

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SİSMİK YÜKLER ALTINDA YAPI DAVRANIŞ KONTROLÜ**

**MÜRÜVVET BATI**

**KOCAELİ 2020**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SİSMİK YÜKLER ALTINDA YAPI DAVRANIŞ KONTROLÜ**

**MÜRÜVVET BATI**

**Prof.Dr. Kemal BEYEN**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Dr.Öğr.Üyesi Hilal MEYDANLI ATALAY**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Doç.Dr. Eren UÇKAN**

**Jüri Üyesi, Boğaziçi Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 06.08.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tezde deprem etkisi altında çok serbestlik dereceli yapıları kontrol etmek amacıyla kullanılan pasif ve aktif kontrol sistemleri üzerine çalışılmıştır. Pasif kontrolü viskoz damperle, aktif kontrolü LQR ve gürbüz kontrol yöntemleri kullanılarak yapı kontrolü incelenmiştir. Yüksek lisans tezinde bana yol gösteren, tüm çalışmam boyunca düşünce ve bilgisinden yararlandığım Prof. Dr. Kemal Beyen'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında bana her zaman güvenen ve beni destekleyen kıymetli aileme ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos-2020

Mürüvvet BATI

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
GİRİŞ .....	1
1.YAPI KONTROL SİSTEMLERİ .....	4
1.1. Pasif Kontrol .....	4
1.1.1. Pasif enerji sönümleyiciler .....	4
1.1.1.1. Pasif ayarlı kütle sönümleyiciler(TMD) .....	5
1.1.1.2. Ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD).....	6
1.1.1.3. Eğilmeli metal sönümleyiciler.....	7
1.1.1.4. Sürtünmeli sönümleyiciler .....	8
1.1.1.5. Viskoelastik sönümleyiciler .....	8
1.1.1.6.Viskoz sönümleyiciler .....	9
1.1.2. Yapı izolasyon sistemleri .....	10
1.1.2.1. Tabakalı kauçuk mesnetler (LBR) .....	10
1.1.2.2. Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemleri (R-FBI).....	11
1.1.2.3. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (N-Z sistemi) .....	12
1.1.2.4. Saf sürtünmeli sistemi (P-F).....	13
1.1.2.5. Sürtünmeli sarkaç sistemi (FPS) .....	14
1.1.2.6. Fransız elektrik sistemi (EDF) .....	16
1.2. Aktif Kontrol Sistemleri.....	16
1.2.1. Aktif tendon kontrolü .....	20
1.2.2. Aktif destek sistemi .....	20
1.2.3. Darbe harekete geçirici sistem .....	21
1.2.4. Aktif kütle sönümleyici .....	21
1.3. Aktif Kontrolün Avantajları .....	25
1.4. Aktif Kontrolün Dezavantajları.....	26
1.5. Hibrid Kontrol Sistemleri.....	27
1.6. Yarı Aktif Kontrol Sistemleri.....	27
2. SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL .....	29
2.1.Temel Kavramlar ve Tanımlar .....	29
2.2. Kontrolün Amaç ve Faydaları .....	30
2.3. Otomatik Kontrolün Tasarım İlkeleri.....	31
2.3.1. Geri beslemeli kontrol.....	31
2.3.1.1. Açık çevrim geri besleme kontrolü .....	32
2.3.1.2. Kapalı çevrim geri besleme kontrolü .....	32
2.3.1.3. Açık-kapalı çevrim geri besleme kontrolü .....	33
2.4. İnşaat Mühendisliğinde Kullanılan Kontrol Stratejileri .....	34
2.4.1. Lqr tipi kontrolcü .....	35

2.4.2. Lineer kuadratik gauss (LQG).....	37
2.4.3. Sinir ağı denetleyicileri .....	37
2.4.4. Bulanık mantık kontrolcü.....	38
2.4.5. Kayma modu kontrolörleri.....	39
2.4.6. Dalgacık tabanlı kontrol algoritması .....	39
2.4.7. Oransal-integral-türev kontrolcü.....	40
2.5. Optimal Kontrol .....	41
2.6. Gürbüz Kontrol (Robust Control) .....	41
2.6.1. $H_{\infty}$ kontrolcü.....	42
2.6.1.1. Gürbüz kontrol ve sentez.....	44
2.6.1.2. Çok serbestlik dereceli sistem için gürbüz kontrol .....	45
2.7. Çok Serbestlik Sistem İçin Lqr Kontrol .....	49
2.8. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Yapı Tasarımı .....	53
2.8.1. TBDY-2018 göre yapılardaki düzensizlik türleri.....	54
2.9. TBDY-2018 Açısından Yapısal Kontrol Gerekliliği .....	56
3. YAPI BİLGİLERİ.....	58
3.1. Malzeme Bilgileri.....	58
3.2. Analiz .....	58
4. SAYISAL ÇALIŞMALAR.....	61
4.1. Pasif Kontrol .....	61
4.2. Aktif Kontrol .....	62
4.3. Simülasyon Sonuçları.....	64
4.3.1. Kinematik değerlendirme.....	64
4.3.2. Eleman iç kuvvetlerinin değerlendirilmesi .....	73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	75
KAYNAKLAR .....	77
EKLER .....	84
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	92
ÖZGEÇMİŞ .....	93

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Pasif Kontrol Sistemleri (a)Temel İzolasyon Sistemleri (b) İlave Sönümleyici (c)Ayarlı Kütle Sistemi .....	4
Şekil 1.2. TMD Şematik Gösterimi .....	5
Şekil 1.3. TMD Yerleştirilmiş Yapı.....	6
Şekil 1.4. TMD uygulanmış Taipei 101 Kulesi .....	6
Şekil 1.5. Ayarlı Sıvı Sönümleyisi (TLD) .....	7
Şekil 1.6. X Şekli Metalik Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı.....	7
Şekil 1.7. Pall Sürtünme Tipi Sönümleyici.....	8
Şekil 1.8. (a) Viskoelastik sönümleyici (b) Dünya Ticaret Merkezindeki viskoelastik sönümleyici detayı .....	9
Şekil 1.9. Viskoelastik Sönümleyici uygulaması Chaoshan Xinhe Binası.....	9
Şekil 1.10. (a) Temel İzolasyonu (b) Birinci kat izolasyonu (c) Yapının üst katlarında izolasyon (d) İlave katla yapı izolasyonu (e) Gök geçit Bağlantı İzolasyonu .....	10
Şekil 1.11. (a) Şematik Gösterim (b) Matematiksel Model (c) Kuvvet-Deformasyon Davranışı .....	11
Şekil 1.12. (a)Şematik Gösterim (b)Matematiksel Model (c)Kuvvet-Deformasyon Davranışı .....	12
Şekil 1.13. Kurşun Çekirdekli Mesnet (N-Z).....	12
Şekil 1.14. (a)N-Z (b)Şematik Gösterim (c)Kuvvet-Deformasyon Davranışı.....	13
Şekil 1.15. (a)Fiziksel Model (b)Matematiksel Model (c)Kuvvet-Deformasyon İlişkisi.....	14
Şekil 1.16. Sürtünmeli Sarkaç Sistemi.....	14
Şekil 1.17. (a) Fiziksel Model (b)Matematiksel Model (c) Kuvvet-Deformasyon İlişkisi.....	15
Şekil 1.18. Sürtünmeli Sarkaç Sisteminin Hareket Mekanizması .....	15
Şekil 1.19. (a) Matematiksel Model (b) Kuvvet-Deformasyon Davranışı.....	16
Şekil 1.20. Aktif Kontrol Şeması .....	17
Şekil 1.21. Aktif Tendon Sistemi.....	20
Şekil 1.22. Aktif Destek Sistemi .....	21
Şekil 1.23. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı.....	22
Şekil 1.24. Aktif Kontrollü Kyobashi Seiwa Binası .....	22
Şekil 1.25. Durum Uzay Gösterimi.....	23
Şekil 2.1. Sistem Kavramı.....	29
Şekil 2.2. Açık – Çevrim Kontrolü Şematik Diagramı .....	32
Şekil 2.3. Kapalı-Çevrim Kontrol Şeması .....	33
Şekil 2.4. Açık-Kapalı Çevrim Kontrol Şeması.....	33
Şekil 2.5. PID Denetim Şeması.....	41
Şekil 2.6. Kapalı Çevrim Sistemi ve Kontrolcü.....	43
Şekil 2.7. Yapısal belirsizlik genel şeması.....	44
Şekil 2.8. Robust Gürbüz Kontrol Şeması .....	45

Şekil 3.2. Kat Planı .....	59
Şekil 3.3. Kocaeli (Gebze-TUBİTAK) 1999 Deprem Kaydı.....	60
Şekil 3.4. Fourier Amplitude Spektrumu (FAS) .....	60
Şekil 4.1. Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Damper Modellenmesi.....	62
Şekil 4.2. Damper Yerleşim Şeması X-Z, X-Y yönleri .....	62
Şekil 4.3. Viskoz Damper Histerisis Grafiği.....	63
Şekil 4.4. LQR Maksimum Kuvvet Grafiği .....	63
Şekil 4.5. Deprem Etkisi Altında 1. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri .....	64
Şekil 4.6. Deprem Etkisi Altında 2. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri .....	65
Şekil 4.7. Deprem Etkisi Altında 3. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri .....	65
Şekil 4.8. Deprem Etkisi Altında 4. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri .....	66
Şekil 4.9. Deprem Etkisi Altında 5. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri .....	66
Şekil 4.10. Deprem Etkisi Altında 1. Kat Hız Tepkileri .....	67
Şekil 4.11. Deprem Etkisi Altında 2. Kat Hız Tepkileri .....	67
Şekil 4.12. Deprem Etkisi Altında 3. Kat Hız Tepkileri .....	68
Şekil 4.13. Deprem Etkisi Altında 4. Kat Hız Tepkileri .....	68
Şekil 4.14. Deprem Etkisi Altında 5. Kat Hız Tepkileri .....	69
Şekil 4.15. Deprem Etkisi Altında 1. Kat İvme Tepkileri.....	69
Şekil 4.16. Deprem Etkisi Altında 2. Kat İvme Tepkileri.....	70
Şekil 4.17. Deprem Etkisi Altında 3. Kat İvme Tepkileri.....	70
Şekil 4.18. Deprem Etkisi Altında 4. Kat İvme Tepkileri.....	71
Şekil 4.19. Deprem Etkisi Altında 5. Kat İvme Tepkileri.....	71
Şekil 4.20. Deprem Etkisi Altında Maksimum İvme Tepkileri .....	72
Şekil 4.21. Deprem Etkisi Altında Kat Maksimum Yerdeğiştirme Tepkileri.....	72
Şekil 4.22. Deprem Etkisi Altında Kat İvme Tepkileri.....	73
Şekil 4.23. Deprem etkisinde kat seviyesinde kesme kuvveti değişimleri .....	74
Şekil 4.24. Deprem etkisinde kat seviyesinde moment kuvveti değişimleri.....	74
Şekil A.1. Matlab Simulink LQR Kontrol Şeması.....	86

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Planda Düzensizlik Durumları.....	54
Tablo B.1. LQR kontrol kazancı.....	90
Tablo B.2. A Matrisi .....	90
Tablo B.3. B Matrisi .....	91
Tablo B.4. C Matrisi .....	91
Tablo B.5. D Matrisi .....	91



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	: Durum Uzay Sistem Matrisi
Bp	: Çıktı sinyali,
Bu	: Kontrol Giriş Sinyali
Bw	: Deprem Sinyali
c	: Sönüm
$c_d$	: Kütle Sönümleyicinin Sönüm Katsayısı
C	: Sönüm Matrisi
$C^0$	: Nominal Sönüm Matrisi
$\Delta_C$	: Belirsiz Sönüm Bloğu
D	: Durum Uzay Sistem Matrisi
F	: Kuvvet
$F_a$	: Aktüatör Kuvveti
$F_c$	: Kontrol Kuvveti
G	: Transfer Fonksiyonu
$G_{cl}$	: Kapalı Çevrim Transfer Fonksiyonu
k	: Rijitlik
$k_d$	: Kütle Sönümleyici Rijitliği
K	: Rijitlik Matrisi
$K^0$	: Nominal Rijitlik Matrisi
$\Delta_K$	: Belirsiz Rijitlik Bloğu
L	: Genel Kontrol Yer Matrisi
m	: Kütle
$m_d$	: TMD Kütlesi
M	: Kütle Matrisi
$M^0$	: Nominal Kütle Matrisi
n	: Gürültü
p	: Belirsiz Blok Çıkış Sinyali
$p_c$	: Belirsiz Blok Sönüm Oranı ile İlgili Çıkış Sinyali
$p_k$	: Belirsiz Blok Rijitlik Oranı ile İlgili Çıkış Sinyali
P	: Ricatti Denklemi
q	: Belirsiz Blok Giriş Sinyali
$q_c$	: Belirsiz Blok Sönüm Oranı ile İlgili Giriş Sinyali
$q_k$	: Belirsiz Blok Rijitlik Oranı ile İlgili Giriş Sinyali
Q	: Semidefined Ağırlık Matrisi
R	: Pozitif Difenet Ağırlık Matrisi
T	: Transformasyon Matrisi
u	: Kontrol Kuvveti
$u_d$	: Sönümleyici Kontrol Kuvveti
$W_{C1}, W_{C2}$	: Sönüm Ağırlık Matrisleri
$W_{K1}, W_{K2}$	: Rijitlik Ağırlık Matrisleri
$W_n$	: Gürültü Ağırlık Matrisi
$W_u$	: Kontrol Giriş Matrisi
x	: Yer değiştirme

$x_d$	: Sönümleyici Yer Değiştirmesi
$\ddot{X}_g$	: Dış Kuvvet Vektörü Deprem İvmesi
$\Delta$	: Belirsizlik Bloğu

### Kısaltmalar

AMD	: Active Mass Damper (Aktif Kütle Sönümleyici)
LQR	: Linear Quadratic Regulator (Doğrusal İkinci Dereceden Düzenleyici)
LQG	: Linear Quadratic Gauss (Doğrusal İkinci Dereceden Gauss)
MDOF	: Multi Degree of Freedom (Çok Serbestlik Dereceli)
PTMD	: Passive Tuned Mass Damper (Pasif Ayarlı Kütle Sönümleyici)
SDOF	: Single Degree of Freedom (Tek Serbestlik Dereceli)
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği



## SİSMİK YÜKLER ALTINDA YAPI DAVRANIŞ KONTROLÜ

### ÖZET

Gelişen teknoloji ve kullanılan malzemeler sayesinde yapılar daha yüksek ve esnek tasarlanmaktadır. Bu sebeple yapıları dinamik yüklere karşı korumak önemli hale gelmiştir. Yapıların sismik tepkisini azaltmak amacıyla çeşitli yapısal kontrol sistemleri uygulanmaktadır. Yapısal kontrol genel olarak Pasif Kontrol ve Aktif Kontrol Sistemi olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Kontrol sistemlerinin yapılarda kullanılmasının amacı insan can güvenliğini sağlamakla birlikte, yapı güvenliğini ve işlevini kaybetmeden yapının deplasman, iç kuvvet değerlerinin sınır koşulları aşmamasını sağlamaktır. Sınır koşullar yapı güvenliği ve yapı konforu açısından yapısal kontrol sistemleri uygulanarak minimize edilmeye çalışılır. Yapısal kontrolde öncelikle ana taşıyıcı sistemin zarar görmemesi amaçlanır. Kontrol sisteminin optimalliğini depremin büyüklüğü ve frekans içeriği etkilemektedir. Optimal kontrolün amacı minimum kontrol kuvvetiyle görece kat ötelemelerini minimize etmektir.

Bu çalışmada, depreme karşı çok serbestlik dereceli sistem olarak beş katlı bir yapıda pasif ve aktif kontrol sistemi yöntemleri kullanılmıştır. Amaç, deprem sırasında gerçek zamanlı tepki verebilen sensörler ve kontrol cihazları ile donatılmış yeni nesil akıllı yapılar geliştirmektir. Pasif kontrol için Viskoz Damper, aktif kontrol sisteminde ise optimal kontrolde uygunluğu ve etkinliği sebebiyle LQR kontrol yöntemi ve  $H_{\infty}$  gürbüz kontrol yöntemleri seçilmiştir. Çok serbestlik dereceli yapılar, Matlab makro kodlamayla yazılan analiz programı ve SAP2000 yapısal analiz programı kullanılarak yürütülen simülasyon çalışmaları ile analiz edilmiştir. Yapı kontrol algoritmasının etkinliği 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi'nin Gebze-TÜBİTAK izleme istasyonu kayıtları kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kat yer değiştirmeleri, hız, ivme zaman cevapları ve iç kuvvet değerleri kontrolsüz ve kontrollü yapı için sunulup tartışılmıştır. 5. Kattan alınan yerdeğiştirme değerlerinde kontrolsüz duruma göre damperli durumda %40, Lqr %72,  $H_{\infty}$  kontrolcüde %85 oranında azalma olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif Kontrol, Gürbüz Kontrol, Pasif Kontrol, Viskoz Damper, Yapısal Kontrol.

## **STRUCTURE BEHAVIOR CONTROL UNDER SEISMIC LOADS**

### **ABSTRACT**

Thanks to the developing technology and design of advanced materials, structures in current engineering practice are designed higher and flexible. For this reason, it has become important to minimize the structural responses against dynamic loading. Various structural control systems are applied to reduce the seismic response of the structures. Structural control generally consists of two parts as Passive Control and Active Control System. The purpose of using control systems in buildings is to ensure human life safety, human comfort and to ensure that the displacement and internal force values of the structure do not exceed the boundary conditions without losing structure safety and function. Boundary conditions are tried to be minimized by applying structural control systems in terms of building safety and building comfort. In structural control, it is primarily aimed that the main load carrying structural components is not damaged. Earthquake characteristics such as magnitude and intensity of the earthquake and the frequency affect the optimization sensitivity of the control system. The aim of optimal control is to minimize relative floor displacement with minimal control force.

In this study, passive and active control system methods of a multi degree of five-storey building against earthquake were used. The aim is to develop new generation smart structures equipped with sensors and control devices that can react in real time during the earthquake. Viscous damper for passive control, LQR control method and  $H_{\infty}$  robust control methods were chosen due to their suitability and effectiveness in the active control system. For the control of multi degree of freedom structures, it was analyzed in different cases, which were simulated in virtual test sets, using Matlab macro codes and analysis program SAP2000N package. The effectiveness of the building control algorithm was determined using the main shock data recorded by Gebze-TÜBİTAK earthquake observation station during the Kocaeli earthquake of 17 August 1999. Results are summarized and presented in tables and graphs for floor displacements, velocity, acceleration time responses and of floors and internal force values discussed for uncontrolled and controlled structures. When kinematic conditions under control are if compared with respect to the uncontrolled situation, the displacement values taken from the 5th floor decreased by 40% in case of the damper, 72% in the Lqr, and 85% in the  $H_{\infty}$  controller.

**Keywords:** Active Control, Robust Control, Passive Control, Viscous Damper, Structural Control.

## GİRİŞ

Depreme dayanıklı yapı tasarımı düşüncesi, geçmişteki yapılara bakıldığında günümüze kadar yaşanan depremlerle test edilerek ayakta durabilen yapıların var olması bu fikrin yapı tarihi kadar eski olduğunu göstermektedir. Depreme dayanıklı yapı tasarımında TBDY-2018’de de önerildiği gibi taşıyıcı sistemin simetrik ve düzenli seçilerek tasarlanması yapıların dinamik yüklere karşı depreme dayanıklı yapı tasarımının gerekliliğidir. Yapıları dinamik yüklere karşı izole etmek depreme dayanıklı yapı tasarımında sıkça kullanılan yöntemlerden biridir. Sismik izolasyon yönteminin amacı yapı temelinden deprem anında yapıya girecek fazla enerjiyi önleyerek zemin ve yapı arasındaki bağ rijitliğini azaltmaktır. Diğer bir yöntem ise dinamik yüklerin enerjisini yapıya yerleştirilen ekipmanlar aracılığıyla enerjinin sönmülmesini sağlamaktır.

Son yıllarda meydana gelen büyük ve orta şiddette depremler yapıları olumsuz etkilediği görülmektedir. Depremi önceden tahmin edilemez ve önlemez bir doğa olayı oluşu yapılarımızı bu dinamik etkiye karşı koruma yöntemlerine başvurmamızın gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gelişen teknolojiyle beraber kullanılan malzeme çeşidi ve kalitesindeki ilerlemeler sayesinde yapılar daha yüksek ve daha esnek inşa edilmektedir. Deprem ve rüzgar gibi dinamik etkilerin bu tür narin yapılarda oluşturacağı titreşimleri azaltmak için çeşitli kontrol sistemleri uygulanmaktadır. Kontrol sistemlerinin kullanılmasıyla kesit zorlarını ve yapı tepkilerini güvenlik sınırları içerisinde tutularak yapı kontrolü sağlanmaktadır. Yapılarda kullanılan kontrol sistemleri dört bölüme ayrılabilir. Bunlar;

- i) Pasif Kontrol Sistemleri,
- ii) Aktif Kontrol Sistemleri,
- iii) Karma Kontrol Sistemleri,
- iv) Yarı Aktif Kontrol Sistemleridir.

Pasif kontrol sistemleri dışarıdan güç kaynağına ihtiyaç duymayan özel elemanlardır. Yapıya yerleştirilen pasif sistemler sayesinde dış etkilere karşı yapı dayanıklılığını arttırmaları. Diğer kontrol sistemlerine göre maliyeti ucuz olan pasif kontrol sistemi kendi içinde taban izolasyon sistemi ve pasif enerji sönümleyiciler olarak ikiye gruba ayrılabilir. Pasif enerji yutucu sistemler sayesinde yapının enerji yutma kapasitesi arttırılır, taban izolasyon sistemleriyle tabana yerleştirilen izolatörlerle yapı zeminden gelen titreşimlerden korunur.

Aktif kontrol sisteminde, dışarıdan enerji kaynağı yardımıyla dış uyarıları ölçer ve yapının tepkilerini azaltacak şekilde kontrol kuvvetleri uygulanır. Bu kontrol sistemi deprem gibi dinamik yüklere maruz kalan yapıda hem can güvenliği hem de yapı içindeki malzemelerin korunup düzgün bir şekilde çalışması amacıyla kullanılmaktadır. Deprem sonrası kesintisiz kullanım gerektiren hastane, nükleer santral gibi yapıların korunmasında aktif kontrol sistemleri kullanılması uygundur.

Karma kontrol sistemleri aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir arada kullanılması sonucu oluşan sistemlerdir. Taban izolasyon sistemleri ve aktif kütle sönümleyicisinin bir arada kullanılması karma kontrol sisteminin başlıca örnekleridir. Aktif kontrolün her hangi bir dış uyarı karşısında etkisiz kaldığında pasif kontrol yapı tepkilerini azaltmaya devam eder. Genel olarak büyük kontrol kuvvetleri gerektirmez, güvenilir ve ekonomiktir.

Yarı aktif kontrol sistemleri aktif kontrolün ve pasif kontrolün en iyi özelliklerinin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu kontrol sistemleri aktif kontrolün bir grubu olarak düşünülebilir. Kontrol edilebilir pasif kontrol elemanları olarak tanımlanabilir. Bu kontrol sisteminde aktif olmayan elemanların hareketi sonucunda karşı koyucu kuvvet üretilir. Ayrıca bu kontrol sistemlerinin harekete geçmesi için çok küçük bir harici güç kaynağı gereklidir.

Bu çalışmada çok serbestlik dereceli yapıları kontrol etmek amacıyla pasif ve aktif kontrol sistemlerinin etkinliği araştırılmıştır. Çok serbestlik dereceli sistem olarak seçilmiş 5 katlı betonarme bir yapıda pasif ve aktif kontrol algoritmaları kullanılarak yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Pasif kontrol için hıza bağlı viskoz damper, aktif kontrolün etkiliği için LQR kontrol ve  $H_{\infty}$  kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Yapı kontrol sistemlerinin etkinliği 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi'nin Gebze-

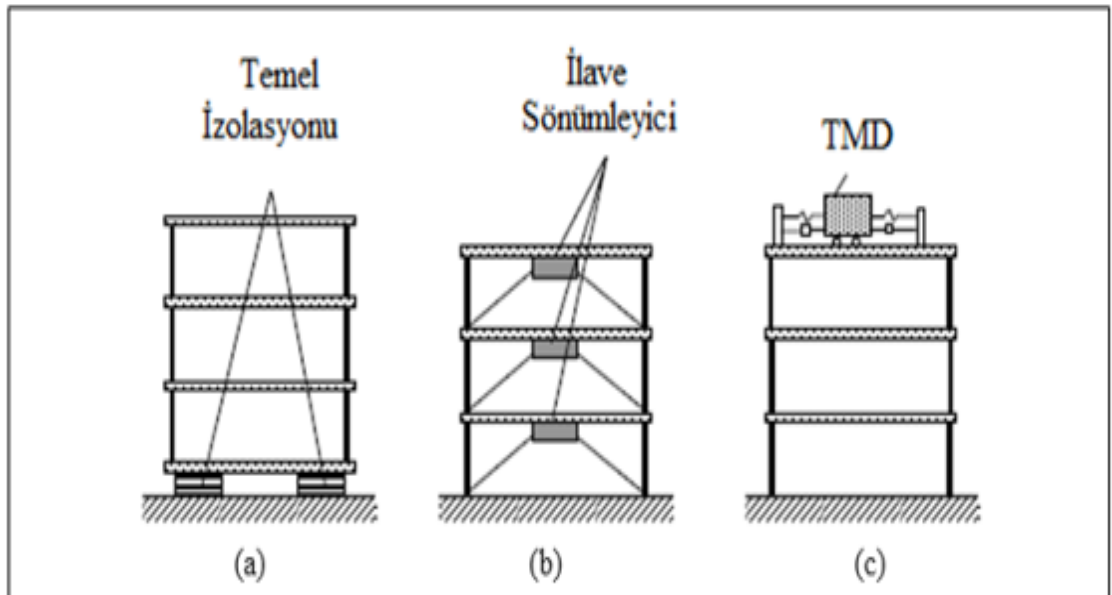
TÜBİTAK izleme istasyonu kayıtları kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan analiz sonucunda kontrolsüz ve kontrollü durumlar için yapı etkileri karşılaştırılarak paylaşılmıştır.



## 1. YAPI KONTROL SİSTEMLERİ

### 1.1. Pasif Kontrol

Pasif kontrol sistemleri dışarıdan herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan yapıya yerleştirilmiş çeşitli mekanizmalarla dinamik enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerine alır (Şekil 1.1). Yapının dış etkilere karşı vereceği tepkilerini azaltır ve yapının dayanma kapasitesini artırılmasına yardımcı olurlar. Bununla birlikte, pasif kontrol cihazları dışarıdan güç kaynağına ihtiyaç duymadığı için doğal olarak stabildir. Bu sistemlerinin maliyeti az ve hesabı kolaydır. Pasif kontrol, pasif enerji sönümleyiciler ve taban izolasyon sistemleri olarak ikiye ayrılır [1].



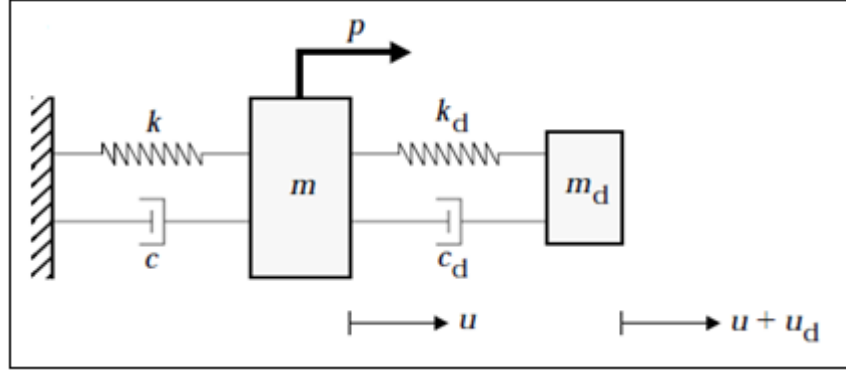
Şekil 1.1. Pasif Kontrol Sistemleri (a) Temel İzolasyon Sistemleri (b) İlave Sönümleyici (c) Ayarlı Kütle Sistemi

#### 1.1.1. Pasif enerji sönümleyiciler

Başlıca pasif enerji sönümleyici kontrol sistemleri; ayarlı kütle sönümleyici (TMD), ayarlı sıvı sönümleyici (TLD), viskoelastik sönümleyici, viskoz sıvı sönümleyiciler, eğilmeli sönümleyiciler ve metalik sönümleyicilerdir.

### 1.1.1.1. Pasif ayarlı kütle sönümleyiciler(TMD)

Şekil 1.2’de tek serbestlik dereceli bir yapı ve bu yapıya yerleştirilmiş TMD’nin modeli görülmektedir [2]. Burada  $k_d$ ,  $c_d$  ve  $m_d$  ayarlı kütle sisteminin (TMD) rijitlik katsayısı, sönüm katsayısı ve kütleini ifade etmektedir. TMD’nin kütleinin yapıya göre  $180^\circ$  faz dışı hareketi ile yapıyla aynı frekansta titreşir ve enerji sönümlenir.



Şekil 1.2. TMD Şematik Gösterimi

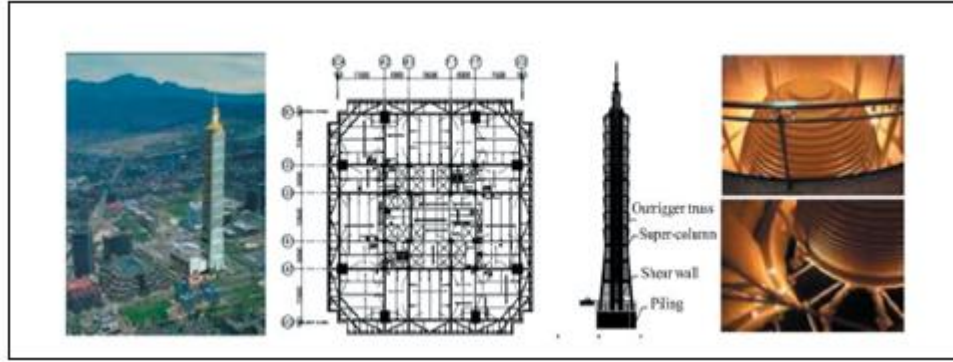
Pasif TMD’ler yapının genel olarak birinci mod tepkilerini azaltacak şekilde tasarlanır. Diğer modların da kontrolün sağlanması, aktif kontrol sistemleri ile mümkün olabilmektedir. Bir TMD'nin en basit şekli, sabitlenmiş yardımcı bir kütle, yay ve sönümleyici cihazından oluşur veya Şekil 1.3' te gösterildiği gibi ana yapının kat seviyelerine, genellikle en üst kat seviyelerine yerleştirilir. Damperin frekansı belirli bir yapısal frekansa, genellikle ilk doğal frekans ayarlanır, yapısal hareket ile bu frekans uyarıldığında, damper faz dışı rezonansa girer. Böylece yapıya etki eden kuvvetlerin enerji yayılımı damper ile elde edilebilir [1].

TMD kullanımını ilk teorik çalışma 1928’de Ormondroyd ve Den Hartog [3] tarafından yapılmıştır. O zamandan beri, çok fazla farklı dinamik yüklemeler için TMD’nin etkinliğini araştırmak amacıyla çalışmalar yapılmış ve uygulanmıştır. TMD’ler rüzgar kaynaklı titreşimleri engellemek için yüksek yapılarda kullanılmaktadır. Örnekler arasında: Boston'daki 244 m yüksekliğindeki John Hancock Kulesi [4] 300 ton kurşun ve çelik bloktan oluşan TMD; New York'ta 280 m yüksekliğindeki Citycorp Center Ofis Binası 400 ton beton bloktan oluşan TMD [5]; New York'taki Park Binasının [6] teras katındaki dansın neden olduğu titreşimleri azaltmak için kullanılmıştır [1]. Şekil

1.4'te Taipei 101 Kulesi'nin rüzgara karşı direnci arttırılmak için pasif TMD sistemi kullanılmıştır.



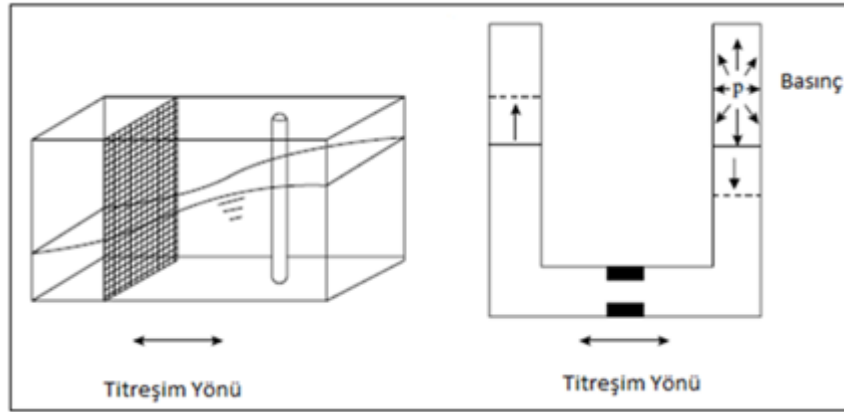
Şekil 1.3. TMD Yerleştirilmiş Yapı



Şekil 1.4. TMD uygulanmış Taipei 101 Kulesi

#### 1.1.1.2. Ayarlı sıvı sönümleyiciler (TLD)

Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler, yapısal titreşim enerjisini azaltan bir ayarlı kütle sönümleyicisi ile aynı temel prensibe sahiptir ve karmaşık mekanizmaya sahip değildir (Şekil 1.5). TLD'ler de genel olarak yapısal tepkilerin maksimum olduğu en üst katlara yerleştirilir. Bir Ayarlı Sıvı Sönümleyici su veya başka bir sıvı malzeme, kütle gibi yerçekimi tarafından oluşan kuvvetle etkilenir ve sistem çalışır. Dinamik etkilerle oluşan yapısal titreşim TLD'yi harekete geçirir ve hazne içindeki sıvı hareketi ile enerji sönümlenir [1]. TLD'ler ilk olarak gemilere uygulanırken 1980'lerde inşaat mühendisliği titreşim kontrolü olarak kullanılmaya başlanmıştır [7].

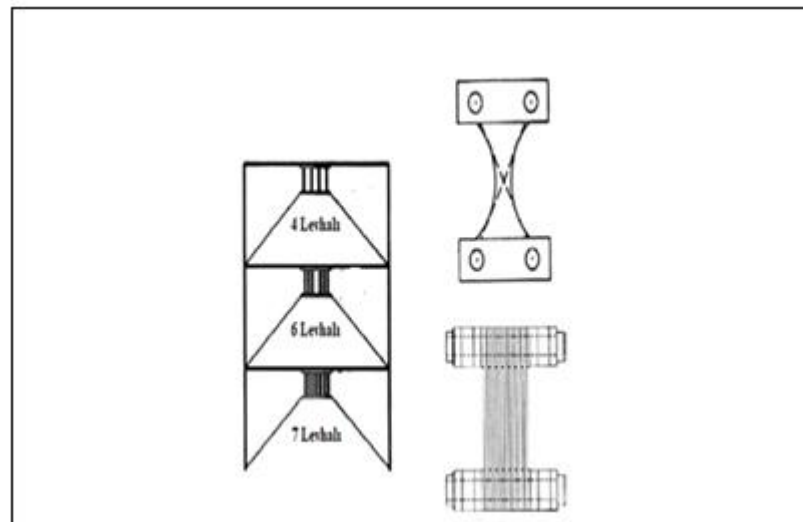


Şekil 1.5. Ayarlı Sıvı Sönümleyisi (TLD)

### 1.1.1.3. Eğilmeli metal sönümleyiciler

Yapıya yerleştirilen metalik sönümleyicilerin elastik olmayan deformasyonu ile enerji dağıtırlar. Bu sönümleyiciler ile enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanır ve böylelikle taşıyıcı sistem zarar görmez. Sönümleyici şekil değiştirmesi halinde sökülebilir yerine yenisi takılabilir. Metalik sönümleyici olarak genel olarak X, üçgen veya dikdörtgen şeklinde yumuşak çelik veya kurşun malzemeler kullanılmaktadır [1].

Şekil 1.6'daki modelde ADAS olarak adlandırılan X şeklinde metalik sönümleyici yerleştirilmiş yapı ve sönümleyicinin detayı yer almaktadır. Şekilde görüldüğü üzere çelik levhalar birbirine paralel olarak yerleştirilir ve plakalar V şeklinde çelik çubukların arasına yerleştirilmiştir.

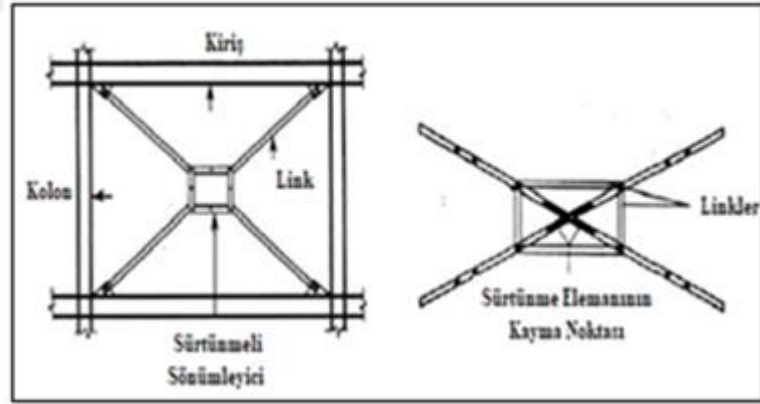


Şekil 1.6. X Şekli Metalik Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı

#### 1.1.1.4. Sürtünmeli sönümleyiciler

Sürtünmeli sönümleyiciler, yapıya eklenen kavramalar arasına yerleştirilen elemanlar aracılığıyla, hareketin kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler. Sürtünmeli sönümleyiciler hidrolik olarak çalışan araçlardır. Elemanlardaki kayma sürtünmesi aracılığıyla sönüm sağlanır. Sürtünmeli sönümleyicinin en bilinen örneği 1980'lerin başında Pall ve Marsh pasif sürtünmeli sönümleyicilere öncülük etmişlerdir [8]. Pall ve Marsh'ın X şekilli çubuklardan oluşan sistemleri sürtünme prensibini kullanırlar [9]. Şekil 1.7'de görüldüğü üzere bu elemanlar kavramalar gibi diyagonal yerleştirilmeyip kat kirişlerine paralel yerleştirilmiştir. Sürtünmeli sönümleyicilerin en önemli özellikleri, orta şiddette deprem ve rüzgar gibi dinamik yer hareketlerinin etkileri sonucunda kaymaya izin verilmeyecek şekilde tasarlanmış olmalarıdır [1].

Sürtünmeli araçlar efektif kullanım, güvenilirlik ve ekonomik olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sönümleyicilerin uzun süre mekanik özelliklerini korumak zordur. Korozyon ve sıcaklık değişimlerinden etkilenirler [1].

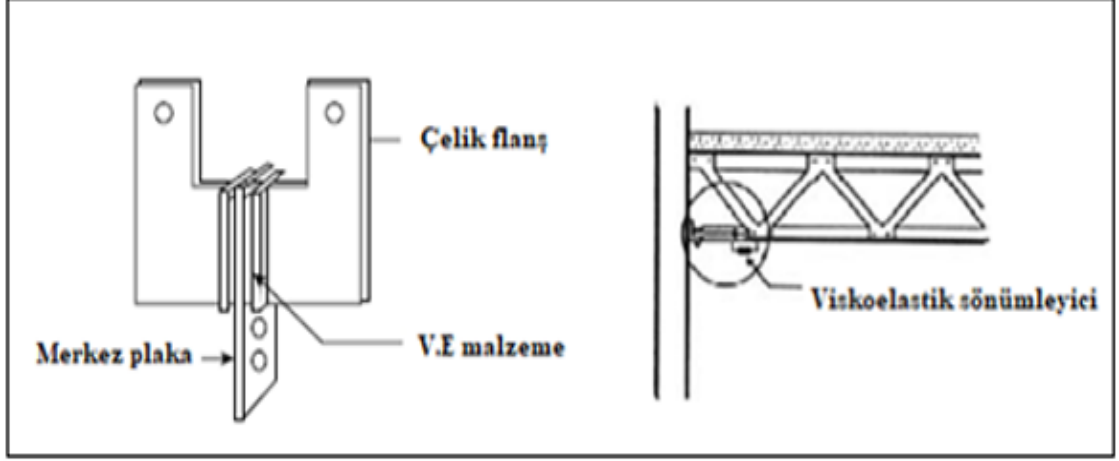


Şekil 1.7. Pall Sürtünme Tipi Sönümleyici

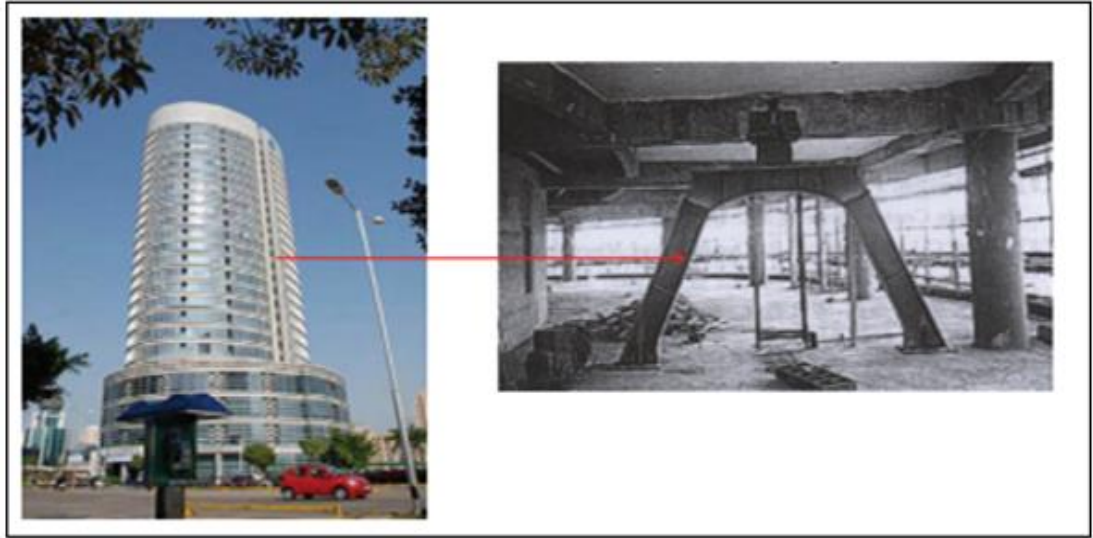
#### 1.1.1.5. Viskoelastik sönümleyiciler

Viskoelastik sönümleyiciler viskoelastik malzemenin kesme deformasyonu yapıdaki titreşim enerjisini dağıtır ve yapı tepkilerini azaltır. Viskoelastik sönümleyicinin histerezis eğrisi elipstir ve bu sayede mükemmel enerji dağıtım kapasiteleri vardır. Viskoelastik sönümleyicilerin avantajları imalatı kolay, dayanıklılığı iyi ve düşük maliyetli olmaları olarak sıralanabilir. Hem deprem hem de rüzgara karşı yapı kontrolünde kullanılır. Viskoelastik sönümleyicilerin dezavantajları

sıcaklıktan etkilenmeleridir [1]. Şekil 1.8 ve 1.9'da viskoelastik sönümleyicilerin farklı uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 1.8. (a) Viskoelastik sönümleyici (b) Dünya Ticaret Merkezindeki viskoelastik sönümleyici detayı



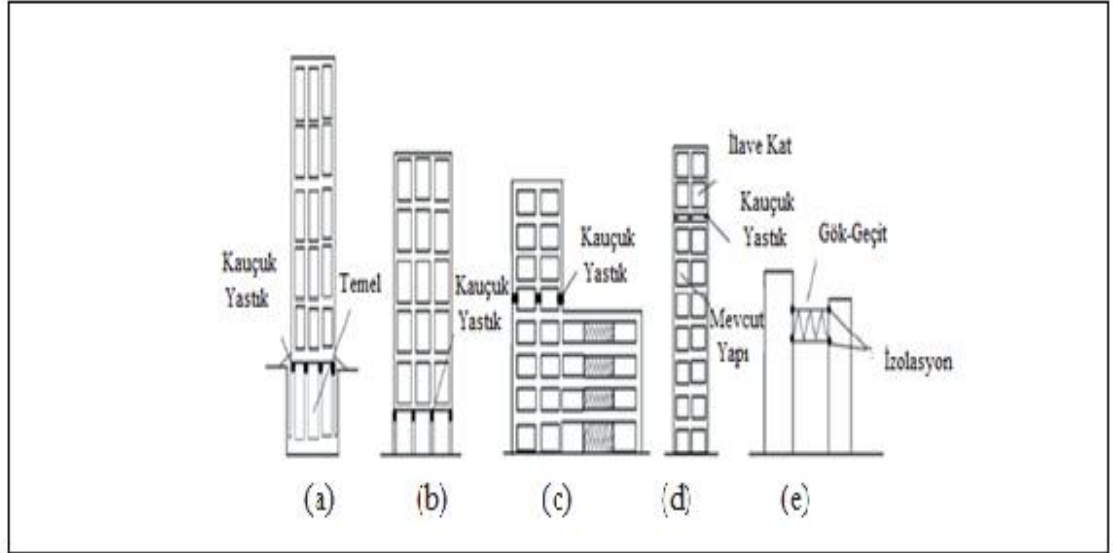
Şekil 1.9. Viskoelastik Sönümleyici uygulaması Chaoshan Xinhe Binası

#### 1.1.1.6. Viskoz sönümleyiciler

Viskoz sönümleyiciler çelik bir piston içindeki akışkan silikon veya yağ aracılığıyla çalışmaktadır. Viskoz sönümleyicilerin avantajları yoğunluğunun düşük olması, sıkıştırılamaz olması, ısıya dayanıklı olması ve geniş frekans bandında çalışabilmeleridir [1]. Sıvı viskoz damperler başlangıçta askeri ve havacılık endüstrisinde kullanılmıştır. 1980'lerin sonunda ve 1990'ların başında yapısal mühendislikte kullanılmak üzere uyarlanmıştır [10,11].

### 1.1.2. Yapı izolasyon sistemleri

Yapı izolasyonu, pasif kontrol yaklaşımının iyi yapılandırılmış bir uygulamasıdır. Temel amaç, üstyapı ile temeli ayırmaktır. Yapının temeline düşük yanal rijitliğe sahip malzeme monte edilerek esnek bir taban elde edilir. Esnek elemanlar sayesinde yapının periyodu artar ve zeminden yapıya aktarılan deprem kuvvetlerinin azalması sağlanır. Deprem sırasında, esnek taban yer hareketinin yüksek frekanslarını filtreler ve binanın hasar görmesini veya göçmesinin engellemeye yardımcı olur. Alçak ve orta katlı bina yapıları yüksek frekanslara sahip yapılar olduğundan sismik etkilere karşı temel izolasyon sistemi uygulaması bu yapılar için etkili bir araçtır. Şekil 1.10'da yapı izolasyon sisteminin farklı uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 1.10. (a) Temel İzolasyonu (b) Birinci kat izolasyonu (c) Yapının üst katlarında izolasyon (d) İlave katla yapı izolasyonu (e) Gök geçit Bağlantı İzolasyonu

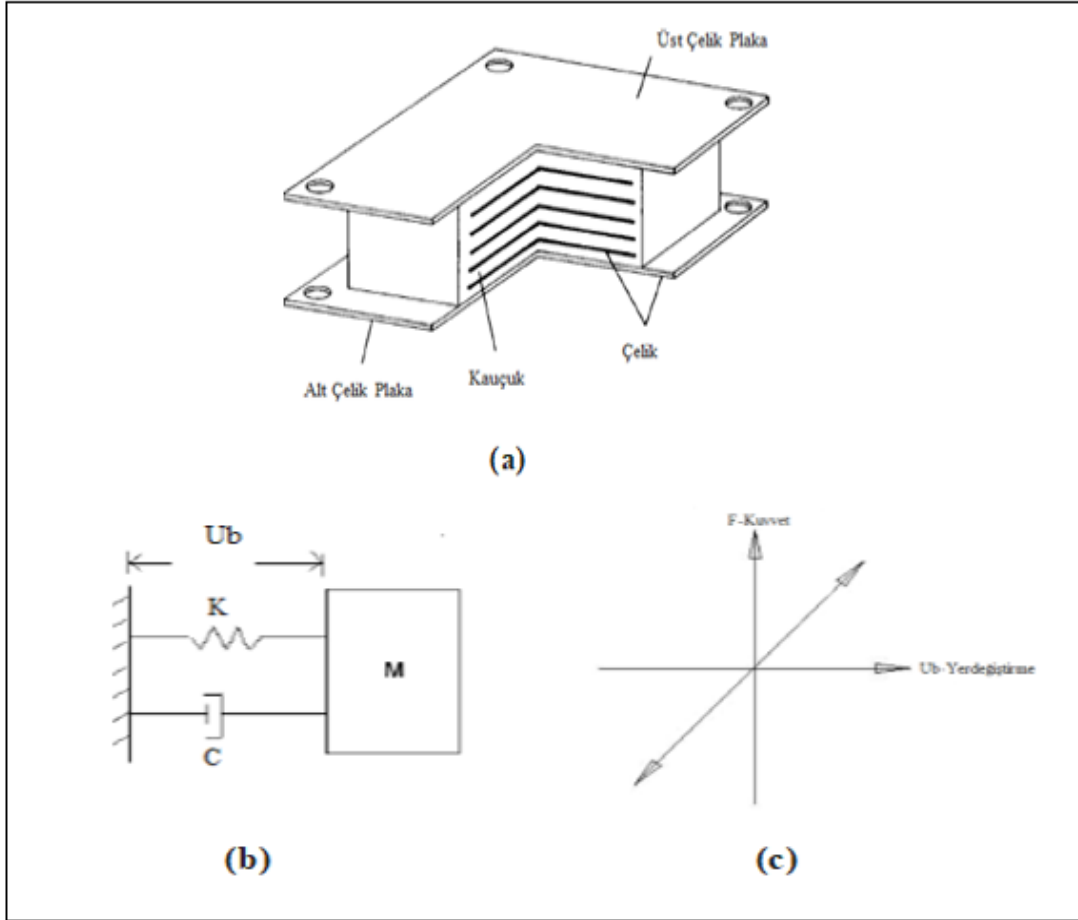
Yapı izolasyon sistemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

Tabakalı Kauçuk Mesnetler (LBR), Esnek Sürtümlü Taban İzolasyon sistemleri (R-FBI), Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnetler veya N-Z sistemi, Saf Sürtümlü Sistemi (P-F), Sürtümlü Sarkaç Sistemi (FPS), Fransız Elektrik Sistemi (EDF).

#### 1.1.2.1. Tabakalı kauçuk mesnetler (LBR)

Tabakalı kauçuk mesnetler, dönüşümlü olarak çelik ve kauçuğun tabakalar halinde yerleştirilmesiyle oluşur. LBR taban izolasyon sisteminin en yaygın kullanılan

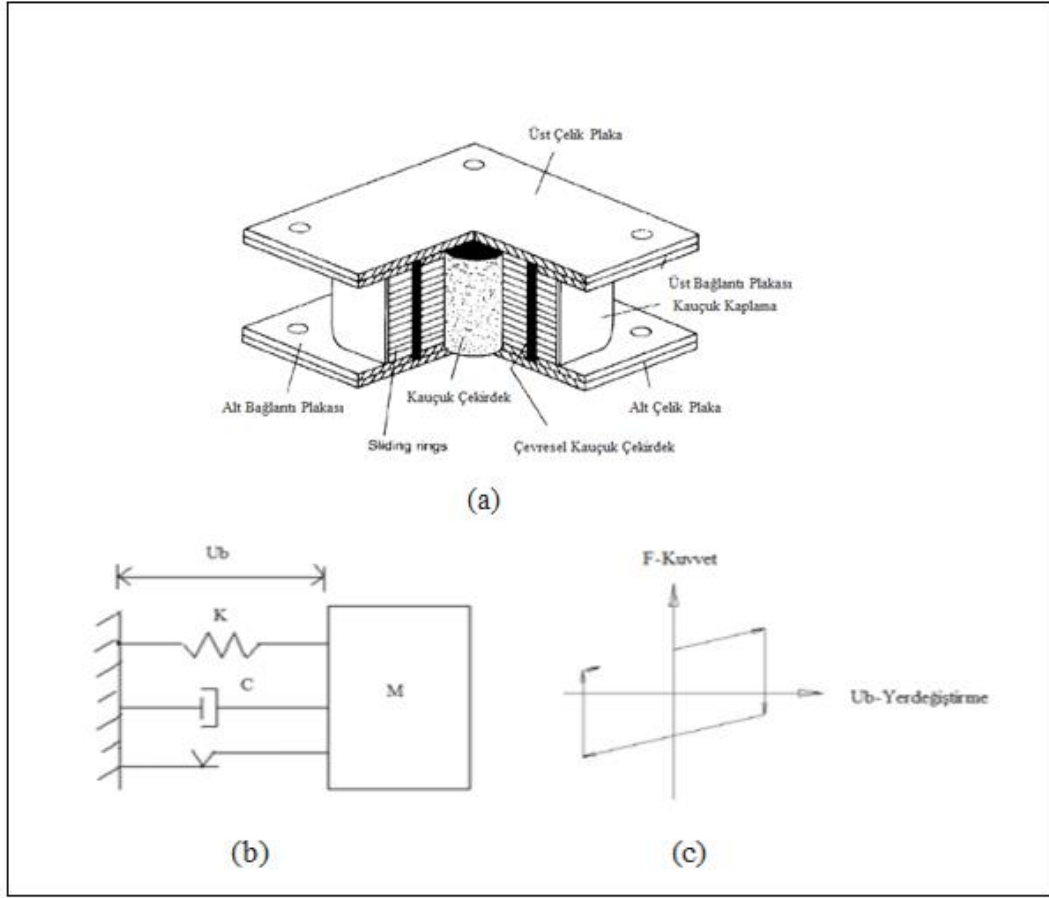
sistemidir. Kauçuk mesnetler, hem güçlü düşey yük taşıma kapasitesi, hem de küçük yatay rijitlik sayesinde büyük yatay yer değiştirme yapabilir, aynı zamanda düşey deprem etkilerine de dayanabilir. LBR sistemini doğal frekans ve sönüm sabiti karakterize eder. Sönümlemeyi karşılamak için izolasyon sisteminde, kurşun çekirdek veya yüksek sönümlü kauçuk kullanılabilir. Yaygın olarak kullanılan izolasyon cihazı Şekil 1.11’de gösterildiği gibidir.



Şekil 1.11. (a) Şematik Gösterim (b) Matematiksel Model (c) Kuvvet-Deformasyon Davranışı

### 1.1.2.2. Esnek sürtünlü taban izolasyon sistemleri (R-FBI)

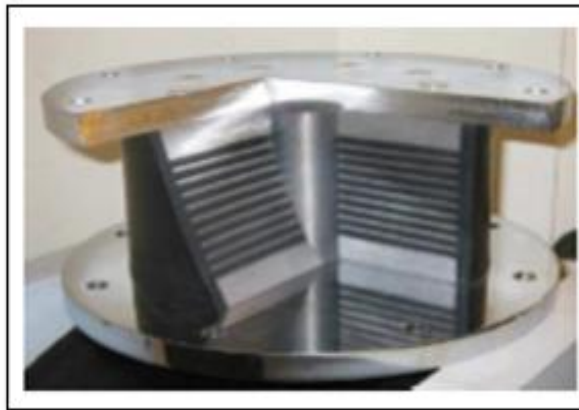
Merkezinde kauçuk çekirdek bulunan, birbiri ile sürtünme etkisinde olan eş merkezli teflon tabakalardan oluşur (Şekil 1.12). Sistem taban izolasyonu; sürtünme sönüm ve yayların hareketi ile sağlar. Doğal frekans, sönümleme sabiti ve sürtünme katsayısı ile karakterize edilir.



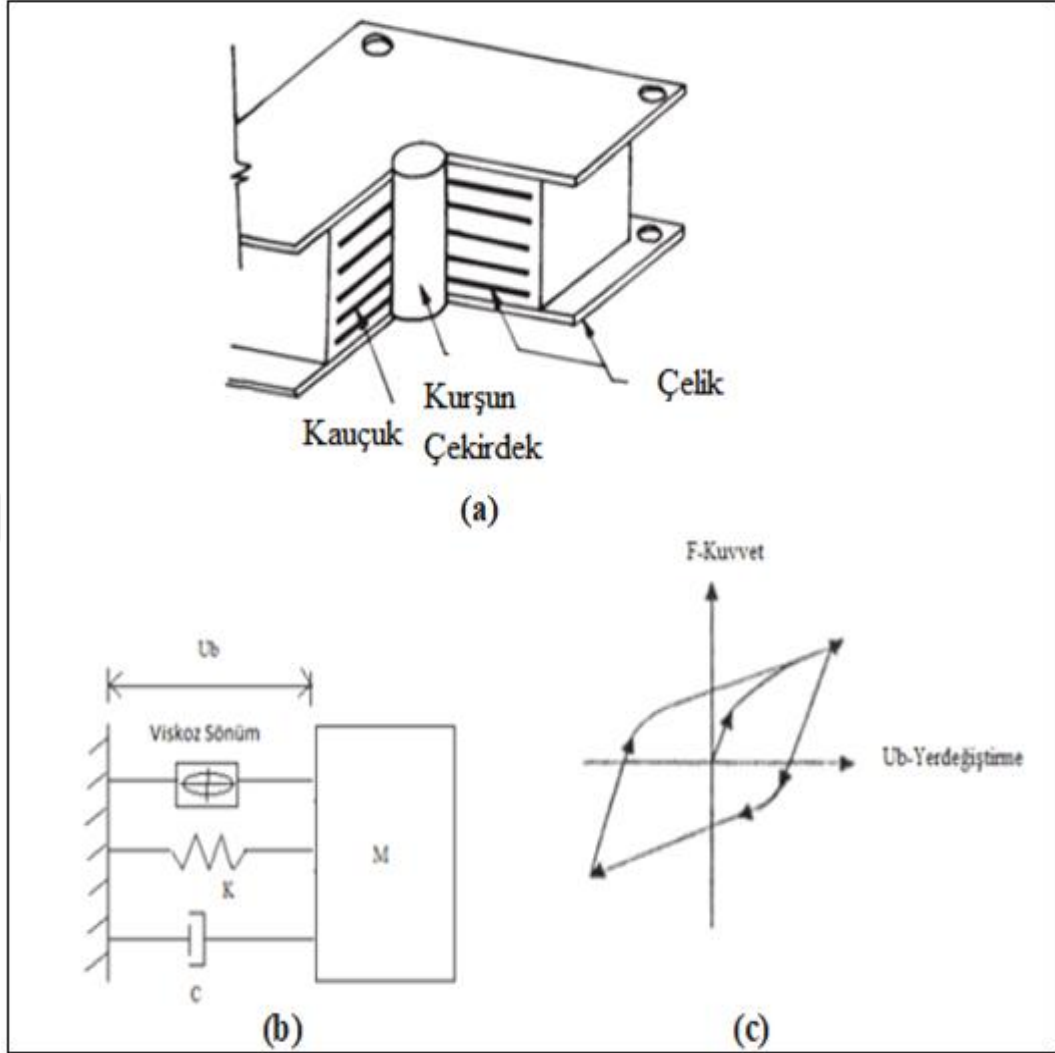
Şekil 1.12. (a)Şematik Gösterim (b)Matematiksel Model (c)Kuvvet-Deformasyon Davranışı

### 1.1.2.3.Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (N-Z sistemi)

Tabaka halinde elastomerik taşıyıcı ve kurşun çekirdekten oluşur (Şekil 1.13). Kurşun çekirdek enerjii sönümlerken, yatay esneklik, tabaka halindeki kauçuk bağlantı tarafından sağlanır. Sistem histerik sönümlerici gibi davranır (Şekil 1.14).



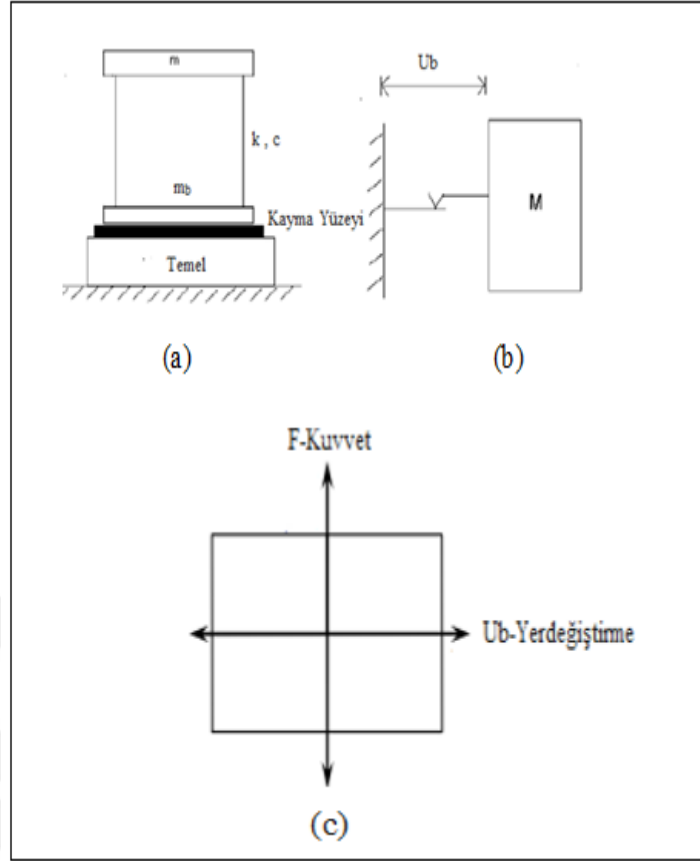
Şekil 1.13. Kurşun Çekirdekli Mesnet (N-Z)



Şekil 1.14. (a) N-Z (b) Şematik Gösterim (c) Kuvvet – Deformasyon Davranışı

#### 1.1.2.4. Saf sürtülmeli sistemi (P-F)

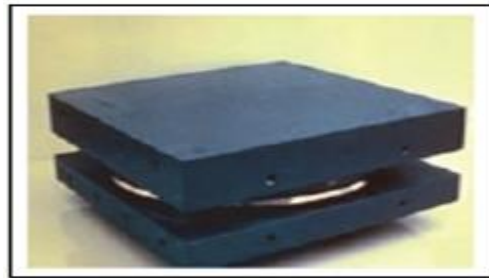
Şekil 1.15’de gösterilen saf sürtülmeli taban izolasyon sisteminin mekanizması kayma sürtünmesine dayanır. Yatay sürtünme kuvveti harekete direnç gösterir ve enerjinin dağıtılmasını sağlar. Geliştirilmiş en basit taban izolasyon sistemidir. Bu sistem çok çeşitli frekans girişleri için etkili olduğundan depreme karşı performansı iyi olmakla birlikte maliyeti ucuzdur.



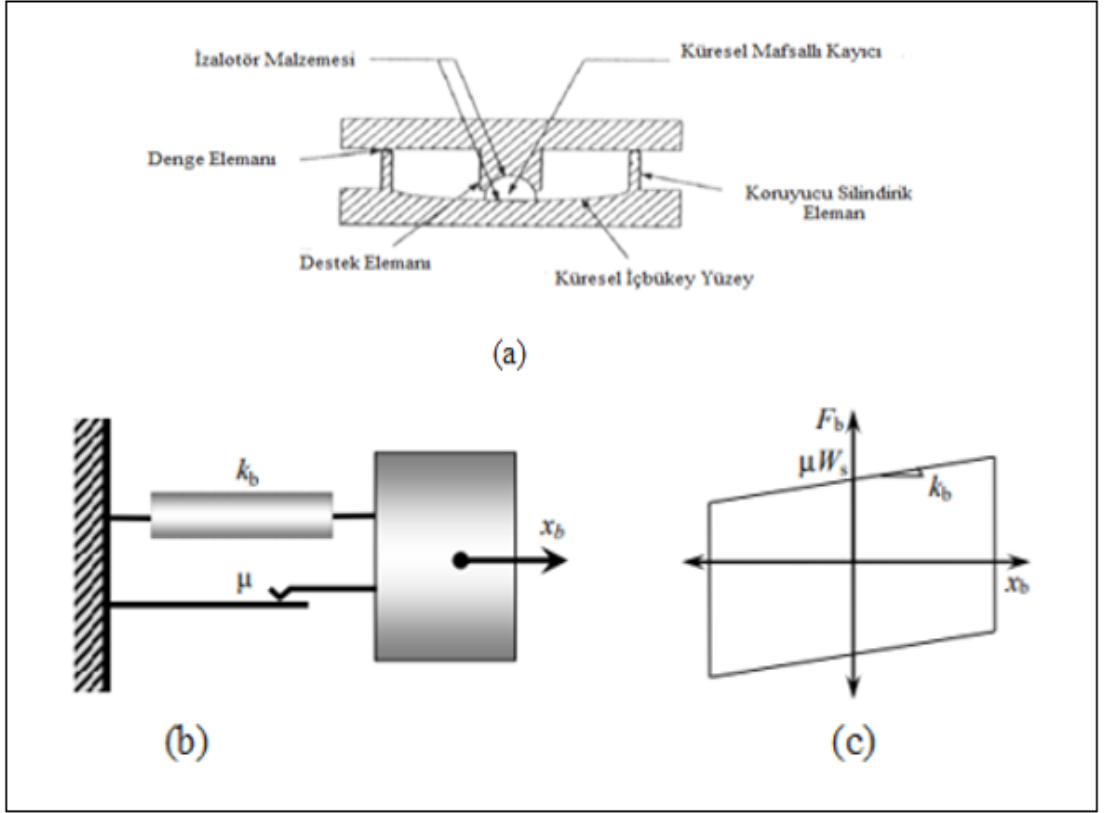
Şekil 1.15. (a)Fiziksel Model (b)Matematiksel Model (c)Kuvvet-Deformasyon İlişkisi

#### 1.1.2.5. Sürtünlü sarkaç sistemi (FPS)

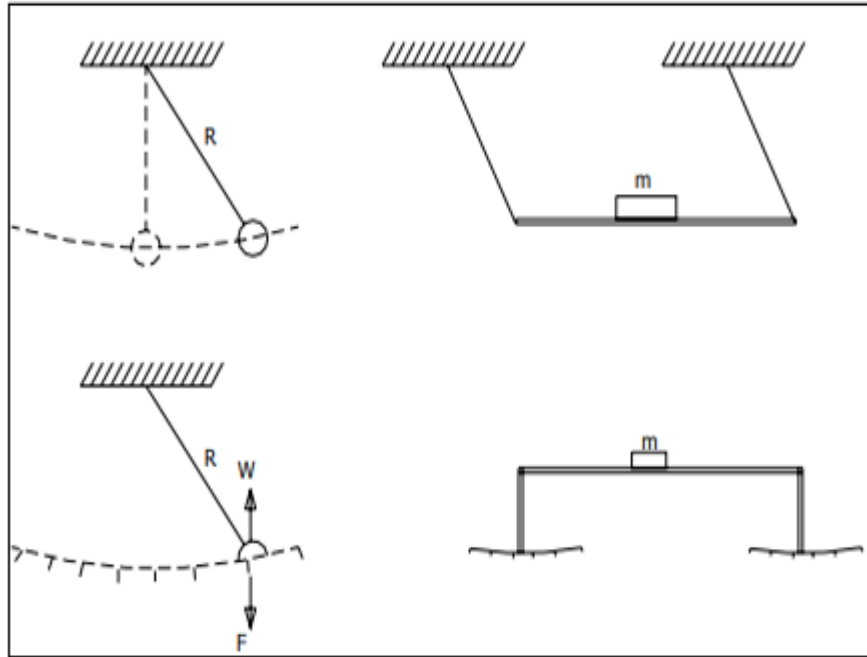
Kayma hareketi ve geri dönüş kuvveti oluşturan sürtünlü bir izolasyon sistemidir. Paslanmaz çelikten küresel yüzeyde hareket edebilen mafsallı kayıcıya sahiptir (Şekil 1.16). Küresel yüzey ile mafsallı kayıcı arasında oluşan sürtünme izolatörde sönüm oluşturur (Şekil 1.17). Sürtünlü, sarkaç sisteminin hareket mekanizması ise Şekil 1.18'de gösterilmektedir.



Şekil 1.16. Sürtünlü Sarkaç Sistemi



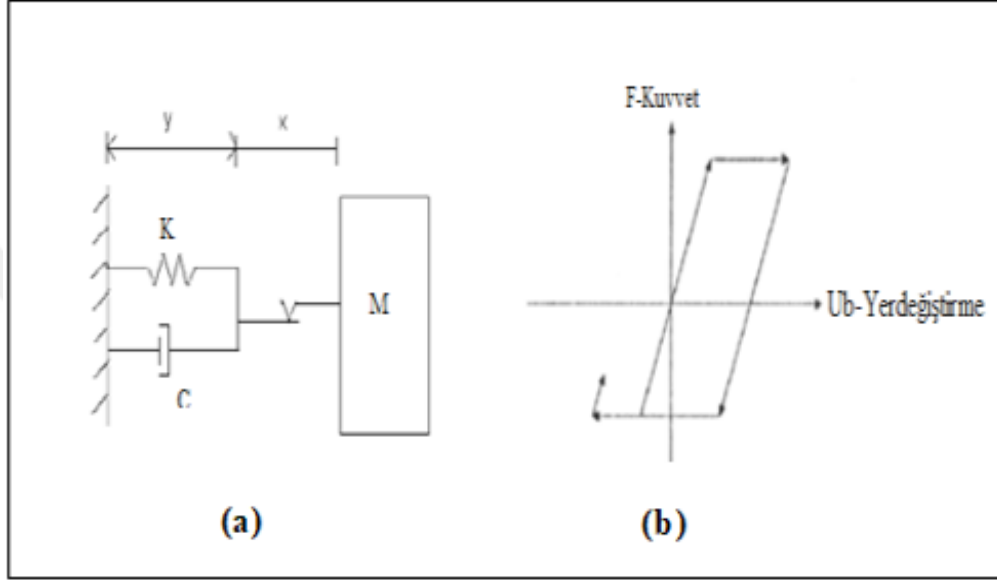
Şekil 1.17. (a) Fiziksel Model (b)Matematiksel Model(c) Kuvvet-Deformasyon İlişkisi



Şekil 1.18. Sürtünlü Sarkaç Sisteminin Hareket Mekanizması

### 1.1.2.6. Fransız elektrik sistemi (EDF)

Nükleer enerji santrallerinin artmasıyla geliştirilen sürtünme tipli izolasyon sistemidir. Şekil 1.19'da gösterilen EDF, neopren tabakalar ile güçlendirilmiş çelikte temas halinde olan kurşun-bronz alaşımı ve elastomer mesnet üzerine oturtulmuş kayma yüzeyinden oluşur. EDF sisteminin kesiti LRB sistemi ile neredeyse aynıdır.

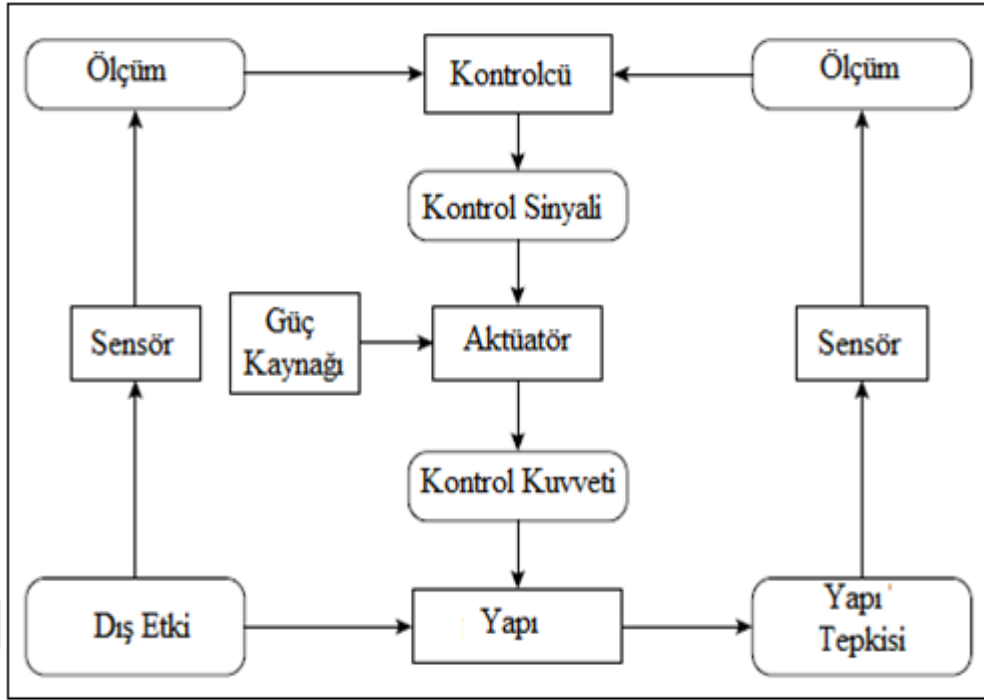


Şekil 1.19. (a) Matematiksel Model (b) Kuvvet-Deformasyon Davranışı

## 1.2. Aktif Kontrol Sistemleri

Aktif kontrol sistemleri, pasif kontrol mekanizmalarından farklı olarak dışarıdan güç kaynağına ihtiyaç duyar. Bu dış güç kaynağı aracılığıyla kontrol edilen tetikleyici sayesinde yapıya kuvvet uygulanır ve yapının dışarıdan gelen etkiye karşılık verdiği tepkiyi azaltacak kontrol kuvvetleri hesaplanıp uygulanır. Aktif kontrol sistemleri dış ve iç etkilerden oluşacak tepkileri kontrol edebilir [1].

Aktif kontrolün amacı, yapı kontrolü süresince yapıya geri besleme sisteminden kontrol kuvveti uygulanarak yapının tepkilerinin belirli sınırlar içinde tutmaktır. Başlıca aktif kontrol sistemleri; aktif kütle sönümleyicisi, aktif tendon kontrolü, aktif destek kontrolü ve darbe harekete geçirici sistem olarak sıralanabilir [1]. Şekil 1.20'de aktif kontrol şeması yer almaktadır.



Şekil 1.20. Aktif Kontrol Şeması

Wu ve araştırma ekibi tarafından çerçeve binasının sismik korunması için gürbüz bir kontrol yöntemi üzerinde bir araştırma yapıldı. Tasarım sürecinde izleme hatasını ve ölçüm gürültüsünü azaltmak için performans gürbüzlüğü de dahil olmak üzere gürbüzlük ölçütleri kullandılar. Bu çalışmada, yapıların kontrolü için geliştirilmiş bir  $H_{\infty}$  kontrol problemine dönüştürülebilen söz konusu gürbüzlük kriterlerini uyguladılar. Önerilen yöntemi doğrulamak için, tam ölçekli bir çelik çerçeve binası üzerinde sayısal ve deneysel bir test gerçekleştirdiler. Sonuçları  $H_{\infty}$ 'ın performansının dikkate değer olduğunu göstermiştir [12].

Bueno ve meslektaşları, sistem parametrelerindeki belirsizlikleri göz önünde bulundurarak deneysel bir yöntemle kafes yapılarında aktif titreşim kontrolü üzerine bir araştırma yaptılar. Kontrol etmeyi zorlaştıran bu yapılardaki mevcut doğrusallıklara ve belirsizliklere odaklandılar. Bu zorluğun üstesinden gelmek için, bir durum-uzay gerçekleşmesi ile temsil edilen dinamik modeli elde etmek için bir tanımlama yöntemi kullandılar. Deneysel bir metodoloji ile doğrusal olmayan ve belirsizliği olan karmaşık yapılar için etkili ve sağlam bir kontrolör tasarımı kazanılabileceğini göstermişlerdir [13].

Park ve araştırma grupları, büyük yapılarda dinamik tepkileri kontrol etmek için  $H_{\infty}$  kontrol yöntemi ile bilinear kutup kaydırma dönüşümü kullanarak aktif kontrol sistemi üzerinde araştırma yapmıştır. Çalışmada belirli bir hedef sönümlenmesi oluşturmak için doğrudan kutup yerleştirme tasarımı kullanılmıştır. Deprem titreşimli on katlı bina kullanarak sayısal simülasyonlar yoluyla önerilen kontrol yöntemlerinin geçerliliğini göstermişlerdir [14].

Venanzi ve arkadaşları, rüzgara maruz kalan yüksek katlı binalar için bir dizi aktif ayarlı kütle damperinin optimum tasarımını araştırmıştır. Bu araştırmada kullanılan kontrol sistemi, servis edilebilirlik sınır durum koşullarında eğilme ve burulma tepkilerini azaltan ATMD'lerdir. Kullanılan algoritma ise bir Kalman filtresi ile tamamlanan klasik LQR dir. Binanın çeşitli katlarına monte edilmiş sınırlı sayıda ivmeölçer kullanarak geri besleme bilgilerini toplamışlardır. Bu araştırmada, binanın en üst katında ATMD'nin en uygun sayısını ve pozisyonları tespit edilmiştir. Ayrıca ivmeölçerlerin bina yüksekliği üzerine en uygun yeri belirenmiştir. Bu kontrol sistemini, rüzgar yükü altında yüksek bir binanın tepkisini azaltmak için optimize edilmiştir. Sonuçlar, optimizasyon prosedürünün pasif bir sistem olarak çalışan ATMD dizisinin en etkili konfigürasyonunu bulabildiğini, eğilme ve burulma tepkisini en aza indirdiğini göstermiştir [15].

Choi ve araştırma grupları tarafından modal bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak sismik yanıtın azaltılması için aktif bir kontrol gerçekleştirildi. İstenen aktif kontrol kuvvetini üretmek için modal alanda tasarlanmış yeni bir bulanık kontrolör kullandılar. Sunulan yeni algoritma, yapılardaki tüm durum değişkenlerinin bilgilerini dikkate alabilmek için modsal kontrol algoritmasını benimsemiştir. Ayrıca, sunulan algoritmanın karmaşık modeller tarafından kolayca dağıtılabileceğini gösterdiler. Araştırmaları, aktif bir modal bulanık kontrol şemasının bir Kalman filtresi ve gerçek yapılarda uygulanabilecek düşük geçişli bir filtre ile birlikte uygulandığını gösterdi. Sayısal simülasyonlarla elde ettikleri sonuçlar, önerilen aktif modal bulanık kontrol sisteminin yapılarda sismik tepkilerinin azaltılmasında yararlı olabileceğini göstermiştir [16].

Ikeda ve araştırma grupları, inşaat mühendisliği alanındaki yapısal kontrollerde aktif bir kütle sönümleyici sisteminin ilk uygulamasını gerçekleştirdi. Deprem ve rüzgar

uyarıları altında yapısal tepkileri önlemek için Tokyo'daki on katlı bir ofis binasına aktif bir kütle sönümleyici (AMD) sistemi kurdular. Bu sistemde LQR algoritması kullandılar. Bu çalışmanın sonunda hem simülasyonun hem de sistem tanımlamasının AMD sisteminin deprem titreşimleri altında kontrol misyonuna ulaştığını doğruladığı sonucuna ulaştılar [17].

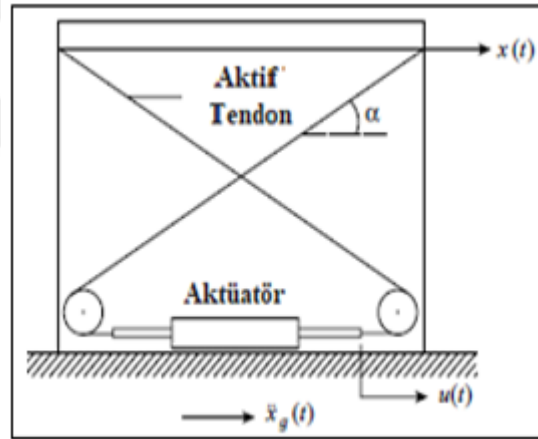
Ricciardelli ve arkadaşları tarafından yüksek binaların rüzgar kaynaklı titreşimleri azaltmak için pasif (TMD), aktif (AMD) ve hibrid (ATMD) kütle sönümleyicilerin performansı üzerine bir araştırma yapılmıştır. İlk adımda, bir kütle sönümleyici ile sağlanan ana yapıyı modellemek için basit bir 1 + 1 serbestlik dereceli sistem seçmişlerdir. Ayrıca, rüzgar kuvveti beyaz gürültü uyarımına basitleştirilmiştir. Sistemlerinde doğrusal bir kuadratik regülatör (LQR) kullanılmıştır. İkinci olarak, 64 katlı bir bina seçilmiş ve ilk dört modu göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Son olarak, atmosferik türbülansın frekans dağılımını açıklayan daha gerçekçi bir tamponlama uyarımı düşünülmüştür. Sonuçlar, ATMD'lerin kullanılmasının daha düşük kontrol kuvvetleri ve güç gerektirdiğini göstermiştir. Ayrıca, 1 + 1 dereceli sisteminin kullanılmasının, cihazların sönümleme kapasiteleri hakkında yanıltıcı bilgi sağlayabildiğini bulmuşlardır [18].

Chu ve araştırma ekibi, yapısal bir simülatör aracılığıyla gerçek zamanlı aktif kontrol doğrulaması araştırdı. Deneysel kurulum veya modellemedeki doğal yanlışlıkların ve deneysel donanımın maliyetinin yapısal kontrol kurulumunda oldukça zor olabileceğini belirtmişlerdir. Gerekli kontrol kuvvetini hesaplamak için algoritmayı bağımsız bir Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP) bulunan özel bir bilgisayar denetleyicisi içine uyguladılar. Ayrıca, gerçek zamanlı kontrol etkisini doğrulamak için bir teorik yapının Hibrit / Aktif Kütle Damperi ile gerçek zamanlı tepkisini taklit etmek için yapısal simülatörü kullandılar. Sonuçlar, gerçek zamanlı bir yapısal simülatörün daha karmaşık ve doğrusal olmayan modellere geliştirilebileceğini gösterdi. Ayrıca, DSPLINK dijital arabirimini kullanmanın sistemin yüksek hızlı bağımsız bir kontrol şemasında değerlendirilmesini mümkün kılacağı sonucuna vardılar. Ayrıca, kontrol kuvveti uygulama gecikme süresinin, DSP kontrolörünün dahili saati ayarlanarak kolayca taklit edilebileceği bulunmuştur [19].

### 1.2.1. Aktif tendon kontrolü

Aktif tendon sistemi öngerilmeli tendonların ve aktüatörlerin bir araya gelmesiyle oluşur. Öngerilmeli tendon eğik form ve çapraz formda yerleştirilir. Bu sistem için dört adet tendon ve iki aktüatör kullanılır. Tendonların ikisi yapının bir yüzüne, diğer ikisi diğer yüzüne yerleştirilir. Yapı dinamik yükler altında uyarıldığında aktüatörler tarafından verilen yer değiştirmeye tendonlar gerilme kuvvetlerinin değişimi ile yapı kontrolü sağlanmış olur [1].

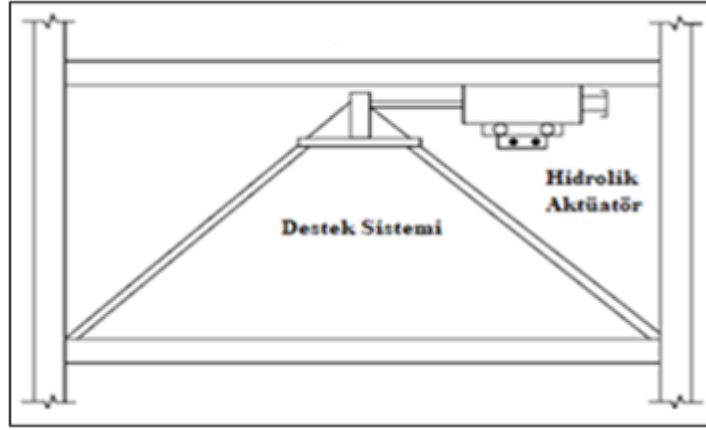
Aktif bir tendon sistemin 6 katlı tam ölçekli uygulaması, Japonya'nın Tokyo kentinde 600 tonluk bina test edilmiştir [20]. Aktif tendon sistemleri kullanılarak kontrol edilen yapılar üzerinde gerçekleştirilen hem teorik hem de deneysel çalışmaların sonuçları yapıların tepkilerinin önemli ölçüde düşürmüştür [1]. İnşaat mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan Aktif Tendon Sistemi Şekil 1.21'de gösterilmiştir.



Şekil 1.21. Aktif Tendon Sistemi

### 1.2.2. Aktif destek sistemi

Aktif destek sistemi, elektrohidrolik mekanizma tarafından yapıya eklenen öngerilmeli destek kirişleriyle sağlanmaktadır (Şekil 1.22). Bu destek elemanları diyagonal, X ve K şeklinde kullanılır. Yapının çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sensörler tarafından kontrol bilgisayarına sinyaller iletilir. Bu sinyaller kontrol bilgisayarı tarafından değerlendirilip dinamik iticiye sinyaller gönderir ve bu sinyaller dinamik itici tarafından yapının tepkilerini azaltacak doğrultuda kuvvet uygulanır. Bu sistemler yüksek katlı ve uzun açıklıklı yapılarda kullanılabilir. Bu sistemde mevcut yapısal elemanlarından yararlanılarak kontrol sisteminin maliyeti minimize edilir [1].



Şekil 1.22. Aktif Destek Sistemi

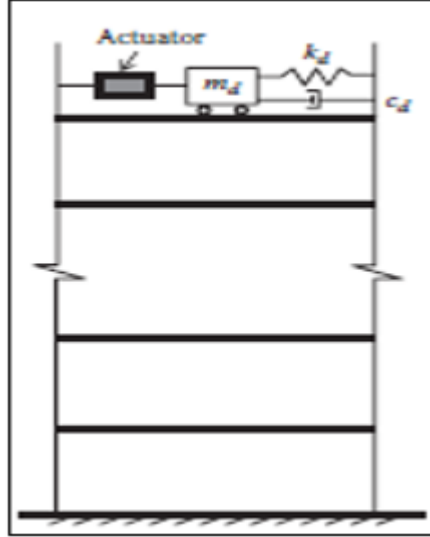
### 1.2.3. Darbe harekete geçirici sistem

Bir darbe üretme sistemi, hidrolik aktüatör yerine bir darbe üretici ile oluşturulmaktadır. Darbe üreticileri, aktif bir kontrol kuvveti üretmek için pnömatrik mekanizmalar kullanır. Bu mekanizmalar bir darbe tipi çalıştırma kuvveti oluşturmak için basınçlı hava kullanır ve yüksek basınçlı sıvı kullanan hidrolik aktüatörlerden farklıdır. Akıllı bir yapı sisteminin çeşitli konumlarına darbe harekete geçirici yapısı yerleştirilebilir. Bu konumlardan herhangi birinde büyük bir bağıl hız tespit edildiğinde, bu konumda pnömatrik aktüatör tetiklenir ve yapıya hız uygulanır. Miller ve arkadaşları altı katlı çelik bir çerçevenin en üst katına darbe üretici yerleştirerek sarsma tablasında darbe üreticiyle testler yapmışlardır [21] ve test sonuçları darbe üreticilerinin sismik tepki kontrolü için umut verici bir cihaz olduğunu göstermişlerdir. Bu sistemin dezavantajları sistemin darbe üreticileri tarafından kullanılan sıkıştırılmış gaz enerjisi ucuz olsa da, tam ölçekli binaları stabilize edecek kadar güçlü olmayabilir ve darbe üretme sistemleri kuvvet olarak yüksek doğrusal olmayan yapıya sahip olmalarıdır [1].

### 1.2.4. Aktif kütle sönümleyici

Pasif ayarlı kütle sönümleyici sistemi yapının birinci mod frekansına ayarlandığından dolayı sadece birinci modun hakim olduğu titreşim frekansında etkilidir. Deprem gibi dinamik yüklemeler daha geniş frekans aralığına sahip olduğundan pasif ayarlı kütle sönümleyicilerin eksikleri giderilerek aktif ayarlı kütle sistemleri geliştirilmiştir. Şekil 1.23'de gösterilen aktif ayarlı kütle sönümleyiciler, dinamik yüklerin çok sayıda

frekans bandı için projelendirilebilir [1]. Şekil 1.24'te Japonya' da yer alan aktif kütle sönümleyici uygulanmış Kyobashi Seiwa yapısını ve şematik gösterimi yer almaktadır.

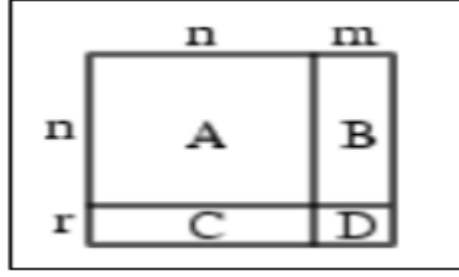


Şekil 1.23. Aktif Ayarlı Kütle Sönümleyici Yerleştirilmiş Yapı



Şekil 1.24. Aktif Kontrollü Kyobashi Seiwa Binası

Aktif ayarlı kütle sönümleyici çalışma prensibi geri beslemeli kontrol sistemi ile çalışır. Geri beslemeli kontrol gerçek zamanlı izleme ile yapılır. Çok serbestlik dereceli sistemlerin çözümünde Şekil 1.25'te şematik gösterimi verilen durum uzay denklemleri kullanılır [1].



Şekil 1.25. Durum Uzay Gösterimi

Çok serbestlik dereceli system için durum uzay denklemleri:

$$M_s \ddot{X}_s + C_s \dot{X}_s + K_s X_s = b_s u + e_s \ddot{x}_g \quad (1.1)$$

$$u = -\hat{G}_d X_s - \hat{G}_v \dot{X}_s - G_a \ddot{X}_s \quad (1.2)$$

$$Z = \begin{Bmatrix} X_s \\ \dot{X}_s \end{Bmatrix} \quad (1.3)$$

$$\ddot{X}_s = -M_s^{-1} C_s \dot{X}_s - M_s^{-1} K_s X_s + M_s^{-1} b_s u + M_s^{-1} e_s \ddot{x}_g \quad (1.4)$$

$$\dot{Z} = AZ + Bu + Ew \quad (1.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ M_s^{-1} K_s & M_s^{-1} C_s \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} b_s \end{bmatrix} \quad E = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} e_s \end{Bmatrix} \quad w = \ddot{x}_g \quad (1.7)$$

Burada A (2nx2n) boyutlu kütle, rijitlik ve sönüm katsayılarından oluşan sistem matrisidir. B (2n x m) boyutunda kontrol kuvveti yer matrisi ve E (2n x r) boyutunda dış kuvvet matrisidir. Aktif kontrol sisteminde, kontrol kuvvetinin aktive olabilmesi için gerekli enerji miktarının büyük olması enerji kaynağı sorununu oluşturur. Büyük aktif kontrol sistemlerinin kullanılması ve enerji kaynağının yerleştirilmesi ve bakımı maliyet sorununu oluşturur [1].

Farklı yapısal güvenlik seviyeleri için aktif kontrol sistemlerinin kullanımı etkili enerji dağıtım sistemlerinin uygulanması için büyük enerji kaynağına ihtiyaç vardır (Enerji

kaynağı sorunu). Bu sistemler yapı kullanımına göre kontrol sistemi ve enerji kaynağının yapıya yerleştirilmesi ve sistemin stabil çalışabilmesi için bakımı kaçınılmazdır (Maliyet sorunu). ATMD sayesinde yapısal güvenlik, insanların yaşam konforu ve yapıda önceden belirlenmiş noktada izin verilen sınır değerler sağlanabilir. Ancak ATMD kontrol kullanmasında maliyetin önemli bir kısıtlama olduğu görülmektedir. Bu yüzden klasik en uygun kontrol algoritmasında belirli performans indeksi tanımlanır. Performans indeksi J yapıyı ifade eden Z(t) ve yapıya uygulanması gereken kontrol kuvveti U(t) ye bağlıdır [1].

$$J = \int_0^t [Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t)]dt \quad (1.8)$$

Yapısal kontrol için performans indeksi ikinci derecedir. Denklemden  $T$  ifadesi matrisin transpoze edilmesini, Q (2nx2n) boyutlu pozitif yarı tanımlı matris olup güvenliği, R (m x m) pozitif tanımlı matris olup maliyeti ifade eder. R ve Q birbiri ile ters orantılı olarak çalışır. Bu yüzden aynı anda minimize edilemez [1]. Optimal kontrol kazancı:

$$u(t) = -G(t)Z(t) \quad (1.9)$$

$$G(t) = -\frac{1}{2} R^{-1}B^T P(t) \quad (1.10)$$

$$u(t) = -\frac{1}{2} R^{-1}B^T P(t)Z(t) \quad (1.11)$$

Burada G(t) kontrol kazancı matrisidir. Geri besleme kazancı matrisi pozitif tanımlıdır, kapalı çevrim sistemi kararlı ve asimptotiktir [92]. Ricatti matrisi olarak bilinen P simetrik matrisi aşağıdaki formülle ifade edilebilir:

$$\dot{P}(t) + P(t)A - \frac{1}{2} PBR^{-1}B^T P(t) + A^T P(t) + 2Q = 0 \quad (1.12)$$

Ricatti matrisi büyük ölçüde yapısal özelliklere ve ağırlık matrislerine bağlıdır. Ricatti matris P'nin deprem süresince sabit olduğu önerilir [22]. Kontrol sistemi, Ricatti matrisinin sabit bir matris olduğu varsayılır; dolayısıyla denklem 1.12' nin ilk terimi,  $\dot{P}$ 'nin deprem süresinden daha uzun olması koşulu ile sıfır alınabilir [22]. Bu sayede matrisin basitleştirilmesine yol açıp cebirsel denklemler için daha az hesaplama süresi harcanacaktır [1].

Deplasmanları bulmak için denklem 1.5'te  $u(t)$  denklemini yerine konulduğunda aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{Z}(t) = (A + BG)Z(t) + Ew \quad (1.13)$$

### 1.3. Aktif Kontrolün Avantajları

Aşağıdaki avantajlar nedeniyle, aktif kontrol sistemleri son yıllarda daha pek çok alanda kullanılabilir hale gelmiştir.

i) Arttırılmış kontrol verimliliği.

Teorik bir bakış açısından, aktif kontrol sistemleri gerektiği kadar güçlü hareket edebilir. Bununla birlikte, uygulamada, sınırlı aktüatör kapasitesinin kontrol verimliliği üzerinde olumsuz bir etkisi vardır. Buna rağmen, pasif veya yarı aktif sönümleyicilerden çok daha büyük kontrol kuvvetleri üretmek için modern endüstriyel ortamlarda güçlü aktüatörler üretilebilir.

ii) Sistemin sürekli değişen yer uyarılarına uyarlanabilirliği.

Aktif bir kontrol sistemi, yapısal titreşimi azaltmak için kontrol uyarıları ve aktüatörüyle yer uyarılarını algılayabilir ve davranışını uyarlayabilir.

iii) Kontrol hedeflerinde serbest seçim.

Kontrol sistemi tasarımı, insan konforunu ve yapısal güvenlik gibi farklı amaçlar için gerçekleştirilebilir.

iv) Çeşitli titreşim mekanizmalarında kullanılmaya uygunluk.

Bir aktif kontrol sistemi, yapının tüm önemli modlarını kapsayan çok çeşitli frekanslar altında tasarlanabilir.

Tasarım süresi için kontrolün matematik modeli kontrol teorisi ile formüle edilir ve ayrıca geri besleme kontrol yasası bir kontrol algoritması ile hesaplanır. Pratik kontrol sistemlerinde hem analog hem de dijital kontrolörler vardır. Benzer kontrolörler, geri besleme kontrol yasalarında sürekli zamanlı etki alanı

kullanırlar. Bununla birlikte, dijital kontrolörler cihazlarında analog / dijital (A / D) ve dijital / analog (D / A) dönüştürücüler kullanılmalıdır.

#### **1.4. Aktif Kontrolün Dezavantajları**

Yukarıda belirtilen belirgin avantajların yanı sıra, yapısal titreşim kontrolünde kullanılan aktif kontrol sistemleri ile ilgili bazı dezavantajların olacağını göstermektedir.

İnşaat Mühendisliği yapıları ilk olarak yayılı kütleli sistemden çok serbestlik dereceli hale indirgenir. Daha sonra bu çok serbestlik dereceli yapı hesaplamalarındaki zorluklar sebebiyle az serbestlik dereceli yapı haline dönüştürülür. Bu az serbestlik dereceli yapıya göre tasarlanan kontrol algoritması gerçek yapıya uygulandığında stabilite sorunu yaşanabilir.

Yapı kontrolünde Şekil 1.20'de görülen şemada gerçekleşen işlemlerin hepsi aynı anda gerçekleştiği varsayılmaktadır. Kontrol sistemlerinde, ölçülen değerlerin işlenmesiyle gerekli kuvvetlerin hesaplanıp yapıya uygulanması esnasında bir zaman geçmektedir. Zaman gecikmesi gerekli kontrol kuvvetlerinin hesaplanıp uygulanmasında gecikmeye sebep olmaktadır. Bu gecikme kontrol sisteminin stabilitesini bozabilmesinin yanı sıra veriminin düşmesine sebep olmaktadır.

Aktif yapı kontrolü genel olarak yapının lineer olduğu varsayımı üzerine geliştirilmektedir. Fakat deprem gibi kuvvetli bir dış etki karşısında yapıda lineer olmayan deformasyonlar oluşabilmektedir. Her ne kadar lineer olmayan özellikler yapı kontrolünde verimin azalmasına sebep olsa da yapı kontrolünde yapının lineer olmayan özelliklerinin göz önünde bulundurulması gereklidir.

Yapı kontrol algoritmaları ve yapı performansı belirlenirken genel olarak yapının kütle, sönüm ve rijitlik değerleri kullanılır. Kontrol algoritması tasarlanırken kullanılan parametreler ile inşa edilen yapıların özellikleri birebir aynı olmaz. Yapı kontrolü bu parametrelerle doğrudan ilişkili olduğundan bu değerler belirlenirken dikkatli olunmalıdır.

Bu dezavantajlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- a. Aktif kontrol sistemlerindeki aktüatörlerin gücü sınırlıdır, bu nedenle sistemin kontrol kapasitesi sınırlanır.
- b. Büyük inşaat mühendisliği yapıları için gerekli kontrol kuvvetleri çok büyük olduğundan, gerekli aktüatör boyutları çok büyüür.
- c. İnşaat mühendisliği yapılarına takılan aktüatörler harici elektrik gücü ile çalışır ve büyük olduklarından büyük bir harici elektrik kaynağına ihtiyaç duyarlar.
- d. İnşaat mühendisliği kontrol sistemlerine kurulan aktüatörler çok pahalıdır.
- e. Aktüatörlerin bakım giderleri önemli ve maliyetlidir.
- f. Yapı kontrol algoritması oluşturulurken kullanılan kütle, sönüm ve rijitlik parametrelerde belirsizlik olması.
- g. Yapının deprem esnasında lineer olmayan deformasyonlar yapması.
- h. Kontrol sisteminde ölçülen değerlerin işlenip yapıya uygun kuvvet uygulanması sırasında zaman gecikmesin olması.

### **1.5. Hibrid Kontrol Sistemleri**

Hibrid kontrol sistemleri, aktif ve pasif kontrol elemanlarının beraber kullanılarak tasarlanan sistemlerdir. Hibrid kontrolün esas amacı pasif kontrol sistemlerinin performansını geliştirmek veya aktif kontrol sisteminin ihtiyaç duyabileceği enerji miktarını minimize etmektir. Başlıca hibrit kontrol sistemleri: hibrid kütle sönümleyici, hibrid taban izolasyon sistemleri, hibrit destek sistemleri olarak sıralanabilir. Örneğin taban izalasyonlu bir yapıda taban izalasyonuna bir aktif kütleli sönümleyici bağlanmış ise bu bir hibrid kontrol uygulamasıdır ve esas amaç taban izalasyonunu kalıcı deformasyonlardan korumaktır.

### **1.6. Yarı Aktif Kontrol Sistemleri**

Yarı aktif kontrol sistemleri, az miktarda enerjiyle manyetik veya elektrik alan şiddetleri değiştirilerek yarı aktif malzemenin mekanik özelliklerinin kontrolü ile yapı kontrolü sağlanmaktadır. Yarı aktif kontrol sistemleri aktif kontrol sistemine göre çok az dış enerjiyle aktive olur. Sismik hareket sırasında aktif kontrol sistemi aktüatörü devre dışı kalma ihtimali varken, yarı aktif kontrol sistemleri piller ile çalışmaya devam etmesi önemli bir avantajdır. Yarı aktif sönümleyiciler 1920'lerde önce otomobil amortisör emici olarak önerildi [23]. Daha sonra mekanik mühendisliği alanlarında başta otomotiv uygulamaları olmak üzere kapsamlı araştırmaların konusu

oldular. 1980'lerde inşaat mühendisliği kontrol uygulamaları, yapılarının titreşim kontrolü üzerine çalışmalar başlamıştır. Yarı aktif sönümleyici kavramı üzerine araştırmalar rüzgar tepkisini kontrol altına almak için yapılmıştır [24]. 1990'larda bu kavram sismik tepki kontrolü için tanıtıldı. Başlıca yarı aktif kontrol cihazları şunları içerir: manyetoreolojik (MR) sönümleyici, elektrororeolojik (ER) sönümleyici, piezoelektrik sürtünme sönümleyici, yarı aktif değişken rijitlik kontrol cihazı ve yarı aktif değişken sönümleme kontrol cihazı olarak sıralanabilir.

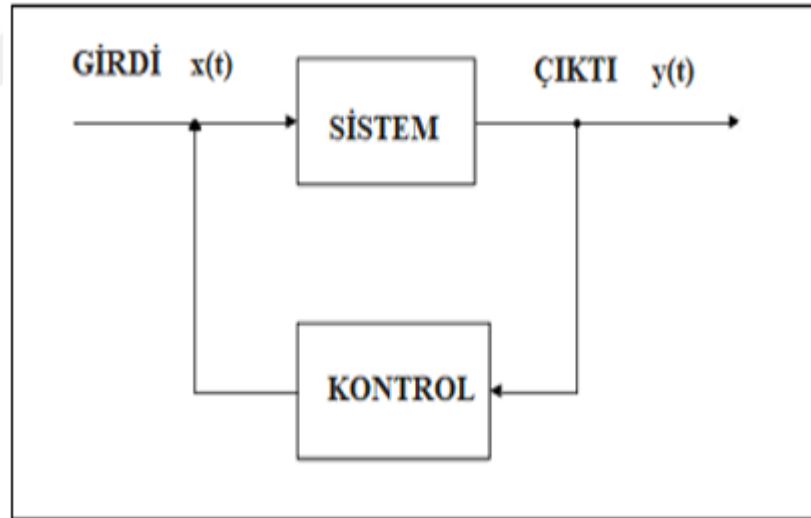


## 2. SİSTEM DİNAMİĞİ VE KONTROL

Otomatik kontrol sistemleri günümüzde toplumların günlük yaşantısına girmiş olup neredeyse her alanda kullanılmaktadır. Sistemlerin kontrolü bilimler arası bir konu olduğundan tüm mühendislik dallarında kullanılmaktadır. Otomatik kontrol sistemleri sınırsız büyüyen bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 2.1. Temel Kavramlar ve Tanımlar

- a) Sistem: Genel olarak; karşılıklı olarak birbirine bağlı elemanların toplamının bir bütün oluşturulması olarak ifade edilir. Fiziksel anlamda; belirli bir görevi bir araya getirmek için birleştirilmiş elemanlar birleşimine sistem denir. Şekil 2.1.'de örnek bir sistemin kontrol şeması yer almaktadır.



Şekil 2.1. Sistem Kavramı

- b) Transfer Fonksiyon

Transfer fonksiyonu, çıkış fonksiyonu Laplace Dönüşümünün, giriş fonksiyonu Laplace Dönüşümüne oranı olarak ifade edilir. Transfer fonksiyonu birimsiz bir fonksiyondur, on tabanında logaritmasının yirmi katı dB olarak tanımlanır

$$TF = \frac{\text{Çıkış}}{\text{Giriş}} \quad (2.1)$$

c) Denetim(Kontrol): Önceden belirlenmiş koşulu düzenlemek, kumanda etmek veya yönetmek için gerçekleştirilen işlemler denetim olarak ifade edilir.

d) Otomatik Kontrol: Bir sistemin kontrol faaliyetlerinin insan iradesi dışında önceden belirlenmiş gayeye göre kontrolü ve yönlendirilmesine otomatik kontrol denir. Otomatik kontrol sisteminin amacı belirlenir ve bu amacın gerçekleşmesini engelleyen bozucu etkileri belirleyip sönmüleyerek, sisteme yeni bir düzen ilave edilir.

e) Kontrol Sistemi: Bir sistemin çıkışındaki verileri ve davranışları, bozucu etkenlere rağmen, istenilen değerlerde tutmak amacıyla kurulan sisteme kontrol sistemi denir. Kontrol sistemleri asıl sisteme ilave edilerek bir bütün oluşturulur ve otomatik kontrollü sistem meydana gelir. Kontrol mekanizması kurulu bir sistemi denetler ve kumanda eder ve bu sayede öngörülen değerler bozucu giriş etkilerine karşı korunur.

Kontrol sisteminde karşılaştırma elemanı, sistem çıkışının denetim amacına uygunluğunu belirleyip sistemi denetim amaçlarına uygun doğrultuda yönetmek işlevlerini yürütür. Kumanda elemanı denetlenen sistemdeki hataları düzeltme görevini yerine getirir.

## **2.2. Kontrolün Amaç ve Faydaları**

Tekrarlanan monoton işlerde konfor ve kolaylık sağlayıp zamanı bilgi, yetenek ve tecrübelerini gerekli olduğu alanlarda kullanmıştır.

Hassasiyet, kalite ve doğruluk sağlayarak hedefin temel amacını sabit ve tekrarlanabilir tutmaktır.

Ani olarak haber alıp kontrol sisteminin uyarılar vermesiyle riskleri ortadan kaldırıp güvenliği sağlamaktadır.

Kontrollü cihazlar sayesinde israfı önlenir, zaman ve enerji tasarrufu sağlanır. Yüksek hassasiyette imalatın yanı sıra sınırlı kaynakların en iyi şekilde kullanılmasını sağlar ve kalite kaybını önler. Burada kontrolün optimizasyon yöntemleri önemlidir.

### **2.3. Otomatik Kontrolün Tasarım İlkeleri**

#### **i) Sıfır veya en az kalıcı durum hatası**

Bir kontrol sisteminde hatanın sıfır veya önemsenmeyecek değerde tutulması amaçlanır. Hata değerini sıfırda tutmak her zaman ekonomik ve kolay bir iş değildir. Bu yüzden genellikle kontrol edilen çıkış değişkeni başvuru giriş değerinin artı eksi bir tolerans sınırı içinde tutmaya çalışılır. Kalıcı durum hatası denetleyici kazanç değerini arttırmak suretiyle azaltılabileceği gibi uygun bir denetim yordamı ile de tamamen sıfır kalıcı durum hatası sağlanabilir.

#### **ii) Kararlı Çalışma**

Kararlı çalışma herhangi bir kontrol sistemi için temel ilkelere dendir. Kontrol sisteminin bozucu etkenlerden dolayı kalıcı durum değerinden uzaklaşması durumunda, kalıcı durum değerine kararlı bir geçiş yapması istenir.

#### **iii) Hızlı Cevap**

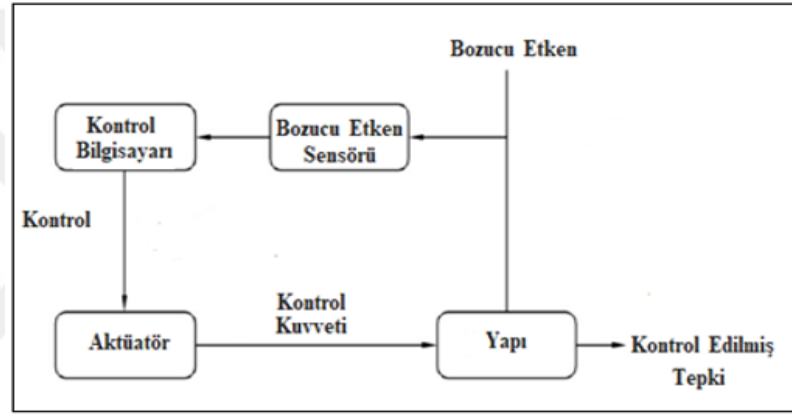
Denetim sisteminin geçici durumdan, denetlenen değişkenin kalıcı durum değerine en kısa zamanda ulaşması istenir. Sistemde oluşabilecek hataların en kısa zamanda düzeltilmesi gerekir.

### **2.3.1. Geri beslemeli kontrol**

Geri beslemeli kontrol sisteminde, sistem çıkışındaki cevap ölçme elemanı tarafından ölçülür ve bu değer sistemin girişine geri beslenir. Akıllı sismik yapılarda, geri besleme kontrol tipleri açık çevrim, kapalı çevrim ve açık-kapalı çevrim şeklinde kategorize edilir.

### 2.3.1.1. Açık çevrim geri besleme kontrolü

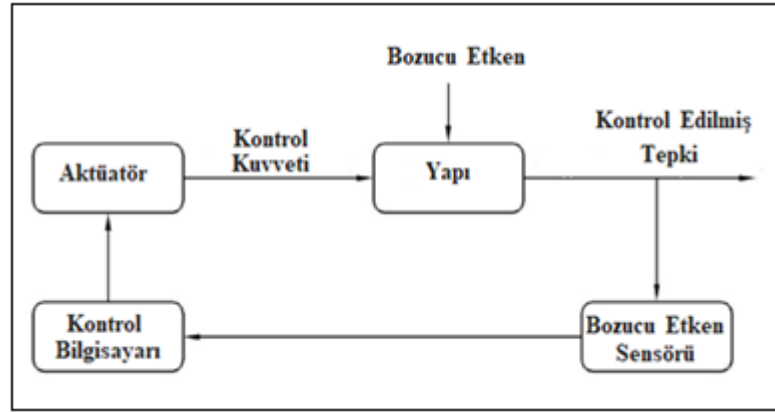
Bir açık çevrim kontrolünün şematik yerleşimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Bu şekilden de anlaşılacağı gibi, bir açık çevrim kontrolünde, kontrol kuvvetleri deprem gibi harici uyarımların geri beslemesine dayanarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle, kontrol yasasının verileri yalnızca deprem uyarıları nedeniyle elde etmesi gerekir. Yer ivmesi nedeniyle titreşimi ölçmek için bina yapısının tabanına bir ivmeölçer yerleştirilir. Sonunda, bu ölçülen veriler kullanılarak, kontrol kuvvetleri açık çevrim kontrolündeki aktif kontrol algoritmasına dayalı olarak hesaplanır ve elde edilen kontrol kuvvetleri yapıya uygulanır.



Şekil 2.2. Açık – Çevrim Kontrolü Şematik Diagramı

### 2.3.1.2. Kapalı çevrim geri besleme kontrolü

Kapalı çevrim sisteminin şematik yerleşimi Şekil 2.3'te gösterilmektedir. Bu şekil, kontrol kuvvetinin, durum değişkenleri tarafından belirtilen sistem yanıtının geri besleme temel alınarak hesaplandığını gösterir. Bu geri besleme kontrolünde, durum değişkenleri yapısal yer değiştirmeler ve hızlardan oluşur. Bu nedenle, bir kapalı çevrim kontrol sisteminde, sistem tepkilerini temsil eden yapının görelî yer değiştirmeleri ve hızları, kontrol yasasında kullanılmak üzere ölçülmeli ve elde edilmelidir. Aktif kontrol kuvveti, yukarıda bahsedilen yapısal tepkilere ilişkin ölçülen veriler kullanılarak kapalı çevrim aktif kontrol algoritmasına dayanılarak üretilir. Son olarak kontrol kuvveti yapıya uygulanır.

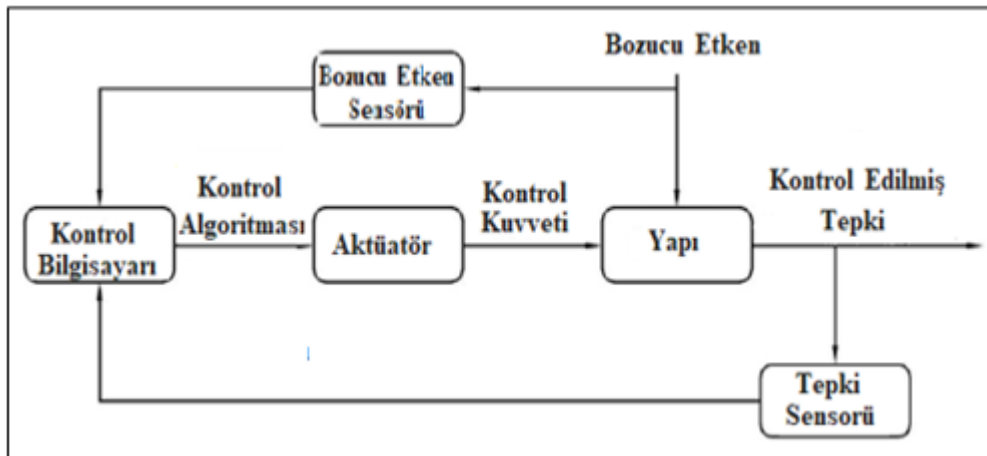


Şekil 2.3. Kapalı-Çevrim Kontrol Şeması

Kapalı çevrim geri beslemesini 2. dereceden bir sistemde kullanmak için tam durum vektörünün ölçülmesi gerekir. Başka bir deyişle, tam yapısal yanıtı ölçmek için  $2n$  sensör gereklidir. Bununla birlikte, analog farklılaştırıcılar veya durum tahmin edicileri (gözlemciler) kullanmak sensör sayısını büyük ölçüde azaltacaktır.

### 2.3.1.3. Açık-kapalı çevrim geri besleme kontrolü

Açık-kapalı-geri besleme kontrolü, açık-çevrim ve kapalı-çevrim kontrol düzenlerini birleştirerek ortaya çıkar. Böyle bir sistemin şematik yerleşimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu düzen hem sistem yanıtı hem de harici uyarma ile ilgili verileri içermelidir. Bu tür geri besleme kontrolünde hem yapısal tepki, yani bağıl yer değiştirme ve hızlar, hem de deprem ivmesi ölçülmeli ve elde edilmelidir. Daha sonra bu veriler kullanılarak, gerekli kontrol kuvveti aktif kontrol algoritmasına göre hesaplanır ve son olarak kontrol kuvveti yapıya uygulanır.



Şekil 2.4. Açık-Kapalı Çevrim Kontrol Şeması

Açık çevrim geri besleme kontrolünün avantajı, deprem yer ivmesini algılamadaki sadeliğine dayanır. Bu geri besleme kontrolünün bina yapısının tabanına sadece bir ivmeölçer takılması gerekir. Ancak, optimal geri besleme kazancını bulmak için, deprem ivmesinin tüm kontrol süresi boyunca önceden bilinmesi gerekir. Bu süreç çoğu akıllı sismik yapılar için deprem ivmesinin önceden bilinmesi mümkün değildir.

Optimal kontrol algoritmalarının gelişmesiyle, kapalı çevrim geri besleme kontrolünün optimal geri besleme kazancına ulaşma avantajını sağlamıştır. Bu sistemin zayıflığı, sistemden durum değişkeni vektörünü ölçmek için çok sayıda sensör kullanılmasına ihtiyaç vardır. Kapalı çevrim geri besleme kontrolünün bu zayıflığının, algılama sistemini büyük ölçüde basitleştiren sismik gözlemci tekniği kullanılarak azaldığı görülmüştür.

Açık-kapalı çevrim geri besleme kontrolü, açık ve kapalı çevrim geri besleme kontrolünün birleşimidir ve onlardan daha iyi olması beklenir. Ancak, optimal geri besleme kazancını elde etme problemi, açık çevrim geri besleme kontrolüne benzer. Bu nedenle, yukarıdaki açıklamalar dikkate alındığında, geri besleme kontrolündeki en popüler düzen kapalı çevrim geri besleme kontrolüdür, diğerlerinin sismik tepki kontrolünde kullanılması imkansızdır. Bu çalışmada, kapalı çevrim geri besleme sistemi kullanılmıştır.

#### **2.4. İnşaat Mühendisliğinde Kullanılan Kontrol Stratejileri**

Akıllı yapı teknolojisinde, yapıya uygulanacak kontrol kuvvetlerini üretmek için etkili bir kontrol algoritmasına sahip olmak hayati bir unsurdur. İnşaat mühendisliği yapıları çok büyük ve karmaşık olup maruz kalacağı dış etkiler önceden bilinmemektedir. Akıllı yapılar, farklı dinamik koşullar altında güvenilir ve aktif olmak için etkili bir kontrol algoritmasına sahip olması gerekir.

Kontrol sistemlerinin akıllı yapılara yerleştirilmesinin ilk aşamalarında kullanılan algoritmalar, LQR ve LQG kontrolörleri gibi mevcut kontrol algoritmalarının kullanılmasına dayanıyordu. Bu algoritmalar, havacılık ve uzay mühendisliği gibi diğer mühendislik alanlarında geliştirilmiştir [25-29]. Son zamanlarda, araştırmacılar mevcut kontrol algoritmalarını değiştirmek ya da karmaşık inşaat mühendisliği

yapılarına yerleştirilecek yeni algoritmalar geliştirmişlerdir. Bu algoritmalar aşağıda açıklanmaktadır.

#### **2.4.1. Lqr tipi kontrolcü**

Optimal kontrol problemlerini çözmek için araştırmacılar için en iyi bilinen yöntemlerden biri LQR (İkinci dereceden doğrusal düzenleyici) algoritmasıdır [30]. Bu algortmada, bir maliyet fonksiyonunun en aza indirilmesiyle optimum kuvvetler üretilir. İnşaat Mühendisliği yapılarındaki kontrol sistemlerinde, maliyet fonksiyonu genellikle yapıdaki arzu edilen yer değiştirme ve ivme miktarlarıyla ilgilidir. Maliyet fonksiyonu, bu limitleri ayarlamak ve kontrolörün optimizasyonuna yardımcı olmak için ağırlık parametreleri içerir. LQR, kontrol sistemleri alanında araştırmacılar tarafından kullanıldığı için kontrol sistemlerinde en yaygın kullanılan algoritma olmuştur [31]. LQR algoritmasının etkinliğini arttırmak için bazı değişiklikler önerilmiştir.

Djajakesukma ve meslektaşları, integral ve ileri beslemeli kontrol terimlerini dikkate alarak değiştirilmiş bir LQR kontrol algoritması üzerinde araştırma yapmışlardır. Bunları Lyapunov tabanlı, kayan mod ve geleneksel LQR kontrol algoritmaları ile karşılaştırdılar. 1995 Kobe, 1994 Northridge, 1940 El Centro ve 1968 Hachinohe depremlerine maruz kalan yarı aktif rijitlik damperi ile donatılmış 35 metre yüksekliğinde, beş katlı bir çelik modele yerleştirdiler ve iyileştirilmiş bir performans bildirdiler [32].

Mei ve araştırma ekibi, uzun bir yapının rüzgar tepkisini kontrol etmek için model öngörülü kontrol şemasını bir yapıda uyguladılar. Bu kontrol stratejisinde, objektif bir işlevi en aza indirdiler ve bir ATMD ile donatılmış 76 katlı bir binanın uyarımlarını kontrol etmek için LQR algoritmasını kullanarak istenen kontrol kuvvetini hesapladılar. Geleneksel LQR ile karşılaştırıldığında en üst katın ortalama hızlanmasında %43'lük bir azalma olduğu bildirilmiştir [33].

Guoping ve Jinzhi, bir LQR algoritmasında, 1940 El Centro depremine maruz kalan 2 boyutlu, üç katlı bir çerçevede aktif bir destek sisteminin kontrolünde kullanılacak gecikme süresini araştırdı [34].

Ma ve Yang, uyarılma yoluyla kontrol kazancını sürekli olarak ayarlayabilen uyarlanabilir bir LQR tabanlı geri besleme - ileri beslemeli kontrolör üzerinde bir araştırma yaptılar. Bu modifikasyon, bir başlangıç noktası olarak önceden hesaplanmış bir dizi kazanımdan rastgele bir değer kullanılarak gerçekleştirilebilir. En düşük maliyeti oluşturan rastgele kazancı bulmak için, kontrol sistemine kaydedilenlerin her biri test edildi. Daha sonra, sağlanan maliyet, girdi uyarılma değerine göre değiştirilir ve işlem tekrarlanır. Bu algoritmayı 1995 Kobe ve 1979 Imperial Valley deprem yükleri altında aktif tendonlarla donatılmış 2 boyutlu beş katlı bir çerçeveye kurmak için kullandılar. Yazarlar, değiştirilmiş performansı geleneksel bir LQR kullanımına kıyasla bildirmişlerdir [33].

Performans endeksi olarak Aldemir, LQR algoritması için basit bir integral tip kuadratik fonksiyonel üzerinde bir araştırma gerçekleştirdi. Önerilen performans endeksinin minimize edilmesiyle birbirini takip eden kontrol anları arasında bir kontrol stratejisi oluşturabilirler. Yazarlar bu algoritmayı sismik titreşimlere maruz kalan aktif tendonlarla donatılmış doğrusal yapıya yerleştirdiler. Sayısal simülasyon sonuçları, önerilen kontrol stratejisinin sismik uyarımları ve klasik lineer optimal kontrol algoritmasından daha iyi performansı önleyebildiğini göstermiştir [35].

SDOF ve MDOF modellerinde Sadek ve Mohraz tarafından LQR, geliştirilmiş LQR yöntemlerini kullanarak yer değiştirme-ivme etki alanı denetleyicilerinin etkinliği üzerine bir karşılaştırma araştırması gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, 1951 Northwest California, 1957 San Francisco, California, 1935 Helena, Montana, 1966 Parkfield, California, 1971 San Fernando, 1989 Loma Prieta, California ve 1994 Northridge depremlerine maruz kalan değişken rijitlik damperleri kullandılar. Geliştirilmiş LQR, geliştirilmiş bir maliyet fonksiyonu ve yapının mutlak ivmelenmesine verilen sınırlamanın dahil edilmesinden oluşturulmuştur. Sonuçlar, geliştirilmiş LQR kontrol cihazının, diğer iki kontrol algoritmasına kıyasla modellerin maksimum yer değiştirmesini ve hızlanmasını sırasıyla %12 ve %31 oranında azalttığını göstermiştir [36].

Alavinasab ve arkadaşları, aktif bir tendon sistemini kontrol etmek için LQR algoritmasında bir enerji dengesi oluşturmuştur. 1: 5 ölçeğinde üç katlı yapının yapısal tepkilerini azaltmak için birinci ve üçüncü katına yerleştirilmiş tendonlar ve 1 kN

aktüatör ile donatılmış, sonuçları standart bir LQR algoritması ile 1940 El Centro, 1968 Hachinohe ve 1952 Taft deprem yükleri altında karşılaştırılmıştır. [37].

#### **2.4.2. Lineer kuadratik gauss (LQG)**

LQG algoritması, lineer bir kuadratik tahmincinin bir doğrusal kuadratik regülatör ile birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu kontrol stratejisi başlangıçta beyaz Gauss gürültüsüne maruz kalan sistemler için icat edildi [38]. Lu ve araştırma grupları, sismik yüklemeye maruz kalan 2 boyutlu yapıların tepkisini kontrol etmek için çevrim transfer kazanımı adlı bir LQG kontrol stratejisi önermişlerdir. Bu algorithmada Kalman Filtresi iç dengeyi iyileştirir. Sonuçlar, önerilen kontrol yönteminin sismik uyarımlar altındaki tam ölçekli binalara uygulanabileceğini göstermiştir [39]. Ayarlanabilir nispi stabilite ve kazanç sağlayan modifiye edilmiş bir LQG kontrol algoritması, Wang tarafından sunulan deprem ve rüzgar uyarılarına maruz kalan yapıları kontrol etmek için önerilmiştir ve sonuç olarak umut verici bir performans elde edildiği raporlanmıştır [40].

#### **2.4.3. Sinir ağı denetleyicileri**

Son yıllarda sinir ağına dayalı geliştirme ve uygulamalar doğrusal-doğrusal olmayan aktif kontrol için diğer uyarlanabilir akıllı kontrol algoritmaları çoğunlukla küçük yapısal sistemleri içeren sistemler için bir kaç yazar tarafından rapor edilmiştir [41-44]. İlk olarak, Ghaboussi ve Joghataie, üç katlı 2 boyutlu bir çerçevenin tepkisini tanımak için sinir ağı tabanlı bir emülatör kullandılar. Daha sonra, yapının doğrusal kontrolü için emülatör kullanılarak bir sinir ağı tabanlı kontrolör geliştirildi. Sinir ağı modeline girdi olarak, önceki iki zaman aralığı boyunca yapının yer değiştirme ve hızlanma tepkilerini ve önceki üç zaman aralığı boyunca aktüatör elektrik sinyallerini kullandılar. Elde edilen sonuçlar, sinir ağına dayalı kontrol algoritmalarının, daha ileri araştırmalardan sonra uyarlanabilir kontrolörler olarak kullanmak için umut verici bir geleceğe sahip olacağını göstermiştir [45]. Bani-Hani ve Ghaboussi, üç katlı, 2 boyutlu çerçeve yapısını doğrusal olmayan kontrol etmek için sinir ağı tabanlı kontrol stratejisi üzerine bir araştırma yaptılar. Yapısal malzemede doğrusal olmama durumunu düşündüler. Sonuçlar, bahsedilen aktif kontrol sistemi için yeterli hassasiyet göstermiştir [46].

Sinir ağırları stratejisini kullanan uyarlanabilir bir kontrolör Hung ve meslektaşları tarafından sunuldu. Bu algoritma, uygulanan kontrol kuvveti darbesini, önceki zaman basamağından mevcut zaman basamağına aktarım olmayacak şekilde düzenledi. Bu algoritmayı, aktif tendonlarla donatılmış, 1940 El Centro ve 1971 San Fernando depremlerine maruz kalan iki boyutlu SDOF ve MDOF çerçevelerine uyguladılar ve algoritmalarının etkinliğini gösterdiler [47].

Brown ve Yang, uygulanan kontrol kuvvetleri ve yer değiştirmeler dahil olmak üzere performans değişkenlerini tahmin etmek için sinir ağırları üzerinde bir araştırma yaptılar. Bu algoritmayı kullanarak, üç katlı 2 boyutlu modelde aktüatörlerle donatılmış bir aktif kontrol sisteminin etkinliğini geliştirdiler [48].

#### **2.4.4. Bulanık mantık kontrolcü**

Bulanık Mantık Kontrolü sürekli değerlere sahip mantıksal değişkenleri kullanan matematiksel bir yöntem olan bulanık mantığa dayalı bir Bulanık Mantık Denetleyici oluşturulmuştur. Klasik mantığın aksine, söz konusu mantık, 0 (yanlış) veya 1 (doğru) olan ayrık değerler üzerinde çalışır [49-51]. Giriş aşamasında, sensör bilgisi bir üyelik fonksiyonundan elde edilen değerlere çevrilir. İşleme aşaması bir dizi if-then mantık kuralı içerir. Zhou ve arkadaşları bir uyum yasası olan ve kapalı çevrim geri besleme kontrol sistemini kullanan bir bulanık mantık kontrolcü önermişlerdir. SDOF ve MDOF yapılarındaki uyarımları kontrol etmek için MR damperleri uyguladılar [52]. Al-Dawod ve araştırma grubu, FLC'yi 1940 El Centro, 1968 Hachinohe, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinin yüklenmesinde 2 boyutlu 3 katlı ve 20 katlı yapıda titreşim kontrolü için kullandılar ve kontrol sistemlerinde etkinliğini bildirdiler [53].

Ahlawat ve Ramaswamy tarafından Genetik Algoritma (GA) kullanılan bir bulanık mantık kontrol algoritması sunuldu [54-58]. Bu algoritmayı, sismik ve rüzgar yüklerine maruz kalan yapısal tepkileri kontrol etmek için yapılarıda maksimum hızlanma ve katlar arası yer değiştirmenin minimize edilmesi için uyguladılar [59,60].

#### 2.4.5. Kayma modu kontrolörleri

Kayma Mod Kontrolü (SMC), kontrolü hazırlamak için yüksek frekanslı anahtarlama kullanan bir kontrol algoritmasıdır [61]. Bu algoritmada, bir kontrol kanunu, kontrol stratejileri sınırları boyunca kontrolör tarafından bir sonraki "kayma" ya geçirilir.

Wu tarafından hızlandırma geri besleme kullanılarak değiştirilmiş bir SMC önerildi. Yazar, 1940 El Centro ve 1995 Kobe depremleri altında aktif destek ve hidrolik aktüatörlerle donatılmış 4.5m x 3m boyutlarında 9m boyutlarında bir çelik yapı iskeleti üzerinde sarsma masası testleri gerçekleştirdi [62].

Wu ve Yang, bir ATMD ekipmanı ile donatılmış 76 katlı gösterge binasının uyarımlarını azaltmak için kontrol kuvvetini düzenli bir şekilde modüle etmek için bir ön filtre kullanan bir SMC algoritması rapor ettiler [63].

#### 2.4.6. Dalgacık tabanlı kontrol algoritması

Dalgacık algoritmaları deprem sinyal işleme [64], yapısal sağlık izleme [65-67], akıllı ulaşım sistemleri [68,69] ve görüntülerin işlenmesi [70] gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır.

Adeli ve Kim ilk kez yapısal titreşim kontrolü için dalgacık konseptini önerdiler [71]. İnşaat mühendisliği yapılarının gürbüz kontrolü için yazarlar tarafından yeni bir dalgacık-hibrit geri besleme LMS algoritması sunulmuştur. Bu amaçla, LQR veya LQG algoritması, filtrelenmiş x En Küçük Ortalama Kare (LMS) algoritması ve dalgacıklar gibi bir geri beslemeli kontrol stratejisinin uyguladılar. Yeni dalgacık tabanlı algoritmanın avantajları aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

- Formülasyonda harici titreşim teriminin bulunması.
- Bir dizi girdi uyarma frekansı üzerindeki uyarıyı önleme yeteneğine sahip olmak.
- Geleneksel algoritmalara kıyasla yapısal yaklaşımlar ve hatalar konusunda daha az duyarlılığa sahip olmak.
- Hem sabit durumda hem de geçici uyarılmalarda kontrol sistemlerinde etkinliğe sahip olmak.
- Uyarlamalı filtre katsayılarının kararlı bir şekilde güncellenmesi için kontrol stratejisinde dalgacık dönüşümünü uygulamak.

Yukarıda belirtilen dalgacık tabanlı kontrol algoritmasını kullanan farklı sismik titreşimlere maruz kalan kablo destekli köprülerin aktif titreşim kontrolü Kim ve Adeli tarafından önerilmiştir. Yazarlar, test edilmiş bir kablo kaldı sorunu için performans sonuçları sundular. Simülasyon sonuçlarıyla, yeni kontrol stratejisinin El Centro, California (1940), Mexico City (1985) ve Gebze, Türkiye (1999) deprem yükleri altında LQG algoritmasından daha etkili olduğunu gösterdiler. Sonuçlar, söz konusu algoritmanın küçük ölçekli yapılardaki mevcut belirsizliklere karşı gürbüz olduğunu göstermiştir [72].

Jiang ve Adeli, aktif bir kontrol sisteminde yeni bir doğrusal olmayan kontrol modeli üzerinde bir araştırma yaptılar. Bu kontrol stratejisini, sinir ağları ve bulanık mantık ve dalgacıklar olmak üzere iki yöntemin kullanarak üç boyutlu bina yapılarında uyguladılar. Yapısal kontrolün formülasyonunda, hem malzeme hem de geometrik doğrusallıkların yanı sıra iki dinamik etkiyi dikkate aldılar. Bu etkiler yapının yanal ve burulma hareketleri ile aktüatör ve yapı arasındaki etkileşim arasında tanımlanmıştır. Gelecekteki zaman aralıklarında yapısal yanıtta bir tahmin elde etmek için, dinamik bir bulanık dalgacık nöroemülatörü kullandılar ve geçerliliği, 12 katlı bir yapı ve 8 katlı bir yapı olan iki düzensiz 3 boyutlu çelik yapı yapısı kullanarak gerçekleştirdiler. Sinir ağlarının yapısal aktif kontrol sistemlerinde uygulanması için önerilen nöroemülatörün yapısal yer değiştirmelerin tepkileri için kesin bir tahmin oluşturduğunu gösterdiler [73].

#### **2.4.7. Oransal-integral-türev kontrolcü**

Oransal-integral-türev (PID) kontrolü, istenen bir ayar noktası ile ölçülen değişken arasındaki bir hata değerini sürekli olarak hesaplayan bir geri besleme kontrol mekanizmasıdır (Şekil 2.5). P, hatanın mevcut değerlerini temsil eder, hatanın geçmiş değerlerini ve D'nin hatanın gelecekteki olası değerlerini açıklar [74,75]. PID kontrolünün kullanımı optimal kontrol veya stabilizeyi garanti etmese de, ayarlama parametrelerini ayarlayarak endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan kontrol yöntemlerinden biridir [76].

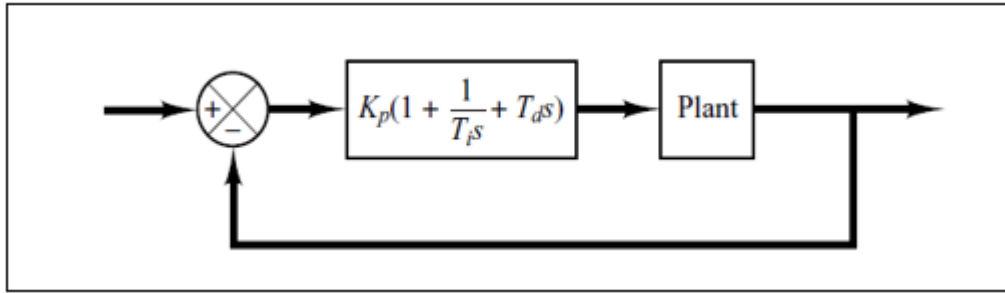
PID kontrolcü, orantı, integral ve türev işlemlerini gerçekleştirerek temel kontrol işlemlerini birleştiren sürekli denetim yasası veya yordamıdır. Bu kontrolcüde hata mevcut olduğu sürece kontrol komutu da sürekli vardır. PID kontrolünde yer alan P,

orantı (ing. Proportional), I integral (ing. Integral) ve D türev (ing. Derivative) matematiksel işlevlerini gerçekleştirmektedir. Pek çok endüstriyel uygulamalarda uygun ve gürbüz denetim sağladığından yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kontrolcü az sayıda tasarım parametresine sahip olduğundan basit ve kullanışlıdır. PID kontrol tek çevrimlü ve doğrusal sistemlerde kullanılır.

Sistemin dinamik yapısına göre P, PD, PI ve PID kontrolcü olarak tasarlanabilir.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i s} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (2.2)$$

$K_p$  Orantı kazancı,  $T_i$  İntegral zamanı,  $T_d$  Türev zamanı katsayıları,  $e(t)$  hata sinyali,  $u(t)$  kontrol sinyalidir. PID kontrolcünde integral işlemi kalıcı durum hatasını sıfırlar, orantı işlemi hızlı cevap vermeye yarar ve türev işlemi sistemin sönümlenme stabilitesinin korunmasını sağlar.



Şekil 2.5. PID Denetim Şeması

## 2.5. Optimal Kontrol

Optimal kontrol, kısıtlamalara tabi objektif bir işlevi en aza indiren veya en üst düzeye çıkaran bir kontrol yasasına dayanır. Amaç, belirli bir amaç için optimum performans spesifikasyonları elde etmektir [74].

## 2.6. Gürbüz Kontrol (Robust Control)

Gürbüz kontrolün temel amacı dinamik şartlardaki değişimler ve sistem modelindeki belirsizliklere rağmen sağlam bir kontrolcü tasarlamaktır. Matematiksel modellerdeki kontrol sistemini oluşturan bazı parametreler tam olarak belirlenemez. Gürbüz kontrolde bu parametrelerdeki belirsizlikler modellemeye dahil edilmektedir. Zaman içerisinde bu parametrelerde kayda değer bir belirsizlik içermesi sebebiyle gürbüz

kontrol gereklidir. En çok kullanılan gürbüz kontrol yaklaşımları  $H_\infty$  kontrol teorisi, Lyapunov teoremi esaslı kontrol ve Kayan tipli kontrol algoritmasıdır.

### 2.6.1. $H_\infty$ kontrolcü

Adından da anlaşıldığı gibi  $H_\infty$  tabanlı kontrolcünün amacı bir sistemin maksimum normlarını minimize etmektir. Maksimum tepkiyi minimize etmeye çalışan sistem hassaslık genel olarak frekans alanında elde edilir.

Kapalı çevrim sisteminin, nihai süre sonsuz olduğunda kararlı olması da gerekir. Yapısal modellemede gerçekte nominal bir değer elde edilmektedir. Elde edilen gerçek sistemle nominal değer arasındaki fark belirsizlik olarak tanımlanır.

Li ve Adeli [77] sadece dinamik kuvvetler nedeniyle yapısal maksimum tepkisini azaltmakla kalmayıp aynı zamanda parametrik belirsizlikler varlığında sağlam ve kararlı olan lineer matris eşitsizlikleri kullanarak akıllı yapıların titreşim kontrolü için yeni bir ayrık zamanlı gürbüz  $H_2 / H_\infty$  algoritması kullanmışlardır. Yapısal parametrelerin belirsizlikleri, pratik uygulamaları kolaylaştırmak için frekans alanındaki aksine zaman alanında dikkate alınmıştır. Yeni uyarlamalı kontrol algoritmasının etkinliği, aktif ayarlanmış bir kütle sönümleyiciye (ATMD) sahip on katlı bir çerçeve kullanılarak doğrulanmıştır.

$H_\infty$  kontrol algoritması, dış kuvvet esnasında en kötü durum için ölçek bir modeldir. Genel bir fonksiyon  $G$  için sonsuzluk normu anlamında şunları tanımlarız:

$$\|G\|_\infty = \text{Sup}_{w \in \mathfrak{R}} \bar{\sigma}(G(jw)) \quad (2.3)$$

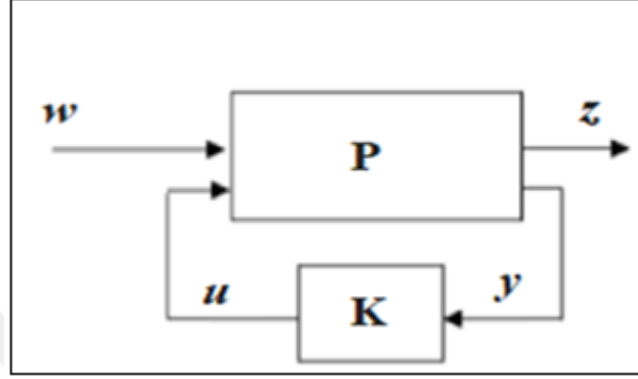
Burada  $jw$  genel olarak frekans için kompleks değerdir.

Şekil 2.6'da  $P$   $n$  katlı bir binayı,  $K$  kontrolcüyü,  $u$  geri besleme kuvvetini ve  $y$  yapının çıkış tepkisini,  $w$  rahatsız edici girişi (deprem) ve  $z$  ise hesaplanan çıkış değerini ifade etmektedir.

$G(P,S)$   $P$   $n$  katlı bir yapı,  $K$  geri besleme matris formunda:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ Z \\ y \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X \\ W \\ u \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$z = G(P,S)W, \quad (2.5)$$



Şekil 2.6. Kapalı Çevrim Sistemi ve Kontrolcü

$H_\infty$  kontrolcünün amacı,  $z$  çıkışını etkileyen  $W$ 'yi en aza indirmek için dengeleyici kontrolcü bulmaktır.  $H_\infty$  algoritması, sistemin maksimum verimliliğinin sonsuzluk normu:

$$\|G(P,S)\|_\infty = \sup_{w \neq 0} \frac{\|z\|_2}{\|W\|_2} = \sup \bar{\sigma}(G(P,S)(j\omega)) \quad (2.6)$$

$$\|G(P,S)\|_\infty < \gamma, \quad \gamma > 0 \quad (2.7)$$

Sistem dinamik modelindeki belirsizliklerden etkilenmeyen ve bu dinamikler olduğu durumda da kararlı bir kontrol sağlayan kontrol tasarım yöntemi gürbüz kontrol olarak tanımlanır.  $H_\infty$  kontrolcü tasarımında filtreler kullanılarak gürbüz kararlılık ve performans amaçlanır.

Genelleştirilmiş sistem matrisi  $G(s)$  oluşturulduktan sonra  $H_\infty$  kontrolör MATLAB/Robust Control Toolbox kullanılarak hesaplanmıştır.  $H_\infty$  kontrolör durum uzayı şeklinde elde edilmektedir. Kontrolör yapısı denklem 2.8'deki gibidir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= A_k x_k + B_k y \\ i_z &= C_k x_k + D_k y \end{aligned} \quad (2.8)$$

### 2.6.1.1. Gürbüz kontrol ve sentez

Gerçek kontrol sistemlerinde olan var olan belirsizlikler(uncertainties) parametrik ve dinamik bozucu etkiler olmak üzere iki kategoride incelenebilir. Parametrik belirsizlikler transfer fonksiyonda bilinmeyen parametrelerinden kaynaklı, dinamik belirsizlikler ise bazı ihmal edilen dinamiklerden sebep olduğu belirsizliktir. Parametrik ve dinamik belirsizliklerin bir arada bulunması durumu karma belirsizlik olarak tanımlanır. Belirsizlik kesirli belirsizlik, ilave belirsizlik ve çoklu belirsizlik olmak üzere üç kategorize edilebilir.

$G_0$  nominal transfer fonksiyondur ve belirsizlik içermez,  $G$  ise belirsiz transfer fonksiyondur.

$$\text{Kesirli belirsizlik: } G = (I + W_1 \Delta W_2)^{-1} G_0 \quad (2.9)$$

$$\text{İlave Belirsizlik: } G = G_0 + W_1 \Delta W_2 \quad (2.10)$$

Çarpımsal Belirsizlik :

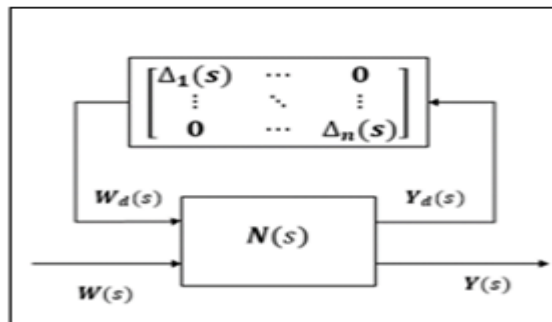
$$\text{Giriş Çarpımsal Belirsizlik: } G = G_0 (I + W_1 \Delta W_2) \quad (2.11)$$

$$\text{Çıkış Çarpımsal Belirsizlik: } G = (I + W_1 \Delta W_2) G_0 \quad (2.12)$$

Burada  $W_1$ ,  $W_2$  belirsiz ağırlıklar ve  $\Delta$  ise belirsizlik bloğudur.

$$\|\Delta\| \leq 1 \quad (2.13)$$

Şekil 2.7'de yapısal bir sistemin belirsizlik genel şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Yapısal belirsizlik genel şeması

Yapısal bir belirsizliğe tabi olan bir sistemin kararlılığı, Şekil 2.8'deki Geri Besleme sisteminin analiz edilmesiyle belirlenir. Nominal kapalı çevrim sisteminin kararlı olduğu varsayılır. Kararlılık, negatif olmayan gerçekteki kısmı olan bir kutupdaki sonuçların en küçük pertürbasyonun “boyutu” belirlenerek değerlendirilebilir. Böyle bir değere neden olan bir pertürbasyon, stabilize edici bir pertürbasyon olarak adlandırılır.

Yapısal Tekillik Değeri şu şekilde tanımlanır:

$$\mu_{\Delta}(N) = \frac{1}{\inf \{ \bar{\sigma}(\Delta \Delta \det(I - N\Delta\Delta) = 0, \Delta \in \Delta \}} \quad (2.14)$$

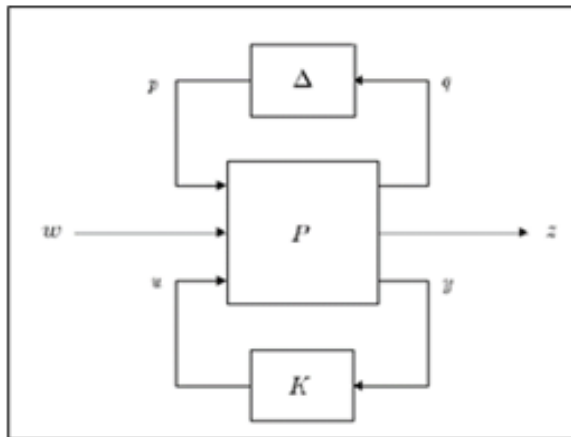
Yapılandırılmış Tekil Değer  $\bar{\Delta}$  ile tanımlanan pertürbasyonun yapısına bağlı olan kompleks bir N matrisinin gerçekteki değerli bir fonksiyonudur.

Yapılandırılmış belirsizliği olan bir sistem için kararlılık sağlamlık kriteri aşağıdaki gibi özetlenmiştir: Şekil 2.8'de verilen genel bir Geri Besleme sistemi, olası tüm bozulmalar için dahili olarak kararlıdır:

$$\Delta_{jw} \in \bar{\Delta} \|\Delta\|_{\infty} \leq 1 \quad (2.15)$$

### 2.6.1.2. Çok serbestlik dereceli sistem için gürbüz kontrol

Şekil 2.8'de P'nin durum uzay matrisleri (A, B, C, D) Matlab 'linmod' komutu ile elde edilir.



Şekil 2.8. Robust Gürbüz Kontrol Şeması





$$q_k = W_{k2}x_1 \quad p_k = \delta_k W_{k2}x_1 = \Delta_k q_k, \quad W_{k1} = K_0 P_K \quad (2.30)$$

$$\dot{x}_2 = -(M_0)^{-1}[C_0x_2 + K_0x_1 + W_{c1}p_c + W_{k1}p_k - d - u] \quad (2.31)$$

$$\dot{x} = Ax + B_p p + B_d d + B_u u \quad (2.32)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -(M_0)^{-1}K_0 & -(M_0)^{-1}C_0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -(M_0)^{-1}W_{c1} & -(M_0)^{-1}W_{k1} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$p = \begin{bmatrix} p_c \\ p_k \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$B_d = B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ (M_0)^{-1} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Şekil 2.8'deki rahatsız edici  $w$ 'yi dış kuvvet etkisi  $d$  ve sensör gürültü sinyali  $n$  ile denklem 2.37'deki gibi ifade edilebilir :

$$w = \begin{bmatrix} d \\ n \end{bmatrix}^T \quad (2.37)$$

$$\dot{x} = Ax + B_p p + B_w w + B_u u \quad (2.38)$$

$$q_c = W_{c2}x_2, \quad q_k = W_{k2}x_1 \quad (2.39)$$

$$q = C_q x + D_{qp} p + D_{qw} w + D_{qu} u.$$

$$q = \begin{bmatrix} q_c \\ q_k \end{bmatrix} \quad C_q = \begin{bmatrix} 0 & W_{c2} \\ W_{k2} & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{qp} = D_{qw} = D_{qu} = 0. \quad (2.40)$$

Çıkış sinyali ' $z$ ' için  $x_1$  kat yerdeğiştirmeleri ve  $W_u$  kontrol ağırlık matrisinin ilave edilmesiyle kontrol çıkış denklemi:

$$z = [x_1 \quad W_u u]^T \quad (2.41)$$

$$z = C_z x + D_{zp} p + D_{zw} w + D_{zu} u. \quad (2.42)$$

$$C_z = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad D_{zp} = D_{zw} = 0, \quad D_{zu} = \begin{bmatrix} 0 \\ W_u \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

Kontrolcü giriş denklemi:

$$y = x_1 + n \quad (2.44)$$

$$y = C_y x + D_{yp} p + D_{yw} w + D_{yu} u \quad (2.45)$$

$$C_y = C_z, \quad D_{yp} = D_{yu} = 0, \quad D_{yw} = [0 \quad W_n]^T \quad (2.46)$$

$$\dot{x} = Ax + B_p p + B_w w + B_u u, \quad (2.47)$$

$$q = C_q x + D_{qp} p + D_{qw} w + D_{qu} u, \quad (2.48)$$

$$z = C_z x + D_{zp} p + D_{zw} w + D_{zu} u, \quad (2.49)$$

$$y = C_y x + D_{yp} p + D_{yw} w + D_{yu} u \quad (2.50)$$

## 2.7. Çok Serbestlik Sistem İçin Lqr Kontrol

Denklem 2.51’de (state-space) parametreleri zamanla değişmeyen lineer sistemlerin dinamiğini durum uzay formunda ifade etmektedir. Sistemin herhangi bir durumu en az sayıdaki değişkenle, durum uzayında bir nokta olarak ifade edilebilir.

$$\dot{Z} = Az(t) + Bu(t), \quad (2.51)$$

$$Z = \begin{Bmatrix} Z \\ \dot{Z} \end{Bmatrix}_{2nx1} \quad (2.52)$$

$$A = \begin{Bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{Bmatrix}_{2n \times 2n} \quad (2.53)$$

$$B = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{Bmatrix}_{2n \times r} \quad (2.54)$$

$$H = \begin{Bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ I \end{Bmatrix}_{2n \times 1} \quad (2.55)$$

$$\dot{Z}(t) = Az(t) + Bu(t) \quad (2.56)$$

$$\text{Sistemin başlangıç durumu şu şekilde tanımlanır : } \{Z_0\}, \{Z_0\} = Z\{t_0\} \quad (2.57)$$

Bu sistem ile ilgili performans indeks fonksiyonu  $J$   $z(t)$  ve  $u(t)$  ye bağlı 2. dereceden seçilir Soong [19] .

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \{ \{Z(t)\}^T (t) Q Z(t) + u^T (t) R u(t) \} dt \quad (2.58)$$

Denklem 2.58'de  $Q$  ve  $R$  ağırlık matrisleri olup  $Q = Q^T \geq 0$   $R = R^T > 0$  seçilmiştir.

Burada amaç  $J$  performans indeksini minimize eden  $u = -Kz$  şeklinde sistemi kararlı hale getiren lineer durum değişkeni geri beslemeli kontrolör oluşturmaktır. Şekil 2.9'da Geri Beslemeli Kontrol edilen bir sistemin şeması yer almaktadır.

Denkem 2.58'de görüleceği gibi ilk terimin içinde  $z(t)$  sistemin cevabını ikinci terimin içinde  $u(t)$  sisteme uygulanması gereken kontrol kuvvetinin büyüklüğünü dolayısıyla;  $(2n \times 2n)$  boyutlu semidefinit  $Q$  matrisi güvenliği,  $(m \times m)$  boyutlu pozitif definit  $R$  matrisi ekonomiyi ifade eder. Örneğin  $Q$  matrisinin elemanlarına atanan değerler büyükse emniyet ekonomiden daha önemli, tersine  $R$  matrisi elemanlarına büyük değerler atanıyorsa ekonomi (maliyet) emniyetten daha önemli demektir.  $Q$  ve  $R$  birbirisiyle ters orantılı olduğundan ikisi de aynı anda minimize edilemez, optimallik buradan kaynaklanır [79].

Hem zamana hem duruma bağlı fonksiyonel denklem

Performans indeksi J yi minimize etmek için Lagrangian çarpanı  $\{\tilde{\lambda}(t)\}$  ile birleştirilir.

$$\{\mathbf{L}\} = \int_{t_0}^{\infty} \left[ \{\mathbf{Z}^T(t)\} \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) + \{\mathbf{u}^T(t)\} [\mathbf{R}] \{\mathbf{u}(t)\} + \{\tilde{\lambda}^T(t)\} ([\mathbf{A}] \{\mathbf{Z}(t)\} + [\mathbf{B}] \{\mathbf{u}(t)\} - \{\dot{\mathbf{Z}}(t)\}) \right] dt \quad (2.59)$$

H ile gösterilen ve Lagrangian L nin integrali olan skaler fonksiyon Hamiltonian olarak adlandırılır. Klasik varyasyon yöntemine dayalı olarak [80], bir önceki denklem (2.59) şu şekilde yeniden yazılabilir.

$$\{\mathbf{L}\} = \int_{t_0}^{\infty} \left[ \mathbf{H}(\{\mathbf{Z}\}, \{\mathbf{u}\}, \{\tilde{\lambda}\}, t) + \{\dot{\tilde{\lambda}}\}^T \{\mathbf{Z}\} \right] dt - \{\tilde{\lambda}\}^T \{\mathbf{Z}\} \Big|_{t_0}^{\infty} \quad (2.60)$$

$$\{\mathbf{H}(\{\mathbf{Z}\}, \{\mathbf{u}\}, \{\tilde{\lambda}\}, t)\} = \{\mathbf{Z}(t)\}^T [\mathbf{Q}] \{\mathbf{Z}(t)\} + \{\mathbf{u}^T(t)\} [\mathbf{R}] \{\mathbf{u}(t)\} + \{\tilde{\lambda}^T(t)\} ([\mathbf{A}] \{\mathbf{Z}(t)\} + [\mathbf{B}] \{\mathbf{u}(t)\}) \quad (2.61)$$

Birinci mertebeden varyasyon göz önüne alındığında, aşağıdaki denklem elde edilebilir:

$$\delta\{\mathbf{L}\} = \delta\{\mathbf{L}_Z\} + \delta\{\mathbf{L}_u\} + \delta\{\mathbf{L}_{\tilde{\lambda}}\} \quad (2.62)$$

$$= \int_{t_0}^{\infty} \left[ \delta\{\mathbf{Z}\}^T \left( \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\mathbf{Z}\}} \right) + \{\dot{\tilde{\lambda}}\} \right) + \delta\{\mathbf{u}\}^T \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\mathbf{u}\}} \right) + \delta\{\tilde{\lambda}\}^T \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\tilde{\lambda}\}} \right) - \{\dot{\mathbf{Z}}\} \right] dt - \delta\{\mathbf{Z}\}^T \{\tilde{\lambda}\} \Big|_{t_0}^{\infty} \quad (2.63)$$

$$\delta\{\mathbf{L}_Z\} = \delta\{\mathbf{Z}\}^T \frac{\partial \{\mathbf{L}\}}{\partial \{\mathbf{Z}\}} = \int_{t_0}^{\infty} \delta\{\mathbf{Z}\}^T \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\mathbf{Z}\}} + \{\dot{\tilde{\lambda}}\} \right) dt - \delta\{\mathbf{Z}\}^T \{\tilde{\lambda}\} \Big|_{t_0}^{\infty} \quad (2.64)$$

$$\delta\{\mathbf{L}_u\} = \delta\{\mathbf{u}\}^T \frac{\partial \{\mathbf{L}\}}{\partial \{\mathbf{u}\}} = \int_{t_0}^{\infty} \delta\{\mathbf{u}\}^T \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\mathbf{u}\}} \right) dt \quad (2.65)$$

$$\delta\{\mathbf{L}_{\tilde{\lambda}}\} = \delta\{\tilde{\lambda}\}^T \frac{\partial \{\mathbf{L}\}}{\partial \{\tilde{\lambda}\}} = \int_{t_0}^{\infty} \delta\{\tilde{\lambda}\}^T \left( \frac{\partial \{\mathbf{H}\}}{\partial \{\tilde{\lambda}\}} - \{\dot{\mathbf{Z}}\} \right) dt \quad (2.66)$$

Maksimum değer koşulunu sağlamak için  $\delta\{\mathbf{L}\} = 0$ ,  $\delta\{\mathbf{Z}\}$ ,  $\delta\{\mathbf{u}\}$  ve  $\delta\{\tilde{\lambda}\}$  için keyfi değer olarak aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$\frac{\partial \{H\}}{\partial \{Z\}} + \dot{\{\tilde{\lambda}\}} = 0, \quad \frac{\partial \{H\}}{\partial \{u\}} = 0, \quad \frac{\partial \{H\}}{\partial \{\tilde{\lambda}\}} - \dot{\{Z\}} = 0, \quad \delta \{Z\}^T \{\tilde{\lambda}\}_{t_0}^{\infty} = 0 \quad (2.67)$$

Denklem 2.60 ve 2.67 aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\dot{\{\tilde{\lambda}\}} = -\frac{\partial \{H\}}{\partial \{Z\}} = -2[Q]\{Z\} - [A]^T \{\tilde{\lambda}\} \quad (2.68)$$

$$\frac{\partial \{H\}}{\partial \{u\}} = 2[R]\{u\} + [B]^T \{\tilde{\lambda}\} = 0 \quad (2.69)$$

Denklem 2.69 yeniden yazılırsa :

$$\{u(t)\} = -\frac{1}{2}[R]^{-1}[B]^T \{\tilde{\lambda}(t)\} \quad (2.70)$$

Daha sonra  $\{u(t)\}$ ,  $\{\lambda(t)\}$  nin lineer bir fonksiyonudur.

$$\{\tilde{\lambda}(t)\} = \{\tilde{P}(t)\}\{Z(t)\} \quad (2.71)$$

Denklem 2.71, denklem 2.70' in yerine yazılırsa Denklem 2.73 elde edilir

$$[G] = -\frac{1}{2}[R]^{-1}[B]^T \{\tilde{P}(t)\} \quad (2.72)$$

$$\{u(t)\} = -[G]\{Z(t)\} \quad (2.73)$$

Denklem 2.68, denklem 2.73'ün yerine konursa:

$$\dot{\{\tilde{P}(t)\}}\{Z(t)\} + \{\tilde{P}(t)\}\dot{\{Z(t)\}} = -(2[Q] + [A]^T \{\tilde{P}(t)\})\{Z(t)\} \quad (2.74)$$

Denklem 2.70 denklem 2.51'e göre düzenlenip yazılırsa denklem 2.74 sadeleşir basitleşir.

$$\dot{\{\tilde{P}(t)\}} + \{\tilde{P}(t)\}[A] + [A]^T \{\tilde{P}(t)\} - \frac{1}{2}(\{\tilde{P}(t)\}[B][R]^{-1}[B]^T \{\tilde{P}(t)\}) + 2[Q] = 0 \quad (2.75)$$

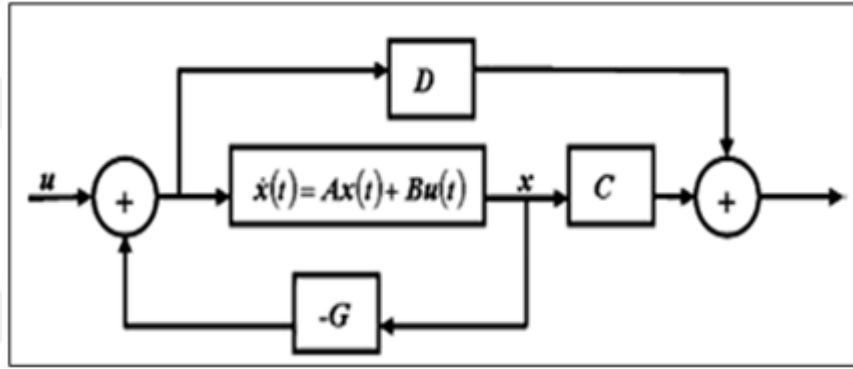
Denklem 2.75 yeniden düzenlenirse

$$\dot{\{\tilde{P}(t)\}} = -\{\tilde{P}(t)\}[A] + [A]^T \{\tilde{P}(t)\} + \frac{1}{2}(\{\tilde{P}(t)\}[B][R]^{-1}[B]^T \{\tilde{P}(t)\}) - 2[Q] \quad (2.76)$$

Denklem 2.76 Riccati denklemi olarak adlandırılır, denklem doğrusal olmayan diferansiyel denklem  $\{\tilde{P}(t)\}$  Riccati matris fonksiyonudur. Denklem 2.76 tarafından hesaplanabilir, yöntem referanslarda gösterilmiştir [81,82].

Denklem 2.51 denklem 2.73'le yeniden düzenlenirse:

$$\{\dot{Z}(t)\} = \left( [A] - \frac{1}{2}[B][R]^{-1}[B]^T \{\tilde{P}(t)\} \right) \{Z(t)\} \quad (2.77)$$



Şekil 2.9. Geri Beslemeli Kontrol

## 2.8. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 Yapı Tasarımı

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de (TBDY-2018) yapı tasarımında uygulanması gereken temel ilkeler: taşıyıcı sistemin sadeliği ve basitliği, düzenli ve simetrik olarak düzenlenmesi, yeterli dayanım ve rijitliğe sahip olmasının yanı sıra taşıyıcı sistemin yeterli süneklikte tasarlanması vurgulanmaktadır.

TBDY-2018'e göre: sismik hareketler, yapı modelleme ve yapısal elemanlarının davranışlarındaki belirsizlikler yanı sıra analiz ve tasarım metotlarındaki yaklaşıklıklar sebebi ile, yapının deprem davranışının öngörülebilir olmasını sağlamak için taşıyıcı sistemin olabildiğince sade ve basit olması, deprem etkisi altında yapı tasarımının esas kuralıdır [83]. Depreme karşı davranışlarındaki olumsuzluklar nedeni ile tasarımından ve yapımından kaçınılması gereken yapılara düzensiz binalar denir. Aşağıda TBDY-2018'e göre yapılarda bulunan düzensizlik türleri ve sınır durumları verilmiştir.

### 2.8.1. TBDY-2018 göre yapılardaki düzensizlik türleri

TBDY-2018’de belirtilen deprem etkisi altındaki düzensiz binalar türleri planda ve düşeyde olarak iki türdür. Aşağıdaki Tablo 2.1’de planda düzensizlik durumları verilmiştir.

Tablo 2.1. Planda Düzensizlik Durumları

A-Planda Düzensizlik Durumları
A1 -Burulma Düzensizliği
A2-Döşeme Süreksizlikleri
A3-Planda Çıkıntılar Bulunması
B-Düşeyde Düzensizlik Durumları
B1-Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat)
B1-Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat)
B3-Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği

#### a) Burulma Düzensizliği (A1)

A1 tipi düzensizlik, birbirine dik iki doğrultudaki depremden herhangi biri için, bir kattaki maksimum görelî yer değiştirmenin ortalama görelî yer değiştirmeye oranı olarak hesaplanan bir burulma düzensizliği katsayısına bağlı olarak tanımlanmaktadır.

$$(\Delta_i)_{ort} = \frac{1}{2} [(\Delta_i)_{max} + (\Delta_i)_{min}] \quad (2.78)$$

$$\eta_{bi} = \left( \frac{(\Delta_i^{(x)})_{max}}{(\Delta_i^{(x)})_{ort}} \right) 1.2 \quad (2.79)$$

Kendi düzlemleri içerisinde döşemelerin rijit diyafram olarak çalışması durumunda kullanılacak formül yukarıda verilmiştir.  $(\Delta_i^{(x)})_{max}$  binanın i’inci katındaki maksimum azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $(\Delta_i)_{min}$  binanın i’inci katındaki minimum azaltılmış görelî kat ötelemesi,  $(\Delta_i^{(x)})_{ort}$  binanın i’inci katındaki ortalama azaltılmış görelî kat ötelemesi  $\eta_{bi}$ ’inci katta tanımlanan burulma düzensizliği katsayısıdır.

#### b) Döşeme Süreksizlikleri (A2)

Kat seviyesindeki boşluk alanlarının toplamının brüt döşeme toplam alanının 1/3’ünü geçmesi, deprem yüklerinin aktarımını engelleyecek lokal döşeme boşluklarının olması ve kat seviyesindeki döşemelerde düzlem içi rijitlik ve dayanımlarında azalmaların bulunması döşeme süreksizlikleri durumlarıdır.

c) Planda Çıkıntılar Bulunması (A3)

Yapı kat planlarında çıkıntı olan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinin de, yapının o katının aynı doğrultulardaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumu [83].

d) Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Zayıf Kat)(B1)

Geçmiş depremlerde dolgu duvarların zemin katlarda üst katlara göre az veya hiç bulunmayan yapılarda büyük hasarlar meydana gelmiştir. Zemin katlarda yapının düşey rijitliğinin az olması yatay deplasmanlara karşı direncinin az olmasına sebep olur. Düşey yönde rijitlik süreksizliği bulunan katlar zayıf kat olarak tanımlanır. Geniş alanlar sağlamak amacıyla ticari amaçlı kullanılan mekanlarda dolgu duvar örülmeyen veya yüksek yapılarda zemin katın kat yüksekliğinin göreceli olarak fazla olması durumlarında yapıların deprem gibi dinamik yükler altında hasar almasına sebep olur.

Betonarme yapılarda Dayanım Düzensizliği, herhangi bir birbirine dik iki deprem doğrultusunun, herhangi bir kat için toplam etkili kesme alanının, bir üst kattaki toplam etkili kesme alanına oranı 0.80'den küçük olması durumudur.

$$\eta_{ci} = (\sum A_e)_i / (\sum A_e)_{i+1} < 0.80 \quad (2.80)$$

Herhangi bir kattaki etkili kesme alanı tanımı:

$$(\sum A_e)_i = (\sum A_w)_i + (\sum A_g)_i + (0.15 \sum A_k)_i \quad (2.81)$$

Denklem (2.80-2.81)'de yer alan ;  $\eta_{ci}$  Dayanım Düzensizliği Katsayısı ,  $\sum A_e$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusundaki etkili olan kesme alanı,  $\sum A_g$  herhangi bir katta, göz önüne alınan deprem doğrultusuna paralel doğrultuda perde olarak çalışan taşıyıcı sistem elemanlarının alanlarının toplamı,  $\sum A_k$  herhangi bir katta, gözönüne alınan deprem doğrultusuna paralel kagir dolgu duvar alanlarının (kapı ve pencere boşlukları hariç) toplamı,  $\sum A_w$  herhangi bir katta, kolon enkesiti etkin gövde alanlarının toplamını ifade etmektedir [83].

e) Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Yumuşak Kat)(B2)

Rijitlik Düzensizliği, bodrum katlar hariç, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'inci kattaki ortalama görelî kat öteleme oranının 2.0'i aşması durumudur.

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(x)}/h_i)_{ort} / (\Delta_{i+1}^{(x)}/h_{i+1})_{ort} > 2.0 \quad (2.82)$$

$$\eta_{ki} = (\Delta_i^{(x)}/h_i)_{ort} / (\Delta_{i-1}^{(x)}/h_{i-1})_{ort} > 2.0 \quad (2.83)$$

Denklem (2.82-2.83)'de  $(\Delta_i)_{ort}$  binanın i'inci katındaki ortalama azaltılmış görelî kat ötelenmesi,  $\eta_{ki}$  yumuşak kat düzensizliği katsayısı  $h_i$  ise görelî kat yüksekliğidir.

#### f) Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizliği (B3)

Taşıyıcı Sistemin Düşey Elemanlarının Süreksizlik durumları: kolon veya perde elemanlarının bazı katlarda kaldırılarak guseli kolonların veya kirişlerin üstüne veya ucuna oturtulması, ya da üst kattaki perdelerin altta kolonlara oturtulması durumudur. TBDY-2018 binanın herhangi bir katında konsol kirişlerin veya alttaki kolonlarda oluşturulan guselerin üstüne veya ucuna oturtulmasına hiçbir zaman izin verilmez.

### 2.9. TBDY-2018 Yapısal Kontrol Gerekliliği

Geçmişteki depremlere bakıldığında tasarım ve yapım aşamasından kaynaklanan kusurlar sebebiyle yapılar ciddi hasarlar almışlardır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e göre düzensiz binalar ile ilgili yapının hem düşeyde hem yatayda sınır koşulları ile yapının dinamik yükler altında taşıyıcı sisteminin kararlı bir davranış göstermesi amaçlanmıştır. Zayıf kat düzensizliği sınırlaması ile yapının kolon ve perde gibi taşıyıcı elemanların yeterli kesitte tasarlanmasını, yumuşak kat ve burulma düzensizliği sınırlaması ile yapının ötelenme oranlarını kontrol altına almayı amaçlamıştır. TBDY-2018'in yapı için belirlediği limit durumları aşmamak ve yapı dinamik karakterini geliştirmek amacıyla hem mevcut hem de yeni yapılacak binalara yapısal kontrol sistemleri uygulanabilir [1].

Düzensiz yapıların karmaşık yanıtlarını, uygun kontrol tasarımıyla önemli ölçüde azaltılabilir. Yang ve Huang asimetrik plana sahip ve burulma davranışı gösteren düzensiz yapı sistemlerinin sismik izolasyonla iyileştirilmiştir [84]. Goel asimetrik yapıya ilave edilen damperlerin yapı deformasyonlarına etkilerini araştırmıştır [85].

Jangid ve Datta Çoklu Ayarlı Kütle Sönümleyiciler ile yapının burulma davranışını incelemiştir [86]. Lin ve Chopra tek katlı asimetrik yapıda ilave viskoz sönümleyici etkilerini araştırmışlardır [87].



### 3. YAPI BİLGİLERİ

Bu bölümde tez çalışmasında incelenen betonarme yapının bilgileri verilecektir. Yapı modeli TBDY-2018 hükümlerine uygun olarak tasarlanmıştır. İncelenen yapının Sap2000 V21.1 yapısal analiz programında oluşturulan sonlu elemanlar modeli Şekil 3.1'de, kat planı ise Şekil 3.2'de gösterilmektedir.

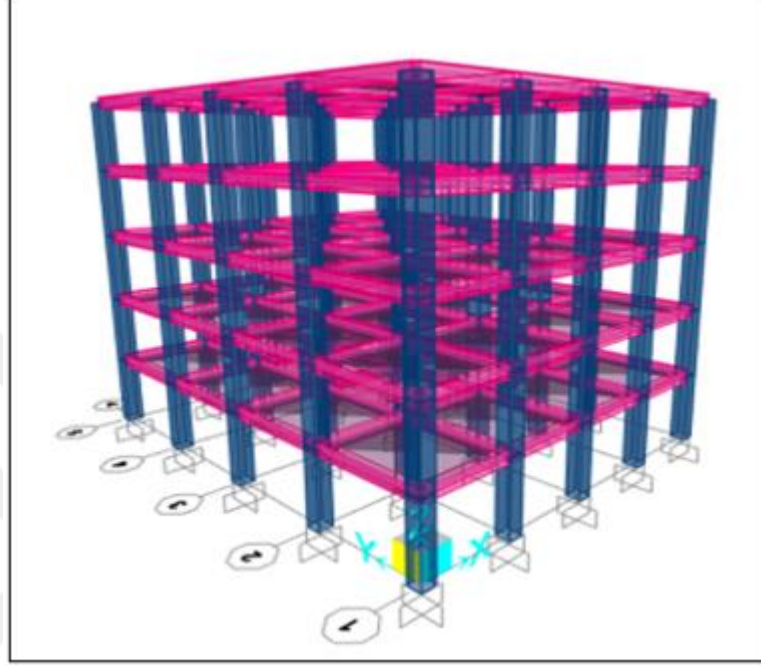
#### 3.1. Malzeme Bilgileri

Betonarme sistemin taşıyıcı elamanlarında ve döşemelerinde C30 beton kullanılmış olup kullanılan betonarme çeliği ise S420 sınıfındadır. 1. Deprem bölgesinde yapılması planlanmış ve zemin sınıfı Z2 alınmıştır. Döşemelerdeki hareketli yük 2 kN/m<sup>2</sup> ve sabit yük için ise 3 kN/ m<sup>2</sup> şeklindedir. Yapı 5 katlı olup tüm kolon, kiriş ve döşeme boyutları aynıdır. Kolon boyutları 50cm\*50cm, kiriş boyutları 25cm\*25cm ve döşemeler 15cm'dir.

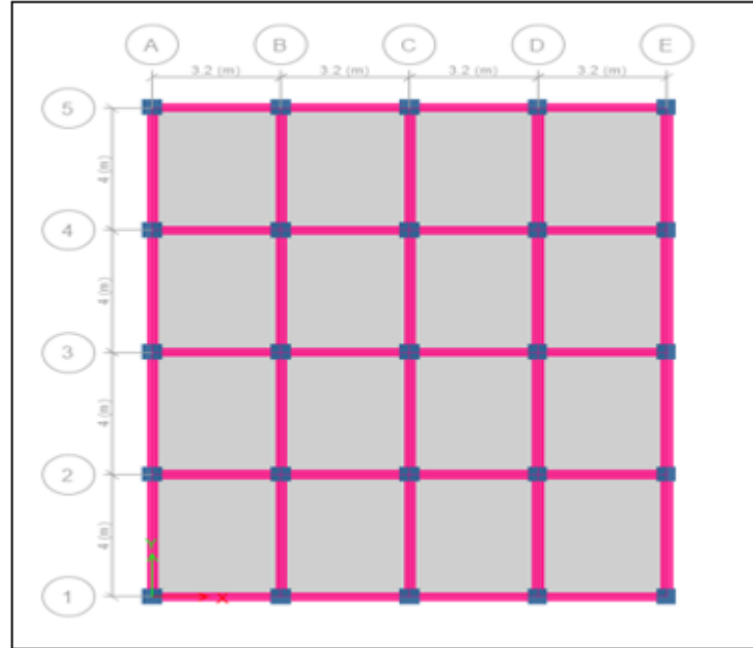
#### 3.2. Analiz

Yapı kontrol algoritmasının etkinliği 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi'nin Gebze-TUBİTAK izleme istasyonu kayıtları kullanılarak belirlenmiştir (Şekil 3.3). Bina türü konutların deprem sonrası gözlenen hasar dağılımları incelendiğinde, ülkemizde sıklıkla yaşadığımız depremlerin ortak karakteristiği olarak yanal atım fay mekanizmasının tetiklediği bir deprem olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin Gebze istasyon kaydı Şekil 3.4 'de gözlenen frekans içeriğiyle seçilmiştir. Çalışma depremi Kocaeli Gebze kaydı kaynak mekanizmasının, kırılım, yayılım, yönelim etkilerinin izlendiği frekansları yeterli genlik büyüklükleriyle barındırmaktadır [88,89]. Öte yandan, şehirlerimizde genelde hâkim olan 5 - 8 katlı betonarme binaların sahip oldukları hâkim frekans bandı 0.5 sn. (2.0 Hz.) – 0.8 sn. (1.25 Hz.) band aralığı Şekil 3.4'te gözlenen genlik-frekans içerikleriyle yapı davranışına dikkat çeken mertebelerde etki verdiği önceki çalışmalardan bilinmektedir [89-90]. Bu çalışmada amaçlanan değişik kontrol benzeşim çalışmalarının performansları gerçek sınaşıartlarında test edilmiş olacaktır.

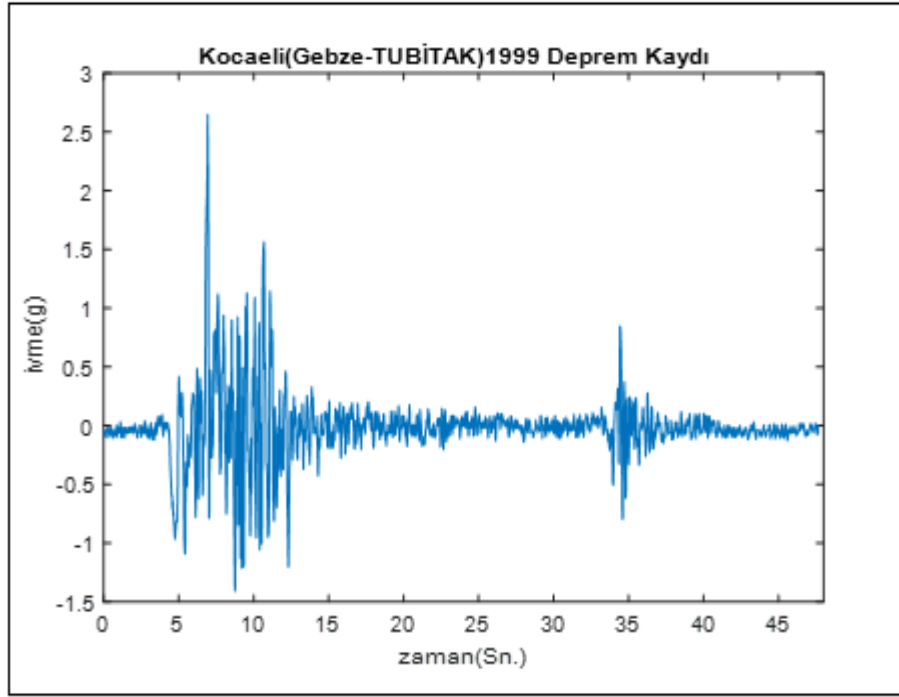
Simülasyon çalışmaları makro kodlarla Matlab [91] programında yazılarak yürütülmüş ve sonuçları aşağıda tartışılmıştır [1].



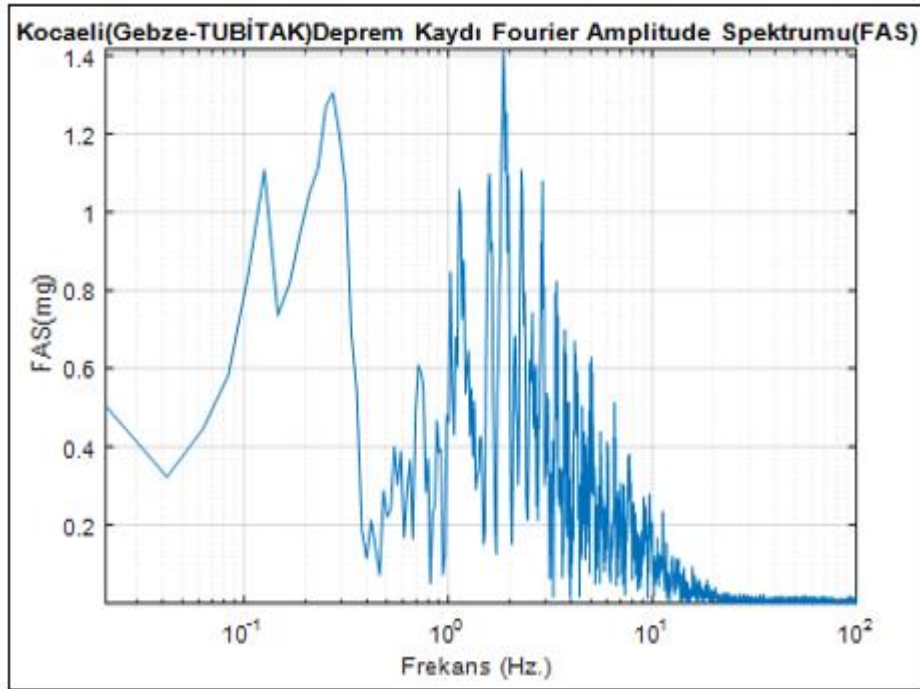
Şekil 3.1. Yapı Sonlu Eleman Modeli



Şekil 3.2. Kat Planı



Şekil 3.3. Kocaeli (Gebze-TUBİTAK) 1999 Deprem Kaydı



Şekil 3.4. Fourier Amplitude Spektrumu (FAS)

#### 4. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Beş katlı betonarme yapıda pasif kontrol için Şekil 4.1’de gösterilen viskoz damper kullanılmış olup analizler için Sap2000 V21.1.0 yapısal analiz yazılımı kullanılmıştır. Viskoz sönümleyiciler sadece çerçevelerin dış aksına Şekil 4.2’de görüldüğü konumlarda toplam 40 adet kullanılmıştır.

##### 4.1. Pasif Kontrol

SAP2000, bina yapıları üzerinde çalışan yapı mühendisi için mevcut en geniş analiz ve tasarım araçları yelpazesini sunmaktadır.

Deprem enerjisini dağıtmak için akışkan viskoz damperlerin kullanılması, yapının yer değiştirme, hız ve ivme değerlerinin azalmasını sağlamıştır.

5 katlı yapının damperli ve dampersiz yapılarının sismik davranışlarını nonlinear time history analizi ile incelenmiştir.

SAP2000 programında kullanılan damperleri tanımlamak için seçilen parametreler aşağıdaki gibidir. Viskoz damper hıza bağlı olduğundan ve statik yüklere dayanmadığından, rijitliğin doğrusal özellikleri sıfır olarak ayarlanır.

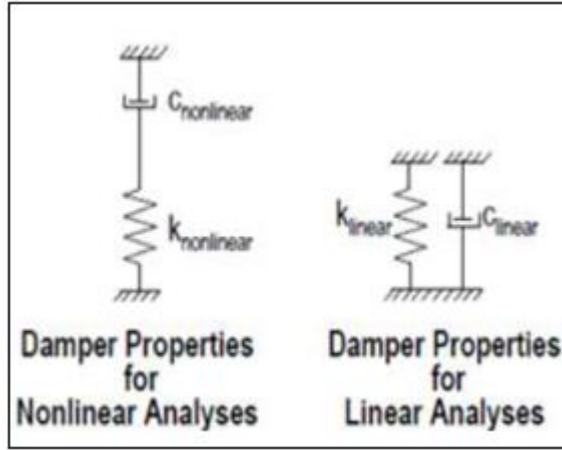
Sap2000 Programında Damper için seçilen parametreler (kN-m):

Nonlinear Link Type : Damper

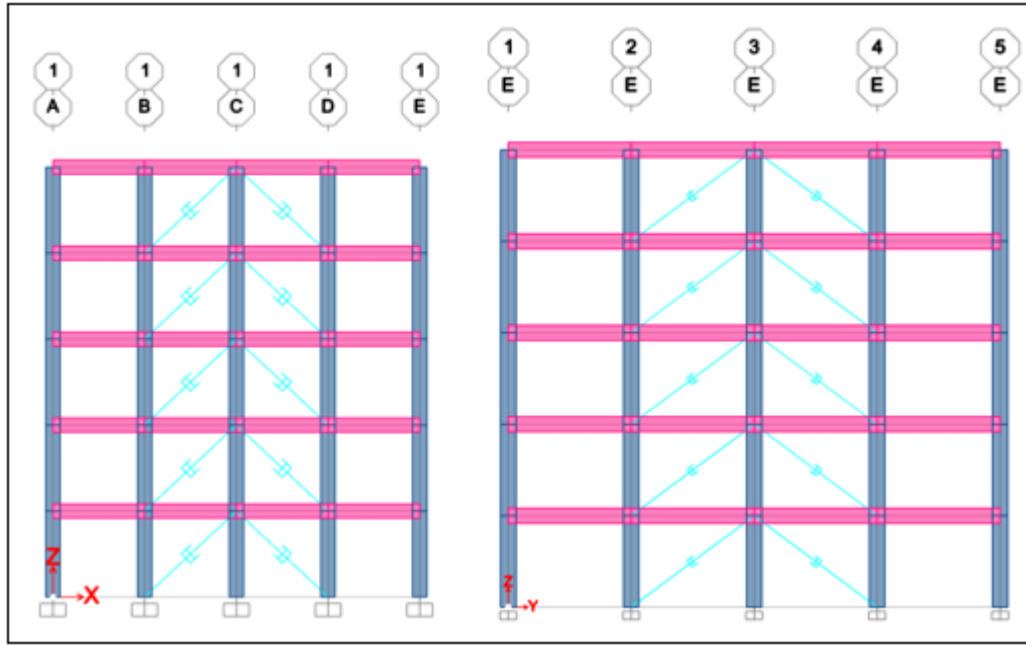
U1 Nonlinear Stiffness : 200000

U1 Nonlinear Damping : 6000

U1 Nonlinear Damping Component : 1



Şekil 4.1. Lineer ve Lineer Olmayan Analiz Damper Modellenmesi



Şekil 4.2. Damper Yerleşim Şeması X-Z, X-Y yönleri

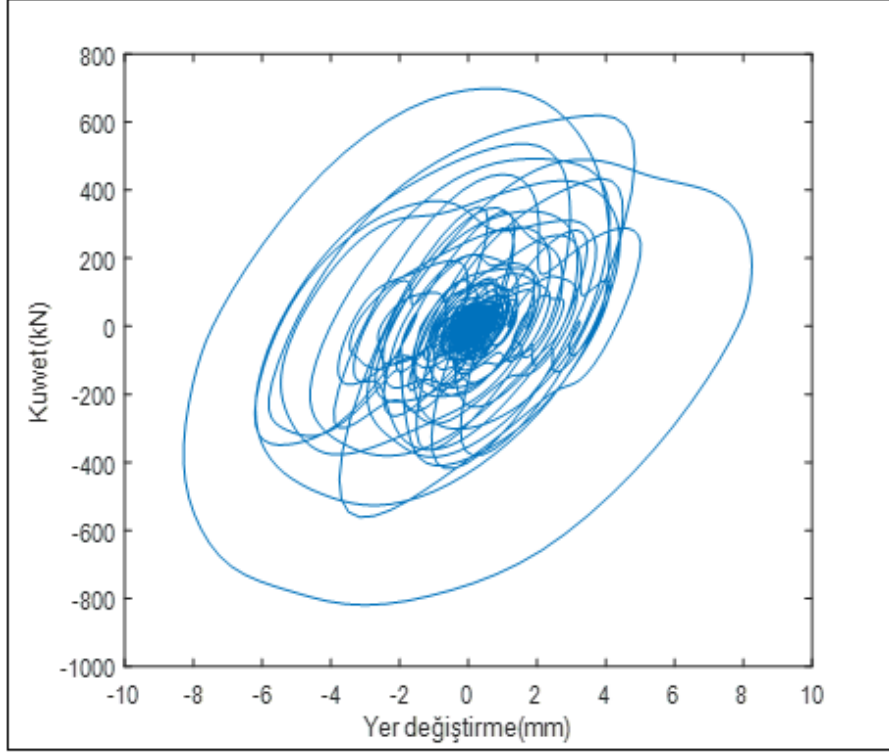
## 4.2. Aktif Kontrol

Yapının Aktif kontrol kısmında LQR ve Gürbüz Kontrol  $H^\infty$  yöntemleri ayrı ayrı Matlab programında simule edilmiştir. Viskoz sönümleyicinin histeretis grafiği Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

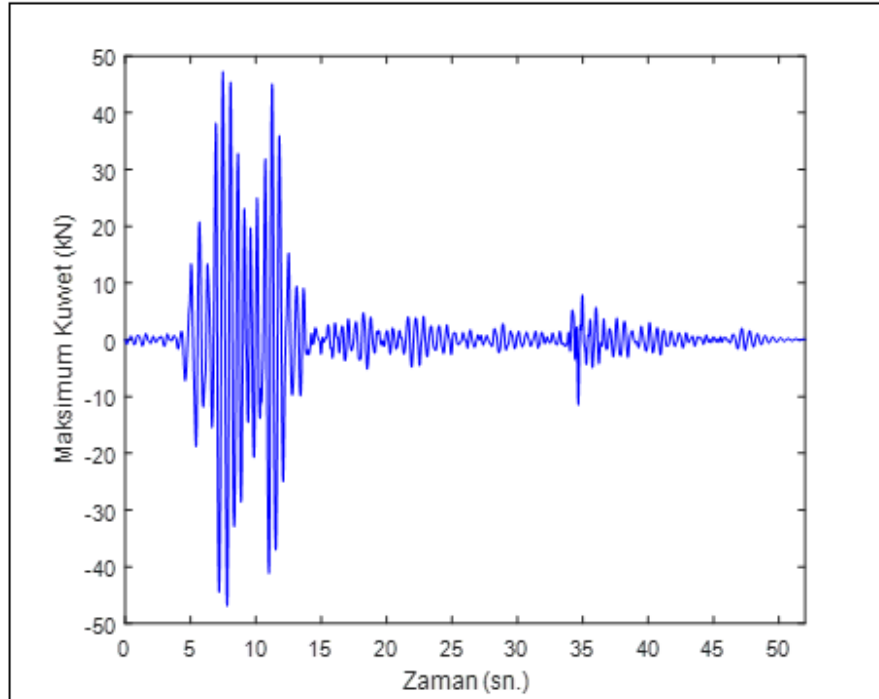
LQR maksimum kuvvet grafiği ise Şekil 4.4'teki gibi tanımlanmıştır. LQR parametreleri:

R ağırlık matrisi köşegen elemanlar  $10^{-4}$  diğer elemanlar sıfır olarak seçilmiştir.

Q ağırlık matrisi  $10^2 * \text{diag}[0 0 1 1]$  olarak seçilmiştir.



şekil 4.3. Viskoz Damper Histerisis Grafiği



şekil 4.4. LQR Maksimum Kuvvet Grafiği

Gürbüz Kontrol pamametreleri:

Gürbüz kontrolde yapının rijitlik ve sönüm değerlerinde %10 belirsizlik varsayımı ile yapı parametreleri belirlenmiştir. Seçilen ağırlık matrisleri:

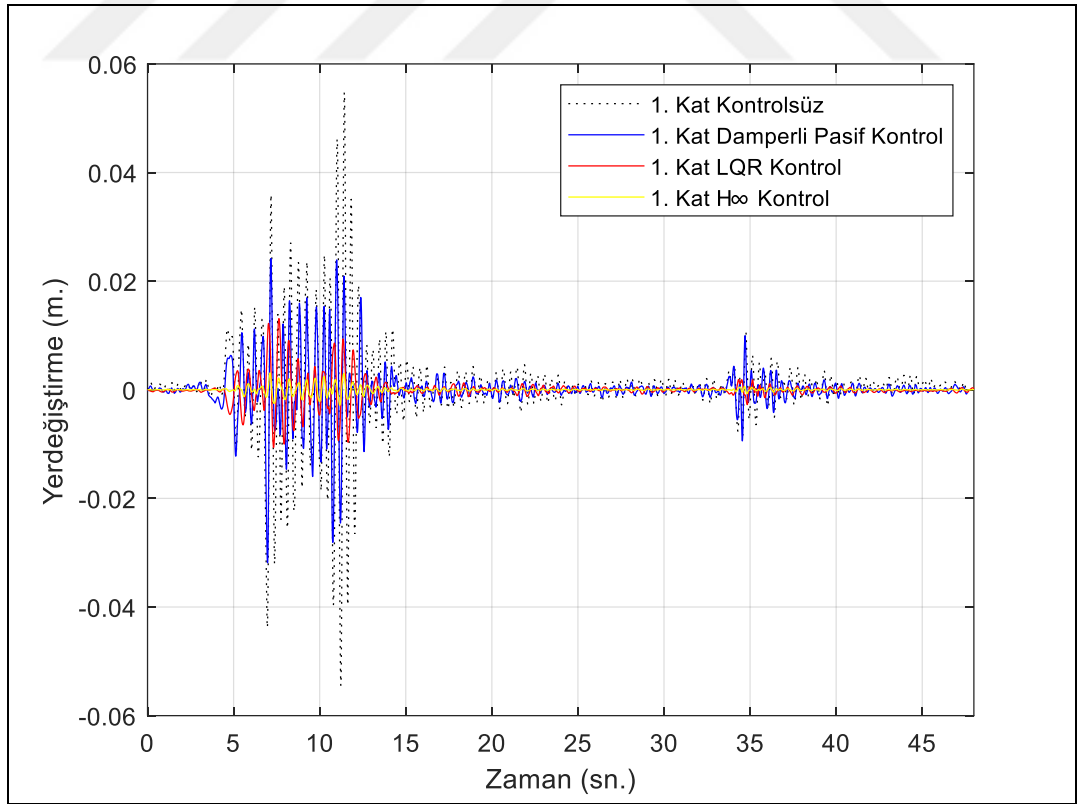
$$W_u = 9 \cdot 10^{-9} [I]$$

$$W_n = 8 \cdot 10^{-12} [I]$$

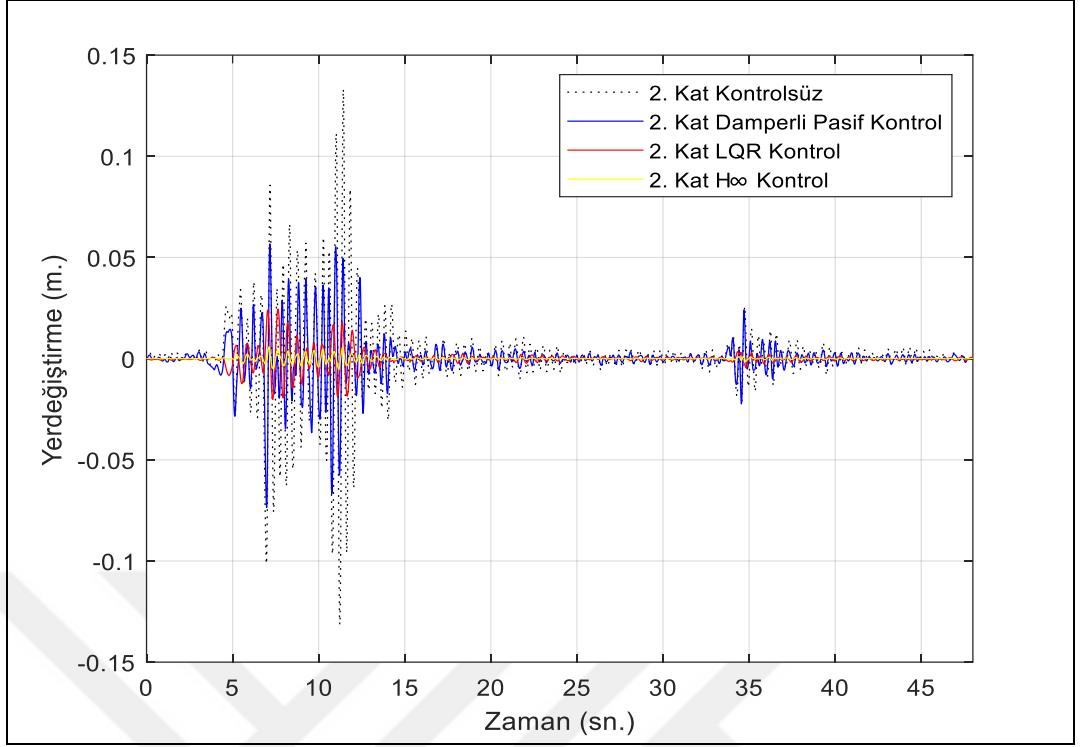
### 4.3. Simülasyon Sonuçları

#### 4.3.1. Kinematik değerlendirme

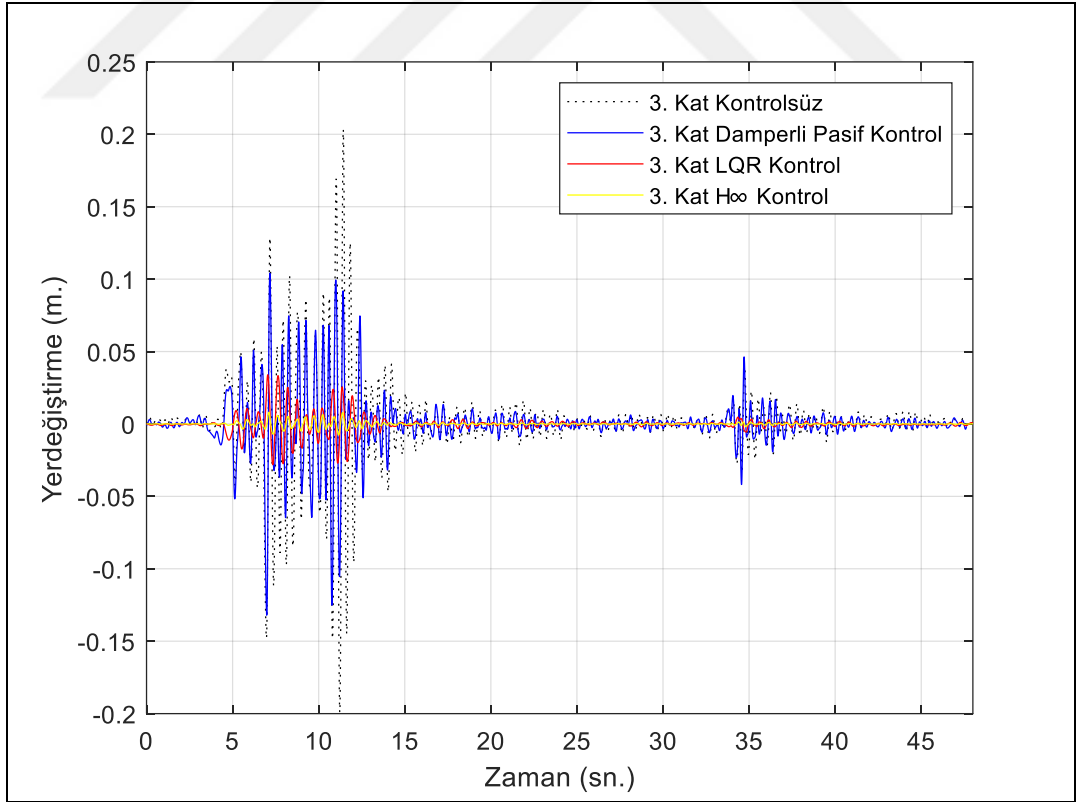
Uygulanan kontrollü ve kontrolsüz simülasyonlarda değişik kat seviyelerinde yer değiştirme, hız ve ivme zaman geçmişleri Şekil 4.5 - Şekil 4.22 grafiklerinde gösterilmiştir. Genel eğilim olarak kinematik parametrelerin genliklerinde önemli oranda sönümün kontrollü sistemler altında baskın olduğu, en güçlü şekliyle  $H_\infty$  kontrol ile sönümün doruk yaptığı grafiklerden izlenmektedir.



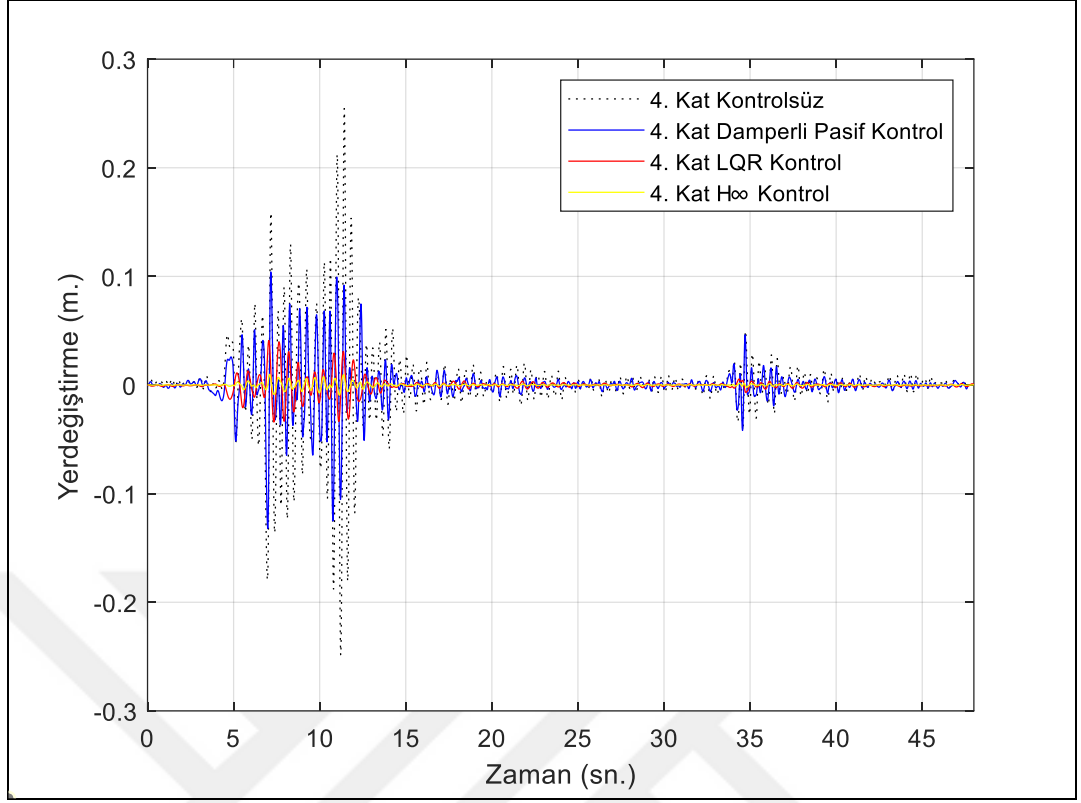
Şekil 4.5. Deprem Etkisi Altında 1. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri



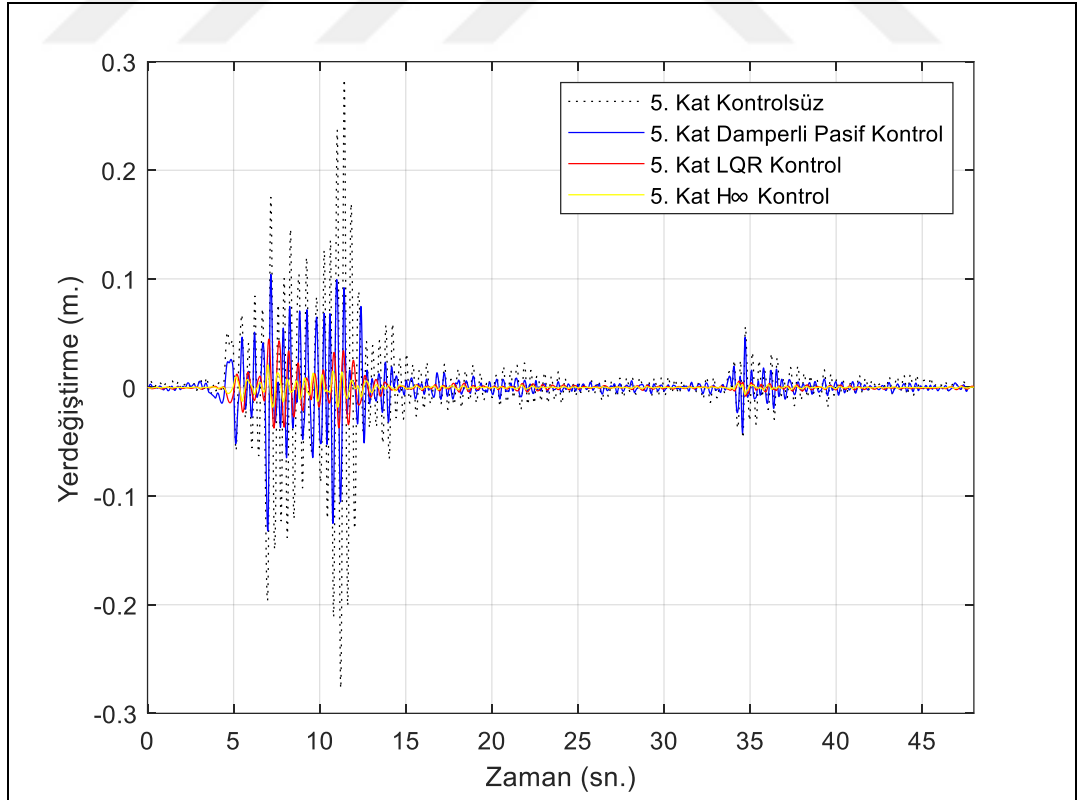
Şekil 4.6. Deprem Etkisi Altında 2. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri



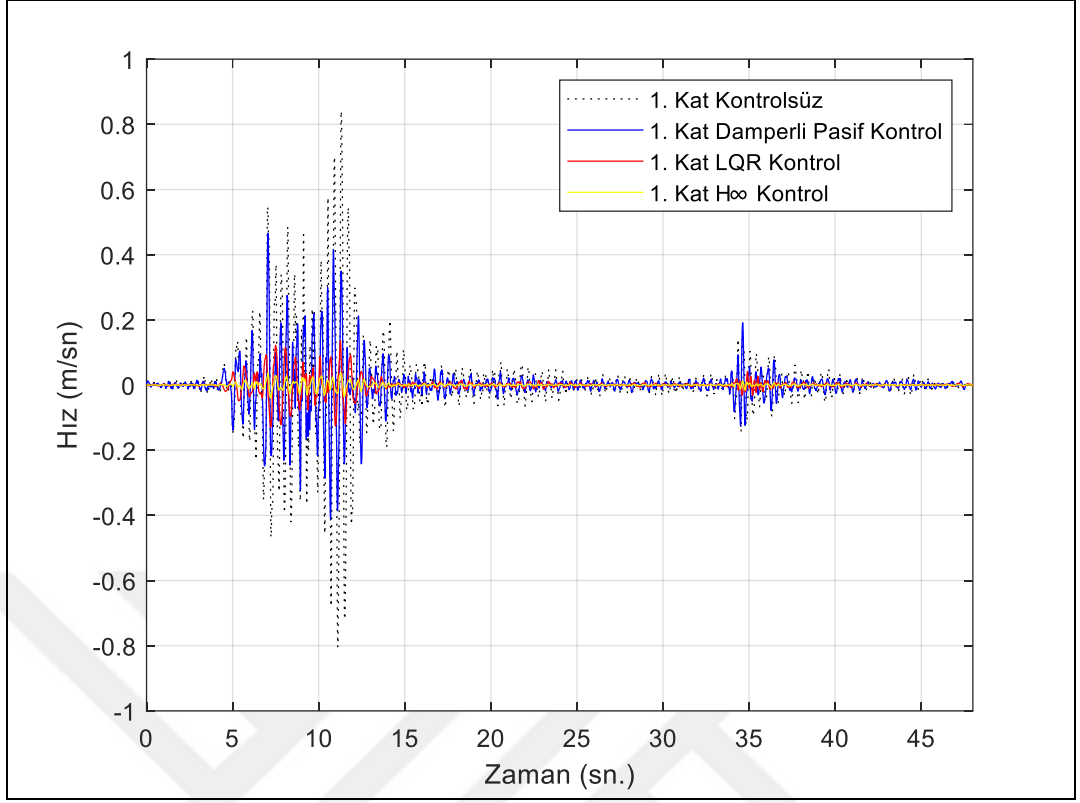
Şekil 4.7. Deprem Etkisi Altında 3. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri



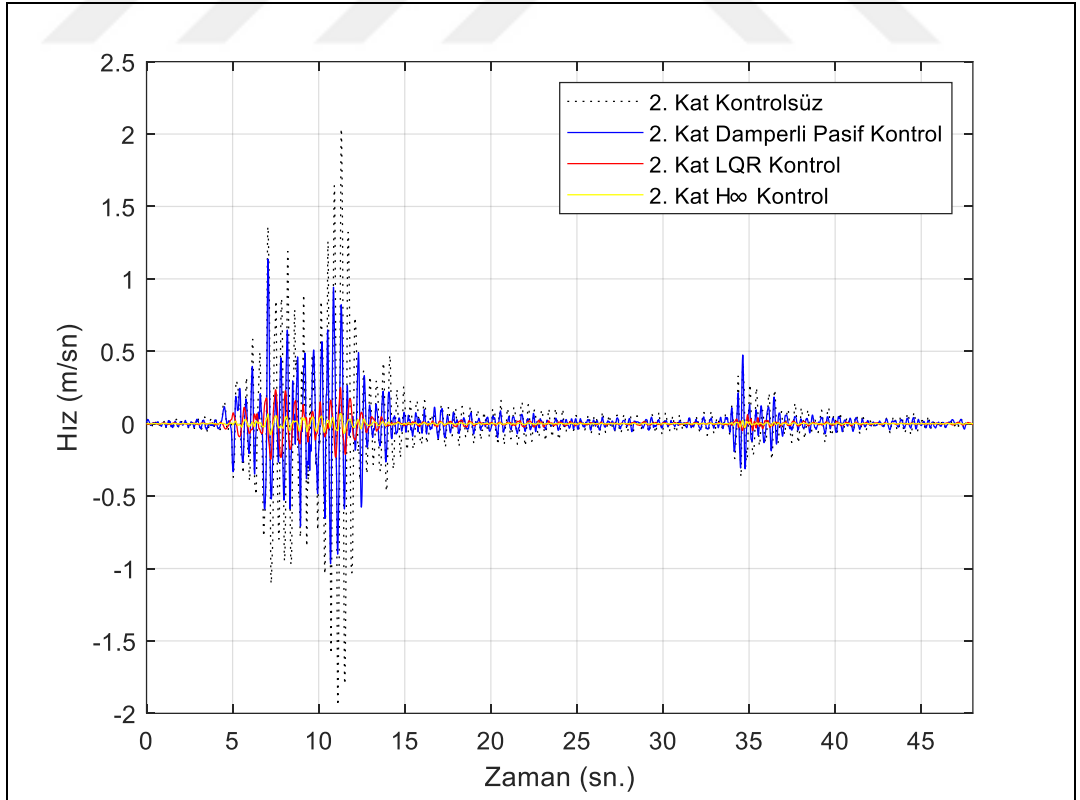
Şekil 4.8. Deprem Etkisi Altında 4. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri



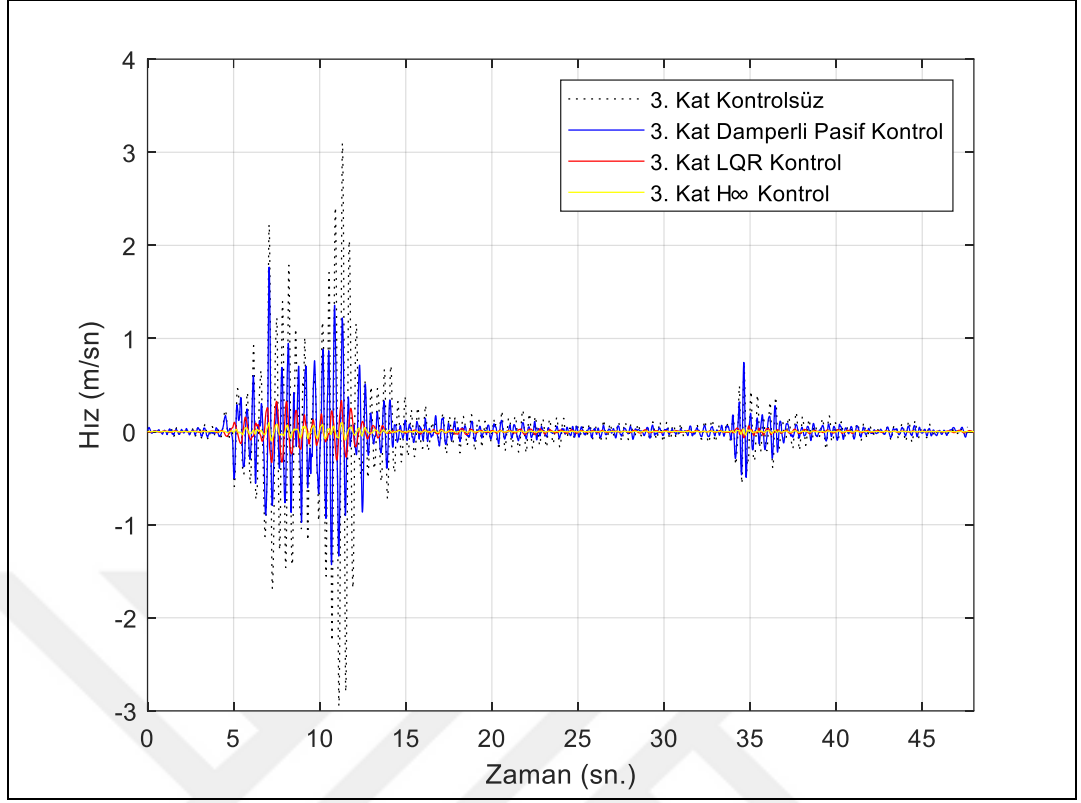
Şekil 4.9. Deprem Etkisi Altında 5. Kat Yerdeğiştirme Tepkileri



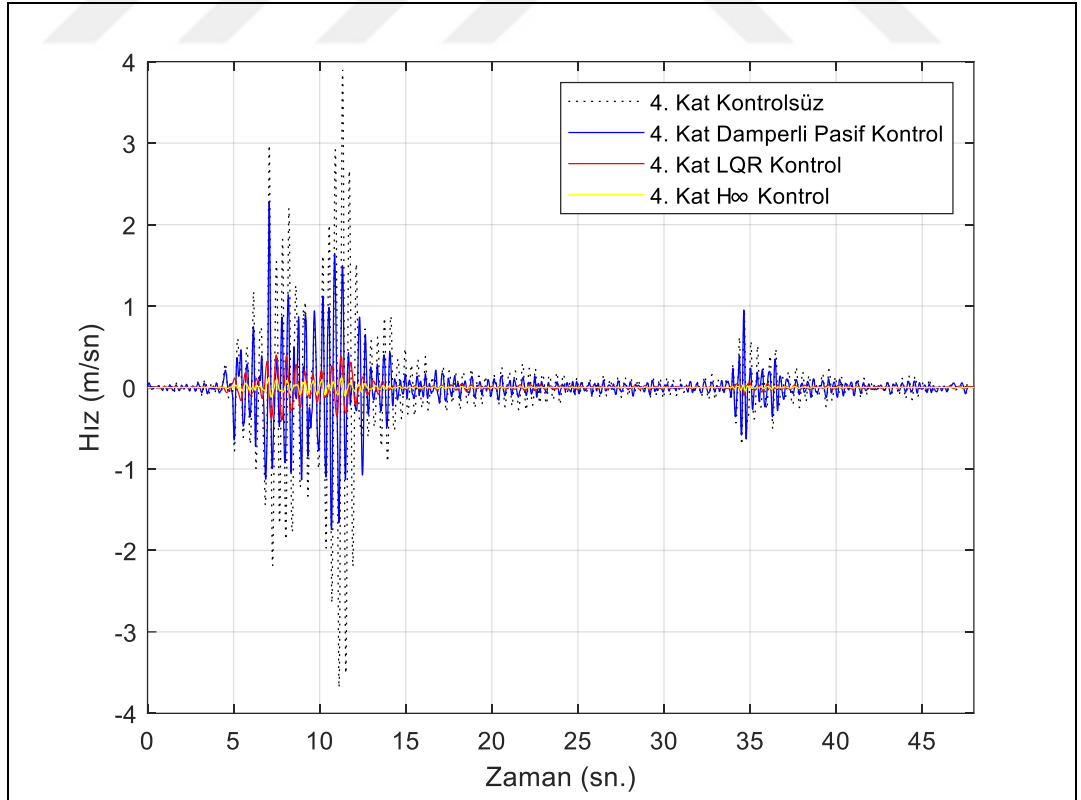
Şekil 4.10. Deprem Etkisi Altında 1. Kat Hız Tepkileri



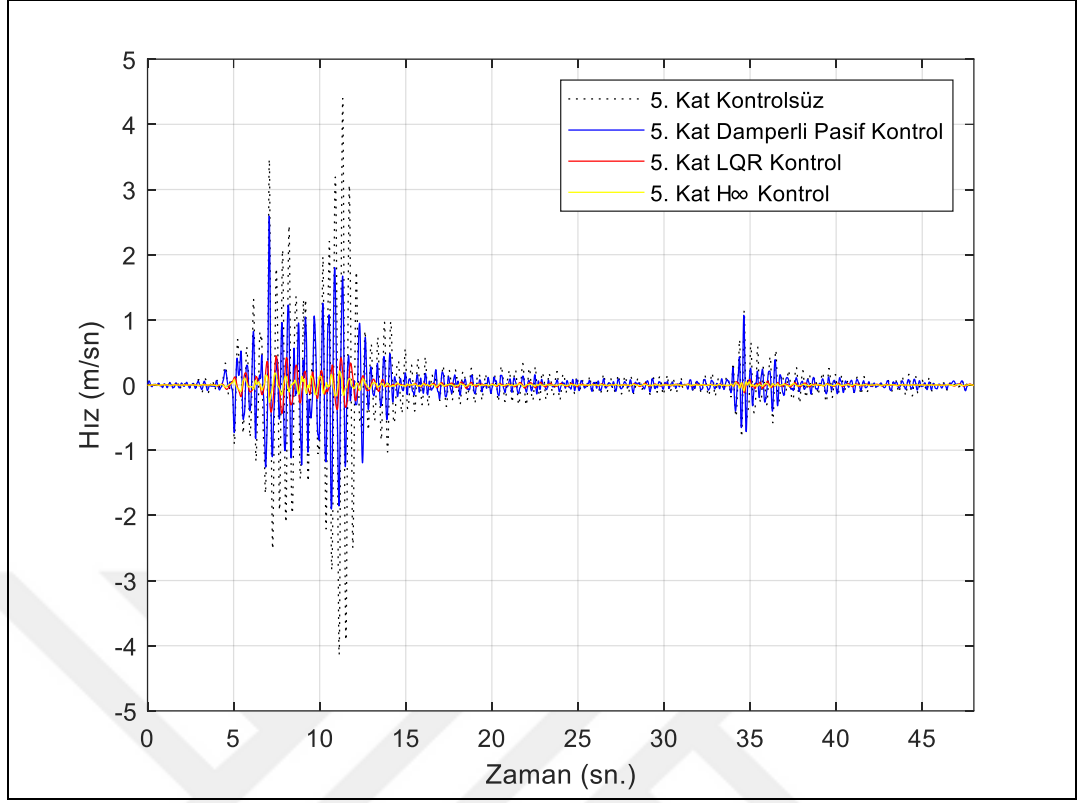
Şekil 4.11. Deprem Etkisi Altında 2. Kat Hız Tepkileri



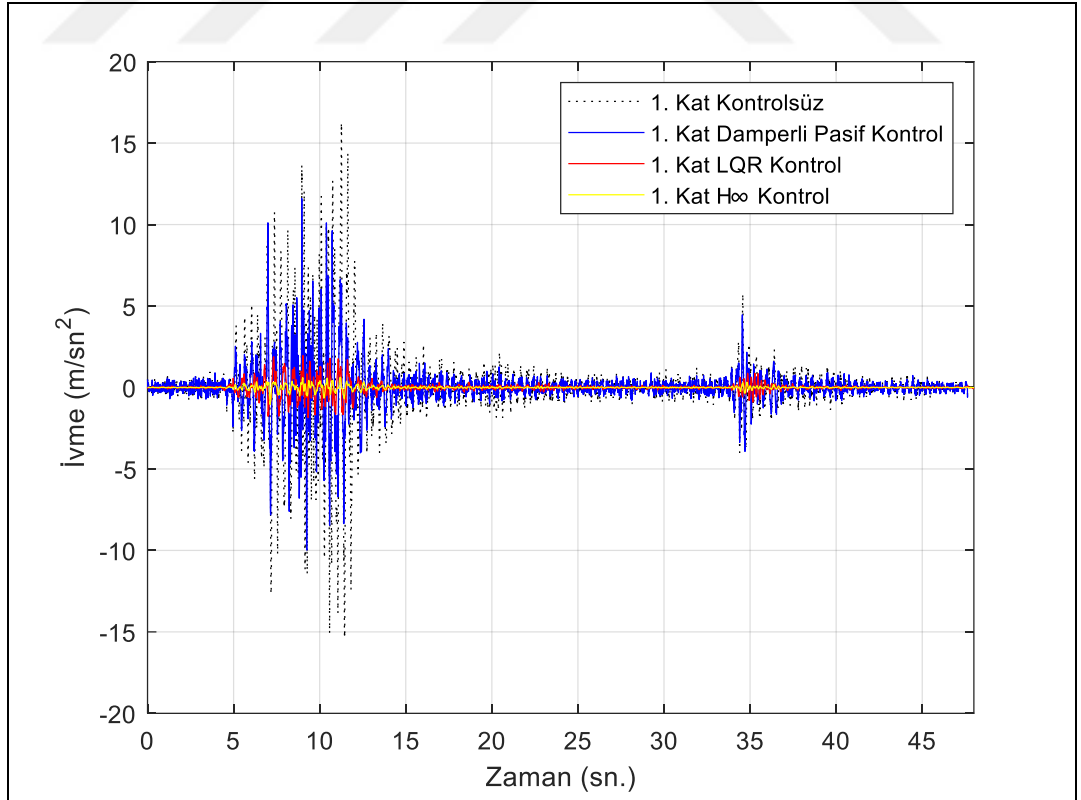
Şekil 4.12. Deprem Etkisi Altında 3. Kat Hız Tepkileri



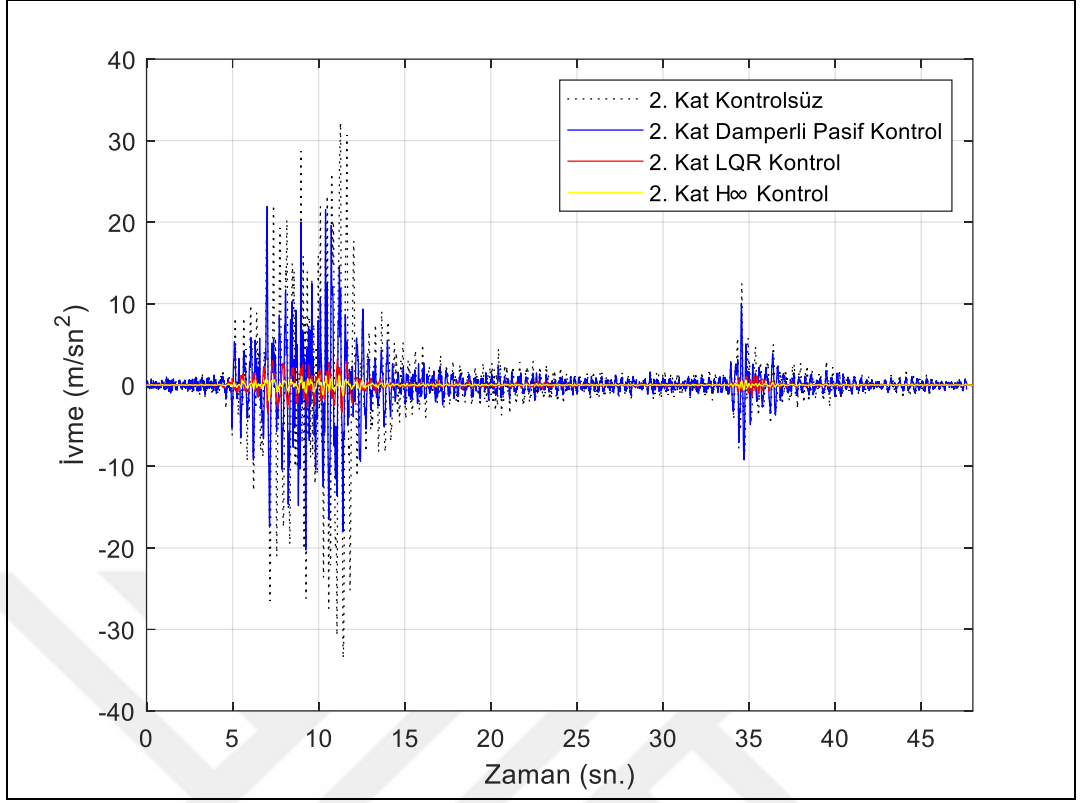
Şekil 4.13. Deprem Etkisi Altında 4. Kat Hız Tepkileri



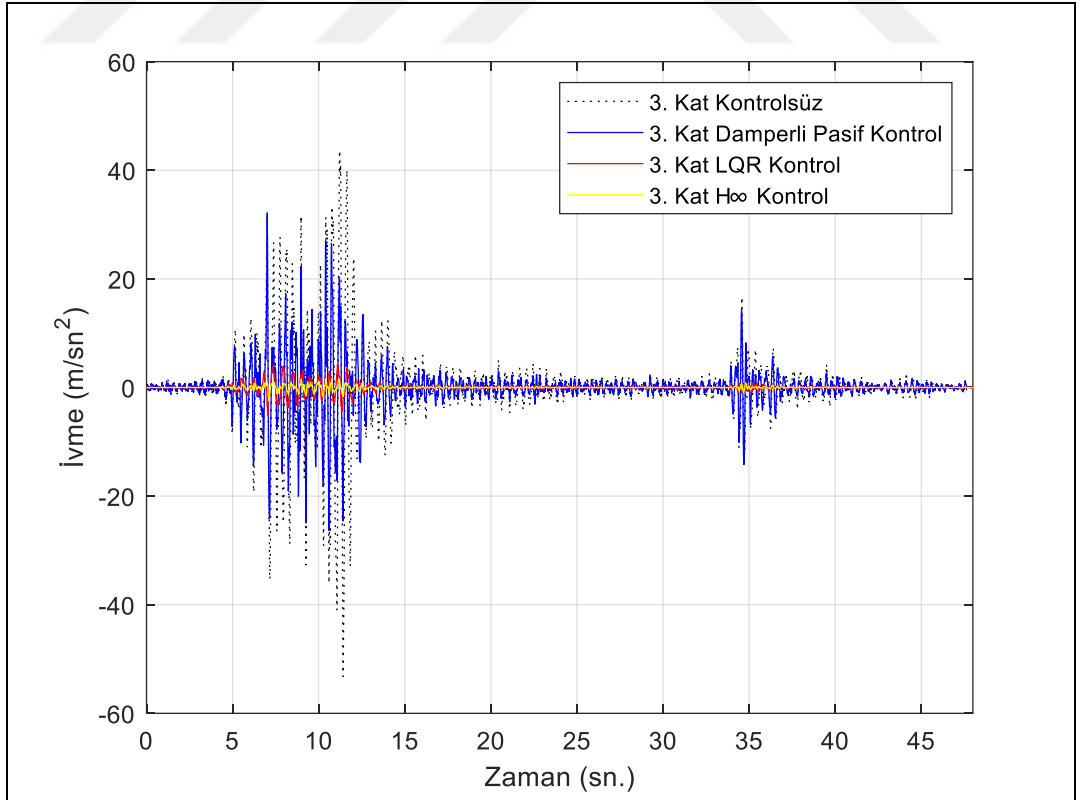
Şekil 4.14. Deprem Etkisi Altında 5. Kat Hız Tepkileri



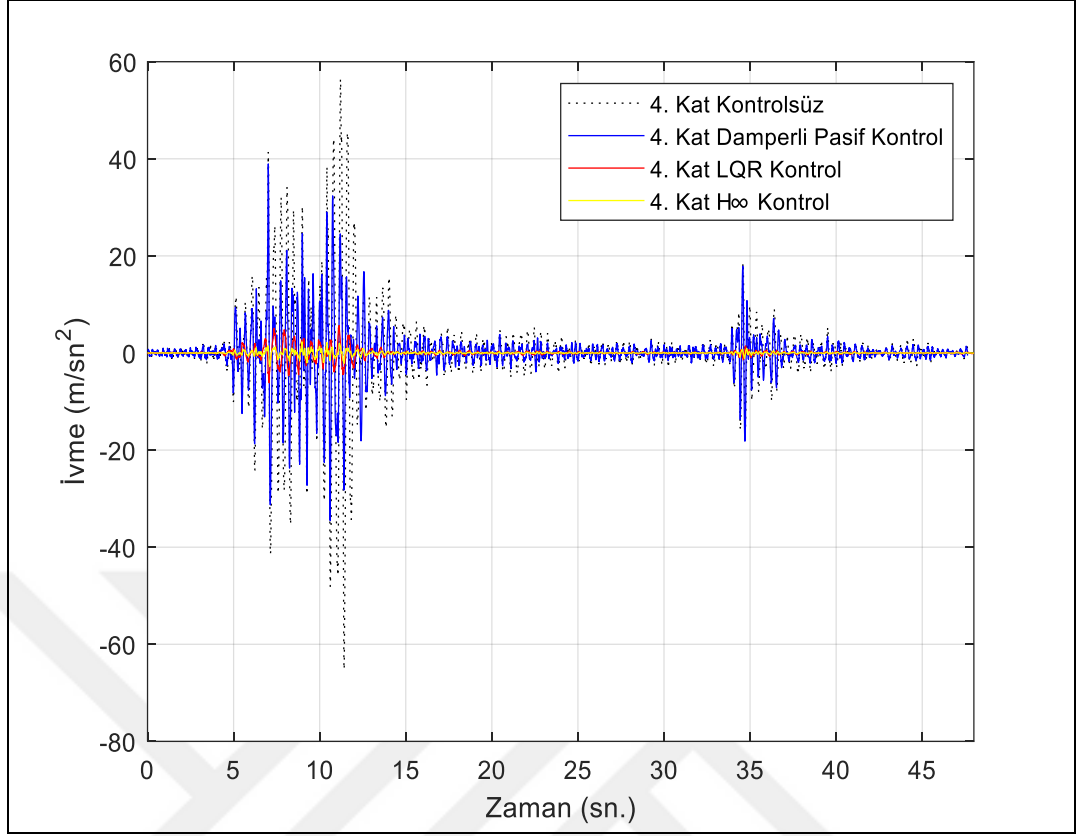
Şekil 4.15. Deprem Etkisi Altında 1. Kat İvme Tepkileri



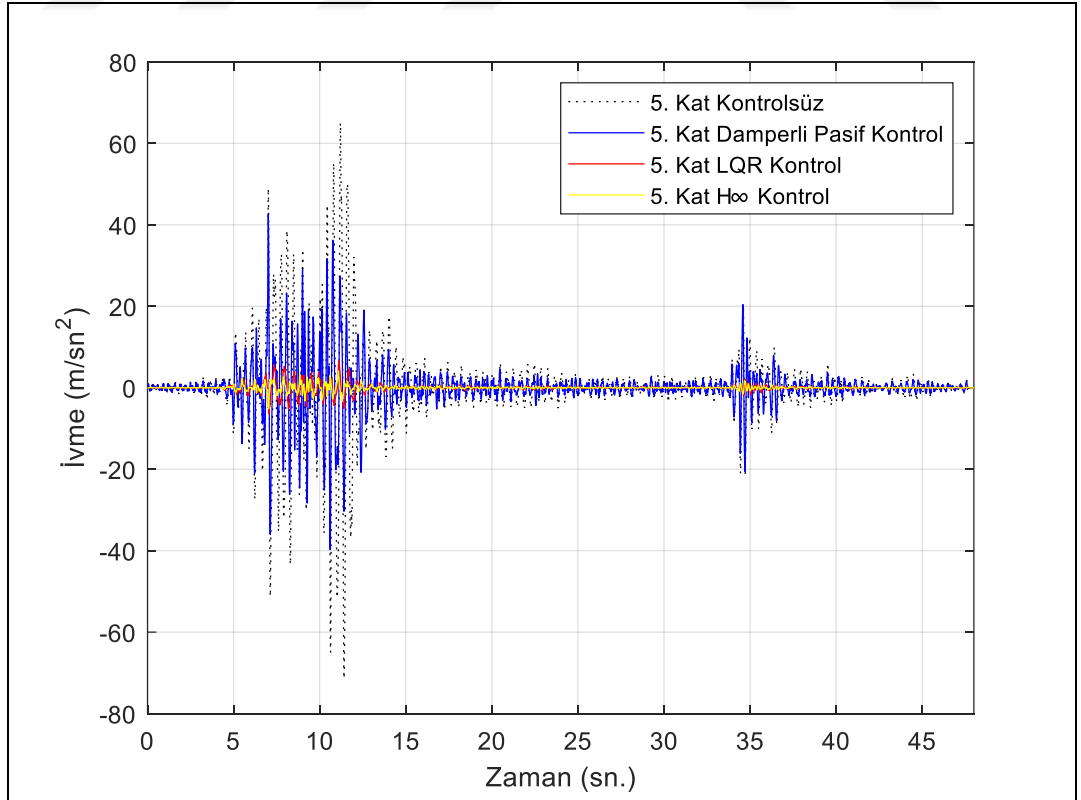
Şekil 4.16. Deprem Etkisi Altında 2. Kat İvme Tepkileri



Şekil 4.17. Deprem Etkisi Altında 3. Kat İvme Tepkileri

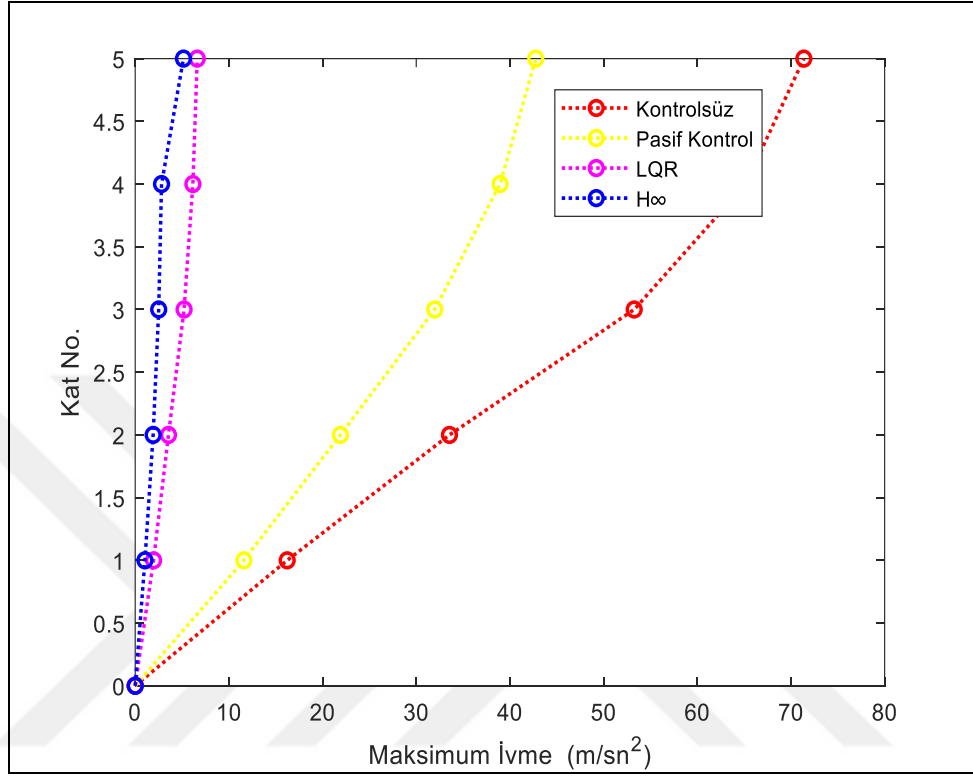


Şekil 4.18. Deprem Etkisi Altında 4. Kat İvme Tepkileri

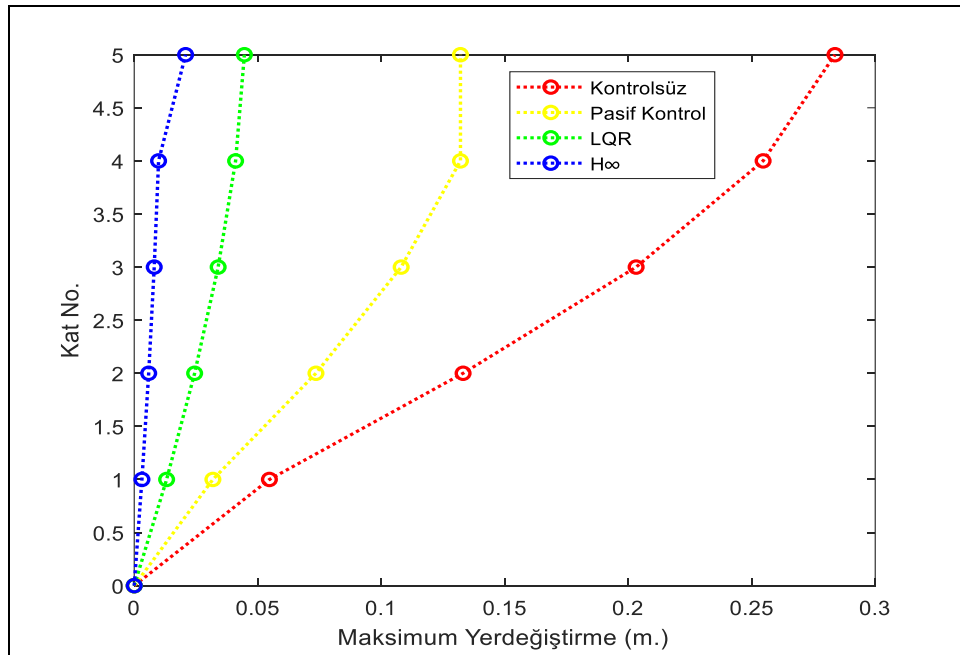


Şekil 4.19. Deprem Etkisi Altında 5. Kat İvme Tepkileri

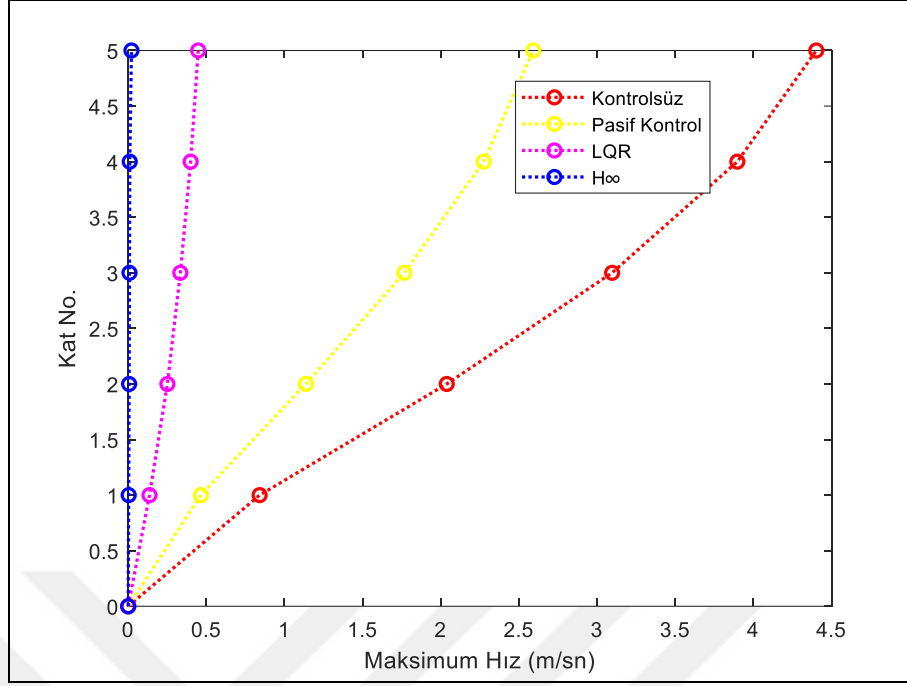
Şekil 4.5-4.19 arasında çok serbestlik dereceli sistemin yerdeğiştirme, hız ve ivme grafikleri verilmiştir. Yapıdaki titreşimin pasif ve aktif kontrollü durumlar için sönümlendiği izlenen grafiklerde görülmektedir.



Şekil 4.20. Deprem Etkisi Altında Maksimum İvme Tepkileri



Şekil 4.21. Deprem Etkisi Altında Kat Maksimum Yerdeğiştirme Tepkileri

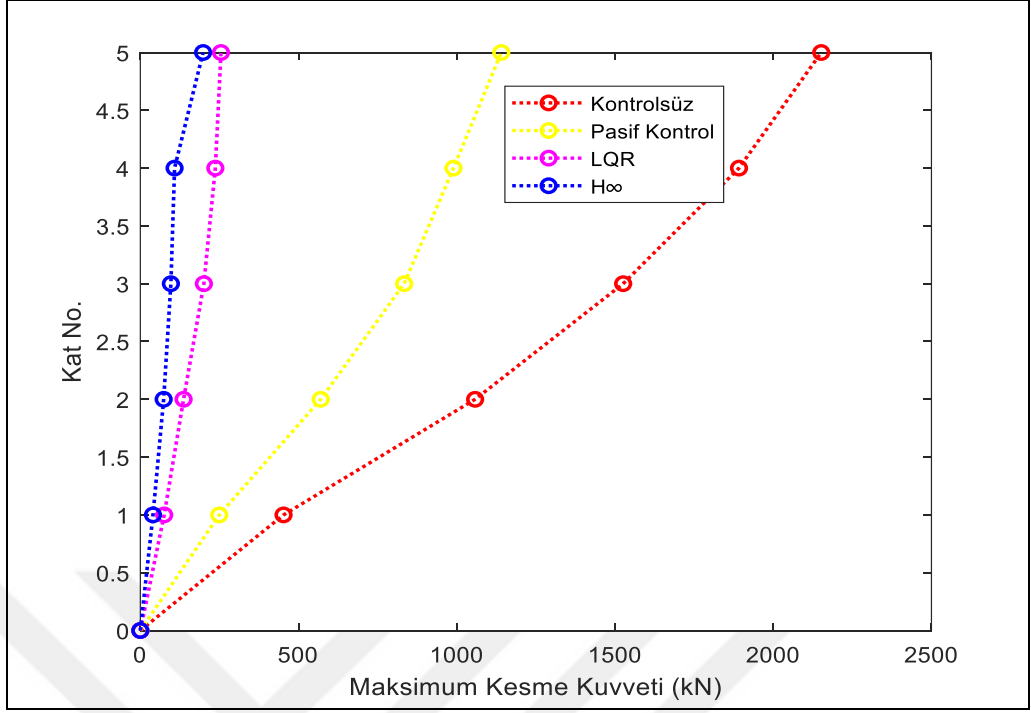


Şekil 4.22. Deprem Etkisi Altında Kat İvme Tepkileri

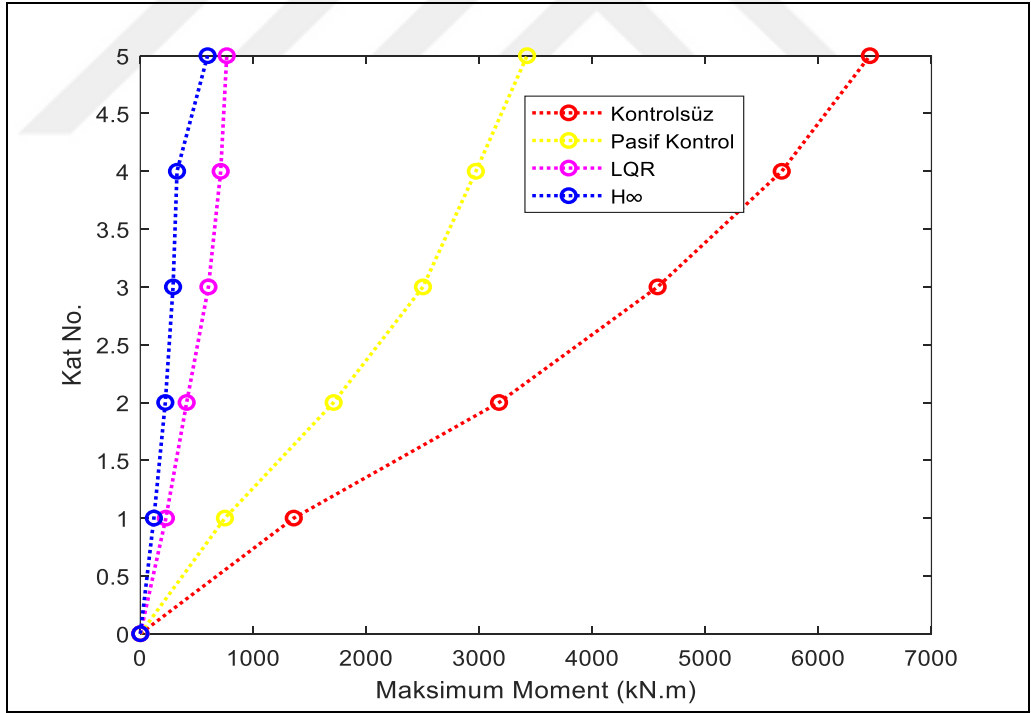
Deprem etkisinde yapılan analiz ve simülasyon çalışması sonucunda Şekil 4.20-4.21 arasında yapı kat seviyelerindeki maksimum yerdeğiştirme, hız ve ivme değerleri verilmiştir. Kat seviyesindeki maksimum tepkiler incelendiğinde sönümün kontrollü sistemler için etkin olduğunu görülmektedir. Yapının maksimum tepkileri olan 5. kattan alınan verilere göre yapının kontrolsüz durumda ve kontrollü durum için karşılaştırıldığında aktif kontrolün sonuçlarının pasif kontrollü duruma göre oldukça iyi davranış göstermektedir.

#### 4.3.2. Eleman iç kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Uygulanan kontrollü ve kontrolsüz simülasyonlarda değişik kat seviyelerinde kinematik parametreler olan yer değiştirme, hız ve ivme zaman geçmişlerinin yanı sıra kuvvet temelli değişkenlerde izlenmiştir. Aks CC boyunca yükselen orta kolon eleman için, Şekil 4.23'de kat seviyelerinde oluşan kesme kuvveti değişimleri, Şekil 4.24'te ise kat seviyelerinde oluşan eğilme momenti değişimleri gösterilmektedir. Genel eğilim olarak kinematik parametrelerde izlenen genlik azalmalarına yakın iç kuvvet azalmaları önemli oranda sönümün kontrollü sistemler altında baskın olarak gözlenmiştir. En güçlü şekliyle H $\infty$  kontrol ile sönümün doruk yaptığı grafiklerden izlenmektedir.



Şekil 4.23. Deprem etkisinde kat seviyesinde kesme kuvveti değişimleri



Şekil 4.24. Deprem etkisinde kat seviyesinde moment kuvveti değişimleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında deprem etkisi altındaki çok serbestlik dereceli yapılar, pasif ve aktif kontrol yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Geleneksel yapı tasarımına alternatif olarak yapıda dış kuvvetlerden oluşacak titreşimleri azaltmak amacıyla ilave ekipmanlar kullanılabilir. Son otuz yılda inşaat mühendisliği alanında aktif, pasif ve diğer kontrol sistemleri önemli araştırmalara konu olmuştur. Yapı kontrolünün amacı sensörlerin yapının tepkilerini gerçek zamanlı ölçtüğü ve aktüatörler veya sönümleme cihazlarıyla yapının tepkisini en aza indirmek için gerekli kuvvetlerin uyguladığı sensörler ve aktüatörlerle donatılmış akıllı yapılar geliştirmektir.

Çalışma kapsamında beş katlı betonarme bir yapının dinamik yükler altındaki davranışı pasif ve aktif kontrol sistemleri kullanılarak belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapı kontrolü için pasif kontrolde viskoz sönümleyici kullanılmış olup, aktif kontrol için LQR ve  $H^\infty$  yöntemleri kullanılmıştır. Kocaeli-1999 (Gebze-TUBİTAK) deprem kaydı altında yapı davranış simülasyon çalışmalarında, yapıda aktif kontrolün pasif kontrole göre kat tepkilerinde ve iç kuvvet değerlerinde önemli ölçüde azalma olmuştur. Maksimum kat yerdeğiştirme tepkilerinde damperli durum için %40, Lqr kontrolcü %72,  $H^\infty$  kontrolcüde %85 oranında azalma olmuştur. Elde edilen bu sonuç ötelenmelerin fazla olduğu ve düzensizliklerin olduğu yapılarda pasif ve aktif kontrol sistemlerinin kullanılmasının yapının davranışını iyileştireceğini göstermiştir. Aktif kontrolde  $H^\infty$  daha etkili olmuştur. LQR kontrolcü için kontrolün optimum olması açısından Q ve R ağırlık matrislerinin seçimi konusunda günümüzde çalışmalar sürmektedir.

Şiddetli depremlerde yapının aktif kontrol edildiği durumda kullanılacak olan enerji miktarının fazla olması aktif ve pasif kontrol sistemlerinin bir araya gelmesiyle oluşan karma kontrol sistemlerinin kullanılması aktif kontrol sistemlerinin bu sorunun çözülmesinde umut vericidir.

İnşaat mühendisliği yapılarının matematiksel modellemesinde fiziksel gerçek model parametrelerinde daima yakınsama vardır. Bu yüzden inşaat mühendisliği yapılarının kontrolünde gürbüz kontrol yöntemleri tercih edilmelidir.

Yapı kontrol sistemleri, hem yeni yapılacak yapılarda hem de mevcut yapıların veya hasarlı yapıların güçlendirilmeleri için de kullanılabilir. Yapı kontrol sistemlerinin deprem kuvvetine karşı yapıda kullanılmasıyla yapı tepkileri ve iç kuvvet değerlerinde önemli ölçüde azalma olmuştur. Gelişen teknolojiyle beraber hem can güvenliği sağlanması hem de yapının zarar görmeden ayakta kalması sebebiyle kontrol sistemlerinin kullanılması, depreme dayanıklı yapı tasarımında en etkili yollardan biridir.



## KAYNAKLAR

- [1] Batı M., Beyen K., 8 Katlı Yapının Dinamik Yükler Altında Titreşim Kontrolü, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Kocaeli, 2020.
- [2] Connor, J. J., *Introduction to Structural Motion Control*, Prentice Hall Upper Saddle River, NJ., 2003.
- [3] Ormondroyd, J., and Den Hartog, J. P., The Theory of Dynamic Vibration Absorber, *ASME J. Appl. Mech.*, 1928, **50**(7), 9-22.
- [4] "Hancock Tower Now to Get Dampers," *Engineering News Record*, 1975, Oct. 30, 11.
- [5] "Tuned Mass Dampers Steady Sway of Sky Scrapers in Wind.", *Engineering News Record*, 1977, Aug. 18, 28-29.
- [6] Webster A. C. and Vaicaitis R., Application of Tuned Mass Dampers to Control Vibrations of Composite Floor Systems, *Engineering 1.*, AISC, 1992, **29**(3), 116-124.
- [7] Bauer, H.F., Oscillations of Inviscid Liquids in A Rectangular Container: A New Damper for Excitated Structures, *Journal of Sound and Vibration*, 1984, **93**(1), 117.
- [8] Pall, A.S. and Marsh, C., Response of Friction Damped Braced Frames, *ASCE Journal of Structural Division*, 1982, **108**(9), 1313.
- [9] Pall, A. et al., Friction Dampers for Seismic Control of Canadian Space Agency Headquarters, *Earthquake Spectra*, 1993, **9**(3), 547.
- [10] Constantinou, M.C. and M.D. Symans, Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers, *NCEER Technical Report*, No.92-0032, 1992.
- [11] Makris, N. and M.C. Constantinou, Viscous Dampers: Testing, Modeling and Application in Vibration and Seismic Isolation, *NCEER Technical Report*, No. 90-0028, 1990.
- [12] Wu, J.C., Chih, H.H. & Chen, C.H., A Robust Control Method for Seismic Protection of Civil Frame Building, *Journal of Sound and Vibration*, 2006, **294**(1-2), 314-328.

- [13] Bueno, D. D., Marqui, C. R., Santos, R. B., Neto, C. M. & Lopes, Experimental Active Vibration Control in Truss Structures Considering Uncertainties in System Parameters, *Mathematical Problems in Engineering*, 2008, 1-15.
- [14] Park, W., Park, K.-S. & Koh, H.M., Active Control of Large Structures Using a Bilinear Pole-Shifting Transform with Control Method, *Engineering Structures*, 2008, **30**(11), 3336-3344.
- [15] Venanzi, I., Ubertini, F. & Materazzi, A. L., Optimal Design of an Array of Active Tuned Mass Dampers for Wind-Exposed High-Rise Buildings, *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, **20**(6), 903-917.
- [16] Choi, K.M., Cho, S.W., Kim, D.O. & Lee, I.W., Active Control for Seismic Response Reduction Using Modal-Fuzzy Approach, *International Journal of Solids and Structures*, 2005, **42**(16-17), 4779-4794.
- [17] Ikeda, Y., Sasaki, K., Sakamoto, M. & Kobori, T., Active Mass Driver System as The First Application of Active Structural Control, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2001, **30**(11), 1575-1595.
- [18] Ricciardelli, F., Pizzimenti, A. D. & Mattei, M., Passive and Active Mass Damper Control of The Response of Tall Buildings to Wind Gustiness, *Engineering Structures*, 2003, **25**(9), 1199-1209.
- [19] Chu, S.Y., Soong, T. & Reinhorn, A., Real-Time Active Control Verification via a Structural Simulator, *Engineering Structures*, 2002, **24**(3), 343-353.
- [20] Soong, T. T., *Active Structural Control: Theory and Practice*, 2nd ed., John Wiley, 1990.
- [21] Miller, R.K. et al., Active Vibration Control of Large Civil Structures, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 1988, **114**(9), 1542.
- [22] Yang, J. N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P., New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of Engineering Mechanics Division*, 1987, **113**(9), 1369-1386.
- [23] Wang, S.G., Linear Quadratic Gaussian-Alpha Control with Relative Stability and Gain Parameter for The Structural Benchmark Problems, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 511-517.
- [24] Sadek, F. & Mohraz, B., Semiactive Control Algorithms for Structures with Variable Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(9), 981-990.
- [25] Chen, J.P., Webster, R. S., Hathaway, M. D., Herrick, G. P. & Skoch, G. J., High Performance Computing of Compressor Rotating Stall and Stall Control, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2009, **16**(1), 75-89.

- [26] Shih, M.C. & Wang, T.Y., Active Control of Electro-Rheological Fluid Embedded Pneumatic Vibration Isolator, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2008, **15**(3), 267-276.
- [27] Zemalache, K. M., Beji, L. & Maaref, H., Two Inertial Models of X4-Flyers Dynamics Motion Planning and Control, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2007, **14**(2), 107-119.
- [28] Huang, P. & Xu, Y., SVM-Based Learning Control of Space Robots in Capturing Operation, *International Journal of Neural Systems*, 2007, **17**(6), 467-477.
- [29] Hentschel, M., Wulf, O. & Wagner, B., A Hybrid Feedback Controller for Car-Like Robots-Combining Reactive Obstacle Avoidance and Global Replanning, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2007, **14**(1), 3-14.
- [30] Adeli, H., Control, Optimization, and Smart Structures: High-Performance Bridges and Buildings of The Future, *John Wiley & Sons, Inc.* 1999.
- [31] Duan, Y., Ni, Y. & Ko, J., State-Derivative Feedback Control of Cable Vibration Using Semiactive Magnetorheological Dampers, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2005, **20**(6), 431-449.
- [32] Djajakesukma, S., Samali, B. & Nguyen, H., Study of A Semi-Active Stiffness Damper Under Various Earthquake Inputs, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002, **31**(10), 1757-1776.
- [33] Ma, T.W. & Yang, H. T., Adaptive Feedback-Feedforward Control of Building Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(7), 786-793.
- [34] Guoping, C. & Jinzhi, H., Optimal Control Method for Seismically Excited Building Structures with Time-Delay in Control, *Journal of Engineering Mechanics*, 2002, **128**(6), 602-612.
- [35] Aldemir, U., Evaluation of Disturbance Weighting Parameter of Minimax Attenuation Problems, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, **24**(4), 302-308.
- [36] Sadek, F. & Mohraz, B., Semiactive Control Algorithms for Structures with Variable Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(9), 981-990.
- [37] Alavinasab, A., Moharrami, H. & Khajepour, A., Active Control of Structures Using Energy-Based LQR Method, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2006, **21**(8), 605-611.
- [38] Fisco, N. & Adeli, H., Smart Structures: Part II—Hybrid Control Systems and Control Strategies, *Scientia Iranica*, 2011, **18**(3), 285-295.

- [39] Lu, L.T., Chiang, W.L. & Tang, J.P., LQG/LTR Control Methodology in Active Structural Control, *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(4), 446-454.
- [40] Wang, S.G., Linear Quadratic Gaussian-Alpha Control with Relative Stability and Gain Parameter for The Structural Benchmark Problems, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 511-517.
- [41] Sirca Jr, G. F. & Adeli, H., Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges, *Journal of Structural Engineering*, 2005, **131**(3), 380-388.
- [42] Ghosh-Dastidar, S. & Adeli, H., Improved Spiking Neural Networks for EEG Classification and Epilepsy and Seizure Detection, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2007, **14**(3), 187-212.
- [43] Adeli, H. & Panakkat, A., A Probabilistic Neural Network for Earthquake Magnitude Prediction, *Neural Networks*, 2009, **22**(7), 1018-1024.
- [44] Patrinos, P., Alexandridis, A., Ninos, K. & Sarimveis, H., Variable Selection in Nonlinear Modeling Based on RBF Networks and Evolutionary Computation, *International Journal of Neural Systems*, 2010, **20**(5), 365-379.
- [45] Ghaboussi, J. & Joghataie, A., Active Control of Structures Using Neural Networks, *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, **121**(4), 555-567.
- [46] Bani-Hani, K. & Ghaboussi, J., Nonlinear Structural Control Using Neural Networks, *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, **124**(3), 319-327.
- [47] Hung, S.L., Kao, C. & Lee, J., Active Pulse Structural Control Using Artificial Neural Networks, *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, **126**(8), 839-849.
- [48] Brown, A. S. & Yang, H. T., Neural Networks for Multiobjective Adaptive Structural Control, *Journal of Structural Engineering*, 2001, **127**(2), 203-210.
- [49] Yu, W. & Li, X., Automated Nonlinear System Modeling with Multiple Fuzzy Neural Networks and Kernel Smoothing, *International Journal of Neural Systems*, 2010, **20**(5), 429-435.
- [50] Sanourin, C., Madani, K. & Bruneau, O., Autonomous Biped Gait Pattern Based on Fuzzy-CMAC Neural Networks, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2007, **14**(2), 173-186.
- [51] Jin, X. H. & Doloi, H., Modeling Risk Allocation in Privately Financed Infrastructure Projects Using Fuzzy Logic, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, **24**(7), 509-524.
- [52] Zhou, L., Chang, C.C. & Wang, L.X., Adaptive Fuzzy Control for Nonlinear Building-Magnetorheological Damper System, *Journal of Structural Engineering*, 2003, **129**(7), 905-913.

- [53] Al-Dawod, M., Samali, B., Kwok, K. & Naghdy, F., Fuzzy Controller for Seismically Excited Nonlinear Buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 407-415.
- [54] Adeli, H. & Cheng, N.-T., Augmented Lagrangian Genetic Algorithm for Structural Optimization, *Journal of Aerospace Engineering*, 1994, **7**(1), 104-118.
- [55] Adeli, H. & Cheng, N.T., Concurrent Genetic Algorithms for Optimization of Large Structures, *Journal of Aerospace Engineering*, 1994, **7**(3), 276-296.
- [56] Adeli, H. & Kumar, S., Concurrent Structural Optimization on Massively Parallel Supercomputer, *Journal of Structural Engineering*, 1995, **121**(11), 1588-1597.
- [57] Adeli, H. & Kumar, S., Distributed Genetic Algorithm for Structural Optimization, *Journal of Aerospace Engineering*, 1995, **8**(3), 156-163.
- [58] Kim, H. & Adeli, H., Discrete Cost Optimization of Composite Floors Using a Floating-Point Genetic Algorithm, *Engineering Optimization*, 2001, **33**(4), 485-501.
- [59] Ahlawat, A. & Ramaswamy, A., Multiobjective Optimal Fuzzy Logic Control System for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 524-530.
- [60] Ahlawat, A. & Ramaswamy, A., Multiobjective Optimal Fuzzy Logic Controller Driven Active and Hybrid Control Systems for Seismically Excited Nonlinear Buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 416-423.
- [61] Solea, R. & Nunes, U., Trajectory Planning and Sliding-Mode Control Based Trajectory-Tracking for Cybercars, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2007, **14**(1), 33-47.
- [62] Wu, J.C., Experiments on a Full-Scale Building Model Using Modified Sliding Mode Control, *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, **129**(4), 363-372.
- [63] Wu, J.C. & Yang, J. N., Modified Sliding Mode Control for Wind-Excited Benchmark Problem, *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, **130**(4), 499-504.
- [64] Zhou, Z. & Adeli, H., Time-Frequency Signal Analysis of Earthquake Records Using Mexican Hat Wavelets, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2003, **18**(5), 379-389.
- [65] Jiang, X. & Adeli, H., Pseudospectra, Music, and Dynamic Wavelet Neural Network for Damage Detection of Highrise Buildings, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2007, **71**(5), 606-629.

- [66] Umesha, P., Ravichandran, R. & Sivasubramanian, K., Crack Detection and Quantification in Beams Using Wavelets, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, **24**(8), 593-607.
- [67] Kemal Beyen, Structural Identification for Post-Earthquake Safety Analysis of The Fatih Mosque After The 17 August 1999 Kocaeli earthquake, *Engineering Structures*, 2008, **30**(8), 2165–2184.
- [68] Ghosh, B., Basu, B. & O’Mahony, M., Random Process Model for Urban Traffic Flow Using a Wavelet-Bayesian Hierarchical Technique, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, **25**(8), 613-624.
- [69] Samant, A. & Adeli, H., Feature Extraction for Traffic Incident Detection Using Wavelet Transform and Linear Discriminant Analysis, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2000, **15**(4), 241-250.
- [70] He, Z., You, X., Zhou, L., Cheung, Y. & Du, J., Writer Identification Using Fractal Dimension of Wavelet Subbands in Gabor Domain, *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2010, **17**(2), 157-165.
- [71] Adeli, H. & Kim, H., Wavelet-Hybrid Feedback-Least Mean Square Algorithm for Robust Control of Structures, *Journal of Structural Engineering*, 2004, **130**(1), 128-137.
- [72] Kim, H. & Adeli, H., Wavelet-Hybrid Feedback Linear Mean Squared Algorithm for Robust Control of Cable-Stayed Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 2005, **10**(2), 116-123.
- [73] Jiang, X. & Adeli, H., Dynamic Fuzzy Wavelet Neuroemulator for Non-Linear Control of Irregular Building Structures, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2008, **74**(7), 1045-1066.
- [74] Ogata, K., *Modern Control Engineering*. Fifth Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2010.
- [75] Dorf, R.C., and Bishop, R. H., *Modern Control Systems*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 2008.
- [76] Dorf, R.C., and Kusiak, A., *Handbook of Manufacturing and Automation*, John Wiley & Sons, New York, New York, USA, 1994.
- [77] Li, Z., and Adeli, H., New Discrete-Time Robust H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> Algorithm for Vibration Control of Smart 10 Structures Using Linear Matrix Inequalities, *Engineering 11 Applications of Artificial Intelligence*, 2016, **55**(2016), 47-57.
- [78] Atam, E., Passive and Active Control of Seismically Excited Buildings, Master Thesis, Boğaziçi University, Institute of Science, İstanbul, 2002, 170860.
- [79] Gözükızıl, B.B., Deprem Etkisi Altındaki Yapıların Aktif Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000,101192.

- [80] Struwe M., *Variational Methods: Applications to Nonlinear Partial Differential Equations and Hamiltonian Systems*, 4th ed., Springer, Berlin, 2008.
- [81] Yang JN., Akbarpour A, Ghaemmaghami P., New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *J EngMech*, 1987, **113**(9), 1369-1386.
- [82] Yang JN., Akbarpour A, Ghaemmaghami P., Optimal Control Algorithms for Earthquake-Excited Building, *Proceedings of the Second International Symposium on Structural Control*, Ontario, Canada, July 15-17, 1985
- [83] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı*, Ankara, 2018.
- [84] Yang, Y.B. and Huang, W.H., Equipment Structure Interaction Considering the Effect of Torsion and Base Isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, **27**(2), 155-171.
- [85] Goel, R. K., Effect Supplementing Viscous Damping on Seismic Response of Asymmetric-Plan Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, **27**(2), 125-141.
- [86] Jangid, R. S. and Datta, T. K., Performance of Multiple Tuned Mass Dampers for Torsionally Coupled System, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, **26**(3), 307-317.
- [87] Lin, W. H., and Chopra, A. K., Asymmetric One-Story Elastic System with Non-Linear Viscous and Viscoelastic Dampers Earthquake Response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, **32**(4), 555-577.
- [88] Kemal Beyen, Hanging Wall and Footwall Effects in he Largest Reverse-Slip Earthquake of Turkey, October 23, 2011, M W 7.2 Van Earthquake, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, **44**(5), .4757-4781.
- [89] Kemal Beyen, Mustafa Erdik, Two Dimensional Nonlinear Site Response Analysis of Adapazari Plain and Predictions Inferered from Aftershocks of The Kocaeli Earthquake, 17 August 1999, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2004, **24**(3), 261–279.
- [90] Kemal Beyen, Gülüm Tanırcan, Strong Ground Motion Characteristics of The 2011 Van Earthquake of Turkey: Implications of Seismological Aspects on Engineering Parameters, *Earthquakes and Structures*, 2015, **8**(6), 1363-1386.
- [91] MATLAB, *Release 2016a*, The MathWorks Inc., Natick, USA, 2016.



## Ek-A

Bu kısımda yapı kontrolü için kullanılan matlab kodları verilmiştir.

% Beş katlı yapı için LQR Kontrol ve  $H^\infty$  Kontrolcü

%% Mürüvvet Batı KOU-2020 %%

```
m = [m1 m2 m3 m4 m5];
```

```
M =diag(m); % Kütle Matrisi
```

```
kn=[k1 k2 k3 k4 k5];
```

```
nkat=length(m);
```

```
kn (nkat+1)=0;
```

```
Kn=diag(kn1(1:nkat))+diag(kn1(2:end))+diag(-1*kn1(2:nkat),1)+diag(-1*kn1(2:nkat),-1);
```

```
% Rijitlik Matrisi
```

```
% Yapının sönüm matrisi için Rayleigh Sömümü Kullanılmıştır.
```

```
w=sort(sqrt(eig(M\Kn))); w1=w(1); w2=w(2); w3=w(3);
```

```
syms aa0 aa1
```

```
W=[1/w1 w1; 1/w2 w2];
```

```
zeta = 2*[0.05;0.05];
```

```
[aa0,aa1]=solve(W*[aa0;aa1]==zeta); aa0=sym2poly(aa0); aa1=sym2poly(aa1);
```

```
Cn = (aa0*M + aa1*Kn); %Sönüm Matrisi
```

```
% Durum Uzay Matrislerinin Oluşturulması
```

```
A11=[zeros(5,5) eye(5,5); -(inv(M))*Kn -(inv(M))*Cn];
```

```

B11 = [zeros(length(M)); (inv(M))*H] ;

CC1 = [eye(10)];

DD1 = [zeros(length(M));

zeros(length(M))];

%%%%%% %% LQR Design %%%%%%%%%

Cm=[zeros(5,5) zeros(5,5);zeros(5,5) eye(5,5)];

C1=eye(2*length(M)); % yerdeğiştirme ve hız değerlerinin alınması

q=1e2;

r=1e-3;

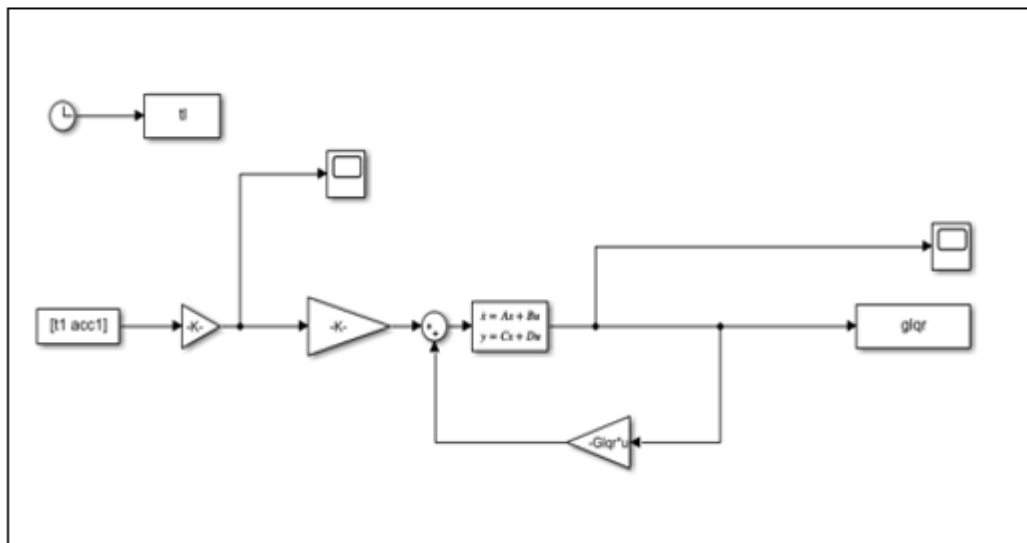
Q= q*(Cm')*Cm;

R= r*eye(size(M));

Glqr=lqr(A11,B11,Q,R); % Kontrol Kazancı

Ac= A11-B11*Glqr;

```



Şekil A.1. Matlab Simulink LQR Kontrol Şeması

%  $H^\infty$  Kontrolcü

%Yapıdaki sönüm ve rijitlik değerleri için belirsizliklerin tanımı

c1= ureal('c1',c,'Percent',10);

c2= ureal('c2',c,'Percent',10);

c3= ureal('c3',c,'Percent',10);

c4= ureal('c4',c,'Percent',10);

c5= ureal('c5',c,'Percent',10);

k1 = ureal('k1',k,'Percent',10);

k2 = ureal('k2',k,'Percent',10);

k3= ureal('k4',k,'Percent',10);

k4= ureal('k4',k,'Percent',10);

k5 = ureal('k5',k,'Percent',10);

c=[c1 c2 c3 c4 c5];

k=[k1 k2 k3 k4 k5];

k(nkat+1)=0;

c(nkat+1)=0;

Ks=diag(k(1:nkat))+diag(k(2:end))+diag(-1\*k(2:nkat),1)+diag(-1\*k(2:nkat),-1);

Cd=diag(c(1:nkat))+diag(c(2:end))+diag(-1\*c(2:nkat),1)+diag(-1\*c(2:nkat),-1);

%% Sistem Matrislerinin Oluşturulması  $H^\infty$  Kontrolcü

```

A=[zeros(5 ,5) eye(5,5);

    -(inv(M))*Ks -(inv(M))*Cd];

H=[-1 1 0 0 0;

    0 -1 1 0 0;

    0 0 -1 1 0;

    0 0 0 -1 1;

    0 0 0 0 -1];

%
B = [zeros(length(M)); (inv(M)*H)] ; % B for controlled case

Bu=[zeros(5,5); eye(5)]; % B for uncontrolled

%

CC = [eye(10)];

DD = [zeros(length(M));

    zeros(length(M))] ;

Gunc1=ss(A11,Bu,CC,DD);

Gunc=ss(A,B,CC,DD);

Wunmod=eye(1)*0.1;

Gunc = Gunc *(eye(5)+ultidyn('Delta',[5 5]));

Delta=ultidyn('Delta',[5 5]);

%%

Gunc =

```

Uncertain continuous-time state-space model with 10 outputs, 5 inputs, 10 states.

The model uncertainty consists of the following blocks:

Delta: Uncertain 5x5 LTI, peak gain = 1, 1 occurrences

c: Uncertain real, nominal = 2.88e+04, variability = [-10,10]%, 5 occurrences

k: Uncertain real, nominal = 5.95e+05, variability = [-10,10]%, 5 occurrences

%Ağırlık matrisleri

```
Wu=9*10^-9*eye(5);
```

```
Wn=8*10^-12*eye(10);
```

```
[A1, B1, C1, D1]=linmod('Simu5');
```

```
P=ss(A1, B1, C1, D1);
```

## Ek-B

Bu kısımda yapı kotrolü için kullanılan kontrol algoritmalarıyla elde edilen kontrolcüler verilmiştir.

Tablo B.1. LQR kontrol kazancı

0	0	0	0	0	23.4902	14.2128	8.7148	5.6736	4.3266
0	0	0	0	0	14.2128	32.205	19.8864	13.0414	10.0002
0	0	0	0	0	8.7148	19.8864	36.5316	24.213	18.715
0	0	0	0	0	5.6736	13.0414	24.213	42.2052	32.9278
0	0	0	0	0	4.3266	10.0002	18.715	32.9278	56.418

## Gürbüz kontrol için $H^\infty$ Kontrolcü Durum Uzay Matrisleri

Tablo B.2. A Matrisi

0	0	0	0	0	1	-0,000212	-0,000238	-0,00022	-0,000205
0	0	0	0	0	5,29E-05	1	-0,000103	-0,000145	-0,00016
0	0	0	0	0	5,95E-05	0,000103	1	-6,34E-05	-9,28E-05
0	0	0	0	0	5,51E-05	0,000145	6,33E-05	1	-3,36E-05
0	0	0	0	0	5,11E-05	0,00016	9,28E-05	3,36E-05	1
-3089	1544	1,21E-07	1,23E-07	1,21E-07	-150,7	74,91	0,07744	0,07397	0,07156
1544	-3089	1544	8,26E-08	9,39E-08	74,85	-153,9	74,99	0,1452	0,1394
-1,19E-07	1544	-3089	1544	-3089	0,01936	74,99	-153,8	75,06	0,2154
-1,21E-07	-8,05E-08	1544	-3089	1544	0,01849	0,1452	75,06	-153,7	75,13
-1,19E-07	-9,18E-08	-5,32E-08	1544	-1544	0,01789	0,1394	0,2154	75,13	-78,79

Tablo B.3. B Matrisi

1.20E-07	0.001058	0.00119	0.0011	0.00102
-0.0002643	1.71E-07	5.13E-04	0.00073	0.0008
-0.0002975	-0.0005131	9.33E-08	0.00032	0.00046
-0.0002754	-0.0007265	-0.0003166	9.60E-08	0.00017
-0.0002557	-0.0007987	-0.000464	-0.00017	1.14E-07
5.386	-0.3854	-0.3699	-0.3699	-0.3578
-0.09635	20.95	-0.7834	-0.7258	-0.6969
-0.0968	-0.7834	20.59	-1.13	-1.077
-0.09247	-0.7258	-1.13	20.23	-1.518
-0.08945	-0.6969	-1.077	-1.518	19.78

Tablo B.4. C Matrisi

-0.01509	-0.01509	-0.01509	-0.01509	-0.01511	-0.01813	-0.01509	-0.01509	-0.01509	-0.01509
-0.0603	-0.0603	-0.0603	-0.06031	-0.01813	-0.01509	-0.01509	-0.01509	-0.01509	-0.01509
-0.06019	-0.06018	-0.06017	-0.06031	-0.06018	-0.05985	-0.06018	-0.06019	-0.07232	-0.06019
-0.06014	-0.06013	-0.06011	-0.06014	-0.0608	-0.06011	-0.06009	-0.06014	-0.07227	-0.06011
-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-3.863	-4.64

Tablo B.5. D Matrisi

0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Batı M.**, Beyen K., 8 Katlı Yapının Dinamik Yükler Altında Titreşim Kontrolü, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Kocaeli, 2020.



## ÖZGEÇMİŞ

Mürüvvet BATI ilköğretimini G.O.P. ilköğretim okulunda tamamladı. Lise eğitimini Yalova Atatürk Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği'ni kazandı. Radikal bir kararla 2014 yılında yine Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ne geçiş yaptı ve 2016 yılında mezun oldu. Lisans eğitiminin ardından Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünden yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

