

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPISAL KONTROL ALTINDA
YAPIYA GİREN ENERJİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Arcan YANIK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPISAL KONTROL ALTINDA
YAPIYA GİREN ENERJİNİN İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Arcan YANIK
(501082002)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet BAKİOĞLU
Eş Danışmanı: Prof. Dr. Ünal ALDEMİR**

EYLÜL 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501082002 numaralı Doktora Öğrencisi **Arcan YANIK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YAPISAL KONTROL ALTINDA YAPIYA GİREN ENERJİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mehmet BAKİOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman **: Prof.Dr. Ünal ALDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Abdul HAYIR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdullah GEDİKLİ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof.Dr. İrfan COŞKUN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi

Doç. Dr. Deniz GÜNEY
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **24 Temmuz 2014**
Savunma Tarihi : **10 Eylül 2014**

AILEME,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması kapsamında öncelikle değerli danışman hocalarım Prof. Dr. Mehmet Bakioğlu ve Prof. Dr. Ünal Aldemir'e teşekkür ederim. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümündeki araştırma görevliliğim esnasında ve diğer bir çok konuda bana çok iyi davranan ve sonsuz anlayış gösteren danışman hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Tez izleme komitemde olup bana değerli görüşleri ile yardımcı olan hocalarım Prof.Dr. Abdul Hayır, Doç. Dr. Cenk Alhan ve Doç.Dr. Deniz Güney'e teşekkür ederim.

Bu tez esnasında hem proje bazında tezimi destekleyen (Proje No:108M496) , hem de Florida Institute of Technology/ABD'de deki araştırmalarım bir senelik destek sağlayan TÜBİTAK kurumuna en içten teşekkürlerimi bildiririm.

Proje bazında tezime katkı sağlayan İstanbul Teknik Üniversitesi Bap birimi'ne (Proje No:34224) teşekkürlerimi sunarım.

Tezime olan katkısı nedeni ile Florida Institute of Technology üniversitesindeki hocam Prof. Dr. Jean-Paul Pinelli'ye de teşekkürü borç bilirim.

İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi , İnşaat Mühendisliği bölümündeki araştırma görevliliği görevim boyunca beraber çalıştığım hocalarım ve asistan arkadaşlarıma da iyi niyetleri ve anlayışları için teşekkür ederim.

Son olarak bana eğitim hayatım süresince desteğini esirgemeyen babam G. Yaşar Yanık, Annem Nilgün Yanık ve ağabeyim işletme mühendisi Arda Yanık'a da teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2014

Arcan YANIK
İnşaat Y. Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Kontrol Sistemleri	3
1.2 Yapısal Kontrol	5
1.2.1 Pasif kontrol	6
1.2.2 Aktif kontrol.....	8
1.2.3 Yarı Aktif Kontrol.....	9
1.2.4 Hibrid karma kontrol.....	11
1.3 Tezin Amacı	13
1.4 Yapısal Kontrol Alanında Yapılan Çeşitli Çalışmalar	13
2. ÇOK KATLI AKTİF VEYA PASİF KONTROL UYGULANMIŞ YAPILARDA ENERJİ DAĞILIMLARI.....	21
2.1 Hareket Denklemine Formülasyonu	21
2.1.1 Doğrusal hal	24
2.1.2 İkinci mertebeden hareket denkleminin birinci mertebeden denkleme indirgenmesi.....	26
2.2 Kontrol Algoritması	27
2.2.1 Klasik doğrusal optimal kontrol algoritması.....	27
2.2.1.1 Kapalı çevrim.....	28
2.2.1.2 Kapalı-Açık çevrim ve açık çevrim:	29
2.2.2 Ani doğrusal optimal kontrol algoritması	30
2.3 Enerji Bağıntıları	32
2.3.1 Mutlak hız	35
2.4 Veri Depremi.....	38
3. AKTİF VE/VEYA PASİF KONTROL UYGULANMIŞ ÇOK KATLI KAYMA BİNALARINDA ENERJİ DAĞILIMLARI	39
3.1 Sayısal Örnekler	44
3.1.1 Histeretik eğriler (deplasman-kuvvet eğrileri).....	46
3.1.2 Yapıda rölatif enerji dağılımları.....	52
3.1.3 Yapıda mutlak enerji dağılımları	57
3.1.4 Şekil değiştirme enerjisinin katlara ve kontrol elemanlarına göre dağılımı	60
4. DEPREM ETKİSİNDEKİ YAPILARIN KONTROLU İÇİN İKİ YENİ YAKLAŞIM.....	61

4.1 Giriş	61
4.2 Klasik Doğrusal Optimal Kontrol Algoritması	61
4.3 Önerilen Kontrol Metodları	64
4.3.1 Pasif Yaklaşım.....	65
4.3.2 Aktif Kontrol Yaklaşımı.....	66
4.4 Sayısal Örnek.....	69
4.4.1 Örnek yapı I.....	71
4.4.2 Örnek yapı II	73
5. ÜÇ BOYUTLU YAPILARIN AKTİF KONTROLU.....	87
5.1 Üç Boyutlu Kayma Binaları	87
5.2 Üç Boyutlu Kayma Binalarının Aktif Kontrolü	92
5.3 İki Eksenli Deprem Etkisindeki Üç Boyutlu Kayma Binalarının Aktif Kontrolü	92
5.4 Üç Boyutlu Kayma Binalarının Klasik Doğrusal Optimal Kontrolü	94
5.5 Üç Boyutlu Kayma Binaları için Önerilen Aktif Kontrol Performans İndeksi	95
5.6 Sayısal Örnek.....	97
6. MAGNETO-RHEOLOGİC SÖNÜMLEYİCİLERİN YAPILARDA	
KULLANIMI.....	107
6.1 Magnetorheologic (MR) Sönümleyici Stratejisi	107
6.2 Sayısal Örnek.....	109
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	113
7.1 Yapısal Kontrol Altında Yapıya Giren Enerjinin İncelenmesi ile İlgili Sonuçlar	113
7.2 Önerilen Kontrol Yaklaşımları ile İlgili Sonuçlar	114
7.3 Magneto-rheologic Sönümleyici (MR-MD) Araştırmasından Elde Edilen Sonuçlar.....	115
7.4 Öneriler.....	115
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	125

KISALTMALAR

PC	: Önerilen aktif kontrol algoritması
CLOC	: Klasik doğrusal optimal kontrol algoritması
TMD	: Ayarlı kütle sönümleyici
NC	: Kontrolsüz yapı
MR-MD	: Magneto-rheologic damper
B1	: Üç katlı örnek bina
B2	: Oniki katlı örnek bina
KDO	: Klasik doğrusal optimal kontrol algoritması
SE	: Toplam şekil değiştirme enerjisi
CE	: Kontrol enerjisi
KNSZ	: Kontrolsüz yapı
KE	: Kinetik enerji
özd	: Özdeğer
K1	: Kontrolsüz yapı
K2	: Taban izolasyonlu yapı
K3	: Taban izolasyonlu ve pasif kütle sönümleyicili yapı
K4	: Pasif kütle sönümleyicili yapı
K5	: Aktif kütle sönümleyicili yapı
K6	: Taban izolasyonlu ve aktif kütle sönümleyicili yapı
NS	: Kuzey güney yönü
EW	: Doğu batı yönü
C1	: Üç katlı yapıda birinci pasif yaklaşım
C2	: Üç katlı yapıda ikinci pasif yaklaşım
C3	: Üç katlı yapıda üçüncü pasif yaklaşım
C4	: Üç katlı yapıda dördüncü pasif yaklaşım
C5	: On katlı yapıda birinci pasif yaklaşım
C6	: On katlı yapıda ikinci pasif yaklaşım
C7	: On katlı yapıda üçüncü pasif yaklaşım
C8	: On katlı yapıda dördüncü pasif yaklaşım
maks	: Maksimum
abs	: Mutlak değer
No	: Numara
s	: Saniye
m	: Metre
cm	: Santimetre
CS	: Rijitlik merkezi
CM	: Kütle merkezi
DOF	: Serbestlik derecesi
top	: Üst kat
bot	: Alt kat
kN	: Kilonewton
g	: Yerçekimi ivmesi
PGA	: Depremin maksimum zemin ivmesi

PGV	: Depremin maksimum zemin hızı
PGD	: Depremin maksimum zemin yerdeğiřtirmesi
opt	: Optimal
eig	: Özdeğer
FN	: Depremin normal doğrultudaki bileşeni
FP	: Depremin paralel doğrultudaki bileşeni

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : 12 Katlı yapı (B2) özellikleri.....	46
Çizelge 4.1 : 10 katlı üç tendon kontrol uygulanmış yapıda K_{opt} ve C_{opt}	74
Çizelge 4.2 : 10 katlı 10 tendon kontrol uygulanmış yapıda K_{opt} ve C_{opt}	77
Çizelge 4.3 : 3 katlı yapıda tek tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler.	77
Çizelge 4.4 : 3 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler.....	78
Çizelge 4.5 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler . Veri depremi :Erzincan.	78
Çizelge 4.6 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler . Veri depremi :Northridge.	78
Çizelge 4.7 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler .Veri depremi :Sentetik.	78
Çizelge 4.8 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler. Veri depremi : Erzincan.....	79
Çizelge 4.9 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Erzincan.	79
Çizelge 4.10 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler. Veri depremi : Northridge.	79
Çizelge 4.11 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Northridge.	79
Çizelge 4.12 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler. Veri depremi:Sentetik.....	80
Çizelge 4.13 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Sentetik.	80
Çizelge 4.14 : 3 katlı yapıda tek tendon hali için performans parametreleri.	80
Çizelge 4.15 : 3 katlı yapıda üç tendon hali için performans parametreleri.	81
Çizelge 4.16 : 10 katlı yapıda üç tendon hali için performans parametreleri.	82
Çizelge 4.17 : 10 katlı yapıda on tendon hali için performans parametreleri.....	82
Çizelge 5.1 : Deprem ivmesi parametreleri.	100
Çizelge 5.2 : N sistem matrisinin özdeğerleri.....	101
Çizelge 5.3 : Performans parametreleri.	105
Çizelge 6.1 : Yapı tepkisi azaltım yüzdeleri (%).	112

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Sistem davranışı	4
Şekil 1.2 : Kontrol diyagramı	4
Şekil 1.3 : Kapalı çevrim blok diyagramı	5
Şekil 1.4 : Yapısal kontrolün dalları	6
Şekil 1.5 : Pasif kontrol sistemleri	7
Şekil 1.6 : Pratikte taban izolasyonu uygulamaları (Aldemir ve Aydın, 2005).....	8
Şekil 1.7 : Ayarlı kütleli sönümleyici (TMD) mekanik modeli (Aldemir ve Aydın, 2005).....	9
Şekil 1.8 : Taipei 101 gökdeleni'ndeki ayarlı kütleli sönümleyici (Van Der Veek, 2009).....	9
Şekil 1.9 : Aktif kontrol sistemleri	10
Şekil 1.10 : Kütle sönümleyici eklenmiş Sendayaga İntes gökdeleni	11
Şekil 1.11 : Yarı aktif kontrol sistemleri şematik diyagramı	12
Şekil 2.1 : Kayma Binası	21
Şekil 2.2 : İdealize Edilmiş Kayma Binası	22
Şekil 2.3 : Tekil Kayma Binası Elemanı	22
Şekil 2.4 : Hareketli Mesnet Hali	23
Şekil 2.5 : Doğrusal halde serbest cisim diyagramı.....	24
Şekil 3.1 : İki katlı yapıda FORTRAN ve MATLAB program karşılaştırması (Sürekli çizgi:FORTRAN, kesikli çizgi:MATLAB).....	40
Şekil 3.2 : Üç katlı yapıda FORTRAN ve MATLAB program karşılaştırması (Sürekli çizgi:FORTRAN, kesikli çizgi:MATLAB).....	41
Şekil 3.3 : Program Akış Diyagramı.....	43
Şekil 3.4 : İncelenen kontrol durumları	45
Şekil 3.5 : Sentetik deprem ivme kaydı	45
Şekil 3.6 : Erzincan depremi ivme kaydı.....	45
Şekil 3.7 : El Centro depremi ivme kaydı.....	45
Şekil 3.8 : Erzincan depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B1).....	47
Şekil 3.9 : Erzincan depremi etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1).....	47
Şekil 3.10 : El Centro depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B1).....	48
Şekil 3.11 : El Centro depremi etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1).....	48
Şekil 3.12 : Sentetik deprem etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler	49
Şekil 3.13 : Sentetik deprem etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1)	49
Şekil 3.14 : Erzincan depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B2).....	50
Şekil 3.15 : El Centro depremi etkisinde 1. kata etkiyen histeretik eğriler (B2).....	51
Şekil 3.16 : Sentetik deprem etkisinde 1. kata etkiyen histeretik eğriler (B2)	51
Şekil 3.17 : Erzincan depremi etkisinde enerji dağılımları (B1)(mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	52

Şekil 3.18 : El Centro depremi etkisinde enerji dağılımları (B1) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	53
Şekil 3.19 : Sentetik depremi etkisinde enerji dağılımları (B1) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	54
Şekil 3.20 : Erzincan depremi etkisinde enerji dağılımları (B2) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	55
Şekil 3.21 : El Centro depremi etkisinde enerji dağılımları (B2) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	56
Şekil 3.22 : Sentetik deprem etkisinde enerji dağılımları (B2) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).....	57
Şekil 3.23 : Mutlak-bağıl enerji dağılımları (B2) (Kesiksiz eğri:deprem enerjisi, kesikli eğri:kinetik enerji).....	58
Şekil 3.24 : Erzincan depremi etkisinde mutlak-bağıl enerji dağılımları (B2) (Kesiksiz eğri:deprem enerjisi, kesikli eğri:kinetik enerji).....	59
Şekil 3.25 : Şekil değiştirme enerjisinin dağılımı (B2)	60
Şekil 4.1 : Aktif tendon uygulanmış 3 ve 10 katlı yapılar	70
Şekil 4.2 : Northridge depremi ivme kaydı.....	70
Şekil 4.3 : 3 katlı tek tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).....	83
Şekil 4.4 : 3 katlı 3 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).....	83
Şekil 4.5 : 10 katlı 3 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).....	83
Şekil 4.6 : 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).....	84
Şekil 4.7 : 3 katlı 3 tendon kontrol uygulanmış yapıda deplasman (X_1 , X_2 , X_3) zaman eğrileri (Veri depremi = a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik, ince çizgi:kontrolsüz, kalın çizgi:kontrollü).....	84
Şekil 4.8 : 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda deplasman (X_1 , X_5 , X_{10}) zaman eğrileri (Veri depremi = a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik).....	85
Şekil 4.9 : Enerji zaman eğrileri (a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik)	85
Şekil 5.1 : 3 boyutlu kayma binası şematik planı	88
Şekil 5.2 : İki eksenli deprem etkisindeki üç boyutlu kayma binası.....	93
Şekil 5.3 : Yapı çerçeve sistemi.....	98
Şekil 5.4 : Deprem ivme zaman eğrileri (a) Erzincan (b) Loma Prieta (d) Coalinga (c) Northridge (e) San Fernando (f) Kern County	99
Şekil 5.5 : Aktif tendon kontrolörlerinin şematik dağılımı.....	101
Şekil 5.6 : Normalize edilmiş deplasmanlar (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County	102

Şekil 5.7 : Normalize edilmiş dönme (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County	103
Şekil 5.8 : Normalize edilmiş deplasman doğu batı yönü (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County	103
Şekil 5.9 : Normalize edilmiş ivme doğu batı yönü (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County.....	106
Şekil 6.1 : MR damper eklenmiş sistemin işleyiş diyagramı	109
Şekil 6.2 : Örnek bina planı	110
Şekil 6.3 : Deplasman zaman eğrileri	111
Şekil 6.4 : Mutlak ivmeler (a:kuzey güney doğrultusu, b:doğu batı doğrultusu)....	112

YAPISAL KONTROL ALTINDA YAPIYA GİREN ENERJİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada ilk olarak çok katlı kayma binalarında, depreme dayanıklı bina tasarımında kullanılan aktif ve pasif kontrol uygulanması durumunda yapıda meydana gelen enerji dağılımları incelenmiştir. Yapı hareketinin malzeme bakımından doğrusal olmayan diferansiyel denklemi ve enerji denklemleri kontrolsuz yapı ve kontrol uygulanmış yapı için ayrı ayrı elde edilmiştir. Sayısal problem olarak, iki adet örnek yapı, kontrolsuz durumda dahil olmak üzere altı farklı kontrol uygulanması durumunda incelenmiştir. Bu yapılar 3 katlı ve 12 katlı iki adet kayma binasıdır. İncelemelerde sentetik, Erzincan ve El Centro olmak üzere 3 farklı deprem kullanılmıştır. Aktif ve pasif kontrol yapıya taban izolasyonu ve kütle sönümleyicisi eklenerek elde edilmiştir. Taban izolasyonu ve aktif kütle sönümleyicinin beraber uygulandığı hibrid (karma) kontrol durumu da incelenmiştir. Aktif kontrol kuvvetinin bulunmasında kontrol algoritması olarak, sadece mevcut durumu göz önünde bulunduran ani optimal kontrol algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar deplasman-zaman, kuvvet-deplasman, bağıl ve mutlak enerji grafikleri olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar kontrolsuz yapı ve incelenen farklı kontrol durumları için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yapılarda enerji dağılımları ile elde edilen detaylı sonuçlar tezde yer almıştır.

Tezin ikinci kısmında depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılmak üzere iki adet yeni yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımlardan birincisi pasif bir yaklaşım olarak adlandırılabilir. Bu pasif yaklaşımda klasik doğrusal optimal aktif kontrol algoritmasından yararlanarak yapıya dizayn aşamasında eklenebilecek ek sönüm ve rijitlik değerlerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu pasif yaklaşımda klasik doğrusal optimal kontrolün temel parametrelerinden olan kazanç matrisinden yararlanarak yapıya eklenebilecek yarı optimal sönüm ve rijitlik parametrelerini bulmak için çeşitli basit metodlar önerilmiştir. Yapıya klasik doğrusal optimal kontrolden elde edilecek tam sönüm ve rijitliği eklemek pratikte mümkün olmadığından ötürü yarı optimal değerlerin bulunması için bu yöntem sunulmuştur. Nümerik olarak incelenen bu yaklaşım sonucunda yapının ilk sönümünü ve rijitliğini uygun oranlarda değiştirmek deprem etkisi altında oluşan titreşimleri azaltmakta ancak yöntemin performansı depremden depreme değişmektedir. Bu yöntem tam anlamıyla pasif ve değişken dinamik etkilere karşı adapte olabilme yeteneği olmadığından ikinci olarak aktif kontrol için yeni bir performans indeksi önerilmiştir.

Önerilen performans indeksi yapının mekanik enerjisi ile beraber, kontrol ve sismik enerjileri de eş zamanlı olarak minimize etme prensibine dayanmaktadır. Bu iki yaklaşım öncelik kayma binalarında karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yapı davranışı klasik doğrusal optimal kontrol algoritması altındaki davranış ile karşılaştırılmıştır. Önerilen aktif kontrol performans indeksinin klasik doğrusal optimal kontrol algoritmasının performansına benzer performans gösterdiği ve bazı durumlarda daha iyi olduğu gözükmiştir. Kayma binalarında önerilen performans indeksinin efektifliği incelendikten sonra daha kompleks bir üç boyutlu model örnek bina olarak seçilmiş olup bu modelde de önerilen aktif kontrol performans indeksinin davranışının efektifliği incelenmiş ve önerilen performans indeksinin klasik doğrusal optimal kontrol kadar iyi performans gösterdiği ve bazı durumlarda performansının klasik doğrusal optimal kontrol den daha iyi olduğu görülmüştür. Bu model oluşturulurken Los Angeles California bölgesi için dizayn edilen bir yapı planı kullanılmış olup üç boyutlu kayma binası ‘tier building’ yaklaşımından yararlanılarak yapının üç boyutta analizi gerçekleştirilmiştir. Nümerik olarak efektifliği kanıtlanan bu aktif kontrol performans indeksinin ileride de deneysel olarak efektifliğinin test edileceği ve kanıtlanacağı düşünülmekte olup literature yeni bir aktif kontrol algoritması olarak kendine yer bulabileceği düşünülmektedir.

Tezin son kısmında ise yarı aktif kontrol elemanlarından olan magneto-rheologic damperlerin yapılarda kullanımı ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmış olup magneto-rheologic damper kuvvet modeli için daha önce çok fazla denenmemiş yeni bir kuvvet modeli denenmiştir.

INVESTIGATION OF THE ENERGIES IN STRUCTURES UNDER THE EFFECT OF STRUCTURAL CONTROL

SUMMARY

Vibration control of civil engineering structures has drawn much attention during the last two decades. It will continue to be a vigorous area of research because of the need to protect structures against earthquakes and strong winds. Conventional civil engineering structures are designed relying on the mass and rigidity of the structure to resist to uncertain dynamic loads and to mitigate unwanted vibrations. The need of adaptability to resist uncertain loads increased safety levels. The strong desire for better utilization of new materials and the lower costs have motivated the development of new concepts for protecting structures. These new concepts are structural control applications. In this thesis a detailed analysis of structural control applications are carried out.

In the first part of this PhD thesis the energy distributions of actively or passively controlled multi storey shear structures are investigated. Nonlinear differential equation of the motion of the structure and the energy equations are derived for the uncontrolled and the controlled structure. As numerical examples two different structures are examined with five different control situations. These structures are three storey and twelve storey structures. In the dynamic analysis synthetic, Erzincan and El Centro earthquakes are used. Five different cases of structural control are analyzed and compared with each other and with an uncontrolled structure. These cases are a structure with base isolation, a structure with a passive mass damper at the top of the building, a structure with an active mass damper at the top the building, a structure with base isolation and a passive mass damper at the base of the building, and a structure with base isolation and an active mass damper at the top of the building. Through these control cases, examples of passive, active and hybrid control systems in structures are investigated. Hybrid structural control case is examined by implementing base isolation with active mass damper to the structure. Instantaneous optimal control algorithm which minimizes a performance index defined as a time dependent quadratic scalar functional instead of a quadratic integral functional and takes into account only the current state is used as an active control algorithm. The results are given as displacement-time, force-displacement, relative and absolute energy curves in a comparative way for uncontrolled and controlled structure.

As second part of the thesis, this study firstly proposes a simple passive approach which focuses on the question that how much damping and stiffness must be added to the structure for passive control. The required damping and stiffness parameters are obtained from the optimal control gain matrix by some representative simple methods since it is not possible to add the exact optimal damping and stiffness parameters to the structure in practice. It is shown numerically that increasing the structural damping and the stiffness in the proposed suboptimal ways suppresses the uncontrolled vibrations while the performance levels may vary for different seismic inputs. Since the proposed approach is intrinsically passive and has no adaptive

property against changing dynamic effects, this study secondly proposes a new performance index so that the optimal control policy is derived based on the minimization of the proposed index with the aid of the Lagrange multipliers method. The resulting closed-loop control algorithm does not need the future knowledge of earthquake and also does not require the solution of the nonlinear matrix Riccati equation. The performance of the proposed control is investigated for the example structures subjected to various seismic inputs and compared to those of the uncontrolled, the classical linear optimal control and the passive cases. It is shown by numerical simulation results that the proposed control is capable of suppressing the uncontrolled seismic structural vibrations and performs almost as well as the classical linear optimal control without increasing the absolute accelerations and outperforms the passive approach.

After verifying the active control algorithm in 2 dimensional buildings, to simulate the behavior of real buildings more accurately, more realistic and complex models are taken into account in the performance evaluation and design of the control algorithms. This thesis also presents a new performance index for active vibration control of three-dimensional structures. To analytically validate the proposed performance index, a six story three-dimensional structure is considered as an example with a fully active tendon controller system implemented in one direction of the building. Tier building formulation is used for three-dimensional dynamic analysis. The building is modeled as a structure composed of members connected by a rigid floor diaphragm such that it has three degrees of freedom at each floor, i.e., lateral displacements in two perpendicular directions and a rotation with respect to a vertical axis for the third dimension. The performance of the building with the active tendons controlled using a classical linear optimal control algorithm is compared to the performance of the proposed control algorithm under several far-fault and near-fault earthquakes using several performance measures. Comparison between the computational results shows that the proposed algorithm outperforms the performance of the classical linear optimal control algorithm for the actively controlled building.

In the last part of this study the feasibility and effectiveness of using magneto rheological mass dampers (MR-MD) in a 3 dimensional tier building is explored. This is achieved by using a simpler MR model structure whose parameters can be extracted from force-velocity data by a straightforward method. A novel piece-wise invertible MR damper model will give access to robust control techniques whose action is a combination of both continuous and switching actions. The adjustability of damping force in real time can make the MR-MDs substantially more effective than optimally-tuned passive TMDs, since they can compensate for nonlinear effects in large base-motion events. In particular, the seismic transient response can be attenuated more successfully thanks to the adaptability of the semi-active device. The semi-active controller adapts to the changing characteristics as it might exhibit a non-linear behavior and can actually minimize or eliminate the incursion into the non-near range. The MR-MD approach is not based on tuning, but in calculating the forces required to correct the building's state vector under a performance metric evaluated in real-time.

The model structure which will be investigated is a 3-dimensional tier building. The analytical three-dimensional model of the structure incorporates either tuned mass dampers or magneto-rheological mass dampers. A novel MR damper model structure that is piece-wise input-invertible, and estimates both the hysteretic force-velocity behaviour as well as the dependency of damping force with input current is used to estimate the current required. This novel approach is included in the analytical simulations. To perform the numerical simulations for the three dimensional tier building model with or without magneto-rheological dampers MATLAB-SIMULINK simulations have been developed. The accuracy of these simulations was verified with ANSYS. The results show that maximum uncontrolled response reduction is achieved by the system with magneto-rheological mass dampers.

1. GİRİŞ

Depremelerin yıkıcı etkilerinden yapıları koruyabilmek için ortaya çıkan depreme dayanıklı yapı tasarımı fikri yapı tarihi kadar eskidir. Geleneksel yapı tasarımı fikrinde amaç yapının şiddetli depremler etkisinde büyük dayanım kaybı yaşamaması ve şiddetli deprem kuvvetlerine dayanabilmesi veya bu kuvvetler etkisinde yapının tamamen göçmesinin önlenmesi ile can kaybının en aza indirilmesidir. Günümüzde depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan düşünceler iki grupta toplanabilir. Birinci grup düşünce yapıya özel bir form vererek depreme karşı dayanıklılığı sağlamak. Kolon rijitliklerinin azaltılması (esnek zemin kat), mafsallı kolonlar gibi. Burada amaç deprem esnasında ortaya çıkan sismik enerjinin belirli yapı elemanları tarafından absorbe edilmesi veya sisteme enerji girişinin azaltılmasıdır. İkinci grup düşünce ise yapıya ilave elemanlar konularak enerji tüketiminin bu elemanlar yardımı ile sağlanmasıdır. Yapının mevcut klasik tasarımına ek olarak, yapıya ilave elemanlar konularak deprem gibi dinamik etkilere karşı yapının daha iyi korunmasının sağlanmasına yapısal kontrol denmektedir.

Yapılarda akıllı elemanların kullanılmasının teorik temelleri 1972 yılında Yao (1972) tarafından ortaya atıldı. Yao (1972), yapısal kontrol (Structural Control) adını kullanarak, yazdığı makalede, kontrol teorilerinin yapılarda da kullanılabileceğini belirtti. Genel anlamda yapısal kontrol pasif kontrol, yarı aktif kontrol, aktif kontrol ve pasif kontrol ile aktif kontrolün beraber kullanıldığı karma kontrol olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. Pasif kontrolda kontrol kuvvetleri yapıya konulan elemanların kendi iç bünyeleri tarafından sağlanmaktadır yani elemanlar işlevlerini kendileri yaparlar, bir dış güç kaynağına gereksinim duymayan bu sistemler sismik enerjiyi kendi üzerlerine alırlar. Aktif kontrol de ise yapıya ilave olarak konulan elemanlar yapı hareketlerini sistemde hazır olarak bulundurulmuş enerjiyi kullanarak gelen etkiye göre sistemi kontrol ederler, aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetlerini üretebilmek için bir dış güç kaynağına ihtiyaç vardır. Karma sistemler ise aktif ve pasif kontrol sistemlerinin birlikte kullanılmasıdır. Yarı aktif kontrol sistemleri ise sönüm ve rijitlikleri deprem esnasında kontrol edilebilen, enerji

ihtiyacının aktif kontrole kıyasla çok daha az olduğu ve belirli kontrol algoritmalarına bağlı olarak elektrik veya manyetik alan şiddeti değiştirilerek kontrolün uygulanabildiği sistemlerdir.

Yapısal kontrol gibi halen araştırma aşamasında olan bir diğer konu olan enerji esaslı depreme dayanıklı bina tasarımında ise, en önemli parametre sisteme giren enerji miktarıdır. Sisteme giren enerji ne kadar az olursa veya yapıya yerleştirilen elemanlar tarafından alınır veya söndürülür ise yapının depreme dayanıklılığı artar. Bu nedenle depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan bir yöntemde sisteme enerji girişinin az olması sağlanmaya çalışılır ve yapıya çeşitli kontrol elemanları konularak giren enerji başka formlarına çevrilir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında en önemli problemlerden biri yapıya giren enerji miktarının ne kadar olduğunun ve yapıyı ne şekilde etkileyeceğinin; yani yapıda enerji dağılımının belirlenmesidir (Bakioğlu ve diğ., 2009).

Depreme dayanıklı yapı tasarımında enerjiden yararlanma düşüncesi 1930'lu yıllara kadar gitmektedir (Benioff, 1934). Housner (1956), benzer şekilde tasarım parametresi olarak yapıya giren sismik enerjiyi dikkate almıştır. Deprem kaynağında serbest kalan enerjinin hesabına yönelik alternatif bir yöntem son yıllarda incelenmiştir (Trifunac, 2008). Yapıya gelen sismik enerjinin tahmini için tek serbestlik dereceli sistemleri esas alan çeşitli formüller araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Yapıya giren sismik enerjinin büyük ölçüde yapının kütleline ve temel titreşim periyoduna bağlı olduğu ifade edilmiştir. Yapıya gelen sismik enerjinin yapıya olan etkisini değerlendirmek üzere değiştirilmiş Mercalli ölçeği veya en büyük zemin ivmesi gibi parametreler öngörülmüş, fakat depremin şiddeti ve neticesinde oluşan hasarın mertebesinin sadece bu parametreler ile açıklanamayacağı görülmüştür.

Düktil çelik çerçeve sistemlere sismik enerji girişi, bu enerjinin dağılımı ve histeretik enerji talebine yönelik çalışmalar literatürde mevcuttur (Akbas ve Shen, 2003; Akbas ve diğ., 2006). (Kalkan ve Kunnath, 2007a&b) doğrusal olmayan yapılarda mutlak ve göreceli enerji kavramları ve aralarındaki ilişkileri irdelenmiştir. Surahman (2007) enerjiye dayalı depreme dayanıklı yapı tasarımı için analitik ve deneysel bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışmanın pratik açıdan uygulanabilmesi için daha çalışılması gerektiği ifade etmiştir.

Yukarıda verilen çalışmaların tamamı aktif veya pasif kontrol elemanı bulundurmeyen yapılara yöneliktir. Basili ve Angelis (2006) bir pasif kontrol elemanının tasarımı enerji yaklaşımının kullanımına yönelik bir çalışma yapmıştır. Aktif kontrollü bir sistemde enerjiye dayalı tasarım üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlıdır (Alavinasab ve Moharrami, 2006; Wong ve Yang, 2001).

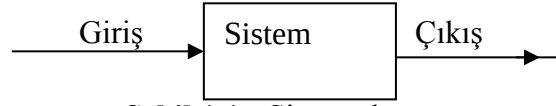
Kontrol sistemleri, yapısal kontrol ve yapısal kontrolün dalları ile ilgili detaylı bilgi aşağıdaki kısımda verilmiştir.

1.1 Kontrol Sistemleri

Bir işlevi yapmak için birbirlerine bağlanarak bir bütünü oluşturan elemanlar topluluğuna sistem adı verilir. Bazı kaynaklar, “sistem” ismi yerine işlem (process) veya plant ismini kullanmaktadırlar. Sisteme örnek olarak, yaya bağlı bir kütleyi verebiliriz. Bu sistemde, yay ve kütle olmak üzere iki eleman bulunmaktadır. Sisteme bir başka örnek; bir binayı ısıtmak için yapılan düzeneğdir. Bu sistem çok elemanlı olup düzeneğin şekline göre eleman sayısı değişmektedir. Sistem insan yapımı elemanlardan oluştuğu gibi tabii elemanlardan da oluşabilir. Örneğin; biyolojik sistem (hücrelerden oluşan canlı), fizyolojik sistem (kan dolaşımı sistemi), demografik sistem (belirli bölgede yaşayan canlılar) gibi.

Sisteme bir uyarı (excitation) verildiğinde sistem uyarıya bir karşılık verir. Verilen karşılık sistemin yanıtı (response) olarak isimlendirilir. Uyarı ve yanıt için farklı isimler de kullanılır: Uyarı için giriş, kontrol işareti, kumanda işareti, veya veri yanıt için ise çıkış, çıkış işareti, sonuç veya mukabele isimleri kullanılır. Bunların içinde en çok kullanılan isim giriş ve çıkış isimleridir. Uyarı ve yanıtı örnek olarak deprem etkisindeki bir yapıyı göz önüne alalım. Burada sistem yapıdır. Yapının bulunduğu zeminin hareketi uyarı ve yanıt ise yapının deprem nedeniyle hareketidir.

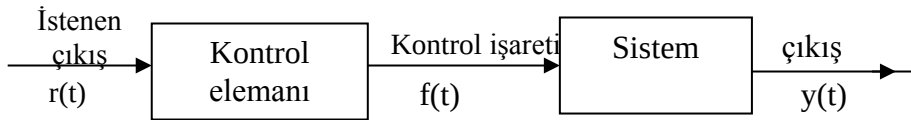
Uyarı-yanıt bağıntısının incelenmesinde, sistemin zaman içinde davranışı incelendiğinden, bu inceleme sistem dinamiği adı altında yapılır. Kısaca sistem dinamiği, uyarı yanıt ile isimlendirilen bir sebep-sonuç ilişkisinin incelenmesidir. Sistemin davranışı şematik olarak aşağıda verilen diyagram ile gösterilebilir.



Şekil 1.1 : Sistem davranışı.

Bazı sistemlerde giriş ve çıkış adeti birden fazla olabilir. Bu tip sistemlere çok girişli ve çok çıkışlı sistemlere adı verilir. Şekil 1.1 ile verilen sistemde uyarı, yanıt ilişkisi bir dış tesir olmadan oluşmaktadır. Böyle sistemlere kontrolsüz sistemler adı verilir.

Bir sistemde yanıtı istenilen değerlerde tutmak veya yanıtın belirli değişimler göstermesi için uyarılar üzerine yapılan işlemlere kontrol adı verilir. Bu tip sistemlere kontrollü sistem adı verilir. Kontrol, sisteme eleman eklenerek yapılır ve bu elemana kontrol elemanı adı verilir. Kontrollü sistemler çeşitli şekillerde sınıflanırlar. Bir sınıflama şeklinde kontrollü sistemler; insan yapımı, tabii, karışık olmak üzere üç gruba ayrılır. Burada göz önüne alınan kriter esas sistemin yapısıdır. Örneğin; elektrik düğmesi insan yapımı bir kontrol sistemi, insanın vücut ısını ayarlamak için kullandığı terleme sistemi ise tabii bir kontrol sistemidir. Kontrol sistemlerinin bir başka sınıflaması; el ile kontrol, otomatik kontrol şeklindedir. Bir lambanın el ile yanması el ile kontrol olup aynı lambanın bir insan geçerken otomatik olarak yanması otomatik kontroldür. Mühendislik bakımından önemli olan otomatik kontrol sistemidir. Burada kontrol, insan etkisi olmadan yapılır. Otomatik kontrol iş gücünden tasarruf sağladığı gibi çok daha önemli insan yetenekleri ile yapılamayan işlerin ancak otomatik kontrol yardımı ile yapılmasıdır. Kontrollü sistemlerin matematik modellenmesine göre sınıflandırılması ileride yapılacaktır. Bundan sonra sistem denildiğinde kontrollü sistem anlaşılabilecektir. Aksi durum belirtilecektir. Kontrol, şematik olarak aşağıda verilen blok diyagramı ile ifade edilebilir.

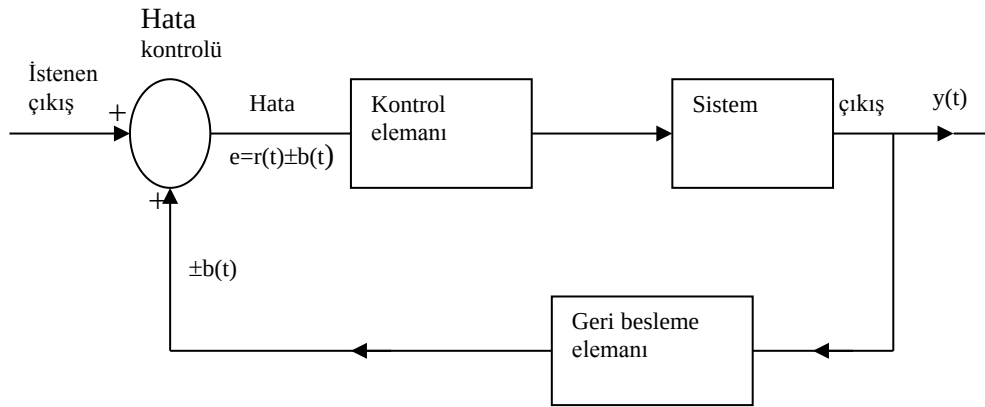


Şekil 1.2 : Kontrol diyagramı.

Yukarıda görülen sistemde arzu edilen çıkış, kontrol elemanına giriş olarak verilmekte ve kontrol elemanının çıkışı sistemin giriş olmaktadır. Bir sistemde işlemin yapılması için oluşturulan bütün elemanlar veya matematik işlem dizisine kontrol çevrimi veya kısaca çevrim adı verilir. Örneğin bir binayı içindeki ısıtma düzeninin bina içindeki sıcaklığa bağımlı olmadan verilen bir saate çalışmaya

başlaması, trafik lambalarının yeşil yanma süresinin trafik yoğunluğuna bağlı olmadan yanması gibi.

Yukarıda Şekil 1.2 ile verilen çevrimde, çıkışın girişe etkisi yoktur. Bu sistemlere açık çevrim adı verilir. Açık çevrimlerin çıkış, istenen çıkışa eşit olmayabilir. Bunun nedeni sistemdeki belirsizlikler, beklenmeyen bozucu etkiler, teoride yapılan kabuller, sistemin zaman içinde yıpranması gibi etkilere bağlıdır. Bunların içindeki en önemlisi belirsizliklerdir. Örneğin bir binayı belirli saatte ısıtmaya başlayan ısı sisteminin durumu. Çevre sıcaklığı aniden düşebilir veya yükselebilir. Bu durumlarda sistemin devreye girmesi veya devreden çıkması gerekir. Trafik lambasının yeşil yanma süresinin trafik yoğunluğuna göre ayarlanması gerekir. Bu durum kapalı çevrimler ile önlenir. Kapalı çevrimler, geri besleme kontrolü olarak da isimlendirilir. Kapalı çevrimin blok diyagramı Şekil 1.3 de verilmiştir.



Şekil 1.3 : Kapalı çevrim blok diyagramı.

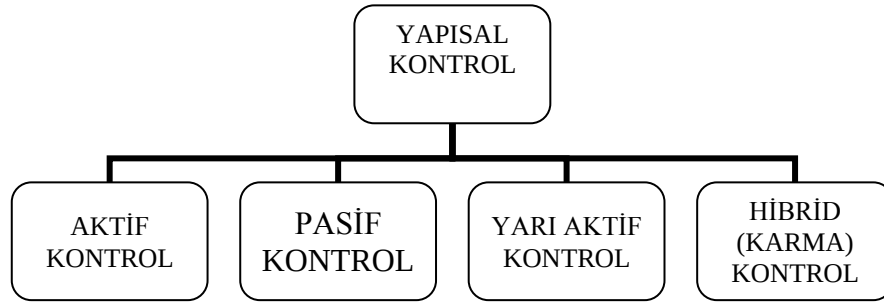
Yukarıda verilen sistemde $y(t)$ çıkış değeri geri besleme elemanı ile $b(t)$ ye çevrilir. Bu değer hata kontrol elemanı yardımı $r(t)$ ile karşılaştırılarak kontrol elemanına verilir. Kontrol elemanı hata kadar düzeltme yaparak çıkışı ayarlar. Kapalı çevrimler, beklenmeyen bozucu etkileri ve belirsizlikleri karşılama yeteneği bulunduğu gibi açık çevrimlere göre daha karardır. Bunlara karşın daha pahalı bir sistemdir. Bozucu etkiler ve belirsizlikler yeteri kadar küçük ise açık çevrim kontrolü kullanılabilir.

1.2 Yapısal Kontrol

Yapıların dış etkiler karşısında hareketlerini azaltmak gayesi ile yapıya kontrol kuvvetleri adı verilen bir takım kuvvetler etki ettirilmesine yapı kontrolü adı verilmektedir. Bir başka deyişle yapının mevcut klasik tasarımına ek olarak,

yapıya ilave elemanlar konularak deprem gibi dinamik etkilere karşı yapının daha iyi korunmasının sağlanmasıdır. İnşaat mühendisliği yapılarının kontrolu diğer disiplinlerdeki kontrol problemlerine göre daha zorlu bir kontrol problemidir. İnşaat mühendisliğinde yapı kontrolunun diğer disiplinlerdeki kontrol problemlerine göre uygulanabilirliğinin zorluğu inşaat mühendisliği yapılarının çok sayıda serbestlik derecesine ve çok sayıda moda sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Preumont ve Seto, 2008). Bu tür problemlerde sonlu elemanların kullanımı çoğunlukla serbestik derecelerinin artmasına da yol açmaktadır. Bu problemler genellikle modal koordinatlar kullanılarak çözülür. İkinci olarak yapısal kontrol alanında incelenen bir çok yapı düşük sönümlü yapılardır ($\zeta = 0.001 \sim 0.005$). Bu da kontrol sisteminin hesaplamalarında olabilecek hataların yapının stabilitesini bozabileceği anlamına gelmektedir.

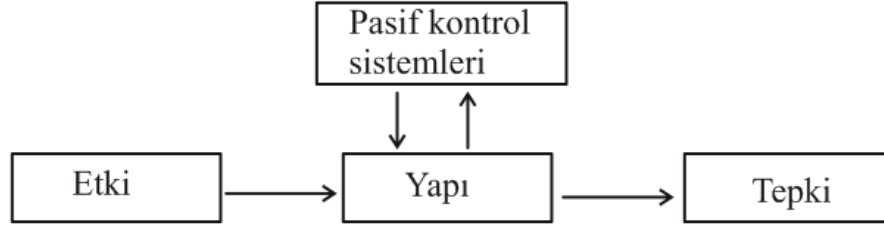
Şekil 1.4 de şematik olarak yapısal kontrolün dalları verilmiştir.



Şekil 1.4 : Yapısal kontrolün dalları.

1.2.1 Pasif kontrol

Teknolojinin ve bu konuda araştırmaların ilerlemesi ile birlikte pasif kontrol çalışmaları literatürde yerini almaya ve pratikte uygulanmaya başladı. Bu tip kontrolde kontrol kuvvetleri yapıya konulan elemanların kendi iç bünyeleri tarafından sağlanmaktadır yani elemanlar işlevlerini kendileri yaparlar. Harici bir güç kaynağına ihtiyaç duymayan bu sistemler sismik enerjiyi kendi içlerinde sönümlerler. Değişken dinamik etkilere göre adapte olabilme özellikleri yoktur. Pasif kontrol elemanlarının çalışma diyagramı Şekil 1.5 de verilmiştir.



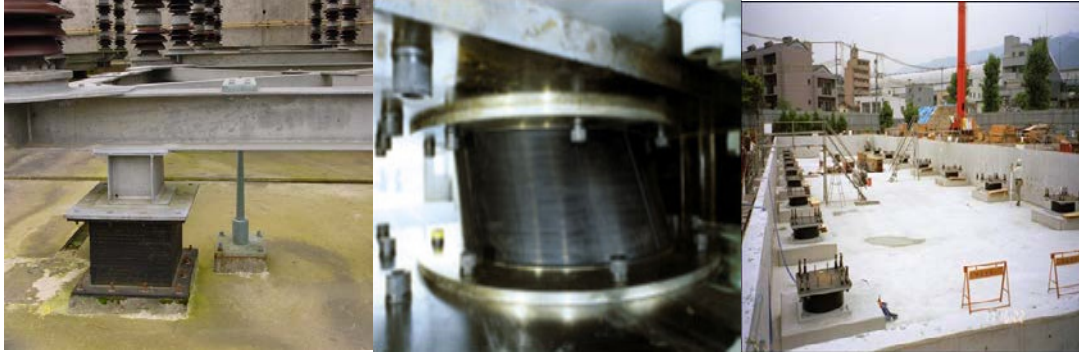
Şekil 1.5 : Pasif kontrol sistemleri.

Bu alanda en yaygın olarak kullanılan elemanlar taban izolasyonlarıdır. Taban izolasyonları ile ilgili detaylı bilgi de bu tez kapsamında verilmiştir. Pasif kütle sönümleyiciler ve metalik sönümleyiciler gibi elemanlar da yaygın olarak kullanılan pasif kontrol elemanlarıdır.

Taban izolasyonları üst yapıya deprem esnasında gelen enerjiyi kendi üzerlerinde absorbe ederek iletirler. Enerjinin büyük bölümünü absorbe eden taban izolasyonları büyük deplasman yapabilme özelliğine sahiptirler. Taban izolasyonları bu sayede üst yapının rijit davranış göstermesini sağlarlar. Ancak taban izolasyonlarının en büyük dezavantajı çok katlı yapılarda artan dönme momentlerinin yapıda devrilme etkisi yaratabilmesidir. Ayrıca taban izolasyonlarında her depremten sonra oluşan kalıcı deformasyonlar toplanarak artmaktadır. Bu nedenlerle taban izolasyonları yüksek binalarda kullanılmamaktadır.

Taban izolasyonları genelde iki grupta toplanırlar; elastik mesnetler ve kayıcı plaklar. Taban izolasyonları olarak kullanılan elastik mesnetler aralarında çelik plakalar bulunan kauçuklardan tabakalı olarak yapılmış mesnetlerdir. Bu mesnetler düşey doğrultuda rijit ve yatay doğrultuda esnektirler. Bu elemanlar yardımı ile sistemin doğal frekansları değiştirilir. Plakalardan yapılan kayıcı elemanlar ise tek başına kullanılmayıp elastik mesnetlerde kullanılmaktadır. Bu şekilde kullanılan kayıcı elemanlar sisteme ilave bir koruma sağlamaktadır. Kayıcı plakalarla yapılan taban izolasyonunda ise geri çağırıcı bir kuvvet gerekmektedir ve bu kuvvetin teşkili de zor bir problemdir. Plakalardaki sürtünme katsayısı küçük olan sistemlerde sistem tamamen geri çağırıcı kuvvetin etkisi altında hareket etmekte ve kayıcı plakaların avantajı kaybolmaktadır. Bu nedenle sürtünme katsayısı 0.15-0.20 değerlerine kadar artırılmaktadır. Sürtünme katsayısı arttırıldığında ise ivmesinin maksimum değeri μg den küçük depremlerde sürtünme plakaları çalışmamaktadırlar (μ =sürtünme katsayısı). Bu durumda yapı zarar görmese bile yapı içindeki bazı aletler zarar görmektedir. Nükleer santrallerde olduğu gibi bazı yapılarda aletlerin korunması

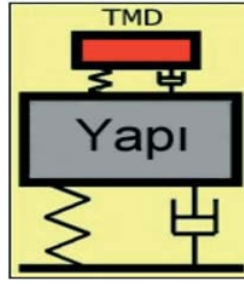
yapının korunması kadar önemlidir. Şekil 1.6 da çeşitli taban izolasyonlarının gerçek yapılarda uygulamaları verilmiştir.



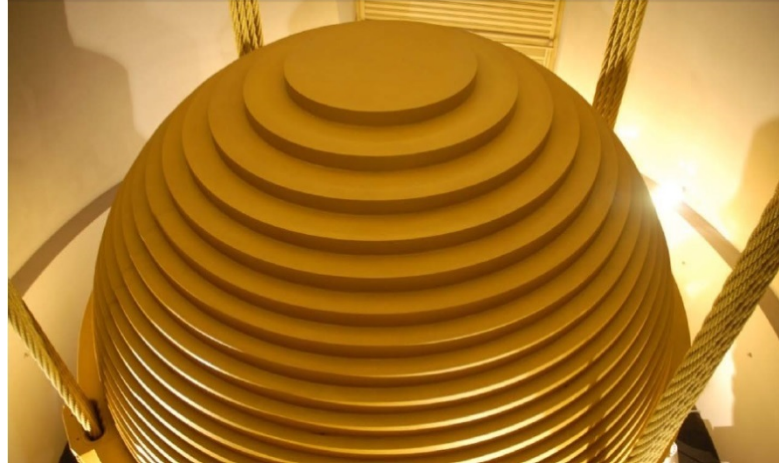
Şekil 1.6 : Pratikte taban izolasyonu uygulamaları (Aldemir ve Aydın, 2005).

En yaygın kullanılan bir diğer pasif kontrol elemanı da ayarlı kütleli sönümleyicidir (TMD). Bu elemanların yapıya yay ve sönüm elemanları ile bağlandığı kabul edilir. Yapıya uygun şekilde eklenen kütleli efektif performans gösterebilmesi için kütleli frekansı esas yapının frekansına göre ayarlanmalıdır. Ayarlı kütleli sönümleyicilerin yapının frekansına tam olarak ayarlanmadığı durumlarda yapı titreşimlerini azaltmada etkisiz olduğu görülmüştür. Ayarlı kütleli sönümleyicinin mekanik modeli Şekil 1.7 de verilmiştir.

TMD'lerin yerleştirildiği ilk yapı Avustralya'nın Sydney şehrindeki çelik taşıyıcı sisteme sahip Centerpoint gökdelenidir. Amerika Birleşik Devletlerinde TMD'lerin yerleştirildiği iki binadan birisi Newyork'da taşıyıcı sistemi çelik olan Citicorp Center, diğeri ise Boston'da John Hancock gökdelenidir. Japonya'da ise ilk TMD yine çelik taşıyıcı sistemli Chiba Port gökdelenine yerleştirildikten sonra bunu Osaka'da Funade Bridge gökdeleni, Kimitsu şehrindeki çelik bacalar ve diğerleri izlemiştir. TMD 'ler ise pek çok köprüde, Dubai'de Burj Al Arab otelinde ve Emirates kulelerinde kullanılmıştır (Aldemir ve Aydın, 2005). Tayvan'daki Taipei 101 gökdelenine eklenmiş bir ayarlı kütle sönümleyici Şekil 1.8 de verilmiştir. Pasif enerji sönümleyici elemanlar olarak taban izolasyonları ve ayarlı kütleli sönümleyicilerden başka metalik akma sönümleyicileri, sürtünme sönümleyicileri, viskoz sıvı sönümleyicileri ve ayarlı sıvı sönümleyicileri sayabiliriz.



Şekil 1.7 : Ayarlı kütleli sönümleyici (TMD) mekanik modeli (Aldemir ve Aydın, 2005).



Şekil 1.8 : Taipei 101 gökdeleninin'deki ayarlı kütleli sönümleyici (Van Der Veek, 2009).

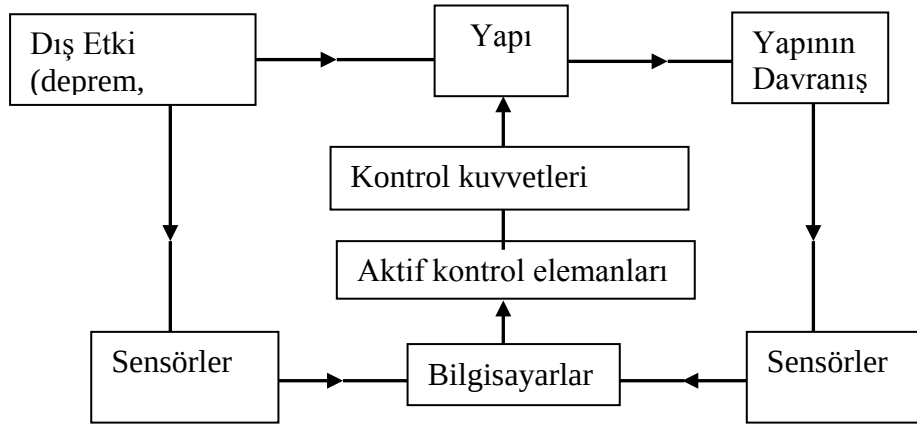
1.2.2 Aktif kontrol

İlk olarak uçak ve uzay endüstrisinde geliştirilen aktif kontrol kullanımı inşaat mühendisliğine 1960 lı yıllardan itibaren fikir olarak girmiştir (Zuk, 1968). Bu tip kontrolde yapıya ilave olarak konulan elemanlar yapı hareketlerini sistemde hazır olarak bulundurulmuş enerjiyi kullanarak gelen etkiye göre sistemi kontrol ederler. Aktif kontrol sistemlerinde kontrol kuvvetlerini üretebilmek için harici bir güç kaynağına ihtiyaç vardır. Aktif kontrolün gerekliliği pasif kontrolün yetersiz kaldığı durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Pasif kontrolün yetersiz kaldığı durumlara örnek olarak; yüksek binalarda taban izolasyonlarının kaldırma kuvveti oluşturabilmesi bu kuvvetlerin de yapının stabilitesini bozarak döndürme etkisi yapması verilebilir. Buna ek olarak büyük yatay deplasmanlardan ötürü depremlerden sonra kalıcı deformasyonlar oluşmakta ve bunlar zamanla birikerek sistem kullanılmaz hale gelmektedir.

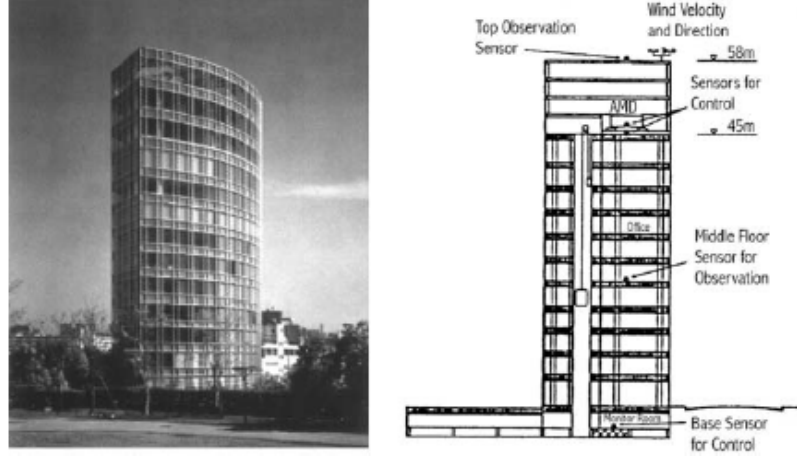
Deplasman kontrolünün , konforun, emniyetin çok önemli olduğu yapıların, normal ömürleri boyunca sürekli değişen dış yüklere ve değişik kullanım amaçlarına göre

kendilerini adapte edebilme özelliklerinin bulunması gerekmektedir, bu amaçla aktif kontrol çalışmaları başlatılmıştır. Aktif kontrol sistemlerinin genel çalışma şeması Şekil 1.9 da verilmiştir (Aldemir, 1999). Yapılarda aktif kontrol sistemleri birbirleri ile bütünleşik bilgisayarlar, hidrolik yük verenler (actuato lar) , yapıdaki tepkileri ölçen ve anlık olan kontrol kuvvetlerinin üretilmesi için bilgisayarlar a yollayan sensörlerden oluşmaktadır. Kontrol kuvvetlerinin üretilmesi için de çeşitli kontrol algoritmalarından uygun olanının seçilmesi ve kontrol bilgisayarlarına tanımlanması gerekmektedir. Sensörler optik, mekanik ve kimyasal olabilirler. Bilgisayarların belirli bir aktif kontrol algoritmasına uygun olarak anlık hesapladığı kontrol kuvveti komutlarını gönderdiği hidrolik yük veren (actuato ların) bu kontrol kuvvetlerini üretebilmeleri için çeşitli dış güç kaynaklarına da ihtiyaçları vardır. Aktif kontrolün dış güç kaynaklarına bağlı olması deprem esnasında oluşabilecek güç kayıplarının bu sistemleri nasıl etkileyeceği ve bu sistemlerin işlevsizlikleri ile ilgili soru işaretleri oluşturmakla birlikte, bu sistemlere alternatif olan yarı aktif kontrol sistemleri ile ilgili olan çalışmaları arttırmıştır. Yarı aktif kontrol sistemlerinin ufak bataryalar yardımıyla bile çalışabilir olması onları aktif kontrol sistemlerinin en büyük alternatifi yapmıştır.



Şekil 1.9 : Aktif kontrol sistemleri.

Aktif kontrol elemanlarından en yaygın olarak kullanılan aktif kütle sönümleyicilere gerçek binalarda da rastlanabilmektedir. Japonya’da bulunan Sendayaga Intes gökdelenine eklenmiş bir aktif kütle sönümleyicisi ve yapının planı Şekil 1.10’da verilmiştir (Soong ve Spencer, 2002).



Şekil 1.10 : Kütle sönümleyici eklenmiş Sendaya Intes gökdeleni (Soong ve Spencer, 2002).

1.2.3 Yarı Aktif Kontrol

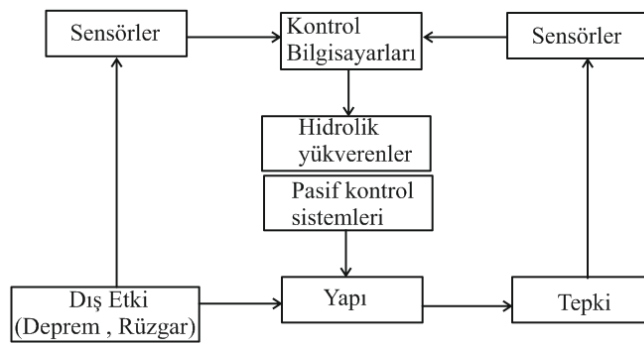
Yarı aktif kontrol cihazları büyük güç kaynakları gerektirmeyen aktif kontrol cihazları olarak uyarlanabilmesi ile dikkat çekmektedir. Yarı aktif kontrol cihazları mekanik enerjiyi kontrol edilen yapı sistemine aktarmaz. Ayrıca sistemin vereceği cevabı optimum olacak derecede küçültebilecek şekilde kontrol edilebilen özelliklere sahiptir. Bu nedenle aktif kontrol cihazlarının aksine yapı sisteminin stabilitesini değiştirme potansiyeli yoktur. Yarı aktif kontrol sistemleri pasif sistemin güvenilirliği ile aktif sistemin çok yönlülüğü ve adaptebilirliğini sadece pil enerjisi ile sağlayabilmektedir. Başka bir deyişle yarı aktif kontrol sistemleri aktif ve pasif kontrol sistemlerin en iyi özelliklerinin birleşimidir. Yapılan çalışmalar yarı aktif sönümleyicilerin aktif ve pasif sönümleyicilere göre daha iyi performans verdiğini göstermektedir. Yarı aktif kontrol sistemlerinin aktif sistemler ile aralarındaki en önemli fark yapının ihtiyaç duyduğu sisteme etki ettirilecek dış kuvvetin büyüklüğünün aktif kontrole göre daha küçük olmasıdır. Yarı aktif kontrol cihazları yapıya mekanik bir enerji eklemediklerinden dolayı yapıda herhangi bir stabilite sorunu oluşturma durumu söz konusu değildir. Yarı aktif kontrol cihazları kontrol edilebilen pasif cihazlar olarak bilinir.

Yarı aktif kontrol sistemleri sönüm ve rijitlikleri deprem esnasında kontrol edilebilen sistemler olarak da tanımlanabilir. Aktif kontrolde büyük enerji ihtiyacı bulunurken yarı aktif kontrol sistemlerinde küçük bataryalarla bile enerji ihtiyacı karşılanabilmektedir. Belirli kontrol algoritmalarına bağlı olarak elektrik veya

manyetik alan şiddeti değiştirilerek yarı aktif sistemlerin mekanik özellikleri kontrol edilebilmektedir. Yarı aktif sönümleyiciler genel olarak aşağıdaki gibi sıralandırılır.

1. Değişken boşluklu sönümleyiciler
2. Değişken sürtünmeli sönümleyiciler
3. Rijitlik kontrollu sönümleyiciler
4. Ayarlanabilir kütle sönümleyiciler
5. Kontrol edilebilir akışkan sönümleyiciler (akıllı malzemeler)

Yukarıda sıralanan sönümleyicilerden kontrol edilebilir akışkan sönümleyiciler içerisinde kontrol edilebilir sıvılar bulunan sönümleyicilerdir. Kontrol edilebilir sıvıların en temel özelliği; elektrik veya magnetik alana maruz bırakıldıklarında viskoz bir akışkandan kontrol edilebilir bir akma dayanımı olan yarı-katı bir malzemeye dönüşebilmeleridir. Bu dönüşüm oldukça kısa bir süre içerisinde milisaniye seviyelerinde oluşmaktadır. Maruz bırakıldıkları alan türü dolayısı ile iki tip olarak adlandırılmaktadırlar bunlar elektoreolojik akışkanlar (ER) ve magnetoreolojik akışkanlardır (MR). Elektoreolojik akışkanların içerisinde bulunduğu damperlere elektoreolojik (ER) damperler, magnetoreolojik akışkanların içerisinde bulunduğu damperlere ise magnetoreolojik (MR) damper adı verilir. Bu tez kapsamında da incelenecek magnetoreolojik damperler en yaygın olarak incelenen yarı aktif kontrol elemanlarından. Yarı aktif kontrol sistemlerinin şematik çalışma diyagramı Şekil 1.11 de verilmiştir.



Şekil 1.11 : Yarı aktif kontrol sistemleri şematik diyagramı.

1.2.4 Hibrid karma kontrol

Hibrid (karma) tip yapısal kontrolde, bir yapıda aktif veya yarı aktif kontrol elemanları kullanılmış olup davranışı iyileştirmek için pasif elemanlarla desteklenmiş olabilir.

Hibrid Kontrol sistemleri pasif kontrol sisteminin performansını artırabilmek için aktif kontrol cihazlarının kullanılması ile oluşur. Bu sisteme ek olarak pasif kontrol sistemi de aktif kontrolün ihtiyaç duyduğu enerjinin küçültülmesi için kullanılarak bir hibrid kontrol sistemi oluşturulur. Hibrid kontrol ile aktif kontrol arasındaki belirgin en büyük fark sisteme dışardan etkitilen kuvvet ile ilgilidir. Hibrid kontrol sistemleri çoğu zaman aktif ve pasif kontrol sistemlerinin ayrı ayrı uygulandıklarında varolan sınırlandırmaları azaltarak daha iyi bir sonuç elde edilmesini sağlar. Örneğin bu tez kapsamında da analitik olarak incelenmiş olan taban izolasyonlu bir yapıya aktif kütle sönümleyici eklenmesi durumu da hibrid (karma) kontrol uygulamasıdır. Burada esas amaç taban izolasyonunun deformasyonun artarak ilerlemesini engellemek dolayısıyla taban izolasyonun yapabileceği devrilme etkisine karşı önlem almaktır. Viskoelastik sönümleyicilerin yapı üzerinde aktif bir kütle ile kullanılması veya taban izolasyonu sistemlerinin yapının performansını kontrol eden bir güç kaynağı ile birlikte kullanıldığı durumlar da Hibrid kontrol yöntemine örnek gösterilebilir. Hibrid kontrol sistemlerinin diğer bir faydası, yalnız aktif kontrol sistemlerinin uygulandığı durumda meydana gelebilecek güç kesilmesi durumunda pasif kontrol bileşenleri ile devam edebilmesidir (Housner ve diğ. 1997).

1.3 Tezin Amacı

Yapılan çalışmanın amacı, ilk olarak çok katlı kayma binalarında aktif ve pasif sistemler içeren doğrusal ve doğrusal olmayan yapılarda, sisteme giren deprem enerjisinin katlara ve enerji tiplerine göre dağılımlarının hesaplanması, bu hesapları yapan bir bilgisayar programının hazırlanması, elde edilen sonuçlara göre aktif ve pasif kontrol elemanlarının yerleştirilmesi ve enerji esaslı depreme dayanıklı yapı tasarımına katkıda bulunulmasıdır. Bunlara ek olarak çalışmada 2 adet yeni yöntem önerilmiştir. Bu yeni yöntemlerden biri yapılarda aktif kontrol kullanımında yeni bir performans indeksidir diğer yöntem ise klasik doğrusal optimal kontrolün temel denklemi lineer quadratik regülatör probleminin çözümünden elde edilen kazanç matrisinden yararlanılarak yapıya eklenecek optimal sönüm ve rijitliğin

bulunmasıdır. Önerilen aktif kontrol performans indeksi de enerji tabanlı yeni bir performans indeksidir. Ayrıca tezde yarı aktif kontrol elemanlarından olan magnetorheological damperlerin deprem etkisi altındaki yapılarda kullanımı ve sismik titreşimlerin azaltılmasına katkıları ile ilgili de çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

Yapısal kontrolün inşaat mühendisliği, yapı mühendisliği, kontrol mühendisliği gibi farklı farklı disiplinleri içerisinde barındıran bir araştırma alanı olması da konunun ilgi çekiciliğini arttırdığı da düşünülmektedir.

1.4 Yapısal Kontrol Alanında Yapılan Çeşitli Çalışmalar

Aldemir ve diğ. (2001) deprem etkisi altında aktif kontrol uygulanmış yapıların optimal kontrolü ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. (Aldemir ve Bakioğlu, 2001) deprem değerlerinin yakın gelecekteki değerlerinin tahmini üzerine kurulu bir aktif kontrol algoritması önermişlerdir. Bakioğlu ve Aldemir (2001) aktif kontrollu yapıların optimal kontrolü için yeni bir sayısal algoritma önermiştir. Wong ve Yang (2001) aktif kontrol uygulanmış yapıların enerji ve deplasman tepkilerinin hesaplanması ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Soong ve Spencer Jr. (2002) enerji tüketiminin, yapıya konan aktif veya pasif kontrol elemanları ile sağlanmasında tekniğin geldiği son durum ve uygulamadaki örneklerini incelemiştir. Alavinasab ve diğ. (2006) çalışmasında enerjiye bağlı bir aktif kontrol algoritması önermiştir. (Wong ve Pang, 2007a) aktif kontrol uygulanmış yapıların enerji yönünden incelendiği bir çalışma yapmıştır. Lu ve diğ., (2011) mutlak enerjiye bağlı aktif kontrol algoritması üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Aldemir (2010) deprem etkisi altındaki yapılar için yeni bir aktif kontrol algoritması tarafından önermiştir. Costa ve Balthazar (2009) aktif kontrol uygulanmış doğrusal olmayan yapılarda enerjiler ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Wang, (2011) aktif kontrol algoritmalarından H_{∞} algoritması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Pasif kontrol uygulanmış yapılarla ilgili de son yıllarda çeşitli araştırmalar yapılmaya devam edilmektedir (Konar ve Gosh, 2010; Cimellaro ve diğ., 2009). Pasif kontrol elemanlarından en yaygın olarak kullanılan ve bu doktora tezi kapsamında incelenecek taban izolasyonları da yaygın olarak araştırılan bir konudur (Ou ve diğ, 2010; Riley ve diğ. 1998; Agrawal ve diğ. 2006; Narasimhan ve diğ. 2006). Taban izolasyonları göreceli kat ötelemelerini azaltmada etkin kontrol elemanlarındandır. Ancak yakın fay etkisi altında bulunan çok katlı yapılarda dönme momentlerinin aşırı artması sonucu oluşan

taban deplasmanlarının dramatik artışı taban izolasyonlarının negatif yönleri olarak literatürde araştırılmış bir konudur (Palazzo ve Petti, 1999). Yaygın olarak kullanılan başka bir pasif kontrol elemanı ise kütle sönümleyicidir (Wang ve diğ. 2001; Aldemir, 2003; Kang ve diğ. 2012). Yaygın olarak araştırılmalarına rağmen frekanslarının yapının frekansına tam olarak ayarlanamamaları kullanımlarını kısıtlamaktadır (Chey ve diğ. 2010). Ayarlı kütle sönümleyicinin frekansı yapı frekansından farklı olur ise kütle sönümleyici yapı deplasmanlarını azaltmada etkin olamamaktadır. Casciati ve Guilliani (2009) , çok küçük kütle oranlarıyla kullanılan kütle sönümleyicilerinin zayıf performanslarını çalışmalarında göstermişlerdir. Chou ve Uang, (2003), yaptıkları çalışmada yapılarda enerjinin sismik hasar etkisinden dolayı oluşan yük ve deplasman tepkilerini belirlemede alternatif bir yol olduğunu belirtmiş, çok katlı bir çerçevenin absorbe ettiği enerjiyi, enerji spektrumundan hesaplayan bir yöntem geliştirmiştir. Bu enerji spektrumu ayrıca her bir modun enerji dağılımı için kullanılmış, çalışma sonucunda ikinci modun tepkisinin bazı durumlarda üst katlardaki enerji (hasar) dağılımını etkilediği görülmüştür. Min ve diğ., (2003), tarafından yapılan çalışmada yapısal enerjinin olasılıklı fonksiyonunu kullanarak hazırlanan bir aktif kontrol algoritması sunulmuştur. Yapısal enerjinin Rayleigh olasılık dağılımına sahip olduğu belirtilmiştir. Önerilen kontrol algoritmasının LQR kontrolörüne göre sismik etkilere karşı yapının verdiği tepkilerde daha fazla azaltma yaptığı ve kontrolör dizaynındaki kontrol kuvvetinin limitini göz önüne aldığı belirtilmiştir. Manfredi, (2001) çalışmasında basitleştirilmiş, histeretik ve giriş enerji spektrumlarının elde edilmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemin deprem karakteristiklerine bağlı eşdeğer sayıda periyodun değerlendirilmesi üzerine kurulu olduğu belirtilmiştir. Kullanılan yöntemin histeretik ve giriş enerjisinin maksimum değerlerini elde etmeyi sağladığı belirtilmiştir. Katsaras ve diğ. (2007), tarafından yapılan çalışmada bilineer histeretik veya sürtünmeli sismik izolasyon sistemlerinin geri çağırıcı kapasitesi bazı detayları ile incelenmiştir. Parametrik analizler ve regresyon analizleri depremden sonra meydana gelen artık deplasmanların ve ardışık depremlerden sonra meydana gelen kümülatif deplasmanların birbirine bağımlılığını belirtmişlerdir. Wong (2005), tarafından yapılan çalışmada elastik deplasman geri beslemesi kullanarak, inelastik yapıların dinamik tepkilerini azaltmakta aktif kontrol sistemlerinin yararlılığını kanıtlamak için değiştirilmiş bir optimal doğrusal kontrol algoritması önerilmiştir. Yapısal kontrol altındaki yapının kontrol enerjisi üzerine çalışılarak önerilen

algoritmanın yararlılığı gösterilmiştir. Çeşitli tek serbestlik dereceli sistemler kullanılarak yapılan sayısal örneklerde, her zaman yapısal karakteristiklere ve deprem etkisine bağlı olarak kontrol enerjisinin maksimum olduğu bir nokta olduğunu belirtmiştir. Wong ve Pang (2007a), tarafından yapılan çalışmada deprem etkisindeki aktif kontrollü yapısal modeller incelenerek yapının enerji yoğunluk spektrumunun oluşturulması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Elastik ve inelastik enerji spektrumu, farklı enerji elemanları arasındaki enerji transferini incelemek için oluşturulmuştur. İnelastik yapıların enerji yoğunluk spektrumu; giriş enerjisinin 3 ana elemanı olan sönüm enerjisi, kontrol enerjisi ve plastik enerji bakımından 2 yöntem ile incelenmiştir. Bu yöntemlerden ilkinin rijitliği değiştirmek olduğu, ikincisinin ise sönümü değiştirmek olduğu belirtilmiştir. Wong ve Pang (2007a), çalışmalarında deprem etkisi altındaki kontrollü yapılarda enerji dağılımları ile ilgili kısıtlı sayıda çalışma olduğunu deprem etkisi altında çeşitli enerji formlarının dağılımlarının daha iyi anlaşılabilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Wong ve Pang (2007b) , bir diğer çalışmalarında çok serbestlik dereceli yapılarda enerji yoğunluklarının farklı depremler etkisinde incelenmesi ile ilgili daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yapıların deprem etkisi altında davranışlarını iyileştirmek için kontrol elemanlarının gelişimine yapılan bilimsel katkılar son yıllarda da sürmektedir (Bitaraf ve diğ. 2012; Cho ve diğ. 2012).

Yukarıda da bahsedilen kontrol konusundaki araştırmaların çoğu klasik doğrusal aktif kontrol algoritmaları ile ilgilidir. Klasik doğrusal kontrolde performans indeksi kuadratik bir ifadenin durum ve kontrol vektörlerine göre integre edilmesi ile elde edilir. Bu performans indeksinin iki özelliği vardır. Birincisi kontrolsüz değişkenin değerini 0 a düşürmeye, ikincisi ise kontrol girdisinin değerini küçültmeye yarar. Ancak klasik doğrusal kontrol algoritmaları gerçekte yapılara kapalı bir çevrim içerisinde uygulanabilir. Doğrusal olmayan matris Rikkati denklemi deprem ivmesi terimini göz önüne almadan çözüldüğü için klasik doğrusal kapalı çevrim kontrol tam anlamıyla optimallik şartını sağlayamaz. Bu denklemi çözmek için deprem değerlerinin tamamının bilinmesi gereklidir. Dolayısı ile bu tarz kontrol pratikte gerçek yapılara uygulanamaz. Klasik doğrusal kontrolün yapılara uygulanmasındaki bu problemler nedeni ile bir çok araştırmada çeşitli yeni kontrol algoritmaları çalışılmış ve önerilmiştir (Yang ve diğ. 1987;Sato ve Toki 1990; Xu ve diğ. 2005;

Akhiev ve diğ. 2002). Mathakari ve diğ. (2007) ile Sarma ve Adeli (2001) doğrusal olmayan çok katlı yapıların aktif kontrol uygulamalarında optimal kontrol kuvvetinin bulunması için genetik algoritma bazlı kontrol algoritmaları önermişlerdir. Lu ve diğ. (2011) çalışmalarında çeşitli enerji esaslı kontrol algoritmalarını incelemişlerdir. Yukarıda da belirtildiği gibi bir çok araştırmacı klasik doğrusal optimal kontrolün pratik uygulamalarda kullanılabilirliğinin sınırlı olması nedeni ile yeni kontrol algoritmaları veya performans indeksleri önermek için araştırmalarda bulunmuşlardır.

Bu tez kapsamında da incelenen yarı aktif kontrol elemanlarından özellikle magnetorheological damperler ile ilgili de literatürde bir çok araştırma bulunmaktadır. Magnetorheological damperler (MR damper) MR sıvısı ile üretilen yarı aktif kontrol elemanlarındanır. MR sıvısı ise manyetik alan etkisinde milisaniyeler içerisinde sıvı formunu değiştirip viskoplastik davranış gösterebilen bir malzemedir (Carlson 1994; Gavin 2001, Snyder ve diğ. 2001). MR sıvıları milisaniyeler içerisinde 80 Kpa değerine kadar akma dayanımı gösterebilme özelliğine sahiptirler. Magnetorheological damperlerin özellikle aktif kontrol elemanlarına göre düşük enerji tüketme özellikleri ve gerçek zamanlı olarak ayarlanabilir olmaları onları çok önemli bir araştırma konusu haline getirmiştir (Symans ve diğ. 1999; Xu ve diğ. 2005; Erkus ve Johnson 2011). Carlson ve Spencer (1996) çalışmalarında sismik titreşimlerin azaltılmasında 20 tonluk bir MR damper tanımlamışlardır. Spencer ve diğ. (1997) Bouc Wen histeretik modelini kullanarak MR damperler için quasi statik bir model geliştirmişlerdir ayrıca ile geri besleme ile bütünleşik doğrusal bir optimal kontrol önerisinde bulunmuşlardır analitik olarak da bu kontrol sisteminin aktif kontrol sistemlerinin performansından daha iyi bir performans sergileyebileceğini belirtmişlerdir. Dyke ve diğ. (1996) çalışmalarında deneysel olarak sismik titreşimlerin kontrolunda MR damperlerin etkinliğini göstermişlerdir ayrıca ‘clipped optimal control’ adını verdikleri ivmelerin algoritmaya giriş verisi olarak tanımlandığı bir yarı aktif kontrol modeli önermişlerdir. Altı katlı küçük bir deney numunesi olarak ölçeklendirilmiş yapıya MR damper eklenmesi durumunda yapının davranışı sarsma tablasında deneysel olarak incelenmiştir (Yi ve diğ. 1998; Yi ve Dyke 2000). Bu çalışmada MR damperlerinde ‘clipped optimal control’ ve Lyapunov esaslı iki yarı aktif kontrol modeli de denenmiş olup, MR damperlerin pasif sistemlere olan üstünlükleri

belirtilmiştir. Yang ve diğ. (2004) çalışmalarında gerçek ölçekli MR damper ler için ‘phenomenological model’ adını verdikleri bir yarı aktif kontrol kuvveti modeli önermişlerdir bu modelin MR damperlerin tepki sürelerini azalttığını belirtmişlerdir. MR damperlerin yapılarda oluşan sismik etkilerin azaltılmasında etkinlikleri 2000 li yılların başından itibaren bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Xu ve diğ. 2000; Zhou ve diğ. 2003; Choi ve Lee 2001; Ribakov 2002; Spencer ve diğ. 2002). Fujitani ve diğ. (2004) taban izolasyonunda MR damper kullanımını incelemiştir. Barroso ve diğ. (2002) farklı depremler etkisinde yapılara eklenen MR damperlerin performansını incelemek için analitik bir çalışma yapmışlardır. Ochiuzzi (2003 & 2005) MR damperlerin davranışını inceledikleri büyük ölçekli deneyler gerçekleştirmiş olup MR damperin Bingham kontrol kuvveti modelini temel alarak basit bir yarı aktif kontrol algoritması önermiştir. MR damperlerin doğrudan yük veren (actuator) olarak kullanıldığı çalışmalar da (doğrudan yapının iki noktasını birleştiren elemanlar) incelenmiştir (Spencer ve diğ. 2002; Dyke ve diğ. 1996). MR damperlerin doğrudan yük veren olarak kullanılması için büyük MR damperlerin yapıya katlar arası diyagonal elemanlar olarak yerleştirilmesi gerekir. Bu düzende kullanım da gerçek zamanlı simülasyonlar ile test edilmiş ve başarılı sonuçlar vermiştir (Christenson ve diğ. 2008). Jung ve diğ. (2004) , Jansen ve Dyke (2000) MR damper lerin inşaat mühendisliğinde uygulamalarıyla ilgili bir araştırma yapmışlardır. En önemli MR damper modelleri 2 kategoriye ayrılır birinci kategori parametrik modellerdir Bingham, Bouc Wen ve bu modellerin genişletilmiş versiyonu olan modeller (Kamath ve Werely, 1997). İkinci kategori olarak MR damperlerin kuvvet modelleri için de parametrik olmayan modeller vardır. Bunlar yapay sinir ağları, bulanık mantık yaklaşımlarından türetilmiş modellerdir. Modele bağlı olan kontrolörler dört gruba ayrılır; birinci grup ‘clipped optimal algoritmaları’, LQG kazanç matrisinin ve açık kapalı çevrim kombinasyonu olan modelleri içerir (Dyke ve diğ. 1996; Yi ve diğ. 1998 & 2001, Dyke ve Spencer 1996) . İkinci grup ise Lyapunov esaslı kontroldür (Dyke ve Spencer 1997; Yi ve diğ. 2001; Wang ve Gordaninejad 2002). Üçüncü grup stokastik kontrol esaslı dinamik programlamadır (Ni ve diğ. 2002). Dördüncü grup ise kayıcı mod kontrolü olarak da adlandırılan ‘robust control veya sliding mode control’ dur. Moon ve diğ. (2002), sismik etkiler altındaki kablolu köprülerle doğrudan yük veren MR damper kullanımı durumunda simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Yapay sinir ağları yaklaşımı da kabloların titreşim kontrol için MR damper uygulamalarında da araştırmalarda kullanılmıştır (Xu 2005).

Yapı ve damper sistemi ile ilgili önceki bilgilere gerek duymayan bulanık mantık esaslı kontrollörler de literatürde araştırılmıştır (Zhou ve diğ. 2003). Bulanık mantık ve yapay sinir ağı esaslı kontrollörlerin performans karşılaştırmaları da literatürde sadece nümerik simülasyonlar ile incelenmiştir (Ni ve diğ. 2002). Son yıllarda MR damperler için yeni bir doğrudan adaptiv kontrol yöntemi ve tahmine dayalı modal bir kontrol yöntemi önerilmiştir (Bitaraf ve diğ. 2012; Xu ve Li 2011).

MR damperlerin yapıların deprem rüzgar gibi etkilere karşı korunmasında kullanımı ile ilgili çalışmalarda genel olarak kullanılan yarı aktif kontrol kuvvet modelleri Bouc-Wen modelinden türetilmiş değişik versiyonlardır (Erkus ve Johnson 2011; Yi ve diğ. 2001; Motra ve diğ. 2011). Hiemenz ve diğ. (2003) ‘sky-hook control’ , clipped optimal lineer regülatör kontrolü ve kayıcı mod kontrolünü 3 katlı bir yapıda MR damper kullanımı için karşılaştırmış kayıcı mod kontrolünün diğer kontrollörlerden enerji tüketimi yönünden daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir. MR damper sistemleri için kayıcı mod kontrol en iyi performansı gösteren kontrol tekniği olarak gözükmektedir. Ancak MR damper kontrol kuvveti modellerinin ilgili terimlerinin matematiksel olarak tersinin alınamıyor oluşu bu nedenle de kayıcı mod kontrolünün sadece bir kısmının kullanılabiliyor olması MR damper sistemlerinin performansını azaltmaktadır.

MR damperler ile ilgili en iyi sonuçlar katlar arası ve kat çerçeve tendonları kullanılarak elde edilmiştir. Bu da MR damperleri çok büyük, pahalı ve mevcut yapıları güçlendirmek için kullanımını çok zor hale getirmiştir. MR damper kullanımı taban izolasyon sistemleri için de önerilmiştir (Narasimhan ve diğ. 2006; Chang ve diğ. 2008; Erkus ve Johnson 2011). Sismik kontrol için gerçek hayatta MR damper uygulamalarının örneklerinden bazıları Japonyadaki Miraikan ulusal müzesinde 2001 yılında 30 tonluk 2 MR damper eklenerek ve Santiago Şili’de 160 tonluk ayarlı kütleli MR damper eklenerek inşa edilmiştir (Zemp ve diğ. 2011 a&b).

Bu doktora tezi kapsamında öncelikle aktif , pasif ve bu iki değişik kontrolün beraber kullanıldığı hibrid kontrol elemanlarının yapılarda kullanılması durumunda yapıda meydana gelen enerji dağılımları incelenmiş bu enerji dağılımları yorumlanmıştır. Kontrol elemanları olarak yapıda taban izolasyonu, pasif kütle sönümleyicisi ve aktif kütle sönümleyicisi kullanılmıştır. Bunlara ek olarak da klasik doğrusal optimal kontrolün temel elemanlarından kazanç matrisinden yararlanılarak yapılara

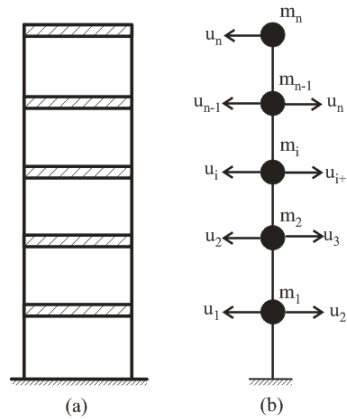
eklenecek ek sönüm ve rijitliğin bulunması için basit bir yöntem de geliştirilmiştir. Tam optimal rijitlik ve sönüm matrisleri direk olarak yapının sönüm ve rijitlik matrislerine eklenemeyeceği için yarıoptimal rijitlik ve sönüm parametrelerini elde etmek için çeşitli yaklaşık yöntemler önerilmiştir. Eklenecek pasif parametreler yarı optimal olarak bulunduğu için bu sistemler pasif sistem olarak tanımlanabilir dolayısıyla bu sistemin dinamik yüklere adapte olabilme imkanı yoktur. Çeşitli depremler etkisinde kontrolsüz yapı titreşimlerini azaltabilen bu yöntemin efektifliği deprem etkisine göre azalabilmektedir. Bu nedenle bu doktora tezi kapsamında ikinci olarak aktif kontrol uygulamalarında kullanılabilecek sismik enerji teriminin de göz önüne alındığı yeni bir aktif kontrol performans indeksi önerilmiştir. Bu performans indeksinde yapının mekanik enerjisi, sismik enerjisi ve kontrol enerjisi aynı anda minimize edilmektedir dolayısıyla performans indeksinde çapraz terimler bulunmaktadır. Önerilen performans indeksi sismik enerji terimi nedeni ile deprem etkisini bir nevi içerse de bu performans indeksi kullanılarak elde edilen kapalı çevrim optimal kontrol algoritması deprem değerlerinin tümünün bilinmesini gerektirmez. Önerilen yöntemler gerçek deprem kayıtları etkisi altında denenmiş sonuçlar ve yorumlar sunulmuştur. Tez kapsamında son olarak yarı aktif kontrol elemanlarından en yaygın kullanılan magnetorheological sönümleyicilerin sismik etki altındaki yapılarda kullanımı ile ilgili bazı incelemeler de yapılmıştır.

2. ÇOK KATLI AKTİF VEYA PASİF KONTROL UYGULANMIŞ YAPILARDA ENERJİ DAĞILIMLARI

Bu kısımda kontrol uygulanmış çok katlı kayma binası tipi yapıların hareket ve enerji denklemleri sayısal integrasyon yöntemlerinden biri kullanılarak çözülecektir. Aşağıdaki kısımlarda problemin formülasyonu ve kullanılacak sayısal yöntemler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

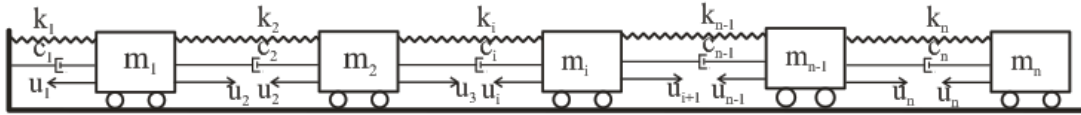
2.1 Hareket Denkleminin Formülasyonu

Çok katlı bir binada döşeme rijitliklerini sonsuz alıp sadece kolonların rijitliklerinin göz önüne alındığı binalara kayma binası adı verilmektedir. Bir kayma binası Şekil 2.1(a) 'da görülmektedir. Bu bina Şekil 2.1(b)'de görüldüğü gibi idealize edilebilir. Yapının kayma binası şeklinde modellenmesindeki amaç çok serbestlik dereceli yapıların dinamik analizlerde hareket denklemlerini adım adım integre edip yapının doğrusal olmayan karakteristiklerini kolayca göz önüne almaktır, (Chopra 1995). Burada m_i ile gösterilen ifadeler kat kütlelerini, u_i ile gösterilen kuvvetler ise katlara etkiyen kontrol kuvvetlerini ifade etmektedir burada $i=1,2,3,...n$ şeklinde bir sayıdır. Burada n sistemin serbestlik derecesini ifade etmektedir. Kolonlar esnek ve iç sönümleri bulunmaktadır.

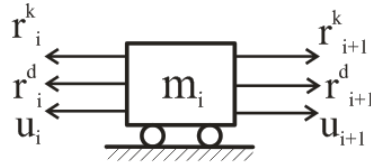


Şekil 2.1 : Kayma Binası.

Kayma binası düşünce kolaylığı bakımından Şekil 2.2’de görüldüğü gibi idealize edilebilir. Şekil 2.2’de görülen sistemde i nolu elemanın serbest cisim diyagramı Şekil 2.3’de görülmektedir. Şekilde görülen; r_i^d , sönüm kuvvetlerini, r_i^k , geri çağırıcı yay kuvvetlerini, u_i ise kontrol kuvvetlerini göstermektedir. Bu kuvvetler zamanın fonksiyonlarıdır. Ayrıca bu çalışmada sönüm kuvvetleri hızın, geri çağırıcı kuvvetler ise yer değiştirmenin fonksiyonu kabul edilecektir. Kayma binası Şekil 2.2’de görüldüğü gibi yaylardan ve sönüm elemanlarından oluşan sistem ile idealize edilebilir. Şekil 2.2’de görülen sistemde i nolu elemanın serbest cisim diyagramı Şekil 2.3’de görülmektedir. Şekilde görülen; r_i^d , sönüm kuvvetlerini, r_i^k , geri çağırıcı yay kuvvetlerini, u_i ise kontrol kuvvetlerini göstermektedir. Bu kuvvetler zamana bağlı fonksiyonlardır.



Şekil 2.2 : İdealize Edilmiş Kayma Binası.



Şekil 2.3 : Tekil Kayma Binası Elemanı.

Şekil 2.3’de görülen eleman üzerinde dinamik denge denklemi yazıldığında aşağıda verilen bağıntı elde edilir.

$$m_i \ddot{x}_i = r_{i+1}^d - r_i^d + r_{i+1}^k - r_i^k + u_{i+1} - u_i \quad (2.1)$$

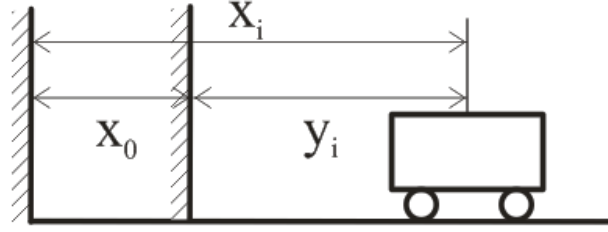
Yukarıda verilen denklem aşağıda verilen (2.2) denklemi kullanılarak denklem 2.3 deki şekilde yazılabilir.

$$f_i^d = r_{i+1}^d - r_i^d \quad f_i^k = r_{i+1}^k - r_i^k \quad (2.2)$$

$$m_i \ddot{x}_i + f_i^d + f_i^k = u_{i+1} - u_i \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)’de (" $\ddot{x}_i$ ") rölatif ivmeyi ifade etmektedir. Sistemin mesneti Şekil 2.4’de görüldüğü gibi hareketli olarak düşünüldüğünde y_i değerleri hareketli

mesnetten itibaren ölçülmek üzere $x_i = x_0 + y_i$ yazılır. Bu değer (2.3) denkleminde yerine konulduğunda (2.4a) ve (2.4b)'de verilen bağıntı elde edilir.



Şekil 2.4 : Hareketli Mesnet Hali.

$$m_i \ddot{y}_i + f_i^d(\dot{y}_i) + f_i^k(y_i) = -m_i \ddot{x}_0 + u_{i+1} - u_i \quad (i = 1, n-1) \quad (2.4a)$$

$$m_n \ddot{y}_n + f_n^d(\dot{y}_n) + f_n^k(y_n) = -m_n \ddot{x}_0 - u_n \quad (2.4b)$$

yukarıdaki denklemde görülen $\ddot{x}_0$ terimi bir boyutlu depremin ivmesini göstermektedir, bu bağıntılar matris formunda (2.5) denkleminde verilmiştir.

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{F}^d(t) + \mathbf{F}^k(t) = -\mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0 + \mathbf{L} \mathbf{U} \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklemde görülen; $\mathbf{M}$ kütle matrisi ($n \times n$) boyutlu ve köşegen matristir. Hareketli takıma göre yer değiştirme vektörü $\mathbf{Y}(t)$, kontrol vektörü $\mathbf{U}(t)$, sönüm ve geri çağırma kuvvetlerini gösteren $\mathbf{F}^d(t)$, $\mathbf{F}^k(t)$ vektörleri ise n boyutlu vektörlerdir. $\mathbf{V}$ vektörü elemanları 1 olan n boyutlu bir vektördür; yani $\mathbf{V} = [1, 1, 1, \dots, 1]^T$ şeklinde bir vektördür (burada T harfi transpozeyi göstermektedir). Bu vektör yardımı ile deprem ivmesi ilgili denklemlere yerleşir. Bu vektör bir yerleştirme vektörüdür. $\mathbf{L}$ matrisi ise ($n \times r$) boyutlu yerleştirme matrisidir. Buradaki r yapıda bulunan kontrol elemanı sayısıdır. Bu matris kontrol kuvvetlerini ilgili denklemlere yerleştirir ve bu matrisin elemanları 1,0 ve -1 dir. $\mathbf{V}$ vektörü ve $\mathbf{L}$ matrisi sıra ile deprem ivmesini ve kontrol kuvvetlerini yerleştirme vektörü ve yerleştirme matrisidir. $\mathbf{U}$ vektörü ise kontrol kuvvetlerinin bulunduğu n boyutlu kontrol vektörüdür.

$\mathbf{M}$, $\mathbf{L}$ matrisi ile $\mathbf{Y}(t)$, $\mathbf{F}^d(t)$, $\mathbf{F}^k(t)$, $\mathbf{V}$, $\mathbf{U}$ vektörleri aşağıda verilen şekilde yazılırlar.

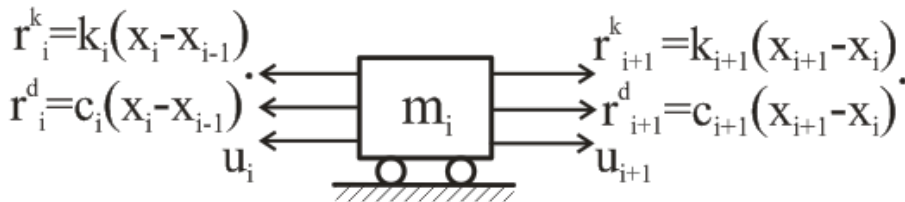
$$\begin{aligned}
\mathbf{M} &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_n \end{bmatrix} & \mathbf{Y}(t) &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} & \mathbf{F}^d(t) &= \begin{bmatrix} f_1^d \\ f_2^d \\ f_3^d \\ \dots \\ f_n^d \end{bmatrix} & \mathbf{F}^k(t) &= \begin{bmatrix} f_1^k \\ f_2^k \\ f_3^k \\ \dots \\ f_n^k \end{bmatrix} \\
\mathbf{V} &= \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} & \mathbf{U}(t) &= \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \dots \\ u_n \end{bmatrix} & \mathbf{L} &= \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Şekil 2.1 de verilen sisteme göre $\mathbf{L}$ matrisi yukarıda verilen şekildedir. Kontrol kuvvetleri Şekil 2.1 den farklı yerleşir ve sayısı r ($r \leq n$) olabilir. Genel olarak $\mathbf{L}$ matrisi ($n \times r$) boyutunda bir matristir. Bu durumda $\mathbf{U}$ kontrol vektörünün boyutu da r dir.

2.1.1 Doğrusal hal

Bu kısımda sönüm ve yay kuvvetlerinin, hıza ve yer değiştirmeye doğrusal olarak bağlı olması halinde temel bağıntıların alacağı şekil incelenecektir. Yay ve sönüm kuvvetleri yer değiştirmeye ve hıza doğrusal bağlı olduğunda i nolu kütlenin altında bulunan kolonun yay katsayısı k_i ve sönüm katsayısı c_i olsun; Şekil 2.1b ve şekil 2.3. Bu durumda Şekil 2.5’de görülen m_i kütlesine etkiyen kuvvetler aşağıda verilen şekildedir. Aşağıdaki ifadelerde $(\dot{})$ ifadesi parantez içerisindeki denklemin türevi anlamına gelmektedir.

$$\begin{aligned}
r_i^d[\dot{x}(t)] &= c_i(x_i - x_{i-1}) & r_{i+1}^d[\dot{x}(t)] &= c_{i+1}(x_{i+1} - x_i) \\
r_i^k[x(t)] &= k_i(x_i - x_{i-1}) & r_{i+1}^k[x(t)] &= k_{i+1}(x_{i+1} - x_i)
\end{aligned} \tag{2.7}$$



Şekil 2.5 : Doğrusal halde serbest cisim diyagramı.

Hareket denklemleri şekil 2.5’den aşağıda verilen şekilde yazılır.

$i=1$ için

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_1 \dot{x}_1 + k_2(x_2 - x_1) - k_1 x_1 + u_2 - u_1 \\ m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 &= u_2 - u_1 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$i=n$ için

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x}_n &= -c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n(x_n - x_{n-1}) - u_n \\ m_n \ddot{x}_n - c_n \dot{x}_{n-1} + c_n \dot{x}_n - k_n x_{n-1} + k_n x_n &= -u_n \end{aligned} \quad (2.9)$$

Sistemin mesneti Şekil 2.4’de görüldüğü gibi hareketliyse y_i değerleri hareketli mesnetten itibaren ölçülmek üzere, daha önceden belirtildiği gibi

$$x_i = x_0 + y_i \quad (2.10)$$

dir. Bu eşitlikten

$$\begin{aligned} x_i - x_{i-1} &= y_i - y_{i-1} & x_{i+1} - x_i &= y_{i+1} - y_i \\ (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) &= (\dot{y}_i - \dot{y}_{i-1}) & (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) &= (\dot{y}_{i+1} - \dot{y}_i) \\ \ddot{x}_i &= \ddot{x}_0 + \ddot{y}_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

yazılır. Bu eşitlik yukarıda verilen (2.9) ve (2.10) denklemleri ve (2.8) denkleminde yerine konulduğunda aşağıda verilen bağıntılar elde edilir.

$$\begin{aligned} m_i \ddot{y}_i - c_i \dot{y}_{i-1} + (c_i + c_{i+1}) \dot{y}_i - c_{i+1} \dot{y}_{i+1} - k_i y_{i-1} + (k_i + k_{i+1}) y_i - k_{i+1} y_{i+1} \\ = -m_i \ddot{x}_0 + u_{i+1} - u_i \end{aligned} \quad (i = 2, n-1) \quad (2.12)$$

$i=1$ için

$$\begin{aligned} m_1(\ddot{x}_0 + \ddot{y}_1) &= c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k_2(x_2 - x_1) - k_1(x_1 - x_0) + u_2 - u_1 \\ m_1 \ddot{y}_1 + (c_1 + c_2) \dot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 + (k_1 + k_2) y_1 - k_2 y_2 &= -m_1 \ddot{x}_0 + u_2 - u_1 \end{aligned} \quad (2.13)$$

$i=n$ için

$$\begin{aligned} m_n \ddot{x}_n &= -c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n(x_n - x_{n-1}) - u_n \\ m_n \ddot{y}_n - c_n \dot{y}_{n-1} + c_n \dot{y}_n - k_n y_{n-1} + k_n y_n &= -m_n \ddot{x}_0 - u_n \end{aligned} \quad (2.14)$$

Yukarıda elde edilen denklemler matris formunda

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{Y}(t) = -\mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{f}(t) + \mathbf{L} \mathbf{U} \quad , \quad \ddot{f}(t) = \ddot{x}_0 \quad (2.15)$$

şeklinde yazılır. Burada görülen $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ matrisleri aşağıda verilmiştir; diğer matrisler denklem 2.6 da tanımlıdır.

$$\begin{aligned}
C &= \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -c_n \\ 0 & \dots & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix} \\
K &= \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & \dots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \dots & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -k_n \\ 0 & \dots & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.16}$$

Yapı sistemlerinde genellikle sönüm, viskoz sönüm alınmakla birlikte geri çağırıcı kuvvet doğrusal alınmayıp hareket denklemi aşağıda verilen şekilde yazılmaktadır.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{F}^k(t) = -\mathbf{M}\mathbf{V}f(t) + \mathbf{L}\mathbf{U} \quad f(t) = \ddot{x}_0 \tag{2.17}$$

Yapılarda dış sönüm olabilir. Genellikle dış sönüm katların birbirlerine göre yer değiştirmesine bağlı olmayıp şeklindedir. Bu durumda (2.16) denklemi ile verilen C matrisi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + c_1^* & -c_2 & 0 & \dots & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 + c_2^* & -c_3 & \dots & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 + c_3^* & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -c_n \\ 0 & \dots & 0 & -c_n & c_n + c_n^* \end{bmatrix} \tag{2.18}$$

2.1.2 İkinci mertebeden hareket denkleminin birinci mertebeden denkleme indirgenmesi

Yukarıda (2.15) ile verilen ikinci mertebeden diferansiyel denklem durum vektörü yardımı ile birinci mertebeden diferansiyel denklem olarak yazılabilir. Durum vektörü olarak $2n$ boyutlu $\mathbf{Z}(t)$ vektörü

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(t) \\ \dot{\mathbf{Y}}(t) \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

şeklinde yazılabilir. Durum vektörü kullanılarak (2.15) denklemi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{H}f(t) \quad \mathbf{Z}(0) = \mathbf{Z}_0 \quad (2.20)$$

Yukarıdaki denklemde $\mathbf{U}(n)$ boyutlu kontrol kuvveti vektörüdür. Burada bulunan $\mathbf{A}(2n \times 2n)$, $\mathbf{B}(n \times 2n)$ matrisleri ve $\mathbf{H}(2n)$ vektörü aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{L} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

(2.21) denkleminde $\mathbf{I}$ ($n \times n$) boyutlu birim matrisi $\mathbf{V}$ ise $[1, 1, \dots, 1]^T$ şeklinde elemanları 1 olan n boyutlu vektörü temsil etmektedir.

2.2 Kontrol Algoritması

Yukarıda verilen (2.20) denkleminde bulunan $\mathbf{U}(t)$ kontrol kuvveti belirlenmesi için bir kontrol algoritması seçilmesi gerekir. Kontrol kuvveti belirlendikten sonra (2.20) denklemi çözülür. Algoritma olarak; klasik doğrusal optimal kontrol algoritması ile ani optimal kontrol algoritması göz önüne alınacaktır.

2.2.1 Klasik doğrusal optimal kontrol algoritması

Bu algorithmada performans indeksi

$$J = J_1[\mathbf{Z}(t_0), \mathbf{Z}(t_f), t_0, t_f] + \int_{t_0}^{t_f} J_2(\mathbf{Z}, \dot{\mathbf{Z}}, \mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}, t) dt \quad (2.22)$$

şeklinde olup yapısal kontrolda performans indeksi kuadratik formda

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [\mathbf{Z}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{U}(t)] dt \rightarrow \min \quad (2.23)$$

şeklinde seçilir. Burada $\mathbf{Q}$ matris ($2n \times 2n$) boyutunda pozitif semidefinit, $\mathbf{R}$ ise ($r \times r$) boyutunda pozitif definit matristir. Bunlar ağırlık matrisleri olarak isimlendirilirler. Bunları şiddetleri durum değişkenlerinin kontrol kuvvetleri göre önemini belirtir. $\mathbf{Q}$ matrisinin elemanları $\mathbf{R}$ matrisinin elemanlarına göre büyük seçilirse sistemin yanıtının küçültülmesi kontrol kuvvetlerine göre daha önemlidir. Aksi durumda kontrol kuvvetlerinin küçük olması daha önemlidir.

Yukarıda verilen (2.20) denkleminin (2.23) şartı altında çözümü için $\lambda(t)$, Langrange çarpanı kullanılarak problemin Hamiltonyeni

$$H = \mathbf{Z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{U}(t) + \boldsymbol{\lambda}^T(t)[\mathbf{A}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{H}f(t)] \quad (2.24)$$

şeklinde yazılır. Optimal çözüm için bu Hamiltonyen kullanılarak

$$\dot{\mathbf{Z}}^*(t) = \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}^*} = \mathbf{A}\mathbf{Z}^*(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}^* + \mathbf{H}f(t) \quad (2.25)$$

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}^* = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{Z}^*} = -2\mathbf{Q}\mathbf{Z}^*(t) - \mathbf{A}^T \boldsymbol{\lambda}^*(t) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{U}^*} = 0 = 2\mathbf{R}\mathbf{U}^*(t) + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda}^*(t) \quad (2.27)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^*(t_f) = 0 \quad (2.28)$$

bağıntıları bulunur. Yukarıdaki bağıntılarda verilen $\mathbf{Z}^*$, $\mathbf{U}^*$ ve $\boldsymbol{\lambda}^*$ değerleri problemin optimal değerleridir. Optimal kontrol kuvveti yukarıdaki (2.27) denkleminde aşağıda verilen şekilde bulunur.

$$\mathbf{U}^* = -\frac{1}{2}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda}^* \quad (2.29)$$

2.2.1.1 Kapalı çevrim

Bu algorithma performans indeksi

$$\boldsymbol{\lambda}^* = \mathbf{P}(t)\mathbf{Z}^*(t) \quad (2.30)$$

şeklinde bağlıdır. Burada görülen bilinmeyen $\mathbf{P}(t)$ matrisi bulmak için yukarıda verilen (2.30) bağıntısı ile (2.26),(2.27) bağıntıları kullanılarak

$$\begin{aligned} [\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) + 2\mathbf{Q}]\mathbf{Z}^*(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{H}f(t) &= 0 \\ \mathbf{P}(t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (2.31)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının her $\mathbf{Z}^*(t)$ için sıfır olması için $f(t)=0$ alınarak

$$\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) + 2\mathbf{Q} = 0 \quad \mathbf{P}(t_f) = 0 \quad (2.32)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem bir Rikkati diferansiyel denklemdir ve $\mathbf{P}(t)$ matrisi Rikkati matrisi olarak isimlendirilir. Rikkati denklemi zamana göre geriye doğru çözülecektir. Çözüm $f(t)=0$ dan dolayı tam anlamıyla optimal değildir. Beyaz gürültü

hallerinde bu kabul yapılabilir (Soong, 1990; Kwakernaak ve Sivan, 1972; Yang, 1975).

Yukarıdaki (2.32) denkleminde $\mathbf{P}(t)$ bulunduktan sonra kontrol kuvveti aşağıda verilen şekilde elde edilir.

$$\mathbf{U}^* = -\frac{1}{2}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t)\mathbf{Z}^*(t) \quad (2.33)$$

Yapısal kontrol hesaplarında Rikkati matrisi sabit gidip $t=t_f$ ye yaklaşınca aniden sıfır olmaktadır. Bu nedenle (2.29) denkleminde Rikkati matrisinin türevi ihmal edilerek denklem aşağıda verilen şekilde kullanılabilir.

$$\mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) + 2\mathbf{Q} = 0 \quad \mathbf{P}(t_f) = 0 \quad (2.34)$$

İlerde yapılacak hesaplarda yukarıda bahsedilen basitleştirici yaklaşım kullanılmayacaktır.

2.2.1.2 Kapalı-Açık çevrim ve açık çevrim:

Bu çevrimde kontrol vektörü durum vektörü ile

$$\boldsymbol{\lambda}^* = \mathbf{P}(t)\mathbf{Z}^*(t) + \mathbf{q}(t) \quad (2.35)$$

şeklinde bağlıdır. Burada görülen bilinmeyen $\mathbf{P}(t)$ matrisi bulmak için yukarıda verilen bağıntı (2.25),(2.26) denklemlerine konularak (2.28) e benzer şekilde

$$\begin{aligned} & [\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) + 2\mathbf{Q}]\mathbf{Z}^*(t) + \\ & + \dot{\mathbf{q}}(t) - [\frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T - \mathbf{A}^T]\mathbf{q}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{H}\mathbf{f}(t) = 0 \quad (2.36) \\ & \mathbf{P}(t_f) = 0 \quad \mathbf{q}(t_f) = 0 \end{aligned}$$

bağıntısı elde edilir. Yukarıdaki denklemler her t anında

$$\begin{aligned} & [\dot{\mathbf{P}}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P}(t) + \mathbf{A}^T\mathbf{P}(t) + 2\mathbf{Q}] = 0 \\ & \dot{\mathbf{q}}(t) - [\frac{1}{2}\mathbf{P}(t)\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T - \mathbf{A}^T]\mathbf{q}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{H}\mathbf{f}(t) = 0 \quad (2.37) \end{aligned}$$

denklemlerinin

$$\mathbf{P}(t_f) = 0 \quad \mathbf{q}(t_f) = 0 \quad (2.38)$$

şartları altında çözümü ile sağlanır.

Yukarıda verilen (2.35) ifadesinde λ değeri (2.29) da yerine konulduğunda

$$\mathbf{U}^*(t) = -\frac{1}{2}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T[\mathbf{P}(t)\mathbf{Z}^*(t) + \mathbf{q}(t)] \quad (2.39)$$

elde edilir. Bu değer (2.35)'de yerine konulduğunda kapalı-açık döngüye ait hareket denklemi aşağıda verilen şekilde elde edilir.

$$\dot{\mathbf{Z}}^*(t) = (\mathbf{A} - \frac{1}{2}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{P})\mathbf{Z}^*(t) - \frac{1}{2}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{q}(t) + \mathbf{H}f(t) \quad \mathbf{Z}^*(0) = 0 \quad (2.40)$$

Kapalı-açık çevrim kapalı çevrime göre daha iyidir çünkü denklemde deprem etkisi bulunmaktadır. Buna karşın (2.40) bağıntısı geriye doğru çözülmesi gerekir geriye doğru çözüm yapılırken deprem etkisi henüz belli olmadığından elde edilen çözüm optimal değildir.

Buna karşın depremin yakın gelecekteki değeri tahmin edilerek problem yakın gelecek için çözülür. Daha sonra yakın gelecek bilindiğinden tekrar yakın gelecek tahmin edilerek problem adım adım çözülür, (Bakioğlu ve Aldemir, 2001).

2.2.2 Ani doğrusal optimal kontrol algoritması

Bu algoritma deprem etkilerinin önceden bilinmemesi nedeniyle ortaya çıkan güçlüğü yenmek için geliştirilmiştir (Yang ve diğ, 1987; Akhiev ve diğ, 2002). Minimize edilecek zamana bağlı performans indeksi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$J = \mathbf{Z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t)\mathbf{R}\mathbf{U}(t) \rightarrow \min \quad (2.41)$$

Problemin temel denklemi (2.41) de verilmektedir. (2.41) de görülen $\mathbf{A}$ matrisinin özdeğerleri ayrık olsun ve bunlara karşı gelen özvektörlerinden teşkil edilen $(2n \times 2n)$ boyutlu modal matris $\mathbf{T}$ olsun. Bu durumda $\mathbf{Z}$ vektörü

$$\mathbf{Z} = \mathbf{T}\mathbf{X}(t) \quad (2.42)$$

şeklinde yazılır. Bu şekilde tanımlanan $\mathbf{Z}$ vektörü (2.20) denkleminde kullanılarak elde edilen denklemin düzenlenmiş hali aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{Z}}(t) &= \mathbf{T}\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{T}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{H}f(t) \rightarrow \\ \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}\mathbf{X}(t) + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{H}f(t) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Yukarıda verilen denklemde görülen $\mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T}$ terimi, $\mathbf{A}$ matrisinin Λ spektral matrisidir. Λ spektral matrisi bir köşegen matris olup köşegen elemanları $\mathbf{A}$ matrisinin özdeğerleridir. Λ köşegen matrisi (spektral matris) kullanılarak (2.43) denklemi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{X}}(t) &= \Lambda \mathbf{X}(t) + \mathbf{q}(t) & \mathbf{X}(0) &= 0 \\ \Lambda &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} & \mathbf{q}(t) &= \mathbf{T}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{T}^{-1}\mathbf{H}f(t)\end{aligned}\quad (2.44)$$

Yukarıda bulunan diferansiyel denklemin çözümü

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(t) &= \mathbf{e}^{\Lambda t}\mathbf{X}(0) + \int_0^t \mathbf{e}^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{q}(\tau)d\tau = 0 + \int_0^t \mathbf{e}^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{q}(\tau)d\tau \\ \mathbf{X}(t) &= \int_0^{t-\Delta t} \mathbf{e}^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{q}(\tau)d\tau + \int_{t-\Delta t}^t \mathbf{e}^{\Lambda(t-\tau)}\mathbf{q}(\tau)d\tau\end{aligned}\quad (2.45)$$

dir. Yukarıda verilen eşitlikte birinci terim farklı şekilde yazılarak, ikinci terim ise yaklaşık integrasyon (Trapez kuralı) kullanılarak aşağıda verilen bağıntı bulunur.

$$\mathbf{X}(t) \approx \mathbf{e}^{\Lambda t}\mathbf{X}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{e}^{\Lambda \Delta t}\mathbf{q}(t-\Delta t) + \mathbf{q}(t)] \quad (2.46)$$

Burada $\mathbf{e}^{\Lambda t}$ matrisi köşegen bir matris olup köşegen elemanları $\lambda_i \Delta t$ ($i=1, 2n$ kadar olup $\mathbf{A}$ matrisinin özdeğerleridir) dir. Yukarıda verilen denklemde $\mathbf{Z}=\mathbf{T}\mathbf{X}(t)$ ve (2.46) denkleminde verilen $\mathbf{q}(t)$ nin tanımı kullanıldığında aşağıda verilen bağıntı bulunur.

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{T}\mathbf{D}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{B}\mathbf{U}(t) + \mathbf{H}f(t)] \quad (2.47)$$

$$\mathbf{D}(t-\Delta t) = \exp(\Lambda \Delta t)\mathbf{T}^{-1} \left\{ \mathbf{Z}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{B}\mathbf{U}(t-\Delta t) + \mathbf{H}f(t-\Delta t)] \right\} \quad (2.48)$$

Problemin Hamiltonyeni ve optimum şartları

$$\mathbf{X}(t) \approx \mathbf{e}^{\Lambda t}\mathbf{X}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{e}^{\Lambda \Delta t}\mathbf{q}(t-\Delta t) + \mathbf{q}(t)] \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \mathbf{Z}^*} = 0 \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{U}^*} = 0 \quad \frac{\partial H}{\partial \boldsymbol{\lambda}^*} = 0 \quad (2.50)$$

dir. Bu şartlar kullanılarak aşağıda verilen bağıntılar elde edilir.

$$\begin{aligned}
2\mathbf{Q}\mathbf{Z}^* + \boldsymbol{\lambda}^*(t) &= 0 \\
2\mathbf{R}\mathbf{U}^* - \frac{\Delta t}{2}\mathbf{B}^T\boldsymbol{\lambda}^*(t) &= 0 \\
\mathbf{Z}^* &= \mathbf{T}\mathbf{D}^*(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2}[\mathbf{B}\mathbf{U}^*(t - \Delta t) + \mathbf{H}f(t - \Delta t)]
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Kapalı döngü için

$$\boldsymbol{\lambda}^*(t) = \mathbf{P}\mathbf{Z}(t) \tag{2.52}$$

alalım. Bu bağıntı kullanılarak (2.51) birinci denklemden $\mathbf{P} = -2\mathbf{Q}$ bulunur. Bu değerler kullanılarak (2.51) denklemlerinden aşağıda verilen bağıntılar bulunur.

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}^* &= -\frac{\Delta t}{2}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{Q}\mathbf{Z}^*(t) \\
\mathbf{Z}^* &= [\mathbf{I} + \frac{(\Delta t)^2}{4}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{Q}]^{-1}[\mathbf{T}\mathbf{D}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2}\mathbf{H}f(t)]
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Yukarıda bulunan optimal değerler klasik kontrol bağıntılarının verdiği optimal çözüm ile karşılaştırıldığında: Rikkati denkleminin çözümü olan $\mathbf{P}$ matrisi yerine Δt $\mathbf{Q}$ terimi gelmektedir. Ayrıca ani optimal kontrol algoritmasına çözümünde Rikkati diferansiyel denkleminin çözümü yoktur.

2.3 Enerji Bağıntıları

Yapısal kontrol uygulanan bir sistemde enerji bağıntılarını elde etmek için (2.5) denklemini soldan hız vektörünün transpozesi olan $\dot{\mathbf{Y}}^T(t)$ ile çarpıp $(0, t)$ aralığında integre edilirse

$$\begin{aligned}
\int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau)\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}(\tau)d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau)\mathbf{F}^d(\tau)d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau)\mathbf{F}^k(\tau)d\tau \\
= -\int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau)\mathbf{M}\mathbf{V}\ddot{x}_0d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau)\mathbf{L}\mathbf{U}d\tau
\end{aligned} \tag{2.54}$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıdaki birinci terimi başka formda yazmak için

$$(\dot{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M}\dot{\mathbf{Y}}) = \ddot{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M}\dot{\mathbf{Y}} + \dot{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} \tag{2.55}$$

bağıntısı göz önüne alınırsa, bağıntının sol taraftaki ilk terimi skaler büyüklük olduğu için transpozesi kendisine eşit olup $(\ddot{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M}\dot{\mathbf{Y}})^T = \dot{\mathbf{Y}}^T\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}}$ dir. Ayrıca ve bu terimin transpozesi alındığında

$$(\ddot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}})^T = \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M}^T \ddot{\mathbf{Y}} = \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}} \quad (2.56)$$

sonucu bulunur. Bu iki sonuçtan (2.55) ile verilen bağıntının sağ tarafındaki terimlerin birbirlerine eşit olduğu görülür. Sonuç olarak (2.55) bağıntısı

$$(\dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}}) = 2 \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}} \quad (2.57)$$

şeklinde yazılır. Bu sonuç kullanılarak (2.54) denklemindeki kinetik enerjiyi ifade eden E_{kin} olarak tanımlanan birinci terimi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$E_{kin} = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{Y}}(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{2} [\dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}}(\tau)] d\tau = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}^T(t) \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}}(t) \quad (2.58)$$

Bulunan bu bağıntıdaki E_{kin} değeri kat kütlelerinin hareketli zemine göre bağlı kinetik enerjilerinin toplamını göstermektedir.

Yukarıda verilen (2.54) bağıntısının ikinci terimi sönüm enerjisini verecektir. Sönüm enerjisi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$E_{sön} = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^d(\tau) d\tau \quad (2.59)$$

Yukarıda verilen (2.54) bağıntısının üçüncü terimi şekil değiştirme enerjisidir. Şekil değiştirme enerjisi ise aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$E_{şek} = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^k(\tau) d\tau \quad (2.60)$$

Sistem doğrusal elastik ise; yani $\mathbf{F}^k = \mathbf{K} \mathbf{Y}$ ise aşağıda verilen ve kinetik enerji bağıntısının elde edilmesine benzer yol izlenerek integral sonucu bulunur. Bunun için

$$(\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{Y}}) = \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{K} \mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{Y}} \quad (2.61)$$

bağıntısını göz önüne alalım. Bağıntının sol taraftaki ilk terim skaler büyüklük olduğu için transpozesi kendisine eşit $(\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{Y}})^T = \mathbf{Y}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{Y}}$ dir. Ayrıca bu terimin transpozesi alındığında

$$(\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \dot{\mathbf{Y}})^T = \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{K}^T \mathbf{Y} = \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{K} \mathbf{Y} \quad (2.62)$$

sonucu bulunur. Bu iki sonuçtan (2.62) ile verilen bağıntının sağ tarafındaki terimlerin birbirlerine eşit olduğu görülür. Sonuç olarak (2.62) bağıntısı

$$(\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \mathbf{Y}) = 2 \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{K} \mathbf{Y} \quad (2.63)$$

olarak yazılır. Bu sonuç kullanılarak (2.54) denklemindeki ikinci terim doğrusal elastik halde aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$E_{\text{şek}}^{\text{elas}} = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{K} \mathbf{Y}(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{2} (\mathbf{Y}^T \mathbf{K} \mathbf{Y}) d\tau = \frac{1}{2} \mathbf{Y}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{Y}(t) \quad (2.64)$$

Yukarıda verilen bağıntı sistemin tamamen elastik olması halinde geçerlidir. Sistemin şekil değiştirmeleri elastik sınırı geçmiş ise enerji ikiye ayrılabilir. Birinci kısmı geri dönebilen elastik enerji ikinci kısmı ise geri dönmeyen histeretik enerjidir. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi iki enerjinin toplamı olarak

$$E_{\text{şek}} = E_{\text{şek}}^{\text{elas}} + E_{\text{şek}}^{\text{his}} \quad (2.65)$$

şeklinde yazılır. Geri dönebilen elastik enerji ise

$$E_{\text{şek}}^{\text{elas}} = \sum_{i=1}^n \frac{f_i^k(t)}{2k} \quad (2.66)$$

şeklindedir. Burada k değeri sistemin başlangıçtaki rijidliğidir. Şekil değiştirme enerjisinde ayırım yapılırken her kat için ayrı ayrı ayırım yapmak gerekecektir. Bazı katlar elastik kalmasına karşın bazı katlarda akmalara oluşabilir.

Yukarıda verilen (2.54) denkleminin diğer terimlerine gelince denklemin sağ tarafında bulunan birinci terim binaya giren deprem enerjisidir ve bu enerjiyi E_{dep} ile gösterebilir. Son terim ise kontrol kuvvetlerinin enerjisi olup E_{kon} ile gösterilebilir. Bu enerjilerin ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$E_{\text{dep}} = - \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{\mathbf{x}}_0 d\tau \quad (2.67)$$

$$E_{\text{kon}} = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{L} \mathbf{U} d\tau \quad (2.68)$$

Bu tanımlardan sonra enerji dengesi aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$E_{\text{kin}} + E_{\text{sön}} + E_{\text{şek}}^{\text{elas}} + E_{\text{şek}}^{\text{his}} = E_{\text{dep}} + E_{\text{kon}} \quad (2.69)$$

Elastik şekil değiştirme enerjisi ile kinetik enerji, titreşim enerjisi adı altında toplanır. Bu durumda yukarıda verilen enerji bağıntısı, $E_{tit} = E_{kin} + E_{şek}^{elas}$ şeklinde titreşim enerjisi tanımlanarak

$$E_{tit} + E_{sön} + E_{şek}^{his} = E_{dep} + E_{kon} \quad (2.70)$$

şeklinde yazılır. Titreşim enerjisi sistemde depo edilen ve geri dönecek enerjidir. Histeristik enerji ise plastik enerjiyi temsil eden ve sistemin harap olmasına yol açan enerjidir.

Sisteme giren deprem enerjisi, ilk kez G.W. Housner tarafından tanımlanan (Housner, 1956)

$$V_{dep} = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (2.71)$$

bağıntısı ile hıza çevrilir. Bu hız gerçek hız olmadığından çok kez pseudo (yalancı) hız olarak isimlendirilir. Tanımlanan bu pseudo hızın zamana veya periyoda göre değişimi incelenerek sisteme giren ve sistemin taşıyabileceği enerji hakkında bilgiler edilir (Uang ve Bertero, 1990; Akiyama, 1985) Ayrıca

$$\mathbf{R} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{F}^k(t) \quad (2.72)$$

şeklinde tanımlanan kuvvetin eğimi sisteme giren enerji hakkında bilgi verir (Akiyama, 1985).

2.3.1 Mutlak hız

Yukarıda yapılan hesaplarda kullanılan koordinat takımı hareketli tabana göre tanımlanan koordinat takımıdır. Bu koordinat takımı iç sönüm ve geri çağırıcı kuvvet hesaplarına uygun koordinat takımıdır. Bazı dış sönüm tiplerinde de kullanışlı olabilir. Daha önce enerji hesaplarında elde edilen hız terimi hareketli tabana göre tanımlanan hız terimidir; yani bağıl hızdır. Dolayısıyla kinetik enerji bağıl kinetik enerjidir. Gerçekte ise mutlak hız ve mutlak kinetik enerjinin kullanılması gerekir. Genellikle literatürde yapılan hesaplarda bağıl hız kullanılmaktadır. (Chopra, 1995) bağıl hız ve yer değiştirmelerin mutlak hız ve yer değiştirmelerine göre daha anlamlı olduğunu belirtmektedir; buna karşın bu görüşünü her hangi analitik bir çalışmaya dayandırmamaktadır. Bazı yazarlar mutlak hız terimini kullanarak bazı incelemeler

yapmıştır (Akiyama, 1985). Burada çok katlı binalarda enerji ifadesi mutlak hız kullanılarak elde edilecektir.

Sistemin (2.15) ile verilen denklemi, sabit kabul edilen, x koordinatlarına göre

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{F}^d(t) + \mathbf{F}^k(t) = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (2.73)$$

şeklinde yazılır. Burada $\mathbf{X}(t)$ vektörü elemanları x_i olan vektördür. $\mathbf{X}(t)$ vektörü, hareketli takıma göre tanımlanan $\mathbf{Y}(t)$ ve depremden dolayı zeminin yer değiştirmesi x_0 arasında

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{Y}(t) + \mathbf{V}x_0 \quad (2.74)$$

bağıntı bulunmaktadır. Burada $\mathbf{V}$ vektörü elemanları 1 olan n boyutlu vektördür. (2.69) denklemi, soldan hız vektörünün transpozesi olan $\dot{\mathbf{Y}}^T(t)$ ile çarpıp $(0,t)$ aralığında integre edilirse

$$\begin{aligned} \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^d(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^k(\tau) d\tau \\ = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{L}\mathbf{U} d\tau \end{aligned} \quad (2.75)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının ilk terimi

$$I_1 = \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau = \int_0^t \frac{d\mathbf{Y}^T}{d\tau} \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau = \int_0^t d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) \quad (2.76)$$

şeklinde yazılır. $d\mathbf{Y}^T$ yerine (2.74) den eşiti yazıldığında

$$I_1 = \int_0^t d(\mathbf{X} - \mathbf{V}x_0)^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} = \int_0^t d\mathbf{X}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} - \int_0^t \mathbf{V}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} dx_0 \quad (2.77)$$

elde edilir. Yukarıda verilen denklemin birinci terimi daha önce açıklandığı gibi integrali alındığında $\ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}} / 2$ elde edilir. Bu terim mutlak kinetik enerjidir. Yukarıda verilen ifadenin ikinci integralin integrandı skaler olduğunda transpozesi kendisine eşit olup $(\mathbf{V}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}})^T = \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \mathbf{V}$ bulunur. Bu bağıntılar kullanılarak

$$I_1 = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} - \int_0^t \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} dx_0 \quad (2.78)$$

elde edilir. Bu bağıntı kullanılarak (2.75) eşitliği aşağıda verilen şekilde yazılır.

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^d(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{F}^k(\tau) d\tau \\
& = \int_0^t \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} dx_0 + \int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T(\tau) \mathbf{L} \mathbf{U} d\tau
\end{aligned} \tag{2.79}$$

Burada elde edilen kinetik enerji ve deprem enerjisi daha önce elde edilenlerden farklıdır ve bunlar E_{kin}^A, E_{dep}^A ile gösterilir. Daha önce bulunan bağıl değerler E_{kin}^B, E_{dep}^B ile gösterelim. Bu büyüklüklerin analitik ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
E_{kin}^A &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} & E_{dep}^A &= \int_0^t \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} dx_0 \\
E_{kin}^B &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}} & E_{dep}^B &= -\int_0^t d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0 = -\int_0^t \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} d\tau
\end{aligned} \tag{2.80}$$

Mutlak kinetik enerji ile bağıl kinetik enerji arasındaki fark da aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\begin{aligned}
E_{kin}^A - E_{kin}^B &= \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}} \\
E_{kin}^A - E_{kin}^B &= \frac{1}{2} (\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{V} \dot{x}_0)^T \mathbf{M} (\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{V} \dot{x}_0) - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}} \\
E_{kin}^A - E_{kin}^B &= \frac{1}{2} \mathbf{V}^T \mathbf{M} \mathbf{V} (\dot{x}_0)^2 + \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \dot{x}_0
\end{aligned} \tag{2.81}$$

Fark görüldüğü gibi zeminin yer değiştirme hızına bağlıdır. Şimdi mutlak ve bağıl enerjiler arasındaki farkı bulalım.

$$\begin{aligned}
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= \int_0^t \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \mathbf{V} dx_0 + \int_0^t d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0 \\
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= \int_0^t \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} (d\mathbf{X} - d\mathbf{Y}) + \int_0^t d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0 \\
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= \int_0^t [\ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} d\mathbf{X} - \ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} d\mathbf{Y} + d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0] \\
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= \int_0^t [\ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} d\mathbf{X} - (\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{V} \ddot{x}_0)^T \mathbf{M} d\mathbf{Y} + d\mathbf{Y}^T \mathbf{M} \mathbf{V} \ddot{x}_0] \\
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= \int_0^t [\ddot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} d\mathbf{X} - \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} d\mathbf{Y}] = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{Y}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{Y}} \\
E_{dep}^A - E_{dep}^B &= E_{kin}^A - E_{kin}^B
\end{aligned} \tag{2.82}$$

Görüldüğü gibi mutlak ve bağıl deprem enerjileri arasındaki fark mutlak ve bağıl kinetik enerjileri arasındaki farka eşittir. Bu sonuç ise beklenen sonuçtur.

2.4 Veri Depremi

Araştırma ve tasarımlarda veri olarak kullanılacak depremlerin seçiminde kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Eisenberg, 1992). (Eisenberg, 1992) çalışmasında anlatılan sentetik deprem bu çalışmada da kullanılmıştır. Bu kısımda iki gerçek deprem kaydı ile bir sentetik deprem kaydı kullanılacaktır. Seçilen depremler ve sentetik deprem kuvvetli deprem grubuna giren depremlerdir. Gerçek deprem için El Centro, Erzincan (1992) ve deprem kayıtları kullanılacaktır. Sentetik deprem için

$$\ddot{X}_0 = \beta(t)\ddot{X}(t) \quad (2.83)$$

şeklinde bir bağıntı göz önüne alınacaktır. Burada $\beta(t)$ zarf fonksiyonu olup deterministik yoldan belirlenecektir. Hesaplarda $\beta(t)$ zarf fonksiyonu aşağıda verilen şekilde alınacaktır.

$$\begin{aligned} \beta(t) &= 0 & t < 0 ; \beta(t) &= (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ \beta(t) &= 1 & t_1 \leq t \leq t_2 ; \beta(t) &= e^{-c(t-t_1)} & t_2 \leq t_1 \end{aligned} \quad (2.84)$$

$\ddot{X}(t)$ fonksiyonu ise ortalaması sıfır ve spektral güç yoğunluğu $S(\omega)$ olan stasyonier rasgele bir işlemdir (Eisenberg, 1992; Shinozuka ve Deodatis, 1991). Hesaplarda spektral güç yoğunluğu için “Kanai –Tajima Spectrumu” olarak adlandırılan ve

$$S(\omega) = \frac{1 + 4h_g^2(\omega/\omega_g)^2}{[1 - (\omega/\omega_g)^2]^2 + 4h_g^2(\omega/\omega_g)^2} S^2 \quad (2.85)$$

şeklinde verilen bir spektrum kullanılacaktır. Bu spectrum A.B.D.’de ve birçok ülkede nükleer santrallerin depreme karşı tasarımında kullanılmaktadır. Yukarıda verilen ifadede h_g zeminin hakim sönüm katsayısı, ω_g zeminin karakteristik frekansı, S ise zemin hareketinin şiddetidir. Yukarıda verilen formülasyon kullanılarak oluşturulan sentetik depremin ivme zaman grafiği de aşağıda verilmiştir. Hesaplarda ω_g, ξ_g ve S^2 için sırasıyla 18.85 rd/sn, 0.65 ve 0.00465 m²/sn³/rd değerleri kullanılmıştır. $\beta(t)$ fonksiyonunda ise $t_1=3$ sn, $t_2=13$ sn ve $c=0.26$ sn⁻¹ değerleri kullanılmıştır. Bu parametreler ile oluşturulan sentetik deprem ivme kaydı da bir sonraki bölümde verilmiştir.

3. AKTİF VE/VEYA PASİF KONTROL UYGULANMIŞ ÇOK KATLI KAYMA BİNALARINDA ENERJİ DAĞILIMLARI

Bu kısımda altı farklı kontrol durumunun kayma binalarında uygulamaları incelenmiştir. Üç farklı deprem etkisi altında yapıların enerji dağılımları incelenmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. Bu kontrol durumları aşağıda sıralanmıştır;

- Kontrolsüz yapı
- Taban izolasyonu yardımı ile pasif kontrolün uygulandığı durum
- Pasif kütle sönümleyicisi ile pasif kontrolün uygulandığı durum
- Aktif kütle sönümleyicisi ile aktif kontrolün uygulandığı durum
- Taban izolasyonu ile beraber izolasyon seviyesinde pasif kütle sönümleyicisinin kullanıldığı hibrid (karma veya melez) kontrol durumu
- Taban izolasyonu ile en üst katta aktif kütle sönümleyicisinin kullanıldığı hibrid (karma veya melez) kontrol durumu

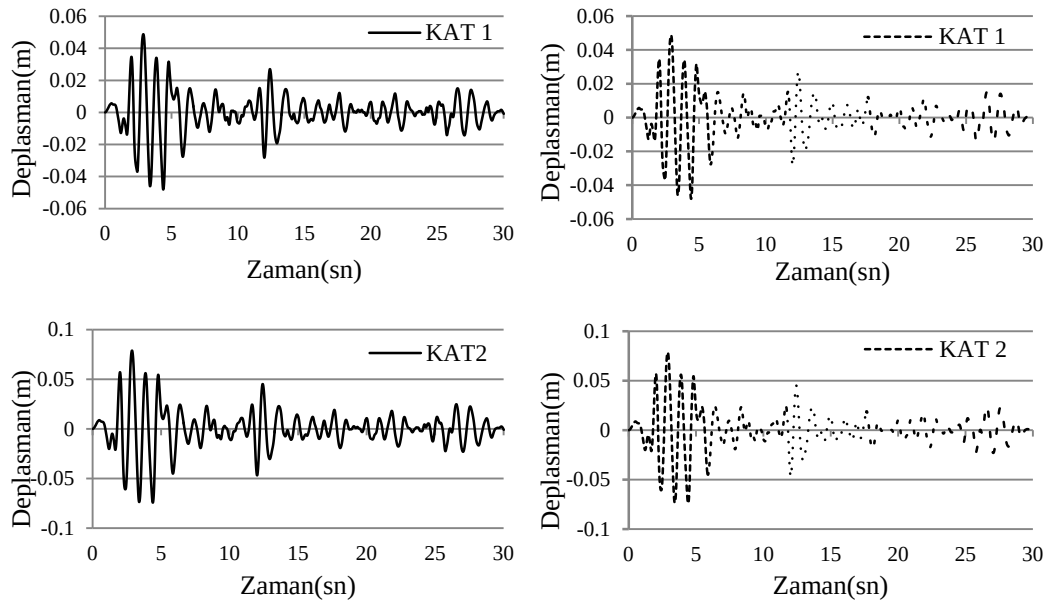
Kontrolsüz yapı, üzerinde herhangi bir kontrol elemanı bulunmayan geleneksel yapıdır. Pasif kontrol elemanı olarak yaygın şekilde kullanılan taban izolasyonları yapılarda temel altına veya temel ile üst yapı arasına konulmaktadır. Herhangi bir dış güç kaynağına ihtiyaç duymayan bu sistemlerin dinamik dış etkilere karşı adaptasyon kabiliyeti yoktur. Yapılarda taban izolasyonu ile ilgili araştırmalara öncülük eden çeşitli çalışmalar yer almaktadır (Shinozuka ve Deodatidis, 1991; Tsai ve Kelly, 1989; Yang ve diğ, 1991).

Pasif kütle sönümleyiciler de yapıların deprem ve rüzgar gibi dinamik dış etkiler karşısında tepkilerini azaltmak için kullanılan ilave elemanlardır. Kütle sönümleyiciler yapıya paralel yay ve viskoz sönümleyici yardımı ile bağlanırlar. Kütle sönümleyicilerin yapılarda kullanımı ile ilgili çalışmalar 1970 yılında başlamış olup literatürde aktif, pasif ve yarı aktif kütle sönümleyiciler ile ilgili çeşitli araştırmalar yer almaktadır. Bu kısımda taban izolasyonu ile beraber kütle sönümleyicinin beraber kullanıldığı hibrid (karma) kontrol uygulanan yapılar da incelenebilmektedir.

Bu kısımda yapılan çalışmalar kapsamında enerji yönünden kontrol durumları içerisinde en efektif kontrol durumunu belirlemek mümkün olmaktadır.

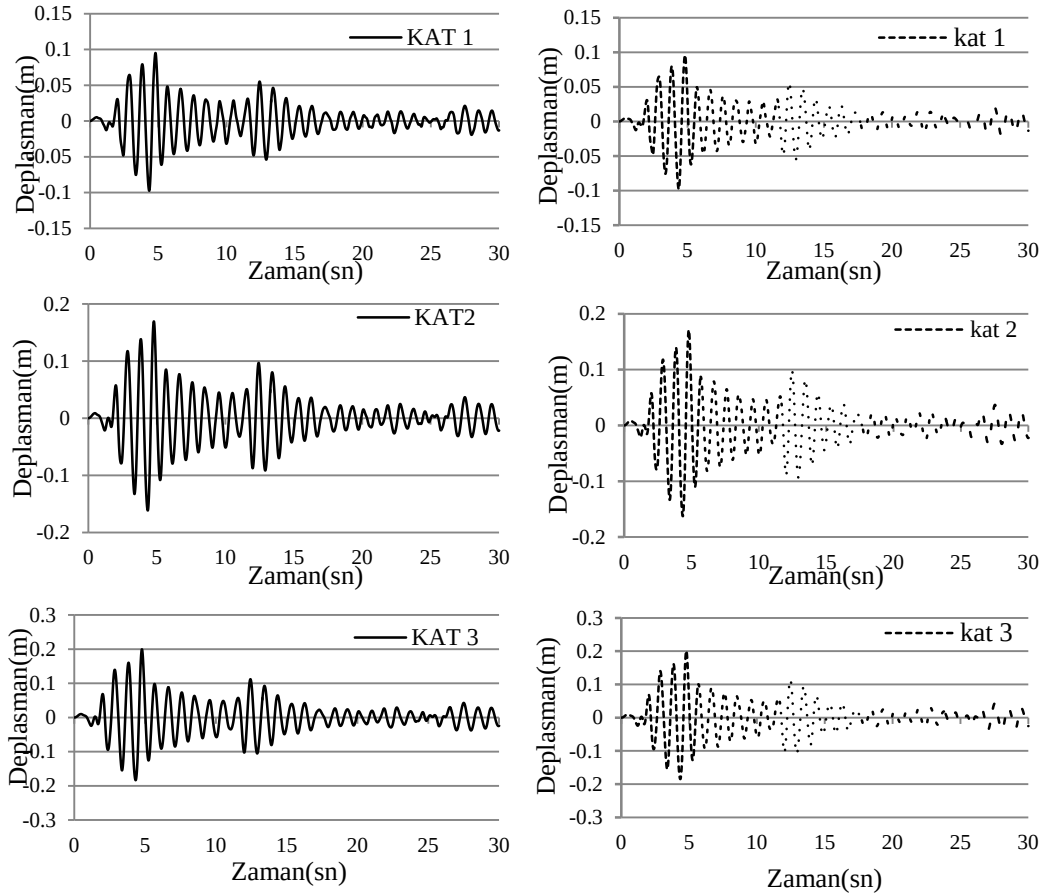
Bu kısımdaki örneklerde aktif kontrollü yapılar için ani optimal kontrol algoritmasını kapalı çevrim kullanarak uygulamaktadır. Bu algoritmanın kullanılmasının nedeni deprem kuvvetlerinin önceden bilinmemesi nedeni ile ortaya çıkan güçlükleri yenmek için geliştirilen bir kontrol algoritması olmasından dolayıdır (Yang ve diğ., 1987; Akhiev ve diğ., 2002).

Tüm bu analizleri gerçekleştirmek için FORTRAN lisanı ile bir program yazılmıştır. Programın doğruluğunun kontrolü için MATLAB-SIMULINK de çeşitli simülasyonlar ile çalışmalar yapılmıştır. FORTRAN lisanı ile yazılan programda Wilson- θ yöntemi ile dinamik hareketin diferansiyel denklemi çözülürken MATLAB-SIMULINK'te çözümde Runge Kutta yöntemi kullanılmaktadır. Karşılaştırma amacı ile 2 katlı ve 3 katlı olmak üzere 2 adet yapı FORTRAN ve MATLAB-SIMULINK'te çözdürülmüştür. 2 ve 3 katlı yapıda da kat kütlesi 100 kg, kat sönümü 50 Ns/m ve kat rijitliği 1000 kN/m olarak seçilmiştir. Oluşturulan simülasyon ve FORTRAN programına da karşılaştırma amacıyla giriş bilgisinde malzeme davranışı doğrusal olarak tanımlanmıştır. İki programa da aynı veriler verilerek sonuçlar alınmıştır. Sonuçlar grafikler şeklinde aşağıda verilmiştir. İlk olarak 2 katlı yapı için El Centro depremi etkisi altında kat deplasmanlarının zamana göre değişimleri Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1 : İki katlı yapıda FORTRAN ve MATLAB program karşılaştırması (Sürekli çizgi:FORTRAN, kesikli çizgi:MATLAB).

3 katlı kayma binası için de iki farklı programda çözüm sonucu elde edilen deplasman zaman grafikleri Şekil 3.2 de verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere iki program bu yapı için de aynı sonuçları vermektedir.



Şekil 3.2 : Üç katlı yapıda FORTRAN ve MATLAB program karşılaştırması (Sürekli çizgi:FORTRAN, kesikli çizgi:MATLAB).

En genel halde programın akış diyagramı Şekil 3.3 de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere program öncelikle giriş dosyalarını okumakta, okunan dosyaya göre kontrolsüz, pasif kontrollü veya aktif kontrollü duruma göre uygun hesap adımlarını seçerek hesaplamaları gerçekleştirmektedir. Uygun hesap adımı olarak ölçülen deprem ivmelerinin aralığı alınacaktır ki bu aralık bir çok hesap için yeterlidir.

Kontrol durumları kullanıcı tarafından metin dosyasına girilen MKOT adı verilen sayılarla program tarafından algılanmaktadır. Hesaplarda kullanılacak deprem ivme dosyası kullanıcı tarafından oluşturulup ilgili dizine kopyalanmalıdır. Program giriş bilgileri olarak deprem veri dosyası ile ilgili bilgiyi talep ettiğinde oluşturulan deprem ivme dosyasının ismi girilerek programın dosyayı okuması sağlanmaktadır.

Program işlemleri sonlandırdıktan sonra çıkış bilgilerini metin dosyaları olarak vermektedir. Çıkış bilgileri deprem esnasında yapıda meydana gelen deplasman, kuvvet, enerji gibi verilerdir.

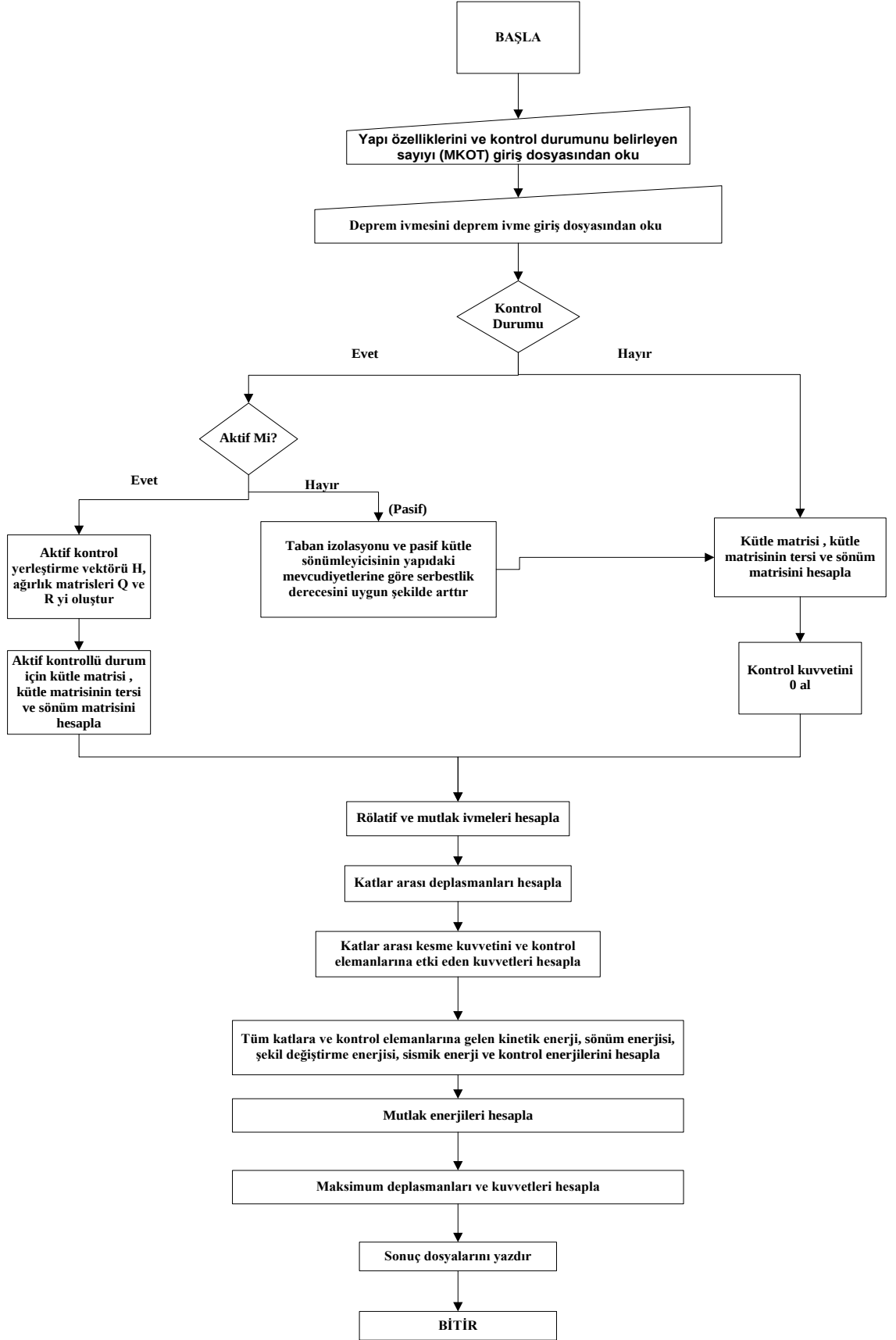
Yapının deprem esnasındaki deplasmanları ve kuvvetleri her kat ve kontrol elemanı için ayrı ayrı verilmektedir. Bu veriler yardımı ile yapıya ait kuvvet deplasman eğrileri çizdirilerek yapının davranışına ait sonuçlar yorumlanabilir.

Çeşitli araştırmacılar tarafından incelenen depreme dayanıklı yapı tasarımında önemli bir parametre olan enerji kavramı (Kalkan ve Kunnath, 2007; Surahman, 2007; Akbas ve Shen, 2003) bu programda da önemli bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır. Yapısal kontrol enerjilerinin de kontrol elemanlarının dizaynında önemli bir parametre olduğu çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmıştır (Wong ve Wang , 2001; Wong ve Pang , 2007a&b ;Wong ve Yang, 2001). ENDEP programında da kontrol enerjileri hesaplanıp çıkış olarak verilmektedir. Yapıya giren toplam enerji sismik enerji, kinetik enerji, şekil değiştirme enerjisi(potansiyel enerji), sönüm enerjisi ve yukarıda da belirtildiği gibi kontrol enerjisi gibi değişik enerji formlarında programdan çıkış olarak alınmaktadır. Her kata ve eğer yapıda kontrol uygulanmışsa kontrol elemanına ait enerji çıkışları da program tarafından hesaplanmaktadır. Program enerji çıkışları ile deprem ve kontrol enerjisinin toplamının kinetik enerji, sönüm enerjisi ve şekil değiştirme enerjisinin toplamına eşit olup olmadığı da kontrol edilebilmektedir.

Yapılarda konfora etki ettiği kadar izolasyon sisteminin efektifliğini belirlemede bir ölçüt olarak kullanabilecek ivme değerleri (Lu ve diğ., 2011), de program yardımı ile hesaplanmaktadır. İvme değerleri rölatif ve mutlak ivme olarak iki ayrı şekilde hesaplanmaktadır. Bu değerler de enerjide olduğu gibi her kat ve kontrol elemanları için ayrı ayrı hesaplanmaktadır.

Katlara ve kontrol elemanlarına ait maksimum deplasmanlar ve maksimum kuvvetler de çıkış dosyalarına yazdırılmaktadır. Bu sayede maksimum dayanımları belirlemek mümkün olmaktadır. Programın işleyişi ile ilgili bilgiler ve programa ait akış diyagramı aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

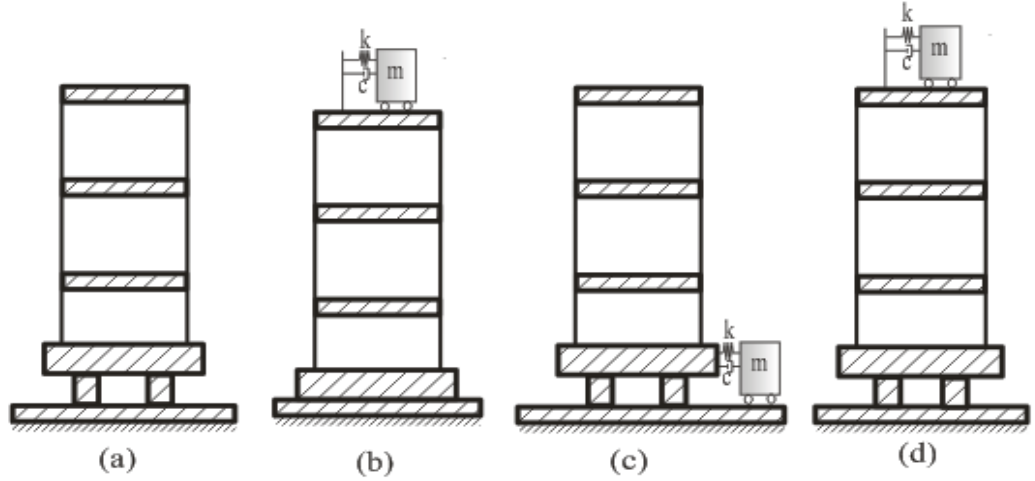
Program rölatif ve mutlak enerjileri hesaplamakta ve enerji dengesi yardımı ile sayısal hesapların doğruluğu kontrol edilmektedir.



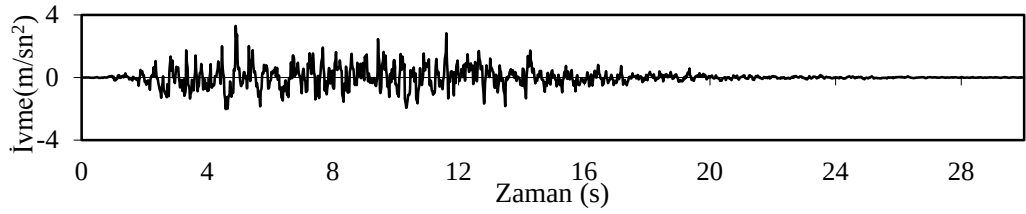
Şekil 3.3 : Program Akış Diyagramı.

3.1 Sayısal Örnekler

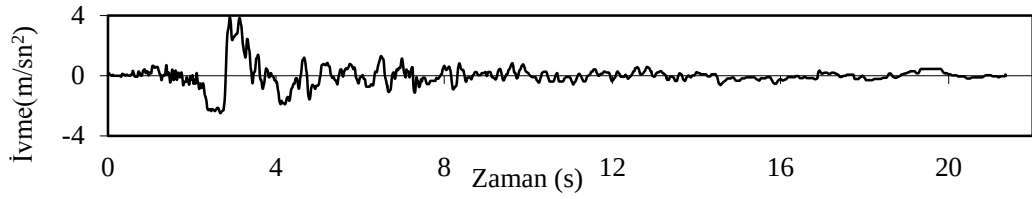
Bu kısımda 2 farklı yapı, 3 farklı deprem etkisi halinde ve 6 farklı kontrol durumu için çözdürülmüştür. Bu durumlar Şekil 3.4 de şematik olarak gösterilmiştir. Bu yapılar 3 katlı (B1) ve 12 katlı (B2) olmak iki adet kayma binasıdır. B1 ve B2 tezde bundan sonra bu binalara verilecek isimlerdir. Kontrol durumları ise kontrolsüz yapı(K1), taban izolasyonlu yapı(K2) (Şekil 3.4a), taban izolasyonuna izolasyon seviyesinde pasif kütle sönümleyicisi eklenmiş hal(K3) (Şekil 3.4c), yapının en üstünde pasif kütle sönümleyicisi eklenmiş hal(K4) (Şekil 3.4b), yapının en üstünde aktif kütle sönümleyicisi eklenmiş hal(K5) (Şekil 3.4b) ve yapıya taban izolasyonu ile en üst katta aktif kütle sönümleyicisi eklenmiş haldir(K6) (Şekil 3.4d). K1-K6 kontrol durumlarını belirleyen sayılar olup metinde bundan sonra bu isimlendirme baz alınacaktır. Bu kontrol durumlarının şematik gösterimleri Şekil 3.2 de verilmiştir. Gerçek deprem kaydı olarak yurdumuzda meydana gelen 1992 Erzincan depremi kaydı ve literatürde özellikle deprem mühendisliği ile ilgili yayınlarda yaygın olarak kullanılan El Centro-NS deprem kaydı kullanılmıştır. Sentetik deprem kaydının yaratılmasında Kanai-Tajima spectrumu adı verilen A.B.D.'de ve birçok ülkede nükleer santrallerin depreme karşı tasarımında kullanılan spektrumdan yararlanılmıştır. Seçilen iki deprem kaydı ve sentetik deprem (ivme zaman grafiği bir önceki bölümde verilmişti) kuvvetli deprem sınıfına giren depremlerdir. Sentetik, Erzincan depremi ve El Centro depreminin ivme zaman grafikleri sırası ile Şekil 3.5-3.7 de verilmiştir. Sentetik deprem üretilirken bölüm 2.4 de belirtilen parametreler kullanılmıştır. Kullanılan Erzincan depremi kaydı 1992 yılında meydana gelmiş, 95 Erzincan adlı deprem istasyonundan indirilen , şiddeti 6.69, PGA (g), PGV (cm/s) , PGD (cm) değerleri ise sırasıyla 0.48, 72.95 ve 24.79 olan depremdir. El Centro depremi kaydı ise 1940 yılında gerçekleşmiş olan ve NS (kuzey-güney) yönündeki bileşeni kullanılmıştır. Bu kayıt USGS 117 El Centro adlı istasyondan alınmıştır, şiddeti 6.95 olup, PGA: 0.2584 (g) , PGV: 31.7400 (cm/s), PGD: 18.0100 (cm) değerlerine sahiptir. Bu doktora tezinde kullanılan tüm deprem ivme kayıtları University of California, Berkeley tarafından hazırlanmış Pacific Earthquake Engineering Research Center: NGA Database adlı internet sitesinden alınmıştır.



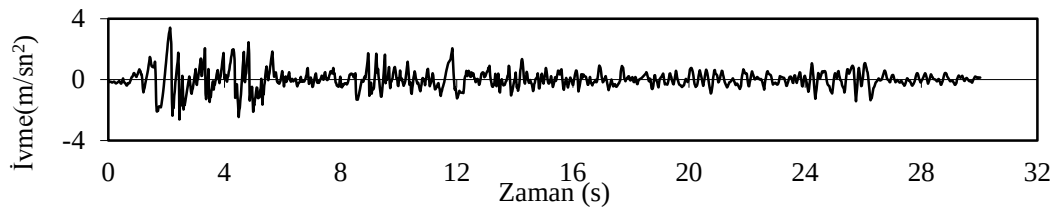
Şekil 3.4 : İncelenen kontrol durumları.



Şekil 3.5 : Sentetik deprem ivme kaydı.



Şekil 3.6 : Erzincan depremi ivme kaydı.



Şekil 3.7 : El Centro depremi ivme kaydı.

İki yapıya ait histeretik eğriler (deplasman-katlara etkiyen kesme kuvveti eğrileri), yapıya giren toplam kinetik enerji, sönüm enerjisi, şekil değiştirme enerjisi, kontrol enerjisi ve toplam enerjinin dağılımları üç deprem kaydı için de incelenmiştir. İlk olarak 3 katlı yapı irdelenmiştir. Üç katlı yapı için kullanılan kütle, rijitlik ve sönüm matrisleri aşağıda verilmiştir. Yapıda sönüm oranı %5 olup viskoz sönüm kullanılmıştır.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \text{ ton}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 251.32 & -125.66 & 0 \\ -125.66 & 251.32 & -125.66 \\ 0 & -125.66 & 125.66 \end{bmatrix} \text{ kNs/m}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 31582.734 & -15791.34 & 0 \\ -15791.34 & 31582.734 & -15791.34 \\ 0 & -15791.34 & 15791.34 \end{bmatrix} \text{ kN/m}$$
(2.86)

Yapıya eklenen taban izolasyonu için kütle, rijitlik ve sönüm parametreleri sırasıyla $m_b=100$ ton, $k_b=2527 \times 10^3$ kN/m and $c_b=63$ kNs/m. Pasif ve aktif kütle sönümleyicisi için ise $m_d=36.3$ ton, $k_d=1136$ kN/m, $c_d=31$ kNs/m olarak alınmıştır. Kütle sönümleyicisi yapının 1. titreşim periyoduna göre ayarlanmıştır. Aktif kontrol durumunda yapıda bir adet aktif kontrol elemanı bulunduğu için R (1×1) matrisi yani skaleri 10^{-3} olarak seçilmiştir. Diğer ağırlık matrisi Q ise diyagonal elemanları 1000 ve diğer tüm elemanları 0 olan (10×10) boyutlu bir matris olarak seçilmiştir. 12 katlı yapı için ise katların kütleleri, rijitlik ve sönüm değerleri ile akma uzama değerleri de Çizelge 3.1 de verilmiştir.

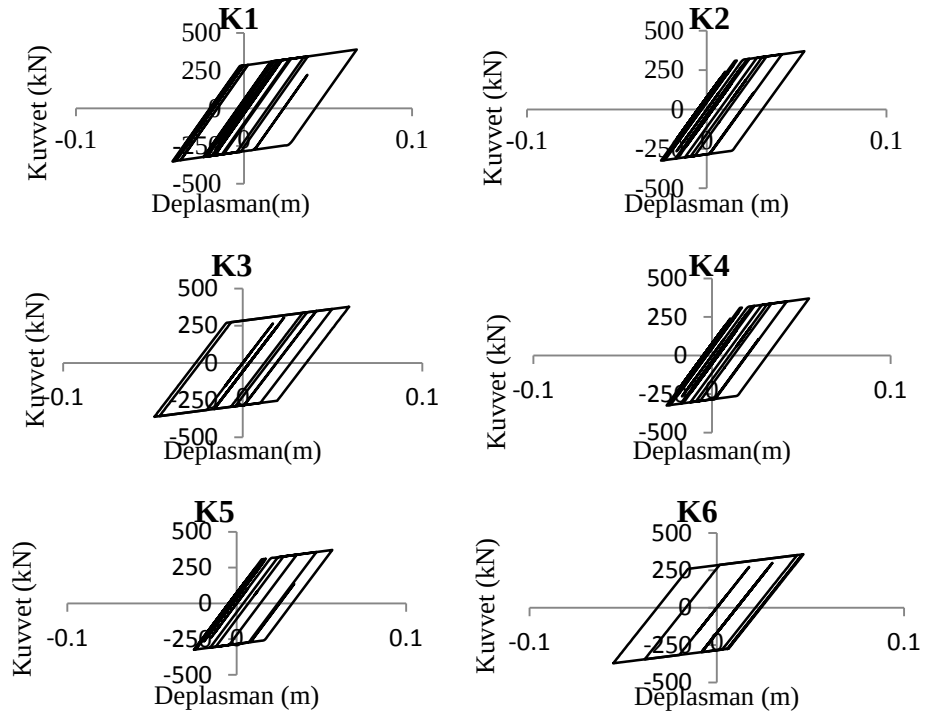
Çizelge 3.1 : 12 Katlı yapı (B2) özellikleri.

Kat No ve İlave Elemanlar	Kütle (ton)	Rijitlik(k_1) (kN/m)	İç Sönüm (kN.sn/m)	Akma Uzaması (cm)
1-11	500	500000	4952	2.5
12	300	500000	4952	2.5
Taban İzolasyonu	500	20000	605	2.5
Kütle Sönümleyicisi(tabanda)	500	1940.5	197	200
Kütle Sönümleyici(tepede)	100	1577	394	200

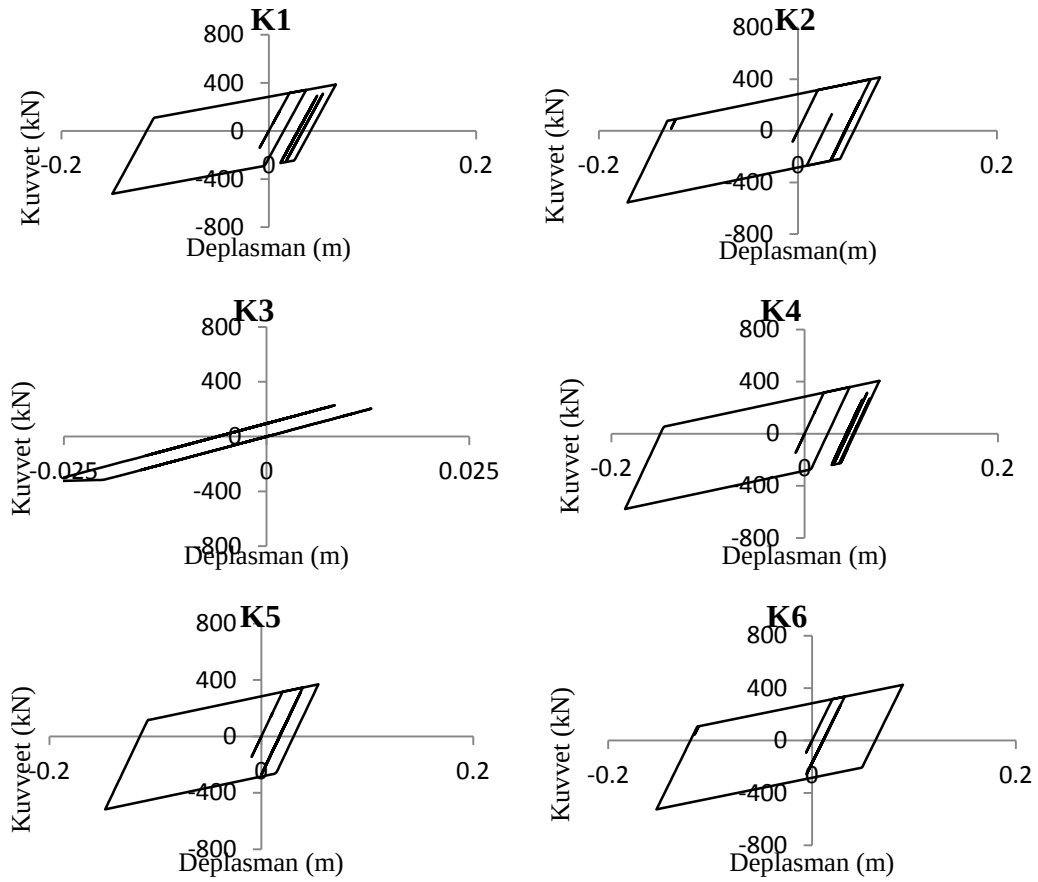
Yukarıdaki tabloda görülen malzeme rijitliği akmadan sonra ilk rijitliğin %10 u olarak yani $k_2=0.1 k_1$ olarak alınmıştır.

3.1.1 Histeretik eğriler (deplasman-kuvvet eğrileri)

Tüm kontrol durumları için histeretik eğriler de irdelenmiştir. Şekil 3.8-3.9 da sırasıyla 3 katlı yapıda 1. ve 2. katlara ait Erzincan depremi etkisi altında oluşan kuvvet-deplasman ilişkileri verilmiştir. 1. kat için görüldüğü gibi kontrol elemanları eklenmesi yapıdaki plastik davranışı elastik hale getirmemiştir. Ancak histeretik eğrilerin kapadığı alanlar kontrolsuz duruma göre küçülmüştür. Şekil 3.9 dan görüldüğü üzere K3 kontrol durumunda histeretik eğriler en az alanı kaplamaktadır.

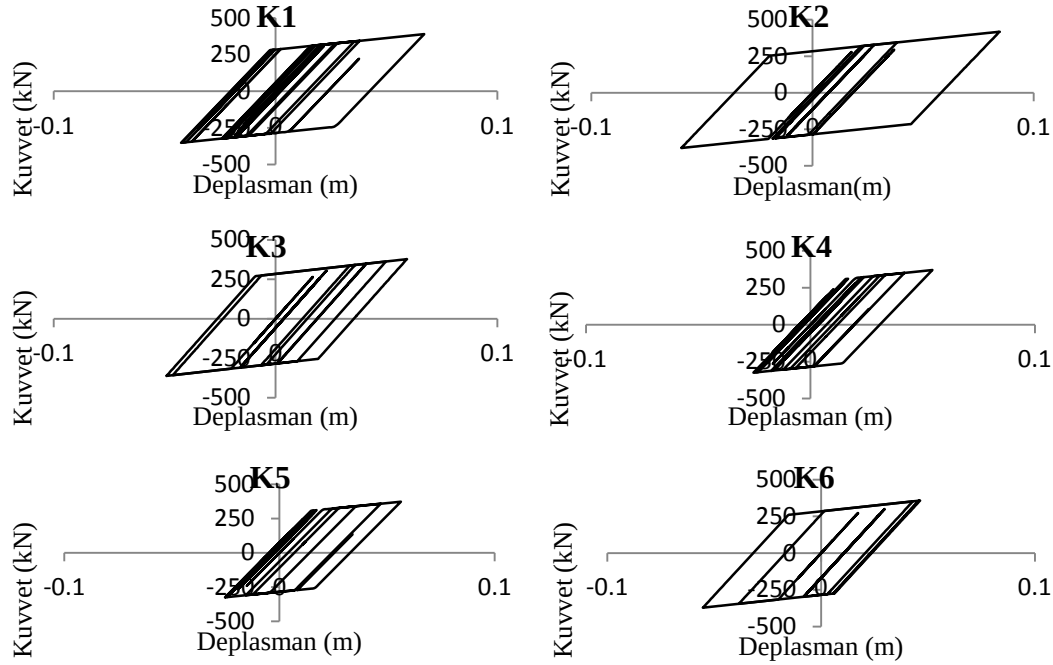


Şekil 3.8 : Erzincan depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B1).

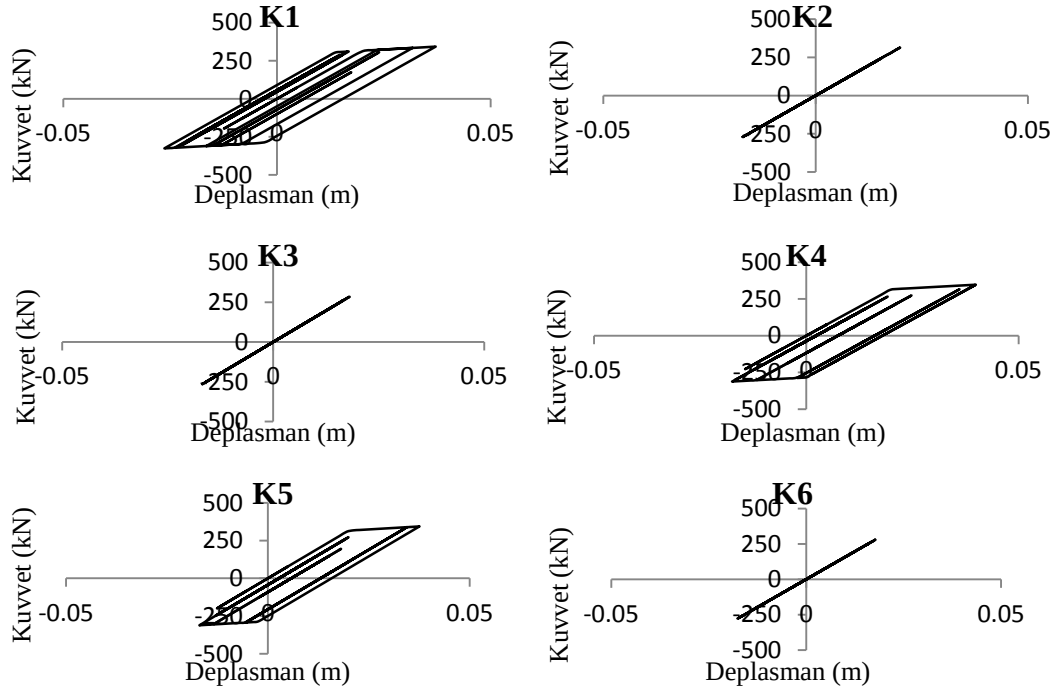


Şekil 3.9 : Erzincan depremi etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1).

El Centro depremi etkisinde de 3 katlı yapıda oluşan histeretik eğriler de 1. ve 2. kat için 3.10-3.11 de verilmiştir. 2. kata ait histeretik eğriler incelendiğinde K2, K3 ve K6 kontrol durumlarında yapı davranışını elastik hale gelmiştir. K4 ve K5 kontrol durumlarında ise yapı davranışını plastiktir.

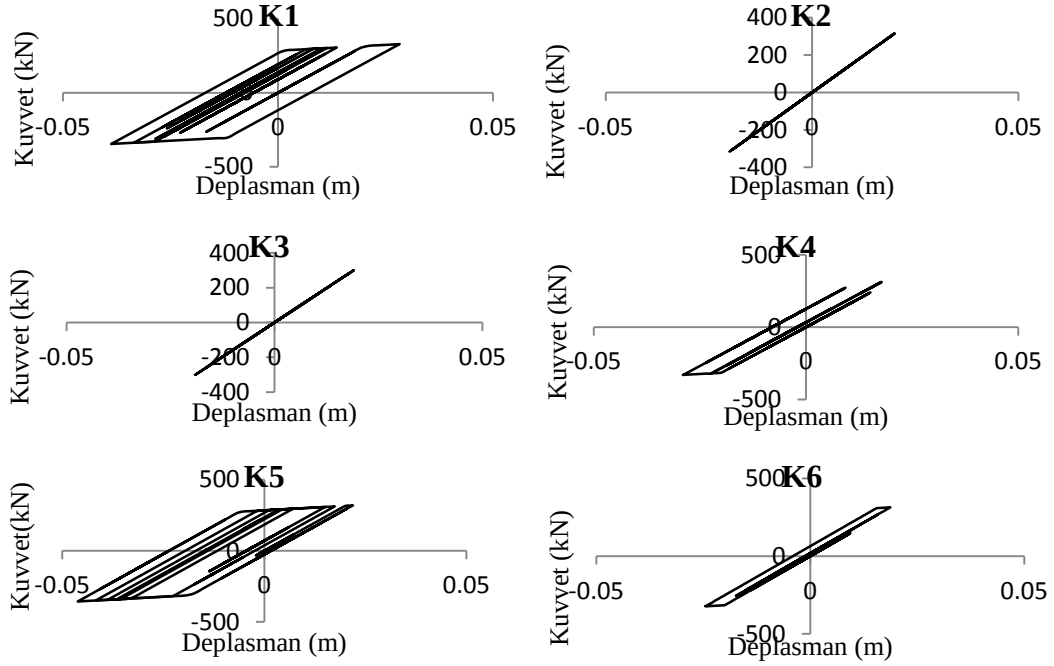


Şekil 3.10 : El Centro depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B1).

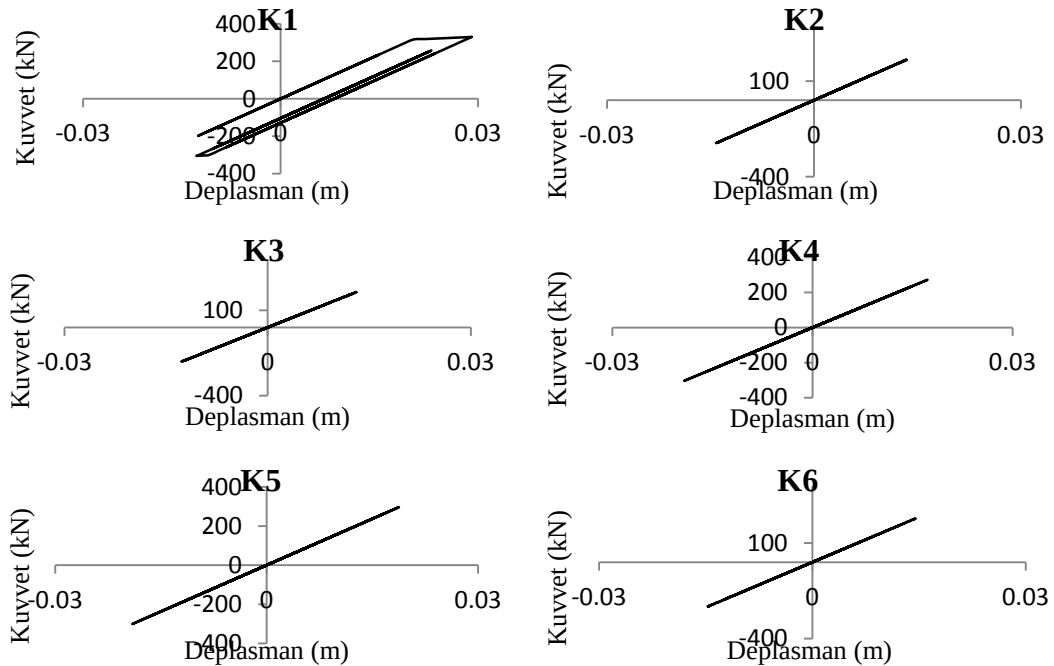


Şekil 3.11 : El Centro depremi etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1).

3 katlı yapıda Sentetik deprem etkisi altında da 1. ve 2. kat için histeretik eğriler sırasıyla Şekil 3.12 ve 3.13 de verilmiştir. 1. kata ait histeretik eğriler incelendiğinde K2 ve K3 kontrol durumları plastik davranışı elastik hale getirmiştir. 2. kat eğrileri incelendiğinde ise kontrolsüz durumda yapı davranışı plastik iken tüm kontrol durumları için davranış elastik hale gelmiştir.

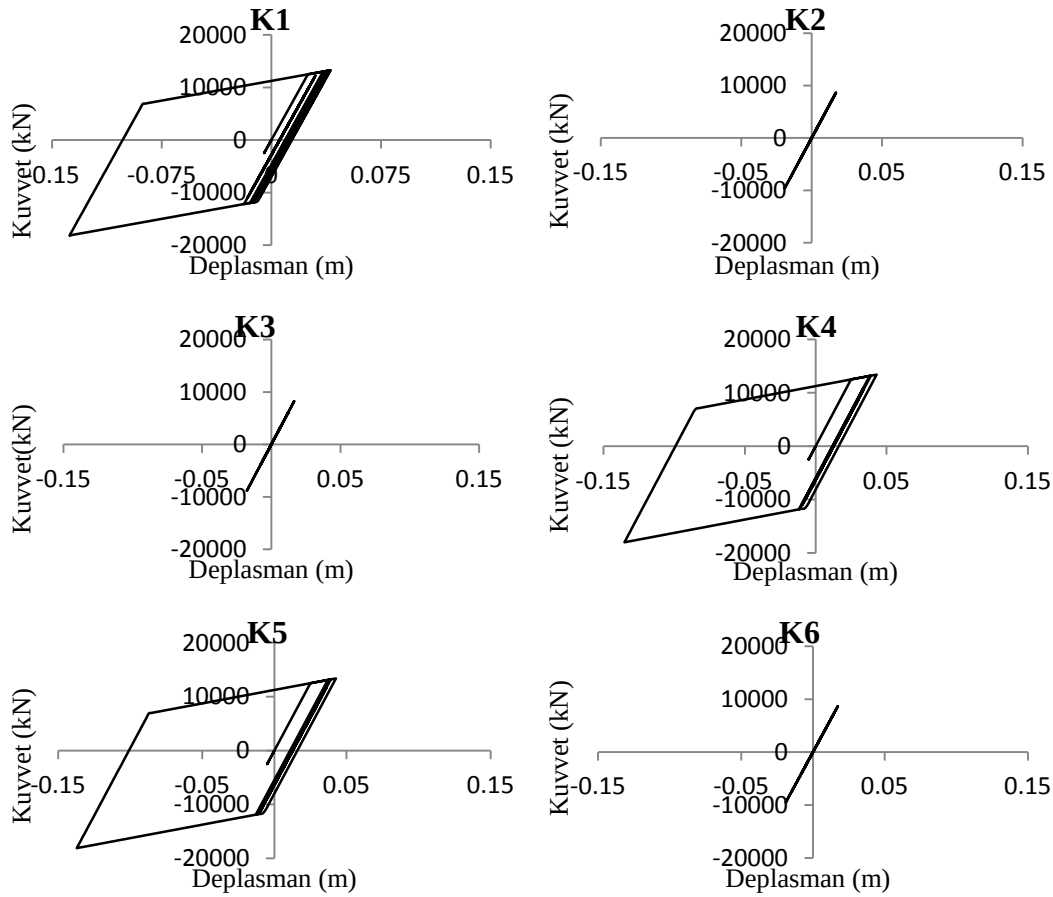


Şekil 3.12 : Sentetik deprem etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler .



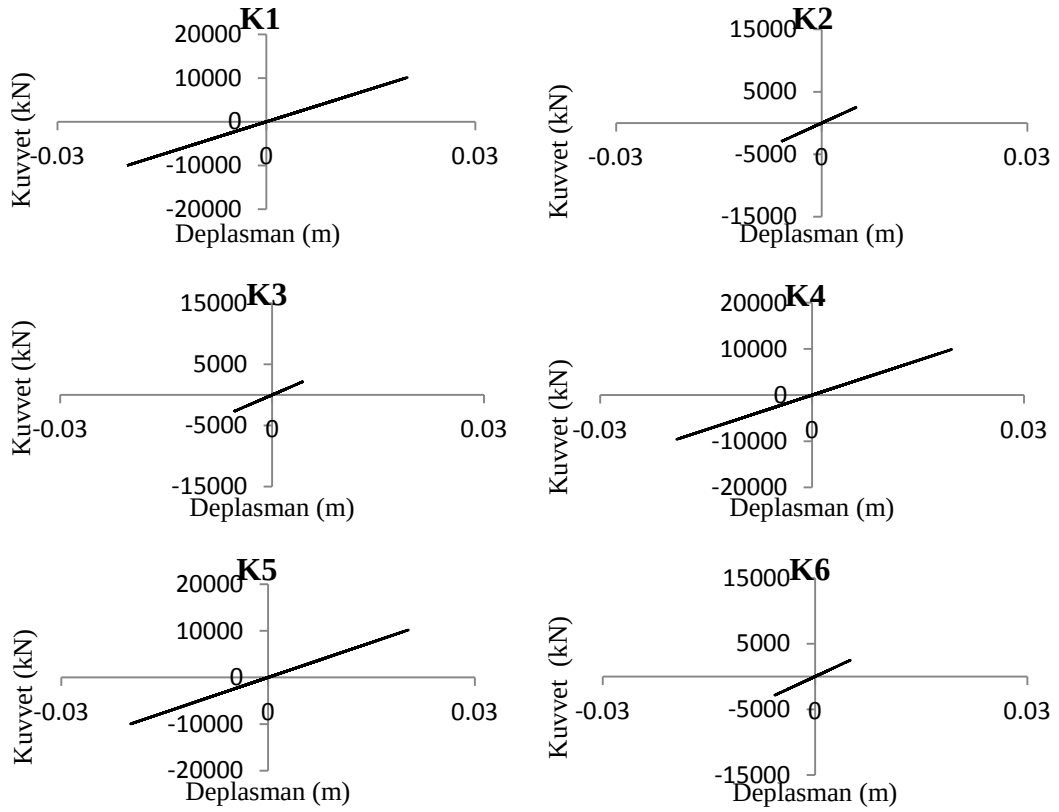
Şekil 3.13 : Sentetik deprem etkisinde 2. kata ait histeretik eğriler (B1).

12 katlı yapıda da kuvvet-deplasman davranışları incelenmiştir. 1. kata ait davranış irdelenmiştir. 1. kata ait davranışın incelenmesinin nedeni kata etkiyen kuvvetler nedeni ile en kritik katın bu kat olarak belirlenmesinden ötürüdür. Şekil 3.14 de Erzincan depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler verilmiştir. 1. kata ait histeretik eğriler incelendiğinde K2(taban izolasyonlu), K3(taban izolasyonuna+izolasyon seviyesinde pasif kütle sönümleyici) ve K6 (taban izolasyonu ile beraber en üst katta aktif kütle sönümleyicisi) kontrol durumlarında yapı davranışının elastik hale geldiği görülmektedir. Yapıda sadece pasif kütle sönümleyicisi veya aktif kütle sönümleyicisi eklenmiş hal incelendiğinde ise davranış plastiktir.

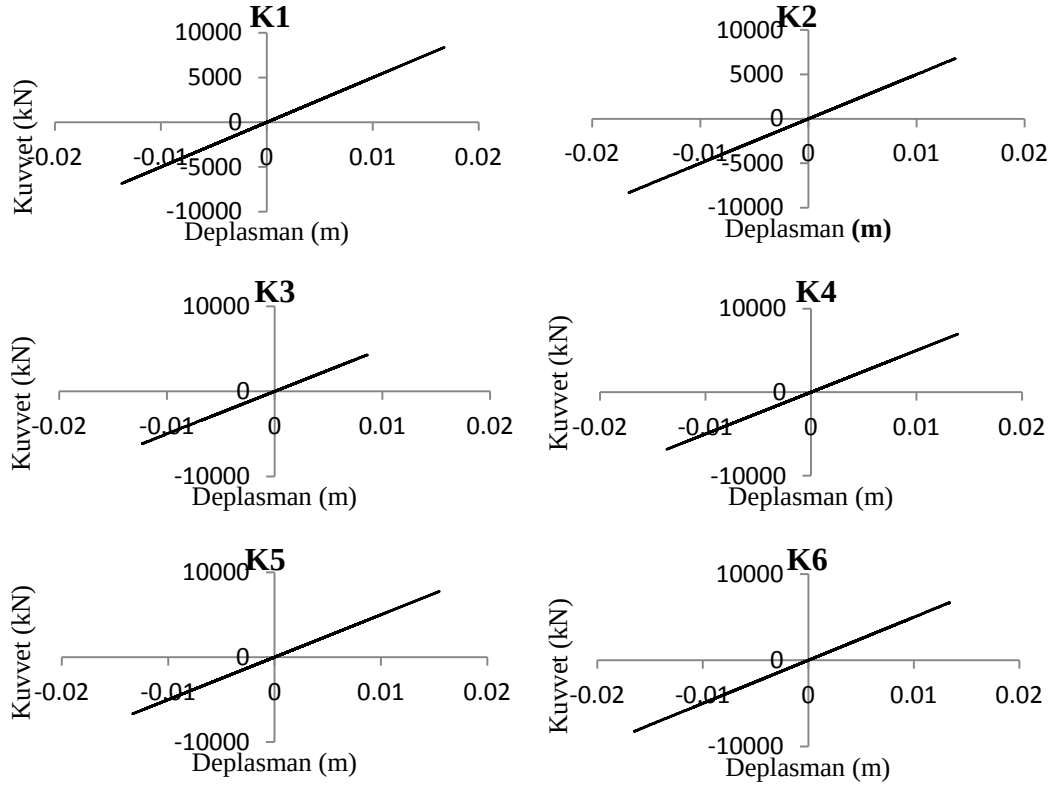


Şekil 3.14 : Erzincan depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler (B2).

El Centro depremi etkisinde 1. kata ait histeretik eğriler ise Şekil 3.15 de verilmiştir. Eğrilerden görüldüğü üzere kontrol elemanları eklenmesi yapıya etkiyen kuvvet ve deplasmanları önemli ölçüde azaltmıştır. Sentetik deprem etkisinde histeretik eğriler ise Şekil 3.16 da verilmiştir. Diğer iki deprem etkisinde olduğu gibi kontrol elemanları eklenmesi deplasmanları ve kuvvetleri azaltmıştır.



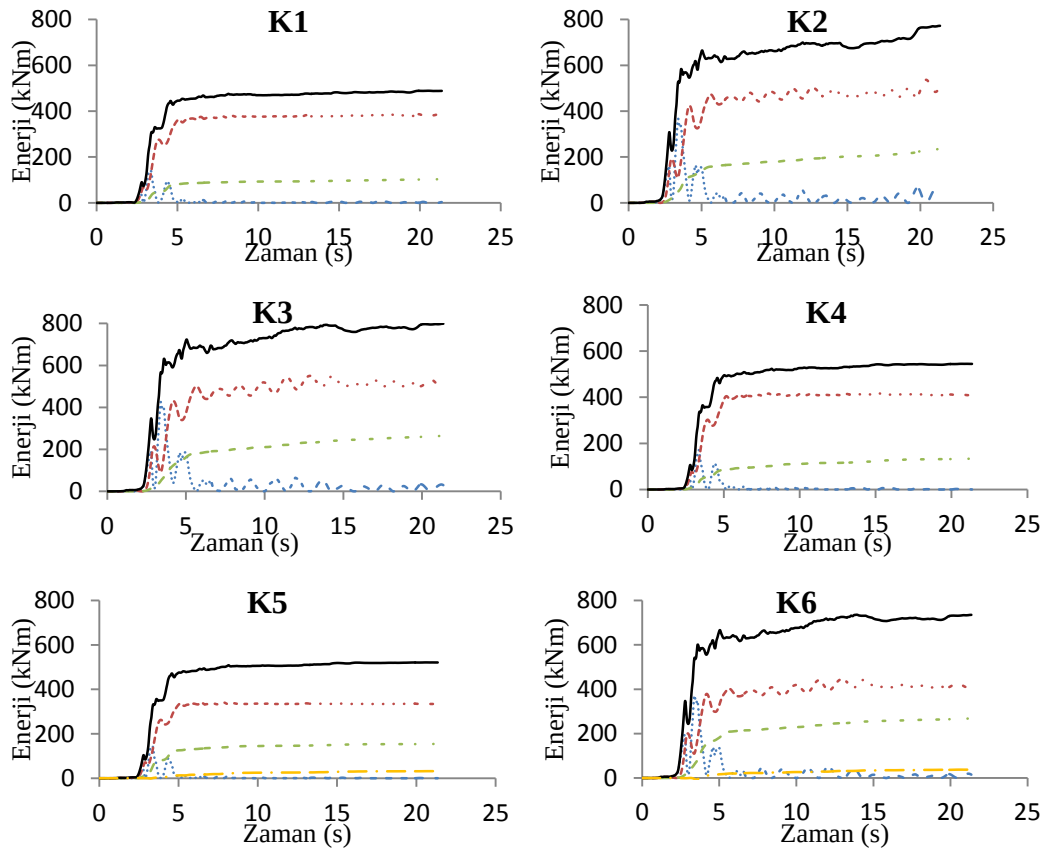
Şekil 3.15 : El Centro depremi etkisinde 1. kata etkiyen histeretik eğriler (B2).



Şekil 3.16 : Sentetik deprem etkisinde 1. kata etkiyen histeretik eğriler (B2).

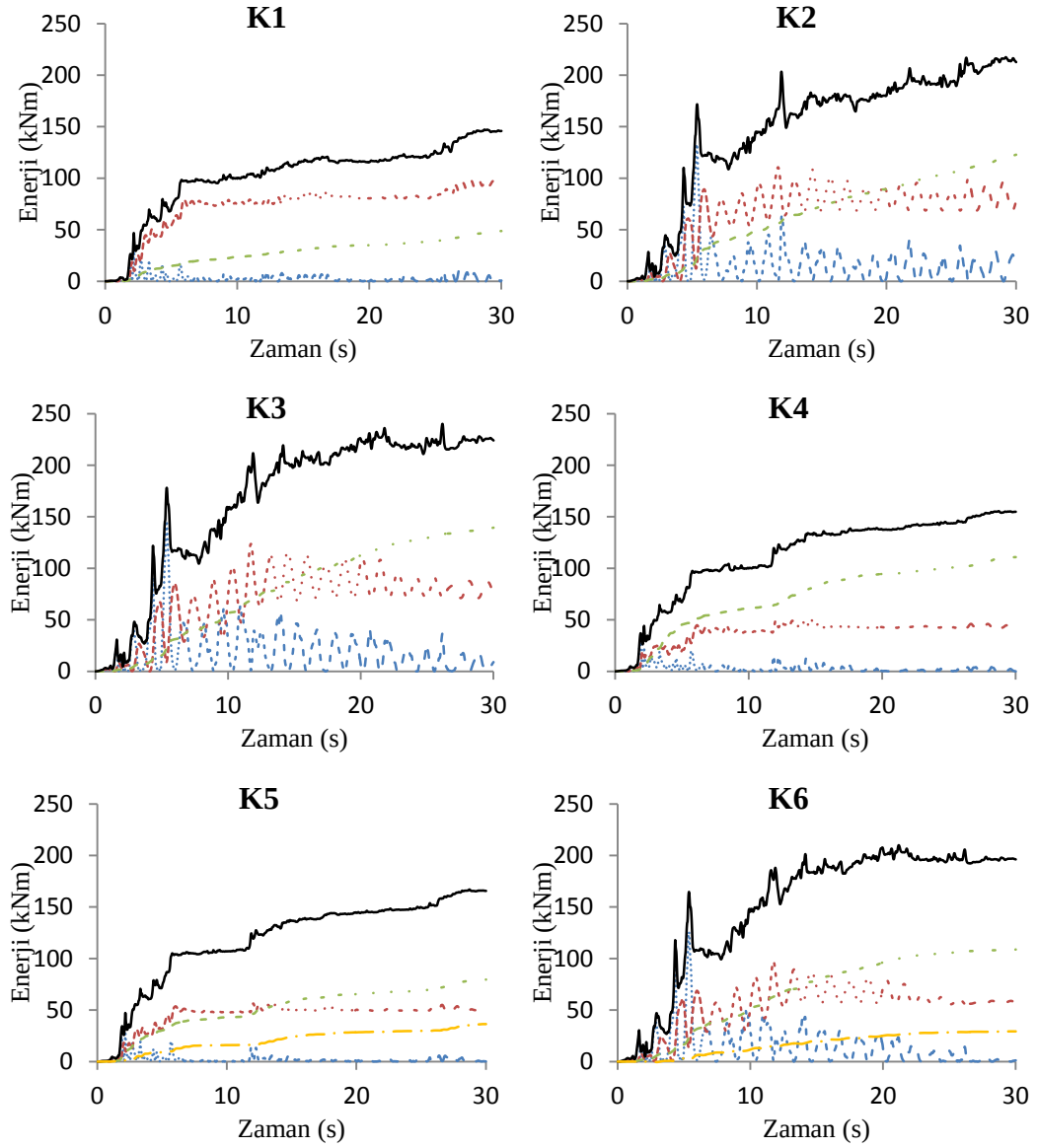
3.1.2 Yapıda rölatif enerji dağılımları

Yapısal kontrol altındaki yapılarda yapıya giren deprem ve kontrol enerjisinin toplamı; kinetik enerji, sönüm enerjisi ve şekil değiştirme enerjisinin toplamına eşit olduğu bilinmektedir. Bu denge aynı zamanda yapılan sayısal hesapların kontrolünde da kullanılmaktadır. Pasif kontrol ve kontrolsüz yapıda kontrol enerjisi sıfır olmaktadır. Aktif kontrollü yapıda kontrol enerjisi de mevcuttur. Üç katlı yapıda rölatif enerji dağılımları Erzincan depremi için Şekil 3.17 de verilmiştir. Yapıya kontrol elemanları eklenmesi bazı hallerde yapıya giren deprem enerjisini arttırmaktadır. Bunun nedeni eklenen kontrol elemanlarını kütlesi ile yapının kütlelerinin artmasıdır. Buna karşın eklenen elemanlar şekil değiştirme ve kinetik enerjinin bir kısmını almaktadırlar. Dolayısıyla yapıya giren deprem enerjisinin fazlalığı alınmış olmaktadır. Aktif kontrol enerjisi ise K5 ve K6 kontrol durumlarında benzer değerleri almıştır. Diğer enerjilere kıyasla kontrol enerjisi daha düşüktür.



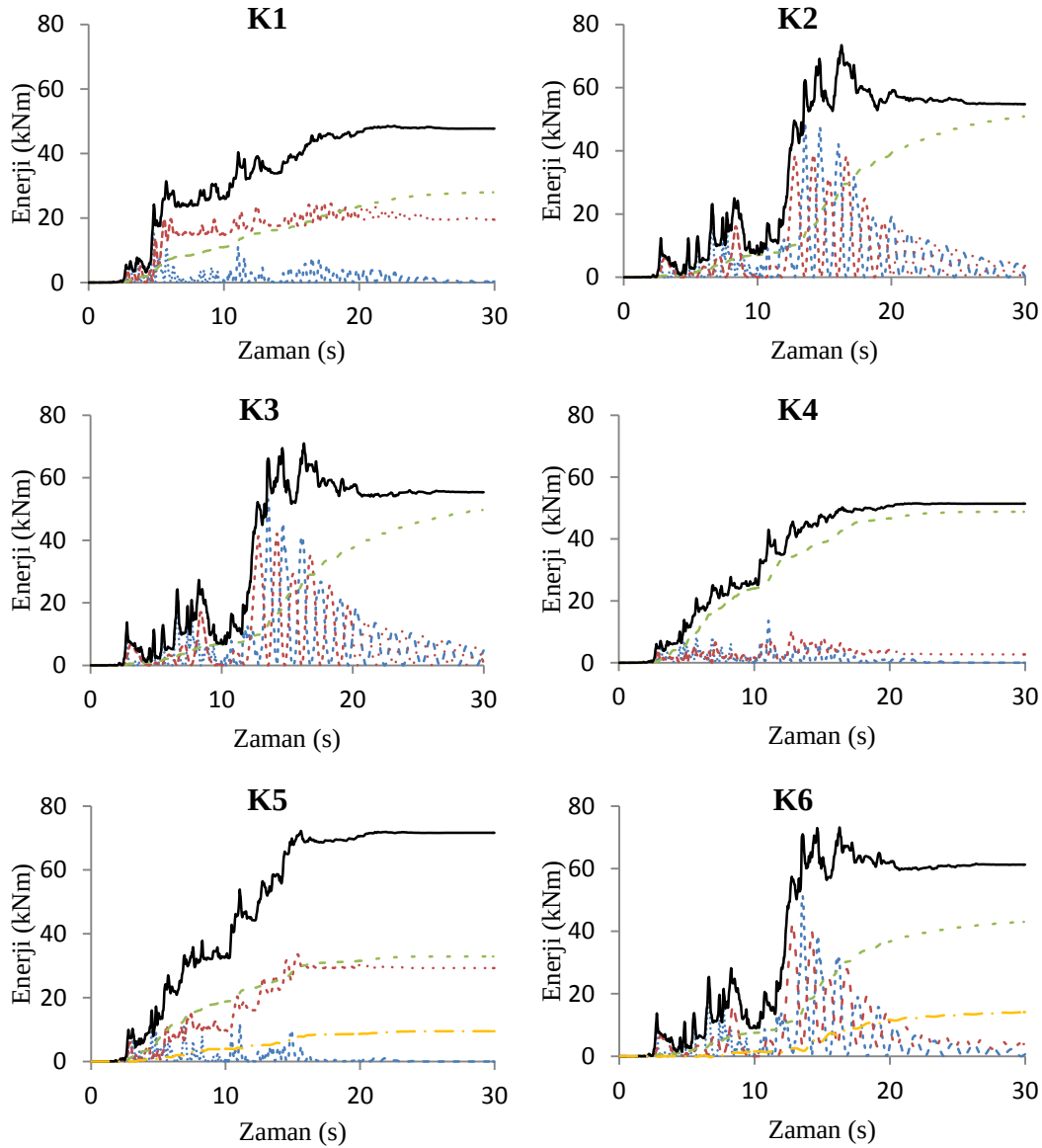
Şekil 3.17 : Erzincan depremi etkisinde enerji dağılımları (B1)(mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

El Centro depremi etkisinde yapıdaki enerji dağılımları da Şekil 3.18 de verilmiştir.



Şekil 3.18 : El Centro depremi etkisinde enerji dağılımları (B1)
(mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

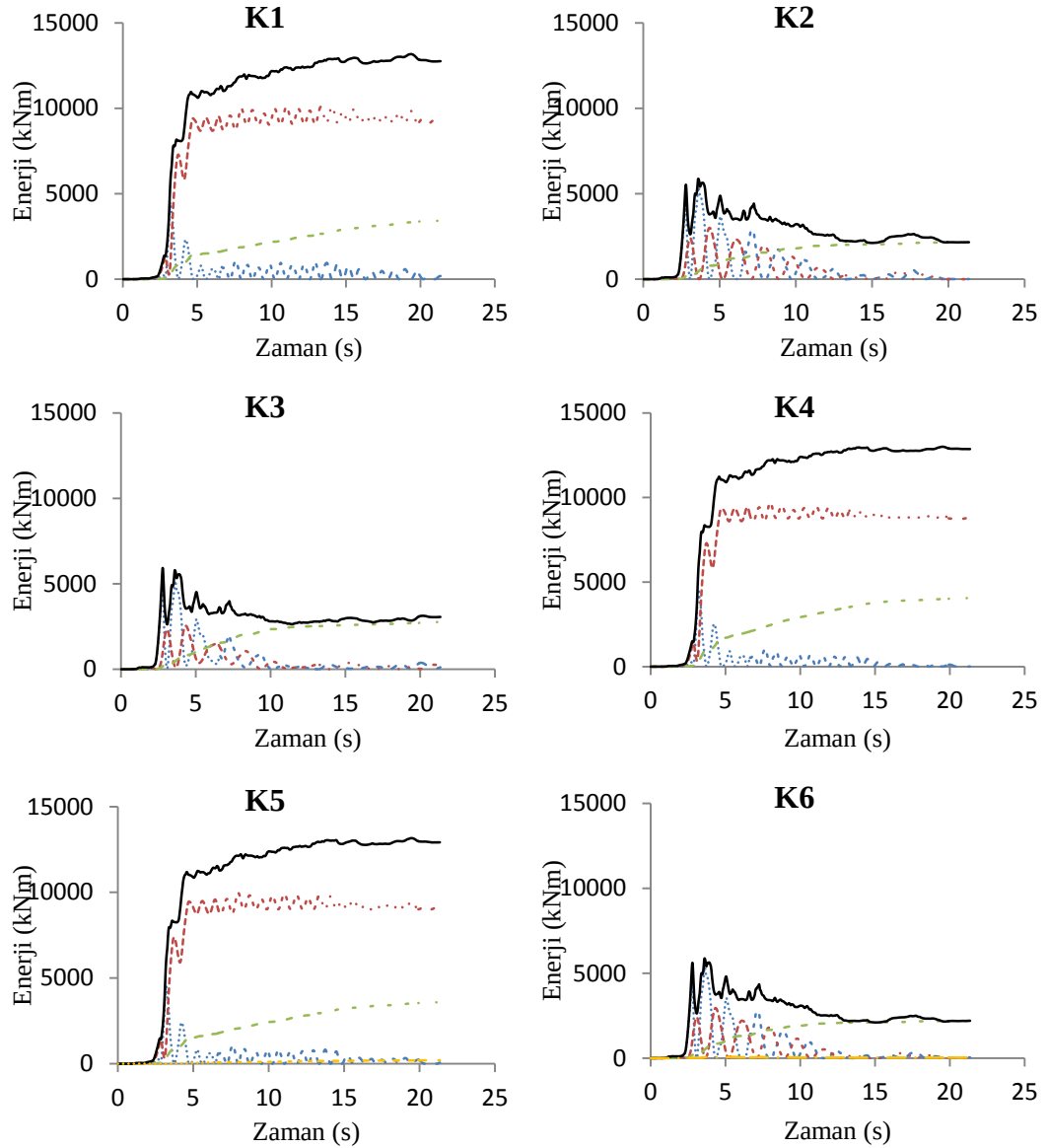
Sentetik deprem etkisinde yapıda meydana gelen enerji dağılımları da Şekil 3.19 da verilmiştir. Diğer depremlere kıyasla yapıya giren deprem enerjisi sentetik depremde daha düşük olmuştur.



Şekil 3.19 : Sentetik depremi etkisinde enerji dağılımları (B1) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

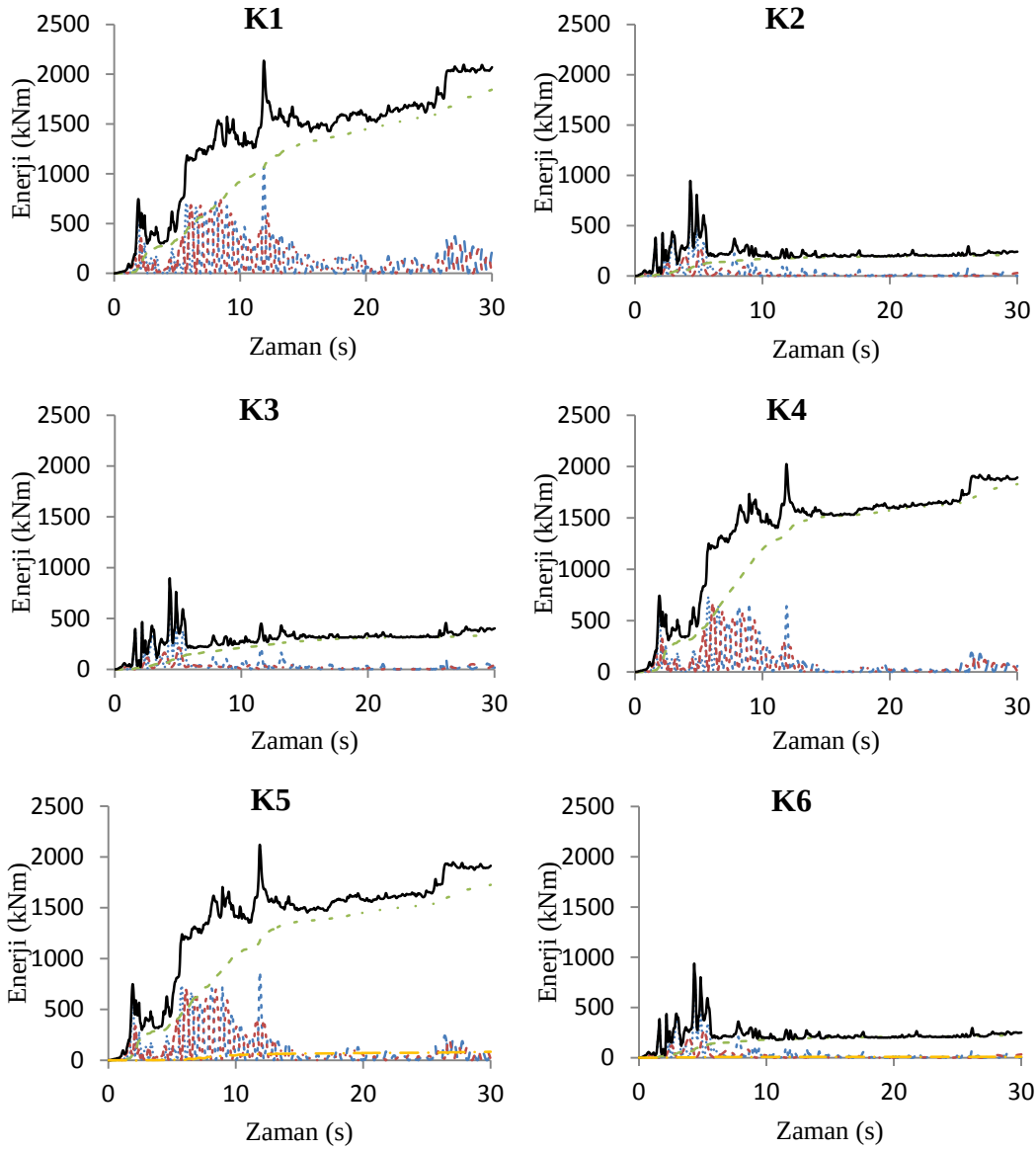
12 katlı yapıdaki rölatif enerji dağılımları Erzincan depremi için tüm kontrol durumları için Şekil 3.20’de verilmiştir. Şekil 3.20 incelendiğinde kontrolsuz durumda yapıya giren şekil değiştirme enerjisinden yapı davranışının plastik durumda olduğu anlaşılmaktadır. Şekil değiştirme eğrisinin 9000 ve 10000 kN.m lik enerji seviyelerinde salınım yaptığı görülmektedir, bu duruma yapıda oluşan plastijk şekil değiştirmeler neden olmaktadır. 3 katlı yapıdan farklı olarak bu yapıda kontrol elemanları eklenmesi giren deprem enerjisini azaltmıştır. Yapıya taban izolasyonu eklenmesiyle şekil değiştirme enerjisinin azaldığı ve yapı davranışının elastik bölge içerisinde kaldığı eğrilerden çıkarılabilecek başka bir sonuçtur. Yapıya sadece pasif

veya aktif kütle sönümleyicisi eklemenin (K4 ve K5) plastik davranışı önleyemediği ve enerjilerin de kontrolsüz duruma benzer şekilde dağılım gösterdiği görülmektedir.



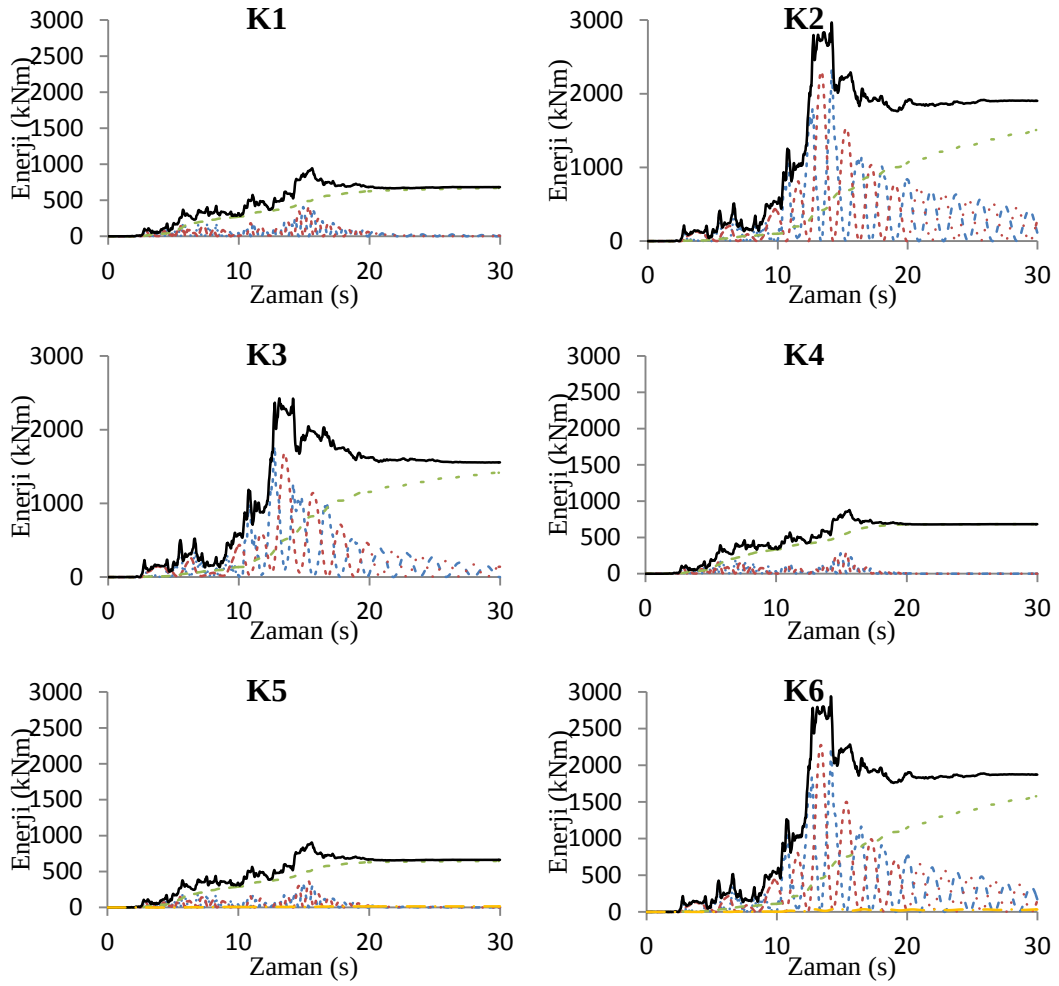
Şekil 3.20 : Erzincan depremi etkisinde enerji dağılımları (B2) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

El Centro depremi etkisinde 12 katlı binada enerji dağılımları da Şekil 3.21 de verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere K2,K3 ve K6 kontrol durumlarında yapıya giren deprem enerjisinin ve diğer enerjilerin azaldığı görülmektedir. K4 ve K5 kontrol durumlarında ise enerji dağılımları kontrolsüz yapıya benzer şekildedir.



Şekil 3.21 : El Centro depremi etkisinde enerji dağılımları (B2)
(mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

Sentetik deprem etkisi altındaki enerji dağılımları 12 katlı yapı için Şekil 3.22 de verilmiştir. Rölatif enerjilerin yanında mutlak enerjiler de bu çalışma kapsamında incelenmiştir.

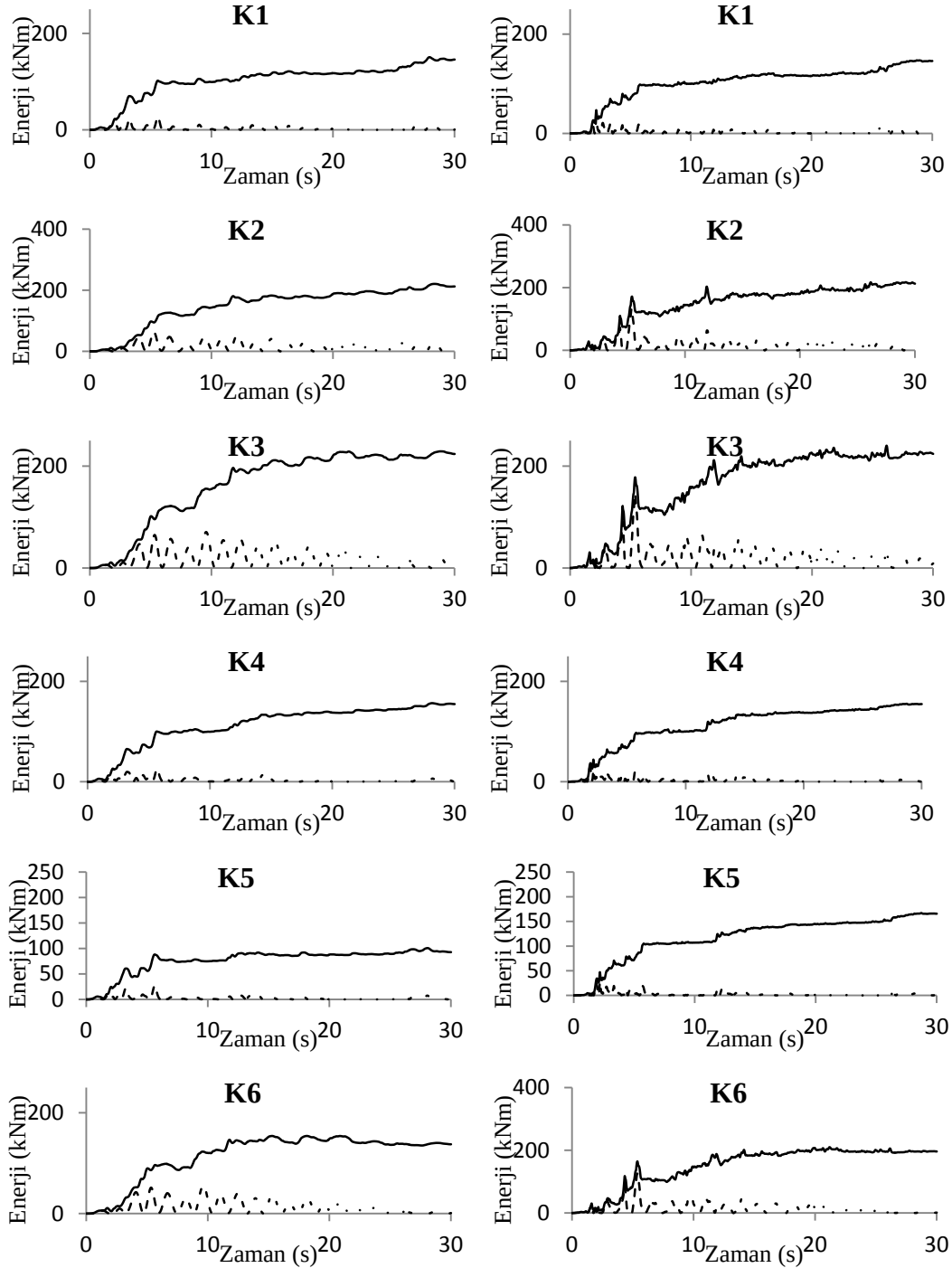


Şekil 3.22 : Sentetik deprem etkisinde enerji dağılımları (B2) (mavi noktalı eğri:kinetik enerji,kırmızı sık kesikli eğri:şekil değiştirme enerjisi, yeşil kesikli eğri:sönüm enerjisi, siyah kesiksiz eğri:deprem enerjisi, sarı noktalı kesikli eğri:kontrol enerjisi).

3.1.3 Yapıda mutlak enerji dağılımları

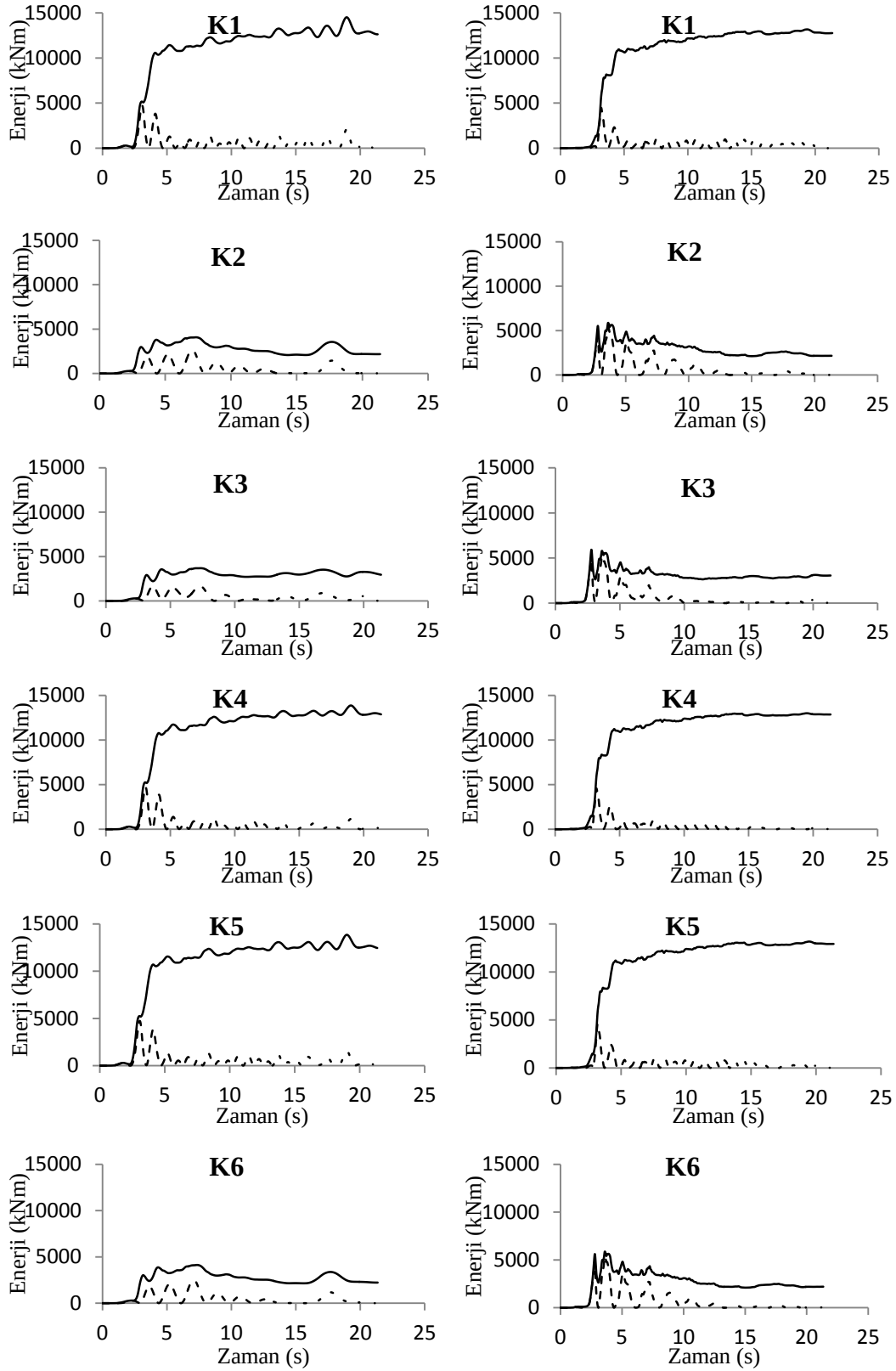
Bundan önceki bölümde hesaplanan kinetik enerji ve deprem enerjisi bağıl(rölatif) enerjilerdir. Yani hareketli tabana göre hesaplanmışlardır. Bu bölümde mutlak kinetik enerji ve mutlak deprem enerjisi hesaplanmış grafikler halinde bağıl enerjilerle karşılaştırılmıştır. Mutlak hız kullanılarak hesaplanan mutlak deprem enerjisi ve mutlak kinetik enerji, bağıl hız kullanılarak hesaplanan enerjilerden farklıdır. Sönüm enerjisi, şekildeğiştirme enerjisi ve kontrol enerjisi ise mutlak ve bağıl ivmelerin kullanıldığı iki durumda da aynı olmaktadır. Bu kısımda mutlak ve bağıl enerjilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 3.23 de El Centro depremi etkisi altında 3 katlı yapıda meydana gelen mutlak ve bağıl enerjilerin dağılımı verilmiştir. Şekilde ilk sütundaki grafikler mutlak, ikinci sütun bağıl enerjileri temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde mutlak enerjilerin bağıl enerjiler arasında önemli bir fark

olmadığı görülmektedir. Mutlak kinetik enerji ile bağıl kinetik enerjinin arasındaki farkın mutlak deprem enerjisi ile, bağıl deprem enerji arasındaki farka eşit olacağı önceki bölümde belirtilmiştir. Bu eşitlik sayısal hesapların kontrolünde kullanılmıştır.



Şekil 3.23 : Mutlak-bağıl enerji dağılımları (B2) (Kesiksiz eğri:deprem enerjisi, kesikli eğri:kinetik enerji).

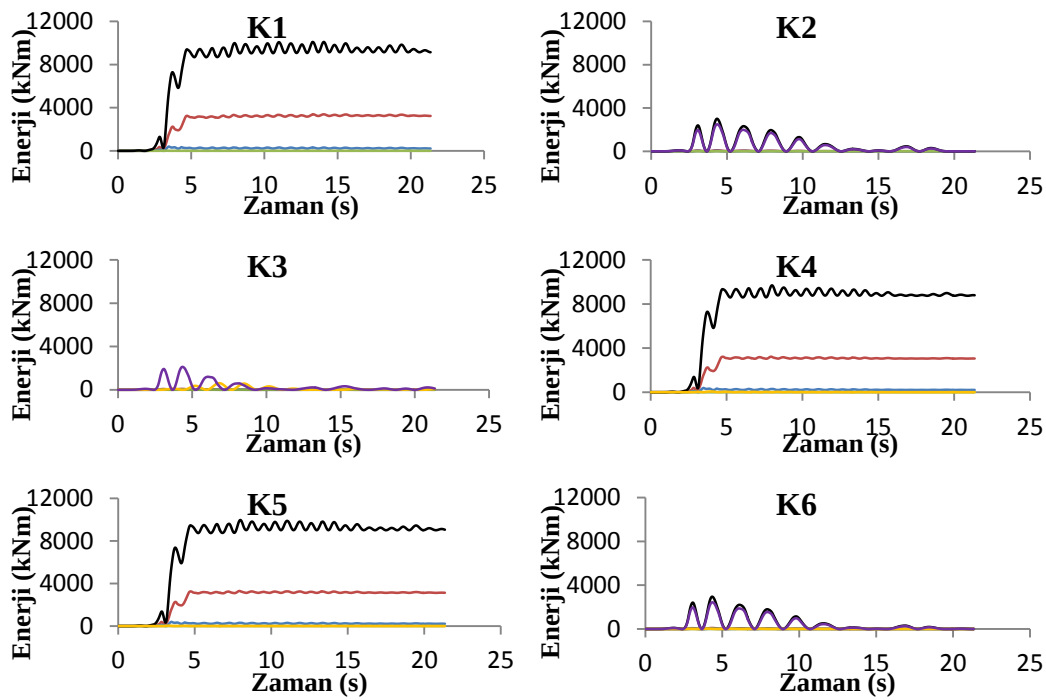
Şekil 3.24 de ise 12 katlı yapıda Erzincan depremi etkisinde enerji dağılımları verilmiştir.



Şekil 3.24 : Erzincan depremi etkisinde mutlak-bağıl enerji dağılımları (B2)(Kesiksiz eğri:deprem enerjisi, kesikli eğri:kinetik enerji).

3.1.4 Şekil değiştirme enerjisinin katlara ve kontrol elemanlarına göre dağılımı

Şekil değiştirme enerjisinin artması yapılarda hasara neden olmaktadır. Bu enerji tipinin çok büyük değerler alması durumunda yapı harap olabilir. Yapıyı harap edebilecek şekil değiştirme enerjisinin katlara ve kontrol elemanlarına ne şekilde dağıldığı da bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Kontrol elemanları şekil değiştirme enerjisinin büyük kısmını üzerlerine alıyor ise bunun yapı davranışını olumlu yönde etkileyecek bir davranış olduğu söylenebilir. Erzincan depremi etkisinde 12 katlı yapıda şekil değiştirme enerjisinin katlara ve kontrol elemanlarına göre dağılımı tüm kontrol durumları için Şekil 3.25 de verilmiştir. Şekil 3.25 incelendiğinde kontrolsüz durumda şekil değiştirme enerjisinin büyük kısmını 1. katın aldığı yukarı katlara çıkıldıkça katların aldığı şekil değiştirme enerjisinin azaldığı görülmektedir. Yapıya taban izolasyonu eklenmesi ile toplam şekil değiştirme enerjisinin büyük çoğunluğunun taban izolasyonu tarafından alındığı görülmektedir. Ayrıca K2, K3 ve K6 kontrol durumlarında yapıdaki şekil değiştirme enerjisinin büyük ölçüde azaldığı görülmektedir. Yapıya taban izolasyonu eklemek şekil değiştirme enerjisini hem azaltmış hem de toplam şekil değiştirme enerjisinin büyük çoğunluğunun taban izolasyonu tarafından alınmasını sağlamıştır. Grafikte kırmızı eğri:1. kat, mavi eğri:6. kat, yeşil eğri:12. kat, mor eğri:sönümleyici, sarı eğri:izolasyon, siyah eğri: toplam şekil değiştirme enerjisine karşı gelmektedir.



Şekil 3.25 : Şekil değiştirme enerjisinin dağılımı (B2) .

4. DEPREM ETKİSİNDEKİ YAPILARIN KONTROLU İÇİN İKİ YENİ YAKLAŞIM

4.1 Giriş

Bu kısımda öncelikle klasik doğrusal optimal kontrolün temel parametrelerinden olan kazanç matrisinden yararlanarak yapıya eklenebilecek yarı optimal sönüm ve rijitlik parametrelerini bulmak için çeşitli basit metodlar önerilmiştir. Yapıya klasik doğrusal optimal kontrolden elde edilecek tam sönüm ve rijitliği eklemek pratikte mümkün olmadığından ötürü yarı optimal değerlerin bulunması için bu yöntem sunulmuştur. Nümerik olarak incelenen bu yaklaşım sonucunda yapının ilk sönümünü ve rijitliğini uygun oranlarda değiştirmek deprem etkisi altında oluşan titreşimleri azaltmakta ancak yöntemin performansı depremden depreme değişmektedir. Bu yöntem tam anlamıyla pasif ve değişken dinamik etkilere karşı adapte olabilme yeteneği olmadığından ikinci olarak aktif kontrol için yeni bir performans indeksi önerilmiştir. Önerilen performans indeksi yapının mekanik enerjisi ile beraber, kontrol ve sismik enerjileri de eş zamanlı olarak minimize etme prensibine dayanmaktadır. Bu performans indeksi yapıya etkileyen deprem değerlerinin tümünün bilinmesini gerektirmemekte ve doğrusal olmayan matris Rikkati denkleminin çözümünü içermemektedir. Önerilen performans indeksi üç farklı deprem etkisi altında iki farklı yapı için değerlendirilmiş olup yapı davranışı kontrolsüz, klasik doğrusal optimal kontrol ve önerilen diğer yöntem ile karşılaştırılmıştır.

4.2 Klasik Doğrusal Optimal Kontrol Algoritması

Bu algoritma ile ilgili bilgiler Bölüm 2.2.1 de verilmişti. Bu kısımda önerilen algoritma ile uyumlu olması açısından çeşitli indis değişikliklerine gidilmiştir. Bu indis değişikliklerinden ötürü algoritmanın temel denklemleri bu kısımda da verilecektir.

Tek yönde etkiyen deprem ve kontrol etkisi altındaki n katlı doğrusal bir kayma binası n serbestlik dereceli bir sistem ile idealize edilebilir. Bu binanın hareket denklemleri aşağıda verilmiştir

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{X}(t) = \mathbf{D}_1 f(t) + \mathbf{D}_2 \mathbf{U}(t) \quad , t \in (t_0, t_1) \quad (4.1)$$

buradaki $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$ ve $\mathbf{K}$ matrisleri önceki bölümlerde tanımlanmıştı, $\mathbf{X}(t) = (X_1, X_2, \dots, X_n)^T$, $(n \times 1)$ boyutlu rölatif deplasman matrisleridir; $\mathbf{D}_1$ $(n \times 1)$ boyutlu yerleşim vektörü ve $\mathbf{D}_1^T = -(m_1, \dots, m_n)$ şeklinde tanımlanır; $\mathbf{D}_2$ ise $(n \times r)$ -boyutlu r adet kontrol elemanının kontrol kuvvet yerleşim vektörüdür; $\mathbf{U}(t)$ ise r -boyutlu aktif kontrol kuvveti vektörüdür ve $\mathbf{U}^T(t) = (u_1(t), \dots, u_r(t))$ şeklinde tanımlanır, skaler fonksiyon $f(t)$ ise bir boyutlu deprem ivme vektörüdür. Bu yapının başlangıç koşulları aşağıda yazılmıştır

$$\mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}^{(0)} ; \dot{\mathbf{X}}(t_0) = \mathbf{X}^{(1)} \quad (4.2)$$

pratikte $\mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{X}^{(1)} = \mathbf{0}$ dir. Bu denklem bölüm 2.2.1 de tanımlanan $2n$ boyutlu $\mathbf{Z} = (\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}})^T$ durum vektörü yardımı ile doğrusal birinci dereceden durum uzayı denklemlerine aşağıdaki şekilde dönüştürülür.

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B} \mathbf{U}(t) + \mathbf{D} f(t), \quad t \in (t_0, t_1) \quad (4.3)$$

bu denklemdeki parametreler de aşağıdaki gibi tanımlanır

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{D}_2 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

burada $\mathbf{I}$ $(n \times n)$ boyutlu birim matris ve $\boldsymbol{\eta} = (1, \dots, 1)^T$ n -boyutlu sabit vektördür. Denklem 4.3 ün başlangıç şartları denklem 4.2 kullanılarak aşağıdaki gibi yazılır

$$\mathbf{Z}(t_0) = \mathbf{Z}^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}^{(0)} \\ \mathbf{X}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.3 denkleminin 4.5 denklemi kullanılarak çözümü aşağıdaki gibi elde edilir

$$\mathbf{Z}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{Z}^0 + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-s)} \mathbf{q}(s) ds \quad (4.6)$$

burada

$$\mathbf{q}(t)=\mathbf{B} \mathbf{U}(t)+\mathbf{D} f(t) \quad (4.7)$$

olarak tanımlanır. 4.6 denklemi aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir

$$\mathbf{Z}(t)=e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{Z}(t-\Delta t)+\int_{t-\Delta}^t e^{\mathbf{A}(t-s)} \mathbf{q}(s) ds \quad (4.8)$$

burada Δt zaman aralığıdır. Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki denklemin trapez kuralı yardımı ile çözersek , $\mathbf{Z}(t)$ aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$\mathbf{Z}(t)=e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{Z}(t-\Delta t)+(\Delta t / 2) e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{q}(t-\Delta t)+(\Delta t / 2)[\mathbf{B} \mathbf{U}(t)+\mathbf{D} f(t)]+O(\Delta t^3) \quad (4.9)$$

burada $O(\Delta t^3) |g(\Delta t)| \leq C_0 \Delta t^3$, $\Delta t \rightarrow +0$ için $C_0 = \text{sabit} > 0$ şartını sağlayan $g(\Delta t)$ parametresini ifade etmektedir. Klasik optimal doğrusal kontrol algoritmasında klasik integral tipli kuadratik performans indeksi aşağıdaki gibi tanımlanır

$$J=\int_0^{t_1}(\mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_C \mathbf{Z}+\mathbf{U}^T \mathbf{R}_C \mathbf{U}) dt \quad (4.10)$$

Yukarıda verilen klasik doğrusal optimal kontrolün performans indeksinin minimize edilmesi ve doğrusal olmayan matris Rikkati denkleminden de yararlanılarak bölüm 2.2.1.1 ve denklem 2.33 ile de verilmiş olan sonuç kontrol kuvveti aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\mathbf{U}(t)=-\frac{1}{2} \mathbf{R}_C^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) \mathbf{Z}(t) \quad (4.11)$$

yukarıda verilen denklemde $\mathbf{P}(t)$ simetrik pozitif belirli Rikkati denkleminin çözümü olan matristir ve aşağıdaki gibi yazılır

$$\dot{\mathbf{P}}(t)+\mathbf{P}(t) \mathbf{A}-\frac{1}{2} \mathbf{P}(t) \mathbf{B} \mathbf{R}_C^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t)+\mathbf{A}^T \mathbf{P}(t)+2 \mathbf{Q}_C=\mathbf{0} ; \mathbf{P}(t_1)=0 \quad (4.12)$$

yukarıdaki ifadede C alt indisi klasik doğrusal optimal kontrolü ifade etmektedir; $\mathbf{Q}_c$ ve $\mathbf{R}_c$ tasarımcı tarafından belirlenen sırasıyla pozitif yarı-belirli ve pozitif belirli ağırlık matrisleridir. Bu matrislerin seçiminde yapının stabilitesini sağlayacak sistematik metodlar kullanılması istenilmektedir ancak günümüzde ağırlık matrislerinin değerlerinin atanmasında herhangi bir sistematik metod veya kural tanımlanmamıştır. Ağırlık matrisine atanan değerler yapı deplasmanları ve kontrol kuvvetleri ile direk ilişkilidir. Bu nedenle ağırlık matrislerine optimal değerlerin atanması kontrol elemanlarının tasarımında önemli bir aşamadır. Bu çalışma kapsamında ağırlık matrislerine atanan değerler yapının stabilize şartlarını sağlamaktadır. Bir tasarımcı ağırlık matrislerine nümerik değerleri atadıktan sonra kontrollü sistemin özdeğerlerini hesap ederek sistemin stabilitesi hakkında fikir sahibi olabilir.

Denklem 4.3 ile verilen kontrol kuvveti aşağıdaki şekilde de yazılabilir

$$\mathbf{U}(t) = \mathbf{G}_c \mathbf{Z}(t) \quad (4.13)$$

bu denklemde ifade edilen kazanç matrisi $\mathbf{G}_c$ ($n \times 2n$) boyutlu bir matristir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\mathbf{G}_c(t) = -\frac{1}{2} \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) \quad (4.14)$$

denklem 4.12 vasıtası ile elde edilen Rikkati matrisi $\mathbf{P}(t)$ deprem ivme terimi $f(t)$ kontrol aralığı boyunca bilinmediği sürece optimal bir sonuç vermez (Soong, 1990). Ayrıca Rikkati matrisinin yapısal kontrol uygulamalarında sabit olarak kabul edilebileceği bilinmektedir. Bu nedenle denklem 4.14 ve 4.12 den anlaşılacağı üzere ağırlık matrislerinin nümerik değerleri belirlendikten sonra Rikkati matrisi ve kazanç matrisi bir yapı için sabittir ve deprem ivmesinden bağımsızdır.

4.3 Önerilen Kontrol Metodları

Bu kısımda öncelikle yapıya eklenecek yarı optimal rijitlik ve sönümün yapı davranışına yapacağı etki incelenmiş ardından da yapıların aktif kontrolü için yeni bir performans indeksi önerilmiştir

4.3.1 Pasif Yaklaşım

Denklem 4.14 ile verilen kazanç matrisi $\mathbf{G}_1$ ve $\mathbf{G}_2$ şeklinde iki alt matrise ayrılır ise elde edilen yeni ifade aşağıdaki gibidir

$$\mathbf{G}_C = [\mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_2] \quad (4.15)$$

Denklem 4.15 kullanılarak 4.13 denklemi yeniden yazılabilir

$$\mathbf{U} = [\mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{X}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}(t) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

burada $\mathbf{G}_1$ ve $\mathbf{G}_2$ ($n \times n$) boyutlu $\mathbf{G}_C$ nin alt matrisleridir (Gluck ve diğ., 1996, Sing ve Moreschi, 2001, Reinhorn, 2009). Denklem 4.16 dan yararlanılarak denklem 4.1 tekrar yazılır ise aşağıdaki denklem elde edilir

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(t) + [\mathbf{C} - \mathbf{D}_2 \mathbf{G}_2] \dot{\mathbf{X}}(t) + [\mathbf{K} - \mathbf{D}_2 \mathbf{G}_1] \mathbf{X}(t) = \mathbf{D}_1 f(t) \quad (4.17)$$

yukarıdaki denklemden anlaşıldığı üzere kontrol kuvveti yapı rijitliğini ve sönümünü değiştirmektedir. Bu değişim aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$\mathbf{K}_{opt} = -\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_1 ; \mathbf{C}_{opt} = -\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_2 \quad (4.18)$$

çoğu durumda klasik doğrusal optimal kontrol yardımıyla yukarıda bulunan optimal sönüm ve rijitlik matrisleri yapının sönüm ve rijitlik matrislerine direk olarak eklenemez. Katlara eklenecek olan sönüm ve rijitliğin tam tamına optimal değerlerini bulmak mümkün görünmemektedir. Eğer bu mümkün olsa idi yapılara aktif veya pasif kontrol elemanlarının eklenmesine zaten gerek kalmazdı. Bu nedenlerden ötürü bu çalışmada çeşitli basit yaklaşık yöntemler önerilmiş olup bu yöntemler yapıya eklenecek mutlak optimal rijitlik ve sönüm değerlerini değil yarı optimal rijitlik ve sönüm değerlerinin eklenmesi amaçlanmıştır. 4.18 denkleminde elde edilen rijitlik ve sönüm matrisleri düzgün formda ise yapının ilk rijitlik ve sönüm matrisine direk olarak eklenir. Burada düzgün formdan kasıt yapının rijitlik ve sönüm matrislerinin dizilişi ile aynı dizilişe sahip olmasıdır. Eğer bu formda değil ise optimal rijitlik ve sönüm matrislerinin özdeğerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır ve ilgili katların sönüm ve rijitlik değerlerine eklenir

$$\begin{aligned} \text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_2) &= Ca_i \quad ; \quad i = 1, n \\ \text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_1) &= Ka_i \quad ; \quad i = 1, n \end{aligned} \quad (4.19)$$

burada Ca_i ve Ka_i i . kata eklenecek ek sönüm ve rijitliği ifade etmektedir.

Bir başka basit yöntem olarak ortalama ek sönüm ve ek rijitlik elde edilip katların ilgili değerlerine eklenebilir

$$\frac{\sum_{i=1}^n \text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_2)}{n} = Ca_j \quad ; \quad \frac{\sum_{i=1}^n \text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_1)}{n} = Ka_j \quad ; \quad j = 1, n \quad (4.20)$$

veya maksimum sönüm ve rijitlik parametreleri ilk kattan son kata kadar azalan bir şekilde katların sönüm ve rijitlik parametrelerine eklenebilir

$$\begin{aligned} [\text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_2)]_{\text{maks}, \dots, \text{min}} &= Ca_{1, \dots, n} \quad ; \\ [\text{Eig}_i(-\mathbf{D}_2 \mathbf{G}_1)]_{\text{maks}, \dots, \text{min}} &= Ka_{1, \dots, n} \end{aligned} \quad (4.21)$$

son olarak elde edilen optimal sönüm ve rijitlik matrislerinin klasik yapı sönüm ve rijitlik matrisleri formunda simetrik band matris olduğunu kabul ederek katlara eklenecek sönüm ve rijitlik aşağıdaki şekilde de bulunabilir

$$\frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{K}_{\text{opt}}(i, i)}{2n-1} = Ka_j \quad ; \quad \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{C}_{\text{opt}}(i, i)}{2n-1} = Ca_j \quad ; \quad j = 1, n \quad (4.22)$$

4.3.2 Aktif Kontrol Yaklaşımı

Bu kısımda yapının mekanik enerjisi, kontrol enerjisi ve sismik enerjilerin aynı anda minimizasyon prosedüründe göz önüne alındığı aşağıdaki performans indeksi önerilmiştir

$$J = J_1(\mathbf{Z}, \mathbf{U}) + J_2(\mathbf{Z}, t) \quad (4.23)$$

burada J_1 ve J_2 parametreleri aşağıdaki şekilde tanımlanır

$$\begin{aligned} J_1 &= \mathbf{Z}^T(t) \mathbf{Q}_1 \mathbf{Z}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{U}(t) \\ J_2 &= \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{D}_1 f(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (4.24)$$

yukarıdaki denklemde J_1 zamandan bağımsız kuadratik skaler bir fonksiyoneldir ; $\mathbf{Q}_1$ pozitif yarı belirli ağırlık matrisi; J_2 yapının sismik enerjisini tanımlayan integral tipinde kuadratik bir fonksiyoneldir. $\mathbf{D}_1$ de yerleşim vektörü olup $\mathbf{D}_1 = -(m_1, \dots, m_n)^T$ olarak tanımlanır. J_2 yapının enerji dengesinden aşağıda verilen şekilde ifade edilir

$$\begin{aligned} & \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{M} \ddot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{K} \mathbf{X}(\tau) d\tau \\ & = \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{D}_1 f(t) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{D}_2 \mathbf{U}(t) d\tau \end{aligned} \quad (4.25)$$

yukarıda denklemde verilen ilk terim yapının kinetik enerjisi $(1/2) \dot{\mathbf{X}}^T(t) \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}}(t)$ olarak tanımlanır. İkinci terim ise yapının sönüm enerjisi, üçüncü terim ise $(1/2) \mathbf{X}^T(t) \mathbf{K} \mathbf{X}(t)$ şeklinde tanımlanan doğrusal şekil değiştirme enerjisidir. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim J_2 olarak tanımlanan yapının sismik enerjisi ikinci terim ise yapının kontrol enerjisidir. J_2 4.25 denkleminde aşağıda verilen şekilde elde edilir

$$\begin{aligned} J_2 &= \int_0^t \dot{\mathbf{X}}^T(\tau) \mathbf{D}_1 f(t) d\tau = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{X}} + \frac{\Delta t}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{C} \dot{\mathbf{X}} \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \mathbf{X}^T \mathbf{K} \mathbf{X} - \frac{\Delta t}{2} \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{D}_2 \mathbf{U} + E(t-\Delta t) \end{aligned} \quad (4.26)$$

bu denklemde Δt zaman aralığı $E(t-\Delta t)$ ise 0 dan $(t-\Delta t)$ zamanına kadar olan enerji terimlerini kapsamaktadır. J_2 vektörü durum ve kontrol vektörleri cinsinden de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir

$$J_2 = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{Z} + \mathbf{Z}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t) \quad (4.27)$$

bu denklemde bulunan $\mathbf{Q}_2$ ve $\mathbf{H}_1$ terimleri de aşağıdaki gibi yazılır

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \frac{\Delta t}{2} \mathbf{K} & \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C} + \frac{\mathbf{M}}{2} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\frac{\Delta t}{2} \mathbf{D}_2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Bu tanımlamalardan sonra önerilen performans fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$J = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{Z} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + [\mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{Z} + \mathbf{Z}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t)] \quad (4.29)$$

$$J = \mathbf{Z}^T (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2) \mathbf{Z} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + \mathbf{Z}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t) \quad (4.30)$$

burada dikkat edilmesi gereken nokta önerilen performans indeksinin durum ve kontrol vektörlerinin çapraz terimlerini içermiş olmasıdır. Önerilen performans indeksinin denklem 4.2 ve 4.3 ile verilen kısıtlar altında optimallik koşulları Lagrange çarpanları metodu ile problemin Hamiltonyeni kullanılarak elde edilebilir

$$H = J + \lambda \{ \mathbf{Z}(t) - e^{A\Delta t} [\mathbf{Z}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{q}(t-\Delta t)] - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{q}(t) \} \quad (4.31)$$

burada λ Lagrange çarpım vektörüdür (Chung ve diğ. 1995, Lin ve diğ. 1996, Singh ve Moreschi, 2001). Optimalliğin gerekli koşulları da aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\frac{\partial H}{\partial \lambda} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{U}} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial H}{\partial \mathbf{Z}} = 0 \quad (4.32)$$

denklem 4.31 ve 4.32 den aşağıdaki denklemler elde edilir

$$\mathbf{Z}(t) - e^{A\Delta t} \{ \mathbf{Z}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{q}(t-\Delta t) \} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{q}(t) = 0 \quad (4.33)$$

$$2 \mathbf{R} \mathbf{U} + \mathbf{H}_1^T \mathbf{Z} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \lambda^T = 0 \quad (4.34)$$

$$2 (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2) \mathbf{Z} + \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + \lambda^T = 0 \quad (4.35)$$

denklem 4.35 aşağıdaki gibi de ifade edilebilir

$$2 \mathbf{Q} \mathbf{Z} + \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + \lambda^T = 0 \quad (4.36)$$

burada $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2$ dir. Denklem 4.34 denklem 4.36 kullanılarak tekrar yazılırsa

$$[2 \mathbf{R} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1] \mathbf{U} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T 2 \mathbf{Q} \mathbf{Z} + \mathbf{H}_1^T \mathbf{Z} = 0 \quad (4.37)$$

bu denklem yardımı ile optimal kontrol kuvveti de aşağıdaki gibi bulunur

$$\mathbf{U}(t) = -\mathbf{G}_{pc} \mathbf{Z}(t) \quad (4.38)$$

burada kontrol kazancı $\mathbf{G}_{pc}$ ise

$$\mathbf{G}_{pc} = [2 \mathbf{R} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1]^{-1} [\Delta t \mathbf{B}^T \mathbf{Q} + \mathbf{H}_1^T] \quad (4.39)$$

olarak ifade edilir. Yukarıdaki denklemde ‘pc’ alt indisi önerilen kontrol algoritmasını ifade etmektedir. Denklem 4.38 i denklem 4.3 içerisine yerleştirdiğimizde optimal kontrollü yapı için aşağıdaki denklemi elde ederiz

$$\dot{\mathbf{Z}} = [\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{G}_{pc}] \mathbf{Z} + \mathbf{D} f(t) \quad (4.40)$$

$$\dot{\mathbf{Z}} = [\mathbf{A} - \mathbf{B} (2 \mathbf{R} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1)^{-1} (\Delta t \mathbf{B}^T \mathbf{Q} + \mathbf{H}_1^T)] \mathbf{Z} + \mathbf{D} f(t) \quad (4.41)$$

denklem 4.41 aşağıdaki şekilde de ifade edilebilir

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{N} \mathbf{Z} + \mathbf{D} f(t) \quad (4.42)$$

burada kapalı çevrim sistem matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\mathbf{N} = [\mathbf{A} - (2 \mathbf{R} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1)^{-1} (\Delta t \mathbf{B}^T \mathbf{Q} + \mathbf{H}_1^T)] \quad (4.43)$$

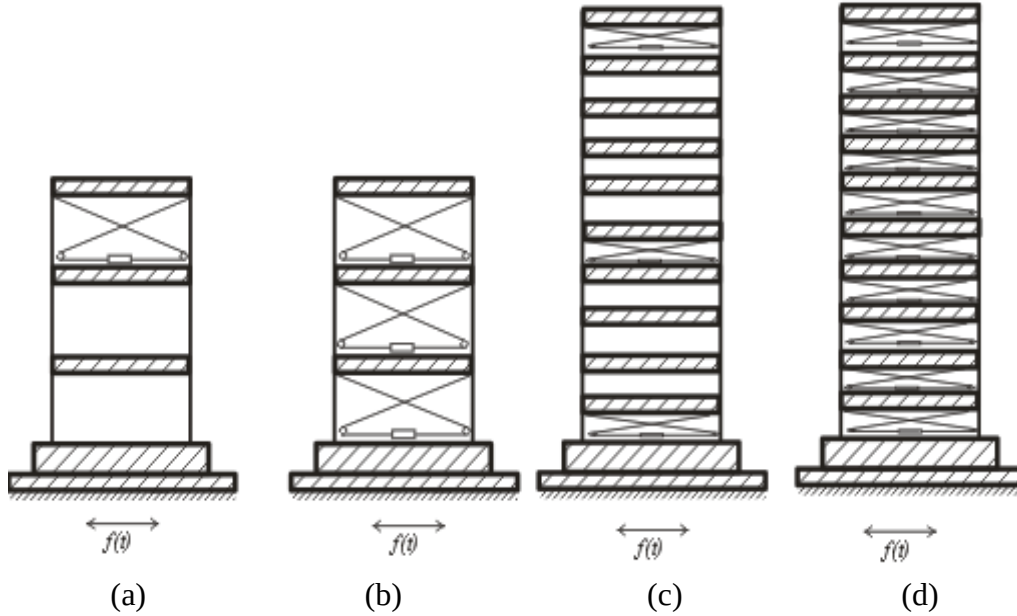
Denklem 4.43 de verilen kapalı çevrim sistem matrisi $\mathbf{N}$ nin özdeğerleri kompleks düzlemin sol tarafında bulunuyor ise sistem asimptotik olarak kararlıdır. Önerilen kontrol kuvvetinin uygulaması doğrusal olmayan Rikkati matris denkleminin çözümünü içermez. Ayrıca önerilen algoritma kapalı-açık çevrim uygulaması olmadığından ötürü dış etkiye bağlı değildir ve yer hareketinin gelecekteki değerlerinin bilinmesini gerektirmez.

4.4 Sayısal Örnek

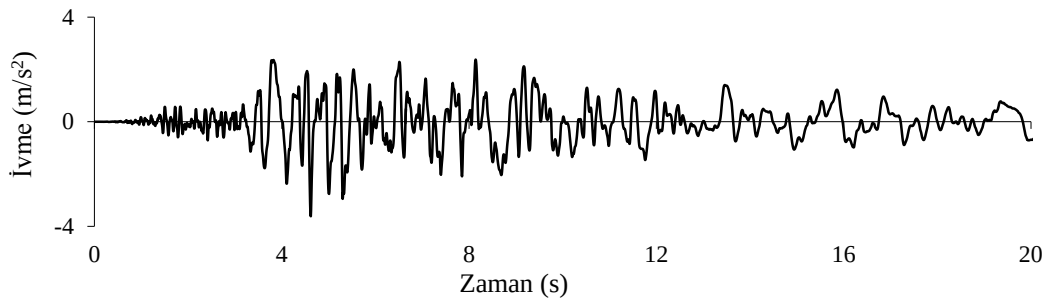
Önerilen algoritmanın ve pasif yaklaşımın etkinliğini göstermek için aktif tendon kontrol uygulanmış 3 ve 10 katlı iki adet kayma binası çeşitli deprem etkileri altında incelenmiştir. Şematik olarak bu yapılar Şekil 4.1 de verilmiştir. Bu çalışmanın amacı önerilen yaklaşımların performanslarını incelemek ve üstünlüklerini göstermek olduğundan 3 ve 10 katlı kayma yapıları daha kompleks modellere göre biraz daha basit modeller olmasına rağmen önerilen yaklaşımların değerlendirilmesi açısından yeterli oldukları söylenebilir.

Bu yapılar üç farklı deprem etkisi altında incelenmiştir bu depremler Erzincan (1992-95 Erzincan Station) bu depremin ivme kaydı Şekil 3.3 de verilmişti, Northridge

(1994-USC 90003 Northridge - 17645 Saticoy Station) ve sentetik depremdir. Sentetik deprem ivme kaydının oluşturulması ve deprem ivme kaydı bölüm 3 de verilmiştir. Northridge depreminin ivme kaydı ise Şekil 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Aktif tendon uygulanmış 3 ve 10 katlı yapılar.



Şekil 4.2 : Northridge depremi ivme kaydı.

Önerilen iki yaklaşımın performansını değerlendirmek için dört adet parametre belirlenmiştir. Bu parametreler yapı deplasmanlarını, rölatif ve mutlak ivmeleri, sismik enerjiyi ve kontrol enerjisini göz önünde bulundurmaktadır. Performans parametreleri birinci kat için belirlenmiş olup, β_3 parametresi yapının toplam kontrol ve sismik enerjisi için belirlenmiştir. Bu performans parametreleri aşağıda verilmiştir (aşağıdaki denklemde KDO:klasik doğrusal optimal kontrol, PC:önerilen aktif kontrol, KNSZ:kontROLSUZ yapı, SE:toplam şekildeğiştirme enerjisi, KE:kontrol enerjisini belirtmektedir).

$$\beta_1 = \frac{\text{maks}|X_1|_{\text{KDO}_{\text{PC}}}}{\text{maks}|X_1|_{\text{KNSZ}}}, \beta_2 = \frac{\text{maks}|\ddot{X}_1|}{\text{maks}|\ddot{X}_1|_{\text{KNSZ}}}$$

$$\beta_3 = \frac{\text{maks}|KE|}{\text{maks}|SE|}, \beta_4 = \frac{\text{maks}|\ddot{X}_{1abs}|_{\text{KDO}_{\text{PC}}}}{\text{maks}|\ddot{X}_{1abs}|_{\text{KNSZ}}}$$
(4.44)

4.4.1 Örnek yapı I

İncelenen üç katlı yapıda her kat kütlesi eşit ve 100 ton, elastik rijitlik katsayısı her katta eşit ve 15791 kN/m ve doğrusal viskoz sönüm katsayısı 125.66 kNs/m dir. Bu yapı iki farklı kontrol durumu için Şekil 4.1 a-b de verilmiştir. Tek tendon uygulanmış üç katlı yapı için ağırlık matrisi $\mathbf{R}_C$ (1 x 1) klasik doğrusal optimal kontrolde (KDO) 0.5×10^{-4} ;önerilen kontrol için (PC) 0.5×10^{-5} olarak belirlenmiştir. Tüm katlara tendon kontrol uygulandığı durumda ise $\mathbf{R}_C$ (3 x 3) KDO için $\mathbf{I}$ birim matris olmak üzere $0.5 \times 10^{-4} \mathbf{I}_{3 \times 3}$;PC için ise $0.4 \times 10^{-4} \mathbf{I}_{3 \times 3}$ olarak seçilmiştir. $\mathbf{Q}_C$ ve $\mathbf{Q}_1$ ağırlık matrisleri de aşağıdaki gibi seçilmiştir

$$\mathbf{Q}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{Q}_1 = 100 \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{bmatrix}$$
(4.45)

Ağırlık matrisleri PC ve KDO kontrollerinden birbirine yakın kontrol kuvvetleri elde edecek şekilde seçilmiştir. Kapalı çevrim sistem matrisi ($\mathbf{N}$) nin tüm özdeğerleri kompleks düzlemin sol yarısında kaldığından ötürü (-22.3312 , -22.3312 , -10.6949 , -10.6949 , -1.3623 , -1.3623), sistem asimptotik olarak kararlıdır. Tek tendonlu yapıda kazanç matrisi $\mathbf{G}_C = [987.4, -1263.5, 544.6, 193.1, -418.7, -363.2]$ olarak bulunmuştur. Bu matris yardımı ile $\mathbf{K}_{\text{opt}}$ ve $\mathbf{C}_{\text{opt}}$ da aşağıdaki gibi elde edilmiştir

$$\mathbf{K}_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} 987.4 & -1263.5 & 544.6 \\ -987.4 & 1263.5 & -544.6 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} 193.1 & -418.7 & -363.2 \\ -193.1 & 418.7 & 363.2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4.46)

görüldüğü üzere bu matrisler yapıların geleneksel rijitlik ve sönüm matrislerinden diziliş olarak farklıdır. Bu nedenle bu matrisler yapının ilk sönüm ve rijitlik

matrislerine direk olarak eklenemeyeceğinden bu matrislerin özdeğerleri hesaplanmış ve katların sönüm ve rijitliklerine direk olarak eklenmiştir. Hesaplanan özdeğerler ise $\text{özd}(\mathbf{K}_{\text{opt}})=(0, 2251, 0)$ ve $\text{özd}(\mathbf{C}_{\text{opt}})=(0, 611.8, 0)$ dir. C1 olarak adlandırılan ilk durumda optimal rijitlik matrisinin ikinci özdeğeri birinci katın rijitlik değerine direkt olarak eklenmiş ve optimal sönüm matrisinin ikinci özdeğeri de birinci katın ilk sönüm değerine direkt olarak eklenmiştir. C2 olarak adlandırılan ikinci durumda da özdeğerlerin ortalaması alınarak katların rijitlik ve sönüm değerlerine eşit olarak eklenmiştir.

Üç katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda $\mathbf{G}_c$, $\mathbf{K}_{\text{opt}}$ ve $\mathbf{C}_{\text{opt}}$ aşağıdaki gibi elde edilmiştir

$$\mathbf{G}_c = \begin{bmatrix} 970.20 & -0.03 & 0.03 & 437.83 & 238.61 & 188.09 \\ -970.20 & 970.20 & 0.01 & -199.22 & 387.31 & 238.61 \\ -0.02 & -970.20 & 970.2 & -50.52 & -199.22 & 437.83 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

$$\mathbf{K}_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} 1940.40 & -970.2 & 0.0 \\ -970.20 & 1940.40 & -970.20 \\ 0.0 & -970.20 & 970.20 \end{bmatrix}; \quad (4.48)$$

$$\mathbf{C}_{\text{opt}} = \begin{bmatrix} 637.05 & -148.70 & -50.52 \\ -148.70 & 586.53 & -199.22 \\ -50.52 & -199.22 & 437.83 \end{bmatrix}$$

yukarıdaki denklemlerden görüldüğü üzere $\mathbf{K}_{\text{opt}}$ geleneksel yapı rijitlik matrisine $k_1=k_2=k_3=970.2$ kN/m olarak uygun bir dizilimdedir. Ancak $\mathbf{C}_{\text{opt}}$ yapı sönüm matrisine uygun değildir ve direk olarak yapı sönüm matrisine eklenememektedir. C3 durumunda $\mathbf{K}_{\text{opt}}$ direk olarak eklenmiş olup $\mathbf{C}_{\text{opt}}$ özdeğerleri hesaplanmış ve katların sönüm katsayılarına eklenmiştir. C4 olarak adlandırılan durumda is bu iki matrisin de özdeğerleri hesaplanıp ilgili katların rijitlik ve sönüm değerlerine eklenmiştir. Bu matrislerin özdeğerleri de $\text{özd}(\mathbf{K}_{\text{opt}})=(3150.2, 1508.6, 192.2)$ and $\text{özd}(\mathbf{C}_{\text{opt}})=(255.6, 611.4, 794.5)$ olarak bulunmuştur. Burada dikkat edilmesi gereken husus elde edilen sönüm değerleri tendon kontrol uygulanmış gerçek yapının sönüm değerlerinden çok daha büyüktür. Ancak yukarıda belirtilen basit yaklaşımlar karşılaştırma amacıyla verilmiştir.

4.4.2 Örnek yapı II

İkinci olarak 3 ve 10 adet tendon uygulanmış 10 katlı bir yapı incelenmiştir Şekil 4.1 c-d verilmiştir. Her katın kütle, rijitlik ve sönüm katsayıları sırasıyla $m=345.6$ ton, $k=3.404 \times 10^5$ kN/m and $c=2937$ ton/s olarak seçilmiştir. Üç adet tendon uygulanmış durum için hidrolik yük verenler (actuator) birinci, beşinci ve onuncu katlara yerleştirilmiştir. On adet tendon uygulanmış durumda ise her katta hidrolik yük verenler bulunmaktadır. Tendon ların yapılara optimal yerleşimi ile çalışmalar literatürde bulunmaktadır (Pantelides ve Cheng, 1990, Abdullah ve diğ. 2001).

$$\mathbf{Q}_C = q_1 \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0}_{10 \times 10} \\ \mathbf{0}_{10 \times 10} & \mathbf{M} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{Q}_1 = q_2 \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0}_{10 \times 10} \\ \mathbf{0}_{10 \times 10} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

yukarıdaki denklemde q_1 ve q_2 parametrelerine PC ve KDO algoritmalarında yakın kontrol kuvvetleri elde edebilmek için uygun değerler verilmiştir. Üç adet tendon kontrol bulunan durumda KDO için ağırlık matrislerinden $\mathbf{R}_C(3 \times 3)$ $0.5 \times 10^{-2} \mathbf{I}_{3 \times 3}$; PC için ise $\mathbf{R}(3 \times 3)$ diyagonal bir matris olarak $0.15 \times 10^{-4} \mathbf{I}_{3 \times 3}$ seçilmiştir. Yapıda 10 adet tendon bulunduğu durumda ise KDO için $\mathbf{R}_C(10 \times 10)$ $0.2 \times 10^{-3} \mathbf{I}_{10 \times 10}$ olarak belirlenmiş ve PC için $\mathbf{R}(10 \times 10)$ olarak $0.5 \times 10^{-5} \mathbf{I}_{10 \times 10}$ belirlenmiştir.

Üç tendon kontrol uygulanmış durum için $\mathbf{K}_{opt}$ ve $\mathbf{C}_{opt}$ Çizelge 4.1 de verilmiştir. Çizelge 4.1 den anlaşıldığı üzere $\mathbf{K}_{opt}$ ve $\mathbf{C}_{opt}$ geleneksel yapı rijitlik ve sönüm matrislerinden dizilim olarak farklıdır. Bu nedenle yapıya tam olarak eklenecek optimal rijitlik ve sönümü bulmak olanaklı değildir. Bu matrislerin özdeğerleri hesaplanmış olup , $\text{öz}d(\mathbf{K}_{opt})=(56858, 22912, 1204.8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ ve $\text{öz}d(\mathbf{C}_{opt})=(4808.2, 3169.2, 618.22, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ olarak bulunmuştur. Bu özdeğerler C5 adı verilen kontrol durumunda yapının rijitlik ve sönüm matrislerine direk olarak eklenmiştir. C6 adı verilen kontrol durumunda ise bu matrislerin maksimum özdeğerleri ilk katın rijitlik ve sönüm değerine eklenmiş, diğer özdeğerler ise yukarı katların rijitlik ve sönüm değerlerine azalan bir şekilde eklenmiştir (üç tendon kontrol uygulanmış durumda C5 ve C6 durumları birbirine eşittir). C7 kontrol durumunda ise matrislerin diyagonal olmayan elemanları diyagonal elemanlara göre çok daha küçük ise optimal rijitlik ve sönüm matrisleri tüm katların aynı özelliklere sahip olduğu geleneksel yapı sönüm ve rijitlik matrisleri gibi kabul edilebilir. Bu durumda optimal matrislerin diyagonal elemanlarının toplamı alınıp bu toplam 19 a

Çizelge 4.1 : 10 katlı üç tendon kontrol uygulanmış yapıda $\mathbf{K}_{opt}$ ve $\mathbf{C}_{opt}$.

$\mathbf{K}_{opt} =$	15,500.0	-5,620.0	-1,300.0	11,500.0	-9,200.0	-1,680.0	-147.0	1,610.0	-4,130.0	-503.0
	-5,340.0	15,300.0	-618.0	-4,850.0	17,200.0	-2,320.0	-3,890.0	-2,430.0	13,700.0	-9,330.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	15,500.0	-5,620.0	-1,300.0	11,500.0	-9,200.0	-1,680.0	-147.0	1,610.0	-4,130.0	-503.0
	-5,340.0	15,300.0	-618.0	-4,850.0	17,200.0	-2,320.0	-3,890.0	-2,430.0	13,700.0	-9,330.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-5,340.0	15,300.0	-618.0	-4,850.0	17,200.0	-2,320.0	-3,890.0	-2,430.0	13,700.0	-9,330.0
	-1,770.0	-7,710.0	1,190.0	-764.0	-7,980.0	2,750.0	2,860.0	1,060.0	-8,010.0	7,740.0
$\mathbf{C}_{opt} =$	1,290.0	279.0	683.0	1,360.0	-147.0	-324.0	-488.0	-797.0	-1,290.0	-967.0
	69.0	1,440.0	795.0	563.0	1,910.0	1,250.0	1,080.0	1,310.0	1,890.0	446.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1,290.0	279.0	683.0	1,360.0	-147.0	-324.0	-488.0	-797.0	-1,290.0	-967.0
	69.0	1,440.0	795.0	563.0	1,910.0	1,250.0	1,080.0	1,310.0	1,890.0	446.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	69.0	1,440.0	795.0	563.0	1,910.0	1,250.0	1,080.0	1,310.0	1,890.0	446.0
	-456.0	-1,020.0	-717.0	-786.0	-1,180.0	-677.0	-470.0	-423.0	-457.0	704.0
	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

bölünerek katların sönüm ve rijitlik değerlerine eşit olarak eklenmiştir. Son durum C8 de ise $\mathbf{K}_{opt}$ ve $\mathbf{C}_{opt}$ un özdeğerleri toplanarak toplam değer 10 a bölünerek katların sönüm ve rijitlik değerlerine eşit olarak eklenmiştir.

Yapıya 10 adet aktif tendon uygulanmış durumda ise $\mathbf{K}_{opt}$ ve $\mathbf{C}_{opt}$ Çizelge 4.2 de verilmiştir. Bu iki matrisin özdeğerleri $\text{özd}(\mathbf{K}_{opt}) = (76041, 71022, 63158, 53092, 41799, 30223, 19439, 434.82, 3860.4, 10384)$ ve $\text{özd}(\mathbf{C}_{opt}) = (717.42, 1815.4, 2557, 3053.5, 3385.6, 3609.7, 3759.9, 3860.8, 3958.9, 3923.9)$ olarak elde edilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus hem 3 hem de 10 adet tendon kontrol uygulanmış durumda tam optimal sönüm matrisinden elde edilen sönüm değerleri katların sönüm değerleriyle aynı mertebelerdedir. C5 kontrol durumunda bu iki matrisin özdeğerleri direk olarak katların rijitlik ve sönüm değerlerine eklenmiştir. Çizelge 4.2 den görüldüğü üzere $\mathbf{K}_{opt}$ matrisinin diyagonal olmayan elemanları diyagonal elemanlara göre çok daha küçük, $\mathbf{C}_{opt}$ matrisinin ise diyagonal olmayan elemanları diyagonal elemanlara göre küçüktür. Bu nedenle bu matrisler ufak bir değişiklik ile geleneksel yapı rijitlik ve sönüm matrisi dizilimine dönüştürülebilir. C7 kontrol durumunda optimal rijitlik ve sönüm matrislerinin diyagonal elemanları 19 a bölünüp eşdeğer rijitlik ve sönüm değerleri $k=19450$ kN/m ve $c=1612.74$ ton/s/m olarak bulunmuştur. C8 kontrol durumunda ise bu matrislerin özdeğerleri toplanıp 10 a bölünerek katların rijitlik ve sönüm değerlerine eklenmiştir.

Üç katlı yapıda tek ve üç tendon kontrol uygulanmış durumlar için maksimum yapı tepkileri incelenen tüm durumlar için Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 de verilmiştir. Çizelgelerde NC yapıdaki kontrolsüz durumu ifade etmektedir. On katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış hal için Erzincan , Norhtridge ve sentetik deprem etkisinde maksimum yapı tepkileri ise Çizelge 4.5-4.7 de incelenen tüm durumlar için sunulmuştur. On katlı yapıda on adet tendon kontrol uygulanmış hal için Erzincan , Norhtridge ve sentetik deprem etkisinde maksimum yapı tepkileri ise Çizelge 4.8-4.13 de incelenen tüm durumlar için sunulmuştur. Çizelge 4.14 ve 4.15 de ise üç katlı yapıda tek ve üç tendon uygulanmış yapıda performans parametreleri verilmiştir. On katlı yapıda üç ve on adet tendon kontrol uygulanmış durumlarda ise performans parametreleri Çizelge 4.16 ve 4.17 de verilmiştir.

Çizelge 4.3 ve 4.4 den görüldüğü üzere pasif durumlardan C1, C2, C3 ve C4 kontrolsüz yapı deplasmanlarını önemli ölçüde azaltmıştır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus yapıya eklenen yarı optimal sönüm değerleri yapının ilk sönüm değerlerinden oldukça fazladır. Buradan anlaşılabileceği üzere tam optimal performans yapıya yarı optimal sönüm eklenmesi ile elde edilemeyecektir. Bu durumlar karşılaştırma düşüncesi ile burada incelenmiştir. Çizelge 4.3 ve 4.4 den çıkarılabilecek başka bir sonuç ise pasif C1, C2, C3 ve C4 durumları için kontrolsüz yapının titreşimleri birbirine yakın oranda azaltılmıştır. Bu sonuç ayrıca Çizelge 4.14 ve 4.15 den β_1 , β_2 ve β_4 göz önünde bulundurularak da çıkarılabilir. β_4 performans parametresi pasif C1, C2, C3 ve C4 durumları için 1 den küçüktür. Çizelge 4.3- 4.4 ve Çizelge 4.14 – 4.15 den çıkarılabilecek başka bir sonuç ise farklı depremler için pasif C1, C2, C3 ve C4 kontrol durumları farklı deplasman azaltımı yönünden farklı performans göstermektedir. Pasif sistemlerin dinamik etkilere karşı kendilerini adapte olma yeteneği olmadığı için bu sonucun pasif sistemlerin karakteristik bir özelliği olduğu söylenebilir. Çizelge 4.5, 4.7 ve 4.16 dan görüldüğü gibi pasif C5 ve C6 durumları birbirine benzer sonuçlar vermiş ve C7 ve C8 durumlarından daha iyi sonuç vermiştir. Ancak kontrolsüz deplasmanları azaltma yönünden C1, C2, C3 ve C4 kontrol durumlarından daha kötü performans göstermişlerdir. Çizelge 4.16 dan görüldüğü gibi β_4 performans parametresi pasif C5, C6, C7 ve C8 durumları için 1 den küçüktür. Çizelge 4.5, 4.7 ve 4.16 dan çıkarılabilecek başka bir sonuç ise PC ve KDO nun C5, C6, C7 ve C8 pasif durumlarının hepsinden daha iyi performans gösterdiğidir. Çizelge 4.8, 4.10, 4.12 ve 4.17 den görüldüğü üzere 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda C5, C6, C7 ve C8 durumları kontrolsüz yapı tepkilerini Northridge ve sentetik depremler için azaltmış ancak Erzincan depremi için çok ufak miktarda da olsa artırmıştır. Bu sonuçlar optimal sönüm ve rijitlik parametrelerinin farklı depremler için farklı olabileceğini gösterir. Belirli bir deprem için optimal olan yapı parametreleri başka bir deprem için optimal olmayabilir hatta yapı tepkilerini beklenenden daha fazla arttırabilir. Nitekim yapılarda yarı aktif ve aktif kontrol elemanlarının sismik davranışı iyileştirmek için kullanılmasının başlıca nedeni de budur.

Çizelge 4.3, 4.10 ve Çizelge 4.14 ve 4.17 den açıkça görüldüğü üzere PC ve KDO algoritmaları kontrolsüz yapı tepkilerini azaltmada kayda değer bir performans göstermiş olup incelenen tüm pasif durumlardan daha iyi performans göstermiştir. β_3

ün toplam kontrol enerjisinin toplam sismik enerjiye olan oranını gösterdiğini göz önünde bulundurarak, Çizelge 4.3 ve 4.14 den PC ve KDO nun neredeyse eşit kontrol enerjisi kullanımı ile yapı tepkilerini aynı oranda azalttığı görülmektedir. Çizelge 4.14 den çıkarılabilecek başka bir sonuç ise bütün depremler için, PC kontrolsüz mutlak ivmeleri birinci kat için KDO ya göre bir miktar daha azaltmıştır. Çizelge 4.4 ve 4.15 (3 katlı 3 tendon kontrollü yapı) dan görüldüğü üzere aynı oranda kontrol enerjisi tüketimi ile PC kontrolsüz yapı deplasmanlarını azaltmada KDO ile benzer performans göstermiştir ve PC durumunda KDO ya göre daha düşük mutlak ivme değerlerine ulaşılmıştır. Buna benzer sonuçlar incelenen tüm depremler için 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda da Çizelge 4.8, 4.13 ve 4.17 den çıkarılabilir.

Çizelge 4.2 : 10 katlı 10 tendon kontrol uygulanmış yapıda K_{opt} ve C_{opt} .

$K_{opt} =$	38,880.0	-19,455.0	-1.2	-3.8	-10.2	-1.3	-1.2	3.6	4.5	-4.2
	-19,443.0	38,889.0	-19,452.0	-3.8	13.0	7.9	12.6	8.0	3.7	9.4
	-10.7	-19,467.0	38,866.0	-19,448.0	-12.8	-8.6	-11.4	-8.6	-2.3	0.2
	16.6	34.8	-19,403.0	38,898.0	-19,441.0	4.9	4.7	4.5	2.6	-1.3
	-4.8	-15.8	-30.0	-19,461.0	38,889.0	-19,447.0	1.8	3.4	1.7	7.6
	7.9	18.9	33.4	36.5	-19,429.0	38,891.0	-19,454.0	-8.4	-6.4	-12.9
	-3.6	-4.7	-4.3	-9.2	-19.5	-19,447.0	38,898.0	-19,443.0	2.1	2.3
	-2.9	-7.1	-11.6	-5.5	34.0	16.5	-19,434.0	38,896.0	-19,453.0	-9.4
	1.1	2.9	8.7	16.7	1.0	18.7	0.9	-19,451.0	38,890.0	-19,446.0
	-1.9	-4.4	-10.5	-21.7	-25.9	-32.1	-13.0	1.2	-19,437.0	19,456.0
$C_{opt} =$	3,399.1	-470.6	-201.4	-97.5	-53.0	-31.7	-20.9	-15.0	-12.0	-11.0
	-470.6	3,197.4	-568.8	-255.1	-129.7	-74.6	-47.6	-33.8	-26.9	-23.7
	-201.6	-568.5	3,144.0	-600.5	-276.6	-145.9	-87.7	-59.6	-45.7	-39.9
	-97.5	-254.2	-599.7	3,122.6	-616.5	-289.1	-157.1	-98.8	-72.0	-61.3
	-53.2	-129.9	-276.4	-616.2	3,110.3	-627.7	-300.4	-169.8	-114.6	-93.4
	-32.1	-74.4	-145.0	-288.0	-627.5	3,098.7	-640.7	-316.5	-191.5	-147.2
	-21.5	-47.9	-87.3	-156.8	-300.3	-640.0	3,083.4	-661.8	-348.3	-244.5
	-15.9	-34.6	-60.0	-99.4	-169.0	-315.9	-661.9	3,050.7	-715.6	-446.6
	-12.6	-26.9	-45.3	-71.6	-114.3	-190.6	-348.1	-714.9	2,953.4	-916.4
	-11.6	-24.6	-40.5	-62.4	-95.1	-148.3	-245.2	-446.5	-916.8	2,482.4

Çizelge 4.3 : 3 katlı yapıda tek tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler.

Deprem	maks $X_i(m)$ NC	maks $X_i(m)$ C1	maks $X_i(m)$ C2	maks $X_i(m)$ PC	maks $u_r(kN)$ PC	maks $X_i(m)$ KDO	maks $u_r(kN)$ KDO
Erzincan	0.1589	0.1308	0.1337	0.1591		0.1390	-
	0.2811	0.2146	0.2370	0.2775		0.2468	-
	0.3438	0.2693	0.2923	0.3017	728.38	0.3003	850.01
Northridge	0.0893	0.0529	0.0590	0.0773		0.0625	
	0.1617	0.0828	0.1043	0.1370		0.1084	
	0.2008	0.1058	0.1297	0.1439	421.10	0.1355	463.28
Sentetik	0.0426	0.0312	0.0335	0.0376		0.0334	
	0.0712	0.0512	0.0578	0.0665		0.0551	
	0.0851	0.0644	0.0725	0.0704	239.07	0.0680	165.02

Çizelge 4.4 : 3 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler.

Deprem	maks $X_i(m)$ NC	maks $X_i(m)$ C3	maks $X_i(m)$ C4	maks $X_i(m)$ PC	maks $u_i(kN)$ PC	maks $X_i(m)$ CLOC	maks $u_i(kN)$ CLOC
Erzincan	0.1589 0.2811 0.3438	0.127 0.222 0.2724	0.1136 0.2064 0.2595	0.0901 0.1583 0.1947	542.97 420.53 235.23	0.0906 0.1597 0.1962	513.08 425.43 246.39
Northridge	0.0893 0.1617 0.2008	0.0512 0.0900 0.1112	0.0414 0.0768 0.0977	0.0375 0.0660 0.0814	284.97 188.21 99.96	0.0358 0.0635 0.0787	273.28 194.78 105.78
Sentetik	0.0426 0.0712 0.0851	0.0197 0.0338 0.0406	0.0164 0.0304 0.0379	0.0151 0.0264 0.0323	221.61 163.4 93.83	0.0142 0.0251 0.0312	226.59 180.60 99.32

Çizelge 4.5 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler . Veri depremi :Erzincan.

Kat No.	Deplasman $X_i (i=1,..10)(m)$										Kontrol kuvveti(kN)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	5	10
NC	0.0696	0.1373	0.2007	0.2582	0.3088	0.3520	0.3877	0.4153	0.4342	0.4438	1635.6	3193.2	2283.2
PC	0.0212	0.0415	0.0612	0.0784	0.0933	0.1079	0.1204	0.1295	0.1355	0.1412			
KDO	0.0226	0.0429	0.0634	0.0813	0.0955	0.1113	0.1237	0.1318	0.1360	0.1415			
C5	0.0584	0.1207	0.1833	0.2405	0.2910	0.3342	0.3698	0.3974	0.4163	0.4259	1645.5	3242.2	1778.1
C6	0.0584	0.1207	0.1833	0.2405	0.2910	0.3342	0.3698	0.3974	0.4163	0.4259			
C7	0.0686	0.1352	0.1976	0.2543	0.3042	0.3470	0.3823	0.4095	0.4281	0.4375			
C8	0.0677	0.1334	0.1951	0.2511	0.3005	0.3429	0.3778	0.4047	0.4230	0.4323			

Çizelge 4.6 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler . Veri depremi :Northridge.

Kat No.	Deplasman $X_i (i=1,..10) (m)$										Kontrol kuvveti (kN)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	5	10
NC	0.0531	0.1048	0.1538	0.1987	0.2385	0.2723	0.2996	0.3201	0.3336	0.3403	871.57	1365.4	956.63
PC	0.0071	0.0134	0.0209	0.0290	0.0352	0.0426	0.0487	0.0532	0.0559	0.0586			
KDO	0.0079	0.0135	0.0223	0.0303	0.0364	0.0437	0.0496	0.0538	0.0562	0.0584			
C5	0.0412	0.0848	0.1288	0.1692	0.2049	0.2354	0.2602	0.2790	0.2916	0.2979	794.27	1461.4	851.54
C6	0.0412	0.0848	0.1288	0.1692	0.2049	0.2354	0.2602	0.2790	0.2916	0.2979			
C7	0.0512	0.1008	0.1476	0.1905	0.2284	0.2607	0.2867	0.3063	0.3194	0.3259			
C8	0.0495	0.0973	0.1424	0.1835	0.2199	0.2508	0.2759	0.2949	0.3076	0.3139			

Çizelge 4.7 : 10 katlı yapıda üç tendon kontrol uygulanmış durumda maksimum tepkiler .Veri depremi :Sentetik.

Kat No.	Deplasman $X_i (i=1,..10) (m)$										Kontrol kuvveti(kN)		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	5	10
NC	0.0149	0.0288	0.0413	0.0523	0.0622	0.0720	0.0806	0.0875	0.0923	0.0948	494.7	825.6	482.3
PC	0.0065	0.0121	0.0176	0.0222	0.0255	0.0284	0.0306	0.0339	0.0364	0.0383			
KDO	0.0052	0.0092	0.0137	0.0172	0.0193	0.0223	0.0260	0.0289	0.0310	0.0328			
C5	0.0104	0.0211	0.0320	0.0420	0.0511	0.0591	0.0659	0.0713	0.0750	0.0769	562.3	1004.3	593.1
C6	0.0104	0.0211	0.0320	0.0420	0.0511	0.0591	0.0659	0.0713	0.0750	0.0769			
C7	0.0130	0.0248	0.0358	0.0465	0.0562	0.0647	0.0719	0.0776	0.0816	0.0836			
C8	0.0138	0.0265	0.0380	0.0487	0.0590	0.0681	0.0758	0.0820	0.0863	0.0885			

Çizelge 4.8 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler.
Veri depremi : Erzincan.

	Deplasman X_i (i=1,...10) (m)									
Kat No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NC	0.0196	0.0390	0.0571	0.0730	0.0865	0.0977	0.1071	0.1146	0.1198	0.1224
PC	0.0116	0.0224	0.0322	0.0410	0.0488	0.0554	0.0607	0.0648	0.0675	0.0689
KDO	0.0100	0.0195	0.0283	0.0362	0.0435	0.0500	0.0554	0.0596	0.0626	0.0641
C5	0.0217	0.0429	0.0636	0.0835	0.1026	0.1205	0.1364	0.1499	0.1593	0.1640
C6	0.0203	0.0403	0.0598	0.0786	0.0967	0.1136	0.1288	0.1413	0.1502	0.1549
C7	0.0209	0.0414	0.0606	0.0780	0.0932	0.1061	0.1167	0.1250	0.1308	0.1338
C8	0.0218	0.0430	0.0630	0.0814	0.0979	0.1124	0.1246	0.1343	0.1409	0.1444

Çizelge 4.9 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Erzincan.

	Kontrol kuvveti (kN)									
Kat No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PC	2942.1	2759.1	2543.9	2327.1	2108.2	1868.2	1587.6	1254.7	871.19	446.6
KDO	3146.5	3041.8	2869.5	2632.7	2342.5	2014.9	1652.1	1266.5	858.76	435.4

Çizelge 4.10 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler.
Veri depremi : Northridge.

	Deplasman X_i (i=1,...10) (m)									
Kat No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NC	0.0531	0.1048	0.1538	0.1987	0.2385	0.2723	0.2996	0.3201	0.3336	0.3403
PC	0.0233	0.0455	0.0663	0.0854	0.1024	0.1170	0.1290	0.1382	0.1444	0.1475
KDO	0.0208	0.0406	0.0593	0.0767	0.0924	0.1059	0.1167	0.1248	0.1302	0.1329
C5	0.0422	0.0829	0.1214	0.1571	0.1893	0.2177	0.2415	0.2604	0.2733	0.2798
C6	0.0411	0.0809	0.1186	0.1535	0.1851	0.2128	0.2361	0.2542	0.2665	0.2728
C7	0.0490	0.0963	0.1408	0.1815	0.2175	0.2481	0.2729	0.2917	0.3043	0.3106
C8	0.0451	0.0885	0.1291	0.1661	0.1989	0.2269	0.2499	0.2674	0.2793	0.2852

Çizelge 4.11 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Northridge.

	Kontrol kuvveti (kN)									
Kat No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PC	2107.9	2035.6	1938.1	1805.6	1639.2	1435.6	1197.4	928.38	633.86	321.61
KDO	2152.6	2110.3	2020	1884	1701.6	1474.7	1213.1	928.06	625.64	315.65

Çizelge 4.12 : 10 katlı yapıda on tendon uygulanmış durumda maksimum tepkiler.
Veri depremi:Sentetik.

Kat No.	Deplasman X_i (i=1,..10) (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NC	0.0149	0.0288	0.0413	0.0523	0.0622	0.0720	0.0806	0.0875	0.0923	0.0948
PC	0.0066	0.0125	0.0178	0.0224	0.0263	0.0296	0.0322	0.0341	0.0355	0.0362
KDO	0.0063	0.0119	0.0168	0.0210	0.0245	0.0276	0.0304	0.0327	0.0342	0.0350
C5	0.0109	0.0211	0.0307	0.0397	0.0480	0.0555	0.0620	0.0676	0.0713	0.0731
C6	0.0103	0.0199	0.0289	0.0372	0.0448	0.0517	0.0579	0.0631	0.0668	0.0689
C7	0.0105	0.0202	0.0290	0.0370	0.0447	0.0519	0.0583	0.0635	0.0672	0.0691
C8	0.0102	0.0195	0.0276	0.0347	0.0409	0.0470	0.0521	0.0560	0.0587	0.0601

Çizelge 4.13 : 10 katlı yapıda 10 tendon uygulanmış durumda maksimum kontrol kuvvetleri Veri depremi : Sentetik.

Kat No.	Kontrol kuvveti (kN)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PC	2376	1895.8	1626.8	1471.2	1328	1164.2	975.17	759.31	520.71	264.91
KDO	1849	1754.3	1663.1	1549	1388.3	1205.7	1005.4	795.42	553.58	288.45

Çizelge 4.14 : 3 katlı yapıda tek tendon hali için performans parametreleri.

Deprem	Kontrol durumları	β_1	β_2	β_3	β_4
Erzincan	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C1	0.82	0.76	-	1.17
	C2	0.84	0.79	-	0.84
	KDO	0.87	0.84	0.52	0.90
	PC	1.00	0.97	0.30	0.87
Northridge	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C1	0.59	0.73	-	1.09
	C2	0.66	0.86	-	0.76
	KDO	0.70	0.80	0.65	0.80
	PC	0.86	1.07	0.41	0.75
Sentetik	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C1	0.73	0.89	-	1.02
	C2	0.79	0.94	-	0.88
	KDO	0.78	1.01	0.42	0.85
	PC	0.84	1.02	0.54	0.83

Çizelge 4.15 : 3 katlı yapıda üç tendon hali için performans parametreleri.

Deprem	Kontrol durumları	β_1	β_2	β_3	β_4
Erzincan	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.84	0.83	-	0.99
	C6	0.84	0.83	-	0.99
	C7	0.98	0.99	-	0.99
	C8	0.97	0.98	-	0.99
	KDO	0.32	0.81	0.95	1.14
	PC	0.30	0.70	0.96	1.11
Northridge	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.77	0.84	-	0.92
	C6	0.77	0.84	-	0.92
	C7	0.96	0.75	-	0.98
	C8	0.93	0.75	-	0.96
	KDO	0.15	0.93	0.91	1.05
	PC	0.13	0.83	0.92	0.90
Sentetik	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.70	0.83	-	0.98
	C6	0.70	0.83	-	0.98
	C7	0.87	0.95	-	0.99
	C8	0.93	0.92	-	0.99
	KDO	0.35	1.02	0.88	1.15
	PC	0.43	0.91	0.89	1.06

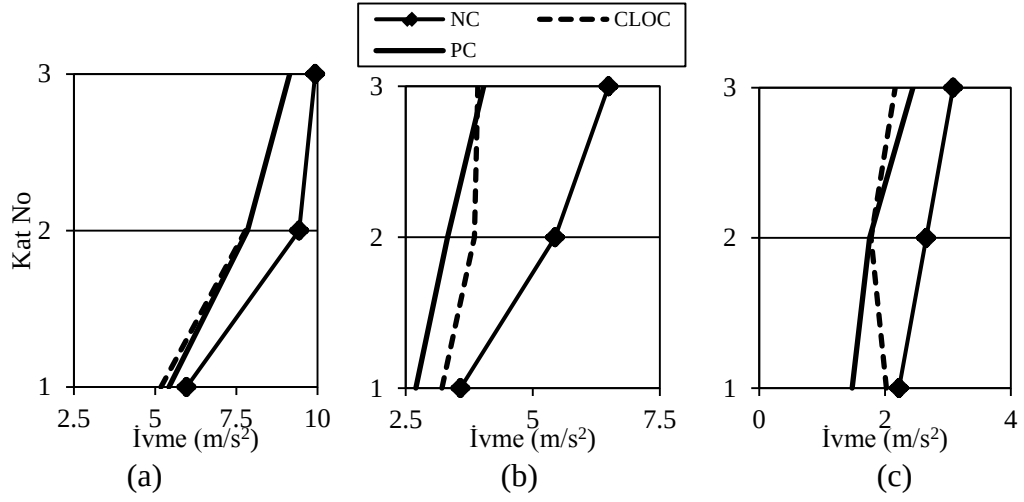
Katlara ait maksimum mutlak ivmeler 3 ve 10 katlı yapı için Şekil 4.3-4.6 da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere PC tüm durumlarda KDO'dan biraz daha iyi performans göstermektedir. Rölatif ivmeler azaltılsa bile sismik etkiler yapıda oluşabilecek mutlak ivmeler sorun teşkil edebilirler. Bu nedenle yapıdaki mutlak ivmeleri düşürmek de önemli bir katkıdır. Yapı deplasmanlarında ve mutlak ivmelerinde simultane azalma elde edildiği için önerilen yaklaşımın sismik etkilere karşı yapıyı koruyabileceği söylenebilir.

Çizelge 4.16 : 10 katlı yapıda üç tendon hali için performans parametreleri.

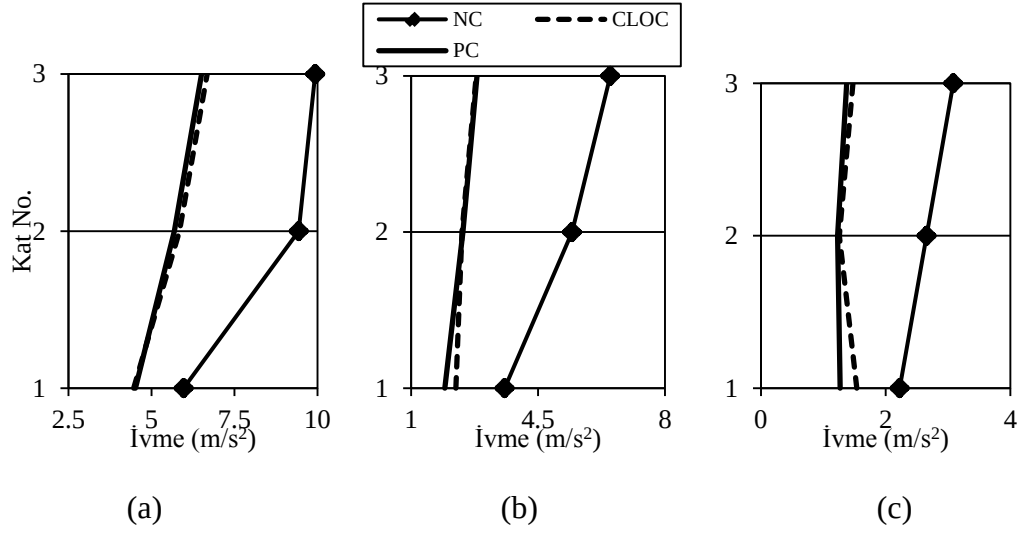
Deprem	Kontrol durumları	β_1	β_2	β_3	β_4
Erzincan	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.84	0.83	-	0.99
	C6	0.84	0.83	-	0.99
	C7	0.98	0.99	-	0.99
	C8	0.97	0.98	-	0.99
	KDO	0.32	0.81	0.95	1.14
	PC	0.30	0.70	0.96	1.11
Northridge	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.77	0.84	-	0.92
	C6	0.77	0.84	-	0.92
	C7	0.96	0.75	-	0.98
	C8	0.93	0.75	-	0.96
	KDO	0.15	0.93	0.91	1.05
	PC	0.13	0.83	0.92	0.90
Sentetik	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.70	0.83	-	0.98
	C6	0.70	0.83	-	0.98
	C7	0.87	0.95	-	0.99
	C8	0.93	0.92	-	0.99
	KDO	0.35	1.02	0.88	1.15
	PC	0.43	0.91	0.89	1.06

Çizelge 4.17 : 10 katlı yapıda on tendon hali için performans parametreleri.

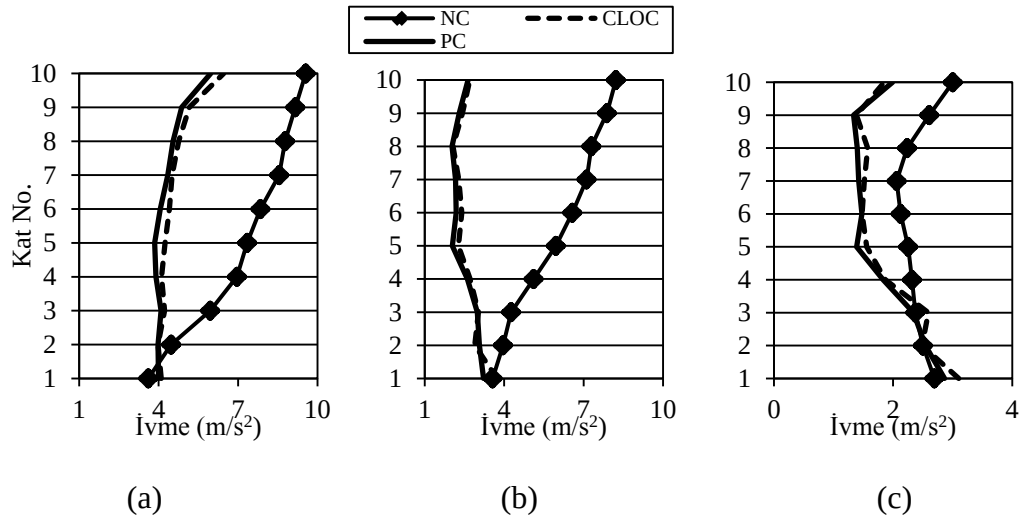
Deprem	Kontrol durumları	β_1	β_2	β_3	β_4
Erzincan	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.84	0.83	-	0.99
	C6	0.84	0.83	-	0.99
	C7	0.98	0.99	-	0.99
	C8	0.97	0.98	-	0.99
	KDO	0.32	0.81	0.95	1.14
	PC	0.30	0.70	0.96	1.11
Northridge	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.77	0.84	-	0.92
	C6	0.77	0.84	-	0.92
	C7	0.96	0.75	-	0.98
	C8	0.93	0.75	-	0.96
	KDO	0.15	0.93	0.91	1.05
	PC	0.13	0.83	0.92	0.90
Sentetik	NC	1.00	1.00	-	1.00
	C5	0.70	0.83	-	0.98
	C6	0.70	0.83	-	0.98
	C7	0.87	0.95	-	0.99
	C8	0.93	0.92	-	0.99
	KDO	0.35	1.02	0.88	1.15
	PC	0.43	0.91	0.89	1.06



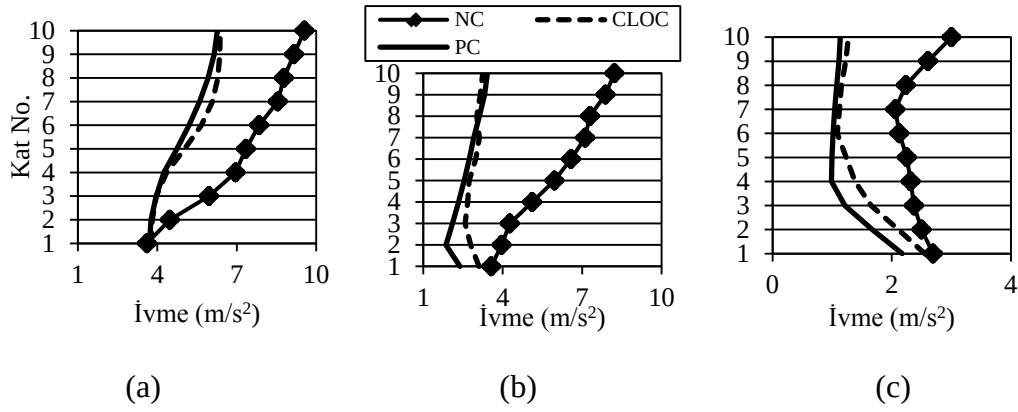
Şekil 4.3 : 3 katlı tek tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).



Şekil 4.4 : 3 katlı 3 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).

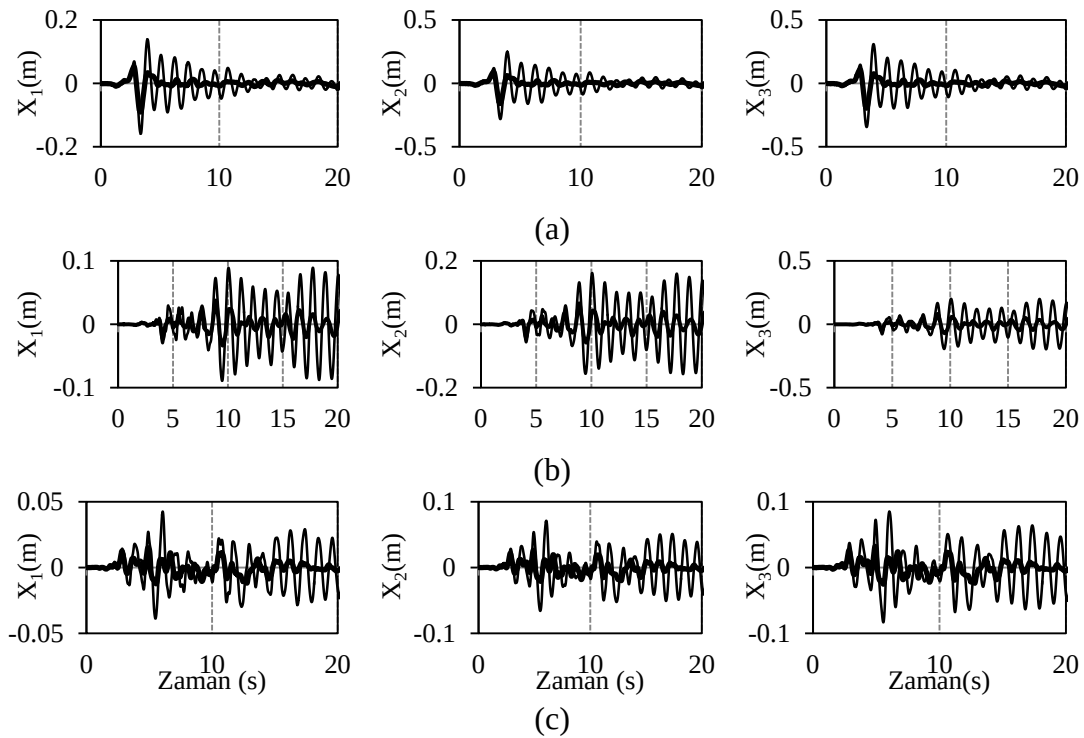


Şekil 4.5 : 10 katlı 3 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).

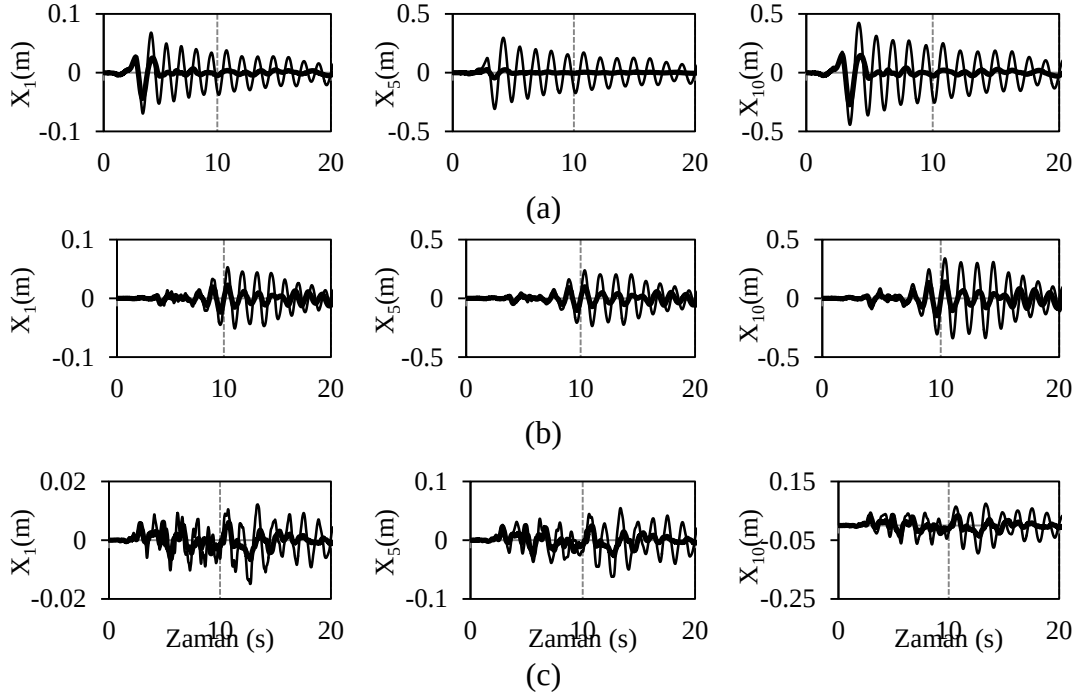


Şekil 4.6 : 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda mutlak ivmeler (Veri depremi =a:Erzincan, b:Northridge , c:sentetik).

3 katlı 3 tendon kontrol ve 10 katlı 10 tendon kontrol uygulanmış yapıda deplasman zaman eğrileri PC ve kontrolsüz durumlar için Şekil 4.7-4.8 de verilmiştir. Şekil 4.7 ve 4.8 den görüldüğü üzere PC algoritması kontrolsüz yapı deplasmanlarını önemli ölçüde azaltabilmektedir. Çizelge 3.16 dan da görüldüğü üzere kontrol enerjisinin toplam sismik enerjiye oranı β_3 PC ve KDO incelenen tüm depremler için neredeyse aynıdır. 10 katlı 3 tendon uygulanmış yapıda kontrol ve sismik enerjilerinin zamana göre değişimleri incelenen tüm depremler için Şekil 4.9 da verilmiştir. Grafiklerde ince çizgi kontrolsüz, kalın çizgi kontrollü yapıyı ifade etmektedir.

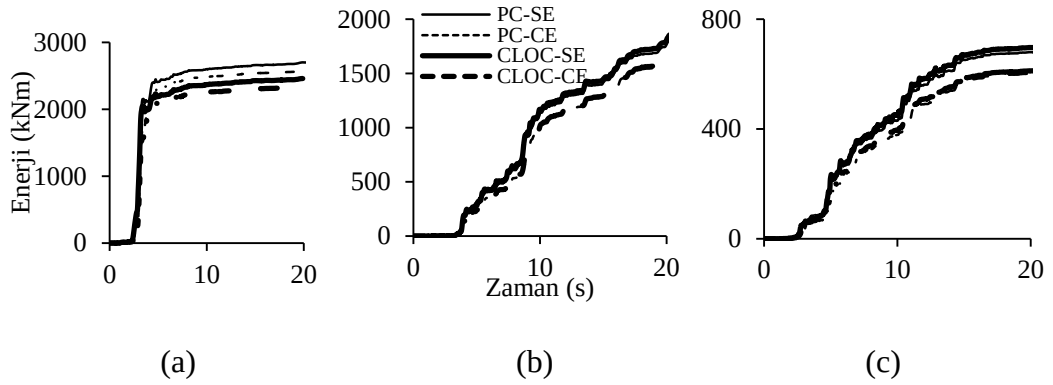


Şekil 4.7 : 3 katlı 3 tendon kontrol uygulanmış yapıda deplasman (X_1 , X_2 , X_3) zaman eğrileri (Veri depremi = a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik, ince çizgi:kontrolsüz, kalın çizgi:kontrollü) .



Şekil 4.8 : 10 katlı 10 tendon uygulanmış yapıda deplasman (X_1 , X_5 , X_{10}) zaman eğrileri (Veri depremi = a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik).

Şekil 4.9 a, b ve c de Northridge ve sentetik depremler için görüldüğü üzere toplam sismik enerji ve enerjilerin oranı β_3 PC ve KDO için birbirine çok yakındır. Ancak Şekil 4.9 a dan Erzincan depremi için, toplam sismik enerjisinin uygulanan kontrol algoritmasına bağlı olduğu ve PC ve KDO durumlarında birbirinden çok farklı olduğu görülmektedir. Ancak ilgili enerji oranı β_3 bu iki durumda neredeyse aynıdır. İncelemelerden açıkça görülmektedir ki PC kontrolsüz yapı deplasmanlarını azaltmada önemli bir potansiyele sahip olup eşit kontrol enerjisi tüketimi ve mutlak ivmeleri daha fazla azaltarak performansı neredeyse klasik doğrusal optimal kontrol algoritması ile aynıdır. Bir sonraki bölümde yukarıda belirtilen aktif kontrol yaklaşımın üç boyutlu yapılara uygulamalarından bahsedilecektir.



Şekil 4.9 : Enerji zaman eğrileri (a)Erzincan, b)Northridge, c)sentetik).

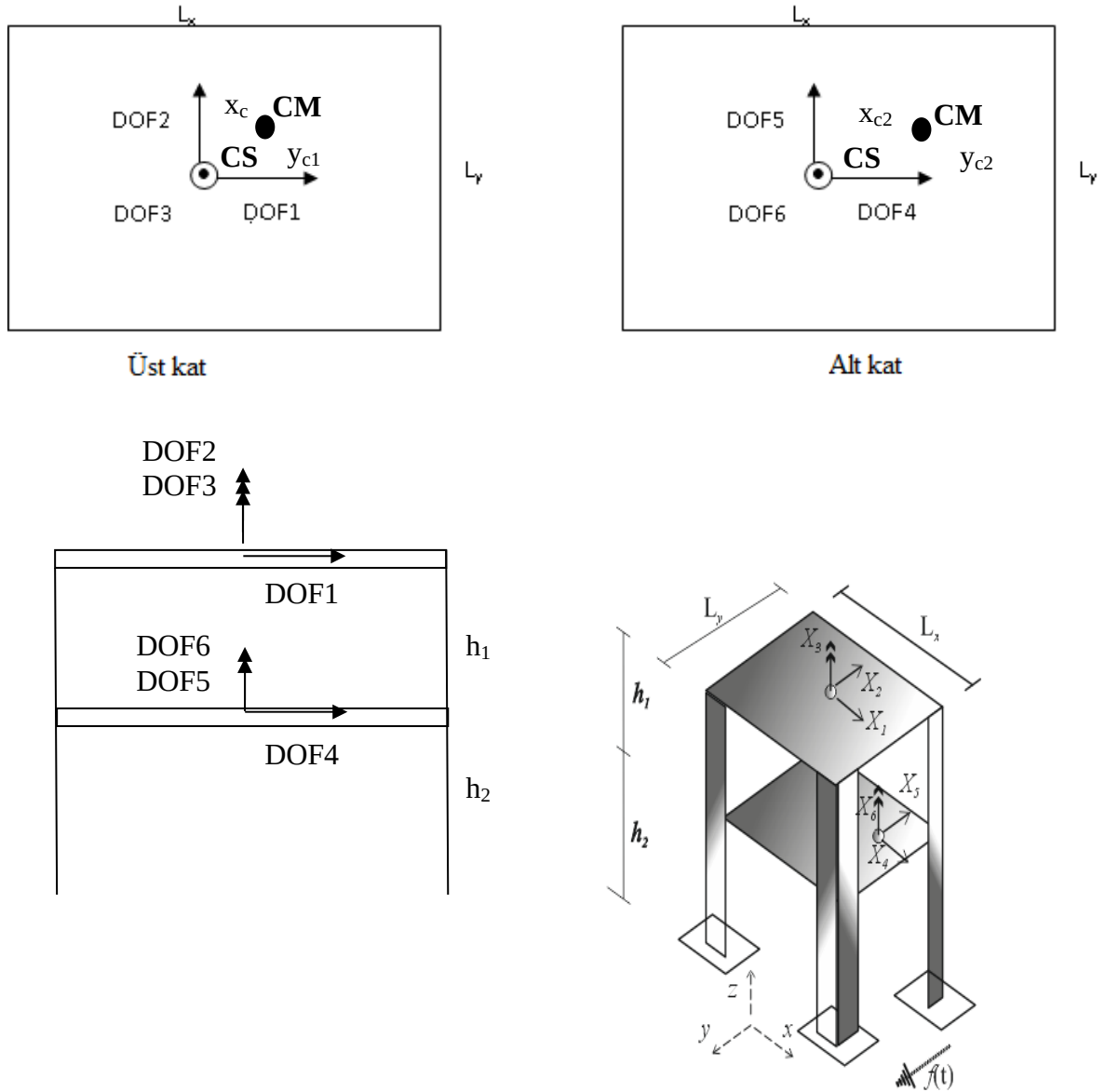
5. ÜÇ BOYUTLU YAPILARIN AKTİF KONTROLU

Bu bölümde yukarıdaki kısımlarda anlatılan aktif kontrol performans indeksinin döşemelerin rijit kabul edildiği 3 boyutlu kayma binası ‘tier building’ olarak adlandırılan formulasyona uygulanması ile elde edilen problemin formulasyonu verilmiş ardından bu formulasyona uyularak gerçekleştirilen dinamik analizlerin sonuçları klasik doğrusal optimal kontrol algoritmasından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Öncelikle ‘tier building’ 3 boyutlu kayma binası formulasyonu aşağıda tanıtılmıştır.

5.1 Üç Boyutlu Kayma Binaları

Döşemelerin rijit kabul edildiği üç boyutlu kayma binaları ile ilgili ‘tier building’ formulasyonu ilk olarak 1966 yılında Weaver ve diğ. tarafından kullanılmıştır (Weaver ve diğ. 1966 & 1968) . Bu formulasyonda her katın 3 serbestlik derecesine sahip rijit bir cisim gibi hareket ettiği kabul edilir. Bu yapı davranışı bize katların düşey ve dönme hareketini de incelememizi sağlayacaktır. Bu tez kapsamında yapı davranışı iki doğrultuda etkiyen deprem etkisi altında incelenecektir.

Kolonların sonsuz rijit kabul edildiğini ve burulma rijitliklerinin ihmal edildiğini göz önünde bulundurursak (kolonların burulma rijitlikleri katların burulma rijitliklerine göre ihmal edilebilir düzeydedir) . Bu durumda her kolonun eşdeğer olduğunu varsayarsak rijitlik merkezi katların tam ortasında olacaktır (rijitliğin simetrik olması nedeni ile) ve CS diye adlandırılmıştır. Kütle merkezi de CM olarak adlandırılmıştır. Kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasındaki ekzantrisiteler de i . kat için x_{ci} ve y_{ci} olarak adlandırılmıştır. Bu serbestlik dereceleri ve tanımlanan oriyantasyon için yapının şematik planı Şekil 5.1 de verilmiştir (Şekilde DOF1 den DOF6 ya kadar sıralanmıştır serbestlik dereceleri.)



Şekil 5.1 : 3 boyutlu kayma binası şematik planı .

yukarıdaki şekilde x_{c1} , y_{c1} , x_{c2} ve y_{c2} üst ve alt katların ekzantrisitelerini temsil etmektedir. L_x ve L_y ise katların x ve y eksenlerindeki genişliklerini , h_1 ve h_2 sırasıyla üst katın ve alt katın uzunluğunu ifade etmektedir. Yukarıdaki modele göre üç boyutlu kayma binasının kütle ve rijitlik matrisleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
[\mathbf{M}_{3d}] &= \begin{bmatrix} m_1 & 0 & -y_{c1}m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & x_{c1}m_1 & 0 & 0 & 0 \\ -y_{c1}m_1 & x_{c1}m_1 & m_{1\theta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 & 0 & -y_{c2}m_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_2 & x_{c2}m_1 \\ 0 & 0 & 0 & -y_{c2}m_1 & x_{c2}m_1 & m_{2\theta} \end{bmatrix}; \\
[\mathbf{K}_{3d}] &= \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & -k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & -k_{22} & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & 0 & -k_{33} \\ -k_{11} & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{22} & 0 & 0 & k_{55} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{33} & 0 & 0 & k_{66} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

yukarıdaki denklemde gözüken m_1 ve m_2 üst ve alt katların kütleleridir ve aşağıda gözüken şekilde ifade edilebilir.

$$m_{1\theta} = m_1(x_{c1}^2 + y_{c1}^2 + \rho_1^2) \quad ; \quad m_{2\theta} = m_2(x_{c2}^2 + y_{c2}^2 + \rho_2^2) \tag{5.2}$$

yukarıdaki denklemde ρ_1 ve ρ_2 sırasıyla üst ve alt katların eylemsizlik yarıçaplarıdır. Denklem 5.1 deki rijitlik terimleri ise aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir

$$\begin{aligned}
k_{11} &= 4 \times \frac{12 E_{top} I_{1top}}{h_1^3} \quad ; \quad k_{22} = 4 \times \frac{12 E_{top} I_{2top}}{h_1^3} \quad ; \quad k_{33} = 2 \times \left(\frac{12 E_{top} I_{1top} L_y^2}{h_1^3} + \frac{12 E_{top} I_2}{h_1^3} \right. \\
k_{44} &= 4 \times \left(\frac{12 E_{top} I_{1top}}{h_1^3} + \frac{12 E_{bot} I_{1top}}{h_2^3} \right) \quad ; \quad k_{55} = 4 \times \left(\frac{12 E_{top} I_{2top}}{h_1^3} + \frac{12 E_{bot} I_{2top}}{h_2^3} \right) \\
k_{66} &= 2 \times L_x^2 \left(\frac{12 E_{top} I_{2top}}{h_1^3} + \frac{12 E_{bot} I_{2top}}{h_2^3} \right) + 2 \times L_y^2 \left(\frac{12 E_{top} I_{1top}}{h_1^3} + \frac{12 E_{bot} I_{1top}}{h_2^3} \right)
\end{aligned} \tag{5.3}$$

yukarıdaki denklemdeki E_{top} ve E_{bot} üst ve alt kata ait malzeme elastisite modüllerini I_{1top} , I_{2top} üst katın x ve y eksenlerindeki eylemsizlik momentlerini I_{1bot} , I_{2bot} ise alt katın x ve y eksenlerindeki eylemsizlik momentlerini ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında üç boyutlu kayma binasının sönümü orantılı sönüm olarak seçilmiştir. Orantılı sönüm formülü de aşağıda verilmiştir

$$\mathbf{C}_{3d} = a_0 \mathbf{M}_{3d} + a_1 \mathbf{K}_{3d} \tag{5.4}$$

yukarıdaki denklemde verilen a_0 ve a_1 katsayıları da aşağıda belirtilen şekilde yapının doğal frekansları kullanılarak hesaplanır

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = 2 \frac{\omega_m \omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \begin{bmatrix} \omega_m & -\omega_n \\ -1/\omega_n & 1/\omega_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

bu denklemde ω_m ve ω_n ilgili doğal frekanslar, doğal frekanslara karşı gelen ξ_m ve ξ_n ise vizkos sönüm katsayılarıdır. Bu formülasyon örnek teşkil etmesi bakımından iki katlı bir yapı için verilmiştir buna ek olarak n katlı bir yapı için elde edilen formülasyon aşağıda verilmiştir.

n katlı her katın eşdeğer kütle ve eşdeğer kat genişliğine sahip olduğunu varsayarsak (x yönünde L_x ve y yönünde L_y genişlikleri). Bu bilgilere ek olarak kat yüksekliklerini de eşdeğer ve h olarak düşünersek n katlı üç boyutlu kayma binasının kütle matrisi aşağıda verilen şekilde ifade edilir

$$[\mathbf{M}_{3d}] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & -y_{c1}m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & x_{c1}m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -y_{c1}m_1 & x_{c1}m_1 & m_{1\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & m_2 & 0 & -y_{c2}m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \text{simetrik} & & 0 & m_2 & x_{c2}m_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & -y_{c2}m_2 & x_{c2}m_2 & m_{2\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & m_i & 0 & -y_{ci}m_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & m_i & x_{ci}m_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & -y_{ci}m_i & x_{ci}m_i & m_{i\theta} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & \ddots & & & \\ & & & & & & & & & & & & m_{n-1} & 0 & -y_{c(n-1)}m_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 & m_{n-1} & x_{c(n-1)}m_{n-1} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & -y_{c(n-1)}m_{n-1} & x_{c(n-1)}m_{n-1} & m_{(n-1)\theta} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & m_n & 0 & -y_{cn}m_n \\ & & & & & & & & & & & & & & & 0 & m_n & x_{cn}m_n \\ & & & & & & & & & & & & & & & -y_{cn}m_n & x_{cn}m_n & m_{n\theta} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

burada $m_n, m_{n-1}, m_i, m_2, m_1$ kütleleri sırası ile n . (en üst kat) , $n-1$, i ., ikinci ve birinci katların kütleleridir. $x_{cn}, y_{cn}, x_{c(n-1)}, y_{c(n-1)}, x_{ci(n-1)}, y_{ci(n-1)}, x_{c2}, y_{c2}$ ve x_{c1}, y_{c1} ise n . (en üst kat) , $(n-1)$. , i ., ikinci ve birinci katların x ve y yönlerindeki ekzantrisitelerini temsil etmektedir.

$m_{n\theta}, m_{(n-1)\theta}$ ve $m_{i\theta}$ aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir

$$m_{n\theta} = m_n(x_{cn}^2 + y_{cn}^2 + \rho_n^2) ; m_{(n-1)\theta} = m_{n-1}(x_{c(n-1)}^2 + y_{c(n-1)}^2 + \rho_{n-1}^2) ; m_{i\theta} = m_i(x_{ci}^2 + y_{ci}^2 + \rho_i^2) \quad (5.7)$$

yukarıdaki denklemde ρ_n, ρ_{n-1} ve ρ_i n . , $(n-1)$. ve i . katlara ait eylemsizlik yarıçaplarıdır.

n katlı üç boyutlu kayma binasının her katta eşit eylemsizlik momenti olması durumundaki rijitlik matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir

$$[K_{3d}] = \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 & -k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 & 0 & -k_{3(nn)-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{33} & 0 & 0 & k_{3(nn)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & -k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{3(nn)-1} & 0 & 0 & k_{55} & 0 & 0 & -k_{3(nn)-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{3(nn)} & 0 & 0 & k_{66} & 0 & 0 & -k_{3(nn)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & \ddots & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & k_{ii} & 0 & 0 & -k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & \ddots & & & & & & \\ & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 & -k_{3(nn)} & 0 & 0 & k_{3(nn)-3} & 0 & 0 & -k_{3(nn)} \\ & & & & & & & & & -k_{nn-2} & 0 & 0 & k_{3(nn)-2} & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & -k_{3(nn)-1} & 0 & 0 & k_{3(nn)-1} & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & -k_{3(nn)} & 0 & 0 & k_{3(nn)} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

simetrik

yukarıdaki denklemde ifade edilen $k_{3(nn)}$, $k_{3(nn)-1}$ ve $k_{3(nn)-2}$ sırasıyla n . kata ait dönme rijitliğini, y ve x doğrultusundaki rijitlikleri ifade etmektedir. Rijitlik matrisindeki bazı parametreler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (aşağıdaki formüllerde E her kat için aynıdır ve elastisite modülünü ifade eder)

$$\begin{aligned}
 k_{3(nn)-2} &= 4 \times \frac{12 EI_1}{h^3} \quad ; \quad k_{3(nn)-1} = 4 \times \frac{12 EI_2}{h^3} \quad ; \\
 k_{3(nn)} &= 2 \times L_x^2 \left(\frac{12 EI_2}{h^3} + \frac{12 EI_2}{h^3} \right) + 2 \times L_y^2 \left(\frac{12 EI_1}{h^3} + \frac{12 EI_1}{h^3} \right) \\
 k_{11} &= 2 * k_{3(nn)-2} \quad ; \quad k_{22} = 2 * k_{3(nn)-1} \quad ; \quad k_{33} = 2 * k_{3(nn)} \quad ; \\
 k_{ii} &= 2 * k_{3(nn)-2} \quad ; \quad k_{3(nn)-3} = 2 * k_{3(nn)}
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

yukarıdaki denklemde I_1 ve I_2 kolonların x ve y doğrultularındaki eylemsizlik momentlerini ifade etmektedir.

5.2 Üç Boyutlu Kayma Binalarının Aktif Kontrolü

Yukarı kısımda belirtilen üç boyutlu kayma binasının dinamik dış etkilere maruz kalması durumundaki hareketinin diferansiyel denklemi aşağıda belirtilen şekilde ifade edilir

$$\mathbf{M}_{3d} \ddot{\mathbf{X}}_{3d} + \mathbf{C}_{3d} \dot{\mathbf{X}}_{3d} + \mathbf{K}_{3d} \mathbf{X}_{3d} = \mathbf{D} \tag{5.10}$$

bu denklemde $\mathbf{X}_{3d}$ rölatif deplasman , $\dot{\mathbf{X}}_{3d}$ ve $\ddot{\mathbf{X}}_{3d}$ ise rölatif hız ve ivme vektörleridir. $\mathbf{M}_{3d}$, $\mathbf{C}_{3d}$ ve $\mathbf{K}_{3d}$ ise n kat sayısı olmak üzere $(3n-3n)$ boyutlu kütle , sönüm ve rijitlik matrisleridir. $\mathbf{D}$ ise dinamik dış etki vektörüdür. $\mathbf{D}$ dış etki vektörü dinamik bir kuvvet veya deprem olabilir.

5.3 İki Eksenli Deprem Etkisindeki Üç Boyutlu Kayma Binalarının Aktif Kontrolü

İki eksenli deprem ve aktif kontrol etkisindeki üç boyutlu kayma binası modeli Şekil 5.2 de verilmiştir. Binanın n . katının kütle merkezi CM olup CS ise rijitlik merkezidir. Kütle merkezi ve rijitlik merkezi arasındaki mesafeler de x ve y doğrultuları için e_{xn} ve e_{yn} olarak ifade edilmektedir. Katların genişliği x ve y doğrultularında l_x ve l_y katların yükseklikleri de en alt kattan en üst kata doğru h_1 , h_2 , h_i , ... h_n olarak değişmektedir.

5.4 Üç Boyutlu Kayma Binalarının Klasik Doğrusal Optimal Kontrolu

$\mathbf{Z}_{3d} = (\mathbf{X}_{3d}, \dot{\mathbf{X}}_{3d})^T$ şeklinde $6n$ boyutlu bir durum vektörü tanımlanarak (üç boyutlu kayma binaları için) , denklem 5.2 aşağıda belirtilen şekilde ifade edilebilir

$$\dot{\mathbf{Z}}_{3d}(t) = \mathbf{A} \mathbf{Z}_{3d}(t) + \mathbf{B} \mathbf{U}(t) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t), \quad t \in (t_0, t_1) \quad (5.13)$$

burada

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_{3d}^{-1} \mathbf{K}_{3d} & -\mathbf{M}_{3d}^{-1} \mathbf{C}_{3d} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_{3d}^{-1} \mathbf{D}_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\boldsymbol{\eta} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

şeklinde ifade edilebilir . Yukarıdaki denklemde $\mathbf{I}$ ($3n \times 3n$) boyutlu birim matris $\boldsymbol{\eta}$ ise iki eksenli deprem için ($3n \times 2$) boyutlu sabit bir matristir ve aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir.

$$\boldsymbol{\eta} = [1, 0, 0, 1, 0, 0, \dots; 0, 1, 0, 0, 1, 0, \dots]^T \quad (5.15)$$

denklem 5.13 ile verilen bağıntının başlangıç koşulları da 5.12 den yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\mathbf{Z}_{3d}(t_0) = \mathbf{Z}_{3d}^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{3d}^{(0)} \\ \mathbf{X}_{3d}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

denklem 5.13 ün çözümü ise yukarıdaki bağıntılardan da yararlanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\mathbf{Z}_{3d}(t) = e^{\mathbf{A}(t-t_0)} \mathbf{Z}_{3d}^0 + \int_{t_0}^t e^{\mathbf{A}(t-s)} \mathbf{q}(s) ds \quad (5.17)$$

bu denklemde

$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{B} \mathbf{U}(t) + \mathbf{D} \mathbf{f}(t) \quad (5.18)$$

olarak ifade edilir . Denklem 5.17 den aşağıdaki bağıntı elde edilebilir

$$\mathbf{Z}_{3d}(t) = e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{Z}_{3d}(t - \Delta t) + \int_{t-\Delta}^t e^{\mathbf{A}(t-s)} \mathbf{q}(s) ds \quad (5.19)$$

burada Δt deprem zaman aralığıdır. Yukarıdaki denklemin sağ tarafındaki integrali trapez kuralını kullanarak çözer isek aşağıdaki bağıntı elde edilir

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_{3d}(t) = e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{Z}_{3d}(t-\Delta t) + (\Delta t/2) e^{\mathbf{A}\Delta t} \mathbf{q}(t-\Delta t) + (\Delta t/2) [\mathbf{B} \mathbf{U}(t) \\ + \mathbf{D} \mathbf{f}(t)] + O(\Delta t^3) \end{aligned} \quad (5.20)$$

Üç boyutlu kayma binalarının aktif kontrolunda önceki bölümlerde anlatılan klasik kuadratik regülatör kontrolün performans indeksi aşağıdaki şekilde ifade edilir

$$J = \int_0^{t_f} (\mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{Q}_C \mathbf{Z}_{3d} + \mathbf{U}^T \mathbf{R}_C \mathbf{U}) dt \quad (5.21)$$

ve bu performans indeksinin minimize edilmesi sonucunda elde edilen kontrol kuvveti aşağıdaki gibi yazılır

$$\mathbf{U}(t) = -\frac{1}{2} \mathbf{R}_C^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P}(t) \mathbf{Z}_{3d}(t) \quad (5.22)$$

bu denklemdeki $\mathbf{P}$ rikkati matrisinin çözümü 4. bölümde denklem 4.12 ile verilmişti. Bundan sonraki bölümde üç boyutlu yapılar için önerilen performans indeksi sunulmuştur.

5.5 Üç Boyutlu Kayma Binaları için Önerilen Aktif Kontrol Performans İndeksi

Bu kısımda üç boyutlu kayma binaları için önerilen aktif kontrol performans indeksi tanımlanmıştır. Burada bahsedilecek olan performans indeksi Bölüm 4.3.2 de belirtilen performans indeksine benzerlikler taşımakta olup o kısımda anlatılan performans indeksi 3 boyutlu kayma binalarına uygun olarak değiştirilmiştir. Aşağıda belirtilen üç boyutlu kayma binaları için tanımlanmış iki kısımdan oluşan J_1 ve J_2 performans indeksi minimize edilmek istenmektedir

$$J = J_1(\mathbf{Z}_{3d}, \mathbf{U}) + J_2(\mathbf{Z}_{3d}, t) \quad (5.23)$$

burada

$$\begin{aligned} J_1 &= \mathbf{Z}_{3d}^T(t) \mathbf{Q}_1 \mathbf{Z}_{3d}(t) + \mathbf{U}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{U}(t) \\ J_2 &= \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{V} \mathbf{M}_{3d} \mathbf{f}(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (5.24)$$

olarak belirtilmektedir. Yukarıdaki denklemdeki ifadelerin bir çoğu Bölüm 4.3.2 de ifade edilmişti, burada dikkat edilmesi gereken husus deplasman , durum vektörleri ve kütle matrislerinin üç boyutlu yapılara uygun olarak tanımlandığıdır. J_2 ise Bölüm 4.3.2 de anlatılana benzer şekilde ve yapının enerji dengesinden de faydalanarak aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\begin{aligned} & \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{M}_{3d} \ddot{\mathbf{X}}_{3d}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{C}_{3d} \dot{\mathbf{X}}_{3d}(\tau) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{K}_{3d} \mathbf{X}_{3d} \\ & = \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{V} \mathbf{M}_{3d} \mathbf{f}(t) d\tau + \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{D}_1 \mathbf{U}(t) d\tau \end{aligned} \quad (5.25)$$

yukarıdaki denklemde dikkat edilmesi gereken husus kütle, sönüm ve rijitlik matrislerinin üç boyutlu kayma binaları için tanımlanması gerektiğidir. Bu denklemdeki enerji terimleri bölüm 4.3.2 de tanımlandığı için tekrardan detaylı bir şekilde tanımlanmayacaktır. Enerji denkleminde performans indeksinin J_2 kısmı aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\begin{aligned} J_2 = & \int_0^t \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T(\tau) \mathbf{V} \mathbf{M}_{3d} \mathbf{f}(t) d\tau = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T \mathbf{M}_{3d} \dot{\mathbf{X}}_{3d} + \frac{\Delta t}{2} \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T \mathbf{C}_{3d} \dot{\mathbf{X}}_{3d} \\ & + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{X}_{3d}^T \mathbf{K}_{3d} \mathbf{X}_{3d} - \frac{\Delta t}{2} \dot{\mathbf{X}}_{3d}^T \mathbf{D}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t) \end{aligned} \quad (5.26)$$

J_2 ayrıca üç boyutlu kayma binaları için tanımlanan durum vektörü kullanılarak aşağıdaki gibi sunulabilir

$$J_2 = \mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{Z}_{3d} + \mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t) \quad (5.27)$$

bu denklemdeki elemanlar kayma binaları için çıkarılan formüle benzer şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \frac{\Delta t}{2} \mathbf{K}_{3d} & \frac{\Delta t}{2} \mathbf{C}_{3d} + \frac{\mathbf{M}_{3d}}{2} \end{bmatrix} ; \quad \mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\frac{\Delta t}{2} \mathbf{D}_1 \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

bu tanımlamalardan sonra performans indeksi aşağıdaki gibi yazılabilir

$$J = \mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{Z}_{3d} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + [\mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{Q}_2 \mathbf{Z}_{3d} + \mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t-\Delta t)] \quad (5.29)$$

$$J = \mathbf{Z}_{3d}^T (\mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2) \mathbf{Z}_{3d} + \mathbf{U}^T \mathbf{R} \mathbf{U} + \mathbf{Z}_{3d}^T \mathbf{H}_1 \mathbf{U} + E(t - \Delta t) \quad (5.30)$$

bu performans indeksinin minimize edilmesi sonucu Bölüm 4.3.2 de belirtilen işlemler de takip edilerek sonuç kontrol kuvveti aşağıda belirtilen şekilde bulunur

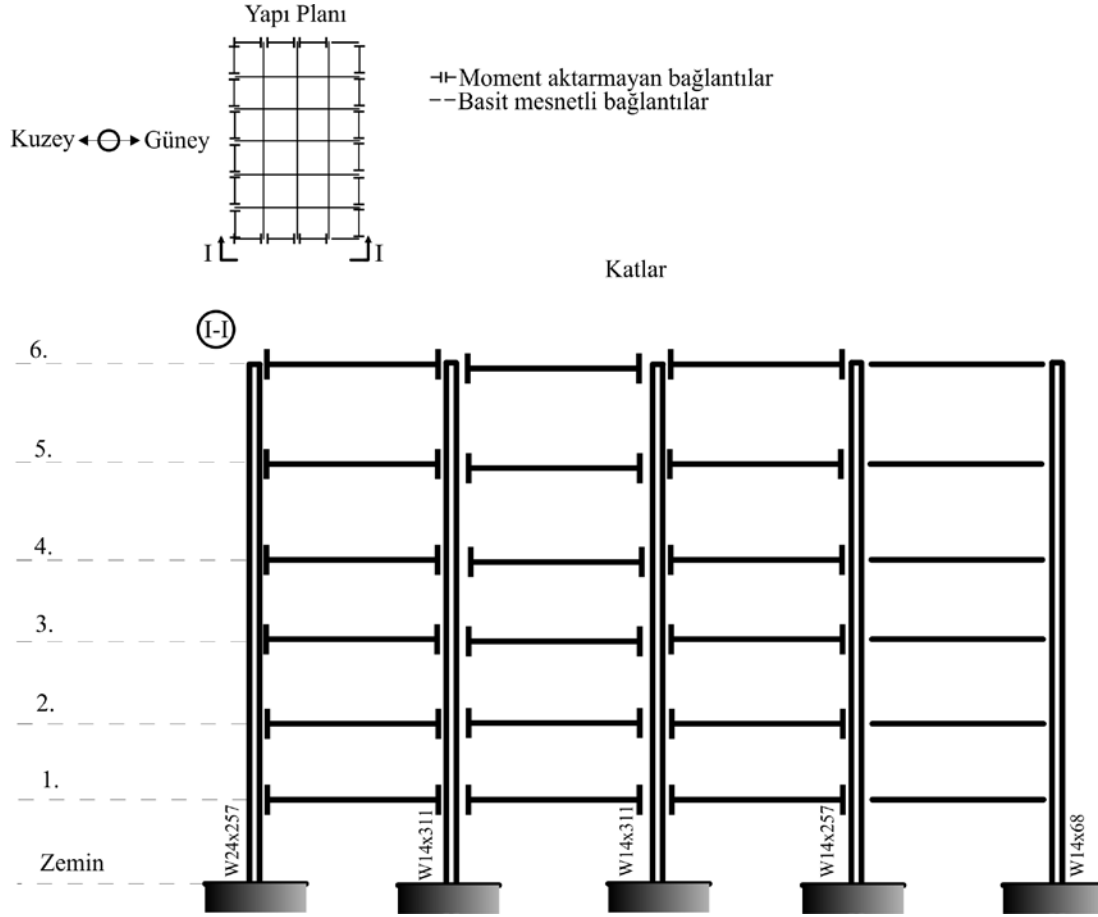
$$\mathbf{U}(t) = - \left[2 \mathbf{R} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B}^T \mathbf{H}_1 \right]^{-1} \left[\Delta t \mathbf{B}^T \mathbf{Q} + \mathbf{H}_1^T \right] \mathbf{Z}_{3d}(t) \quad (5.31)$$

ara işlemler iki boyutlu kayma binalarına benzer şekilde ilerlediği için burada detaylı olarak verilmemiş olur sadece üç boyutlu kayma binaları için önerilen algorithmadan elde edilen kontrol kuvvetine yer verilmiştir.

5.6 Sayısal Örnek

Sayısal örnek olarak bu kısımda 6 katlı çelik yapı modeli kullanılmıştır. Bu çelik yapı modelinin planı literatürde yer alan bir çok araştırmada kullanılmış bir referans yapının planından esinlenilmiştir (Ohtori ve diğ. 2004). Ancak bizim örneğimizde kat sayısı , kat yükseklikleri ve boyutlar referans yapısından farklıdır. Altı katlı yapının planda toplam uzunluğu 40.60 m ye 60.90 m ve toplam yüksekliği 24 m dir. Açıklık uzunluğu 10.15 m olup kuzey-güney ve doğu-batı doğrultusunda 5 adet açıklık bulunmaktadır. Yapının yatay yüklere karşı çalışan elemanları çelik çerçeve sisteminden oluşmuştur. Döşemeler kompozit döşeme olup çelik ve beton birleşiminden oluşmaktadır. Kolonların malzemesi 345 MPa akma dayanımına sahip çelik malzemesidir. Şekil 5.3 te yapının planı ve kat uzunlukları verilmiştir. Kolonların tabanda ankastre olarak mesnetlendiği varsayılmıştır. Kat yükseklikleri her kat için 4 m dir. Yapının sönümünü tanımlarken Rayleigh sönümü kullanılmıştır. Sönüm matrisini oluştururken her kat için %2 sönüm oranı alınmıştır.

Kat kütleleri ise yapı bileşenlerinin hepsi düşünülerek 1-5. katlar için 2×10^5 kg 6. kat için ise 1×10^6 kg olarak alınmıştır (çelik çerçeve sistemi, mekanik ve elektriksel aksanlar, tavan ve taban döşemeleri gibi elemanlar). 6 katlı çelik çerçeve sistemi Şekil 5.3 te verilmiştir yukarıda belirtildiği gibi. Katların ekzantrisitesi ise kuzey güney yönünde 5.22 m , doğu batı yönünde ise 0.1 m olarak hesaplanmıştır.

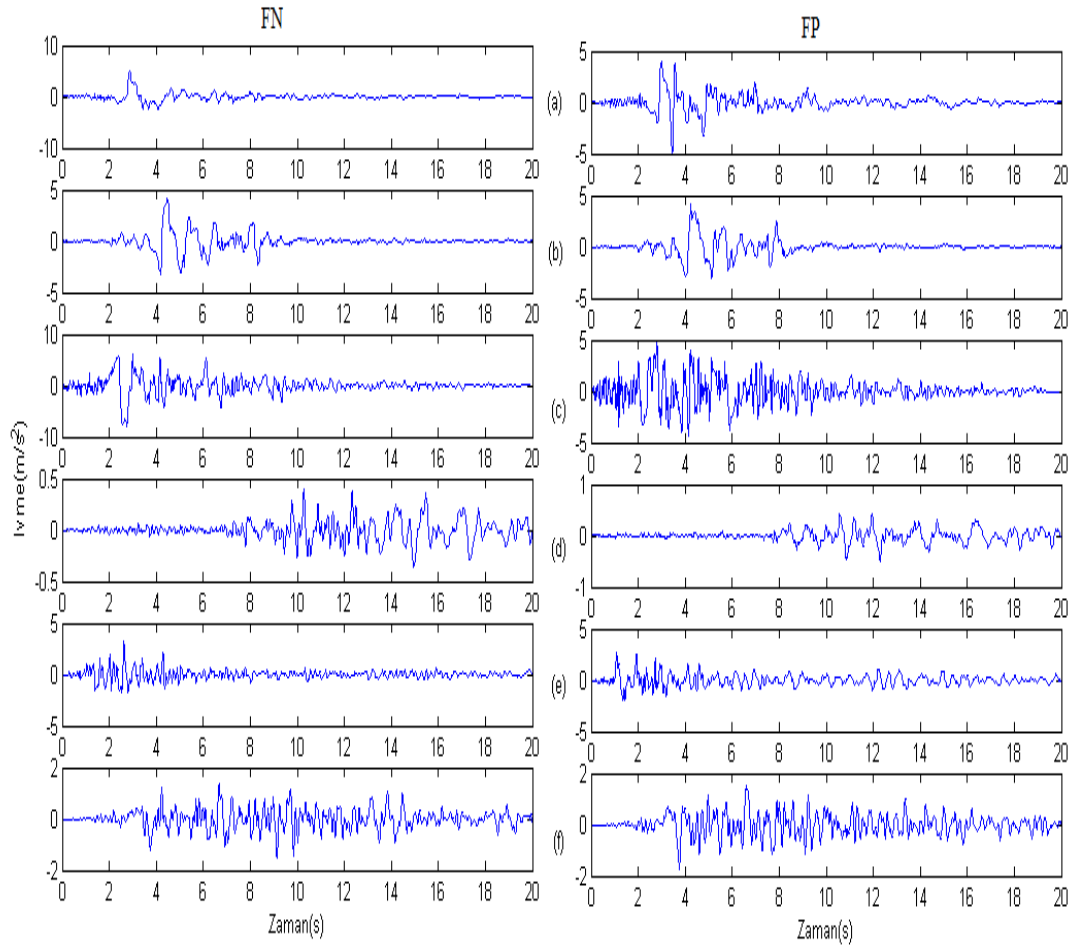


Şekil 5.3 : Yapı çerçeve sistemi.

Bu tür yapılar 2 boyutlu analizde literatürde çeşitli zamanlarda kullanılmıştır (Ohtori ve diğ. 2004). Bu çalışma kapsamında bu yapı üç boyutlu kayma binası yaklaşımı kullanılarak basit bir şekilde her katında 3 serbestlik derecesi olan toplamda 18 serbestlik derecesine sahip bir üç boyutlu kayma binasına dönüştürülmüştür. Her katta yatay ve düşey doğrultularda 2 serbestlik derecesi ve 1 adet dönme serbestisi vardır. Üç boyutlu yapının frekansları 0.83, 1.23, 2.86, 3.02, 4.49, 5.40, 7.51, 8.02, 9.14, 10.17, 10.39, 11.16, 13.58, 15.11, 18.57, 25.81, 31.42 ve 34.97 Hz olarak hesaplanmıştır. (Ohtori ve diğ. 2004) çalışmalarında 2 boyutlu çerçevenin frekanslarını vermişlerdi , bu frekanslar ile beraber 2 boyutlu ve 3 boyutlu yapının mod şekilleri ve frekansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonunda 2 ve 3 boyutlu yapı frekanslarının uyumlu olduğu görülmüştür. Kuzey güney yönünde hesaplanan yapı frekansları 0.83, 3.02, 7.51 , 10,17 13.58 ve 25.81 Hz dir.

Üç boyutlu kayma binasında önerilen performans indeksinin ve klasik doğrusal optimal kontrol algoritmasının performanslarını karşılaştırmak için 3 adet yakın fay etkisi içeren deprem ile 3 adet uzak fay etkisi içeren deprem seçilmiştir. Bu

depremlere ait ivme zaman eğrileri Şekil 5.4 de verilmiştir. Bu depremler yakın fay bölgelerinden , Erzincan (1992), Loma Prieta (1989) ve Northridge (1994). Uzak fay bölgelerinden ise, Coalinga (1983), San Fernando (1971) ve Kern County (1951) depremleri seçilmiştir. Şekil 5.4 de görüldüğü gibi tüm dinamik analizler 20 saniye için ve 0.01 saniyelik deprem aralığı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm depremlerin iki eksendeki bileşenleri kullanılmıştır (FN:depremin doğrultusundaki ve FP:depreme paralel doğrultudaki) olmak üzere. Depremlerin karakteristik özellikleri ve kaydedildikleri istasyonlar ise Çizelge 5.1 de verilmiştir. Bütün deprem ivmeleri azaltma çarpanı olmadan tam değerlerinde kullanılmıştır. Yapıya her katta bulunan bir tendon kontrol sistemi eklenmiştir. Tendon kontrollörleri yapıya kuzey güney doğrultusunda eklenmiştir. Tendon kontrollörlerinin şematik çizimi Şekil 5.5 de verilmiştir. Şekil 5.5 den görüldüğü üzere her katta kuzey-güney doğrultusunda kontrollör bulunmaktadır. Bu tendon kontrol durumu için ağırlık matrisleri **Q** ve **R** aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.4 : Deprem ivme zaman eğrileri (a) Erzincan (b) Loma Prieta (d) Coalinga (c) Northridge (e) San Fernando (f) Kern County .

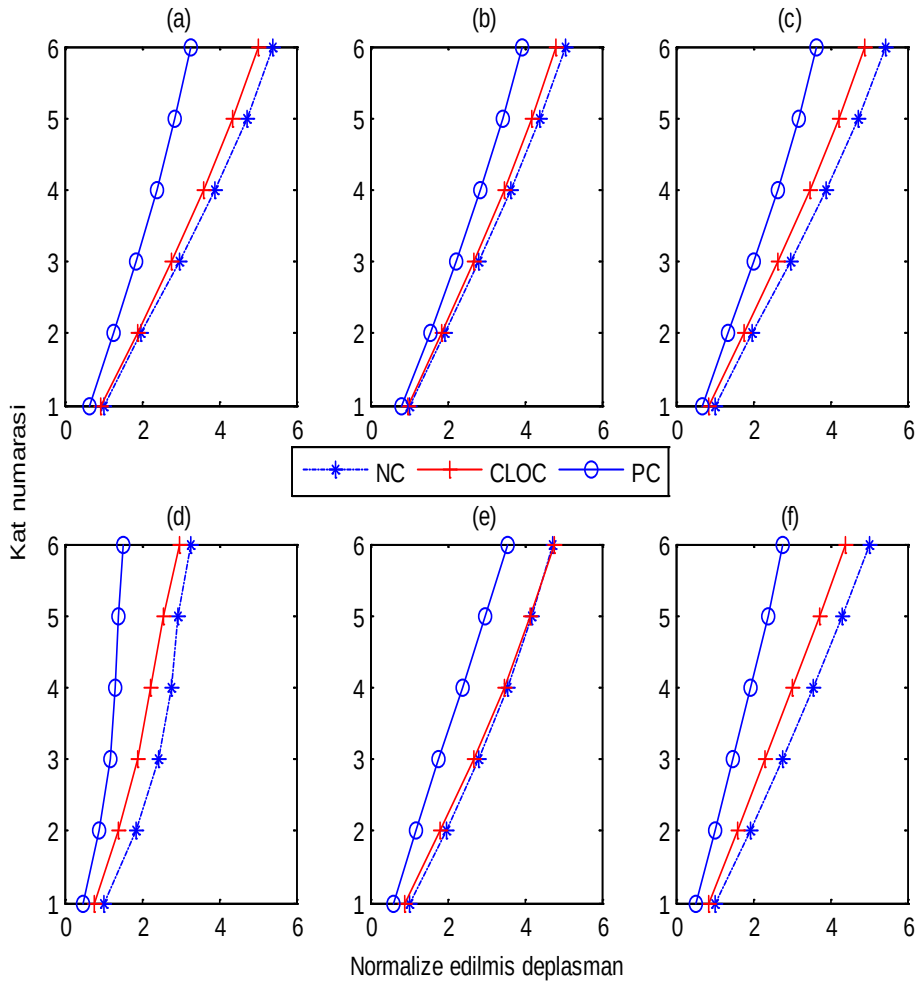
Çizelge 5.1 : Deprem ivmesi parametreleri.

Fay	Deprem	Şiddet	İstasyon	PGA	PGV	PGD
Etkisi				(g)	(cm/s)	(cm)
Yakın	Erzincan	6.69	95 Erzincan	0.48	72.95	24.79
	Loma Prieta	6.93	Los Gatos – Lexington	0.44	62.18	16.63
	Northridge	6.69	Rinaldi	0.63	109.24	28.26
			Receiving Sta			
Uzak	Coalinga	6.36	Parkfield - Cholame 12W	0.04	4.70	1.23
	San Fernando	6.61	Castaic - Old Ridge Route	0.29	19.83	3.29
	Kern County	7.36	Taft Lincoln School	0.17	15.72	9.34

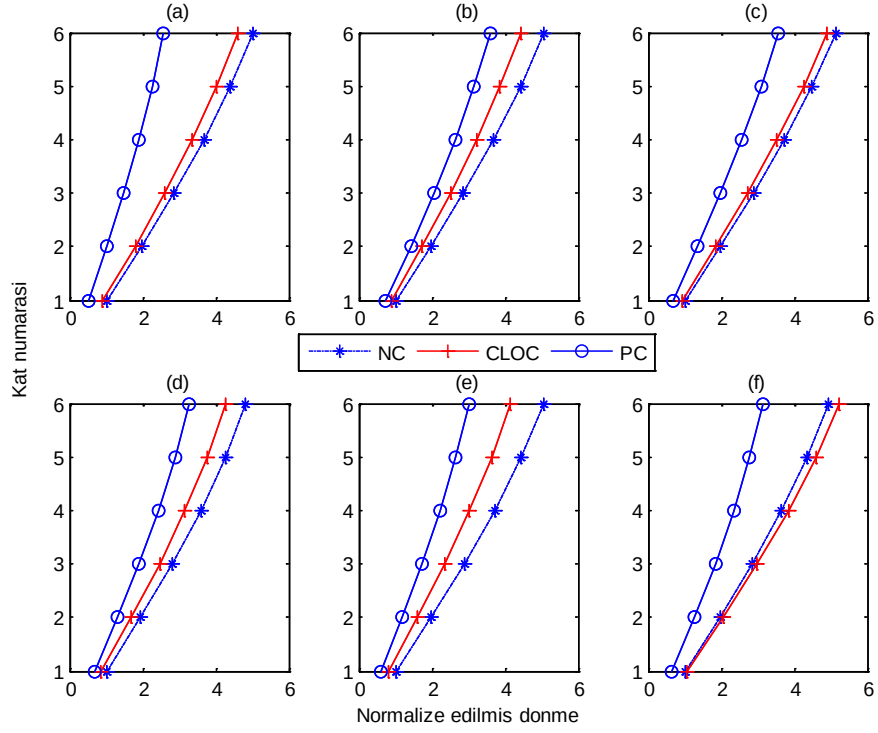
Ağırlık matrislerinden $\mathbf{R}_C(6 \times 6)$ klasik doğrusal optimal kontrol ve önerilen kontrol PC için $0.05 \times 10^{-3} \mathbf{I}_{6 \times 6}$ olarak seçilmiştir. Burada $\mathbf{I}$ matrisi birim matrisi simgelemektedir. Diğer ağırlık matrisleri $\mathbf{Q}_C$ ve $\mathbf{Q}_1$ ise aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Bu matrisler de PC ve klasik doğrusal optimal kontrol algoritmaları için eşit seviyede kontrol kuvveti elde etmek için deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. Ağırlık matrislerinin seçiminde sistematik metodlar veya kurallar geliştirilmeye çalışılmaktadır ancak bu matrislerin seçiminde daha geçerli uyulacak sistematik bir yaklaşım bulunmamaktadır. Ağırlık matrislerine verilen değerler yapı tepkilerinde istenilen azaltmaya ve de aktif kontrol güç kaynağı enerjisi ile ilgili olmaktadır. Bu ağırlık matrislerini belirlerken optimal değer atanması çalışmanın en özen gerektiren kısımlarındandır. Bu çalışma kapsamında bu matrisler sistemin stabilite şartını sağlamaktadır. Aşağıdaki denklemde tanımlanan $\mathbf{Q}_C$ ve $\mathbf{Q}_1$ matrislerinin özdeğerleri 0 ve pozitif olduğundan bu matrisler pozitif belirli matrislerdir dolayısıyla stabilite koşulunu sağlamaktadırlar.

$$\mathbf{Q}_C = 10^3 \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{Q}_1 = 10^4 \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{C} \\ \mathbf{C} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

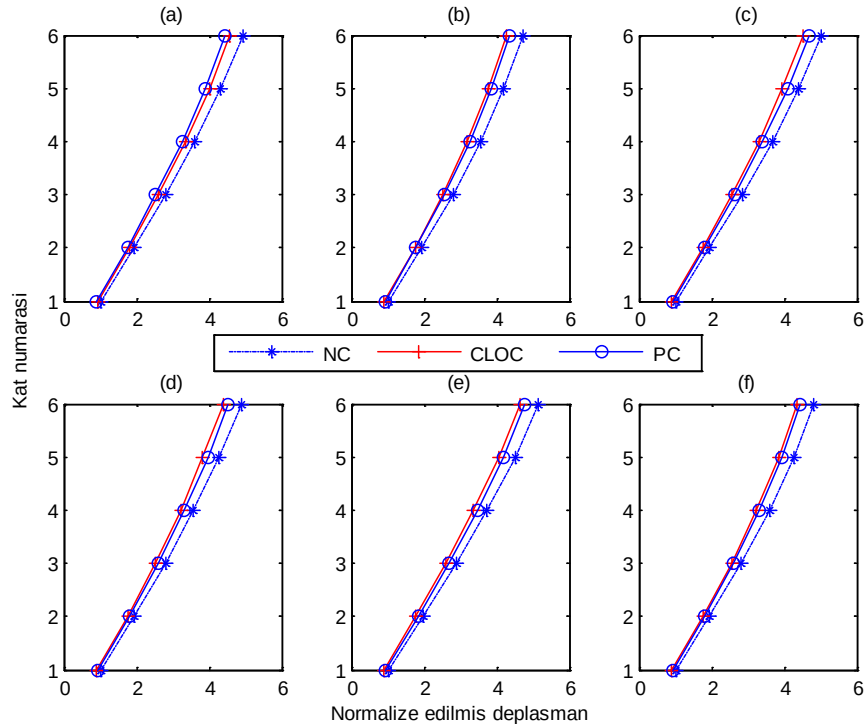
önerilmesinin nedenlerinden biridir. Bir deprem için optimal olan kontrol kuvveti bir diğer için optimal olmayabilir ve deplasmanları azaltmayabilir. Normalize edilmiş katların dönme değerleri ise Şekil 5.7 de verilmiştir. Şekil 5.7 de görüldüğü üzere PC dönme değerlerini azaltmada CLOC den biraz daha iyi performans göstermiştir. İki farklı kontrol algoritması da doğu batı yönündeki deplasmanları azaltmada başarılı olamamıştır. Doğru batı yönündeki normalize edilmiş deplasmanlar da Şekil 5.8 de verilmiştir. Şekil 5.8 den anlaşıldığı üzere PC ve CLOC algoritmalarında doğu batı yönünde kontrolsüz deplasman azaltma yüzdesi %8-10 arası değişmektedir.



Şekil 5.6 : Normalize edilmiş deplasmanlar (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County .



Şekil 5.7 : Normalize edilmiş dönme (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County.



Şekil 5.8 : Normalize edilmiş deplasman doğu batı yönü (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County.

Yukarıdaki karşılaştırmalara ek olarak 8 adet performans parametresi $\beta_1 - \beta_8$ tanımlanmış olup bu parametreler ile ilgili de karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu parametreler deplasman, rölatif ivme , mutlak ivme , kontrol kuvveti $U(t)$, kontrol enerjisi (CE) ve sismik enerji (SE) gibi parametreleri göz önüne almaktadır. Bu performans parametreleri tanımlanırken normalize edilmiş maksimum değerler kullanılmıştır. Bütün parametreler yapı güvenliği açısından en kritik davranışı sergileyen kat olan en üst kat için tanımlanmıştır. Parametreler tanımlanırken kuzey-güney doğrultusundaki ortagonal davranış göz önünde alınmış olup β_5 performans parametresi dönme davranışı göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Ek olarak β_8 parametresi yapının toplam sismik ve kontrol enerjisi göz önünde bulundurularak tanımlanmıştır. Aşağıdaki denklemde performans parametrelerinin formülasyonu verilmiştir. $\beta_{1,2}$ kat deplasmanlarıyla , $\beta_{3,4}$ kat ivmeleriyle , β_5 kontrol ve sismik enerjilerle , $\beta_{6,7}$ mutlak ivmelerle ve β_8 kontrol kuvvetleriyle alakalıdır. Denklem 5.33 deki abs kısaltması mutlak anlamına gelmektedir.

$$\begin{aligned}
\beta_{1,2} &= \frac{\text{maksnorm}|X_{11}, \theta_6|_{\text{CLOC}}}{\text{maksnorm}|X_{11}, \theta_6|_{\text{NC}}}, \quad \beta_{3,4} = \frac{\text{maksnorm}|\ddot{X}_{11}, \ddot{\theta}_6|}{\text{maksnorm}|\ddot{X}_{11}, \ddot{\theta}_6|_{\text{NC}}} \\
\beta_5 &= \frac{\text{maksnorm}|CE|}{\text{maksnorm}|SE|}, \quad \beta_{6,7} = \frac{\text{maksnorm}|\ddot{X}_{abs11}, \ddot{\theta}_{abs6}|_{\text{CLOC}}}{\text{maksnorm}|\ddot{X}_{abs11}, \ddot{\theta}_{abs6}|_{\text{NC}}} \\
\beta_8 &= \frac{\text{maksnorm}|u_1, u_2, u_3|_{\text{PC}}}{\text{maksnorm}|u_1, u_2, u_3|_{\text{CLOC}}}
\end{aligned} \tag{5.33}$$

Yukarıdaki denklemde X_{11} ve $\ddot{X}_{11}$ en üst katta kuzey güney doğrultusundaki deplasman ve rölatif ivmeyi temsil etmektedir. θ_6 ve $\ddot{\theta}_6$ en üst kata ait dönmeyi ve bu dönmeye bağlı ivmeye karşı gelmektedir. $\ddot{X}_{abs11}$ ve $\ddot{\theta}_{abs6}$ ise en üst katın mutlak ivme, mutlak dönme ivmesini ifade eder. u_1 , u_2 ve u_3 ise ilk üç kata etkiyen kuzey güney yönündeki kontrol kuvvetlerini temsil etmektedir.

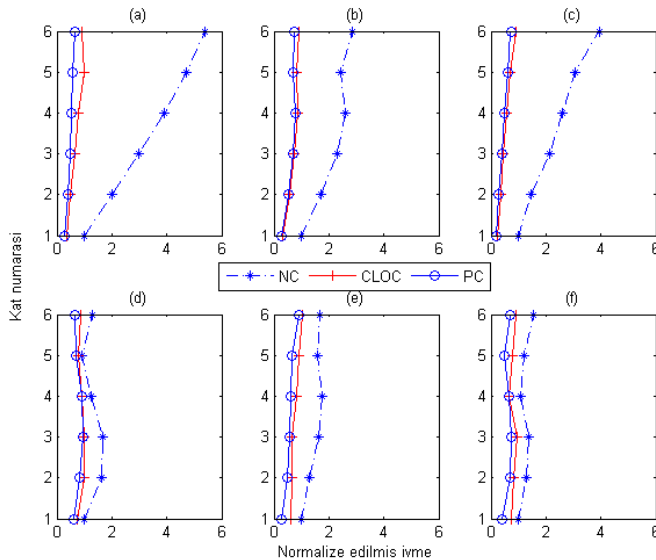
Çizelge 5.3 te performans parametrelerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen değerleri bulunmaktadır. Çizelge 5.3 ten görüldüğü üzere PC kontrolsüz yapı deplasmanlarını kuzey güney yönünde önemli ölçüde azaltmaktadır. Kat deplasmanlarıyla ilgili olan $\beta_{1,2}$ parametreleri göz önüne alındığında Çizelge 5.3 den anlaşıldığı gibi PC , CLOC den en üst kata ait deplasmanları ve dönmeleri azalt-

Çizelge 5.3 : Performans parametreleri.

Deprem	Kontrol	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8		
	Hali										
Northridge	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
	CLOC	0.92	0.91	0.91	0.77	0.27	0.92	0.77	1.00	1.00	1.00
	PC	0.61	0.51	0.67	0.54	0.32	0.54	0.53	0.28	0.51	1.17
Erzincan	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
	CLOC	0.94	0.87	0.91	0.85	0.32	0.92	0.85	1.00	1.00	1.00
	PC	0.78	0.71	0.75	0.74	0.39	0.76	0.74	0.16	0.28	0.72
Loma	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
Prieta	CLOC	0.88	0.95	0.92	0.98	0.31	0.91	1.02	1.00	1.00	1.00
	PC	0.67	0.69	0.72	0.87	0.37	0.68	0.87	0.19	0.34	0.66
San	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
Fernando	CLOC	0.88	0.88	0.88	0.80	0.05	0.84	0.80	1.00	1.00	1.00
	PC	0.46	0.68	0.65	0.58	0.11	0.53	0.58	0.14	0.33	1.03
Coalinga	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
	CLOC	0.91	0.82	0.98	0.74	0.12	0.97	0.77	1.00	1.00	1.00
	PC	0.75	0.60	0.90	0.55	0.16	0.82	0.54	0.19	0.32	1.22
Kern	NC	1.00	1.00	1.00	1.00	-	1.00	1.00	-	-	-
County	CLOC	0.85	0.93	0.92	1.08	0.11	0.96	1.08	1.00	1.00	1.00
	PC	0.55	0.63	0.71	0.66	0.24	0.59	0.66	0.20	0.45	1.36

mada tüm yakın ve uzak fay etkisindeki depremler için daha etkilidir. PC için kuzey güney yönündeki deplasmanları azaltma yüzdesi %54 (San Fernando) ve %22 (Erzincan) depremleri için değişmekte CLOC için bu yüzde %15 (Kern County) ve %6 (Erzincan) depremleri için değişmektedir. $\beta_{3,4}$ ve $\beta_{6,7}$ parametrelerinden de anlaşıldığı üzere hem rölatif hem de mutlak ivmeleri azaltmada PC algoritması CLOC den daha etkilidir. PC algoritması için rölatif ivme azaltma yüzdesi %35 den

%10 a değişmekte , CLOC için %12 den %2 ye değişmektedir. Dönme serbestliğindeki ivme değerlerini incelediğimizde azaltma yüzdesi PC için %46 dan %13 e değişmektedir bu değerler CLOC için % 26 dan %-8 e değişim göstermektedir. β_6 performans parametresi de göz önünde bulundurulur ise PC algoritması için kuzey güney yönünde mutlak ivme azaltma yüzdeleri %47 den %18 e , CLOC için ise %16 dan %3 e değişmektedir. Bunlara ek olarak dönme serbestliğindeki mutlak ivme azaltımı değerleri de PC için %47 den % 13 e CLOC için ise %23 den %-8 e değişmektedir. Bu azaltımlar aynı derecede kontrol kuvveti ile elde edilmiştir. Ancak PC algoritmasındaki kontrol enerjisi tüketimi çok az da olsa CLOC algoritmasındaki kontrol enerjisi tüketiminden fazladır. Bu detaya rağmen kontrol kuvvetleri ile alakalı β_8 performans parametresi incelendiğinde ilk üç kat için kontrol kuvvetlerinin Erzincan ve Loma Prieta depremleri için PC algoritmasında CLOC a göre daha küçük olduğu görülebilir. Diğer depremler için ise kontrol kuvvetleri ilk iki kat için PC algoritmasında CLOC a göre daha düşük ancak 3. kat için yaklaşık aynı mertebededir. Normalize edilmiş kontrol kuvveti parametresi β_8 , 4. 5. ve 6. katlar için de ilk üç kata benzer sonuçlar vermiştir. Normalize edilmiş rölatif ivmeler de doğu batı yönü için Şekil 5.9 da verilmiştir. Şekil 5.9 dan görüldüğü gibi rölatif ivme azaltımı PC algoritmasında CLOC a göre çok az da olsa daha iyidir.



Şekil 5.9 : Normalize edilmiş ivme doğu batı yönü (a) Northridge (b) Erzincan (c) Loma Prieta (d) San Fernando (e) Coalinga (f) Kern County.

6. MAGNETO-RHEOLOGİC SÖNÜMLEYİCİLERİN YAPILARDA KULLANIMI

Tezin son kısmında magneto-rheologic (MR) sönümleyicilerin üç boyutlu kayma binalarında kullanımı ile ilgili çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu kısımda anlatılacak çalışmalar Florida Institute of Technology İnşaat mühendisliği bölümünde Prof. Dr. Jean-Paul Pinelli yönetiminde gerçekleştirilmiştir. Bu doktora tezinin ana konusu yapısal kontrol olduğundan tezin son kısmında da yarı-aktif kontrol konusunda değinilecek çalışmaların tezin bütünlüğüne uygun olduğu düşünülmüştür. Bu kısımda kullanılan örnek yapı modeli de üç boyutlu kayma binası olup önceki kısımlarda değinilen formülasyon kullanılmıştır. Magneto-rheologic damper modeli için yeni geliştirilen bir kuvvet modeli kullanılmıştır (Van der Veek, 2009) . Bu kuvvet modeli ile birlikte PID kontrol algoritması kullanılarak MR sönümleyici kuvvetini üretmek için gerekli elektriksel güç te hesaplanabilirmiştir. MR sönümleyicileri kullanmanın en önemli avantajı olan düşük güç kaynakları ile kontrol kuvveti üretebilme avantajı bu kısımda da gözlemlenmiştir. İleriki kısımlarda yapı modeli , MR sönümleyici kuvvet modeli , MR sönümleyici eklenmiş yapının kontrol şeması ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

6.1 Magnetorheologic (MR) Sönümleyici Stratejisi

Bu kısımda kullanılan magnetorheologic sönümleyici modeli hem gerekli elektriksel akım şiddetini hesaplamakta hem de histeretik kuvvet hız davranışını tahmin edebilmektedir. Aşağıda MR sönümleyici modelinden elde edilen kuvvet bağıntısı verilmiştir.

$$\begin{aligned} F_d^+(\dot{x}, i) &= \frac{f(i)}{\pi} [\arctan(M(\dot{x} - \dot{x}_0)) + N(\dot{x} - \dot{x}_0)] + g(i), \quad \ddot{x} > 0 \\ F_d^+(\dot{x}, i) &= \frac{f(i)}{\pi} [\arctan(M(\dot{x} + \dot{x}_0)) + N(\dot{x} + \dot{x}_0)] - g(i), \quad \ddot{x} < 0 \end{aligned} \quad (6.1)$$

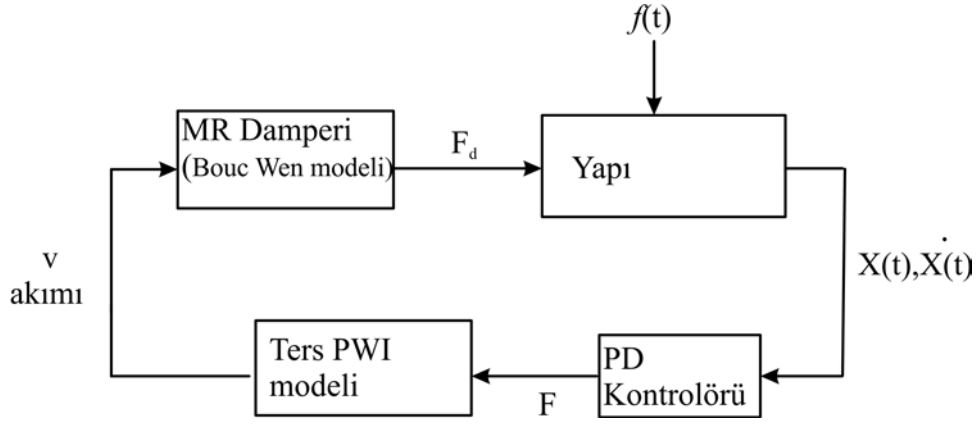
yukarıdaki denklemde i elektriksel akım şiddeti , $\ddot{x}, \dot{x}$ sırasıyla MR sönümleyiciin ivmesi ve hızıdır. Bir çalışma yukarıdaki denklem parametrelerinin (M , N ve $f(i)$ ve

$g(i)$ polinomları içindeki parametrelerin) deneme yapılma yoluyla elde edilebileceğini irdelemiştir (Van Der Veek, 2009). Aynı çalışmada elde edilen MR sönümleyici kontrol kuvvetleri zaman ve frekans alanında deneysel olarak elde edilen veriler ile de karşılaştırılarak bir nevi bir çok kuvvet hız datasından hareketle tahmin edilen parametrelerin güvenilirliği de test edilmiş ve onaylanmıştır. Yukarıda belirtilen kuvvet modeline PVI(PWI) kuvvet modeli adı verilmiştir. Bu testlere ek olarak MR sönümleyici kontrol kuvvetinin analitik ifadesi gelişmiş MR sönümleyici kuvvet modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda deneysel olarak 240 kN kuvvet üretebilen Lehigh üniversitesi (ABD) de denenen bir MR sönümleyiciden elde edilen datalar ve 25 kN kuvvet üretebilen Lord cooperation adlı MR sönümleyiciler konusunda öncü bir firma tarafından üretilen bir MR sönümleyici kullanılmıştır.

Bu MR sönümleyici modeli kullanılarak 3 boyutlu bir kayma binasında MR sönümleyici kullanımı durumunda elektriksel akım şiddetini de dikkate alarak deprem etkisi altındaki davranışı temsil eden bir simulasyon gerçekleştirilmiştir. Bu MR sönümleyici simulasyonundaki detaylar aşağıda verilmiştir.

- Öncelikle orantılı ve türev (PD) kontrolörü yapıdaki titreşimi azaltmak için gerekli olan kontrol kuvvetini hesap eder
- Bu kuvvet bilgisi ile 6.1 denkleminde verilen MR sönümleyici kuvvet modelinin tersi ilgili elektriksel akım şiddeti / voltajını hesaplar.
- MR sönümleyici kuvvet modelinin tersi (PVI modelinin tersi) ile hesaplanan gerekli akım Bouc Wen modeline iletilerek gerekli olan MR sönümleyici kuvveti elektrik akımına göre hesaplanır.
- Hesaplanan MR sönümleyici kuvveti yapı sisteminin hareketinin dinamik diferansiyel denklemine iletilerek denklem çözülür

Yukarıda bahsedilen sistemin işleyiş şeması Şekil 6.1 de verilmiştir. Ek olarak sistem ve Bouc Wen modeli ile ilgili detaylı bilgiler ve gerekli formülasyonlar aşağıdaki kısımlarda ifade edilmiştir.



Şekil 6.1 : MR sönümleyici eklenmiş sistemin işleyiş diyagramı.

Bouc Wen modeline ait MR sönümleyici kuvveti aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \quad (6.2)$$

yukarıdaki denklemdeki z parametresi de aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (6.3)$$

6.3 denklemde verilen γ, β ve α parametrelerinin değerleri sistemin akma öncesi ve akma sonrası davranışı ile ilgilidir. Denklem 6.3 ve 6.2 sisteme etkiyen voltajın (elektiriksel akımın) sabit olması durumunda geçerlidir. Ancak bu çalışma kapsamında manyetik alanın sabit olmadığı dolayısıyla gerçek sisteme yakın bir çalışma prensibi belirlenerek sabit akım yerine akımın değiştiği düşünülmüştür. Burada gerçekleştirilen analitik simülasyonlarda voltajın ve akımın değişimi hesaplanmıştır. Akım hesabı için aşağıdaki bağıntılar kullanılmıştır (bu bağıntılar ile ilgili daha detaylı bilgiler (Dyke ve diğ. 1996) da bulunabilir.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u, \quad c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u, \quad c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (6.4)$$

bu denklemdeki u akım veya voltajı temsil etmektedir. Sistemin diğer parametrelerine bu çalışma kapsamında optimal değerler atanmıştır.

6.2 Sayısal Örnek

Yukarıda belirtilen MR-MD yaklaşımı üç boyutlu bir kayma binasına uygulanmıştır. Üç boyutlu kayma binasına pasif kütle sönümleyici ve MR-MD eklenmiştir. Örnek bina olarak (Ohtori ve diğ. 2004) makalesinde tanımlanmış Los Angeles Californiya

aşamalarında kullanılan Bouc Wen kuvvet modeli için seçilen parametreler aşağıda verilmiştir.

$$c_{0a}=60; c_{0b}=20; k_0=1650; \alpha_a=5; \alpha_b=1; \gamma=1; \beta=1; A=120; n=2 \quad (6.5)$$

6.1 denklemi ile verilen modelin tersinin alınması için seçilen parametreler de aşağıda yazılmıştır

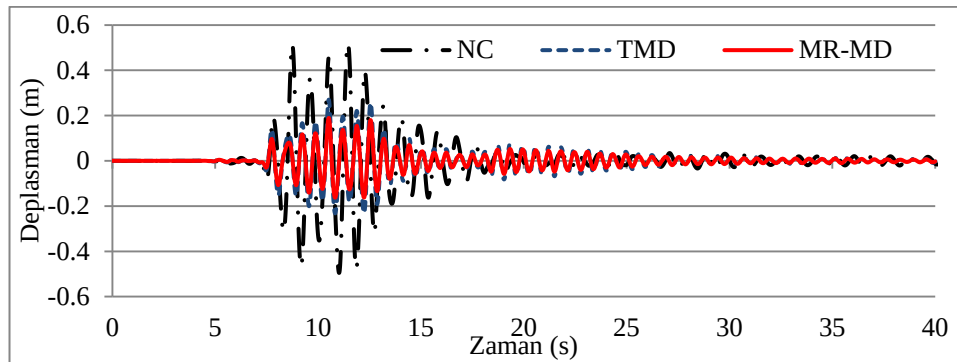
$$i_1 = 0; i_2 = 0; M = 0.039; N = -0.001; \dot{x}_0 = 26.2; f_0 = -22.533$$

$$f_1 = 87.853; g_0 = -1.0776; g_1 = 4.8579; g_2 = -0.9644 \quad (6.6)$$

orantılı ve türev kontrolörü (PD) için de parametreler aşağıda verilmiştir

$$\text{Orantılı (P)}=100, \text{ Türev (N)}=5, \text{ Filtre katsayısı (N)}:10 \quad (6.7)$$

Bütün parametreler tanımlandıktan sonra dinamik analizler 40 saniye için 0.02 saniyelik deprem zaman aralığı ile gerçekleştirilmiştir. Yapıdaki ilk kata ait deplasman zaman grafikleri Şekil 6.3 de kontrolsüz yapı , TMD eklenmiş yapı ve MR-MD eklenmiş yapı için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Maksimum yapı tepkisi azaltma yüzdeleri ise Çizelge 6.1 de sunulmuştur (Çizelge 6.1 de KG=kuzey güney, DB=doğu batı yönlerini belirtmektedir). Şekil 6.3 den görüldüğü üzere deplasman azaltımı yönünden en iyi performansı MR-MD eklenmiş sistem göstermiştir. Çizelge 6.1 ve Şekil 6.3 den görüldüğü üzere MR-MD eklenmiş sistemde elde edilen kontrolsüz kat deplasmanı ve kat dönmeleri azaltımı TMD eklenmiş sisteme göre daha iyidir. Her iki yönde deplasmanların azaltım oranı kat dönmelerinin azaltım oranına göre daha fazladır.

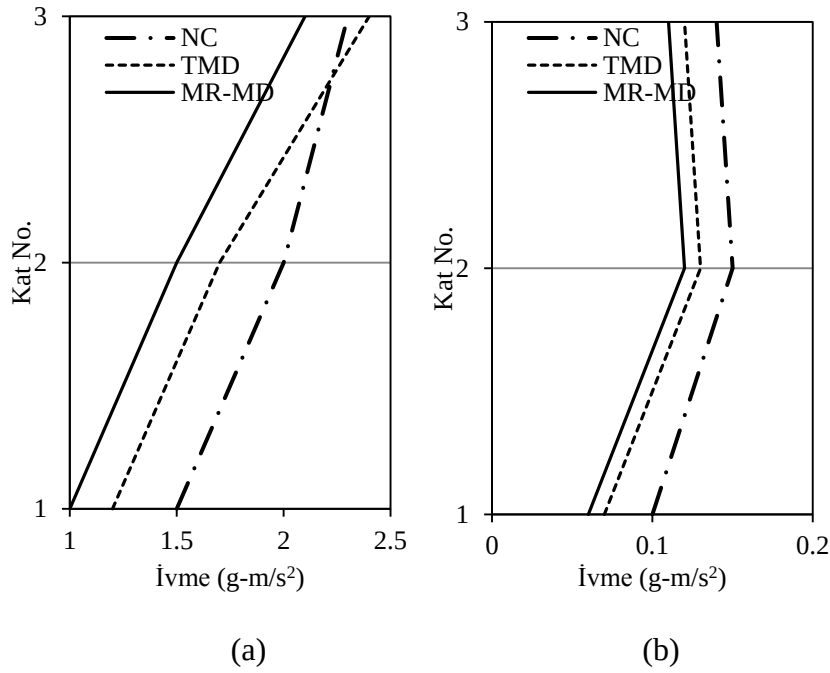


Şekil 6.3 : Deplasman zaman eğrileri.

Çizelge 6.1 : Yapı tepkisi azaltım yüzdeleri (%).

Kat No & Doğrultu	1-KG	1-DB	1-Dönme	2-KG	2-DB	2-Dönme	3-KG	3-DB	3-Dönme
TMD	52.8	19.8	5.1	49.9	16.1	2.7	47.7	19.9	3.3
MR-MD	64.5	39.8	7.2	62.3	37.0	4.0	60.7	40.0	5.1

Katlara ait maksimum mutlak ivme değerleri de incelenmiş ve Şekil 6.4 de kontrolsüz, TMD eklenmiş yapı ve MR-MD eklenmiş yapı için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sadece kuzey güney yönündeki mutlak ivme değerlerine şekilde sunulmuştur. Şekilden anlaşıldığı üzere en düşük mutlak ivmeler MR-MD eklenmiş sistem ile elde edilmiştir. Bu kısımda kayda değer önemli nokta ise tüm deplasman ve ivme azaltımlarının maksimum 0.79 kN luk bir yarı aktif kontrol kuvveti ile elde edilmiş olmasıdır. Bu maksimum kontrol kuvveti aktif kontrol uygulanması durumunda oluşacak maksimum kontrol kuvvetine dolayısıyla kontrol enerjisine kıyasla çok daha düşüktür. Bu nedenledir ki yarı aktif kontrol sistemlerinde küçük bataryalar ile sistem çalıştırılabilmektedir.

**Şekil 6.4 : Mutlak ivmeler (a:kuzey güney doğrultusu, b:doğu batı doğrultusu).**

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu kısımda sonuçlar üç alt başlık halinde verilmiştir. Alt başlıklardan ilki tezin ilk kısmında değinilen yapısal kontrol altında yapıya giren enerjinin incelenmesi ile ilgili sonuçlardır. İkinci kısımda ise bu tez kapsamında değinilen bir aktif ve bir pasif olmak üzere elde edilen iki adet yeni yaklaşımdan elde edilen sonuçlar verilmiştir. Üçüncü sonuç kısmında ise tezin son kısmında değinilen magneto-rheologic (MR-MD) sönümleyiciler ile ilgili yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara değinilmiştir. Bu bölümün sonunda ise gelecekte bu konuda yapılabilecek çalışma önerilerine kısaca değinilmiştir.

7.1 Yapısal Kontrol Altında Yapıya Giren Enerjinin İncelenmesi ile İlgili

Sonuçlar

Çeşitli yapısal kontrol elemanlarının (taban izolasyonu, aktif ve pasif kütle sönümleyiciler) yapıya eklenmesi durumunda bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır. Bu tez kapsamında elde edilen sonuçların sadece spesifik olanları bir başka deyişle yapısal enerjilerle ilgili olan kısımlar aşağıda verilmiş olup daha önceki yıllarda literatürde bir çok kez ulaşılan yapısal kontrol elemanlarının yapı davranışına etkisi ile ilgili sonuçlara yer verilmemiştir. Yapısal enerji ve kontrol elemanlarının enerji davranışına etkisi ile ilgili sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Elde edilen en temel sonuç yapısal kontrol elemanlarının yapılara eklenmesinin yapısal enerjileri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Bunlara ek olarak ;

- Depremlerin karakteristik özellikleri kontrolsüz veya kontrollü tüm yapılara giren enerji seviyelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Maksimum deprem ivmesi değeri daha yüksek olan bir deprem etkisindeki yapıya giren enerjiler daha düşük ivmeli bir deprem etkisi altındaki bir yapıya göre önemli oranda fazla olabilir.

- Ağırlık matrislerinden **R** matrisinin kontrol enerjisi tüketimine etkisi fazladır. Bilindiği gibi **R** matrisine küçük değerler atanması kontrol kuvvetini azalttığı gibi kontrol enerjisini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bunlara ek olarak kontrol enerjisi tüketimi , diğer yapı enerjilerine oranla çok azdır.
- Şekil değiştirme enerjisinin katlara göre dağılımı incelendiğinde en fazla şekil değiştirme enerjisi tüketiminin birinci katta olduğu üst katlara çıkıldıkça şekil değiştirme enerjisi tüketiminin azaldığı görülmüştür.

Tezdeki bütün çıkarımlar yapısal kontrol sistemlerinin enerji yönünden efektifliğini göstermektedir. Yapısal kontrol sistemlerinin enerji tüketme kapasitelerini arttıracak şekilde dizayn edilmeleri daha efektif kontrol sistemlerinin elde edilmesine neden olabilir.

7.2 Önerilen Kontrol Yaklaşımları ile İlgili Sonuçlar

Bu tezde klasik doğrusal optimal kontrolün temel parametrelerinden olan kazanç matrisinden yararlanarak yapıya eklenebilecek yarı optimal sönüm ve rijitlik parametrelerini bulmak için çeşitli basit metodlar önerilmiştir. Nümerik olarak incelenen bu yaklaşım sonucunda yapının ilk sönümünü ve rijitliğini uygun oranlarda değiştirmek deprem etkisi altında oluşan titreşimleri azaltmakta ancak yöntemin performansı depremden depreme değişmektedir. Bu yöntem tam anlamıyla pasif ve değişken dinamik etkilere karşı adapte olabilme yeteneği olmadığından ikinci olarak aktif kontrol için yeni bir performans indeksi önerilmiştir. Önerilen performans indeksi yapının mekanik enerjisi ile beraber, kontrol ve sismik enerjileri de eş zamanlı olarak minimize etme prensibine dayanmaktadır. Önerilen performans indeksinin yapılara uygulaması esnasında doğrusal olmayan Rikkati denkleminin çözümüne ve deprem ivme zaman geçişinin tamamının bilinmesine gerek yoktur. Önerilen performans indeksinin incelenmesi hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu kayma binalarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda önerilen performans indeksinin tüm pasif yaklaşımlardan daha iyi sonuç verdiği görülmüş hem kontrolsüz yapı deplasmanlarını hem de katlara ait mutlak ivmeleri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Bilindiği üzere yapılarda rölatif ivmelerin azaltımı başarsa bile yapı kontrol kuvvetleri ve sismik yer ivmeleri nedeniyle önemli ivmelere ulaşabilir. Bu nedenle mutlak ivmelerin de azaltılması önemli bir katkıdır. Önerilen aktif kontrol performans indeksi ayrıca literatürde yaygın olarak kullanılan klasik optimal

doğrusal kontrol algoritmasına yakın performans göstermiştir. Buna ek olarak klasik optimal doğrusal kontrol yapı tepkilerini azaltırken mutlak ivmeleri azaltmada çok başarılı olamamıştır buna karşın önerilen performans indeksi hem yapı tepkilerini hem mutlak ivmeleri eş zamanlı azaltabilmiştir. Bu sonuçlardan ötürü aktif kontrol uygulanmış yapının deprem esnasında olası yapısal hasarları ve insan yaralanmalarını da kontrol uygulanmamış yapıya göre azaltabileceği söylenebilir.

7.3 Magneto-rheologic Sönümleyici (MR-MD) Araştırmasından Elde Edilen Sonuçlar

Yeni bir MR-MD kuvvet modelinin analitik olarak denendiği bu çalışmada model 3 boyutlu bir kayma binasına eklenmiştir ve etkinliği incelenmiştir. Ayarlı kütsel sönümleyici (TMD) ile yapılan performans karşılaştırması sonucunda MR-MD eklenmiş yapının hem yapı tepkisi (kat deplasmanları) hem de yapı ivmelerinin azaltımında daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu performansa da çok düşük kontrol enerjisi ve kontrol kuvveti ile ulaşılmıştır. Yarı aktif kontrol sistemlerinin kullanımının aktif kontrol sistemlerine göre en önemli avantajı olan düşük kontrol enerjisi hatta bataryalarla bile kontrol kuvveti üretebilmesi bu tez kapsamında da kullanılan yeni bir kuvvet modeli ile de gözlemlenmiştir.

7.4 Öneriler

Bu çalışma kapsamında kontrol elemanlarına (aktif, pasif , yarı aktif) detaylı bir incelemede bulunulmuştur. Bunlara ek olarak iki yeni kontrol yaklaşımı önerilmiş ve bu yaklaşımlar ile ilgili çeşitli analitik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Gelecek çalışmalar için yapılacak en büyük öneri bu konular ile ilgili deneysel araştırmalara yönelmektir. Deneysel araştırmalarda da kontrollü ve kontrolsüz yapıların davranışları laboratuvar ortamında incelenebilir sonuçlar deneysel olarak karşılaştırılabilir. Deneylerde de öncelikle tek katlı çerçeve modelleri incelenebilir. Kontrol elemanları bu prototip modellere eklenerek ileriki seviyelerde deneylerin başarı durumuna göre deneyler de daha kompleks hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M.M., Richardson, A., & Hanif, J.** (2001). Placement of sensors/actuators on civil structures using genetic algorithms, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 1167-1184.
- Agrawal, A.K., Xu, Z., & He W.L.** (2006). Ground motion pulse-based active control of a linear base-isolated benchmark building, *Structural Control and Health Monitoring*, 13(2-3), 792-808.
- Akbas, B. ve Shen, J.** (2003). Depreme dayanıklı yapı tasarımı ve enerji kavramı, *İMO Teknik Dergi*, 2877- 2901.
- Akbas, B., Shen, J., & Temiz, H.** (2006). Identifying the hysteretic energy demand and distribution in regular steel frames, *Steel and Composite Structures*, 6(6), 479-491.
- Akhiev, S.S., Aldemir, Ü., & Bakioğlu, M.** (2002). Multipoint instantaneous optimal control of structures, *Computers and Structures*, 80, 909-917.
- Akiyama, H.** (1985). *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan.
- Alavinasab, A., Moharrami, H., & Khajepour, A.** (2006). Active control of structures using energy-based LQR method, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21, 605-611.
- Aldemir, Ü.** (1999). Yapıların optimal kontrolü, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora tezi), İstanbul.
- Aldemir, Ü.** (2003). Optimal control of structures with semiactive-tuned mass dampers, *Journal of Sound and Vibration*, 266(4), 847-874.
- Aldemir, Ü.** (2010). A Simple Active Control Algorithm for Earthquake Excited Structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 25(3), 218-225.
- Aldemir, Ü. & Bakioğlu, M.** (2001). Active structural control based on the prediction and degree of stability, *Journal of Sound and Vibration*, 247(4), 561-576.
- Aldemir, Ü., Bakioğlu, M. , & Akhiev, S.S.** (2001). Optimal control of linear structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30(6), 835-851.
- Aldemir, Ü. ve Aydın, E.** (2005). Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri* , 435(1), 81-89.
- Bakioğlu, M. & Aldemir, Ü.** (2001). A new numerical algorithm for sub-optimal control of earthquake excited structures, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 50(12), 2601-2616.

- Bakioğlu, M., Aldemir, Ü., ve Hayır, A.** (2009). Aktif ve/veya Pasif Kontrol Uygulanmış Çok Katlı ve Doğrusal Olmayan Malzemeden Yapılmış Kayma Binalarına Giren Deprem Enerjisinin Dağılımı, Tübitak 108M496 nolu Araştırma projesi sonuç raporu, Ankara, Türkiye.
- Barroso, L. Chase, Geoffrey, J., & Hunt, S.** (2002). Application of Magneto-Rheological Dampers for Multi-Level Seismic Hazard Mitigation of Hysteretic Structures. *Proceedings of 15th ASCE Engineering Mechanics Conference (EM2002)*, New York, USA, June 2-5, 2002.
- Basili, M. & Angelis, M. D.** (2007). Optimal passive control of adjacent structures interconnected with nonlinear hysteretic devices, *Journal of Sound and Vibration*, 301, 106-125.
- Benioff, H.** (1934). The physical evaluation of seismic destructiveness, *Bull. Seism. Sos. Am.*, 24, 398-403.
- Bitaraf, M., Hurlebaus, S., & Barroso, L.R.** (2012). Active and Semi-active Adaptive Control for Undamaged and Damaged Building Structures under Seismic Load, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1), 48-64.
- Carlson, J. D.** (1994). The Promise of Controllable Fluids. *Proceedings Of Actuator 95* (H. Borgmann and K. Lenz, Eds.), AXON Technologie Consult GmbH, 266-270.
- Carlson, J. D. & Spencer, B.F.** (1996). Magneto rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control. *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, (pp.35-40), Chiba, Japan.
- Casciati, F. & Giuliani, F.** (2009). Performance of multi-TMD in the towers of suspension bridges, *Journal of Vibration and Control*, 15(6), 821-847.
- Chang, C-M., Park, K.-S., Mullenix, A., & Spencer Jr., B. F.** (2008). Semi active control strategy for a phase II smart base isolated benchmark building, *Structural Control and Health Monitoring*, 15(5), 673-696.
- Chey, M.H., Chase, G., Mander, J.B., & Carr, A.J.** (2010). Semi-active tuned mass damper building systems: Design, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 119-139.
- Cho, B.H., Jo, J.S., Joo, S.J., & Kim, H.** (2012). Dynamic Parameter Identification of Secondary Mass Dampers based on Full-Scale Tests, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(3), 218-230.
- Choi S.B. & Lee S.K.** (2001). A hysteresis model for the field-dependent damping force of a magneto rheological damper, *Journal of Sound and Vibrations*, 245(2), 375-383.
- Chopra, A. K.** (1995). *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Chou, C. C. & Uang C. M.** (2003). A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structure, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 229-244.

- Christenson, R., Lin, Y. Z., Emmons, A., & Bass, B.** (2008). Large-scale experimental verification of semi active control through real-time hybrid simulation, *Journal of Structural Engineering*, 134(4), 522-534.
- Chung, L. L., Lin, C. C., & Lu, K. H.** (1995). Time-delay control of structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 24(5), 687-701.
- Cimellaro, G. P. , Lavan, O., & Reinhorn, A. M.** (2009). Design of passive systems for control of inelastic structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 783-804.
- Costa, S. N. & Balthazar J. M.** (2009). On an active control for a structurally nonlinear mechanical system taking into account an energy pumping, *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 4, 1-6.
- Dyke, S.J. & Spencer Jr., B.F.** (1996). Seismic Response Control Using Multiple MR Dampers, *Proceedings. Of the 2nd International Workshop on Structural Control*.(pp. 163-173), Hong Kong,.
- Dyke, S. J., Spencer Jr., B.F. , Sain, M. K., & Carlson, J.D.** (1996). Modeling and Control of Magneto-rheological Dampers for Seismic Response Reduction, *Smart Materials and Structures*, 5, 565-575
- Dyke, S. J., Spencer Jr., B.F., Quast, P., Kaspari, Jr., D.C., & Sain, M.K.,** (1996). Implementation of an Active Mass Driver Using Acceleration Feedback Control. *Microcomputers in Civil Engineering: Special Issue on Active and Hybrid Structural Control*, 11, 305-323.
- Dyke, S. J. & Spencer Jr., B. F.,** (1997). A Comparison of Semi-Active Control Strategies for MR Damper, *Proceedings of the LASTED International Conference on Intelligent Information Systems*, 580-584.
- Eisenberg, J.** (1992). Some Actual Problems in Earthquake Engineering, *Lectures Notes*, İstanbul Technical University.
- Erkus, B. & Johnson, E. A.** (2011). Dissipativity analysis of the base isolated benchmark structure with magnetorheological fluid dampers. *Smart Materials and Structures*, 20, 105001, 1-12.
- Fujitani, H., Sodeyama, H., Hata, K., Hiwatashi, T., Shiozaki, Y., Inoue, N., & Soda, S.** (2004). Application of magneto rheological fluid to semi-active control of building structures by BRI and partners, *Key Engineering Materials Advances in Nondestructive Evaluation*, , 270-273, III, 2126-2133.
- Gavin H. P.** (2001). Multi-duct ER Dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12, 353-366.
- Gluck, N., Reinhorn, A.M., Gluck, J., & Levy, R.** (1996). Design of supplemental dampers for control of structures, *Journal of Structural Engineering*, 122(12), 1394-1399.
- Hiemenz, G.J., Choi, Y.T., & Weeley, N.M.** (2003). Seismic control of civil structures using semi-active MR braces, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18, 31-44.

- Housner, G. W.** (1956). Earthquake resistant limit design of structures, *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, 5-1,(pp. 5-13), Berkeley, California.
- Housner,G.W., Bergman, L.A.,Caughey, T.K., Chassiakos, A.G.,Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, B.F. & Yao, J.T.P.** (1997). Structural Control: Past, Present, and Future. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE,123(2), 897-958.
- Jansen, L.M. & Dyke, S.J.** (2000). Semi-active control strategies for the MR damper: a comparative study, *J. Eng. Mech. ASCE*, 126(8),795-803.
- Jung, H.J., Spencer, B.F. Jr., Ni, Y.Q. & Lee, I.W.** (2004). State-of-the-art of semi active control systems using MR fluid dampers in civil engineering applications, *Structural Engineering and Mechanics*, 12, 493-526.
- Kalkan, E. & Kunnath, S. K.** (2007). Relevance of absolute and relative energy content in seismic evaluation of structures, *Advances in Structural Engineering*, 11(1), 1-17.
- Kalkan, E. & Kunnath, S. K.** (2007). Effective cyclic energy as a measure of seismic demand, *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 725-751.
- Katsaras C.P., Panagiotakos T.B., & Kolas B.** (2007). Restoring capability of bilinear hysteretic seismic isolation systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 557-575.
- Kamath, G.M. & Wereley, N.M.,** (1997). System Identification of Electro rheological Fluid-Based Dampers Using a Nonlinear Viscoelastic-Plastic Phenomenological Model, *Proceedings of the AIAA Aerospace Sciences Conference*, Reno, Nevada, January 6-7.
- Kang, N., Kim, H., Choi, S., Jo, S., Hwang, J.S., & Yu, E.** (2012), Performance evaluation of TMD under typhoon using system identification and inverse wind load estimation, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(6), 455-473.
- Konar, T. & Ghosh, A.** (2010). Passive control of seismically excited structures by the liquid column vibration absorber, *Structural Engineering and Mechanics*, 36(5), 561-573.
- Kwakernaak, H. & Sivan, R.** (1972). *Linear Optimal Control Systems*, Wiley, New York, NY.
- Lin, C. C., Lu, K. H., & Chung, L. L.** (1996). Optimal discrete-time structural control using direct output feedback, *Engineering Structures* , 18(6), 472-480.
- Lu, L.Y., Lin, G.L., & Lin, C.C.** (2011). Absolute-energy-based active control strategies for linear seismic isolation systems. *Structural Control and Health Monitoring* , 18, 321-340.
- Manfredi, G.** (2001). Evaluation of seismic energy demand , *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 485-499.
- Mathakari, S., Gardoni, P., Agarwal, P., Raich, A., & Haukaas, T.** (2007). Reliability-based Optimal Design of Electrical Transmission Towers

Using Multi-objective Genetic Algorithms, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(4), 282-292.

- Min, K. W., Hwang, J.S., Lee, S.H., & Chung, L.** (2003). Probabilistic approach for active control based on structural energy. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32 , 2301-2318.
- Moon, S.J., Bergman, L.A., & Voulgaris, P.G.,** (2002). Sliding mode control of a cable-stayed bridge subjected to seismic excitation, *Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, USA.
- Motra, G., Mallik, W., & Chandiramani, N.,** (2011). Semi-active vibration control of connected buildings using magneto-rheological dampers, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22 (16), 1811-1827.
- Narasimhan S., Nagarajaiah S., Johnson E.A., & Gavin H.** (2006). Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition, *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, 13, 573–588.
- Ni, Y.Q., Chen, Y., Ko, J. M., & Cao, D.Q.** (2002). Neuro-control of cable vibration using semi-active magneto-rheological dampers, *Engineering Structures*, 24, 295-307.
- Occhiuzzi, A., Spizzuoco, M., & Serino, G.,** (2003). Experimental analysis of magneto rheological dampers for structural control, *Smart Materials and Structures*, 12 , 703-711.
- Occhiuzzi, A. & Spizzuoco, M.,** (2005). Experimental analysis of a semi-actively controlled steel building, *Structural engineering and Mechanics*, 19(6), 721-747.
- Ohtori, Y., Christenson, R.E., Spencer Jr., B.F., & Dyke, S.J.,** (2004) Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings. *Journal of Engineering Mechanics-ASCE* , 130 , 366-385.
- Ou, Y. C., Song, J. ve Lee, G. C.** (2010). A parametric study of seismic behavior of roller seismic isolation bearings for highway bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39,541–559
- Palazzo, B. & Petti L.** (1999) . Combined control strategy :base isolation and tuned mass damping, *ISET Journal of Earthquake Technology*, 36,121-137.
- Pantelides, C.P. & Cheng, F.Y.** (1990). Optimal placement of controllers for seismic structures, *Engineering Structures*, 12 (4), 252-262.
- Preumont, A. & Seto K.** (2008). *Active control of structures*, Chichester,West Sussex, JohnWiley & Sons Ltd.
- Reinhorn, A.M., Lavan, O., & Cimellaro, G.P.** (2009). Design of controlled elastic and inelastic structures, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8 , 469-479.
- Ribakov, Y. & Gluck, J.** (2002). Selective controlled base isolation system with magneto rheological dampers, *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(6), 1301-1324.

- Riley M.A., Reinhorn A.M., & Nagarajaiah S.** (1998). Implementation issues and testing of a hybrid sliding isolation system, *Engineering Structures*, 20(3), 144–154.
- Sarma, K.C. & Adeli, H.** (2001). Bi-Level Parallel Genetic Algorithms for Optimization of Large Steel Structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16 (5), 295-304.
- Sato, T. & Toki, K.** (1990). Active control of seismic response of structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, 1, 447-475.
- Shinozuka, M. & Deodatis, G.** (1991) Simulation of Stochastic Processes by Spectral Representation, *Applied Mechanics Reviews*, 44(4) ,191-203.
- Singh, M.P. & Moreschi, L.M.** (2001). Optimal seismic response control with dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 553-572.
- Soong, T.T.** (1990). *Active Structural Control; Theory and Practice*, Longman Scientific and Technical ,Essex, England.
- Soong, T.T. & Spencer Jr., B.F.** (2002). Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice. *Engineering Structures* , 24, 243-259.
- Spencer, Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., & Carlson, J. D.** (1997). Phenomenological Model of a Magneto-rheological Damper. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3), 230-238.
- Spencer, Jr., B.F., Yoshioka, H., & Ramallo, J.C.** (2002). Smart base isolation strategies employing magnetorheological dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 128(5), , 540-551.
- Spencer, Jr., B.F., Yang, G., Carlson, J.D., & Sain, M.K.** (2002). Large-scale MR fluid dampers: Modeling and dynamic performance considerations, *Engineering Structures*, 24(3), 309-323.
- Snyder, R.A., Kamath, G.M., & Wereley, N.M.** (2001). Characterization and analysis of magneto-rheological damper behavior under sinusoidal loading. *AIAA Journal*, 39(7), 1240-1253.
- Surahman, A.** (2007). Earthquake-resistant structural design through energy demand and capacity, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 2099-2117.
- Symans, M. D. & Constantinou, M.** (1999). Semi-active control systems for seismic protection of structures: A state-of-the-art review. *Engineering Structures*, 21(6), 469-487.
- Trifunac, M. D.** (2008). Energy of strong motion at earthquake source, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28, 1-6.
- Tsai, H.C. & Kelly, J.M.** (1989). Seismic Response of the Superstructure and Attached Aquipment in a Base-Isolated building. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* , 18, 551-564.
- Uang, C. & Bertero, V.** (1990). Evaluation of Seismic Energy in Structures, *Earthquake Engineering and Syructural Dynamics* , 19, 77-90.

Url-1 < <http://peer.berkeley.edu/nga/earthquakes.html>>, alındığı tarih: 10.06.2010.

- Van Der Veek, B.J.** (2009). *Seismic Hazard Mitigation of Structures by Semi Active Magneto-Rheological Mass-Dampers*, (master tezi), MAE department, Florida Institute of Technology, Melbourne, FL, ABD ve EE department, Technische Universiteit Eindhoven, Hollanda.
- Wang, Y.** (2011). Time-delayed dynamic output feedback H_∞ controller design for civil structures: A decentralized approach through homotopic transformation, *Structural Control and Health Monitoring*, 18,121-139.
- Wang, A.P., Fung R.F., & Huang S.C.** (2001). Dynamic analysis of a tall building with a tuned-mass-damper device subjected to earthquake excitations, *Journal of Sound and Vibration*, 244(1), 123–136.
- Wang, X. & Gordaninejad, F.**, (2002). Lyapunov-based control of a bridge using magneto-rheological fluid dampers, *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 13(7),415-419.
- Weaver Jr., W. & Nelson , M.F.** (1966). Three-dimensional analysis of tier buildings, *American Society of Civil Engineers Proceedings Journal of the Structural Division*, 92(ST6), 385-404.
- Weaver Jr., W, Nelson, M.F., & Manning, T.A.** (1968). Dynamics of tier buildings. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Engineering Mechanics Division* , 94(EM6),1455-1474.
- Wong, K.K.F.** (2005), Structural control energy efficiency based on elastic displacement, *Solid Mechanics and Its Applications*, 130, 365-374,
- Wong K.K.F. & Pang M.** (2007a). Energy density spectra in actively controlled inelastic structures theory, *Structural Control and Health Monitoring*, 14, 261–278.
- Wong, K.K.F. & Pang, M.** (2007b). Energy density spectra in actively controlled inelastic structures-application, *Structural Control and Health Monitoring*, 14, 279-300.
- Wong, K.K.F. & Wang, Y.** (2001). Probabilistic structural damage assessment and control based on energy approach, *The Structural Design of Tall Buildings*, 10, 283-308.
- Wong, K.K.F. & Yang, R.** (2001). Evaluation of response and energy in actively controlled structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 1495–1510.
- Xu, Y.L., Qu, W.L., & Ko, J.M.** (2000). Seismic Response Control of Frame Structures Using Magneto rheological/ Electro rheological Dampers, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 557-575.
- Xu, J.Y., Li, Q.S., Li, G.Q., Wu, J.R., & Tang, J.** (2005). Suboptimal control strategy in structural control implementation, *Structural Engineering and Mechanics*, 19(1), 107-121.
- Xu, J.Y., Tang, J, & Li, Q.S** (2005). Semi-active control devices in structural control implementation, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 14(2), 165-174.

- Xu, L. & Li, Z.** (2011). Model predictive control strategies for protection of structures during earthquakes, *Structural Engineering and Mechanics*, 40(2), 233-243.
- Yang, J.N.** (1975). Application of Optimal Control Theory to Civil Engineering Structures, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, 101(6), 818-832.
- Yang, J.N., Akbarpour, A., & Ghaemmaghami, P.** (1987). New optimal control algorithms for structural control, *Journal of Engineering Mechanics*, 113(9), 1369-1386.
- Yang, J.N., Danielians, A., & Liu, S.C.** (1991). Aseismic Hybrid Control Systems for Building Structures, *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 117, 836-853.
- Yang, G., Spencer Jr., B. F., Jung, H.-J., & Carlson, J. D.** (2004). Dynamic modeling of large-scale magneto rheological damper systems for civil engineering applications, *Journal of Engineering Mechanics*, 130(9), 1107-1114.
- Yi, F., Dyke, S.J., Frech, S., & Carlson, J.D.** (1998). Investigation of Magneto-rheological Dampers for Earthquake Hazard Mitigation, Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Control, Kyoto, Japan, Haziran 30-Temmuz 2, 349-358.
- Yi, F. & Dyke, S. J.** (2000). Structural control systems: performance assessment, *Proceedings of the American Control Conference*, 1, (pp.14-18).
- Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M., & Carlson, J.D.** (2001). Experimental Verification of Multi input Seismic Control Strategies for Smart Dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(11), 1152-1164.
- Zemp, R., de la LLera, J. C., & Almazan, J. L.** (2011). Tall building vibration control using a TM-MR damper assembly: experimental results and implementation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40, 257-271.
- Zemp, R., de la LLera, J. C., & Almazan, J. L.** (2011). Tall building vibration control using a TM-MR damper assembly, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40, 339-354.
- Zhou, L., Chang, C.C., & Wang, L.X.** (2003). Adaptive fuzzy control for a nonlinear building-MR damper system, *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 905-913.
- Zuk, W.** (1968). Kinetic Structures, *Civil Engineering*, 39, 62-64.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Arcan Yanık

Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy İstanbul / 19.04.1983

Adres: Bahariye caddesi, Ali Suavi Sokak No:14/1 Kadıköy İstanbul

E-Posta: yanikar@itu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (2006)

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Programı (2008)

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Araştırma Görevlisi

2009 Ocak-2014 Eylül İstanbul Teknik Üniversitesi

Araştırmacı

2012 Mart-2013 Mart Florida Institute of Technology

Yapı Mühendisi

Eylül 2008-Aralık 2008 Eqrm International

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir & Mehmet Bakioglu (2014), Energy Distributions in Actively and Passively Controlled Nonlinear Structures, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements* , 2(1), 14-29.

- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir & Mehmet Bakioğlu (2014) , A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures, *Engineering Structures* , 62 , 53-64.
- Ünal Aldemir, **Arcan Yanık** & Mehmet Bakioğlu (2012) , Control Of Structural Response Under Earthquake Excitation, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27 (8),620-638.
- **Arcan Yanık**, Jean-Paul Pinelli & Hector Gutierrez (2013), Control of a three-dimensional structure with magneto-rheological dampers, *11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)*, Lisbon, Portekiz, 9-12 Eylül, 2013.
- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir & Mehmet Bakioğlu (2013), A New Simple Passive Approach for Vibration Mitigation of 3-Dimensional Structures. *11th International Conference on Vibration Problems (ICOVP-2013)*, Lisbon, Portugal, 9-12 Eylül, 2013.
- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir & Mehmet Bakioğlu (2011), Energy-based evaluation of seismic response of structures with passive and active systems. *8th International Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures*, 7-9 Eylül 2011, Chianciano Terme, İtalya.
- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir ve Mehmet Bakioğlu (2009), Taban izolasyonlu ve izolasyonsuz yapılarda sismik enerjinin dağılımı. *XVI. Ulusal Mekanik Kongresi*, 22-26 Haziran 2009, Kayseri, Türkiye.
- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir ve Mehmet Bakioğlu (2009), Yapısal Kontrol Altında Yapıya Giren Enerjinin İncelenmesi. *62. Mustafa İnan Tatbiki Mekanik Seminerleri* , 9 Haziran 2009, İstanbul, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Arcan Yanık** , Unal Aldemir & Mehmet Bakioğlu (2014), Seismic Vibration Control of Three Dimensional Structures with a Simple Approach, *Journal of Vibration Engineering & Technologies* (Kabul edilmiştir)
- **Arcan Yanık**, Jean-Paul Pinelli & Hector Gutierrez (2014), “An analytical study about a tier building model with magnetorheological dampers. ”, *ACE 2014, 11th International Congress on Advances in Civil Engineering*, Istanbul-Türkiye, 21-25 Ekim, 2014.
- **Arcan Yanık**, Ünal Aldemir & Mehmet Bakioğlu (2014), Active Control of Three-Dimensional Structures, *IMAC XXXII A Conference and Exposition on Structural Dynamics* , 3-6 February, Orlando- Amerika Birleşik Devletleri.
- Prof. Dr. Mehmet Bakioğlu, **Araş. Gör. Arcan Yanık** (2013), "*Mühendislik Mekaniği Dinamik Çözümlü Problemler*", ISBN: 9786053778370, Beta Yayınları, İstanbul, Ocak 2013.
- **Arcan Yanık**, Ercan Yuksel & Cem Yalcin (2013), Evaluation of High-Deformation Capability and High-Strength Steels As Reinforcement in

Reinforced Concrete Members. *3rd Annual International Conference on Civil Engineering (ATINER)*, Athens, Greece, 10-13 June 2013.

- **Arcan Yanık** (2013), Evaluation of High-Deformation Capability and High-Strength Steels As Reinforcement in Columns. *XVIII. Ulusal Mekanik Kongresi*, 26.08.2013-30.08.2013, Manisa, Türkiye.
- Prof. Dr. Mehmet Bakioğlu, Doç.Dr. Fethi Kadioğlu, Y.Doç. Dr. Barış Barlas , **Araş. Gör. Arcan Yanık** (2011), *Sayısal Analiz Problemleri*, ISBN: 978-975-511-566-5, *Birsen Yayınevi* , İstanbul 2011.
- **Arcan Yanık**, Mehmet Bakioglu and Ünal Aldemir (2011), Deprem etkisi altındaki yapıların aktif kontrolü. *7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 31.05.2011-03.06.2011, İstanbul, Türkiye.

