

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KRENLERİN SİSMİK ETKİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ
VE TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ**

C. OKTAY AZELOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. AHMET SAĞIRLI**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KRENLERİN SİSMİK ETKİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ
VE TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ

C. Oktay AZELOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 21.05.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Muharrem E. BOĞOÇLU

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. C. Erdem İMRAK

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER

Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 2011-06-01-KAP01 numaralı Kapsamlı Araştırma Projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu doktora tezinde, krenlerin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir matematik model geliştirilmiş, geliştirilen matematik modelin doğruluğu fiziksel bir kren modeli üzerinde yapılan sarsma masası deneyleri ile doğrulanmış ve krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak, sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Aktif titreşim kontrolü için, eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmış ve tasarlanan kontrolörün performansı yapılan benzetim çalışmaları ile ortaya konmuştur.

Doktora tez çalışması, oldukça özveri gerektiren, dünya çapında bilime yeni bir katkı sağlayan, heyecan dolu zahmetli bir süreçtir. Doktora çalışmam süresince çok kişinin katkısı ve emeği olmuştur, bu vesileyle hepsine teşekkürlerimi sunarım. İlk olarak, doktora öğrenimim boyunca her konuda desteğini hissettiğim, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI'ya teşekkürlerimi sunarım. Yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolü alanında bilgilerinden yararlandığım hocam Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'ye, kontrol konusunda her konuda destek sağlayan değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI'ya ve beni dayanıklı kontrol kuramı ile tanıştıran hocam Doç. Dr. İbrahim B. KÜÇÜKDEMİRAL'a çok teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımda, BÜ-KRDAE Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Sarsma Masası Laboratuvarının imkanlarını seferber eden Doç. Dr. Ayşe EDİNÇLİLER'e ve deneylerin yapılmasında yardımcı olan laboratuvar çalışanları Müh. Oktay ÇIRAĞ, Uzman Mehmet BEKTAŞ ve Uzman Ekrem ULUSOY'a çok teşekkür ederim. Doktora tezine, değerli görüş ve önerileriyle katkı sağlayan hocam Prof. Dr. C. Erdem İMRAK'a ve hocam Yrd. Doç. Dr. Muharrem E. BOĞOÇLU'ya teşekkürlerimi sunarım. Yine deneyler süresince yardımını esirgemeyen çalışma arkadaşım Uzman Seyhan ÖZEN'e, ayrıca Arş. Gör. Alperen ACAR'a, Alican PALI ve Nevzat UMDU kardeşlerime ve tüm çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Ve... Hayatım boyunca bana destek olan, bu çalışmanın esas mimarları ve sahipleri, değerli Anne ve Babama, Nurhan ve M. Aytek AZELOĞLU'na, uygulamaya yönelik pratik düşünce ve tecrübelerinden yararlandığım ağabeyim Müh. Koray AZELOĞLU'na, tüm aile fertlerime ve Eşim Aylin AZELOĞLU'na sonsuz teşekkürler ederim.

Nisan, 2012

C. Oktay AZELOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti.....	7
1.1.1. Krenlerin Sismik Performansları İle İlgili Çalışmalar	7
1.1.2. Dayanıklı Kontrol İle İlgili Çalışmalar	11
1.1.3. Yapısal Titreşimlerin Aktif Kontrolü İle İlgili Çalışmalar	14
1.2. Tezin Amacı.....	19
1.3. Orijinal Katkı	21
BÖLÜM 2	22
DEPREME MARUZ KRENLER İÇİN MATEMATİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	22
2.1. Matematik Modelin Geliştirilmesi	22
2.1.1. Depreme Maruz Krenin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi	23
2.2. Sisteme Bozucu Deprem Hareketlerinin Uygulanması.....	26
2.3. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi	28
2.4. Benzetim Çalışmalarının Sonuçları	29
BÖLÜM 3	34
DENEYSEL ÇALIŞMA	34
3.1. Deney Düzeneği.....	34

3.1.1. Sarsma Masası ve Ölçüm Cihazları	35
3.1.2. Fiziksel Model	39
3.2. Deneyin Yapılışı.....	43
3.3. Deneysel Sonuçlar	46
3.3.1. Zaman Cevaplarının Analizi	46
3.3.2. Frekans Cevaplarının Analizi.....	48
3.4. Benzetim Çalışmalarının Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması.....	49
BÖLÜM 4	54
KRENLERDE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜNÜN UYGULANMASI.....	54
4.1. Krenlerde Aktif Titreşim Kontrolü İçin Kontrolörün Yerleştirileceği En Uygun Yerin Belirlenmesi	55
4.2. Aktif Titreşim Kontrol Mekanizmasının Krene Yerleştirilmesi.....	56
BÖLÜM 5	59
DİŞBÜKEY OPTİMİZASYON VE DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİ İLE H_{∞} OPTİMİZASYON PROBLEMİ	59
5.1. Dışbükey Optimizasyon	60
5.2. Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME).....	63
5.2.1. DME'lerin Kullanım Alanları.....	66
5.2.2. DME'lerinin Çözüm Yöntemleri	67
5.3. Doğrusal Matris Eşitsizlikleri İle Analiz	70
5.3.1. H_{∞} Normu	70
5.3.2. H_{∞} Normunun Hesaplanması.....	71
5.3.3. H_{∞} Optimizasyon Kontrol Problemi	73
BÖLÜM 6	75
EYLEYİCİ DOYUMLU KARMA H_2/H_{∞} KONTROL ALGORİTMASININ TASARIMI	75
6.1. Karma H_2/H_{∞} Kontrol Algoritmasının Tasarımı.....	75
6.2. Eyleyici Doymulu Karma H_2/H_{∞} Kontrol Algoritmasının Tasarımı	79
6.2.1. Doymulu Eyleyicinin Kontrol İşareti Üzerinden Elde Edilmesi	80
6.2.2. Eyleyici Doymulu Karma H_2/H_{∞} Kontrolör Tasarımı	81
BÖLÜM 7	82
AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	82
7.1. DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Karma H_2/H_{∞} Kontrolör İle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Azaltılması	83
7.2. DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Eyleyici Doymulu Karma H_2/H_{∞} Kontrolör İle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Azaltılması	90
7.3. Aktif Kontrol İle İlgili Benzetim Çalışmalarının Değerlendirilmesi	95

BÖLÜM 8.....	98
SONUÇ VE ÖNERİLER	98
KAYNAKLAR.....	102
EK-A.....	109
SİSTEME AİT ENERJİ DENKLEMLERİ VE HAREKET DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ ..	109
ÖZGEÇMİŞ	112

SİMGE LİSTESİ

A	Sistem Matrisi
A^T	A Matrisinin Transpozesi
A^{-1}	A Matrisinin Tersi
$A > 0 (< 0)$	Simetrik Pozitif (Negatif) Tanımlı Matris
$A \geq 0 (\leq 0)$	Simetrik Pozitif (Negatif) Yarı Tanımlı Matris
B_h	Kontrol Giriş Matrisi
B_w	Bozucu Giriş Matrisi
C_s	Sönüm Matrisi
c_i	i'inci Elemanın Sönüm Değeri
C	Kompleks Sayılar Kümesi
C^n	n Bileşenli Kompleks Vektörler Kümesi
$C^{n \times m}$	$n \times m$ Boyutlu Kompleks Matrisler Kümesi
$\text{diag}(A_1, \dots, A_n)$	Diyagonal Matris
$d^2 x_i / dt^2$	i'inci Elemanın İvme Değeri
E_A	Sistemdeki Belirsizliklerin Yapısını Tanımlayan Bilinen Sabit Reel Matris
E_D	Sistemin Toplam Sönüm Enerjisi
E_k	Sistemin Toplam Kinetik Enerjisi
E_p	Sistemin Toplam Potansiyel Enerjisi
E_w	Bozucuların Ağırlık Matrisi
$F(t)$	Lebesgue Sınırlı Ölçülebilir Bilinmeyen Matris Fonksiyonu
I	Uygun Boyutlu Birim Matris
I_i	i'inci Elemanın Kesit Atalet Momenti
$\text{iz}(A)$	A Matrisinin İzi (Köşegen Elemanlarının Toplamı)
K	Kontrol Kazanç Matrisi
K_s	Rijitlik Matrisi
k_i	i'inci Elemanın Rijitlik Değeri
L	Halat Uzunluğu
L_i	i'inci Elemanın Uzunluğu
M_s	Kütle Matrisi
M_w	Deprem Büküklüğü
m_i	i'inci Elemanın Kütle Değeri

$\Re$	Reel Sayılar Kümesi
$\Re^n$	Elemanları Reel Sayı Olan n Boyutlu Euclid Uzayı
$\Re^{n \times m}$	$n \times m$ Boyutlu Reel Matrisler Kümesi
$\Re_+$	Pozitif Reel Sayılar Kümesi
$\text{Re}(s)$	$s \in \mathbb{C}$ 'nin Reel Kismi
T	Uygun Boyutlu Pozitif Tanımlı Simetrik Matris
$u(t)$	Kontrol Giriş Vektörü
$\bar{Q}$	Uygun Boyutlu Pozitif Tanımlı Simetrik Matris
Q_i	Genelleştirilmiş Kuvvetler
q_i	Genelleştirilmiş Koordinatlar
$V(x(t), t)$	Lyapunov Krasovskii Aday Fonksiyoneli
$\bar{W}$	Herhangi Bir Pozitif Tanımlı Simetrik Matris
$w(t)$	Bozucu Giriş Vektörü
$x(t)$	Sistemin Durum Vektörü
x_0	Kren Yapısına Uygulanan Bozucu Deprem Hareketi
x_i	i 'inci Elemanın Yerdeğiştirmesi
$\bar{Z}$	Uygun Boyutlu Pozitif Tanımlı Simetrik Matris
$z(t)$	Kontrol Edilmek İstenen Çıkış Vektörü
α_0	Rayleigh Sönüm Prensibine Göre Belirlenen Sabit
β_0	Rayleigh Sönüm Prensibine Göre Belirlenen Sabit
μ	Gecikme Zamanının Türevinin Üst Sınırını Veren Bilinen Pozitif Sabit
γ	En Küçük Bozucu Etkisizleştirme Seviyesi
χ	Genişletilmiş Durum Vektörü
ε	Herhangi Bir Pozitif Sabit
θ	Yükün Salınım Açısı
ω_i	i 'inci Kritik Frekans Değeri
$\lambda(A)$	A Matrisinin Özdeğeri
$\sigma(A)$	A Matrisinin En Büyük Tekil Değeri
$L_2[0, +\infty)$	$[0, +\infty)$ 'da Kare Entegre Edilebilir Fonksiyonlar Kümesi
$\ \cdot\ _\infty$	H_∞ Normu
$\ \cdot\ _2$	H_2 Normu
$:=$	Tanımsal Eşitlik
$\in$	Bir Kümenin Elemanı Olmak

KISALTMA LİSTESİ

AAKD	Aktif Ayarlı Kütle Damperi
AGS	Aktif Gergi Sistemi
BMK	Bulanık Mantık Kontrol
BMPIDK	Bulanık Mantık PID Kontrol
BÜ-KRDAE	Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü
CRE	Cebirsel Riccati Eşitliği
ÇGBK	Çıkış Geri-Beslemeli Kontrolör
DGBK	Durum Geri-Beslemeli Kontrolör
DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
DOMÉ	Doğrusal Olmayan Matris Eşitsizliği
EA	Elipsoid Algoritması
İNA	İç Nokta Algoritması
inf	Bir Kümenin İnfimumu
LQR	Linear Quadratic Regulator
LQG	Linear Quadratic Gaussian
ÖUBMK	Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrol
sup	Bir Kümenin Supremumu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1. 1	Kobe depreminde yıkılan krenler 2
Şekil 2. 1	Modellenen krenin şematik resmi ve depremin etki yönü..... 23
Şekil 2. 2	Sismik etkiye maruz krenin dinamik modeli 24
Şekil 2. 3	Tekerlek mekanizmasının modellenmesi..... 25
Şekil 2. 4	El Centro depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali 27
Şekil 2. 5	Kocaeli depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali 27
Şekil 2. 6	El Centro depreminin matematik modele uygulanması hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 29
Şekil 2. 7	El Centro depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 30
Şekil 2. 8	El Centro depreminin matematik modele uygulanmış hali için θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 30
Şekil 2. 9	Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 31
Şekil 2. 10	Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 31
Şekil 2. 11	Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 32
Şekil 3. 1	Sarsma masası ve kontrol ünitesi..... 37
Şekil 3. 2	Deneyde kullanılan konumölçerler 38
Şekil 3. 3	Deneyde kullanılan ivmeölçerler 39
Şekil 3. 4	Model krene ait temel büyüklükler 41
Şekil 3. 5	Model krenin perspektif görünüşü 41
Şekil 3. 6	Model krenin görünümü 42
Şekil 3. 7	Kutunun görünümü 42
Şekil 3. 8	Beton bloğun görünümü 43
Şekil 3. 9	Deneyin şematik gösterimi 44
Şekil 3. 10	El Centro depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali 44
Şekil 3. 11	Kocaeli depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali 45

Şekil 3. 12	Ölçüm cihazlarının fiziksel model üzerindeki yerleri	45
Şekil 3. 13	El Centro depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanması hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	46
Şekil 3. 14	El Centro depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	46
Şekil 3. 15	Kocaeli depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanması hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	47
Şekil 3. 16	Kocaeli depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	47
Şekil 3. 17	Sistemin deneysel olarak elde edilen frekans cevapları	49
Şekil 3. 18	El Centro depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	50
Şekil 3. 19	El Centro depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	50
Şekil 3. 20	Kocaeli depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	51
Şekil 3. 21	Kocaeli depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	52
Şekil 4. 1	Aktif kontrol mekanizmasının kren sistemine yerleştirilmesi.....	57
Şekil 4. 2	Aktif kontrol uygulanmış kren sisteminin dinamik modeli	58
Şekil 6. 1	Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı.....	76
Şekil 7. 1	El Centro depreminin yer hareketi.....	84
Şekil 7. 2	x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	85
Şekil 7. 4	Kontrol kuvvetinin zaman cevabı.....	86
Şekil 7. 5	Kocaeli depreminin yer hareketi.....	87
Şekil 7. 6	x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	87
Şekil 7. 7	θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	88
Şekil 7. 8	Kontrol kuvvetinin zaman cevabı.....	88
Şekil 7. 9	x_4 'ün yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları	89
Şekil 7. 10	x_4 'ün sistemin rijitlik parametrelerinin değişimine göre elde edilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları	89
Şekil 7. 11	x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	91
Şekil 7. 12	θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	91
Şekil 7. 13	Kontrol kuvvetinin zaman cevabı ($x \pm 2500$ kN)	92
Şekil 7. 14	x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları.....	93
Şekil 7. 15	θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları	93
Şekil 7. 16	Kontrol kuvvetinin zaman cevabı ($x \pm 2500$ kN)	94
Şekil 7. 17	x_4 'ün yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları	95
Şekil 7. 18	x_4 'ün sistemin rijitlik parametrelerinin değişimine göre elde edilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları	95

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Fiziksel modele ait kütle, rijitlik ve sönüm değerleri..... 28
Çizelge 2. 2	x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları..... 32
Çizelge 2. 3	Sistemin matematik model yardımıyla hesaplanan kritik frekans değerleri..... 33
Çizelge 3. 1	Prototip kren ile fiziksel modelin büyüklükleri arasındaki ölçeklendirme oranları..... 40
Çizelge 3. 2	Ölçüm cihazları tarafından deney düzeneği üzerinden alınan ölçümler. 45
Çizelge 3. 3	x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları..... 48
Çizelge 3. 4	Sistemin deneysel olarak elde edilen kritik frekans değerleri 49
Çizelge 3. 5	Deneysel olarak ve matematik modelden elde edilen frekans cevaplarının karşılaştırılması 53
Çizelge 7. 1	Aktif titreşim kontrolü için benzetim çalışmalarında kullanılan kren sistemine ait kütle, rijitlik ve sönüm parametreleri 83
Çizelge 7. 2	El Centro depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 86
Çizelge 7. 3	Kocaeli depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları..... 88
Çizelge 7. 4	El Centro depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları 92
Çizelge 7. 5	Kocaeli depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları..... 94
Çizelge 7. 6	El Centro depremine maruz kren sistemi için kontrolsüz ve kontrollü durumların karşılaştırılması..... 97
Çizelge 7. 7	Kocaeli depremine maruz kren sistemi için kontrolsüz ve kontrollü durumların karşılaştırılması..... 97

**KRENLERİN SİSMİK ETKİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ
VE TİTREŞİMLERİNİN AKTİF KONTROLÜ**

C. Oktay AZELOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Depremelerin krenlere verdiği hasarların önemi ancak 2000’li yıllara yaklaşıldığında anlaşılmaya başlanmıştır. Depremelerin krenler üzerindeki etkisinin geç fark edilmesinin bir nedeni, büyük kapasiteli krenlerin yakın zamana kadar çok yaygın bir şekilde kullanılmamasıdır. Ancak son yıllarda dünya çapında üretim ve tüketimin artmasının doğal bir sonucu olarak daha büyük gemiler, daha büyük limanlar ve dolayısıyla daha büyük krenler kullanılmaya başlanmıştır. Diğer bir neden ise, krenler üzerindeki deprem etkilerini gözlemleyecek önemli bir deneyimin olmamasıdır. Ancak 1995 Kobe depreminin krenler üzerindeki yıkıcı etkisi bu konunun önemini ortaya koymuştur. Bu depremde krenlerin kolayca hasar görmeleri ve yıkılmaları krenlerin depreme karşı dayanıklı hale getirilmesini gündeme getirmiştir. Bu tarihten sonra krenlerin sismik performanslarını arttırmak için çeşitli çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır. Bu problemi, “krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemi” olarak tanımlamak mümkündür. Bu problemin çözümü için önerilen yöntemlerden biri de, kren yapısına gelen titreşimlerin aktif kontrol yolu ile azaltılmasıdır.

Bu doktora tezinin amacı, krenlerin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli bir matematik model geliştirmek ve geliştirilen matematik modeli kullanarak kren yapısında oluşan titreşimleri aktif kontrol yoluyla azaltmaktır. Aktif titreşim kontrolü için eyleyici doyumlu bir kontrol algoritmasının geliştirilmesi

amaçlanmıştır. Bu kapsamda tez, geliştirilen matematik model, krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak sunulan yöntem (aktif titreşim kontrolü) ve tasarlanan kontrol algoritması (eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolör) ile literatüre pek çok alanda katkı sağlamaktadır.

Bu hedefler doğrultusunda tez, iki ana kısımdan oluşmaktadır. İlk ana kısımda, depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan, çok serbestlik dereceli bir matematik model geliştirilmiş ve matematik modelin doğruluğu 1/20 ölçekli kren modeli üzerinde sarsma masasında gerçek deprem verileri kullanılarak yapılan deneyler yoluyla doğrulanmıştır. Geliştirilen matematik model yardımıyla, krenlerde deprem etkilerinin incelenmesi, dinamik etkilerin gözlemlenebilmesi yoluyla uygun konstrüktif tedbirlerin alınması ve aktif-pasif kontrol yöntemleri ile depreme karşı stabilitelerinin sağlanması mümkün olacaktır.

İkinci ana kısımda ise, krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak aktif titreşim kontrolü önerilmiş ve bu amaçla kontrol algoritması tasarımı yapılmıştır. Son yıllarda, depremde kaynaklanan titreşimleri izole etmek için aktif kontrol uygulamaları öneren çalışmalar hız kazanmıştır. Krenlerde depremde kaynaklanan titreşimlerin aktif titreşim kontrolü yoluyla azaltılması yeni ve gelişmeye açık bir konudur. Bu yolla krenlerin sismik performanslarını arttırmak için yeni bir yöntem önerilmiştir.

Son dönemlerde, dayanıklı kontrol tekniklerinin çözümünde yaşanan gelişmelere paralel olarak birçok mühendislik probleminin çözümünde H_2 ve H_∞ kontrol yapıları sıklıkla tercih edilmektedir. Aktif titreşim kontrolü uygulamaları bu problemlerin en önemlilerinden biridir. Özellikle Japonya ve Amerika’da uygulama alanı bulan aktif kontrol tekniklerinde, kontrol algoritması olarak sıklıkla H_2 ve H_∞ gibi dayanıklı kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni, sistemin bozucu girişlerden etkilenmesinin engellenmesi için bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu minimum yapma düşüncesiyle ortaya çıkan H_∞ kontrol yapısının deprem gibi şiddeti ve özellikleri önceden bilinmeyen bozucu girişlerin etkisi altındaki yapısal sistemler için son derece uygun bir kontrol algoritması olmasıdır. Ancak, H_∞ kontrol tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir. Kapalı çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti edemez. H_2 kontrol ise geçici rejim cevaplarında daha başarılıdır. Bu nedenle bu doktora tezinde, arzu edilen frekans ve geçici rejim cevaplarının elde edilebilmesi için, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) yaklaşımıyla uygun bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrol yapısı kullanılmıştır. Ancak, aktif yapısal kontrolün önemli bir problemi sismik yüklerin rastlantısal durumlarından dolayı, ihtiyaç duyulan gerekli kontrol kuvvetinin, uygulamada kullanılan eyleyicilerin kapasitelerini aşabilmesidir. “Eyleyici doyumu problemi” olarak adlandırılan bu durum, sistemin kapalı-çevrim performansında ciddi bozulmalar doğurabilir ve bununla birlikte kararsızlığa neden olabilir. Bu problemin giderilmesi ve önerilen yöntemin pratikte uygulanabilir olabilmesi için, tasarlanan karma H_2/H_∞ kontrol mimarisine eyleyici doyumu olayı DME kısıtları şeklinde dahil edilmiştir. Bu sayede, optimum performansı sağlayan, eyleyici doyumu limitine bağlı olarak pratikte uygulanabilir durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması elde edilmiştir.

Sonuç olarak, önerilen kontrol algoritmasının ve aktif kontrol sisteminin etkinliği depreme maruz bir krenin zaman ve frekans cevaplarının verildiği benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Gerçek deprem kayıtlarının kullanıldığı benzetim çalışmalarının sonuçları, önerilen kontrol algoritmasının, belirlenen eyleyici doyumu kısıtlarında sistemin kararlılığını garanti altına aldığını ve krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Krenler, Yapısal Titreşimler, Doğrusal Olmayan Matematik Model, Sarsma Masası Deneyleri, Ölçekli Kren Modeli, Aktif Titreşim Kontrolü, Doğrusal Matris Eşitsizlikleri, Karma H_2/H_∞ Kontrol, Eyleyici Doyumu.

**MODELING OF THE BEHAVIORS OF CRANES UNDER SEISMIC EFFECT
AND ACTIVE CONTROL OF VIBRATIONS**

C. Oktay AZELOĞLU

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ahmet SAĞIRLI

Importance of earthquake damages on Crane structures is understood at the beginning of 2000s. One of the main reasons of this late perception is the usage of heavy capacity cranes is not so prevalent. But on recent years mass production and consumer behaviors entailed the usage of huge ships, bigger harbors, therefore heavy capacity cranes are needed and constructed widely. Another reason is that there is no such experience to see the effect of earthquakes on crane structures. But on 1995 the destructive effect of Kobe earthquake on crane structures is showed the importance of the subject. On this earthquake, crane structures are damaged easily, therefore earthquake resistant crane structures are needed. After the date of Kobe earthquake, improving the seismic performance of crane structures are studied both in academia and industry. The problem could be defined as “the problem of minimizing the earthquake caused structural vibrations on cranes.” One of the recommended solutions to the problem is active control of vibrations on crane structures.

The main purpose of this Phd thesis to develop a multi degree of freedom mathematical model to fulfill the dynamic behavior of crane structures under seismic loading, and to reduce vibrations using active control technique. For active vibration control, an actuator saturated control algorithm is developed. In this context, the

thesis, the developed mathematical model, presented as a solution to the problem of reducing the structural vibration caused by the earthquake (active vibration control) and the designed control algorithm (actuator saturated mixed H_2/H_∞ controller) contributes to the literature in many areas.

These objectives are in line with the thesis, consists of two main parts. The first main section, revealing the dynamic behavior of cranes subjected to earthquake, multi-degree of freedom mathematical model is a mathematical model was developed and the accuracy 1/20 scale model of the crane on the shaking table has been confirmed through experiments using real seismic datas. Investigation earthquake effects on cranes, observing dynamic effects, taking appropriate constructive precautions and with active-passive control procedures it will be able to ensure stabilities by developed mathematical model.

In the second main part, active vibration control has been suggested as a solution for reducing structural vibrations that are based on earthquake. For this purpose, the control algorithm has been designed. Recently, studies that suggest active control application for isolating of vibrations that are based on earthquakes have accelerated. Reducing structural vibrations that are based on earthquake subject is a new and open for improvement. By this way, for increasing seismic performance of cranes, a new method is suggested.

Recently, in parallel with improvements in solution of durable control techniques, in many engineering problems H_2 and H_∞ control structures have been preferred mostly. Active vibration control application is one of the most important one of these problems. The most important reason, in order to prevent the exposure of the system disturbance inputs from disturbant outputs, the idea of making the minimum norm of an infinite matrix, the resulting transfer functions H_∞ control structure be known in advance such as earthquakes, adverse entries in the severity and characteristics of structural systems under the influence of a control algorithm is well suited for. However, the H_∞ control design relates to the field of more frequency. A closed-loop system can not guarantee a good transient response. The transient responses of control are more successful than the H_2 . Therefore, the Phd thesis, in order to achieve the desired frequency and transient responses, H_2 and H_∞ control structures, linear matrix inequalities (LMI's), obtained in accordance with the hybrid approach, H_2/H_∞ control structure is used. However, the active structural control seismic loads a major problem because of incidental situation, the force necessary control is needed, the actuators used in these capacities. "Actuator saturation problem" referred to as this closed-loop performance of the system and may lead to serious deterioration, however, may cause instability. Overcome this problem and the proposed method to be applied in practice, designed a mixed H_2/H_∞ control were included in architecture in the form of actuator saturation constraints DME event. In this way, providing optimum performance, depending on the actuator saturation limit for back-feed actuators can be applied in practice fulfilled mixed H_2/H_∞ control algorithm is obtained.

In conclusion, the effectiveness of the proposed control algorithm, and the active control system subjected to earthquake simulation studies where a crane is shown time and frequency responses. The results of simulation studies using actual

earthquake records, the proposed control algorithm, which guarantees the stability of the system and the Cranes actuator saturation constraints arising from the earthquake shows that it has significant potential to reduce structural vibration.

Keywords: Cranes, Structural Vibrations, Nonlinear Mathematical Model, Shake Table Experiments, 1/20 Scale Model Crane, Active Vibration Control, Linear Matrix Inequalities, Mixed H_2/H_∞ Control, Actuator Saturation.

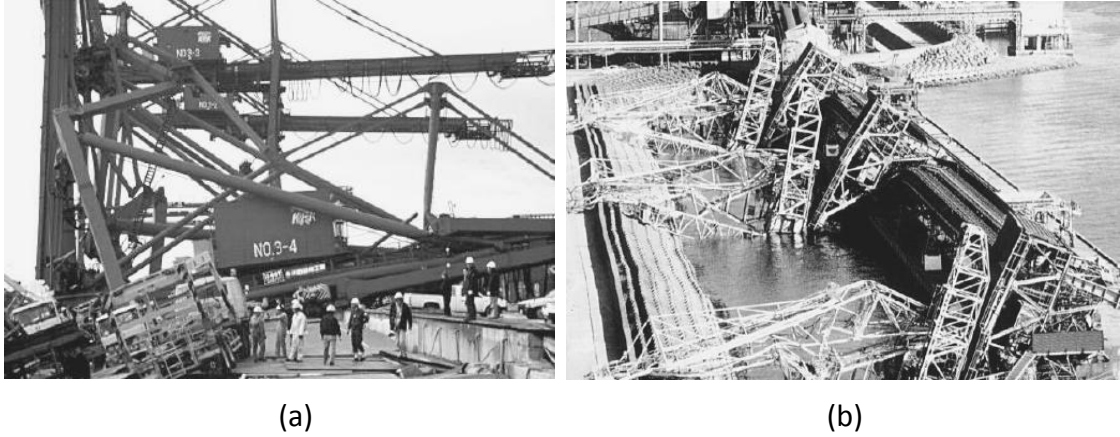
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Depremlerin krenlere verdiği hasarların önemi ancak 2000'li yıllara yaklaşıldığında anlaşılmaya başlanmıştır. Depremlerin krenler üzerindeki etkisinin geç fark edilmesinin bir nedeni, büyük kapasiteli krenlerin yakın zamana kadar çok yaygın bir şekilde kullanılmamasıdır. Ancak dünya çapında üretim ve tüketimin artması mamul ve yarı mamullerin transferini hızlandırmış, ürünlerin tek seferde hızlı bir şekilde taşınması ihtiyacını doğurmuştur. Bunun sonucu olarak daha büyük gemiler, daha büyük limanlar ve daha büyük krenler kullanılmaya başlanmıştır. Diğer bir neden ise, krenler üzerindeki deprem etkilerini gözlemleyecek önemli bir deneyimin olmamasıdır. Ancak 1995 Kobe depreminin krenler üzerindeki yıkıcı etkisi bu konunun önemini ortaya koymuştur. Bu depremde krenlerin kolayca hasar görmeleri, kullanılamaz hale gelmeleri ve yıkılmaları krenlerin depreme karşı dayanıklı hale getirilmesini gündeme getirmiştir. Bu tarihten itibaren krenlerin sismik performanslarını arttırmak için çeşitli çalışmalar yürütülmeye başlanmıştır. Şekil 1.1'de 1995 Kobe depreminde yıkılan bir kren görülmektedir (Fotoğraflar; (a) C. Scawthorn, (b) Courtesy EQE International).

Şimdiye kadar krenler üzerine yapılmış sismik çalışmalar iki amacı hedef edinmişlerdir. Çalışmaların bir kısmı kren yapısının deprem esnasındaki dinamik davranışlarını belirlemeyi, bir kısmı ise bu probleme çözüm önerileri sunmayı hedeflemiştir. Kren yapısının deprem esnasındaki dinamik davranışlarını belirlemeyi hedefleyen çalışmalarda genellikle ölçekli bir fiziksel model oluşturularak sarsma masası üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda depremlerin en tehlikeli yıkıcı etkisi olan yatay etki göz önüne alınmış ve deprem hareketinin krenin en kritik eksenini boyunca olduğu kabul edilerek çalışmalar tek ekseninde yürütülmüştür.

Deneyisel alışmalar kren yapısının deprem esnasındaki dinamik davranışlarını belirlemek konusunda oldukça etkili olmaktadır. Ancak literatürde, krenlerde yapısal titreşimlerin analizinde kullanılmak üzere kren yapısının dinamiğini gerçekçi olarak yansıtan etkili bir matematik modele ihtiyaç duyulmaktadır. Bu şekilde deneyisel çalışmalara ihtiyaç duyulmaksızın benzetim çalışmaları yoluyla krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını belirlemek mümkün olacaktır.



şekil 1. 1 Kobe depreminde yıkılan krenler

Bu doktora tez çalışmasında, öncelikle sismik etkilere maruz bir krenin dinamik davranışlarının gözlemlenebileceği bir matematik model geliştirilmiştir. Sistemin hareket denklemlerinin oluşturulmasında Lagrange yönteminden faydalanılmıştır. Ayrıca geliştirilen matematik modele zeminin ve tekerlek mekanizmasının dinamiği de dahil edilmiştir. Ardından geliştirilen matematik modeli doğrulamak amacıyla prototip bir konteyner kreninin 1/20 ölçekli fiziksel modeli hazırlanmış ve fiziksel model üzerinde sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçek deprem verileri kullanılarak bom eksenini doğrultusunda yapılmış ve elde edilen deneyisel sonuçlar geliştirilen matematik modelin benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Teorik ve deneyisel sonuçların zaman ve frekans alanında karşılaştırılması matematik modelin krenin dinamik davranışlarını başarı ile ortaya koyduğunu göstermektedir. Geliştirilen matematik modelin krenlerin aktif titreşim kontrolü çalışmalarında etkili şekilde kullanılabileceği görölmüştür.

Krenler üzerine yapılmış sismik çalışmaların bir kısmı da krenlerin sismik performanslarını arttırmayı hedeflemişlerdir. Mevcut problem “krenlerde yapısal titreşimlerin azaltılması problemi” olarak da adlandırılabilir. Literatürde bu problemin

çözümü için farklı yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemler; kren yapısının ilave takviyeler ve donatılar ile güçlendirilmesi, zemin izolasyonu yoluyla kren yapısına gelen titreşimlerin azaltılması ve kren yapısına gelen titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılmasıdır. Bu doktora tezinde mevcut problemin çözümü için aktif titreşim kontrolü önerilmiştir.

Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yerdeğiştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler çok gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup, yapıda oluşan titreşimlerin etkilerini karşı bir hareket üreterek sönümlemeye çalışan kontrol sistemleridir. Son yıllarda yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmaları, elektronik endüstrisinin gösterdiği ilerlemelere paralel olarak uygulamaya konulabilecek düzeye erişmiştir. Aktif kontrol sistemleri ilk olarak Japonya'daki yapısal sistemlerde uygulanmaya başlanmış ve günümüzde birçok yapı bu teknoloji ile donatılmıştır. Aktif titreşim kontrolü genel olarak iki kısımdan meydana gelir. Birincisi, sisteme dışarıdan uygulanacak kuvveti yapıya tatbik edecek olan aktif kontrol mekanizması; ikincisi ise, sensörlerden gelen bilgiyi değerlendirip eyleyici tarafından üretilmesi gereken kontrol kuvvetini hesaplayan kontrol algoritmasıdır. Aktif Ayarlı Kütle Damperi (AAKD), aktif tendon ve MR (Manyeto-reolojik) damper, hidrolik eyleyiciler kontrol mekanizmalarına örnek olarak verilebilir. Gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan algoritmalara ise, dayanıklı kontrol (H_2 ve H_∞ , Kayan Kipli Kontrol), Bulanık Mantık Kontrol (BMK) ve Adaptif Kontrol yöntemleri örnek olarak verilebilir. Yapılan teorik ve pratik çalışmalar, yapısal sistemlerin bozucu etkiler karşısındaki titreşimlerinin etkin bir şekilde azaltılmasında, aktif kontrol sistemlerinin yarı aktif ve pasif kontrol sistemlerine göre daha üstün sönüm performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Aktif kontrol sistemlerinin tasarımında seçilecek kontrol algoritmasının, özellikle yapıya zemin yoluyla iletilen sismik etkileri azaltmada çok önemli rol oynadığı bilinmektedir. Bu doktora tezinde, aktif kontrol uygulaması için kontrol mekanizması olarak hidrolik eyleyiciler, kontrol algoritması olarak durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tercih edilmiştir. Son dönemlerde, dayanıklı kontrol tekniklerinin çözümünde yaşanan gelişmelere paralel olarak birçok mühendislik probleminin çözümünde H_2 ve H_∞ kontrol yapıları sıklıkla tercih edilmektedir. Aktif

titreşim kontrolü uygulamaları bu problemlerin en önemlilerinden biridir. Özellikle Japonya ve Amerika'da uygulama alanı bulan aktif kontrol tekniklerinde, kontrol algoritması olarak sıklıkla H_2 ve H_∞ gibi dayanıklı kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Bunun en önemli nedeni, sistemin bozucu girişlerden etkilenmesinin engellenmesi için, bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu minimum yapma düşüncesiyle ortaya çıkan H_∞ kontrol yapısının, deprem gibi şiddeti ve özellikleri önceden bilinmeyen bozucu girişlerin etkisi altındaki yapısal sistemler için son derece uygun bir kontrol algoritması olmasıdır. H_∞ kontrol tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir. Kapalı çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti edemez. H_2 kontrol ise geçici rejim cevaplarında daha başarılıdır. Bu nedenle bu doktora tezinde, arzu edilen frekans ve geçici rejim cevaplarının elde edilebilmesi için kontrol algoritması olarak, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME) yaklaşımıyla uygun bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrol yapısı kullanılmıştır. Ancak, aktif yapısal kontrolün önemli bir problemi sismik yüklerin rastlantısal durumlarından dolayı, ihtiyaç duyulan gerekli kontrol kuvvetinin, uygulamada kullanılan eyleyicilerin kapasitelerini aşabilmesidir. Oysaki, pratikte eyleyiciler üzerinde çok sıkı değişim sınırlamaları bulunmaktadır. Eyleyici doyumu problemi olarak adlandırılan bu durum, kapalı-çevrim performansında ciddi bozulmalar doğurabilen, kapalı-çevrim kararlılığını bozabilecek kadar önemli bir problemdir. Bu problemin giderilmesi ve önerilen yöntemin uygulanabilir olması için eyleyici doyumu olayı, DME kısıtları şeklinde kontrol mimarisine eklenmiştir. Bu sayede, en iyi performansı sağlayan eyleyici doyumu limitine bağlı olarak pratikte uygulanabilir, durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritması elde edilmiştir.

Sonuç olarak önerilen kontrolörün etkinliği, sismik etkiye maruz bir krenin zaman ve frekans cevaplarının verildiği benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Gerçek deprem kayıtlarının kullanıldığı benzetim çalışmalarının sonuçları, önerilen kontrol algoritmasının belirlenen eyleyici doyumu kısıtlarında sistemin kararlılığını garanti altına aldığını ve krenlerde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Doktora tezi 8 bölümden oluşmaktadır. Sunulan bu giriş bölümü literatür özeti, tezin amacı ve orjinal katkısı gibi kısımları içermektedir. Tezin Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği, Deprem Mühendisliği ve İnşaat Mühendisliği gibi pek çok disiplini içeren bir çalışma olması literatür araştırmasını oldukça kapsamlı hale getirmiştir. Literatür özetinde, ilk olarak krenlerin depreme yönelik performanslarının arttırılması alanında bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalara değinilmiştir. Ardından yapısal sistemlerin aktif kontrolü alanında bugüne dek yapılmış önemli çalışmalar anlatılmıştır. Daha sonra tasarlanan kontrol algoritmasının geliştirilmesine katkı sağlayan çalışmalara değinilmiş ve sistemin dinamiği üzerinde olumsuz etkileri olan eyleyici doyumu problemi konusunda yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Ardından, doktora tezinin literatüre yapmış olduğu katkı vurgulanmıştır. Daha sonra, doktora tezinde çözülmesi amaçlanan problemler tanıtılarak tezin motivasyon nedeni ve amacı açıklanmış, son olarak tezin orjinal katkısı ortaya konmuştur.

Bölüm 2’de sismik etkiye maruz krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan bir matematik model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematik model çok serbestlik dereceli, zemin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren, doğrusal olmayan düzlemsel bir matematik modeldir. Matematik modele deneylerde kullanılan fiziksel modelin parametreleri ve bozucu giriş olarak deneylerde kullanılan ölçekli gerçek deprem kayıtları uygulanarak benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Bölüm 3’de, ölçekli bir kren modeli üzerinde sarsma masası deneyleri yapılmıştır. Gerçek deprem verileri kullanılarak yapılan deneysel çalışmalardan zaman ve frekans alanında sonuçlar elde edilerek kren modelinin titreşim analizi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Ardından, deneysel çalışmaların sonuçlarıyla benzetim çalışmalarının sonuçları zaman ve frekans alanında karşılaştırılarak geliştirilen matematik modelin etkinliği değerlendirilmiştir.

Bölüm 4’de, krenlerde aktif titreşim kontrolünün uygulanması üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, aktif titreşim kontrolünün yapısal sistemlerde nasıl uygulandığı ile ilgili bilgiler verilmiş, ardından yöntemin pratikte uygulanabilirliğinin arttırılması ve en etkin sönüm performansının elde edilebilmesi için, aktif kontrolün krende uygulanabileceği en etkin yerin belirlenmesine çalışılmıştır. Literatürde yer alan makalelerde, sismik

zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında kontrolörün yerleştirileceği yerin belirlenmesi genellikle deneme yanılma yoluyla ve genel geçer yaklaşımlarla yapılmaktadır. Bu doktora tezinde kontrolörün yerleştirileceği en uygun yer, kapalı-çevrim sisteminin yönetilebilirlik indeksinin analitik olarak bulunmasıyla matematiksel olarak belirlenmiştir.

Bölüm 5’de, kontrolör tasarımı en önemli araç olarak kullanılan doğrusal matris eşitsizlikleri ve dayanıklı kontrolün temelleri hakkında kısa tanımlar yapılmıştır. DME yaklaşımının kontrol problemine getirdiği yenilikler ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiş, DME’ler kullanılarak oluşturulan optimizasyon problemlerinde çözüm için yaygın olarak kullanılan ve DME aracının popülerlik kazanmasında başlıca rol oynayan iç nokta algoritmasının çalışma prensibi açıklanmıştır. Ardından, bu doktora tezinde geliştirilen kontrol algoritmaları için öne sürülen teoremlerin ispatları, yararlanılan yardımcı teorem ve yöntemler açıklanarak, DME tabanlı durum geri-beslemeli dayanıklı kontrolün temelleri ortaya konmuştur.

Bölüm 6’da aktif titreşim kontrolünde kullanılacak kontrol algoritmalarının tasarımı yapılmıştır. Öncelikle DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritmasının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ardından, kapalı çevrim performansında ciddi bozulmalara yol açabilen ve kararsızlığa neden olan eyleyici doyumu probleminin giderilebilmesi için tasarlanan karma kontrolör mimarisine eyleyici doyumu olayı DME kısıtları şeklinde dahil edilmiştir. Bu sayede, optimum performansı sağlayan eyleyici doyumu limitine bağlı olarak, pratikte uygulanabilir durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması geliştirilmiştir.

Bölüm 7’de depreme maruz krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrolü ile ilgili benzetim çalışmaları yapılarak, tasarlanan kontrolörlerin performansları incelenmiştir. Zaman ve frekans alanında yapılan analizler, karma H_2/H_∞ kontrolörün krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin azaltılmasında oldukça iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuş, ancak kontrol kuvvetinin uygulanabilir değerlerin üzerine çıkabileceğini göstermiştir. Bu problemin aşılması için tasarlanan eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolörün ise optimum performansı sağlayan eyleyici doyumu limitine bağlı olarak titreşimleri etkili şekilde bastırdığı benzetim çalışmaları ile gözlemlenmiştir.

Bölüm 8'de doktora tezi ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek tezin literatüre katkısı vurgulanmış, gelecekte bu alanda yapılabilecek yeni çalışmalarla ilgili görüş ve öneriler sunulmuştur.

1.1. Literatür Özeti

Bu bölümde, doktora tezine katkı sağlayan çalışmalar hakkında detaylı bir literatür araştırması sunulmuştur. Tezin Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği, Deprem Mühendisliği ve İnşaat Mühendisliği gibi pek çok disiplini içeren bir çalışma olması nedeniyle literatür araştırması oldukça kapsamlıdır. Literatür özetinde, ilk olarak krenlerin depreme yönelik performanslarının arttırılması alanında bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalara değinilmiştir. Ardından, tasarlanan dayanıklı kontrol algoritmasının geliştirilmesine katkı sağlayan çalışmalara değinilmiş ve sistemin dinamiği üzerinde olumsuz etkileri olan eyleyici doyumu problemi konusunda yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Daha sonra, yapısal sistemlerin aktif kontrolü alanında bugüne dek yapılmış çalışmalar anlatılmıştır. Son olarak, doktora tezinin literatüre yapmış olduğu katkı vurgulanmıştır.

1.1.1. Krenlerin Sismik Performansları İle İlgili Çalışmalar

Krenlerin sismik performansları üzerine yapılan çalışmalar kren yapısının deprem esnasındaki dinamik davranışlarını belirlemeyi ve bu probleme çözüm önerileri sunmayı hedeflemişlerdir.

Kanayama ve Kashiwazaki [1], konteyner krenlerinin dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, 1/25 ölçekli bir kren modeli oluşturulmuş ve sarsma masası üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylerde büyük depremlere ait kaydedilmiş veriler kullanılmıştır. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremlerin en tehlikeli yıkıcı etkisi olan yatay etki göz önüne alınmıştır. Çalışmada tekerleklerin raydan çıkması, ayaklarda burkulma ve devrilme olmak üzere krenlerin depremde maruz kaldığı üç temel hasar durumu incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmanın odak noktası krenlerin sismik davranışlarını gözlemlemek olmuştur.

Kanayama vd. [2], 1/8 ölçekli bir kren modeli oluşturmuş ve sarsma masası üzerinde gerçek deprem verileri kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremin yatay etkisi göz önüne alınmıştır. Çalışma krenlerin depremde maruz kaldığı üç temel hasar durumunu incelemiş ve kren yapısının deprem etkisi altındaki rijitliğinin gözlemlenmesi amacına odaklanmıştır.

Otani vd. [3], köprülü krenlerde deprem etkisi altında oluşan düşey etkileri incelemişlerdir. Bu amaçla 1/8 ölçekli bir köprülü kren modeli oluşturulmuş ve düşey eksenli bir sarsma masasında gerçek deprem verileri kullanılarak sistemde oluşan düşey titreşimler ve dinamik etkiler incelenmiştir.

Kobayashi vd. [4], konteyner krenlerinin sismik etkiler altındaki dinamik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada krenin tekerlek ray bağlantısına ait 1/8 ölçekli bir model oluşturulmuş ve sarsma masasında gerçek deprem verileri kullanılarak sistemde oluşan dinamik etkiler incelenmiştir. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremin yatay etkisi göz önüne alınmıştır. Çalışma deprem esnasında tekerlek-ray bağlantısının kontak problemini ve raydan çıkma davranışını incelemek üzerine odaklanmıştır.

Soderberg ve Jordan [5], Koshab ve Jacobs [6], Jacobs vd. [7], jumbo konteyner krenlerinin deprem etkisi altındaki davranışlarını ortaya koyacak çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda, bir jumbo konteyner krenin 1/20 ölçekli bir modeli üzerinde sarsma masasında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremin yatay etkisi göz önüne alınmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan bir model üzerinde benzetim çalışmaları yapılmış ve kren yapıları için bir takım konstrüktif tedbirler ortaya konmuştur. Bu çalışmalar, mevcut probleme çözüm olarak konstrüktif tedbirler sunmaktadır. Alınacak konstrüktif tedbirler bazı yerlere ilave kirişlerin yerleştirilmesi, kiriş kesitlerinin ilave takviyeler ile güçlendirilmesi üzerinedir. Ayrıca, Mitsubishi firması tarafından gerçekleştirilen bir izolasyon sistemi de önerilmiştir. Bu sistem ayaklar ile yürütme mekanizması arasına bir sönümleme mekanizmasının yerleştirilmesi temeline dayanmaktadır.

Sugano vd. [8], farklı yöntemler kullanarak depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını teorik olarak incelemiş, ayrıca 1/15 ölçekli bir kren modeli oluşturarak sarsma masası üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. Teorik çalışmada, kren modeli tek serbestlik dereceli basit bir kütle-yay sistemi olarak modellenmiş, ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle iki ve üç boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremin yatay etkisi göz önüne alınmıştır. Çalışma, mevcut probleme çözüm olarak titreşim izolasyonu önermektedir. Bu amaçla, deneylerde depremden kaynaklanan titreşimleri sönmüleyecek bir izolasyon sistemi test edilmiştir. Sonuçlar, önerilen sistemin kullanılması durumunda kren yapısına gelen ivmelerin azaldığını göstermektedir.

Jin ve Li [9], prototip bir konteyner kreninin 1/50 ölçekli modelini hazırlamış ve model kren üzerinde frekans alanında deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca çalışmanın teorik kısmında sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturdukları model üzerinde mod şekillerini frekans cevaplarını elde etmiş ve sonuçları karşılaştırmışlardır.

Sağırlı ve Azeloğlu [10], portal krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını teorik olarak incelemiş, ayrıca 1/20 ölçekli bir portal kren modeli oluşturarak sarsma masası üzerinde gerçek deprem verilerini kullanarak deneyler gerçekleştirmiştir. Teorik çalışmada, portal krenlerin deprem etkisi altındaki dinamik davranışlarını ortaya koyan, zeminin dinamiğini de içeren, çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir matematik model geliştirmişlerdir. Deneyler bom eksenini doğrultusunda tek eksenli olarak yapılmış ve depremin yatay etkisi göz önüne alınmıştır. Benzetim çalışmaları ve deneyler yoluyla elde edilen sonuçlar, portal krenler için geliştirilen matematik modelin sistemin dinamiğini etkili şekilde yansıttığını ortaya koymaktadır. Geliştirilen matematik model yardımıyla, portal krenlerde deprem etkilerinin hesaplara katılması ve sisteme aktif-pasif titreşim kontrolü uygulanabilmesi mümkün olacaktır.

Sağırlı, Edinçliler ve Azeloğlu [11], konteyner krenlerinin sismik performanslarının artırılması üzerinde çalışmaktadırlar. Çalışma konteyner krenlerinde depremden kaynaklanan yapısal titreşimlerin zeminde yapılacak iyileştirmeler yoluyla azaltılması üzerine odaklanmıştır.

Sağırlı vd. [12], portal krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak aktif titreşim kontrolünü önermişlerdir. Bu çalışma, aktif titreşim kontrolünün kren yapılarına uygulandığı literatürde yer alan ilk çalışmadır. Çalışmada, [10]'da ortaya konulan matematik model kullanılarak sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Çalışmada kontrol algoritması olarak Öz Uyarlamalı Bulanık Mantık Kontrol (ÖUBMK) algoritması tasarlanmıştır. Benzetim çalışmalarında bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi kullanılmış ve tasarlanan kontrolörün performansı klasik PD kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar portal krenlerde aktif titreşim kontrolünün başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir.

Azeloğlu ve Sağrılı [13], konteyner krenlerinde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak aktif titreşim kontrolü önermişlerdir. Çalışmada, bu doktora tezinde geliştirilen matematik model kullanılarak sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Çalışmada kontrol algoritması olarak ÖUBMK algoritması tasarlanmış ve benzetim çalışmalarında bozucu giriş olarak 1995 Kobe depreminin yer hareketi kullanılmıştır. Sonuçlar konteyner krenlerinde aktif titreşim kontrolünün başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir.

Azeloğlu vd. [14], konteyner krenlerinde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, bu doktora tezinde geliştirilen matematik model kullanılarak sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır. Çalışmada kontrol algoritması olarak Bulanık Mantık PID kontrol (BMPIDK) algoritması tasarlanmıştır. Benzetim çalışmalarında bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi kullanılmıştır. Sonuçlar kontrolörün depremde kaynaklanan titreşimleri etkili şekilde sönümlediğini göstermiştir.

Azeloğlu ve Sağrılı [15], konteyner krenlerinde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak durum geri beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritması ile aktif titreşim kontrolü önermişlerdir. Çalışmada, bu doktora tezinde geliştirilen matematik model kullanılmış, durum geri beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolörün tasarımı yapılarak kren yapısına aktif kontrol uygulanmıştır. Çalışmada kren yapısına bozucu giriş olarak 1999 Marmara Kocaeli depreminin verileri

uygulanmıştır. Sonuçlar konteyner krenlerinin aktif titreşim kontrolünde karma H_2/H_∞ kontrolörlerin başarıyla uygulanabileceğini göstermiştir.

1.1.2. Dayanıklı Kontrol İle İlgili Çalışmalar

Bu doktora tezinde mevcut problemin çözümü için aktif titreşim kontrolü önerilmektedir. Bu amaçla tezde, çeşitli dayanıklı kontrol algoritmaları tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu kısımdan itibaren doktora tezinde incelenen, DME yaklaşımıyla H_2 ve H_∞ optimizasyon kontrol problemi, eyleyici doymu ve dayanıklı kontrolör tasarımına yönelik literatür araştırması verilmektedir.

Geri-beslemeli kontrol sistemi tasarımlarının temel amaçlarından biri bozucuların sistem cevabı üzerindeki etkilerinin azaltılmasıdır. Bozucuların etkilerinin optimum olarak azaltılması, çeşitli performans ölçütlerinden biri seçilerek yapılır. Bu davranış ölçütlerinin en önemlilerinden biri, denetlenen çıkışlar ile bozucular arasındaki transfer fonksiyonu matrisinin H_∞ normudur. H_∞ optimizasyon kontrol probleminin çözümüne ait ilk çalışmalar, Francis [16] ve Doyle vd. [17] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, H_∞ optimizasyon problemi, sistemin durum-uzay modeli göz önüne alınarak Riccati denklemlerinden yararlanılarak çözülmüştür. Daha sonra, günümüzde de kontrol alanında sıkça kullanılan ve ilk defa basit olarak Lyapunov'un kararlılık analizinde ortaya çıkan DME yaklaşımı ile H_∞ kontrol probleminin çözümüne yeni bir yaklaşım getirilmiştir [18].

Dayanıklı kararlılık ve dayanıklı kontrol problemlerinin çözümünde, Lyapunov fonksiyonu temelli tasarım sıklıkla kullanılmaktadır. Gahinet ve Apkarian [19], Chilali ve Gahinet [20] yaptıkları çalışmalarla; H_∞ optimizasyon kontrolü, H_2 optimizasyon kontrolü, kutup yerleştirme, dayanıklı kutup yerleştirme gibi birçok kontrol probleminin DME yaklaşımı ile çözülebileceğini ortaya koymuşlardır. Ancak DME yaklaşımının ürettiği çözümlerin tutucu olması araştırmacıları yeni arayışlara yönlendirmiş ve daha az tutucu kontrol tasarımlarının elde edilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Daha az tutucu kontrol yapılarının geliştirilmesi için, Gahinet vd. [21], de Oliveira vd. [22], [23], [24] sistem parametrelerine bağımlı Lyapunov fonksiyonu kullanarak kontrolör tasarımları gerçekleştirmişlerdir. Oliveria vd. [25] ve

Sato [26], geliştirdikleri sistem parametrelerine bağlı çok terimli Lyapunov fonksiyonu tabanlı yaklaşım ile DME'ler üzerinde yeni açılımların oluşmasına zemin hazırlamışlardır. Scherer [27], DME gevşetmeleri üzerine yaptığı çalışma ile tutuculuğun azaltılması için iki yeni gevşetme yöntemi sunmuştur.

Boyd vd. [28] kitaplarında, DME yaklaşımının kontrol problemlerinin üzümünde kullanılması ncelemişlerdir. DME yaklaşımının sistem teorisi ve kontrol problemlerinin zmne getirdiği yenilikler ve kolaylıklar ele alınmıştır.

Chilali vd. [29], DME yaklaşımıyla çok amaçlı çıkış geri-beslemeli kontrolör analizi ve sentezi üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Akın [30], yüksek lisans tezinde H_∞ optimizasyon kontrol probleminin doğrusal matris eşitsizlikleri ile zm üzerine çalışmıştır. Tezde, DME yaklaşımının kontrol problemlerinin zmne getirdiği yenilikler vurgulanarak değişik sistemler için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Akın [31] doktora tezinde, H_∞ model eşleme problemini dinamik ve statik durum geri-besleme biçimleriyle önce H_∞ optimizasyon kontrol problemine indirgemiş, daha sonra DME tabanlı yeni bir H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmiştir.

Löfberg [32], yaptığı çalışmayla MATLAB paket programı için DME'lerin üzümünde kullanılmak üzere yeni bir ayrıştırıcı yazılımı geliştirmiştir. DME'lerin üzümünde kullanılan ve YALMIP adı verilen bu ayrıştırıcı yazılımı, son yıllarda yapılan birçok çalışmada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kontrolör tasarımlarında, kapalı-çevrim kararlılığı üzerinde olumsuz etkileri bulunan doğrusal olmayan yapıdaki eyleyici doyumunu problemi son yıllarda oldukça ilgi çeken bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bilindiği gibi pratikteki geri-beslemeli kontrol uygulamalarında kullanılan eyleyiciler üzerinde çok sıkı sınırlamalar bulunmaktadır. Bu nedenle, son dönemlerde enerjisi sınırlı bozucu etkisi altındaki sistemlerin L_2 kararlılığını garanti eden ve aynı zamanda eyleyici giriş sinyalinin eyleyici doyum sınırları içerisinde kalması şartını sağlayan kontrolör tasarımı üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır [33], [34].

Eyleyici doyumu konusunda yapılan ilk çalışmalar; problemin optimizasyon kontrol teorisine göre çözümü (Hsia [35]), hata yönetimi yaklaşımı (Kapasouris vd. [36]), anti-windup kompanzasyonu (Astrom ve Rundqwsit [37]), Riccati ve Lyapunov tabanlı kararlılık problemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde eyleyici doyumlu sistemler için; bozucu bastırma, belirsizlikler ve zaman gecikmelerine karşı dayanıklılık, performans kaybı gibi problemler üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Castelan vd. [38], çalışmalarında enerjisi sınırlı bozucu etkisi altındaki eyleyici doyumlu doğrusal sistemlerin kontrol problemini incelemişlerdir. Kontrolör tasarımı, karesel Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Kapalı-çevrim kararlılığını ve kapalı-çevrim sınırlı kazanç L_2 kararlılığını garanti edecek durum geri-besleme kazancı, DME kısıtları şeklinde elde edilmiştir.

Pan ve Kapila [39], ayrık zamanlı sistemler için eyleyici doyumu problemi üzerine çalışmışlardır. Makalelerinde, doyumlu eyleyici genliği ve değişimi içeren ayrık zamanlı sistemler için DME tabanlı durum ve çıkış geri-beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, tutuculuğu azaltacak yönde kararlılık çarpanlarının belirlenmesi için yeni bir metot sunmuşlardır. Önerilen kontrolörün etkinliği iki sayısal örnekle ortaya konulmuştur.

Tarbouriech ve Garcia [40], Riccati ve DME yaklaşımıyla, eyleyici doyumlu belirsizlik içeren sistemler için dayanıklı çıkış geri-beslemeli kontrolör tasarlamışlardır. Çalışmada, normu sınırlı zamanla değişen parametre belirsizliği yapısı kullanılmıştır. Önerilen kontrolör kapalı-çevrim sistem için dayanıklı kararlılık ve dayanıklı performans sağlarken, açık çevrimli kararsız sistemler için de yerel kararlılık sağlamaktadır. Çalışmanın literatüre sunduğu yenilik ise, eyleyici doyumu olayının politopik bir şekilde gösterilmiş olmasıdır. Önerilen kontrolörün performansı iki farklı sayısal örnekle gösterilmiştir.

Iwasaki ve Fu [41], kontrol girişlerinin genlikleri sınırlı olan, zamandan bağımsız doğrusal sistemler için dinamik çıkış geri-beslemeli bölgesel H_2 performans problemi üzerine çalışmışlardır. Makalelerinde, kapalı-çevrim kararlılığı altında arzu edilen H_2 performansını sağlayabilmek için dairesel ve doğrusal analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Doğrusal analiz yöntemi doyumun aktif olmadığı bölgelerde

kullanılırken, dairesel analiz yöntemi durum uzayında eyleyicilerin doyumlu olduğu bölgeler için kullanılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği sayısal benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Delibaşı [42], doktora tezinde doyumlu eyleyicilere sahip doğrusal parametre değişimli sistemler için dayanıklı kontrolör tasarımı gerçekleştirmiştir. Tezde, parametrelerine bağımlı homojen çok terimli gösterimi ile yeni bir H_2 norm hesabı sunulmuştur. Daha sonra, parametrelerine bağımlı homojen Lyapunov fonksiyonu ile doğrusal parametreleri değişen sistemler için L_2 kazanç minimizasyonu yapılmıştır. Enerjisi sınırlı bozucu etkisi altındaki doyumlu eyleyicilere sahip doğrusal parametreleri değişen sistemlerde karma L_2 , H_2 kontrol tasarımı için sistematik olarak tutuculuğun azaltıldığı yeni bir yöntem ortaya konulmuştur.

1.1.3. Yapısal Titreşimlerin Aktif Kontrolü İle İlgili Çalışmalar

Bu doktora tezinde, krenlerde depremde kaynaklanan titreşimlerin azaltılması probleminin çözümü için aktif titreşim kontrolü önerilmektedir. Dolayısıyla, bu kısımdan itibaren, değişik bozucu girişler etkisi altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrol yoluyla azaltılması konusunda literatürde yer alan çalışmalara değinilmektedir. Yapısal sistemlerin bozucu etkisindeki titreşimlerinin azaltılması probleminin çözümü için çok disiplinli bir mühendislik çalışmasının yapılması gerekmektedir. Problemin çözümü için Makine Mühendisliği, Kontrol Mühendisliği, Deprem Mühendisliği ve İnşaat Mühendisliği gibi farklı disiplinlerin ortak çalışmasına gereksinim duyulmaktadır. Günümüzde aktif titreşim kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılmakta olup, sadece Japonya'da 2000 yılından önce 35 bina bu teknoloji ile donatılmıştır (Majia [43]).

Soong ve Constantinou [44] kitaplarında, sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin azaltılması çalışmalarında kullanılan aktif-pasif kontrol sistemlerini örnek uygulamalarla açıklamışlardır. Kitapları, bu alanda temel kaynak niteliğindedir.

Kelly [45] kitabında, deprem verilerinden elde edilen bozucu girişlerin modellenen yapıya iletilmesi ve oluşan titreşimlerin azaltılmasında pasif kontrol tekniklerinin tasarımı üzerine bilgiler vermiştir.

Erdik ve Yüzügüllü [46] kitaplarında, yapısal sistemlerin modellenmesi, doğal titreşim mod ve frekanslarının belirlenmesi, yapıların doğrusal olmayan davranışları ve yanal burulma davranışları üzerine bilgiler vermişlerdir. Ayrıca bu kitap, yapısal sistemlerin dinamik davranışlarının zorlanmış titreşim deneyleri ile tespit edilmesi ve rezonans eğrisi yardımıyla sönüm değerlerinin bulunması gibi oldukça yararlı bölümlerden oluşmaktadır.

Kasımzade [47] kitabında, yapıların modellenmesi, deprem verilerinin yapıya bozucu giriş olarak iletilmesi, deprem yönetmeliğine göre yapı tasarımı ve çok katlı yapılar için zemin izolasyonu uygulamalarının yer aldığı, teorik bilgilerin pratik uygulamalarla desteklendiği bilgiler sunmuştur.

Gawronski [48] kitabında, yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için LQR, LQG, H_2 ve H_∞ kontrolör tasarımları üzerine çalışmalarını yayınlamıştır. H_2 ve H_∞ kontrol problemleri Riccati denklemlerinden yararlanılarak çözülmüştür. Modellenen yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için tasarlanan kontrolörlerin sönüm performansları benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında, kullanılan kontrol algoritmasının sönüm performansı üzerindeki en önemli etken olduğu bilinmektedir. Bu alanda kullanılacak kontrol algoritmasından, pratikte uygulanabilir, dayanıklı, ayar parametresi gerektirmeyen, en düşük kontrol kuvvetiyle en iyi performansı gösterebilen bir algoritma olması beklenir. Gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan algoritmalara örnek olarak, dayanıklı kontrol (H_2 ve H_∞ , Kayan Kipli Kontrol), Bulanık Mantık Kontrol (BMK) ve Adaptif Kontrol yöntemleri örnek olarak verilebilir. Günümüze kadar pek çok araştırmacı yarı-aktif kontrol yolu ile (Aldemir [49], Aldemir [50]), geliştirdikleri BMK algoritmaları (Yazıcı ve Güçlü [51], Park vd. [52], Güçlü ve Yazıcı [53], Al-dawod vd. [54], Güçlü [55], Yazıcı [56], Güçlü ve Yazıcı [57], Güçlü ve Yazıcı [58], Güçlü ve Yazıcı [59], Alli ve Yakut [60]) ve Adaptif kontrol yöntemleri (Agarwala vd. [61], Ikhoulane vd. [62]) ile problemin çözümüne önemli katkılar sunmuşlardır. Sistemin bozucu girişlerden etkilenmesinin engellenmesi için, bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu en küçük yapma düşüncesiyle ortaya çıkan H_∞ kontrol yapısı, deprem gibi

sınırlı enerjiye sahip, şiddeti ve özellikleri önceden bilinemeyen bozucu girişlerin etkisi altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için son derece uygun bir kontrol algoritmasıdır. Bu nedenle son dönemlerde birçok aktif kontrol uygulamasında, kontrol algoritması olarak H_∞ kontrolörler sıklıkla tercih edilmiştir (Güçlü ve Sertbaş [63], Yağız [64]).

Köse vd. [65], deprem etkisindeki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için statik çıkış geri-beslemeli H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Kat rijitlik ve sönüm değerlerinde belirsizlikler içeren üç ve altı katlı iki farklı yapının matematik modelleri elde edilmiştir. Sistemdeki belirsizlikler zamanla değişen normu sınırlı parametre belirsizliği yapısında oluşturularak sistemin dinamiğine eklenmiştir. Yapılan benzetim çalışmasıyla, önerilen kontrolörün etkinliği gösterilmiştir. Makalede kontrolörün, sensörlerin yerleştirileceği katın ve geri-besleme bilgisinin ne olması gerektiğine dair bilgilerin belirlenmesine yönelik değişik durumlar için benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu makale, özellikle yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında belirsizliklerin sistem dinamiği üzerindeki etkilerinin gösterilmesi ve detaylı benzetim çalışmalarıyla bu alandaki temel yayınlardan biri olmuştur.

Nanomi ve Sivrioğlu [66] yaptıkları çalışma ile, H_2 kontrol algoritmasının geçici rejim cevapları ve H_∞ kontrol algoritmasının frekans cevaplarını iyileştirmedeki etkisini, geliştirilen ortak çözüm yöntemiyle tek bir yapıda birleştirmişlerdir. Bu şekilde yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolü problemi için son derece uygun bir kontrol algoritması elde etmişlerdir. Dört katlı bir yapının titreşimlerinin aktif kontrolü için, DME yaklaşımıyla durum ve çıkış geri-beslemeli standart H_2 , H_∞ ve karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Önerilen karma H_2/H_∞ kontrolör hem geçici rejim cevaplarında hem de frekans cevaplarında standart H_2 ve H_∞ kontrolöre göre daha iyi cevaplar vermiştir.

Kim ve Choi [67], üç katlı yapısal bir sistemin deprem etkisindeki titreşimlerinin aktif kontrolü için dayanıklı H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Sistemdeki belirsizlik, normu sınırlı parametre belirsizliği yapısında modellenerek kat kütle, sönüm

ve rijitlik değerlerinin %10 değiştiği kabul edilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. Sistemdeki eyleyici doyumu problemi ise incelenmemiştir.

Fujinami vd. [68], Japonya Tokyo'da 23 katlı gerçek bir binada rüzgar ve depremlerin etkisiyle oluşan eğilme ve burulma titreşimlerinin aktif kontrolü için aktif hibrit kütle damperi kullanmışlardır. Aktif hibrit kütle damperinin sürülmesinde kontrol algoritması olarak H_∞ kontrol yöntemi kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmayla titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli bir başarı elde edilmiştir.

Wang vd. çalışmalarında [69], sistem ve kontrol girişi matrislerinde parametre belirsizliği ve bozucu giriş matrisindeki yapısal olmayan belirsizlik içeren sistemlerin aktif titreşim kontrolü için dayanıklı kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Yapısal belirsizlikler için özel bir tekil değer ayrışım yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada hem yapısal belirsizlikler hem de yapısal olmayan normu sınırlı belirsizlikler hesaba katılmıştır. Yapılan benzetim çalışmasında, 1940 El-Centro depremi etkisindeki dört katlı yapısal bir sistemin titreşimlerinin tasarlanan dayanıklı H_2 , H_∞ kontrolörler ile etkin bir şekilde azaltıldığı gösterilmiştir. Çalışmada, eyleyici doyumu problemi incelenmemiştir.

Du vd. [70], sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için kırılğan olmayan H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Kat kütle, sönüm ve rijitlik değerlerinin %10 belirsizlik içerdiği kabulüyle, parametre belirsizliği sistemin dinamiğine normu sınırlı belirsizlik yapısında eklenmiştir. Çalışmada, H_∞ performans indeksi yaklaşımı ve DME formülasyonu ile yeni bir dayanıklı gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli kontrolör yapısı geliştirilmiştir. Önerilen kontrolörün etkinliği, dört serbestlik dereceli bir yapısal sistem için yapılan benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Çalışmada, parametre belirsizliğinin üst sınırına herhangi bir algoritma ile ulaşılmamıştır. Gerekli kararlılık kısıtlarında bu üst sınır deneme yanılma yöntemiyle belirlenmiştir. Bununla beraber, sistemdeki parametre belirsizliği zamanla değişmeyen yapıda alınmıştır. Benzetim çalışmaları sonunda tasarlanan dayanıklı kırılğan olmayan H_∞ kontrolörün üstün sönüm performansı gösterdiği gözlenmiştir. Çalışmada, eyleyici doyumu problemi incelenmemiştir.

Huo vd. [71], yaptıkları deneysel çalışmada bozucu etkisindeki AAKD'li iki katlı model yapı için dayanıklı H_∞ kontrolör tasarlamışlardır. AAKD'li yapısal sistemlerde parametre belirsizliklerinin kapalı-çevrim sisteminde performans problemine neden olacağını öne sürmüşlerdir. Bu nedenle, kat kütle ve rijitlik değerlerindeki belirsizlikler, doğrusal kesirli dönüşüm yapısında sistemin dinamiğine dahil edilerek DME tabanlı H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, önerilen dayanıklı H_∞ kontrolör ile bozucu bastırma, yapısal parametre değişimlerine karşı performans ve kararlılık problemlerinin etkin bir şekilde çözülebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, çalışmada eyleyici doyumu problemi incelenmemiştir.

Yazıcı vd. [72], gerçek kat kütle, rijitlik ve sönüm değerlerine sahip dört katlı bir yapının 1994 Northridge depremi etkisindeki titreşimlerinin aktif kontrolü için DME tabanlı çıkış geri-beslemeli dinamik H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Önerilen kontrolör ile, yapısal titreşimlerin azaltılmasında yüksek sönüm performansı elde edilmiştir. Çalışmada eyleyici doyumu problemi incelenmemiştir.

Yazıcı ve Güçlü [73], deprem etkisindeki dört katlı yapısal bir sistemin titreşimlerinin aktif kontrolü için DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Modellenen yapıya, 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli depremi yer hareketleri bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Benzetim çalışmaları, önerilen kontrolörün hem zaman hem de frekans cevaplarında son derece başarılı sonuçlar verdiğini ve yüksek sönüm performansı sağladığını göstermektedir. Çalışmada eyleyici doyumu problemi incelenmemiştir.

Du ve Lam [74], sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin azaltılması için yeni bir statik çıkış geri-beslemeli kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Tasarım sonucunda karşılaşılan DOME probleminin çözümü için genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon metodu kullanarak arzu edilen eyleyici doyumu sınırlarında, kontrol kuvvetinin belirlenmesini sağlamışlardır. Önerilen kontrolörün sönüm performansı, yapılan benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Arzu edilen eyleyici doyumu sınırında, enerji-tepe performans tabanlı kontrolörün yapısal titreşimlerin tepe değerlerini bastırmada son derece başarılı olduğu gözlenmiştir.

Yazıcı [75], doktora tezinde sismik zorlanma altındaki sabit ve zamanla değişen eyleyici gecikmeli enerjisi sınırlı bozucu etkisinde, zamanla değişen parametrik belirsizliklere ve doyumlu eyleyiciye sahip yapısal sistemler için durum geri-beslemeli gecikmeye-bağlı H_∞ kontrolör tasarımı sunmuştur. Bu çalışma, parametre belirsizliği, eyleyici gecikmesi ve eyleyici doyumu olayının birlikte incelendiği literatürde yer alan ilk çalışmadır. Çalışmada, eyleyici doyumu olayı, DME kısıtları şeklinde kontrol algoritmasına eklenmiştir. Öne sürülen yöntem doyumlu eyleyicinin matematiksel ifadesini doğrusal geri-beslemeler ile oluşturulan bir dışbükey kabuk ile ifade etmek ve bu ifade üzerinden H_∞ kontrolör için DME şeklinde kısıtlamalar barındıran bir optimizasyon problemi içermektedir. Geliştirilen kontrolörün üstünlüğü yapılan benzetim çalışmalarıyla gösterilmiş ve belirlenen eyleyici doyumu kısıtlarında kontrol sisteminin maksimum gecikme zamanı ve parametre belirsizliği sınırlarındaki kararlılığının garanti altına alındığı ortaya konulmuştur.

Yapılan detaylı literatür araştırmasından da görüldüğü gibi, bu doktora tezi, geliştirilen matematik model, krenlerin sismik performanslarını arttırmak için önerilen yöntem ve tasarlanan kontrol algoritması ile literatüre çok yönlü bir katkı sağlamaktadır. Literatür araştırmasında değinilen, krenler için matematik model geliştirilmesi ve krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması konusundaki tüm çalışmalar bu doktora tezi bünyesinde yürütülen çalışmaların sonuçlarıdır. Bu doktora tezi ile literatüre, krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan matematik modeller sunulmuş, ayrıca krenlerde yapısal titreşimleri azaltmak için yeni bir yöntem olarak aktif titreşim kontrolü ve bunu gerçekleştirebilecek çeşitli kontrol algoritmaları kazandırılmıştır. Dolayısıyla, bu doktora tezi ve buna bağlı olarak yürütülen çalışmalar krenlerde yapısal titreşimlerin azaltılması probleminin çözümüne katkı sağlayarak literatürde yer alan boşluğu doldurmaktadır.

1.2. Tezin Amacı

Krenlerin depremde hasar görmeleri can kayıpları ile beraber büyük ekonomik kayıplar doğurmaktadır. Ayrıca büyük depremlerden hemen sonra bölge için hayati önem teşkil eden lojistik faaliyetler, özellikle limanlarda bulunan krenlerin hasar görmesi nedeniyle durmakta veya çok yavaş ilerlemektedir. Dolayısıyla krenlerin sismik performanslarının

arttırılması oldukça önemli bir konudur. Bu amaçla yürütülen çalışmalar iki ana başlık altında toplanabilir. Birinci grup, krenlerin deprem esnasındaki dinamik davranışlarını belirlemeye yönelik çalışmalar ve ikinci grup, krenlerin sismik performanslarını arttırmaya yönelik çalışmalardır. Bu doktora tezinde iki amaç bir arada yürütülerek krenlerin deprem esnasındaki dinamik davranışlarını ortaya koyan bir matematik model geliştirilmiş ve bu matematik model kullanılarak kren yapısının sismik performansını arttırmak için sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır.

Bu nedenle tezin amacı “krenlerin depreme karşı dinamik davranışlarını ortaya koyan bir matematik modelin geliştirilmesi ve bu matematik modele aktif titreşim kontrolü uygulayarak yapısal titreşimlerin azaltılması” şekline özetlenebilir. Bu amaç doğrultusunda tezde aşağıdaki adımlar gerçekleştirilmiştir.

- (i) Depreme maruz krenler için doğrusal olmayan kapsamlı bir matematik model geliştirilmiştir.
- (ii) Matematik model yoluyla benzetim çalışmaları yapılmıştır.
- (iii) Fiziksel bir kren modeli oluşturulmuştur.
- (iv) Oluşturulan kren modeli üzerinde sarsma masası deneyleri yapılmıştır.
- (v) Sarsma masası deneyleri ile krenlerin deprem esnasındaki dinamik davranışları hakkında zaman ve frekans alanında sonuçlar elde edilmiştir.
- (vi) Deneysel sonuçlarla benzetim çalışmaları karşılaştırılarak matematik model doğrulanmıştır.
- (vii) Geliştirilen matematik model kullanılarak kren yapısına aktif titreşim kontrolü uygulanmıştır.
- (viii) Aktif titreşim kontrolü için etkin bir kontrolör olarak eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır.
- (ix) Tasarlanan kontrolörün performansı benzetim çalışmaları yoluyla ortaya konulmuştur.

1.3. Orijinal Katkı

Depremlerde krenlerin kolayca hasar görmeleri ve yıkılmaları krenlerin depreme karşı dayanıklı hale getirilmesini gündeme getirmiştir. Yaklaşık son 20 yıldır krenlerin sismik performanslarını arttırmak için yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Bu tezin literatüre sunduğu orijinal katkı maddeler halinde aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- (i) Bu tezde depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarının incelenebileceği ayrıca aktif titreşim kontrolü uygulamalarında kullanılabilecek çok serbestlik dereceli, zeminin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren, doğrusal olmayan bir matematik model geliştirilmiştir. Literatürde bu tür bir çalışma bulunmamaktadır. Dolayısıyla, tez bu alanda temel kaynak görevi görecektir.
- (ii) Krenlerin sismik davranışlarının incelenmesi, depremlerin gerçekleşme zamanı düşünüldüğünde bir kren modeli hazırlanmasını ve titreşim tablası üzerinde deneylerin yapılacağı laboratuvar çalışmalarını gerektiren kapsamlı bir süreçtir. Geliştirilen matematik model krenlerin dinamik davranışlarının deneysel çalışmalara gerek duyulmaksızın benzetim çalışmaları yoluyla ortaya konmasını sağlayacaktır.
- (iii) Bu tez ile krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılması probleminin çözümü için önerilen yöntem, aktif titreşim kontrolü olmuştur. Yapılan literatür araştırması sonucunda, mevcut problemin çözümü için bu yöntemin önerildiği tüm çalışmaların, bu doktora tezi bünyesinde yapılan çalışmalar olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, tez bu alanda temel kaynak görevi görecektir.
- (iv) Geliştirilen matematik model kullanılarak, mevcut problemin çözümü için aktif titreşim kontrolü amacıyla daha kapsamlı kontrol algoritmaları geliştirilebilir. Bu anlamda tez, kontrol algoritmaları yoluyla bu konuya katkı sağlamak isteyen sonraki araştırmacılar için de temel kaynak görevi görecektir.

DEPREME MARUZ KRENLER İÇİN MATEMATİK MODEL GELİŞTİRİLMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bir sistemin dinamik karakteristiğinin matematiksel tanımına matematik model adı verilir. Mekanik, elektriksel, ısı, akışkan, ekonomik, biyolojik vb... pek çok sistemin matematik modeli diferansiyel denklemler yoluyla karakterize edilebilmektedir. Bir dinamik sistemin bir giriş fonksiyonuna karşı göstereceği tepki, diğer bir deyişle sistemin cevabı, bu diferansiyel denklemin veya diferansiyel denklem takımının çözümünden elde edilir [76].

Bu bölümde, sismik etkiye maruz krenlerdeki yapısal titreşimlerin analizi için çok serbestlik dereceli, doğrusal olmayan, zemin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren bir matematik model geliştirilmiştir. Bu matematik model sistemin hareket denklemlerinden oluşmaktadır. Ardından bu matematik model kullanılarak kren sisteminin titreşim analizi benzetim çalışmaları yoluyla yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında sisteme farklı karakteristiklere sahip yıkıcı etkisi yönünden önemli sayılan 1940 El-Centro ve 1999 Marmara Kocaeli depremleri bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Benzetim çalışmalarında Bölüm 3’de deneysel çalışmalarda kullanılan fiziksel modele ait parametreler kullanılmış ve sonuçlar grafikler halinde sayısal olarak verilmiştir.

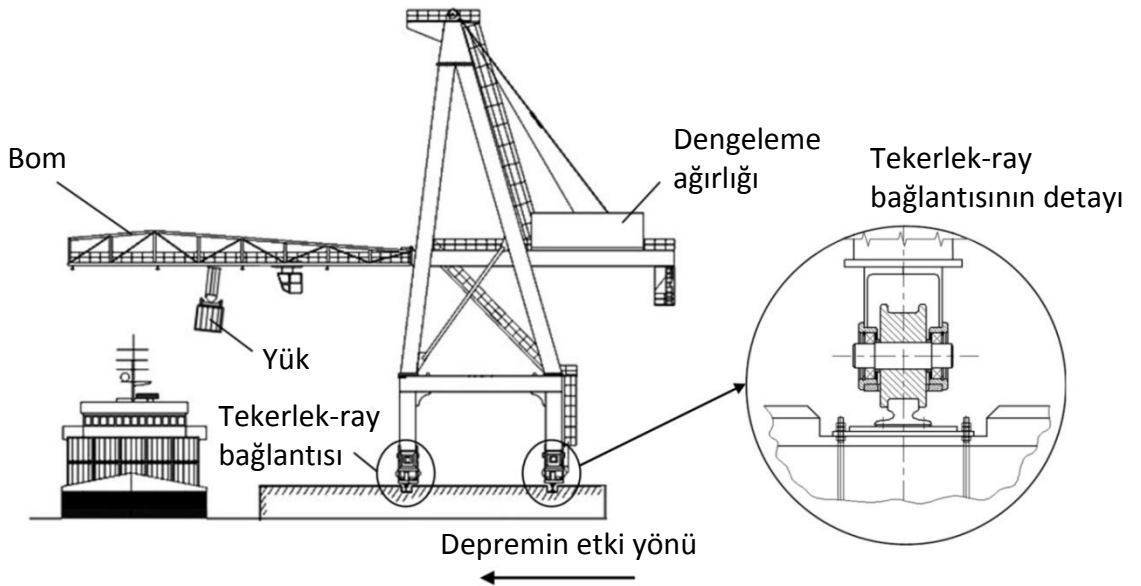
2.1. Matematik Modelin Geliştirilmesi

Bu bölümde deprem etkisindeki krenlerde yapısal titreşimlerin incelenebilmesi için, çok serbestlik dereceli, doğrusal olmayan, zemin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de

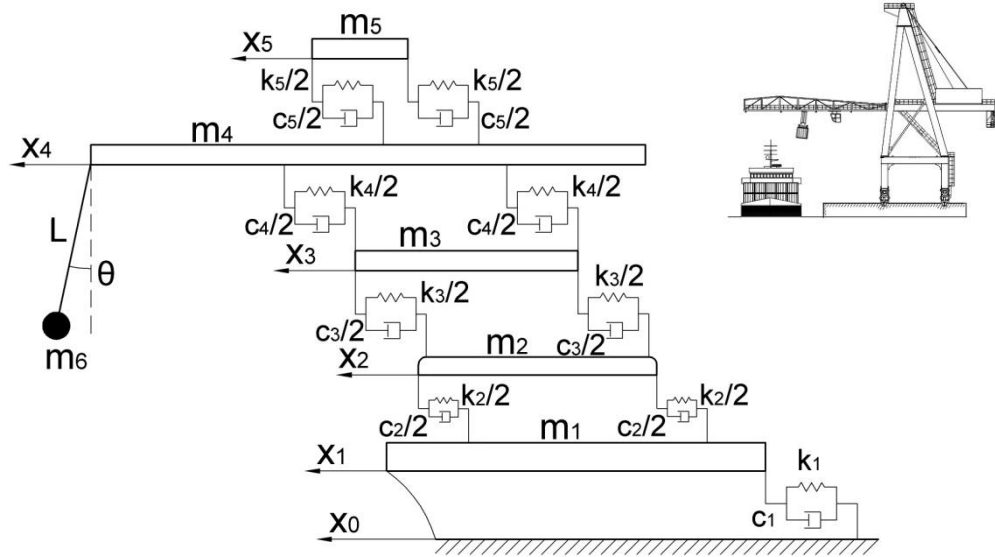
içeren bir matematik model oluşturulmuştur. Konteyner krenleri, tasarımları itibarı ile depremlerden en çok etkilenen kren yapılarıdır. Bu nedenle ele alınan kren tipi bir konteyner krenidir.

2.1.1. Depreme Maruz Krenin Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

Geliştirilen matematik model, konteyner krenlerinin deprem esnasındaki dinamik davranışlarını ortaya koyan, zemin ve tekerlek-ray bağlantısının dinamiğini de içeren, 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir matematik modeldir. Depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, serbestlik derecesi sadece bu yönde hesaba katılmıştır (Sağırlı ve Azeloğlu [10], Sağırlı vd. [12], Azeloğlu ve Sağırlı [13], Azeloğlu vd. [14], Azeloğlu ve Sağırlı [15]). Deprem esnasında konteyner krenleri üzerindeki en büyük yıkıcı etkinin ayaklarda oluşması ve en büyük yerdeğiştirmelerin ve ivmelerin kren köprüsü ve üst yapıda meydana gelmesi beklenmektedir [12]. Modellenen krenin şematik resmi ve depremin etki yönü Şekil 2.1’de verilmiştir. Sistemin dinamik modeli ise Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2. 1 Modellenen krenin şematik resmi ve depremin etki yönü



Şekil 2. 2 Sismik etkiye maruz krenin dinamik modeli

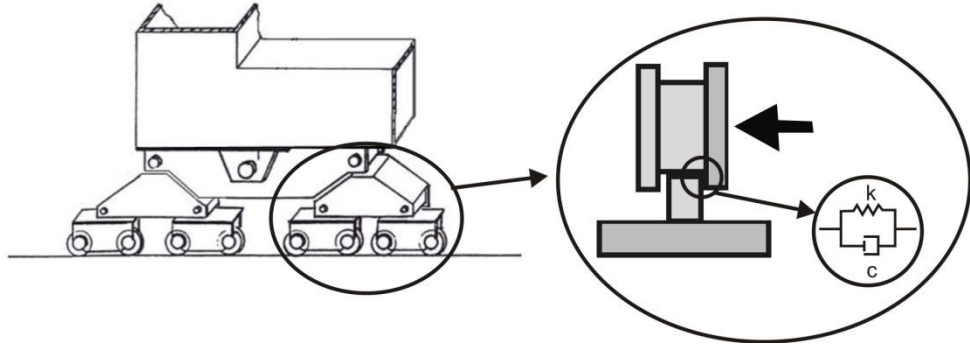
Dinamik modelde, $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ sırasıyla, konteyner rıhtımı (zemin), yürütme mekanizması, rijit kirişler, köprü, üst kirişler ve yükün kütlesi, k_1 ve c_1 toprağın rijitliği ve sönümü, k_2, k_3, k_4 ve k_5 portal ayakların rijitliği, c_2, c_3, c_4 ve c_5 portal ayakların sönümü ve L halatın uzunluğudur. x_0 kren yapısına uygulanan bozucu deprem hareketini, x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 ilgili kısımların yerdeğiştirmelerini ve θ yükün salınım açısını ifade etmektedir.

Geliştirilen dinamik model şu kabulleri içermektedir;

- Sistemin serbestlik derecesi yatay doğrultuda alınmıştır.
- Matematik model bom eksenini doğrultusundaki dinamik etkileri içerek şekilde oluşturulmuştur.
- Deprem krenin bom eksenini doğrultusunda etki ettiği ve bomun da ray eksenine dik doğrultuda olduğu kabul edilmiştir.
- Modelde yer alan tüm kütleler ilgili elemanın ağırlık merkezine indirgenmiş noktasal kütleler olarak kabul edilmiştir.
- Matematik modelde yükün salınımı düzlemsel olarak incelenmiş, halat rijit ve kütlesiz olarak ele alınmıştır.
- Zeminin krenin bom eksenini doğrultusundaki rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir.

- Tekerlek-ray bağlantısının krenin bom eksenine doğrultusundaki rijitliği ve sönümü modele dahil edilmiştir.
- Tekerlek-ray bağlantısında yanıl boşluklar ihmal edilmiştir.

Kobayashi vd. [4], krenlerde tekerlek-ray bağlantısının bir yay ve sönüm elemanına indirgenebileceğini göstermişlerdir. Dolayısıyla bu çalışmada kren, zemine rijit bağlı olarak ele alınmamış, tekerlek mekanizması da modele dahil edilmiştir. Şekil 2.3’de tekerlek mekanizmasının modellenmesi verilmiştir.



Şekil 2. 3 Tekerlek mekanizmasının modellenmesi

Sistemin hareket denklemlerinin elde edilmesinde Lagrange yöntemi kullanılmıştır. Lagrange denkleminin genel ifadesi,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.1)$$

şeklindeyir. Burada; E_k toplam kinetik enerji, E_P toplam potansiyel enerji, E_D toplam sönüm enerjisi, Q_i genelleştirilmiş kuvvetler, q_i genelleştirilmiş koordinatlardır.

Sisteme ait enerji denklemleri ve bu denklemler yoluyla hareket denklemlerinin elde edilmesi Ek-A’da verilmiştir. Sonuç olarak, 6 serbestlik dereceli kren sistemine ait hareket denklemleri Ek-A’da görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Bozucu bir dış etki altındaki krenin hareket denklemi en genel halde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = E_w w(t) \quad (2.2)$$

Burada $x=[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ \theta]^T$ ilgili kısımların yerdeğıştirmelerini gösteren durum vektörünü, $w(t)$ sisteme uygulanan bozucu girişı, $E_w = [-(c_1\dot{x}_0 + k_1x_0) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \in \Re^{m_w}$ bozucuların ağırlık matrisini, $M_s, C_s, K_s \in \Re^{n \times n}$ sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini göstermektedir. Sistemin kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri sırasıyla (2.3), (2.4) ve (2.5.)’de verilmiştir.

$$M_s = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 + m_6 & 0 & m_6 L \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_6 L \cos \theta & 0 & m_6 L^2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$C_s = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c_4 & c_4 + c_5 & -c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_5 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

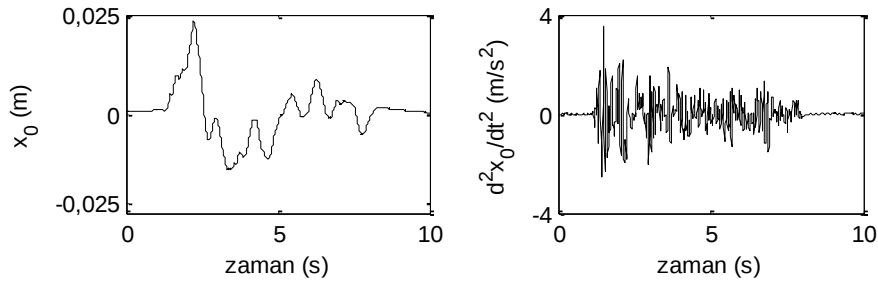
$$K_s = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_4 & k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_6 g L \sin \theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.2. Sisteme Bozucu Deprem Hareketlerinin Uygulanması

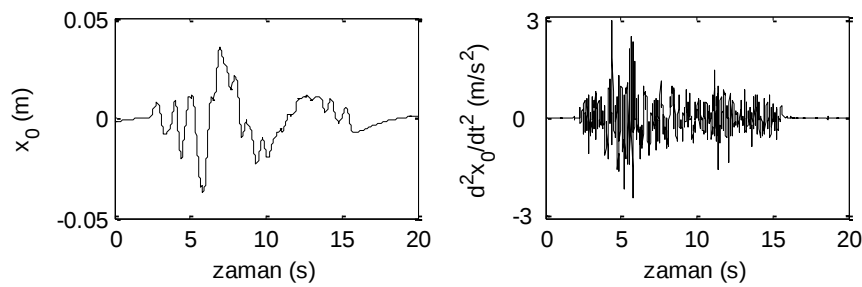
Benzetim çalışmalarında sisteme bozucu giriş olarak farklı karakteristiklere sahip, geçmişte yaşanmış ve yıkıcı etkisi yönünden önemli sayılan iki büyük deprem hareketi uygulanmıştır. Bu depremler El Centro’da (ABD) 1940 yılında meydana gelen $M_w=7.1$ şiddetindeki El Centro depremi ve Marmara Kocaeli’de (Türkiye) 1999 yılında meydana gelen $M_w=7.4$ şiddetindeki Marmara Kocaeli depremidir. Benzetim çalışmaları için deprem anında deprem ölçüm istasyonlarında kaydedilen veriler MATLAB paket

programı ile alçak ve yüksek geçiren filtrelerle işlenerek ölçümden kaynaklanan gürültü ve benzeri bozucu sinyallerin arındırılmasıyla zamanın bir fonksiyonu şeklinde modellenmiştir (Yağız [77], Yağız [78], Yazıcı ve Güçlü [79], Kasımcı [47]).

Yapılan benzetim çalışmalarında, deneylerde kullanılan fiziksel modele ait parametreler kullanıldığından, bahsedilen gerçek deprem kayıtları ayrıca Çizelge 3.1’de yer alan zaman ölçeklendirme faktörüne uygun olarak ölçeklendirilerek benzetim çalışmalarında kullanılmaya uygun hale getirilmiştir. Şekil 2.4’de El Centro depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali, Şekil 2.5’de ise Marmara Kocaeli depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali verilmiştir. İfade kolaylığı açısından bundan sonra ölçeklendirilmiş El Centro depremine “El Centro depremi”, ölçeklendirilmiş Marmara Kocaeli depremine “Kocaeli depremi” denilecektir.



Şekil 2. 4 El Centro depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali



Şekil 2. 5 Kocaeli depreminin yer hareketinin zamanın bir fonksiyonu olarak modellenerek ölçeklendirilmiş hali

2.3. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

Benzetim çalışmalarında, daha sonra karşılaştırılabilmesi açısından deneysel çalışmalarda kullanılan fiziksel modele ait parametreler kullanılmıştır. Fiziksel modele ait kütle, rijitlik ve sönüm değerleri, prototip bir krenin 1/20 ölçekli dinamik eşdeğer modeline göre belirlenmiştir. Krenin portal ayaklarının rijitlik katsayılarının belirlenmesinde (2.6) ifadesinden yararlanılmıştır.

$$k_i = \frac{12EI_i}{L_i^3} \quad (2.6)$$

Burada; E malzemenin elastisite modülü, I_i eğilmeye zorlanan elemanın kesit atalet momenti, L_i ise eğilmeye zorlanan elemanın uzunluğudur. Model krenin sönüm parametreleri ise, Rayleigh sönüm prensibine göre (2.7) ifadesi ile belirlenmiştir [80].

$$[C] = \alpha_0[M] + \beta_0[K] \quad (2.7)$$

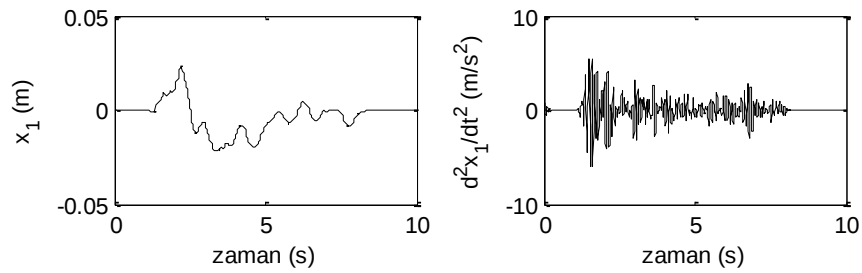
Burada, $\alpha_0 = (2\xi_1\omega_1\omega_2)/(\omega_1 + \omega_2)$ ve $\beta_0 = 2\xi_2/(\omega_1 + \omega_2)$ şeklinde belirlenen sabitlerdir. Şekil 2.2’de verilen dinamik modelde sisteme ait parametrelerin temsil ettiği yerler görülmektedir. Çizelge 2.1’de ise fiziksel modele ait kütle, rijitlik ve sönüm değerleri verilmiştir.

Çizelge 2. 1 Fiziksel modele ait kütle, rijitlik ve sönüm değerleri

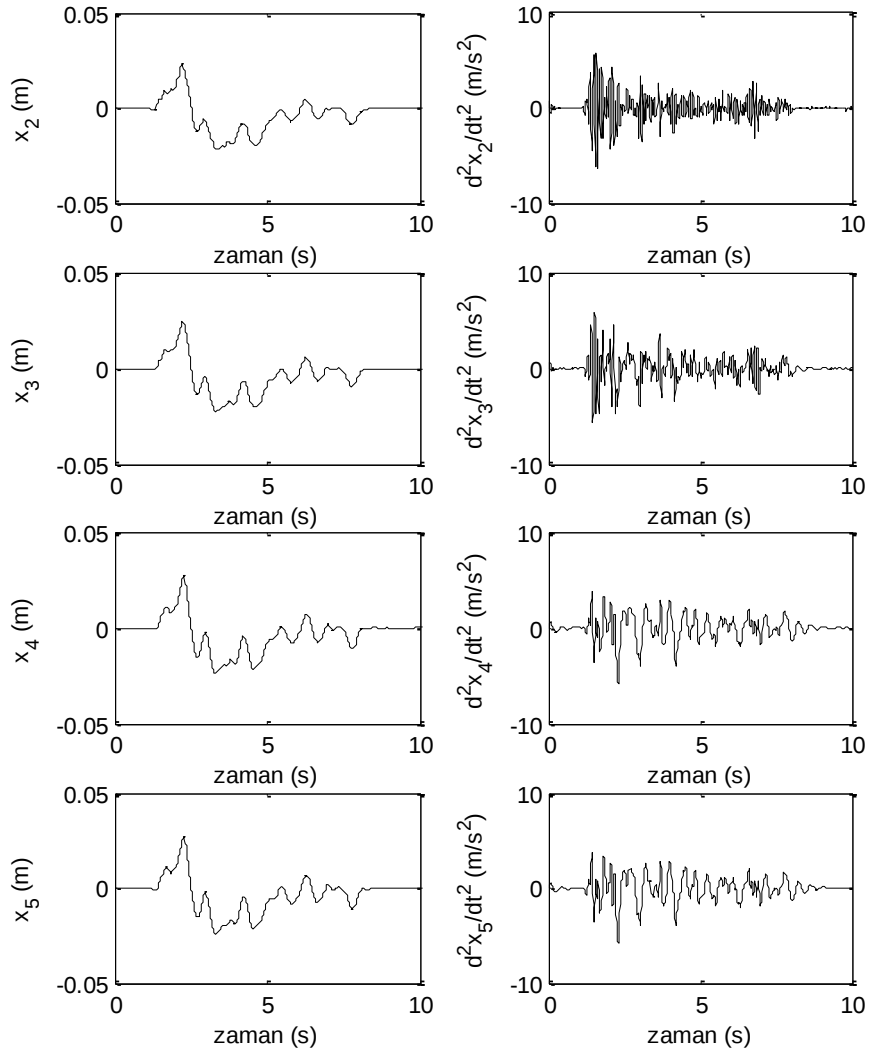
Kütle Parametreleri	Rijitlik Parametreleri	Sönüm Parametreleri
$m_1 = 534,76 \text{ kg}$	$k_1 = 3000000 \text{ N/m}$	$c_1 = 10181 \text{ Ns/m}$
$m_2 = 51,16 \text{ kg}$	$k_2 = 3382520 \text{ N/m}$	$c_2 = 11473 \text{ Ns/m}$
$m_3 = 39,57 \text{ kg}$	$k_3 = 52668 \text{ N/m}$	$c_3 = 179 \text{ Ns/m}$
$m_4 = 79,72 \text{ kg}$	$k_4 = 32628 \text{ N/m}$	$c_4 = 111 \text{ Ns/m}$
$m_5 = 9,3 \text{ kg}$	$k_5 = 7996 \text{ N/m}$	$c_5 = 27 \text{ Ns/m}$
$m_6 = 5 \text{ kg}$	Uzunluk parametresi $L = 0,53 \text{ m}$	

2.4. Benzetim Çalışmalarının Sonuçları

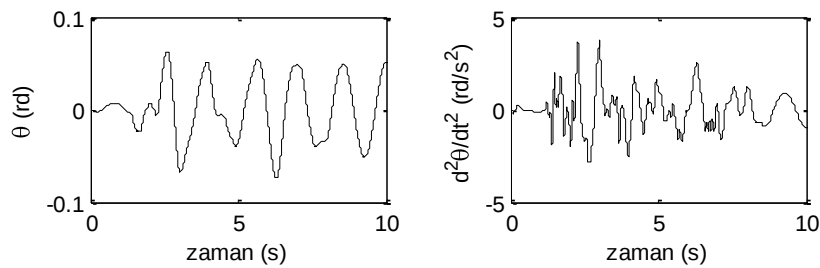
Bu bölümde, geliştirilen matematik model yardımıyla benzetim çalışmaları yapılmış ve model krenin titreşim analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında MATLAB-Simulink paket programı kullanılmıştır. Öncelikle matematik modele Şekil 2.4’de verilen El Centro depreminin yer hareketi bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Bu durumda x_1 ’de oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları Şekil 2.6’da, x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 ’te oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları ise Şekil 2.7’de verilmiştir. Ayrıca θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları da Şekil 2.8’de sunulmuştur.



Şekil 2. 6 El Centro depreminin matematik modele uygulanması hali için x_1 ’in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



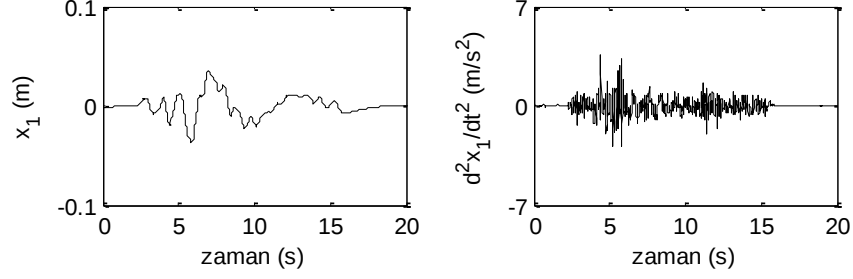
Şekil 2. 7 El Centro depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



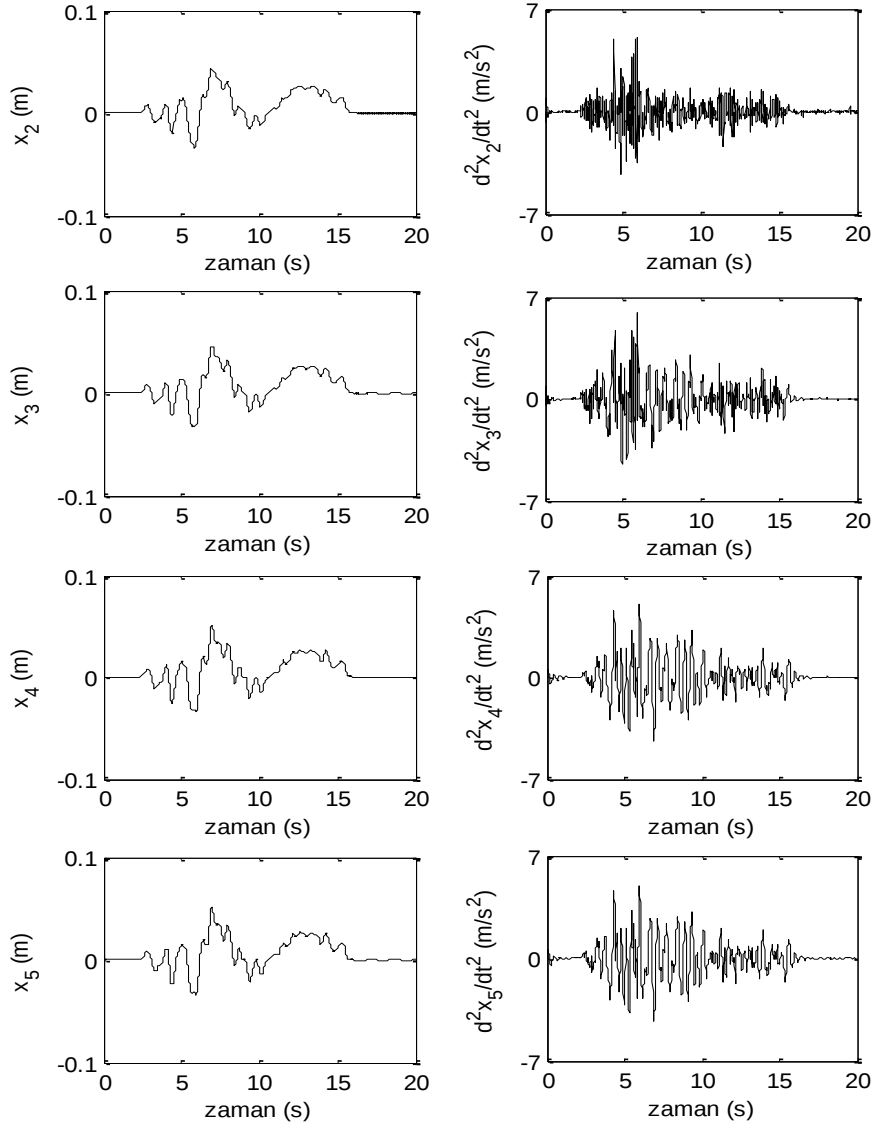
Şekil 2. 8 El Centro depreminin matematik modele uygulanmış hali için θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

Matematik modele ikinci olarak Şekil 2.5'de verilen Kocaeli depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş hali bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Bu durumda x_1 'de oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları Şekil 2.9'da, x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'te oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları ise Şekil 2.10'da verilmiştir. Ayrıca θ 'nın

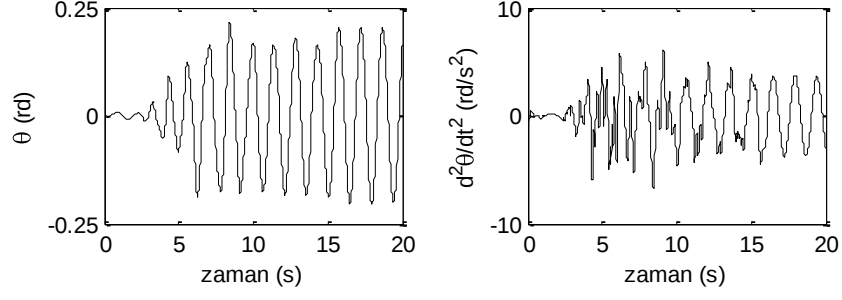
yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları da Şekil 2.11’de sunulmuştur. Çizelge 2.2’de benzetim çalışmalarından elde edilen x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevaplarının değerleri (tepeden-tepeye) sayısal olarak verilmiştir.



Şekil 2. 9 Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_1 ’in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 2. 10 Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 ’in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 2. 11 Kocaeli depreminin matematik modele uygulanmış hali için θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

Çizelge 2.2 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	El Centro Depremi	Kocaeli Depremi
x_1 (m)	0.0451	0.0728
x_2 (m)	0.0452	0.0774
x_3 (m)	0.0474	0.0801
x_4 (m)	0.0480	0.0832
x_5 (m)	0.0503	0.0828
θ (rd)	0.13021	0.3957
d^2x_1/dt^2 (m/s ²)	9.9100	7.0820
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	10.2670	8.5320
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	10.6290	9.3850
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	11.5150	9.3180
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	11.5060	9.2560
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	6.677	12.746

Sisteme ait kritik frekans değerleri de matematik model yardımıyla hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında sisteme ait kütle ve rijitlik matrisleri kullanılmıştır. Sistem 6 serbestlik derecesine sahip olduğundan altı adet kritik frekans elde edilmiştir. Matematik model yoluyla hesaplanan kritik frekans değerleri Çizelge 2.3'de verilmiştir.

Çizelge 2. 3 Sistemin matematik model yardımıyla hesaplanan kritik frekans değerleri

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)	w_6 (Hz)
Matematik model	0.68	2.26	4.96	7.61	11.50	43.25

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMA

Krenler üzerinde yapılan sarsma masası deneylerinin birkaç amacı vardır. Bu amaçlardan biri krenlerin elastik ve elastik olmayan davranışlarını anlamaktır (Kanayama ve Kashiwazaki [1], Kanayama vd. [2]). Bir diğer amaç ise, krenlerin dinamik davranışları hakkında bilgi edinerek sismik performanslarını arttırabilecek uygun tedbirleri geliştirebilmektir (Soderberg ve Jordan [5], Koshab ve Jacobs [6], Jacobs vd. [7], Sugano vd. [8]). Bu doktora tezinde, Bölüm 2’de geliştirilen matematik modelin doğruluğunu belirleyebilmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır (Sağırlı ve Azeloğlu [10]). Deneysel çalışmalar prototip bir konteyner kreninin 1/20 ölçekli fiziksel modeli üzerinde gerçek deprem verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde bölümler halinde sırasıyla; deneyde kullanılan sistem hakkında bilgi verilmiş, kullanılan sarsma masası, ölçüm cihazları ve fiziksel model tanıtılmış, deneylerde kullanılan bozucu deprem hareketleri hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca deneyin yapılışı anlatılarak deneysel çalışmaların sonuçları ortaya konmuştur. Ardından geliştirilen matematik modelin sonuçları, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve geliştirilen matematik modelin etkinliği değerlendirilmiştir.

3.1. Deney Düzeneği

Bu bölümde deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneğini oluşturan, sarma masası, ölçüm cihazları ve fiziksel model hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1. Sarsma Masası ve Ölçüm Cihazları

Bu doktora tezi bünyesinde yapılan deneysel çalışmalar Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü (BÜ-KRDAE) Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Sarsma Masası Laboratuvarında yapılmıştır. Ayrıca temel zemininin hazırlanmasında Boğaziçi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Zemin Mekaniği Laboratuvarlarının imkanlarından faydalanılmıştır.

BÜ-KRDAE Deprem Mühendisliği Anabilim dalı bünyesinde Sarsma Masası Laboratuvarında bulunan Sarsma masası ANCO R-148 model, servo-hidrolik ünite ile tahrik edilen bir sistem olup tek ekseninde hareket etme yeteneğine sahiptir. Sarsma masası ile ilgili teknik detaylar aşağıdaki gibi özetlenebilir [81].

- **Masa:** Boyutları 3m x 3m ölçülerinde, kaynaklı konstrüksiyondan imal edilmiş ve üzerinde deney numunelerinin bağlanabilmesi için dış açılmış delikler bulunmaktadır.
- **Deney Kapasitesi:** 10 ton ağırlığa kadar deney numunelerini, 2g maksimum ivme kapasitesi ile 0-50 Hz frekans aralığında test edebilmektedir.
- **Hareket kabiliyeti:** Masa tek ekseninde hareket etme yeteneğine sahip olup, istenilen yatay hareketin sağlanabilmesi için masanın altında 11 adet lineer yataktan oluşan ray sistemi bulunmaktadır. Temel, titreşimi toprağa ve masa etrafındaki yapılara iletmeyecek şekilde gerekli izolasyon yapılar tasarlanmıştır.
- **Hidrolik ünite:** Hidrolik silindir 200 bar basınçta ve 228 lt/dk debiyle çalışmaktadır. Sistemde, bir çift 45 kW motor ve 114 lt/dk debiye sahip hidrolik pompa bulunmaktadır. Ayrıca sistem içerisinde 3 adet 190 litre ve 200 barlık akümülatör seti bulunmaktadır. Akümülatörlerin ikisi yüksek basınç hattı üzerinde ve diğeri düşük basınç hattı üzerindedir. Akümülatörlerin ilk ikisi, yüksek hızdaki sismik hareketler sırasında maksimum gidiş ve dönüş akışını yakalamayı sağlamakta, diğeri ise ana sistemde basıncın düşmesi durumunda, kontrol için yeterli pilot akışını sağlamaktadır. Sistemdeki hidrolik silindir, ± 120 mm stroktadır ve 3 aşamalı Moog Servo valfine sahiptir.
- **Kontrol ünitesi:** Servo valf ve hidrolik silindir GS2000 analog servo döngü kontrolcüsü tarafından kontrol edilmektedir. Servo kontrolcü, istenilen yerdeğiştirme

sinyalini alır ve silindirin bu sinyalle aynı hareketi gerçekleştirmesini sağlar. Kontrolcü, yatay eksen boyunca gerçekleştirilen ötelenme hareketinin kapalı çevrim kontrolünü sağlar. Sarsma masasının hareketlerinin programlanması ve kontrolünde deprem ivme kayıtları kullanılmaktadır. Masanın hareketi ve veri toplama, Data Physics 550 WIN dijital veri kontrolü ve toplama sistemi tarafından yapılmaktadır. Bu sistem hareketli masa üzerinde bir geri-besleme ivmeölçer, PC tabanlı ivme okuyan dijital kontrol sistemi ve aynı bilgisayar sistemi üzerinde silindirin servo kontrolcüsüne giden analog sinyal üreticiden oluşmaktadır.

- **Ölçüm cihazları ve veri toplama sistemi:** Masada 16 kapasitif PCB 300 ve 3000 mV/g nominal kalibrasyonlu, 20g ve 3g 'lik ivme ölçerler kullanılmaktadır. ANCO R-148 için veri toplama ve kontrol sistemi, 16 kanal PC tabanlı Data Physics 550 WIN sistemidir. Sistem, anti-aliasing filtreleri içeren 16 kanal dijital kontrol sistemi (1 çıkış, 16 giriş), amplifikatör, işlemin güvenilirliği için bir UPS, COMPAQ kontrol bilgisayar ve monitörü, Gardner System servo kontrolcüsü ve acil hidrolik güç kaynağı boşaltım valflerinden oluşur. Data Physics sistemi 16 kanal için anti-aliasing filtresi sağlamaktadır.

Dolayısıyla, deneyler için gerçek deprem kayıtları ölçekli ve ölçeksiz olarak ayarlanarak istenilen bozucu girişler elde edilebilmekte ve bu bozucu girişler servo-hidrolik sistem yardımıyla sarsma masasında uygulanabilmektedir. Sarsma masasının hareketi ve deneysel verilerin toplanması için dijital veri toplama ve kontrol sistemi kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de deney düzeneği a) Sarsma masası, b) Servo hidrolik eyleyici, valfler ve hidrolik güç ünitesi, c) Kontrol ünitesinin genel görünümü, d) Kontrol paneli, e) sinyal jeneratörü ve osiloskop ve f) servo kontrol ünitesi görülmektedir.



Şekil 3. 1 Sarsma masası ve kontrol ünitesi

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm cihazları BÜ-KRDAE Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı Sarsma Masası Laboratuvarına aittir. Deneysel çalışmalarda matematik modelin doğrulanabilmesi ve krenin titreşim analizlerinde gerekli olacak ölçümlerin alınabilmesi amaçlanmıştır ve bu amaçla konumölçerler ve ivmeölçerler kullanılmıştır. Deneyde 3 adet ipli konumölçer kullanılmıştır. Bunlar, ESA firmasına ait WDS-300-P60-SR-U model konumölçerlerdir. Bu konumölçerler, 0-300 mm ölçüm aralığına sahip, 33,33 mV/mm hassasiyetinde ve $\leq \% 0,25$ sapma değerindedir. Deneyde ayrıca 3 adet lazer konumölçer kullanılmıştır. Bunlar, Leuze Electronic firmasına ait OD8L 8/V4-400-S12 model konumölçerlerdir. Bu konumölçerler, 20-400 mm ölçüm aralığına sahip, dalgaboyu 650 nm (görülebilir kırmızı ışık), maksimum sapma değeri ölçülen değerin $\pm \% 0,5$ 'i ve cevap zamanı ≤ 20 ms değerindedir [81]. Şekil 3.2'de deneylerde kullanılan

konumölçerler a) Deney düzeneğinin genel görünümü, b) sarsma masasının yerdeğişimlerini (x_0) ölçen ipli konumölçer, c) x_1 'i ölçen ipli konumölçer, d) x_1 'i ölçen ipli konumölçerin başka bir açıdan görünümü, e) x_3 , x_4 ve x_5 'i ölçen lazer konumölçerlerin genel görünümü, f) Bomun yerdeğişimlerini (x_4) ölçen lazer konumölçer, g) Lazer konumölçerlerin başka bir açıdan görünümü, h) x_3 'ü ölçen lazer konumölçer ve ı) x_3 'ü ölçen lazer konumölçerin başka bir açıdan görünümü verilmiştir.



Şekil 3. 2 Deneyde kullanılan konumölçerler

Deneyde kullanılan 8 adet ivmeölçer ise PCB firması tarafından üretilmiştir. Ölçüm aralığı 3g olan ivmeölçerler 3801G3FB3G/3AY model, 20g olanlar ise 3801D3FB20G/3AY model ivmeölçerlerdir [81]. Şekil 3.3’de deneyde kullanılan ivmeölçerler a) Deney düzeneğinin genel görünümü, b) sarsma masasının ivme değerini (d^2x_0/dt^2) ölçen ivmeölçer, c) d^2x_1/dt^2 ve d^2x_2/dt^2 ’yi ölçen ivmeölçerlerin genel görünümü, d) d^2x_1/dt^2 ve d^2x_2/dt^2 ’yi ölçen ivmeölçerlerin başka bir açıdan görünümü, e) d^2x_3/dt^2 ’yi ölçen ivme ölçerler, f) Beton bloğun ivme değerini (d^2x_1/dt^2) ölçen ivmeölçer, g) d^2x_2/dt^2 ’yi ölçen ivmeölçer, h) d^2x_3/dt^2 ’yi ölçen ivme ölçerlerden birinin başka bir görünümü ve ı) d^2x_4/dt^2 ’yi ölçen bir ivmeölçer görülmektedir.



Şekil 3. 3 Deneyde kullanılan ivmeölçerler

3.1.2. Fiziksel Model

Deneyisel çalışmalarda kullanılan fiziksel model prototip bir konteyner kreninin 1/20 ölçekli modeli olarak hazırlanmıştır. 1/20 oranında bir ölçeklendirme, krenin deprem esnasındaki elastik davranışlarını gözlemleyerek titreşimlerini analiz edebilmek için yeterli olmaktadır (Jacobs vd. [7], Sağır ve Azeloğlu [10]). Prototip kren yaklaşık 1500

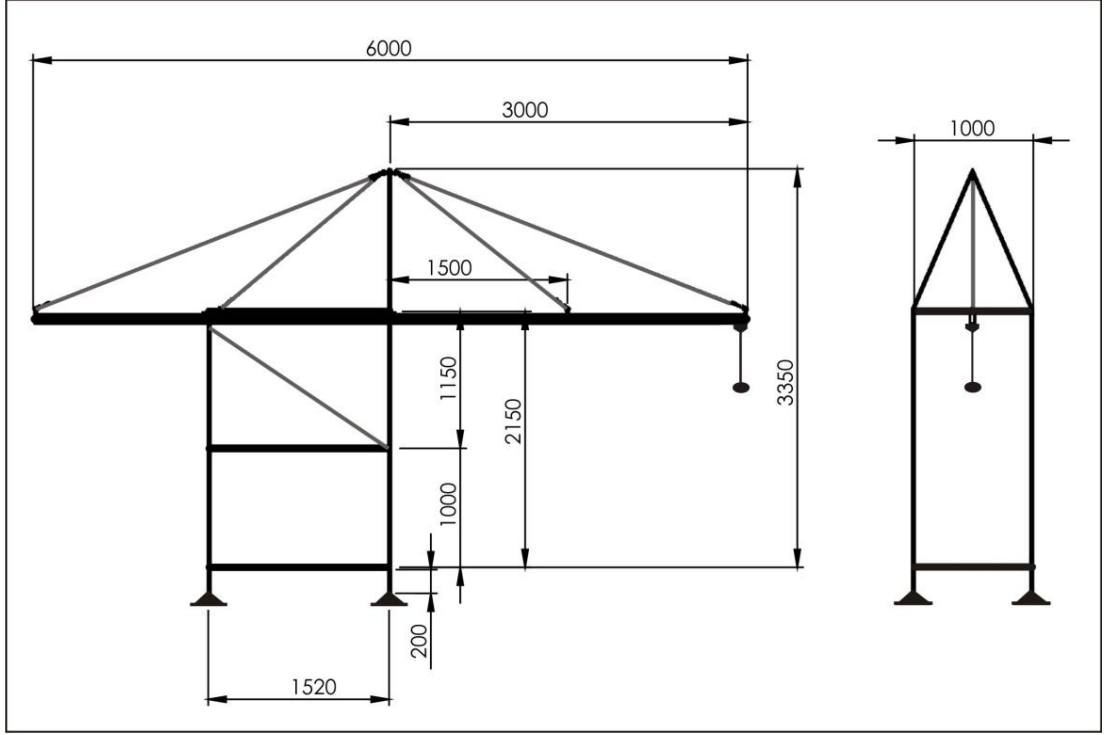
ton ağırlığında, ray açıklığı 30 metre olan bir jumbo konteyner krenidir. Prototip kren ile model kren arasındaki geometrik büyüklükler dinamik eşdeğerlik esasına uygun olarak ölçeklendirilmiştir (Sugano vd. [8]). Bu ölçeklendirme oranları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Çizelge 3.1’de yer almayan diğer büyüklükler arasındaki ilişkiler ise çizelgede yer alan değerler yoluyla hesaplanabilmektedir.

Çizelge 3. 1 Prototip kren ile fiziksel modelin büyüklükleri arasındaki ölçeklendirme oranları

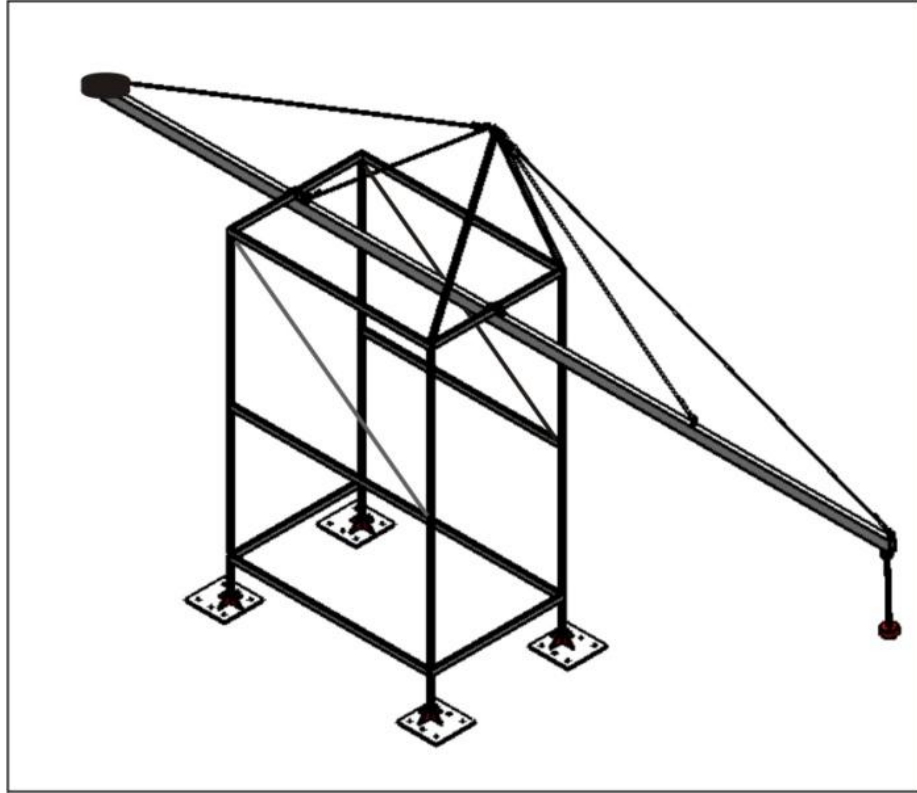
Büyüklük	Birim	Sembol	Prototip kren	Model kren
Uzunluk	m	λ_l	1	1/20
Elastisite modülü	N/m ²	λ_E	1	1
İvme	m/s ²	λ_a	1	1
Kütle	kg	λ_m	1	1/20 ³
Zaman	s	λ_t	1	1/20 ^{1/2}

Model kren, Çizelge 3.1’de verilen ölçeklendirme oranlarına ve bu oranlar arasındaki ilişkiden elde edilen büyüklüklere göre prototip krenin dinamik eşdeğer modeli olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.4’de model krene ait temel büyüklükler verilmiştir. Model krende bomun arka tarafına karşı ağırlık olarak 5 kg’lık ağırlık sabitlenmiş, ayrıca bomun ucuna 0.53 metre uzunluğundaki bir halat ile 5 kg’lık bir yük asılmıştır. Şekil 3.5’de model krenin perspektif görünüşü verilmiştir. Şekil 3.6’da ise a) Model krenin sarsma masası üzerine yerleştirilmiş hali, b) Bomun ucuna yerleştirilen yükün görünümü verilmiştir.

Deneyisel çalışmalar için ayrıca konteyner rıhtımını temsil eden bir beton blok ile alt zemini temsil eden kumun yerleştirileceği bir kutunun tasarımı yapılmıştır. Beton blok 1,4m x 1,9m x 0,2 m ölçülerinde ve 533 kg ağırlığında olup üzerinde model krenin bağlanabileceği delikler yer almaktadır. Kutu ise 2m x 2,45m x 0,5m ölçülerinde ve 2,5 m³ kapasiteli olup üzerinde bulunan aparatlar yardımıyla bağlantı papuçları ile sarsma masasına rijit bir şekilde bağlanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.7’de a) Kutunun genel görünümü, b) Kutunun içerisine kum yerleştirilerek hazırlanan alt zemin, c) Alt zeminin bir başka görünümü, d) Alt zeminin bir diğer görünümü verilmiştir. Şekil 3.8’de ise a) Beton bloğun genel görünümü, b) Beton bloğun başka bir görünümü, c) Beton bloğun bir diğer görünümü verilmiştir.



Şekil 3. 4 Model krene ait temel büyüklükler



Şekil 3. 5 Model krenin perspektif görünüşü



Şekil 3. 6 Model krenin görünümü



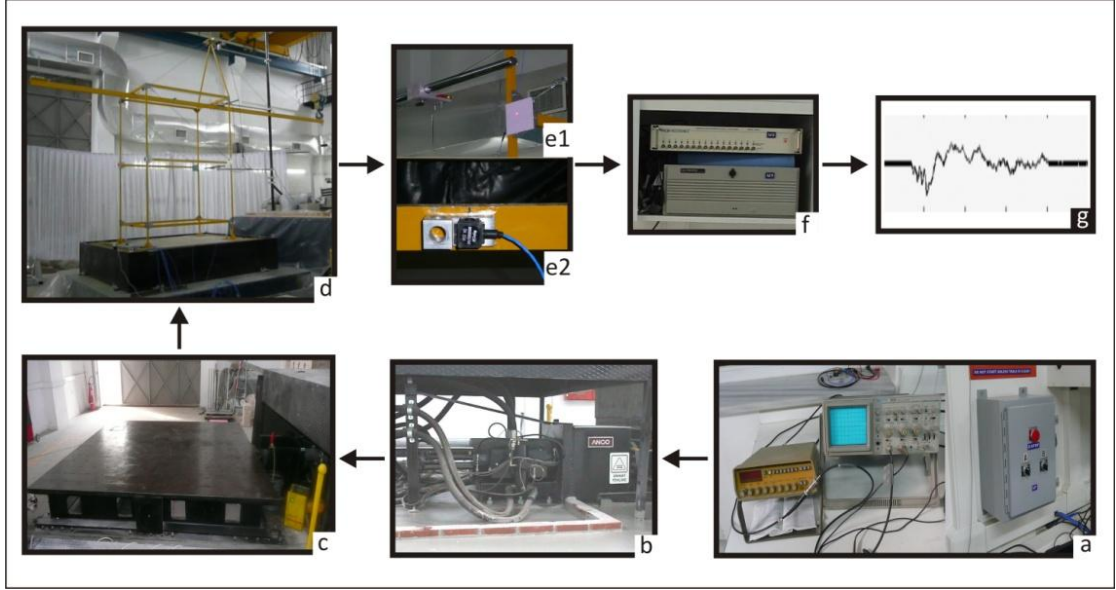
Şekil 3. 7 Kutunun görünümü



Şekil 3. 8 Beton bloğun görünümü

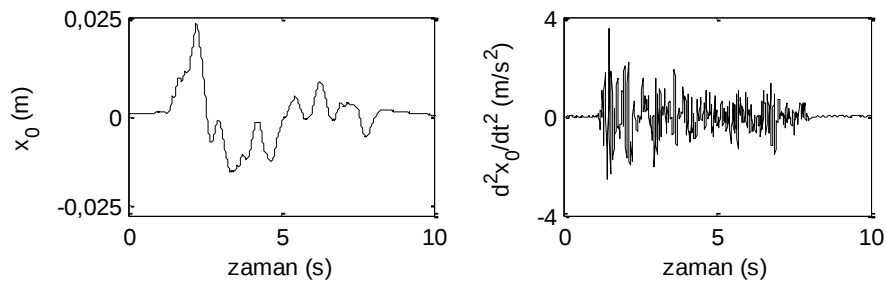
3.2. Deneyin Yapılışı

Bir önceki bölümde deney düzeneği hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ise deneyin yapılışı ve deney prosedürü ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Deneyin genel akışı ve şematik gösterimi Şekil 3.9'da verilmiştir. Buna göre deneyler Şekil 3.9'da gösterilen sırayla; a) hazırlanan bozucu girişin (deprem hareketi) kontrol ünitesi tarafından sisteme gönderilmesi, b) kontrol ünitesi tarafından gönderilen deprem hareketinin hidrolik eyleyici tarafından uygulanması, c) hidrolik eyleyici tarafından uygulanan deprem hareketi ile sarsma masasının sallanması, d) Sarsma masası üzerine tesbit edilen fiziksel modelin uygulanan deprem hareketine maruz kalması e1,e2) Fiziksel model üzerine yerleştirilen ölçüm cihazları ile (konumölçerler ve ivmeölçerler) yerdeğiştirme ve ivme ölçümlerinin alınması, f) Ölçüm cihazları ile alınan yerdeğiştirme ve ivme ölçümü kayıtlarının veri toplama kartı tarafından işlenmesi ve g) Sonuçların edilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

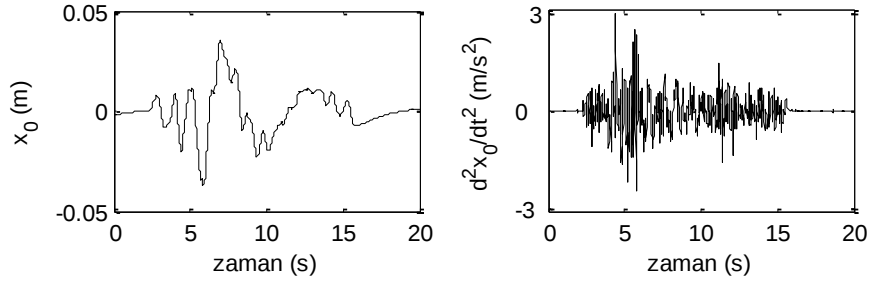


Şekil 3. 9 Deneyin şematik gösterimi

Deneylerde fiziksel modele farklı karakteristiklere sahip, geçmişte yaşanmış ve yıkıcı etkisi yönünden önemli sayılan iki büyük deprem hareketi uygulanmıştır. Bu depremler El Centro'da (ABD) 1940 yılında meydana gelen $M_w=7.1$ şiddetindeki El Centro depremi ve Marmara Kocaeli'de (Türkiye) 1999 yılında meydana gelen $M_w=7.4$ şiddetindeki Marmara Kocaeli depremidir. İlgili depremlere ait gerçek deprem kayıtları Çizelge 3.1'de yer alan zaman ölçeklendirme faktörüne uygun olarak ölçeklendirilmiş ve bu şekilde deneylerde kullanılmaya uygun hale getirilmiştir. Şekil 3.10'da El Centro depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali, Şekil 3.11'de ise Kocaeli depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali verilmiştir.

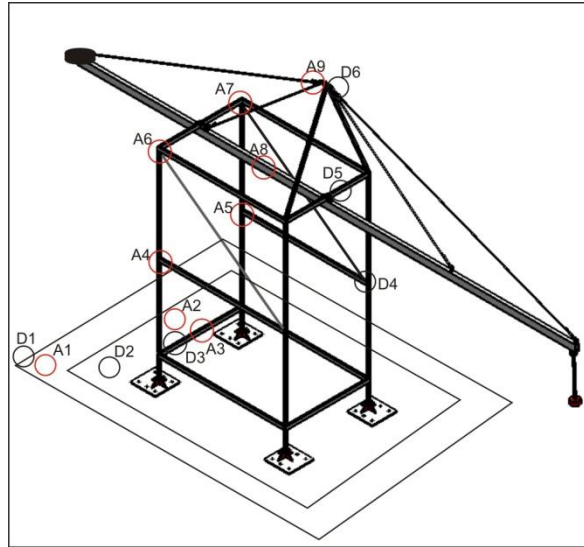


Şekil 3. 10 El Centro depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali



Şekil 3. 11 Kocaeli depreminin yer hareketinin ölçeklendirilmiş ve sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali

Deneylerde fiziksel model üzerine yerleştirilen ölçüm cihazlarının yerleri Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Burada, D indisi konumölçerleri, A indisi ise ivmeölçerleri belirtmek için kullanılmıştır. Çizelge 3.2’de ise her bir ölçüm cihazının deney düzeneği üzerinden ölçüm aldığı değerler verilmiştir.



Şekil 3. 12 Ölçüm cihazlarının fiziksel model üzerindeki yerleri

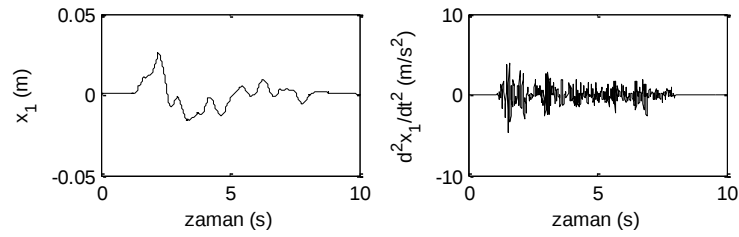
Çizelge 3. 2 Ölçüm cihazları tarafından deney düzeneği üzerinden alınan ölçümler

Konumölçer	Ölçülen değer (m)	İvmeölçer	Ölçülen değer (m/s ²)
D1	x_0	A1	d^2x_0/dt^2
D2	x_1	A2	d^2x_1/dt^2
D3	x_2	A3	d^2x_2/dt^2
D4	x_3	A4, A5	d^2x_3/dt^2
D5	x_4	A6, A7, A8	d^2x_4/dt^2
D6	x_5	A9	d^2x_5/dt^2

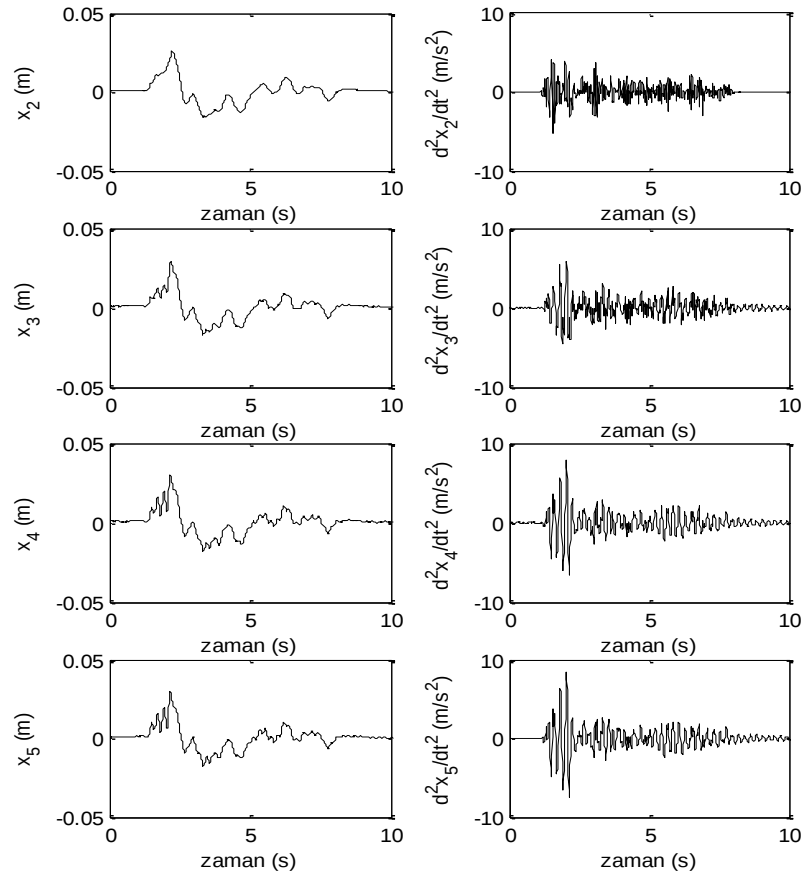
3.3. Deneysel Sonuçlar

3.3.1. Zaman Cevaplarının Analizi

Bu bölümde, zaman alanında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Öncelikle fiziksel modele Şekil 3.10’da verilen ölçekli El Centro depreminin yer hareketi uygulanmıştır. Bu durumda beton blokta oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları Şekil 3.13’de, model krende oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları ise Şekil 3.14’de verilmiştir.

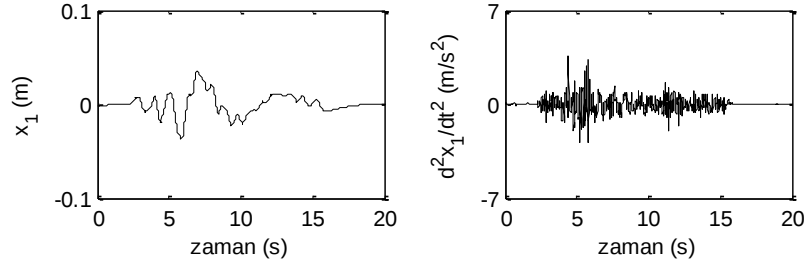


Şekil 3. 13 El Centro depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanması hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

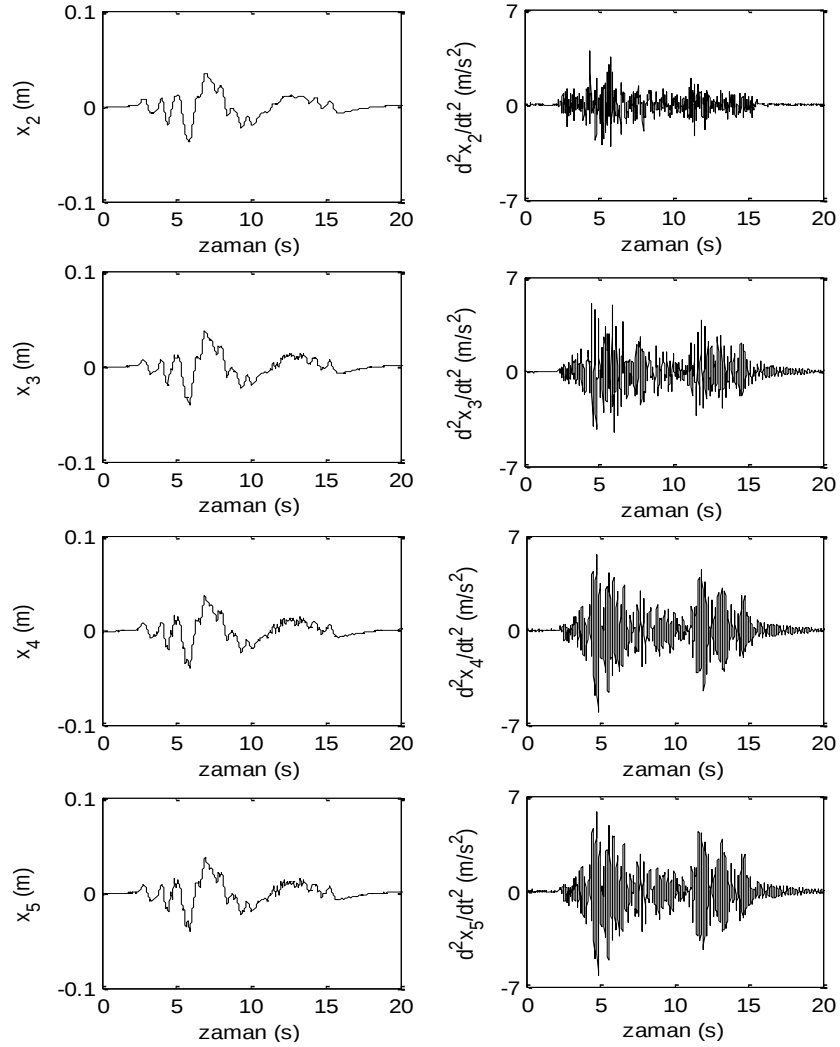


Şekil 3. 14 El Centro depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

Deneylerde ikinci olarak fiziksel modele Şekil 3.11’de verilen Kocaeli depreminin yer hareketi hali uygulanmıştır. Bu durumda beton blokta oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları Şekil 3.15’de, model krende oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları ise Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3. 15 Kocaeli depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanması hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 3. 16 Kocaeli depreminin sarsma masası tarafından fiziksel modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

Çizelge 3.3’de deneysel çalışmalarla elde edilen x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ’e ait yerdeğiştirme ve ivme zaman cevaplarının değerleri (tepeden-tepeye) sayısal olarak verilmiştir.

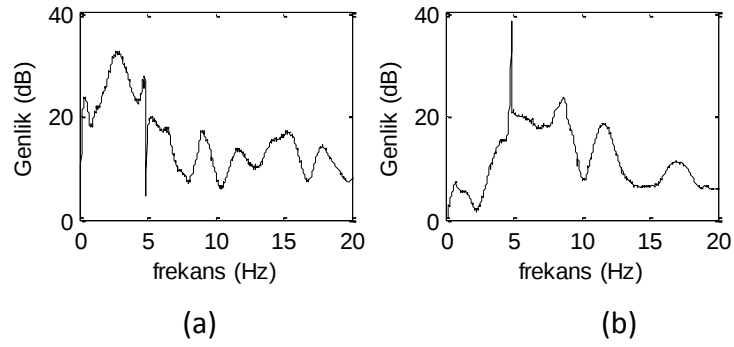
Çizelge 3. 3 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 ’in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	El Centro Depremi	Kocaeli Depremi
x_1 (m)	0.0418	0.0778
x_2 (m)	0.0419	0.0732
x_3 (m)	0.0625	0.0774
x_4 (m)	0.0511	0.0756
x_5 (m)	0.0477	0.0757
d^2x_1/dt^2 (m/s ²)	7.9880	6.1390
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	9.2280	6.9480
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	10.3840	9.3670
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	13.9760	11.5390
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	14.8380	12.0400

3.3.2. Frekans Cevaplarının Analizi

Bu bölümde, frekans alanında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Sistemin frekans cevaplarının elde edilebilmesi için fiziksel sistem üzerinde darbe deneyleri yapılmıştır. Düşük frekansların tesbit edilebilmesi için yapılan deneyde sisteme darbe girişi uygulanan balyoz kauçuk uç takılarak sisteme tatbik edilmiş, yüksek frekansların tesbit edilebilmesi için yapılan deneyde sisteme darbe girişi uygulanan balyoz çelik uç takılarak sisteme tatbik edilmiştir. Şekil 3.17’de sisteme ait frekans cevapları verilmiştir. Şekil 3.17 (a)’da düşük frekansların tesbit edilebilmesi için yapılan deneyin sonuçları, Şekil 3.17 (b)’de ise yüksek frekansların tesbit edilebilmesi için yapılan deneyin sonuçları verilmiştir.

0-20 Hz aralığında yapılan deneylerde 7 kritik frekans değeri gözlemlenmiştir. Çizelge 3.4’de sistemin deneysel olarak elde edilen frekans cevapları sayısal olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 17 Sistemin deneysel olarak elde edilen frekans cevapları

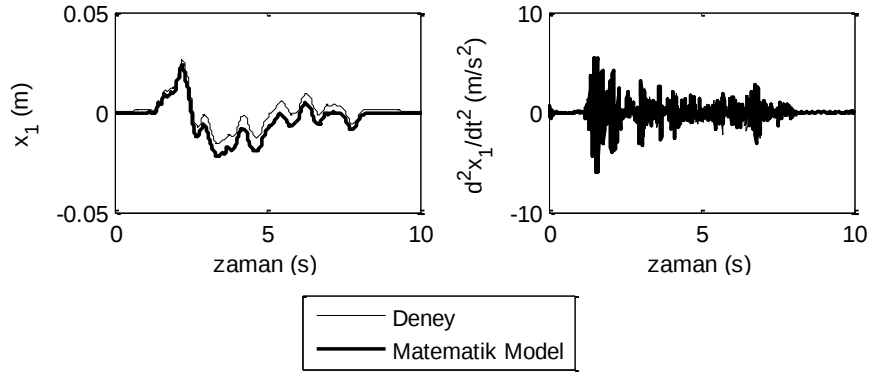
Çizelge 3. 4 Sistemin deneysel olarak elde edilen kritik frekans değerleri

w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)	w_6 (Hz)	w_7 (Hz)
0.79	2.79	4.87	8.46	11.59	15.34	17.89

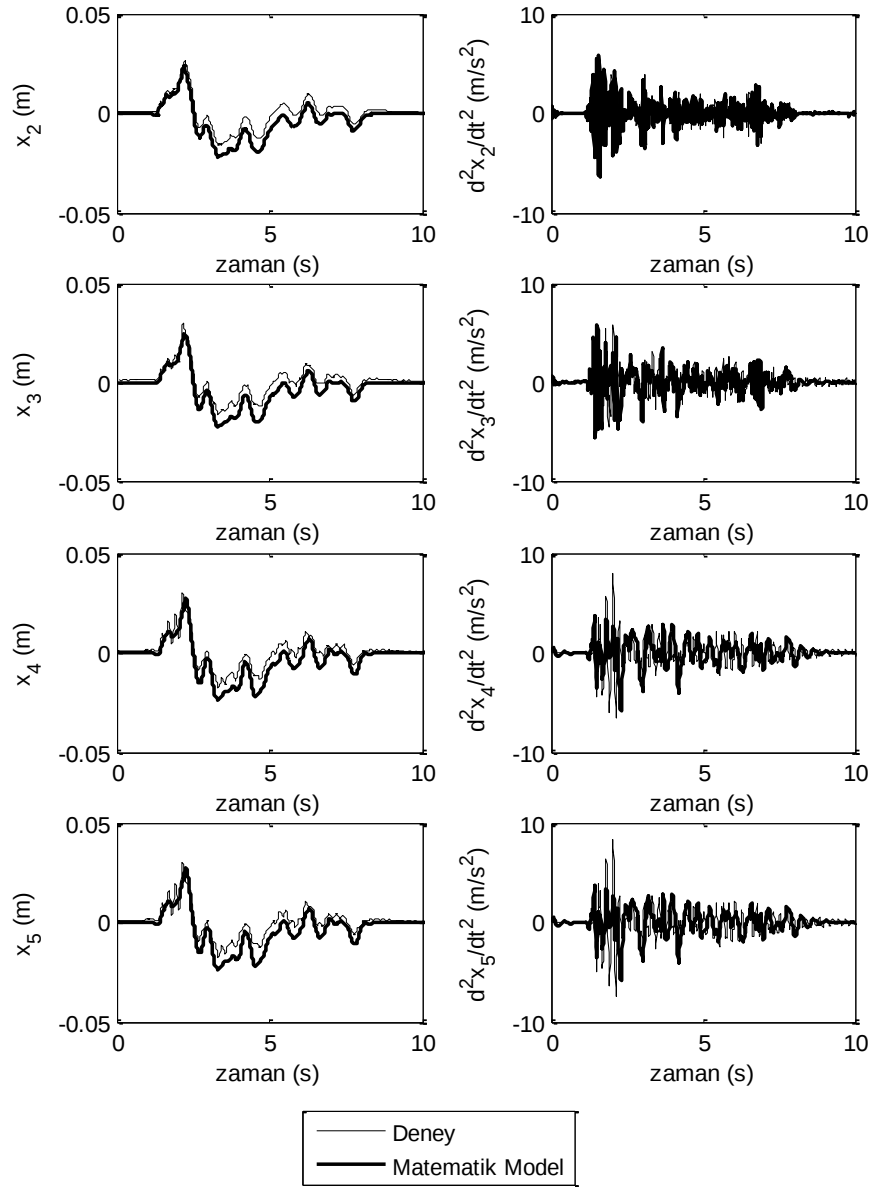
3.4. Benzetim Çalışmalarının Sonuçları İle Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde, geliştirilen matematik modelin etkinliğinin görülebilmesi amacıyla Bölüm 3.3’de yer alan deneysel çalışmalarda fiziksel sistem üzerinden elde edilen zaman ve frekans cevapları, Bölüm 2.4’de matematik model kullanılarak gerçekleştirilen benzetim çalışmaları yoluyla elde edilen zaman ve frekans cevapları ile karşılaştırılmıştır.

İlk olarak El Centro depreminin yer hareketinin bozucu giriş olarak uygulandığı deneysel sonuçlar ile benzetim çalışmaları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.18’de x_1 ’de oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları deneysel ve matematik model olarak verilmiştir. Şekil 3.19’da ise x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 ’te oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları deneysel ve matematik model olarak verilmiştir.

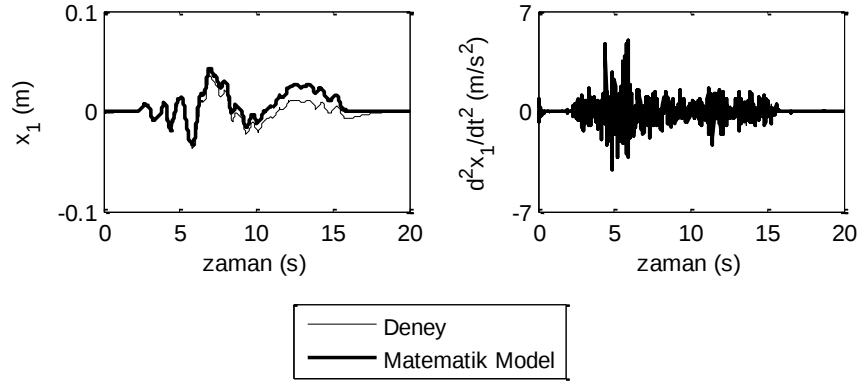


Şekil 3. 18 El Centro depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_1 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

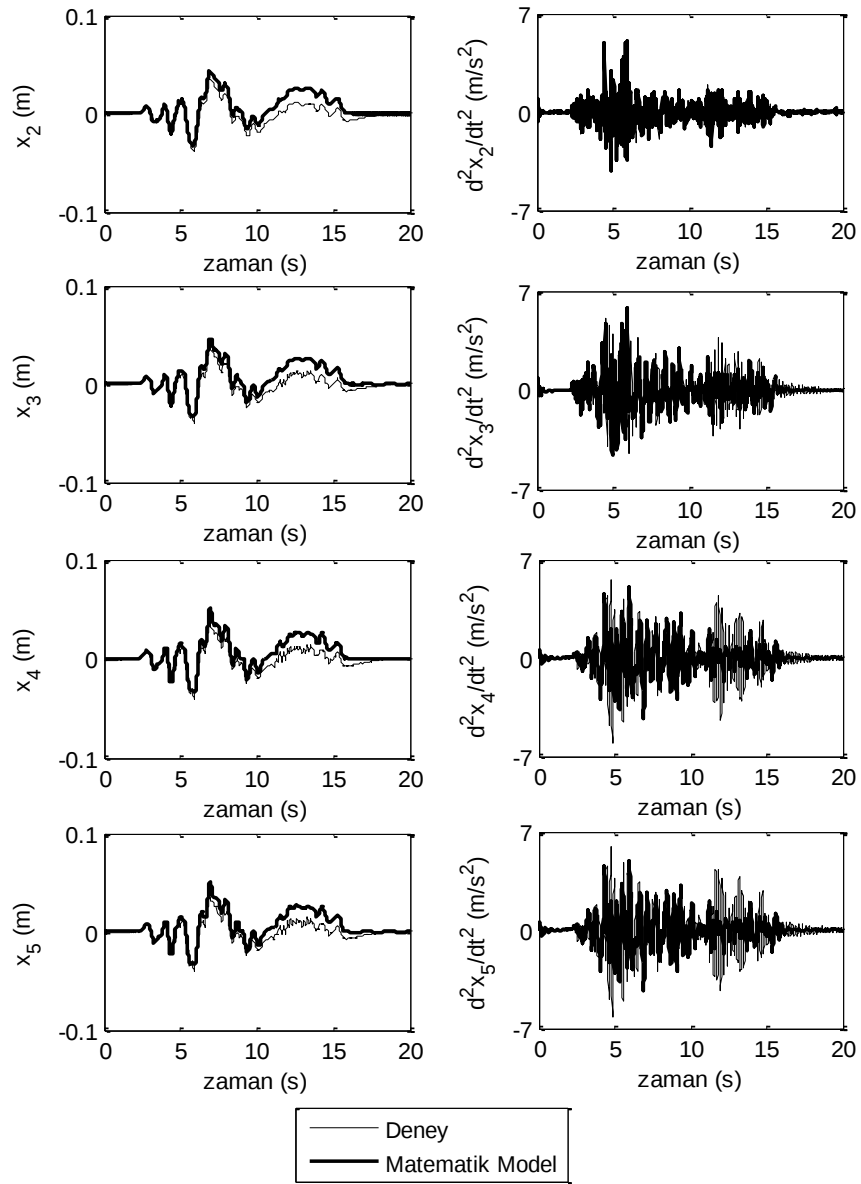


Şekil 3. 19 El Centro depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

İkinci olarak Kocaeli depreminin yer hareketinin bozucu giriş olarak uygulandığı deneysel sonuçlar ile benzetim çalışmaları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.20’de x_1 ’de oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları deneysel ve matematik model olarak verilmiştir. Şekil 3.21’de ise x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 ’te oluşan yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları deneysel ve matematik model olarak verilmiştir.



Şekil 3. 20 Kocaeli depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_1 ’in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 3. 21 Kocaeli depreminin fiziksel sisteme ve matematik modele uygulanmış hali için x_2, x_3, x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

Deneysel çalışmalardan elde edilen frekans cevapları ile matematik modelden elde edilen frekans cevapları Çizelge 3.5'de karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalar 0-20 Hz aralığında yapıldığından frekans cevapları 0-20 Hz aralığı için karşılaştırılarak sonuçlar sayısal olarak gösterilmiştir.

Çizelge 3. 5 Deneysel olarak ve matematik modelden elde edilen frekans cevaplarının karşılaştırılması

	w_1 (Hz)	w_2 (Hz)	w_3 (Hz)	w_4 (Hz)	w_5 (Hz)	w_6 (Hz)	w_7 (Hz)
Deney	0.79	2.79	4.87	8.46	11.59	15.34	17.89
Matematik model	0.68	2.26	4.96	7.61	11.50	-	-

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, teste tabi tutulan 1/20 ölçekli kren modeli için geçerlidir. Matematik model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması, matematik modelin sistemin dinamik davranışlarını hem zaman hem de frekans alanında etkin bir şekilde ortaya koyduğunu ispat etmiştir. Matematik modelden ve deneylerden elde edilen yerdeğiştirme ve ivme zaman cevaplarının karakteristiğinin birbirlerine uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Frekans alanında yapılan analizlerde ise, hata oranının literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür (Ju ve Lin [9]). Sonuç olarak geliştirilen matematik modelin sistemin dinamik davranışlarını gerçekçi olarak yansıttığı belirlenmiş ve matematik model doğrulanmıştır. Geliştirilen matematik model yardımıyla, krenlerde deprem etkilerinin incelenmesi, dinamik etkilerin gözlemlenebilmesi yoluyla uygun konstrüktif tedbirlerin alınması ve aktif-pasif kontrol yöntemleri ile sismik performanslarının artırılması mümkün olacaktır.

KRENLERDE AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜNÜN UYGULANMASI

Bu doktora tezinin önceki bölümlerinde, depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını gerçekçi olarak ortaya koyan nonlinear bir matematik model ortaya konularak tezin ilk ana amacı olan depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarının ortaya konulabilmesi dolayısıyla problemin tespit edilebilmesi aşaması gerçekleştirilmiştir. Bu bölümden itibaren ise tezin ikinci ana amacı olan, krenlerin sismik performanslarının artırılması problemine çözüm getirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, çalışmada mevcut problemin çözümü için aktif titreşim kontrolü önerilmiştir.

Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yerdeğıştirmelerini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Bu sistemler gelişmiş bilgisayarlar ile donatılmış olup, titreşimlerin etkilerini yapıda bir karşı hareket üreterek sönümlemeye çalışmaktadır. Aktif titreşim kontrolü genel olarak iki kısımdan meydana gelir. Birincisi, sisteme dışarıdan uygulanacak kuvveti yapıya tatbik edecek olan aktif kontrol mekanizması; ikincisi ise, sensörlerden gelen bilgiyi değerlendirip eyleyici tarafından üretilmesi gereken kontrol kuvvetini hesaplayan kontrol algoritmasıdır. Ayrıca, yapısal sistemlerin aktif kontrolü çalışmalarında kontrolörün yerleştirileceği yerin kontrolörün performansı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir [75]. Dolayısıyla bu bölümde, öncelikle krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrolü çalışmalarında kontrolörün yerleştirileceği en uygun yerin matematiksel olarak belirlenmesi sağlanmış, ardından uygulanacak kontrol kuvvetini krene tatbik edecek olan kontrol mekanizması üzerinde durulmuş ve kontrolör içeren durumdaki

krenler için hareket denklemleri ifade edilmiştir.

4.1. Krenlerde Aktif Titreşim Kontrolü İçin Kontrolörün Yerleştirileceği En Uygun Yerin Belirlenmesi

Depreme maruz yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolü çalışmalarında kontrolörün yerleştirileceği yer kontrolörün performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Literatürde, yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında kontrolörün yerleştirileceği yerin belirlenmesinde kullanılan kesin bir yöntem mevcut değildir. Genellikle benzetim çalışmalarından elde edilen cevaplara göre ve önceki deneyimlere dayanılarak kontrolörler en uygun olduğu düşünülen yere yerleştirilmiştir [75]. Bu doktora tezinde, optimum performansa ulaşmak için kontrolörün kren üzerinde yerleştirileceği yer sistemin yönetilebilirlik indeksinin bulunmasıyla matematiksel olarak belirlenmiştir.

Doğrusal bir kontrol sistemini ele alalım.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_h u(t) \quad (4.1)$$

Burada, $\dot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ ve $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$ olacak şekilde sistem tümüyle yönetilebilir olsun. Yani $C = [B_h \ AB_h \ A^2 B_h \ \dots \ A^{n-1} B_h]$ matrisinin rankı n olsun. Bu bölümde yapılan matematiksel analizlerde, kren sistemi yüksüz olarak ele alınmış ve bu durumda kren sistemi beş serbestlik dereceli bir yapısal sistem olarak kabul edilmiştir. Bu durumda $n=10$ olduğu ve sistemin tam yönetilebilir olduğu görülmüştür. Burada amaç, sistemi yönetilebilir kanonik forma getirmektir. Bunun için C yönetilebilirlik matrisi sütunlarının ilişkilerini de ortaya koyacak şekilde yazılır. Krenin tüm bölümlerine kontrolör yerleştirilmesi durumunu ele alalım.

Eğer,

$$B_h = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4] \quad (4.2)$$

şeklinde ise

$$\tilde{C} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ | \ Au_1 \ Au_2 \ Au_3 \ Au_4 \ | \ A^2 u_1 \ A^2 u_2 \ A^2 u_3 \ A^2 u_4 \ | \ A^3 u_1 \ A^3 u_2 \ A^3 u_3 \ A^3 u_4 \ | \ A^4 u_1 \ A^4 u_2 \ A^4 u_3 \ A^4 u_4] \quad (4.3)$$

olarak yazılır. Bu matrisin içinde sol baştan itibaren sırasıyla doğrusal bağımsız sütunlar seçilerek kurulan $n \times n$ boyutlu $\bar{C}$ matrisi bulunur. $\bar{C}$ matrisi içinde u_1 sütunundan türemiş sütunlar $\bar{m}_1$ adet, u_2 sütunundan türemiş sütunlar $\bar{m}_2$ adet, u_3 sütunundan türemiş sütunlar $\bar{m}_3$ adet ve u_4 sütunundan türemiş sütunlar $\bar{m}_4$ adet olur. Buradan, $\bar{C}$ matrisinin B_h 'nin kolonlarına göre sıralı yeni bir L matrisi aşağıdaki gibi elde edilir.

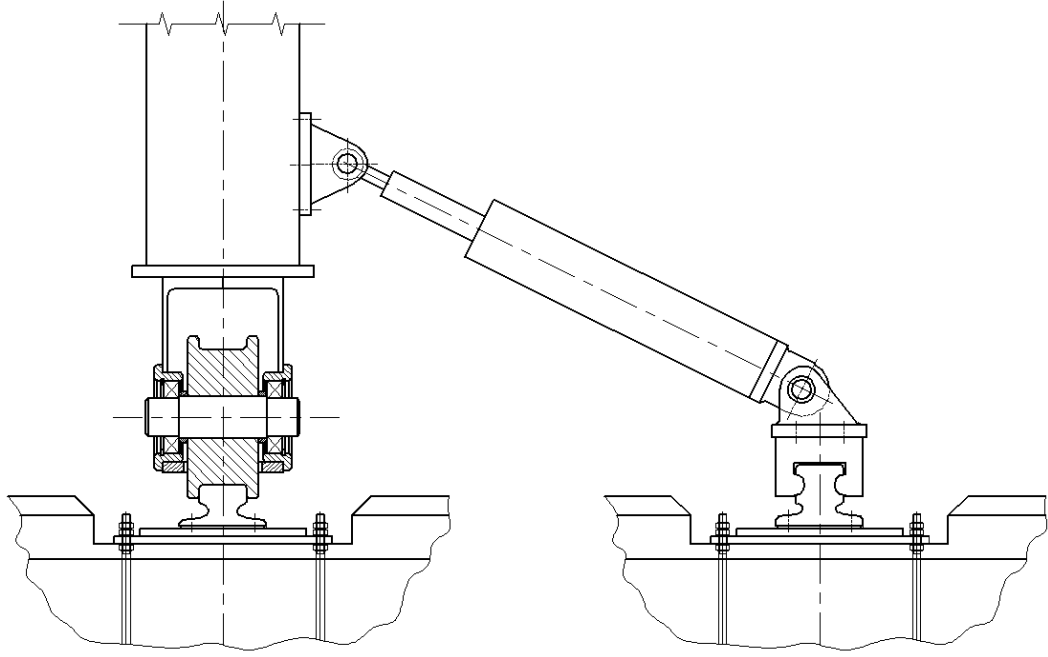
$$L = [u_1 \ A u_1 \ A^2 u_1 \ A^3 u_1 \ A^4 u_1 \mid u_2 \ A u_2 \mid u_3 \ A u_3 \mid u_4] \quad (4.4)$$

Burada, $\bar{m}$ tamsayılarına yönetilebilirlik indisi, bunların en büyüğüne ise yönetilebilirlik indeksi adı verilir. Bütünüyle yönetilebilir bir sistemde yönetilebilirlik indislerinin toplamı n adet olur. Özetle, yönetilebilirlik indisleri, ilgili girişe ait yönetilebilirlik alt uzayının boyutudur. Bu alt uzay ne kadar büyükse, ilgili giriş sistem kontrolünde o derece etkilidir. Bu durumda, yönetilebilirlik indeksine sahip olan giriş, sistemin yönetiminde en etkin giriştir.

Sistemimiz 10 durumlu ve 4 kontrol girişli bir sistemdir. Krende her noktaya yerleştirilen kontrolörlerin yönetilebilirlik indisleri hesaplandığında L matrisinden $\bar{m}_1=5$, diğerlerinin $\bar{m}_2=2$, $\bar{m}_3=2$ ve $\bar{m}_4=1$ olduğu görülmüştür. Yapılan bu matematiksel analiz, kontrolörün yerleştirileceği en uygun yerin x_1-x_2 arası olması gerektiğini ispat etmiştir. Başka bir deyişle, optimum sönüm performansının sağlanması için aktif kontrol sisteminin konteyner rıhtımı ile tekerlek mekanizması arasına yerleştirilmesinin uygun olduğu görülmüştür.

4.2. Aktif Titreşim Kontrol Mekanizmasının Krene Yerleştirilmesi

Bir önceki bölümde, optimum sönüm performansını sağlamak üzere kontrolörün kren üzerinde yerleştirileceği yer, sistemin yönetilebilirlik indeksinin bulunmasıyla matematiksel olarak belirlenmiş ve optimum sönüm performansının sağlanması için aktif kontrol mekanizmasının x_1-x_2 arasına yerleştirilmesi gerektiği gösterilmiştir. Buna göre, kren sistemine aktif kontrol mekanizması Şekil 4.1'deki gibi yerleştirilmiştir.



Şekil 4. 1 Aktif kontrol mekanizmasının kren sistemine yerleştirilmesi

Bozucu bir dış etki altındaki krenin hareket denklemi kontrollü durumda en genel halde aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$M_s \ddot{x}(t) + C_s \dot{x}(t) + K_s x(t) = F_u u(t) + E_w w(t) \quad (4.5)$$

Burada $u(t)$ kontrol kuvvetini, $F_u \in \mathcal{R}^{m_u \times n}$ kontrolörün yerleştirildiği yeri ifade etmektedir. Diğer ifadeler Bölüm 2.2’de açıklanmıştır. Sistemin hareket denklemlerinin düzenlenmesiyle elde edilen kütle, sönüm ve rijitlik matrisleri Ek-B’de verilmiştir.

Sisteme kontrol uygulanabilmesi için, $x(t) = [x(t)^T \dot{x}(t)^T]^T$ ifadesi kullanılarak yukarıda tanımlanan sistemin hareket denklemleri durum-uzay formuna,

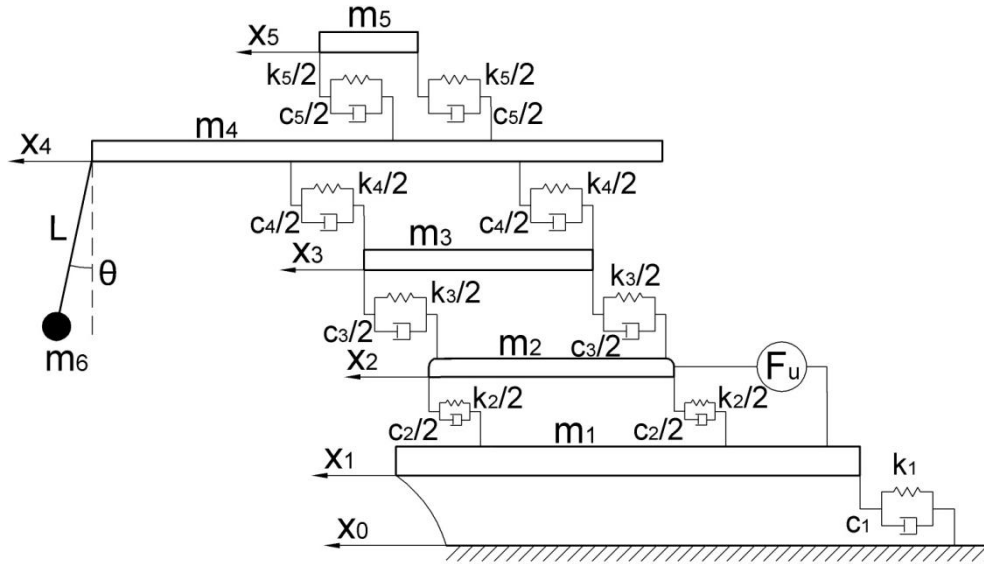
$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_h u(t) + B_w w(t) \quad (4.6)$$

şeklinde dönüştürülmüştür. Burada,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}K_s & -M_s^{-1}C_s \end{bmatrix}, B_h = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1}F_u \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1}E_w \end{bmatrix}$$

sırasıyla uygun boyutlu sistem, kontrol girişi ve bozucu giriş matrislerini ve $x(t) \in \mathcal{R}^n$ sistemin durum vektörünü, $u(t) \in \mathcal{R}^{m_u}$ sistemin kontrol girişini, $w(t) \in \mathcal{R}^{m_w}$ sistem

üzerindeki bozucu giriş vektörünü göstermektedir. Aktif kontrol uygulanmış durum için kren sisteminin dinamik modeli Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 2 Aktif kontrol uygulanmış kren sisteminin dinamik modeli

DIŞBÜKEY OPTİMİZASYON VE DOĞRUSAL MATRİS EŞİTSİZLİKLERİ İLE H_∞ OPTİMİZASYON PROBLEMİ

Aktif titreşim kontrolünün önemli bir elemanı sensörlerden gelen bilgiyi değerlendirip eyleyici tarafından üretilmesi gereken kontrol kuvvetini hesaplayan kontrol algoritmasıdır. Bu bölümden itibaren aktif titreşim kontrolü için kontrol algoritmalarının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu bölümde, doktora tezinde tasarlanacak kontrol algoritmalarının tasarımında temel teşkil eden dışbükey optimizasyon problemi ile ilgili temel tanımlar verilmiş ve dışbükey optimizasyon temelindeki DME anlatılmış, ardından H_∞ optimizasyon kontrol problemi üzerinde durulmuştur.

Hardy'nin uzun süre uygulama alanı bulunamayan H uzayları teorisi 1970'lerden sonra Kontrol Mühendisliği problemlerinde uygulama alanı bulmuştur. 1981'den sonra da H_∞ optimizasyon probleminin çözümüne yönelik önemli çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. DME ilk kez Lyapunov'un kararlılık analizinde ortaya çıkmıştır [18]. Daha sonra, Lure ve Postnikov doğrusal olmayan eyleyicilerin kararlılığı için ortaya koydukları çözüm önerisinde DME'lerinden yararlanmışlardır [82]. Ardından, Kalman, Yakupovich ve Popov DME'lerin çözümüne yönelik grafiksel bir çözüm metodu geliştirmişlerdir. Bu metod, günümüzde KYP yardımcı teoremi olarak kontrol alanında yerini almıştır. DME'nin sayısal çözümü için Nesterov ve Nemirovski tarafından geliştirilen yöntem konunun gelişmesini sağlayan en önemli çalışmalardan biri olmuştur [83], [84]. Nesterov ve Nemirovski çalışmalarında, H_∞ optimizasyon probleminin DME temelli

çözümünün elde edilmesine yönelik yeni bir sayısal yöntem önermişlerdir. Makalelerinde, İç Nokta Algoritmasını (İNA), DME kısıtları üzerinden dışbükey optimizasyon problemine genişletmişlerdir. Daha sonra yapılan çalışmalar, H_∞ optimizasyon kontrolü, H_2 optimizasyon kontrolü, kutup yerleştirme, dayanıklı kutup yerleştirme vb... kontrol problemlerinin DME ile çözülebileceğini göstermiştir [85], [86], [87].

Bu bölümde ilk olarak dışbükey optimizasyon problemi ile ilgili temel tanımlar verilerek, doktora tezinde kontrolörlerin tasarımında temel teşkil eden dışbükey optimizasyon temelindeki doğrusal matris eşitsizlikleri anlatılmış, ardından H_∞ optimizasyon kontrol problemi üzerinde durulmuştur.

5.1. Dışbükey Optimizasyon

Optimizasyon, karşılaştığımız problemlerde elde edebileceğimiz çözüm kümelerinden veya ihtimallerinden bizim için “en iyisini seçmek” olarak tanımlanabilir. Pek çok bilim dalında olduğu gibi mühendislikte de optimizasyon problemleri ile uğraşilmektedir.

Matematiksel problemlerde aday kararların özellikleri ve en iyi kararın analitik olarak belirlenmesi doğrudan optimizasyon teorisinin ilgi alanına girmektedir. Bir optimizasyon problemi içerisindeki bütün kararların oluşturduğu kümeyi H ile ifade edelim. Ayrıca aday kararları da H kümesinin alt kümesi olan S ile tanımlayalım. Aday kararın performansını nicilemek üzere, aday kararlar içerisinde alınan x ’ler kullanılarak oluşturulan $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ şeklinde bir $f(x)$ fonksiyonu atayalım. Bu fonksiyon, amaç fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu durumda, amaç fonksiyonunun yorumuna göre S kümesi içerisindeki tüm aday çözümler üzerinde f ’i minimize veya maksimize edebiliriz. Sonuç olarak optimum karar, f ’i makul olan tüm alternatifler içerisinde minimum veya maksimum yapan S ’nin bir elemanı olarak tanımlanır [42], [75].

Bir optimizasyon probleminde amaç fonksiyonu ve mevcut kısıtların serbest bıraktığı olası çözümler kümesi, dışbükeylik adı verilen bir özelliğe sahip olduğunda problemin dışbükey bir problem olduğu söylenir. Minimizasyon amaçlı dışbükey problemler, “gerek koşul-yeter koşul” ve “yerel minimum-genel minimum” ikilemlerinde çözümü

kolaylaştıran bazı önemli özelliklere sahiptir. Bu bölümde kısaca bu konudaki temel tanımlara değinilmiştir.

- **Dışbükey Fonksiyon**

S boş olmayan dışbükey bir küme, $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ şeklinde tanımlı bir fonksiyon olmak üzere, her $x_1, x_2 \in S$ ve $\alpha \in (0,1)$ koşulunda

$$f(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) \leq \alpha f(x_1) + (1-\alpha)f(x_2) \quad (5.1)$$

Eşitsizliği sağlanıyorsa, f dışbükey bir fonksiyondur.

- **Dışbükey Küme**

Doğrusal vektör uzayında S kümesi

$$\{x_1, x_2 \in S\} \Rightarrow \{x := \alpha x_1 + (1-\alpha)x_2 \in S \mid \forall \alpha \in (0,1)\} \quad (5.2)$$

şartını sağlıyorsa, bu kümeye dışbükey küme denir. Geometrik olarak burada iki noktanın oluşturduğu bir çizgi dışbükey küme olarak gösterilmiştir. Genelde sadece bir nokta içeren kümeler de dışbükey küme olarak kabul edilir. $\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2$ $\alpha \in (0,1)$ ile gösterilen nokta x_1 ve x_2 gibi iki noktanın dışbükey kombinasyonu olarak tanımlanır.

- **Dışbükey Kombinasyon**

S vektör uzayını bir alt uzay olarak ele aldığımızda

$$x := \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \quad (5.3)$$

ile tanımlı nokta $\alpha_i \geq 0$, $i=1, \dots, n$ ve $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ koşulunu sağladığı sürece, $x_1, \dots, x_n \in S$ noktalarının dışbükey kombinasyonu olarak tanımlanır.

- **Dışbükey Kabuk**

$S \subset H$ kümesinin dışbükey kabuğu $\text{conv}(S)$ ile gösterilir ve $S \in H$ alt kümesini kapsayan tüm dışbükey kümelerin kesişimidir. Eğer S kümesini kapsayan sonlu sayıda dışbükey küme varsa, bu kümelerin kesişim noktalarına $\text{conv}(S)$ kümesinin köşe

noktaları denilir. Sonlu bir kümenin sonlu sayıda eleman içeren dışbükey kabuğu bir politoptur. Bu önermenin terside aynen geçerlidir. Eğer her $x \in S$ ve $\alpha > 0$ için $\alpha x \in S$ sağlanıyorsa bu küme bir koniktir. Rastgele seçilen dışbükey konik kümelerin kesişimi de yine bir dışbükey küme oluşturur.

- **İlgın Küme**

Her $x_1 \in S$, $x_2 \in S$ ve $\alpha \in \mathbb{R}$ için $x := \alpha x_1 + (1-\alpha)x_2$ ile tanımlanan nokta, doğrusal vektör uzayında tanımlı alt küme olan S içerisinde ise bu kümeye ılgın küme denir. ılgın kümelerde, ilgili küme içerisinde seçilen iki nokta arasındaki doğru parçası her zaman ilgili küme içerisinde kalır. Her ılgın küme dışbükeydir.

- **İlgın Fonksiyon**

Her $x_1 \in S$, $x_2 \in S$ ve $\alpha \in \mathbb{R}$ için

$$f(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) = \alpha f(x_1) + (1-\alpha)f(x_2) \quad (5.4)$$

ise f fonksiyonu ılgın fonksiyondur.

Dışbükey fonksiyonlarla çalışmanın en önemli yönü, yerel en küçüğün her zaman için global en küçüğe eşit olmasıdır. Bu noktada, yerel ve global optimum kavramlarının açıklanması uygun olacaktır.

- **Yerel ve Global Optimum**

Normlu H uzayının bir alt kümesi olarak S kümesini ele alalım. Eğer $\varepsilon > 0$, $\|x - x_0\| < \varepsilon$ koşulu altındaki her $x \in S$ için $f(x_0) \leq f(x)$ eşitsizliği sağlanıyorsa $x_0 \in S$, $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonunun yerel optimum çözümüdür. Bu eşitsizlik bir koşul gerektirmeksizin her $x \in S$ için sağlanıyorsa çözüm artık global optimum olur.

Önerme: $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ fonksiyonunu dışbükey kabul ettiğimizde, f fonksiyonunun her yerel optimum çözümü aynı zamanda global optimum çözümü olacaktır. Yani, f fonksiyonu kesin dışbükey ise global optimum çözüm tektir.

İspat: f fonksiyonu dışbükey ise ve $x_0 \in S$ noktası bu fonksiyonun yerel optimum çözümü ise her $x \in S$ ve $\alpha \in (0,1)$ için

$$f(x_0) \leq f(x_0 + \alpha(x - x_0)) = f((1-\alpha)x_0 + \alpha x) \leq (1-\alpha)f(x_0) + \alpha f(x) \quad (5.5)$$

eşitsizliği ve bu eşitsizlikten

$$0 \leq \alpha(f(x) - f(x_0)) \quad (5.6)$$

elde edilir. Diğer bir gösterim ile $f(x_0) \leq f(x)$ sonucuna ulaşılır. Bundan dolayı x_0 fonksiyonu global optimum çözümdür. Eğer fonksiyon kesin dışbükey ise bu durumda (5.5) eşitsizliğindeki ikinci kısım kesin olacak ve bunun doğal bir sonucu olarak (5.6) eşitsizliği de kesin olacak ve x_0 tek olacaktır.

Bu ispat bize çözümün varlığı hakkında bilgi sunmak yerine, dışbükey fonksiyonlarda eğer bir yerel optimum çözüm varsa bunun aynı zamanda global optimum çözüm olduğunu göstermektedir. Bu nedenle dışbükey fonksiyonlarda sadece yerel optimum çözüm bulunması, global optimum çözümü bulmak anlamına gelir (Delibaşı [42], Yazıcı [75], Scherer ve Weiland [88]).

- **Dışbükey Optimizasyon Problemi**

Standart forma getirilmiş haliyle

$$P = f_0(x); \quad x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T \rightarrow \min \quad (5.7)$$

$$f_j(x) = 0; \quad j = 1, 2, \dots, J; \quad J < N \quad (5.8)$$

$$g_k(x) = b_k; \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (5.9)$$

şeklindeki bir optimizasyon probleminde, (5.8) eşitlik ve (5.9) eşitsizlik kısıtları, bir S aday çözümler kümesi dışbükey küme, amaç fonksiyonu da (en azından S kümesinin sınırları içerisinde) dışbükey bir fonksiyon olan optimizasyon problemlerine dışbükey optimizasyon problemi denir [75].

5.2. Doğrusal Matris Eşitsizlikleri (DME)

Doğrusal matris eşitsizlikleri sistem ve kontrol teorisinde yaygın kullanımı nedeniyle son zamanlarda üzerinde pek çok çalışmanın yapıldığı bir konu haline gelmiştir [88].

Herhangi bir doğrusal matris eşitsizliği kanonik formda;

$$F(x) := F_0 + x_1 F_1 + \dots + x_n F_n = F_0 + \sum_{i=1}^n x_i F_i < 0 \quad (5.10)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada;

- $x = (x_1, \dots, x_n)$ n tane karar değişkeni içeren vektörü göstermektedir. x_i 'ler karar değişkenleri veya optimizasyon değişkenleri olarak adlandırılırlar.
- $F_0, \dots, F_n$ gerçekte simetrik matrisleri göstermektedir.
- < 0 ifadesi kesin negatifliği göstermektedir. Başka sözlerle, simetrik (hermityen) ve gerçekte bir matris için tüm özdeğerlerin sıfırdan küçük yani negatif olması gerektiğini göstermektedir. ($\lambda_{\max}(F(x)) < 0$).

Kısa bir hatırlatma yapmak gerekirse, A matrisi kare ve $A = A^* = \overline{A}^T$ eşitliği sağlanıyorsa A matrisi Hermityen bir matrisdir. Burada bar sembolü A matrisi reel ise $A = A^T$ 'dir ve simetriktir.

DME'leri, x gibi bir değişken üzerinden, dışbükey bir kıstas belirlemek için kullanılabilir. Bu durum DME'leri günümüz optimizasyon problemlerinin çözümü için ilgi çekici kılmaktadır.

$$S := \{x \mid F(x) < 0\} \quad (5.11)$$

$F(x) < 0$ DME'sinin çözüm kümesi dışbükeydir. Burada, $x_1, x_2 \in S$ ve $\alpha \in (0, 1)$ durumunda,

$$F(\alpha x_1 + (1 - \alpha)x_2) = \alpha F(x_1) + (1 - \alpha)F(x_2) < 0 \quad (5.12)$$

şeklindeki F fonksiyonu $\alpha > 0$, $(1 - \alpha) > 0$ koşulu altında ılgındır. $F(x) < 0$ DME'lerinin x üzerinden dışbükey kıstas olması özel bir durum olsa da birçok dışbükey küme bu şekilde kolaylıkla tanımlanabilir.

DME yaklaşımının diğer bir önemli avantajı, çok sayıda DME söz konusu olduğunda bunların hepsinin daha büyük boyutlu tek bir DME şeklinde yazılabilmesidir. DME sistemleri sonlu sayıda DME'den oluşmaktadır. Dışbükey fonksiyon ve küme tanımlarından da bilindiği gibi

$$F_1(x) < 0, \dots, F_k(x) < 0 \quad (5.13)$$

şeklindeki DME'lerin her birinin oluşturduğu olası kümenin kesişimi de dışbükeydir. (5.13) DME'lerini sağlayan tüm x 'lerin kümesi dışbükeydir. DME'leri tek tek yazmak yerine, tamamı tek bir DME olarak,

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1(x) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & F_2(x) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & F_k(x) \end{bmatrix} < 0 \quad (5.14)$$

şeklinde yazılabilir. Bu son eşitsizlik herhangi bir x için, $F(x)$ matrisinin simetrik (Hermityen) olduğunu belirtmektedir. $F(x)$ matrisinin özdeğerlerinin oluşturduğu küme $F_1(x), \dots, F_k(x)$ matrislerinin tek tek özdeğerlerinin birleşiminden oluşan küme ile aynıdır. $F(x) < 0$ DME'lerini sağlayan x ifadesi, (5.13) ile belirtilen tüm DME'leri de sağlamaktadır. Bu şekilde çoklu DME kısıtlamaları tek bir DME kısıtlamasına indirgenebilir. Bu durum DME'leri çok amaçlı optimizasyon ve kontrol problemlerinin çözümünde etkin şekilde kullanılabilecek bir araç haline getirmiştir [28].

Doğrusal olmayan matris eşitsizlikleri (DOME), Schur tümleyen ile DME formuna çevrilebilir. Örneğin, $S \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ şeklinde bir matris ele alalım.

$$S = S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Burada, S_{11} 'in $r \times r$ boyutunda tekil olmayan bir matris olduğunu kabul edersek,

$$M := S_{22} - S_{21}S_{11}^{-1}S_{12} \quad (5.16)$$

şeklinde tanımlı M matrisi, S matrisi içerisinde S_{11} 'in Schur tümleyeni olmaktadır. S simetrik matris olduğundan aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$S < 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} S_{11} & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} S_{11} < 0 \\ M < 0 \end{cases} \quad (5.17)$$

- **Schur Tümleyen**

$F: X \rightarrow S$ tanımlanmış ve

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_{11}(x) & F_{12}(x) \\ F_{21}(x) & F_{22}(x) \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

şeklinde parçalanmış olsun. Bu ayrıştırmada, $F_{11}(x)$ karedir ve aşağıdaki önermeler birbirine eşdeğerdir.

$$(i) \quad F(x) < 0 \quad (5.19)$$

$$(ii) \quad \begin{cases} F_{11}(x) < 0 \\ F_{22}(x) - F_{21}(x)[F_{11}(x)]^{-1}F_{12}(x) < 0 \end{cases} \quad (5.20)$$

$$(iii) \quad \begin{cases} F_{22}(x) < 0 \\ F_{11}(x) - F_{12}(x)[F_{22}(x)]^{-1}F_{21}(x) < 0 \end{cases} \quad (5.21)$$

5.2.1. DME'lerin Kullanım Alanları

Günümüzde pek çok kontrol problemi DME yaklaşımı ile bir optimizasyon problemine dönüştürülerek çözülebilmektedir. $f: S \rightarrow \mathfrak{R}$ tanımlı bir performans fonksiyonunun minimizasyonu veya maksimizasyonu problemi DME olan $F(x) < 0$ gibi x değişkeni üzerinden tanımlı dışbükey kısıtlamalar gösteriyorsa, aslında bu tip problemler bir dışbükey optimizasyon problemidir. $F(x)$ performans fonksiyonu, dışbükey olduğu sürece çözüme ilişkin algoritmalar geliştirilebilir ve bunlar dışbükey optimizasyon teorisi ile ilişkilidir. Aslında, DME'ler için $F: X \rightarrow S$ ılığın ise genelde iki temel çalışma alanı vardır.

i) Varlık: $F(x) < 0$ DME kısıtlamasını sağlayan en az bir $x \in X$ 'in var olup olmadığını irdelemektir.

ii) Optimizasyon: DME kısıtlamalarını sağlayan elemanlar ile oluşturulmuş küme $S := \{x \mid F(x) < 0\}$ şeklinde ifade edilmiş olsun. $V_{\text{opt}} = \inf_{x \in S} f(x)$ belirleme problemine DME kısıtlamalarıyla optimizasyon problemi denir.

Doğrusal eşitsizlikler, matris eşitsizlikleri, dışbükey karesel eşitsizlikler ve Lyapunov ve Riccati eşitsizlikleri gibi birçok yapı DME şeklinde formüle edilebilir. Bu yaklaşım özellikle kontrol kuramında pek çok problemin çözümüne önemli katkılar sunmuştur. Bunlara örnek olarak, kararlılık, μ analizi, tekil değer minimizasyonu ve durum geri-besleme problemi verilebilir. Bunlardan doktora tezinde kullanılan durum geri-besleme problemini ele alalım.

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.22)$$

şeklinde tanımlansın. Burada, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ve $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ şeklindedir. Problem, bu sistemi $u(t) = Fx(t)$ durum geri besleme kuralı ile asimtotik kararlı kılan F statik kazanç matrisinin belirlenmesidir. Aşağıdaki matris eşitsizliklerini sağlayan F ve X matrisleri bulunduğu problem çözülmüş olacaktır.

$$\begin{cases} X < 0 \\ (A + BF)^T X + X(A + BF) < 0 \end{cases} \quad (5.23)$$

F ve X matrislerinin bilinmeyen olması nedeniyle (5.23) eşitsizliği DME formunda değildir. $K = FY$ ve $Y = X^{-1}$ gibi yeni değişkenler tanımlanıp eşitsizlikler tekrar yazılırsa elde edilen aşağıdaki eşitsizlikler bilinmeyenler üzerinden doğrusal olacaktır.

$$\begin{cases} Y < 0 \\ AY + YA^T + BK + K^T B^T < 0 \end{cases} \quad (5.24)$$

Görüldüğü gibi durum geri-besleme problemimiz, (5.24) DME'lerinde Y ve K matrislerinin varlığının incelenmesi problemine dönüşmüştür. Y ve K matrislerinin belirlenmesi ile F statik kazanç matrisi, $F = KY^{-1}$ ifadesi ile kolaylıkla elde edilebilir [75].

5.2.2. DME'lerinin Çözüm Yöntemleri

Kontrol kuramı içerisinde sıklıkla kullanılan ve analitik olarak çözülemeyen büyük ölçekli optimizasyon problemleri içeren DME'lerinin, nümerik olarak ele alınarak iç

Nokta Algoritması (İNA) yoluyla çözümü mümkündür. DME sayısal çözümüne ilişkin geliştirilmiş algoritmalarından en çok bilinenleri Elipsoid Algoritması (EA) ve İNA dır.

EA nümerik olarak dayanıklı ve kolay uygulanabilirliği ile etkin bir algoritmadır. Ancak bu yöntemin dışbükey problemlerin çözümünde yetersiz kalması ve büyük ölçekli optimizasyon problemlerinde oldukça yavaş çalışması önemli dezavantajlarıdır.

Dış bükey optimizasyon alanındaki en önemli yenilik, iç nokta yönteminin geliştirilmiş olmasıdır. Nesterov ve Nemirovskii'nin çalışması [84], DME yaklaşımıyla formüle edilen optimizasyon problemlerinin gerçekçi ve uygulanabilir olmasını sağlamıştır. Dışbükey programlama çalışmalarındaki bu gelişmeler konik karesel programlama, yarı tanımlı programlama gibi alanlarda gelişmelerin yaşanmasına neden olmuştur. Bu nedenle bu bölümde, İNA'nın kısaca açıklanması faydalı olacaktır.

İNA'nın ana fikri şu şekilde özetlenebilir. F ılgın bir fonksiyon ve minimize etmek istediğimiz $f : \delta \rightarrow \Re$, $\delta := \{x \mid F(x) < 0\}$ uzayında tanımlı bir dışbükey fonksiyon olsun.

Optimize etmek istediğimiz dışbükey problem ise,

$$V_{\text{opt}} = \inf_{x \in \delta} f(x) \quad (5.25)$$

olsun. Bu problemi çözebilmek için (optimum veya optimuma çok yakın çözüm) öncelikle bir bariyer fonksiyonu tanımlanır. Bu fonksiyon aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- δ 'nin içinde kesin dışbükey olmalı,
- δ 'nin içindeki birbirini takip eden $\{x_n\}_{n=1}^{\infty}$ noktaları boyunca $+\infty$ yaklaşıldığında, fonksiyon da δ 'nin sınırına yakınsamalıdır.

θ gibi bir bariyer fonksiyonu verildiğinde, $x \in \delta$ koşulundaki $f(x)$ fonksiyonunun minimizasyonu şeklindeki kısıtlı optimizasyon problemi,

$$f_t(x) := tf(x) + \theta(x) \quad (5.26)$$

şeklindeki kısıtsız bir optimizasyon problemine dönüşmüş olur. Burada $t > 0$ dır ve ceza parametresini simgelemektedir. Ayrıca f_t fonksiyonu $\Re^n$ de kesin dışbükeydir. Temel

fikir f_t fonksiyonunun $x(t)$ 'sini herhangi $t > 0$ anında minimize edebilecek $t \rightarrow x(t)$ ye uygun eşlemeyi belirlemektir. Kısıtsız optimizasyon problemi çözümü için kullanılan hemen hemen tüm iç nokta yöntemlerinde Newton-Raphson iterasyon tekniği kullanılır.

Eğer $F(x) < 0$ gibi bir DME'nin çözümünün varlığı problemi ile karşı karşıya isek, burada f fonksiyonun bir rolü yoktur. Olası bariyer fonksiyonlarından biri logaritmik fonksiyondur. Bir bariyer fonksiyonu logaritmik fonksiyon olarak

$$\theta(x) := \begin{cases} \log \det -F(x)^{-1} & \text{Eğer } x \in S \\ \infty & \text{tüm diğer durumlarda} \end{cases} \quad (5.27)$$

δ kümesinin boş olmadığı ve sınırlı olduğu kabul edilirse, θ kesin dışbükey olur ve δ üzerinde bir bariyer fonksiyonu olur. Bu durumda, θ fonksiyonunun minimumunu teşkil eden x_{opt} çözümünün tek olarak var olduğu gösterilebilir. Açıktır ki, bu nokta δ kümesinin içindedir ve δ 'in çözüm kümesinin analitik merkezi olarak adlandırılır. x_{opt} noktası genellikle klasik Newton iterasyonundan kolayca,

$$x_{k+1} := x_k - (\theta''(x_k))^{-1} \theta'(x_k) \quad (5.28)$$

şeklinde hesaplanabilir. Buradaki θ' ve θ'' ifadeleri sırasıyla θ 'nın gradyanı ve Hesiyanını göstermektedir.

Eğer $F(x) < 0$ gibi bir DME'ye bağlı $f(x)$ fonksiyonun minimizasyonu problemi başka bir deyişle

$$\hat{F}_t(x) := \begin{bmatrix} f(x) - t & 0 \\ 0 & F(x) \end{bmatrix} < 0 \quad (5.29)$$

DME'nin çözümünün varlığı problemi şeklinde de ifade edilebilir. Burada $t > t_0 := \inf_{x \in \delta} f(x)$ ceza parametresidir. Aynı bariyer fonksiyonu kullanıldığında, kısıtsız optimizasyon problemi

$$gt(x) := \log \det -\hat{F}_t(x)^{-1} = \underbrace{\log \frac{1}{t - f(x)}}_{\theta_0(t - f(x))} + \underbrace{\log \det -F(x)^{-1}}_{\theta(x)} \quad (5.30)$$

fonksiyonunun minimizasyonu olarak şekillenmektedir [42], [88].

5.3. Doğrusal Matris Eşitsizlikleri İle Analiz

5.3.1. H_∞ Normu

Matris ve vektörler gibi çok bileşenli matematiksel ifadelerin büyüklüğünün ya da uzunluğunun ölçülendirilmesinde gerçek değerli bir fonksiyon olan norm kavramından yararlanılır.

H_∞ doğrusal vektör uzayı, sağ yarı açık s düzleminde analitik, (5.31) ile verilen norma göre sınırlı olan fonksiyonların oluşturduğu L_∞ Banach uzayının kapalı bir alt uzayıdır. Bu uzayda tanımlı olan norma da H_∞ normu denir. $G(s) \in H_\infty$ ise H_∞ normu,

$$\|G(s)\|_\infty := \sup_{\text{Re}(s)>0} \sigma_{\max}(G(s)) = \sup_{w \in \mathcal{R}} \sigma_{\max}(G(jw)) \quad (5.31)$$

şeklinde ifade edilebilir. H_∞ vektör uzayı kararlı, düzgün transfer fonksiyonlarını içerir. Eşitlik (5.31)'deki ikinci eşitlik Maksimum Genlik Teoremi'nin genelleştirilmiş halidir [89]. Burada, eğer $G(s)$ tek girişli tek çıkışlı bir sistemin transfer fonksiyonu ise H_∞ normu,

$$\|G(s)\|_\infty = \sup_{w \in \mathcal{R}} |G(jw)| \quad (5.32)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade bir girişli bir çıkışlı sistemin transfer fonksiyonuna ilişkin Bode genlik diyagramındaki maksimum noktayı veya Nyquist eğrisinin orijinden olan maksimum uzaklığını verir [16].

H_∞ normu zaman alanında da tanımlanabilir. Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem için $w(t)$ sistemin girişi, $z(t)$ sistemin çıkışı olmak üzere, bunların enerjileri

$$\|w\|_2^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} w^T(t)w(t)dt$$

$$\|z\|_2^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} z^T(t)z(t)dt$$

olarak tanımlanabilir. Buradan, $G(s)$ 'in H_∞ normu,

$$\|G\|_{\infty} = \sup_{w \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} \quad (5.33)$$

şeklinde elde edilebilir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi H_{∞} normu $L_2([0, \infty))$ uzayı üzerinden işaretlerin ne kadar kuvvetlendirileceğini gösterir. Aslında, H_{∞} normu bir sistemin en kötü hal performansını belirler.

Bir sistemin H_2 normu ise,

$$\|G(s)\|_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{trace}(G(jw)^* G(jw)) dw} \quad (5.34)$$

şeklinde tanımlanabilir. H_2 normu, sistemin impuls cevabı için toplam çıkış enerjisini göstermektedir [75].

5.3.2. H_{∞} Normunun Hesaplanması

Doğrusal zamanla değişmeyen çok girişli çok çıkışlı sistemlerin H_{∞} normunun Bode diyagramları üzerinden hesaplanması oldukça zordur. Bunun için değişik yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan en sık kullanılanlar Ortay (Bisection) Algoritması, Cebirsel Riccati Eşitliği (CRE) ve DME yaklaşımlarıdır.

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem ele alalım;

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bw(t) \\ z(t) &= Cx(t) + Dw(t) \end{aligned} \quad (5.35)$$

burada, sistemin durum matrisi A Hurwitz'dir, yani A 'nın tüm özdeğerleri sol yarı açık s düzlemindedir. $x(t) \in \mathbb{R}^n$ sistemin durum değişkenlerini, $w(t) \in \mathbb{R}^{m_w}$ sisteme etki eden bozucu girişleri ve $z(t) \in \mathbb{R}^p$ ise performans çıkışlarını göstermektedir. A , B , C ve D ise bilinen durum-uzay matrisleridir.

H_{∞} normunun ortay algoritması ile hesaplanması amacıyla,

$$H_e := \begin{bmatrix} A + BR^{-1}D^TC & BR^{-1}B^T \\ C^T(I + DR^{-1}D^T)C & -(A + BR^{-1}D^TC)^T \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

matrisi tanımlanabilir. Burada, $R := \gamma^2 I - D^TD$ dir.

Teorem: (Doyle vd. [90]) Ancak ve ancak H_e 'nin imajiner eksen üzerinde özdeğerleri olmaması durumunda $\|G(s)\|_\infty < 1$ dir.

Bu teorem $\|G(s)\|_\infty$ normunun istenilen hassasiyette hesaplanmasına imkan vermektedir. Öncelikle γ gibi pozitif bir sayı seçilir, daha sonra $\|G(s)\|_\infty < \gamma$ ($\|\gamma^{-1}G(s)\|_\infty < 1$) şartı için uygun matrisin özdeğerleri için γ arttırılıp azaltılarak test edilir. Bu yöntem ortay teoremi olarak bilinir ve algoritma aşağıdaki gibidir [90].

1. $\|G(s)\|_\infty$ normu için γ_1 şeklinde bir alt sınırı tahmini olarak belirle.
2. $\|G(s)\|_\infty$ normu için γ_2 şeklinde bir üst sınırı tahmin et ve bunun bir üst sınır olduğunun H_e 'nin özdeğerlerinin hiçbirinin sanal eksen üzerinde olmaması gereğinden yola çıkarak ispatla.
3. Eğer $\gamma_2 - \gamma_1$ önceden tanımlanmış olan hassasiyetten küçük ise algoritmayı durdur. Değil ise, Adım 4'ten devam et.
4. $\gamma = \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)$ şeklinde tanımla ve H_s 'e ilişkin özdeğerleri hesapla. Eğer sanal eksen üzerinde özdeğerler bulunursa $\gamma_1 := \gamma$, aksi durumda $\gamma_2 := \gamma$ atamasını yap.
5. Adım 3'e git.

H_∞ normunun hesaplanmasında kullanılan diğer bir metod ise Cebirsel Riccati Eşitliği (CRE)'nin çözümünden elde edilir. Aşağıdaki Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi (SGYT) kullanılarak CRE ile bir sistemin H_∞ normu hesaplanabilir.

Teorem: (Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi) (Zhou vd. [91]) Verilen sürekli zamanlı bir sistemin gerçekleştirilmesi $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ için aşağıdaki ifadeler eşdeğerdir.

- i) A matrisi Hurwitz'dir (A 'nın tüm özdeğerleri sol yarı açık s düzleminde) ve $\|C(sI - A)^{-1}B + D\|_\infty < \gamma$ dır.
- ii) İlgili Hamiltonyanın özdeğerlerinin hiçbirinin sanal eksen üzerinde olmaması gerekir.
- iii) Aşağıdaki Cebirsel Riccati Eşitliğini çözen simetrik bir P matrisi vardır.

$$A^T P + PA + (B^T P + D^T C)^T (\gamma^2 I - D^T D)^{-1} (B^T P + D^T C) + C^T C = 0$$

CRE formülasyonunun başlıca dezavantajı, çözümün en kötü senaryo açısından ele alınması ve bu durumun tutuculuğu arttırmasıdır. Bu nedenle, CRE'leri DME ile yeniden formüle edilerek problemin çözümüne esneklik katılmıştır. Bu modifikasyonla problem eşitlik yerine eşitsizliklerin çözümünden elde edilir. Bu şekilde DME yaklaşımıyla elde edilen eşitsizlikler geçersiz oluncaya kadar, probleme getirilen kısıtların sınırları zorlanabilir. Bu nedenle, problemin çözümünde DME yaklaşımının kullanılmasıyla daha az tutucu sonuçlar elde edilebilir.

H_∞ normu ile DME arasındaki bağlantı, yukarıda verilen Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi'nin düzenlenmesiyle sağlanır ve DME'lerinin sayısal çözümü için önerilen yöntem $G(s)$ 'in H_∞ normunun hesabında kullanılır.

Yardımcı Teorem: (Zhou vd. [91]) Verilen sürekli zamanlı bir sistemin gerçekleştirilmesi $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ için aşağıdaki ifadeler eşdeğerdir.

i) A matrisi Hurwitz'dir (A 'nın tüm özdeğerleri sol yarı açık s düzleminde) ve $\|G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D\|_\infty < \gamma$.

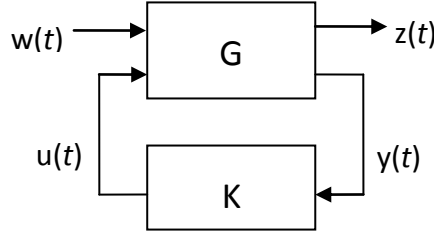
ii) Aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliğini çözen bir $P > 0$ matrisi vardır.

$$\begin{bmatrix} A^T P + PA & PB & C^T \\ B^T P & -\gamma I & D^T \\ C & D & -\gamma I \end{bmatrix} < 0$$

Burada γ , ekstra bir değişken gibi davranır ve γ 'nin minimizasyonu ile sistemin H_∞ normu hesaplanır.

5.3.3. H_∞ Optimizasyon Kontrol Problemi

Bilindiği gibi, standart H_∞ optimizasyon kontrol problemi, sisteme gelen bozucuların sistem cevabı üzerindeki etkilerinin azaltılmasının en iyi yolu olarak, bozuculardan kontrol edilmek istenen çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin H_∞ normunu en küçük yapma işlemi olarak tanımlanır. H_∞ optimizasyon kontrol probleminin çözümünde Şekil 5.1'de gösterilen blok diyagramı kullanılır.



Şekil 5. 1 Standart H_∞ blok diyagramı

Burada, $w(t) \in \mathcal{R}^{m_w}$ bozucu gürültü veya referans gibi tüm dış kaynaklı girişleri, $z(t) \in \mathcal{R}^p$ kontrol edilmek istenen büyüklükleri, $u(t) \in \mathcal{R}^{m_u}$ kontrol işaretlerini, $y(t) \in \mathcal{R}^y$ geri-besleme işaretlerini, G kontrolcü dışında kalan tüm sistemin transfer fonksiyonu matrisini ve K kontrolcüye ilişkin transfer fonksiyonları matrisini göstermektedir. G ve K 'nın durum-uzayı gerçekleştirilmesi kararlı kılınabilir ve bulunabilir olduğu düşünülür.

Şekil 5.1 'de yer alan sistem, eğer herhangi bir ilk koşul altında ve $w(t)=0$ iken $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ özelliklerini sağlıyorsa iç kararlıdır. Burada T_{zw} , w girişlerinden z çıkışlarına transfer fonksiyonları matrisi olmak üzere;

a) Kapalı-çevrim sistem iç kararlı,

b) $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ olacak şekilde bir kontrolcü bulmak alt optimum H_∞ kontrol problemi, γ 'yı minimum yapan kontrolcüyü bulmak ise H_∞ optimum kontrol problemi olarak tanımlanır.

Dayanıklı kararlılık problemi, bozucu bastırma problemi, yörünge izleme problemi, model eşleme problemi gibi pek çok problem H_∞ optimizasyon problemine indirgenip çözülebilir [75].

EYLEYİCİ DOYUMLU KARMA H_2/H_∞ KONTROL ALGORİTMASININ TASARIMI

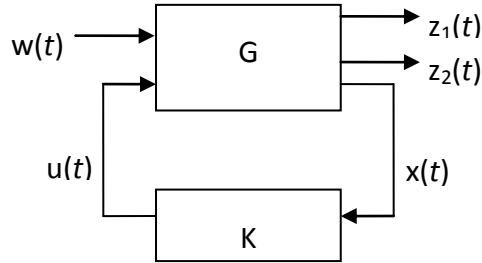
Bu bölümde, DME yaklaşımıyla Krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrolü için kullanılacak kontrol algoritmalarının tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle, durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmış ardından tasarlanan algoritmaya eyleyici doyumu olayı DME kısıtları şeklinde ilave edilmiştir. Tasarlanan kontrolörlerin performansı benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Zaman ve frekans alanında yapılan benzetim çalışmaları önerilen kontrolörlerin yapısal titreşimlerin azaltılmasında başarılı olduklarını göstermiştir.

6.1. Karma H_2/H_∞ Kontrol Algoritmasının Tasarımı

İlk olarak, aktif titreşim kontrolü çalışmalarında tasarım özellikleri bakımından literatürde sıklıkla önerilen durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bilindiği gibi H_∞ kontrol tasarımı daha çok frekans alanıyla ilgilidir. Kapalı-çevrim sistemi için iyi bir geçici rejim cevabını garanti edemez. H_2 kontrol ise geçici rejim cevaplarında daha başarılıdır. Özellikle sismik zorlanma altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında kontrol algoritmasının hem zaman hem de frekans alanı cevaplarında arzu edilen performansı göstermesi beklenir. Bu nedenle, bu bölümde titreşim kontrolü alanında etkin bir şekilde kullanılabilecek arzu edilen frekans ve geçici rejim cevaplarının elde edilebilmesi için kontrol

algoritması olarak, H_2 ve H_∞ kontrol yapılarının DME yaklaşımıyla uygun bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen karma H_2/H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6. 1 Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı

Kontrol problemi durum-uzay formunda,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z_1(t) &= C_1 x(t) + D_{11} w(t) + D_{12} u(t) \\ z_2(t) &= C_2 x(t) + D_{21} w(t) + D_{22} u(t)\end{aligned}\tag{6.1}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ durum vektörünü, $z_1(t), z_2(t) \in \mathbb{R}^p$ kontrol çıkış vektörlerini, $w(t) \in \mathbb{R}^{m_w}$ bozucu giriş vektörünü, $u(t) \in \mathbb{R}^{m_u}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ ve D_{22} matrisleri ise sistemin bilinen uygun boyutlu durum-uzay matrisleridir. Kontrol girişinin $u(t) = Kx(t)$ ($K \in \mathbb{R}^{m_u \times n}$) gibi durumların doğrusal bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkarak (6.1)’de verilen kapalı-çevrim sistemi elde edilir. Burada, K durum geri-beslemeli kontrol kazancını göstermektedir.

H_∞ performans problemi, kapalı-çevrim (6.1) sistemini kararlı kılacak ve sistemin girişlerinden çıkışlarına olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu $\|Tz_1 w\|_\infty$, γ gibi bulunabilecek minimum skaler pozitif bir değerden küçük kılacak bir kontrolör bulmaktır. Bilindiği gibi, H_∞ normu ile DME arasındaki bağlantı sınırlı gerçek yardımcı teoremi kullanılarak yapılır. $V(x(t), t) = x^T(t)Px(t)$, $P = P^T > 0$ şartıyla karesel Lyapunov fonksiyonudur. $\gamma > 0$ olmak üzere sistemin performans ve kararlılık kısıtları için tanımlanan aşağıdaki (6.2) eşitsizliği, tüm $x(t)$ ve $w(t)$ ’ler için negatif tanımlı olmalıdır.

$$\dot{V}(x(t), t) + z_1^T(t)z_1(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) < 0 \quad (6.2)$$

Eşitsizlik (6.2)'in (6.1) ile birleştirilmesiyle,

$$\begin{aligned} & [(A + B_2K)x(t) + B_1w(t)]^T Px(t) + x^T(t)P[(A + B_2K)x(t) + B_1w(t)] \\ & + [(C_1 + D_{12}K)x(t) + D_{11}w(t)]^T [(C_1 + D_{12}K)x(t) + D_{11}w(t)] - \gamma^2 w^T(t)w(t) < 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

eşitsizliği elde edilir. Burada, (6.3)'ün düzenlenmesiyle

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)^T P + P(A + B_2K) + (C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)) & PB_1 + (C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T P + D_{11}^T (C_1 + D_{12}K) & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \quad (6.4)$$

matris eşitsizliği elde edilir. Schur tümleyeni ve (6.4)'ün sağından ve solundan P^{-1} ile çarpılması sonucunda

$$\begin{aligned} & P^{-1}(A + B_2K)^T + (A + B_2K)P^{-1} + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)P^{-1} \\ & - (B_1 + P^{-1}(C_1 + D_{12}K)^T D_{11})(-\gamma^2 I + D_{11}D_{11}^T)^{-1}(B_1^T + D_{11}^T(C_1 + D_{12}K)P^{-1}) < 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

eşitsizliği elde edilir. $X_\infty = P^{-1}$ değişken dönüşümüyle,

$$\begin{bmatrix} ((A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T (C_1 + D_{12}K)X_\infty) & B_1 + X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T D_{11} \\ B_1^T + D_{11}^T(C_1 + D_{12}K)X_\infty & -\gamma^2 I + D_{11}^T D_{11} \end{bmatrix} < 0 \quad (6.6)$$

$$\begin{bmatrix} (A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T & B_1 \\ B_1^T & -\gamma I \end{bmatrix} + \frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T \\ D_{11}^T \end{bmatrix} [(C_1 + D_{12}K)X_\infty \quad D_{11}] < 0 \quad (6.7)$$

DME'leri elde edilebilir. Yine Schur tümleyeni kullanılarak $X_\infty > 0$ için, (6.1)'de tanımlanan kapalı-çevrim sistemin H_∞ performans kısıtları aşağıdaki DME şeklinde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} (A + B_2K)X_\infty + X_\infty(A + B_2K)^T & B_1 & X_\infty(C_1 + D_{12}K)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1 + D_{12}K)X_\infty & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (6.8)$$

Bilindiği gibi sistemin bozucu girişlerden çıkışlara transfer fonksiyonunun H_2 normunun $\|T_{z_2 w}\|_2^2$ sonlu olması, $D_{21}=0$ şartıyla sağlanır. Durum geri-beslemeli H_2 performans probleminin çözümü, $X_2 = X_2^T$ ve $Q = Q^T$ şartıyla,

$$(A + B_2 K)X_2 + X_2(A + B_2 K)^T + B_1 B_1^T < 0 \quad (6.9)$$

$$\begin{bmatrix} Q & (C_2 + D_{22}K)X_2 \\ X_2(C_2 + D_{22}K)^T & X_2 \end{bmatrix} > 0 \quad (6.10)$$

$$\text{iz}(Q) < \eta \quad (6.11)$$

DME'lerinin çözümünden elde edilir. Yukarıda durum geri-beslemeli kontrolör için H_2 ve H_∞ kontrol amaçları DME yaklaşımıyla ayrı ayrı türetilmiştir. Bu iki kontrol kısıtı tek bir yapıda birleştirilerek karma H_2/H_∞ kontrolör yapısı elde edilebilir (Khargonekar ve Rotea [92]). Karma H_2/H_∞ kontrol problemi, sistemin bozuculardan çıkışlara transfer fonksiyonları matrisinin H_2 normunu minimum yapacak ve H_∞ kısıtlarını sağlayacak durum geri-beslemeli K kontrolör kazancını bulmaktır. H_2 ve H_∞ kontrol yapılarını birleştirmek için,

$$X = X_2 = X_\infty \quad (6.12)$$

kabulü ile tanımlanan genel X Lyapunov matrisi kullanılır. Yukarıda elde edilen (6.9), (6.10) ve (6.11) eşitsizlikleri, KX_2 ve KX_∞ terimlerinden dolayı dışbükey değildir. Dışbükeyliği sağlamak için ise $W = KX$ değişken dönüşümü yapılarak, $X = X^T$, $Q = Q^T$ şartları altında H_2/H_∞ kontrol problemini çözen

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2 W + W^T B_2^T & B_1 & XC_1^T + W^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 X + D_{12} W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (6.13)$$

$$\begin{bmatrix} Q & C_2 X + D_{22} W \\ XC_2^T + W^T D_{22}^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (6.14)$$

$$\text{iz}(Q) < \eta \quad (6.15)$$

DME'leri elde edilir. (6.13), (6.14) ve (6.15) DME'lerini çözen uygun X , Q ve W matrisleri bulunursa, optimum durum geri-beslemeli H_2/H_∞ kontrolör kazancı

$$K = WX^{-1} \quad (6.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada, durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör kazancı γ ile η 'nün sistem cevabı üzerinden ağırlıklandırılması ile belirlenir.

6.2. Eyleyici Doyumlu Karma H_2/H_∞ Kontrol Algoritmasının Tasarımı

Bir önceki bölümde herhangi bir eyleyici doyumu kısıtı içermeyen ve yapısal titreşimlerin kontrolü çalışmalarında sıklıkla önerilen durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır. Bu bölümde ise, kontrol kuvvetinin sınırlandırılması ile titreşim genliklerinin en aza indirilmesi arasında bir ödünleşmeye karar verilerek, doyumlu eyleyiciye sahip karma H_2/H_∞ kontrol algoritmasının tasarımı yapılmıştır.

Giriş bölümünde anlatıldığı gibi, eyleyici doyumlu sistemlerde bozucu bastırma problemi son dönemlerde üzerinde oldukça fazla çalışmanın yapıldığı bir konu haline gelmiştir. Günümüzde tasarlanan pek çok kontrolörün doyumlu eyleyicilere sahip olması istenmektedir. Bunun başlıca nedeni, eyleyici doyumu probleminin kontrol performansını bozabilen hatta bazı durumlarda kapalı-çevrim döngüsünü kırarak sistemi kararsız kılabilen önemli bir problem olmasıdır. Doktora tezinin bu bölümünde eyleyici doyumu problemi de kontrol problemine dahil edilerek çok amaçlı bir kontrolör tasarımı elde edilmiştir.

Eyleyici doyumu problemi kontrol algoritmasına iki yaklaşımla katılabilir. Bu yaklaşımların ilki doyumlu eyleyici yapısına, kontrol sinyaline DME biçiminde getirilen kısıtlar ile ulaşılmasıdır. İkinci yaklaşım ise eyleyici doyumunun sistemin dinamiğine dahil edilmesidir. Yazıcı doktora tezinde [75], benzetim çalışmaları yoluyla yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolü çalışmalarında ilk yöntemin daha az tutucu ve uygulanabilir olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, bu doktora tezinde eyleyici doyumu problemi, kontrol algoritmasına kontrol sinyaline DME biçiminde getirilen kısıtlar yoluyla dahil edilmiştir.

6.2.1. Doyumlu Eyleyicinin Kontrol İşareti Üzerinden Elde Edilmesi

Doyumlu eyleyicinin DME kısıtları şeklinde doğrudan kontrol sinyali üzerinden matematiksel olarak elde edilmesi aşağıdaki gibidir.

En büyük kontrol sinyali,

$\|u\|_2 \leq u_{\max}$ şeklinde ifade edilebilir ve

$$u^T u \leq u_{\max}^2 \quad (6.17)$$

eşitsizliği olarak yazılabilir. Çalışmada $u(t) = Kx(t)$ olarak tanımlandığından

$$x^T(t) K^T K x(t) \leq u_{\max}^2 \quad (6.18)$$

olarak elde edilir. $W = KX$ tanımlaması bizi

$$\frac{x^T(t) X^{-1} W^T W X^{-1} x(t)}{u_{\max}^2} \leq 1 \quad (6.19)$$

eşitsizliğini elde etmemizi sağlar.

Burada, $x(t) \in \varepsilon\left(\frac{X^{-1} W^T W X^{-1}}{u_{\max}^2}\right)$ şeklinde ifade edilebilir.

$\varepsilon(X^{-1}) \leq \varepsilon\left(\frac{X^{-1} W^T W X^{-1}}{u_{\max}^2}\right)$ ifadesinden $X^{-1} \geq \frac{X^{-1} W^T W X^{-1}}{u_{\max}^2}$ eşitsizliği elde edilir ve bu

eşitsizliğin sağından ve solundan X ile çarpılırsa

$$XX^{-1}X \geq \frac{XX^{-1}W^TWX^{-1}X}{u_{\max}^2} \quad (6.20)$$

eşitsizliği elde edilir. (6.20) eşitsizliğinin düzenlenmesi

$$X \geq \frac{W^TW}{u_{\max}^2} \quad (6.21)$$

sonucunu elde etmemizi sağlar.

$X - \frac{W^TW}{u_{\max}^2} \geq 0$ ile Schur tümleyeni kullanılarak

$$\begin{bmatrix} X & W^T \\ W & u_{\max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (6.22)$$

doğrusal matris eşitsizliği elde edilebilir.

6.2.2. Eyleyici Doyumlu Karma H_2/H_∞ Kontrolör Tasarımı

Durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol problemini çözen eşitsizlikler (6.13), (6.14) ve (6.15)'te verilen ifadelerdi. Doyumlu eyleyicinin DME kısıtları şeklinde doğrudan kontrol sinyali üzerinden matematiksel olarak ifadesi ise (6.22)'de elde edilmişti. Dolayısıyla bu dört DME'yi çözen uygun X , Q ve W matrisleri bulunursa, eyleyici doyumlu alt optimum durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör için, $u = WX^{-1}x$ formunda elde edilebilir. Öyleyse problemin sonucu (6.23), (6.24) ve (6.25) DME'lerinin çözümü ile elde edilir. Bu durumda kontrol kazancı (6.26) ifadesi ile belirlenir.

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2 W + W^T B_2^T & B_1 & XC_1^T + W^T D_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1 X + D_{12} W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \quad (6.23)$$

$$\begin{bmatrix} Q & C_2 X + D_{22} W \\ XC_2^T + W^T D_{22}^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (6.24)$$

$$\begin{bmatrix} X & W^T \\ W & u_{\max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0 \quad (6.25)$$

$$K = WX^{-1} \quad (6.26)$$

AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI

Doktora tezinin bu bölümünde, Bölüm 6'de tasarlanan kontrolörlerin ve krenlerde aktif kontrol sisteminin uygulanabilirliğinin gösterilmesi amacıyla benzetim çalışmaları yapılmıştır. Önceki bölümde tasarımı gerçekleştirilen kontrolörlerin performansları, depreme maruz bir krenin yapısal titreşimlerinin aktif kontrol yoluyla azaltılması problemi için benzetim çalışmaları yolu ile gözlemlenmiştir. Zaman ve frekans alanında yapılan analizler, deprem etkisindeki krenlerde yapısal titreşimlerin azaltılması için bu doktora tezinde önerilen eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolörün, kontrolsüz durumla ve karma H_2/H_∞ kontrolör ile karşılaştırılabilmesini mümkün kılmıştır. Sonuçlar önerilen kontrolörün pratikte uygulanabilir olduğunu, yüksek sönüm performansı gösterdiğini ve kontrol sisteminin kararlılığının arzu edilen eyleyici doyumu limiti için garanti altına alındığını göstermiştir.

Aktif titreşim kontrolü için yapılan benzetim çalışmalarında gerçek bir konteyner krenine ait parametreler kullanılmıştır (Azeloğlu ve Sağırlı [13], Azeloğlu ve Sağırlı [15]). Benzetim çalışmalarında kullanılan sisteme ait parametreler Çizelge 7.1'de verilmiştir. Benzetim çalışmalarında kren sistemine bozucu giriş olarak, farklı karakteristiklere sahip ve yıkıcı etkisi yönünden literatürde önemli görülen 1940 El Centro ve 1999 Kocaeli depremleri uygulanmıştır. Çalışmada, deprem anında deprem ölçüm istasyonlarında kaydedilen veriler MATLAB paket programı ile alçak ve yüksek geçiren filtrelerle işlenerek ölçümden kaynaklanan gürültü ve benzeri bozucu sinyallerin arındırılmasıyla zamanın bir fonksiyonu şeklinde modellenmiştir [77], [78], [79], [47].

Çizelge 7. 1 Aktif titreşim kontrolü için benzetim çalışmalarında kullanılan kren sistemine ait kütle, rijitlik ve sönüm parametreleri

Kütle Parametreleri	Rijitlik Parametreleri	Sönüm Parametreleri
$m_1 = 600000 \text{ kg}$	$k_1 = 18050000 \text{ N/m}$	$c_1 = 26170 \text{ Ns/m}$
$m_2 = 63000 \text{ kg}$	$k_2 = 12448000 \text{ N/m}$	$c_2 = 10680 \text{ Ns/m}$
$m_3 = 38200 \text{ kg}$	$k_3 = 2210000 \text{ N/m}$	$c_3 = 1900 \text{ Ns/m}$
$m_4 = 105000 \text{ kg}$	$k_4 = 3360000 \text{ N/m}$	$c_4 = 2890 \text{ Ns/m}$
$m_5 = 15000 \text{ kg}$	$k_5 = 765000 \text{ N/m}$	$c_5 = 650 \text{ Ns/m}$
$m_6 = 20000 \text{ kg}$	Uzunluk parametresi $L = 6 \text{ m}$	

Benzetim çalışmaları krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması probleminin çözümü için tasarlanan sırasıyla; DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör ve DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu dayanıklı karma H_2/H_∞ kontrolör kullanılarak yapılmıştır. Kontrolörlerin tasarımında MATLAB-Simulink programı ve DME'lerin çözümünde YALMIP ayrıştırıcı ile LMILAB çözücüsü kullanılmıştır.

7.1. DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Karma H_2/H_∞ Kontrolör İle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Azaltılması

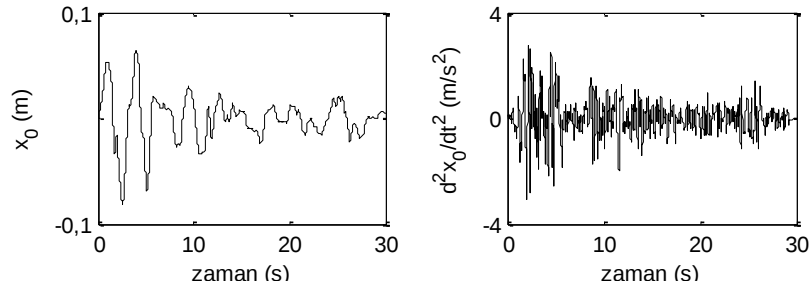
Bu bölümde krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması probleminin çözümünde DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. İfade kolaylığı açısından bundan sonra DME tabanlı durum geri-beslemeli H_∞ kontrolör kısaca “karma kontrolör” olarak adlandırılmıştır. 31 iterasyon sonucunda optimum kontrol kazancı,

$$K = WX^{-1} = 10^7 \times [-1.1412 \ -0.2258 \ 1.3443 \ 0.2353 \ -0.4796 \ -0.3312 \ -0.0025 \\ -0.0757 \ 0.1026 \ 0.1379 \ -0.0946 \ 0.0152]$$

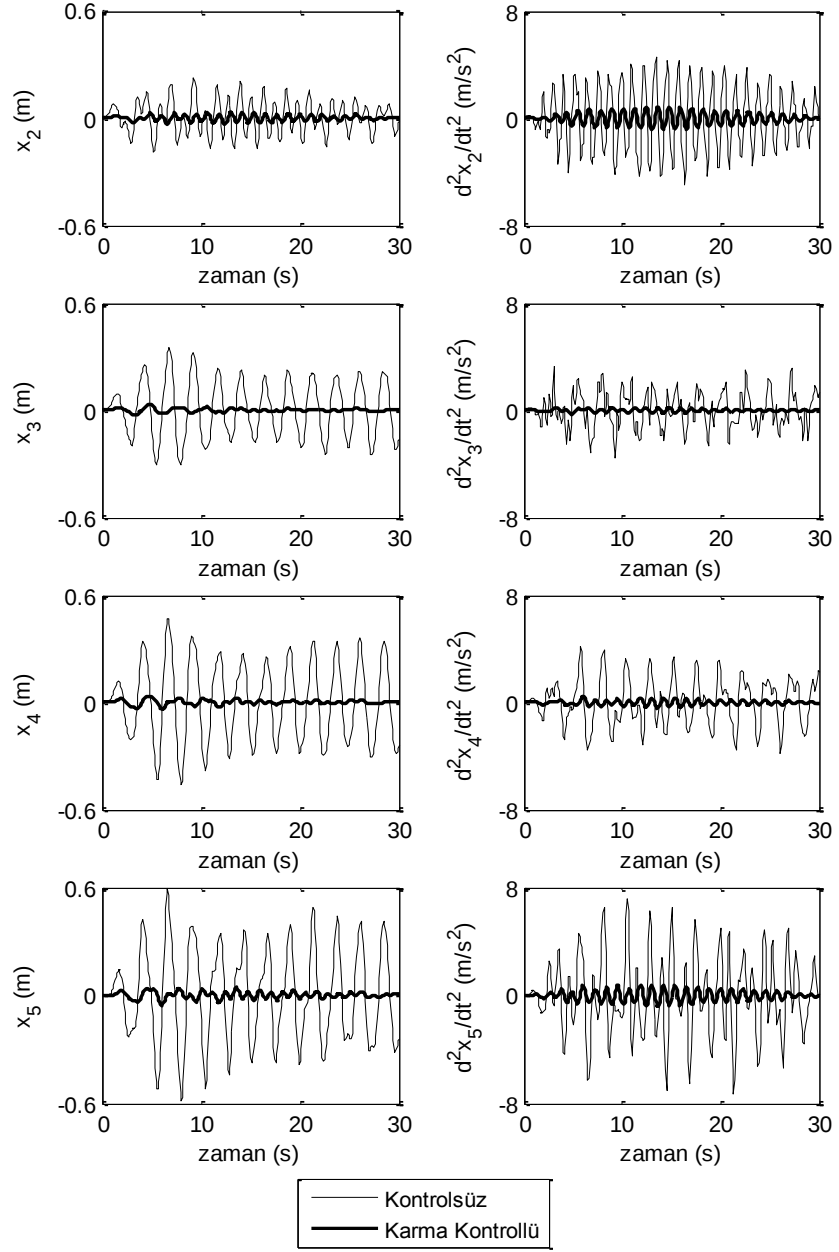
olarak elde edilmiştir.

Aktif kontrol çalışmalarında, kontrolör tasarımı için güvenlik ve konfor önemli performans kriterleridir. Genel olarak yapısal bir sistemin güvenliği yerdeğiştirme cevaplarına bağlı olarak değerlendirilirken, konfor ivme cevaplarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, deprem etkisindeki yapısal sistemlerde ivme cevaplarının yapısal sistemin güvenliği açısından da incelenmesi gerekir. Dolayısıyla krenlerde depreme yönelik çalışmalarda yerdeğiştirme ve ivme cevaplarının güvenlik açısından incelenmesi gerekir.

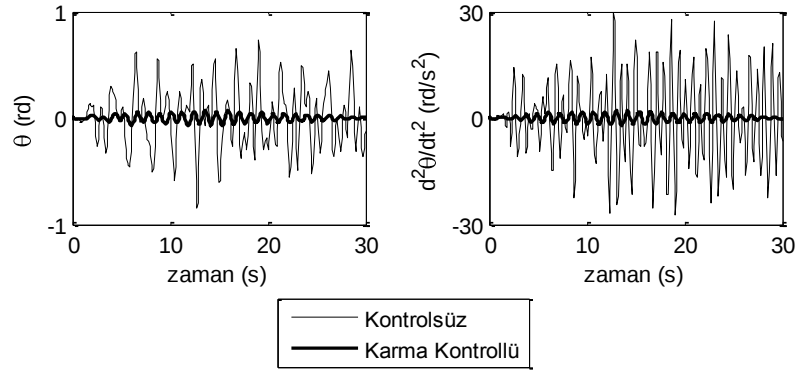
Benzetim çalışmalarında kren sistemine ilk olarak El Centro depreminin yer hareketi uygulanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 7.1’de El Centro depreminin yer hareketi, Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 7.4’de kontrol kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Çizelge 7.2’de ise kontrolsüz durum ve karma kontrollü durum için kontrol kuvveti, x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları (tepeden-tepeye) sayısal olarak verilmiştir.



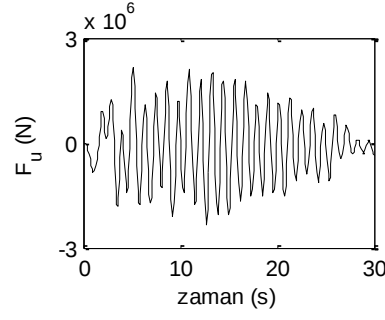
Şekil 7. 1 El Centro depreminin yer hareketi



Şekil 7. 2 x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 3 θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

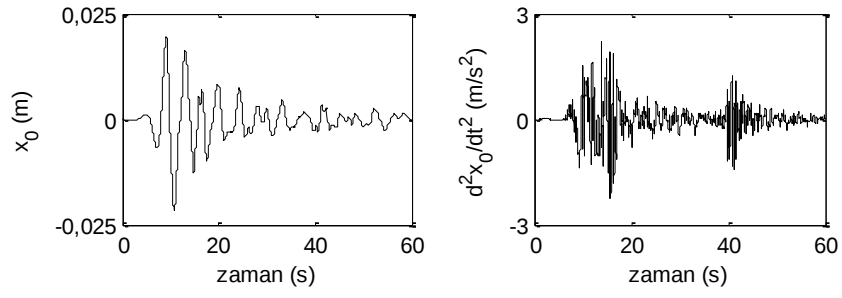


Şekil 7. 4 Kontrol kuvvetinin zaman cevabı

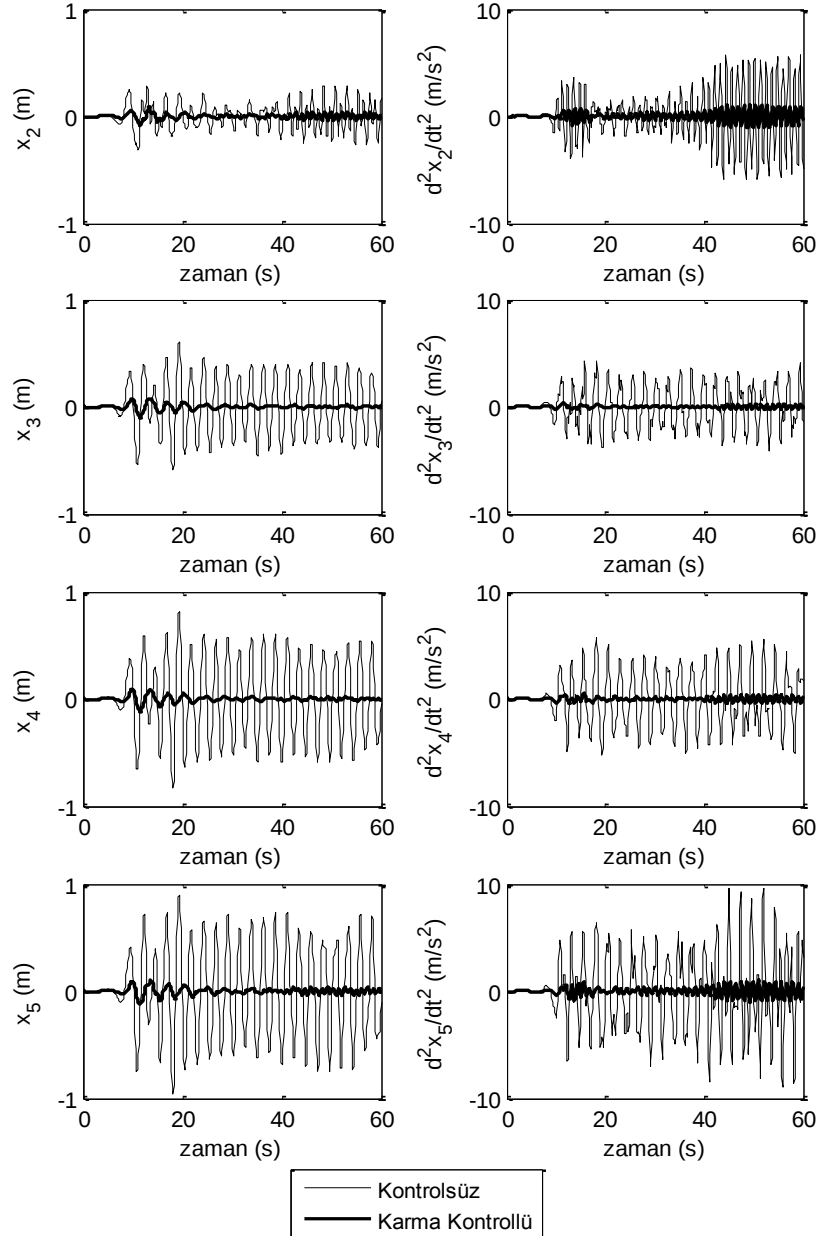
Çizelge 7. 2 El Centro depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	Kontrolsüz	Karma kontrollü
F_u (kN)	-	4529
x_2 (m)	0.4164	0.0667
x_3 (m)	0.6561	0.0480
x_4 (m)	0.9343	0.0680
x_5 (m)	1.1770	0.0951
θ (rd)	1.5515	0.1533
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	9.2710	1.9095
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	6.8740	0.7195
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	7.9398	0.8341
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	14.4382	1.9411
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	56.7416	5.3979

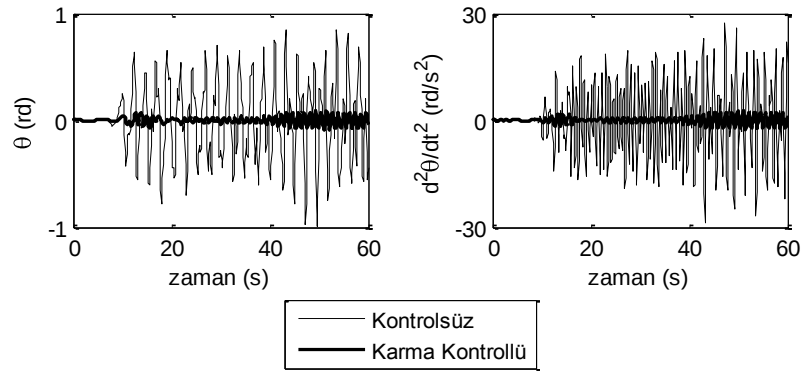
Benzetim çalışmalarında kren sistemine ikinci olarak Kocaeli depreminin yer hareketi uygulanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 7.5'de Kocaeli depreminin yer hareketi ile konteyner rıhtımının yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 7.6 ve Şekil 7.7'de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 7.8'de kontrol kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi sunulmuştur. Çizelge 7.3'de ise kontrolsüz durum ve karma kontrollü durum için maksimum kontrol kuvveti, x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları sayısal olarak verilmiştir.



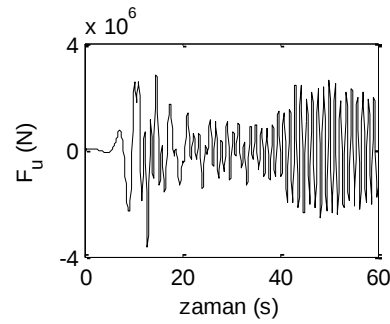
Şekil 7. 5 Kocaeli depreminin yer hareketi



Şekil 7. 6 x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 7 θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 8 Kontrol kuvvetinin zaman cevabı

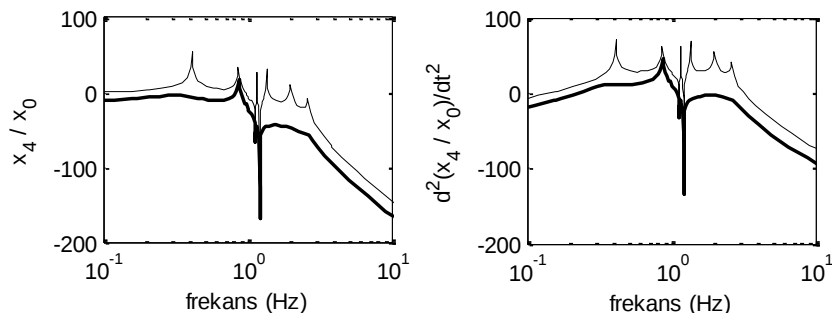
Çizelge 7. 3 Kocaeli depremüne maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	Kontrolsüz	Karma kontrollü
F_u (kN)	-	6436
x_2 (m)	0.6118	0.1716
x_3 (m)	1.1962	0.1865
x_4 (m)	1.6471	0.2059
x_5 (m)	1.8525	0.2238
θ (rd)	1.8394	0.1685
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	11.6788	2.2033
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	8.4604	0.7211
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	11.0614	0.9714
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	18.5110	1.9577
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	55.8224	4.8988

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde karma kontrolörün göstermiş olduğu sönüm performansının oldukça tatmin edici olduğu görülmektedir.

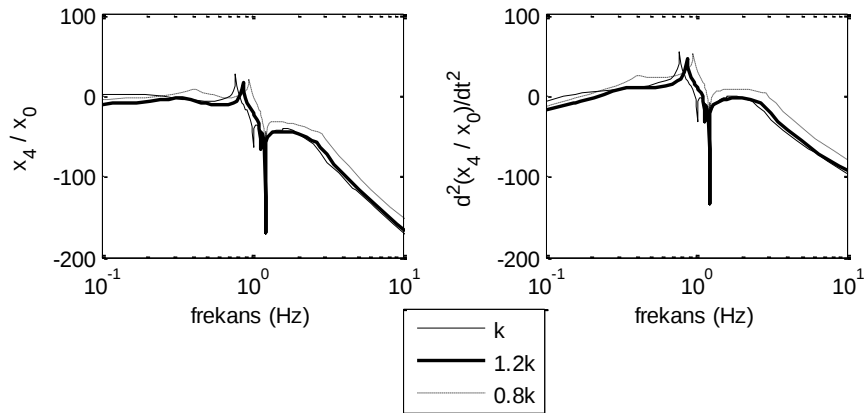
Hem yerdeğiştirme hem de ivme zaman cevapları tasarlanan kontrolörün farklı karakteristiklere sahip, yıkıcı etkisi bilinen depremler altında üstün sönüm performansı göstererek titreşim genliklerini etkin bir şekilde azalttığını göstermiştir.

şekil 7.9’da kren köprüsünün (x_4) yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları verilmiştir. Sistem 6 serbestlik derecesine sahip olduğundan; 0.20, 0.45, 0.87, 1.21, 1.97, 2.61 Hz. olmak üzere altı adet doğıal frekansı vardır. Bu değıerler, kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanmıştır. Depremlerde özellikle 1. mod en tehlikeli mod olarak kabul edilir [12]. Kontrolör, amaçlandığı gibi rezonans değıerlerini özellikle 1. mod olmak üzere azaltmıştır.



şekil 7. 9 x_4 ’ün yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

Tasarlanan kontrolörün dayanıklılığı kren sisteminin rijitlik parametrelerinin $\pm 20\%$ değıişimine göre yapılan benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. şekil 7.10’da kren köprüsünün (x_4) parametre değıişimlerine göre çizdirilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları verilmiştir. Sonuçlar tasarlanan kontrolörün parametre değıişimlerinden etkilenmediğini göstererek dayanıklılığını ortaya koymuştur.



şekil 7. 10 x_4 ’ün sistemin rijitlik parametrelerinin değıişimine göre elde edilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

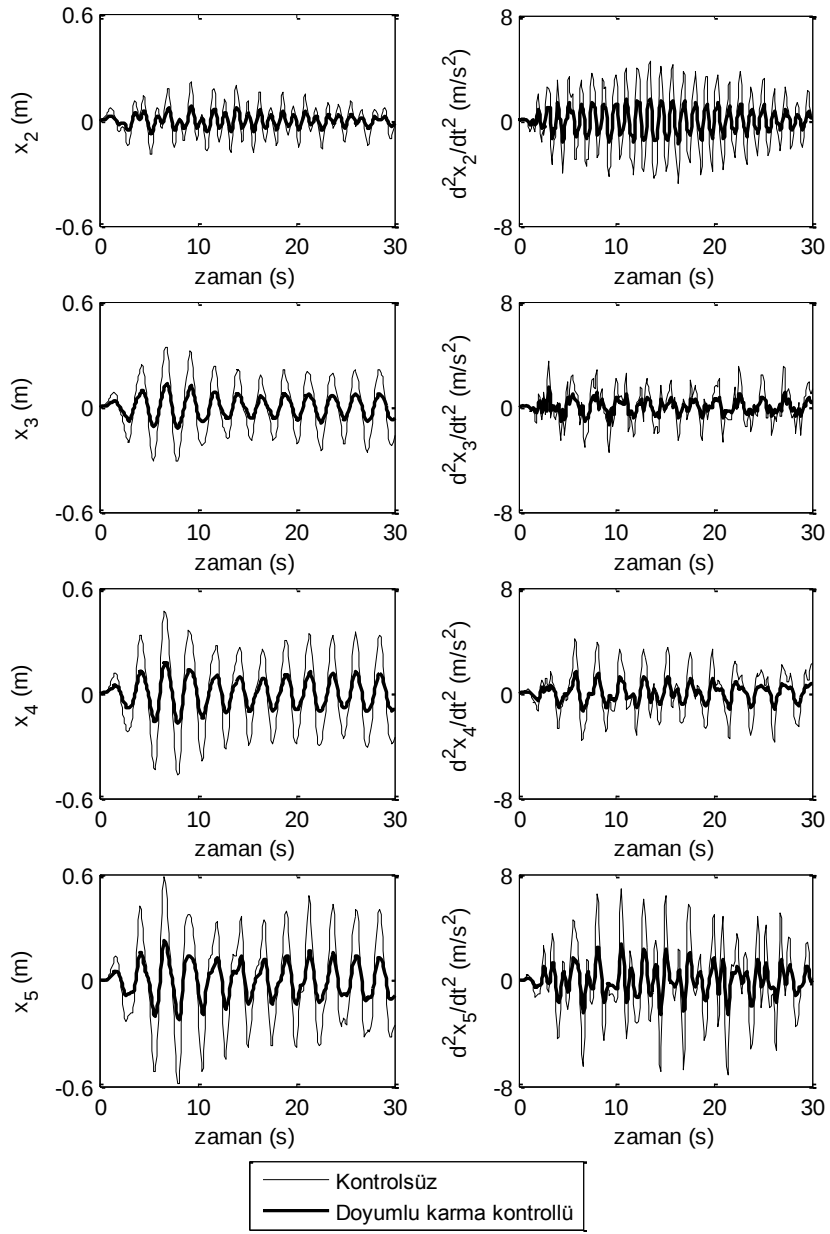
7.2. DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Eyleyici Doyumlu Karma H_2/H_∞ Kontrolör İle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Azaltılması

Bu bölümde mevcut problemin çözümünde DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolör kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmıştır. İfade kolaylığı açısından bundan sonra DME tabanlı durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu dayanıklı H_∞ kontrolör kısaca “doyumlu karma kontrolör” olarak adlandırılmıştır. Eyleyici doyumu limiti ± 2500 kN için 76 iterasyon sonucunda, optimum kontrol kazancı,

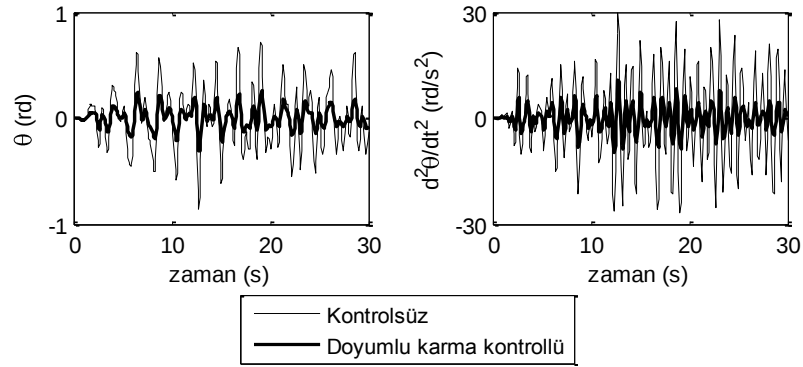
$$K = WX^{-1} = [-1.1621 \ -0.1207 \ -0.0124 \ 0.1147 \ 0.0184 \ -0.0006 \ -0.1807 \\ -0.0225 \ -0.0120 \ -0.0001 \ 0.0181 \ 0.0012]$$

olarak elde edilmiştir.

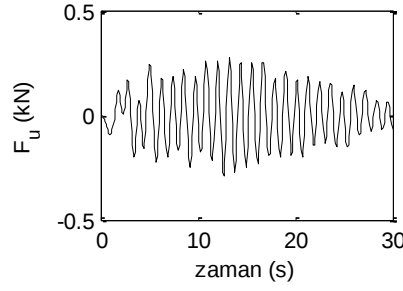
Benzetim çalışmalarında kren sistemine ilk olarak 1940 El Centro depreminin yer hareketi uygulanmış ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 7.1’de El Centro depreminin yer hareketi verilmiştir. Şekil 7.11’de ve Şekil 7.12’de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 7.13’de kontrol kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Çizelge 7.5’de ise kontrolsüz durum ve doyumlu dayanıklı karma kontrollü durum için maksimum kontrol kuvveti, x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ ’nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları sayısal olarak verilmiştir.



Şekil 7. 11 x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 12 θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

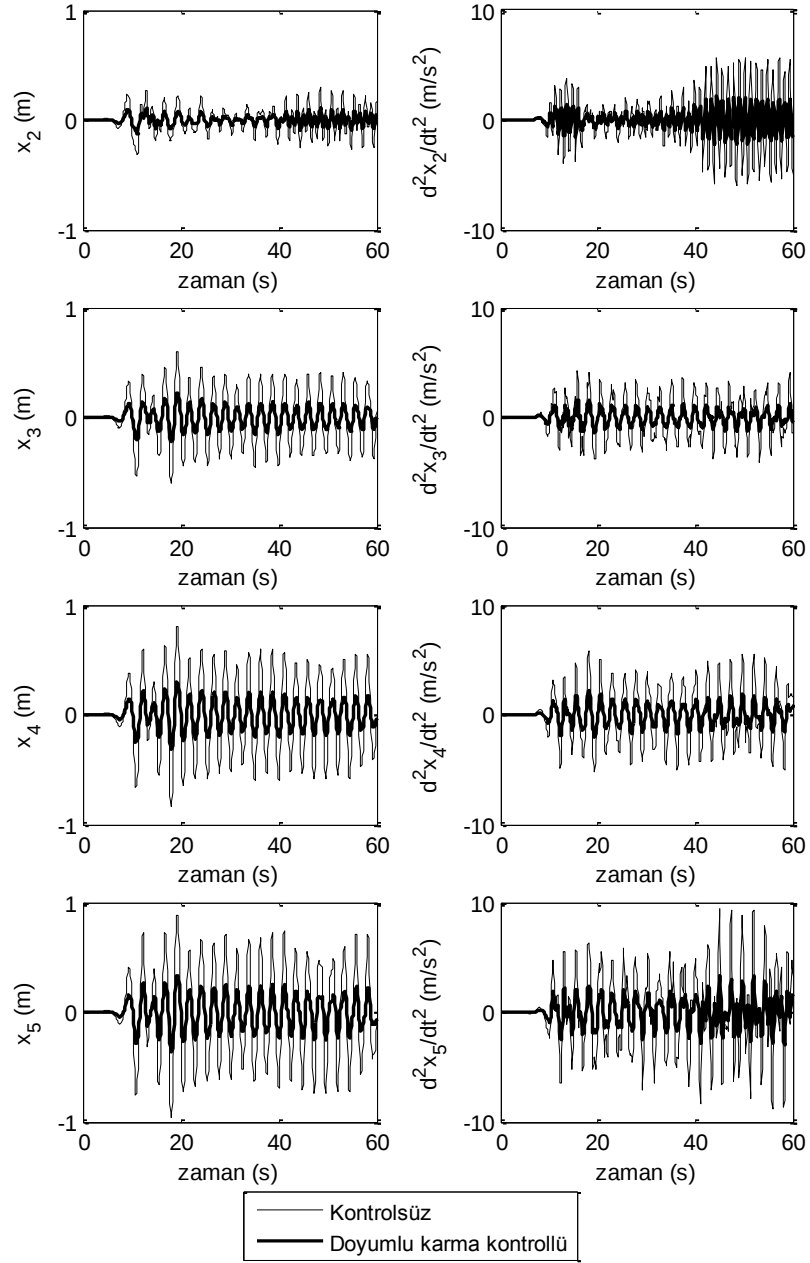


Şekil 7. 13 Kontrol kuvvetinin zaman cevabı (± 2500 kN)

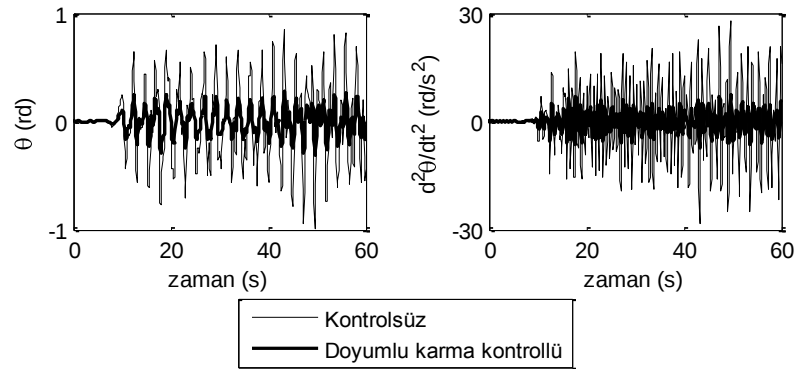
Çizelge 7. 4 El Centro depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	Kontrolsüz	Doyumlu karma kontrollü
F_u (kN)	-	± 2500
x_2 (m)	0.4162	0.1583
x_3 (m)	0.6558	0.2486
x_4 (m)	0.9344	0.3516
x_5 (m)	1.7161	0.4456
θ (rd)	1.5854	0.5601
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	9.5049	3.3967
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	6.8511	2.9146
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	7.9541	2.9663
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	14.4625	5.2582
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	57.6300	20.3075

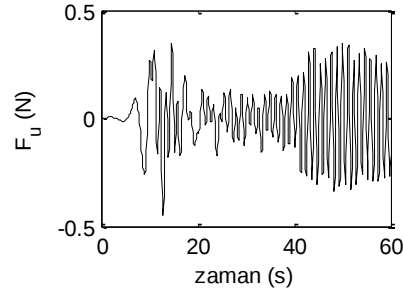
Benzetim çalışmalarında kren sistemine ikinci olarak Kocaeli depreminin yer hareketi uygulanmıştır. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar sayısal ve grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 7.5'de Marmara Kocaeli depreminin yer hareketi, Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'de x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları, Şekil 7.16'da kontrol kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi verilmiştir. Çizelge 7.7'de ise kontrolsüz durum ve doyumlu dayanıklı karma kontrollü durum için maksimum kontrol kuvveti, x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları sayısal olarak verilmiştir.



Şekil 7. 14 x_2 , x_3 , x_4 ve x_5 'in yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 15 θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları



Şekil 7. 16 Kontrol kuvvetinin zaman cevabı (± 2500 kN)

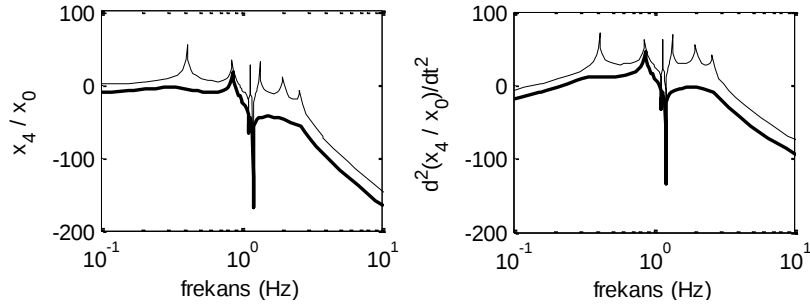
Çizelge 7. 5 Kocaeli depremine maruz kren sistemi için maksimum kontrol kuvveti ile x_2 , x_3 , x_4 , x_5 ve θ 'nın yerdeğiştirme ve ivme zaman cevapları

	KontROLSÜZ	Doyumlu karma kontrollü
F_u (kN)	-	± 2500
x_2 (m)	0.6118	0.2331
x_3 (m)	1.1962	0.4492
x_4 (m)	1.6471	0.6190
x_5 (m)	1.8525	0.6943
θ (rd)	1.8394	0.5875
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	11.6788	4.4030
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	8.4604	3.1088
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	11.0614	4.1479
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	18.5110	6.2805
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	55.8224	14.5918

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde doyumlu karma kontrolörün göstermiş olduğu sönüm performansının oldukça tatmin edici olduğu görülmektedir. Hem yerdeğiştirme hem de ivme zaman cevapları tasarlanan kontrolörün farklı karakteristiklere sahip, yıkıcı etkisi bilinen depremler altında üstün sönüm performansı gösterdiğini ve belirlenen eyleyici doyumu limitleri içerisinde kalarak pratikte uygulanabilirliğin ve sistemin kararlılığının korunduğunu göstermiştir.

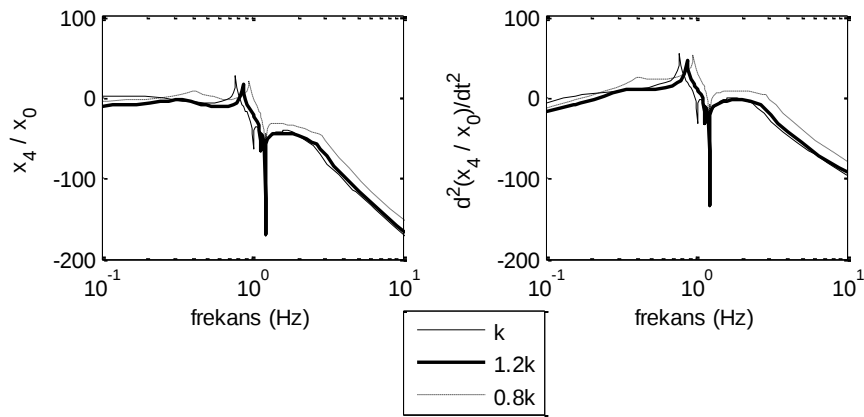
Şekil 7.17'de kren köprüsünün (x_4) yerdeğiştirme ve ivmelerinin frekans cevapları verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi 6 serbestlik dereceli kren sisteminin kütle ve rijitlik matrisleri kullanılarak hesaplanan 0.20, 0.45, 0.87, 1.21, 1.97, 2.61 Hz. olmak

üzere altı adet doğal frekansı vardır. Depremlerde özellikle 1. modun en tehlikeli mod olarak kabul edildiği gözönüne alındığında kontrolör, amaçlandığı gibi rezonans değerlerini özellikle 1. mod olmak üzere etkili şekilde bastırmıştır.



Şekil 7. 17 x_4 'ün yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

Tasarlanan kontrolörün dayanıklılığı kren sisteminin rijitlik parametrelerinin $\pm 20\%$ değişimine göre yapılan benzetim çalışmalarıyla test edilmiştir. Şekil 7.18'de kren köprüsünün (x_4) parametre değişimlerine göre çizdirilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları verilmiştir. Sonuçlar tasarlanan kontrolörün parametre değişimlerinden etkilenmediğini göstererek dayanıklılığını göstermiştir.



Şekil 7. 18 x_4 'ün sistemin rijitlik parametrelerinin değişimine göre elde edilen yerdeğiştirme ve ivme frekans cevapları

7.3. Aktif Kontrol İle İlgili Benzetim Çalışmalarının Değerlendirilmesi

Bölüm 7.1'deki sonuçlar incelendiğinde karma kontrolörün göstermiş olduğu sönüm performansının zaman ve frekans alanında oldukça tatmin edici olduğu görülmüştür. Sonuçların kontrol kuvveti yönünden incelenmesi ise, sistemde El Centro depreminden kaynaklanan titreşimlerin bastırılması için ± 3000 kN kapasiteli bir eyleyiciye, Kocaeli

depreminden kaynaklanan titreşimlerin bastırılması için ± 4000 kN kapasiteli bir eyleyiciye ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Bu durum, aktif yapısal kontrolün önemli bir problemini ortaya koymaktadır. Sismik yüklerin rastlantısal durumlarından dolayı, ihtiyaç duyulan gerekli kontrol kuvveti, her depreme göre değişmekte dolayısıyla bazı durumlarda uygulamada kullanılan eyleyicilerin kapasitesi aşılabilmektedir. Bu durum literatürde “eyleyici doyumu problemi” olarak adlandırılmakta ve sistemin kapalı-çevrim performansında ciddi bozulmalara ve bununla birlikte kararsızlığa neden olabilmektedir. Bu nedenle aktif yapısal kontrol uygulamalarında kullanılacak kontrolörlere ait eyleyicilerin doyumlu olması tercih edilir. Bu problemin giderilmesi ve önerilen yöntemin pratikte uygulanabilir olabilmesi için, Bölüm 7.2’de, kontrol kuvvetinin sınırlandırılması ile titreşim genliklerinin en aza indirilmesi arasında bir ödünleşmeye karar verilerek, eyleyici doyumlu karma kontrolörün tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan karma H_2/H_∞ kontrol mimarisine eyleyici doyumu olayı DME kısıtları şeklinde dahil edilmiştir. Bu sayede, optimum performansı sağlayan, eyleyici doyumu limitine bağlı olarak pratikte uygulanabilir durum geri-beslemeli eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması elde edilmiştir. Çizelge 7.8 ve Çizelge 7.9’da El Centro ve Kocaeli depremleri için kontrolsüz durum ile karma kontrollü ve doyumlu karma kontrollü durumlar (tepeden-tepeye) karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, eyleyici doyumu içermeyen duruma göre titreşim genliklerinin bir miktar arttığını ancak üretilecek kontrol kuvvetinin sismik yüklerin rastlantısal durumlarından bağımsız hale getirilerek istenilen limitleri aşmayacağını göstermiştir. Böylelikle sistemin kararlılığı sağlanmış ve pratikte uygulanabilir duruma getirilmiştir.

Çizelge 7. 6 El Centro depremine maruz kren sistemi için kontrolsüz ve kontrollü durumların karşılaştırılması

	Kontrolsüz	Karma kontrollü	Doyumlu karma kontrollü
F_u (kN)	-	4529	± 2500
x_2 (m)	0.4164	0.0667	0.1583
x_3 (m)	0.6561	0.0480	0.2486
x_4 (m)	0.9343	0.0680	0.3516
x_5 (m)	1.1770	0.0951	0.4456
θ (rd)	1.5515	0.1533	0.5601
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	9.2710	1.9095	3.3967
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	6.8740	0.7195	2.9146
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	7.9398	0.8341	2.9663
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	14.4382	1.9411	5.2582
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	56.7416	5.3979	20.3075

Çizelge 7. 7 Kocaeli depremine maruz kren sistemi için kontrolsüz ve kontrollü durumların karşılaştırılması

	Kontrolsüz	Karma kontrollü	Doyumlu karma kontrollü
F_u (kN)	-	6436	± 2500
x_2 (m)	0.6118	0.1716	0.2331
x_3 (m)	1.1962	0.1865	0.4492
x_4 (m)	1.6471	0.2059	0.6190
x_5 (m)	1.8525	0.2238	0.6943
θ (rd)	1.8394	0.1685	0.5875
d^2x_2/dt^2 (m/s ²)	11.6788	2.2033	4.4030
d^2x_3/dt^2 (m/s ²)	8.4604	0.7211	3.1088
d^2x_4/dt^2 (m/s ²)	11.0614	0.9714	4.1479
d^2x_5/dt^2 (m/s ²)	18.5110	1.9577	6.2805
$d^2\theta/dt^2$ (rd/s ²)	55.8224	4.8988	14.5918

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde, depreme maruz krenler için çok serbestlik dereceli, zeminin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren, doğrusal olmayan bir matematik model geliştirilmiş, matematik modelin gerçekliği fiziksel bir kren modeli üzerinde yapılan gerçek deprem verilerinin kullanıldığı sarsma masası deneyleriyle doğrulanmış ve geliştirilen matematik model kullanılarak depreme maruz krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması sağlanmıştır. Krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrol yoluyla azaltılması problemi için durum geri-besleme mantığı ile çalışan eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrolör tasarlanmıştır. Kontrolör tasarımının en önemli aracı, dışbükey optimizasyon temelindeki doğrusal matris eşitsizlikleri olmuştur.

Bölüm 1’de, literatür özeti, tezin amacı ve orijinal katkısı yer almıştır. Literatür özetinde, ilk olarak krenlerin depreme yönelik performanslarının arttırılması alanında bugüne kadar gerçekleştirilen çalışmalara değinilmiş, ardından yapısal sistemlerin aktif kontrolü alanında bugüne dek yapılmış çalışmalar anlatılmış, daha sonra tasarlanan dayanıklı kontrol algoritmasının geliştirilmesine katkı sağlayan çalışmalara değinilerek sistemin dinamiği üzerinde olumsuz etkileri olan eyleyici doyumu problemi konusunda yapılan çalışmalar üzerinde durulmuştur. Ardından, doktora tezinin literatüre yapmış olduğu katkı vurgulanmış, doktora tezinde çözülmesi amaçlanan problem tanıtılarak tezin motivasyon nedeni ve amacı açıklanmış, son olarak tezin orijinal katkısı ortaya konulmuştur.

Bölüm 2’de sismik etkiye maruz krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan çok serbestlik dereceli doğrusal olmayan bir matematik model geliştirilmiştir. Doktora tezinde benzetim çalışmalarında ve deneylerde kullanılacak, bazı önemli depremlerin kayıtları modellenerek değişik bozucu girişler elde edilmiş ve yapılan benzetim çalışmalarıyla krenin farklı depremler altındaki dinamik davranışları elde edilmiştir.

Bölüm 3’de, geliştirilen matematik modelin doğruluğunu ortaya koymak için prototip bir konteyner kreninin 1/20 ölçekli fiziksel modeli üzerinde gerçek deprem verileri kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ardından, Bölüm 2’de elde edilen teorik sonuçlarla bu bölümde elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılarak yapılan analizler, geliştirilen matematik modelin depreme maruz krenlerin yapısal titreşimlerini gerçekçi şekilde ortaya koyduğunu göstermiştir. Dolayısıyla, bu doktora tezinde ortaya konan matematik model deneysel çalışmalar yoluyla doğrulanmıştır.

Bölüm 4’te, krenlerde aktif titreşim kontrolünün uygulanması üzerinde durulmuştur. Yöntemin pratikte uygulanabilirliğinin artırılması ve en etkin sönüm performansının elde edilmesi için, aktif kontrolün krende uygulanabileceği en etkin yerin belirlenmesine çalışılmış ve aktif kontrol mekanizmasının kren yapısına nasıl yerleştirileceği gösterilmiştir. Kontrolörün yerleştirileceği en uygun yer, kapalı-çevrim sistemin yönetilebilirlik indeksinin analitik olarak bulunmasıyla belirlenmiştir.

Bölüm 5’te, kontrolör tasarımında en önemli araç olarak kullanılan doğrusal matris eşitsizlikleri ve H_∞ kontrolün temelleri hakkında kısa tanımlar yapılmıştır. Ardından, bu doktora tezinde geliştirilen kontrol algoritmaları için öne sürülen teoremlerin ispatları, yararlanılan yardımcı teorem ve yöntemler açıklanarak, DME tabanlı durum geri-beslemeli dayanaklı kontrolün temelleri ortaya konulmuştur.

Bölüm 6’da aktif titreşim kontrolünde kullanılacak kontrol algoritmalarının tasarımı yapılmıştır. Öncelikle DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrol algoritmasının tasarımı gerçekleştirilmiştir. Aktif yapısal kontrolün önemli bir problemi sismik yüklerin rastlantısal durumlarından dolayı, ihtiyaç duyulan gerekli kontrol kuvvetinin, uygulamada kullanılan eyleyicilerin kapasitelerini aşabilmesidir. Kapalı-çevrim performansında ciddi bozulmalara ve sistemde kararsızlığa neden olabilen bu problemin giderilmesi ve önerilen yöntemin pratikte uygulanabilir olabilmesi için,

tasarlanan karma H_2/H_∞ kontrol mimarisine eyleyici doyumu olayı DME kısıtları şeklinde dahil edilmiştir.

Bölüm 7’de depreme maruz krenlerde yapısal titreşimlerin aktif kontrolü ile ilgili zaman ve frekans alanında benzetim çalışmaları yapılarak, aktif kontrol sisteminin ve tasarlanan kontrolörlerin performansları incelenmiştir.

Bu doktora tezi depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan yeni bir matematik model geliştirilmesi ve krenlerde yapısal titreşimlerin azaltılması problemine çözüm olarak sisteme aktif titreşim kontrolü uygulanması nedeniyle literatüre önemli katkılar sağlamıştır.

Bu doktora tezinde ilk olarak, depreme maruz krenlerin dinamik davranışlarını ortaya koyan, çok serbestlik dereceli, zeminin ve tekerlek mekanizmasının dinamiğini de içeren, doğrusal olmayan bir matematik model geliştirilmiştir. Literatürde daha önce bu tür bir matematik modele rastlanılmamıştır. Şimdiye kadar literatürde bu konuda yer alan tüm çalışmalar bu doktora tezi ile yürütülen çalışmalardan elde edilmiştir. Geliştirilen matematik model yardımıyla, krenlerde deprem etkilerinin incelenmesinin ve aktif-pasif kontrol yöntemleri ile sismik performanslarının arttırılmasının mümkün olduğu gösterilmiştir.

İkinci olarak literatürde krenlerin sismik performanslarını arttırmak için aktif titreşim kontrolü öneren bir çalışmaya daha önce rastlanılmamıştır. Şimdiye kadar literatürde krenlerin sismik performanslarının arttırılması için aktif titreşim kontrolü öneren tüm çalışmalar bu doktora tezi ile yürütülen çalışmalardan elde edilmiştir.

Ayrıca, bu doktora tezinde aktif titreşim kontrolü için karma H_2/H_∞ kontrol algoritması ve eyleyici doyumlu karma H_2/H_∞ kontrol algoritması tasarlanmıştır. Zaman ve frekans alanında yapılan analizler, karma H_2/H_∞ kontrolörün krenlerde depremden kaynaklanan titreşimlerin azaltılmasında oldukça iyi bir sönüm performansı gösterdiğini vurgulamış, ancak bazı depremlerde kontrol kuvvetinin uygulanabilir değerlerin üzerine çıktığını göstermiştir. Sistemi kararsızlığa götürebilecek bu problemin aşılması için geliştirilen eyleyici doyumlu dayanıklı karma H_2/H_∞ kontrolörün ise, optimum performansı sağlayan eyleyici doyumu limitine bağlı olarak pratikte uygulanabilir olduğu görülmüştür. Dolayısıyla benzetim çalışmalarının sonuçları, önerilen kontrol

algoritmasının, belirlenen eyleyici doyumu limitlerinde sistemin kararlılığını garanti altına aldığını ve krenlerde depremde kaynaklanan yapısal titreşimlerin azaltılmasında önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Tasarlanan kontrolör, sadece bu problemde değil, tüm yapısal sistemlerin bozucu bastırma problemlerinde etkin olarak kullanılabilecek bir kontrolördür. Geliştirilen kontrolör ayrıca, rüzgar etkisindeki krenlerde yapısal titreşimlerin azaltılmasında, krenlerde yük salınımlarının azaltılması probleminde, köprü titreşimlerinin azaltılmasında ve benzeri pek çok aktif titreşim kontrolü probleminde kontrol algoritması olarak tercih edilebilir.

Bu doktora tezinin sağladığı motivasyonla, ileride matematik model ve kontrol algoritması yönünden çalışmalara devam edilecektir. Bu doktora tezinde sunulan matematik model, tekerleklerin raydan çıkma durumu, tekerlek-ray bağlantısındaki yanal boşluklar ve halatın elastikiyeti ve sönümü modele dahil edilerek geliştirilecektir. Bu doktora tezinde tasarlanan kontrol algoritması, eyleyici gecikmesi problemi ve parametre belirsizliği problemini de içerecek şekilde çok daha etkin hale getirilecektir. Ayrıca krenlerin tasarımında kullanılan mevcut standartların, kren tasarımında deprem etkilerini göz önüne alabilmeleri için bu doktora tezinden elde edilen sonuçlar standart kuruluşlarıyla paylaşılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Kanayama, T. ve Kashiwazaki, A., (1998). "A Study on the Dynamic Behavior of Container Cranes Under Strong Earthquakes", *Seismic Engineering* 364: 276-284.
- [2] Kanayama, T., Kashiwazaki, A., Shimizu, N., Nakamura I. ve Kobayashi, N., (1998). "Large Shaking Table Test of a Container Crane by Strong Ground Excitation", *Seismic Engineering*, 364: 243-248.
- [3] Otani, A., Nagashima, K. ve Suzuki, J., (2002). "Vertical Seismic Response of Overhead Crane", *Nuclear Engineering and Design*, 212: 211-220.
- [4] Kobayashi, N., Kuribara, H., Honda, T. ve Watanabe, M., (2004). "Nonlinear Seismic Responses of Container Cranes Including the Contact Problem Between Wheels and Rails", *Journal of Pressure Vessel Technology*, 126: 59-65.
- [5] Soderberg, E. ve Jordan, M., (2007). "Seismic Response of Jumbo Container Cranes and Design Recommendations to Limit Damage and Prevent Collapse", *ASCE Ports 2007 Conference*, San Diego, CA., USA.
- [6] Koshab, B. ve Jacobs, L., (2008). "Seismic Performance of Container Cranes", *Seismic Risk Management for Port Systems*, NEESR Grand Challenge Third Annual Meeting, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.
- [7] Jacobs, L., DesRoches R. ve Leon, R.T., (2008). "Shake Table Testing of Container Cranes", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 14th WCEE, Beijing, China.
- [8] Sugano, T., Takenobu, M., Suzuki, T. ve Shiozaki, Y., (2008). "Design Procedures of Seismic-Isolated Container Crane at Port", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 14th WCEE, Beijing, China.
- [9] Jin, Y.L. ve Li, Z.G., (2011). "Theoretical Design and Experimental Verification of a 1/50 Scale Model of a Quayside Container Crane", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 1-19.

- [10] Sagirli, A. ve Azeloglu, C.O., (2012). "Investigation of the Dynamic Behaviors of Cranes under Seismic Effects with Theoretical and Experimental Study", *Advanced Materials Research*, 445: 1082-1087.
- [11] Sağırılı, A., Azeloğlu, C.O. ve Edinçliler, A., (2011). Krenlerin Sismik Performanslarının Zemin İyileştirilmesi Yoluyla Arttırılması, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Kapsamlı Araştırma Projesi, 2011-06-01-KAP01.
- [12] Sagirli, A., Azeloglu, C.O., Guclu, R. ve Yazici, H., (2011). "Self-tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures against Earthquake Induced Vibration", *Nonlinear Dynamics*, 64: 375-384.
- [13] Azeloğlu, C.O. ve Sağırılı, A., (2011). "Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Aktif Kontrolü", *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (29): 383-394.
- [14] Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A., Yazıcı, H. ve Güçlü, R., (2012). "Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Bulanık PID Kontrolör ile Aktif Kontrolü, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2 (24).
- [15] Azeloğlu, C.O. ve Sağırılı, A., (2012). "DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Karma H_2/H_∞ Kontrolörle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Kontrolü", *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (30).
- [16] Francis, B.A., (1987). *A Course in H_∞ Control Theory*, Lecture Notes in Control and Information Sciences 88, Edited by M. Thoma and A. Wyner, Springer-Verlag, New York.
- [17] Doyle, J.C., Glover, K., Khargonekar, P.P. ve Francis B.A., (1989). "State-Space Solutions to Standart H_2 and H_∞ Control Problems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 34(8): 831-847.
- [18] Lyapunov, A., (1947). *Problema General de la Stabilité du Mouvement*, Annals of Mathematical Studies, Princeton University Press, Princeton.
- [19] Gahinet, P. ve Apkarian, P., (1994). "A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 4: 421-448.
- [20] Chilali, M. ve Gahinet, P., (1996). " H_∞ Design with Pole Placement Constraints: An LMI approach", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(3): 358-367.
- [21] Gahinet, P., Apkarian, P. ve Chilali, M., (1996), "Affine Parameter Dependent Lyapunov Functions and Real Parametric Uncertainty", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(3):436-442.
- [22] de Oliveira, M.C., Geromel, J.C. ve Bernussou, J., (2002). "Extended H_2 and H_∞ Characterization and Controller Parametrizations for Discrete-Time Systems", *International Journal Of Control*, 75(9):666–679.
- [23] de Oliveira, P.J., Oliveira, R.C.L.F., Leite, V.J.S., Montagner, V.F. ve Peres, P.L.D., (2004). " H_2 Guaranteed Cost Computation by Means of Parameter Dependent Lyapunov Functions", *International Journal of System Science*, 35(5):305–315.

- [24] de Oliveira, P.J., Oliveira, R.C.L.F., Leite, V.J.S., Montagner, V.F. ve Peres, P.L.D., (2004). " H_∞ Guaranteed Cost Computation by Means of Parameter Dependent Lyapunov Functions", *Automatica*, 40(6):1053–1061.
- [25] Oliviera, R.C.L.F., de Oliveira, M.C. ve Peres, P.L.D., (2006). "LMI Relaxations for Robust H_2 Performance Analysis of Polytopic Linear Systems", *Proc. IEEE Conference on Decision & Control*, CA, San Diego, 2907–2912.
- [26] Sato, M., (2005). "Robust Performance Analysis of Linear Time-Invariant Parameter-Dependent Systems using Higher-Order Lyapunov Functions", *American Control Conference*, 8-10 June 2005, Proceedings of the 2005:615–620.
- [27] Scherer, C.W., (2006). "LMI Relaxations in Robust Control", *European Journal of Control*, 12(1):3–29.
- [28] Boyd, S., El Ghaoui, L., Feron, E. ve Balakrishnan, V., (1994). *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM Studies in Applied Mathematics, Philadelphia.
- [29] Chilali, M., Gahinet, P. ve Scherer, C., (1996). "Multi-Objective Output-Feedback Control via LMI Optimization", *IFAC 13th Triennial World Congress*, San Francisco
- [30] Akin, M., (1997). H_∞ Optimal Kontrol Problemlerinde Doğrusal Matris Eşitsizlikleri Yaklaşımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Akin, M., (2003), H_∞ Model Eşleme Problemlerinin Lineer Matris Eşitsizlikleri Yaklaşımı İle Çözümü, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] Löfberg, J., (2004). "Yalmip: A toolbox for Modeling and Optimzation in MATLAB", *Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan.
- [33] Lin, Z., (1997). " H_∞ almost disturbance decoupling with internal stability for linear systems subject to input saturation", 42(7): 992–995.
- [34] Castelan, E.B., Tarbouriech, S., da Silva Jr, J.M.G. ve Queinnec, I., (2006). " L_2 -Stabilization of Continuous-Time Linear Systems with Saturating Actuators", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 16(18): 935–944.
- [35] Hsia, T., (1967). "On the Optimal Control of Plants with Saturation Nonlinearity", *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 12(3): 331–332.
- [36] Kapasouris, P., Athans, M. ve Stein, G., (1988). "Design of Feedback Control Systems for Stable Plants with Saturating Actuators", *Decision and Control, Proceedings of the 27th IEEE Conference on*, 1: 469–479.
- [37] Astrom, K.J. ve Rundqwist, L., (1989). "Integrator Windup and How to Avoid It", *Proc. American Control Conference*, 1693–1698.
- [38] Castelan, E.B., Tarbouriech, S., da Silva Jr, J.M.G. ve Queinnec, I., (2006). " L_2 -Stabilization of Continuous-Time Linear Systems with Saturating Actuators", *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 16 (18): 935–944.

- [39] Pan, H. ve Kapila, V., (2001). "LMI-Based Control of Discrete-Time Systems with Actuator Amplitude and Rate Nonlinearities", American Control Conference Proceedings of the 2001, 5: 4140–4145.
- [40] Tarbouriech, S. ve Garcia, G., (2002). Output Feedback Compensators for Linear Systems with Position and Rate Bounded Actuators, in V. Kapila ve K.M. Grigoriadis, editors, "Actuator Saturation Control 10. Bölüm", Marcel Dekker, Inc., New York.
- [41] Iwasaki, T. ve Fu, M., (2002). Regional H_2 Performance Synthesis, in V. Kapila ve K.M. Grigoriadis, editors, "Actuator Saturation Control 4. Bölüm", Marcel Dekker, Inc., New York.
- [42] Delibaşı, A., (2008). Doyumlu Eyleyicilere Sahip DPD Sistemler İçin Dayanıklı Kontrolör Tasarımı, Dotor Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] Majia, R.V., (2005). Robust control of systems subject to uncertain disturbances and actuator dynamics", University of Girona, Spain, Doctoral Thesis.
- [44] Soong, T.T. ve Constantinou, M.C. (1994), Passive and Active Structure Vibration Control in Civil Engineering, Springer-Verlag, New York.
- [45] Kelly, J.M., (1996), Earthquake Resistant Design with Rubber, Springer-Verlag, London.
- [46] Erdik M. ve Yüzügüllü Ö.,(1980), Deprem Mühendisliği Açısından Yapı Dinamiğine Giriş, T.C. İmar ve İskan Bakanlığı Deprem Araştırma Başkanlığı", ODTÜ, Ankara.
- [47] Kasımzade, A.A., (2004), Yapı Dinamiği, Birsan Yayınevi, İstanbul, Türkiye.
- [48] Gawronski, W., (2004), Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures, Springer Verlag.
- [49] Aldemir, U.,(2009). "Causal Semi-Active Control of Seismic Response," Journal of Sound and Vibration, 322: 665–673.
- [50] Aldemir, U., (2003). "Optimal Control of Structures with Semi-Active Tuned Mass dampers", Journal of Sound and Vibration, 4(266):847–874.
- [51] Yazici, H. ve Guclu, R., (2008), "Active Vibration Control of a Structure with ATMD using a Robust Self-tuning Scheme P-ID Type Fuzzy Controller", The Mechanics Conference to Celebrate the 100th Anniversary of The Department of Engineering Science and Mechanics, May 29-30, Virginia.
- [52] Park, K., Koh, H. ve Seo C. (2004). "Independent modal space fuzzy control of earthquake-excited structures", Engineering Structures, 26: 279-289.
- [53] Guclu, R. ve Yazici, H. (2007), "Fuzzy Logic Control of a Non-Linear Structural System against Earthquake Induced Vibration", Journal of Vibration and Control, 13(11):1535-1551.

- [54] Al-dawod, M., Samali, B., Naghdy, F. ve Kwok, K.C.S., (2001). "Active Control of along Wind Response of Tall Building Using a Fuzzy Controller", *Engineering Structures*, 23:1512-1522.
- [55] Guclu, R., (2001). "Fuzzy Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-of-Freedom Structural Systems" *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 27:157–167.
- [56] Yazıcı, H., (2006). Çok Serbestlik Dereceli Bir Yapının Titreşimlerinin Bulanık Mantıkla Kontrolü, YTÜ, FBE, Yüksek Lisans Tezi.
- [57] Guclu, R. ve Yazici, H., (2008). "Vibration Control of a Structure with ATMD Against Earthquake using Fuzzy Logic Controllers", *Journal of Sound and Vibration*, 318(1-2):36-49.
- [58] Guclu, R. ve Yazici, H., (2009). "Seismic-Vibration Mitigation of a Non-Linear Structural System with an ATMD Through a Fuzzy PID Controller", *Nonlinear Dynamics*, 58(3): 553-564.
- [59] Guclu R. ve Yazici, H., (2009). "Self-Tuning Fuzzy Logic Control of a Non-Linear Structural System with ATMD Against Earthquake", *Nonlinear Dynamics*, 56(3):199-211.
- [60] Alli, H. ve Yakut, O., (2009). "Application of Neural Based Fuzzy Logic Sliding Mode Control with Moving Sliding Surface for the Seismic Isolation of a Building with Active Tendon", *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 20:235-256.
- [61] Agarwala, R., Ozcelik, S. ve Faruqi, M., (2000). "Active Vibration Control of a Multi-Degree-of-Freedom Structure by the Use of Direct Model Reference Adaptive Control," *American Control Conference*, Chicago, IL, USA, 3580-3584.
- [62] Ikhouane, F., Manosa, V. ve Rodellar, J., (2005) Adaptive control of hysteretic structural system. *Automatica* 41: 225-331.
- [63] Guclu, R. ve Sertbas, A. (2005), "Evaluation of sliding mode and proportional – integral-derivative controlled structures with an active mass damper", *Journal of Vibration and Control*, Vol 11: 397-406.
- [64] Yagiz, N., (2001). "Sliding Mode Control of a Multi-Degree-of-Freedom Structural System with Active Tuned Mass Damper", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25:651-657.
- [65] Kose, I.E., Schmitendorf, W., Jabbari, F. ve Yang, J., (1996). " H_{∞} Active Seismic Response Control Using Static Output Feedback", *Journal of Engineering Mechanics*, 122(7):651–659.
- [66] Nonami, K. ve Sivrioglu, S., (1996). "Active Vibration Control Using LMI-Based Mixed H_2/H_{∞} State and Output Feedback Control with Nonlinearity", *Proc. of the 35th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Kobe, 161-166,.
- [67] Kim, S.J. ve Choi, J.W. (2000). "Parametric Uncertainty in Controlling the Vibration of a Building", *SICE Iizuka, Japan*, 107-112.
- [68] Fujinami, T., Saito, Y., Morishita, M., Koike, Y. ve Tanida, K. (2001). "A Hybrid Mass Damper System Controlled by H_{∞} Control Theory for Reducing Bending-

- Torsion Vibration of an Actual Building”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 30: 1639-1653.
- [69] Wang, S.G., Yen, H.V. ve Roschke, P.N., (2001). "Robust Control for Structural Systems with Parametric and Unstructured Uncertainties", Journal of Vibration and Control, 7: 713-722.
- [70] Du, H., Lam, J. ve Sze, K.Y., (2004). “Non-Fragile H_∞ Vibration Control for Uncertain Structural Systems”, Journal of Sound and Vibration, 273: 1031-1045.
- [71] Huo, L., Song, G., Li, H. ve Grigoriadis, K., (2008). “ H_∞ Robust Control Design of Structural VibrationSuppressions using an Active Mass Damper”, Smart Materials and Structures 17 015021(10pp).
- [72] Yazıcı, H., Küçükdemiral, İ.B. ve Güçlü, R., (2009). “LMI Tabanlı Çıkış Geri-Beslemeli H_∞ Kontrolör ile Yapısal Bir Sistemin Aktif Titreşim Kontrolü”, UMTS 2009, 14. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampüsü, s.7-13, Güzelyurt, KKTC.
- [73] Yazıcı, H. ve Guclu, R., (2010). "Active Vibration Control of Seismic Excited Structural System using LMI-Based Mixed H_2/H_∞ State Feedback Controller”, Turkish Journal of Electrical of Engineering & Computer Sciences, doi:10.3906/elk-1007-592.
- [74] Du, H. ve Lam, J., (2006). “Energy-to-Peak Performance Controller Design for Building via Static Output Feedback under Consideration of Actuator Saturation”, Computer Structures, 84(31-32):2277-2290.
- [75] Yazici, H., (2011), Eyleyici Gecikmesine Bağlı Doyumlu ve Dayanıklı H_∞ Denetleyiciyle Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Sistemlerin Titreşimlerinin Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] Ercan, Y., (2003), Mühendislik Sistemlerinin Modellenmesi ve Dinamiği, Literatür Yayıncılık, İstanbul, Türkiye.
- [77] Yagiz, N., (2003). “Vibration Control of a Building with ATMD under Earthquake Excitation”, International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 8(1).
- [78] Yagiz, N. ve Ertal, C., (2003). “Evaluation of Control Methods on a Structural System”, Mathematical & Computational Applications, 8(3): 369-376.
- [79] Yazici, H. ve Guclu, R., (2007). “Active Vibration Control of a Building Structure Using a Hybrid Fuzzy Logic P+ID Controller”, The 36th International Congress & Exhibition on Noise Control Engineering, 28-31 August 2007, Istanbul, 36, in07-029 CD.
- [80] Çetin, Ş., (2010), MR Sönümleyici ile Yapıların Titreşim Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [81] Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü, Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Sarsma Masası Laboratuvarı (2012). Deney Cihazları Kullanım Kılavuzları, İstanbul.
- [82] Lure, A., (1957). Some Nonlinear Problems in the the Theory of Automatic Control, H. Stationary Office, London.
- [83] Nesterov, Y. ve Nemirovskii, A., (1988), A General Approach to Polynominal-Time Algorithms Design for Convex Programming, Technical Report Cent. Econ. and Math. Inst., USSR Acad. Sci, Moscow, USSR.
- [84] Nesterov, Y. ve Nemirovskii, A., (1994), Interior -Point Polynominal Algorithms in Convex Programming, Theory and Application, Philadelphia.
- [85] Apkarian, P. ve Tuan, H.D., (1998), "Parameterized LMIs in Control Theory", Proceedings on the 37th IEEE Conference on Decision and Control, 152-157.
- [86] Chilali, M. ve Gahinet, P., (1996). " H_∞ design with the pole placement constraints: an LMI approach", IEEE Transactions on Automatic Control, 41(3): 358-367.
- [87] Scherer, C., Gahinet, P. ve Chilali, M., (1997). "Multi-Objective Output-Feedback Control via LMI Optimization, IEEE Transactions on Automatic Control, 42(7): 895-911.
- [88] Scherer, C. ve Weiland, S., (1999). Linear Matrix Inequalities in Control, Lecture Notes DISC Course, Netherland.
- [89] Boyd, S. ve Desoer, C. A., (1985). "Subharmonics Functions and Performance Bounds in Linear Time-Invariant Feedback Systems", IMA J. Math. Cont. and Info., 2: 153-170.
- [90] Doyle, J., Fancis, J. ve Tannenbaum, K., (1995). Feedback Control Theory, Mcmillian Englewood Clifts, NJ, USA.
- [91] Zhou, K., Doyle, J. ve Glover, K., (1995). Robust and Optimal Control, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.
- [92] Khargonekar, P.P. ve Rotea M.A., (1991). "Mixed H_2/H_∞ Control Problem: A Convex Optimisation Approach", IEEETrans. Automatic Control, 3(7): 824-837.

SİSTEME AİT ENERJİ DENKLEMLERİ VE HAREKET DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

Sistemin kinetik enerjisi (E_k):

$$E_k = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}_3^2 + \frac{1}{2} m_4 \dot{x}_4^2 + \frac{1}{2} m_5 \dot{x}_5^2 \\ + \frac{1}{2} m_6 [(\dot{x}_4 + \dot{L} \sin \theta + L \dot{\theta} \cos \theta)^2 + (L \dot{\theta} \sin \theta - \dot{L} \cos \theta)^2] + \frac{1}{2} m_6 L^2 \dot{\theta}^2$$

Sistemin sönüm enerjisi (E_D):

$$E_D = \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2} c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)^2 + \frac{1}{2} c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)^2$$

Sistemin potansiyel enerjisi (E_p):

$$E_p = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 (x_3 - x_2)^2 + \frac{1}{2} k_4 (x_4 - x_3)^2 \\ + \frac{1}{2} k_5 (x_5 - x_4)^2 + m_6 g L (1 - \cos \theta)$$

Enerji denklemlerinin Lagrange denkleminde yerine yazılarak hareket denklemlerinin elde edilmesi:

x_1' in hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_1} = m_1 \dot{x}_1, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_1} \right) = m_1 \ddot{x}_1, \quad \frac{\partial E_k}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_1} = k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1),$$

$$\frac{\partial E_D}{\partial x_1} = c_1 \dot{x}_1 - c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 = 0$$

x_2' nin hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_2} = m_2 \dot{x}_2, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_2} \right) = m_2 \ddot{x}_2, \quad \frac{\partial E_k}{\partial x_2} = 0, \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_2} = k_2 (x_2 - x_1) - k_3 (x_3 - x_2),$$

$$\frac{\partial E_D}{\partial x_2} = c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + (k_2 + k_3) x_2 - k_2 x_1 - k_3 x_3 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_3 \dot{x}_3 = 0$$

x_3' ün hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_3} = m_3 \dot{x}_3, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_3} \right) = m_3 \ddot{x}_3, \quad \frac{\partial E_k}{\partial x_3} = 0, \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_3} = k_3 (x_3 - x_2) - k_4 (x_4 - x_3),$$

$$\frac{\partial E_D}{\partial x_3} = c_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) - c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 + (k_3 + k_4) x_3 - k_3 x_2 - k_4 x_4 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 - c_4 \dot{x}_4 = 0$$

x_4' ün hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_4} = m_4 \dot{x}_4 + m_6 \dot{x}_4 + m_6 L \dot{\theta} \cos \theta, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_4} \right) = (m_4 + m_6) \ddot{x}_4 + m_6 L \ddot{\theta} \cos \theta,$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial x_4} = 0, \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_4} = k_4 (x_4 - x_3) - k_5 (x_5 - x_4), \quad \frac{\partial E_D}{\partial x_4} = c_4 (\dot{x}_4 - \dot{x}_3) - c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)$$

$$(m_4 + m_6)\ddot{x}_4 + m_6 L \ddot{\theta} \cos \theta + (k_4 + k_5)x_4 - k_4 x_3 - k_5 x_5 + (c_4 + c_5)\dot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 - c_5 \dot{x}_5 = 0$$

x_5 'in hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_5} = m_5 \dot{x}_5, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{x}_5} \right) = m_5 \ddot{x}_5, \quad \frac{\partial E_k}{\partial x_5} = 0, \quad \frac{\partial E_p}{\partial x_5} = k_5 (x_5 - x_4),$$

$$\frac{\partial E_D}{\partial \dot{x}_5} = c_5 (\dot{x}_5 - \dot{x}_4)$$

$$m_5 \ddot{x}_5 + k_5 x_5 - k_5 x_4 + c_5 \dot{x}_5 - c_5 \dot{x}_4 = 0$$

θ 'nın hareketinin diferansiyel denkleminin elde edilmesi:

$$\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} = m_6 (\dot{x}_4 L \cos \theta + L^2 \dot{\theta}), \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{\theta}} \right) = m_6 (\ddot{x}_4 L \cos \theta + L^2 \ddot{\theta}), \quad \frac{\partial E_k}{\partial \theta} = 0,$$

$$\frac{\partial E_p}{\partial \theta} = m_6 g L \sin \theta, \quad \frac{\partial E_D}{\partial \dot{\theta}} = 0$$

$$m_6 L^2 \ddot{\theta} + m_6 L \ddot{x}_4 \cos \theta + m_6 g L \sin \theta = 0$$

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : C. Oktay AZELOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 28.10.1979 İSTANBUL
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : azeloglu@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lisans	Makine Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2000
Lise	Fen-Matematik	İntaş Lisesi	1996

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2005	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Sagirli, A., Azeloglu, C.O., Guclu, R., Yazici, H., (2011). "Self-tuning Fuzzy Logic Control of Crane Structures against Earthquake Induced Vibration", Nonlinear Dynamics, 64: 375-384.
2. Sagirli, A., Azeloglu, C.O., (2012). "Investigation of the Dynamic Behaviors of Cranes under Seismic Effects with Theoretical and Experimental Study", Advanced Materials Research, 445: 1082-1087.
3. Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A., (2011). "Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Aktif Kontrolü", Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4 (29): 383-394.
4. Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A., (2012). "DME Tabanlı Durum Geri-beslemeli Karma H_2/H_∞ Kontrolörle Krenlerde Yapısal Titreşimlerin Kontrolü", Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 4 (30).
5. Azeloğlu, C.O., Sağırılı, A., Yazıcı, H., Güçlü, R., (2012). "Konteyner Krenlerinde Depremden Kaynaklanan Titreşimlerin Bulanık PID Kontrolör ile Aktif Kontrolü, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2 (24).

Projeler

1. Krenlerde Hareketli ve Salınımlı Yüklerin Kuvvet Geri Beslemeli Kontrolü ve Sismik Etkilere Maruz Krenlerin Dinamik Davranışlarının ve Stabilitelerinin İncelenmesi.

Proje Türü: Y.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Kapsamlı Araştırma Projesi.

Proje No ve Süresi: 2010-06-01-KAP01, 2010-2012.

Proje Ekibi: Ahmet Sağırılı, C.Oktay Azeloğlu, Utku Büyüksahin.

2. Krenlerin Sismik Performanslarının Zemin İyileştirilmesi Yoluyla Arttırılması.

Proje Türü: Y.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü, Kapsamlı Araştırma Projesi.

Proje No ve Süresi: 2011-06-01-KAP01, 2011-2013.

Proje Ekibi: Ahmet Sağırılı, Ayşe Edinçliler, C.Oktay Azeloğlu.