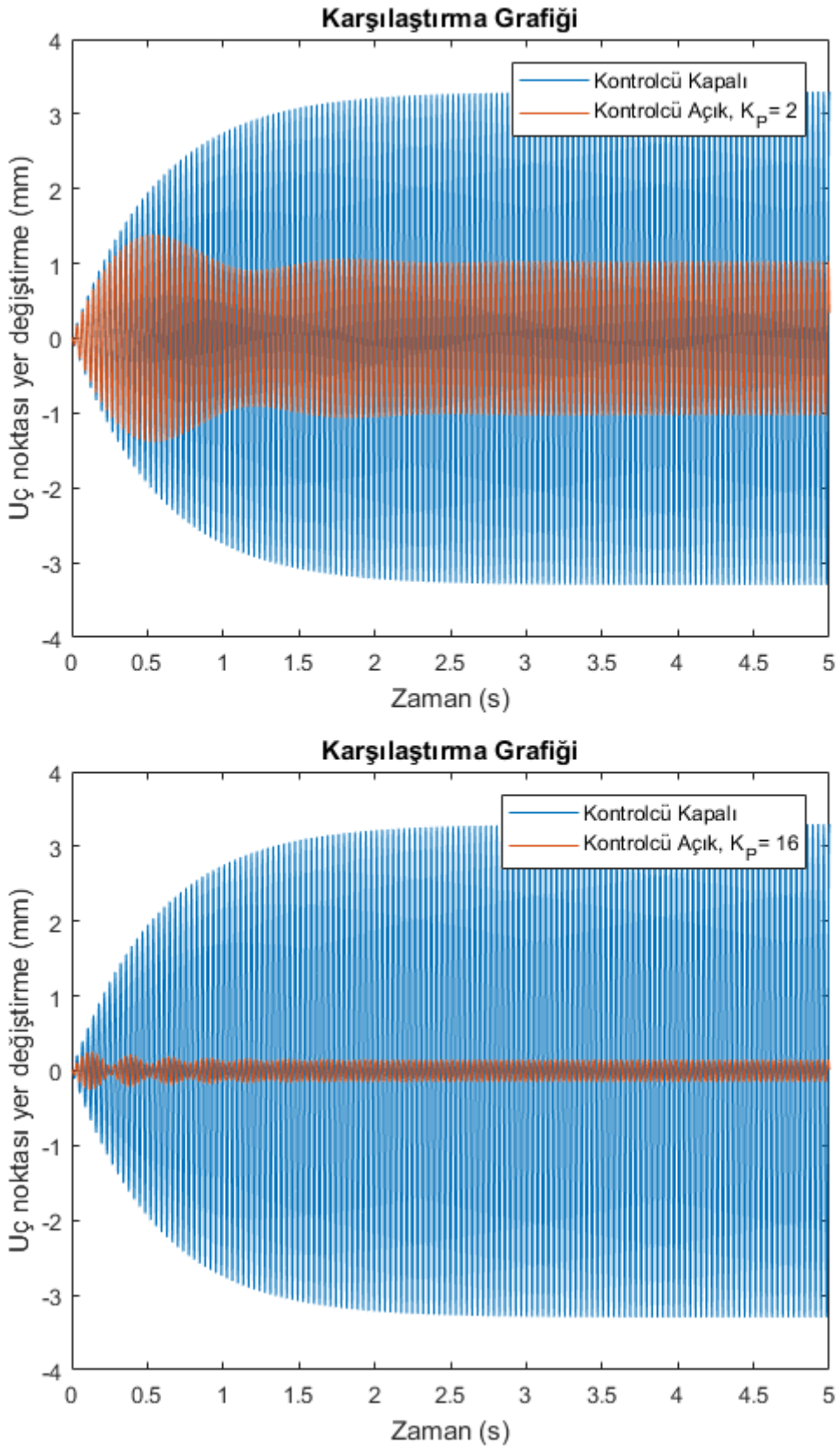


Şekil 4. 27 Kirişin uç noktasının Z-yönündeki yer değiştirmesi

4.5.3.1 1. Mod Rezonans Durumu

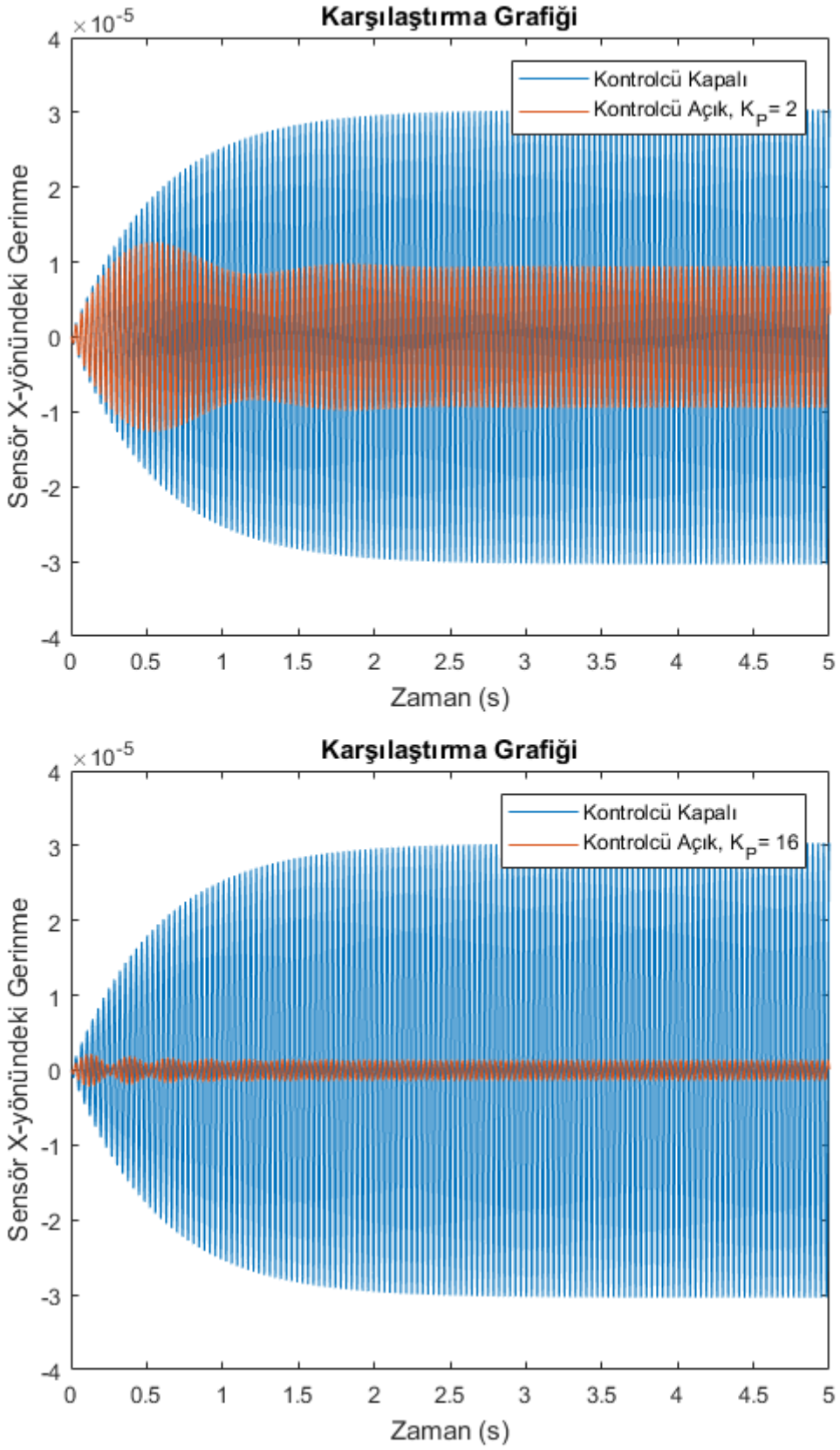


Şekil 4. 28 Birinci mod rezonans durumu sensör cevapları, K_P=2 ve K_P=16



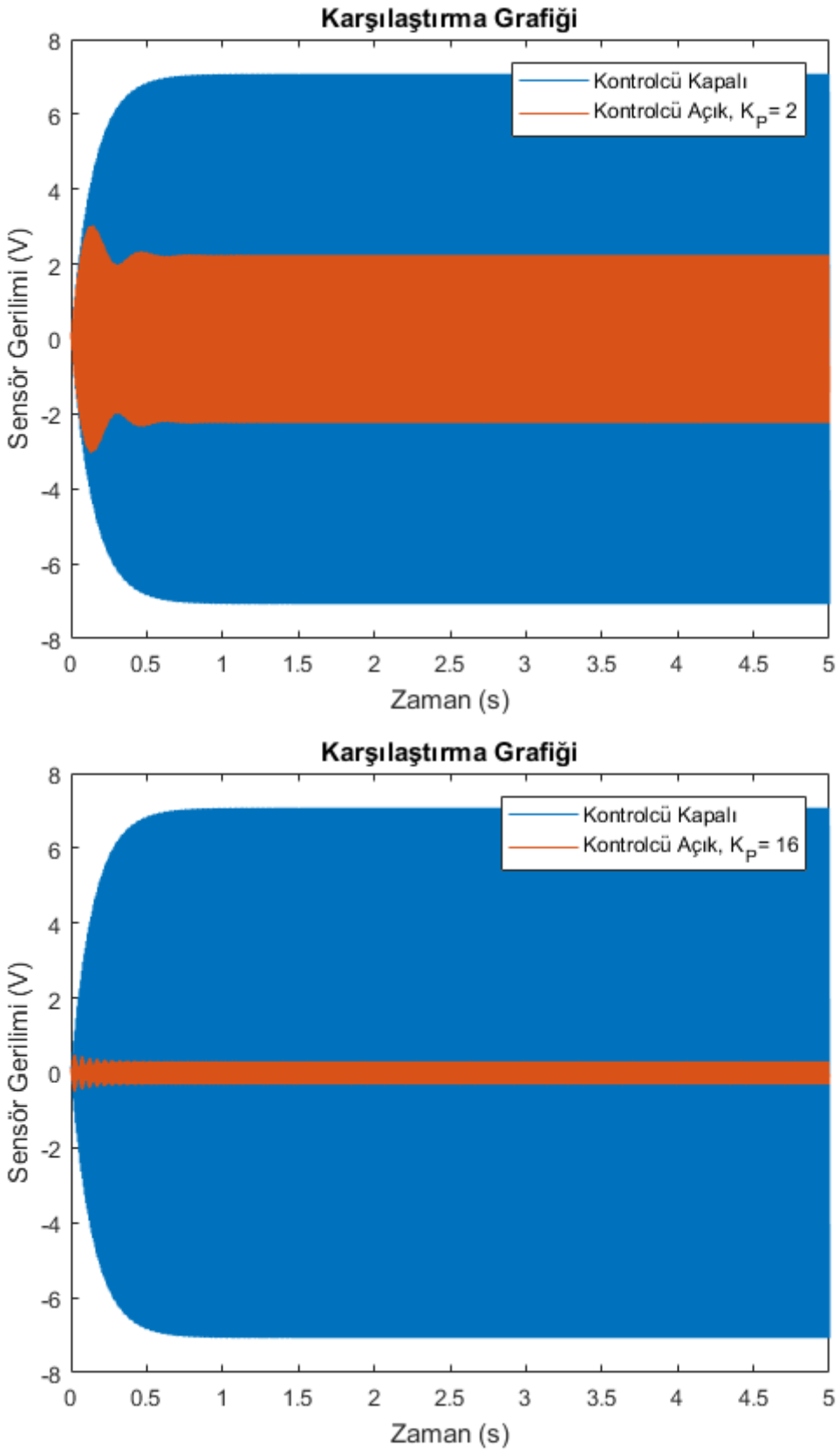
Şekil 4. 29 1. Mod rezonans durumu kiriş ucunun yer değiştirmesi, K_P=2 ve K_P=16

x



Şekil 4. 30 1. Mod rezonans durumu X-yönündeki gerinme , K_P=2 ve K_P=16

4.5.3.2 2. Mod Rezonans Durumu



Şekil 4. 31 İkinci mod rezonans durumu cevapları, K_P=2 ve K_P=16

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada, alüminyum kiriş üzerine yapıştırılacak piezoelektrik yamalar ile aktif titreşim kontrolü gerçekleştirilmeye çalışılacaktır. Koşullar değiştirilip çeşitli başlangıç şartlarında ankastre akıllı kirişin verdiği cevaplar incelenecektir.

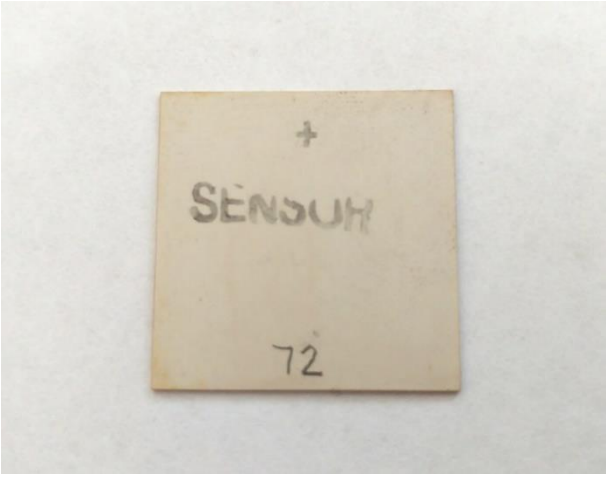
5.1 Deney Sisteminin Hazırlanması

Deney düzeneği için öncelikle 1mm kalınlığındaki yalıtımlı alüminyum levhadan 300x30 mm ölçülerinde bir çubuk kesilmiştir. Kullanılan alüminyumun yoğunluğu $2700\ kg/m^3$, elastiklik modülü ise $70\ Gpa$'dır.

Ardından çubuk üzerine piezoelektrik yamalar yapıştırılarak oluşturulan kiriş tek tarafından mesnetlenecektir. Matlab/Simulink ve dSPACE – ControlDesk uygulaması üzerinden aktif titreşim kontrolü için ankastre kirişin donatı bağlantıları yapılacaktır.

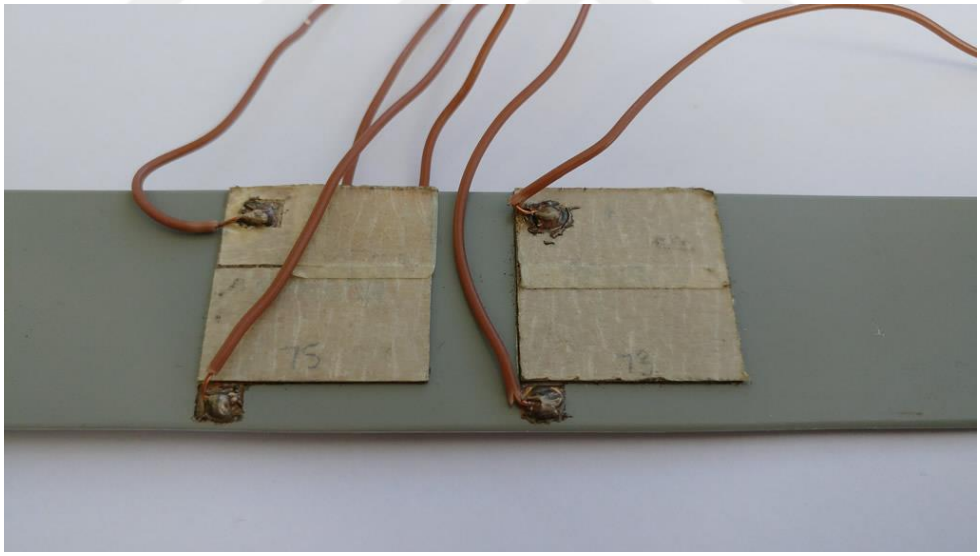
5.1.1 Piezoelektrik Yamaların Kiriş Üzerine Yapıştırılması

Alüminyum üzerine 3 adet SensorTech markalı BM532 tip PZT-5H piezoelektrik yama yapıştırılmıştır (Şekil 5. 1). Yamaların her biri 25x25x0,6 mm boyutlarındadır. Bu piezoelektrik malzemenin özellikleri üretici verilerine göre Çizelge 5. 1'de yer almaktadır. BM532, sensör uygulamaları için kullanılmasının yanında arttırılmış dielektrik ve piezoelektrik yük sabiti değerlerine sahiptir. Bu sebeple büyük mekanik yerdeğiştirme arzulanan aktüatör uygulamaları için tercih edilir [85].



Şekil 5. 1 PZT-5H Piezoelektrik yama

Piezoelektrik yamaları alüminyum üzerine yapıştırmak için çift bileşenli gümüş epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırma sırasında piezoelektrik yamaların + - kutupları arasında kısa devre olmaması için yapıştırıcının taşmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca birbirleri ile etkileşim olmayacak şekilde alüminyum çubuk ile yamalar arası elektriksel olarak yalıtılmış olmalıdır.



Şekil 5. 2 Piezoelektrik yamaların alüminyum yüzeyine yapıştırılması

Sensör amacıyla kullanılmak üzere 1 adet piezoelektrik yama bir yüzeye; aktüatör olarak kullanımı amaçlanan 2 adet yama ise aralarında 10mm olacak şekilde diğer yüzeye yapıştırılmıştır. Kabloların da aynı yapıştırıcı ile sistemle birleştirilmesinin (Şekil 5. 2) ardından bilgisayar ile entegrasyon için hazır hale gelmiştir. Voltmetre ile olası kısa devreye karşı kontroller yapılmış ve yamaların elektrik üretip üretmediği denenmiştir (Şekil 5. 3).

Çizelge 5. 1 BM532 Piezoelektrik malzemenin özellikleri

PZT - BM532	
Elektriksel özellikler[1]	
Relatif Dielektrik Sabiti ($K_{33}{}^{T}$)	3250
Dielektrik Kayıp Faktörü ($\mathbf{Tan}\ \delta$)	%2
Mekaniksel	
Uyum matrisi ($S^{E}{}_{11}$)	14 ($\times 10^{-12}\ m^2/N$)
$S^{E}{}_{33}$	20 ($\times 10^{-12}\ m^2/N$)
Yoğunluğu (ρ)	7.65 g/cm^3
Küri Sıcaklığı (T_C)	210 ℃
Piezoelektrik özellikleri	
Elektromekanik Eşleşme Katsayısı (k_p)	0.65
k_{31}	0.39
k_{33}	0.75
Yük Sabiti (d_{31})	-270 ($\times 10^{-12}\ C/N$)
d_{33}	590 ($\times 10^{-12}\ C/N$)
Voltaj Sabiti (g_{31})	-9 ($\times 10^{-3}\ Vm/N$)
g_{33}	20 ($\times 10^{-3}\ Vm/N$)
Mekanik Kalite Faktörü (Q_m)	70
Frekans Sabitleri (N_p)	2000 $Hz \cdot m$
N_1	1425 $Hz \cdot m$
N_4	1850 $Hz \cdot m$

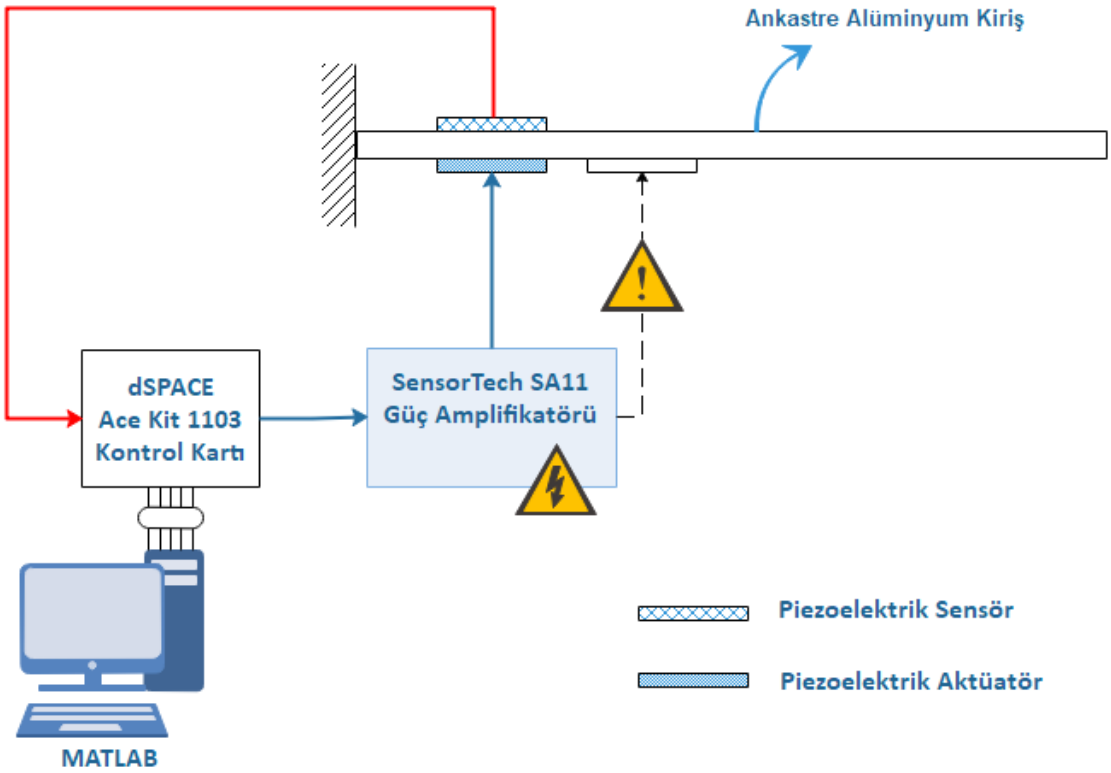
[1] 1 kHz'de



Şekil 5. 3 Mekanik zorlama ile oluşan gerilim (15.5 Volt)

5.1.2 Bilgisayar Bağlantıları

Ankastre kiriş ve kontrolcü arasındaki gerekli kablo bağlantıları yapıldıktan sonra, sensörden sinyal algılanıp algılanmadığı bilgisayar arayüzünde teyit edilmiştir. Oluşturulan Simulink modelleri EK-C'de yer almaktadır. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 5. 4'de gösterilmektedir.



Şekil 5. 4 Deney düzeneğinin şematik gösterilişi

Piezoelektrik sensörden algılanan sinyal, içerisinde Analog-dijital (ADC) ve dijital-analog (DAC) dönüştürücü barındıran dSPACE 1103 veri toplama kartına iletilir. Burada dijital sinyale çevrildikten sonra bilgisayar üzerindeki Matlab/Simulink yazılımı ile oluşturulmuş kontrolcüye giriş sinyali olarak ulaşır (Şekil 5. 5).



Şekil 5. 5 Deney düzeneği

Kontrol algoritması tarafından üretilen çıkış sinyali dSPACE kontrol kartı tarafından tekrar analog sinyale dönüştürülerek piezoelektrik aktüatöre iletilir. Fakat bilgisayar tarafından üretilebilen gerilim $\pm 9\, Volt$ arasındadır, bu değerler piezoelektrik aktüatörün yeterli tahrik üretebilmesi için yetersizdir. Bu sebeple araya güç amplifikatörü konulmuştur. SensorTech SA11 iki kanallı yüksek gerilim güç amplifikatörü gerilimi 15 kat arttırmaktadır (Şekil 5. 6). Yani amplifikatöre $\pm 9\, Volt$ aralığında gelen gerilim 15 yükseltilerek $\pm 135\, Volt$ aralığında çıkış yaparak piezoelektrik aktüatöre gönderilir.

dSPACE – ControlDesk uygulamasının arayüzünden sistemin gerçek zamanlı takibi ve PID parametre değişikliği yapılarak sistemin cevabı izlenmiştir.



Şekil 5. 6 SensorTech SA11 güç amplifikatörü

5.2 Bulanık Mantık PID Kontrolcü Tasarımı

Aktif titreşim kontrolünde Bulanık Mantık Kontrol (BMK) sistemi, uygulama kolaylığı, esnekliği, diğer kontrol yöntemleri ile harmanlanabilirliği, üstün performansı ve kolay anlaşılabilir basit yapısı nedeni ile seçilmiştir.

Bu tez çalışmasında Mamdani ve Sugeno tipi bulanık kural kullanılarak iki farklı kontrolcü tasarlanmıştır. Mamdani yönteminin kullanıldığı BMK, seçilen üyelik fonksiyonu bakımından “Lineer” ve Sugeno yönteminin kullanıldığı kontrolcü ise “Nonlineer” olarak adlandırılmıştır.

Sugeno Yönteminin avantajları [86]:

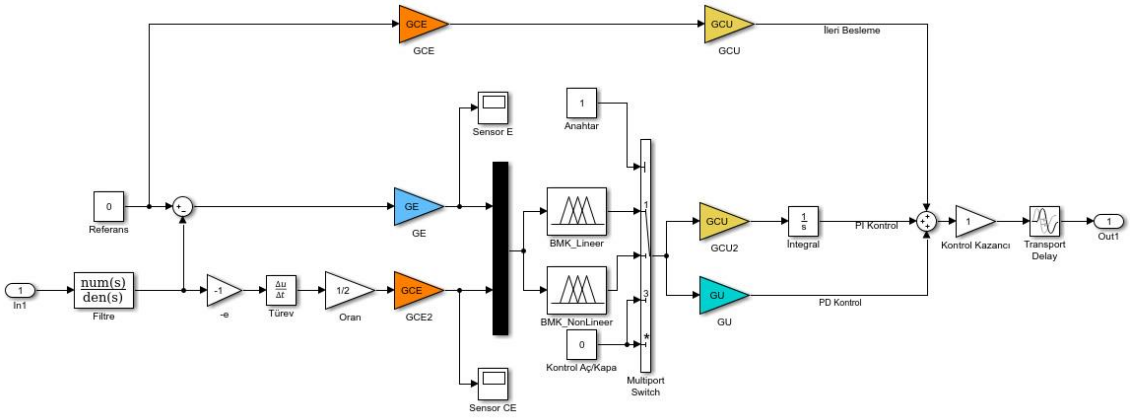
- Hesaplama açısından verimlidir.
- Lineer teknikler (örn. PID kontrol) ile iyi çalışır.
- Optimizasyon ve adaptif yöntemler ile iyi çalışır.
- Çıkış yüzeyinin sürekliliğini garanti eder.
- Matematiksel analiz için uygundur.

Mamdani Yönteminin avantajları [86]:

- Sezgiseldir.

- Yaygın kabul görmüşlüğe sahiptir.
- İnsan girişi için uygundur.

BMK tasarımı ve simülasyonları Matlab/Simulink yazılımının Fuzzy Logic Toolbox modülü ile yapılmıştır (Şekil 5. 7).



Şekil 5. 7 Simulink ile BMK tasarımı

Ölçekleme çarpanları GE, GCE, GCU, ve GU; PID kontrolcü kazançları K_P, K_I, K_D ile belirlenir. PID kontrol ve Lineer Bulanık Mantık PID kontrol ifadeleri karşılaştırlırsa, değişkenler arası ilişki şöyledir;

$$K_P = GCU \times GCE + GU + GE \tag{5.1}$$

$$K_I = GCU \times GE \tag{5.2}$$

$$K_D = GU \times GCE \tag{5.3}$$

Hata E 'nin giriş aralığı [-10 10] olduğunda GE, 10 olarak ayarlanır. Bu durumda GCE, GCU, ve GU çözülürse;

$$GE = 10 \tag{5.4}$$

$$GCE = \frac{GE\left[\frac{\left(K_P - \sqrt{{K_P}^2 - 4K_IK_D}\right)}{2}\right]}{K_I} \tag{5.5}$$

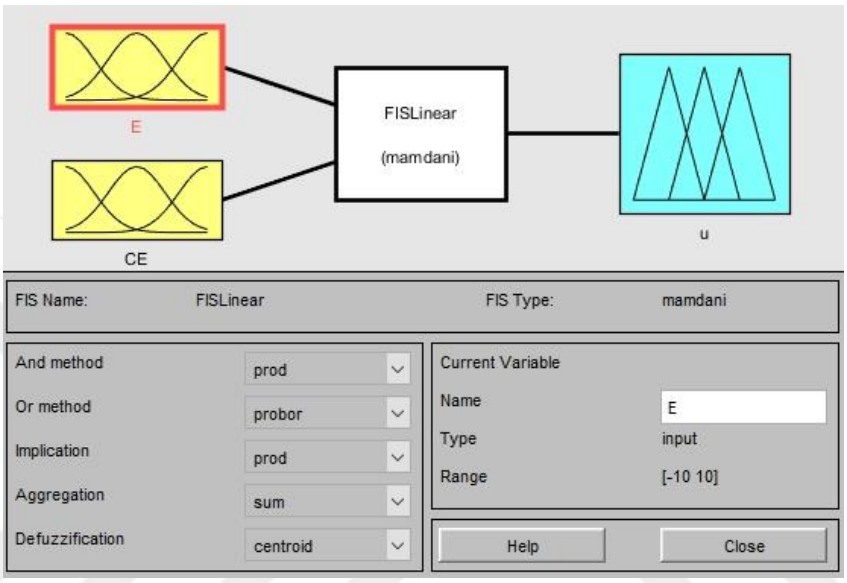
$$GCU = K_I/GE \tag{5.6}$$

$$GU = K_D/GCE \tag{5.7}$$

5.2.1 Lineer Bulanık Mantık PID Kontrolcü

Dört ölçekleme çarpanını belirleyerek klasik PID kontrolcünün kontrol performansına yakın Lineer Bulanık Mantık PID kontrolcü elde edilebilir.

Mamdani tipi bulanık kural ve netleştirici olarak merkez yöntemi kullanılmıştır. Giriş aralığı [-10 10], çıkış aralığı [-20 20] olup Fuzzy Logic Toolbox modülünde görünüşü Şekil 5. 8 'deki gibidir.



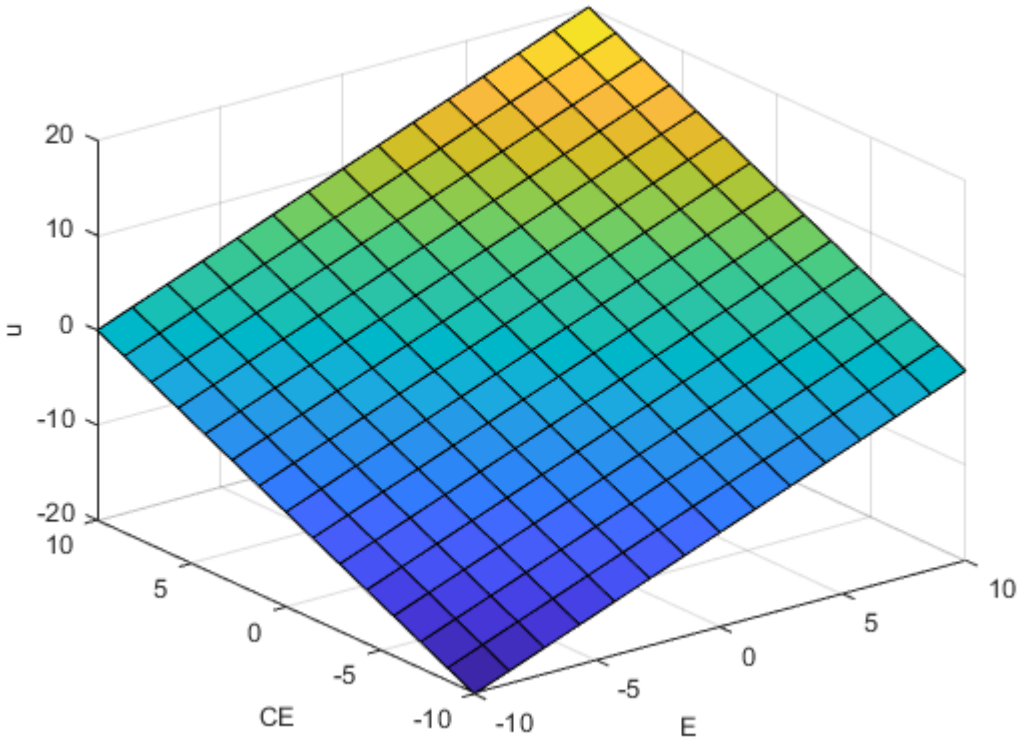
Şekil 5. 8 Matlab'de tasarlanan Lineer BMK'nin ayarları

Lineer bulanık mantık kontrolcünün kural tablosu ve kontrol yüzeyi sırasıyla Çizelge 5. 2 ve Şekil 5. 9 'de görülmektedir.

Çizelge 5. 2 Lineer BMK kural tablosu

		Hatanın Türevi (CE)		
		N	**Z**	**P**
Hata (E)	**N**	LN	SN	Z
	Z	SN	Z	SP
	P	Z	SP	LP

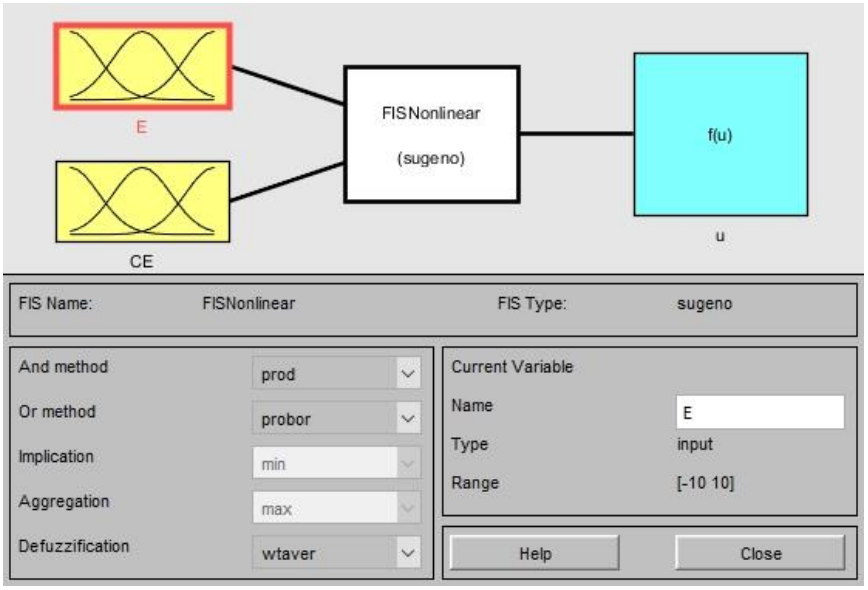
Kural tablosunda hata için L,S,P,Z,N; Büyük (Large), Küçük (Small), Pozitif (Positive), Sıfır (Zero), Negatif (Negative) anlamına gelmektedir ve dilsel niteleyicilerdir.



Şekil 5. 9 Lineer kontrol yüzeyi

5.2.2 Nonlineer Kontrol Yüzeyli Bulanık Mantık PID Kontrolcü

Lineer bulanık mantık PID kontrolcü tasarlandıktan sonra, bulanık mantık kural tipi, üyelik fonksiyonları ve kurallar tabanı değiştirilerek nonlineer kontrol yüzeyi oluşturulabilir. Bunun için Sugeno tipi bulanık kural, netleştirici olarak ağırlıklı ortalama yöntemi Şekil 5. 10'daki gibi seçilmiştir.



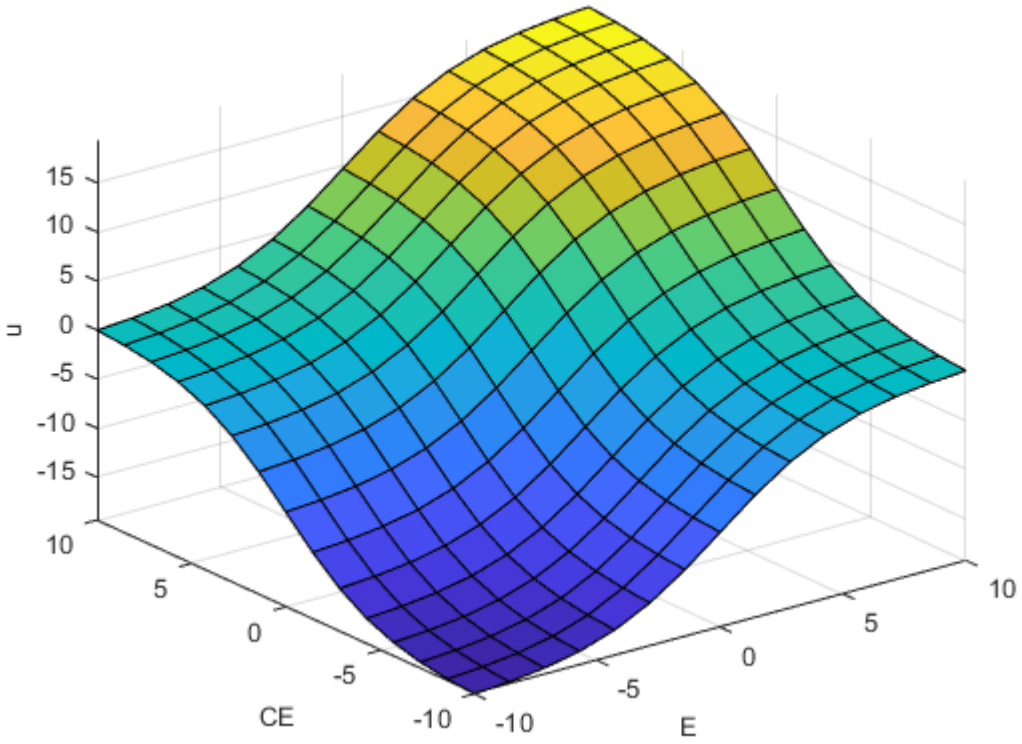
Şekil 5. 10 Tasarlanan Nonlineer BMK'nin Matlab ayarları

Gasuss eğrisi üyelik fonksiyonu seçilip, BMK kural tablosu Çizelge 5. 3 'deki gibi değiştirilmiştir.

Çizelge 5. 3 Nonlineer BMK kural tablosu

		Hatanın Türevi (CE)	
		N	**P**
Hata (E)	**N**	Min	Z
	P	Z	Max

Kural tablosunda hata için Min, Max, P,Z,N; En büyük (Max), En küçük (Min), Pozitif (Positive), Sıfır (Zero), Negatif (Negative) anlamına gelmektedir. Bu durumda çıkış fonksiyonu u için en büyük değer 20 ve en küçük değer -20 olacaktır. Çizdirilen nonlineer kontrol yüzeyi Şekil 5. 11 'de yer almaktadır.



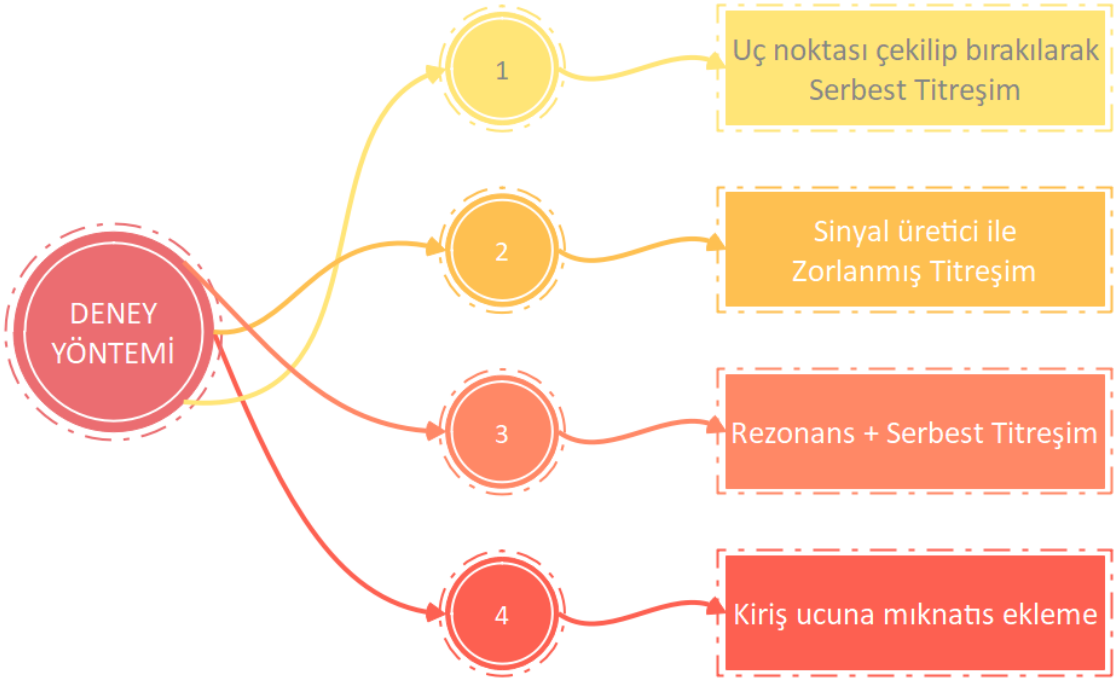
Şekil 5. 11 Nonlineer kontrol yüzeyi

5.3 Deney Metodolojisi

Bu başlıkta ankastre kirişin aktif titreşim kontrolü sonuçlarının elde edildiği metodoloji açıklanacaktır. Sonraki bölümlerde koşullar ve kontrolcü değerleri değiştirilerek sonuçların karşılaştırmasına yer verilecektir.

Metodoloji için akıllı kiriş aktüatörden 11mm uzaklığa mesnetlenmiştir. Aktif titreşim kontrolünü gerçekleştirmek amacıyla PID, Bulanık PID Lineer ve Bulanık PID Nonlineer kontrol uygulanmıştır. Kontrolcünün kapalı olduğu durum da dâhil edilirse, dört durum söz konusudur. Bulanık mantık lineer ve lineer olmayan algoritma arasındaki farka önceki başlıkta değinilmiştir.

Deneysel aşamada aktif titreşim kontrolü sonuçları üç temel yöntem ile elde edilmiştir. Bu yöntemlerin şematik olarak gösterimi için Şekil 5. 12'ye bakılabilir.



Şekil 5. 12 Deney yöntemi

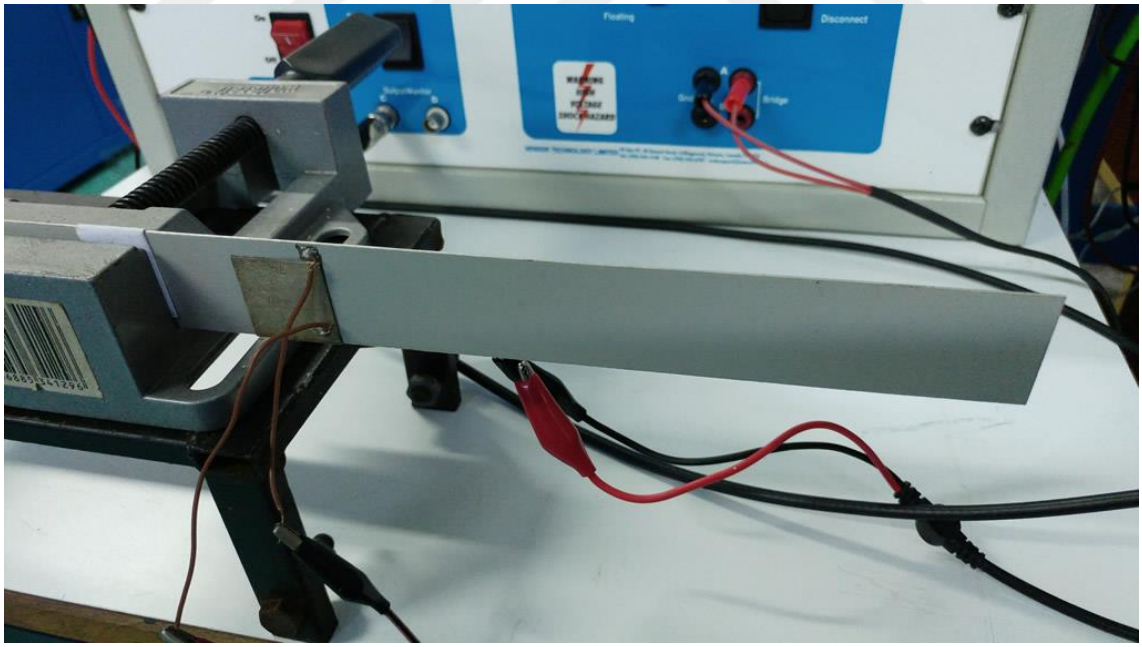
- (1) Kirişin uç noktası 5 mm çekilip bırakılarak serbest titreşim yapması sağlanmıştır. Birinci aktüatör ile aktif titreşim kontrolü yapılmıştır.
- (2) Deney düzeneğine ilave sinyal üretici eklenerek ikinci aktüatör ile kiriş tahrik edilerek rezonansa sokulmuş, zorlanmış titreşim durumunda birinci aktüatör ile aktif kontrolü sağlanmıştır. Sonuçlar elde edilmiştir.
- (3) Üçüncü yöntemde ise Matlab/Simulink ile birinci aktüatöre rezonans sinyali gönderilmiş, 4üncü saniyede sinyal kesilerek serbest titreşim yapması sağlanmıştır. Rezonans sinyalinin kesildiği anda kontrolcü açılarak titreşim kontrolü yine birinci aktüatör üzerinden yapılmıştır.

Çeşitli denemelerden sonra PID katsayıları, sistemin stabil olarak çalıştığı K_P=16, K_I=0.001, K_D=0.1 katsayıları ayarlanarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5. 13 Sinyal üretici (209 Hz frekansta sinyal ürettiği an)

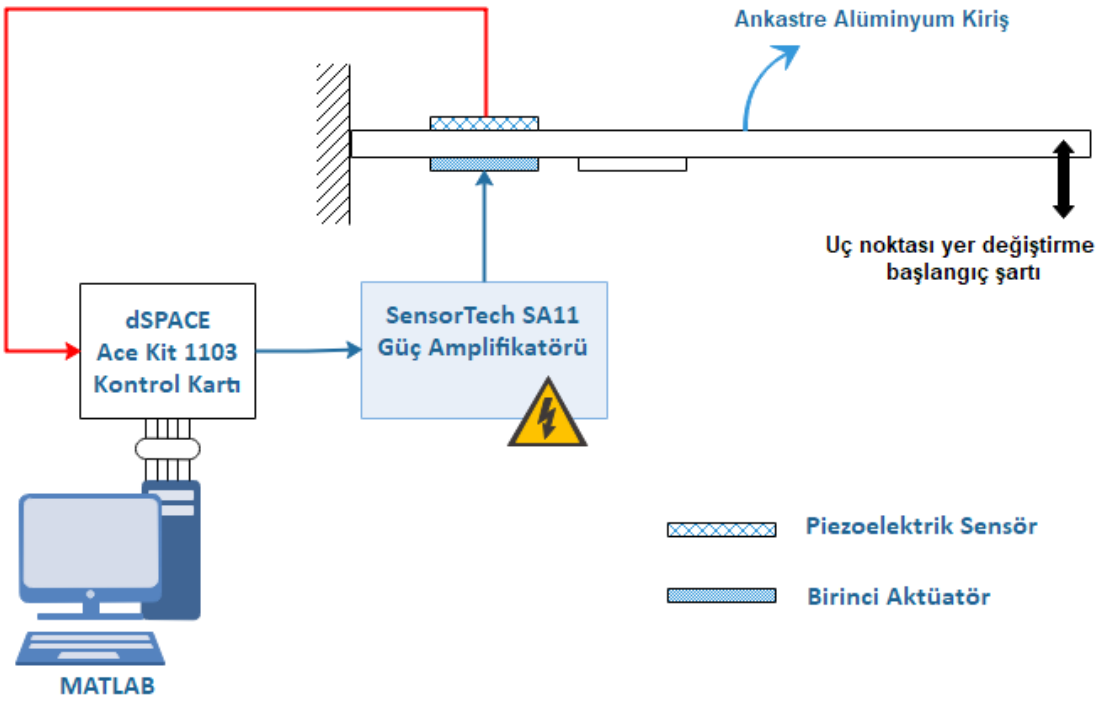
Doğal frekans tespiti için aktüatör sinyal üretici (Şekil 5. 13) ile tahrik edilerek sensör cevabı izlenmiştir. Gönderilen sinyal frekansı 0,1 Hz 'lik değerlerde attırılarak sistemin rezonansa girdiği frekans tespit edilmiştir.



Şekil 5. 14 Akıllı kiriş

5.3.1 Serbest Titreşim (1)

Birinci yöntemde kirişin ucu elle 5 mm çekilip bırakılarak sistemin serbest titreşim yapması sağlanmıştır. Şekil 5. 15'deki gibi birinci aktüatör üzerinden aktif titreşim kontrolü yapılmıştır.



Şekil 5. 15 Kiriş uç noktası 5 mm yerdeğiştirme başlangıcı ile serbest titreşim deneyinin şematik gösterimi

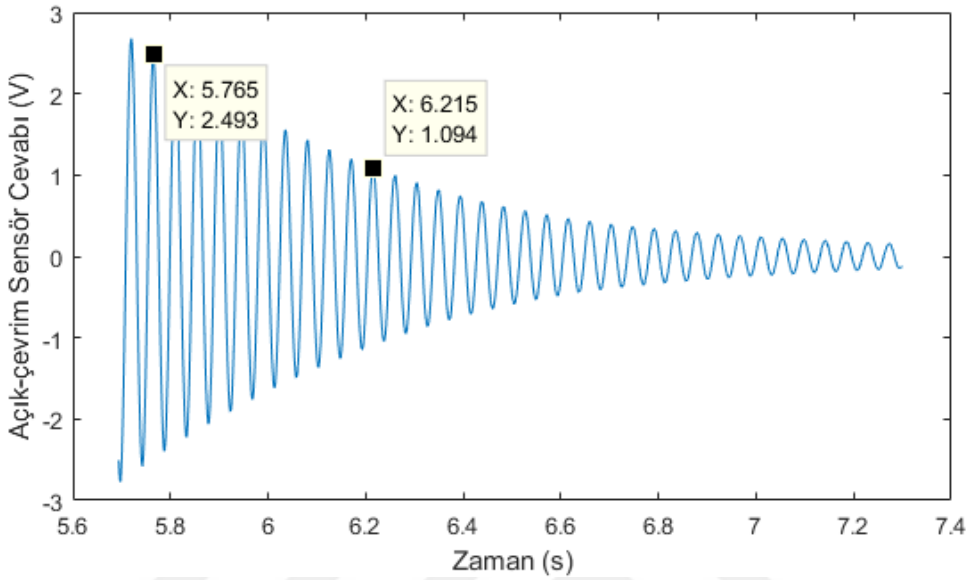
Kontrol işlemine dahil olmasa da başlangıç yerdeğiştirmesi lazer mesafe ölçer (Şekil 5. 16) ile teyit edilmiştir.



Şekil 5. 16 Lazer mesafe ölçer

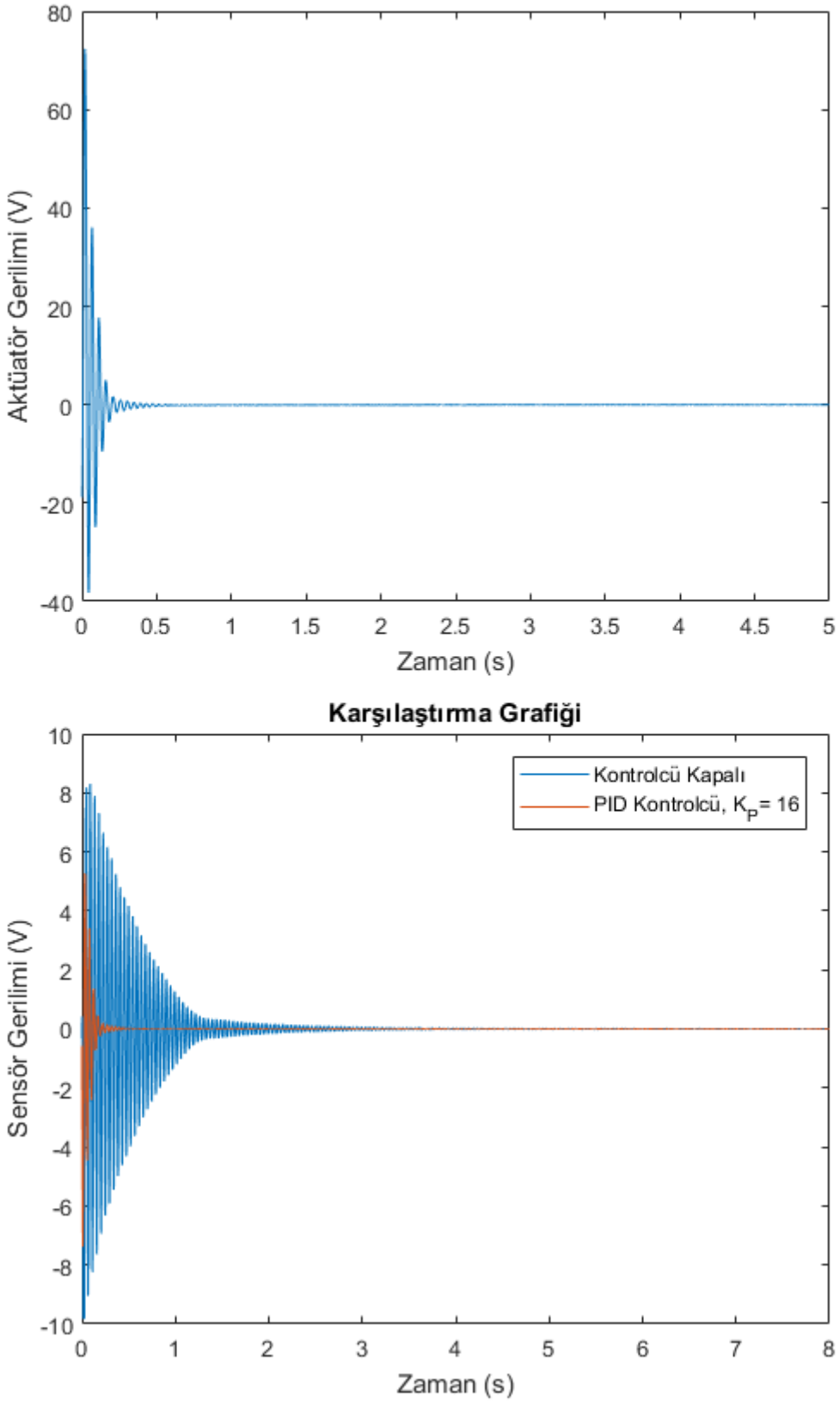
Kontrolcü kapalı durumda kiriş ucu 5mm çekilip bırakılarak açık çevrim cevabı elde edilmiştir. Şekil 5. 17'deki grafik kullanılarak birinci mod için sönüm oranı hesaplanmıştır:

$$\zeta_1 = \frac{1}{2\pi 10}\ln\left(\frac{A_1}{A_0}\right) = \frac{1}{2\pi 10}\ln\left(\frac{2.493}{1.094}\right) = 0.0131 \quad (5.8)$$

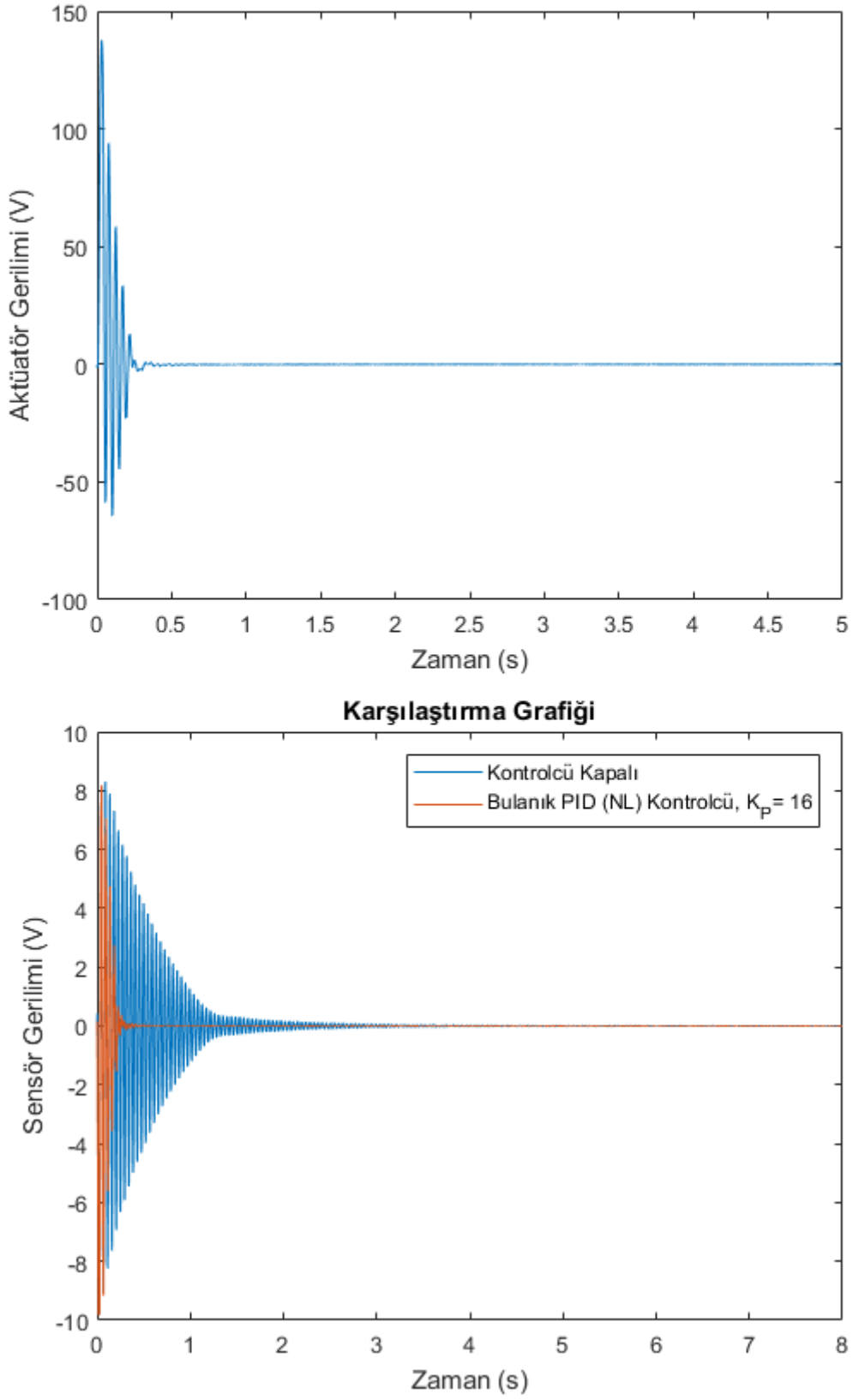


Şekil 5. 17 Birinci mod sönüm oranı hesabı, açık çevrim cevabı yakınlaştırılarak elde edilmiştir

PID Kontrol ile aktüatöre uygulanan gerilim ve sensör çıkış geriliminin kontrolcünün kapalı olduğu durum ile karşılaştırması (Şekil 5. 18) yapılmıştır. Aynı deney Bulanık PID kontrolcü ile tekrarlanmış ve nonlineer kontrol yüzeye sahip bulanık PID kontrol sonuçları (Şekil 5. 19) elde edilmiştir.



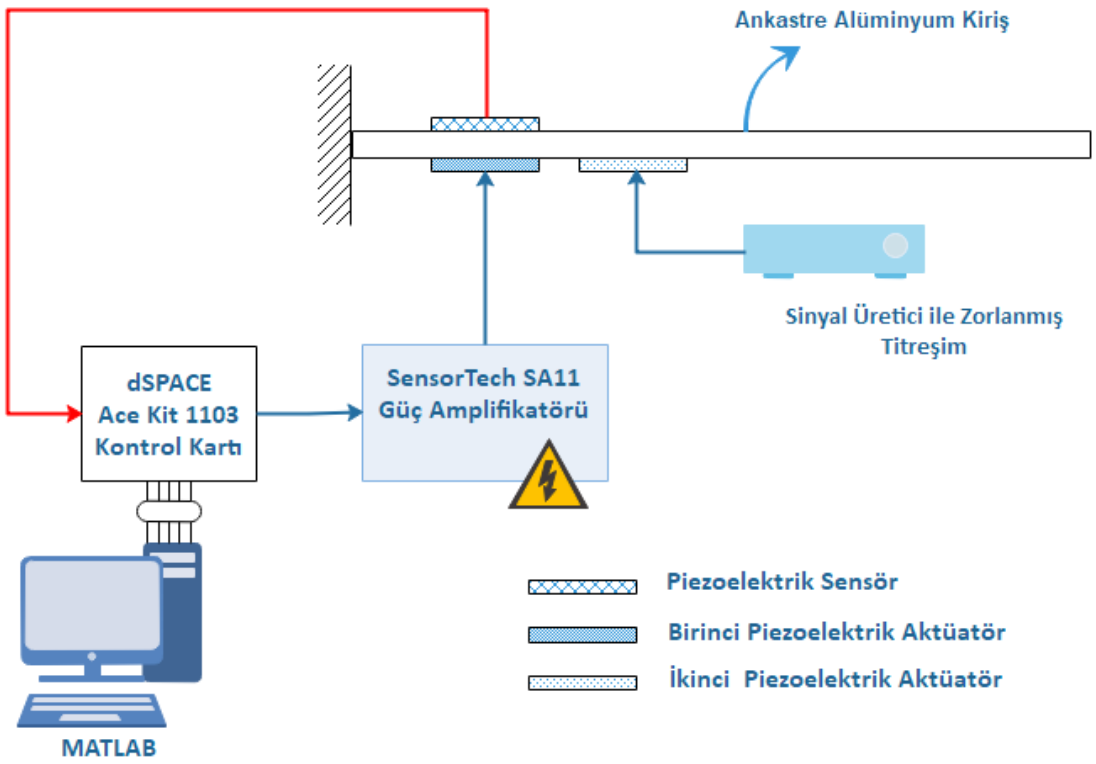
Şekil 5. 18 PID Kontrol ile aktüatöre uygulanan gerilim (üstte), ve sensör çıkış gerilimi karşılaştırma grafiği (altta), K_P=16



Şekil 5. 19 Bulanık PID Nonlineer kontrol ile aktüatöre uygulanan gerilim (üstte), ve sensör çıkış gerilimi karşılaştırma grafiği (altta), K_P=16

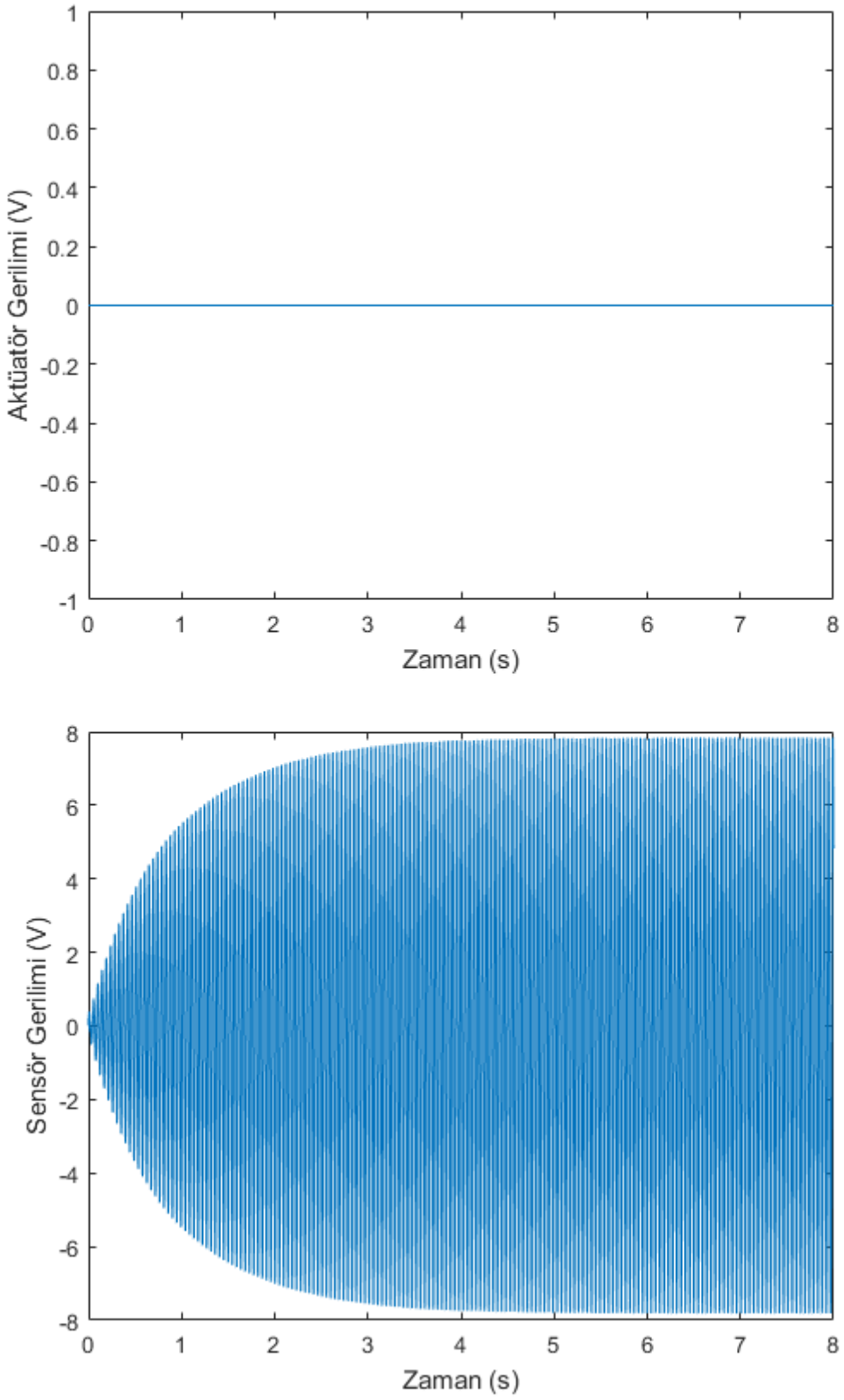
5.3.2 Sinyal Üretici İle Zorlanmış Titreşim (2)

İkinci yöntemde deney düzeneğine ilave sinyal üretici (Şekil 5. 13) eklenerek ikinci aktüatör ile 1. Mod doğal frekansında kiriş tahrik edilerek rezonansa sokulmuş, zorlanmış titreşim durumunda birinci aktüatör ile aktif kontrolü sağlanmıştır (Şekil 5. 20). Sonuçlar elde edilmiştir.

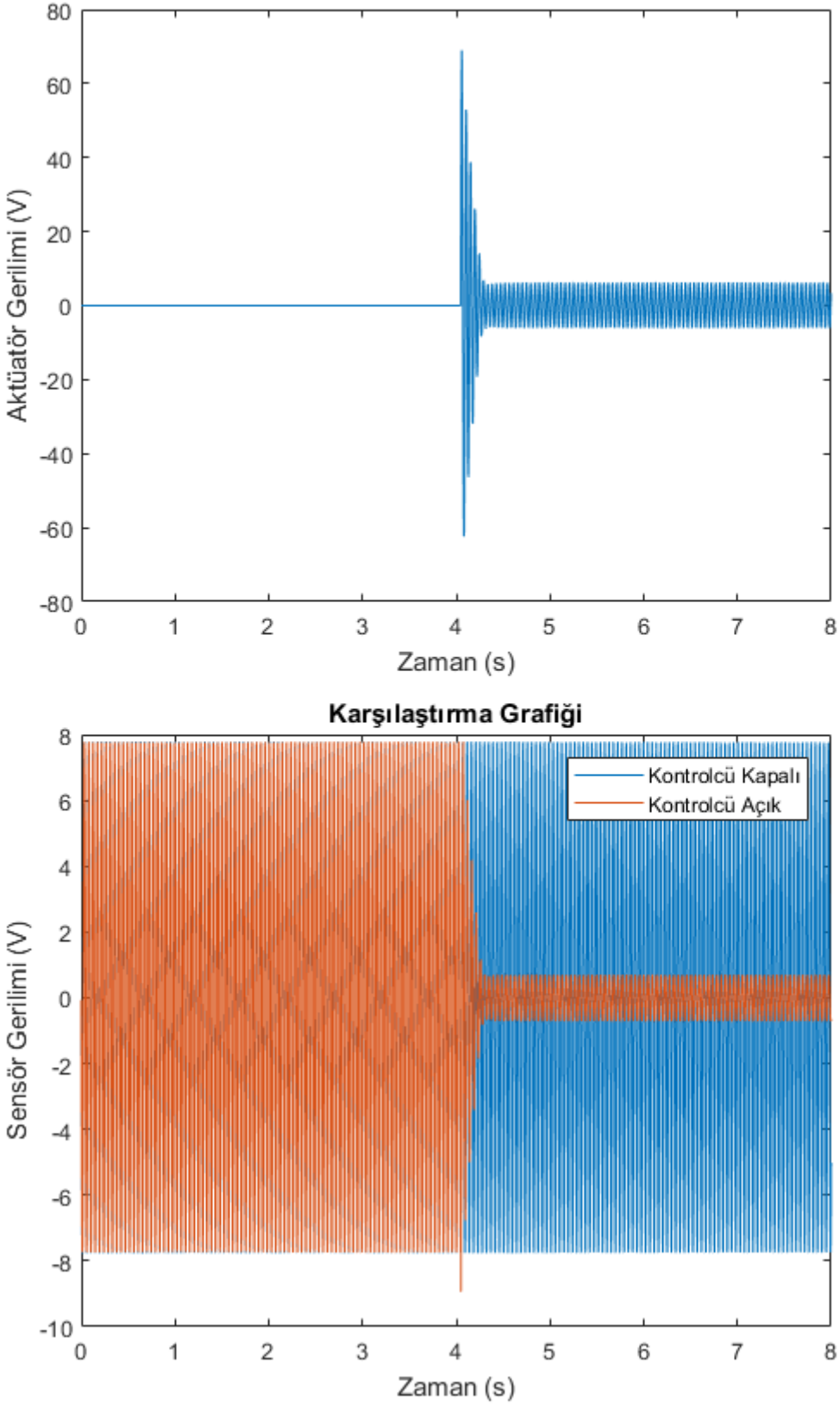


Şekil 5. 20 Sinyal üretici ile zorlanmış titreşim deneyinin şematik gösterimi

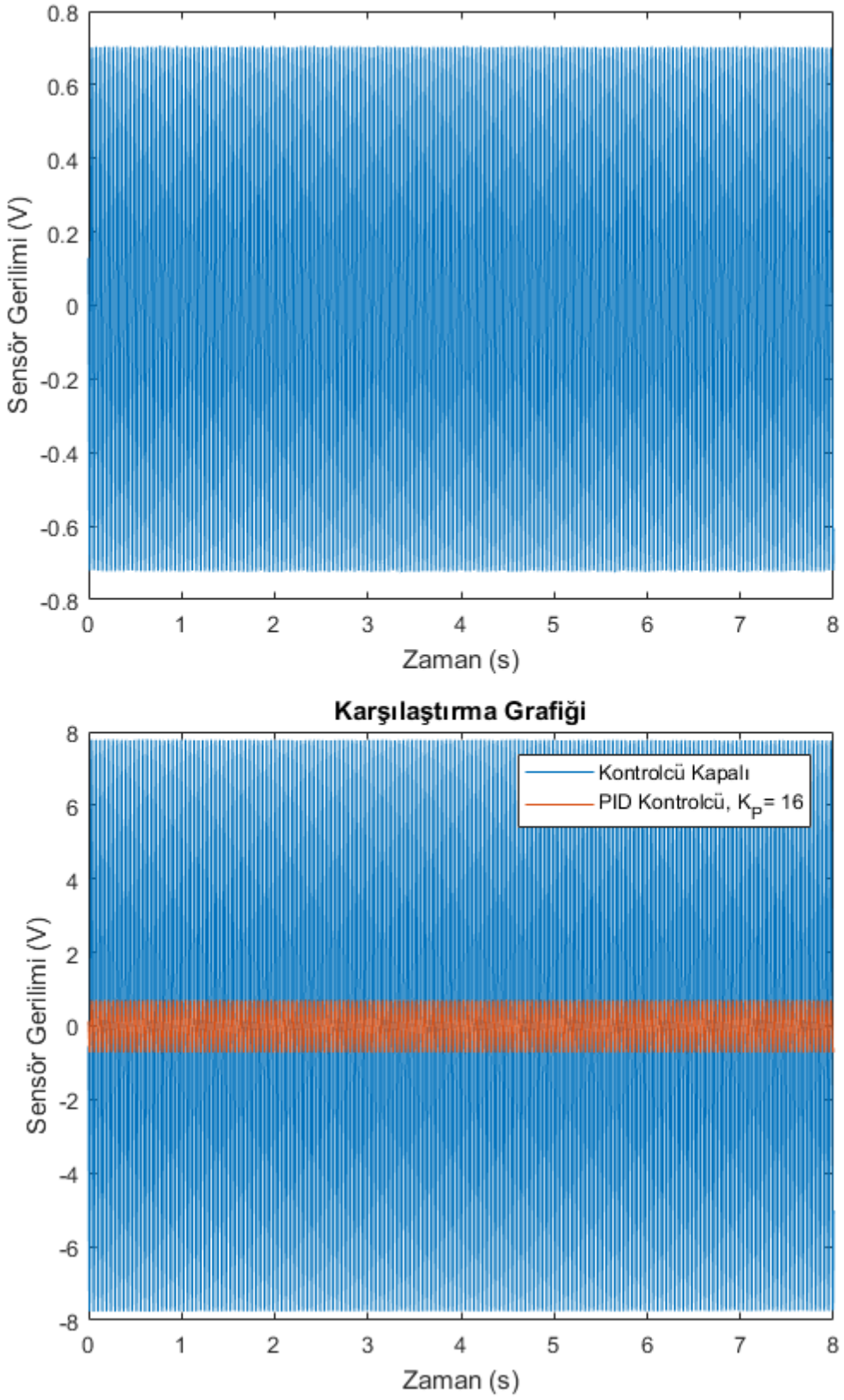
Kontrolcü kapalı iken sinyal üretici ile rezonans titreşiminin başlaması ve aktüatörün 0 volt değerini gösteren grafikleri Şekil 5. 21'de yer almaktadır. Rezonans durumu devam ederken 4. saniyede PID kontrolcü açıldığında aktüatörün devreye girmesi ve kiriş titreşimlerinin bastırılmasını Şekil 5. 22'de gösterilmektedir. PID kontrolcü açıkken K_P=16 değerindeki zorlanmış titreşim kontrolünde sensör gerilimi ±0.7 Volt ölçülmüş olup, kontrolcü kapalı olduğu durum ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5. 23). Nonlineer kontrol yüzeyli bulanık PID kontrolcü devreye sokulduğunda sensör gerilimleri ±0.35 Volt'a düşmüştür. Sensör gerilimi ve karşılaştırması Şekil 5. 24'de yer almaktadır.



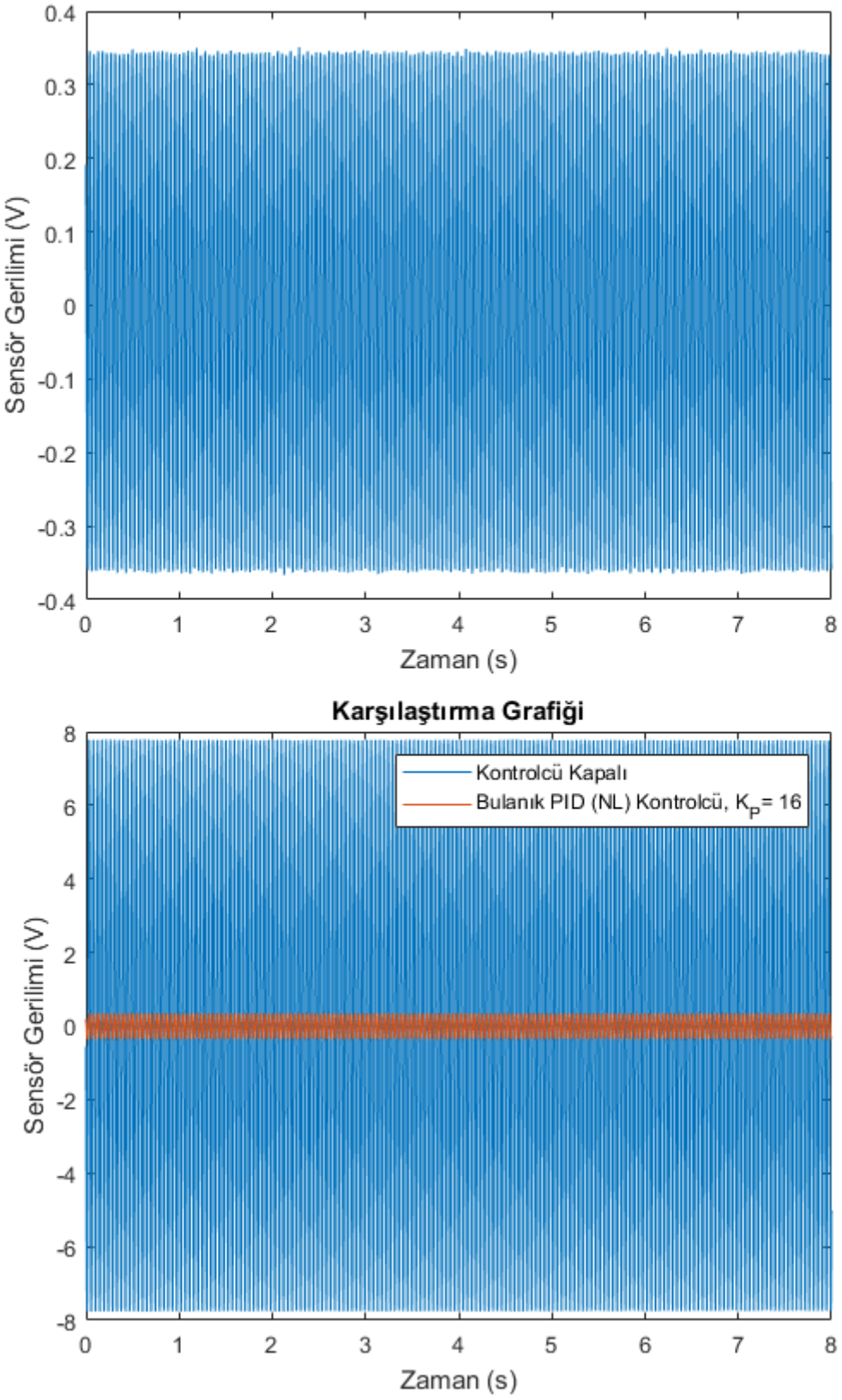
Şekil 5. 21 Kontrolcünün kapalı olduğu durumda rezonans başlangıcı grafikleri



Şekil 5. 22 Kontrolcü kapalı durumda iken 4. saniyede PID kontrolcü açıldığında aktüatörün devreye girmesi (üstte) ve titreşimlerin azalması (altta), K_P=16



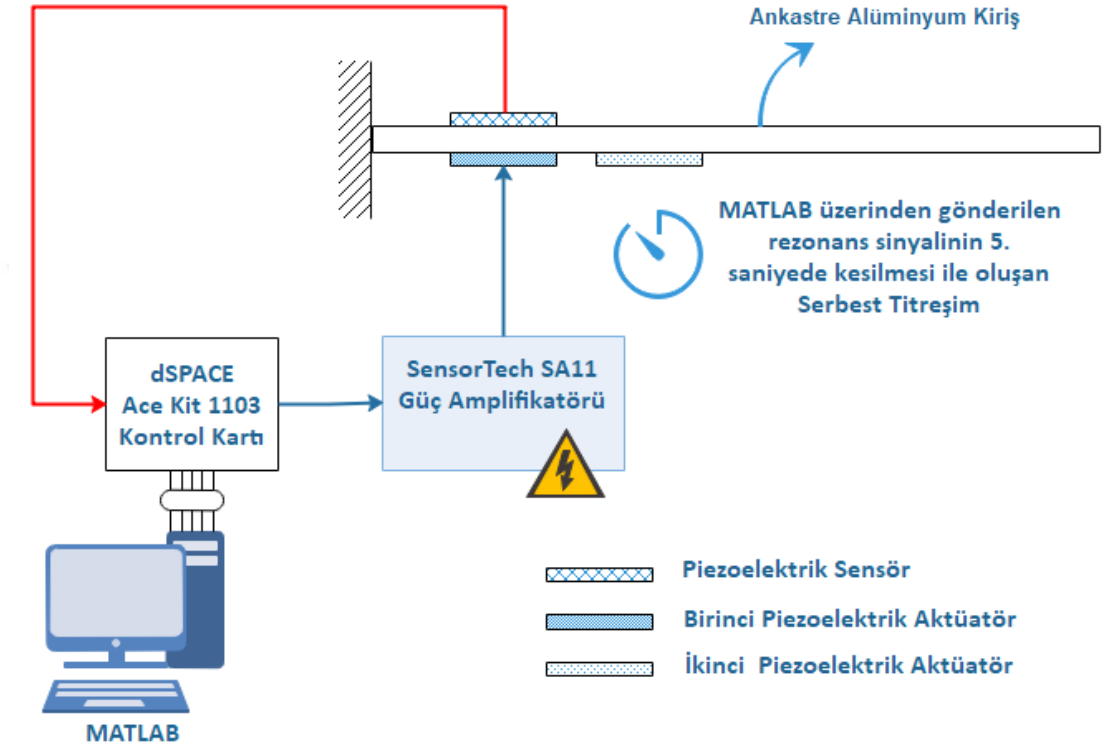
Şekil 5. 23 Zorlanmış titreşim PID kontrol sensör cevabı (üstte) ve karşılaştırması



Şekil 5. 24 Zorlanmış titreşim Bulanık PID Nonlineer kontrol sensör cevabı (üstte) ve karşılaştırması

5.3.3 Rezonans + Serbest Titreşim (3)

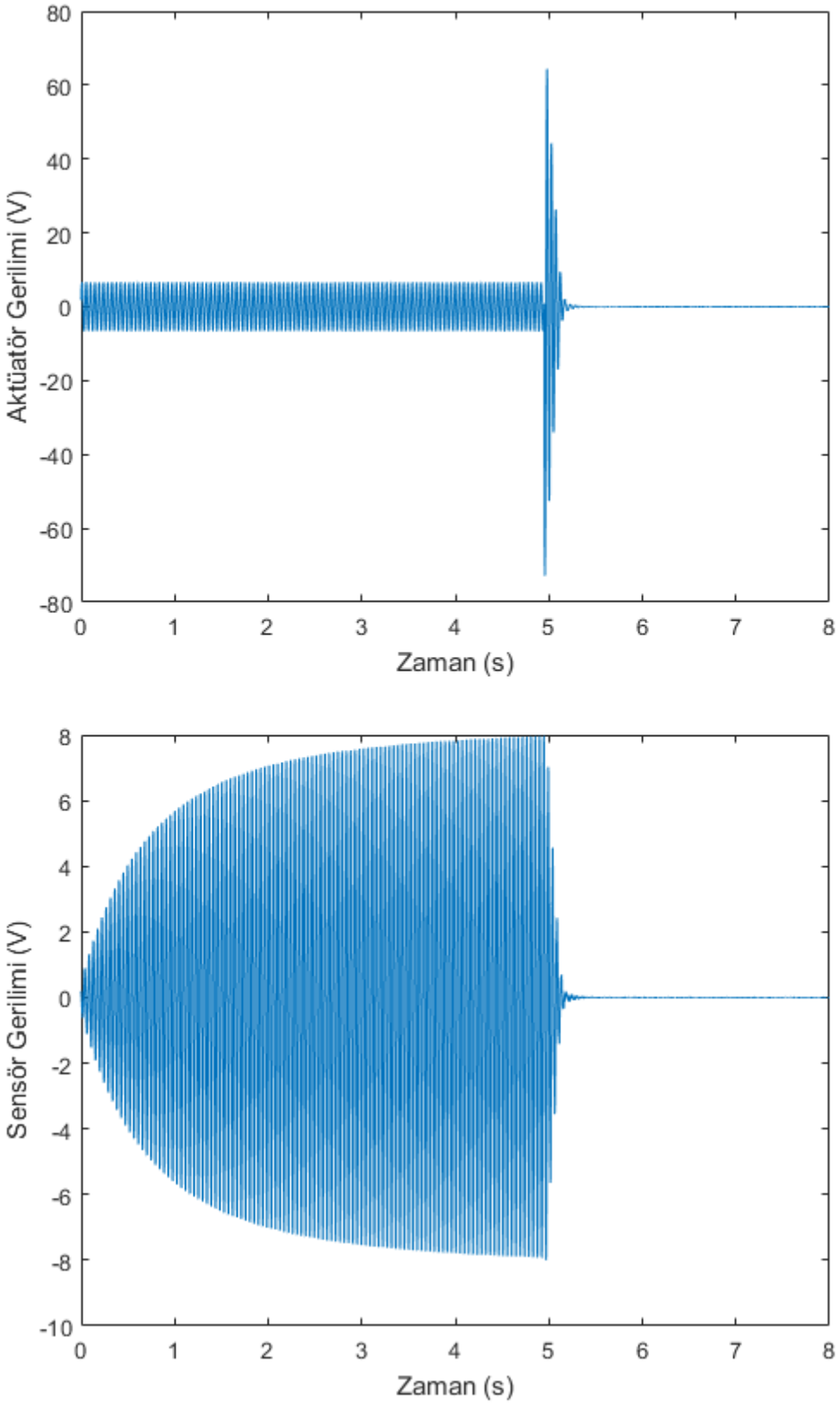
Üçüncü yöntemde ise Matlab/Simulink ile birinci aktüatöre rezonans sinyali gönderilmiş, 5'inci saniyede sinyal kesilerek kirişin serbest titreşim yapması sağlanmıştır. Rezonans sinyalinin kesildiği anda kontrolcü açılarak titreşim kontrolü yine birinci aktüatör üzerinden yapılmıştır (Şekil 5. 25).



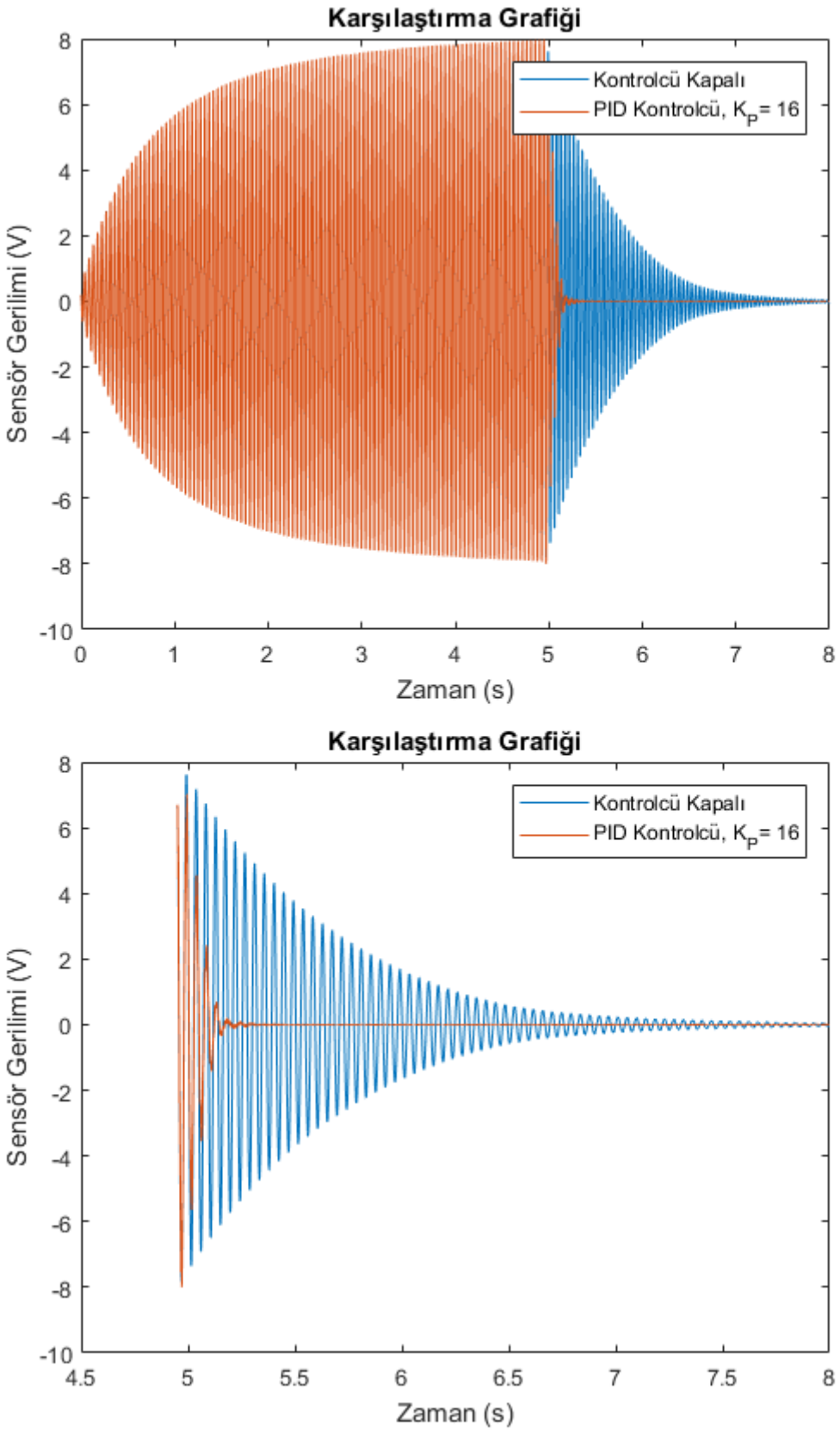
Şekil 5. 25 Matlab üzerinden oluşturulan serbest titreşim deneyinin şematik gösterimi

Matlab/Simulink üzerinden gönderilen rezonans sinyalinin beşinci saniyede kesilmesiyle oluşan serbest titreşimin PID kontrolü Şekil 5. 26 ile gösterilmektedir. Kontrolcünün kapalı durumu için karşılaştırma grafiği çizdirilip, beşinci saniyeden sonrası yakınlaştırılmıştır (Şekil 5. 27).

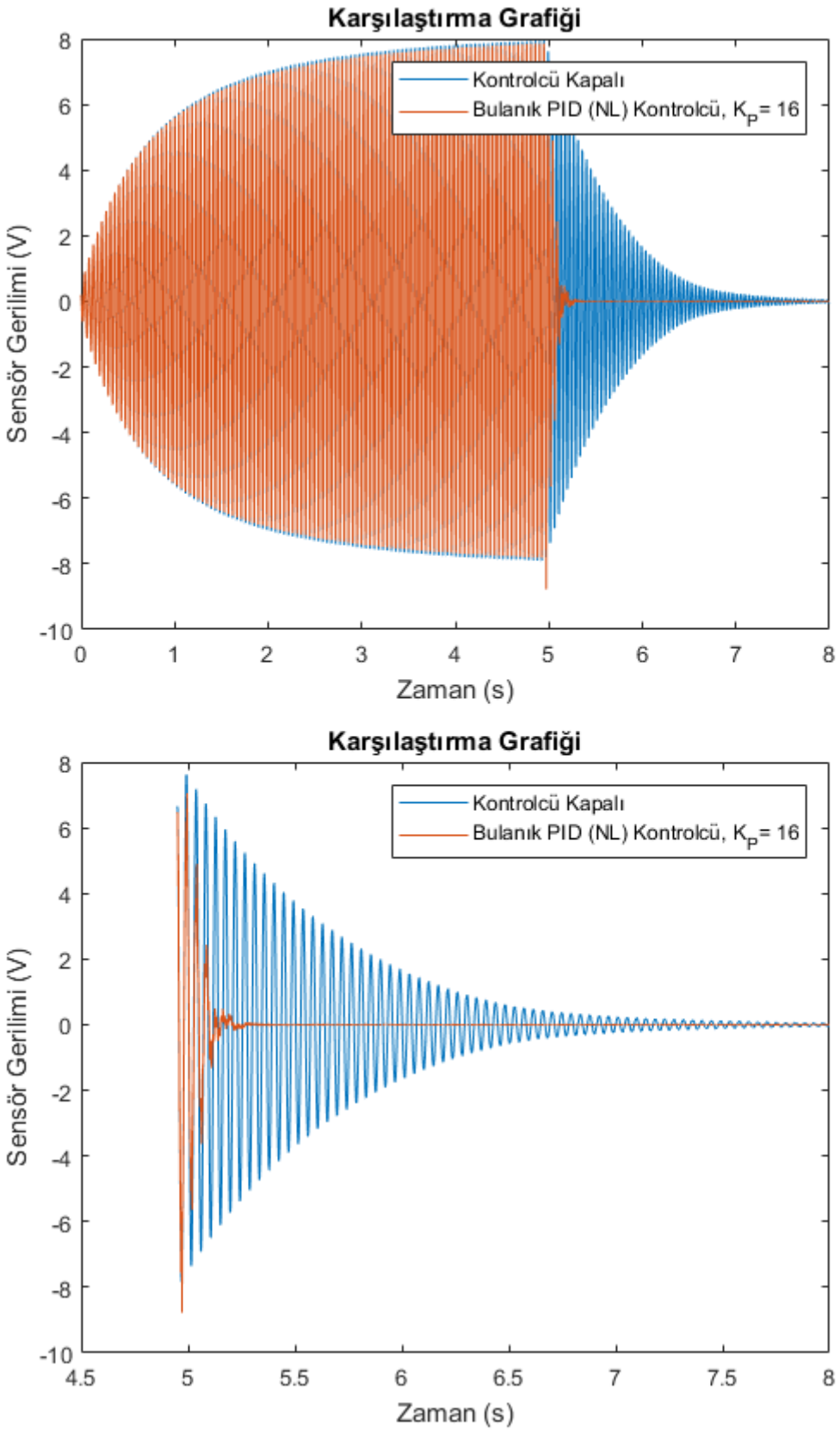
Aynı deney Bulanık PID nonlineer yüzeyli kontrolcü için tekrarlanmış ve Şekil 5. 28'deki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 5. 26 Gönderilen rezonans sinyalinin beşinci saniyede kesilmesiyle oluşan serbest titreşimin PID kontrolü, sensör ve aktüatör genlikleri



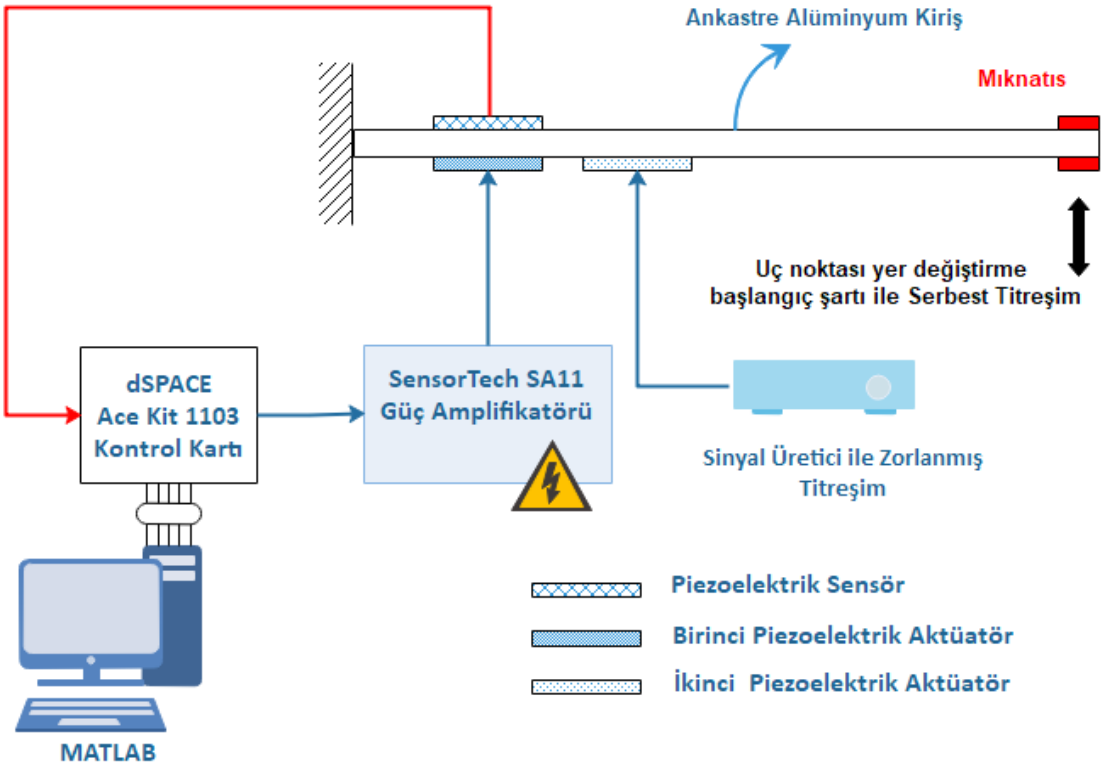
Şekil 5. 27 Rezonans sinyalinin kesilmesinin ardından oluşan serbest titreşim (üstte), yakınlaştırılmış grafik (altta) PID kontrol, K_P=16



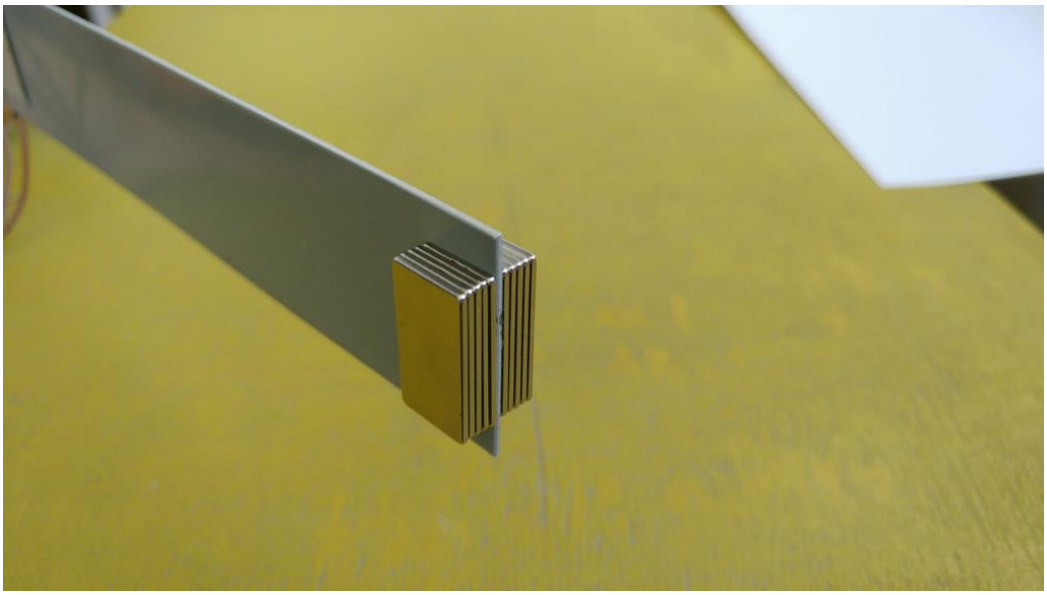
Şekil 5. 28 Rezonans sinyalinin kesilmesinin ardından oluşan serbest titreşim (üstte), yakınlaştırılmış grafik (altta) Bulanık PID Nonlineer kontrol, K_P=16

5.4 Uç Kısmına Ağırlık/Mıknatıs Eklenmesi (4)

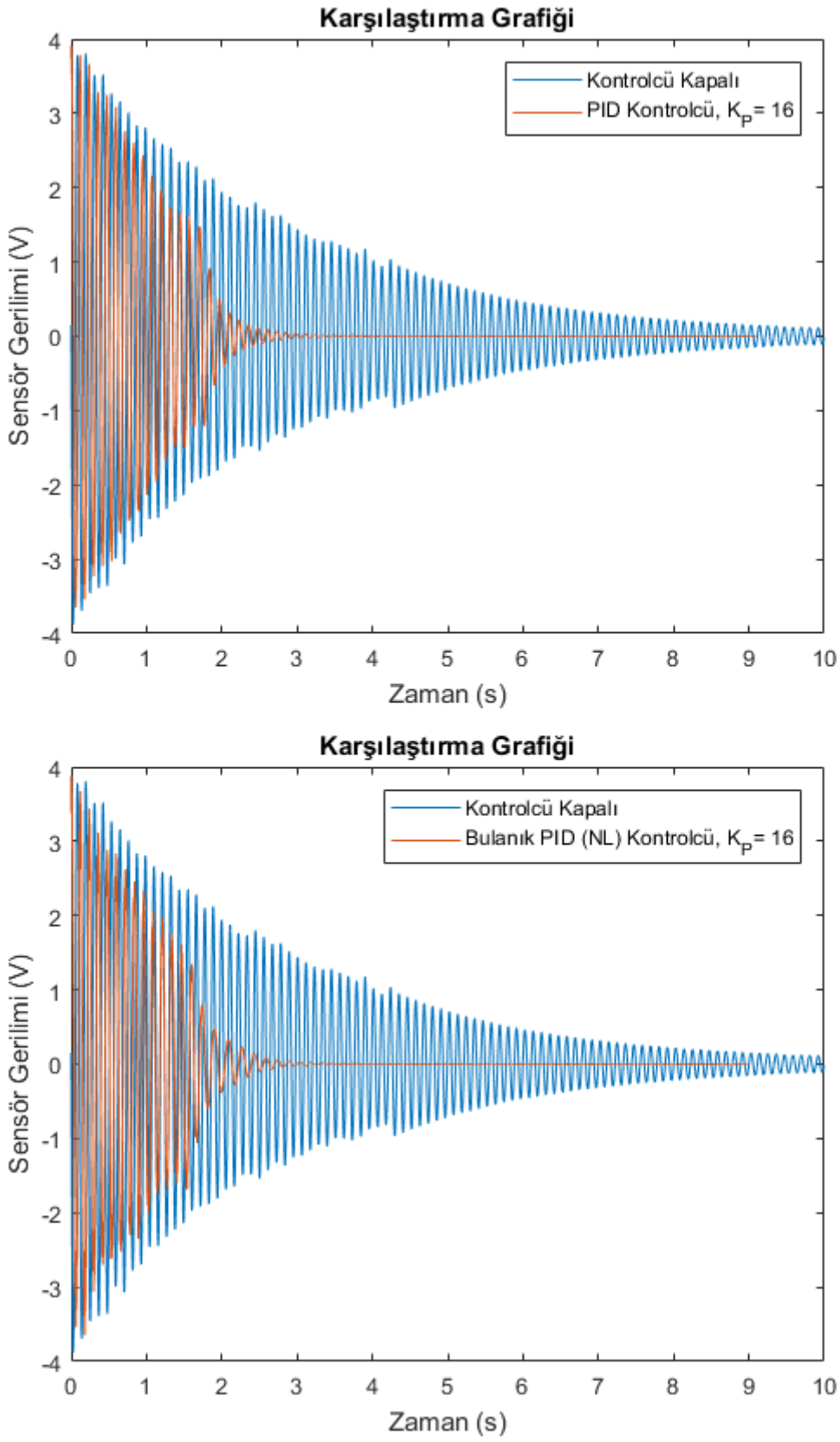
Akıllı kirişin ucuna 20x10x5 mm boyutlarında mıknatıslar karşılıklı olarak eklenerek titreşim kontrolü deneyi devam ettirilmiştir (Şekil 5. 28). Sisteme ilave edilen mıknatısların (Şekil 5. 30) toplam kütlesi 15 gramdır.



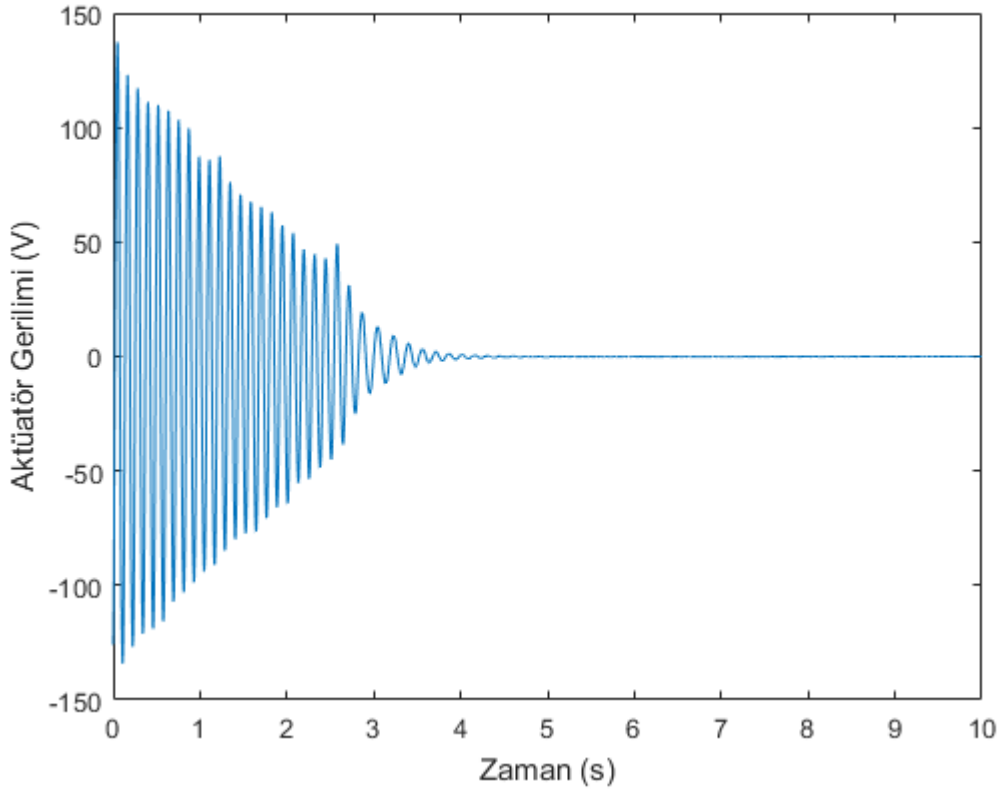
Şekil 5. 29 Akıllı kirişin ucuna mıknatıs eklendiği deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 5. 30 Kirişin ucuna ağırlık eklenmesi, mıknatıs boyutları 20x10x5 mm



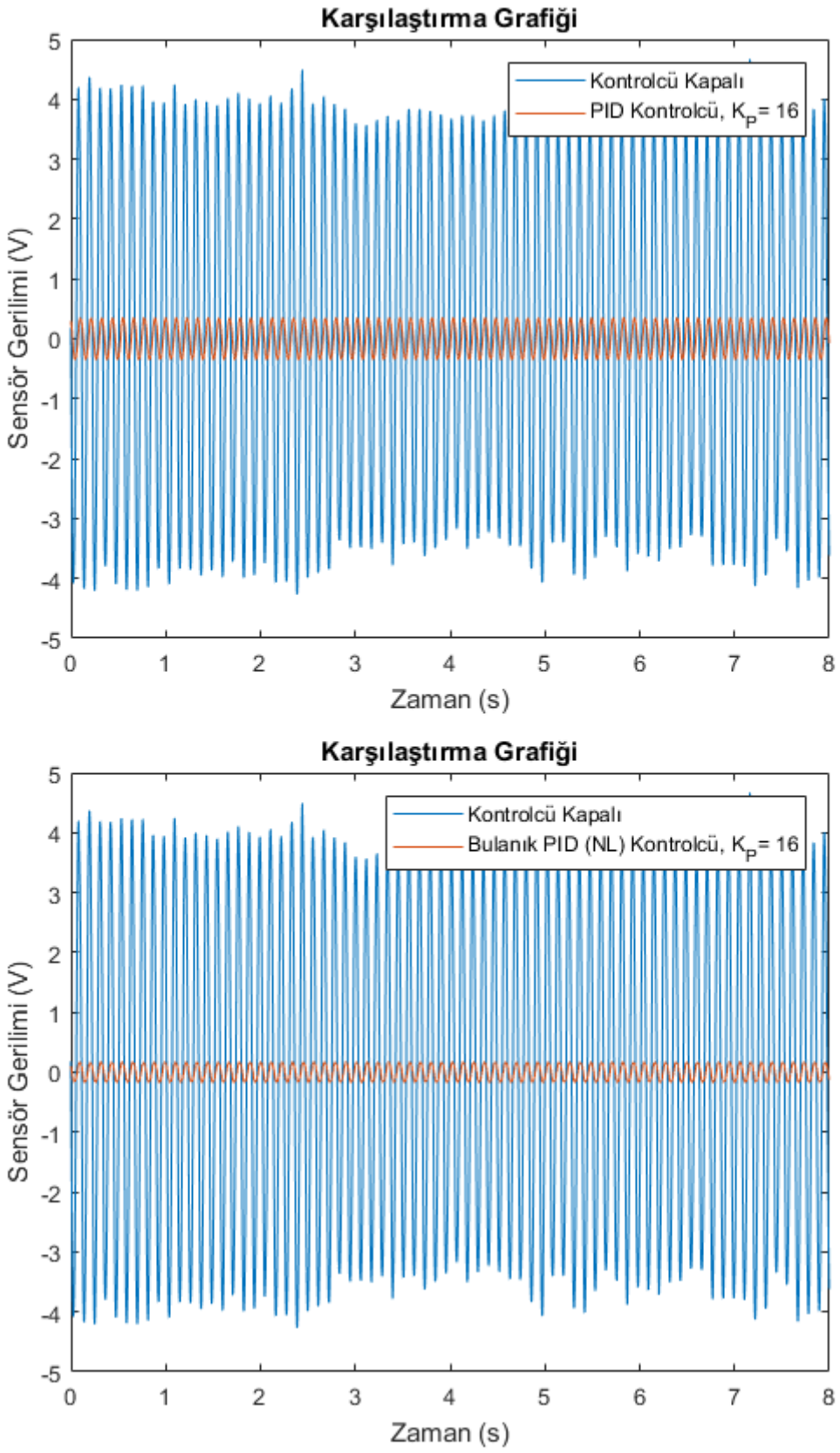
Şekil 5. 31 Mıknatıs eklenmiş kirişin serbest titreşim aktif kontrolü



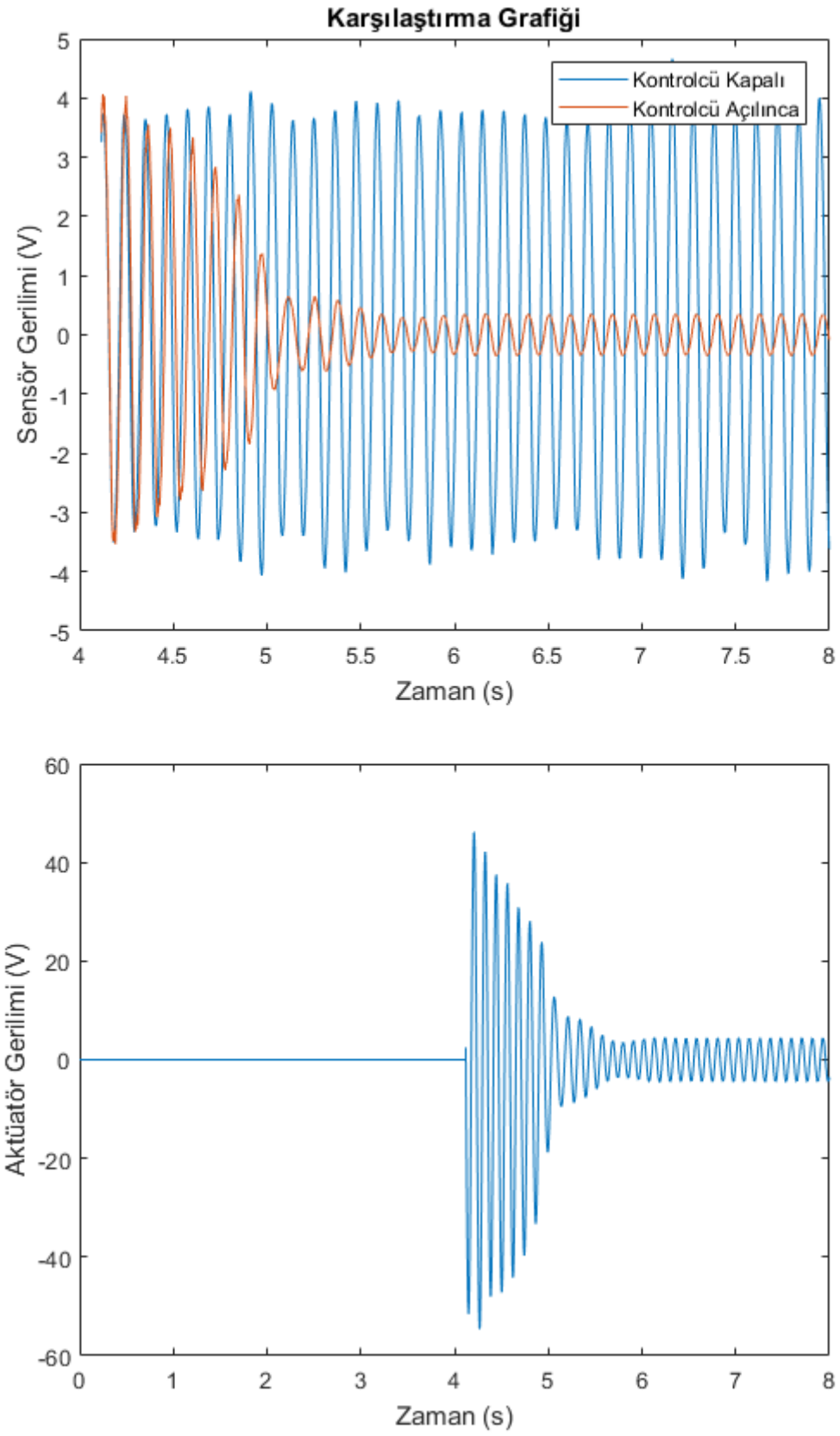
Şekil 5. 32 Bulanık PID (NL) kontrol durumunda aktüatör gerilimi

Mıknatıs eklenmiş kirişin uç noktası 5 mm çekilip bırakılarak serbest titreşim yaptırılmış, ardından PID kontrolcü ve Bulanık PID kontrolcü açılarak da aynı yöntem tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5. 31'da ve PID kontrol durumunda aktüatör gerilimi Şekil 5. 32'de yer almaktadır. Mesnet uzaklığı 10mm dir.

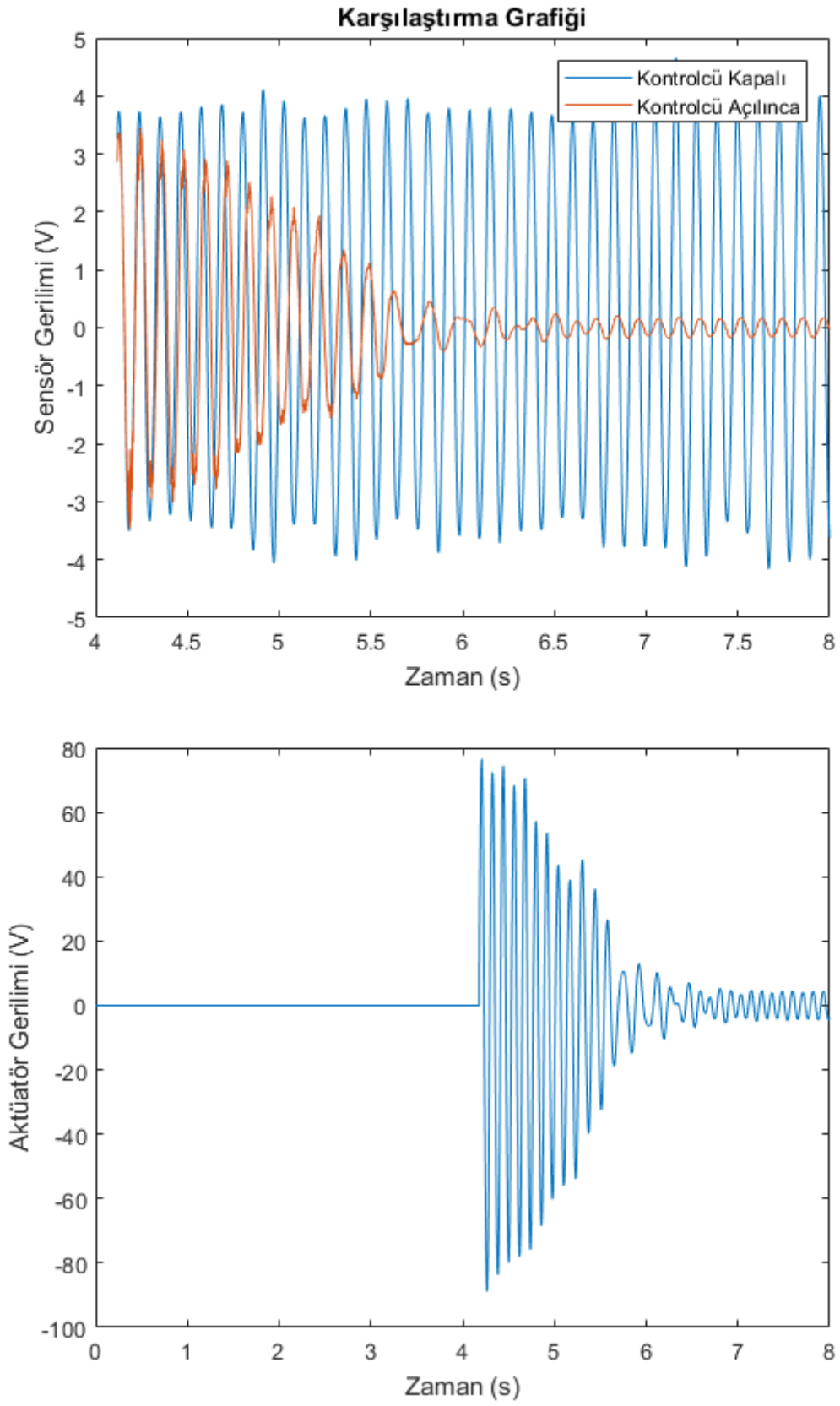
Birinci mod rezonans halinde zorlanmış titreşim aktif kontrolü iki kontrolcü için karşılaştırılmıştır (Şekil 5. 33). Dördüncü saniyede kontrolcü aktif hale getirildiğinde sistemin cevabı incelenmiştir. Yakınlaştırılmış grafikler her iki kontrolcü için Şekil 5. 34 ve Şekil 5. 35'te aktüatör gerilimleri ile birlikte verilmiştir.



Şekil 5. 33 Birinci mod rezonans durumu zorlanmış titreşim kontrolü



Şekil 5. 34 Kontrolcünün açılmasıyla genliklerin azalması ve aktüatör gerilimi, PID kontrol, K_P=16



Şekil 5. 35 Kontrolcünün açılmasıyla genliklerin azalması ve aktüatör gerilimi, Bulanık PID Nonlineer kontrol, K_P=16

5.5 Parametre Değişikliği İle Deneyin İlerletilmesi

Parametre değişikliği yapılarak akıllı kirişin aktif titreşim kontrolü deneyi Şekil 5. 5 ile açıklanan yöntemler tekrarlanarak devam ettirilmiştir. Öncelikle mesnet uzaklığı 15 mm, ardından 10 mm ve 5 mm olarak ayarlanarak sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra mesnet uzaklığı 10 mm durumunda oransal kazanç katsayısı K_P'nin farklı değerleri için serbest ve zorlanmış titreşim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde kontrolcü kazançları K_I=0.001, K_D=0.1 olmaktadır.

Mesnet uzaklığı 15 mm ayarlanarak çek-bırak yöntemiyle serbest titreşim kontrolü, rezonans durumunda zorlanmış titreşim kontrolü ve rezonans sinyalinin kesilmesiyle oluşan serbest titreşim kontrolü sonuçları sırasıyla Şekil 5. 36, Şekil 5. 37 ve Şekil 5. 38'de yer almaktadır.

Mesnet uzaklığının 10 mm olduğu durumdaki kontrol durumu sensör gerilimi sonuçları aynı sırayla (Şekil 5. 39, Şekil 5. 40 ve Şekil 5. 41) verilmiştir.

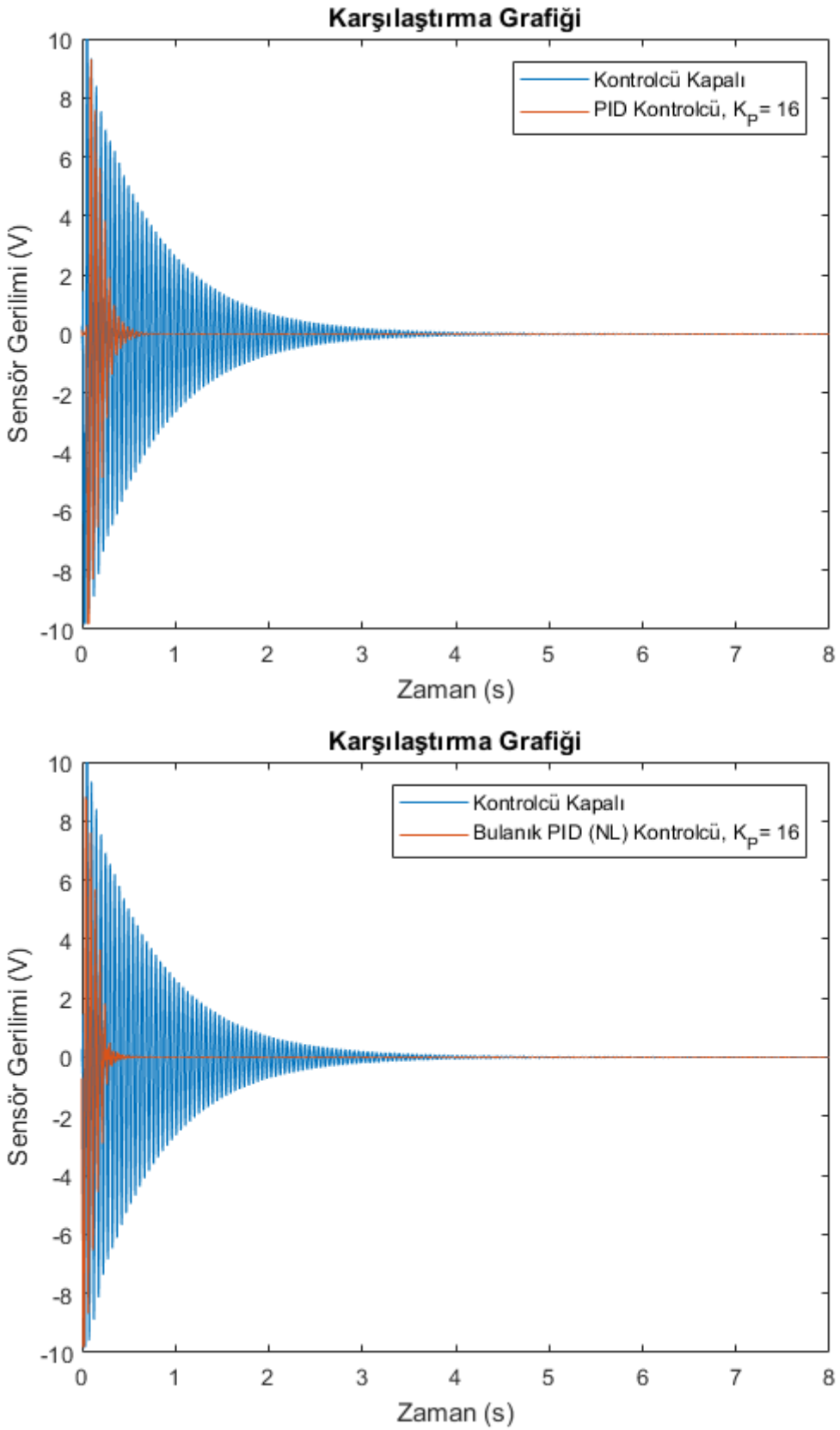
Son olarak kiriş mesnet uzaklığı 5 mm olacak şekilde sabitlenerek deney metodolojisi tekrarlanmıştır. Aynı sırayla oluşturulan sonuç grafikleri Şekil 5. 42, Şekil 5. 43 ve Şekil 5. 44'de gösterilmektedir.

Deney sonuçlarındaki hataların sebebi, mesnet uzaklığı ayarlandıktan sonra kabloların yeterince optimize edilmemesi olduğu düşünülmektedir.

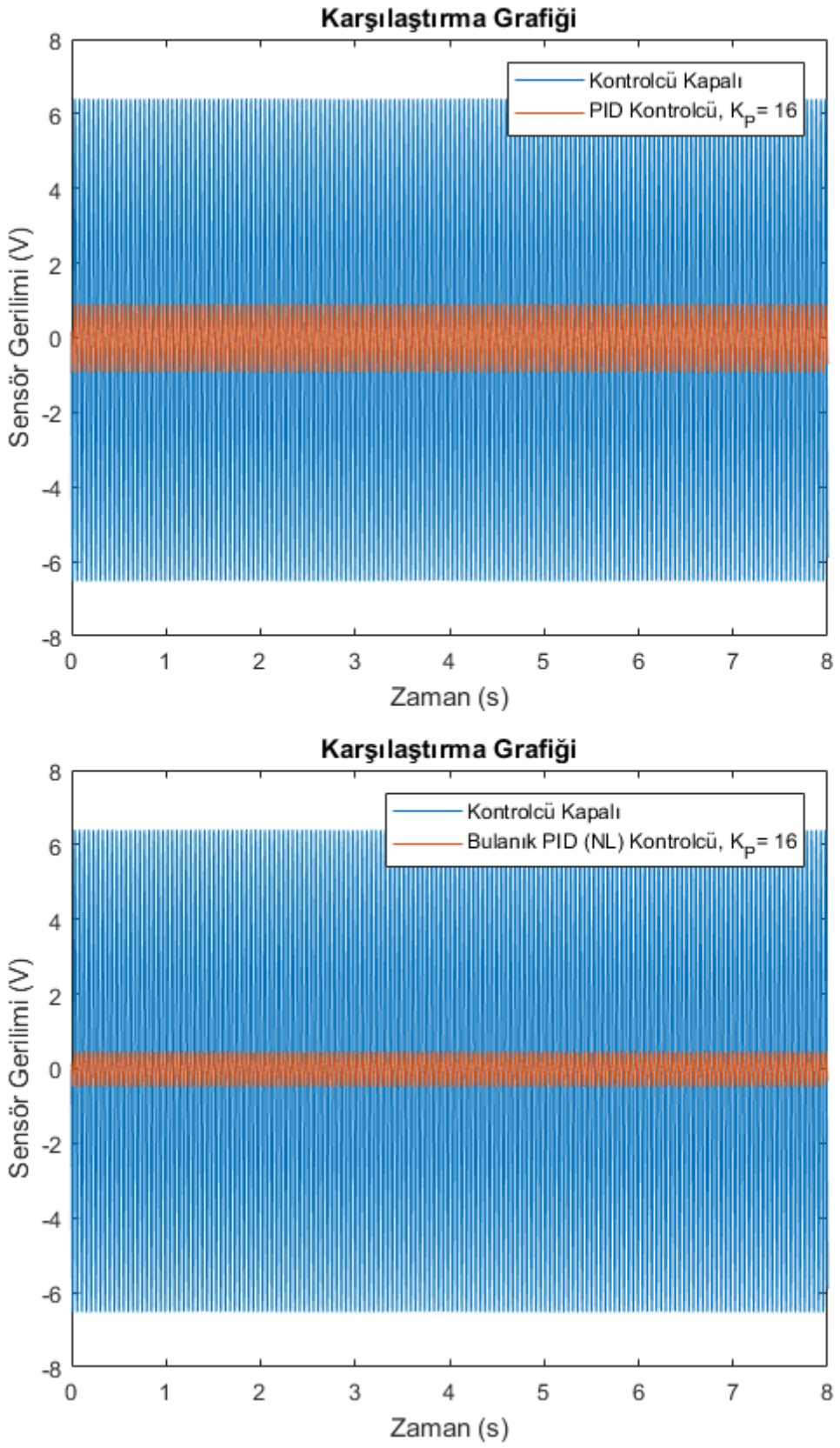
Serbest titreşim durumunda bulanık PID nonlineer kontrolcü ile K_P değerinin titreşim kontolüne etkisi gözlemlemek için deney devam ettirilmiştir. Mesnet uzaklığı 10 mm olarak ayarlanıp, K_P değeri 2 den 12 'ye arrtırılarak sonuçlar (Şekil 5. 45 ve Şekil 5. 46) elde edilmiştir.

Kirişin aktif titreşim kontrolünde kontrolcülerin etkisi karşılaştırmak amacıyla zorlanmış titreşim durumunda her üç kontrolcü için aynı K_P değerlerinde deneyler ve ölçümler yapılmıştır. Farklı oransal kazanç katsayılarında sonuçlar ayrı ayrı grafiksel olarak sırasıyla (Şekil 5. 47 ve Şekil 5. 48) çizdirilmiştir.

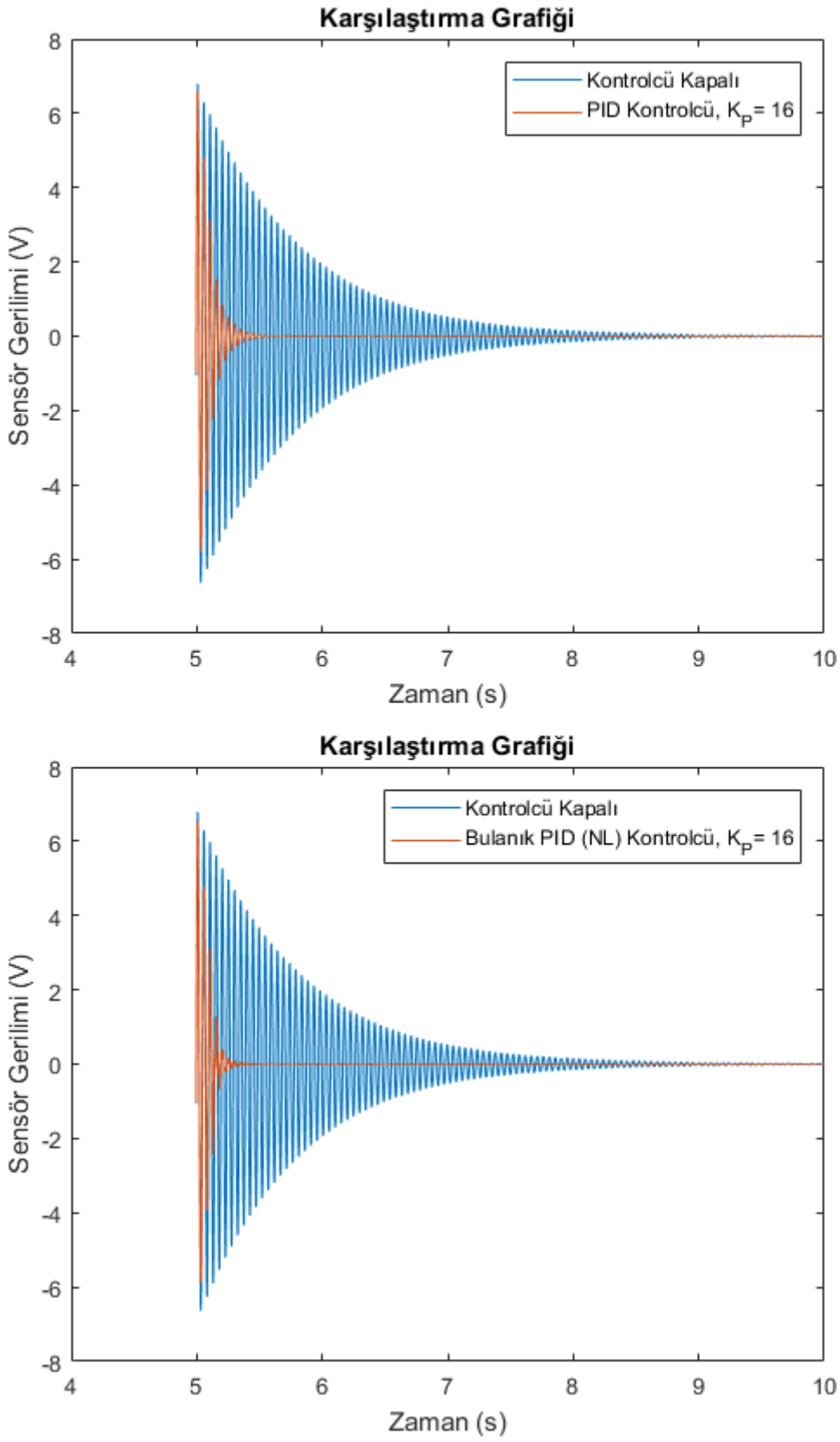
5.5.1 Mesnet uzaklığının 15mm olması durumu



Şekil 5. 36 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda serbest titreşim kontrolü

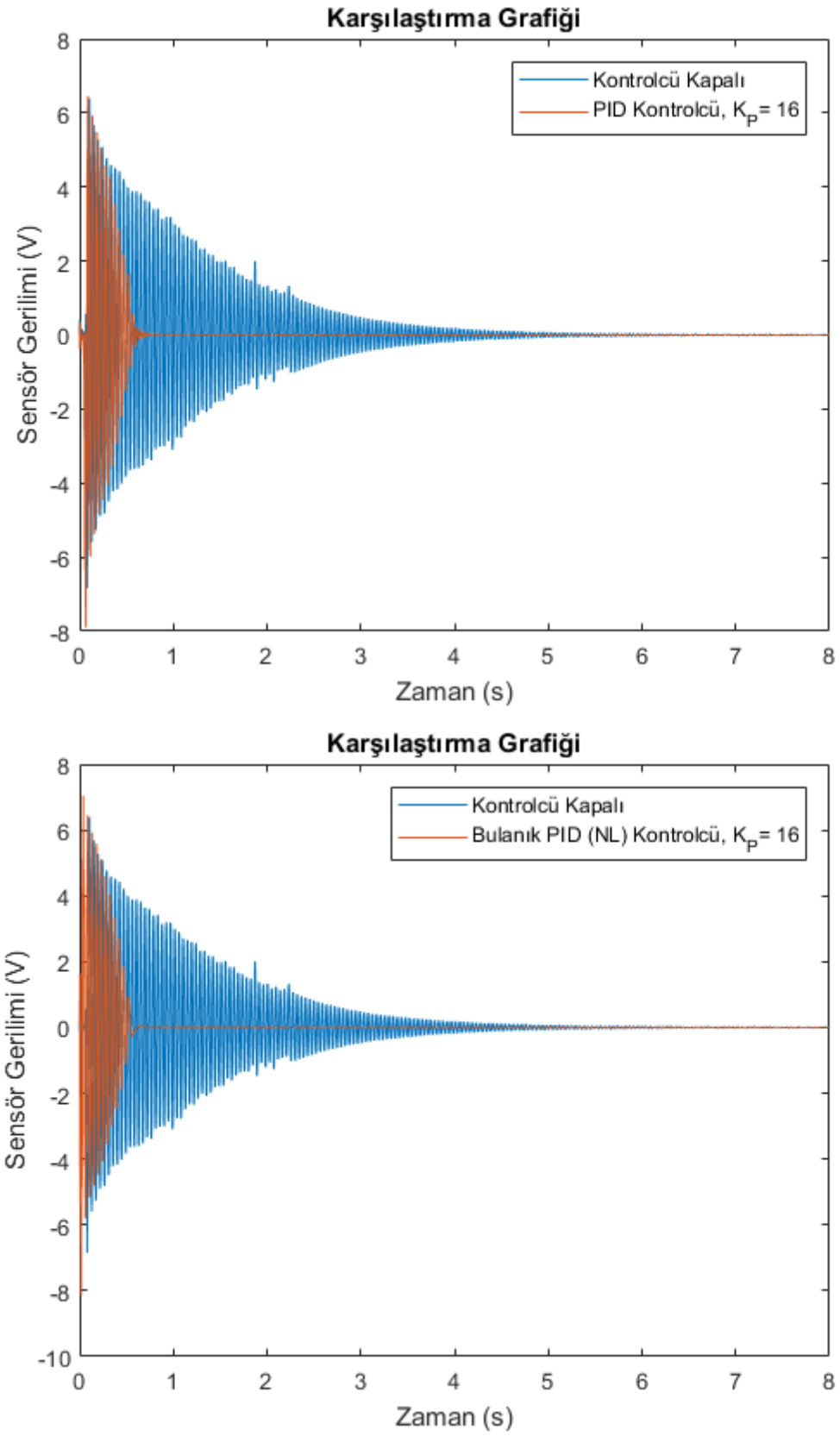


Şekil 5. 37 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü

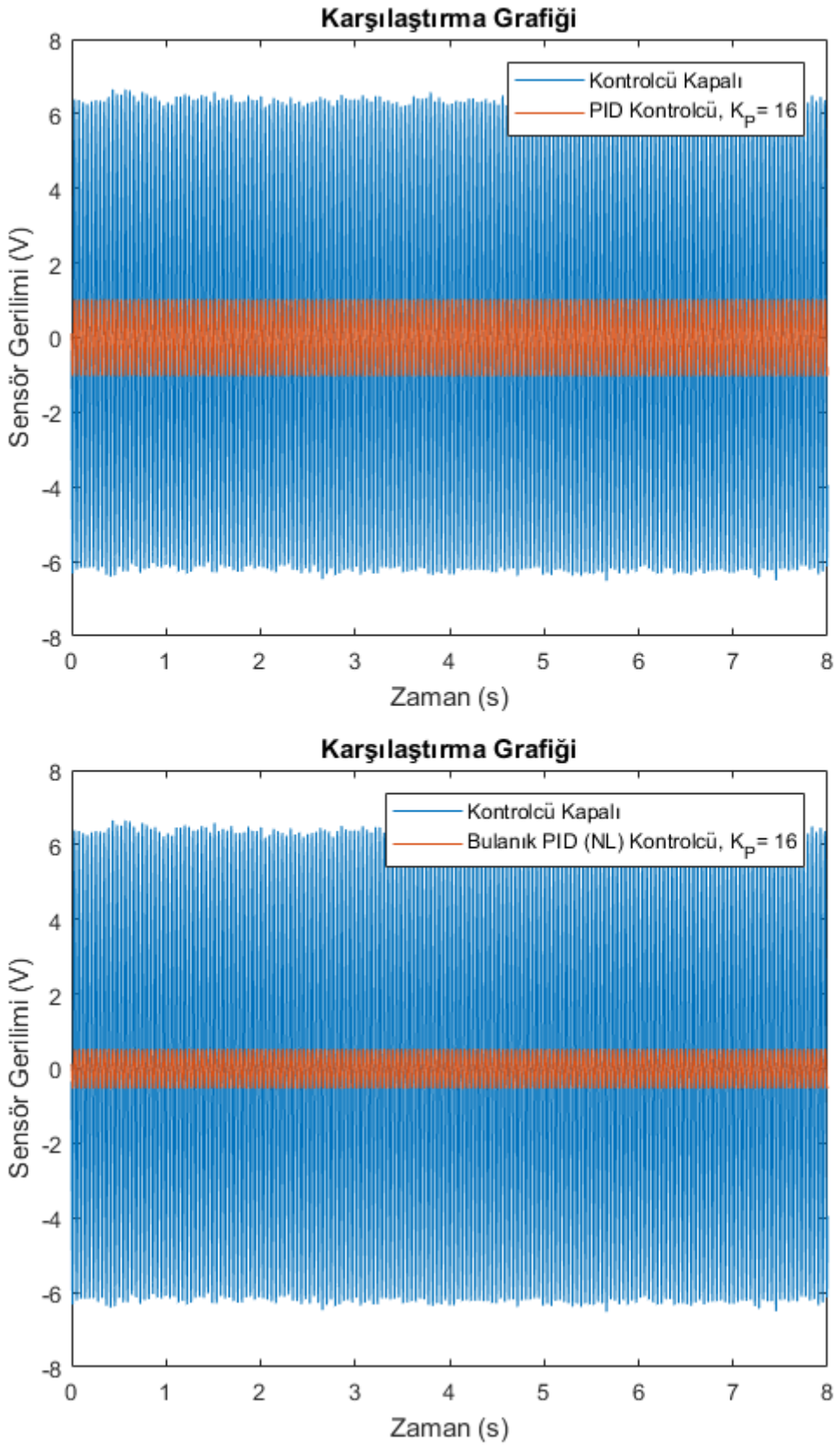


Şekil 5. 38 Mesnet uzaklığı 15mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü

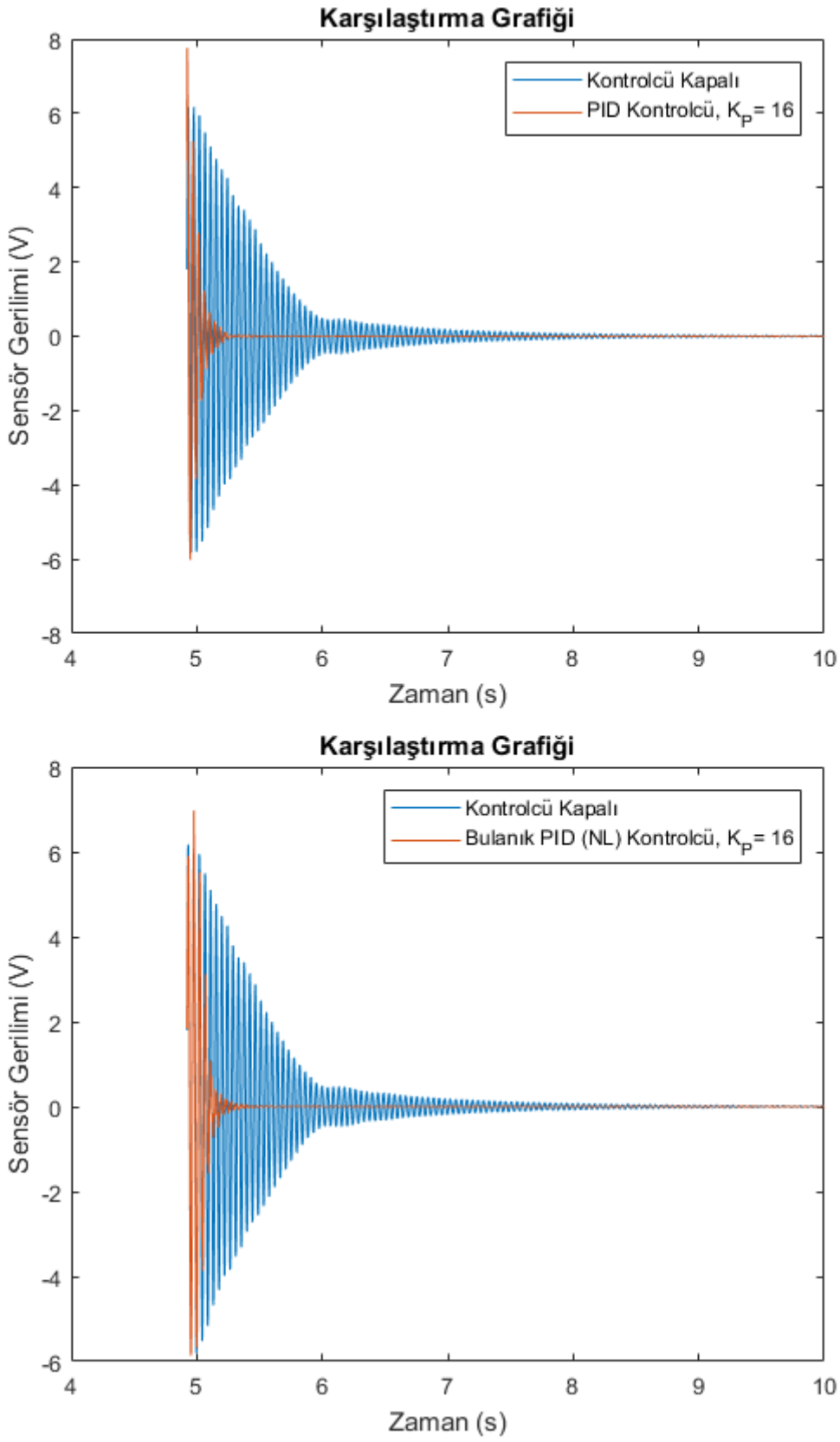
5.5.2 Mesnet uzaklığının 10mm olması durumu



Şekil 5. 39 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda serbest titreşim kontrolü

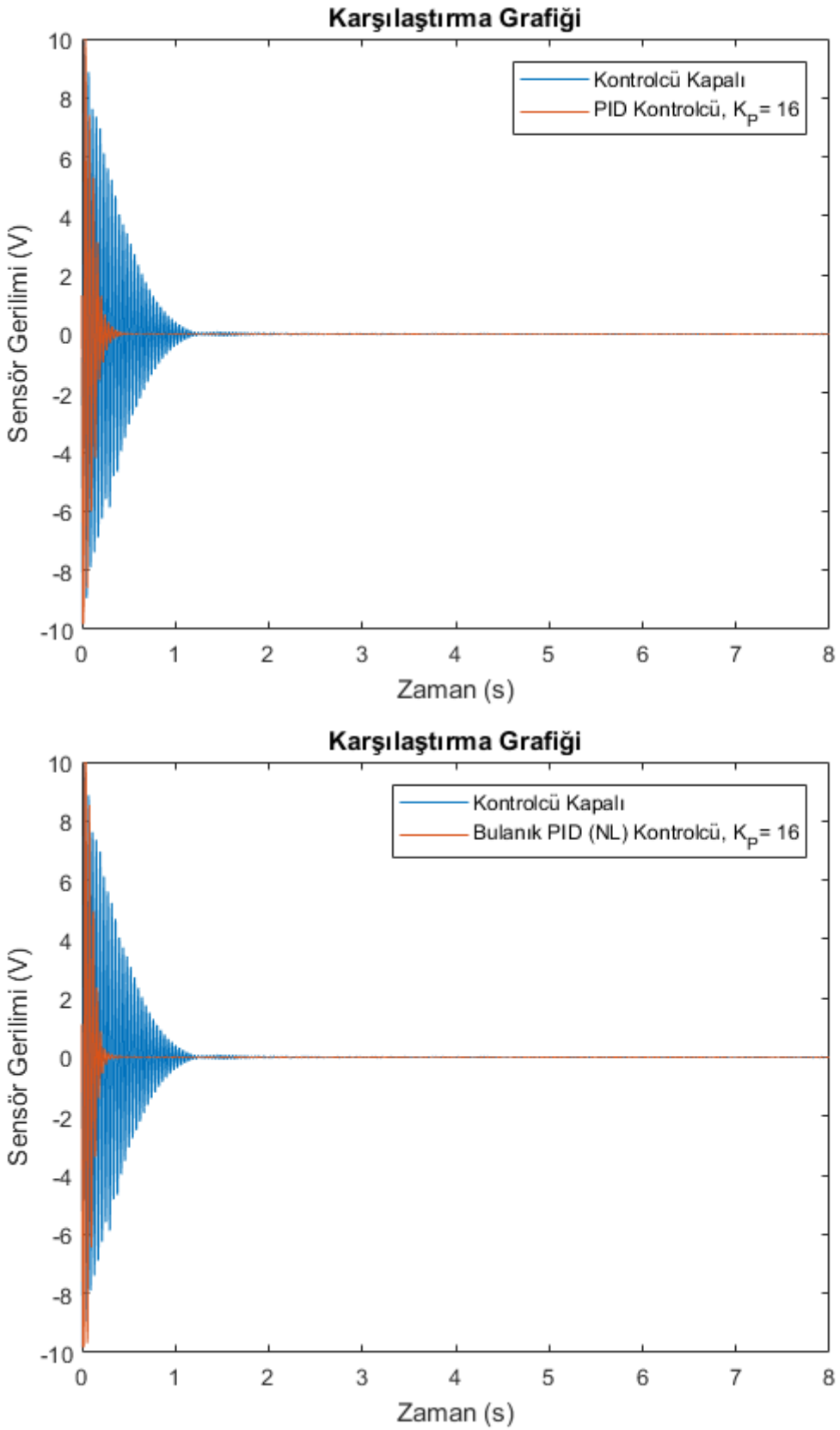


Şekil 5. 40 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü

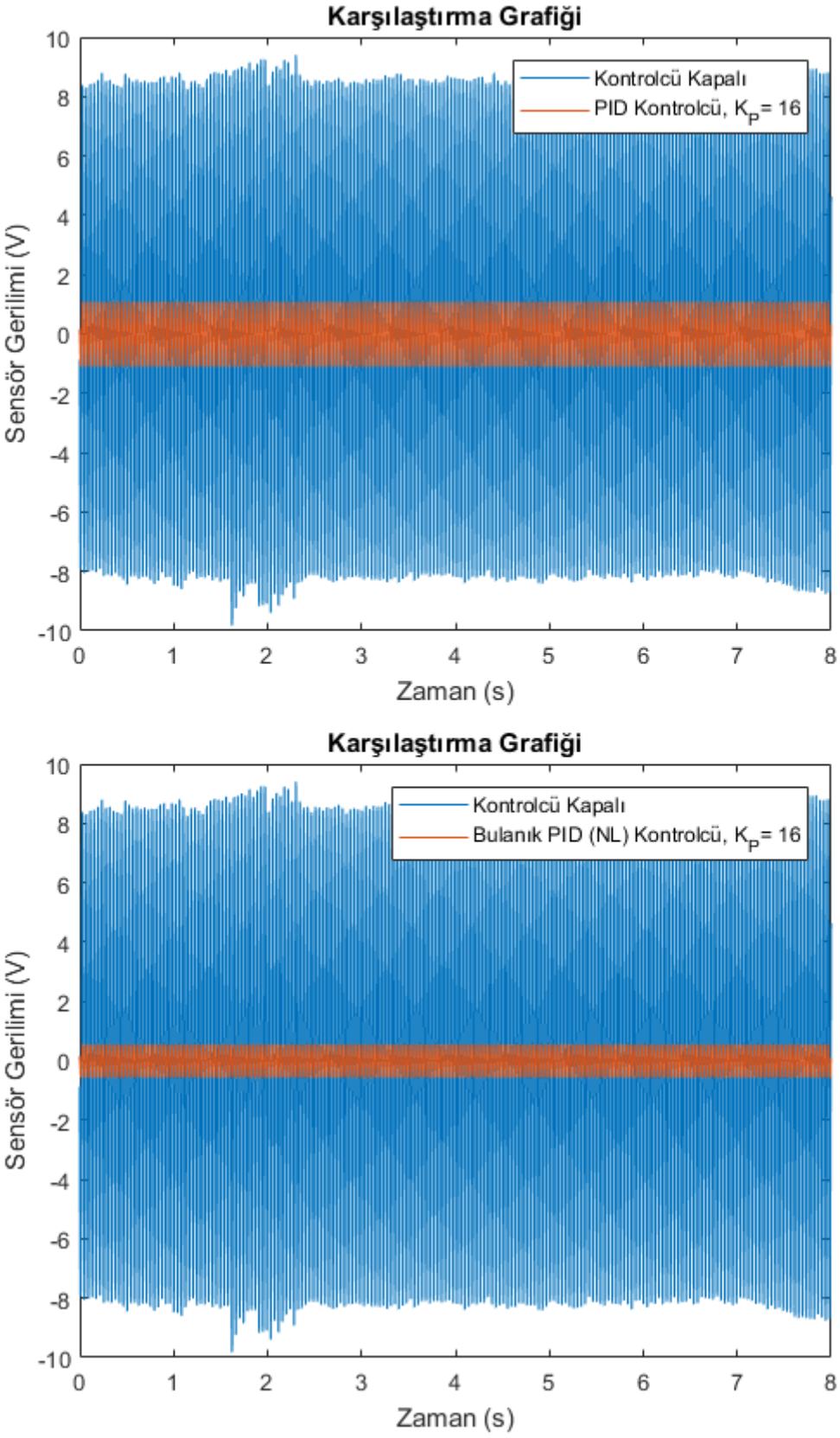


Şekil 5. 41 Mesnet uzaklığı 10mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü

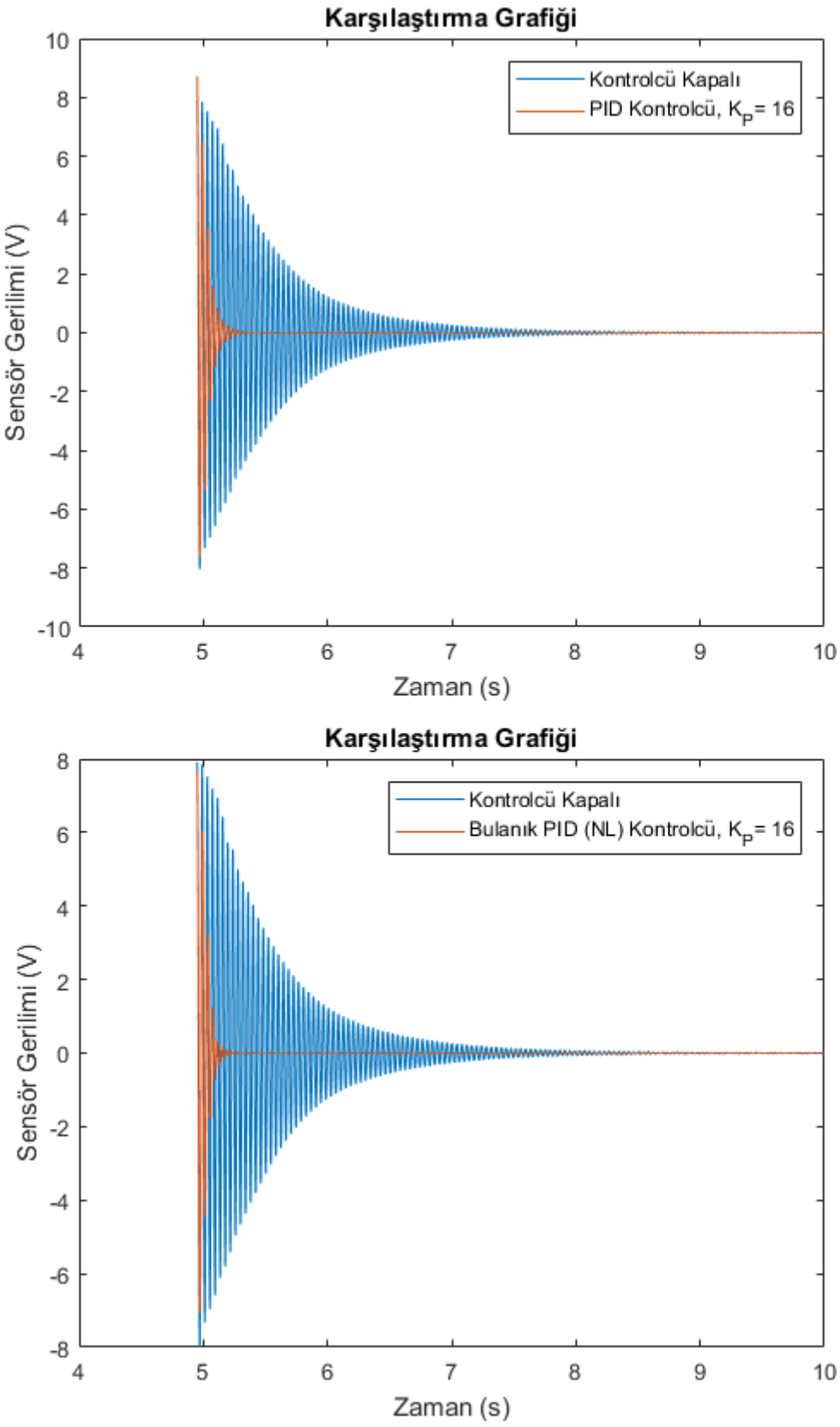
5.5.3 Mesnet uzaklığının 5 mm olması durumu



Şekil 5. 42 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda serbest titreşim kontrolü

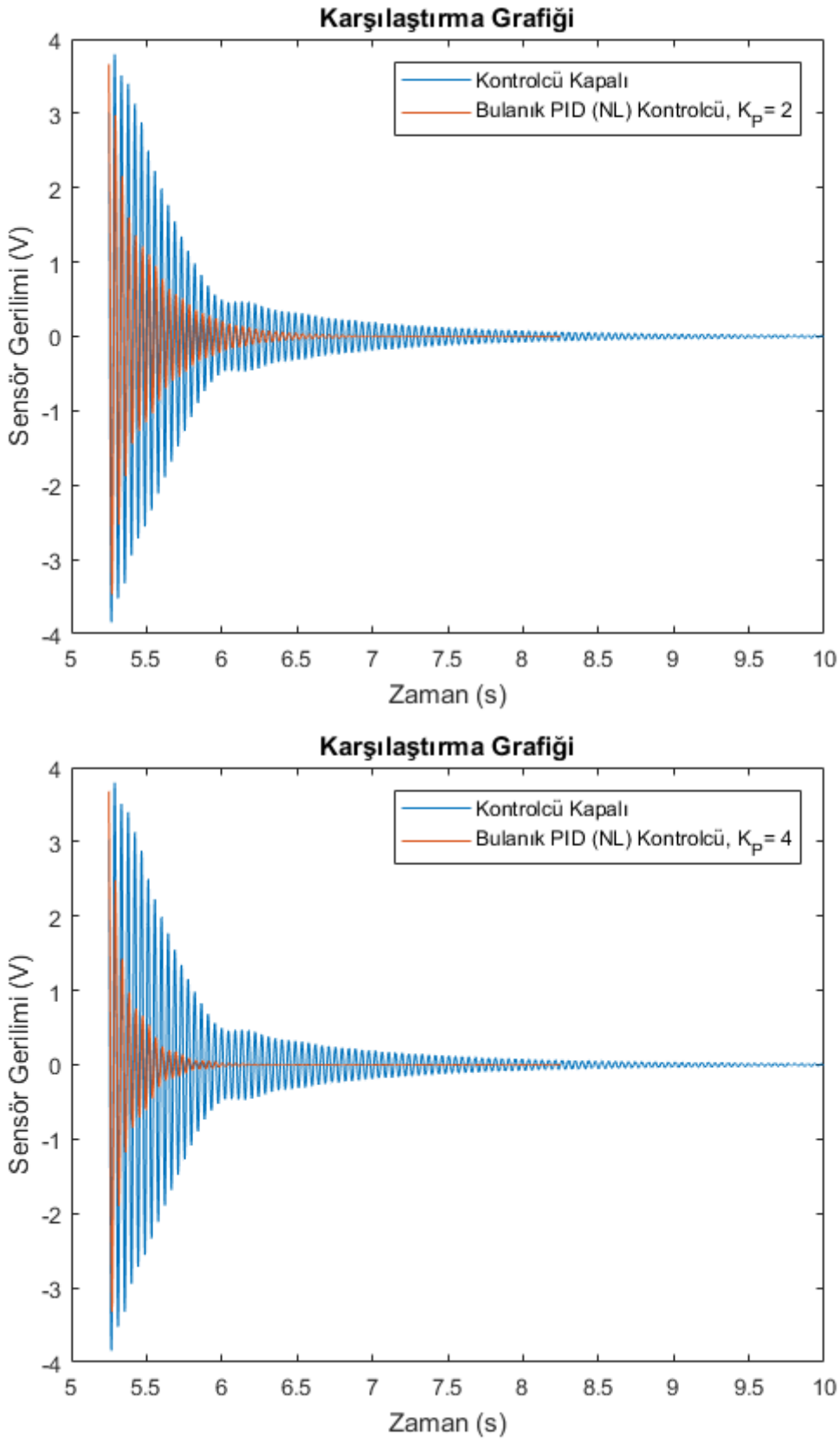


Şekil 5. 43 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda zorlanmış titreşim kontrolü

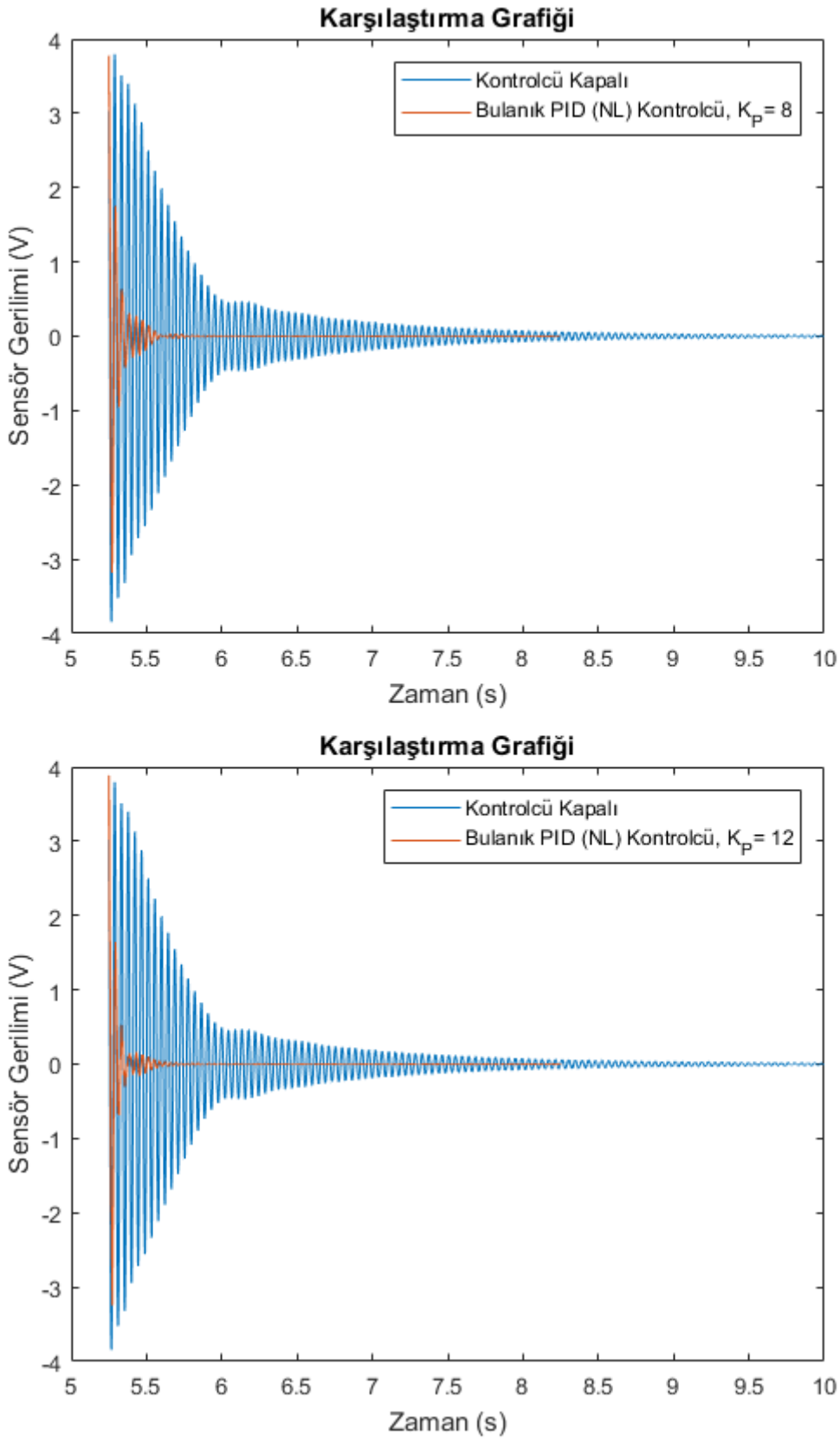


Şekil 5. 44 Mesnet uzaklığı 5mm durumunda rezonans sonrası oluşan serbest titreşim kontrolü

5.5.4 Serbest Titreşimde K_P Parametre Değişikliği Etkisi

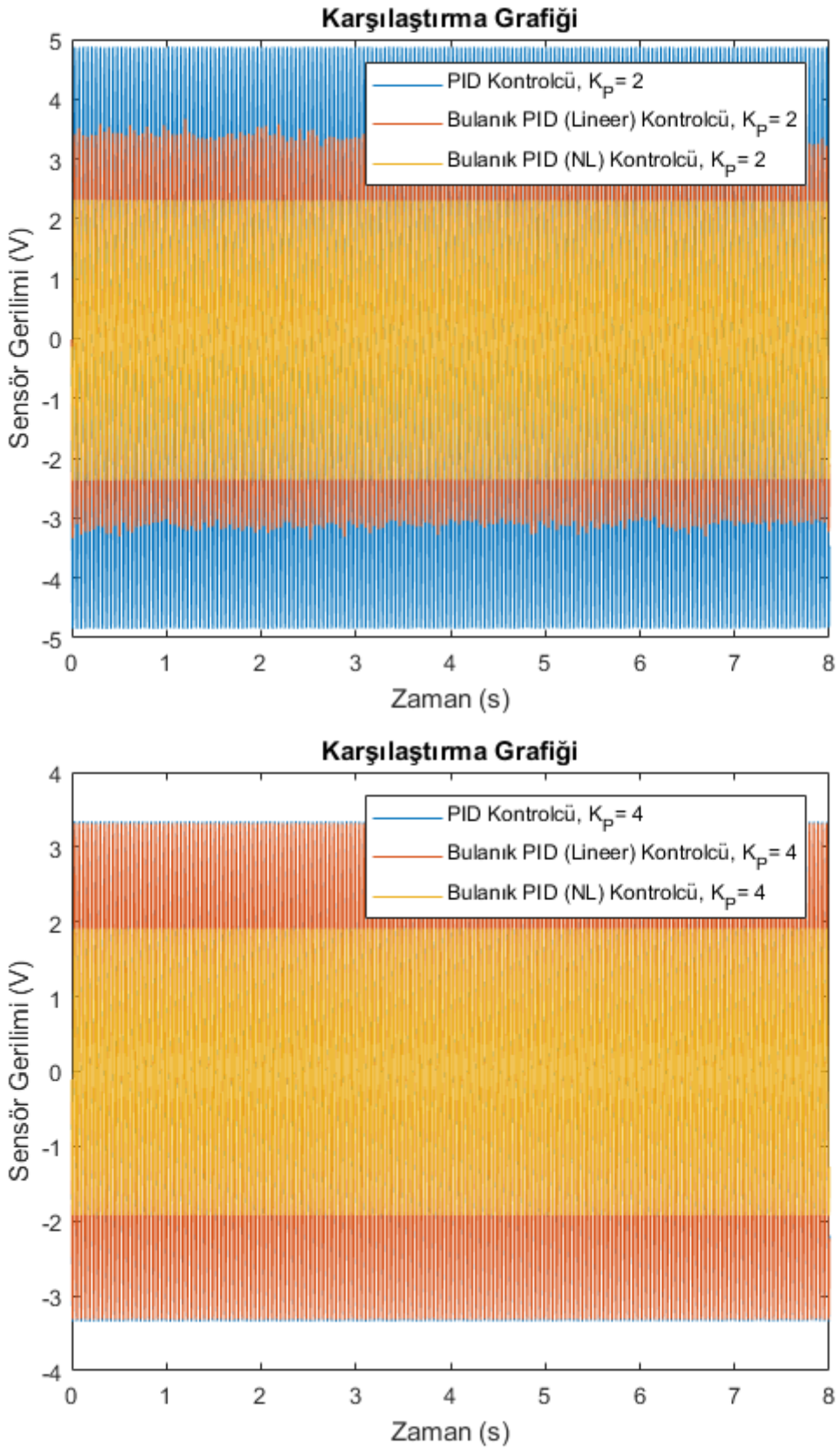


Şekil 5. 45 Mesnet uzaklığı 10mm iken K_P oransal kazanç katsayısı değişikliği durumları

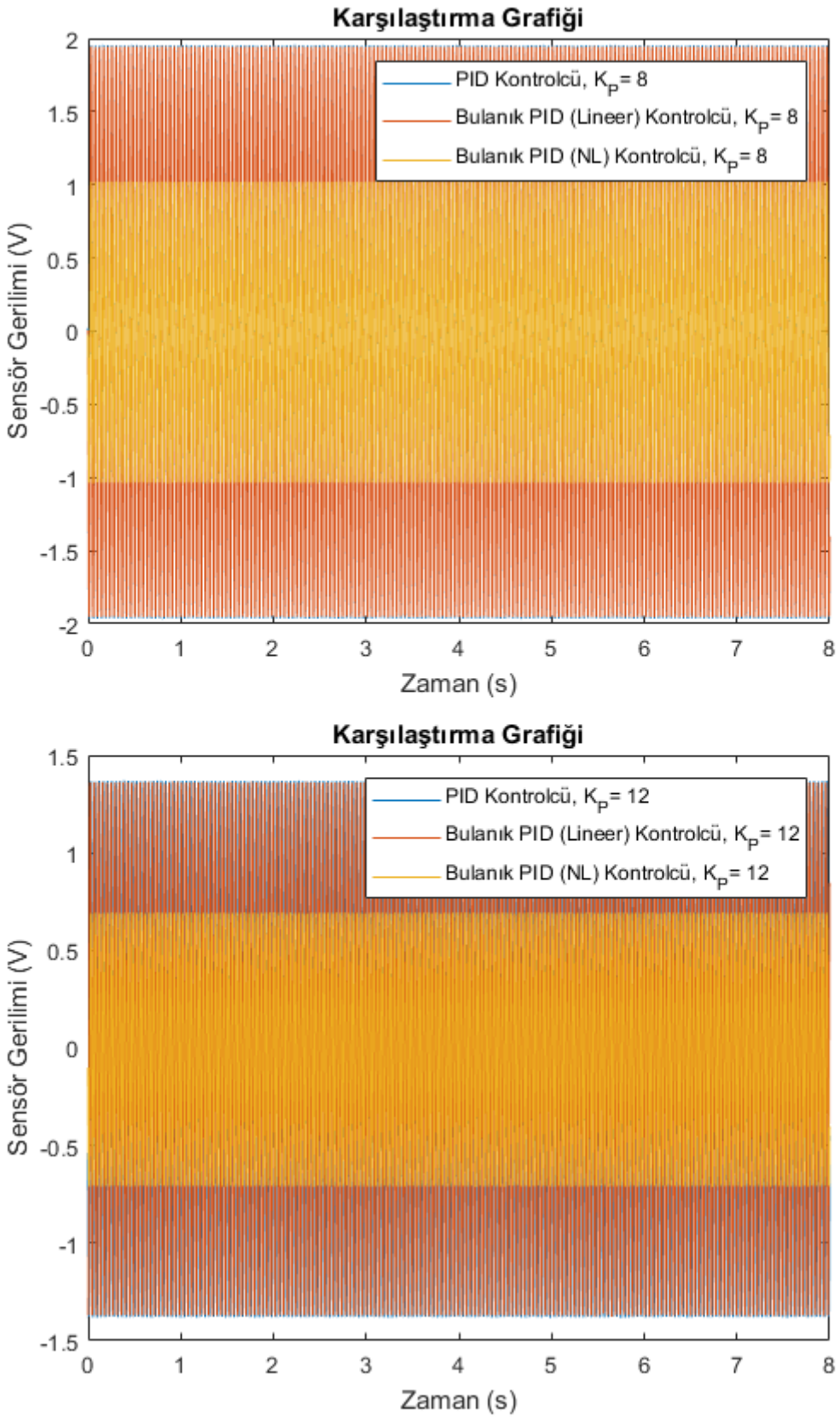


Şekil 5. 46 Mesnet uzaklığı 10mm iken oransal kazanç katsayısı değişikliği durumları, K_P=8 ve K_P=12

5.5.5 Zorlanmış Titreşim Kontrolünde Kontrolcülerin Karşılaştırılması



Şekil 5. 47 Zorlanmış titreşim kontrolcü ve parametre değişikliği karşılaştırma grafikleri



Şekil 5. 48 Zorlanmış titreşim kontrolcü ve parametre değişikliği karşılaştırma grafikleri, K_P=8 ve K_P=12

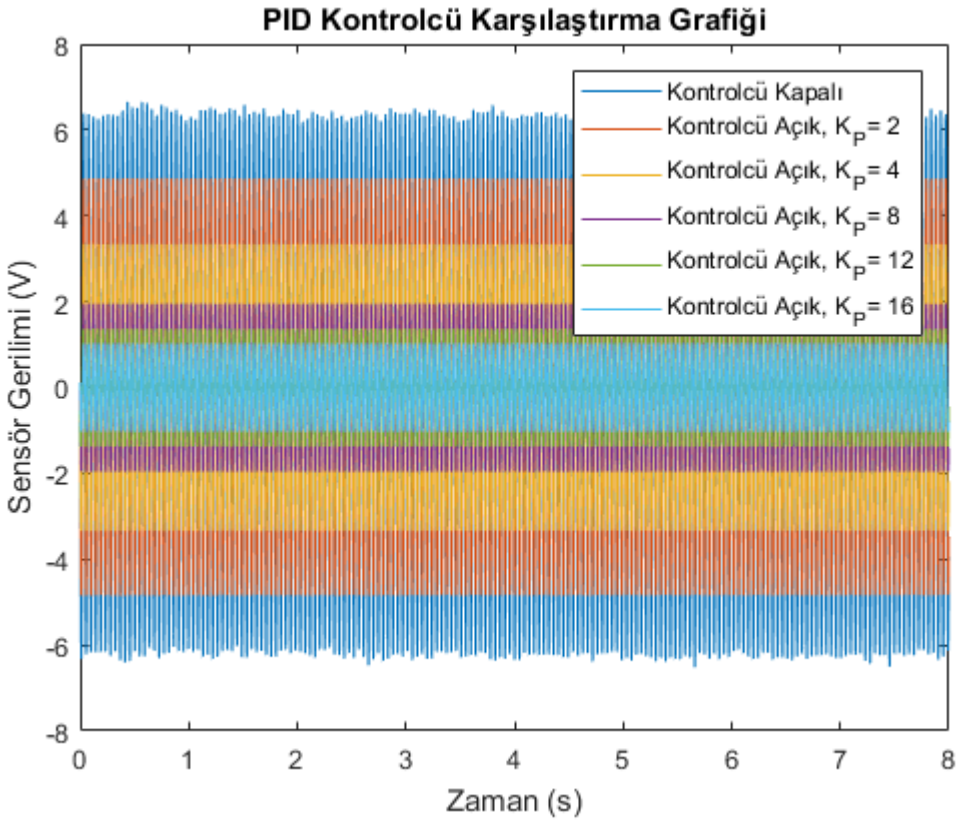
Beklendiği gibi PID kontrolcü ve lineer kontrol yüzeyli bulanık PID kontrolcü ile elde edilen sonuçlar aynı çıkmıştır. Sonuçların sayısal değerleri Çizelge 5. 4'de yer almaktadır.

5.6 K_P Parametre Değişikliği İle Sonuç Grafikleri

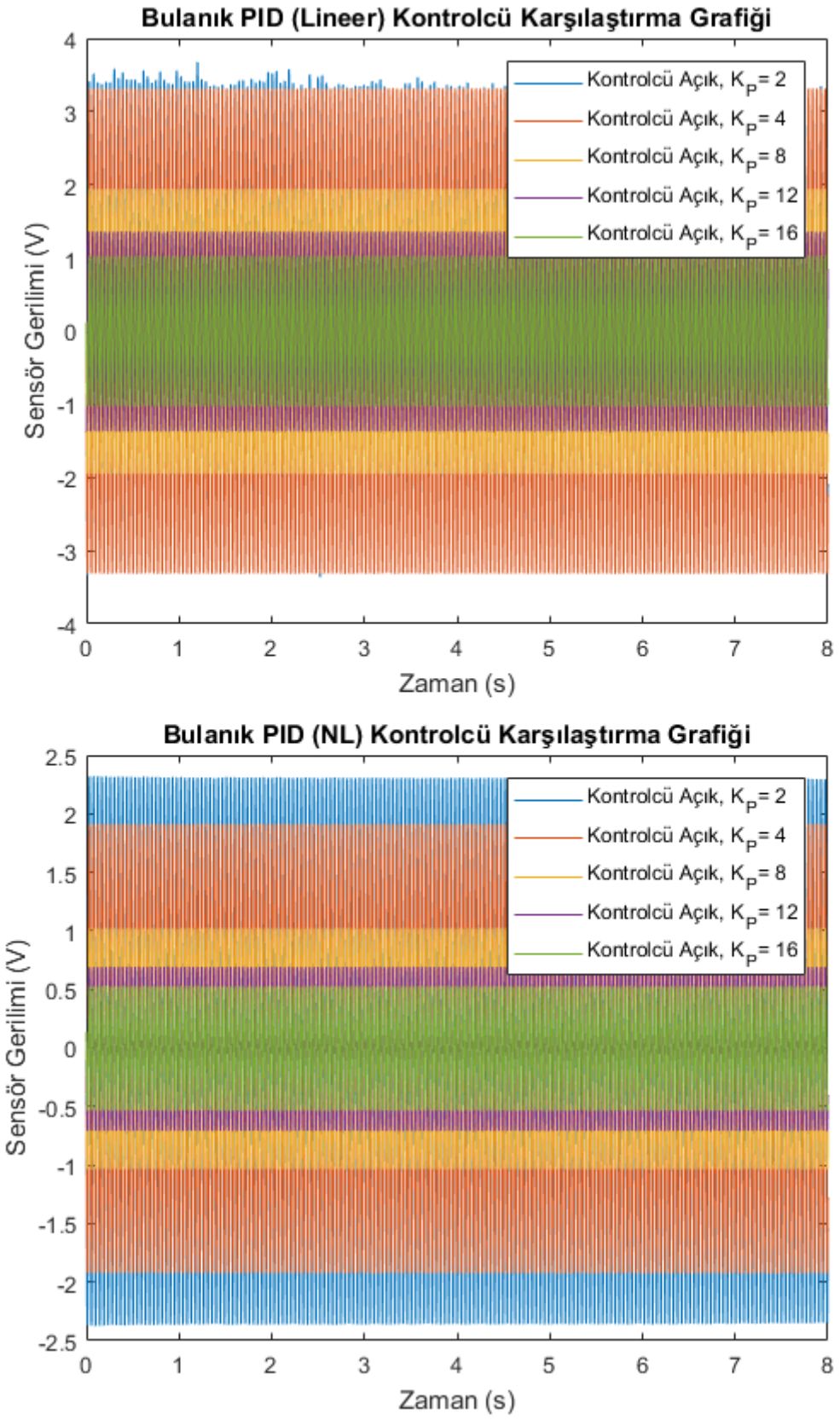
Zorlanmış titreşim durumunda, oransal kazanç katsayısı K_P'nin aktif titreşim kontrolü üzerindeki etkisini görebilmek için grafikler çizdirilmiştir. Ankastre kirişin mesnet uzaklığı 10mm olup, kontrolcünün kapalı olduğu durumda sensör gerilimi ± 6.43 Volt okunmuştur.

PID kontrolcünün 2 ile 16 arasında değişen K_P değerlerindeki sonuçların karşılaştırması Şekil 5. 49'de verilmiştir. Bulanık PID kontrolcüler için oransal kazanç değişikliği etkisi Şekil 5. 50'da gösterilmektedir.

K_P değerleri değişikliği ile elde edilen bu sonuçlardan Çizelge 5. 4 oluşturulmuştur.



Şekil 5. 49 PID kontrolcü ile K_P parametre değişikliğinde sonuçların karşılaştırılması



Şekil 5. 50 Bulanık PID Lineer kontrolcü (üstte) ve Bulanık PID Nonlineer kontrolcü (altta) ile K_P değeri değiştirilerek elde edilen sonuçların karşılaştırılması

5.7 Sonuç Karşılaştırma Çizelgeleri

Nümerik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma çizelgeleri oluşturulmuştur. Çizelgelerde aksi belirtilmediği sürece sonuçlar, kontrolcünün K_P=16, K_I=0.001, K_D=0.1 katsayı değerleri içindir.

Zorlanmış titreşim kontrolünde K_P değişikliği etkisinin karşılaştırması Çizelge 5. 4'te verilmiştir. Mesnet uzaklığı 10 mm olup, sensör gerilimi ±Volt olarak verilmiştir.

Çizelge 5. 5 zorlanmış titreşim kontrolünde mesnet uzaklığı etkisini karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Deneysel çalışma için genliklerin azaltılmasında kontrolcünün başarısı oransal olarak çizelgeye dâhil edilmiştir.

Serbest titreşim durumu için ise titreşimlerin sönümlenme zamanının azaltılmasında kontrolcü etkisinin karşılaştırması (Çizelge 5. 6) yapılmıştır. Titreşimlerin sönümlenme süresi, sensörün 8 Volt ile 0.01 Volt gerilim değerleri arasında $T_{0.01V} - T_{8V}$ olacak şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 5. 4 Zorlanmış titreşim kontrolünde K_P değişikliği etkisi

Sensör (±Volt)	**Kontrolcü**		K_P**=2**	K_P**=4**	K_P**=8**	K_P**=12**	K_P**=16**
Teorik model	Kapalı	6.27					
	PID						1.24
ANSYS modeli	Kapalı	6.81					
	PID		2.12	1.16	0.6	0.41	0.31
Deneysel çalışma	Kapalı	6.43					
	PID		4.86	3.34	1.95	1.37	1.03
	Bulanık PID (L)		3.45	3.31	1.94	1.36	1.03
	Bulanık PID (NL)		2.3	1.91	1.01	0.69	0.52

Çizelge 5. 5 Zorlanmış titreşim kontrolünde mesnet uzaklığı etkisi

Sensör (±Volt)		**5 mm**	**10 mm**	**11 mm**	**15 mm**
	Kontrolcü				
Teorik model	Kapalı		6.27		
	K_P=16		1.24		
ANSYS modeli	Kapalı		6.81		
1.Mod	K_P=2		2.12		
	K_P=16		0.308		
2.Mod	Kapalı		7.08		
	K_P=2		2.24		
	K_P=16		0.31		
Deneysel çalışma	Kapalı	8.5	6.43	7.9	6.4
	PID	1.01	1.03	0.7	0.9
	Bulanık PID (NL)	0.55	0.52	0.35	0.46
Başarı %	PID	%88.1	%84	%91.1	%86
	Bulanık(NL)	%93.5	%91.9	%95.6	%92.8
Mıknatıs eklenmesi	Kapalı		3.9		
	PID		0.35		
	Bulanık PID (NL)		0.17		

Çizelge 5. 6 Serbest titreşim durumu için kontrolcü etkisinin karşılaştırması

	Mesnet uzaklığı	**Birinci mod doğal frekans (Hz)**	**Kontrolcü**		**Sönümlenme süresi (s)[1]**
Teorik model	10 mm	20.5	PID	K_P=16	0.75
				K_P=50	0.3
ANSYS modeli	10 mm	27.8	PID	K_P=16	0.4
Deneysel çalışma	5 mm	24.2	Kapalı		2.5
			PID	K_P=16	0.5
			Bulanık PID (NL)	K_P=16	0.64
	10 mm	22.3	Kapalı		7.8
			PID	K_P=16	0.82
			Bulanık PID (NL)	K_P=16	0.8
	11 mm	21.8	Kapalı		4.6
			PID	K_P=16	0.68
			Bulanık PID (NL)	K_P=16	0.57
	15 mm	20.4	Kapalı		5.35
			PID	K_P=16	0.72
			Bulanık PID (NL)	K_P=16	0.67
Mıknatıs eklenmesi	10 mm	8.9	Kapalı		12+
			PID	K_P=16	3.7
			Bulanık PID (NL)	K_P=16	3.6

[1] Titreşimin tamamen sönümlenme süresi, sensörün 8 Volt ile 0.01 Volt gerilim değerleri arasında hesaplanmıştır. $T_{0.01V} - T_{8V}$

BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının ilk bölümde piezoelektrikliğin tarihçesine ve bu alandaki çalışmalara değinilmektedir. Takip eden bölümlerde arka plandaki teoriler ve bilgilerin özetine yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ele alınan tek tarafı mesnetli akıllı ankastre kiriş modellenmiştir. Hareket denklemi çözülerek mod şekil fonksiyonu ve doğal frekansları elde edilmiştir. Analitik ve sonlu elemanlar analiz programı ANSYS ile kirişin modal analizi yapılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modal analiz sonuçlarından da yararlanılarak akıllı kirişin Matlab / Simulink modeli, transfer fonksiyonu analizi, durum-uzay analizi ve ANSYS ile durum-uzay analizi olmak üzere üç yöntem ile elde edilmiştir. Bu modellere PID kontrol uygulanarak aktif titreşim kontrol sonuçları incelenmiştir.

Beşinci bölümde tasarlanan akıllı kirişin üretimi ve deney metodolojisine yer verilmektedir. Klasik PID kontrolcüye alternatif olarak Bulanık PID lineer ve nonlineer kontrol yüzeyli BMK tasarımı yapılmıştır. Parametre ve kontrolcü değişiklikleri ile deney sonuçları elde edilmiş ve kontrolcünün titreşimleri kontrol etme performansını gösteren Çizelge 5. 4, Çizelge 5. 5, Çizelge 5. 6 oluşturulmuştur. Titreşimlerin aktif olarak bastırılmasında en başarılı sonuçların Nonlineer kontrol yüzeyli Bulanık PID kontrol algoritması ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Titreşimleri sönümlemede %95.6 'ya varan başarı sağlanmıştır. Zorlanmış titreşim durumunda genliklerin azaltılmasında kontrolcü başarısı Çizelge 6. 1'de verilmiştir. Çizelge 6.2 ise serbest titreşimlerin sönümlenme zamanının kısaltılmasında kontrolcülerin başarısını göstermektedir.

Çizelge 6. 1 Zorlanmış titreşim durumunda genliklerin azaltılmasındaki başarı oranı

Başarı %	**Kontrolcü**	**Mesnet uzaklığı**			
		5 mm	**10 mm**	**11 mm**	**15 mm**
Teorik model	PID		%80.2		
ANSYS modeli	PID, K_P=2		%68.9		
	PID, K_P=16		%95.8		
Deneysel çalışma	PID	%88.1	%84	%91.1	%86
	Bulanık PID (NL)	%93.5	%91.9	%95.6	%92.8
Mıknatıs eklenmesi	PID		%91.03		
	Bulanık PID (NL)		%95.64		

Çizelge 6. 2 Serbest titreşimlerin sönümlenme zamanındaki azalma oranı

Başarı %	**Kontrolcü**	**Mesnet uzaklığı**			
		5 mm	**10 mm**	**11 mm**	**15 mm**
Serbest Titreşim (Deneysel)	PID	%80	%89.5	%85.2	%86.5
	Bulanık PID (NL)	%77.4	%89.75	%87.6	%87.5
Mıknatıs eklenmesi	PID		%69.2		
	Bulanık PID (NL)		%70		

Analitik ve sayısal modeller ile deneysel sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Deney düzeneğine harici sinyal üretici ilave edilerek üç piezoelektrik yama aynı anda aktif olarak kullanılmış olsa da, Matlab üzerinden bu kontrolün yapılması arzulanmıştır. Sensör konumu değiştirmek gibi planlanan bazı deneysel çalışmalar gerçekleştirilememiştir.

Kabloların sertliği gibi sebeplerden dolayı titreşim ve kontrol, sisteme tam olarak yansıyamamıştır. Piezoelektrik yamalara lehimlenen kabloların daha esnek seçilmesi uygun olacaktır. Özellikle mesnet uzaklığı değişikliğinden sonra meydana gelen hataların

bu sebepten kaynaklandığı düşünülmektedir. Kabloların düzenlemesi sonuçlara olumlu katkı yapacaktır. Farklı kablolama yöntemleri de denenebilir.

Bazı durumlarda sistemin mekanik ve elektrik frekanslarının etkileşiminden dolayı vuru olayı gerçekleşmiştir.

Piezoelektrik yamaların çalışma aralığı ±350 Volt olmasına rağmen, donanımsal olarak en yüksek ±135 Volt değerinde çalıştırılabilmiştir. Bu değerlere ulaşılabilmesi durumunda daha başarılı sonuçlar elde edilmesi mümkündür.

KAYNAKLAR

[1] Ikeda, T., (1990). Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press, Oxford.

[2] Curie, J. ve Curie, P., (1880). "Développement, Par Pression, de L'électricité Polaire Dans les Cristaux Hémièdres à Daces Inclinées", Comptes rendus, 91: 294-295.

[3] Hankel, W.G., (1881). "Über die Aktino- und Piezoelektrischen Eigenschaften des Bergkrystalles und ihre Beziehung zu den Thermoelektrischen", Leipzig Abhandlungen, 12: 459–547.

[4] Lippmann, G.J., (1881). "Principe de la Conservation de l'électricité, ou Second Principe de la Théorie des Phénomènes électriques", Annales de chimie et de physique, 24: 145–177.

[5] Cady, W.G., (1964). Piezoelectricity, Dover, New York.

[6] Arshadi, R. ve Cobbold, R.S., (2007). "A Pioneer in the Development of Modern Ultrasound: Robert William Boyle (1883–1955)", Ultrasound in medicine & biology, 33: 3-14.

[7] Dineva, P. Gross, D. Müller, R. ve Rangelov, T., (2014). "Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials", AMC, 10: 12.

[8] Jaffe, B. Roth, R. ve Marzullo, S., (1954). "Piezoelectric Properties of Lead Zirconate-Lead Titanate Solid-Solution Ceramics", Journal of Applied Physics, 25: 809-810.

[9] Dökmeci, M.C., (1974). "A Theory of High Frequency Vibrations of Piezoelectric Cyrstal Bars", International Journal of Solids and Structures, 10: 401-409.

[10] Bayar, S., (2007). Malzeme Özellikleri Sıcaklığa Bağlı Olan Bir Piezoelektrik Plağın Statik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[11] Jalili, N., (2010). Piezoelectric-Based Vibration Control, Springer, Boston.

[12] Malgaca, L., (2007). Integration of Active Vibration Control Methods with Finite Element Models of Smart Structures, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

[13] Kim, J. Varadan, V.V. Varadan, V.K. ve Bao, X.-Q., (1996). "Finite-element Modeling of a Smart Cantilever Plate and Comparison with Experiments", Smart Materials and Structures, 5: 165.

[14] Gaudenzi, P. Carbonaro, R. ve Benzi, E., (2000). "Control of Beam Vibrations by Means of Piezoelectric Devices: Theory and Experiments", Composite structures, 50: 373-379.

[15] Bruant, I. Coffignal, G. Lene, F. ve Verge, M., (2001). "Active Control of Beam Structures with Piezoelectric Actuators and Sensors: Modeling and Simulation", Smart Materials and Structures, 10: 404.

[16] Halim, D. ve Moheimani, S.R., (2002). "Experimental Implementation of Spatial H_{inf} Control on a Piezoelectric-laminate Beam", IEEE/ASME transactions on mechatronics, 7: 346-356.

[17] Gabbert, U. Trajkov-Nestorović, T. ve Köppe, H., (2002). "Modelling, Control and Simulation of Piezoelectric Smart Structures Using Finite Element Method and Optimal LQ Control", Facta universitatis-series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, 3: 417-430.

[18] Lin, R. ve Nyang, K., (2003). "Analytical and Experimental Investigations on Vibrational Control Mechanisms for Flexible Active Structures", Smart Materials and Structures, 12: 500.

[19] Fei, J., (2005). "Active Vibration Control of Flexible Steel Cantilever Beam Using Piezoelectric Actuators": IEEE.

[20] Vasques, C. ve Rodrigues, J.D., (2006). "Active Vibration Control of Smart Piezoelectric Beams: Comparison of Classical and Optimal Feedback Control Strategies", Computers & structures, 84: 1402-1414.

[21] Peng, F. Ng, A. ve Hu, Y.-R., (2005). "Actuator Placement Optimization and Adaptive Vibration Control of Plate Smart Structures", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16: 263-271.

[22] Ma, K. ve Ghasemi-Nejhad, M.N., (2005). "Adaptive Simultaneous Precision Positioning and Vibration Control of Intelligent Composite Structures", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16: 163-174.

[23] Gupta, V. Sharma, M. ve Thakur, N., (2010). "Optimization Criteria for Optimal Placement of Piezoelectric Sensors and Actuators on a Smart Structure: A Technical Review", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 21: 1227-1243.

[24] Barboni, R. Mannini, A. Fantini, E. ve Gaudenzi, P., (2000). "Optimal Placement of PZT Actuators for the Control of Beam Dynamics", Smart Materials and Structures, 9: 110.

[25] Padula, S.L. ve Kincaid, R.K., (1999). "Optimization Strategies for Sensor and Actuator Placement", NASA / TM-1999-209126.

[26] Çalışkan, T., (2002). Piezoelectric Ceramics and Their Applications in Smart Aerospace Structures, Doktora Tezi, Middle East Technical University. Department of Aeronautical Engineering, Ankara.

[27] Sahin, M. Karadal, F.M. Yaman, Y. Kircali, O.F. Nalbantoglu, V. Ulker, F.D. ve Caliskan, T., (2008). "Smart Structures and Their Applications on Active Vibration Control: Studies in the Department of Aerospace Engineering, METU", Journal of Electroceramics, 20: 167-174.

[28] Yaman, Y. Ülker, F.D. Nalbantoğlu, V. Çalışkan, T. Prasad, E. Waechter, D. ve Yan, B., (2003). "Application of μ-synthesis Active Vibration Control Technique to a Smart Fin".

[29] Wang, S. Quek, S. ve Ang, K., (2001). "Vibration Control of Smart Piezoelectric Composite Plates", Smart Materials and Structures, 10: 637.

[30] Baillargeon, B.P. ve Vel, S.S., (2005). "Active Vibration Suppression of Sandwich Beams Using Piezoelectric Shear Actuators: Experiments and Numerical Simulations", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 16: 517-530.

[31] Reaves, M.C. ve Horta, L.G., (2003). "Piezoelectric Actuator Modeling Using MSC/NASTRAN and MATLAB", NASA / TM-2003-212651, Langley Research Center, Virginia.

[32] Xu, S. ve Koko, T., (2004). "Finite Element Analysis and Design of Actively Controlled Piezoelectric Smart Structures", Finite elements in analysis and design, 40: 241-262.

[33] Seba, B. Ni, J. ve Lohmann, B., (2006). "Vibration Attenuation Using a Piezoelectric Shunt Circuit Based on Finite Element Method Analysis", Smart Materials and Structures, 15: 509.

[34] Ge, S. Lee, T. ve Gong, J., (1999). "A Robust Distributed Controller of a Single-link SCARA: Cartesian Smart Materials Robot", Mechatronics, 9: 65-93.

[35] Jha, R. ve Rower, J., (2001). "Experimental Investigation of Active Vibration Control Using Neural Networks and Piezoelectric Actuators", Smart Materials and Structures, 11: 115.

[36] Ülker, F.D. Nalbantoğlu, V. Çalışkan, T. Yaman, Y. ve Prasad, E., (2003). "Akıllı Yapıların Zorlanmış Titreşimlerinin Aktif Titreşim Kontrolü", Gazi Üniversitesi, Ankara.

[37] Karagülle, H. Malgaca, L. ve Öktem, H., (2004). "Analysis of Active Vibration Control in Smart Structures by ANSYS", Smart Materials and Structures, 13: 661.

[38] Trojanowski, R. ve Wiciak, J., (2009). "Plate Vibration Control using Piezoelectric Transducers and the LABVIEW Software".

[39] Kırcalı, Ö.F., (2006). Active Vibration Control of a Smart Beam: A Spatial Approach, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[40] Kazancı, M.V., (2013). Active Vibration Control of a Cantilever Beam, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[41] Ekrem, M., (2015). Elastik Bir Kirişin Piezoelektrik Eyleyiciyle Titreşim Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

[42] Holler, F.J. Skoog, D.A. ve Crouch, S.R., (2006). Principles of Instrumental Analysis, Cengage Learning, Boston.

[43] Liddell, H.G. ve Scott, R., A Greek-English Lexicon, http://www.perseus.tufts.edu/hopper/text?doc=Perseus:text:1999.04.0057:entry=h)/lektron, 15 Eylül 2017.

[44] Katzir, S., (2007). The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics, Springer Science & Business Media, Netherlands.

[45] Sekouri, E.M., (2004). Modeling and Shape Estimation of Smart Structures for Active Control, École de Technologie Supérieure.

[46] Sevgi, H.E., (2009). Piezoelektrik Yamalı Katmanlı Kompozit Bir Kirişin Titreşim Analizi ve Kontrolü, ed^eds. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[47] Tzou, H. ve Ye, R., (1996). "Pyroelectric and Thermal Strain Effects of Piezoelectric (PVDF and PZT) Devices", Mechanical Systems and Signal Processing, 10: 459-469.

[48] Dyer, P. ve Srinivasan, R., (1989). "Pyroelectric Detection of Ultraviolet Laser Ablation Products from Polymers", Journal of Applied Physics, 66: 2608-2612.

[49] Münch, W. ve Thiemann, U., (1991). "Pyroelectric Detector Array with PVDF on Silicon Integrated Circuit", Sensors and Actuators A: Physical, 25: 167-172.

[50] Bent, A.A. ve Hagood, N.W., (1997). "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 8: 903-919.

[51] Yürüklü, E. ve Yağımlı, M., Fiber Optik Sensörler ve Optik Jiroskop, http://yuruklu.home.uludag.edu.tr/file/Optik_Jiroskop.pdf?cv=1, 16 Ekim 2017.

[52] APC International, L., (2002). Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications, APC International, Pennsylvania.

[53] Ebrahimi, F., (2014). Piezoelectric Materials and Devices-Practice and Applications, InTech, Croatia.

[54] Tzou, H. Lee, H.-J. ve Arnold, S., (2004). "Smart Materials, Precision Sensors/Actuators, Smart Structures, and Structronic Systems", Mechanics of Advanced Materials and Structures, 11: 367-393.

[55] Berlincourt, D., (1981). "Piezoelectric Ceramics: Characteristics and Applications", The Journal of the Acoustical Society of America, 70: 1586-1595.

[56] Damjanovic, D., (1998). "Ferroelectric, Dielectric and Piezoelectric Properties of Ferroelectric Thin Films and Ceramics", Reports on Progress in Physics, 61: 1267.

[57] Mele, E. ve Král, P., (2002). "Electric Polarization of Heteropolar Nanotubes as a Geometric Phase", Physical review letters, 88: 056803.

[58] Daniel, J.I., (2001). Engineering Vibration, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

[59] Crawford, A.R. ve Crawford, S., (1992). The Simplified Handbook of Vibration Analysis. V. 1, Introduction to Vibration Analysis Fundamentals: Computational Systems Incorporated.

[60] De Silva, C.W., (2005). Vibration and Shock Handbook, CRC Press LLC, New York.

[61] Ogata, K., (2010). Modern Control Engineering, Prentice Hall, New Jersey

[62] Golnaraghi, F. ve Kuo, B.C., (2009). Automatic Control Systems, Wiley, USA.

[63] Yüksel, İ., (2006). Otomatik Kontrol: Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Nobel Yayınevi, İstanbul.

[64] Ziegler, J.G. ve Nichols, N.B., (1942). "Optimum Settings for Automatic Controllers", trans. ASME, 64.

[65] Ang, K.H. Chong, G. ve Li, Y., (2005). "PID Control System Analysis, Design, and Technology", IEEE transactions on control systems technology, 13: 559-576.

[66] Metin, M., (2007). Raylı Sistem Araçlarının Modellenmesi ve Titreşimlerinin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[67] Atalay, A.E., (2009). E43000 Lokomotifinin Dinamik Modelinin Oluşturulması ve Titreşimlerinin Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[68] Sun, J. Jolly, M.R. ve Norris, M., (1995). "Passive, Adaptive and Active Tuned Vibration Absorbers—A Survey", Journal of mechanical design, 117: 234-242.

[69] Jalili N, E.E., (2005). Vibration Control, Vibration and Shock Handbook'un 23. Bölümü, CRC Press LLC, Florida.

[70] Soong, T.T. ve Costantinou, M.C., (1994). Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering, Springer, Netherlands.

[71] Ülker, F. Yaman, Y. Nalbantoğlu, V. ve Kırcalı, Ö., (2005). "Akıllı Bir Plağın Burulma Titreşimlerinin Aktif Kontrolü", 12. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu, 1: 177-182.

[72] Seto, K. ve Matsumoto, Y., (1999). "Active Vibration Control of Multiple Buildings Connected with Active Control Bridges in Response to Large Earthquakes": IEEE.

[73] Xianmin, Z. Changjian, S. ve Erdman, A.G., (2002). "Active Vibration Controller Design and Comparison Study of Flexible Linkage Mechanism Systems", Mechanism and Machine Theory, 37: 985-997.

[74] O'Connor, W. ve Lang, D., (1998). "Position Control of Flexible Robot Arms Using Mechanical Waves", Journal of dynamic systems, measurement, and control, 120: 334-339.

[75] Williams, J.H., (1995). Fundamentals of Applied Dynamics, Wiley, New York.

[76] Nayfeh, A.H. ve Pai, P.F., (2004). Linear and Nonlinear Structural Mechanics, John Wiley & Sons.

[77] Hagedorn, P. ve DasGupta, A., (2007). Vibrations and Waves in Continuous Mechanical Systems, John Wiley & Sons, Wiltshire.

[78] Kreyszig, E., (2010). Advanced Engineering Mathematics, John Wiley & Sons, Massachusetts.

[79] Meirovitch, L., (2001). Fundamentals of Vibrations, McGraw-Hill, New York.

[80] Le, S., (2009). Active Vibration Control of a Flexible Beam, Yüksek Lisans Tezi, San Jose State University, Kaliforniya.

[81] de Abreu, G.L.C. ve Ribeiro, J.F., (2004). "Spatial H∞ Control of a Flexible Beam Containing Piezoelectric Sensors and Actuators", University of Uberlandia, 1: 243-253.

[82] Pota, H. Moheimani, S.R. ve Smith, M., (2002). "Resonant Controllers for Smart Structures", Smart Materials and Structures, 11: 1.

[83] Preumont, A., (2006). Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems, Springer Netherlands, Netherlands.

[84] Choi, S.-B. ve Han, Y.-M., (2016). Piezoelectric Actuators: Control Applications of Smart Materials, CRC Press.

[85] Ltd., S.T., Sensor Technology Ltd. | Piezoelectric Solutions, http://sensortechcanada.com/, 16 Eylül 2017.

[86] The MathWorks Inc. ,MATLAB Documentation, https://www.mathworks.com/help/, 27 Kasım 2017.

[87] ANSYS Inc., ANSYS Manual, http://www.ansys.com/, 12 Ağustos 2016.

EK-A

PİEZOELEKTRİK MALZEME VERİ DÖNÜŞÜMLERİ

PZT gibi piezoelektrik seramiklerin malzeme özellik dönüşümleri, üreticinin vermiş olduğu veri ve ANSYS tarafından istenen format arasındaki farklılıktan dolayı karışıklığa sebep olmaktadır. Bu bölüm, bu noktayı açıklığa kavuşturmayı ve dönüşüm yöntemleri hakkında bilgi vermeyi amaçlamaktadır.

A-1 başlığı temel eşitliklerin altını çizerken, konu hakkında bir çerçeve oluşturmaktadır. A-2'den A-5'e kadar olan başlıklar ise rijitlik matrisi (stiffness matrix), dielektrik (dielectric constants) ve piezoelektrik sabitleri (piezoelectric constants) için imalatçı verisinin ANSYS verisine dönüşümünü kapsamaktadır [87].

A-1 Genel Bilgiler

Dönüşüm yöntemlerine geçmeden önce, piezoelektrik malzemelerin temel yapısal ilişkilerine değinilecektir.

T = Mekanik gerilme (mechanical stress)

S = Mekanik şekil değiştirme (mechanical strain)

D = Elektrik yer değiştirme (electric displacement)

E = Elektrik alan (electric field)

Yukardaki notasyonlar (hepsi büyük harf), hem değişken (vektör) hem de üstindis olarak kullanılmaktadır.

İmalatçı tarafından verilen veya yayınlanan yapısal ilişki verisi genellikle aşağıdaki biçimdedir:

$$\{S\} = [S^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad \text{(A.1)}$$

$$\{D\} = [d]^t\{T\} + [\varepsilon^t]\{E\} \quad \text{(A.2)}$$

Burada,

$\{T\}$ = gerilme vektörü, stress vector (6 bileşen x, y, z, yz, xz, xy)
$\{S\}$ = şekil değiştirme vektörü, strain vector (6 bileşen x, y, z, yz, xz, xy)
$\{D\}$ = elektrik yer değiştirme vektörü, electric displacement vector (3 bileşen x, y, z)
$\{E\}$ = elektrik alan vektörü, electric field vector (3 bileşen x, y, z)
$[S^E]$ = sabit elektrik alan değerinde bulunan uyumluluk matrisi (compliance matrix)
$[d]$ = şekil değiştirme/elektrik alan ilişkili piezoelektrik matris
$[d]^t$ = şekil değiştirme/elektrik alan ilişkili piezoelektrik matris (transpoze edilmiş)
$[\varepsilon^T]$ = sabit gerilim altındaki dielektrik matrisi (dielectric matrix evaluated at constant stress)

olmaktadır.

Diğer taraftan ANSYS, veriyi takip eden şekildeki gibi istemektedir:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} + [e]\{E\} \quad \text{(A.3)}$$

$$\{D\} = [e]^t\{S\} + [\varepsilon^S]\{E\} \quad \text{(A.4)}$$

Burada ise;

$\{T\}$ = gerilme vektörü, stress vector (6 bileşen x, y, z, xy, yz, xz)

$\{S\}$ = şekil değiştirme vektörü, strain vector (6 bileşen x, y, z, xy, yz, xz)

$\{D\}$ = elektrik yer değiştirme vektörü, electric displacement vector (3 bileşen x, y, z)

$\{E\}$ = elektrik alan vektörü, electric field vector (3 bileşen x, y, z)

$[c^E]$ = sabit elektrik alan değerinde bulunan rijitlik matrisi

$[e]$ = gerilme/elektrik alan ilişkili piezoelektrik matris

$[e]^t$ = gerilme/elektrik alan ilişkili piezoelektrik matris (transpoze edilmiş)

$[\varepsilon^S]$ = sabit şekil değiştirme altındaki dielektrik matrisi (dielectric matrix evaluated at constant strain)

olmaktadır.

Denklem (A.1) ve (A.2)'deki şekliyle sunulmuş imalatçı verisini ANSYS notasyonuna (Denklem (A.3) ve (A.4)) dönüştürmek için, *Denklem* (A.1)'in şekil değiştirme yerine gerilmeye dayalı olması gerekir. Aşağıdaki düzenlemeler yapılırsa:

$$\{S\} = [S^E]\{T\} + [d]\{E\} \quad \text{(A.5)}$$

$$[S^E]\{T\} = \{S\} - [d]\{E\} \quad \text{(A.6)}$$

$$\{T\} = [S^E]^{-1}\{S\} - [S^E]^{-1}[d]\{E\} \quad \text{(A.7)}$$

Denklem (A.2)(A.2)'nin elektrik yer değiştirmeyi gerilme yerine şekil değiştirme ile ilişkilendirmesi sebebiyle; *Denklem* (A.7), *Denklem* (A.2) 'deki yerine koyulabilir:

$$\{D\} = [d]^t\{T\} + [\varepsilon^t]\{E\} \quad \text{(A.8)}$$

$$\{D\} = [d]^t([S^E]^{-1}\{S\} - [S^E]^{-1}[d]\{E\}) + [\varepsilon^t]\{E\} \quad \text{(A.9)}$$

$$\{D\} = [d]^t[S^E]^{-1}\{S\} + ([\varepsilon^t] - [d]^t[S^E]^{-1}[d])\{E\} \quad \text{(A.10)}$$

Denklem (A.3) ve (A.4) ile (A.7) ve (A.10) karşılaştırılması sonucu, imalatçıdan temin edilen veri ve ANSYS'in istediği değerler arasından şu ilişki elde edilir:

$$[C^E] = [S^E]^{-1} \quad \text{(A.11)}$$

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t[S^E]^{-1}[d] \quad \text{(A.12)}$$

$$[e] = [S^E]^{-1}[d] = [d]^t[S^E]^{-1} \quad \text{(A.13)}$$

Bu denklemler, birkaç sayfa sonra tartışılacak olan dönüşüm yöntemlerinin temelini teşkil etmektedir. Dikkat edilmelidir ki, imalatçı verisindeki vektörler {x, y, z, yz, xz, xy} şeklindeyken ANSYS'in vektörleri {x, y, z, xy, yz, xz} formundadır.

A-2 Rijitlik/Uyumluluk Matrisi

Kullanıcının gerilim-şekil değiştirme verisini girebileceği üç yol vardır. Birincisi ortotropik malzeme özelliklerini (EX, NUXY, GXY) belirtmek için MP komutunu kullanmaktır. Aksi

takdirde, kullanıcı programa TB,ANEL ile bir anizotropik elastik matris (anisotropic elastic matrix) girebilir.

3-eksen'de (z-ekseni) polarizasyon yapıldığı varsayılıp, uyumluluk matrisi oluşturmak için imalatçı verisi ANSYS verisine eşlemlenirse:

$$[S^E] = [C^E]^{-1} = \begin{bmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{66}^E & 0 & 0 \\ & & & & S_{44}^E & 0 \\ & & & & & S_{44}^E \end{bmatrix} \quad \text{(A.14)}$$

Eğer S_{66}^E mevcut değilse, $S_{66}^E = 2(S_{11}^E - S_{12}^E)$ denkleminden hesaplanabilir.[1] Eğer kullanıcı rijitlik matrisini girmek isterse, $[C^E] = [S^E]^{-1}$ yi hesaplaması gerektiğine dikkat ediniz. Kişinin, önceki başlıklarda bahsedildiği gibi diğer sabitleri hesaplamak için bunu yapması gerekecektir. Uyumluluk matrisinin tersini (inversini) almak için Microsoft Excel'de MINVERSE fonksiyonu kullanılabilir. TB,ANEL komutu için herhangi bir matris (rijitlik matrisi veya uyumluluk matrisi) girdi olabilir.

Bu veriyi uyumluluk olarak girmek için, aşağıdaki komutlar yazılabilir:

TB,ANEL,1,1,,1	! Malzeme #1, 1 TEMP, TBOPT=1 uyumluluk girdisi için
TBDATA, 1,se11,se12,se13	! birinci satırı girin
TBDATA, 7,se11,se13	! ikinci satırı girin
TBDATA,12,se33	! üçüncü satırı girin
TBDATA,16,se66	! dördüncü satırı girin
TBDATA,19,se44	! beşinci satırı girin
TBDATA,21,se44	! altıncı satırı girin

Satırlardaki se12 lerin yerine, uyumluluk matrisindeki doğru sayısal değerler koyulmalıdır.

[1] $S_{66}^E = \frac{1}{G_{xy}} = \frac{2(1+\nu_{xy})}{E_x} = 2(S_{11}^E - S_{12}^E)$

Satırlardaki se12 lerin yerine, uyumluluk matrisindeki doğru sayısal değerler koyulmalıdır.

Öte yandan, veriyi rijitlik olarak girmek için kişi şu komutları kullanabilir:

```
TB,ANEL,1,1,,0          ! Malzeme #1, 1 TEMP, TBOPT=0 rijitlik girdisi için
TBDATA, 1,ce11,ce12,ce13 ! birinci satırı girin
TBDATA, 7,ce11,ce13      ! ikinci satırı girin
TBDATA,12,ce33           ! üçüncü satırı girin
TBDATA,16,ce66           ! dördüncü satırı girin
TBDATA,19,ce44           ! beşinci satırı girin
TBDATA,21,ce44           ! altıncı satırı girin
```

Satırlardaki ce12 ler, uyumluluk matrisinin inversi olarak hesaplanan uygun sayısal rijitlik değerleri ile değiştirilmelidir (MATLAB, mathcad ya da önceden bahsedildiği gibi Excel gibi programlar kullanılarak).

TB,ANEL kullanımına alternatif yöntem, MP komutudur. 3-eksen'de (z-ekseni) polarizasyon yapıldığı varsayılırsa; kişi, imalatçı verisini ANSYS verisine dönüştürebilir. Denklem hatırlanırsa:

$$[D]^{-1} = [S^E] = [C^E]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -v_{xy}/E_y & -v_{xz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & 1/E_y & -v_{yz}/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/G_{xy} & 0 & 0 \\ & & & & 1/G_{yz} & 0 \\ & & & & & 1/G_{xz} \end{bmatrix}$$

Yukardaki ilişkiden yola çıkıp, rijitlik ortotropik MP komutu ile şu şekilde yazılır:

$$EX = \frac{1}{S_{11}^E} = EY \quad \text{(A.15)}$$

$$EZ = \frac{1}{S_{33}^E} \quad \text{(A.16)}$$

$$GXY = \frac{1}{S_{66}^E} = \frac{1}{2(S_{11}^E - S_{12}^E)} \quad \text{(A.17)}$$

$$GYZ = \frac{1}{S_{44}^E} = GXZ \quad \text{(A.18)}$$

$$NUXY = -\frac{S_{12}^E}{S_{11}^E} \quad \text{(A.19)}$$

$$NUYZ = -\frac{S_{13}^E}{S_{33}^E} = NUXZ \quad \text{(A.20)}$$

Bu veriyi ANSYS'e girmek için kullanılan komutlar:

```
MP,EX ,1,1/se11          ! Malzeme #1, Elastiklik modülü
MP,EY ,1,1/se11

MP,EZ ,1,1/se33

MP,NUXY,1,-se12/se11     ! Minör Poisson oranı

MP,NUYZ,1,-se13/se33

MP,NUXZ,1,-se13/se33

MP,GXY ,1,1/se66         ! Kayma modülü

MP,GYZ ,1,1/se44

MP,GXZ ,1,1/se44
```

Bütün se12 lerin yerine uygun sayısal değerler yerleştirilmelidir.

A-3 Elektrik Yüklenebilirlik Matrisi

Sabit şekil değiştirme altında hesaplanan elektrik yüklenebilirlik matrisi (permittivity matrix), ANSYS girdisi olarak kabul edilir. Çoğu zaman imalatçı verisi sabit gerilim altındaki elektrik yüklenebilirliği içerir, bu yüzden dönüşüm gereklidir.

Denklem (A.12)'de gösterildiği gibi, dielektrik sabitler şekil değiştirmeye bağlı olarak hesaplanabilir:

$$[\varepsilon^S] = [\varepsilon^T] - [d]^t[S^E]^{-1}[d] \quad \text{(A.21)}$$

İşlemler yapılıp denklem düzenlendikten sonra, elektrik yüklenebilirlik girilebilir. Matris sadece köşegen terimlere sahiptir.

$$[\varepsilon^S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\ & \varepsilon_{11}^S & 0 \\ & & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} K_{11}^S & 0 & 0 \\ & K_{11}^S & 0 \\ & & K_{33}^S \end{bmatrix} \quad \text{(A.22)}$$

Burada, $K_{11}^S = \frac{\varepsilon_{11}^S}{\varepsilon_0}$ bağıl (göreli) elektrik yüklenebilirlik olmaktadır.

ANSYS'de elektrik yüklenebilirliği, mutlak değer ε_{33}^{T} yada bağıl değer K_{33}^{T} olarak girmek üzere iki seçenek vardır. Bağıl olarak girilmesi tavsiye edilen seçimdir. 3-eksen'de (z-doğrultusu) polarizasyon yapıldığı varsayılırsa, bu aşağıdaki gibi MP komutu ile girilebilir:

```
EMUNIT,EPZRO,8.85e-12     !Serbest-uzay elektrik
yüklenebilirliği tanımla

MP,PERX,1,reps11          ! Malzeme #1

MP,PERY,1,reps11

MP,PERZ,1,reps33
```

Bütün reps33 ifadeleri uygun bağıl elektrik yüklenebilirlik değerleri ile değiştirilmelidir. [1]

A-4 Yoğunluk Girdisi

Yoğunluk için bir dönüşüme gerek yoktur. MP komutu ile şu şekilde girilir:

```
MP,DENS,1,dens      ! Malzeme #1
```

dens yerine yoğunluğun uygun sayısal değeri yazılmalıdır.

A-5 Piezoelektrik Sabit Matrisi

Genellikle, imalatçı verisi mekanik şekil değiştirme ile elektrik alanı ilişkilendiren $[d]$ yi içerir. Bunun yanında; ANSYS tarafından mekanik gerilmeyi elektrik alan ile ilişkilendiren $[e]$ talep edilir ve bu nedenle dönüşüm gereklidir.

Denklem (A.13) ile $[e]$ ve $[d]$ arasındaki ilişki kurulmuştu:

$$[e] = [S^E]^{-1}[d] = [d]^t[S^E]^{-1} \quad \text{(A.23)}$$

Burada, 3-eksen'de (z-doğrultusu) polarizasyon ve kutuplaşmamış doğrultularda simetri varsayılarak ($d_{32} = d_{31}$ ve $d_{24} = d_{15}$) :

$$[d]^t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(A.24)}$$

[1] Küçük değerler (< 1), ANSYS tarafından otomatik olarak mutlak elektrik yüklenebilirlik şeklinde kabul edilir, dolayısı ile kullanıcının fazladan herhangi bir tanımlama yapması gerekmez.

İmalatçı verisinde {x, y, z, yz, xz, xy} mekanik vektörlerin {1, 2, 3, 4, 5, 6}'e karşılık geldiği hatırlanırsa; 4. satır 5. ile, benzer biçimde, 5. satır → 6. satır, 6. satır → 4. satır yer değiştirir. Dolayısı ile d_{15} ve d_{24} bir yatay (satır) yer değiştirir.

Kişi, $[S^E]^{-1} = [C^E]$ matrisini $[e]$'yi elde etmek üzere kullanırsa (4,5,6. satırlar düzenlenerek) şu matris elde edilir:

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{(A.25)}$$

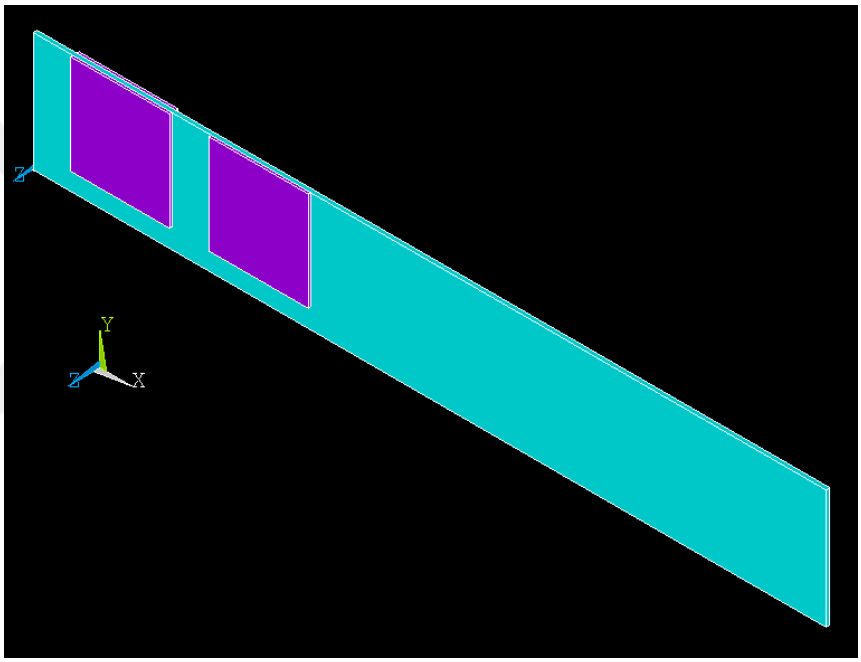
Bu veriyi girmek için aşağıdaki komutlar kullanılır:

```
TB,PIEZ,1                ! Malzeme #1, piezo matris
TBDATA, 3,e31            ! birinci satırı girin
TBDATA, 6,e31            ! ikincisatırı girin
TBDATA, 9,e33            ! üçüncüsatırı girin
TBDATA,14,e15            ! beşinci satırı girin
TBDATA,16,e15            ! altıncı satırı girin
```

Uygun sayısal piezo sabitleri, e33 lerin yerine yazılmalıdır.

EK-B

ANSYS PARAMETRİK TASARIM DİLİ İLE AKILLI KİRİŞİN MODELLENMESİ



Akıllı kirişin APDL yani ANSYS parametrik tasarım dili ile modellenmesi özetle şöyledir:

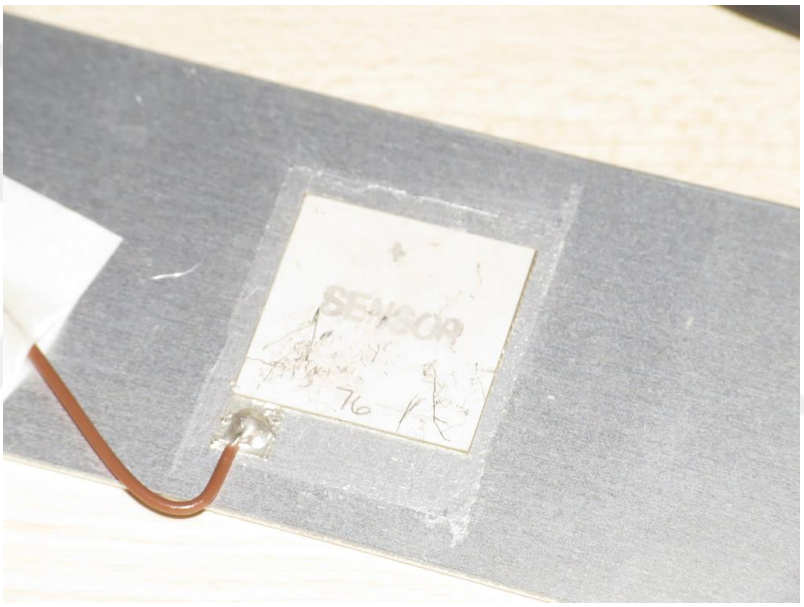
- "Preferences" ekranından "Structural" ve "Electric" seçilir ve "h-Method" seçeneği işaretlenir.
- "Preprocessor" bölümünde eleman tipi olarak, alüminyum kiriş için "SOLID185" ve piezoelektrik malzeme için "SOLID5" eklenir. "SOLID5" elemanının serbestlik derecesi olarak "UX UY UZ VOLT" seçilmelidir.
- Analiz için gerekli alüminyum malzeme özellikleri olan yoğunluk, poisson oranı, elastiklik modülü ile, piezoelektrik malzeme için gerekli olan yoğunluk, iletkenlik

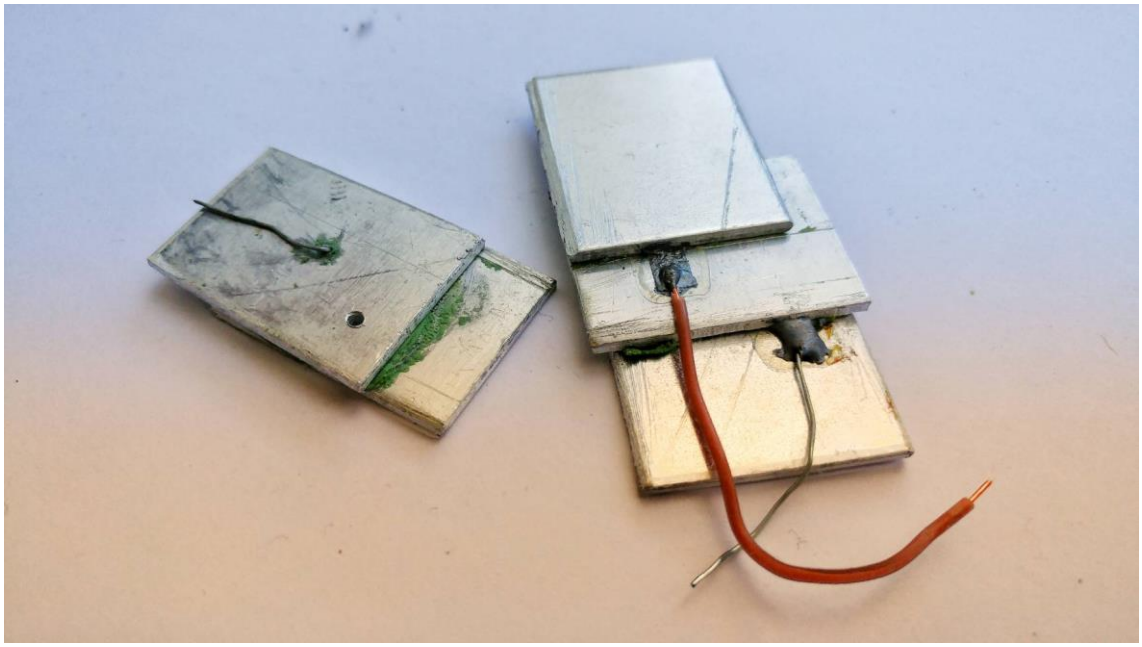
matrisi, rijitlik matrisi, piezoelektrik sabit matrisi programa tanıtılır. Ek-A'da ANSYS için gerekli olan piezoelektrik malzeme veri dönüşümlerine değinilmiştir.

- Alüminyum kirişi modellemek için "Preprocessor – Modelling – Create – Volumes – Block – By Dimensions" seçilerek kirişin boyutları metre olarak girilir (0.2 x 0.03 x 0.001 m) ve bir hacim oluşturulur.
- Piezoelektrik yama aynı şekilde (0.025 x 0.025 x 0.0006 m) boyutlarında oluşturulur. Ardından "Move/Modify Volume" komutları ile koordinat sisteminde yerine yerleştirir. İkinci ve üçüncü piezoelektrik yamalar ise "Copy Volume" ile kopyalanıp koordinat sistemine göre yerleştirilir.
- Piezoelektrik yamalar kiriş yüzeyine "Preprocessor - Modeling - Operate - Booleans - Glue - Volumes" seçilerek yapıştırılır.
- "Preprocessor – Meshing – Size Controls – ManualSize – Global – Size" kısmına mesh elemanının istenilen boyutu metre olarak girilir. Bu kısım "Mesh Tool" ile de ayarlanabilir.
- "Preprocessor – Meshing - MeshTool" ile "Attributes Volume Set" kiriş için alüminyum malzeme, piezoelektrik yamalar için uygun malzeme tipi atanır. Daha sonra "Sweep Auto" ile modele mesh atılır.
- Modeli tamamlamak için, "Preprocessor – Coupling / Ceqn – Couple DOFs" seçilerek, piezoelektrik yamaların üst ve alt alanındaki nodlar, her alan değişik bir "Set reference number" olacak şekilde "VOLT" serbestlik derecesinde birleştirilir.

EK-C

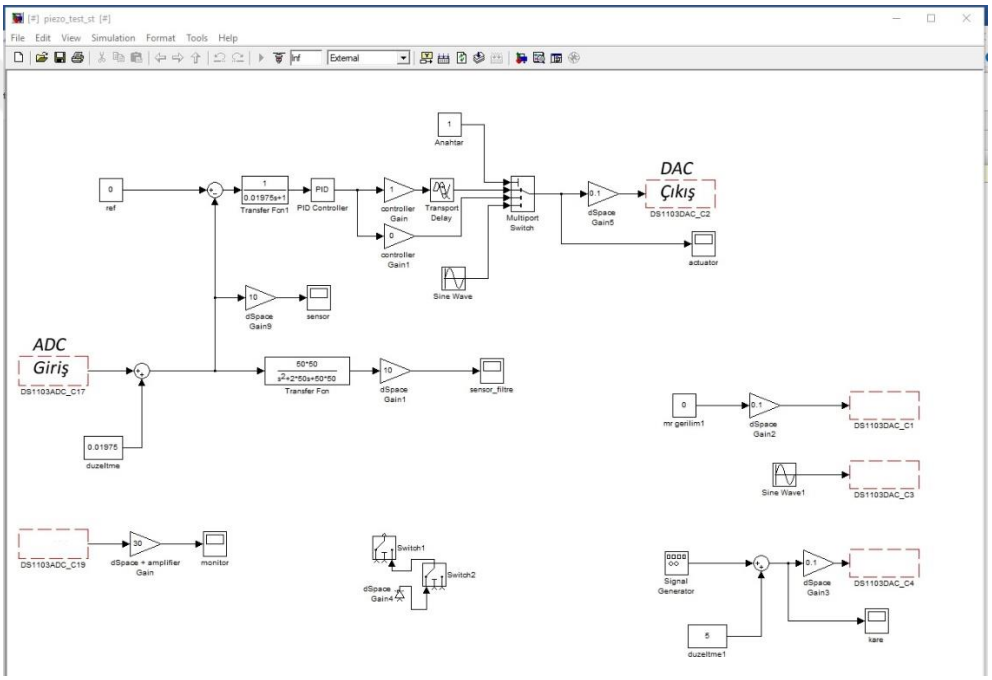
BAŞARISIZ OLAN DENEMELER

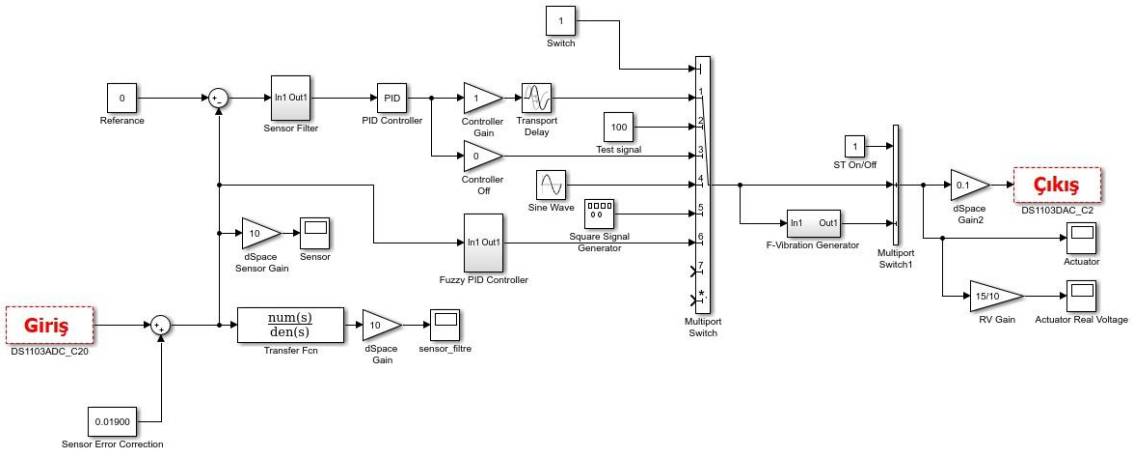




EK-D

MATLAB/SİMULİNK MODELLERİ

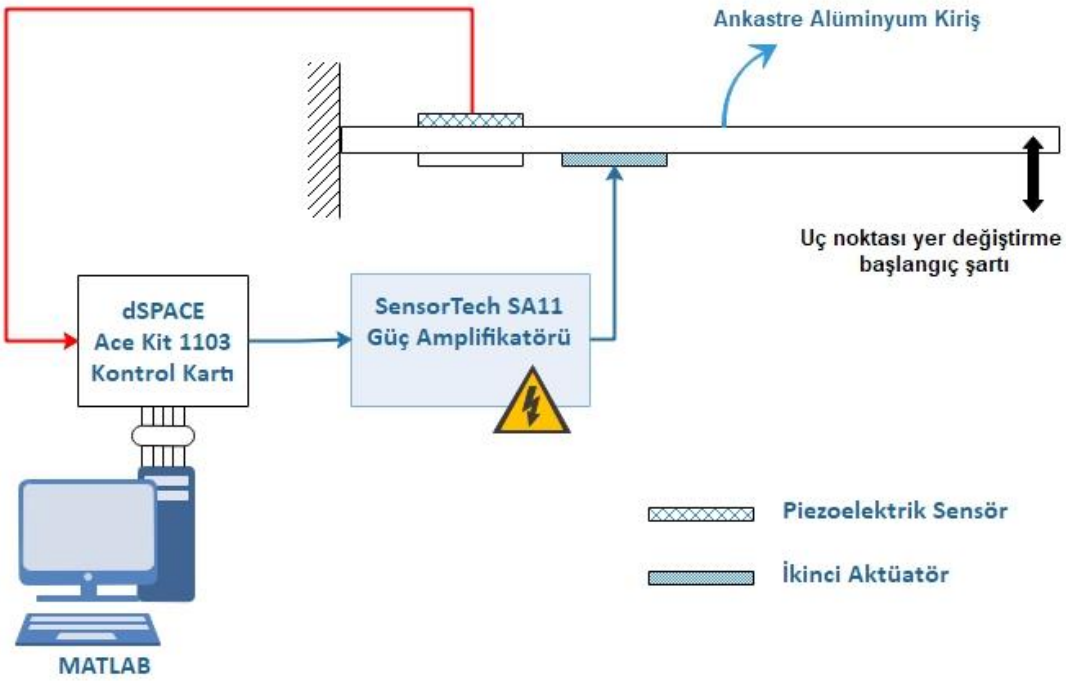




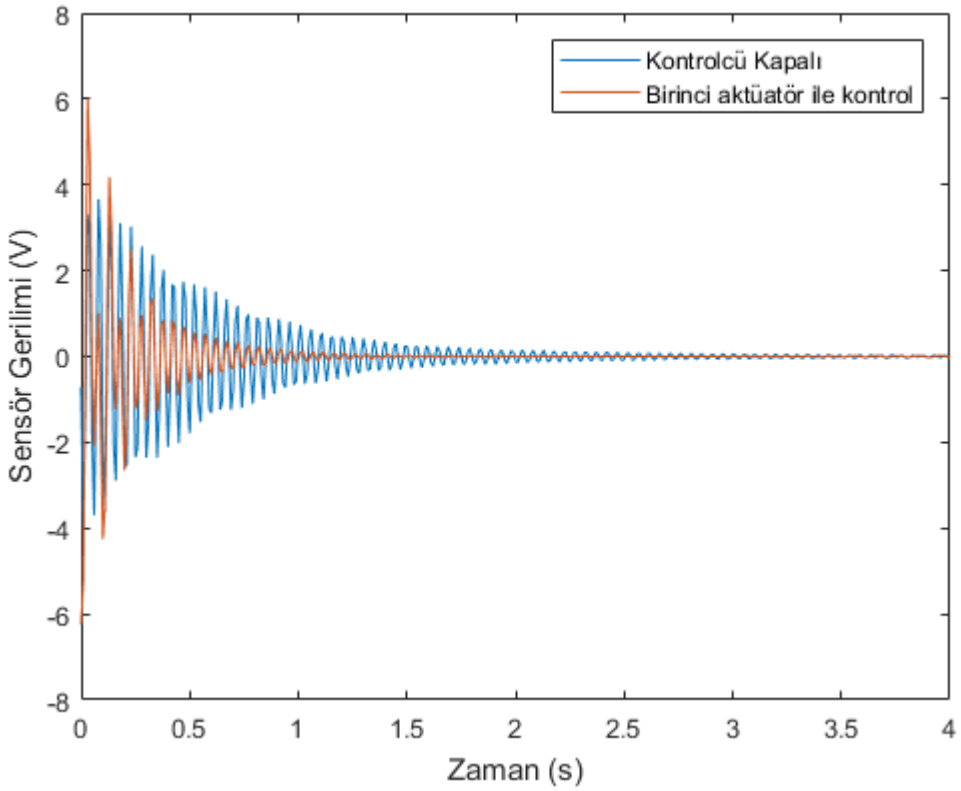
EK-E

İKİNCİ AKTÜATÖR İLE KONTROL

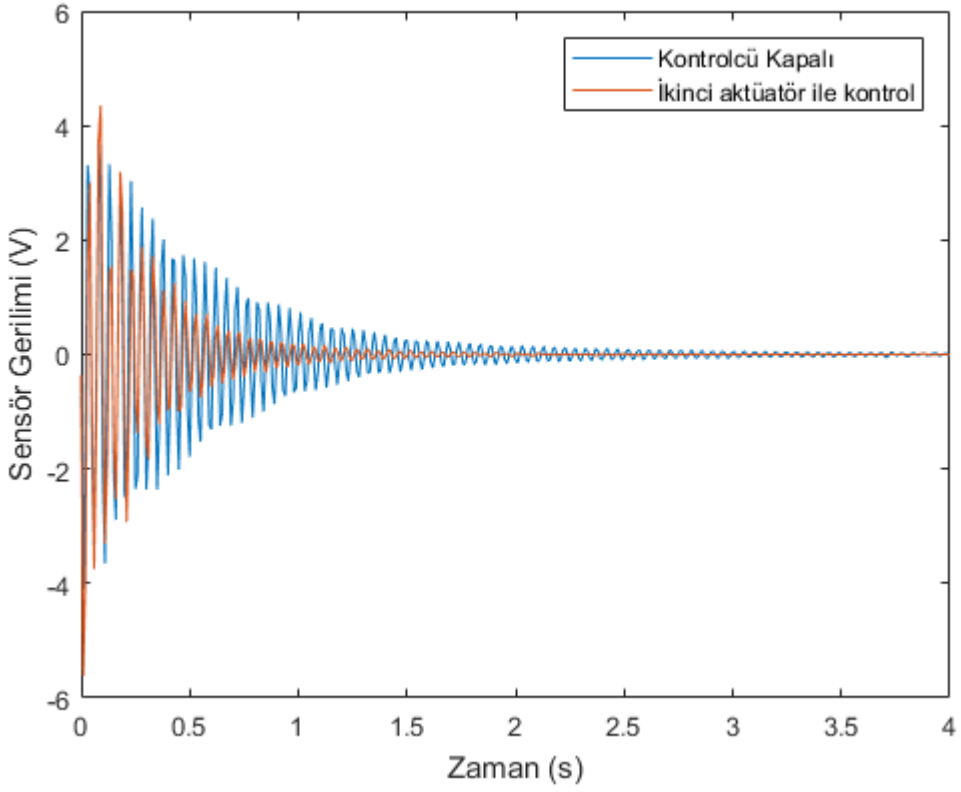
İkinci aktüatör üzerinden kontrol işlemi yapılarak $K_P = 4$ katsayısında sonuçlar birinci aktüatör ile karşılaştırılmıştır (Şekil E.1).



Şekil E.1 Akıllı çubuğun ikinci aktüatör ile kontrol edilmesi



Şekil E.2 Birinci aktüatör ile kontrol, K_P=4



Şekil E.3 İkinci aktüatör ile kontrol, K_P=4

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Deniz SOFU

Doğum Tarihi ve Yeri : 11.1986 - Varna

Yabancı Dili : İngilizce, Japonca

E-posta : denizsofu@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Teorisi Sistem Dinamiği ve Kontrol Anabilim Dalı	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği	2017
Lisans	Konstrüksiyon Anabilim Dalı	Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği	2011
Lise		Sakıp Sabancı Anadolu Lisesi	2004