T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASİMETRİK YAPISAL BİR SİSTEMİN GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL TİTREŞİM KONTROLÜ

MERVE TÜRKOĞLU

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

DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. HAKAN YAZICI

İSTANBUL, 2016

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASİMETRİK YAPISAL BİR SİSTEMİN GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL TİTREŞİM KONTROLÜ

Merve TÜRKOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 25.04.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

İstanbul Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Kütle ve rijitlik merkezleri çakışık olmayan yapısal sistemler asimetrik olarak tanımlanmaktadır. Yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolünde geri besleme esnasında oluşan zaman gecikmesi problemi sistemlerin kararlılık ve performans kayıplarına neden olmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan gecikmeye bağlı bir kontrolör sentez metodu, asimetrik yapısal bir sistem üzerinde uygulanmıştır. Kontrolörün üstünlüğü yapılan simülasyon çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Yüksek Lisans öğrenimimde beni modern kontrol ile tanıştıran, bilim dünyasına kazandırdığı özgün çalışmalarının devamının geleceğine emin olduğum, değerli bilgilerinden faydalandığım değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım. Yüksek Lisans öğrenimine başlamam yönünde beni teşvik eden, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Rahmi GÜÇLÜ'ye ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamda yardımını esirgemeyen Arş.Gör. Mert SEVER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bütün hayatım boyunca bana destek olan, yaşadıkları her türlü zorluğa rağmen beni bugünlere getiren Anne ve Babama, sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım. Aynı sıraları paylaştığımız, bu zamana kadar desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli meslektaşım Kardeşime sonsuz sevgiler. Yüksek Lisans öğrenimim süresince hep yanımda olan, değerli meslektaşım sevgili Eşime sonsuz teşekkürler.

Haziran, 2016

Merve TÜRKOĞLU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vi

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ viii

ÇİZELGE LİSTESİ x

ÖZET xi

ABSTRACT xiii

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 3
1.2 Tezin Amacı 12
1.3 Hipotez 14

BÖLÜM 2

DEPREM ETKİSİNDEKİ YAPISAL SİSTEMLERİN MODELLENMESİ 15

2.1 Tek Yönde Hareketli Yapısal Sistemler 15
2.2 Asimetrik Yapısal Sistemler 16
2.2.1 Asimetrik Yapısal Sistemin Matematiksel Modeli 17

BÖLÜM 3

GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL KONTROLÖR TASARIMI 24

3.1 Dışbükey Optimizasyon 25
3.1.1 Parametre Optimizasyonu 25
3.1.2 Fonksiyon Optimizasyonu 26
3.1.3 Dışbükey Problemler 26
3.1.4 Dışbükey Optimizasyon Problemi 28
3.2 Sinyal Normları 28
3.3 H_∞ Normu 29

3.4 H_∞ Normunun Hesaplanması 30
3.5 H_∞ Optimal Kontrol Problemi 33
3.6 Doğrusal Matris Eşitsizliklleri 34
3.7 DME Kullanılarak Durum Geri-Besleme Problemi 36
3.7.1 DME Tabanlı Durum Geri-Beslemeli Optimal Kontrolör Tasarımı 37
3.7.2 Zaman Gecikmeli Sistemler İçin Gecikmeye-Bağlı Optimal Kontrolör Tasarımı 40

BÖLÜM 4

ASİMETRİK YAPISAL BİR SİSTEMİN GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL KONTROLÜ İÇİN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI 52

4.1 Asimetrik Yapısal Sisteme Uygulanan Bozucu Deprem Hareketleri 52
4.2 Durum Geri-Beslemeli Optimal Kontrolör için Simülasyon Çalışmaları 53
4.3 Kontrol Giriş Sinyalinde Zaman Gecikmesinin İncelenmesi 62
4.4 Durum Geri-Beslemeli Gecikmeye-Bağlı Optimal Kontrolörün Simülasyon Çalışmaları 66

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER 75

KAYNAKLAR 77

ÖZGEÇMİŞ 82

SİMGE LİSTESİ

A	Sistem Matrisi
A^T	A Matrisinin Transpozesi
A^{-1}	A Matrisinin Tersi
B_2	Kontrol Giriş Matrisi
B_1	Bozucu Giriş Matrisi
C	Sönüm Matrisi
C	Kompleks Sayılar Kümesi
C^n	n Bileşenli Kompleks Vektörler Kümesi
$\bar{h}$	Gecikme Zamanının Üst Sınırı Veren Bilinen Pozitif Sabit
I	Uygun Boyutlu Birim Matris
K	Kontrol Kazanç Matrisi
K_c	Rijitlik Matrisi
M	Kütle Matrisi
$\Re$	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
$\mathrm{Re}(s)$	$s\in C$'nin Reel Kısmı
$\mathrm{u}(t)$	Kontrol Giriş Vektörü
$\mathrm{V}(\mathrm{x}(t),t)$	Lyapunov Krasovskii Aday Fonksiyoneli
$\mathrm{w}(t)$	Bozucu Giriş Vektörü
$\mathrm{x}(t)$	Sistemin Durum Vektörü
$\mathrm{z}(t)$	Kontrol Edilmek İstenen Çıkış Vektörü
γ	En Küçük Bozucu Bastırma Seviyesi
χ	Genişletilmiş Durum Vektörü
ε	Herhangi bir Pozitif Sabit
$\lambda(\mathrm{A})$	A Matrisinin Özdeğeri
$\sigma(\mathrm{A})$	A Matrisinin En Büyük Tekil Değeri
$L_2[0,+\infty)$	$[0,+\infty)$'da Kare Entegre Edilebilir Fonksiyonlar Kümesi
$\|\cdot\|_\infty$	H_∞ normu
:=	Tanımsal Eşitlik
$\in$	Bir Kümenin Elemanı Olmak
□	İspat Sonu

KISALTMA LİSTESİ

AAKD	Aktif Ayarlı Kütle Damperi
APTKS	Akıllı Pasif Titreşim Kontrol Sistemi
AYS	Asimetrik Yapısal Sistem
BK	Bulanık Kontrol
CRE	Cebirsel Riccati Eşitliği
DE	Dönel Esnek
DME	Doğrusal Matris Eşitsizliği
DOME	Doğrusal Olmayan Matris Eşitsizliği
ER	Elektro-Reolojik
KM	Kütle Merkezi
MR	Manyeto-Reolojik
RM	Rijitlik Merkezi
RMS	Root Mean Square (Karekök Ortalama)
SGYT	Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Üç Katlı Kayma Bina Modeli 15
Şekil 2. 2 Düzce depreminde burulma titreşimine maruz kalmış hasarlı bir bina..... 17
Şekil 2. 3 Asimetrik yapısal sistemin fiziksel modeli..... 18
Şekil 2. 4 Asimetrik yapısal sistemin üst görünüşü 18
Şekil 3. 1 Standart H_∞ blok diyagramı 33
Şekil 3. 2 Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı..... 37
Şekil 4. 1 1940 El-Centro Depreminin Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerindeki zamana bağlı ivme değişimleri 53
Şekil 4. 2 1906 San Francisco Depreminin Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerindeki zamana bağlı ivme değişimleri..... 53
Şekil 4. 3 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 54
Şekil 4. 4 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 55
Şekil 4. 5 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 55
Şekil 4. 6 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 56
Şekil 4. 7 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 56
Şekil 4. 8 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 57
Şekil 4. 9 1940 El-Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemde Kontrolcü 1 için tendon yerdeğiştirmeleri..... 59
Şekil 4. 10 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemde Kontrolcü 1 için tendon yerdeğiştirmeleri 59
Şekil 4. 11 1940 El-Centro depremi için Kontrolcü 1 kuvvetindeki değişim 60
Şekil 4. 12 1906 San Francisco depremi için Kontrolcü 1 kuvvetindeki değişim..... 60

Şekil 4. 13 Asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları 60
Şekil 4. 14 Asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları 61
Şekil 4. 15 Asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları 61
Şekil 4. 16 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 63
Şekil 4. 17 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 63
Şekil 4. 18 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 64
Şekil 4. 19 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 64
Şekil 4. 20 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 65
Şekil 4. 21 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları 65
Şekil 4. 22 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 67
Şekil 4. 23 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 68
Şekil 4. 24 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 68
Şekil 4. 25 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 69
Şekil 4. 26 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 69
Şekil 4. 27 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları 70
Şekil 4. 28 Asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları 71
Şekil 4. 29 Asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları 71
Şekil 4. 30 Asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları 72
Şekil 4. 31 Asimetrik yapısal sistemin tendon yerdeğiştirmeleri 72
Şekil 4. 32 Tendonlere etkiyen Kontrolcü 2'ye ait kuvvetlerin zamana göre değişimleri 73

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Asimetrik yapısal sistemin parametreleri 22
Çizelge 4.1 1940 El-Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile RMS değerleri 57
Çizelge 4.2 1906 San Francisco depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile RMS değerleri 58
Çizelge 4.3 1940 El-Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile RMS değerleri 73
Çizelge 4.4 1906 San Francisco depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile RMS değerleri 74
Çizelge 4.5 Asimetrik yapısal sistemin farklı bozucular etkisinde Kontrolcü 1 ve Kontrolcü 2 ile zaman gecikmesinin erişilebilir üst sınırları 74

ÖZET

ASİMETRİK YAPISAL BİR SİSTEMİN GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL TİTREŞİM KONTROLÜ

Merve TÜRKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hakan YAZICI

Bu zamana kadar yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, aktif kontrol metodlarının yapısal sistemlerdeki dinamik etkilerini azalttığını göstermektedir. Fakat bu çalışmaların çoğunda simetrik yapıda binaların incelendiği görülmüştür. Gerçekte inşaat aşamasındaki hatalar ya da ilave büyük kütleler sebebiyle binalar simetrik karakterlerini kaybetmektedir. Bu sistemler literatürde Asimetrik Yapısal Sistemler (AYS) olarak tanımlanmaktadır ve bu tarz yapılara herhangi bir yönde etki eden bozucu zemin hareketi yanal titreşimlerin yanısıra burulma titreşimlerine de neden olmaktadır.

Aktif yapısal kontrol çalışmalarında genellikle gözardı edilen en önemli problemlerden biri zaman gecikmesidir. Kontrol sisteminin kararlılık ve performans kayıplarına neden olan gecikme problemi, uzun mesafelerde bulunan sensörler sebebiyle veri ve sinyallerin iletilmesi ve/veya kontrol kuvvetinin yapıya iletimi sırasında oluşabilecek bir problemdir.

Bu yüksek lisans tezinde, sismik zorlanma altındaki, kontrol girişinde zaman gecikmeli asimetrik yapısal sistemler için durum geri-beslemeli gecikmeye-bağlı optimal kontrolörlerin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bozucu girişler olarak 1906 San Francisco ve 1940 El Centro depremlerinin zamana bağlı ivme değişimleri kullanılmıştır. İlk olarak Doğrusal Matris Eşitsizliği (DME) tabanlı durum geri beslemeli optimal kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiş, daha sonra kontrol giriş sinyalinde zaman gecikmesinin oluşması durumunda sistem cevabının kararsızlaştığı gösterilmiştir. Gecikmeye bağlı kontrolör tasarımında gerekli kararlılık ve performans koşulları matris eşitsizlikleri

formunda elde edilmiştir. Çalışmada geliştirilen kontrol algoritması ile sistemin gecikme zamanının kabul edilebilir üst sınırına ve bozucu bastırma seviyesine eş zamanlı olarak erişilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları, önerilen gecikmeye-bağlı optimal kontrolörün kapalı çevrim sisteminin asimptotik kararlılığını garanti ettiğini ve yüksek sönüm performansına sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Asimetrik Yapısal Sistem, Optimal Kontrol, Giriş Gecikmesi, Doğrusal Matris Eşitsizlikleri, Aktif Titreşim Kontrolü.

ABSTRACT

DELAY DEPENDENT OPTIMAL VIBRATION CONTROL OF AN ASYMMETRIC STRUCTURAL SYSTEM

Merve TÜRKOĞLU

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Hakan YAZICI

Theoretical and experimental research works until this time show that active control methods can reduce the response of building structure against dynamic excitations. However, in large part of these works, buildings in symmetric forms are studied. In reality, because of the failures in construction phase and additional huge masses, buildings lose their symmetric characters. These systems are called Asymetric Structural Systems (A.S.S) in literature and ground motion disturbances affected in any way to these buildings create torsional vibration as well as lateral vibration.

In active structural control research works, one of the most important problem is time delay that usually underestimated. The time delay phenomenon, that caused loss of stability and performance, is kinda problem occurred by during transmitting data and signals to actuator and/or the control forces to structural system because of long distance sensors at different location.

In this Msc Thesis, the design of state feedback delay-dependent optimal controllers for an asymmetric structural systems with input delay are presented. 1906 San Francisco and 1940 El Centro earthquakes time-dependent of acceleration are used as a disturbance inputs. First, LMIs based state feedback optimal controller design is performed, then the response of system become unstable is illustrated in case of occurring time delay in input signal. The required stability and performance constraints

in design of delay dependent controller are obtained in terms of matrix inequalities. Using the improved control algorithm in this study, maximum allowable delay bound and disturbance attenuation level can be attained simultaneously. Simulation results show that the proposed method, delay-dependent optimal controller, guarentees the asymptotic stability of closed-loop system and has effective damping performances.

Keywords: Asymmetric Structural System, Optimal Control, Input Delay, Linear Matrix Inequality, Active Vibration Control

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yapısal sistemlerin depreme dayanıklı şekilde tasarımı yapı tarihi kadar eskidir. Bu zamana kadar çeşitli yöntemler kullanılarak yapılar depreme karşı korunmaya çalışılmıştır. Bu konuda insaların ne kadar başarılı oldukları yaşanan depremlerden test edilerek, eski çağlardan günümüze kadar gelen yapılardan belli olmaktadır.

Yapısal sistem tasarımında sadece statik kuvvetler dikkate alınarak tasarlanan klasik dönem ile sonrasında dinamik kuvvetlerin de dikkate alındığı modern çağ, yapı tasarımının ilk iki safhasını oluşturmaktadır. Üçüncü dönem ise yapının dinamik kuvvetlere karşı, bir geri-besleme sistemi yardımıyla kendini adapte edebilmesi prensibine dayanmaktadır.

Aktif veya pasif kontrol sistemlerinin kullanılmasının asıl amacı insan hayatını kurtarmakla birlikte, yapının güvenliği ve işlevselliğidir. Dolayısı ile gerilme ve yerdeğişimi gibi iç kuvvetler de sınır değerleri aşmamalıdır. Sınır durumlar güvenlik yönünden veya konfor bakımından seçilir ve genelde yerdeğişimleri kontrol altına alınarak azaltılmaya çalışılır.

Deprem etkilerine karşı yapıları korumak amacıyla geliştirilen çözümler iki gruba ayrılabilir. Birinci grupta kolon rijitlikleri azaltılarak, kirişlere mafsallar koyularak yada bunun gibi yöntemlerle yapıya bir form verilerek, depreme karşı dayanım sağlanır. Burada amaç, depremden yapıya etki eden enerjinin belirli yapı elemanları tarafından sönümlenmesi veya sisteme enerji girişinin azaltılmasıdır. Fakat bu önlemler ile belli bir koruma sağlansa bile, bazı elemanlarda oluşabilecek plastik deformasyonlar, yapıya ciddi hasarlar verebilir. İkinci grupta ise, yapıya katı veya sıvı sönümleyiciler, özel

mesnetler ve kayma elemanları dediğimiz ilave elemanlar koyularak birinci grupta belirtilen amaçlar gerçekleştirilir.

Sismik koruma teknikleri uygulama metoduna göre; pasif kontrol, yarı-aktif kontrol ve aktif kontrol olarak sınıflandırılmaktadır. Pasif kontrol sistemleri; yapıya yerleştirilen özel elemanlar aracılığı ile deprem, şiddetli rüzgar vb. nedenlerle sisteme dışardan giren enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerine alırlar. Bu sistemlerin hesabı kolay ve maliyeti düşüktür. Dışarıdan bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Dolayısı ile, deprem esnasında oluşabilecek güç kesintisinden etkilenmezler ve stabilite sorununa neden olmazlar. Pasif enerji sönümleyiciler ve sismik izolasyon sistemlerinden oluşan pasif kontrol sistemleri, sisteme ilave edilen araçlar sayesinde sistemin enerji yutma kapasitesini arttırırlar ya da yapının zemin titreşiminden izole edilmesini sağlamaktadırlar [1]. Bu sistemlerde boyutlandırma yapının ömrü boyunca maruz kalabileceği deprem şiddetleri göz önüne alınarak belirlenir. Tasarlanandan daha şiddetli bir deprem meydana gelirse yapıda büyük deformasyonlar oluşabilir.

Yarı aktif kontrol elemanları, kontrol edilebilen pasif elemanlar olarak görülür. Yarı aktif kontrol bir çeşit aktif kontrol olup, gerekli dış enerjinin büyüklüğü tipik aktif kontrol sistemine göre daha azdır. Bu sönümleyiciler, piller vasıtası ile oluşturulabilen elektrik ve manyetik alanlar yardımı ile Elektro-Reolojik (ER) ve Manyeto-Reolojik (MR) sıvıların mekanik özelliklerinin kontrolü prensibi ile çalışmaktadırlar.

Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının yerdeğişimini istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Sistemin mekanizması genel olarak, deprem titreşimlerinin algılanması, bir kontrol aygıtı ile bu bilgilerin değerlendirilmesi ve bina üzerine yerleştirilmiş olan aygıtlarla, bina titreşimlerine karşı çeşitli biçimlerde yapının taşıyıcı sistemi üzerindeki zarar verici etkisinden kurtulması prensibine dayalı olarak kurulmuştur. Aktif Ayarlı Kütle Damperi (AAKD), aktif tendon ve MR damper, kontrol mekanizmalarına örnek olarak verilebilir. Pasif kütle damperleri yapının genelde birinci mod hareketini azaltacak şekilde ayarlanmaktadır. Diğer modları da kontrol edebilmek aktif kütle damperleri ile mümkün olmaktadır. Aktif tendon sisteminde ise kontrol kuvvetleri tendonlar yardımıyla uygulanmaktadır. Bu tendonlar konvansiyonel kontrol metodları (PD, PI, PID) ile kontrol edilmektedir.

Gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanmasında kullanılan algoritmalara ise, dayanıklı kontrol (H_2 ve H_∞ Kontrol), Bulanık Kontrol (BK) ve Adaptif Kontrol metotları örnek olarak verilebilir.

Yapılan teorik ve pratik çalışmalar, yapısal sistemlerin dış 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 tercih edilen kontrol algoritmasının, özellikle yapıya zemin yoluyla iletilen sismik etkileri azaltmada çok önemli rol oynadığı bilinmektedir. Literatürde, asimetrik yapısal sistemlerin aktif kontrolü çalışmalarında zaman gecikmesi probleminin sistemin dinamiğine dahil edildiği bir kontrolör tasarımına rastlanmamıştır. Bu durum bizi asimetrik yapılarda daha az tutucu, zaman gecikmesinin üst sınırına ulaşabilecek yeni bir kontrolör tasarımı geliştirmek konusunda motive etmiştir.

Sunulan bu giriş bölümü, literatür özeti, tezin amacı ve hipotez gibi kısımlardan oluşmaktadır. İlk olarak, literatür araştırması verilerek yapısal sistemlerin kontrolü alanında bu güne kadar gerçekleştirilen çalışmalar anlatılmıştır. Daha sonra sistemin dinamiği üzerine olumsuz etkileri olan zaman gecikmesi problemi hakkında yapılan çalışmalar açıklanmıştır. Son olarak asimetrik yapısal sistemlerin kontrolü üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiş ve zaman gecikmesi probleminin bu sistemlerin dinamiğine dahil edilmediği açıklanarak yüksek lisans tezinin literatüre yapmış olduğu katkı vurgulanmıştır.

1.1 Literatür Özeti

Bu bölümde, yapısal sistemlerin titreşim problemine yönelik detaylı bir literatür araştırması verilmiştir. İlk olarak yapısal sistemlerde pasif, yarı-aktif kontrol uygulamalarından bahsedilmiş ardından aktif kontrol çalışmaları ile zaman gecikmesi probleminin dahil olduğu çalışmalar anlatılmıştır. Daha sonra, asimetrik yapısal sistemler üzerine yapılan titreşim kontrolü çalışmaları açıklanmıştır. Zaman gecikmesi probleminin, bu zamana kadar yapılan çalışmalarda asimetrik yapılarda incelenmediği vurgusu yapılarak yüksek lisans tezinin literatüre olan katkısı ortaya konmuştur.

Xue vd. [2] çalışmalarında, Akıllı Pasif Titreşim Kontrol Sistemi (APTKS) olarak adlandırdıkları pasif kontrol sistemini sunmuşlardır. Pasif ve akıllı olarak nitelendirilen, farklı rijitlik ve viskozite değerlerine sahip iki pasif kontrol elemanından oluşan bu sistemde, küçük depremlerde sadece pasif kısmın çalıştığı, yerdeğiştirme cevaplarının artması durumunda akıllı kısmın çalışarak kontrol sisteminin mekanik özelliklerinin değiştiği anlatılmıştır. Önerilen APTKS'nin pasif sistemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği simülasyon çalışmaları ile gösterilmiştir.

Yongqi vd. [3] çalışmalarında, Pekin'de bulunan 39 katlı yüksek bir binanın pasif titreşim kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Pasif kontrol viskoz damperler ile uygulanmaktadır. Aynı zamanda yapıda burkulmaya dirençli destek elemanları ilave edilen yapıda, hem yatay hem de düşey yönlerdeki yerdeğiştirme ve ivme cevaplarının kontrolsüz duruma göre azaldığı yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Bigdeli ve Dookie [4], yapısal sistemlerde kullanılan pasif kontrol sistemlerini faklı kontrolör kütleleri için incelemişlerdir. Ayarlı kütle damperi, ayarlı sıvı damper ve ayarlı sıvı sütün damperlerinin karşılaştırıldığı bu çalışmada ölçekli üç katlı yapısal bir sistem kullanılmıştır. Yapılan deneysel sonuçlara göre, en yüksek sönüm etkisinin ayarlı kütle damperi ile elde edildiği, sönüm indeksinin kontrolör kütlesi ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir.

Li vd. [5], bulanık mantık tabanlı ayarlı sıvı sütün damperli yarı-aktif kontrol metodunu düzensiz binalar üzerinde incelemişlerdir. Deprem hareketleri çok yönlü olarak, çok katlı düzensiz bir binaya etkitilmiştir. Yapılan simülsyon çalışmaları ile bu kontrolörün uygulanabilir olduğu, pasif sistemlere göre daha etikili olduğu belirtilmiştir.

Çetin vd. [6] çalışmalarında 6 serbestlik dereceli bir yapısal sistem için MR damper kullanarak dayanıklı H_∞ kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. MR damper zemin kat ile birinci kat arasında yerleştirilmiştir. Oluşturulan sistemin performansı, laboratuvar ortamında tek boyutlu sarsma masası üzerinde test edilerek incelenmiştir. Yarı aktif H_∞ kontrolörün, bozucu deprem etkisinde yapının titreşimlerini sönümlediği gösterilmiştir.

Thenozhi ve Yu [7], lineer ve lineer olmayan yapılarda aktif titreşim kontrolülün kararlılık analizini gerçekleştirmişlerdir. PD/PID kontrolörlerin kullanıldığı bu çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan yapısal rijitlikler dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

Lyapunov teorisi ile yeterli kararlılık koşulları elde edilerek kontrol kazanç değerleri belirlenmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar, sarsma masasına bağlı iki katlı prototip bir yapı üzerine uygulanmıştır. Seçilen kontrol kazançlarının optimal olmadığı halde kararlılığı sağladığı belirtilmiştir.

Aldemir yaptığı çalışmada [8], yarı aktif ayarlı kütle damperli yapısal bir sistemin deprem etkisi sonucu oluşan titreşimlerinin aktif kontrolü için yeni bir en iyi kontrolör dizaynı gerçekleştirmiştir. Önerilen dizaynın performansı yapılan nümerik simülasyon çalışmalarıyla belirtmiştir.

Deprem, rüzgar vb. farklı bozucu girişler etkisindeki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında, son dönemlerde kontrol mühendisliği alanında meydana gelen gelişmelerle beraber önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bozucu sismik hareketlere maruz kalan yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında, sönüm performansı üzerindeki en önemli etkenin uygulanan kontrol algoritması olduğu iyi bilinmektedir. Bu alanda kullanılacak kontrol algoritmasından, pratikte uygulanabilir, dayanıklı, ayar parametresine ihtiyaç duymayan, en düşük kontrol kuvvetiyle istenilen en iyi performansı göstermesi istenir. Bu zamana kadar birçok araştırmacı bu alanda yaptıkları kontrolör dizaynı ve pratik uygulamalarla problemin çözümüne önemli katkılar sağlamışlardır [9], [10], [11], [12], [13], [14].

Geri-beslemeli kontrol sistemlerinin temel amaçlarından biri sisteme etki eden bozucuların bastırılmasıdır. Bozucuların en iyi şekilde bastırılması, çeşitli performans kriterlerinden biri seçilerek yapılır. Bu kriterlerin en önemlilerinden biri, kontrol edilen çıkışlar ile bozucular arasındaki transfer fonksiyonu matrisinin H_∞ normudur. H_∞ optimizasyon kontrol probleminin çözümüne ait ilk çalışmalar, Francis [15] ve Doyle vd. [16] tarafından yapılmıştır. Bu ilk çalışmalarda, H_∞ optimizasyon problemi, Riccati denklemleri ile sistemin durum-uzay modeli oluşturularak çözülmüştür. Daha sonra, ilk defa basitçe Lyapunov'un kararlılık analizinde (1890) gösterilen ve günümüzde kontrol alanında çok sık kullanılan doğrusal matris eşitsizlikleri yaklaşımı ile H_∞ kontrol probleminin çözümü hakkında bir yaklaşım geliştirilmiştir [17].

Dayanıklı kararlılık ve dayanıklı kontrol çalışmalarında, Lyapunov fonksiyonu esaslı tasarım sıkça kullanılmaktadır. Gahinet ve Apkarian [18], Chilali ve Gahinet [19]

çalışmalarında; H_∞ optimizasyon kontrolü, H_2 optimizasyon kontrolü gibi birçok kontrol probleminin doğrusal matris eşitsizlikleri yaklaşımı ile çözülebileceğini göstermişlerdir.

Boyd vd. [20] kitaplarında, kontrol problemlerinde DME yaklaşımının kullanımını incelemiştir. Bu yöntemin sistem teorisi ve kontrol problemlerinin çözümüne getirdiği yeni öneriler ve basit yaklaşımlar ele alınmıştır.

Löfberg [21], MATLAB paket programında doğrusal matris eşitsizliklerinin çözümünün gerçekleştirilebilmesi için yeni bir ayrıştırıcı yazılımı geliştirmiştir. DME'lerinin çözümünde kullanılan YALMIP yazılımı, son yıllarda yapılan pek çok çalışmada sıkça kullanılmaktadır.

Strum [22], MATLAB paket programı ile uyumlu çalışacak şekilde hazırlanmış, doğrusal, karesel ve yarı tanımlılık kısıtlarına sahip optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılacak yeni bir çözücü yazılımı geliştirmiştir. Geniş bir skaladaki optimizasyon problemleri, ayrıklaştırma yönteminden yararlanılarak SEDUMI ile etkin bir şekilde çözülebilmektedir. Bununla beraber, SEDUMI çözücüsünün DME'lerinin MATLAB paket programı içerisinde uygun formda yazılmalarına imkan veren YALMIP ayrıştırıcısı ile de uyumlu çalışmaktadır. Makalede, SEDUMI çözücüsünün nasıl kullanılacağı verilen örneklerle açıklanmıştır.

Gawronski [23] kitabında, yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için LQR, LQG, H2 ve H_∞ kontrolör dizaynları üzerine çalışmalarını açıklamıştır. H_2 ve H_∞ kontrol problemleri Riccati denklemlerinden faydalanılarak çözülmüştür. Modellenen yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için dizayn edilen kontrolörlerin sönüm performansları yapılan nümerik simülasyon çalışmalarıyla ifade edilmiştir.

Yağız [24], bozucu deprem etkileri altındaki aktif ayarlı kütle damperli çok serbestlik dereceli yapısal bir sistemin titreşimlerinin azaltılması için kayan kipli kontrolör dizaynı yapmıştır. Önerilen kontrolörün elde ettiği üstün sönüm performansı zaman ve frekans bazında yapılan simülasyon çalışmalarıyla açıklanmıştır.

Güçlü çalışmasında [25], beş serbestlik dereceli gerçek bir yapı modeline, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin bozucu sismik hareketleri etkiterek oluşan yapısal titreşimlerin azaltılması için Bulanık ve PD kontrolör tasarımı gerçekleştirmiştir. Yapılan

simülasyon çalışmalarının sonucunda Bulanık Kontrol'ün kat yerdeğiştirme ve ivmelerinin zaman ve frekans alanındaki cevaplarının PD kontrolöre göre çok daha iyi cevaplar verdiği gözlenmiştir.

Sistemin bozucu girişlerine karşı, bozuculardan çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu en küçük yapma fikriyle 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 sebeple son dönemlerde birçok aktif kontrol uygulamasında, H_∞ kontrolörler sıkça kullanılmaktadır.

Fujinami vd. [26], Japonya Tokyo'da 23 katlı gerçek bir binada bozucu rüzgar ve deprem hareketlerinin etkisiyle meydana gelen eğilme ve burulma titreşimlerinin aktif kontrolü için aktif hibrit kütle damperi kullanmışlardır. Aktif hibrit kütle damperinin sürülmesinde kontrol algoritması olarak H_∞ kontrol yöntemi uygulanmıştır. Yapılan çalışmayla titreşim genliklerinin azaltılmasında önemli bir başarı kazanılmıştır.

Yazıcı vd. [27], 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 dizaynı gerçekleştirmişlerdir. Önerilen kontrolör ile, yapısal titreşimlerin azaltılmasında yüksek sönüm performansı elde edilmiştir.

Yazıcı ve Güçlü [28], dört katlı yapısal bir sistemin titreşimlerinin deprem etkisi altındaki aktif kontrolü için DME tabanlı durum geri-beslemeli karma H_2/H_∞ kontrolör dizaynı yapmışlardır. 1995 Kobe ve 1999 Kocaeli depremi modellenen yapıda bozucu giriş olarak uygulanmıştır. Simülasyon çalışmaları ile, önerilen kontrolörün hem zaman hem de frekans cevaplarında son derece başarılı sonuçlar verdiği ve yüksek sönüm performansının sağladığı gösterilmektedir.

Literatürde düzensiz binalar olarak da tanımlanan asimetrik yapılar, Kütle Merkezi (KM) ve Rijitlik Merkezi (RM) nin çakışık olmaması sebebiyle bozucu sismik hareketlere maruz kaldığında sistemde burulma titreşimleri gözlenir. Ueng ve Lin [29] yaptıkları çalışma ile burulma titreşimlerinin oluştuğu çok katlı asimetrik bir binanın bozucu titreşim hareketi altında ulaşılan yer değişim cevapları ile sistemin frekansını ve sönüm

oranlarını elde etmişlerdir. Goel [30] asimetrik planlı sistemlerde yapıya ilave edilen viskoz sönümleyicilerin sismik davranışlarını incelemiştir. Viskoz sönümleyicilerin tıpkı simetrik yapılarda olduğu gibi asimetrik sistemlerde de deformasyonları azalttığını açıklamıştır. Daha sonra benzer çalışmayı doğrusal akışı olmayan viskoz damperler için yapmıştır [31].

Mevada ve Jangid [32], tek katlı ve bir yönde asimetrik yapısal bir sistemin pasif ve yarı-aktif damperler ile sismik cevaplarını incelemişlerdir. Sistemin hareket denklemleri durum-uzay metodu ile elde edilmiştir. Pasif damper ile anahtarlamalı ve yeniden ayarlamalı yarı-aktif damperlerin kullanıldığı bu çalışmada, asimetrik binalar için burulma, yanal ve kenar yerdeğiştirmelerinin, damper rijitliğinin kat rijitlik değerine olan oranı ile ters orantılı olduğu belirtilmiştir. Yeniden ayarlamalı yarı-aktif damperlerin diğerleri ile karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği anlatılmıştır.

Yoshima [33], [34] çalışmalarında iki katlı asimetrik bir binanın akıllı MR damperler ile hem nümerik hem de laboratuar ortamında yarı aktif titreşim kontrolünü gerçekleştirmiştir. MR damperlerin kullanılmasıyla iki katlı bu yapının bütün sistem cevaplarındaki iyileşme görüldükten sonra tam ölçekli nümerik iki model üzerindeki etkileri araştırılmıştır. İlk olarak perde duvarların yerleşiminden kaynalanan asimetrik karaktere sahip ve izdüşümü dikdörtgen olan dokuz katlı bir bina modellenmiştir. Daha sonra içeri hizada inşa edilmiş olması sebebiyle ilave düşey düzensizlik içeren L-yapıdaki asimetrik sekiz katlı bir bina incelenmiştir. 1940 El Centro ve 1995 Kobe depremlerinin bozucu giriş olarak kullanıldığı bu çalışmada Yoshima H_2/LQR nominal kontrol tasarımını kullanmıştır. MR damperlerin ilave edildiği bu yarı aktif titreşim kontrolörü ile aktif kontrol sistemlerininkine benzer sonuçlar verdiği ileri sürülmüştür. Ayrıca pasif kontrol sistemleri ile karşılaştırıldığında da önerilen yarı aktif kontrolcünün ivme cevaplarında önemli sönüm performansına sahip olduğu gösterilmiştir.

Date ve Jangid [35], tek katlı asimetrik bir yapı için aktif kontrol sistemlerinin etkilerini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Kontrol kuvveti klasik doğrusal optimal kontrol algoritması ile elde edilmiştir. Sistemin kontolcülü ve kontrolcüsüz cevapları ile kontrol kuvvetinin hem asimetrik hem de simetrik yapıdaki etkileri karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlarla kontrol algoritmasının asimetrik yapıdaki bozucu etklileri azalttığı ve

burulma titreşimlerinin ihmal edildiği yapılarda kontrol kuvvetlerinin daha düşük kabul edilmesi gerektiği ileri sürülmüştür.

Lin [36], binanın bulunduğu zeminin yapısının asimetrik yapıların aktif titreşim kontrolü üzerine olan etkilerini araştırmış ve çalışmasında H_∞ çıkış-geri beslemeli kontrolcü kullanmıştır. Aktif tendon sistemi kullanılarak tek katlı asimetrik yapının yanal ve burulma titreşimlerinin sönümlendiği gösterilmiştir. Bu çalışmada zaman gecikmesi problemi incelenmemiştir.

Niğdeli ve Boduroğlu [37], deprem yer hareketleri altında burulmaya maruz kalan düzensiz binaların titreşim kontrolünü aktif tendon sistemiyle gerçekleştirmişlerdir. PID kontrolcünün kullanıldığı bu çalışmada, kontrol girişindeki yirmi milisaniyelik bir zaman gecikmesi dikkate alınmıştır. Yapının frekans değişimleri incelenerek uygulanan aktif kontrol sisteminin dayanıklılığı gösterilmiştir. Kararlılık probleminin ±25% frekans değeri değişikliğinde görülmediği gösterilmiştir. Tasarladıkları sistemin performansını inceleyen Niğdeli ve Boduroğlu farklı kontrol kuvveti limitlerinde testler gerçekleştirerek gerekli maksimum kontrol kuvveti değerinin yarısı kadarı kullanıldığı durumda sönüm performansında önemli değişiklikler gözlenmediğini vurgulamışlardır.

Sever vd. yaptıkları çalışmada [38], doyumlu eyleyicilere sahip asimetrik yapıdaki bir sistemin titreşimlerinin DME tabanlı H_∞ durum geri-beslemeli kontrolör ile azaltılması problemini incelemişlerdir. Matematiksel model olarak iki yönde yanal ve tek yönde burulma titreşimine maruz asimetrik yapısal sistem kullanılmıştır. Tasarlanan kontrolörün titreşimleri azaltmadaki etkinliği frekans bölgesi tepe değerlerindeki azalmayla gösterilmiştir. Bu çalışmada zaman gecikmesi problemi incelenmemiştir.

Kontrolör dizaynlarının gerçekteki uygulamalarındaki en önemli problemlerin başında, sistemlerin durumlarında ve kontrol sinyali girişinde oluşan zaman gecikmesi hadiseleri gelmektedir. Bilindiği üzere, fiziksel ve dinamik sistemlerde kaçınılması mümkün olmayan zaman gecikmeleri oluşmaktadır. Havacılık, uzay, mekanik ve kimyasal prosesler gibi pek çok mühendislik alanında zaman gecikmelerinin sistem üzerinde bıraktıkları olumsuz etkiler bilinmektedir. Zaman gecikmelerinin meydana gelmesi sistemlerde performans kaybına ve kararsız davranışlara yol açabilmektedir. Burdan yola çıkılarak, bu sistemlerin kararlılığı ve kontrolü hakkında günümüze kadar pek çok

araştırma yapılmıştır. [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47] yayınları, zaman gecikmeli sistemler hakkında ilk çalışmalara örnek verilebilir.

Yapısal sistemlerde kararlılık ve performans problemine sebep olan kontrol giriş gecikmesinin çözümüne yönelik yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Mahmoud [48] kitabında, DME yaklaşımıyla doğrusal zaman gecikmeli belirsizlik içeren sistemlerin kararlılık, dayanıklı kararlılık, dayanıklı kararlı kılma problemlerini incelemiştir. Daha sonra, aynı kontrol problemleri için DME tabanlı durum ve çıkış geri-beslemeli gecikmeye-bağlı ve gecikmeden bağımsız H_∞ kontrolör dizaynları yapılmıştır. Sürekli zamanlı sistemler için yapılan tasarımlar, kesikli zamanlı sistemler içinde yapılmıştır. Tasarlanan denetleyicilerin performansları nümerik simülasyon çalışmalarıyla gösterilmiştir.

Yue ve Han [49], kontrol giriş gecikmeli belirsizlik içeren sistemler için gecikmeye-bağlı dayanıklı kontrolör dizaynı gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, konik tamamlayıcı doğrusallaştırma metodu ve hafızalı geri-besleme tipli yeni bir dizayn yöntemi önerilmiştir. Buna karşın, önerilen hafızalı geri-beslemeli kontrol metodu kesin gecikme bilgilerinin kullanılmasına gerek duyan bir dizayn tipidir. Bu da gerçekleştirilebilirlik yönünden pek çok fiziksel sistem için mümkün olmayan bir olaydır.

Küçükdemiral [50], durum gecikmeli doğrusal parametre değişimli sistemler için gecikmeye-bağlı garanti edilmiş bedel fonksiyonu ile kazanç ayarlamalı yeni bir kontrolör dizaynı gerçekleştirmiştir. Geliştirilen dizaynın etkinliğinin belirtilmesi maksadıyla, üç farklı nümerik problem üzerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Wang vd. [51], zamanla değişen kontrol girişi gecikmeli belirsizlik içeren sistemler için daha az tutucu dayanıklı kontrolör dizaynı gerçekleştirmişlerdir.

Parlakçı ve Küçükdemiral [52], zamanla değişen durum ve girişi gecikmeli, belirsizlik içeren, enerjisi sınırlı bozucu etkiler altındaki sistemler için yeni bir dayanıklı H_∞ kontrolör dizaynı gerçekleştirmişlerdir. Dizaynda kullanılan genişletilmiş formdaki Lyapunov-Krasovskii fonksiyoneli, serbest gevşetme matrisleri, Jensen integral eşitsizlikleri ve tam kareye tamamlama metodları ile daha az tutucu bir kontrolör yapısı

elde edilmiştir. Önerilen konik tamamlayıcı algoritmasıyla, erişilebilir en üst zaman gecikmesi değerleri ve en düşük bozucu bastırma seviyesini eş zamanlı olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonunda, dizayn edilen kontrolörün etkinliği yapılan simülasyon çalışmalarıyla belirtilmiştir.

Agrawal ve Yang [53], yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında kontrol girişindeki zaman gecikmesi problemini incelemişlerdir. Kontrol giriş gecikmesi ilavesiyle beraber aktif titreşim kontrolü, iki ve üç katlı yapısal sistemler için gerçekleştirilmiştir. Belli bir zaman gecikmesi değerinin aşılması anında, sistemde kararlılık ve performans probleminin oluştuğu yapılan simülasyonlarla gösterilmiştir. Agrawal ve Yang [54], [53]'deki benzer çalışmayı bu sefer çok serbestlik dereceli yapısal bir sistemin üzerinde incelemişlerdir.

Chai vd. [55], El-Centro ve Tianjin depremlerinin bozucu girişler olarak kullanıldığı üç ve altı katlı yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü için bir en-iyi kontrolör dizaynı gerçekleştirmişlerdir. Gecikmeye-bağlı ve gecikmeden bağımsız olarak tasarlanan kontrolörlerin titreşim azaltma performansları, nümerik simülasyon çalışmalarıyla gösterilmiştir. Çalışmada, yeterli kararlılık kısıtlarında belirlenen kontrol giriş gecikmesinin üst sınırının aşılması durumunda, kapalı-çevrim sistemin kararlılığını kaybetmesi, zaman cevaplarıyla ortaya konulmuştur. Simülasyon çalışmalarında kullanılan yapısal sistemlerin parametrelerinin gerçek yapı parametreleri olmaması gerçekte ne kadarlık bir kontrol kuvvetinin üreteceği hakkında belirsizlik içermektedir.

Du ve Zhang [56], çok serbestlik dereceli yapısal sistemlerin titreşimlerinin azaltılması için yeni bir gecikmeye-bağlı H_∞ kontrolör önermişlerdir. Gerekli kararlılık sınırlarında kontrol kuvveti ve kontrol giriş gecikmesinin üst sınırı, genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon yöntemiyle aynı anda hesaplanmıştır. Kararlılık sınırlarındaki kontrol giriş gecikmesi zamanının üst sınırının aşılması durumunda, kapalı-çevrim sistemin kararsızlığa gittiği zaman cevaplarıyla ifade edilmiştir. Önerilen gecikmeye-bağlı H_∞ kontrolörün kontrol algoritması olarak kullanılmasıyla, kararlılık probleminin çözülebileceği yapılan simülasyon çalışmalarıyla tespit edilmiştir.

Yazıcı doktora tezinde [57], yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında etkin bir şekilde kullanılabilecek eyleyici gecikmesi, eyleyici doyumu ve

parametre belirsizliği problemlerinin aynı anda sistemin dinamiğine dahil edildiği, yeni bir kontrol algoritması sunmuştur. Gecikmeye-bağlı yeterli kararlılık koşulları H_∞ sentezini kararlı kılmak amacıyla matris eşitsizlikleri yaklaşımıyla uygun Lyapunov-Krasovskii aday fonksiyonellerinin seçimi ile oluşturulmuştur. Daha sonra problem genişletilerek eyleyici doyumu problemi sistemin dinamiğine dahil edilmiştir. Son olarak, probleme parametre belirsizliği, zamanla değişen normu sınırlı parametre belirsizliği yapısında dahil edilerek dayanıklı kontrolör dizaynı gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma alanında bir ilk olmakla beraber dizayn edilen kontrolörün üstünlüğü yapılan simülasyon çalışmaları kanıtlanmıştır. Simülasyon çalışmalarına dört katlı bir yapısal sistem modellenmiş, bozucu girişler olarak çeşitli deprem dataları kullanılmıştır. Zaman ve frekans alanında yapılan analizler, deprem etkisindeki yapısal titreşimlerin azaltılmasında önerilen kontrolörün yüksek sönüm performansı gösterdiğini ve kontrol sisteminin maksimum gecikme zamanı sınırlarındaki kararlılığının garanti altında olduğunu göstermiştir.

Yapılan literatür araştırmasından da görüleceği üzere, son zamanlarda bozucu sismik etkilere maruz kalan yapısal sitemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında zaman gecikmesinin, sistem dinamiği üzerindeki etkileri başlıca araştırma konusu haline gelmiştir. Buna karşın, zaman gecikmesi probleminin asimetrik yapısal sistemlerin aktif titreşim kontrolündeki etkilerini inceleyen herhangi bir çalışamaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu yüksek lisans tezi ile tasarımı gerçekleştirilen DME tabanlı gecikmeye-bağlı optimal kontrolörün, asimetrik yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü uygulamalarında etkin bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Ülkemizin deprem kuşağında bulunması ve son yıllarda yaşanan büyük depremler sonrasında, yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü üzerine yapılan çalışmalar gün geçtikçe yenilenmektedir. Özellikle kontrol mühendisliği alanında yapılan bu çalışmalar, son zamanlarda oluşan hızlı teknolojik gelişmelerle beraber birçok yapısal problemi çözmektedir. Buna rağmen teoride çözülmeyi bekleyen birçok problem mevcuttur. Bozucu etkisindeki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü

uygulamalarında, asimetrik yapıların varlığı ve kontrol kuvvetinin yapıya iletimi sırasında oluşan kaçınılmaz zaman gecikmelerinin de hesaba katılması gerekmektedir.

Kütle Merkezi ve Rijitlik Merkezi çakışık olmayan asimetrik yapılarda, bozucu zemin hareketleri sadece yanal yönlerde değil ilave olarak burulma titreşimlerine de neden olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan asimetrik bina bu etkenlere göre modellenmiştir.

Kontrol sisteminin performansı ve kararlılığına kötü etki eden zaman gecikmesi probleminde rol oynayan başlıca etkenler;

a) Kontrol edilecek olan sistemin değişik yerlerine yerleştirilen sensörlerden çevrim-içi veri akışında geçen süre,

b) Sensörlerden gelen verilerin filtrelenmesi ve işlenmesi, gerekli kontrol kuvvetinin hesaplanması ve bu bilginin iletilmesi esnasında geçen süre,

c) Gerekli kontrol kuvvetinin üretilmesi ve yapıya etki etmesi sırasında geçen süre olarak özetlenebilir.

Sismik etkiler altındaki yapıların titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında, kontrol girişinde meydana gelen zaman gecikmesini dengeleyecek bazı yöntemler öne sürülmüştür. Bu çalışmalarda ilk önce zaman gecikmesi yokmuş gibi sistem tasarlanır ve daha sonra geri-besleme kazancı gecikmeyi karşılayacak şekilde ayarlanır. Fakat bu yöntemler gecikmenin çok küçük değerlerde olduğu durumlarda başarılı olabilmektedir. Büyük zaman gecikmelerinin oluşması halinde bu yöntemler sistemin kararlılığını ve performansını garanti edemez.

Bu yüksek lisans tezi ile aktif kontrol çalışmalarında kontrol girişindeki gecikmenin asimetrik bir yapısal sistem üzerindeki etkileri araştırılarak, gecikmeye-bağlı optimal kontrolörler ile problemin çözümü gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Gecikmeye-bağlı kontrolörün yeterli kararlılık kısıtları Lyapunov-Krasovski fonksiyoneli yaklaşımı ile doğrusal olmayan matris eşitsizliği formunda elde edilmiştir. DOME'lerin çözümü için, bu dışbükey olmayan fizibilite problemi yerine, DME içeren konik tamamlayıcı problemi biçiminde doğrusal olmayan bir minimizasyon problemi önerilmiştir. Bunun başlıca sebebi, tasarımda yer alan doğrusal olmayan matris formundaki terimlerden dolayı problemin çözümünün dışbükey optimizasyon problemi çözümünde kullanılan

yöntemlerle bulunamıyor olmasıdır. Bu sebeple literatürde bu tip problemlerin çözümünde kullanılan doğrusallaştırma yöntemlerinden faydalanılması gerekir. Yüksek lisans tezinde kullanılan konik tamamlayıcı doğrusallaştırma algoritmasının diğer algoritmalara göre daha az tutucu sonuçlar verdiği literatürde yapılan nümerik çalışmalarla ortaya konulmuştur (El Ghaoui vd. [58], Moon vd. [59]). Yüksek lisans tezinde önerilen bu doğrusallaştırma yöntemiyle doğrusal olmayan matris eşitsizliği problemi çözülerek istenilen gecikme zamanının üst sınırı, minimum bozucu bastırma seviyesi ile eş zamanlı olarak bulunmuştur.

Bu tezin temel amacı, kontrol girişindeki gecikmeye bağlı durum geri beslemeli optimal kontrolör ile asimetrik bir yapının kapalı-çevrim sistemini kararlı kılmak ve sistemin tolere edebileceği gecikme zamanının erişilebilir en üst sınırını minimum bozucu bastırma seviyesi ile eş zamanlı olarak belirlemektir.

1.3 Hipotez

Aktif titreşim kontrolü çalışmalarında bu zamana kadar modellenen yapılar genellikle kütle merkezi ve rijitlik merkezinin çakışık olduğu sistemlerdir. Bina tasarımlarında KM ve RM'nin aynı noktada düşünülse de yapının inşası aşamasında yapılan hatalar ve/veya sonradan eklenen büyük kütleler sistemlerin asimetrik karaktere dönüşmesine neden olabilmektedir.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, asimetrik yapısal sistemlerin aktif kontrolü çalışmalarında kontrol girişindeki gecikme probleminin matematiksel olarak sistemin dinamiğine dahil edildiği bir kontrolör tasarımına rastlanmamıştır.

Yapılan bu çalışma ile ilk olarak asimetrik bir yapı üzerindeki gecikme etkisi incelenmiştir. Sonrasında tasarlanan gecikmeye-bağlı optimal kontrolör ile bu problemin çözümüne katkı sunulmuştur. Çalışmada kullanılan konik tamamlayıcı algoritması ile kapalı-çevrim sistemin yeterli kararlılık şartlarında erişilebilir en yüksek zaman gecikmesi sınırı belirlenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmaları ile önerilen kontrolörün kapalı çevrim sisteminin asimptotik kararlılığını garanti ettiği ve titreşim genliklerini azaltmada başarılı olduğu gösterilmiştir.

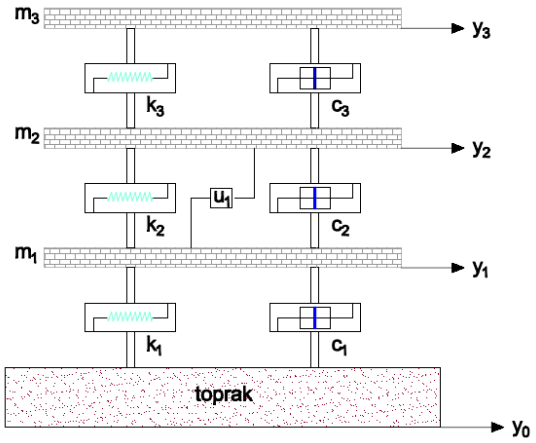
BÖLÜM 2

DEPREM ETKİSİNDEKİ YAPISAL SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

Bu bölümde ilk olarak tek yönde hareketli bina modeli yapısından ve bu modelin yetersizliğinden bahsedilmiş daha sonra yüksek lisans çalışmasında kullanılacak olan çok serbestlik dereceli asimetrik yapısal bir sistem modellenerek hareket denklemleri elde edilmiştir.

2.1 Tek Yönde Hareketli Yapısal Sistemler

Yapısal sistemlerde depremlerin yıkıcı etkileri yatay titreşimlerin bir sonucu olarak ortaya çıktığından, yapılan çalışmaların genelinde bina modeli oluşturulurken serbestlik derecesi sadece bu yönde hesaba katılmaktadır. Kayma bina modeli olarak isimlendirilen bu modelde, tüm yay ve sönüm elemanlarının yatay yönde hareket ettiği kabul edilir.



Şekil 2. 1 Üç Katlı Kayma Bina Modeli

Şekil 2.1'de kayma bina modeline örnek verilebilecek üç katlı yapısal bir sistem gösterilmiştir. Burada, herbir katın kütlesi sırasıyla m_1, m_2 ve m_3'tür. y_1, y_2 ve y_3 ilgili katlara ait yatay yer değiştirmelerdir. c_1, c_2 ve c_3 ilgili katlara ait sönüm değerleri, k_1, k_2 ve k_3 ise rijitlik değerleridir. Binanın sadece y yönünde hareket ettiği kabulü yapılmıştır ve y_0 zemin kaynaklı yerdeğiştirmedir.

Binaların yapım aşamasındaki hatalar, ilave büyük kütleler, sonradan yapılan güçlendirme çalışmaları yapıların simetrik özelliğini kaybetmesine yol açmakta ve deprem sırasında yanal titreşimlere ilave olarak burulma titreşimlerine de neden olmaktadır. Tek yönde hareket ettiği kabulü yapılan bina modelinin bu anlamda yetersiz olduğu, yaşanan depremler sonrasında meydana gelen hasarlar incelendiğinde anlaşılmaktadır.

2.2 Asimetrik Yapısal Sistemler

Yakın zamanda Türkiye'de meydana gelen yıkıcı depremlere örnek olarak 1999 Kocaeli ve Düzce depremleri verilebilir. Bu depremlerin etkisinde birçok bina hasar görmüş ve hatta yıkılmıştır. Bu tez çalışmasında incelenen asimetrik yapısal sistemlerin gerçek bir deprem sonrasında nasıl etkilere maruz kaldığının en iyi örneklerinden biri Şekil 2.2'de gösterilen Düzce'de bulunan bir binadır. 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında bu yapı kısmen zarar görmüş ve bina sahibi deprem sonrasında yapının onarılmasına karar vermiştir. Ancak, mali sorunlar sebebiyle yapının sadece Banka'nın bulunduğu köşesindeki kolonları mantolanmıştır. Sonuç olarak, güçlendirilen köşe binanın diğer kısımlarına göre daha katı hale gelmiştir. Fakat, yapının güçlendirilmesinden iki ay sonra 12 Kasım 1999 Düzce depremi meydana gelmiştir. Şekil 2.2'de görüleceği üzere binanın sadece bir kısmının güçlendirilmesi sebebiyle oluşan burulma düzensizliği, yapının esnek kısımlarının Bankanın bulunduğu köşeden çok daha fazla yer değiştirmesine neden olmuştur. Sonuç itibariyle yapı ciddi bir şekilde zarar görmüştür [60].

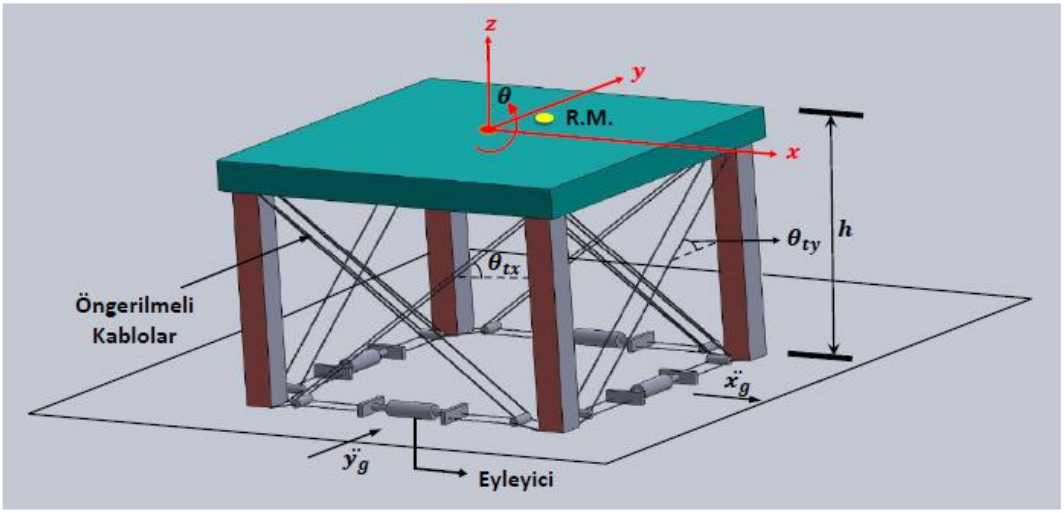


Şekil 2. 2 Düzce depreminde burulma titreşimine maruz kalmış hasarlı bir bina

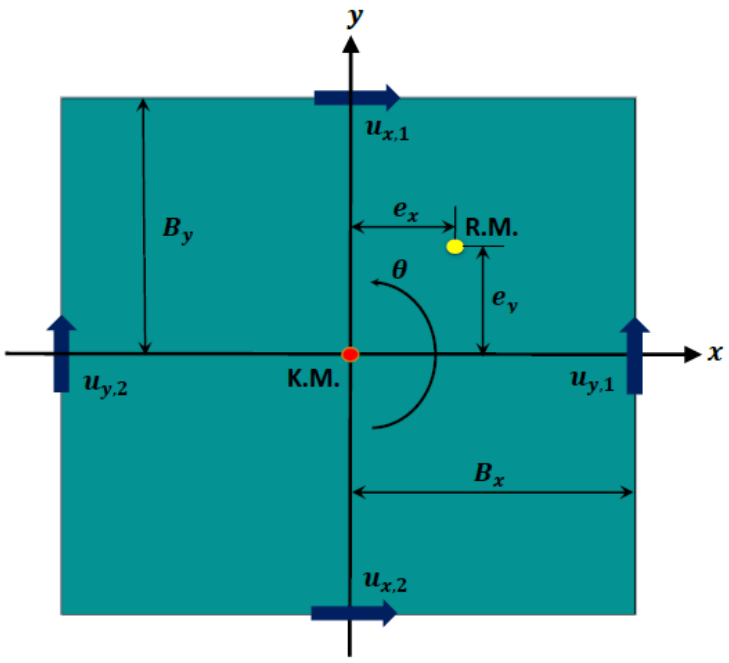
2.2.1 Asimetrik Yapısal Sistemin Matematiksel Modeli

Kütle ve rijitlik merkezinin aynı nokta üzerinde olduğu simetrik yapılarda doğrusal yönde oluşan bozucu sismik hareketler, sistemde sadece yanal titreşimlere neden olur. Asimetrik sistemlerde ise aynı zamanda burulma titreşimlerine sebebiyet vermektedir. Bu sistemlerde dikkat edilmesi gerek nokta titreşim frekansları arasındaki orandır. Eğer asimetrik bir binada meydana gelen burulma titreşimlerinin doğal frekans değeri, yanal titreşimlerin doğal frekansın değerinden daha düşük ise bu bina dönel esnek olma özelliği göstermektedir. Dönel esnek olma özelliğine sahip bir yapısal sistemde aktif titreşim kontrolü uygulanacak ise bu sistem burulma titreşimleri dikkate alınarak modellenmelidir [38].

Yüksek lisans tezinde incelenecek olan asimetrik yapısal sistemin matematiksel modeli bu bölümde anlatılmıştır. Yapı çift yönlü eksantrikliğe sahip, aktif tendon sistemli tek katlı bir bina modelidir. İki eksende yanal titreşimlere ve tek eksende burulma titreşimine izin veren bu model üç serbestlik derecelidir.



Şekil 2. 3 Asimetrik yapısal sistemin fiziksel modeli



Şekil 2. 4 Asimetrik yapısal sistemin üst görünüşü

Sistemin hareket denklemlerinin oluşturulabilmesi için Şekil 2.4'deki yapı dikkatle irdelenmelidir. Rijitlik merkezinin kütle merkezine olan eksantriklik mesafeleri x ve y yönlerinde sırasıyla e_x ve e_y'dir. KM ve RM arasındaki mesafe ise r'dir.

Aktif kontrol sistemlerinde dış güç kaynağı tarafından kontrol edilen eyleyiciler binaya kuvvet uygular. Bu kuvvet binaya enerji eklemek veya enerjisini sönümlemek için kullanılabilir. Aktif geri beslemeli kontrol sistemlerinde, fiziksel sensörler ile ölçülen

sistemin tepkisinin fonksiyonu, sinyal olarak kontrol eyleyicilerine gönderilir. Bu sistemler iç ve dış etkiden gelen tepkileri kontrol edebilir.

Aktif tendon kontrolü dört öngerilmeli kablo, iki eyleyici ve kontrol elemanından meydana gelir. Bu kabloların ikisi çapraz olarak eyleyiciye bağlı şekilde binanın bir yüzünde bulunurken, diğer ikisi ise diğer yüzde bulunur. Eyleyiciler tarafından verilen deplasmanla, kablolardaki gerilme kuvvetlerinin değişmesi sağlanır ve bu kuvvet değişimlerinin yatay bileşenlerinin katlara etkisi ile sistemin serbestliklerinin kontrolü sağlanmış olur. Binanın iki yatay yönde de kontrol edilmesi isteniyor ise, kat başına sekiz kablo ve dört eyleyiciye ihtiyaç vardır.

Yapıdaki titreşimlerin azaltılması için gerekli olan kuvvetleri aktif tendon sistemi sağlamaktadır. Yapının herbir kenarında bulunan bu tendonların yer değişimleri sırasıyla $u_{x,1}, u_{x,2}, u_{y,1}, u_{y,2}$ olarak tanımlanmıştır. k_c tendonlara ait yay sabitini, θ_{tx} ve θ_{ty} açıları ise tendonların konstrüksüyon üzerindeki yerlerini belirtmektedir. Sistemin herbir moduna ait doğal frekansları ω_x, ω_y ve ω_θ 'dır. Sistemin kütlesi m, tendonlar ile KM arasındaki x ve y yönündeki mesafeler ise sırasıyla B_x ve B_y'dir. k_x, k_y ve k_θ sırasıyla x, y ve θ yönlerindeki kat rijitlik değerleridir.

AYS'nin hareket denklemleri aşağıdaki gibi oluşturulur,

$$m\left[\ddot{x}(t)+\ddot{x}_g(t)\right]+k_x\left[x(t)-e_y\theta(t)\right]=u_{x,1}(t)+u_{x,2}(t) \tag{2.1}$$

$$m\left[\ddot{y}(t)+\ddot{y}_g(t)\right]+k_y\left[y(t)+e_x\theta(t)\right]=u_{y,1}(t)+u_{y,2}(t) \tag{2.2}$$

$$J\ddot{\theta}(t)+k_\theta\theta(t)-k_x e_y\left[x(t)-e_y\theta(t)\right]+k_y e_x\left[y(t)+e_x\theta(t)\right]=-B_y\left[u_{x,1}(t)-u_{x,2}(t)\right]$$
$$+B_x\left[u_{y,1}(t)-u_{y,2}(t)\right] \tag{2.3}$$

Daha sonra bu denklemler aşağıdaki matris formunda ifade edilebilir,

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=B_2u(t)+B_1w(t) \tag{2.4}$$

Burada, x, u, ve w vektörleri sırasıyla,

$$x = \begin{bmatrix} x \\ y \\ r\theta \end{bmatrix}, \tag{2.5}$$

$$u = \begin{bmatrix} u_{x,1} \\ u_{x,2} \\ u_{y,1} \\ u_{y,2} \end{bmatrix}, \tag{2.6}$$

$$w = \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \ddot{y}_g \end{bmatrix}, \tag{2.7}$$

şeklindedir. Genelleştirilmiş koordinatları belirten x vektörünün üçüncü elemanı olan $r\theta$, geri beslemeli kontrol için θ'ya göre daha kolay ölçülebilmektedir. Bu sebeple θ yerine $r\theta$ kullanılmıştır.

(2.4) denklemindeki kütle, yay, kontrol girişi ve bozucu etki katsayı matrisleri sırasıyla,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2.8}$$

$$K = \begin{bmatrix} \omega_x^2 & 0 & -\omega_x^2\lambda_{ey} \\ 0 & \omega_y^2 & \omega_y^2\lambda_{ex} \\ -\omega_x^2\lambda_{ey} & \omega_y^2\lambda_{ex} & \omega_\theta^2 + \omega_x^2\lambda_{ey}^2 + \omega_y^2\lambda_{ex}^2 \end{bmatrix}, \tag{2.10}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} \frac{4k_c\cos\theta_{tx}}{m} & \frac{4k_c\cos\theta_{tx}}{m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4k_c\cos\theta_{ty}}{m} & \frac{4k_c\cos\theta_{ty}}{m} \\ -\lambda_{By}\frac{4k_c\cos\theta_{tx}}{m} & \lambda_{By}\frac{4k_c\cos\theta_{tx}}{m} & \lambda_{Bx}\frac{4k_c\cos\theta_{ty}}{m} & -\lambda_{Bx}\frac{4k_c\cos\theta_{ty}}{m} \end{bmatrix}, \tag{2.11}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

olarak belirlenmiştir. Burada, θ_{tx} ve θ_{ty} sırasıyla tendonun rijitliğini ve eğim açılarını belirtmektedir.

Görüldüğü üzere hareket denklemleri sönüm matrisi olmadan tanımlanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen her moda ait sönüm oranları ile sistemin kütle ve yay katsayısı matrisleri kullanılarak sönüm matrisi,

$$C = a_0 M + a_1 K \tag{2.13}$$

denklemiyle hesaplanmaktadır. Bu tarz bir yaklaşıma gidilmesinin sebebi sönüm matrisinin değerlerinin yapısal ölçülerden ya da malzeme karakteristiklerinden ifade etmenin pratikte gerçeğe yakın bulunmamasıdır [61].

Asimetrik yapısal sistemlerde burulma titreşimlerine ait modun doğal frekansı, yanal titreşimlerin doğal frekansından daha düşük ise, buna dönel esnek (DE) olma özelliği denmektedir. Aktif titreşim kontrolü yapılacak olan yapısal sistem eğer DE' lik özelliğine sahip ise burulma titreşimleri gözardı edilmeden modellenmelidir [62]. DE özelliğini kolaylıkla elde etmek için, (2.13) denklemindeki a_0 ve a_1 katsayıları ve sönüm oranları arasındaki ilişki, ayrık doğal frekanslar kullanılarak yapılmaktadır. Belirlenen ayrık doğal frekanslar ile asimetrik yapısal sisteme dönel esnek olma özelliği taşıtılmaktadır.

$$\psi_n = \frac{a_0}{2}\frac{1}{\omega_n} + \frac{a_1}{2}\omega_n \tag{2.14}$$

$$\frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1/\omega_x & \omega_x \\ 1/\omega_y & \omega_y \\ 1/\omega_\theta & \omega_\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_\theta \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

En küçük kareler yöntemi kullanılarak (2.15) denkleminin çözülmesiyle sönüm matrisi (2.13) denklemiyle hesaplanmıştır [61].

Çalışmanın bir sonraki aşaması olan kontrol tasarımının yapılabilmesi için hareket denklemleri durum uzay formunda,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_w w(t) + B_h u(t) \tag{2.16}$$

olarak ifade edilmiştir.

Burada $x(t) \in \Re^n$ durum değişkenleri vektörü $x(t) = \begin{bmatrix} x(t) & \dot{x}(t) \end{bmatrix}^T$, $w(t) \in \Re$ zemin ivme hareketleri $w(t) = \begin{bmatrix} \ddot{x}_g(t) & \ddot{y}_g(t) \end{bmatrix}^T$, $u(t) \in \Re$ kontrol girişleri ise $u(t) = \begin{bmatrix} u_{x1}(t) & u_{x2}(t) & u_{y1}(t) & u_{y2}(t) \end{bmatrix}^T$ vektörüdür. Durum uzay matrisleri ise

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_1 \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

$$B_h = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_2 \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

olarak tanımlanır.

Yüksek lisans tezinde yapılan simülasyon çalışmalarında bu bölümde modellenen asimetrik yapısal sistem kullanılmıştır. Modellenen AYS'e ait sistem parametreleri ise Çizelge 2.1 ile verildiği gibidir.

Çizelge 2. 1 Asimetrik yapısal sistemin parametreleri

Parametre	Tanım	Değer	Birim
ω_x	x moduna ait ayrık doğal frekans değeri	2.82	Hz
ω_y	y moduna ait ayrık doğal frekans değeri	4.11	Hz
ω_θ	θ moduna ait ayrık doğal frekans değeri	1.56	Hz
m	Sistemin kütlesi	342350	Kg
k_c	Tendonlara ait yay sabiti	3721000	N/m
θ_{tx}	Tendonların asimetrik sistem üzerindeki konstrüktif yerleşimi	36	rad

Çizelge 2. 1 Asimetrik yapısal sistemin parametreleri (devamı)

Parametre	Tanım	Değer	Birim
θ_{ty}	Tendonların asimetrik sistem üzerindeki konstrüktif yerleşimi	36	rad
ψ_x	Sönüm Oranı	0.0124	-
ψ_y	Sönüm Oranı	0.0124	-
ψ_θ	Sönüm Oranı	0.0124	-
λ_{ex}	e_x/r	0.3	-
λ_{ey}	e_y/r	0.3	-
λ_{Bx}	B_x/r	1.2247	-
λ_{By}	B_y/r	1.2247	-

BÖLÜM 3

GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL KONTROLÖR TASARIMI

Son zamanlarda, yapısal sistemlerin sismik performanslarının gelişiminde kullanılan aktif titreşim kontrolü uygulamaları büyük ilgi görmektedir. Aktif kontrol metodlarının teorik ve deneysel sonuçlarına bakıldığında, bir binanın dinamik etkilere karşı olan maksimum cevabını azalttığı gözlemlenmektedir. Aktif yapısal kontrolde karşılaşılan önemli bir konu zaman gecikmesi problemidir. Geri-beslemeli kontrol metodundaki zaman gecikmesi probleminin sistemin kararsızlaşmasına ve sistemde performans kayıplarına neden olduğu bilinmektedir.

Bu bölümde ilk olarak dışbükey optimizasyon problemi ile ilgili temel tanımlar verilerek, yüksek lisans tezindeki kontrolör tasarımında en önemli tasarım aracı olarak kullanılan dışbükey optimizasyon temelindeki doğrusal matris eşitsizlikleri anlatılmıştır. Daha sonra DME yaklaşımıyla durum geri-beslemeli H_∞ optimal kontrolör ile durum geri-beslemeli gecikmeye-bağlı optimal kontrolör tasarımları gerçekleştirilmiştir. Gecikmeye-bağlı gerekli kararlılık kriteri, matris eşitsizlikleri tabanında uygun Lyapunov-Krasovskii fonksiyoneli adayının seçimi ile elde edilmiştir. Böyle bir kontrol tasarımı için gerekli koşul, gecikmeye-bağlı doğrusal olmayan matris eşitsizlikleri şeklinde verilmiştir. Sonrasında, konik tamamlayıcı doğrusallaştırma metodu kullanılarak problem doğrusal matris eşitsizlikleri formuna getirilmiştir. Tasarlanan gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli kontrolör ile sistemin erişilebilir en üst zaman gecikmesi değerine ulaşılacağı ileri sürülmüştür.

3.1 Dışbükey Optimizasyon

Optimizasyon, gerçek hayattaki problemlerde elde edebileceğimiz çözüm kümelerinden veya ihtimallerinden bizim için en iyisini seçmek olarak tanımlanabilir. Mühendislik, ekonomi ve biyoloji gibi pek çok bilim dalında optimizasyon problemlerinin örneklerine rastlanabilir. Her somut optimizasyon problemi ancak net olarak tanımlanmış bir optimizasyon ölçütü ile birlikte var olabilir. Optimizasyon ölçütünün verilmesi, aranan "en iyi" yi tanımlı hale getirir. Bunula birlikte, "en iyi" olanın ayırt edilebilmesi için adayların "iyi"liklerinin birbiriyle karşılaştırılabilmesi; bu karşılaştırmanın bilimsel çerçevede yapılabilmesi için ise bu "iyi"liklerin ölçülebilmesi gerekir. Bilimsel çerçevede optimizasyon, bir problemin olası çözümleri arasından elde edilen başarı göstergesini en-uç değer (yerine göre en küçük ya da en büyük) yapanın belirlenmesi eylemidir. Bir optimizasyon probleminin matematiksel olarak formüle edilebilmesi için, elde edilen başarı göstergesinin bir takım argümanlar cinsinden ifade edilmesi gerekir. Bu argümanlar bir takım skaler parametreler olabilecekleri gibi bağımsız bir değişkenin bir takım fonksiyonları da olabilirler [63], [64].

3.1.1 Parametre Optimizasyonu

Matematikte bir takım skalerlere bir skaler eşleştiren yasalara fonksiyon adı verildiğinden parametre optimizasyonunda elde edilen başarı göstergesi

$$\mathrm{P} = f_0(\mathrm{x}); \quad \mathrm{x} = \left\{\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, ..., \mathrm{x}_n\right\}^{\mathrm{T}} \tag{3.1}$$

şeklinde bir fonksiyon olur. Bu fonksiyona amaç fonksiyonu ya da hedef fonksiyonu, bu fonksiyonun x argümanlarına ise optimizasyon parametreleri adı verilir. Parametre optimizasyonunda amaç, optimizasyon parametrelerinin hedef fonksiyonunu en-uç yapan değerlerinin belirlenmesidir. İstenen en-uç değerinin maksimum olması halinde hedef fonksiyonuna özel olarak değer fonksiyonu adı verilir. Tersine, istenenin en küçük olması halinde ise bedel fonksiyonu terimi kullanılır.

Bazı parametre optimizasyonu problemlerinde, optimizasyon parametreleri hiç bir sınırlamaya tabi olmaksızın her değeri alabilir. Bu durumda kısıtsız optimizasyondan söz edilir. Kimi zaman da, bu parametreler bazı kısıtlamalara tabi olurlar. Bu kez de kısıtlı

optimizasyon söz konusudur. Kısıtlar, optimizasyon parametrelerinin sağlamaları gereken kısıt denklemleri şeklinde ifade edilir. Bunlar,

$$f_j(x) = 0 \; ; \quad j = 1, 2, ..., m \tag{3.2}$$

şeklinde eşitlik kısıtları olabilecekleri gibi

$$f_j(x) \le 0 \; ; \quad j = 1, 2, ..., k \tag{3.3}$$

şeklinde eşitsizlik kısıtları da olabilirler.

3.1.2 Fonksiyon Optimizasyonu

Fonksiyon optimizasyonunda elde edilen başarı göstergesi, bağımsız bir değişkenin bir takım fonksiyonlarına bağlı bir skalerdir. Matematikte bir takım fonksiyonlara bir skaler eşleştiren yasalara fonksiyonel adı verildiğinden fonksiyon optimizasyonunda elde edilen başarı göstergesi fonksiyonel olur.

$$P = J[x(t)] = \int_{t_a}^{t_b} f_0[x(t), \dot{x}(t), t]dt; \quad x(t) = \left\{x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)\right\}^T \tag{3.4}$$

Burada t, bağımsız değişkeni; $x_i(t)$ fonksiyonları ise optimizasyon fonksiyonlarını göstermektedir. Fonksiyon optimizasyonunda amaç J fonksiyonelini en-uç değer yapacak $x_i(t)$ fonksiyonlarının hiçbir sınırlamaya tabi olmadığı kısıtsız ve bazı kısıtlamalara uymak zorunda olduğu kısıtlı optimizasyon problemleri söz konusu olabilir.

3.1.3 Dışbükey Problemler

Bir optimizasyon probleminde hedef 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 en küçük-genel en küçük ikilemlerinde çözümü kolaylaştıran bazı önemli özelliklere sahiptir. Bu bölümde kısaca bu konudaki temel kavramların tanımları verilecektir.

Tanım 3.1 (Dışbükey Fonksiyon) Bir $f(x_1,x_2,...,x_n)$ fonksiyonunun, $H(x_1,x_2,...,x_n)$ Hesiyanı, n boyutlu x_i'ler uzayının her noktasında pozitif belirli ise bu fonksiyon bir tam dışbükey fonksiyondur denir. Bazı (ya da bütün) noktalarda pozitif yarı-belirlilik söz konusu olduğunda ise, bir sıradan dışbükey fonksiyondan söz edilir.

Tanım 3.2 (Dışbükey Küme) Eğer n boyutlu x_i'ler uzayında tanımlı bir C noktalar kümesine ait herhangi iki noktayı birleştiren üzerindeki bütün P noktaları yine bu kümeye ait ise, C'nin bir dışbükey küme olduğu söylenir.

Bir noktalar kümesi, $f(x_1,x_2,...,x_n)=0$ şeklinde bir fonksiyon eşitliğini sağlayan noktaların kümesi şeklinde tanımlanmış olabilir. Bu şekilde tanımlanan bir kümenin dışbükey olup olmaması ile $f(x_1,x_2,...,x_n)$ fonksiyonunun doğrusal olup olmaması arasında doğrudan bir ilişki vardır. Bazen de noktalar kümesi, $g(x_1,x_2,...,x_n)\le b$ şeklinde bir fonksiyon eşitsizliğini sağlayan noktaların kümesi şeklinde tanımlanmış olabilir. Bu durumda, $g(x_1,x_2,...,x_n)$ fonksiyonunun (sıradan ya da tam) bir dışbükey fonksiyon olması, tanımlanan kümenin dışbükey olmasını garanti eder. Ancak bunun tersi doğru değildir; yani $g(x_1,x_2,...,x_n)$'nin dışbükey olmaması, kümenin dışbükey olmadığını göstermez. Bununla birlikte, hepsi dışbükey olan kümelerin bir ara kesit kümesi varsa bu küme de dışbükeydir.

Tanım 3.3 (Yerel ve Küresel En İyilik) Normlu H_r uzayının bir alt kümesi olarak Z_k kümesini ele alalım. Eğer $\varepsilon>0$, $\|x-x_0\|<\varepsilon$ koşulu altındaki her $x\in Z_k$ için $f(x_0)\le f(x)$ eşitsizliği sağlanıyorsa, $x_0\in Z_k$, $f: Z_k\to\Re$ fonksiyonunun yerel en iyi çözümüdür. Bu eşitsizlik bir koşul gerektirmeksizin her $x\in Z_k$ için sağlanıyorsa çözüm artık küresel en iyi olur.

Önerme 3.1 $f: Zk\to\Re$ fonksiyonunu dışbükey kabul ettiğimizde, f fonksiyonunun her yerel en iyi çözümü aynı zamanda küresel en iyi çözümü olacaktır. Eğer f fonksiyonu kesin dışbükey ise küresel en iyi çözüm tektir.

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

$$f(x_0)\le f(x_0+\alpha(x-x_0))=f((1-\alpha)x_0+\alpha x)\le(1-\alpha)f(x_0)+\alpha f(x) \qquad (3.5)$$

eşitsizliği ve bu eşitsizlikten

$$0 \le \alpha(f(\mathrm{x}) - f(\mathrm{x}_0)) \tag{3.6}$$

elde edilir. Bir başka gösterimle $f(\mathrm{x}_0) \le f(\mathrm{x})$ sonucuna ulaşılır. Bundan dolayı x_0 fonksiyonu küresel en iyi çözümdür. Eğer fonksiyon kesin dışbükey ise bu durumda (3.5) eşitsizliğindeki ikinci kısım kesin olacak, bunun doğal bir sonucu olarak (3.6) eşitsizliği de kesin olacak ve x_0 tek olacaktır.

Bu ispat bize çözümün varlığı hakkında bilgi sunmaz. Burada asıl amaç, dışbükey fonksiyonlarda eğer bir yerel en iyi çözüm varsa bunun aynı zamanda küresel en iyi olduğunu göstermektir. Bu nedenle dışbükey fonksiyonlarda sadece yerel en iyi çözümü bulmak, küresel en iyi çözümü bulmak anlamına gelmektedir [63], [65].

3.1.4 Dışbükey Optimizasyon Problemi

Standart forma getirilmiş haliyle

$$\mathrm{P} = f_0(\mathrm{x}); \quad \mathrm{x} = \{\mathrm{x}_1, \mathrm{x}_2, ..., \mathrm{x}_\mathrm{N}\}^\mathrm{T} \to \min \tag{3.7}$$

$$f_\mathrm{j}(\mathrm{x}) = 0; \ \mathrm{j} = 1,2,...,\mathrm{J}; \ \mathrm{J} < \mathrm{N} \tag{3.8}$$

$$g_\mathrm{k}(\mathrm{x}) = \mathrm{b}_\mathrm{k}; \ \mathrm{k} = 1,2,...,\mathrm{K} \tag{3.9}$$

şeklindeki bir optimizasyon probleminde, (3.8) eşitlik ve (3.9) 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 [64].

3.2 Sinyal Normları

Bir sinyalin, $(-\infty, +\infty)$'dan $\Re$ reel sayılar kümesine gittiğini düşünecek olursak, böyle sinyaller parçalı sürekli sinyal olarak isimlendirilir. Doğal olarak, $t < 0$ veya $t = 0$ anından başlaması durumunda sinyal sıfır olabilir. Değişik sinyaller için, çeşitli normlar tanımlanabilir.

Öncelikle norm, aşağıdaki dört özelliği sağlamalıdır.

i. $\| u \| \geq 0$

ii. $\| u \| = 0 \Leftrightarrow u(t) = 0, \qquad \forall t$

iii. $\| au \| = | a | \| u \|, \qquad \forall t \in, \Re$

iv. $\| u + v \| \leq \| u \| + \| v \|$

Dördüncü özellik, üçgen eşitsizliği olarak isimlendirilir.

Bir $u(t)$ sinyalinin 1 normu, onun mutlak değerlerinin toplamıdır.

$$\| u \|_1 := \int_{-\infty}^{+\infty} | u(t) | dt$$

Bir $u(t)$ sinyalinin 2 normu,

$$\| u \|_t := \int_{-\infty}^{+\infty} (u(t)^2 dt)^{\frac{1}{2}}$$

şeklinde ifade edilir.

Bir $u(t)$ sinyalinin sonsuz normu, onun mutlak değerinin üst sınırı ile ifade edilir.

$$\| u \|_\infty := \sup_t | u(t) |$$

3.3 H_∞ Normu

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

H_∞ doğrusal vektör uzayı, sağ yarı açık s düzleminde analitik, (3.10) ile verilen norma göre sınırlı olan fonksiyonların oluşturduğu L_∞ Banach uzayının kapalı bir alt uzayıdır. Bu uzayda tanımlı olan normada H_∞ normu denir. $\mathrm{G}(s) \in H_\infty$ ise H_∞ normu,

$$\left\| \mathrm{G}(s) \right\|_\infty := \sup_{\mathrm{Re}(s)>0} \sigma_{\max}(\mathrm{G}(s)) = \sup_{w \in \Re} \sigma_{\max}(\mathrm{G}(jw)) \qquad (3.10)$$

şeklinde gösterilebilir. H_∞ vektör uzayı kararlı, düzgün transfer fonksiyonlarını içerir. Eşitlik (3.10)'deki ikinci eşitlik Maksimum Genlik Teoremi'nin genelleştirilmiş halidir

(Boyd ve Desoer [66]). Burada, eğer G(s) tek girişli tek çıkışlı bir sistemin transfer fonksiyonu ise H_∞ normu,

$$\left\|G(s)\right\|_\infty = \sup_{w\in\Re}\left|G(jw)\right| \tag{3.11}$$

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 [15].

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

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

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

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

$$\left\|G\right\|_\infty = \sup_{w\neq 0}\frac{\left\|z\right\|_2}{\left\|w\right\|_2} \tag{3.12}$$

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

3.4 H_∞ Normunun Hesaplanması

Doğrusal zamanla değişmeyen çok girişli çok çıkışlı sistemlerin H_∞ normunun Bode diyagramları yardımıyla hesaplanması epeyce zordur. Bu durum için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunlardan en sık kullanılanlar Ortay (Bisection) Algoritması, Cebirsel Riccati Eşitliği (CRE) ve DME yaklaşımlarıdır.

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem ele alalım;

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bw(t)\\ z(t) &= Cx(t) + Dw(t)\end{aligned} \tag{3.13}$$

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

H_∞ normunun ortay algoritması ile hesaplanması amacıyla,

$$\mathrm{H_e} := \begin{bmatrix} \mathrm{A} + \mathrm{B}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{D}^{\mathrm{T}}\mathrm{C} & \mathrm{B}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{B}^{\mathrm{T}} \\ \mathrm{C}^{\mathrm{T}}(\mathrm{I} + \mathrm{D}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{D}^{\mathrm{T}})\mathrm{C} & -(\mathrm{A} + \mathrm{B}\mathrm{R}^{-1}\mathrm{D}^{\mathrm{T}}\mathrm{C})^{\mathrm{T}} \end{bmatrix} \tag{3.14}$$

matrisi tanımlanabilir. Burada, $\mathrm{R} := \gamma^2\mathrm{I} - \mathrm{D}^{\mathrm{T}}\mathrm{D}$ dir.

Teorem 3.1 (Doyle [67]) Ancak ve ancak H_e'nin imajiner eksen üzerinde özdeğerleri olmaması durumunda $\|\mathrm{G}(s)\|_\infty < 1$ dir.

Bu teorem $\|\mathrm{G}(s)\|_\infty$ normunun istenilen hassasiyette hesaplanmasına imkan vermektedir. Öncelikle γ gibi pozitif bir sayı seçilir, daha sonra $\|\mathrm{G}(s)\|_\infty < \gamma$ $\left(\|\gamma^{-1}\mathrm{G}(s)\|_\infty < 1\right)$ şartı için uygun matrisin özdeğerleri için γ arttırılıp azaltılarak test edilir. Bu yöntem ortay teoremi olarak bilinir ve algoritma aşağıdaki gibidir [61].

1. $\|\mathrm{G}(s)\|_\infty$ normu için γ_1 şeklinde bir alt sınırı tahmini olarak belirle.

2. $\|\mathrm{G}(s)\|_\infty$ normu için γ_2 için 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. Şayet $\gamma_2 - \gamma_1$ önceden tanımlanmış olan hassasiyetten küçük ise algoritmayı durdur. Değil ise, Adım 4'den devam et.

4. $\gamma = \frac{1}{2}(\gamma_1 + \gamma_2)$ şeklinde tanımla ve H_e'ye ilişkin özdeğerleri hesapla. Şayet 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 yöntem ise Cebirsel Riccati Eşitliği (CRE)' nin çözümünden oluşturulur. Aşağıdaki Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi (SGYT) kullanılarak CRE ile bir sistemin H_∞ normu hesaplanabilir.

Teorem 3.2 (Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi) (Zhou vd. [68]) Verilen sürekli zamanlı bir sistemin gerçeklemesi $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ için aşağıdaki ifadeler eşdeğerdir.

i) A matrisi Hurwitz'dir (A'nın tüm özdeğerleri sol yarı açık *s* düzlemindedir) ve $\left\| C(sI - A)^{-1}B + D \right\|_\infty < \gamma$ 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 kötü yanı, çözümün en kötü senaryo açısından incelenmesi ve bu durumun tutuculuğu arttırmaya neden olmasıdır. Bu sebeple, CRE'leri DME ile yeniden formüle edilerek problemin çözümüne esneklik katılma yoluna gidilmiştir. Bu modifikasyonla problem eşitlik yerine eşitsizliklerin çözümünden sağlanır. Bu şekilde doğrusal matris eşitsizlikleri 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 elde edilir ve DME'lerinin sayısal çözümü için önerilen yöntem G(*s*)'in H_∞ normunun hesabında kullanılır.

Yardımcı Teorem 3.1 (Zhou vd. [68]) Verilen sürekli zamanlı bir sistemin gerçeklemesi $G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ için aşağıdaki ifadeler eşdeğerdir.

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

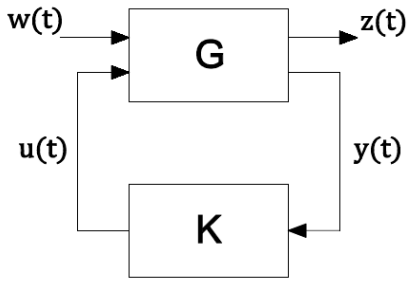
ii) Aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliğini çözen bir $P > 0$ matrisi vardır.

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

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

3.5 H_∞ Optimal Kontrol Problemi

H_∞ optimal kontrol problemi sisteme gelen bozucuların sistem cevabı üzerindeki etkilerinin azaltılmasının en iyi yolu olarak bilinmektedir. Bozuculardan kontrol edilmek istenen çıkışlara olan transfer fonksiyonları matrisinin H_∞ normunu en küçük yapma işlemi olarak tanımlanır. H_∞ optimal kontrol probleminin çözümünde Şekil 3.1'de gösterilen blok diyagramı kullanılır.



Şekil 3. 1 Standart H_∞ blok diyagramı

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

Şekil 3.1 'de yer alan sistem, eğer herhangi bir ilk koşul altında ve $w(t) = 0$ iken $\lim_{t\to\infty} x(t) = 0$ özelliklerini sağlıyorsa iç kararlıdır. Burada T_{zw}, $w(t)$ girişlerinden $z(t)$ çıkışlarına transfer fonksiyonları matrisi olmak üzere;

a) Kapalı-çevrim sistem iç kararlı,

b) $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ olacak şekilde bir kontrolörü bulmak alt en iyi H_∞ kontrol problemi, γ 'yı en küçük yapan kontrolörü bulmak ise H_∞ optimal kontrol problemi olarak tanımlanır.

H_∞ optimal kontrol problemine indirgenip çözülebilecek diğer problemler; dayanıklı kararlılık problemi, bozucu bastırma problemi, yörünge izleme problemi, model eşleme problemi vb.dir. H_∞ optimal kontrol problemi, DME kullanılarak çözülmektedir ve DME'nin kullanımı bu alanda önemli gelişmelere neden olmuştur [18]. Aşağıda, doğrusal matris eşitsizlikleri tanımlanarak bu yaklaşımın kontrol problemine getirdiği yenilikler ve kolaylıklar anlatılmıştır.

3.6 Doğrusal Matris Eşitsizlikleri

Doğrusal matris eşitsizlikleri sistem ve kontrol teorisinde sıkça kullanımı sebebiyle son zamanlarda üzerinde birçok çalışmanın yapıldığı bir konu haline gelmiştir [63].

Herhangi bir doğrusal matris eşitsizliği kanonik formda;

$$F(x) := F_0 + x_1F_1 + ... + x_nF_n = F_0 + \sum_{i=1}^{n} x_iF_i < 0 \qquad (3.15)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada;

- $x = (x_1,...,x_n)^T \in \Re^n$ çözüm sonunda bulunacak bilinmeyen sabit elemanlı vektördür. x_i 'ler karar değişkenleri veya optimizasyon değişkenleri olarak da adlandırılır.
- $F_0,...,F_n$ gerçek simetrik matrisleri ifade etmektedir.
- < 0 ifadesi kesin negatifliği göstermektedir. Diğer bir ifadeyle simetrik (hermityen) ve gerçek bir matris için tüm özdeğerlerin negatif olmasıdır ($\lambda_{max}(F(x)) < 0$).

DME'leri, x gibi bir değişken üzerinden, dışbükey bir limit belirlemek için kullanılır.

$$\delta := \{x \mid F(x) < 0\} \qquad (3.16)$$

$F(x) < 0$ doğrusal matris eşitsizliğinin çözüm kümesi dışbükeydir. Burada, $x_1, x_2 \in \delta$ ve $\alpha \in (0, 1)$ olması durumuda,

$$F(\alpha x_1 + (1-\alpha)x_2) = \alpha F(x_1) + (1-\alpha)F(x_2) < 0 \qquad (3.17)$$

şeklindeki F fonksiyonu $\alpha > 0$, $(1-\alpha) > 0$ koşulu altında ılgındır. $F(x) < 0$ doğrusal matris eşitsizliklerinin x üzerinden dışbükey limit olması özel bir durum olsada bir çok dışbükey küme bu şekilde kolaylıkla ifade edilebilir.

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

$$F_1(x) < 0, \ldots, F_k(x) < 0 \tag{3.18}$$

şeklindeki DME'lerin her birinin oluşturduğu olası kümenin kesişimi de dışbükeydir. (3.18) DME' lerini sağlayan tüm x 'lerin kümesi dışbükeydir. DME'lerini tek tek yazmak yerine, tamamı tek bir DME olarak,

$$F(x) = \begin{bmatrix} F_1(x) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & F_2(x) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & F_k(x) \end{bmatrix} < 0 \tag{3.19}$$

şeklinde yazılabilir. Bu son eşitsizlik her hangi bir x için, $F(x)$ matrisinin simetrik olduğunu göstermektedir. $F(x)$ matrisinin özdeğerlerinin oluşturduğu küme $F_1(x), \ldots, F_k(x)$ matrislerinin tek tek özdeğerlerinin birleşiminden oluşan küme ile aynıdır. $F(x) < 0$ doğrusal matris eşitsizliğini sağlayan x ifadesi, (3.18) ile belirtilen tüm doğrusal matris eşitsizliklerini de sağlamaktadır. Bu şekilde çoklu DME kısıtlamaları tek bir DME kısıtlamasına indirgenebilir. Bu durum DME'ni çok amaçlı optimizasyon ve kontrol problemlerinin çözümünde etkin bir şekilde kullanılabilecek bir araç haline getirmiştir [20].

Doğrusal olmayan matris eşitsizlikleri, Schur tümleyen ile doğrusal matris eşitsizlikleri formuna çevrilebilir. Örneğin, $S \in \Re^{n \times n}$ olmak üzere,

$$S = S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

matrisini ele alalım. Burada, S_{11}'in $r \times r$ boyutlu tekil olmayan bir matris olduğu kabulüyle,

$$M := S_{22} - S_{21}S_{11}^{-1}S_{12} \tag{3.21}$$

şeklinde tanımlı M matrisi, S matrisi içerisinde S_{11}'in Schur tümleyeni olur. S simetrik matris olduğundan

$$S < 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} S_{11} & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} < 0 \Leftrightarrow \begin{cases} S_{11} < 0 \\ M < 0 \end{cases} \tag{3.22}$$

şeklindedir. Yüksek lisans tezinde, kontrolör tasarımlarında kullanılan Schur tümleyen, aşağıdaki yardımcı teoremde verilmiştir.

Yardımcı Teorem 3.2 (Boyd vd. [20]) $S = S^T$ simetrik matrisi (3.20)'de tanımlandığı gibi verilmiş olsun. Bu ayrıştırmada, $S_{11} \in \Re^{n \times n}$ karedir ve aşağıdaki önermeler birbirine eşdeğerdir.

$S < 0;$

$$S_{11} < 0, \;\; S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0 \tag{3.23}$$

$$S_{22} < 0, \;\; S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0 \tag{3.24}$$

3.7 DME Kullanılarak Durum Geri-Besleme Problemi

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{3.25}$$

şeklinde tanımlansın. Burada, $A \in \Re^{n \times n}$ ve $B \in \Re^{n \times n}$ 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 bulunduğunda problem çözülmüş olacaktır.

$$\begin{cases} X < 0 \\ (A + BF)^T X + X(A + BF) < 0 \end{cases} \tag{3.26}$$

F ve X matrislerinin bilinmeyen olması nedeniyle (3.26) eşitsizliği doğrusal matris eşitsizliği formunda değildir. $\mathrm{K}=\mathrm{FY}$ ve $\mathrm{Y}=\mathrm{X}^{-1}$ gibi yeni değişkenler tanımlanıp eşitsizlikler tekrar yazılırsa elde edilen aşağıdaki eşitsizlikler bilinmeyenler üzerinden doğrusal olacaktır.

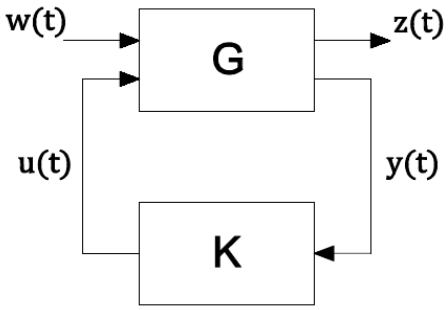
$$\begin{cases}\mathrm{Y}<0\\ \mathrm{AY}+\mathrm{YA}^{\mathrm{T}}+\mathrm{BK}+\mathrm{K}^{\mathrm{T}}\mathrm{B}^{\mathrm{T}}<0\end{cases} \tag{3.27}$$

Görüldüğü gibi durum geri-besleme problemimiz, (3.27) DME'lerinde Y ve K matrislerinin varlığının incelenmesi problemine dönüşmüştür. Y ve K matrislerinin belirlenmesi ile F statik kazanç matrisi, $\mathrm{F}=\mathrm{KY}^{-1}$ ifadesi ile kolaylıkla elde edilebilir.

3.7.1 DME Tabanlı Durum Geri-Beslemeli Optimal Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde, aktif titreşim kontrolü çalışmalarında literatürde sıklıkla önerilen durum geri-beslemeli optimal kontrolör DME yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir.

Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 2 Durum geri-beslemeli kontrol yapısının blok diyagramı

Kontrol problemi durum-uzay formunda,

$$\begin{aligned}\dot{\mathrm{x}}(t)&=\mathrm{Ax}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\mathrm{B}_2\mathrm{u}(t)\\ \mathrm{z}(t)&=\mathrm{C}_1\mathrm{x}(t)+\mathrm{D}_{11}\mathrm{w}(t)+\mathrm{D}_{12}\mathrm{u}(t)\end{aligned} \tag{3.28}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $\mathrm{x}(t)\in\Re^n$ durum vektörünü, $\mathrm{z}(t)\in\Re^p$ kontrol çıkış vektörlerini, $\mathrm{w}(t)\in\Re^{m_w}$ bozucu giriş vektörünü, $\mathrm{u}(t)\in\Re^{m_u}$ kontrol giriş vektörünü göstermektedir. $\mathrm{A},\ \mathrm{B}_1,\ \mathrm{B}_2,\ \mathrm{C}_1,\mathrm{C}_2,\ \mathrm{D}_{11},\ \mathrm{D}_{12}$ matrisleri ise sistemin bilinen uygun

boyutlu durum-uzay matrisleridir. Kontrol girişinin $\mathrm{u}(t)=\mathrm{K}\mathrm{x}(t)$ $(\mathrm{K}\in\Re^{m_u\times n})$ gibi durumların doğrusal bir fonksiyonu olduğu kabulünden yola çıkarak (3.29)'de verilen kapalı-çevrim sistemi elde edilir. Burada, K durum geri-beslemeli kontrol kazancını göstermektedir.

$$\begin{aligned}\dot{\mathrm{x}}(t)&=(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)\\ \mathrm{z}(t)&=(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{D}_{11}\mathrm{w}(t)\end{aligned} \tag{3.29}$$

H∞ performans problemi, kapalı-çevrim (3.29) sistemini kararlı kılacak ve sistemin girişlerinden çıkışlarına olan transfer fonksiyonları matrisinin sonsuz normunu $\|\mathrm{T}_{\mathrm{z}_1\mathrm{w}}\|_\infty$, γ gibi bulunabilecek en küçük skaler pozitif bir değerden küçük kılacak bir kontrolör bulmaktır. Bilindiği gibi, *H*∞ normu ile DME arasındaki bağlantı sınırlı gerçek yardımcı teoremi kullanılarak yapılır. $\mathrm{V}(\mathrm{x}(t))=\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{x}(t)$, $\mathrm{P}=\mathrm{P}^{\mathrm{T}}>0$ şartıyla karesel Lyapunov fonksiyonudur. $\gamma>0$ olmak üzere sistemin performans ve kararlılık kısıtları için tanımlanan aşağıdaki (3.30) eşitsizliği, tüm $\mathrm{x}(t)$ ve $\mathrm{w}(t)$'ler için negatif tanımlı olmalıdır.

$$\dot{\mathrm{V}}(\mathrm{x}(t))+\mathrm{z}_1{}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{z}_1(t)-\gamma^2\mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t)<0 \tag{3.30}$$

Eşitsizlik (3.29)'in (3.30) ile birleştirilmesiyle,

$$\begin{aligned}&[(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)]^{\mathrm{T}}\mathrm{P}\mathrm{x}(t)+\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}[(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)]\\&+[(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{D}_{11}\mathrm{w}(t)]^{\mathrm{T}}[(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})\mathrm{x}(t)+\mathrm{D}_{11}\mathrm{w}(t)]-\gamma^2\mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t)<0\end{aligned} \tag{3.31}$$

eşitsizliği elde edilir. Burada, (3.31)'nin düzenlenmesiyle

$$\begin{bmatrix}((\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})^{\mathrm{T}}\mathrm{P}+\mathrm{P}(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})+(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})^{\mathrm{T}}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})) & \mathrm{P}\mathrm{B}_1+(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})^{\mathrm{T}}\mathrm{D}_{11}\\ \mathrm{B}_1^{\mathrm{T}}\mathrm{P}+\mathrm{D}_{11}^{\mathrm{T}}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K}) & -\gamma^2\mathrm{I}+\mathrm{D}_{11}^{\mathrm{T}}\mathrm{D}_{11}\end{bmatrix}<0 \tag{3.32}$$

matris eşitsizliği elde edilir. Schur tümleyeni ve (3.32)'ün sağından ve solundan P^{-1} ile çarpılması sonucunda

$$\begin{aligned}&\mathrm{P}^{-1}(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})^{\mathrm{T}}+(\mathrm{A}+\mathrm{B}_2\mathrm{K})\mathrm{P}^{-1}+\mathrm{P}^{-1}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})^{\mathrm{T}}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})\mathrm{P}^{-1}\\&-(\mathrm{B}_1+\mathrm{P}^{-1}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})^{\mathrm{T}}\mathrm{D}_{11})(-\gamma^2\mathrm{I}+\mathrm{D}_{11}\mathrm{D}_{11}^{\mathrm{T}})^{-1}(\mathrm{B}_1^{\mathrm{T}}+\mathrm{D}_{11}^{\mathrm{T}}(\mathrm{C}_1+\mathrm{D}_{12}\mathrm{K})\mathrm{P}^{-1})<0\end{aligned} \tag{3.33}$$

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

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

(3.34)

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

(3.35)

DME'leri elde edilebilir. Yine Schur tümleyeni kullanılarak $X_\infty > 0$ için, (3.29)'de tanımlanan kapalı-çevrim sistemin H_∞ performans kısıtları aşağıdaki DME şeklinde elde edilir.

$$\begin{bmatrix} (A+B_2K)X_\infty + X_\infty(A+B_2K)^T & B_1 & X_\infty(C_1+D_{12}K)^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ (C_1+D_{12}K)X_\infty & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.36)$$

Yukarıda durum geri-beslemeli kontrolör için H_∞ optimal kontrol koşulları DME yaklaşımıyla elde edilmiştir. (3.36) eşitsizliği KX_∞ teriminden dolayı dışbükey değildir. Dışbükeyliği sağlamak için $W = KX$ değişken dönüşümü yapılarak, $X_\infty = X = X^T$ şartı altında kontrol problemini çözen

$$\begin{bmatrix} AX + XA^T + B_2W + W^TB_2^T & B_1 & XC_1^T + W^TD_{12}^T \\ B_1^T & -\gamma I & D_{11}^T \\ C_1X + D_{12}W & D_{11} & -\gamma I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.37)$$

DME'si elde edilir. (3.37) DME'sini çözen uygun X ve W matrisleri bulunursa, en iyi durum geri-beslemeli H_∞ optimal kontrolör kazancı, en düşük bozucu bastırma seviyesi γ ile,

$$K = WX^{-1} \qquad (3.38)$$

şeklinde elde edilir [20].

3.7.2 Zaman Gecikmeli Sistemler İçin Gecikmeye-Bağlı Optimal Kontrolör Tasarımı

Bu bölümde, zaman gecikmeli sistemlerin durum geri-beslemeli denetleyiciler ile kontrol edilebilmesi için gecikmeye-bağlı optimal kontrolör tasarımı yapılmıştır. Çalışmada çözülmesi istenen problemin matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir. Zaman gecikmeli bir sistem,

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(t) &= \mathrm{A}\mathrm{x}(t) + \mathrm{B}_2\mathrm{u}(t-h) + \mathrm{B}_1\mathrm{w}(t) \\ \mathrm{z}(t) &= \mathrm{C}\mathrm{x}(t) + \mathrm{D}\mathrm{u}(t), \qquad \mathrm{x}(t) = 0, \quad t \in [-\bar{h}, 0] \end{aligned} \tag{3.39}$$

şeklinde ele alınsın.

Burada, $\mathrm{x}(t) \in \Re^n$ sistemin durum vektörünü, $\mathrm{u}(t) \in \Re^{m_u}$ sistemin kontrol girişini, $\mathrm{w}(t) \in \Re^{m_w}$ sistem üzerideki bozucu girişi ve $\mathrm{z}(t) \in \Re^p$ kontrol edilmek istenen çıkışları ifade etmektedir. A, B_2, B_1, C ve D matrisleri sistemin uygun boyutlu bilinen sabit durum-uzay matrisleridir. Çalışmada tüm başlangıç şartları 0 olarak alınmıştır. Bunu yanında, zaman gecikmesi h,

$$0 < h \le \bar{h} \tag{3.40}$$

eşitsizliğini sağlayan zamanla değişmeyen bir yapıda olduğu kabul edilmiştir. Burada, $\bar{h}$ gecikme zamanın üst sınırını veren bilinen pozitif sabittir. Bu çalışmada sisteme etkiyen bozucu sinyalin sınırlı enerjiye sahip olduğu kabulü yapılmıştır. Bu durumda,

$$\mathrm{W}_\delta := \{\mathrm{w} : \Re_+ \to \Re^{m_w} : \int_0^\infty \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t)dt < \infty\} \tag{3.41}$$

geçerlidir. Bu çalışmada hedef, kapalı-çevrim sistemin küresel asimtotik kararlılığını sağlayacak ve bozuculardan sistem çıkışına en küçük H_∞ kazancını veren, $\mathrm{u}(t) = \mathrm{K}\mathrm{x}(t)$ formunda uygun bir durum geri-beslemeli kontrol kuralı bulmaktır. Bu türden kontrol kuralı vasıtasıyla sistemin kapalı-çevrim durum-uzay modeli,

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(t) &= \mathrm{A}\mathrm{x}(t) + \mathrm{B}_2\mathrm{K}\mathrm{x}(t-h) + \mathrm{B}_1\mathrm{w}(t) \\ \mathrm{z}(t) &= (\mathrm{C} + \mathrm{D}\mathrm{K})\mathrm{x}(t), \quad \mathrm{x}(t) = 0, \quad t \in [-\bar{h}, 0] \end{aligned} \tag{3.42}$$

şeklinde elde edilebilir.

$\mathrm{M_S} = \mathrm{B_2K}$,

$\overline{\mathrm{C}} = \mathrm{C} + \mathrm{DK}$ kabulü ile,

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{x}}(t) &= \mathrm{Ax}(t) + \mathrm{M_s x}(t-h) + \mathrm{B_1 w}(t) \\ \mathrm{z}(t) &= \overline{\mathrm{C}}\mathrm{x}(t), \quad \mathrm{x}(t) = 0, \quad t \in [-\bar{h}, 0] \end{aligned} \tag{3.43}$$

sistemi ele alınsın. Aşağıda açıklanan Sınırlı Gerçek Yardımcı Teoremi (SGYT), (3.39) sistemi için yeterli kararlılık şartlarını sunmaktadır.

Yardımcı Teorem 3.3 [57] $\bar{h}$ ve γ gibi pozitif skaler sabitleri verilmiş olsun. Aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliklerini sağlayan, simetrik pozitif tanımlı P, Q, S, Y, Z, matrisleri bulunabilirse, kontrol girişi gecikmeli (3.39) sistemi, (3.40)'ı sağlayan herhangi bir h zaman gecikmesi değeri için, γ gibi bir bozucu azaltma seviyesi ile küresel asimptotik kararlı olur.

$$\Gamma := \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \mathrm{PM_s} - \mathrm{Y} & \mathrm{PB_1} & \bar{\mathrm{h}}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{Z} & \overline{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}} \\ * & -\mathrm{Q} & 0 & \bar{\mathrm{h}}\mathrm{M_s^T Z} & 0 \\ * & * & -\gamma^2\mathrm{I} & \bar{\mathrm{h}}\mathrm{B_1^T Z} & 0 \\ * & * & * & -\bar{\mathrm{h}}\mathrm{Z} & 0 \\ * & * & * & * & -\mathrm{I} \end{bmatrix} < 0 \tag{3.44}$$

$$\begin{bmatrix} \mathrm{S} & \mathrm{Y} \\ \mathrm{Y}^{\mathrm{T}} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} \geq 0 \tag{3.45}$$

olarak yazılabilir. Burada, $\Gamma_{11} = \mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{P} + \mathrm{PA} + \bar{\mathrm{h}}\mathrm{S} + \mathrm{Y} + \mathrm{Y}^{\mathrm{T}} + \mathrm{Q} + \bar{\mathrm{h}}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{ZA}$ şeklindedir.

İspat: Çalışmada elde edilen sonuçları, Moon vd. [59] önerdiği aşağıdaki yardımcı teoremden faydalanılmıştır.

Yardımcı Teorem 3.4 [59] $a(\cdot) \in \Re^{n_a}, b(\cdot) \in \Re^{n_b}$ ve $\mathrm{N} \in \Re^{n_a \times n_b}$ 'nin Ω aralığında tanımlandığını varsayalım. O halde herhangi bir $\mathrm{S} \in \Re^{n_a \times n_b}$, $\mathrm{Y} \in \Re^{n_a \times n_b}$ ve $\mathrm{Z} \in \Re^{n_a \times n_b}$ matrisleri için,

$$-2\int_{\Omega} a^{\mathrm{T}}(s)\mathrm{N}b(s)ds \leq \int_{\Omega} \begin{bmatrix} a(s) \\ b(s) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} \mathrm{S} & \mathrm{Y}-\mathrm{N} \\ \mathrm{Y}^{\mathrm{T}}-\mathrm{N}^{\mathrm{T}} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(s) \\ b(s) \end{bmatrix} ds \tag{3.46}$$

eşitsizliği geçerlidir. Burada;

$$\begin{bmatrix} \mathrm{S} & \mathrm{Y} \\ \mathrm{Y}^{\mathrm{T}} & \mathrm{Z} \end{bmatrix} \geq 0$$

şeklinde ifade edilebilir.

Newton-Leibnitz formülasyonu ve (3.39) kullanılarak,

$$\mathrm{x}(t-h) = \mathrm{x}(t) - \int_{t-h}^{t} \dot{\mathrm{x}}(\theta) d\theta \tag{3.47}$$

yazılabilir. $\mathrm{x}(t-h)$ ifadesi (3.39)'da yerine yazılırsa,

$$\dot{\mathrm{x}}(t) = (\mathrm{A} + \mathrm{M}_{\mathrm{s}})\mathrm{x}(t) - \mathrm{M}_{\mathrm{s}} \int_{t-h}^{t} \dot{\mathrm{x}}(\theta) d\theta + \mathrm{B}_1 \mathrm{w}(t) \tag{3.48}$$

elde edilir. Lyapunov-Krasovskii aday fonksiyoneli

$$\mathrm{V}(\mathrm{x}(t), t) = \mathrm{V}_1(\mathrm{x}(t), t) + \mathrm{V}_2(\mathrm{x}(t), t) + \mathrm{V}_3(\mathrm{x}(t), t) \tag{3.49}$$

şeklinde seçilmiş olsun. Burada;

$$\begin{aligned} \mathrm{V}_1(\mathrm{x}(t),t) &= \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{x}(t), \\ \mathrm{V}_2(\mathrm{x}(t),t) &= \int_{-h}^{0} \int_{t+\beta}^{t} \dot{\mathrm{x}}^{\mathrm{T}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s) ds d\beta, \\ \mathrm{V}_3(\mathrm{x}(t),t) &= \int_{t-h}^{t} \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(s)\mathrm{Q}\mathrm{x}(s) ds \end{aligned} \tag{3.50}$$

şeklindedir. $\mathrm{V}_1(\mathrm{x}(t), t)$'nin (3.48) sisteminin durum yörüngeleri boyunca t'ye göre türevi

$$\begin{aligned} \dot{\mathrm{V}}_1(\mathrm{x}(t),t) = {} & \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)[(\mathrm{A} + \mathrm{M}_{\mathrm{s}})^{\mathrm{T}}\mathrm{P} + \mathrm{P}(\mathrm{A} + \mathrm{M}_{\mathrm{s}})]\mathrm{x}(t) \\ & - 2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{M}_{\mathrm{s}} \int_{t-h}^{t} \dot{\mathrm{x}}(\theta) d\theta + \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{B}_1^{\mathrm{T}}\mathrm{P}\mathrm{x}(t) + \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t) \end{aligned} \tag{3.51}$$

şeklindedir.

Yardımcı Teorem 3.4'den yararlanarak $a(\cdot) = \mathrm{x}(t)$, $b(\cdot) = \dot{\mathrm{x}}(\theta)$ ve $\mathrm{N} = \mathrm{P}\mathrm{M}_{\mathrm{s}}$ tanımlamaları, (3.51)'e uygulanırsa,

$$
\begin{aligned}
-2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{N}\int_{t-h}^{t}\mathrm{x}(s)ds &\le \int_{t-h}^{t}\begin{bmatrix}\mathrm{x}(t)\\ \dot{\mathrm{x}}(s)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}\mathrm{S} & \mathrm{Y}-\mathrm{N}\\ \mathrm{Y}^{\mathrm{T}}-\mathrm{N}^{\mathrm{T}} & \mathrm{Z}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{x}(t)\\ \dot{\mathrm{x}}(s)\end{bmatrix}ds \\
&= \int_{t-h}^{t}[\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{S}\mathrm{x}(t)+2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{Y}-\mathrm{N})\dot{\mathrm{x}}(s)+\dot{\mathrm{x}}^{\mathrm{T}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s)]ds \\
&= h\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{S}\mathrm{x}(t)+2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{Y}-\mathrm{N})\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)ds+\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s)ds \\
&\le \bar{h}\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{S}\mathrm{x}(t)+2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{Y}-\mathrm{PB}_2\mathrm{K})[\mathrm{x}(t)-\mathrm{x}(t-h)]+\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)\mathrm{Z}\mathrm{x}(s)ds
\end{aligned}
\tag{3.52}
$$

$$
\begin{bmatrix}\mathrm{S} & \mathrm{Y}\\ \mathrm{Y}^{\mathrm{T}} & \mathrm{Z}\end{bmatrix}\ge 0 \tag{3.53}
$$

eşitsizlikleri yazılabilir. (3.52) ve (3.53)'deki koşullar kullanılarak (3.51),

$$
\begin{aligned}
\dot{\mathrm{V}}_1(\mathrm{x}(t),t) &= \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}+\mathrm{P}\mathrm{A}+\bar{h}\mathrm{S}+\mathrm{Y}+\mathrm{Y}^{\mathrm{T}})\mathrm{x}(t)+2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{P}\mathrm{M}_{\mathrm{s}}-\mathrm{Y})\mathrm{x}(t-h) \\
&\quad +\mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{B}_1^{\mathrm{T}}\mathrm{P}\mathrm{x}(t)+\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s)ds
\end{aligned}
\tag{3.54}
$$

şeklinde elde edilebilir.

$\mathrm{V}_2(\mathrm{x}(t),t)$ ve $\mathrm{V}_3(\mathrm{x}(t),t)$ 'nin türevleri,

$$
\begin{aligned}
\dot{\mathrm{V}}_2(\mathrm{x}(t),t) &= h\dot{\mathrm{x}}(t)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(t)-\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s)ds \\
&\le \bar{h}[\mathrm{A}\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\mathrm{M}_{\mathrm{s}}\mathrm{x}(t-h)]^{\mathrm{T}}\mathrm{Z}[\mathrm{A}\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\mathrm{M}_{\mathrm{s}}\mathrm{x}(t-h)] \\
&\quad -\int_{t-h}^{t}\dot{\mathrm{x}}(s)\mathrm{Z}\dot{\mathrm{x}}(s)ds
\end{aligned}
\tag{3.55}
$$

$$
\dot{\mathrm{V}}_3(\mathrm{x}(t),t)=\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{Q}\mathrm{x}(t)-\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t-h)\mathrm{Q}\mathrm{x}(t-h) \tag{3.56}
$$

şeklinde elde edilebilir. Sonuç olarak, (3.54), (3.55) ve (3.56)'nın birleştirilmesiyle seçilen Lyapunov-Krakovskii aday fonksiyonelinin türevi

$$
\begin{aligned}
\dot{\mathrm{V}}(\mathrm{x}(t),t) &\le \dot{\mathrm{V}}_1(\mathrm{x}(t),t)+\dot{\mathrm{V}}_2(\mathrm{x}(t),t)+\dot{\mathrm{V}}_3(\mathrm{x}(t),t) \\
&\le \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{P}+\mathrm{P}\mathrm{A}+\bar{h}\mathrm{S}+\mathrm{Y}+\mathrm{Y}^{\mathrm{T}})\mathrm{x}(t)+2\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)(\mathrm{P}\mathrm{M}_{\mathrm{s}}-\mathrm{Y})\mathrm{x}(t-h) \\
&\quad +\bar{h}[\mathrm{A}\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\mathrm{M}_{\mathrm{s}}\mathrm{x}(t-h)]^{\mathrm{T}}\mathrm{Z}[\mathrm{A}\mathrm{x}(t)+\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)+\mathrm{M}_{\mathrm{s}}\mathrm{x}(t-h)] \\
&\quad +\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{Q}\mathrm{x}(t)-\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t-h)\mathrm{Q}\mathrm{x}(t-h)+\mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{B}_1^{\mathrm{T}}\mathrm{P}\mathrm{x}(t)+\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{P}\mathrm{B}_1\mathrm{w}(t)
\end{aligned}
\tag{3.57}
$$

şeklinde sınırlanabilir. Genişletilmiş durum vektörü $\chi^{\mathrm{T}} := [\mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t)\ \mathrm{x}^{\mathrm{T}}(t-h)\ \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)]$ olarak tanımlanabilir. Eğer $\Omega < 0$ sağlanırsa, $\dot{\mathrm{V}}(\mathrm{x}(t),\mathrm{t}) + \mathrm{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{z}(t) - \gamma^2 \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t) \le \chi^{\mathrm{T}}(\mathrm{t})\Omega\chi(\mathrm{t})$ olur.

Buradan Ω,

$$\mathfrak{V} := \begin{bmatrix} \mathfrak{V}_{11} & \mathrm{PM_s} - \mathrm{Y} + \bar{h}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{ZM_s} & \bar{h}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{ZB_1} + \mathrm{PB_1} \\ * & -\mathrm{Q} + \bar{h}\mathrm{M_s^T}\mathrm{ZM_s} & \bar{h}\mathrm{M_s^T}\mathrm{ZB_1} \\ * & * & -\gamma^2\mathrm{I} + \bar{h}\mathrm{B_1^T}\mathrm{ZB_1} \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

şeklinde elde edilebilir. Burada, $\mathfrak{V}_{11} = \mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{P} + \mathrm{PA} + \bar{h}\mathrm{S} + \mathrm{Y} + \mathrm{Y}^{\mathrm{T}} + \mathrm{Q} + \bar{h}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{ZA} + \bar{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}}\mathrm{C}$ şeklindedir. $\forall t \ge 0$ için $\mathrm{w}(t) \equiv 0$ olduğunda, $\dot{\mathrm{V}}(\mathrm{x}(t),\mathrm{t}) < 0$, (3.43) sisteminin küresel asimptotik olarak kararlı olduğunu garanti eder. Ayrıca, $\dot{\mathrm{V}}(\mathrm{x}(t),\mathrm{t}) + \mathrm{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{z}(t) - \gamma^2\mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t) \le 0$ her iki taraftan 0'dan sonsuza kadar entegre edilirse;

$$\lim_{t\to\infty} \mathrm{V}(\mathrm{x}(t),t) - \mathrm{V}(\mathrm{x}(0),0) + \int_0^\infty \mathrm{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{z}(t)dt - \gamma^2 \int_0^\infty \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t)dt < 0 \tag{3.59}$$

elde edilir. Burada, $\mathrm{V}(\mathrm{x}(0),0) = 0$ ve $\lim_{\mathrm{t}\to\infty} \mathrm{V}(\mathrm{x}(t),t) > 0$ olduğu için, $\int_0^\infty \mathrm{z}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{z}(t)dt - \gamma^2 \int_0^\infty \mathrm{w}^{\mathrm{T}}(t)\mathrm{w}(t)dt < 0$ ifadesi geçerlidir ve bu $\|\mathrm{z}\|_2 < \gamma\|\mathrm{w}\|_2 \ \ \forall \mathrm{w}(t) \in L_2[0,\infty)$ anlamına gelir. Sonuç olarak, Schur tümleyenin (3.58)'ya uygulanmasıyla, (3.44)'te verilen DME elde edilir. Bu şekilde ispat sonlandırılmış olur. □

(3.43) sisteminde $\mathrm{M_s}$'in, $\mathrm{B_2K}$ ile $\bar{\mathrm{C}}$'ın $\mathrm{C}+\mathrm{DK}$ ile yerdeğiştirmesiyle (3.42) kapalı-çevrim sistemi elde edilir. $\bar{\mathrm{L}} = \mathrm{KX}$ olarak tanımlanması ve Yardımcı Teorem 3.3'in genişletilmesiyle $\mathrm{u}(t) = \mathrm{Kx}(t)$ formunda durum geri beslemeli optima kontrolör sentezini veren Teorem 3.3 aşağıdaki gibi elde edilebilir.

Teorem 3.3 [57] $\bar{h}$ ve γ gibi pozitif skaler sabitleri verilmiş olsun. Aşağıdaki matris eşitsizliklerini sağlayan, simetrik pozitif tanımlı X, $\bar{\mathrm{Q}}$, $\bar{\mathrm{S}}$, $\bar{\mathrm{Y}}$, $\bar{\mathrm{Z}}$, T matrisleri ve uygun boyutlu $\bar{\mathrm{L}}$ matrisi varsa, (3.43) kapalı-çevrim sistemi, $\mathrm{u}(t) = \bar{\mathrm{L}}\mathrm{X}^{-1}\mathrm{x}(t)$ kontrol

kuralı altında (3.40)'ı sağlayan herhangi bir h zaman gecikmesi değeri için, γ gibi bir bozucu azaltma seviyesi ile küresel asimptotik kararlı olur.

$$\Upsilon = \begin{bmatrix} \Upsilon_{11} & B_2\bar{L}-\bar{Y} & B_1 & 0 & XC^T+\bar{L}^TD^T & \bar{h}XA^T & 0 \\ * & -\bar{Q} & 0 & 0 & 0 & \bar{h}\bar{L}^TB_2^T & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 & \bar{h}B_1^T & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}\bar{Z} & 0 & 0 & \bar{Z} \\ * & * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -T & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -XT^{-1}X \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.60)$$

Burada, $\Upsilon_{11} = XA^T + AX + \bar{h}\bar{S} + \bar{Y} + \bar{Y}^T + \bar{Q}$ ve

$$\begin{bmatrix} \bar{S} & \bar{Y} \\ \bar{Y}^T & \bar{Z} \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (3.61)$$

şeklinde olmak üzere, γ, $\forall t \geq 0$ için $w(t)$'den $z(t)$'ye kapalı-çevrim sistemin H_∞ normunun üst sınırıdır ve $u(t) = \bar{L}X^{-1}x(t)$, H_∞ kontrolörünün γ ile ilişkili kontrol kuralıdır.

İspat: Schur tümleyenin (Boyd vd. [20]), (3.58) matris eşitsizliğine uygulanmasıyla $\Omega < 0$ eşdeğer olarak,

$$\lambda := \begin{bmatrix} \lambda_{11} & PB_2K-Y & PB_1 & \bar{h}A^TZ & C^T+K^TD^T \\ * & -Q & 0 & \bar{h}K^TB_2^TZ & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \bar{h}B_1^TZ & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}Z & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.62)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada, $\lambda_{11} = A^TP + PA + \bar{h}S + Y + Y^T + Q + \bar{h}A^TZA$ şeklindedir.

(3.62) eşitsizliğinin, $X := P^{-1}$ olmak üzere sağından ve solundan $\mathrm{diag}(X, X, I, X, I)$ ile çarpılması durumunda ve $\bar{S} := XSX$, $\bar{Y} := XYX$, $\bar{Z} := XZX$, $\bar{Q} := XQX$ benzerlik dönüşümlerinin yapılmasıyla,

$$\Theta := \begin{bmatrix} \Theta_{11} & B_2KX - \bar{Y} & B_1 & \bar{h}XA^TZX & XC^T + XK^TD^T \\ * & -\bar{Q} & 0 & \bar{h}XK^TB_2^TZX & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \bar{h}B_1^TZX & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}\bar{Z} & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.63)$$

olarak bulunur. Burada, $\Theta_{11} = XA^T + XA + \bar{h}\bar{S} + \bar{Y} + \bar{Y}^T + \bar{Q} + \bar{h}A^TZA$ dır.

(3.63) ifadesinin yeniden düzenlenmesiyle

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & B_2KX - \bar{Y} & B_1 & \bar{h}XA^TX^{-1}\bar{Z} & XC^T + XK^TD^T \\ * & -\bar{Q} & 0 & \bar{h}XK^TB_2^TX^{-1}\bar{Z} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & \bar{h}B_1^TX^{-1}\bar{Z} & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}\bar{Z} & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.64)$$

elde edilir. Burada, $\Theta_{11} = XA^T + XA + \bar{h}\bar{S} + \bar{Y} + \bar{Y}^T + \bar{Q} + \bar{h}A^TZA$ şeklindedir. $\bar{\Phi}$, bileşenlerine

$$\Theta = \Theta_0 + \Theta_1 + \Theta_1^T \qquad (3.65)$$

olarak ayrıştırılabilir. Burada,

$$\Theta_0 := \begin{bmatrix} \Theta_{11} & B_2KX - \bar{Y} & B_1 & 0 & XC^T + XK^TD^T \\ * & -\bar{Q} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ * & * & * & -\bar{h}\bar{Z} & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.66)$$

ve

$$\Theta_1 := \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \bar{h}XA^TX^{-1}\bar{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{h}XK^TB_2^TX^{-1}\bar{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{h}B_1^TX^{-1}\bar{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} < 0 \qquad (3.67)$$

şeklinde gösterilebilir.

Açıktır ki Θ_1, $\Theta_1 = \Pi_1^{\mathrm{T}} \mathrm{X}^{-1} \Pi_2$ şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\Pi_1 = [\bar{h}\mathrm{AX} \;\; \bar{h}\mathrm{B}_2\mathrm{KX} \;\; \bar{h}\mathrm{B}_1 \;\; 0 \;\; 0],$$

$\Pi_2 = [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; \overline{\mathrm{Z}} \;\; 0]$ dır.

Bunun yanında, $\mathrm{T}^{\mathrm{T}} = \mathrm{T} > 0$ gibi herhangi bir pozitif tanımlı simetrik matris için

$$\Pi_1^{\mathrm{T}} \mathrm{X}^{-1} \Pi_2 + (\Pi_1^{\mathrm{T}} \mathrm{X}^{-1} \Pi_2)^{\mathrm{T}} \leq \Pi_1^{\mathrm{T}} \mathrm{T}^{-1} \Pi_1 + \Pi_2^{\mathrm{T}} (\mathrm{XT}^{-1}\mathrm{X})^{-1} \Pi_2 \qquad (3.68)$$

sınırlandırılmış eşitsizlik geçerlidir. Bu sebeple, (3.68) ifadesi (3.65)'te yerine konulursa

$$\Theta \leq \Theta_0 + \Pi_1^{\mathrm{T}} \mathrm{T}^{-1} \Pi_1 + \Pi_2^{\mathrm{T}} (\mathrm{XT}^{-1}\mathrm{X})^{-1} \Pi_2 \leq 0 \qquad (3.69)$$

eşitsizliği elde edilir. Daha sonra Schur tümleyenini (3.69)'a uygulanması ve $\overline{\mathrm{L}} := \mathrm{KX}$ olarak tanımlanması bizim (3.60)'de verilen matris eşitsizliği şartlarını elde etmemizi sağlar.

Teorem 3.3'ün ışığında, tüm $t \geq 0$ için, $\mathrm{w}(t)$'den $\mathrm{z}(t)$'ye en küçük H_∞ normunu elde etmek amacıyla, simetrik pozitif tanımlı X, $\overline{\mathrm{Q}}$, $\overline{\mathrm{S}}$, $\overline{\mathrm{Y}}$, $\overline{\mathrm{Z}}$, T matrisleri ve uygun boyutlu $\overline{\mathrm{L}}$ matrisi varsa ve pozitif skaler γ için

$$\begin{aligned} &\min \ \gamma \\ &\text{kosullar: } (3.60),(3.61) \end{aligned}$$

doğrusal olmayan optimizasyon problemi çözülebilir. Eğer yukarıdaki optimizasyon probleminin çözümü varsa, verilen problem için alt en iyi kontrolör $\mathrm{u}(t) = \overline{\mathrm{L}}\mathrm{X}^{-1}\mathrm{x}(t)$ kontrol kuralı tarafından oluşturulabileceği söylenebilir. (3.60)'deki matris eşitsizliği şartları, doğrusal olmayan $-\mathrm{XT}^{-1}\mathrm{X}$ teriminden dolayı DME formunda değildir. Bu nedenle ancak konik tamamlayıcı yöntemi kullanılarak alt en iyi kontrolörü elde edilebilir.

Konik tamamlayıcı algoritması fikri,

$$\mathrm{rank}\begin{bmatrix} \mathrm{X} & \mathrm{I} \\ \mathrm{I} & \mathrm{S} \end{bmatrix} \leq \mathrm{n} + \mathrm{m} \qquad (3.70)$$

şeklinde tanımlanan kısıtla ilişkilendirilebilir. Problemin çözümü için,

$$K(X,S) = \begin{bmatrix} X & I \\ I & S \end{bmatrix} \geq 0$$

şeklindeki doyumlu kısıtın tanımlanmasına gerek duyulmaktadır. Buradaki optimizasyon problemi ise

$$\begin{aligned} &\min iz\ XS \\ &\text{kosul } (3.72) \end{aligned}$$

şeklinde tanımlanır. Buradaki rank problemi konik tamamlayıcı problem olarak adlandırılır. Problemin çözümü için bir doğrusallaştırma yöntemi kullanılabilir. Verilen bir (X_0, S_0) noktasında, $iz\ XS$'in bir doğrusal yaklaşımı,

$$\phi_{lin}(X,S) = \text{sabit} + iz\ (S_0X + X_0S) \qquad (3.71)$$

şeklindedir. Doğrusallaştırma algoritması kavramsal olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Algoritma 3.1

1. X_0 ve S_0 gibi uygun bir çözüm noktası bul eğer çözüm yoksa algoritmadan çık. *k*=0 yap.

2. $V_k = S_k$ ve $W_k = X_k$ olarak ayarla X_{k+1}, S_{k+1}'i ve çözüm değişkenleri için aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliği problemini çöz

$$\begin{aligned} &P_k = \min\ iz(V_kX + W_kS) \\ &\text{kosul } (3.72) \end{aligned}$$

3. Eğer durdurma kriterleri sağlanırsa algoritmadan çık. Aksi taktirde küme $k = k+1$ olarak al ikinci Adıma git.

Algoritmanın birinci ve ikinci adımı basit DME problemidir. Burada iç nokta metodu gibi pekçok algoritma kullanılabilir. Devamında P_k DME problemlerinin çözümünde gerekli olan iç basamakları ayırmak için ikinci adımı bir dış iterasyon olarak sayılır.

Aşağıdaki Teorem bu algoritmanın yakınsandığını gösterir.

Teorem 3.4 $t_k := iz(\mathrm{X_{k+1}S_k + S_{k+1}X_k}), \mathrm{k} \geq 0$ dizisi $2\mathrm{n}$ ve azalanlarınca alttan sınırlandırılmıştır. Bu nedenle (t_k) dizisi, $\mathrm{t_{opt}} \geq 2\mathrm{n}$ değerine yakınsar. Bu eşitsizlik sadece ve sadece $\mathrm{XS} = \mathrm{I}$ en iyi noktasında geçerlidir.

İspat: $\mathrm{k} > 0$ olsun. Daha sonra $\mathrm{X_{k-1}, S_{k-1}}$ uygun ve $\mathrm{X_{k+1}, S_{k+1}}$, (P_k) problemi için en iyi değerdir, aşağıdaki eşitsizlik yazılabilir.

$$t_k \leq iz(\mathrm{X_{k-1}S_k + S_{k-1}X_k}) = \mathrm{t_{k-1}} \tag{3.72}$$

Burada, t_k $2\mathrm{n}$ değeri ile alttan sınırlandırılır. Buradan hareketle,

$$\begin{aligned} t_k &= iz(\mathrm{X_{k+1}S_k + S_{k+1}X_k}) \geq \inf_{\mathrm{K(V,W)\geq 0}} iz(\mathrm{VX_k + WS_k}) \\ &= 2iz(\mathrm{X_k^{1/2}S_kX_k^{1/2}})^{1/2} \geq 2\mathrm{n} \end{aligned} \tag{3.73}$$

eşitsizliği yazılabilir. Bu son eşitszilik eğer $t_{opt} = 2\mathrm{n}$ ise, o halde $\mathrm{XS} = \mathrm{I}$ anlamına gelmektedir. □

Önerilen konik tamamlayıcı algoritmasının mevcut algoritmalarla kıyaslanması durumunda çok daha az konservatif sonuçlar verdiği yapılan nümerik çalışmalarla ortaya konulmuştur. Moon vd. [59], çalışmalarında, konik tamamalyacı algoritmasını H_∞ kontrolü probleminin çözümünde kullanmışlardır.

Yukarıda çalışma işleyişi açıklanan konik tamamalayıcı algoritmasının kendi problemimize uygulanması için ilk olarak $\mathrm{R} = \mathrm{R^T} > 0$ gibi yeni bir değişken $\mathrm{R} \leq \mathrm{XT^{-1}X}$ şartıyla tanımlanır ve (3.60)'taki limitler aşağıdaki eşitsizliklerle yer değiştirilir.

$$\overline{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathrm{XA^T + AX + \bar{h}\bar{S} + \bar{Y} + \bar{Y}^T + \bar{Q}} & \mathrm{B_2\bar{L} - \bar{Y}} & \mathrm{B_1} & 0 & \mathrm{XC^T + \bar{L}^TD^T} & \mathrm{\bar{h}XA^T} & 0 \\ * & \mathrm{-\bar{Q}} & 0 & 0 & 0 & \mathrm{\bar{h}\bar{L}^TB_2^T} & 0 \\ * & * & \mathrm{-\gamma^2 I} & 0 & 0 & \mathrm{\bar{h}B_1^T} & 0 \\ * & * & * & \mathrm{-\bar{h}\bar{Z}} & 0 & 0 & \mathrm{\bar{Z}} \\ * & * & * & * & \mathrm{-I} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & \mathrm{-T} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \mathrm{-R} \end{bmatrix} < 0 \tag{3.74}$$

$$\begin{bmatrix} \mathrm{\bar{S}} & \mathrm{\bar{Y}} \\ \mathrm{\bar{Y}^T} & \mathrm{\bar{Z}} \end{bmatrix} \geq 0 \tag{3.75}$$

$$\begin{bmatrix} \overline{R} & \overline{X} \\ \overline{X} & \overline{T} \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} \overline{R} & I \\ I & R \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} \overline{X} & I \\ I & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} \overline{T} & I \\ I & T \end{bmatrix} \geq 0 \qquad (3.76)$$

Buradan $R^{-1} - X^{-1}TX^{-1} \geq 0$ eşitsizliği elde edilebilir ve Schur tümleyeni ile $\overline{R} := \overline{R}^{-1}$, $\overline{X} := X^{-1}$, $\overline{T} := T^{-1}$ tanımlamaları (3.76)'deki eşitsizliklerin elde edilmesini sağlar. Buradan hareketle (3.42)'da verilen kapalı-çevrim sisteminin en küçük H_∞ normunu bulmak için,

$$\begin{aligned} &\min iz\,(\overline{R}R + \overline{X}X + \overline{T}T) \\ &\text{kosullar: } (3.74),\ (3.75), (3.76) \end{aligned}$$

doğrusallaştırılmış optimizasyon problemi kullanılabilir. Sonuç olarak, γ_0 gibi en küçük H_∞ kazancını ve $\overline{h}_0$ gibi en büyük kabul edilebilir gecikme zamanı sınırını sağlayan alt en iyi kontrolör kazancına aşağıdaki konik tamamlayıcı algoritmasının çözülmesiyle ulaşılabilinir.

Algoritma 3.2

1. k=0 yap ve (3.74), (3.75), ve (3.76)'daki doğrusal matris eşitsizlikleri limitlerini sağlayan $\{\overline{X}_0, X_0, \overline{R}_0, R_0, \overline{T}_0, T_0\}$ gibi uygun bir çözüm kümesini; yeterince büyük bir γ ve küçük $\overline{h}$ başlangıç değerleri için tara.

2. $\{\overline{X}, X, \overline{R}, R, \overline{T}, T\}$ değişkenleri için aşağıdaki doğrusal matris eşitsizliği optimizasyon problemini çöz

$$\begin{aligned} &\min iz\,(\overline{R}_k R + \overline{X}_k X + \overline{T}_k T + \overline{R}R_k + \overline{X}X_k + \overline{T}T_k) \\ &\text{kosullar } (3.74), (3.75), (3.76) \end{aligned}$$

ve şu atamaları gerçekleştir: $\overline{X}_{k+1} := \overline{X}$, $X_{k+1} := X$, $\overline{R}_{k+1} := \overline{R}$, $R_{k+1} := R$, $\overline{T}_{k+1} := \overline{T}$, $T_{k+1} := T$

3. Eğer $R \leq XT^{-1}X$ kısıtı yukarıdaki çözüm kümesi için uygunsa, o halde $\gamma_0 = \gamma$, $\overline{h}_0 = \overline{h}$ için γ bir miktar azaltıldaktan ve $\overline{h}$ bir miktar arttırıldıktan sonra birinci adıma geri dön. Aksi taktirde küme $k = k + 1$ olarak al ikinci adıma git ve optimizasyon

işlemine gerekli iterasyon sayısı kadar, veya $\mathrm{R} \le \mathrm{XT}^{-1}\mathrm{X}$ şartını sağlayıncaya kadar devam et. Eğer çözüm yoksa algoritmadan çık.

Bu algoritma ile uygun bir çözüm kümesi bulunabilirse, elde edilebilir en küçük γ'nın, (3.42) kapalı-çevrim sisteminin alt en iyi H_∞ normu olduğu söylenebilir. Bu durumda, alt en iyi durum geri-beslemeli optimal kontrolörü $\mathrm{u}(t) = \overline{\mathrm{L}}\mathrm{X}^{-1}\mathrm{x}(t)$ formunda elde edilebilir.

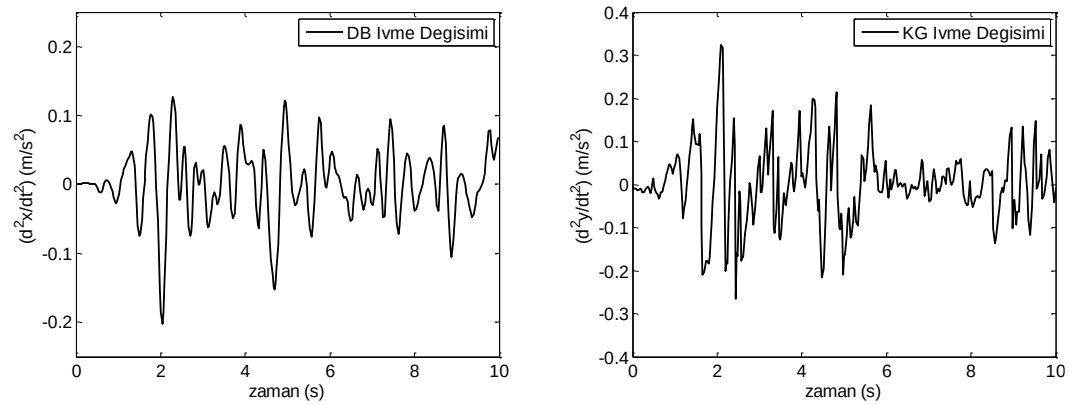
BÖLÜM 4

ASİMETRİK YAPISAL BİR SİSTEMİN GECİKMEYE BAĞLI OPTİMAL KONTROLÜ İÇİN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

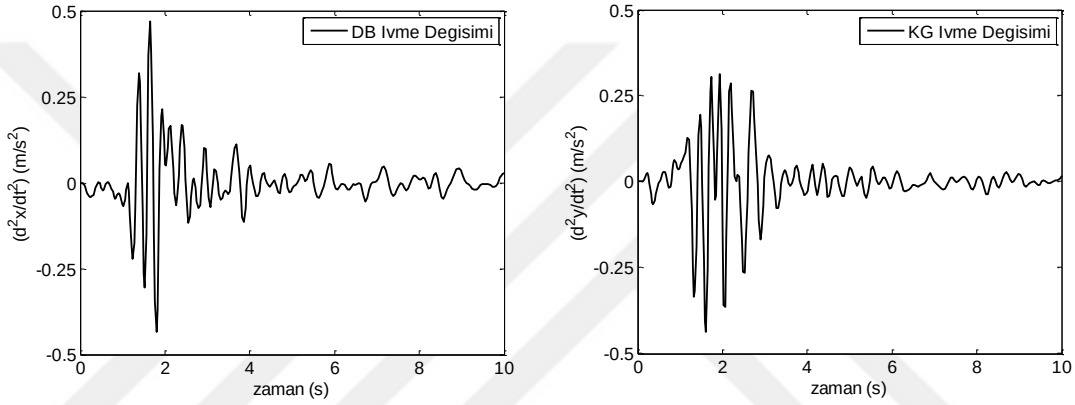
Yüksek lisans tezinin bu bölümünde, Bölüm 3'de açıklanan teoremlerin uygulanabilirliklerinin gösterilmesi amacıyla simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu bölümde öncelikle asimetrik yapısal sistemin durum geri-beslemeli optimal kontrolörünün etkinlikleri incelenmiş, daha sonra kontrol giriş sinyaline zaman gecikmesi uygulanmıştır. Daha sonra, tezde önerilen gecikmeye-bağlı optimal kontrolör ile sistemin gerekli kararlılık kısıtlarında ulaşılabileceği en üst gecikme zamanı ve bozucu bastırma seviyesi belirlenerek yapısal sisteme uygulanmıştır.

4.1 Asimetrik Yapısal Sisteme Uygulanan Bozucu Deprem Hareketleri

Yüksek lisans tezinde yapılacak olan çalışmalarda, modellenen asimetrik yapısal sisteme daha önce yaşanmış olan bazı önemli yıkıcı depremler bozucu girişi olarak uygulanmıştır. Bu bozucu girişler, deprem anında deprem ölçüm istasyonlarında kaydedilen ve daha sonra MATLAB paket programına zamanın fonksiyonu şeklinde işlenmiş datalardan oluşmaktadır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla, yüksek lisans tezinde kullanılan, 1940 yılında meydana gelen M_w=7.1 şiddetindeki El-Centro depremi ve 1906 yılında meydana gelen M_w=7,8 şiddetindeki San Francisco depreminin ivme değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 4. 1 1940 El-Centro Depreminin Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerindeki zamana bağlı ivme değişimleri



Şekil 4. 2 1906 San Francisco Depreminin Doğu-Batı ve Kuzey-Güney yönlerindeki zamana bağlı ivme değişimleri

4.2 Durum Geri-Beslemeli Optimal Kontrolör için Simülasyon Çalışmaları

Bölüm 3'de sentez denklemleri verilen DME tabanlı durum geri-beslemeli optimal kontrolörünün performansları, Bölüm 2'de modellenen deprem etkisindeki asimetrik yapısal sistem için test edilmiştir. Aktif kontrol, Aktif Tendon Sistemi kullanılarak sisteme uygulanmıştır. Kontrolörlerin tasarımında MATLAB-Simulink paket programı ve DME'lerinin çözümünde YALMIP ayrıştırıcısı ile LMILAB çözücüsü kullanılmıştır [21]. Kontrolcünün performansının ölçülmesi çalışmasında asimetrik yapısal sisteme bozucu zemin hareketi olarak sırasıyla San Francisco ve El Centro depremleri uygulanmıştır.

Durum geri-beslemeli optimal kontrolör kazancına,

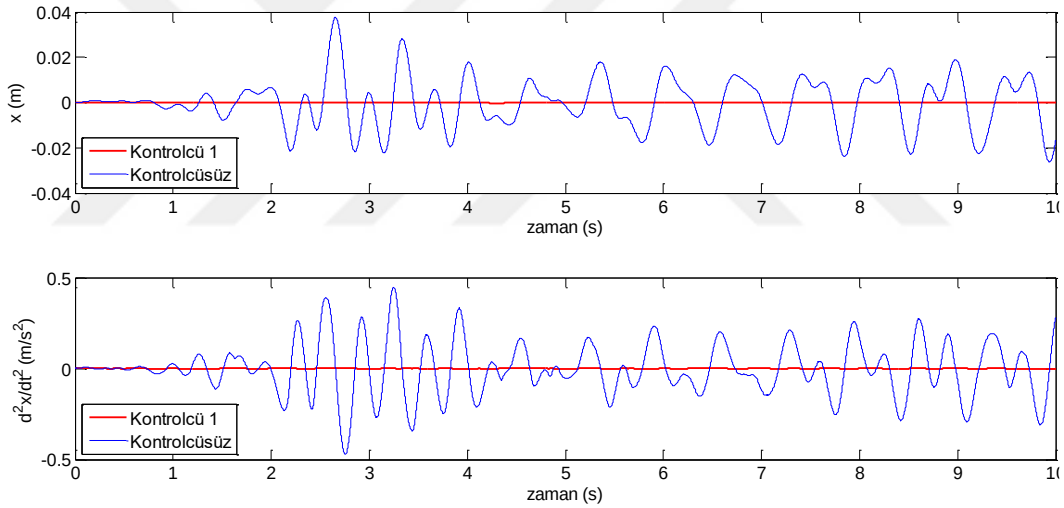
$$\min \ \gamma$$
$$\text{kosullar: } (3.37),(3.38)$$

optimizasyon probleminin çözümünden ulaşılmıştır. Bu optimizasyon probleminin çözümünden sistemin kararlılık şartlarındaki en düşük bozucu bastırma seviyesi γ'nın 0.020035 olduğu bulunmuştur. Kontrolör kazancı,

$$K = 10^3 \times \begin{bmatrix} 0.5332 & 0.4735 & -0.0506 & -0.0477 & 0.0060 & 0.0006 \\ 0.8518 & 0.4391 & -0.1671 & -0.0498 & 0.0144 & -0.0022 \\ -0.7847 & -0.0825 & 0.2367 & 0.0092 & -0.0273 & 0.0020 \\ -1.1033 & -0.0481 & 0.3531 & 0.0112 & -0.0357 & 0.0049 \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir. Gösterim kolaylığı açısından, bundan sonraki bölümde durum geri-beslemeli optimal kontrolör, "Kontrolcü 1" olarak ifade edilecektir.

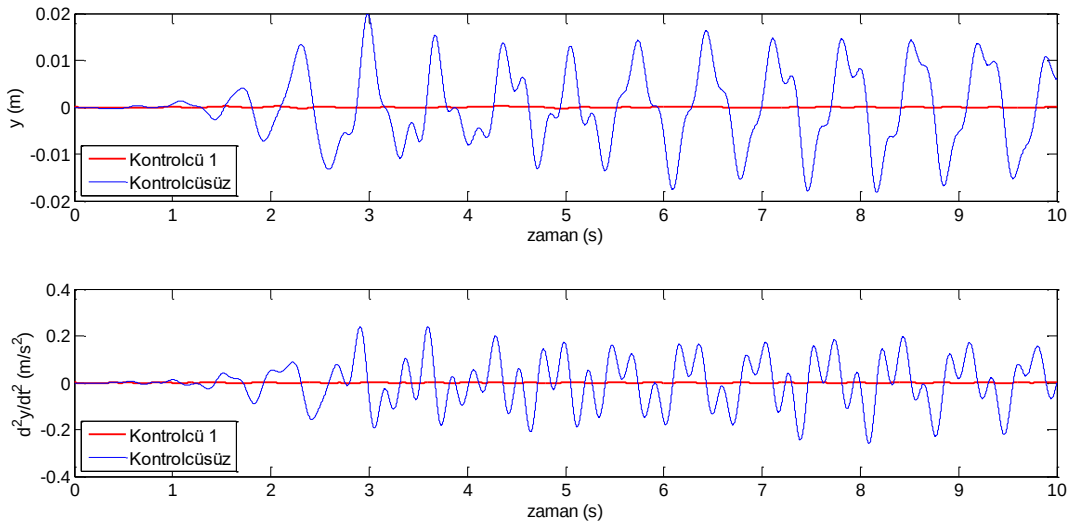
Şekil 4.3'de 1940 El Centro depremi etkisi altında yapının x hareketindeki zaman cevapları, durum geri-beslemeli optimal kontrolcülü (Kontrolcü 1) ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir.



Şekil 4. 3 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

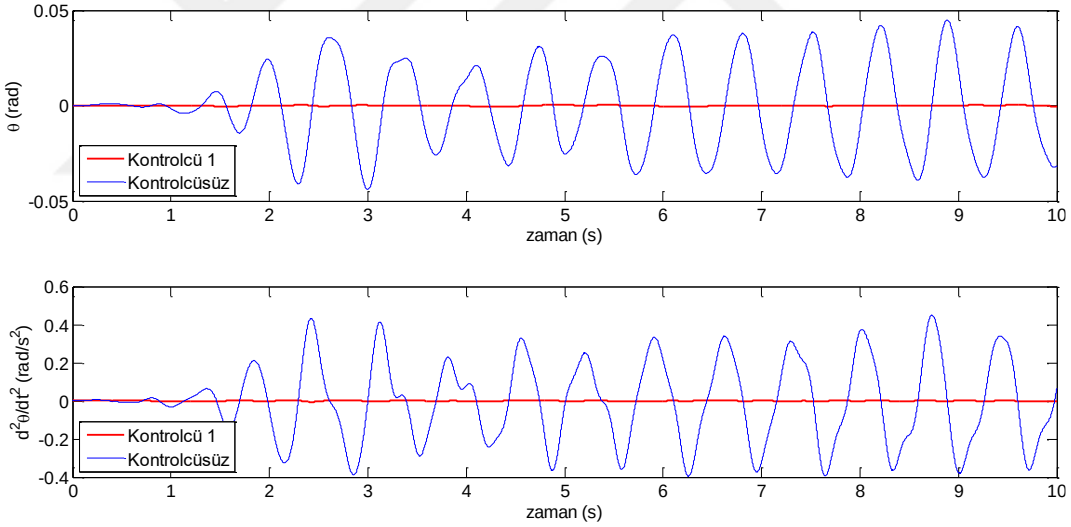
Şekil 4.3'den de gözlemlendiği gibi, tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.

Şekil 4.4'de 1940 El Centro depremi etkisi altında yapının y hareketindeki zaman cevapları, Kontrolcü 1 ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir. Tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.



Şekil 4. 4 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

Şekil 4.5'de 1940 El Centro depremi etkisi altında yapının θ hareketindeki zaman cevapları, Kontrolcü 1 ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir.

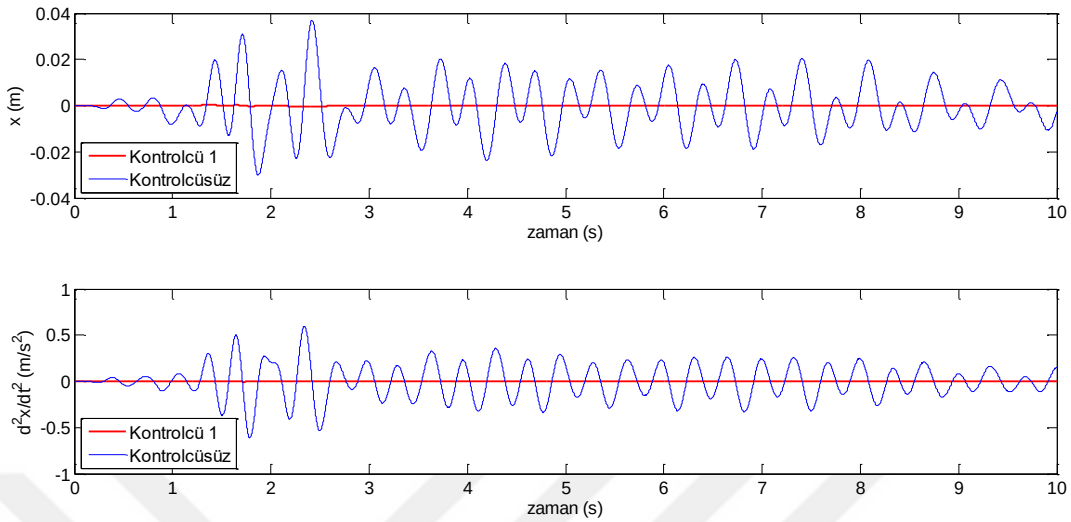


Şekil 4. 5 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

Şekil 4.5'den de gözlemlendiği gibi, tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.

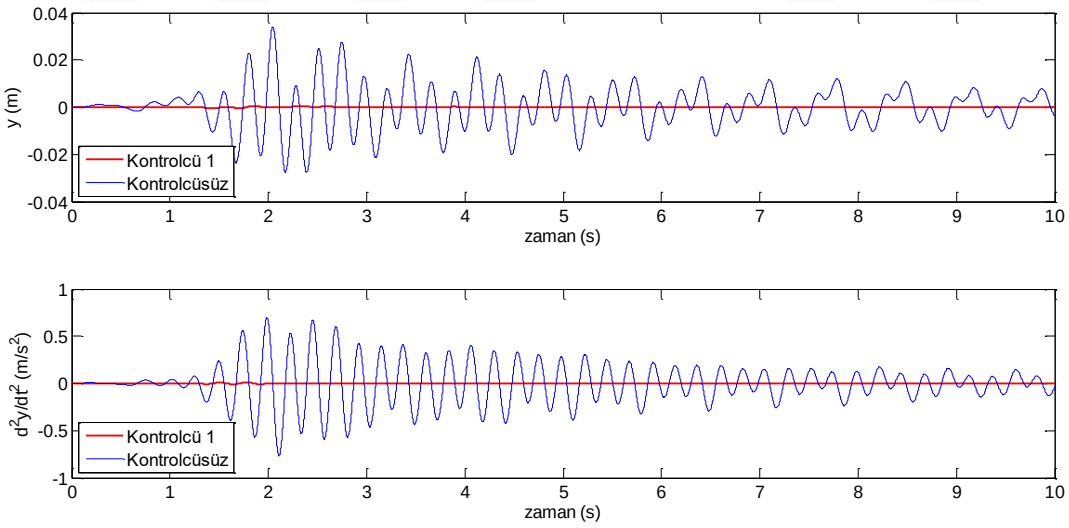
Benzer çalışma 1906 San Francisco depreminin sisteme bozucu hareket olarak etkitilmesiyle tekrarlanmıştır. Şekil 4.6'da 1906 San Francisco depremi etkisi altında yapının x hareketindeki zaman cevapları Kontrolcü 1 ve kontrolcüsüz olarak

gösterilmiştir. Şekil 4.6'dan da gözlemlendiği gibi, tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.



Şekil 4. 6 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

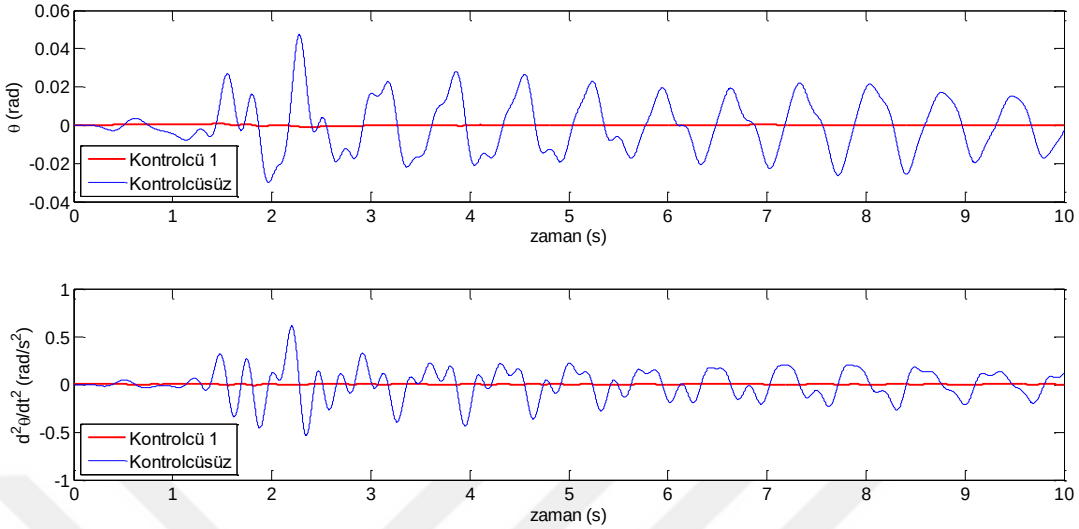
Şekil 4.7'de 1906 San Francisco depremi etkisi altında yapının y hareketindeki zaman cevapları Kontrolcü 1 ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir. Tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.



Şekil 4. 7 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

Şekil 4.8'de 1906 San Francisco depremi etkisi altında yapının θ hareketindeki zaman cevapları Kontrolcü 1 ve kontrolcüsüz olarak gösterilmiştir. Şekil 4.8'den de

gözlemlendiği gibi, tasarlanan Kontrolcü 1, titreşim genliklerinin azaltılmasında başarılı olmuştur.



Şekil 4. 8 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

Kontrolcü 1'in, yapılan simülasyon çalışmalarındaki performansının başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Çizdirilen grafiklerde gözlemlenen bozucu bastırma seviyelerini inceleyebilmek için zaman cevaplarının RMS değerleri hesaplanabilir. Matematikte karekök ortalama ya da kuadratik ortalama olarak bilinen RMS değeri, değişen miktarların büyüklüğünün ölçülmesinde kullanılan istatistik bir ölçüttür. RMS değeri, sürekli olarak değişen bir fonksiyonun sürekli olmayan değer serisi için hesaplanabilir. Karekök ortalama ismi, karelerin ortalamasının karekönünün alınmasından gelir. 1940 El-Centro ve 1906 San Francisco depremleri etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 için RMS değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2).

Çizelge 4.1 1940 El-Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile RMS değerleri

1940 El-Centro Depremi					
Kontrolcüsüz			Kontrolcü 1 ile		
Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim	Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim
x_1	0.0111	[m]	x	0.0001	[m]

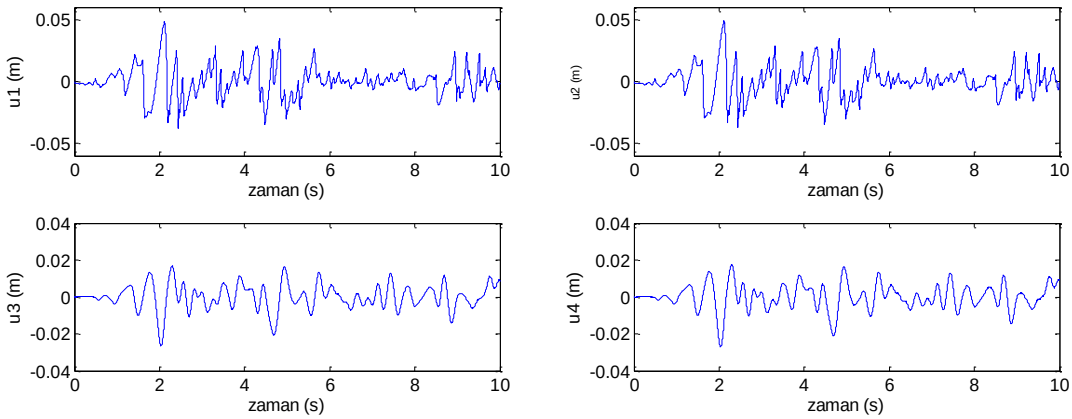
Çizelge 4.1 1940 El-Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile RMS değerleri (devamı)

1940 El-Centro Depremi					
Kontrolcüsüz			Kontrolcü 1 ile		
y_1	0.0080	[m]	y	0.0001	[m]
Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim	Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim
θ_1	0.0227	[rad]	θ	0.0002	[rad]
d^2x_1/dt^2	0.1448	[m/s²]	d^2x/dt^2	0.0006	[m/s²]
d^2y_1/dt^2	0.0962	[m/s²]	d^2y/dt^2	0.0010	[m/s²]
$d^2\theta_1/dt^2$	0.2092	[rad/s²]	$d^2\theta/dt^2$	0.0015	[rad/s²]

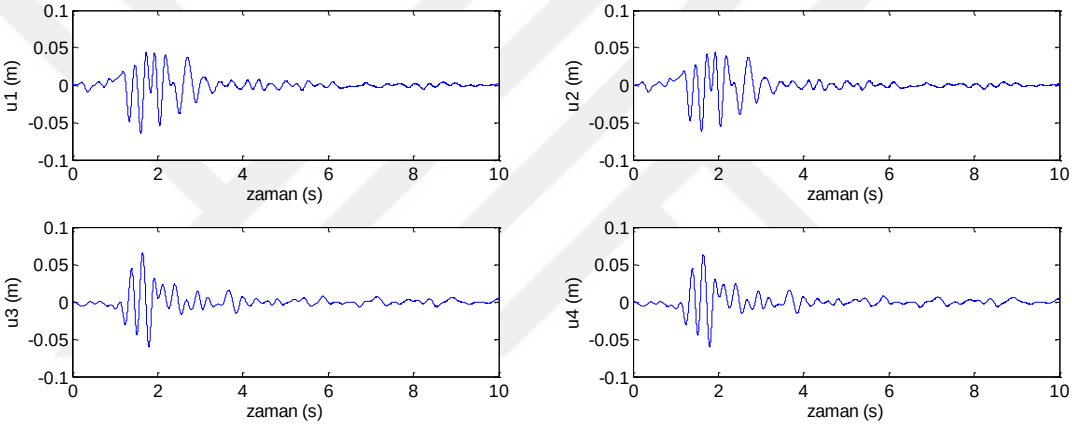
Çizelge 4.2 1906 San Francisco depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile RMS değerleri

1906 San Francisco Depremi					
Kontrolcüsüz			Kontrolcü 1 ile		
Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim	Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim
x_1	0.0109	[m]	x	0.0001	[m]
y_1	0.0093	[m]	y	0.0001	[m]
θ_1	0.0140	[rad]	θ	0.0003	[rad]
d^2x_1/dt^2	0.1853	[m/s²]	d^2x/dt^2	0.0009	[m/s²]
d^2y_1/dt^2	0.2172	[m/s²]	d^2y/dt^2	0.0018	[m/s²]
$d^2\theta_1/dt^2$	0.1592	[rad/s²]	$d^2\theta/dt^2$	0.0020	[rad/s²]

Durum geri-beslemeli optimal kontrolörün (Kontrolcü 1) 1940 El-Centro ve 1906 San Francisco depremi bozucu girişleri etkisindeki asimetrik yapısal sistemin aktif tendon sistemi elemanları olan tendonların yerdeğiştirmeleri, sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterilmektedir.

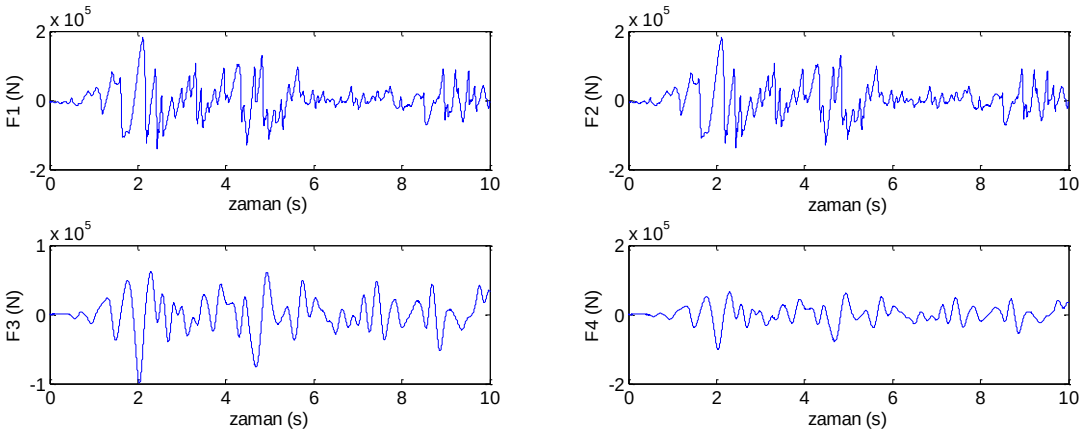


Şekil 4. 9 1940 El-Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemde Kontrolcü 1 için tendon yerdeğiştirmeleri

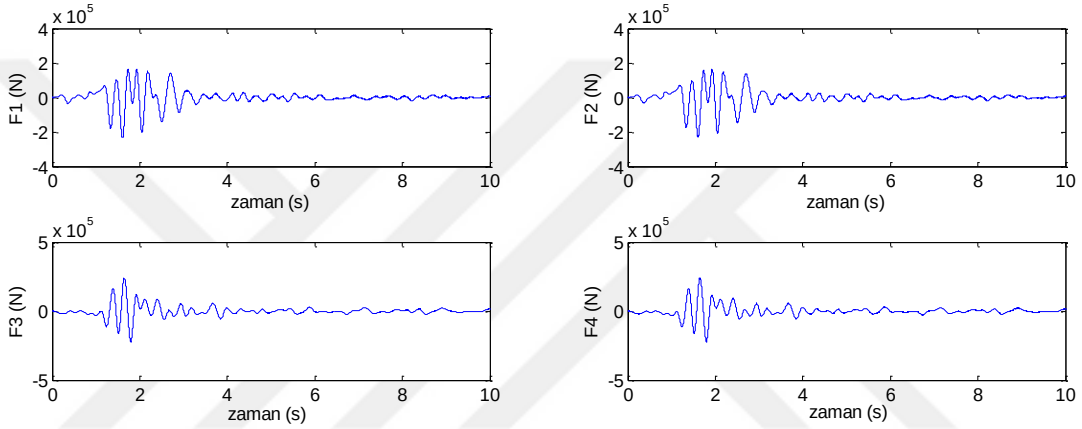


Şekil 4. 10 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemde Kontrolcü 1 için tendon yerdeğiştirmeleri

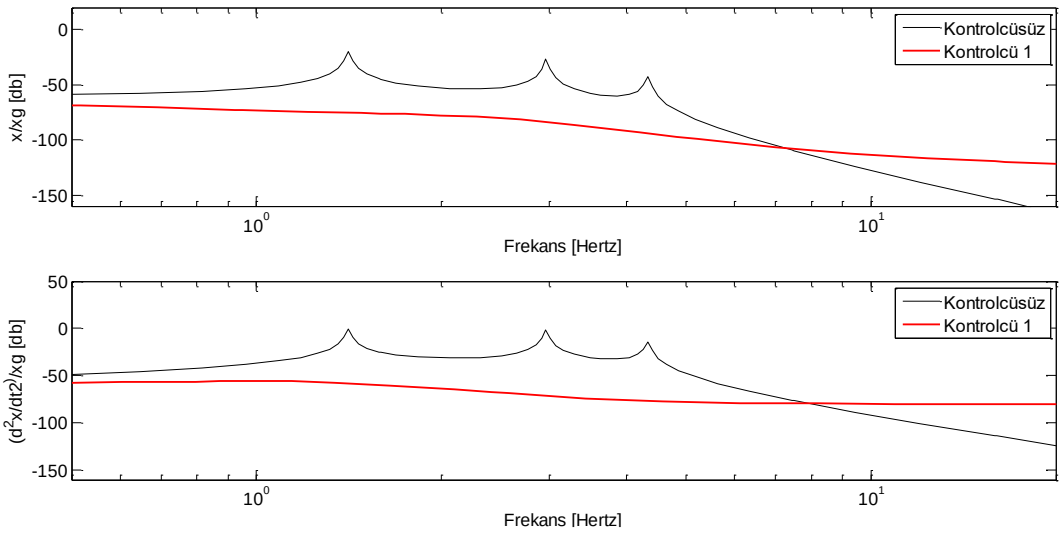
Durum geri-beslemeli optimal kontrolörün (Kontrolcü 1) 1940 El-Centro ve 1906 San Francisco depremi bozucu girişleri etkisindeki asimetrik yapısal sistemin titreşimlerinin azaltılması için ürettiği kontrol kuvvetleri, sırasıyla Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 11 1940 El-Centro depremi için Kontrolcü 1 kuvvetindeki değişim

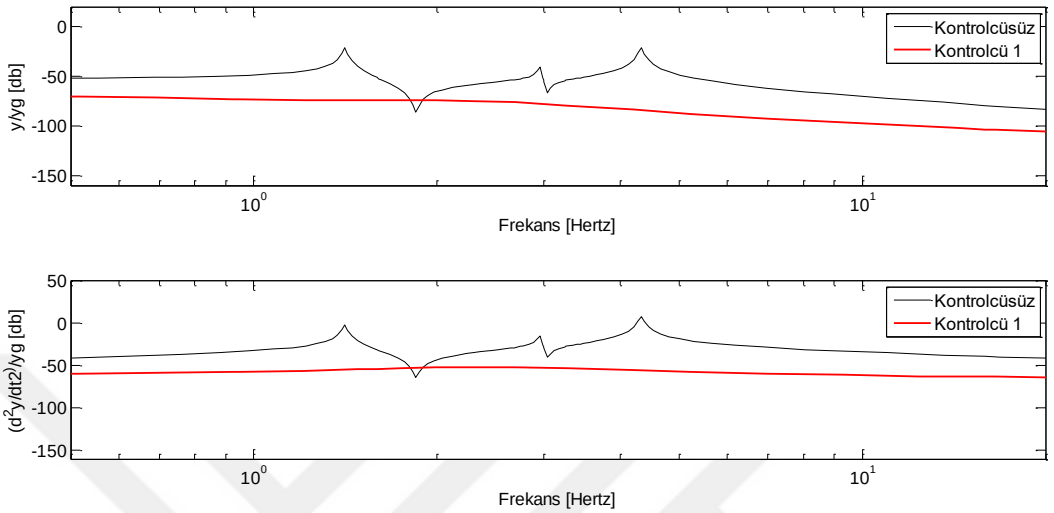


Şekil 4. 12 1906 San Francisco depremi için Kontrolcü 1 kuvvetindeki değişim



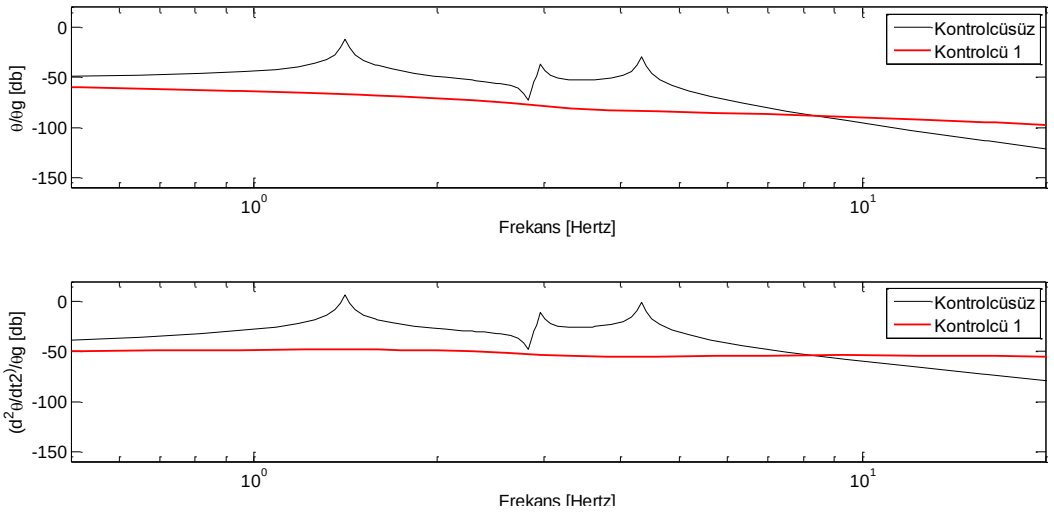
Şekil 4. 13 Asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları

Şekil 4.13'de asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları gösterilmektedir. Kontrolcü 1, tüm doğal frekans değerlerinde oldukça başarılı sönüm performansı göstererek, tüm modları etkin bir şekilde bastırmıştır.



Şekil 4. 14 Asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları

Şekil 4.14'de asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları gösterilmektedir. Kontrolcü 1, tüm doğal frekans değerlerinde oldukça başarılı sönüm performansı göstererek, tüm modları etkin bir şekilde bastırmıştır.



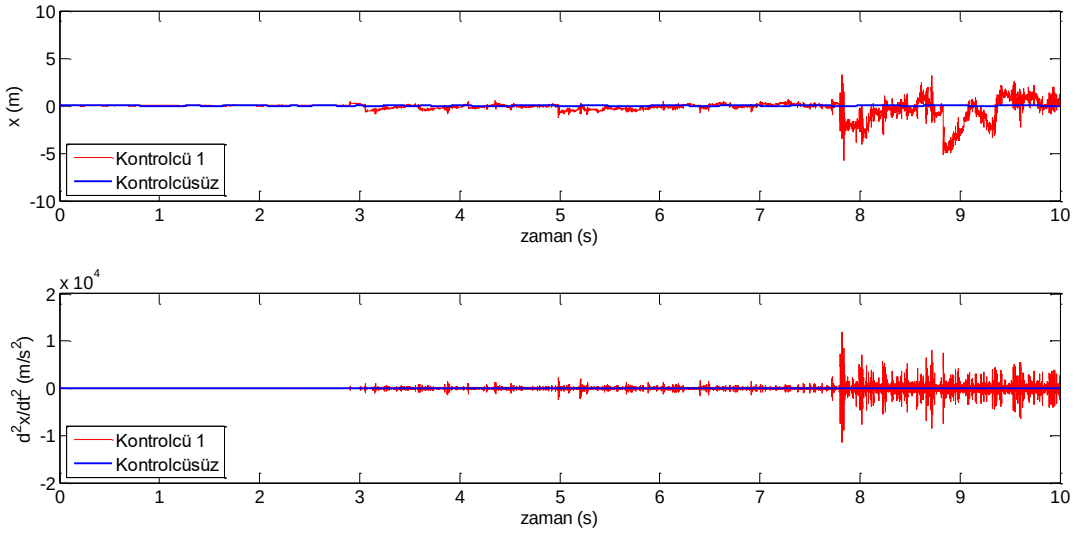
Şekil 4. 15 Asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları

Şekil 4.15’de asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 1 ile frekans cevapları gösterilmektedir. Kontrolcü 1, tüm doğal frekans değerlerinde oldukça başarılı sönüm performansı göstererek, tüm modları etkin bir şekilde bastırmıştır.

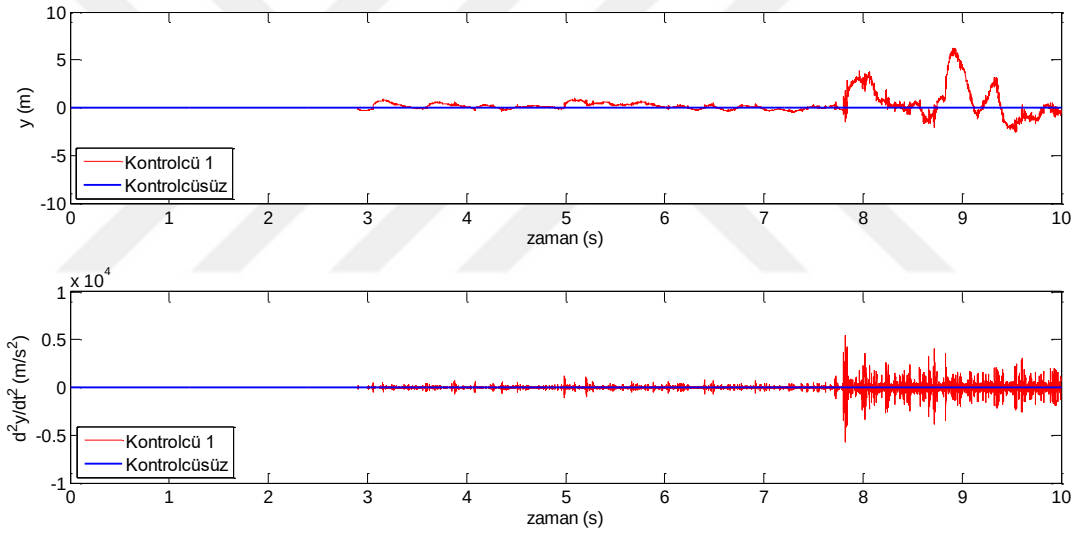
4.3 Kontrol Giriş Sinyalinde Zaman Gecikmesinin İncelenmesi

Birçok mühendislik sisteminde kötü performans ve kararsızlığa sebep olan problemlerden biri de sistemdeki zaman gecikmesidir. Kontrol girişindeki zaman gecikmesi olayının sistemin kapalı-çevrim kararlılığı üzerindeki olumsuz etkilerinin gösterilmesi amacıyla, tasarımı gerçekleştirilen durum geri-beslemeli optimal kontrolörün ürettiği kontrol kuvvetinin yapıya etkitilmesi sırasıda, kontrol giriş sinyaline zaman gecikmesi uygulanmıştır.

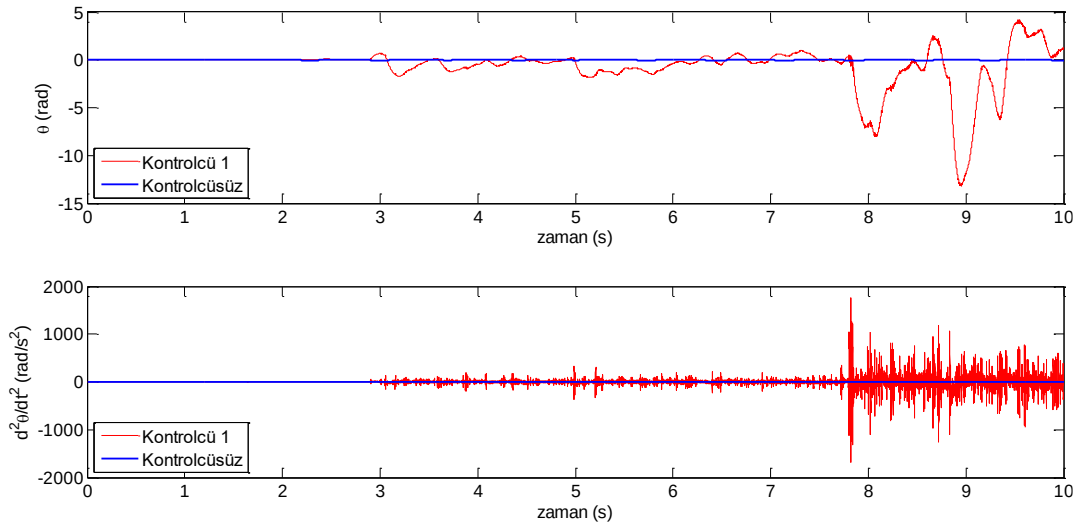
1940 El Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin durum geri-beslemeli optimal kontrolörün girişine uygulanan 0.00044 saniyelik zaman gecikmesinin, kapalı-çevrim sisteminin kararlılığını kaybettirdiği gözlemlenmektedir. Şekil 4.16, 4.17 ve Şekil 4.18'de deprem anında sistemin zamana bağlı yerdeğiştirme ve ivme cevapları, durum geri-beslemeli optimal kontrolörünün ürettiği kontrol sinyalinin 0.00044 saniyelik gecikmeyle yapıya iletilmesi durumu için çizdirilmiştir. Bu sonuçlardan 0.00044 saniyelik gecikmenin kapalı-çevrim sistemin kararlılığını bozduğu görülmektedir. Yapıya iletilen senkronize olmayan kontrol kuvvetinin beklenildiği gibi yapıda aşırı yer değiştirme ve ivmelenmelere neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 16 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

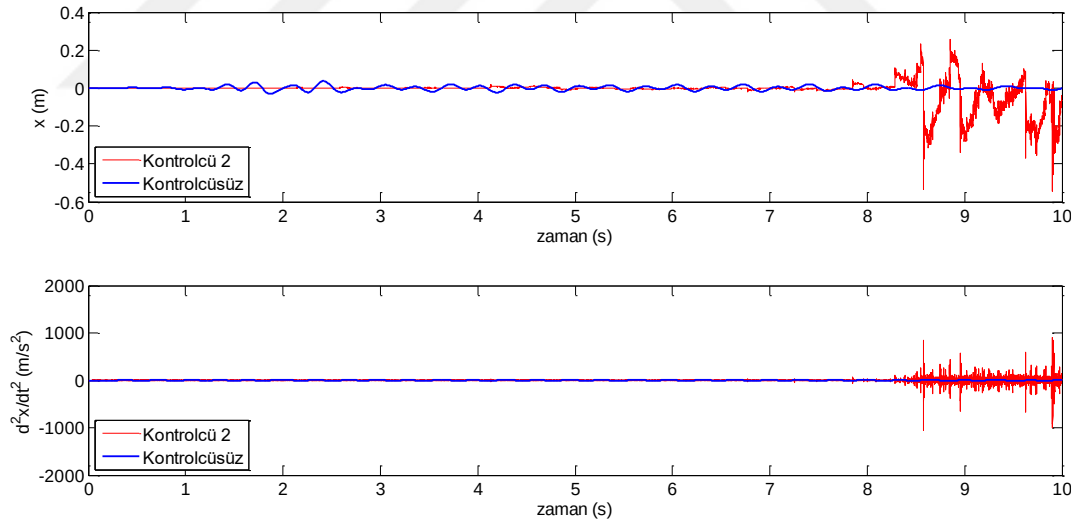


Şekil 4. 17 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

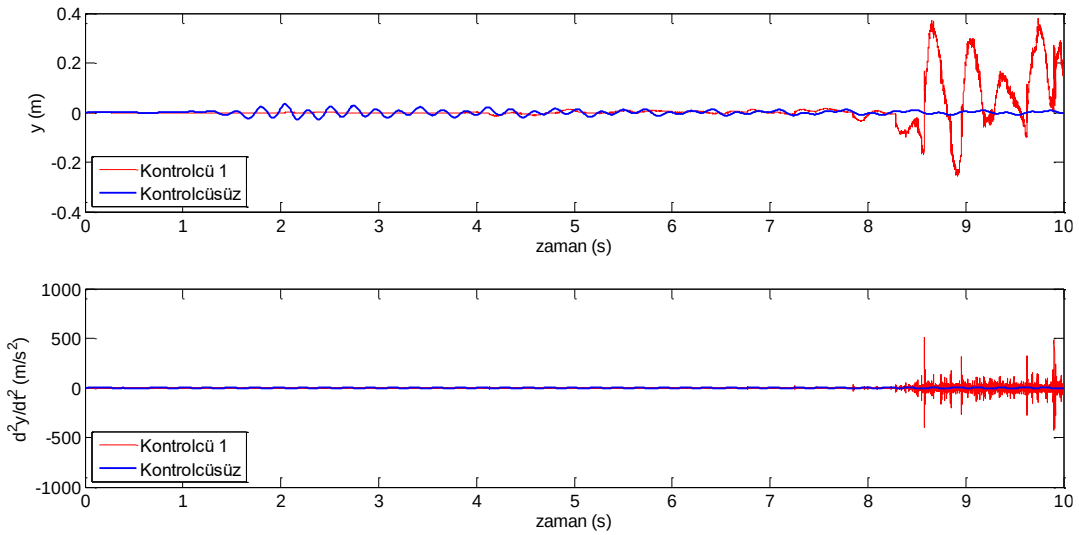


Şekil 4. 18 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00044 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

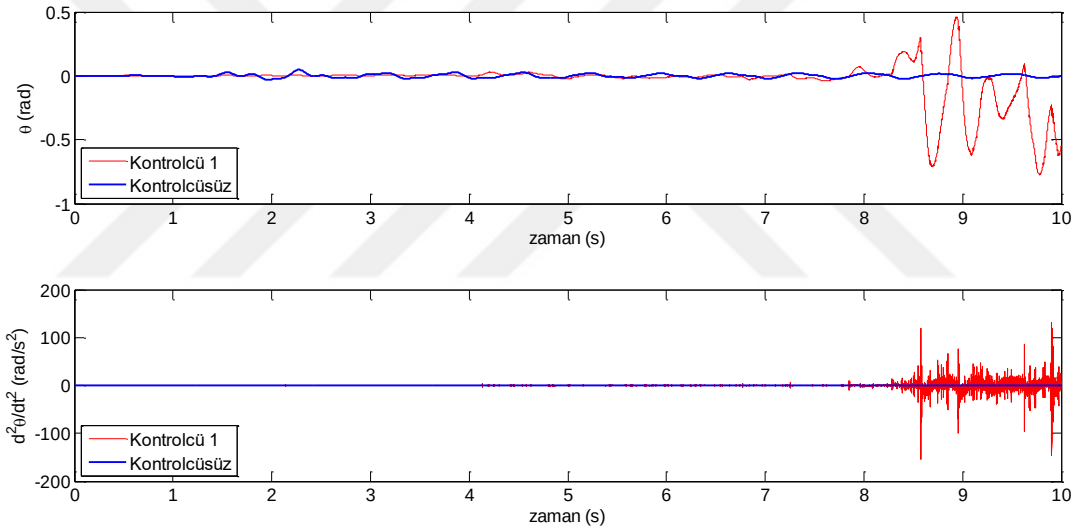
Benzer çalışma 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik bina modeli için de yapılmıştır. Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'te 0.00042 saniyelik gecikmenin sistemi kararsızlaştırdığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 19 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları



Şekil 4. 20 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları



Şekil 4. 21 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapının kontrol girişindeki 0.00042 saniyelik gecikme sonucu yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 1 ile zaman cevapları

Bu bölümde sismik zorlama altındaki yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolünde, geri besleme esnasında oluşan zaman gecikmesi probleminin sistem dinamiği üzerindeki olumsuz etkileri gösterilmiştir. Kontrol kuvvetinin yapıya iletilmesi sırasında oluşacak çok küçük zaman gecikmeleri bile, kontrol sisteminin kararlılığını kaybetmesine ve performansının bozulmasına neden olmaktadır. Bunun başlıca sebebi zaman gecikmesinin sistemin dinamiğine katılarak kontrol kuvvetinin gecikmeye-bağlı olarak hesaplanmamasıdır. Bununla beraber aktif kontrol sistemlerindeki bu problem

daha önce asimetrik yapıdaki bir sistem üzerinde incelenmemiştir. Bu durum bizi bozucu sismik hareketler altındaki asimetrik yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında etkin olarak kullanılacak, kontrol kuvvetinin gecikmeye-bağlı olarak belirlendiği sistemin kararlılığı ve performansının bozulmadığı yeni bir kontrolör yapısının elde edilmesi yönünde teşvik etmiştir.

4.4 Durum Geri-Beslemeli Gecikmeye-Bağlı Optimal Kontrolörün Simülasyon Çalışmaları

Bölüm 3'de sentez denklemleri verilen DME tabanlı durum geri-beslemeli gecikmeye bağlı optimal kontrolör bu bölümde asimetrik yapısal sistem üzerinde test edilmiştir. Durum geri-besleme mantığı ile bozucuların bastırılmasına yönelik sistemin kararlılık şartlarındaki gecikme zamanının ulaşılabilir üst sınırı El Centro depremi için $\bar{h}$'ın 0.031 saniye, San Francisco depremi için $\bar{h}$'ın 0.033 saniye, konik tamamlayıcı algoritması ile bulunmuştur. Durum geri-beslemeli gecikmeye-bağlı optimal kontrolör kazancına,

$$\begin{aligned} &\min\ \gamma \\ &\text{kosullar: } (3.74),(3.75),(3.76) \end{aligned}$$

optimizasyon probleminin çözümünden ulaşılmıştır. Bu optimizasyon probleminin çözümünden sistemin kararlılık şartlarındaki en düşük bozucu bastırma seviyesi γ'nın 0.042 olduğu bulunmuştur. Kontrolör kazancı,

$$\mathrm{K} = \bar{\mathrm{L}}\mathrm{X}^{-1} = \begin{bmatrix} 0.8747 & 2.1433 & 0.6265 \\ 0.6859 & -2.5031 & -1.3011 \\ -0.1174 & 4.9013 & 2.4562 \\ -7.8283x10^{-9} & -9.0521x10^{-9} & -4.1736x10^{-11} \end{bmatrix}$$

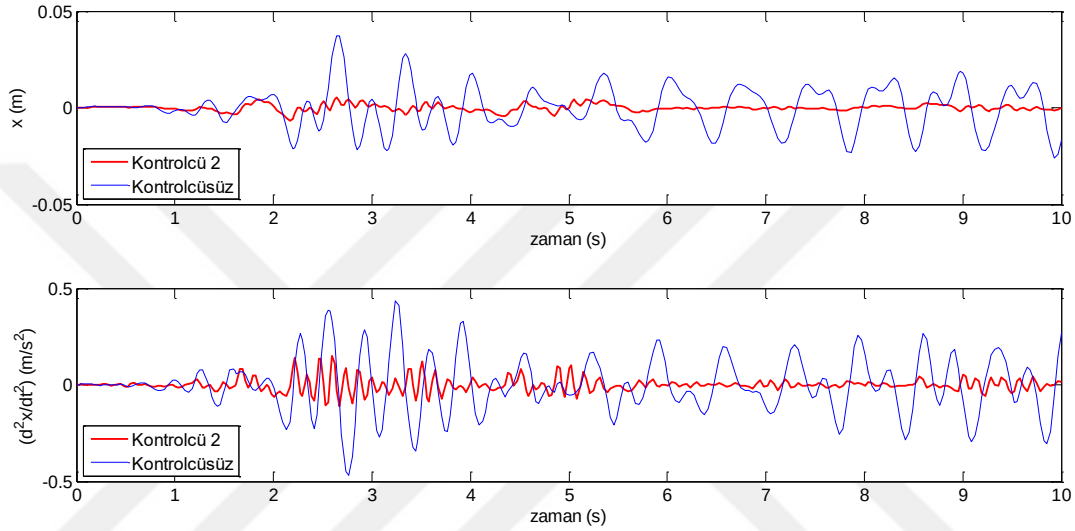
$$\begin{bmatrix} -0.6457 & -0.6195 & 0.3941 \\ -0.6013 & 0.6132 & -0.3946 \\ -0.0076 & -0.0076 & -0.0212 \\ -5.1881x10^{-11} & -5.1881x10^{-11} & -6.0317x10^{-11} \end{bmatrix}$$

şeklinde elde edilmiştir.

Dizayn için güvenlik ve konfor gerekli performans ölçütleridir. Yapıların güvenliği yer değiştirme cevaplarına bağlı olarak incelenirken, konfor için ise ivme cevapları

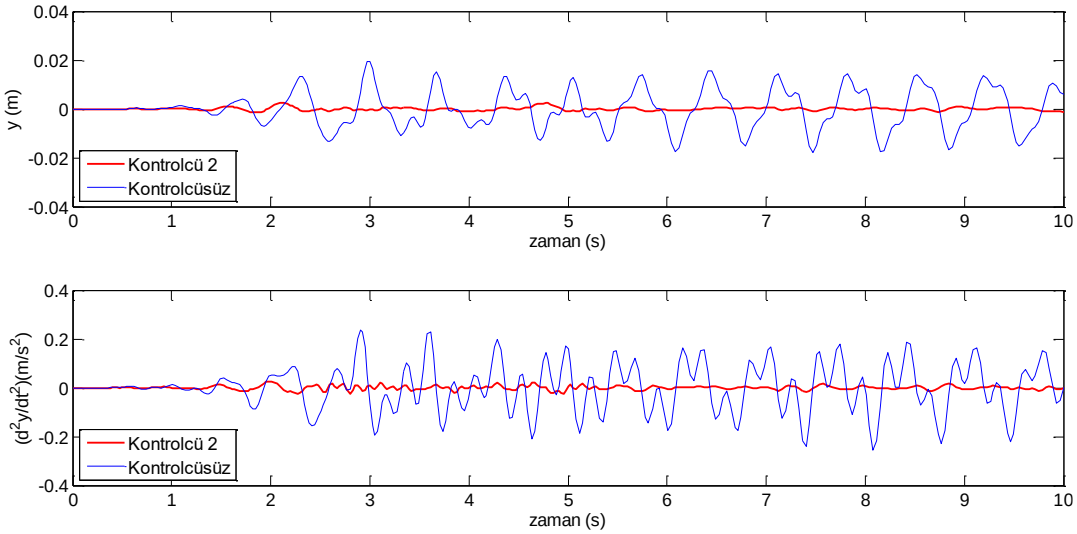
incelenmektedir. Gösterim kolaylığı açısından, bundan sonraki bölümde durum geri-beslemeli gecikmeye-bağlı optimal kontrolör, “Kontrolcü 2” olarak ifade edilecektir.

Şekil 4.22’de 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve durum geri beslemeli gecikmeye-bağlı optimal kontrolör (Kontrolcü 2) olarak gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.031 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur



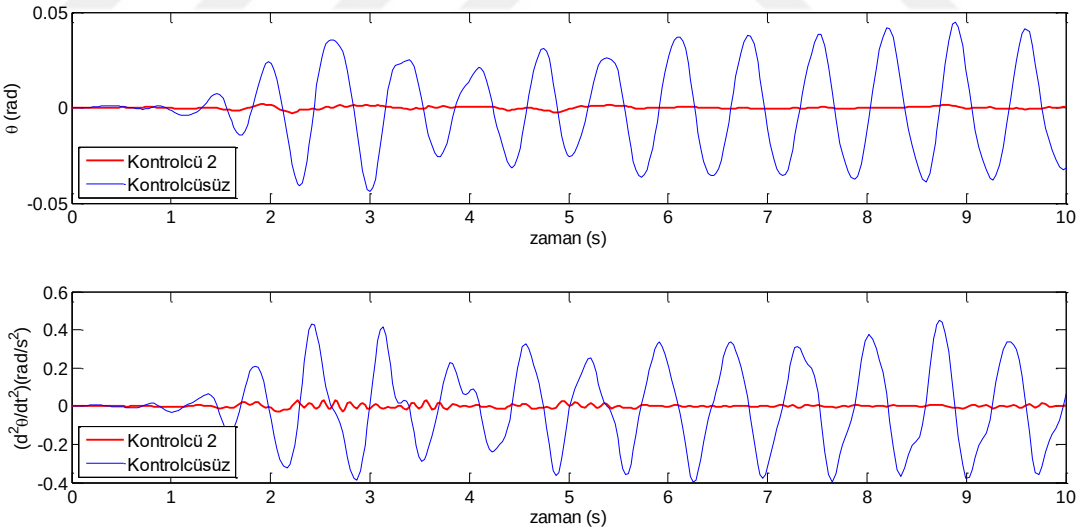
Şekil 4. 22 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

Şekil 4.23’de 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 olarak gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.031 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur.



Şekil 4. 23 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

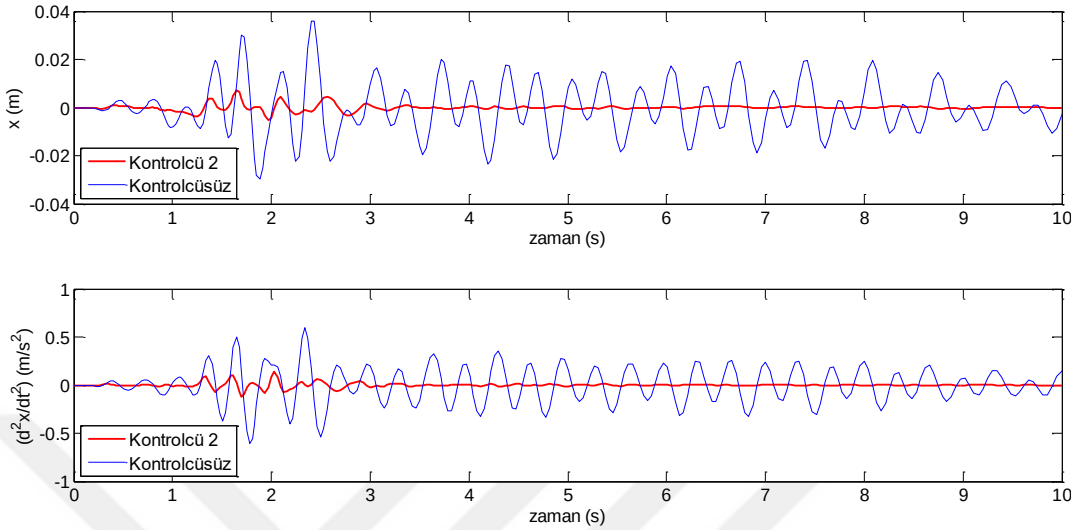
Şekil 4.24'de 1940 El Centro depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 olarak gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.031 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur.



Şekil 4. 24 1940 El Centro depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

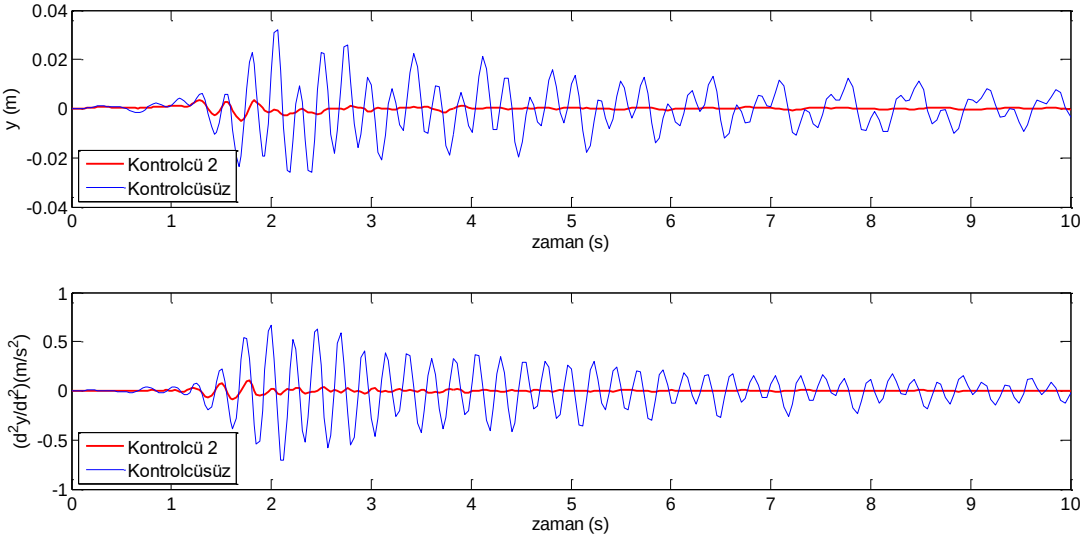
Benzer çalışma 1906 San Francisco depremi etkisi altında tekrarlanmıştır. Şekil 4.25'de 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 olarak

gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.033 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur.



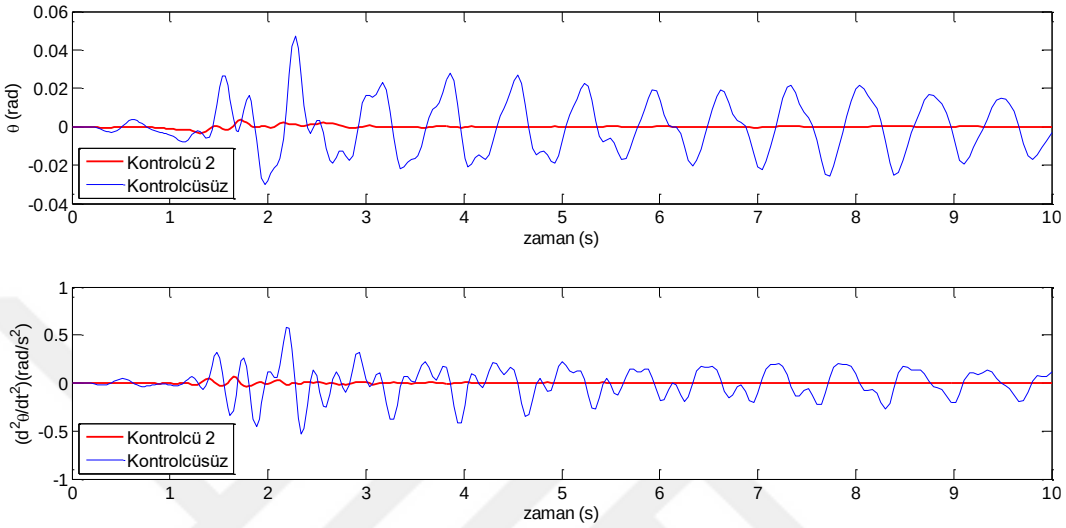
Şekil 4. 25 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (x hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

Şekil 4.26'da 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 olarak gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.033 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur.



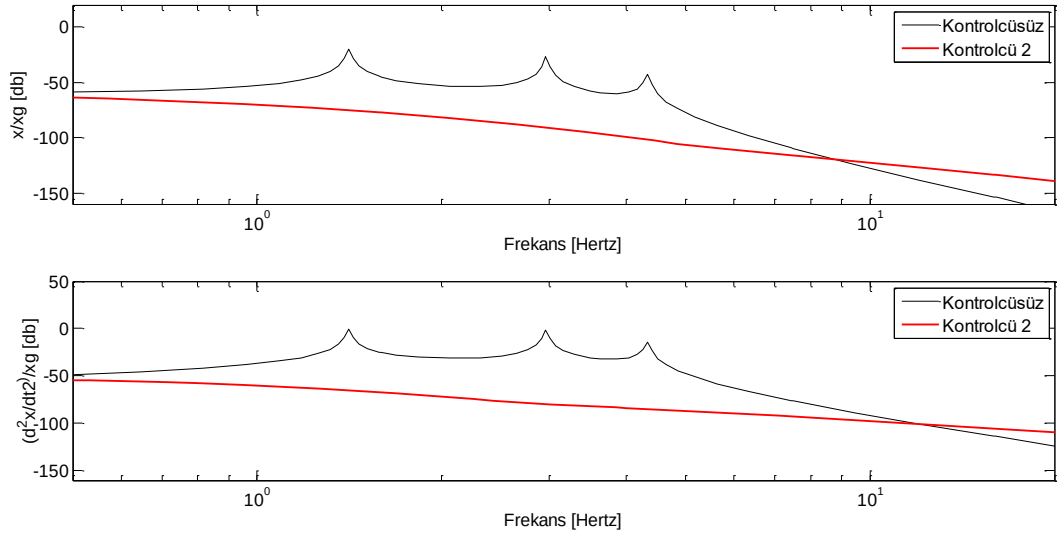
Şekil 4. 26 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (y hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

Şekil 4.27'de 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin, θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin zaman cevapları kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 olarak gösterilmektedir. Bu cevaplar gecikmenin yeni üst sınırı olan 0.033 saniye için çizdirilmiştir. Önerilen Kontrolcü 2, titreşim genliklerinin azaltılmasında son derece başarılı olmuştur.



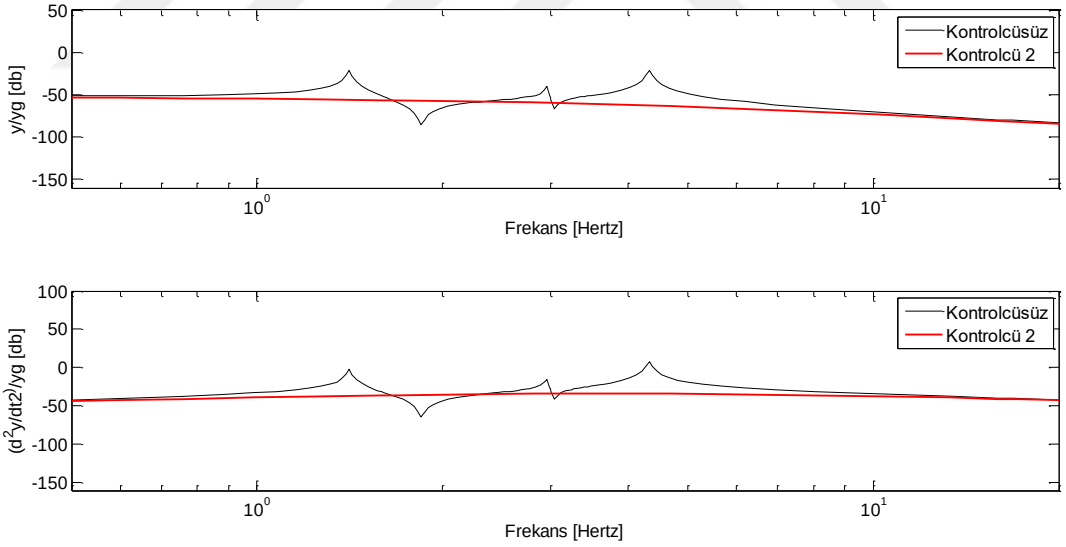
Şekil 4. 27 1906 San Francisco depremi etkisindeki sistemin yer değiştirme ve ivmelerinin (θ hareketi) Kontrolcü 2 ile zaman cevapları

Şekil 4.28'de bu çalışmada incelenen asimetrik yapısal sistemin Kontrolcü 2 ile yer değiştirme ve ivmelerinin x hareketindeki frekans cevapları gösterilmiştir. Sistem 3 serbestlik derecesine sahip olduğundan 3 tane doğal frekansı vardır. Görüldüğü üzere yüksek genlikli eğriler kontrolsüz duruma aittir. Sismik zorlanma altındaki bir yapı için en yıkıcı modun birinci mod olduğu iyi bilinmektedir. Hedeflendiği gibi, uygulanan optimal kontrolör rezonans değerlerinde oldukça iyi sönüm performansı göstererek 1. modu ve diğer modları etkin bir şekilde bastırmıştır.



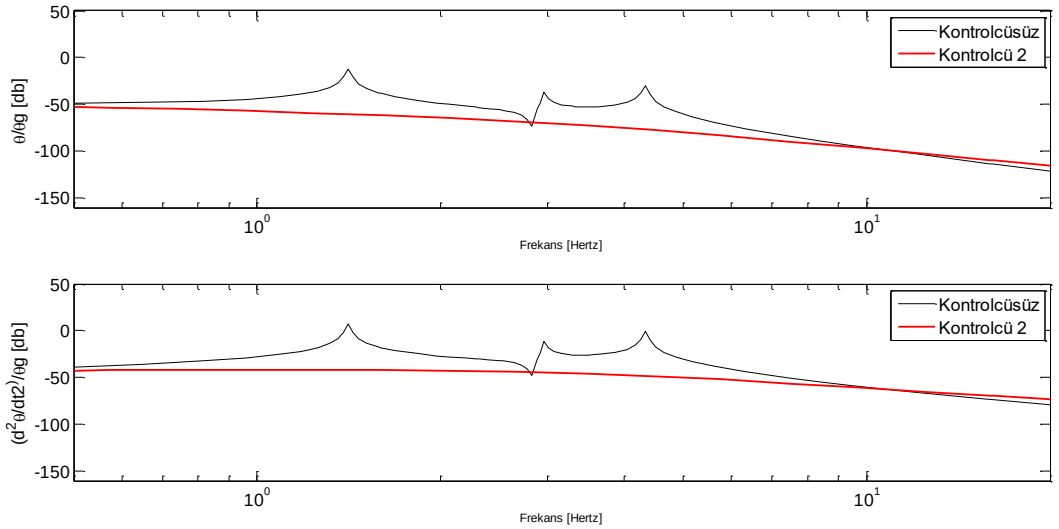
Şekil 4. 28 Asimetrik yapısal sistemin x hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları

Şekil 4.29'da asimetrik yapısal sistemin Kontrolcü 2 ile yer değiştirme ve ivmelerinin y hareketindeki frekans cevapları gösterilmiştir. Kontrolcü 2, tüm doğal frekans değerlerinde oldukça başarılı sönüm performansı göstererek, tüm modları etkin bir şekilde bastırmıştır.



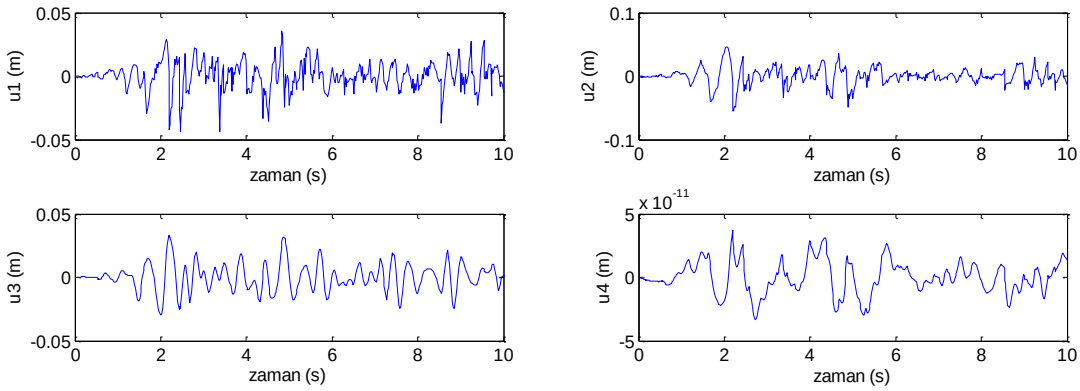
Şekil 4. 29 Asimetrik yapısal sistemin y hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları

Şekil 4.30'da asimetrik yapısal sistemin Kontrolcü 2 ile yer değiştirme ve ivmelerinin θ hareketindeki frekans cevapları gösterilmiştir. Kontrolcü 2, tüm doğal frekans değerlerinde oldukça başarılı sönüm performansı göstererek, tüm modları etkin bir şekilde bastırmıştır.

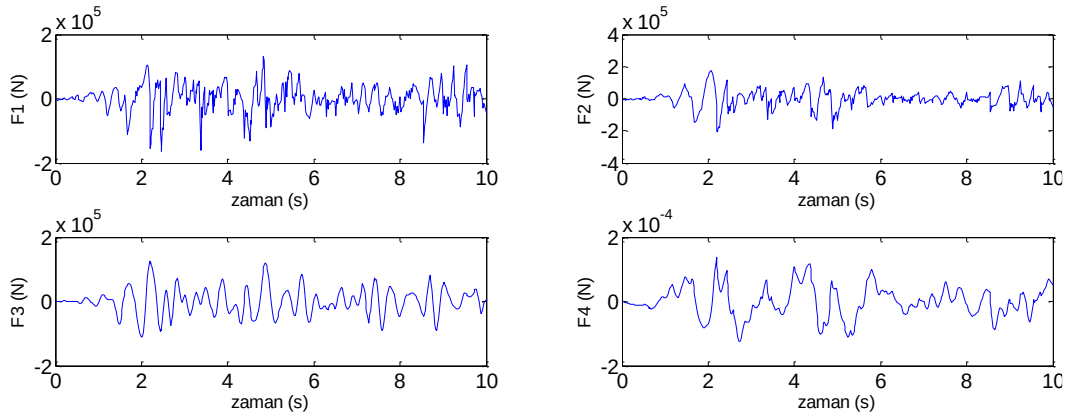


Şekil 4. 30 Asimetrik yapısal sistemin θ hareketindeki yer değiştirme ve ivmelerinin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile frekans cevapları

Şekil 4.31'de kontrol girişi olarak görev yapan aktif tendon sisteminin yerdeğiştirmelerinin zaman kayıtları gösterilmiştir. Bir optimizasyon problemi olarak ifade edilmiş olan gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli optimal kontrolör tasarımının, aktif tendon sisteminde kabul edilebilir yerdeğiştirme değerleri ve Şekil 4.32'de gösterilen uygulanabilir kontrolör kuvvetleri ile başarılı bir performans gösterdiği gözlemlenmektedir.



Şekil 4. 31 Asimetrik yapısal sistemin tendon yerdeğiştirmeleri



Şekil 4. 32 Tendonlere etkiyen Kontrolcü 2'ye ait kuvvetlerin zamana göre değişimleri

Çizdirilen grafiklerde gözlemlenen bozucu bastırma seviyelerini inceleyebilmek için 1940 El-Centro ve 1906 San Francisco depremi etkisindeki asimetrik yapısal sistemin kontrolcüsüz ve önerilen gecikmeye-bağlı optimal kontrolör ile RMS değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'de sırasıyla verilmiştir.

Çizelge 4.3 1940 El-Centro depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile RMS değerleri

1940 El-Centro Depremi					
Kontrolcüsüz			Kontrolcü 2 ile		
Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim	Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim
x_1	0.0111	[m]	x	0.0017	[m]
y_1	0.0080	[m]	y	0.0007	[m]
θ_1	0.0227	[rad]	θ	0.0007	[rad]
d^2x_1/dt^2	0.1452	[m/s²]	d^2x/dt^2	0.0348	[m/s²]
d^2y_1/dt^2	0.0961	[m/s²]	d^2y/dt^2	0.0089	[m/s²]
$d^2\theta_1/dt^2$	0.2092	[rad/s²]	$d^2\theta/dt^2$	0.0088	[rad/s²]

Çizelge 4.4 1906 San Francisco depremi etkisindeki yapısal sistemin kontrolcüsüz ve Kontrolcü 2 ile RMS değerleri

1906 San Francisco Depremi					
Kontrolcüsüz			Kontrolcü 2 ile		
Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim	Ölçülen Parametre	RMS Değerleri	Birim
x_1	0.0109	[m]	x	0.0012	[m]
y_1	0.0093	[m]	y	0.0009	[m]
θ_1	0.0140	[rad]	θ	0.0007	[rad]
d^2x_1/dt^2	0.1853	[m/s²]	d^2x/dt^2	0.0228	[m/s²]
d^2y_1/dt^2	0.2172	[m/s²]	d^2y/dt^2	0.0162	[m/s²]
$d^2\theta_1/dt^2$	0.1592	[rad/s²]	$d^2\theta/dt^2$	0.0092	[rad/s²]

Yapılan simülasyon çalışmaları ile 1906 San Francisco ve 1940 El Centro depremleri etkisi altındaki asimetrik yapısal sistemin, Kontrolcü 2 ile zaman gecikmelerinin erişilebilir üst sınırları incelendiğinde, yüksek lisans tezinde önerilen gecikmeye-bağlı optimal kontrolörün durum geri-beslemeli kontrolör karşısında çok daha az tutucu sonuçlar vererek üstün sönüm performansı gösterdiği gözlemlenmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5 Asimetrik yapısal sistemin farklı bozucular etkisinde Kontrolcü 1 ve Kontrolcü 2 ile zaman gecikmesinin erişilebilir üst sınırları

Bozucu Giriş Olarak Uygulanan Depremler	Gecikmenin Erişilebilir Üst Sınırı [s]	
	Kontrolcü 1	Kontrolcü 2
1940 El-Centro	0.00044	0.031
1906 San Francisco	0.00042	0.033

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tezinde, zaman gecikmeli, burulma titreşimlerine maruz asimetrik yapısal bir sistem için aktif kontrol problemi incelenmiştir. Kontrol probleminin çözümü için durum geri-besleme mantığı ile çalışan gecikmeye bağlı kontrolör algoritması kullanılmıştır. Kontrolör dizaynının en önemli aracı dışbükey optimizasyon temelindeki doğrusal matris eşitsizlikleri olmuştur.

Çalışmanın giriş bölümünde, tezde çözülmesi hedeflenen asimetrik yapılardaki zaman gecikmesi problemi ile ilgili bir literatür araştırması verilmiştir. Bölüm 2'de ilk olarak tek yönde hareketli bina modelinin yetersizliğinden bahsedilmiş ardından çalışmada kullanılacak, üç serbestlik dereceli, iki eksende yanal tek eksende burulma titreşimlerinin etkisi altında olan asimetrik bir binanın matematiksel modeli oluşturularak hareket denklemleri elde edilmiştir.

Bölüm 3'de DME yaklaşımı hakkında bilgi verilerek DME tabalı durum geri-beslemeli optimal kontrolör tasarımı anlatılmıştır. Yapısal sistemlerin titreşimlerinin aktif kontrolü çalışmalarında, kontrol kuvvetinin yapıya iletiminde gecikme probleminin oluşması kaçınılmaz bir olaydır. Bu sebeple gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli kontrolcü dizaynı ile zaman gecikmesi probleminin önüne geçilebileceği ifade edilmiştir ve kontrolör tasarımı açıklanmıştır. Gecikmeye-bağlı yeterli kararlılık kriterleri uygun Lyapunov-Krasovskii aday fonksiyoneli seçimi ile matris eşitsizliği şeklinde elde edilmiştir. Dizayn sonucunda oluşan doğrusal olmayan matris eşitsizliği probleminin çözülebilmesi için konik tamamlayıcı algoritmasından faydalanılmıştır.

Bölüm 4'de ilk olarak yüksek lisans tezinde bozucu giriş olarak kullanılan bazı deprem girişlerinin ivme değişimleri verilmiştir. Daha sonra asimetrik yapısal sistemin bozucu deprem hareketleri altında titreşimlerinin azaltılması problemi için durum geri-beslemeli optimal kontrolörün performansı yapılan simülasyon çalışmasıyla gösterilmiştir. Aynı kontrolör kullanılarak, kontrol girişine zaman gecikmesi ilavesiyle simülasyonlar tekrarlanmış ve çok küçük gecikme zamanları için kontrolörün performansını kaybettiği, sistemin kararsızlaştığı gösterilmiştir. Ardından gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli optimal kontrolöründe önerilen konik tamamlayıcı algoritması ile kapalı-çevrim sistemin küresel asimtotik kararlılığı altında doğrusal olmayan optimizasyon problemi çözülerek, daha büyük kontrol girişi gecikme süresi belirlenmiştir.

Simülasyon çalışmaları 1906 San Francisco ve 1940 El-Centro depremleri için yapılmıştır. Her iki bozucu girişi için gecikmenin erişilebilir üst sınırı, önerilen gecikmeye-bağlı durum geri-beslemeli optimal kontrolör tasarımıyla çok daha az tutucu sonuçlar vererek kontrolörün üstün sönüm performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Çalışmanın literatüre yapmış olduğu en önemli katkı, asimetrik yapısal sistemlerde kontrol kuvvetinin iletimi sırasında oluşan zaman gecikmesi problemi için çözüm aranan ilk çalışma olmasıdır. Simülasyon çalışmalarıyla gecikmeye-bağlı optimal kontrolör dizaynının asimetrik yapısal sistemlerin bozucu bastırma problemlerinin çözümünde kullanılabilir olduğu kanıtlanmıştır.

Kontrol kuvvetinin yapıya iletimi sırasında yaşanan zaman gecikmesi problemi, bu yüksek lisans tezinde tek katlı asimetrik yapısal bir sistem için incelenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda, asimetrik çok katlı yapılarda, zaman gecikmesi problemine ilave olarak eyleyici doyumu ve parametre belirsizliğinin de sistemin dinamiğine dahil edildiği yeni sentez denklemleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

[1] Soong T. T. ve Constantinou M. C., (1994). Passive and Active Structer Vibration Control in Civil Engineering, Springer-Verlag.

[2] Xue, S., Tobita, J. ve Kurita, S., (1997). “Mechanics and Dynamics of Intelligent Passive Vibration Control System”, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 123:0322-0327.

[3] Yongqi, C., Tiezhu, C., Liangzhe M. ve Chaoying L., (2009). “Structural Vibration Passive Control and Economic Analysis of a High-Rise Building in Beijing”, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 8:561-568.

[4] Bigdeli, Y. ve Dookie, K., (2015). “Damping Effect of the Passive Control Devices on Structural Vibration Control: TMD, TLC and TLCD for Varying Total Masses”, 20(1):301-308.

[5] Li, HN., Jin, Q., Song, G. ve Wang, GX., (2003).”Fuzzy Neural Network Based TLCD Semi-Active Control Methodology For Irregular Buildings”, IEEE International Symposium on Intelligent Control, 8-8 Oct. 2003, Houston.

[6] Çetin, Ş., Sivrioğlu, S., Zergeroğlu, E. ve Yüksek, İ., (2011). “Semi-Active H_∞ Robust Control of Six Degree of Freedom Structural System using MR Damper”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 19(5), 797-805.

[7] Thenozhi, S. ve Yu, W., (2014). “Stability Analysis of Active Vibration Control of Building Structures Using PD/PID Control”, Engineering Structures, 81:208-218.

[8] Aldemir, U., (2003). "Optimal Control of Structures with Semi-Active Tuned Mass dampers", Journal of Sound and Vibration, 4(266):847–874.

[9] 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, 29-30 May 2008, Virginia.

[10] 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, 3580-3584.

[11] Park, K., Koh, H. ve Seo C., (2004). “Independent Modal Space Fuzzy Control of Earthquake Excited Structures”, Engineering Structures, 26:279-289.

[12] Ikhouane, F., Manosa, V. ve Rodellar, J., (2005), “Adaptive Control of Hysteretic Structural System”, Automatica, 41:225-331.

[13] 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, 11:397-406.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Lyapunov, A., (1947). Problema General de la Stabilite du Mouvement, Annals of Mathematical Studies, Princeton University Press, Princeton.

[18] Gahinet, P. ve Apkarian, P., (1994). "A Linear Matrix Inequality Approach to H_∞ Control", International Journal of Robust and Nonlinear Control, 4:421-448.

[19] Chilali, M. ve Gahinet, P., (1996),. "H_∞ Design with Pole Placement Constraints: An LMI approach", IEEE Transactions on Automatic Control, 41(3):358-367.

[20] 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.

[21] Löfberg, J., (2004). “Yalmip: A toolbox for Modeling and Optimzation in MATLAB”, Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan.

[22] Strum, J.F., (1999). "Using SeDuMi 1.02 a Matlab for Optimization over Symmetric Cones", Optimization Methods and Software, 11(2):625-653.

[23] Gawronski, W., (2004), Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures, Springer Verlag.

[24] 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.

[25] Guclu, R., (2001). “Fuzzy Logic Control of Vibrations of Analytical Multi-Degree-of-Freedom Structural Systems” Turkish J. Eng. Env. Sci.,27:157–167.

[26] 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.

[27] Yazıcı, H., Küçükdemiral, İ.B. ve Güçlü, R., (2009). "LMI Tabanlı Çıkış Geri-Beslemeli H_∞ Kontrolör ile Yapısal Bir Sistemin Aktif Titreşim Kontrolü", 14. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu, ODTÜ 2-4 Temmuz 2009, Güzelyurt, 7-13.

[28] 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.

[29] Ueng, J., Lin, C. ve Lin, P., (2000). "System Identification of Torsionally Coupled Buildings", Computers and Structures, 667-686.

[30] Goel, R. K., (1998). "Effects of Supplemental Viscous Damping on Seismic Response of Aymmetric-Plan Systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27:125-141.

[31] Goel, R. K., (2005). "Seismic Response of Linear and Non-Linear Asymmetric Systems with Non-Linear Fluid Viscous Dampers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 34:825-846.

[32] Mevada, A. V. ve Jangid, R. S., (2015). "Seismic Response of Torsionally Coupled Building with Passive and Semi-Active Stiffness Dampers, International Journal of Advanced Structural Engineering, 7:31-48

[33] Yoshida, O., (2003). Torsionally-Coupled Response Control of Earthquake-Excited Asymmetric Buildings Using Smart Dampers, PhD Thesis, Sever Institute of Technology, Washington University, ABD.

[34] Yoshida O. ve Dyke, S. J., (2005). "Response Control of Full-Scale Irregular Buildings Using Magnetorheological Dampers", American Society of Civil Engineers (ASCE) 0733-9445, 131:5(734).

[35] Date, V. A. ve Jangid R. S., (2001). "Seismic Response of Torsionally Coupled Structures with Active Control Device", Journal of Structural Control, 8 N.1.

[36] Lin, C., Chang C. ve Wang J., (2009). "Active Control of Irregular Buildings Considering Soil–Structure Interaction Effects", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30:98-109.

[37] Nigdeli S. M. ve Boduroglu M. H., (2013). "Active Tendon Control of Torsionally Irregular Structures under Near-Fault Ground Motion Excitation", Computer-Aided Civil and Infrastucture Engineering, 28:718-736.

[38] Sever, M., Göktaş, G., Yazıcı, H. ve Küçükdemiral, İ. B., (2015). "Doyumlu Eyleyicilere Sahip Bir Asimetrik Yapısal Sistemin Titreşimlerinin Doğrusal Matris Eşitsizlikleri Tabanlı H_∞ Durum Geri Beslemeli Kontrolör ile Azaltılması", Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu, İzmir.

[39] Hale, J., (1997). Theory of Functional Differential Equations. Springer: Berlin.

[40] Feliachi, A. ve Thowsen, A., (1981). "Memoryless Stabilization of Linear Delay-Differential Systems", IEEE Trans. Automatic Control, AC-26, 586-587.

[41] Lee, E.B., Lu, W.S. ve Wu, N.E., (1986). "A Lyapunov Theory for Linear Time-Delay Systems", IEEE Trans. Automatic Control, AC-31, 259-261.

[42] Gorecki, H., Fuska, S., Garbowski, P. ve Korytowski, A., (1989). Analysis and Synthesis of Time Delay System, J. Wiley, New York.

[43] Toker, O. ve Ozbay, H., (1990). “Complexity Issues in Robust Stability of Linear Delay Differential Systems”, Mathemathics of Control, Signals and Systems, 9:386-400.

[44] Dugard, L. ve Verriest E.I., (1997). Satability and Control of Time Delay Systems, Springer Verlag, New York.

[45] Niculescu, S. I., (2001). “On Delay-Dependent Stability under Model Transformations of Some Neutral Linear Systems”, International Journal of Control, 74(6):608-617.

[46] Mahmoud, M.S., (1994). "Output Feedback Stabilization of Uncertain Systems with State Delay", Advances in Theorey and Applications, 63,:197-257.

[47] Gu, K., Kharitonov, V. ve Chen, J., (2003). Stability of Time Delay Systems, Birkhauser: Basel, Boston.

[48] Mahmoud, M.S. (2000). Robust Control and Filtering for Time-Delay Systems, Marcel Dekker Inc, New York.

[49] Yue, D. ve Han, Q.L., (2005). "Delayed Feedback Control of Uncertain Systems with Time-Varying Input Delay", Automatica, 4:233–240.

[50] Kucukdemiral, I.B., (2008). "Delay-Dependent Guaranteed Cost Gain-Scheduling Control of LPV State-Delayed Systems", Optimal Control Applications and Methods, 29:313-331.

[51] Wang, Z., Goldsmith, P. ve Tan, D., (2007). "Improvement on Robust Control of Uncertain Systems with Time-Varying Input Delays", IET Control Theory Appl., 1(1):189-194.

[52] Parlakci, M.N.A. ve Kucukdemiral, I.B., (2010). “Robust Delay-Dependent H_∞ Control of Time-Delay Systems with State and Input Delays," International Journal of Robust and Nonlinear Control, 21:974-1007.

[53] Agrawal, A.K. ve Yang, J.N. (1997). “Effect of Fixed Time Delay on Stability and Performance of Actively Controlled Civil Engineering Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 26:1169–1185.

[54] Agrawal, A.K. ve Yang, J.N. (2000). “Compensation of Time-Delay for Control Civil Engineering Structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 29:37–62.

[55] Chai, G.P., Huang, J.Z. ve Yang, S.X. (2003). “An Optimal Control Method for Lineer System with Time Delay”, Computer and Structures, 81:1539-1546.

[56] Du, H. ve Zhang, N., (2008).“H_∞ Control for Buildings with Time Delay in Control via Linear Matrix Inequalities and Genetic Algorithms”, Engineering Structures, 30:81-94.

[57] Yazıcı, H., (2011). Eyleyici Gecikmesine Bağlı Doyumlu ve Dayanıklı H_∞ Denetleyiciyle Deprem Etkisi Altındaki Yapısal Sistemlerin Titreşimlerinin Kontrolü, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[58] El Ghaoui, L., Qustry, F. ve Ait Rami, M., (1997). "A Cone Complementarity Linearization Algorithm for Static Output-Feedback and Related Problems", IEEE Transactions on Automatic Control, 42(8):1171-1176.

[59] Moon, Y.S, Park, P, Kwon, W.H. ve Lee, Y.S., (2001). "Delay-Dependent Robust Stabilization of Uncertain State-Delayed Systems", International Journal of Control, 74(14):1447–1455.

[60] Tezcan SS, Alhan C. Parametric analysis of irregular structures under seismic loading according to the new Turkish Earthquake Code. Engineering Structures 2001; 23(6): 600-609. DOI: 10.1016/S0141-0296(00)00084-5.

[61] Chopra A. K., (1995) Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall.

[62] Thabatabei R. Recent Advances in Vibration Analysis- Torsional vibrations of eccentric building systems. INTECH, 2011

[63] Scherer, C. ve Weiland, S., (1999). Linear Matrix Inequalities in Control, Lecture Notes DISC Course, Netherlands.

[64] Turhan, Ö., (2010). Optimizasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[65] Delibaşı, A., (2008). Doyumlu Eyleyicilere Sahip DPD Sistemler İçin Dayanıklı Denetleyici Tasarımı, Dotora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[66] 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.

[67] Doyle, J., Fancis, J. ve Tannenbaum, K., (1995). Feedback Control Theory, Mcmillian Englewood Clifts, NJ, USA.

[68] Zhou, K., Doyle, J. ve Glover, K., (1995). Robust and Optimal Control, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Merve TÜRKOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 30.11.1989 / KADIKÖY

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : merveguneytu@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Kadıköy İntaş Lisesi (Y.D.A)	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2014-halen	ULUS YAPI	Sismik Dizayn Mühendisi
2011-2013	Lazer Isı Teknik	Proje Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. 2016 Yücerman, A., Türkoğlu M., Çağatay, A., "SAP2000 Analysis of Steel Supports Used For Suspended Mep Services", TTMD 12. Uluslararası Yapıda Tesisat Teknolojisi