

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMINDA
SİSMİK İZOLASYON VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Cemal Gürol ÖZPALANLAR**

Anabilim Dalı: İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı: YAPI (DEPREM)

OCAK 2004

**DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMINDA
SİSMİK İZOLASYON VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Cemal Gürol ÖZPALANLAR
(501001151)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 25 Ocak 2005**

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Necdet TORUNBALCI

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Özkan İŞLER (İ.T.Ü.)

Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK (İ.T.Ü.)

OCAK 2004

ÖNSÖZ

Başta yüksek lisans eğitimim boyunca beni yönlendiren, çalışmalarımda yakın ilgi ve desteğini esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Necdet TORUNBALCI olmak üzere, FIP Industriale Ar-Ge Mühendisi Prof. Dr. Maria Gabriella CASTELLANO'ya, Earthquake Protection Systems Genel Müdürü Prof. Dr. Anoop MOKHA'ya, Ermenistan Amerikan Üniversitesi öğretim üyesi Prof. Dr. Mikayel MELKUMYAN'a, GERB Vibration Control Systems - Earthquake Protection Department'ten Dr. Peter NAWROTZKI'ye, Tuncel Mühendislik'ten Bülent AYDIN'a, Taylor Devices Inc.'ten Bob SCHNEIDER'e, Maurer SÖHNE'den Dr. Renzo MEDEOT ile Mehtap TUNCER'e, İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Beyza TAŞKIN'a ve özellikle her zaman bana büyük destek ve çalışma gücü veren aileme teşekkür ederim.

Ocak 2005

Cemal Gürol ÖZPALANLAR

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
1.2. Çalışmanın Yöntemi	1
1.3. Giriş	1
2. SİSMİK TASARIMDA ENERJİ YAKLAŞIMI	3
2.1. Geleneksel Yaklaşım: Karşı Koyma	4
2.2. Yeni Yaklaşım: Hafifletme	6
3. GELENEKSEL TASARIM ANLAYIŞI	8
3.1. Geleneksel Tasarım Anlayışının Amacı ve Felsefesi	8
3.2. Geleneksel Tasarım Anlayışının Dezavantajları	8
3.3. Yeni Bir Tasarım Yaklaşımı İhtiyacı	12
4. SİSMİK İZOLASYON ANLAYIŞI	13
4.1. Sismik İzolasyonun Avantajları	15
4.1.1. Yapısal Avantajları	15
4.1.2. Ekonomik Getirileri	16
4.1.3. Deprem Sonrası Hemen Kullanım	16
4.1.4. Tasarım ve Detaylandırmada Kolaylıklar	17
4.1.5. Deprem Güvenliğinin Garanti Edilmesi	17
4.1.6. Yapısal Olmayan Elemanlar İçin Güvenliğin Garanti Edilmesi	17
5. SİSMİK İZOLASYONUN GEÇMİŞİ	18
5.1. Geçmişten Notlar	18
5.1.1. Imperial Oteli – Tokyo	18
5.1.2. Dr. Milne’nin Çalışmaları	18
5.1.3. Dr. Calantarients’in Kayıcı Sistem Önerisi	19
5.1.4. Kauçuk Mesnet Blokları	19
5.2. Dünyada Sismik İzolasyon Uygulamaları	20
5.2.1. ABD’de Sismik İzolasyon Uygulamaları	20
5.2.1.1. The Foothill Communities Law and Justice Center	20
5.2.1.2. The Salt Lake City and County Building	20
5.2.1.3. The University Hospital of the University of Southern California ...	22
5.2.1.4. San Fransisco City Hall	22
5.2.1.5. Oakland City Hall	23
5.2.1.6. Los Angeles City Hall	24
5.2.2. Japonya’da Sismik İzolasyon Uygulamaları	24

5.2.2.1. The Computer Center of the Tohoku Electric Power Company	26
5.2.2.2. The C-1 Building.....	26
5.2.3. Yeni Zelanda’da Sismik İzolasyon Uygulamaları	27
5.2.3.1. The William Clayton Building.....	27
5.2.3.2. Wellington Police Station.....	28
5.2.3.3. Yeni Zelanda Parlamento Binaları	29
5.2.4. Avrupa’da Sismik İzolasyon Uygulamaları	30
5.2.5. Türkiye’de Sismik İzolasyon Uygulamaları	31
5.3. Sismik İzolasyonlu Yapıların Gözlenmiş Performansları.....	32
5.3.1. The University Hospital of the University of Southern California	32
5.3.2. The West Japan Computer Center	34
6. SİSMİK KORUMA TEKNİKLERİNE GENEL BAKIŞ.....	36
6.1. Pasif Kontrol Sistemleri	36
6.2. Aktif Kontrol Sistemleri.....	37
7. PASİF KORUMA TEKNİKLERİ.....	39
7.1. Sismik İzolasyon Sistemleri	39
7.1.1. Kauçuk Esaslı Sistemler.....	40
7.1.1.1. Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (LDRB).....	41
7.1.1.2. Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnetler (HDNR)	43
7.1.1.3. Kurşun Çekirdekli Doğal Kauçuk Mesnetler (LRB).....	45
7.1.2. Kayıcı Sistemler	46
7.1.2.1. Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS).....	47
7.1.2.2. Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyonu (R-FBI).....	49
7.1.3. Kauçuk – Kayıcı Karma Sistemler.....	52
7.1.3.1. Electricite-de-France Sistemi (EDF)	52
7.1.3.2. EERC Bileşik Sistemi	53
7.1.4. Yay Tipi Sistemler	53
7.2. Pasif Enerji Sönümleyiciler.....	55
7.2.1. Eğilmeli Metal Sönümleyiciler	55
7.2.2. Sürtünmeli Sönümleyiciler	55
7.2.3. Viskoelastik Sönümleyiciler	56
7.2.4. Viskoz Sönümleyiciler	57
7.2.5. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD).....	57
7.2.6. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD)	58
8. AKTİF KORUMA TEKNİKLERİ.....	59
8.1. Aktif Kontrol Sistemlerinin Çeşitleri	59
8.1.1. Aktif Kiriş Kontrolü.....	59
8.1.2. Aktif Kütle Sönümleyicisi ve Aktif Kütle Sürücüsü	60
8.1.3. Gravity-Actuator (Yerçekimi-Harekete Geçirici) Sistem	61
8.1.4. Aktif Rijitlik Değiştirici	62
8.2. Aktif Kontrolün Dezavantajları.....	62
8.2.1. Modelleme Hataları.....	63
8.2.2. Zaman Gecikmesi	63
8.2.3. Yapının Lineer Olmaması	64
8.2.4. Yapı Parametrelerindeki Belirsizlikler.....	64
8.2.5. Sensör ve Kontrol Eleman Sayısının Sınırlı Olması	64
8.3. Karma ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	65
8.3.1. Karma Kontrol Sistemleri	65

8.3.1.1. Karma Kütle Sönümleyiciler (HMD).....	66
8.3.1.2. Karma Sismik İzolasyon (HSI)	66
8.3.2. Yarı Aktif Kontrol Sistemleri	66
9. SAP 2000 PROGRAMINDA NLLINK ELEMAN MODELLEME.....	68
9.1. Rubber Isolator	73
9.2. Sliding Isolator	74
9.3. Damper	76
10. SİSMİK İZOLASYON ŞARTNAMESİNİN GELİŞİMİ	77
10.1. A.B.D.'de Şartnamelerin Gelişimi	77
10.2. Japonya'da Şartnamelerin Gelişimi	78
10.3. Yeni Zelanda'da Şartnamelerin Gelişimi.....	79
11. UBC-97 YÖNETMELİĞİNDE SİSMİK İZOLATÖR ESASLARI.....	81
11.1. Sismik Risk Düzeyi.....	81
11.2. Tasarım Yöntemleri	81
11.3. Statik Analiz.....	82
11.3.1. Sismik Bölge Faktörü, Z	84
11.3.2. Zemin Faktörü, S	84
11.3.3. Deprem Kaynak Tipleri; A,B,C	84
11.3.4. Kaynak Yakınlık Faktörü; N_a , N_v	84
11.3.5. MCE Davranış Katsayısı, M_M	85
11.3.6. Spektral Deprem Katsayıları; C_{VD} , C_{VM} ve C_{AD} , C_{AM}	85
11.3.7. Sönüm Katsayıları; β_D , β_M	85
11.3.8. Efektif Sistem Titreşim Periyotları	86
11.3.9. Toplam Tasarım Yerdeğiştirmeleri : D_{TD} ve D_{TM}	87
11.3.10. Tasarım Kuvvetleri	89
11.3.11. Yatay Deprem Yükünün Katlara Dağılımı	90
11.3.12. Yerdeğiştirme Sınırları.....	91
11.4. Dinamik Analiz	91
11.4.1. Zaman Tanım Alanında Analiz.....	92
11.4.2. Ölçeklendirme	92
11.5. Yapısal Olmayan Elemanlar İçin Diğer Gereksinimler	93
11.6. Göz Önüne Alınması Gereken Diğer Hususlar	94
11.7. Statik Analiz Şartları Kullanılarak Adım Adım İzlenecek Yol	94
11.7.1. Ön Tasarım Adımları	94
11.7.2. Kesin Tasarım Adımları.....	97
12. SİSMİK İZOLASYONUN GELECEĞİ	100
13. UYGULAMA I	104
13.1. Ankastre Tabanlı Alternatif.....	109
13.2. Kauçuk İzolatörlü Alternatif	110
13.3. Sürtünmeli Sarkaç İzolatörlü Alternatif.....	112
13.4. İlave İzole Kat Alternatifi	114
13.5. Viskoz Sönümleyicili Alternatif	116
13.6. Karşılaştırma Kriterleri	118
13.7. Sonuçlar.....	122
14. UYGULAMA II.....	124

14.1. Statik Eşdeğer Deprem Yüğü Analizi	126
14.1.1. Kullanılacak UBC-97 Diyagram ve Tabloları	126
14.1.2. Analiz	128
14.2. Karşılık Spektrumu Analizi.....	137
14.3. Zaman Tanım Alanında Lineer Analiz	140
14.4. Zaman Tanım Alanında Nonlinear Analiz.....	141
14.5. Karşılaştırma Kriterleri	143
14.6. Sonuçlar.....	145
15. SONUÇLAR	146
KAYNAKLAR	147
ÖZGEÇMİŞ.....	150

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 11.1 Sönüm katsayıları	86
Tablo 11.2 Süneklik Faktörü Değerleri.....	89
Tablo 11.3 UBC-97 yönetmeliği minimum değerleri	93
Tablo 14.1 Diğer Katsayılar	127

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 Enerjinin Korunumu Prensibi	3
Şekil 2.2 Viskoz ve Histeretik Sönüm Durumları İçin E_s ve E_d Değerleri	4
Şekil 2.3 Depolanan Enerjinin Artırılması Yaklaşımı	4
Şekil 2.4 Örnek Enerji Dağılım Grafiği	5
Şekil 2.5 Sönümlenen Enerjinin Artırılması Yaklaşımı.....	6
Şekil 2.6 Yapıya Gelen Enerjinin Azaltılması Yaklaşımı.....	6
Şekil 2.7 Hafifletme Yaklaşımında Karma Kullanım	7
Şekil 3.1 Süneklik Kavramının Şematik İfadesi	9
Şekil 3.2 Yer Hareketlerinin Yapıya İletimi	10
Şekil 3.3 Yapıda İvme ve Yerdeğiştirme Değerleri	10
Şekil 3.4 El Centro İvme ve Yerdeğiştirme Spektrumları	11
Şekil 4.1 Rijitlik Artışının Spektral İvmeye Etkisi	13
Şekil 4.2 Periyot Artışının Spektral İvmeye Etkisi	14
Şekil 5.1 Imperial Oteli	18
Şekil 5.2 The Foothill Communities Law and Justice Center.....	20
Şekil 5.3 The Salt Lake City and County Building.....	21
Şekil 5.4 The University Hospital of the University of Southern California.....	22
Şekil 5.5 San Fransisco City Hall	23
Şekil 5.6 Oakland City Hall	23
Şekil 5.7 Kobe Depremi Öncesi Japonya’da Sismik İzolasyon	25
Şekil 5.8 Kobe Depremi Sonrası Japonya’da Sismik İzolasyon	25
Şekil 5.9 The C-1 Building	27
Şekil 5.10 The William Clayton Building	28
Şekil 5.11 Wellington Police Station	29
Şekil 5.12 Yeni Zelanda Parlamento Binaları.....	30
Şekil 5.13 Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali	31
Şekil 5.14 USC University Hospital – Northridge 1994 Depremi Kat İvmeleri	32
Şekil 5.15 West Japan Computer Center – Kobe 1995 Depremi Kat İvmeleri.....	34
Şekil 6.1 Aktif Kontrol Sistemlerinin Çalışma Şeması.....	38
Şekil 7.1 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDRB)	42
Şekil 7.2 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet (HDNR).....	44
Şekil 7.3 Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet (LRB)	45
Şekil 7.4 Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet (LRB)	46
Şekil 7.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)	47
Şekil 7.6 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Hareket Mekanizmaları.....	47
Şekil 7.7 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Başlangıç ve Deplasman Konumları.....	49
Şekil 7.8 Esnek Sürtünmeli Sistemler (R-FBI)	51
Şekil 7.9 Electricite-de-France Sistemi (EDF).....	52
Şekil 7.10 Yay Sistemi Serbestlik Dereceleri	54
Şekil 7.11 Viskosönüm Detayı ve Viskosönümlü Yay Sistemi	54
Şekil 7.12 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler ve Kuvvet-Deformasyon Diyagramı	55

Şekil 7.13 Sürtünmeli Sönümleyiciler ve Kuvvet-Deformasyon Diyagramı	56
Şekil 7.14 Viskoelastik Sönümleyiciler ve Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı	56
Şekil 7.15 Viskoz Sönümleyiciler ve Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı	57
Şekil 7.16 Ayarlı Kütle Sönümleyici Tipleri	57
Şekil 7.17 Ayarlı Kütle Sönümleyici Uygulama Fotoğrafı.....	58
Şekil 7.18 Ayarlı Sıvı Sönümleyici.....	58
Şekil 8.1 Aktif Kiriş Kontrolü.....	59
Şekil 8.2 Aktif Kütle Sönümleyicisi	60
Şekil 8.3 Kütlelerin İvmelendirilmesiyle Oluşan Kuvvet Çiftleri	61
Şekil 8.4 Aktif Rijitlik Değiştirici	62
Şekil 8.5 Karma Kütle Sönümleyici (HMD).....	66
Şekil 9.1 Nlink Elemanı İçin Tanımlanan Deformasyon Şekilleri	71
Şekil 9.2 Nlink Elemanı İçin Tanımlanan Altı Serbestlik Dereceli Yay Elemanı	71
Şekil 9.3 Nlink Elemanında İç Kuvvet ve Momentler.....	72
Şekil 9.4 Rubber Isolator Elemanının Çift Eksenli Kayma Davranışı.....	73
Şekil 9.5 İki Eksenli İzolatörlerin Modelleme Parametreleri.....	74
Şekil 9.6 Rubber Isolator Elemanının Modelleme Parametreleri	74
Şekil 9.7 Sliding Isolator Elemanının Sürtünmeli Sarkaç Kayma Davranışı.....	75
Şekil 9.8 Sliding Isolator Elemanının Modelleme Parametreleri.....	75
Şekil 9.9 Damper Elemanının Modelleme Parametreleri	76
Şekil 11.1 UBC-97 Burulma Parametrelerinin Şematik Gösterimi	88
Şekil 13.1 Uygulama I - Kat Planı	104
Şekil 13.2 Yapı Perspektif Görünümü	105
Şekil 13.3 Kocaeli Depremi Kuzey-Güney Bileşeni.....	107
Şekil 13.4 Kocaeli Depremi Doğu-Batı Bileşeni	107
Şekil 13.5 Kocaeli Depremi Kuzey-Güney Bileşeni İvme Spektrumu (m/sn^2)	108
Şekil 13.6 Kocaeli Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Spektrumu (m/sn^2)	108
Şekil 13.7 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod).....	109
Şekil 13.8 Sismik İzolatör Elemanlarının Tanımlanması	110
Şekil 13.9 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod).....	111
Şekil 13.10 Kauçuk Mesnet Histeresis Eğrisi (X ve Yönü).....	112
Şekil 13.11 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod).....	113
Şekil 13.12 Sismik İzolatör Elemanlarının Tanımlanması	114
Şekil 13.13 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod).....	115
Şekil 13.14 Kauçuk Mesnet Histeresis Eğrisi (X ve Yönü).....	116
Şekil 13.15 Viskoz Sönümleyicilerin Yerleşimi.....	116
Şekil 13.16 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod).....	117
Şekil 13.17 Sönümleyici Histeresis Eğrisi	118
Şekil 13.18 Maksimum Taban Kesme Kuvvetleri – X ve Y Yönü.....	118
Şekil 13.19 Orta Kolon Maksimum Kesme Kuvvetleri – X ve Y Yönü	119
Şekil 13.20 Orta Kolon Maksimum Mutlak Kat İvmeleri – X ve Y Yönü.....	120
Şekil 13.21 Orta Kolon Maksimum Göreli Kat Deplasmanları – X ve Y Yönü	121
Şekil 14.1 Uygulama II - Kat Planı ve Perspektif Görünüşü	125
Şekil 14.2 UBC-97 Fay Tipi, N_a ve N_v Parametreleri.....	126
Şekil 14.3 Statik Yükler Altında Taban Kuvvetleri	129
Şekil 14.4 UBC-97 Burulma Parametrelerinin Şematik Gösterimi	132
Şekil 14.5 UBC-97 Eşdeğer Statik Kat Kesme Kuvvetleri.....	136
Şekil 14.6 Ritz Vektörleri 1. Mod Şekli.....	137
Şekil 14.7 UBC-97 İvme Spektrumu	137
Şekil 14.8 SAP2000’de UBC-97 İvme Spektrumu.....	138

Şekil 14.9 SAP2000’de Karşılık Spektrumu Analiz Parametreleri	139
Şekil 14.10 SAP2000’de Lineer Time History Analiz Parametreleri	140
Şekil 14.11 Bi-lineer Modelleme Parametreleri.....	141
Şekil 14.12 LRB İzolatörlerin Nonlinear Modelleme Parametreleri	142
Şekil 14.13 Taban Kesme Kuvvetleri	143
Şekil 14.14 Orta Kolondaki Kesme Kuvvetleri	143
Şekil 14.15 Mutlak Kat Deplasmanları.....	144
Şekil 14.16 Göreli Kat Deplasmanları	144

DEPREME DAYANIKLI YAPI TASARIMINDA SİSMİK İZOLASYON VE ENERJİ SÖNÜMLEYİCİ SİSTEMLER

ÖZET

Sismik izolasyon, deprem etkilerine karşı koymak konusunda geleneksel tasarım yöntemine yeni bir alternatiftir. Sismik izolasyonun dayandığı temel düşünce, yapıların doğal periyodunu, rezonans tehlikesi bulunan aralıktan uzaklaşacak şekilde değiştirerek, deprem nedeniyle oluşan eylemsizlik kuvvetlerini azaltmak ve deplasman ve enerji sönmüleme talebini bu amaç için tasarlanmış olan sismik izolasyon ve enerji sönmüleyici cihazlar üzerinde yoğunlaştırarak karşılamaktır. Bölüm 1'deki kısa girişten sonra, Bölüm 2'de depreme dayanıklı yapı tasarımında enerji yaklaşımı anlatılmıştır. Konuyu uygun bir zeminde ele almak ve sismik izolasyonun potansiyeline dikkat çekmek amacıyla, Bölüm 3'de mevcut geleneksel depreme dayanıklı yapı tasarımı anlayışı ile dezavantaj ve kısıtlamalarından bahsedilmiştir. Bölüm 4'te ise sismik izolasyon yaklaşımı ve avantajları anlatılmaktadır. Sismik izolasyonun geçmişi ve dünyadaki bazı uygulamalar Bölüm 5'te verilmektedir. Bölüm 6'da sismik koruma tekniklerine genel bir bakış anlatılırken, Bölüm 7'de pasif, Bölüm 8'de aktif koruma tekniklerine değinilmiştir. Bölüm 9, SAP2000 programında sismik izolatörlerin modellenmesini açıklamaktadır. Bölüm 10'da sismik izolasyon yönetmeliklerinin dünyadaki gelişimi anlatıldıktan sonra, Bölüm 11'de Amerikan UBC-97'de sismik izolasyona ilişkin hususlar ayrıntılı şekilde açıklanmıştır. Sismik izolasyonun potansiyeli ve geleceği hakkındaki yargılar Bölüm 12'de sunulmuştur. Son olarak Bölüm 13'de, sayısal örnek olarak, altı katlı bir yapı, beş farklı sismik koruma alternatifiyle analiz edilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonuçlar da göstermiştir ki, sismik izolasyon ve enerji sönmüleme sistemleri, günümüz yapı tasarımı mühendislerinin elindeki en etkili araçlardan biridir.

SEISMIC ISOLATION AND ENERGY DISSIPATING SYSTEMS IN EARTHQUAKE RESISTANT STRUCTURAL DESIGN

SUMMARY

Seismic isolation is an alternative to conventional design method for dealing with earthquake loadings. The basic idea of seismic isolation is based on reduction of the earthquake induced inertia loads by shifting the fundamental period of the structure out of dangerous resonance range, and concentration of the deformation and energy dissipation demands at the isolation and energy dissipation systems, which are design for this purpose. After a brief introduction in Chapter 1, the energy approach to the earthquake resistant structural design is described in Chapter 2. To place the discussion in its appropriate context and to highlight the potential of seismic isolation, current conventional earthquake resistance design philosophy and its disadvantages and limitations are discussed in Chapter 3. Chapter 4 describes the seismic isolation approach and its advantages. History of seismic isolation and some applications in the world are discussed in Chapter 5. In Chapter 6 a general look at the earthquake protection techniques, in Chapter 7 passive, and in Chapter 8 active protection techniques are given. Chapter 9 describes modeling seismic isolators in SAP2000 software. After development of seismic isolation regulations in the world is discussed in Chapter 10, seismic isolation issues in UBC-97 are explained in detail in Chapter 11. An assessment of the potential and future of seismic isolation is presented in Chapter 12. Finally, as a numerical example, a six story structure analyzed with five different seismic protection alternatives and results are discussed in Chapter 13. Results show that, seismic isolation and energy dissipation systems are the most efficient tools in the hands of structural design engineers.

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı, son yıllarda depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni bir alternatif olarak ortaya çıkan sismik izolasyon ve enerji sönümleme yaklaşımının, temel çıkış noktasından başlayarak çeşitli açılardan incelenmesidir. Tez kapsamında, sismik izolasyon ve enerji sönümlemenin teorik temelleri, mevcut uygulamalar, genel sismik koruma teknikleri içindeki yeri, dünyada çeşitli yönetmeliklerde edildiği yer ve geleceği konusunda tahminler yer almaktadır. Ayrıca örnek bir bina tipi yapının bu yeni metoda dayalı çeşitli alternatiflerle çözümü ve bazı kriterler çerçevesinde incelenmesi de tez çalışmasına dahil edilmiştir.

1.2. Çalışmanın Yöntemi

Bu çalışmada, deprem koruma tekniklerine genel bir bakışı da içermekle birlikte, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler üzerine odaklanan bir inceleme yöntemi benimsenmiştir. Bölüm 13'teki uygulama örneğinde, 6 katlı bir yapının çeşitli sismik izolasyon ve enerji sönümleme alternatiflerine dayanılarak, SAP2000 programı ile 3 boyutlu, zaman tanım alanında nonlineer analizi yapılmış ve sonuçlar irdelenmiştir. Bölüm 14'teki uygulama örneğinde ise 2 katlı ve sismik izolatörlü bir yapının çeşitli çözüm alternatifleriyle analiz edilerek sonuçların karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

1.3. Giriş

Mühendisler ve mimarlar 100 yılı aşkın bir zamandır binaların yer hareketlerine verdiği tepkileri azaltmanın uygulanabilir metotlarını bulmak için çalışmalar yapmaktadır. Sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler, yapıların depreme dayanıklılığını artırmak için uygulanabilen tasarım stratejilerinden bazılarıdır. Aktif kontrol ve karma sistemler gibi diğer sismik koruma sistemleri de sürekli gelişmekte ve yakın gelecekte çok daha uygun pratik sonuçlar sunacakları öngörülmektedir.

Yapıyı zemin etkilerinden izole etme anlayışı ancak son birkaç onyılıda gelişmiştir. Sismik izolasyon basit anlatımıyla; üstyapıyı zeminden ayırarak deprem gibi etkilere vereceği tepkilerin azaltılması işlemidir. Bu şekilde zeminden izole edilen yapının periyodu ve sönüm oranı artar. Bu da yapıya gelen deprem kuvvetlerinin azalmasını sağlar. Sönüm oranının artması çoğu izolatörler için doğal bir özellik olup istenirse yapıya ek olarak enerji sönümleyici cihazlar da yerleştirilebilir. Normal koşullarda izolatör üstyapının kat yer değiştirmelerini sabit temelli sisteme oranla minimum iki kat azaltır. Yapıda ivmeler de belirgin ölçüde azalacaktır. İvmelerdeki bu azalma, yapısal olmayan bazı bileşenleri ivme sebepli hasarlardan korurken, kat yer değiştirmelerindeki azalma hem yapısal hem de yapısal olmayan bileşenlerin depremi hasarsız ya da az hasarlı olarak atlatmasına imkan verecektir.

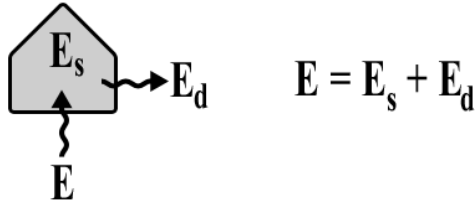
Pasif enerji sönümleyici sistemler yapının sönüm oranını, bazen de rijitliğini, artırır. Viskoz sıvı sönümleyiciler, viskoelastik materyaller, sürtünmeli cihazlar gibi çeşitleri vardır. Enerji sönümleyici sistemler, yapılardaki deprem etkisinden oluşacak enerjinin bir bölümünü yutar ve yapının bileşenlerinin depremden hasarsız ya da daha az hasarla çıkmasına olanak sağlar.

Aktif kontrol sistemleri sensörler yardımıyla yapı hareketini hisseder ve buna karşı koyar. Bu karşı koyma, istenen bölgelerde yapay ilave kuvvetler meydana getirerek ya da aktif elemanların yapısal özelliklerini değiştirerek gerçekleşir. Bundan başka bazı özel sismik sistemler de vardır ve hiç şüphesiz gelecekte yenileri de geliştirilecektir.

İzolasyon ya da enerji sönümleyiciler gibi özel sismik sistemler yapının tasarımı aşamasında değerlendirilmeli ve gerekli görülürse yapı için öngörülen hedeflere uygun olarak seçilmelidir. Eğer yapı için bu sismik sistemlerden birinin uygulanması uygun ve doğru bulunursa, tasarım depremine maruz kalan yapıda istenecek performans derecesine göre yapılır. Deprem talebi ve beklenecek performans arttıkça sismik sistemlerin uygulanması daha cazip ve fizibil hale gelir.

2. SİSMİK TASARIMDA ENERJİ YAKLAŞIMI

Mühendisler için depreme dayanıklı yapı tasarımı denince genellikle akla gelen ilk iki şey kuvvetler ve yerdeğıştirmeler olmaktadır. Ne var ki, deprem aslında enerji kökenli bir fenomen olduğundan, enerji kavramı düşünülmesi gereken çok daha temel bir olgudur. Yapıda deprem etkisiyle oluşan kuvvetlerin de yerdeğıştirmelerin de kökeninde depremin enerjisi vardır. Kuvvet ve yerdeğıştirme, bu enerjinin bir sonucu olarak ortaya çıkar [8].



Şekil 2.1 Enerjinin Korunumu Prensibi

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi enerjinin korunumu prensibine göre, depremin enerjisi (E); yapının bünyesinde depolanan (stored) enerji (E_s) ile sönmölenen (dissipated) enerjinin (E_d) toplamı olmak zorundadır. Burada ;

E : Yapıya gelen toplam deprem enerjisidir. Başka bir ifadeyle yapının temelinde oluşan tersinir kesme kuvvetinin yaptığı toplam iştir.

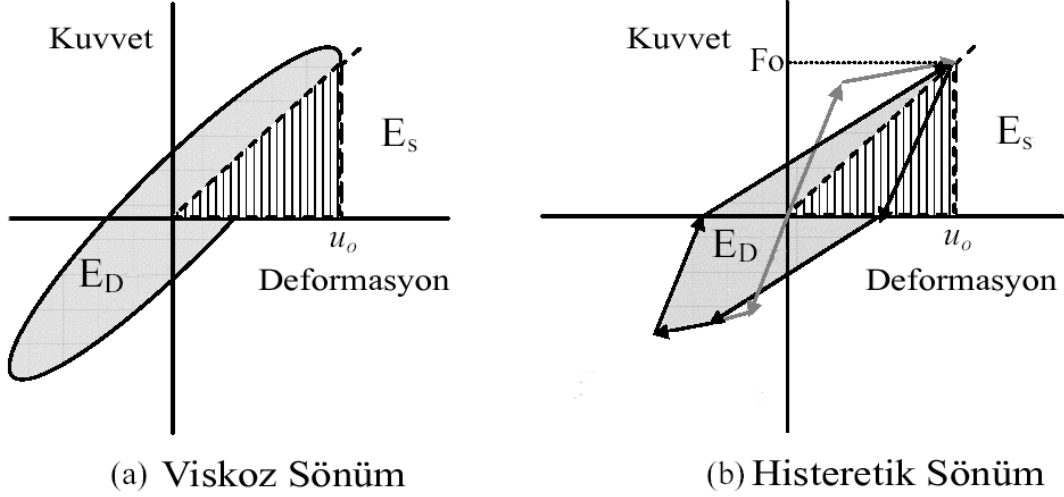
E_s : Yapının elastik sınırlar içinde kendi bünyesinde depoladığı enerji miktarıdır. Yapı bu depolamayı, yaptığı salınım hareketi esnasında deprem enerjisini kinetik enerjiye (E_k) ve elastik gerilme enerjisine (E_e) dönüştürerek yapar.

$$E_s = E_k + E_e \quad (2.1)$$

E_d : Yapı tarafından sönmölenen enerji miktarıdır ve viskoz sönmö (E_v) ve histeretik sönmö (E_h) olmak üzere iki bileşeni vardır. Yapıların viskoz sönmöü aslında; moleküller arası sürtünmeden oluşan ısı, taşıyıcı olmayan elemanların katkısı, havanın viskozitesi gibi birçok karmaşık mekanizmayı ifade etmek için yapılan bir indirgemedir [9]. Histeretik sönmö ise yapıda; plastik mafsallar, çatlaklar,

ezilmeler, eğilmeler, donatının akması, özetle “hasar” ile elde edilen sönümün ifadesidir [7].

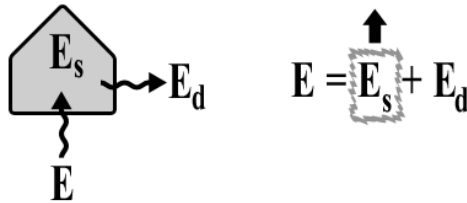
$$E_d = E_v + E_h \quad (2.2)$$



Şekil 2.2 Viskoz ve Histeretik Sönüm Durumları İçin E_s ve E_d Değerleri

2.1. Geleneksel Yaklaşım: Karşı Koyma

Yapılar, elemanları deprem esnasında (ki aynı elastik limitler içinde kaldığı önceden varsayılır) hasar görmeyecek şekilde güçlendirilerek dizayn edilirse , sadece E_e ve E_k terimlerine başvurmayı gerektirir. Yani geleneksel yaklaşımda depreme karşı koymanın yolu E_s 'yi artırmaktan geçer (Şekil 2.3). Enerji, yapının belirli birleşim bölgelerinde yoğunlaşan deformasyonlarla karşılanacağı için özellikle bu bölgelerde dayanım artırılır.



Şekil 2.3 Depolanan Enerjinin Artırılması Yaklaşımı

$$E = E_e + E_k \quad (2.3)$$

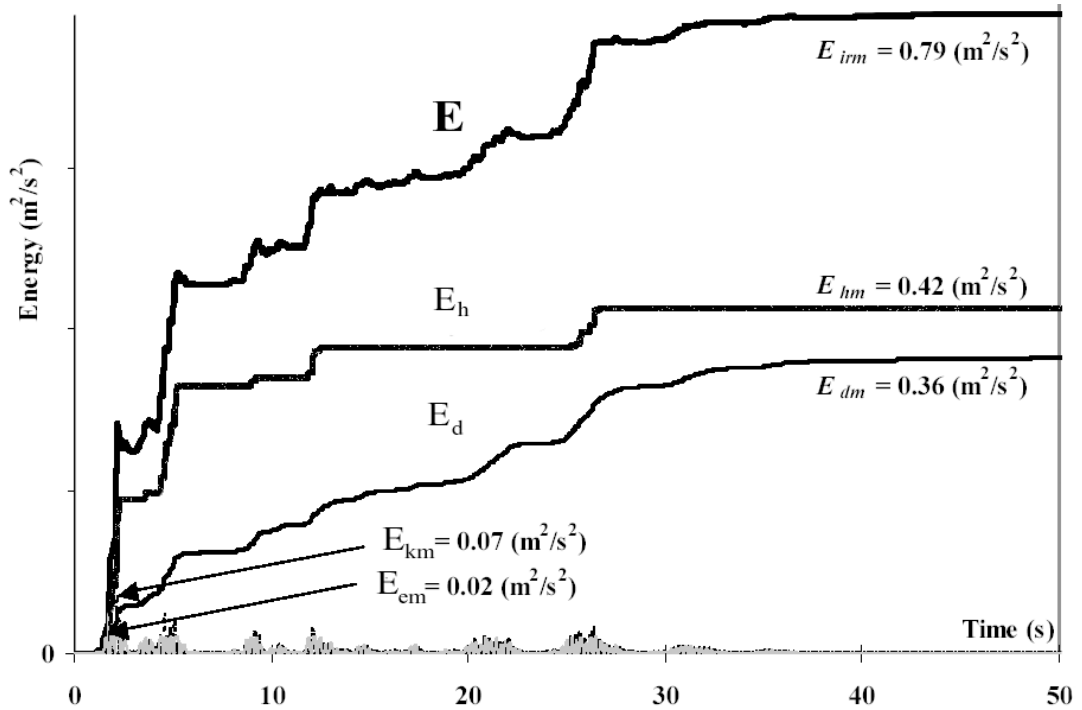
Ancak unutulmamalıdır ki elastik sınırlar içinde kalsa dahi tüm yapılar viskoz tipi (yaklaşık olarak çelik yapılar için $\xi = 0,02$, betonarme yapılar için $\xi = 0,05$ olarak varsayılan) bir sönümlenme kapasitesine sahiptir ve dolayısıyla E_v de gündeme gelir.

$$E = E_e + E_k + E_v \quad (2.4)$$

Ancak yukarıdaki yaklaşım çoğu zaman yanılsama gösterir ve sismik koruma sadece düşük dereceli depremlerde sağlanabilir. Deprem ile gelen enerji yapının elastik sınırını aştığında yapı elemanları tipik olarak eğilir veya kırılır. Diğer bir deyişle, bu gibi durumlarda , enerji denge denklemindeki üçüncü terim olan E_h gündeme gelir.

$$E = E_e + E_k + E_v + E_h \quad (2.5)$$

Şekil 2.4'te El Centro depremi etkisinde incelenen %5 sönümlü tipik bir örnek yapının enerji dağılım grafiği görülmektedir. E_k ve E_e 'nin, daha depremin ilk saniyelerinde maksimum değerine ulaştığı ve E_h değerinin dağılımda birinci rolü oynadığı görülmektedir [6].



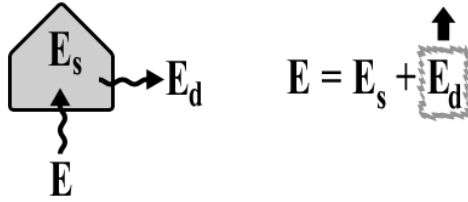
Şekil 2.4 Örnek Enerji Dağılım Grafiği

Maalesef günümüzde bile yapılar halen E_h terimi kullanılarak dizayn edilmekte ve sonuç olarak yapısal elemanların deformasyonu elastik sınırlarını aşarak sünekliliğe başvuracağı gerçeği kabul edilmektedir [8]. Aslında elastik sınırlar ötesindeki

deformasyonları kabul etmek, kalıcı yapısal hasara neden olan sönümleme mekanizmasına başvurmak demektir. Bu da deprem ertesi yapının geçici olarak servis dışı kalmasına sebep olacak yüksek maliyetli yenileme sonucunu kabul etmek anlamına gelir. Bunun bir diğer dezavantajı da tasarım deprem girdisini aşan depremlerde yapının topyekün göçmesi riskidir. Deprem enerjisinin taşıyıcı elemanlarda hasar ile karşılanması anlayışı, gelişen teknolojiyle birlikte artık akılcı bir yaklaşım olmaktan çıkmaya başlamıştır.

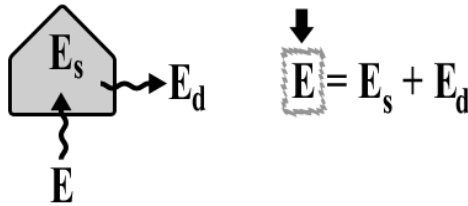
2.2. Yeni Yaklaşım: Hafifletme

Hasarı azaltmak için E_h değerini azaltmak gerektiği açıktır. Yapıların kısıtlı da olsa bir viskoz sönüm kapasitesine sahip olduklarından yukarıda bahsedildi. Enerji denkleminin sağlanması için yapının enerji depolama kapasitesi (E_s) kadar sönümlenen enerji miktarının (E_d) artırılması da mümkündür. Yapıda uygun yerlere yerleştirilecek enerji sönümleyiciler E_v değerini artırmakta, böylece sönüm için hasar mekanizmasını kullanan E_h 'ye ihtiyaç azalmakta veya tamamen ortadan kalkmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Sönümlenen Enerjinin Artırılması Yaklaşımı

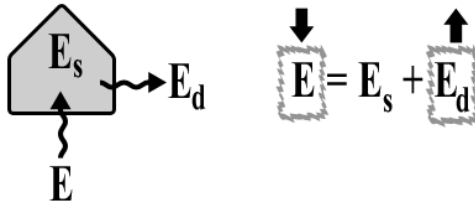
E_e , E_k , E_h ve E_v terimlerini kullanmanın yanı sıra denklemi sağlamanın diğer bir yolunun da yapıya gelen deprem enerjisinin (E) azaltılması olduğu görülmektedir. Bunun için, yaptığı yatay yerdeğiştirme ile deprem etkilerinin yapıya hafifletilerek iletilmesini sağlayan sismik izolasyon sistemleri kullanılmaktadır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Yapıya Gelen Enerjinin Azaltılması Yaklaşımı

Sismik izolasyon sistemleri, aynı zamanda sönüm artırıcı mekanizmalara da sahiptirler fakat sağladıkları sönüm yeteneği arttıkça maliyetleri de büyük miktarda artmaktadır. Maliyet kabullenilse bile yüksek sönüm değerlerine ulaşmaları zordur [21].

Yukarıdakileri dikkate alarak, şu sonuca varılmaktadır ki, en rasyonel yaklaşım enerji denge denklemindeki tüm terimlere başvurularak yapılabilir. Yani, sismik izolasyon ve enerji sönümleme pratikte en uygun olacak şekilde birleştirilmelidir (Şekil 2.7). Bu da isteğimiz doğrultusunda, yapının sismik tepkisini kontrol edebilmek ve istenen koruma derecesini garanti edebilmek demektir .



Şekil 2.7 Hafifletme Yaklaşımında Karma Kullanım

Sismik izolasyon ve enerji sönümleme, hem yapısal elemanlar arasındaki yük transferini hem de rölatif deplasmanları istenilen değerlerle sınırlayan, deprem bölgelerindeki mühendislerin elindeki en etkili araçtır [8].

3. GELENEKSEL TASARIM ANLAYIŞI

3.1. Geleneksel Tasarım Anlayışının Amacı ve Felsefesi

Sismik aktivitesi yüksek bölgelerde, geleneksel tasarım anlayışına göre, kabul edilebilir maliyetler ile, şiddetli depremlere hasarsız olarak karşı koyabilecek orta ve yüksek yapı yapmak neredeyse imkansızdır. Bu yüzden birçok şartnameye göre de beklenen, can kaybının ve topyekün göçmenin engellenmesi yönündedir. Bu anlayışa göre yapıda elastik ötesi davranışların bir sonucu olan hasar, depremin enerjisini sönümlemenin, göçme ihtimalini azaltmanın önemli bir yoludur ve bir tür sigorta veya emniyet valfi görevi görür. Bu tasarım yaklaşımı birçok ülkede birçok hayat kurtarmış olmakla birlikte, ağır hasarlı ve kullanılamaz durumda yüzlerce, hatta binlerce yapının ülke ekonomik ve sosyal hayatına getirdiği çok ağır sıkıntıları engelleyememiştir [24].

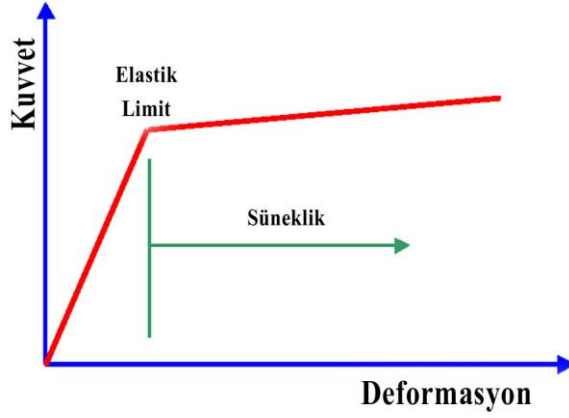
Yukarıda da belirtildiği üzere, aralarında Türkiye'nin de bulunduğu birçok ülkenin depreme dayanıklı yapı şartnamelerinde geleneksel tasarım anlayışının yola çıkış noktası özetle şudur:

- Hafif şiddetli depremlerde, yapıda hiç hasar meydana gelmemelidir.
- Orta şiddetli depremlerde, yapısal elemanlarda, hafif ve onarılabilir olmak kaydıyla hasar kabul edilebilir.
- Şiddetli depremlerde yapısal elemanlarda onarılamaz derecede ağır hasar meydana gelmesi kabul edilebilir. Bina kullanılamaz hale gelse de topyekün göçme olmamalıdır.

3.2. Geleneksel Tasarım Anlayışının Dezavantajları

Şiddetli depremlere dahi dayanabilecek bir yapı tasarlamak kolay ve ucuz değildir. Mühendisler bunun için kendilerine şartnamelerin verdiği izinle, “sünekliği” kullanırlar. Süneklik, yapının elastik davranışın ötesinde deformasyonları

karşılایabilme kapasitesinin bir ifadesidir. Elastik sınır aşıldığında, kuvvetteki ufak bir artış dahi büyük deformasyonlar yaratacaktır [24] (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Süneklik Kavramının Şematik İfadesi

Elastik limit, yükün etkisi yok olduğunda kalıcı deformasyon kalmayacak biçimde başlangıç durumuna geri dönülebilen sınır değeridir.

Süneklik bölgesine geçiş, yapısal elemanlarda hasar demektir. Bu da yapının yüklere dayanma kapasitesinde azalma olduğu anlamına gelir.

Depremi bir talebi (Demand) vardır ve ancak kapasitesi (Capacity) itibarıyla bu talebi karşılayabilen ve aşan yapılar ayakta kalabilir [10]. Depremi talebi değiştirilemediği için geleneksel tasarım yaklaşımında yapılar ;

KAPASİTE > TALEP olacak şekilde tasarlanır. Kapasiteyi artırmak için:

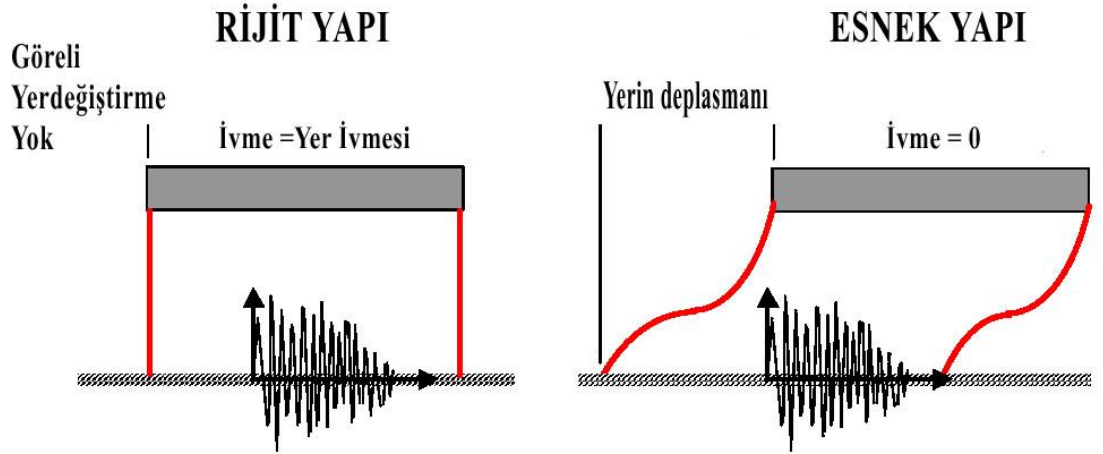
- Elastik dayanım artırılır. Bu hem zor, hem pahalı, hem de binalarda büyük kat ötelemelerine neden olan bir seçenektir.
- Elastik dayanım sınırlandırılır ve yapı süneklik için detaylandırılır. Bu seçim, yapısal elemanlarda onarılamayabilecek hasarlar oluşmasını kabul etmek anlamına gelir [24].

Alçak ve orta yükseklikteki binaların doğal periyotlarının, depremlerin hakim periyotlarıyla bulunduğu aralıkta oluşu rezonans problemleri yaratmaktadır. Meydana gelen rezonans etkisi, yer hareketlerinin yapıya olan etkilerinde ciddi artışlara ve büyük yapısal hasarlara neden olmaktadır.

Bunu teorik olarak şöyle açıklayabiliriz;

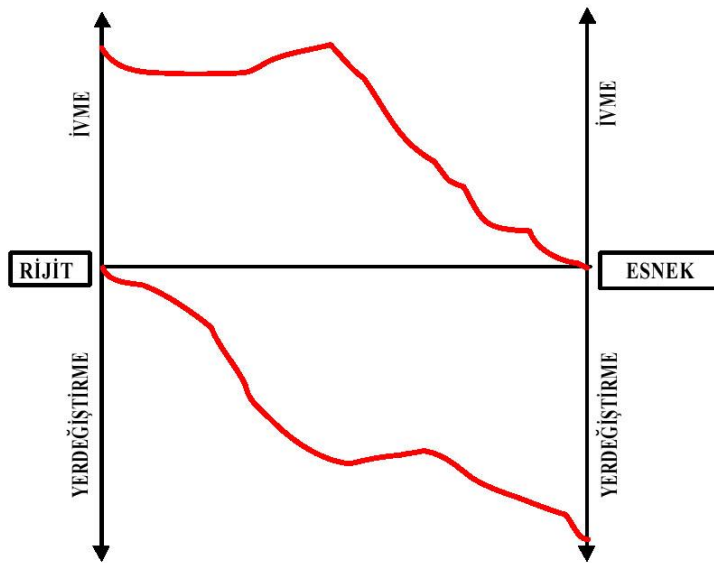
İdeal rijit bir yapının doğal periyodu sıfırdır. Bu da yapı, yer hareketine birebir yanıt verecek ve yapı ile yer arasında görelî bir ötelenme olmayacak demektir. Bu durumda yapı deprem ivmesine eşit bir ivmeyle hareket edecektir (Şekil 3.2).

Bunun tam tersi durum düşünülürse, ideal esnek bir yapının doğal periyodu sonsuzdur. Bu durumda yer hareket etse de yapı hareketsiz kalacak, yapı ile yer arasında yerin yaptığı deplasman kadar bir görelî yerdeğiştirme olacaktır. Yani, ivme sıfır, yerdeğiştirme maksimum olacaktır (Şekil 3.2).



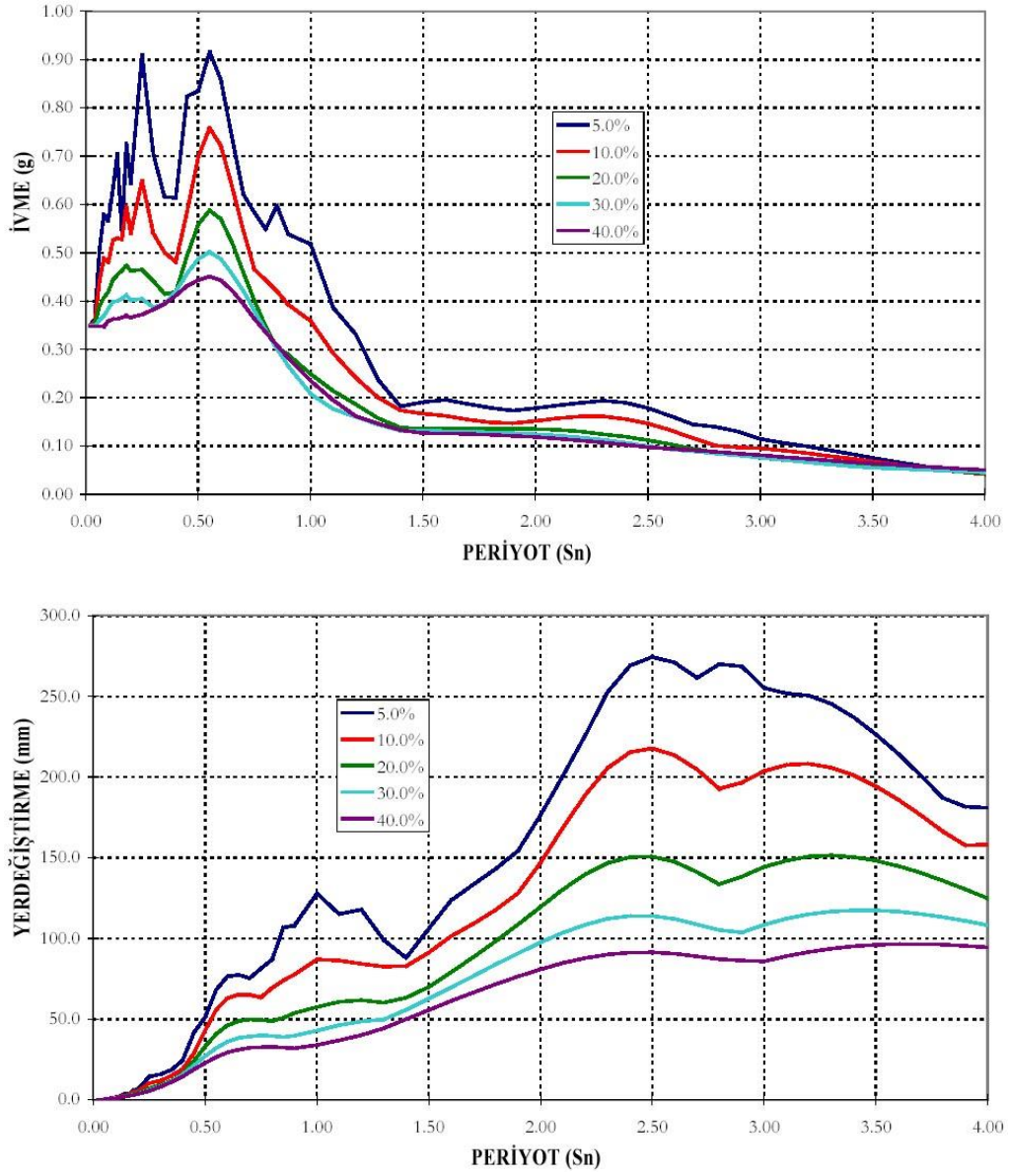
Şekil 3.2 Yer Hareketlerinin Yapıya İletimi

Gerçekte yapılar ne tam rijit, ne de tam esnektir. Yer hareketine verilen karşılık bu iki marjinal değer arasında bir yerde olacaktır [24] (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Yapıda İvme ve Yerdeğiştirme Değerleri

Şekil 3.4’de El Centro Depremine ait ivme ve yerdeğiştirme spektrumları görülmektedir.



Şekil 3.4 El Centro İvme ve Yerdeğiştirme Spektrumları

Görüldüğü gibi, küçük periyotlu rijit yapılar deprem hakim periyoduyla oluşan rezonansın getirdiği yükseltgenmenin de etkisiyle çoğu zaman yer hareketinin ivmesini aşan, büyük ivme değerlerine maruz kalırken, periyot arttıkça bu kez geleneksel yapı tasarım anlayışı ile karşılanması zor kat görelî yerdeğiştirmeleri ile karşılaşılır.

Şekil 3.4’te görülen önemli bir diğer husus da, sönümün hem ivmeleri hem de yerdeğiştirmeleri sınırlamada yaptığı olumlu katkıdır. Ne var ki klasik betonarme

yapılarda genellikle sönüm % 5 civarındadır. Şekilde en dışta görülen çizgiler sönümün bu değerine karşılık gelen ivme ve yerdeğiştirme değerlerini vermektedir. Daha yüksek sönüm oranlarına ulaşmak ancak ek sönümleme cihazları kullanmakla mümkün olacaktır. Hem periyodu, hem de sönümü artırmanın, istenen performansa ulaşmakta en akılcı yol olduğu görülmektedir [25].

3.3. Yeni Bir Tasarım Yaklaşımı İhtiyacı

Geleneksel tasarım anlayışı kullanılarak yukarıda bazıları sayılan olumsuzlukları yok etmek veya minimize etmek istenirse, yapım maliyetleri büyük oranda artacak veya mimari estetik ve kullanılabilirlik değerlerinden çok fazla ödün vermek gerekecektir. Yine de bu anlayış çerçevesinde şiddetli depremler etkisinde hiç hasar görmeyecek bir yapı inşa etmek makul ve mümkün değildir.

Son yıllarda meydana gelen depremlerin öğrettiği şeylerden biri de düşünülmesi gereken tek konunun can kayıplarının engellenmesi olmayışıdır. Geleneksel tasarım yöntemi, hasarlı binaların onarımı düşünüldüğünde çok maliyetli sonuçlar doğurabilmektedir. Deprem sonrasında fonksiyonelliğini devam ettirmesi gereken hayati önemli yapılar ile, tehlike arz edecek veya maddi, manevi, tarihi değeri büyük yapıların da korunması çok önemlidir. Deprem sonrası yaşanan sosyal ve psikolojik travmalar da düşünüldüğünde yeni ve alternatif bir depreme dayanıklı tasarım anlayışına ihtiyaç duyulduğu sonucuna varabiliriz [1].

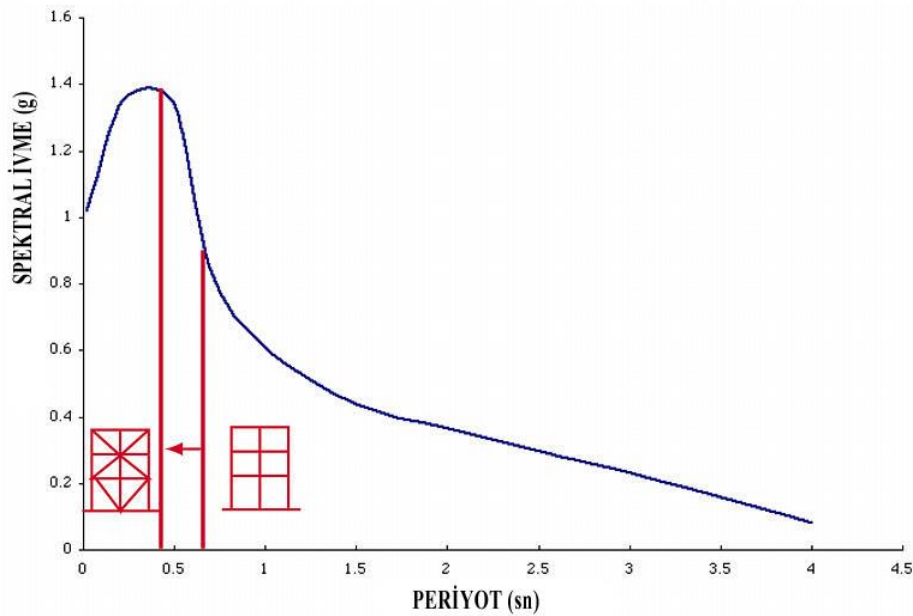
4. SİSMİK İZOLASYON ANLAYIŞI

Sismik izolasyon yapının depreme dayanma kapasitesini arttırmak yerine depremin binadan talebini azaltma esasına dayanan bir depreme dayanıklı yapı tasarım yaklaşımıdır.

Depreme karşı gösterdiği tepkiyi belirlemesi açısından, taşıyıcı sistemin en önemli özelliği doğal periyodudur. Doğal periyot, yapı kütlesine, yanal rijitliğine ve sönümlenmeye bağlıdır. Dikkat edilirse bu parametreler yapının doğal özellikleri olup, yüklerden bağımsızdır. Bundan dolayı, bu özellikler kullanılarak hesaplanan periyoda da “doğal periyot” adı verilir [5].

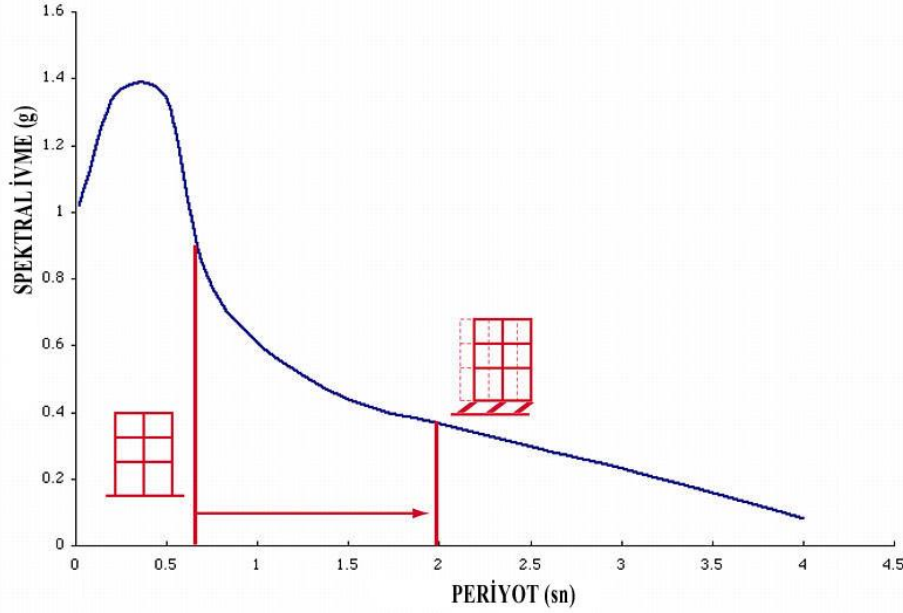
Sismik izolasyonun yapıda gerçekleştirdiği önemli şeylerden biri yapının doğal periyodunu artırarak depremin hakim periyoduyla çakışmasını, yani rezonans etkisiyle meydana gelecek ivme yükseltgenmelerini engellemektir.

Depremin rijit yapılardan ivme, esnek yapılardan ise büyük yerdeğiştirme talebi olduğuna daha önce değinilmişti (Şekil 3.2), (Şekil 3.3), (Şekil 3.4). Şekil 4.1’de yapıda rijitlik artınca deprem spektral ivmesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.1 Rijitlik Artışının Spektral İvmeye Etkisi

Sismik izolasyon kullanıldığında esnek davranışa doğru yaklaşan yapıda, periyodun artmasıyla büyük yerdeğiştirme talebi meydana gelecektir. Sismik izolatörlerin yaptığı iş, bu talebi yapıya iletmeksizin, büyük deformasyonlar yaparak kendi içlerinde karşılamaktır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Periyot Artışının Spektral İvmeye Etkisi

Sismik izolasyon genellikle yapı ile temel arasına yerleştirilen izolatörler şeklinde uygulandığı için yaygın olarak “Taban İzolasyonu” şeklinde anılsa da, temel harici (katlar ve çatı) bölgelerde de kullanıldığı için “Sismik İzolasyon” tanımı daha yerinde olacaktır.

Sismik izolatörlerin önemli bir diğer görevi de enerji sönümleyici cihaz görevi görerek, deprem enerjisini sönümlemektir. İzolasyon sistemleri için sönüm genellikle iki çeşittir.

- Histeretik sönüm (Yerdeğiştirmeye bağlı sönüm)
- Viskoz sönüm (Hıza bağlı sönüm)

Yapının doğal periyodunun artması; ivmede azalmaya ve yerdeğiştirmede artmaya yol açarken, sönümün artması hem ivmenin, hem de yerdeğiştirmenin azalmasına neden olur.¹

¹ Artan sönüm ile birlikte ivmelerdeki azalış; birinci mod etkisindeki taban kesme kuvveti sayesinde olur. Yani sönümdeki artış, yüksek modlarda ivme artışlarına sebep olabilir. Çok katlı yapılarda “Sönüm daima iyidir.” anlayışı her zaman geçerli olmayabilir.

Sismik izolasyon sistemi tüm bunları yaparken yerçekimi, rüzgar, sıcaklık etkileri, rötre ve sünme etkileri gibi kullanma yükleri altında yapı stabilitesini sağlayacak rijitliğe de sahip olmalıdır.

İdeal bir sismik izolasyon sisteminin dört temel görevi vardır :

- Yatayda düşük rijitlik
- Düşeyde yüksek rijitlik
- Sönüm
- Esneklik

Çevresel koşullara dayanım (durabilite), maliyet, montaj kolaylığı, projeye has spesifik ihtiyaçlar gibi faktörler de izolatör seçiminde önem arz etse de, tüm izolatörlerin sahip olması gereken öznelilikler yukarıdaki gibidir [8].

4.1. Sismik İzolasyonun Avantajları

4.1.1. Yapısal Avantajları

Sismik izolasyonun şüphesiz, en büyük avantajı yapı doğal periyodunu artırarak, yapıyı rezonans etkilerinden uzaklaştırmasıdır. Bölüm 2’de, deprem etkisinde esnek yapıların küçük ivmeler fakat büyük yerdeğiştirmelere, rijit yapıların ise küçük yerdeğiştirmeler fakat büyük ivmelere maruz olduğundan bahsedilmişti. Sismik izolasyon bu iki marjinal durumun da avantajlarından yararlanabilmemizi sağlar. Yapıda hem ivmeler büyük oranda azalacak, hem de kat görelî ötelemeleri azalacaktır. Kat görelî ötelemelerindeki düşüşün sebebi, yapı rijitliğinin izolatöre göre çok daha büyük olmasının yapıda yaratacağı rijit davranıştır. Kat deplasmanları azalacağı için yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda hasar minimize edilmiş hatta engellenmiş olur. İvmelerin azalışı, özellikle hassas veya değerli içeriğe sahip yapılarda önemlidir.

Sismik izolatörler uygun ve doğru yerleştirilirse, burulma etkilerine maruz kalabilecek yatayda düzensiz yapılarda, rijitlik merkezini yapı kütle merkezine yaklaştırabilir. Bu durum mimarlara, tasarım yaparken büyük esneklik ve kolaylık sağlayabilir.

Yapının sönüm yeteneğinin artması da sismik izolasyonun avantajlarından biridir. Geleneksel tasarım yaklaşımında enerji sönümleme mekanizması çoğunlukla yapı

taşıyıcı elemanlarının elastik ötesi deformasyonlar yapması üzerine kuruludur. Sismik izolasyonun kullanıldığı yapılarda ise tüm sönümleme, izolatörlerin bulunduğu seviyede toplanmıştır. Böylece hem tasarım aşamasında, hem de performans izlemeye kolaylık sağlar. Enerji sönümleme görevi direkt olarak yapının sünek davranış göstermesine bağlı olmadığı için yapının süneklik gereksinimi azalır.

Sismik izolasyonun güçlendirme yapılırken de avantajları vardır. Güçlendirme işlemi sırasında yapıda büyük değişiklikler yapmaya ve güçlendirme sürecinde yapıda fonksiyon kayıplarına gerek kalmaz. Tarihi yapıların güçlendirmesinde, yapının özgün niteliklerinin korunmasına en çok izin veren alternatif sismik izolasyon olmaktadır [1].

4.1.2. Ekonomik Getirileri

Bir projede sismik izolasyonun bir alternatif olarak düşünülmesiyle, ilk akla gelen konulardan biri de bu tekniğin maliyeti olmaktadır. Bu sorunun yanıtı her zaman çok basit değildir. Doğrudan ve dolaylı maliyetlerle birlikte, yine doğrudan ve dolaylı ekonomik getirileri birlikte değerlendirmek gerekir.

Her proje için geçerli olacak bir değerlendirme yapmak mümkün değildir. Sismik izolasyonun fizibil olup olmaması projenin özelliklerine bağlı olarak değişir. İzolatör kullanılması mutlaka ek maliyet getirecek, fakat sismik izolasyon uygulanan yapılarda deprem kuvvetleri büyük oranda azalacağından taşıyıcı sistem maliyetleri azalacaktır. Karar vermek için maliyetlerdeki bu artış ve azalış incelenmeli ve dolaylı maliyetler de hesaba katılmalıdır.

Dolaylı maliyetlerin en önemlisi, olası hasar maliyetidir. Finans uzmanlarının “Olası Maksimum Kayıp” (PML – Probable Maximum Loss) dedikleri bu maliyet, depremin düşük ihtimalli fakat büyük zarar veren bir olay olmasının gerektirdiği şekilde, olasılık parametreleri de göz önünde bulundurularak hesaplanır. Özellikle tarihi değeri veya kullanım değeri yüksek yapılarda ya da içinde değerli ve depremden zarar görebilecek materyal bulunduran yapılarda, hasar maliyetlerindeki bu azalma sismik izolasyonu ekonomik kılacak yönde olacaktır [2], [24].

4.1.3. Deprem Sonrası Hemen Kullanım

Konvansiyonel tasarım anlayışına göre tüm konstrüktif kurallara ve sismik gereklere uyulmuş da olsa yapısal olmayan elemanlarda büyük hasarlar, diğer elemanlarda

çatlaklar ve büyük yer değiştirmeler çoğu zaman kaçınılmazdır. Sismik izolasyon anlayışında ise eğilme deformasyonları, görelı kat ötelemeleri, çatlaklar ve plastik deformasyonlar önlenir ve yapısal ya da yapısal olmayan elemanlardaki hasar minimumda tutulmuş olur. Bu şekilde büyük ölçekli bir depremden sonra bile yapı derhal hizmet vermeye devam eder [2].

4.1.4. Tasarım ve Detaylandırmada Kolaylıklar

Konvansiyonel anlayışa göre tasarlanmış bir yapıda detayların zorluğu inşa süresinin artmasına neden olur ki bunun getireceği bir maliyet de olacaktır. Belki de çok daha önemlisi, işlevsellik üzerinde ciddi kısıtlamalara gitmek zorunda kalınabilir. Sismik izolasyonun kullanıldığı yapı rijit bir kütle gibi davranacağından proje ve detaylandırmada büyük kolaylık görülür. Basit matematik modeller bile davranışı sergilemekte yeterli olacaktır [2].

4.1.5. Deprem Güvenliğinin Garanti Edilmesi

Yer hareketi karakteristikleri, zemin koşulları, malzeme özellikleri, işçilik, matematik modellerin tutarlılığı gibi birçok faktör yapı davranışının beklenenden sapmasına sebep olur. Sismik izolasyon sayesinde yapı çok daha yüksek güvenliklı bir sismik davranış gösterir ve idealden sapmalar karşısında çok daha az duyarlı olur [2]. Bölüm 3.1’de geleneksel tasarım anlayışına ait performans hedefleri sıralanmıştı. Sismik izolasyonlu yapılarda ise performans hedefleri şu şekilde ortaya konmuştur :

- Hafif ve orta şiddetli depremlerde; yapısal elemanlarda, yapısal olmayan bileşenlerde veya bina içeriklerinde hasar olmaksızın direnç gösterebilmeli,
- Büyük şiddette deprem etkisinde; izolasyon sisteminde göçme yapısal elemanlarda kayda değer hasar, yapısal olmayan bileşenlerde büyük ölçüde hasar ve konfor fonksiyonlarında büyük karışıklık olmaksızın karşı koyabilmelidir.

4.1.6. Yapısal Olmayan Elemanlar İçin Güvenliğin Garanti Edilmesi

Sismik izolasyon kullanıldığında titreşimin doğal periyodu uzun periyot bölgesine doğru kayar. Bu da genellikle kısa periyot bölgesinde bulunan yapısal olmayan elemanların yükseltgenmiş bir etki ile karşılaşmalarını sağlayarak bu elemanların güvenliğini garanti eder [2]. Aynı zamanda değerli eşyalar, cihazlar ve depremde tehlike arz edebilecek bileşenlerin de güvenliğini artırır.

5. SİSMİK İZOLASYONUN GEÇMİŞİ

5.1. Geçmişten Notlar

5.1.1. Imperial Oteli – Tokyo

Sismik izolasyonun binalarda kullanımı için öncü isimlerden biri Amerikalı mimar Frank Lloyd Wright'tir. Wright'ın kendi tasarımı olan Imperial Oteli 1921'de Tokyo'da tamamlanmıştır. Bu otelin inşa edildiği bölgede yaklaşık 20 cm. kalınlığında iyi bir toprak zeminin hemen altında yumuşak çamur vardı. Wright'ın düşüncesi bu binayı yumuşak çamur üzerinde yüzdürerek sismik etkilerden yalıtmak şeklindeydi. Bunu, binayı yumuşak çamurun üst kısımlarına kadar uzanan kazıklarla bağlayarak gerçekleştirdi. 1923 Büyük Kanto depreminde etrafındaki birçok bina göçerken depremi az-orta hasarla atlatan bu tarihi yapı, 1968 yılında yıkılarak yerine bir kopyası Japonya Nagoya'daki Meiji Mura Müzesi'nde yeniden inşa edilmiştir [26].



Şekil 5.1 Imperial Oteli

5.1.2. Dr. Milne'nin Çalışmaları

Binaların altına sismik izolatör yerleştirme fikrinin öncülerinden biri de Prof. Dr. John Milne'dir. Sismolojinin önemli isimlerinden biri olan Milne, 1876 – 1895 yılları arasında Tokyo Üniversitesi Maden Mühendisliği çatısı altında çalışmalarını sürdürmüştür. Dr. Milne 25 cm çapında dökme demir bilyeler üzerine bir yapı inşa etmiştir. Hafif bir depremde tatmin edici sonuçlar elde etmesine rağmen, kuvvetli

rüzgarlar etkisinde stabilite problemleri ortaya çıkmıştır. Daha sonraki denemelerinde bilyelerin çapını 2.5 cm'ye düşürmüş ve hem deprem, hem de rüzgar yüklerine karşı çok daha kabul edilebilir sonuçlar elde etmiştir [2].

5.1.3. Dr. Calantarients'in Kayıcı Sistem Önerisi

Yalnızca kaymayı kullanan bir sistem; Johannes Avetican Calantarients adında, İngiltere'de yaşayan bir tıp doktoru tarafından, 1909 yılında önerilmiştir. Johannes, Santiago Sismoloji Hizmetleri Müdürlüğü'ne bir mektup yazarak, talktan bir tabaka yardımı ile yapıyı temelden ayırmayı önermiştir. Bina ile temeli arasında oluşabilecek büyük yerdeğiştirmeler pahasına da olsa, izolasyon sisteminin taban izolasyonlu binadaki ivmeleri azalttığını açık bir şekilde anlatmıştır [1], [3], [28].

5.1.4. Kauçuk Mesnet Blokları

Zemin titreşimlerinin yapıya iletilmemesi için bilyeler gibi dönen mesnetlerden sonra kauçuk mesnetler de denenmiştir. Bu denemelerin ilki 1969'da Makedonya'nın Skopje (Üsküp) kentinde bir ilkokul binasında gerçekleştirilmiştir. Üç katlı ve betonarme olan Pestalozzi Okulu'nun sismik izolasyonu İsviçreli mühendisler tarafından "Swiss Full Base Isolation" diye bilinen bir yöntemle yapılmıştır. Burada kullanılan doğal kauçuk bloklar günümüzün gelişmiş kauçuk mesnetlerinden oldukça farklıdır. Modern kauçuk mesnetlerde bulunan çelik katmanlara sahip değildirler. İzolatörlerin etrafına yerleştirilen cam köpüğü (foam-glass) blokları, rüzgar, trafik, hafif depremler gibi düşük yükler etkisinde yapının stabilitesini sağlarken, deprem yükleri belli eşik değerlerini aştığında kırılarak sistemi devreye sokarlar ve böylece bir nevi sismik sigorta davranışı sergilerler. Sistemin yatay ve düşey rijitliği yaklaşık olarak eşit olduğundan, deprem etkisinde yapı hem ileri-geri hem de yukarı-aşağı hareket edecektir. Bu mesnetler çelik katmanlı kauçuk mesnet teknolojisinin henüz gelişmediği zamanlarda kullanılmışlardır, bu yüzden tekrar kullanılmaları olasılığı hayli düşüktür. Üsküp'teki bu sistem halen mevcut olup zaman zaman incelemelere tabi tutulmaktadır [2].

5.2. Dünyada Sismik İzolasyon Uygulamaları

5.2.1. ABD’de Sismik İzolasyon Uygulamaları

Amerika’da binalarda gerçekleştirilen sismik izolasyon uygulamalarına bakıldığında, yeni yapılar ile güçlendirme uygulamalarının sayıca yaklaşık olarak birbirine yakın olduğu görülür. Köprülerde yapılan sismik izolasyon ise binalardakinin 4 katı mertebesinde. Bina tipi yapılarda bu sistemler genellikle önemli, değerli ve kritik yapılar ile güçlendirme uygulamalarında görülmektedir.

5.2.1.1. The Foothill Communities Law and Justice Center

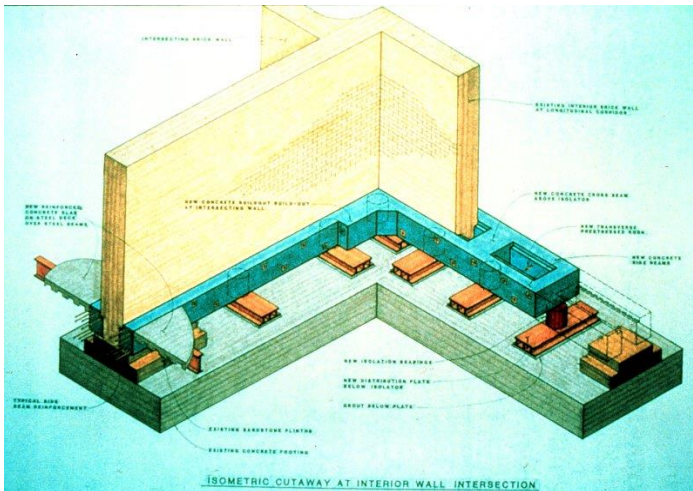
San Bernardino’daki “The Foothill Communities Law and Justice Center” binası Amerika’da sismik izolasyonun kullanıldığı ilk binadır. 98 adet yüksek sönümlü doğal kauçuk (HDNR) üzerine mesnetlenen bu çelik yapı aynı zamanda dünyadaki ilk yüksek sönümlü sismik izolatör uygulamasıdır. Yaklaşık maliyeti 30 milyon \$ olan bu yapı San Andreas fayından 21 km, şehir merkezi Los Angeles’ten yaklaşık 100 km mesafede, 15.800 m²’lik alana sahip, 4 kat, 1 bodrum ve izolatörlerin bulunduğu bir alt-bodrum katı olan bir binadır. Sismik izolasyon sisteminin yapacağı büyük yerdeğiştirme için, olası burulma deplasmanları da düşünülerek binanın köşelerinde 40 cm’lik derz bırakılmıştır. İnşaatına 1994 yılında başlanan ve yapımı 1 yıl süren bina 8.3 Richter şiddetindeki depreme dayanabilecek şekilde projelendirilmiştir [1], [2], [4].



Şekil 5.2 The Foothill Communities Law and Justice Center

5.2.1.2. The Salt Lake City and County Building

The Salt Lake City and County Building, sismik izolasyon sistemi uygulanmış ilk güçlendirme projesidir. 19. yüzyılın son çeyreğinde 40x80 m² alana, tuğla, taş ve



Sismik izolasyon, temel sistemi ile yapı arasına yerleştirilen 447 elastomer mesnet ve dış duvarların altına yerleştirilen kurşun çekirdekli mesnetlerle sağlanmıştır. Güçlendirme için çeşitli alternatifler düşünülmüş, şiddetli deprem etkisinde hasarı önlemekte en etkili ve en ekonomik yöntem olarak görülen sismik izolasyon seçilmiştir. Yapının doğal periyodu 0.5 sn. iken sistemin uygulanmasından sonra 2.5 sn. ye yükselmiştir. Bu değerın taban kesme kuvvetinde 1.5 kat mertebesinde bir azalmaya sebep olacağı hesaplanmıştır. Bilgisayar simulasyonlarına göre yapı 0.20 g yer ivmesine sahip depremde elastik davranabilecektir. Bu değere geleneksel güçlendirme yöntemleriyle ulaşılmasının imkansız olduğu görülmüştür. Proje, sismik

izolasyonun uygulandığı ilk güçlendirme projesi olmasına rağmen, öngörülen bütçe aşılmadan ve zamanında bitirilebilmiştir [27, s.222-224], [1].

5.2.1.3. The University Hospital of the University of Southern California

Dünyanın sismik izolasyonun uygulandığı, dünyanın ilk hastane binası, The USC University Hospital, Kaliforniya Üniversitesi Tıp Kampüsü içinde bulunan 8 katlı, 32.500m²'lik bir binadır. Sismik izolasyonu dış kolonlarda 68 adet kurşun çekirdekli, iç kolonlarda ise 81 kauçuk mesnetle sağlanan yapıda izolasyon seviyesinde 26 cm'lik deplasman derzi bırakılmıştır. 1991 yılında 8.2 Richter ölçeğindeki depreme dayanabilecek şekilde inşa edilen bina aynı zamanda Amerika'da şiddetli bir depreme maruz kalmış ilk sismik izolasyonlu yapı olması bakımından da önemlidir. 1994 Northridge depreminde yapının gösterdiği performans Bölüm 0'te gösterilmektedir [1], [4].



Şekil 5.4 The University Hospital of the University of Southern California

5.2.1.4. San Fransisco City Hall

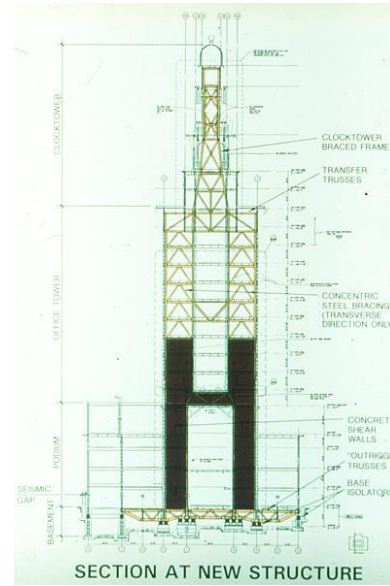
San Fransisco City Hall, dünyanın en büyük güçlendirme projesidir. 1912 yılında inşa edilmiş olan yapı 1989 Loma Prieta depreminde ciddi derecede hasar görmüştür. Projenin amacı, tarihi ve mimari değerlere zarar vermeden yapının sismik kapasitesini artırmaktır. 5 katlı, 90 m uzunluğundaki bu çelik yapının sismik izolasyonunda 500 elastomer mesnet kullanıldı [1].



Şekil 5.5 San Fransisco City Hall

5.2.1.5. Oakland City Hall

1914'te inşa edilen 18 katlı, 99 m yüksekliğinde, 15.000 m²'lik çelik taşıyıcı Oakland City Hall binası Birleşik Devletler'in ilk yüksek katlı binasıdır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Oakland City Hall

1989'da olan Loma Prieta depreminde hasar gördükten sonra, taşıyıcı duvarlar eklenerek ve sismik izolasyon kullanılarak güçlendirilmesi yapılan bina, o zaman için sismik izolasyonun uygulandığı en yüksek yapı idi. Bina 3 katlı bir taban, 10 katlı ofis kulesi ve 2 katlı saat kulesinden oluşmaktadır. Güçlendirme sırasında, 530 adet kurşun çekirdekli kauçuk mesnet kullanılmış, eklenen betonarme perde duvarlar

sayesinde yatay rijitliği artırılmıştır. Yeterli sismik derzi oluşturabilmek için yapı etrafına yeni bir istinat duvarı yapılmak zorunda kalınmıştır [1].

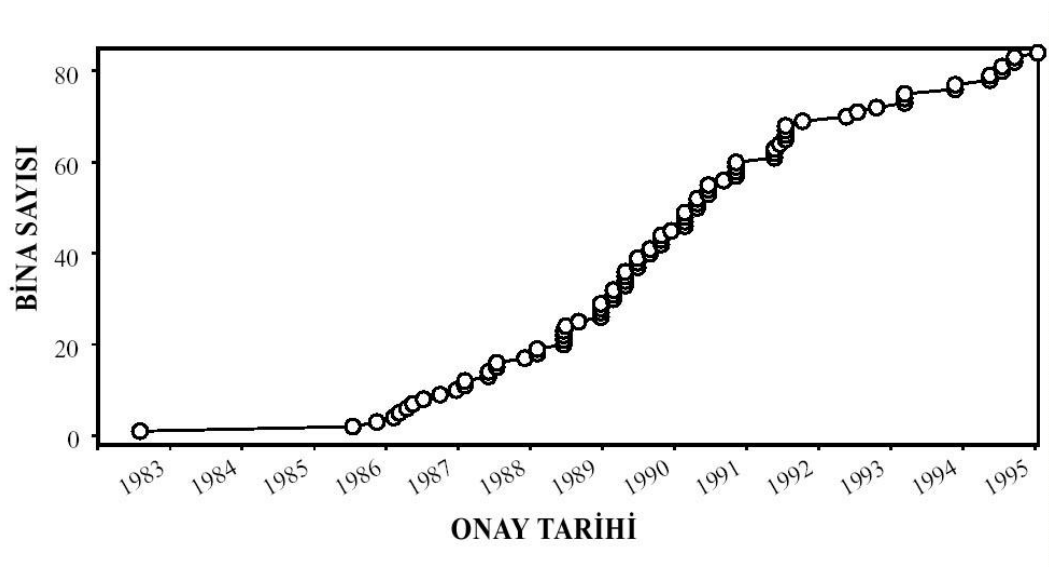
5.2.1.6. Los Angeles City Hall

Los Angeles City Hall 1926’da hiçbir depreme dayanıklı yapı şartnamesi olmaksızın inşa edilmiş, 32 katlı 82.000 m²’lik tarihi bir bina olup, bir çok deprem etkisinde ciddi hasarlar görmüştür. 1994 Northridge depreminin sonra, yapının korunması için sismik güçlendirme kararı alınmıştır. Sismik izolasyon, güçlendirme için düşünölen üç alternatiften biriydi. Geleneksel tasarım yaklaşımı ile hazırlanmış iki alternatifin de, dayanım ve rijitliği artırırken, deprem talebini de istenmeyecek şekilde artıracadı, sismik izolasyonun ise tam tersi bu talebi düşürme yönünde etkisi olacağı düşünöldü. Değerlendirme yapılırken üç alternatifte de kat görelili yerdeğiştirmeleri azalırken, sadece sismik izolasyonun aynı zamanda ivmelerin de azalmasını, dolayısıyla yapısal olmayan bileşenlere gelecek olası hasarların engellenmesini sağladığı için, seçim bu yönde kullanıldı.

Dünyanın sismik izolasyonlu en yüksek yapısı olan binada 1997’de başlanıp 4 yıl süren güçlendirme sırasında sismik izolasyon, 416 adet yüksek sönümlü mesnet (HDNR) ile sağlanmıştır. Aynı zamanda enerji sönümleme kapasitesini de artırmak için izolasyon katında 52 adet, kuleye yüksek modlar etkisinde sönüm kazandırmak için 24. ve 25. katlarda 20 adet viskoz damper kullanılmıştır. Güçlendirmenin maliyeti yaklaşık 150 milyon \$ olmuştur [1].

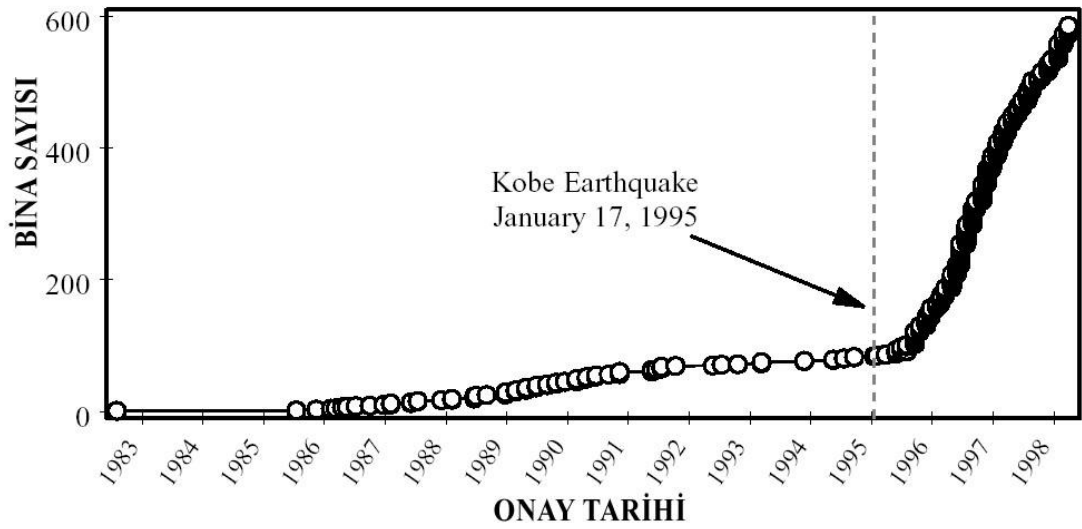
5.2.2. Japonya’da Sismik İzolasyon Uygulamaları

Japonya’da ilk sismik izolasyon uygulaması 1983 yılında inşa edilen 2 katlı betonarme bir konutun 6 tekil temelinin altına yerleştirilen 6 elastomer mesnet şeklinde olmuştur. Sismik izolasyonun uygulandığı ilk büyük yapı 1986 yılında inşa edilen 4 katlı betonarme binadır. şekil 5.7’de, 1983 yılından Kobe depreminin olduğu 1995 yılına kadar geçen 12 yıl içinde 85 sismik izolasyonlu binanın onay olarak, inşa edilmiş olduğu görölmektedir [22].



Şekil 5.7 Kobe Depremi Öncesi Japonya’da Sismik İzolasyon

17 Ocak 1995 Kobe depremi Japonya’daki sismik izolasyon uygulamalarında adeta bir patlama yaratmış, deprem öncesi 3 yılda toplam 15 onay verilmişken, deprem sonrasındaki 3 yılda bu sayı 450’ye fırlamıştır [22] (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Kobe Depremi Sonrası Japonya’da Sismik İzolasyon

Bugün sismik izolasyonun en çok kullanıldığı ülke tartışmasız Japonya’dır. Japonya’daki sismik izolasyon uygulanan yapıların çoğunu konutlar ve ofis binaları oluşturur. Japonya bu konuda, sismik izolasyonu genellikle kritik ve değerli içeriğe sahip binaların inşasında ve güçlendirmesinde benimseyen Amerika’ya göre farklılık gösterir. Japonlar deprem koruması için başlangıç maliyetlerindeki artışı

kabullenmek konusunda Amerikalılardan daha istekli bir görüntü vermektedir. Japonya’da sismik izolasyon için benimsenen tekniklerden en çok kullanılanı, ilave sönümleyicilerle desteklenen kurşun çekirdekli mesnetler (LRB) şeklinde olmuştur. Son birkaç yılda trendin yüksek sönümlü doğal kauçuk mesnetler (HDNR) yönünde kaydığı gözlenmektedir.

Japonya’da birçok sismik izole binaya deprem hareketlerini kaydeden cihazlar yerleştirilmiştir. Sismik izolasyon yaklaşımının pratikte performansının değerlendirilmesi için her önemli deprem sonrası bu kayıtlar incelenip, sabit temelli geleneksel yapılar ile karşılaştırılmaktadır. Özellikle büyük ivme değerlerine sahip depremler etkisinde sismik izolasyonun üstünlüğü daha çok göz önüne serilmektedir. Bu da bu uygulamaların giderek daha hızla yayılmasına neden olmaktadır.

5.2.2.1. The Computer Center of the Tohoku Electric Power Company

The Computer Center of the Tohoku Electric Power Company, Miyoki ilinde, Sendai’de bulunan 6 katlı ve içinde elektrik enerjisi üretimi için kullanılan birçok değerli ve kritik malzeme barındıran bir binadır. 1990 yılında tamamlandığında 10.000 m²’lik toplam alanıyla Japonya’nın en büyük sismik izolasyonlu binasıydı. Bina, çapları 90 cm ile 120 cm arasında değişen ve her biri 400 ile 800 ton arasında değişen düşey yük taşıyan 40 adet yüksek sönümlü izolatör (HDNR) üzerinde mesnetlenmiştir. Sismik izolasyonun yapıda uygulanışı ilk yapım maliyetini yaklaşık % 5 oranında artırmıştır. Montajı oldukça kolay olmuştur ve binanın inşası 1 yıl gibi kısa bir zamanda tamamlanmıştır [1].

5.2.2.2. The C-1 Building

1992 yılında tamamlandığında dünyanın en büyük sismik izolasyonlu binası olan C-1 Building 7 katlı bir bilgisayar merkezi binasıdır. Betonarme ve çelik kompozit taşıyıcı malzemeden 37.850 m² üzerine inşa edilmiş olan yapı, 41.4 m yüksekliğinde ve 62.800 ton ağırlığındadır. Bina çok pahalı ve duyarlı bir içeriğe sahip olup, tasarım yönteminin seçiminde etkili olan dominant faktör bu içeriğin korunmasıdır. Bina, çapları 110 cm ile 150 cm arasında değişen ve çekirdek çapları 18 – 20 cm olan toplam 68 dairesel kurşun çekirdekli izolatör üzerine mesnetlenmiştir. Bu izolatörlerden 150 cm çaplı olanlar dünyada kullanılan en büyük kurşun çekirdekli mesnetlerdir. İzolatörler 15x15 m aralıklı bir ızgara şeklinde yerleştirildikleri için büyük düşey yüklere maruzdurlar. Yapılan dinamik analiz, yapının doğal

periyodunun, yer ivmesinin büyüklüğüne bağlı olarak 1.4 ile 3.0 arasında değişeceğini göstermiştir [1].



Şekil 5.9 The C-1 Building

5.2.3. Yeni Zelanda’da Sismik İzolasyon Uygulamaları

Japonya ile birlikte Yeni Zelanda, sismik izolasyon olgusunun doğmasında öncü olmuşlardır. Yeni Zelanda’da sismik izolasyon kullanılarak yapı tasarlanması ilk kez 1929’da önerilmesine rağmen 1973’de yapılan bir köprü inşaatına kadar pratikte uygulaması görülmemiştir. İlk bina uygulaması ise 1981 yılında inşa edilen The William Clayton Building’dir. Yeni Zelanda’da en yaygın kullanılan sismik izolatör çeşidi kurşun çekirdekli (LRB) mesnetlerdir. Sismik izolasyon uygulamalarının hızla artışına bakıldığında, Yeni Zelanda’nın depreme dayanıklı yapı tasarımı konusundaki bu yenilikçi yaklaşıma pozitif yaklaştığı kolaylıkla söylenebilir [1].

5.2.3.1. The William Clayton Building

Wellington’da bulunan The William Clayton Building, Yeni Zelanda’nın sismik izolatörlü ilk binasıdır. Sağlık Bakanlığı merkez binası olarak kullanılan yapı aynı zamanda dünyada kurşun çekirdekli kauçuk mesnetin (LRB) ilk uygulandığı yapı olmasıyla da önemlidir. 97x40 m alanda 80 adet LRB üzerine mesnetlenen 4 katlı betonarme yapıda 60x60 cm kare kesitli, 20,7 cm yüksekliğinde, çekirdek çapı 10,5 cm olan mesnetler kullanılmıştır (Şekil 5.10). Her bir izolatör üzerine gelen düşey yük 1 MN ile 2 MN arasında değişmektedir. İzolatörlerin 15 cm yatay deplasman yapmasına izin verecek şekilde yapı etrafında deprem boşluğu bırakılmıştır. Uygulanan kuvvetlere ve karşı gelen yerdeğiştirmelere göre yapının doğal periyodu 0,8 ile 2,0 sn arasında olup, akma seviyesi yapı ağırlığının %7’si mertebesindedir. O zamanlar sismik izolasyondaki tecrübenin az olması ve yapının Wellington fayına

yakın olması göz önünde bulundurularak, tasarım aşamasında oldukça muhafazakar davranılmıştır [1].



Şekil 5.10 The William Clayton Building

5.2.3.2. Wellington Police Station

38 x 31 m alana kurulu, 10 katlı olan bu betonarme yapı, büyük bir depremde fonksiyonlarını yitirmeden operasyona devam edebilmesi düşüncesiyle sismik izolasyon kullanılarak inşa edilmiştir. Tasarım aşamasında üç farklı tasarım yaklaşımı alternatifi değerlendirildi ve yüksek deprem performansı ve toplam maliyette sağlayacağı %10'luk tasarruf düşünüldüğünde sismik izolasyonda karar kılınması zor olmadı. Diğer alternatifler, büyük kesitli taşıyıcı elemanlar, dolayısıyla büyük dayanım ve yerdeğiştirme kapasitelerine ihtiyaç duymaktaydı.

Yapının plan boyutları ve yüksekliği düşünüldüğünde kauçuk mesnetlerin kullanılamayacağı görüldü ve farklı bir sismik izolasyon projesi oluşturuldu. Yapının sismik izolasyonu geniş kılıflar içine yerleştirilmiş 12 m. lik uzun kazıklar ile sağlanmıştır. Kılıfların geniş tutulması, deprem hareketi sırasında yapının ihtiyaç duyacağı yaklaşık 15 cm yatay yerdeğiştirme boşluğunun yaratılmasını sağlamıştır. Bu şekilde yapının doğal periyodu 4 sn. mertebesinde olup, rüzgar yükleri etkisinde stabilite problemleri yarattığı için yapıda aynı zamanda kurşun sönümleyiciler kullanılarak doğal periyodun 2 sn. ye inmesi sağlanmıştır. Kullanılan kazıkların bir fonksiyonu da yaklaşık 15 m kalınlığındaki zayıf zemin katmanının altına, kaya zemine ulaşılmasını sağlamak olmuştur.

Aktif Wellington fayına sadece birkaç yüz metre uzaklıktaki binada sismik izolasyonun kullanımı sadece ilk yapım maliyetlerinde %10'luk bir tasarruf

sağlamakla kalmamış, şiddetli depremler etkisinde dahi, yapının operasyonel kalmasının da garantisini vermiştir [1].



Şekil 5.11 Wellington Police Station

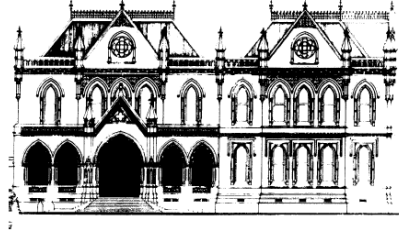
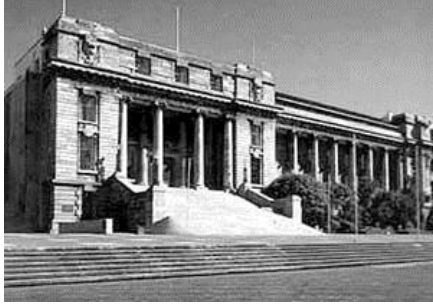
5.2.3.3. Yeni Zelanda Parlamento Binaları

Yeni Zelanda Parlamento Binası (1912) ve Parlamento Kütüphanesi (1898) binalarının güçlendirilmesi, 165 milyon \$'a varan maliyetiyle ülkede gerçekleştirilen en büyük güçlendirme projesi olmuştur. Yapıların tarihi ve mimari değerleri ile aktif Wellington fayına yakın olmaları düşünüldüğünde geleneksel tasarım anlayışına göre güçlendirme uygulamasından yaklaşık %3 daha maliyetli olmasına rağmen güçlendirmede sismik izolasyonun kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kararın verilmesinde hem sağlayacağı yüksek depreme dayanıklılık performansı, hem de mevcut değerli içeriğe en az zarar vererek uygulanacak olması etkili olmuştur.

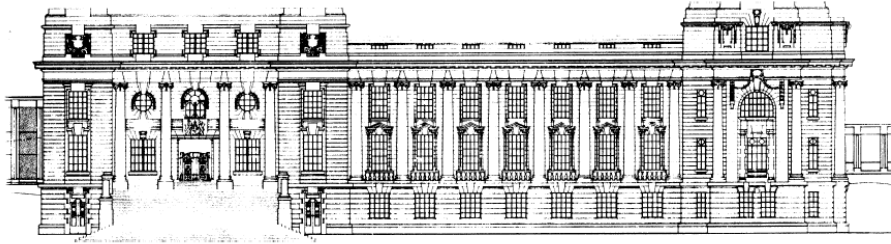
Yapının sismik izolasyonu %75'inden fazlası kurşun çekirdekli olmak üzere 400 civarı yüksek sönümlü kauçuk mesnet ile gerçekleştirilmiştir. 5 katlı Parlamento Binası'nın iç duvarları ile bodrum katının tüm duvar ve kolonları güçlendirildi. Yapının mevcut temelleri teker teker kesilip çıkarılarak yerlerine izolatörlerin monte edileceği betonarme temeller yerleştirildi.

Başarılı sonuçlar almak için projelendirme aşamasında, birçok test ve simülasyonlar yapıldı. Her iki yapının da doğal periyodunun yaklaşık 0,5'den 3,0 sn mertebesine

yükseldiği görüldü. Bu yığma binaların 7.5 Richter şiddetindeki depreme dayanacak kapasitede güçlendirildikleri tahmin edilmektedir. [1]



New Zealand Parliament Library



New Zealand Parliament House

Şekil 5.12 Yeni Zelanda Parlamento Binaları

5.2.4. Avrupa’da Sismik İzolasyon Uygulamaları

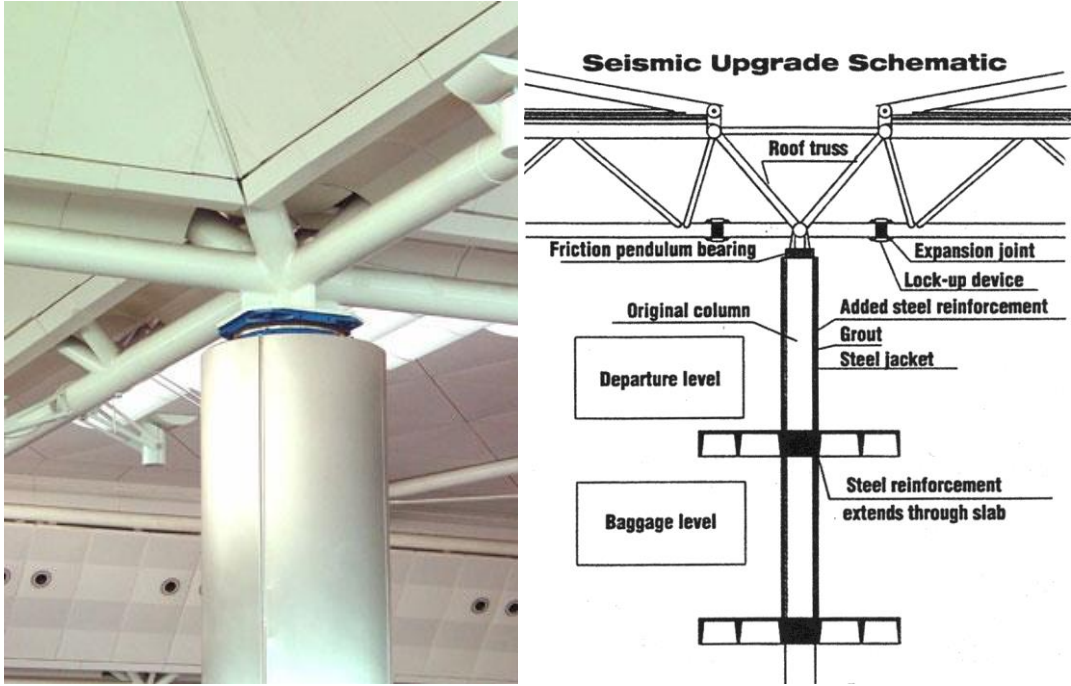
Avrupa’da sismik izolasyonun en çok uygulandığı ülke İtalya’dır. Uygulamaların büyük çoğunluğunu İtalya otoyollarındaki köprülerdeki yapılan izolasyon çalışmaları oluşturur. 1989 yılında İtalya’da kurulan GLIS (Gruppo de Lavarò Isolamento Sismico – Sismik İzolasyon Çalışmaları Grubu) adlı grup bugüne dek sismik izolasyon ile ilgili nümerik ve deneysel çalışmalar yapmak, tasarımcılara sismik izolasyon içeren tasarımlarda destek sağlamak, sismik izolasyonun kullanımını teşvik etmek, bu konuda konferanslar düzenlemek, ilgili şartname ve standartların oluşturulması için çalışmalarda bulunmak ile sismik izolasyon içeren projelerin değerlendirilmesi ve onaylanmasında Eyalet Enstitüsüne destek vermek gibi çalışmalarda bulunmuştur. İtalya’da bu yeni teknolojinin kullanımı söz konusu olduğunda GLIS’in yadsınamaz derecede büyük bir rolü vardır.

Avrupa’da ilk sismik izolasyon uygulaması, İtalya’daki SIP Complex’tir. 1989’da SIP Ulusal Telefon Şirketi’nin yönetim binası olmak üzere yapımına başlanan bu 7 katlı binanın inşası 1992’de tamamlanmış olup sismik izolasyonu İtalya’da en yaygın

kullanılan izolatör çeşidi olan yüksek sönümlü (HDNR) mesnetler kullanılarak yapılmıştır. Yapıda 50 – 60 cm arasında değişen çap ve 19 cm yüksekliğinde toplam 297 adet HDNR mesnet kullanılmıştır.

5.2.5. Türkiye’de Sismik İzolasyon Uygulamaları

Türkiye’de sismik izolasyonun ilk uygulaması, Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali’nin Sismik Modernizasyonu Projesi kapsamında yapılan uygulamadır. 250 x 225 m alana kurulu olan bu yapıda sismik izolasyon, uzay kafesten yapılmış çatısı ile 7 m yüksekliğindeki beton kolonlarının arasına yerleştirilen toplam 130 adet sürtünmeli sarkaç izolatör (FPS) ile gerçekleştirilmiştir. Proje aynı zamanda Amerikan Mühendislik Şirketleri Konseyi (American Council of Engineering Companies - ACEC) tarafından verilen ödüle, 700 aday arasından seçilerek layık görülmüştür [13].



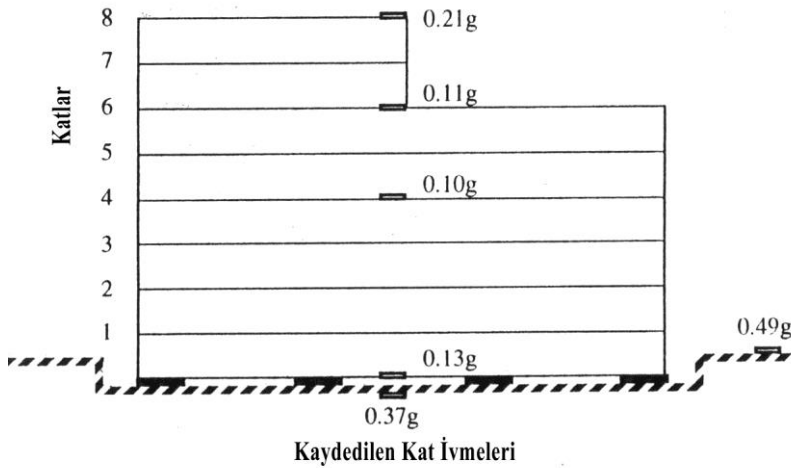
Şekil 5.13 Atatürk Havalimanı Dış Hatlar Terminali

5.3. Sismik İzolasyonlu Yapıların Gözlenmiş Performansları

Sismik izolasyon sistemlerinin potansiyel kullanıcıları tarafından en sık sorulan sorulardan biri de gerçek bir deprem etkisinde performanslarının kanıtlanıp kanıtlanmadığıdır. Birçok sismik izolasyonlu yapıya deprem etkisinde yapının performansını ölçmek için parametre sayılabilecek değerleri kaydeden cihazlar yerleştirilmiştir. Henüz hiçbir yapı sismik izolasyon sisteminin limitlerini test edecek kadar yüksek şiddetli bir depreme maruz kalmasa da, sistemi aktif hale geçirecek yeterli deprem hareketine maruz kalmış yapılar vardır.

5.3.1. The University Hospital of the University of Southern California

6.7 Richter büyüklüğündeki 17 Ocak 1994 Northridge depremi, 61 ölü ve 9.000 yaralı ile sonuçlanmıştır. Yarattığı maddi hasarın 20-50 milyar \$ arasında olduğu tahmin edilen deprem, Los Angeles'te aralarında 31 tane hastanenin de bulunduğu çok sayıda yapıda büyük hasara yol açmıştır. The USC University Hospital, bu depremin merkez üssünden 36 km uzaklıkta olup, etrafındaki hasar alan birçok yapıya karşı depremi tamamen hasarsız atlattığı ve operasyonlarını kesintisiz ve eksiksiz sürdürmüştür. Sismik izolasyon sisteminin varlığı, deprem kuvvetlerinde % 65'e varan oranda bir düşüşe neden olmuştur.



Şekil 5.14 USC University Hospital – Northridge 1994 Depremi Kat İvmeleri

Şekil 5.14'te binanın bazı katlarında ve yer seviyesinde ölçülen maksimum ivmeler gösterilmektedir. Açıkça görülmektedir ki, maksimum yer ivmelerinin (pga – peak

ground acceleration) katlarda yükseltgenmesi yerine, tam tersine, küçük değerlere indirgenmiştir. Depremi kuvvetli yönü olan kuzey-güney doğrultusunda ölçülen maksimum yer ivmesi değerleri 0.49 g ile 0.37 g olup, kat ivmelerinin en yüksek görüldüğü yerler olan zemin ve çatı katında bu ivme değerlerinin sırasıyla 0.13 g ve 0.21 g olarak ölçülmüştür. Bu değerler yer ivmesine kıyasla % 65 ve % 43 oranında azalmaya karşılık gelmektedir.

USC University Hospital'in gözlenen bu performansının tersine, Olive View Hospital 2.31 g çatı katı ivmesine maruz kalmıştır. Bu değer, ankastre temel sistemine sahip olan bu yapıda temel seviyesinde görülen 0.82 g ivme değerinin 2.8 katına karşılık gelmektedir. USC University Hospital binasında bu oranın 0.57 olduğu düşünülürse arada (2.8/0.57) 5 kat mertebesinde bir fark olduğu görülür.

Northridge depremi esnasında kaydedilen düşey yer ivmesi değerleri bazı bölgelerde 0.85 g mertebesinde kaydedilmiş olmasına rağmen, USC University Hospital binasında bu değer 0.09 g'yi aşmamıştır. Binanın izolatör seviyesinin altında, temel seviyesinde ölçülen düşey ivme değerleri 0.07 g ve 0.09 g'dir. Yapıda kaydedilen maksimum düşey ivme değerleri ise 0.08 g ve 0.13 g'dir. Bu değerler % 114 ve %144'lük düşey ivme yükseltgenmelerine karşılık gelmektedir. Sismik izolasyonun düşey ivmelerde büyük bir yükseltgenmeye yol açmadığı ve yapının depremin düşey etkisine verdiği karşılıkta pek değişikliğe yol açmadığı söylenebilir.

USC University Hospital binası bu depremi hasarsız ve fonksiyonlarında kesinti olmaksızın başarılı bir şekilde atlatırken, çevredeki 12 adet hastane binası servis dışı kalacak derecelerde hasara uğramıştır. Bunlardan en ağır hasarı alan, USC University Hospital'den en fazla 1 km uzaklığındaki The Los Angeles County General Hospital Complex'tir. 400 milyon \$ mertebesinde maddi hasar meydana gelen bu hastane boşaltılarak kalıcı olarak kapatılmak zorunda kalmıştır. Ağır hasarlar gören bu hastanelerden bazılarının dönemin en güncel depreme dayanıklı yapı şartnameleri ve yönetmeliklerine uygun olarak inşa edilmiş olması dikkat çekicidir.

Yapının gözlenen bu performansı aynı zamanda kullanılan mesnetlerin başlangıç durumlarına geri dönmedeki beklenen sonuçları da vermiştir. İzolatörler tümüyle sorunsuz olarak orijinal konumlarına geri dönmüşlerdir.

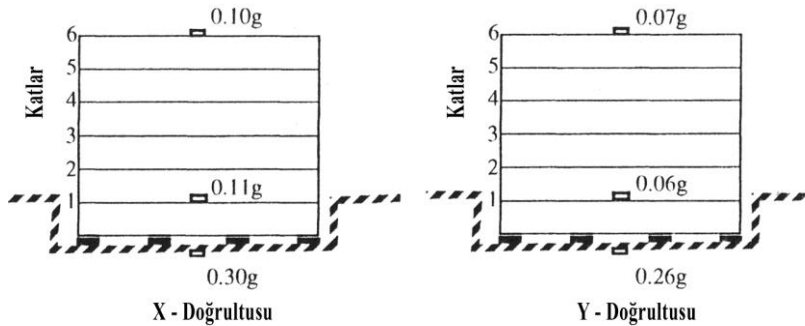
USC University Hospital binasında toplam yapım maliyetine sadece % 2'lik bir ilave maliyet ile uygulanan sismik izolasyon sistemi, birçok insan hayatının tehlikeye

girmesini engellemiş ve oldukça pahalı ve hayati olan ekipmanların korunmasını ve işlevini sürdürmesini sağlamış, depremden sonraki kritik saatlerde hastanenin tam fonksiyonla çalışabilmesine imkan sağlamıştır [1].

5.3.2. The West Japan Computer Center

Japonya'nın Kobe kentinde, Northridge depreminden tam bir yıl sonra, 17 Ocak 1995'te 7.2 Richter büyüklüğünde bir deprem meydana geldi. 5.500 kişinin ölümü, yaklaşık 33.000 kişinin yaralanmasıyla sonuçlanan bu deprem 200 milyar \$'dan fazla maddi hasara yol açtı. Merkez üssünün, insan yoğunluğu yüksek kentsel bölgelere yakın olması ve odak derinliğinin oldukça sığ olması, depremin yıkıcılığını artırdığı, 150.000'den fazla binanın çökmesine veya ağır hasarlı olmasından dolayı yıkılmak zorunda kalınmasına neden olmuştur. Depremin yaralarını bugün bile sarmakta olan Kobe'de birçok binanın yıkılıp yeniden yapılmasına veya onarılmasına rağmen iskan halen büyük bir sorundur.

Dünyanın en büyük sismik izolasyonlu binalarından biri, Japonya Posta ve Telekomünikasyon Bakanlığı'na ait olan West Japan Computer Center binasıdır. Bina, Kobe depreminin merkez üssünden 30 km. uzaklıkta olup Batı Japonya'nın tüm finansal işlemlerinin gerçekleştiği bilgisayar merkezi olmasından dolayı kesintisiz hizmet vermesi oldukça kritik öneme sahip bir yapıdır. 46.500 m² toplam alana sahip olan 6 katlı yapının sismik izolasyonu, 54 kurşun çekirdekli ve 66 doğal kauçuk mesnet kullanılarak sağlanmıştır. Sönüm kapasitesini artırmak için ayrıca çelik ve kurşun sönümleyiciler de kullanılmıştır. Yapının doğal periyodu 3 sn. civarındadır.



Şekil 5.15 West Japan Computer Center – Kobe 1995 Depremi Kat İvmeleri

Şekil 5.15'te yapının depremde kaydedilen ivme değerleri görülmektedir. Deprem kuvvetli yönü olan X yönünde, maksimum yer ivmesi; zemin seviyesinde % 63, çatı seviyesinde ise % 67 mertebesinde bir azalışa yol açmıştır. Yapı, deprem etkisinde yere rölatif maksimum 12 cm. lik yerdeğiştirme yapmış ve sorunsuz biçimde orijinal pozisyonuna dönmüştür.

Civardaki benzer özelliklere sahip binalarda hasar gözlenirken, West Japan Computer Center binası Kobe depremini hasarsız ve fonksiyonlarında kesintiye uğramaksızın atlattır. Yapının bu deprem etkisinde gösterdiği üstün performans Kobe depreminden sonra Japonya'da sismik izolasyon uygulamalarındaki artışın çok önemli sebeplerinden biridir. Bu performans sonuçları değerlendirildikten ve model alındıktan sonra sismik izolasyon içeren binaların onay almaları süreci de hızlanmıştır [1].

6. SİSMİK KORUMA TEKNİKLERİNE GENEL BAKIŞ

Koruma tekniklerinin hepsini içine alan bir sınıflandırma sistemi için çeşitli öneriler bulunmaktadır. Bunlardan biri “Konuma Göre Sınıflandırma”dır. Bu sınıflandırma sismik koruma tekniklerinin yapıda kullanıldığı yer bakımından İç (Internal) Koruma ve Dış (External) Koruma olmak üzere iki çeşittir. Örneğin temellerde kullanılan tipte sismik izolatörler yapının dışında konumlandıkları için “Dış Koruma” elemanları, yapı taşıyıcı sistemine yerleştirilen enerji sönümleyiciler ise “İç Koruma” elemanları sınıfına girer [28].

Bu tez çalışmasında sınıflandırma yöntemi olarak, en yaygın kullanılan yöntem olan “Uygulama Metoduna Göre Sınıflandırma” benimsenmiştir. Buna göre sismik koruma sistemleri şu şekilde kategorize edilir:

- Pasif Koruma Sistemleri
- Aktif Koruma Sistemleri

6.1. Pasif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri; yapıya yerleştirilen özel elemanlar aracılığı ile deprem, şiddetli rüzgar vb. nedenlerle sisteme dışarıdan giren enerjiyi ısıya dönüştürür veya üzerlerine alırlar. Dolayısıyla yapının bu dış etkilere karşı tepkisinde azalma meydana getirmek suretiyle, yapının dayanma kapasitesinin artmasını sağlarlar.

Pasif kontrol sistemlerinin hesabı kolay ve maliyeti düşüktür. Dışarıdan bir güç kaynağına ihtiyaç duymazlar. Dolayısıyla deprem esnasında oluşabilecek güç kesintisinden etkilenmedikleri gibi; dış enerji vermediği için yapıda stabilite sorununa da neden olmazlar. Fakat bununla birlikte aktif kontrol sistemleri kadar etkin değildirler. Yapının ömrü boyunca maruz kalabileceği deprem şiddetleri göz önüne alınarak hesap edilirler. Tasarlanandan daha şiddetli bir deprem meydana gelirse yapıda büyük deformasyonlar oluşabilir.

Pasif kontrol Sistemleri ;

- a. Pasif Enerji Sönümleyiciler
- b. Sismik İzolasyon Sistemleri

olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Pasif enerji sönümleyiciler sisteme ilave edilen araçlar sayesinde sistemin enerji yutma kapasitesini artırır. Sismik izolasyon sistemleri ise; yapının zeminin titreşiminden izole edilmesi için genellikle temelle zemin arasına yerleştirilen cihazlardır.

6.2. Aktif Kontrol Sistemleri

Son yıllarda yapıların titreşimini azaltmak, yapıyı kullananların güvenliğini artırmak isteğinden dolayı önem kazanmıştır. Burada amaç sadece büyük depremlere karşı koruma sağlamak değil, aynı zamanda değerli malzemelerin binada bulunduğu durumlarda malzemelerin zarar görmelerini önlemek ve orta şiddetli depremlerin oluşturduğu titreşimler karşısında bina içinde yaşayanların konforunu artırmaktır.

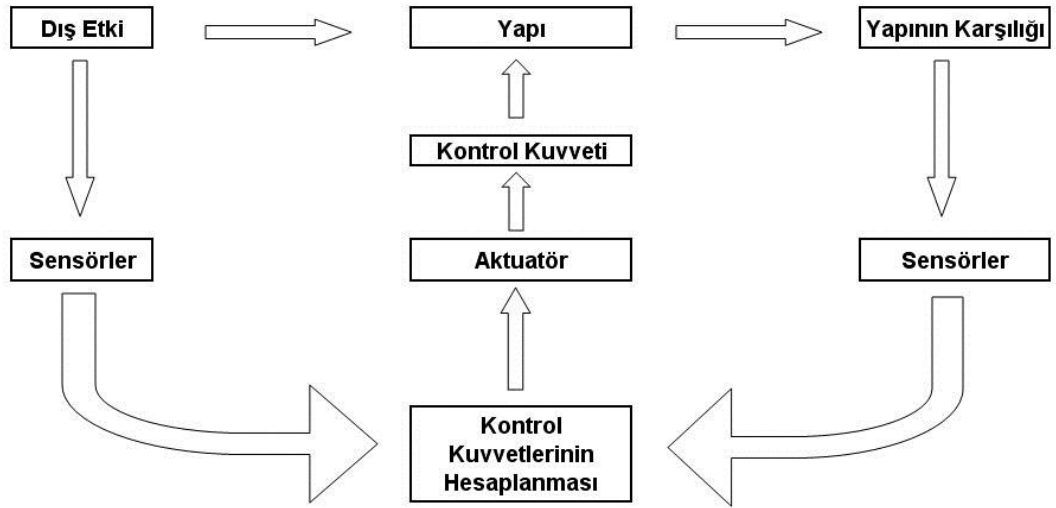
Aktif kontrol sistemleri, dışarıdan bir enerji kaynağı yardımıyla yapının deplasmanını istenilen düzeyde tutmak için geliştirilen sistemlerdir. Aktif kontrol sistemlerinin geliştirilmesinin başlıca sebepleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Yeni malzemelerin keşfinden sonra binalar artık daha yüksek ve daha esnek hale gelmişlerdir. Aktif kontrolün yerleştirilmesinin bir amacı aşırı titreşimlere karşı binayı korumaktır.
- 2) Aktif kontrol sisteminin yapının sağlamlaştırılmasında kullanılmasının bir diğer nedeni de pasif kontrol sistemleri gibi çok yer kaplamamasıdır. Aktif kontrol sistemleri binaya daha az yer kaplayacak şekilde monte edilebilir.
- 3) Yapılar tüm olası dış yüklere karşı koyabilecek şekilde projelendirilmemişlerdir. Beklenmeyen bir yükleme oluştuğunda yapı zarar görebilir; hatta yıkılabilir. Aktif kontrol kullanılmadığında yıkılabilecek bir bina, aktif kontrol sistemi kullanılarak kurtarılabilir. Bu ekstra koruma, deniz üzerindeki platformlar, hastaneler ve nükleer enerji santralleri gibi pahalı yapılar düşünüldüğünde çok önemlidir,
- 4) Bazı yapılar değerli veya çok hassas malzemeleri barındırıyor olabilir. Bu elemanların düzgün çalışması hayati önem taşıyabilir. Aktif kontrolün monte edilmesi ile bu elemanların uygun koşullarda çalışmaları sağlanabilir.

5) Pasif kontrol elemanları yapının depreme karşı performansını artırmakla birlikte; sistemin doğasından kaynaklanan birtakım nedenlerle başarıları sınırlı kalmaktadır. Örneğin ayarlı kütle sönümleyiciler genelde birinci mod frekansa göre ayarlandıkları için sadece birinci modun etkin olduğu titreşimlerde etkilidirler. Ancak aktif kontrol sistemleri daha geniş bir frekans aralığında başarılıdır.

6) Aktif kontrol elemanlarının yapıya uygulanması, malzemenin iyi kullanılmasını ve maliyetin düşmesini sağlayabilir.

Modern kontrol teorileri makine ve elektrik mühendisliği uygulamalarının inşaat mühendisliği alanına uygulanması ile oluşturulmuştur. Araştırmalar aktif kontrol sistemlerinin ani karşılık fonksiyonundan dolayı yüksek titreşim kontrolünü neredeyse tüm yapılarda sağlayabileceğini göstermiştir. Aktif kontrol sistemlerinin çalışma şeması Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1 Aktif Kontrol Sistemlerinin Çalışma Şeması

Yapıların aktif kontrolü için birçok sistem geliştirilmiştir. Bunlar:

- Aktif Kiriş Kontrolü
- Aktif Kütle Sönümleyicisi
- Yerçekimi-Harekete Geçirici Sistem
- Aktif Rijitlik Değiştirici

7. PASİF KORUMA TEKNİKLERİ

7.1. Sismik İzolasyon Sistemleri

Yapıya en büyük zararı deprem hareketinin yatay bileşeni verir. Yapıya yerleştirilen taban izolasyon sistemleri; yatay ivmenin azaltılması amacıyla üst yapıyı temelden ayırarak zeminin hareketine izin verir. Sismik izolasyon sistemleri kullanıldığında yapının frekansı azalmakta başka bir deyişle periyodu artmaktadır. Periyodun artması yatay deplasmanların büyümesine neden olur. Bu deplasmanların büyük bir bölümü izolatörlere iletilir. Bir başka deyişle yapıda küçük yatay deplasmanlar, sismik izolasyonda ise büyük yatay deplasmanlar oluşur. Sistemde izolatörlerin bulunduğu kısımda meydana gelen büyük yer değiştirmeler aracılığı ile enerjinin sönümü sağlanır. Katlar arası yer değiştirmeler küçük kaldığı için deprem esnasında yapı rijit bir davranış gösterir [23].

Sismik izolasyon sisteminde kullanılan izolatör tipleri, şekilleri, kullanıldıkları yer, büyüklükleri ve yapıldıkları malzeme bakımından farklılık teşkil ederler. Sismik izolasyon sistemlerini tümü ile kategorize etmek gerekirse aşağıdaki gibi bir sınıflandırma yapılabilir :

a) Kauçuk Esaslı Sistemler

- Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk İzolatörler (LDRB)
- Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk İzolatörler (HDNR)
- Kurşun Çekirdekli İzolatörler (LRB)

b) Kayıcı Sistemler

- Sürtünmeli Sarkaç Sistemi (FPS)
- Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyon Sistemi (R-FBI)

c) Kauçuk – Kayıcı Karma Sistemler

- Electricite-de-France Sistemi (EDF)
- EERC Birleşik Sistemi

d) Yay Tipi Sistemler

7.1.1. Kauçuk Esaslı Sistemler

Tabakalı kauçuk sistemler, en yaygın olarak kullanılan taban izolasyonu metodudur. Bu sistem tabakalar halinde kullanılmakta olan çelik ve kauçuk plakalardan oluşur. Çelik levhalar sayesinde sistem düşey yönde son derece rijit iken yatay yönde, istenmeyen salınımları önlemek şartıyla, arzu edilen esnekliğe sahiptir.

Sönümün ve rijitliğin paralel etkileri bu sistemlerin en önemli özelliğidir. Genellikle kauçuk esaslı sistemler, yatayda esneklik ve düşeyde rijitlik özelliği ile yüksek sönüm kapasitesi gösterir. Bu sistemin ayrıca iki karakteristik özelliği daha vardır ki bunlar sırasıyla (ω_b) doğal frekans ve (ξ_b) sönüm sabitidir. Sistemin sönüm sabiti izolatörün şekil değiştirmesine bağlıdır.

Bu sistemlerin üretimi kolay olup hareketli parçaları yoktur. Ayrıca geçen zamandan ve kötü çevre koşullarından kolay kolay etkilenmezler. Elastomer malzeme kalıba kolayca dökülebildiği için istenilen şeklin verilebilmesi bakımından avantajlıdır. Ayrıca metalle aderansı güçlüdür. Böylece izolatörün makine ya da temele montajında kolaylık sağlar. İzolatörler uygulamada kesme ya da basınç altındaysa dolu silindir ya da blok biçimi alabilirler. Uygulamada kesme kuvveti altındaki izolatlara içi boş silindirik biçim vermek de mümkündür. İzolatör, maruz kaldığı ağırlığı taşıyabilmeli ve statik rijitliği, statik yer değiştirmeyi sınırlandırabilecek düzeyde olmalıdır. Dinamik rijitlik, rijit kütle ve izolasyon sisteminin rezonans frekansının aşağısında bir değer olmalıdır. İzolatör sönümü, rijit kütle rezonansında aşırı yer değiştirmeyi engelleyecek ve yüksek frekansta dalga etkilerinden koruyacak düzeyde seçilmelidir.

İzolatör, düşey doğrultuda çok rijit ve yatay doğrultuda çok esnektir. Deprem hareketinin düşey bileşenine karşı koruyuculuğu yoktur ve düşey bileşeni yapıya nakleder. Sismik izolasyonlu yapılarda, yanal yükler rijit mesnetli yapılardan daha küçük olduğu için devrilme momentleri de küçüktür.

Sönüm gibi kauçuk malzeme özellikleri frekans ve sıcaklığa bağlıdır. Bu sebeple izolatör uygulama koşulları altında test edilmeli ve en optimum sönüm ve rijitlik seçilmelidir. Bu ve diğer özellikler zamanla değişebilir ve izolatör kullanıldığı çevrenin etkileriyle yaşlanabilir. Bu nedenle izolatör kullanımında uzun süreli basıncın yüksek ve düşük sıcaklıktaki etkileri düşünülmeli ayrıca güneş, ozon hidrolik yağların etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır.

İzolatörün yalnızca yatay yönde gerekli rijitliğe sahip olması yeterli değildir aynı zamanda düşey yönde de istenilen rijitlik sağlanmalıdır. İzolatörler statik basınç yükü etkisi altındayken tüm sistemin yanal statik stabilitesinin de sağlanması istenmektedir. Eğer düşey yöndeki rijitlik çok düşükse, diğer elastik zorlamalar statik stabilizasyonu arttırmak amacıyla eklenebilir.

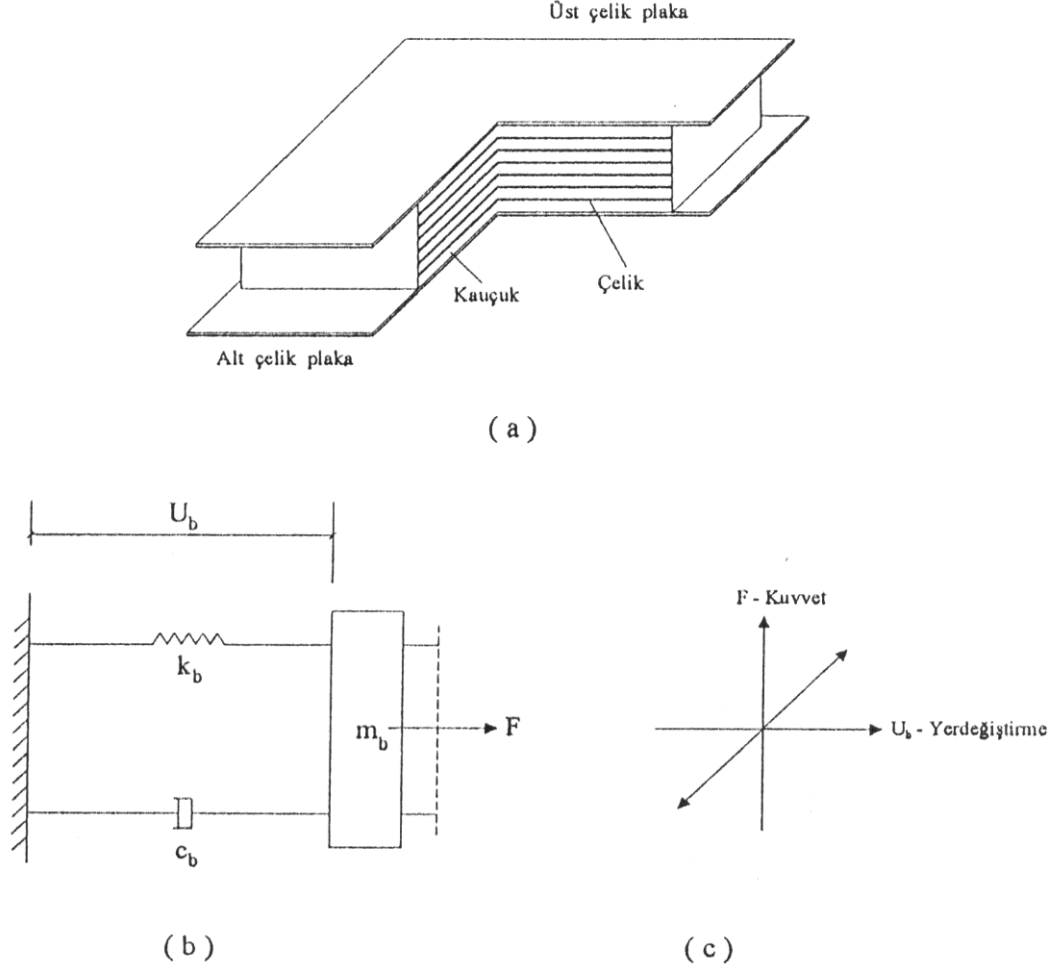
Şişe mantarı, keçe ya da kauçuk köpük, fiberglas içeren malzemeler de sismik izolasyonda kullanılabilir. Fakat bu malzemelerin mekanik özellikleri, elastomer malzemeler kadar iyi bilinmezler ve bunların izolasyon performansları büyük ölçüde tahminidir.

7.1.1.1. Düşük Sönümlü Doğal ve Sentetik Kauçuk Mesnetler (LDRB)

Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk mesnetler (Low Damping Rubber Bearings), kauçuk ve çelik plakalardan oluşmaktadır. Bu izolatörlerin iki adet kalın çelikten uç levhası ve bununla birlikte bu levhaların arasında da çok sayıda ince çelikten ara sac levhaları bulunmaktadır. Kauçuk malzeme, bir kalıp içinde uygulanan sıcaklık ve basınç altında tek bir işlem dahilinde, vulkanize edilmiş ve çeliğe bağlanmıştır [15]. Çelik ara tabakalar, kauçuk malzemenin iki yanından şişmesini yani yanal deformasyon yapmasını önlemekte ve yüksek bir düşey rijitlik sağlamaktadır. Ancak bununla birlikte çelik ara tabakaların, yatay rijitlik üzerinde hiçbir etkisi bulunmamaktadır. Yatay rijitlik, kauçuk tabakaların kalınlığına ve sayısına bağlıdır. Genellikle istenilen rijitlik; tabaka kalınlığı sabit tutularak, kauçuk tabaka sayısının değiştirilmesi ile sağlanır. Kayma durumunda malzemenin davranışı, % 100'ün üzerindeki kayma şekil değiştirmelerine kadar oldukça lineerdir. Aynı zamanda kritik sönüm miktarı % 2-3 arasında değişmektedir. İzolatörlerin yüksekliğinin artması mekanizmada burkulmaya yol açtığından, yükseklik çapın yarısıyla sınırlandırılmıştır. İzolatör çapının 1 m'den fazla ve taşıma kapasitesinin 500 ton civarında alınması genellikle uygundur. Çelik plaka düşey yükler altında kauçuğun yanal deformasyonuna engel olur ve yükün üniform olarak dağılmasını sağlar. Bunun bir sonucu olarak da düşey rijitlik yatay rijitlikten daha büyüktür.

Düşük sönümlü doğal ve sentetik kauçuk izolatörler; viskoz sönümleyiciler, çelik çubuklar, sürtünmeli aletler vb. gibi birtakım ek sönüm aletleri ile birlikte, Japonya'da yaygın olarak kullanılmıştır. Japonya'da kullanılan elastomer malzemeler, genellikle doğal kauçuktan imal edilmektedir.

Düşük sönümlü kauçuk sistemlerde yerdeğiştirme ve kuvvet birbirine bağlı olarak lineer değişmektedir. Şekil 7.1.a'da kesit özellikleri, Şekil 7.1.b'de şematik modeli ve Şekil 7.1.c'de de lineer kuvvet- yerdeğiştirme davranışı gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (LDRB)

Düşük sönümlü doğal kauçuk izolatörlerin pek çok avantajı bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla şöyledir:

- İmal edilmesi basittir.
- Modellenmesi kolaydır.
- Mesnetlerin mekanik davranışı, hız, sıcaklık ve zamanla eskime gibi faktörlerden etkilenmemektedir.

Tek bir dezavantajları bulunmaktadır. O da ek bir sönüm sistemine ihtiyaçları olmasıdır. Bu ek sistemler; çok karmaşık ve girift bağlantılar gerektirmekte, metalik sönümleyiciler durumunda ise kısa sürede yıpranmaktadırlar.

Japonya'da bu tip sistemin pek çok uygulamaları kullanılmıştır. Enerji yutan elemanlar bir tür çelik akma aletlerinden meydana gelmektedir. Bu yaklaşımın bir başka şekli de kurşun çekirdekli izolatörlerdir. Söz konusu izolatörler, ilk olarak 1970'li yıllarda Yeni Zelanda'da geliştirilmiştir. Kurşun çekirdekli izolatör türü şu anda en yaygın kullanılan sismik izolasyon sistemidir.

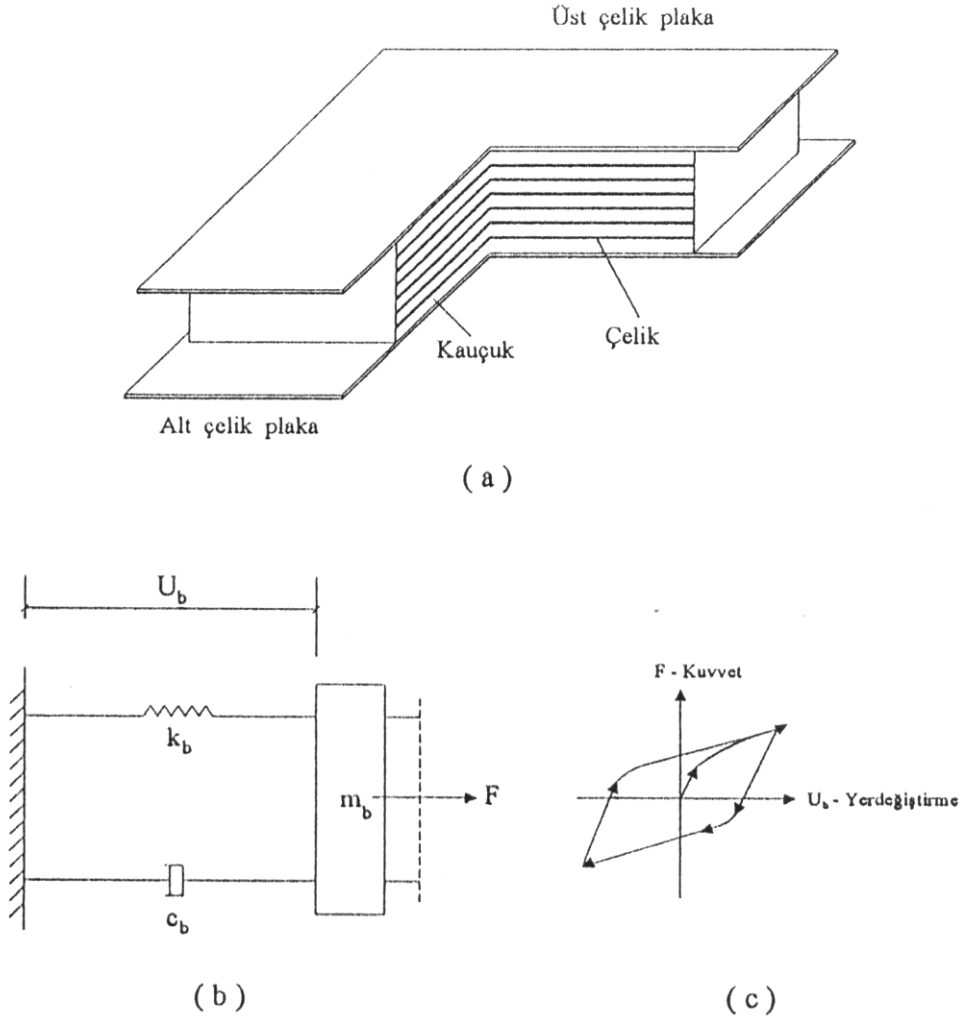
Düşük sönümlü kauçuk mesnetler yerine genellikle yüksek sönümlü kauçuk mesnet yada kurşun saplamalı kauçuk mesnet tercih edilmektedir. Bu mesnet tiplerinde kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi lineer davranış göstermez.

7.1.1.2. Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnetler (HDNR)

Bu sistemlerde (High Damping Natural Rubber), mesnetler doğal kauçuktan yapılmıştır. İngiltere'ye bağlı “Malaysian Rubber Producers’ Research Association” (MRPA)” kurumu tarafından 1982 yılında; ek sönüm elemanlarına olan ihtiyacı gidermek üzere, yeterli içsel sönümü olan doğal kauçuk bir bileşimin geliştirilmesi başarılmıştır. Sönüm miktarı; aşırı saf karbon blok, yağlar veya reçineler ve diğer patentli katkı maddeleri eklenilmesi suretiyle artırılmaktadır. % 100 oranındaki kayma şekil değiştirmelerinde, sönüm % 10 ve % 20 arasındaki mertebelere çıkarılmıştır. Sönümün, düşük sertliğe karşı gelen (50-55 durometer) küçük değerlerinde kayma modülü 0.34 Mpa civarında olmaktadır. Bununla birlikte, sönümün yüksek katılığa karşı gelen (70-75 durometer) büyük değerlerinde ise kayma modülü de yükselmekte ve 1.40 Mpa değerine ulaşmaktadır.

Malzeme % 20'den az orandaki kayma şekil değiştirmelerinde nonlineer davranmaktadır. Bununla birlikte; rüzgar yükü ve düşük düzeyli deprem yüklemesi altındaki davranışının minimize edilmesine yol açacak şekilde, daha yüksek rijitlik ve daha yüksek sönüm vasıtasıyla karakterize edilmektedir. % 20 ila % 120 arasındaki kayma şekil değiştirme oranlarının ötesinde, kayma modülü düşük ve sabit olmaktadır. Büyük şekil değiştirmelerde, bir şekil değiştirme kristalizasyonu işlemine bağlı olarak kayma modülü artmaktadır. Bununla beraber enerji yutulmasında da bir artış meydana gelmektedir.

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetin elemanları Şekil 7.2.a'da, şematik modeli Şekil 7.2.b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı da Şekil 7.2.c'de verilmiştir.



Şekil 7.2 Yüksek Sönümlü Doğal Kauçuk Mesnet (HDNR)

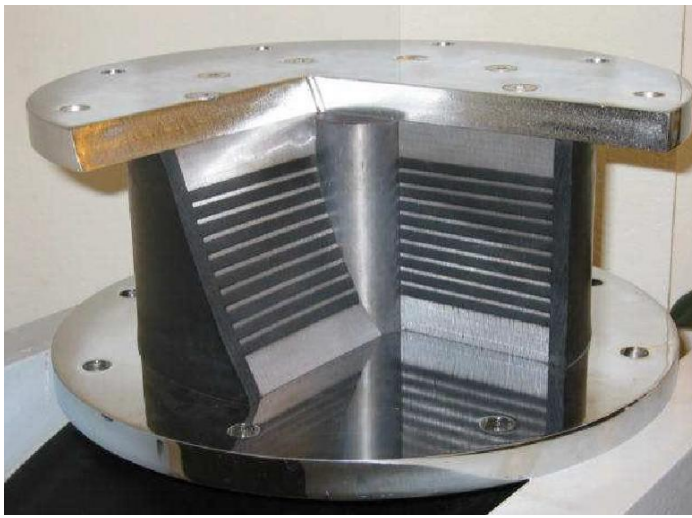
İzolatörlerdeki sönüm ne viskoz ne de histeretik karakterli olup, ikisinin arasında değer alır. Tamamıyla lineer viskoz bir elemandaki enerji yutulması, yerdeğiştirme durumunda kuadrattır. Histeretik sistemde ise enerji yutulması, yerdeğiştirme durumunda lineer olma eğilimindedir.

Yüksek sönümlü doğal kauçuk sistemin bir diğer avantajı çevresel titreşimin azaltılmasında, bir aşama sağlamasıdır. İzolatörler; trafik ya da yakınında bulunan bir metro hattı nedeniyle meydana gelebilecek yüksek frekanslı düşey titreşimleri dışarı süzmek için harekete geçmektedir. Bu sonuç, 1985 yılında Earthquake Engineering Research Center (EERC)'da uygulanan bir sarsma masası test programında gösterilmiştir.

7.1.1.3. Kurşun Çekirdekli Doğal Kauçuk Mesnetler (LRB)

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler, tabakalı kauçuk sisteminin benzeridir. Fakat burada ek rijitlik sağlamak amacıyla kurşun saplamalı çekirdek kullanılmıştır.

Kurşun çekirdeğin boyutları başlangıç rijitliğine, yükün büyüklüğüne göre sistemin ihtiyaç duyduğu şekilde belirlenir. Kurşun çekirdek enerji absorbe edebilme özelliğiyle izolatörün yatay yerdeğiştirmesini azaltmaktadır. Bu sistem prensip olarak histeretik sönümleyiciler gibi davranmaktadır. Bu da kuvvet-yerdeğiştirme davranışının nonlinear olmasına neden olur.

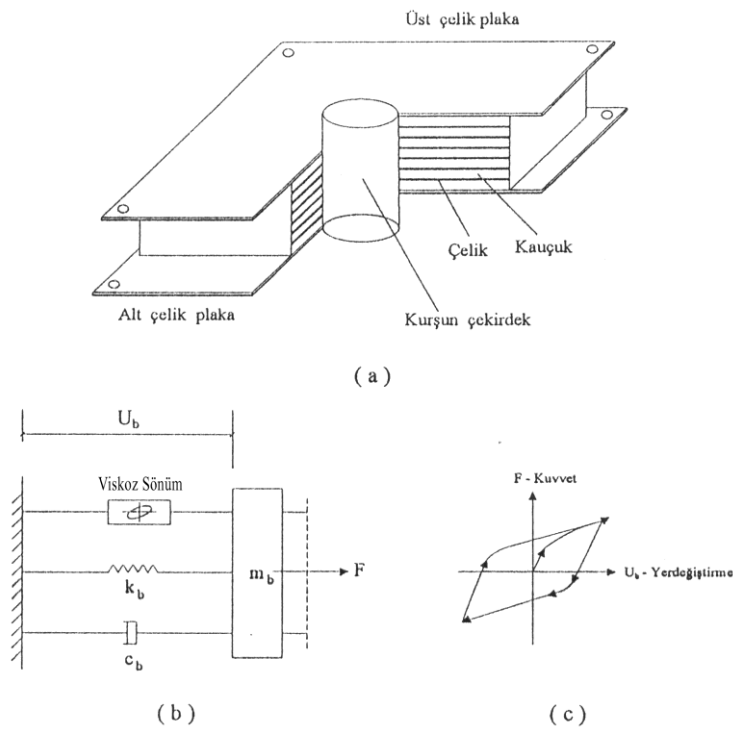


Şekil 7.3 Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet (LRB)

Kurşun çekirdekli izolatör, 1975 yılında Yeni Zelanda'da icat edilmiş ve bu olayı takiben Yeni Zelanda, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri gibi ülkelerde yaygın olarak kullanılmıştır. Kurşun çekirdekli izolatörler, düşük sönümlü kauçuk izolatörlere benzer olarak, ince tabakalara ayrılmış kauçuk izolatörlerdir. Ancak bu izolatörlerin düşük sönümlü kauçuk izolatörlerden farkı, Şekil 7.4.a'da gösterildiği gibi, deliklerin arasına sokulmuş bir tane ya da daha fazla sayıda kurşun çekirdeklerin kullanılmasıdır. İzolatörün içindeki çelik levhalar, kurşun çekirdeği kayma sırasında şekil değiştirmeye zorlamaktadır. İzolatörün içindeki kurşun, 10 Mpa civarındaki bir kesme gerilmesinde fiziksel olarak şekil değiştirmektedir. Böylelikle izolatörün bilineer bir davranış göstermesi sağlanmaktadır. Bu tip mesnetlerde sönüm %15 ile 30 arasında olabilmektedir. Kurşun çekirdeğin enerji sönümleme kapasitesi izolatörün yatay yerdeğiştirmesini azaltır. Bu sistem prensip olarak histeretik sönümleyici aletler gibi davranmaktadır. Bu nedenle kurşun

çekirdekli izolatörlerin kuvvet-yerdeğiştirme karakteristik özelliği, lineer olmayan diferansiyel denklemler kurularak modellenebilmektedir. Bu izolatör sisteminin en önemli sakıncası; şiddetli yer hareketinden sonra kurşun çekirdeğin zarar görüp görmediğinin dışarıdan tespit edilememesidir. Bu izolatörlerle sismik izolasyonu yapılan binalar, 1994 Northridge ve 1995 Kobe depremlerinde iyi bir performans sergilemişlerdir.

Bu mesnetlerin kesiti Şekil 7.4.a'da, şematik modeli Şekil 7.4.b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı da Şekil 7.4.c'de verilmiştir.



Şekil 7.4 Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet (LRB)

7.1.2. Kayıcı Sistemler

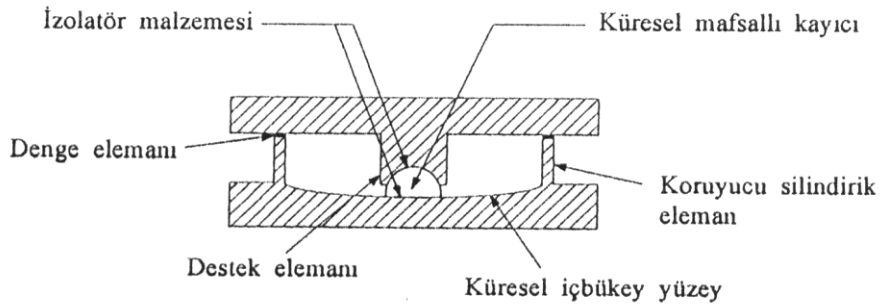
Bu sistemlerin çalışma şekli, izolasyon ara yüzünde kesme kuvveti geçişinin sınırlandırılması şeklinde özetlenebilir. Sürtünmeli sarkaç sistemler ve esnek sürtünmeli sismik izolatörler gibi kayıcı sistemler geliştirilmekte ve kullanılmaktadır.

Kayıcı mesnetler için en çok kullanılan malzemeler, paslanmaz çelik üzerine kaplanan “politetrafloraetilen”dir (PTFE ya da Teflon). Bu sistemin sürtünme karakteristikleri, sıcaklığa, ara yüzey hareketinin hızına, aşınma derecesine, ve

yüzeyin temizliğine bağlıdır. Buna benzer kayıcı elemanların mekanik davranışının söz konusu yönleri üzerinde kapsamlı test çalışmaları yapılmıştır.

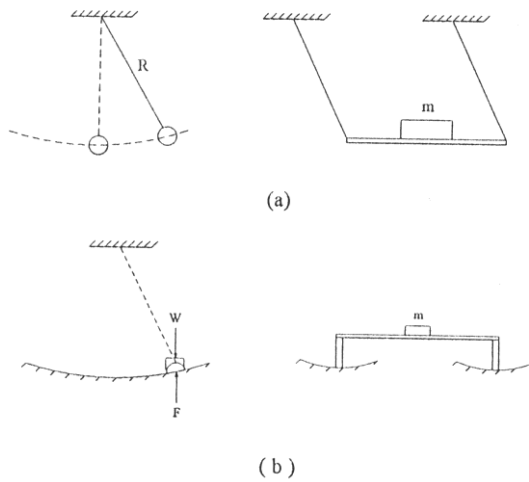
7.1.2.1. Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)

Sürtünmeli sarkaç sistemler (Friction Pendulum System) çelik mesnetlerdir. Düşük sürtünmeli, büyük yükleme kapasiteli paslanmaz çelik mafsallı, içbükey yatak üzerinde kayıcılığı sağlamaktadır. Şekil 7.5’de sürtünmeli sarkaç sistemin kesiti ve elemanları gösterilmiştir.



Şekil 7.5 Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS)

Sürtünme ve sarkaç hareketi sistemin çalışmasını sağlayan iki mekanizmadır. Sürtünmeli sarkaç sistemlerde, istenilen sismik izolasyon sonuçlarını elde ederken ağırlık ve geometriden yararlanılmaktadır. Şekil 7.6.a ve Şekil 7.6.b’de sürtünmeli sarkaç sistemlerinin hareket mekanizmaları gösterilmiştir.



Şekil 7.6 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Hareket Mekanizmaları

İzolatörün efektif rijitliği ve yapının izolasyon periyodu, içbükey yüzeyin eğrilik yarıçapı vasıtasıyla kontrol edilmektedir. İzolatörün titreşim periyodu

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \text{ şeklinde ifade edilebilir.} \quad (7.1)$$

Burada ;

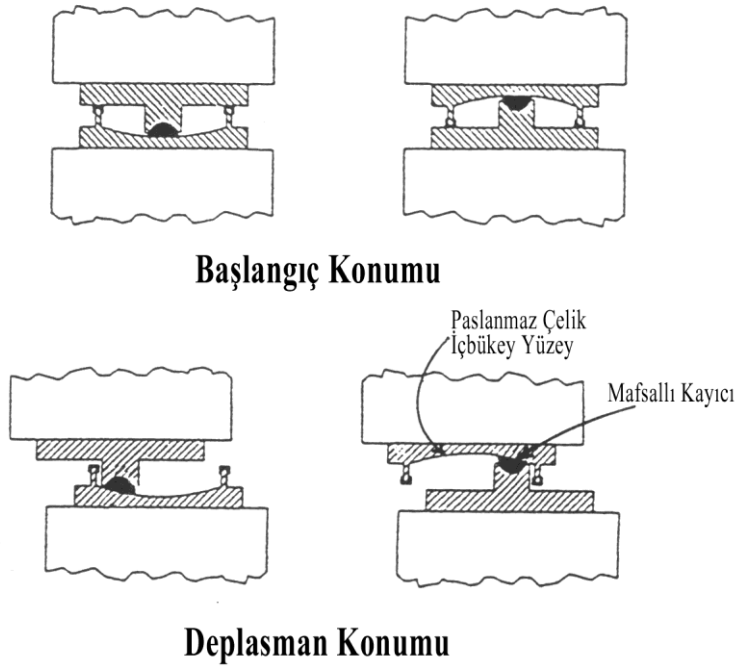
R : Küresel yüzeyin eğrilik yarıçapı,

g : Yerçekimi ivmesi

Yukarıdaki ifadede görüldüğü üzere titreşim periyodu, kütleden bağımsız ancak içbükey yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlıdır. Böylelikle yapının izolasyon periyodu tek parametreye bağlı olduğundan, değiştirilmesi kolaydır. İzolatörlerin sürtünme kuvveti aşıldığında, izolasyonlu periyot aktif hale gelmektedir. Kayma hareketi başladığında aktif olan sürtünme kuvveti, mesnet malzemesinin seçimi ile kontrol edilir. Deprem kuvvetleri sürtünme kuvvetinden az olduğu sürece, sarkaç sistemlerle mesnetlenen yapı, titreşimin izolasyonsuz periyoduna karşılık gelen bir tepki gösterecektir.

Deprem hareketi sırasında mafsal, kayıcı içbükey yüzey üzerinde kayarak kütlenin yükselmesine neden olacaktır. Üst yapının yavaşça yükselmesi kinetik enerjiyi potansiyel enerjiye dönüştürür. Dinamik hareket ortadan kalktıktan sonra sarkaç, ilk sabit denge durumuna ulaşmaya kadar hareketini yeniler. İzolatör, üst yapı kütlesinden dolayı deprem hareketinden oluşacak enerjiyi gerekli oranda yutar. Kayıcı mafsal çapı, yükleme durumuna göre boyutlandırılır. Depremde oluşacak maksimum yerdeğiştirmeye bağlı olarak, bağlantı halkasının çapı boyutlandırılır. İçbükey yüzeyin üstte veya altta olması izolatörün davranışını değiştirmez.

Sürtünmeli sarkaç sistemin önemli ikinci mekanizması, sürtünmeyle deprem enerjisinin yutumudur. Deprem hareketi sırasında, yanal rijitlik ve her bir yatakta oluşan sürtünme kuvveti, yatak üzerine mesnetlenen ağırlıkla direkt olarak ilgilidir. Bu nedenle yapı ağırlık merkeziyle, yatakların rijitlik merkezi çakışmalıdır. Bu, mesnetlenen yapının burulma hareketini ortadan kaldırır.



Şekil 7.7 Sürtünmeli Sarkaç Sistemlerin Başlangıç ve Deplasman Konumları

Mafsallı kayıcının kenarı, düşük sürtünmeli kompozit bir malzeme ile kaplanmıştır. Kayıcının diğer kenarı da tam küresel olup, paslanmaz çelik ile kaplıdır ve yine düşük sürtünmeli kompozit malzeme ile kaplanmış küresel bir oyuk içinde oturmaktadır. Kayıcı, küresel yüzey üzerinde hareket ettikçe taşınan kütlenin yükselmesine yol açmakta ve sistem için geri dönüş kuvveti sağlamaktadır. Mafsallı kayıcı ve küresel yüzey arasındaki sürtünme, izolatörlerde sönüm meydana getirmektedir.

Sürtünmeli sarkaç sistemlerde bulunan koruyucu silindir, yatay yerdeğiştirmelerin engellenmesinde etkili olmaktadır. Ayrıca, iç elemanların çevresel kirlilikten korunmasını sağlamaktadır. Koruyucu silindir tarafından sağlanan yerdeğiştirme sınırlandırması, deprem yüklerinin hesap yüklerini büyük miktarda aşması halinde, çok önemli bir emniyet sağlamaktadır.

7.1.2.2. Esnek Sürtünmeli Taban İzolasyonu (R-FBI)

Esnek sürtünmeli taban izolasyonu (Resilient-Friction Base Isolation), son yıllarda Mostaghel ve Khodaverdian tarafından önerilmiştir. Bu taban izolatörleri, birbirleriyle sürtünmeli olarak temas eden teflon kaplamalı eşit merkezli daireler halindeki plakalardan ve merkezi bir kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Esnek

sürtünmeli taban izolasyon sistemi, yüksek kayma hızlarında paslanmaz çelik üzerindeki teflonun yüksek sürtünme katsayısı probleminin üstesinden gelmeye çalışmaktadır. Bunun için, tek bir izolatör içinde çok sayıda kayıcı ara yüzeyler kullanma yöntemine gidilmektedir. Böylece izolatörün üst ve alt yüzleri arasındaki hız, tabakaların sayısına bölünmektedir. Bu sayede düşük bir sürtünme katsayısı korunarak, her bir yüzdeki hız değeri küçük olmaktadır.

Merkezi kauçuk çekirdek, hiç bir düşey yük taşımamakta, sadece yerdeğiştirme ve hızın, mesnet yüksekliği boyunca üniform olarak dağıtılmasını sağlamaktadır. Kauçuktaki kesme gerilmesini sınırlandırmak ve daha büyük yerdeğiştirme yeteneği kazandırmak amacıyla çelik levhali tabakalı kauçuk mesnetlere, sürtünmeli plaka eklenerek esnek-sürtünmeli taban izolasyon sistemleri düzenlenmiştir.

Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi, merkezi ve çevresel kauçuk çekirdekle birlikte birbirleri üzerinde kayabilen yassı halkalardan oluştuğu için kayıcı tipli izolasyon sistemleri grubuna girmektedir ve bir çok deneyle deprem etkisi altında davranışı denenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bu sistem üzerinde yapılan testlerde kauçuk çekirdeğin, yerdeğiştirmenin tek bir ara yüzeyde toplanmasını önleyemediği görülmüştür. Bu nedenle kauçuk çekirdeğin içine, kayıcı tabakalar arasındaki yerdeğiştirme dağılımını düzelten, merkezi bir çelik çubuk koyulmuştur. 1988 yılında EERC'de yapılan bir deneysel çalışma dahilinde, beş katlı ve 40 ton ağırlığındaki bir çelik çerçeve modelinde esnek sürtünmeli taban izolatörleri kullanılmış ve bu model sarsma masası deneyi ile test edilmiştir.

Kauçuk kılıf, mesnedi toz paslanma gibi dış etkilere korumakla birlikte halkaların aşınmasına engel olur. Kauçuğun sönüm yeteneği azdır bu nedenle enerji yutulmasında sürtünme kullanılmaktadır. Ayrıca mesnet elemanları kauçuk çekirdeğin toplam yanal rijitliği ve sürtünme katsayısına göre karakterize edilmektedir. Yer hareketinin düşey bileşenine karşı etkinliği çok azdır.

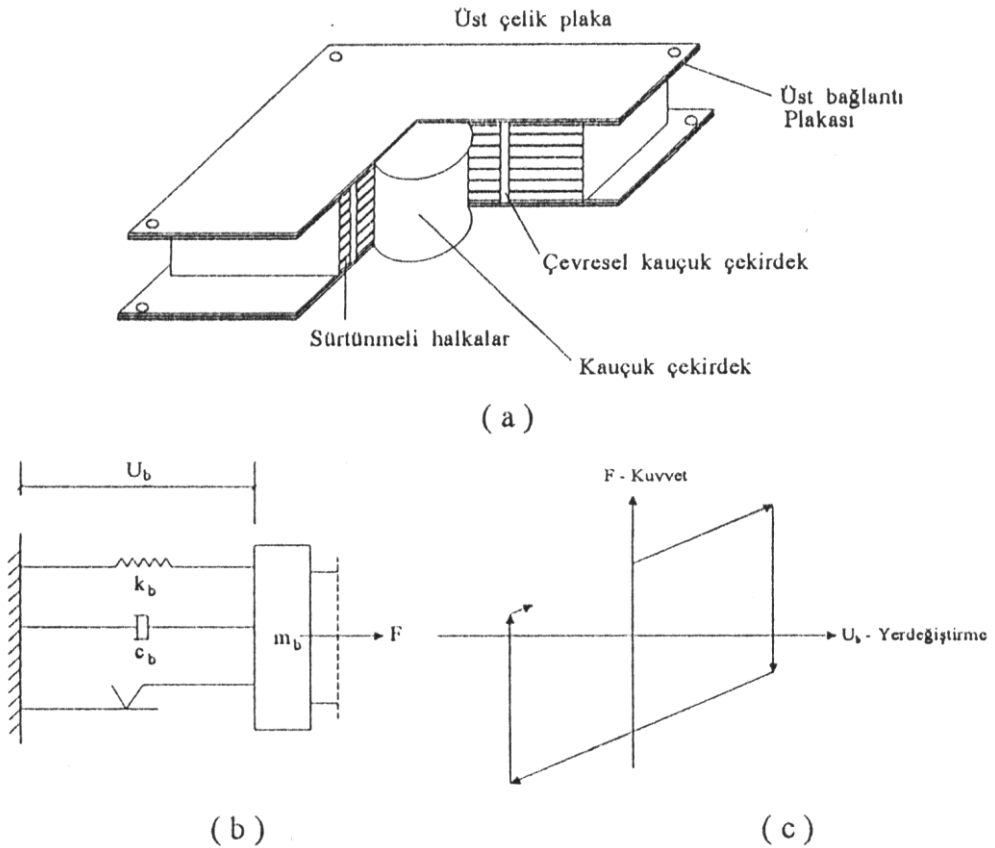
Esnek sürtünmeli sistemlerin düzenlenmesindeki en önemli neden kayıcı sistemlerin, sistemin ilk sabit dengeli durumuna geri döndürecek kuvvete sahip olmamasıdır. Kayıcı sisteme esnek çekirdeğin eklenmesiyle bu sağlanmış olur. Ayrıca esnek kayıcı sistemler temel yerdeğiştirmesini kontrol altında tutmaktadır.

Hareket, sürtünme kuvvetini yenene kadar mesnetlerde kayma oluşmaz. Mesnetler kaymaya başladığında kauçuk deforme olur ve sistemi eski denge haline döndürecek

elastik kuvvet oluşur. Kauçuk çekirdek, yanal yerdeğiştirmeyi ayırıcının yüksekliğine çaprazlamasına dağıtır ve ağırlık yükü taşımaz. Kayma hızı kullanılan kayıcı levha sayısına göre istenilen düzeyde tutulabilmektedir. Sürtünme kuvveti enerji yutma görevini üstlenmiştir.

Esnek sürtünmeli sistem rijitlik merkezi ve kütle merkezini izolasyon seviyesinde çakıştırdığından, simetrik olmayan yapıların düzenlenmesinde de kolaylıkla kullanılır. Sistemdeki sürtünme, rüzgar gibi düşük genlikli yanal hareketlerden tabanı korumaktadır. Sistemdeki elastik elemanlar sadece yer hareketinden doğan yanal yüklere maruz kalırlar. Ağırlık yükleri genellikle daha rijit olan kayıcı bölümlerce taşınmaktadır. Bu da ağırlık yükleri altında sünme ile ilgili problemleri azaltır böylece sistemin yer değiştirme kapasitesini ve stabilitesini de artırır.

Bu mesnetlerin kesiti Şekil 7.8.a'da, şematik modeli Şekil 7.8.b'de ve nonlinear kuvvet-yerdeğiştirme davranışı da Şekil 7.8.c'de verilmiştir.



Şekil 7.8 Esnek Sürtünmeli Sistemler (R-FBI)

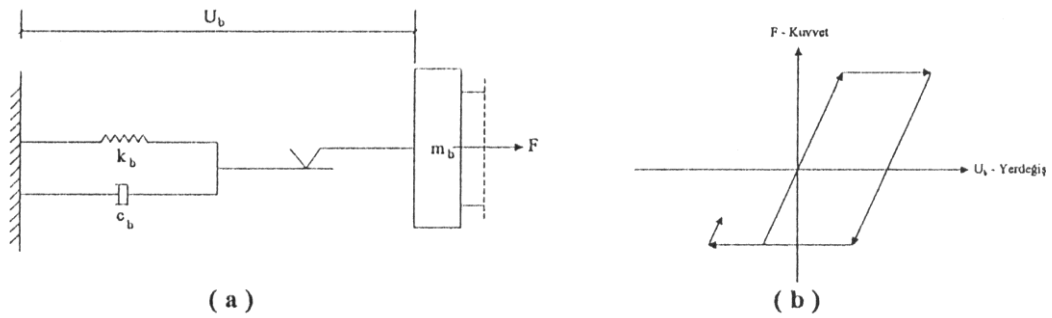
7.1.3. Kauçuk – Kayıcı Karma Sistemler

7.1.3.1. Electricite-de-France Sistemi (EDF)

Bu sistem, Fransız elektrik kurumunun (Electricite-de-France) desteğiyle nükleer elektrik santrali tesislerine yapılacak uygulama için, 1970'li yılların başlarında geliştirilmiştir. Söz konusu kuruluş, içinde güvenliğinin sağlanması gereken donanımına sahip ve 0.2 g'lik ivmeye dayanacak nitelikte, standart bir nükleer elektrik santrali geliştirmişti. Santral, daha yüksek depremselliği olan yerlere yerleştirilmek üzereyken; donanımın ivme mertebelerini binanın sahip olduğu sınır değerinin altında tutmak için izole edilmiştir.

Sistem; tabakalı sentetik kauçuk (neopren) izolatörleri, paslanmaz çelikle temas halinde olan kurşun-bronz alaşımı ile birleştirmektedir. Sistemin kayıcı yüzeyi ise, elastomerik izolatörün üstüne oturtulmaktadır. Kayıcı yüzeyin sürtünme katsayısının, izolatörün servis ömrü göz önüne alınarak, 0.2 olması gerekmektedir. Suni kauçuk tampon, ± 5 cm gibi çok düşük bir yerdeğiştirme kapasitesine sahip olup, meydana gelen yerdeğiştirmelerin bu sınır değeri aşması halinde, kayıcı eleman öngörülen yeterli hareketi sağlamaktadır. Sistem, mesneti düzeltici yani merkeze geri çeken herhangi bir mekanizmaya sahip değildir. Bu nedenle sistemde kalıcı yerdeğiştirmeler meydana gelebilir. Sistem şimdiye kadar sadece bir kez, Güney Afrika Cumhuriyeti'ne bağlı Koeberg şehrinde inşa edilen büyük bir nükleer elektrik santralinde uygulanmıştır.

EDF sisteminin şematik modeli Şekil 7.9.a'da, kuvvet-yerdeğiştirme davranışı Şekil 7.9.b'de verilmiştir.



Şekil 7.9 Electricite-de-France Sistemi (EDF)

7.1.3.2. EERC Bileşik Sistemi

Kauçuk esaslı ve kayıcı sistemin kombinasyonuyla oluşturulmuş bir sistemdir. Yapının iç kolonları teflon kaplı paslanmaz çelikten yapılmış kayıcı elemanlar tarafından taşınır. Dış kolonlar düşük sönümlü doğal kauçuk mesnetler üzerindedir. Kauçuk mesnetler yapının burulma davranışını kontrol ederler. Kayıcı elemanlar ise sönüm yaratır.

Bu sistemin bir başka şekli, hem Nevada Üniversitesi Maden Fakültesi binası, hem de Kaliforniya eyaletine bağlı Willowbrook'ta inşa edilen "M.L. King, Jr. Travma Teşhis ve Tanı Merkezi Hastanesi" binasının güçlendirilmeleri için kullanılmıştır. Her iki yapıda, yüksek sönümlü doğal kauçuk izolatörler (HDNR) kullanılmıştır. Üniversite binasında, teflon yüzeyli, paslanmaz çelikten kayıcı elemanlar kullanılırken, hastane binası için ise paslanmaz çelik üzerinde kurşun-bronz alaşımlı levhalar kullanılmıştır.

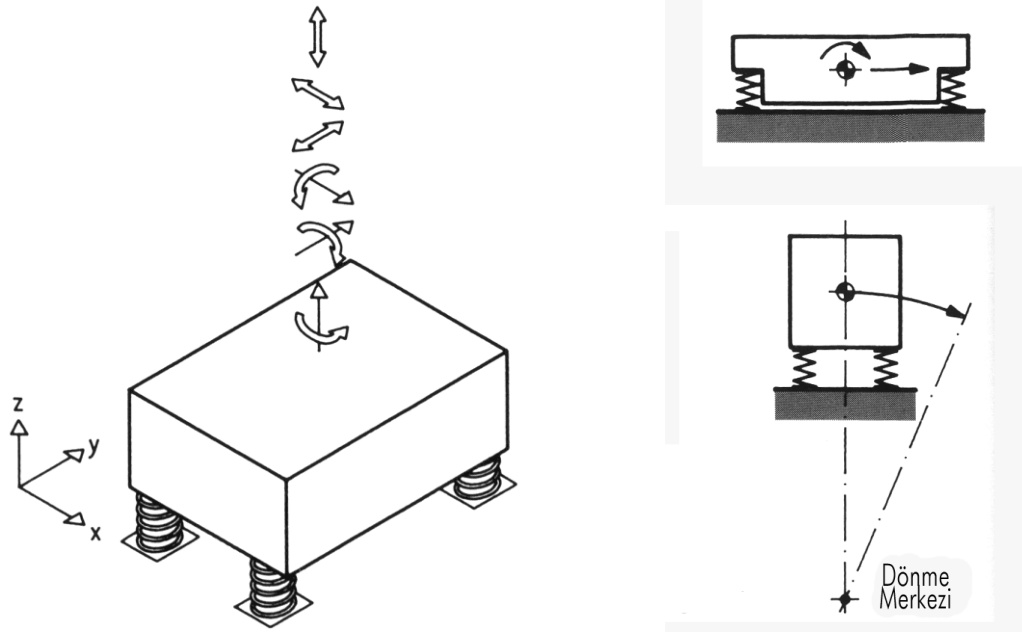
7.1.4. Yay Tipi Sistemler

Kauçuk esaslı ve kayıcı izolasyon sistemleri, genellikle yatay yönde izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılırlar. Eğer düşey yönde de izolasyon sağlanmak isteniyorsa kullanılması tercih edilen izolasyon sistemleri, sarmal yaylardan oluşan izolasyon sistemleridir.

Sarmal yaylardan oluşan sismik izolasyon sistemleri, genellikle enerji santralleri ve fabrikalar gibi tesislerdeki büyük makinelerin yapıda yaratacağı titreşimi önlemek için kullanılır.

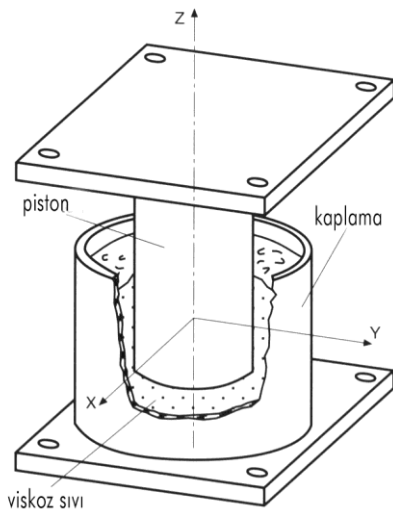
Bu tip sistemlerde, yaylar düşey harekette yatay harekete göre çok fazla rijit değillerdir. Buna karşılık tabakalı kauçuk mesnetlerin düşey rijitliği, yatay rijitliğin birkaç yüz katı olabilmektedir. Sarmal yaylardan oluşan sistem, üzerindeki binayı yer hareketinin düşey bileşeninden de bir dereceye kadar ayırır (Şekil 7.10).

Çekme gerilmesi taşıyamayan çelik yaylarda salınma hareketinin neden olacağı çekme gerilmesi problem olabilmektedir. Bu nedenle de hem çekme hem de basınç kuvvetini taşıyabilecek viskosönümlü yaylar üretilmiştir. Bu yaylar aynı zamanda standart titreşim problemlerinde deprem rezonans amplifikasyonunu sınırlandırmaktadır



Şekil 7.10 Yay Sistemi Serbestlik Dereceleri

Viskosönüm, iki ayrı parçadan oluşmaktadır. Yüksek viskoz sıvıyla doldurulmuş yuva temele montajlanır. Sönümün diğer bir parçası da yayla mesnetlenmiş yapıya civatalanmış pistondur (Şekil 7.11). Piston, viskoz sıvı nedeniyle, kesmeye göre tüm serbestlik derecelerinde hareket edebilmektedir. Bu yolla mekanik enerjiyi, ısı enerjisine dönüştürebilmektedir. Bu matematik modelleme bakımından oldukça karmaşıktır. Viskoz sönümle birlikte sistemde, %20-30 civarlarında düşey doğrultuda kritik sönüm sağlanabilmektedir. Basınca çalışan çelik yayların üst ve altlarından çelik plakalara vidalanmasıyla çekmeye karşı çalışması da sağlanmış olur.



Şekil 7.11 Viskosönüm Detayı ve Viskosönümlü Yay Sistemi

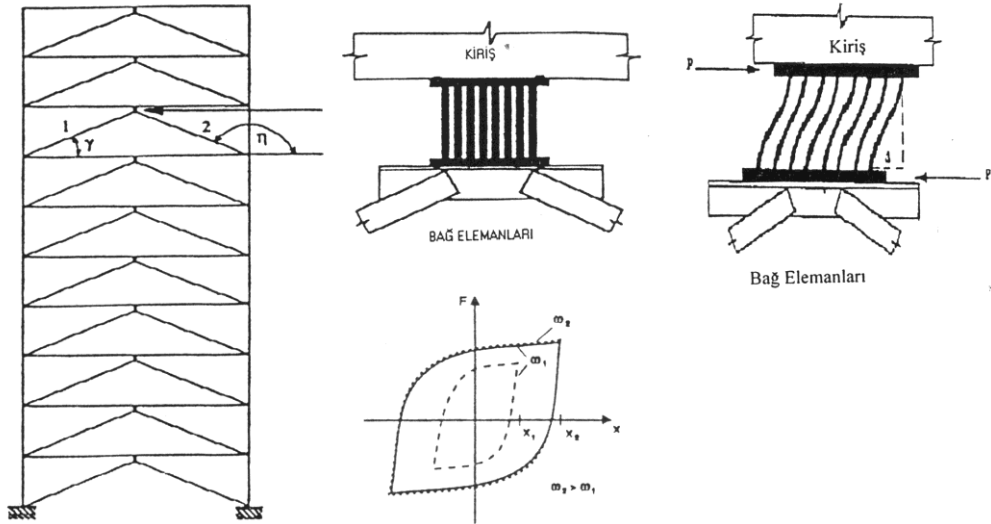
7.2. Pasif Enerji Sönümleyiciler

Pasif enerji Sönümleyiciler; deprem ve şiddetli rüzgar gibi dış etkilerin yapıya verdiği enerjiden dolayı oluşan kesit zorlarını ve yer değiştirmeleri istenilen düzeyde tutmak için geliştirilmiş mekanik aletlerdir.

Enerji sönümlemek; kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştürmek veya enerjiyi titreşim modlarına transfer etmek şeklinde olabilir. Birinci yol sürtünme katsayısıyla, metallerin eğilmesiyle, metallerin faz değiştirmesiyle, viskoelastik katı ve sıvıların deformasyonu ile olabilir. İkinci yol ise yapıya sarkaç ilave ederek, sarkacın dinamik sönümleyici gibi davranmasını sağlayarak gerçekleştirilebilir.

7.2.1. Eğilmeli Metal Sönümleyiciler

Binaya yerleştirilen yumuşak çelik elemanların elastik olmayan deformasyon yapması sonucu enerji yutulur. Enerjinin belli noktalarda yoğunlaşması sağlanır ve bu sayede taşıyıcı sistem zarar görmez. Şekil değiştirmiş araçlar daha sonra sökülebilir ve yerine yenisi takılabilir. Bu sistem için bükülebilen kiriş, esnek kiriş, U-şerit enerji sönümleyici gibi bir çok eleman geliştirilmiştir.

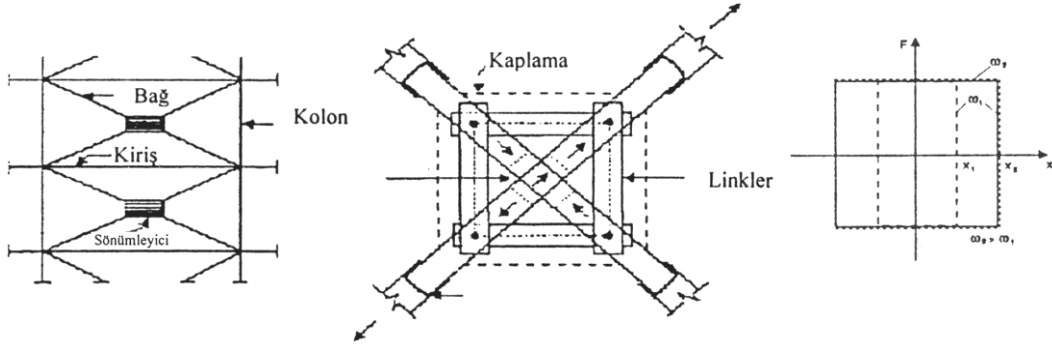


Şekil 7.12 Eğilmeli Metal Sönümleyiciler ve Kuvvet-Deformasyon Diyagramı

7.2.2. Sürtünmeli Sönümleyiciler

Sürtünmeli araçlar yapıya eklenen elemanlar aracılığı ile hareketin kinetik enerjisini ısı enerjisine dönüştürürler. Bu elemanlar yapıdaki kuşaklamalar arasına koyulan

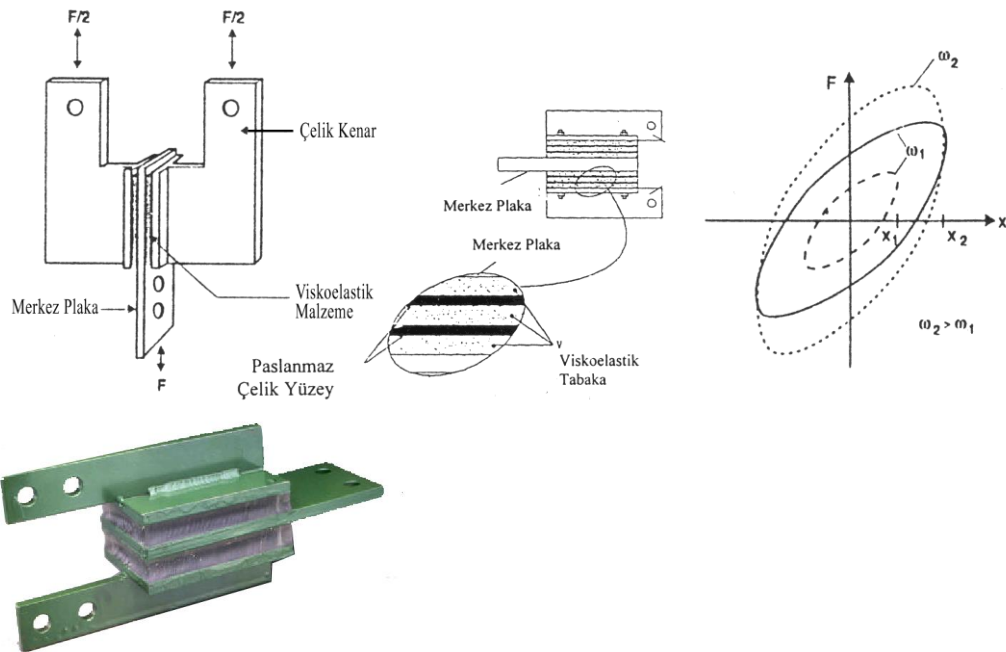
enerji yutuculardır. Elemanlardaki kayma sürtünmesi aracılığı ile sönüm sağlanır. Kuşaklamalar belli bir miktar yük taşıırken, kalan yükler de düzlem çerçeveler tarafından taşınır. Enerjinin yapı içinde dağılması sayesinde sönüm kapasitesinde önemli artış sağlanır.



Şekil 7.13 Sürtünmeli Sönümleyiciler ve Kuvvet-Deformasyon Diyagramı

7.2.3. Viskoelastik Sönümleyiciler

Metalik ve sürtünmeli araçlar öncelikle sismik etki için tanımlanmıştır. Diğer taraftan viskoelastik katı maddeler her seviyedeki deformasyon enerjisini azaltmak için kullanılabilir. Dolayısıyla viskoelastik sönümleyiciler hem rüzgar hem de depreme karşı korumada kullanılabilir.



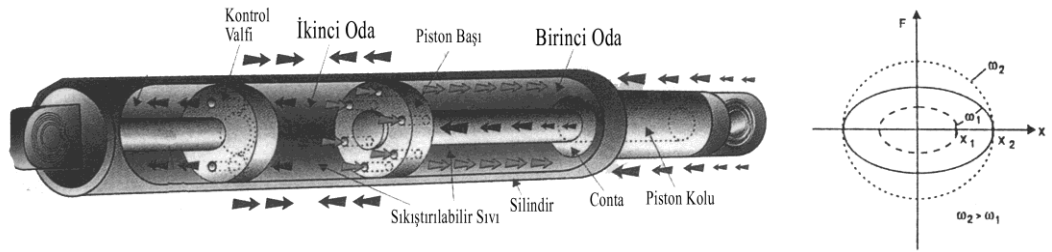
Şekil 7.14 Viskoelastik Sönümleyiciler ve Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı

Metalik ve sürtünmeli sönümleyicilerden farklı olarak viskoelastik sönümleyici içeren lineer yapı lineer kalmaktadır, inşaat mühendisliğinde kullanılan viskoelastik

malzemeler genelde copolimer veya camsı maddelerdir. Sönümleyiciler viskoz sönümün artmasına yardımcı olduğu gibi yanal rijitliği de artırır.

7.2.4. Viskoz Sönümleyiciler

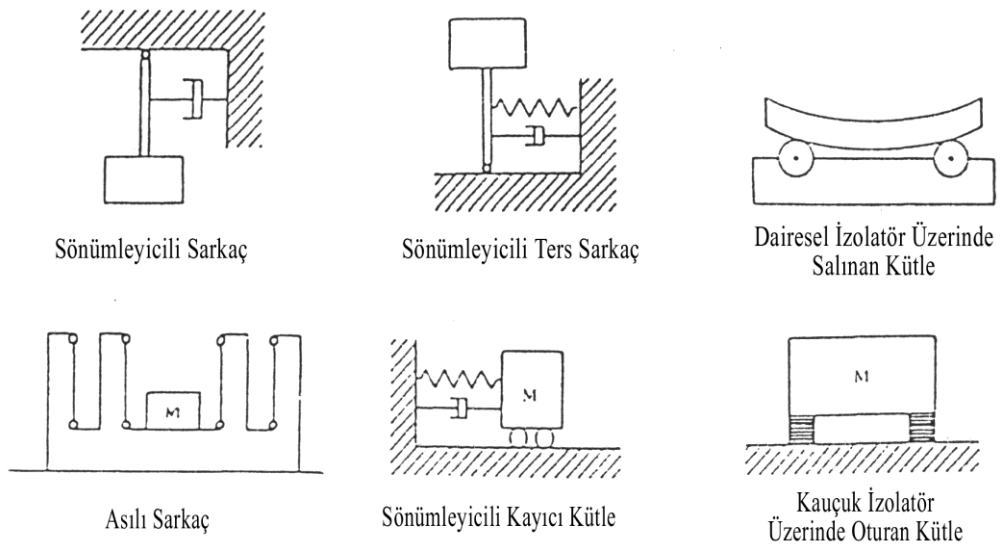
Viskoz sönümleyiciler genelde silikon veya yağın bir bileşeni ile dolu olup içlerinde piston bulundurmaktadırlar. Viskoz malzemenin geniş frekans aralığında etkili olması, ısıya duyarlı olması ve darbe etkisine karşı sıkıştırılamıyor olması gibi özellikleri bu malzemenin yapı uygulamalarında kullanılmasında etkili olmuştur. Viskoz sönümleyiciler uzun yıllar boyunca uzay çalışmaları ve askeri alanlarda, sonra otomotiv sektöründe kullanılmış olup, günümüzde yapı uygulamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır.



Şekil 7.15 Viskoz Sönümleyiciler ve Kuvvet-Yerdeğiştirme Diyagramı

7.2.5. Ayarlı Kütle Sönümleyiciler (TMD)

Ayarlı kütle sönümleyiciler (Tuned Mass Damper), yapının dinamik davranışını istenen şekilde değiştirerek deprem etkilerinin hafifletilmesini sağlar.



Şekil 7.16 Ayarlı Kütle Sönümleyici Tipleri

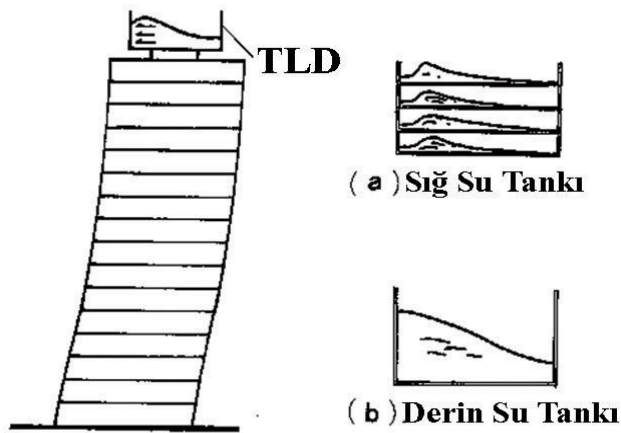
Bu sönümleyiciler frekansa bağlı bir hareket oluşturup yapının sürtünmesini artıran, yay ve sürtünme elemanları ile uyumlu ikincil bir ağırlık içermektedir. Rüzgar etkisi altındaki yapılarda başarısı kanıtlanmıştır. Son yıllarda depremdeki etkisini artırmak için sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 7.17’da bir otel binasının çatısında yapılan uygulama fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 7.17 Ayarlı Kütle Sönümleyici Uygulama Fotoğrafı

7.2.6. Ayarlı Sıvı Sönümleyiciler (TLD)

Ayarlı sıvı sönümleyiciler (Tuned Liquid Damper) de, ayarlı kütle sönümleyicilerine benzer olarak yapıya endirekt sönüm verip yapının performansını artırır. Yapının enerjisini akışkanın viskoz hareketi ve dalga kıranlarla azaltır. Çalışmalar sonucu rüzgarın neden olduğu titreşimlere karşı pratik uygulamalar geliştirilmiştir.



Şekil 7.18 Ayarlı Sıvı Sönümleyici

8. AKTİF KORUMA TEKNİKLERİ

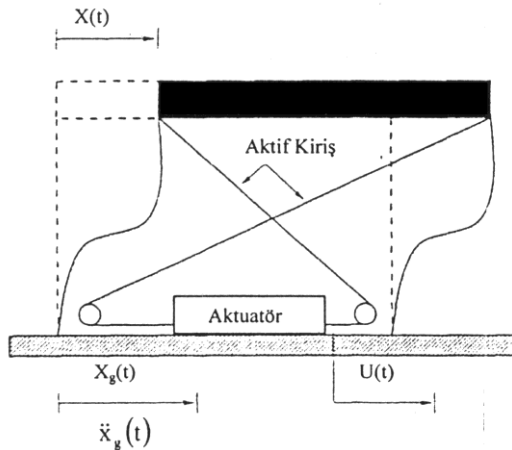
8.1. Aktif Kontrol Sistemlerinin Çeşitleri

Yapıların kontrolü için birçok sistem geliştirilmiştir. Bunlar:

- Aktif Kiriş Kontrolü
- Aktif Kütle Sönümleyicisi
- Yerçekimi-Harekete Geçirici Sistem
- Aktif Rijitlik Değiştirici

8.1.1. Aktif Kiriş Kontrolü

Aktif kiriş kontrol sistemi, gerilimi elektrohidrolik mekanizma tarafından kontrol edilen binaya bağlanmış öngerilmeli kirişlerden oluşmaktadır. Kontrol bilgisayarına binanın çeşitli yerlerine yerleştirilmiş sensörlerden sinyaller gönderilir. Kontrol bilgisayarı bu sinyalleri değerlendirir ve çeşitli hesaplamalar yaparak aktuatöre sinyaller gönderir. Aktuatör kontrol bilgisayarından gelen bu sinyaller doğrultusunda binaya, dış etkiyi azaltacak yönde kuvvetleri uygular. Aktif kiriş kontrolünde kontrol kuvvetleri binaya direkt uygulanır [11].



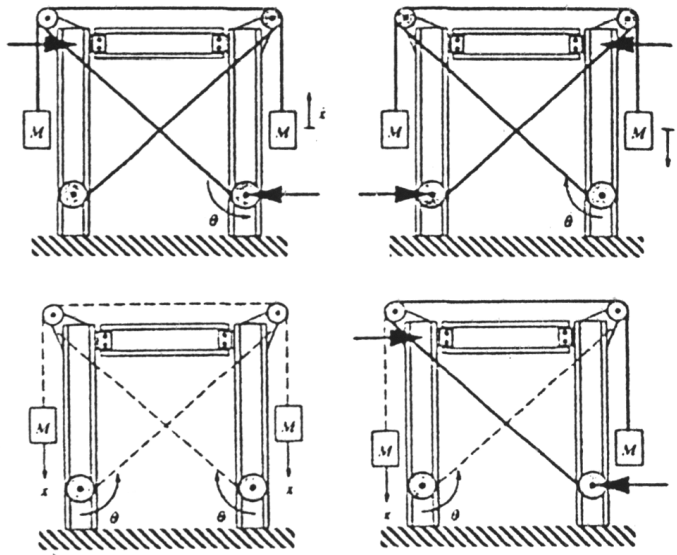
Şekil 8.1 Aktif Kiriş Kontrolü

Aktif kiriş kontrol sisteminin tercih edilmesinin sebeplerinden bir tanesi kirişlerin birçok binada zaten mevcut olmasıdır. Böylece mevcut kirişler kullanılmak suretiyle

Ancak bina büyüdükçe ve depremin şiddeti arttıkça sistemi çalıştırmak için gereken güç artmaktadır. Bu iki sistemin bir diğer dezavantajı da sistemin çalışması için sürekli bulundurulması gereken dış enerjidir [11].

8.1.3. Gravity-Actuator (Yerçekimi-Harekete Geçirici) Sistem

Sistemin amacı yapıyı sismik etkiye karşı minimum enerji gereksinimi ile korumaktır. Aktuatör ve düşey yönde hareket edebilen yardımcı bir kütleden oluşmaktadır. Kütle elastik bir kablo ile bağlanıp iki tane makaradan geçtikten sonra altta bulunan toplama makarasına ankre edilmiştir. Toplama makarası, makaraya sarılmış kablodan ve motor/fren ünitesinden oluşur. Motor/fren ünitesi makarayı dolayısıyla yardımcı kütleyi serbest bırakabilir, ivmelendirebilir veya frenleyebilir.



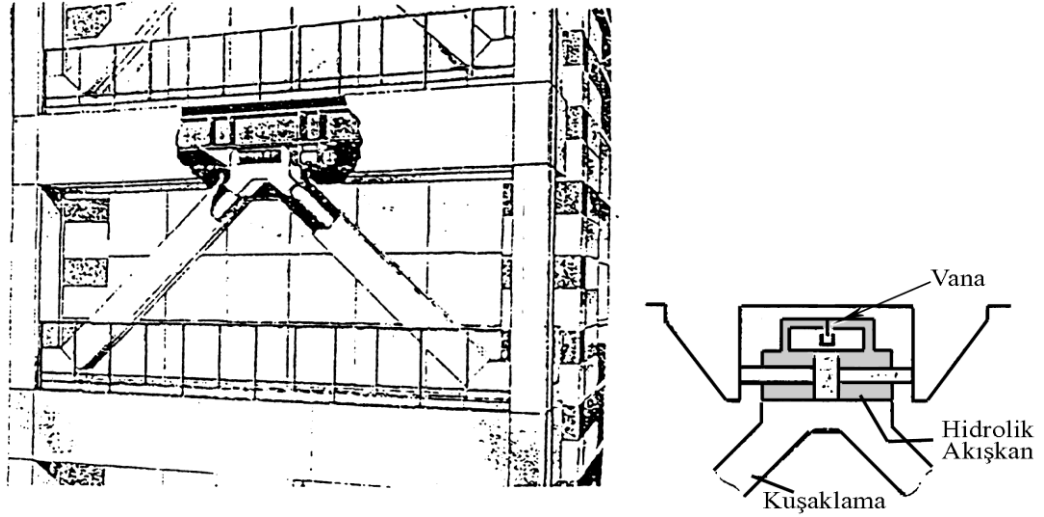
Şekil 8.3 Kütlelerin İvmelendirilmesiyle Oluşan Kuvvet Çiftleri

Tam bir gravity-actuator sistemi çerçevenin her iki yanına yardımcı kütlelerin yerleştirilmesi ile olur. Her iki yana yerleştirilen kütleler birbirine eşit olursa kontrol sistemi durağan ve kablolardaki gerilmeler de birbirine eşit olur. Kablolardaki gerilimi değiştirmek için motor/fren ünitesi aracılığı ile yardımcı kütleler düşey yönde ivmelendirilir. Bu ivmelenmeden dolayı kablolardaki kuvvetlerde değişiklik meydana gelir. Dolayısıyla kuvvetlerde oluşan bu değişiklik ile titreşimin kontrol edilmesi için kuvvet çiftleri oluşturulur. Örneğin aktuatör yardımı ile sağ taraftaki kütle yukarı doğru ivmelendirilirse sağ kablodaki gerilme artar ve saat yönünde, yatay kuvvet çifti oluşur. Aynı şekilde sağ taraftaki kütle serbest bırakılırsa sağ

kablodaki gerilme azalır ve saat yönüne ters, yatay kuvvet çifti oluşur. Her iki durumda da sol taraftaki kütle sabit kalmaktadır [11].

8.1.4. Aktif Rijitlik Değiştirici

Aktif rijitlik değiştirici, sistem rijitliğinin depremin doğasına göre değiştirilmesi yoluyla, yapıyı dış etkilerden korumayı amaçlamaktadır. Koruma, kontrol bilgisayarından gelen sinyallere göre bağ ve kiriş arasındaki bağlanma şartları değiştirilerek sağlanır. Aktif rijitlik değiştiren araç iki ucu kapalı hidrolik silindir ve iki silindiri birbirine bağlayan bir vanadan oluşur. Vananın açık veya kapalı fonksiyonu yağın hareketi ile kontrol edilir. Bağ ve kiriş arasında vananın açık veya kapalı olması her kat için iki ayrı rijitliğin oluşmasına neden olur.



Şekil 8.4 Aktif Rijitlik Değiştirici

Aktif rijitlik değiştirici araçlardaki vanaların çalışması için gerekli enerji çok azdır. Bu da aktif kontrol sistemlerinin enerji problemine önemli bir çözüm olmuştur [11].

8.2. Aktif Kontrolün Dezavantajları

Yapıların, deprem etkilerine karşı korunmasında aktif kontrol sistemlerinden olumlu sonuçlar elde edilmesi gelecek için oldukça umut vericidir. Ne var ki, bu sistemleri yapı kontrolünde pratik olarak kullanılabilmesi için halledilmesi gereken bazı problemler vardır. Bunlardan önemli birkaçı;

- Yapıların maruz kaldıkları kuvvetlere karşı koyabilecek şekilde gereken gücün yaratılması sorunu

- Söz konusu olan bu gücü yaratacak olan ve aktif kontrol sistemini çalıştıracak olan enerjinin sürekli hazır bulundurulması gerekliliği
- Sistemin hem kurulum, hem de işletim ve bakım maliyetlerinin yüksek olmasıdır.

Aktif kontrol sistemleri ideal durumdaki sistemler için geliştirilmiştir. Yukarıda bazıları sayılan problemler haricinde, uygulama esnasında karşılaşılabilecek birçok problem vardır. Bunlardan en önemlileri aşağıda açıklanmıştır :

8.2.1. Modelleme Hataları

İnşaat mühendisliğinde yapılar yayılı kütleli sistemlerdir. Bazı istisnalar dışında analitik olarak hesaplanmış veya simule edilmiş kontrol mekanizmalarının sonuçları genellikle basitleştirilmiş yapı modelleriyle elde edilmişlerdir. Kontrol sistemlerinde binalar öncelikle yayılı kütleli sistemden çok serbestlik dereceli sistem (MDOF) sistem haline indirgenir. Daha sonra çok serbestlik dereceli bu yapılar daha az serbestlik dereceli yapı haline getirilir. Kontrol sistemleri projelendirilirken hesaplamadaki zorluklardan dolayı yapılar az serbestlik dereceli olarak kabul edilir.

Az serbestlik dereceli sistemler olarak kabul edilen yapılar için geliştirilen kontrol mekanizmaları gerçek sistemlere uygulandığında kontrol ve gözlem hataları olabilmekte, stabilize sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu şekilde meydana gelen gözlem ve kontrol hataları, kontrol sisteminin performansında düşüşe neden olmaktadır. Bunları azaltmak için projelendirme aşamasında değişiklikler yapmak gerekir.

Hataları minimize etmek için en uygun yöntem, sensör ve kontrol elemanlarını sahte modların sıfır olduğu yerlere koymaktır. Bu elemanların konumlarının belirlenmesinde genellikle bütünüyle serbest olunmadığı için pek kolay bir yöntem değildir. Uygulanabilecek diğer bir yöntem ise sensör ve durum değerlendirici arasına artık modlardan kurtulmak için filtre yerleştirmektir. Bu yöntem de, özellikle artık modların birbirlerine yakın olarak sıralandığı durumlarda pek verimli değildir.

8.2.2. Zaman Gecikmesi

Kontrol sistemlerinde, yapılan tüm işlemlerin (Şekil 6.1) aynı anda yapıldığı varsayılmakla birlikte, aslında ölçme, ölçülen değerlerin işlenmesi, gerekli kontrol kuvvetlerinin hesaplanması ve uygulanması arasında bir süre geçmektedir. Bu zaman

gecikmesi kontrol kuvvetlerinin uygulanmasında gecikmeye yol açmaktadır. Söz konusu bu gecikme sadece kontrol sisteminin veriminde azalmaya yol açmaz, bazen sistemin stabilitenin bozulmasına da yol açabilir.

8.2.3. Yapının Lineer Olmaması

Aktif kontrol sistemleri genellikle yapıların lineer olduğu kabulü ile hareket etmektedirler. Ancak gerçekte, güçlü deprem etkisi karşısında yapılarda büyük deformasyonlar ve nonlinear davranışlar görülmektedir. Kontrol sisteminin veriminin düşmesine yol açan bu problemi yok etmenin yolu, bazen hesabı büyük ölçüde güçleştirse de nonlinear özellikleri de hesaba katarak analiz yapmaktır.

8.2.4. Yapı Parametrelerindeki Belirsizlikler

Aktif kontrol sisteminin algoritmaları ve yapının performansı kütle, rijitlik ve sönüm oranı gibi yapı parametrelerine bağlıdır. Kontrol sistemi projelendirirken kabul edilen bu parametreler, yapı inşa edildiğinde ortaya çıkan gerçek parametrelerle aynı olmaz. Kontrol sisteminin bu parametrelere ne kadar hassas olarak bağlı olduğu düşünülürse aradaki küçük bir farkın sonuca büyük olumsuz etkileri olabileceği kolaylıkla söylenebilir.

8.2.5. Sensör ve Kontrol Eleman Sayısının Sınırlı Olması

Yapıda kullanılacak sensör ve kontrol elemanlarının sayısı, bu elemanlardaki artışın gerek uygulama gerekse maliyet açısından ortaya çıkarabileceği sorunlar nedeniyle sınırlı kalmaktadır.

Kontrol algoritmaları geliştirilirken bu sensör ve kontrol elemanlarının sayısı keyfi olarak seçilse bile yanıtlanması gereken iki önemli soru ile karşı karşıya kalınmaktadır :

- Yapının tam olarak gözlenebilmesi ve kontrol mekanizmasının verimli ve yeterli bir biçimde çalışabilmesi için gerekli minimum sensör ve kontrol elemanı sayısı nedir?
- Bu eleman sayısı ile maksimum kontrol sağlayabilmek için bu sensör ve elemanların nereye yerleştirilmesi gerekir?

Bu soruların yanıtları algoritmadaki matrislerin incelenmesiyle bulunmaktadır fakat pratikte bu sayı yeterli gelmemekte ve daha çok sensör ve kontrol elemanına ihtiyaç duyulmaktadır.

8.3. Karma ve Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Pasif kontrol sistemleri, sistemde istenmeyen titreşimleri azaltmak için kullanılan basit, ucuz ve güvenilir sistemlerdir. Fakat sabit sönümleyiciler oldukları için performansları kısıtlıdır. Dar bir bantta frekansı azaltabildikleri gibi sabit olmayan dış etki karşısında da verimli değildirler.

Aktif kontrol sistemleri, yüksek ve narin yapılar için uygundur. Tek bir aktif kontrol elemanı örneğin aktif kütle sönümleyici dış etkinin çok sayıda doğal modu için projelendirilebilir. Ancak tüm bu sistemler rüzgar ve orta şiddetteki depremler için uygundur. Aktif kontrol sistemlerinin şiddetli depremlerde kullanılabilmesi için çözülmesi gereken birçok sorun vardır. Bunlar;

- Güçlü depremlere karşı koyabilecek büyük kontrol kuvvetlerinin elde edilmesi;
- Yapının ömrü boyunca gerekli sermaye ve bakım masrafları;
- Kontrol kuvvetlerinin oluşturulması için gerekli dış güç kaynağının sağlanması;
- Büyük kontrol kuvvetinin yapının stabilitesini bozma olasılığının varlığıdır.

Karma ve yarı aktif kontrol mekanizmaları bu sorunların bazılarının çözümünde umut verici gelişmeler sağlamışlardır.

Karma kontrol sistemleri; aktif ve pasif kontrol sistemlerinin birlikte kullanılması olarak tanımlanabilir. Yarı aktif kontrol sistemi ise pasif kontrol sistemlerinin güvenilirliğini artıran aynı zamanda aktif kontrol sisteminin çok yönlülüğünü ve kendini adapte edebilme özelliğini birleştiren sistemler olarak tanımlanabilir.

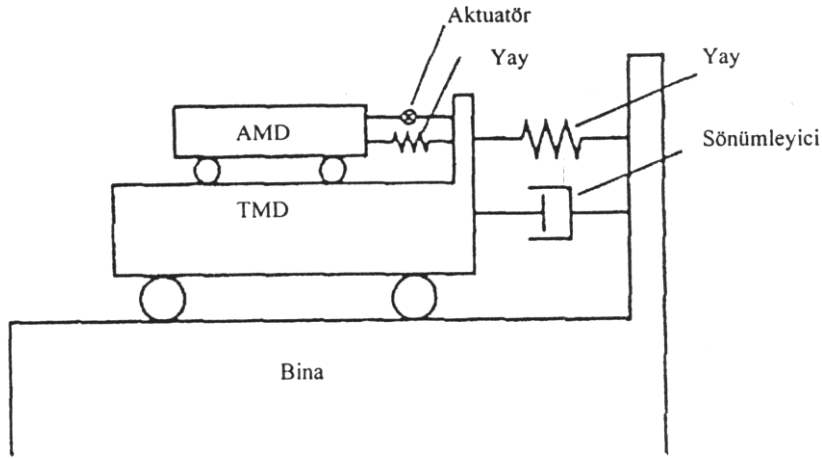
8.3.1. Karma Kontrol Sistemleri

Karma kontrol sistemleri daha verimli, avantajlı ve daha pratiktir. Bu sistem, hem pasif hem de aktif sistemlerin avantajlarını birleştirdiğinden yapının güvenliğini artırmak için daha geniş bir alanda uygulanabilir. Karma kontrol sistemlerinde iki ayrı sistemin birlikte kullanılmasından dolayı sistemlerin tek tek kullanılması ile oluşan sınırlamalar hafifleyebilir. Dolayısıyla yüksek performans elde edilebilir.

Ayrıca daha karmaşık olmasına karşın karma kontrol sistemlerinin sonuçları daha güvenilirdir. Karma kontrol sistemleri üzerindeki çalışmalar karma kütle sönümleyici ve karma sismik izolasyon olmak üzere iki konuda yoğunlaşmıştır.

8.3.1.1. Karma Kütle Sönümleyiciler (HMD)

Karma kütle sönümleyiciler (Hybrid Mass Damper), ayarlı kütle sönümleyici (TMD) ve aktif kontrol elemanlarının birlikte kullanılmasıdır. Sistemin özelliği ayarlı kütle sönümleyicinin hareketinden kaynaklanan yapının karşılığını azaltmaktır. Aktif kontrol sisteminden verilen kuvvet HMD'nin verimini artırmak ve yapının dinamik karakterinde bir değişiklik olursa yapının güvenliğini artırmak için kullanılır. Tipik bir HMD için gereken enerji aynı etkiyi sağlayan aktif kontrole göre bir hayli azdır.



Şekil 8.5 Karma Kütle Sönümleyici (HMD)

8.3.1.2. Karma Sismik İzolasyon (HSI)

Karma sismik izolasyon (Hybrid Seismic Isolation), pasif sismik izolasyon ile aktif kontrol sisteminin bir arada kullanılmasıdır. Sismik izolasyon sistemi basit, güvenilir ve etkili bir kontrol sistemidir. Fakat pasif kontrol sistemi olduğu için deprem etkisine karşı kendini adapte edebilme yeteneği sınırlıdır. Aktif kontrol mekanizmasının taban izolasyonlu binaya ilavesi ile yüksek performans kapasitesine ulaşılır. Ayrıca maliyette ciddi bir artış olmamaktadır.

8.3.2. Yarı Aktif Kontrol Sistemleri

Yarı aktif kontrol elemanları kontrol edilebilen pasif elemanlar olarak görülür. Yapıların deprem ve rüzgar yüklerine karşı korunmasında, pasif ve aktif kontrol

sistemlerinin en önemli özelliklerinin bir araya gelmesi ile oluşur. Yarı aktif kontrol bir çeşit aktif kontrol olup gerekli dış enerjinin büyüklüğü tipik aktif kontrol sistemine göre daha azdır. Hatta gerekli enerji pille sağlanabilecek kadar azdır. Deprem esnasında ana güç kaynağının zarar görme olasılığı düşünüldüğünde bu önemli bir özelliktir.

Yarı aktif kontrol elemanları sisteme mekanik enerji yüklemeyiz. Dolayısıyla giriş ve çıkış stabilitesi sabittir. Çalışmalar uygun kullanılan yarı aktif kontrol sisteminin pasif kontrol mekanizmasına göre daha iyi olduğunu, ve aktif kontrol sisteminin performansına yakın bir performans sağlayabileceğini göstermiştir.

9. SAP 2000 PROGRAMINDA NLLINK ELEMAN MODELLEME

1970’li yılların başlarında kullanılmaya başlanan ve günümüze dek sürekli geliştirilen, SAP (Structural Analysis Program) programı, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapıların üç boyutlu statik ve dinamik analizini yapmakta yaygın olarak kullanılan bir analiz ve tasarım programıdır. “SAP2000 Nonlinear” programında yapısal nonlinearlikleri tanımlamak için “Nllink Element” ve “Nllink Properties” olmak üzere iki seçenek vardır.

Bunlardan ilki modelde kullanılacak elemanın tipini belirler :

- LINEAR
- MULTI LINEAR ELASTIC
- GAP (Sadece basınç)
- HOOK (Sadece çekme)
- DAMPER (Viskoelastik sönümleyici)
- PLASTIC - WEN (Tek eksenli plastik)
- PLASTIC - KINEMATIC (Tek Eksenli plastik)
- RUBBER ISOLATOR (İki eksenli plastisiteye sahip sismik izolatör)
- SLIDING ISOLATOR (Sürtünmeli sarkaç sismik izolatör)

İkinci seçenek ise nonlinear elemanın özelliklerinin belirtildiği yerdir. Nonlinear davranış ancak nonlinear time-history analizi esnasında gözlenebilir. Diğer tüm analizlerde nonlinear eleman lineer davranacaktır. Her elemanın, her biri 6 deformasyonel serbestlik dereceli (eksenel, 2 kesme, burulma ve 2 eğilme) 6 ayrı yayın bir araya gelmesinden oluştuğu varsayılır. Bu yayların her birinin iki ana özelliği vardır.

- Lineer efektif rijitlik ve efektif sönüm özellikleri (Tüm lineer analizler için kullanılacak)

- Opsiyonel nonlinear kuvvet-deformasyon ilişkisi (Sadece nonlinear time-history analizinde kullanılacak)

Eğer bir serbestlik derecesi için bu opsiyonel nonlinear özellikler belirtilmemişse nonlinear time-history analizi için lineer rijitlik (sönüm değil) kullanılır. Lineer efektif sönüm sadece karşılık spektrumu ve lineer time-history analizi için kullanılır. Bu yayların kuvvet-deformasyon ilişkisi modelin davranış tipine bağlı olarak birbirlerine bağımlı ya da tamamen bağımsız olabilir.

Kuvvet-deformasyon özelliklerini belirtirken ve çıktıları yorumlarken her elemanın kendi lokal koordinat sistemi vardır. Yine her eleman yerçekimi ile (herhangi bir yönde) yüklenebilir.

6 serbestlik derecesinin özneliklerinin tümü “Nlprop” olarak adlandırılır. Her bir Nlprop bir ya da daha çok Nllink elemanı tarafından kullanılan kütle, ağırlık ve sayısı 6’ya kadar çıkabilen lineer ve nonlinear kuvvet-deformasyon ilişkisi ihtiva edebilir.

Nlprop, Nllink elemanlarının özelliklerini belirtir. Nlprop, Nllink elemanlardan bağımsız olarak tanımlanır ve daha sonra istenen Nllink elemanlar tanımlanırken referans gösterilir. Her Nlprop, 6 deformasyon için opsiyonel nonlinear kuvvet-deformasyon ilişkilerini belirtir. Bu nonlinear özellikler sadece nonlinear time-history analizi esnasında kullanılır. Aynı zamanda efektif rijitlik ve efektif sönüm özellikleri de belirtilebilir. Bu özellikler ise statik analiz, P-Delta analizi, modal analiz, hareket eden yük analizi, karşılık spektrumu analizi, harmonik steady-state analizi ve lineer veya periyodik time-history analizi olarak sayılabilen tüm lineer analiz türlerinde kullanılabilir.

Efektif rijitlik aynı zamanda nonlinear özelliklerin belirtilmediği durumlarda nonlinear time-history analizi sırasında da kullanılabilirken, efektif sönüm asla nonlinear time-history analizinde kullanılamaz. Ayrıca elemana ait kütle ve ağırlık özellikleri de burada belirtilebilir.

Her Nlprop’un, her biri 6 deformasyonel serbestlik dereceli 6 ayrı yayın bir araya gelmesinden meydana geldiği varsayılır. Bu yayların kuvvet-deformasyon ilişkisi modelin davranış tipine bağlı olarak birbirlerine bağımlı ya da tamamen bağımsız olabilir.

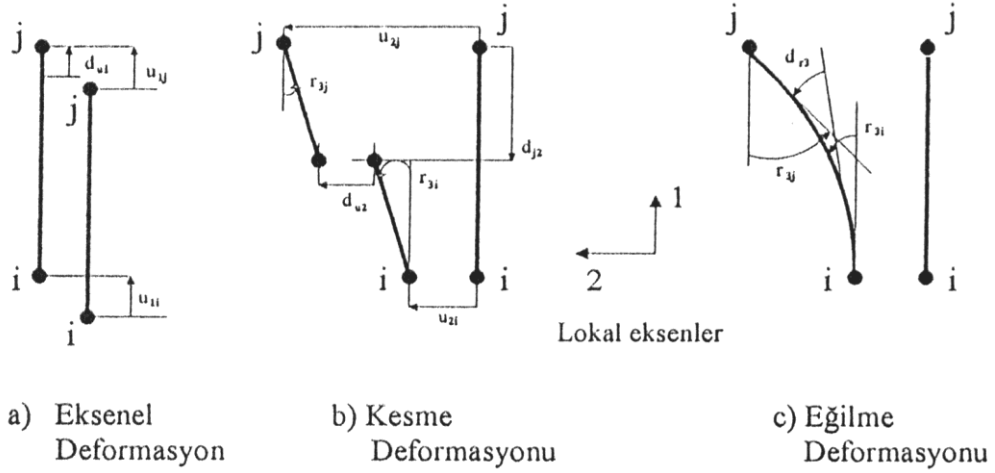
SAP2000 programında Nlink elemanlar, tek düğüm noktalı ve iki düğüm noktalı (yere mesnetlenmiş) olmak üzere iki tiptedir. Tek düğüm noktalı Nlink elemanların uzunluğu sıfır alınır ve 1 lokal koordinatı eksenel koordinattır. Z eksenini global eksen olmak üzere yukarı yön pozitif kabul edilir. İki noktalı izolatörlerde 1 lokal eksenini, i düğüm noktasını j düğüm noktasına bağlayan koordinat olarak alınmaktadır. 2 ve 3 lokal düzlemi, Z global eksenine paralel ve düşey olarak alınır. 3 lokal eksenini ise x-y düzlemine paralel ve daima yataydır. 2 lokal eksenini, global Z eksenine göre düşey iken, global X eksenini boyunca yatay olarak alınır.

u_{1i}, u_{2i}, u_{3i}	: i düğüm noktasındaki yerdeğiştirmeler
r_{1i}, r_{2i}, r_{3i}	: i düğüm noktasındaki dönmeler
u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}	: j düğüm noktasındaki yerdeğiştirmeler
r_{1j}, r_{2j}, r_{3j}	: j düğüm noktasındaki dönmeler
d_{j2}	: d_{u2} deformasyonunun olduğu yerin j ye uzaklığı
d_{j3}	: d_{u3} deformasyonunun olduğu yerin j ye uzaklığı
L	: Eleman uzunluğu

olmak üzere; iki düğüm noktalı izolatörlerde deformasyonlar aşağıdaki gibidir:

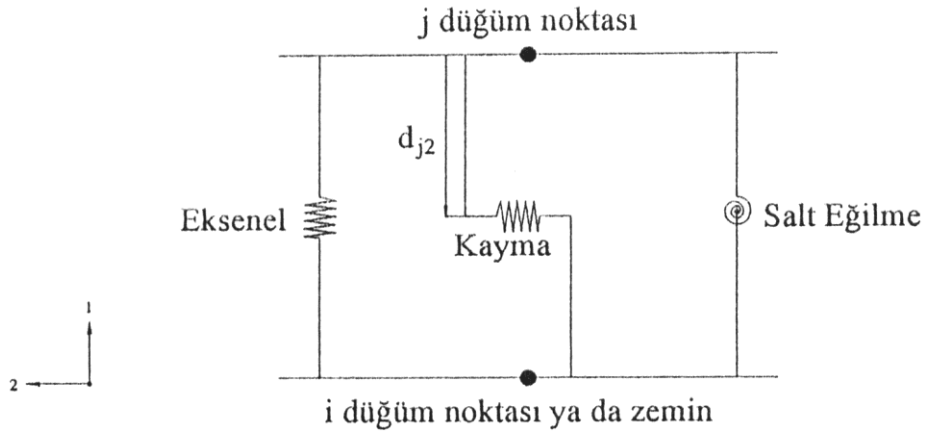
Eksenel	: $d_{u1} = u_{1j} - u_{1i}$
1-2 Düzleminde kesme	: $d_{u2} = u_{2j} - u_{2i} - d_{j2}r_{3j} - (L - d_{j2}) r_{3i}$
1-3 Düzleminde kesme	: $d_{u3} = u_{3j} - u_{3i} - d_{j3}r_{2j} - (L - d_{j3}) r_{2i}$
Burulma	: $d_{r1} = r_{1j} - r_{1i}$
1-2 Düzleminde salt eğilme	: $d_{r3} = r_{3j} - r_{3i}$
1-3 Düzleminde salt eğilme	: $d_{r2} = r_{2j} - r_{2i}$

Nlink elemanı için tanımlanan deformasyon şekilleri Şekil 9.1’de gösterilmiştir.



Şekil 9.1 Nlink Elemanı İçin Tanımlanan Deformasyon Şekilleri

Nlink elemanı için tanımlanan ve üzerinde serbestlik dereceleri yay elemanı Şekil 9.2’de gösterilmiştir.



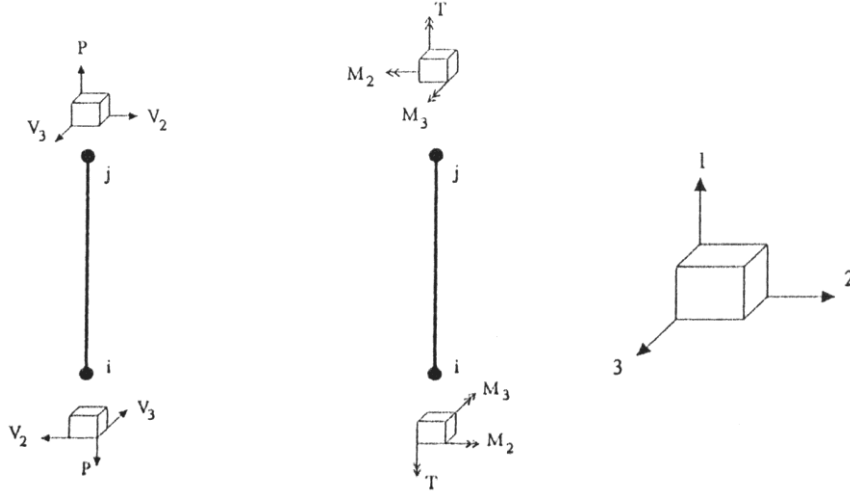
Şekil 9.2 Nlink Elemanı İçin Tanımlanan Altı Serbestlik Dereceli Yay Elemanı

Bu deformasyonlara karşılık gelen yay kuvvetleri, elemanın davranışını belirler.

Eksenel	: d_{u1} için f_{u1}
Kesme	: d_{u2} için f_{u2} ve d_{u3} için f_{u3}
Burulma	: d_{r1} için f_{r1}
Salt eğilme	: d_{r2} için f_{r2} ve d_{r3} için f_{r3}

Burada f_{u1} , f_{u2} , f_{u3} iç yay kuvvetleri; f_{r1} , f_{r2} , f_{r3} ise yay momentleridir. Bu kuvvetler sıfır, lineer ya da nonlinear olabildiği gibi bağımsız veya birbirleriyle etkileşimli olabilirler.

Eleman iç kuvvetleri P, V_2, V_3 ve iç momentleri T, M_2, M_3 çubuk elemanlardaki gibidir ve Şekil 9.3'te gösterilmiştir.



Şekil 9.3 Nlink Elemanında İç Kuvvet ve Momentler

Eksenel	: $P = f_{u1}$	
1-2 Düzleminde kesme	: $V_2 = f_{u2}$	$M_{3s} = (d-d_{2j}) f_{u2}$
1-3 Düzleminde kesme	: $V_3 = f_{u3}$	$M_{2s} = (d-d_{3j}) f_{u3}$
Burulma	: $T = f_{r1}$	
1-2 düzleminde salt eğilme	: $M_{3b} = f_{r3}$	
1-3 düzleminde salt eğilme	: $M_{2b} = f_{r2}$	

Kesme ve salt eğilme etkileri birlikte düşünülürse;

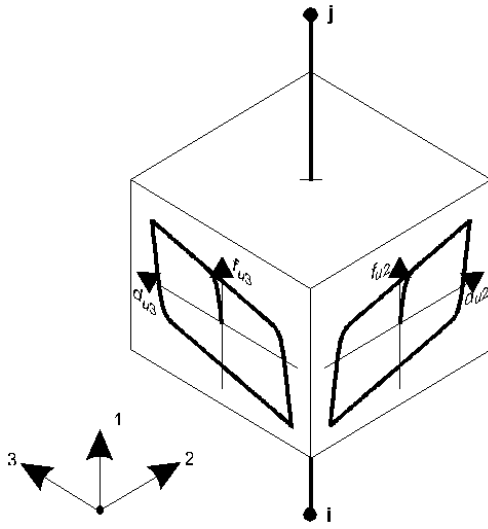
$$M_2 = M_{2s} + M_{2b}$$

$$M_3 = M_{3s} + M_{3b} \text{ olacaktır.}$$

Her bir iç yaya karşılık gelen serbestlik dereceleri için 6 adet lineer efektif rijitlik katsayısı belirlemek gerekir. Lineer efektif rijitlik katsayısı, Nlink elemanın toplam elastik rijitliğini ifade eder ve bu katsayı, statik analiz, P-delta analizi, modal analiz, hareketli yük analizi, davranış spektrumu analizi ve lineer ve periyodik zaman tanım alanında analiz gibi lineer analizlerin hepsinde kullanılır. Bu analiz tiplerinde, gerçek nonlinear özellikler dikkate alınmamaktadır. Ayrıca lineer efektif rijitlik, nonlinear zaman tanım alanında yapılan bir analiz sırasında tüm serbestlik dereceleri için, titreşim modlarının elde edilmesinde kullanılır [14].

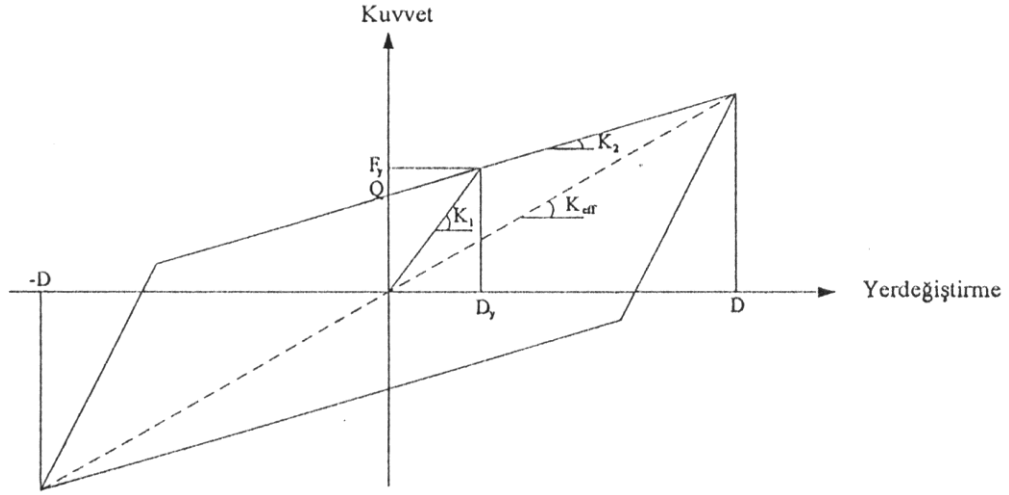
9.1. Rubber Isolator

Rubber Isolator; iki doğrultuda ortogonal ve etkileşimli kayma deformasyonları için plastik davranış gösteren ve diğer dört deformasyon için lineer efektif rijitlik gösteren, çift eksenli (biaxial) histeretik bir izolatördür. Bu tanımdaki histeretik kavramı, dış yükleme sonucunda elemanda oluşan iç kuvvet - şekil değiştirme ilişkisinin ortaya çıkardığı döngüsel tepki davranışdır. Her bir kayma deformasyonu serbestlik derecesi için, lineer veya nonlinear davranış tanımlanabilir. Rubber Isolator elemanının çift eksenli kayma davranışı Şekil 9.4'te görülmektedir.

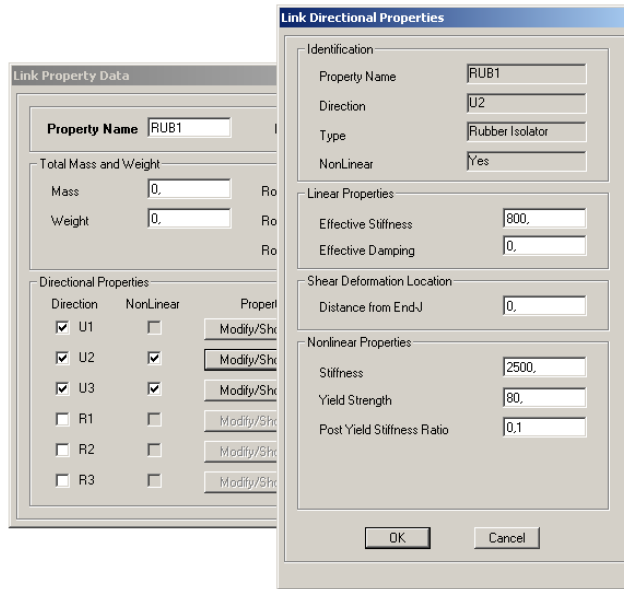


Şekil 9.4 Rubber Isolator Elemanının Çift Eksenli Kayma Davranışı

SAP2000'de tipik olarak düşük sönümlü kauçuk izolatörler LINEAR elamanı tanımlanarak modellenirken, kuvvet deformasyon eğrisi Şekil 9.4'te görüldüğü gibi olan yüksek sönümlü veya kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler RUBBER ISOLATOR elemanı ile modellenir. Rubber isolator elemanı modelleme sırasında nonlinear time history analizi yapılıyorsa; izolatörün lineer etkili rijitliği (K_{eff}), nonlinear başlangıç rijitliği (K_1), akma dayanımı (F_y) ve akma sonrası rijitlik oranı (K_2/K_1) girilmesi yeterli olmaktadır. Akma sonrası rijitliği (K_2) bu orandan faydalanılarak program tarafından bulunur (Şekil 9.5).



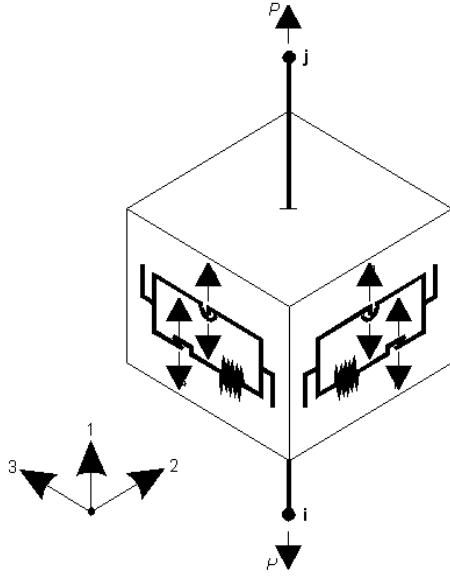
Şekil 9.5 İki Eksenli İzolatörlerin Modelleme Parametreleri



Şekil 9.6 Rubber Isolator Elemanının Modelleme Parametreleri

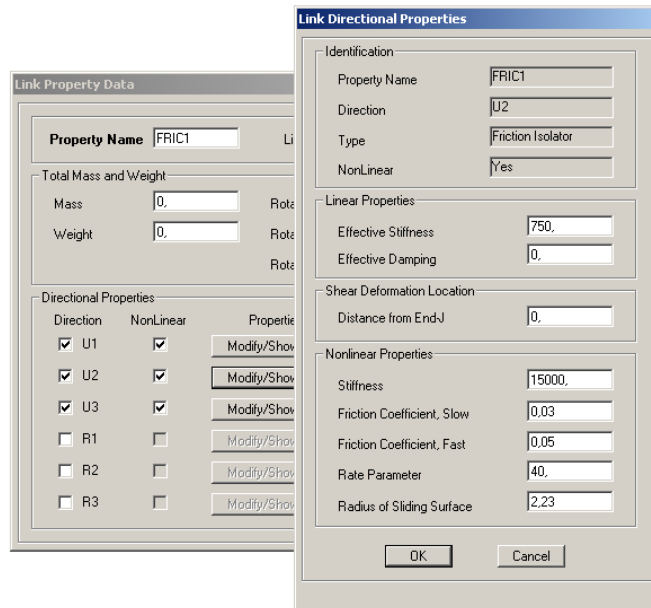
9.2. Sliding Isolator

Sliding Isolator; iki doğrultudaki ortogonal ve etkileşimli kayma deformasyonları için sürtünmeli davranış gösterir. Kayma doğrultularında kayıcı yüzeyin eğrilik yarıçapına bağlı olarak kayma sonrası rijitlik oluşturur. Bu izolatör, eksenel doğrultuda gap (sadece basınca çalışan) eleman davranışı gösteren ve moment deformasyonları için lineer efektif rijitlik özellikleri tanımlanan çift eksenli, sürtünmeli sarkaç tipteki izolatördür.



Şekil 9.7 Sliding Isolator Elemanının Sürtünmeli Sarkaç Kayma Davranışı

Sürtünme kuvvetleri ve sarkaç kuvvetleri, elemandaki eksenel basınç yükü ile doğru orantılıdır. Eleman çekme almaz. Eğer sürtünmeli sarkaç kullanılarak izole edilmiş yapıda devrilme momentleri etkili ise (örneğin plan düzleminde dar olan yapılarda) ve bazı kolonlarda çekme kuvveti oluşturuyorsa, modellemede Sliding Isolator elemanına ek olarak Hook (sadece çekmeye çalışan) tipindeki Nlink elemanları da aynı mesnette birlikte kullanılmalıdır [17]. Sliding Isolator elemanının sürtünmeli sarkaç kayma davranışı idealizasyonu Şekil 9.7'te gösterilmiştir.



Şekil 9.8 Sliding Isolator Elemanının Modelleme Parametreleri

Sliding isolator'da rubber isolator'dan farklı olarak; düşük ve yüksek hızlar için sürtünme katsayısı (friction coefficient), bu katsayılar arasındaki geçişi kontrol eden oran parametresi (rate parameter) ve sürtünmeli sarkacın eğrilik yarıçapı girilmelidir.

9.3. Damper

Damper; viskoz sönümleyicileri modellemek için kullanılan elamandır. Nonlinear time history analizi yapılırken tek eksenli nonlinear DAMPER elemanı olarak tanımlanabilen bu elemanlarda viskoz (hıza bağlı) sönüm için,

C, Sönüm katsayısı; V, hız; n, sıvının viskozitesine bağlı 0,1 ile 2 arasında bir katsayı olmak üzere

$$F=C.V^n \text{ bağıntısı geçerlidir.} \quad (9.1)$$

Nonlinear time history analizinde SAP2000 parametresi olarak C (damping) ve n (damping exponent) ve nonlinear rijitlik değerleri girilir. F kuvveti, adım adım hız değerlerine göre program tarafından hesaplanır [14], [17].

The image shows two overlapping dialog boxes from the SAP2000 software. The background dialog is 'Link Property Data' and the foreground dialog is 'Link Directional Properties'.

Link Property Data:

- Property Name: DAMP1
- Total Mass and Weight:
 - Mass: 0.
 - Weight: 0.
- Directional Properties:

Direction	NonLinear	Prc
☒ U1	☒	Modify...
☐ U2	☐	Modify...
☐ U3	☐	Modify...
☐ R1	☐	Modify...
☐ R2	☐	Modify...
☐ R3	☐	Modify...

Link Directional Properties:

- Identification:
 - Property Name: DAMP1
 - Direction: U1
 - Type: Damper
 - NonLinear: Yes
- Linear Properties:
 - Effective Stiffness: 0.
 - Effective Damping: 0.
- Nonlinear Properties:
 - Stiffness: 210000
 - Damping: 7000
 - Damping Exponent: 1.

Buttons: OK, Cancel

Şekil 9.9 Damper Elemanının Modelleme Parametreleri

10. SİSMİK İZOLASYON ŞARTNAMESİ GELİŞİMİ

10.1. A.B.D.’de Şartnamelerin Gelişimi

80’li yılların başlarına kadar Amerika’da sismik izolasyon olgusu yerleşmemişti. İzolasyon ürünleri gelişip piyasada kolay bulunabilir hale geldikçe araştırma projelerinin geliştirdiği pratik sonuçların da etkisiyle izolasyon olgusu ciddi biçimde dikkate alınmaya başlandı. Özellikle üstün sismik performans arayışında olan projeler bu tekniğin bir anlamda ilk müşterileri oldular. Kısa zamanda mühendisler bu yeni teknolojinin tasarımı ve inşasıyla ilgili standartlara, kamu otoriteleri ise uygulamaların uygun yapıp yapılmadığının denetlenebilmesi için yeni yasal hükümlere gereksinim duydu. Bu durum mevcut tasarım şartnamelerine sismik izolasyon gereksinimlerini karşılayacak ilaveler yapılması ihtiyacını doğurdu.

1985 yılında Amerika Bileşik Devletleri’nde, Structural Engineers Association of California (SEAOC) tarafından “Mavi Kitap” olarak bilinen, "Recommended Lateral Design Requirement and Commentary" yayımlanmıştı.

1986 yılında da “Sarı Kitap” olarak bilinen, "Tentative Seismic Isolation Design Requirements" (Sismik İzolasyon İçin Tavsiye Niteliğinde Tasarım Gereksinimleri) SEAOC’un alt komiteleri tarafından mavi kitabın 4. baskısının eki olarak yayımlandı. Bu şartnamedeki hükümler ve genel yaklaşımlar mavi kitaptakilerle çoğunlukla aynı olmakla birlikte, deprem yükleri 50 yıllık periyotta aşılma olasılığı %10 olan depreme göre alınmıştır. Bu kurallar International Conference of Building Officials (ICBO)’a sunuldu ve Uniform Building Code (1991)’e ek olarak ICBO tarafından kabul edildi. UBC’deki sismik izolasyonla ilgili olan bu ek, yıllık olarak çağın gerekleri doğrultusunda revize edildi. Geçerli son durum 1997 UBC’de yayınlanmıştır.

1991’de Federal Emergency Management Agency (FEMA) mevcut binaların sismik rehabilitasyonu için ulusal ve uygulanabilir bir kılavuz hazırlanması için 6 yıllık bir program başlattı. “The NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings” olarak bilinen bu kurallar FEMA-273 ve FEMA-274’te mevcuttur.

NEHRP Guidelines tasarım ve analiz yöntemleri esasları, güçlendirilmiş binaların üst yapıları için daha genel bir tasarıma izin verilmesi dışında yeni binalar için NEHRP Recommended Provisions tarafından istenen esaslara paraleldir.

Taban izolasyonlu hastane tasarımında, OSHPD-96 (The California Office of Statewide Health Planning and Development) tarafından geliştirilen, “An Acceptable Method for Design and Review of Hospital Building Utilizing Base Isolation” (Temel İzolasyon Kullanılacak Hastane Binalarının Tasarım ve Revizyonu İçin Uygulanabilir Bir Yöntem) bir diğer sismik izolasyon şartnamesidir. Genel olarak UBC ve SEAOC yönetmeliğindeki şartların aynısını içerir. Bu şartnameye göre, yer hareketi datalarının “California Department of Mines and Geology” (DMG) tarafından değerlendirilmesi ve onaylanması zorunluluğu vardır. Hem statik hem de dinamik analiz yapılmalı ve neredeyse tüm dinamik analizler zaman tanım alanında yapılan analizi de içermelidir. Tasarım şartlarında daha sınırlayıcı bir yaklaşıma sahiptir. Taban izolasyon sistemini izlemek ve gerekirse yenilemek için sisteme erişim, yapının ömrü boyunca sağlanacaktır. Her büyük şiddetli depremden sonra ve her on yılda bir, izolatörler test edilmek için demonte edilecektir.

1994 yılında UBC tarafından düzenlenen yönetmelik, statik analizi sınırlandırmış, ankastre mesnetli yapılar için kullanılan düşey yük yayılımını düzgün yükten üçgen yüke dönüştürmüştür.

1997 yılında tekrar gözden geçirilen UBC yönetmeliği son haline getirilmiştir.

Hem UBC-97 hem de OSHPD-96, yeni inşa edilecek yapılar için sismik izolasyon düzenlemelerini içerir, mevcut yapılarda yapılacak güçlendirme çalışmaları için şartları içermez. Güçlendirme projelerinde NEHRP (National Earthquake Hazards Reduction Program) “Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings” FEMA-273 ve FEMA-274 kullanılır [12].

10.2. Japonya’da Şartnamelerin Gelişimi

Japonya da Amerika Birleşik Devletleri gibi sismik izolasyonun kullanıldığı yerlerin başında gelmektedir. Japonya’da sismik izolasyonlu yapıların tasarımı ve inşası ile ilgili birçok kılavuz olmasına rağmen, yerleşmiş ve resmen kabul gören teknik şartname yoktur. Bu tür yapıların inşası halen İnşaat Bakanlığı’na bağlı “Taban

İzolasyonlu Yapılar Değerlendirme Komitesi”’nden alınan özel izinlerle mümkün olabilmektedir.

Japonya’da bakanlık adına “Japonya Yapı Merkezi (BCJ)’nin organize ettiği bir onay mekanizması vardır. Projeler her biri ortalama 20 üniversite profesöründen oluşan bu komitelerce onaylanmak zorundadır. Betonarme yapılar, çelik yapılar, sismik izolasyonlu yapılar ve yüksek yapılar (60 m ve daha yüksek) için olmak üzere, toplam 4 komite, periyodik olarak toplanarak tasarımcılardan ve inşaat şirketlerinden gelen başvuruları inceler ve değerlendirir. Betonarme veya çelik yapılar, ilgili komitenin değerlendirmesinin ardından eğer yüksek yapı sınıfına giriyorsa ve/veya sismik izolasyon içeriyorsa yine ilgili diğer komitenin değerlendirmesine sunulur. BCJ bu onay mekanizmasının yönetiminin haricinde periyodik olarak “The Building Letter” adında bir bülten yayınlar. Bu bültende onaylanan projelere ait bilgiler, dokümanlar ve tasarıma ait tavsiye niteliğinde kurallar bulunur ve gittikçe bir çeşit resmi olmayan şartname niteliği kazanmıştır. Tasarımcılar ve şirketler onay sorunu yaşamamak için genellikle bu tavsiyelere uyarlar. Bu onay süreci yaklaşık bir, bazen iki ay sürmekte, ve projenin büyüklüğüne göre ortalama 18.000\$’a mal olmaktadır.

1987 yılında Japonya Mimari Enstitüsü’nün (AIJ) taban izolasyonu ile ilgili olan alt komitesi “Recommendation for the Design of Base Isolated Buildings” adında bir tasarım kılavuzu hazırladı. 1993 yılında bu kılavuz oldukça kapsamlı bir şekilde geliştirildi fakat yine de resmi bir nitelik kazanmadı.

Ayrıca, Japonya Yapı Merkezi (BCJ – Building Center of Japan) sismik izolasyonlu yapıların tasarımı ve inşası ile ilgili kılavuz niteliğindeki “Report on Safety Evaluation Guideline for Base-Isolated Structures” adlı bir rapor yayımladı. Köprülerin sismik izolasyonu ile ilgili hususlar Japonya Karayolları Kurumu’nun (Japan Highway Corporate) yayımladığı “Specifications for Highway Bridges” adlı kılavuzda, nükleer güç tesisleri ile ilgili tasarım tavsiyeleri ise “Central Research Institute of the Electric Power Industry” tarafından yayımlanan raporda belirtilmiştir.

10.3. Yeni Zelanda’da Şartnamelerin Gelişimi

Sismik izolasyon uygulamalarının en çok görüldüğü ülkelerden biri de Yeni Zelanda’dır. Sismik izolasyon veya enerji sönümleyici sistemler ile ilgili hususlara, Yeni Zelanda’nın tasarım şartnamelerinden sadece 1995 yılında yayımlanan

betonarme yapılar ile ilgili NZS3101'in 4.4.12 "Mekanik Enerji Sönümleyici Cihazlar İçeren Yapılar" adlı maddesinde rastlanmaktadır. Performansa dayalı tasarımı öngören bu şartnameye göre :

Esnek temeller ve mekanik enerji sönümleyen cihazların kullanımı aşağıdaki şartlar yerine getirilmek şartıyla kabul edilebilir:

- *Kullanılacak cihazların performansları testlerle kanıtlanmış olmalıdır.*
- *Yapı için uygun tasarım depremleri üzerinde gerekli çalışmalar yapılmalıdır.*
- *Yapısal elemanların akmaya karşı dayanımları, en azından, enerji sönümleyici ihtiva etmeyen geleneksel sismik tasarım anlayışına göre inşa edilecek yapılar için bu şartnamede belirtilen seviyede olmalıdır.*
- *Yapı, tasarım depreminden daha şiddetli deprem etkisinde kontrollü bir şekilde deforme olacak biçimde detaylandırılmalıdır [24].*

Bugün sismik izolasyon içeren yapıların inşası konusunda, tüm dünyada en çok kabul gören şartnamenin UBC-97 olduğu görülmektedir.

11. UBC-97 YÖNETMELİĞİNDE SİSMİK İZOLATÖR ESASLARI

Aşağıda, UBC-97’de sismik izolasyon sistemleri içeren yapılara ilişkin esaslara ayrıntılı biçimde değinilmiştir [1, s.98-108], [2, s.31-44], [3, s.45-48], [18 , s.56-75].

11.1. Sismik Risk Düzeyi

Sismik risk düzeyini belirlemek amacıyla yönetmelikte iki risk düzeyi tanımlanmıştır.

- Tasarım esaslı deprem (DBE) “Design Basis Earthquake”

50 yıllık zaman diliminde, aşılma ihtimali %10 olan depremlerdir. İstatistiksel olarak 475 yıllık periyotlarla tekrarlanır.

- Olabilecek En Büyük Deprem (MCE) “Maximum Capable Earthquake”

100 yıllık zaman diliminde, aşılma ihtimali %10 olan depremlerdir. İstatistiksel olarak 1000 yıllık periyotlarla tekrarlanır.

11.2. Tasarım Yöntemleri

UBC Yönetmeliği’nin önceki versiyonlarında basit bir, statikçe eşdeğer tasarım yönteminin üzerinde önemle durulmuştur. Bu yöntemde, taban izolasyonlu bir yapıda meydana gelen deplasmanların izolasyon seviyesinde toplanması gerçeğinden faydalanılmakta ve böylece üstyapı neredeyse rijit bir cisim gibi hareket etmektedir. Tasarım tek bir titreşim moduna dayandırılmıştır ve üstyapı için tasarım kuvvetleri, hesap yerdeğiştirme durumunda izolatörlerde ortaya çıkan kuvvetlerden hesap edilmektedir. Bu durum çok basit bir tasarım işlemi ile sonuçlanmıştır. Yönetmelik yavaş yavaş geliştikçe, bununla beraber dinamik analizin kullanılmasının zorunlu hale geldiği durumların sayısı da artmıştır. Nihayet, gerekli olmayabilecek durumlarda dahi, dinamik analizin kullanılmasına yönelik teşvikler yönetmeliğin içine dahil edilmiştir.

Tüm sismik izolasyon tasarımları için bir statik analiz ortaya koymak zorunludur. Bu durum, tasarım deplasmanları ve tasarım kuvvetleri için minimum bir seviye teşkil etmektedir. Statik analiz hem izolasyon sisteminin ön tasarımı ve dinamik analizin gerekli olduğu yapı için, hem de tasarımın yeniden gözden geçirilmesi adına yararlı olmaktadır. Hatta bazı özel koşullar halinde statik analiz, kullanılan tek hesap yöntemi olabilmektedir.

UBC-97 Yönetmeliği'nde, dinamik analiz pek çok durumda gereklidir (OSHPD-96 Yönetmeliği'nde ise her durum için). Yapılacak olan dinamik analiz, davranış spektrumu analizi ya da zaman tanım alanında yapılan analiz şeklinde yürütülebilir. Yapının bulunduğu yerel zemin koşullarına bağlı olarak aşağıdaki durumlarda spektral analiz gerekmektedir:

- Yapı S3 ya da S4 gibi yumuşak bir zemin üzerine oturuyorsa,
- Yapı bilinen aktif bir fay hattına 10 km mesafe yakınlığında bulunuyorsa,
- Yapının MCE periyodu 3 saniyeden büyükse spektral analiz gereklidir.

Davranış spektrumu analizinin gerekli olduğu haller aşağıda sıralanmıştır:

- Yerel zemin koşullarına bağlı spektrum gerekiyorsa,
- Üstyapının yatay ya da düşey yönde düzensiz olması halinde,
- Binanın dört kattan ya da 19.8 m'den daha yüksek olması halinde,
- Yapının izolasyon periyodunun (DBE), elastik ankastre temelli yapının titreşim periyodundan en az üç kat büyük olması halinde davranış spektrumu analizi gereklidir.

Zaman tanım alanında analiz, davranış spektrumu analizinin yerine kullanılabilir. Ancak izolasyon sisteminin veya üstyapının yüksek derecede nonlineer olması halinde, zaman tanım alanında analiz zorunlu hale gelmektedir.

11.3. Statik Analiz

Statik analiz formülleri "Applied Technology Council" ATC-3-06 şartından türetilmiş, 1-3 sn periyot aralığında hız spektrasına göre hesaplanan yerdeğiştirme ve kuvvetleri kapsar. Burada $Z=0.40$, zemin faktörü $S=1$, sönüm oranı $\gamma=5\%$ ve hız, sabit 0.60 m/sn dir.

$$S_D = \frac{S_V}{\omega} = \frac{T}{2\pi} * \frac{Z}{4} * 0,60 = 0,25 ZT \text{ (m) olarak alınır.} \quad (11.1)$$

Spektrum, zemin faktörü ve sönüm etkileri ile diğer sismik bölgeler için de düzenlenerek tasarım yerdeğiştirmesine ulaşılır.

Hesaplanması gereken üç yerdeğiştirme şöyledir :

- D, tasarım yerdeğiştirmesi, DBE düzeyinde rijitlik merkezindeki yerdeğiştirme
- D_T, toplam tasarım yerdeğiştirmesi olarak adlandırılan, D yerdeğiştirmesi yönünde burulma yerdeğiştirmesi bileşenlerini de içeren, binanın köşesindeki bir mesnetin yerdeğiştirmesi
- D_{TM}, toplam maksimum yerdeğiştirme olarak adlandırılan, MCE düzeyinde hesaplanan toplam tasarım yerdeğiştirmesi

UBC-94 ve OSHPD-96 yönetmeliklerine göre, tasarım yerdeğiştirmesi D, tüm tasarım sürecinin başlangıcıdır ve dinamik analiz gereksin ya da gerekmesin hesaplanmalıdır.

Tasarım yerdeğiştirmesi ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$D = \frac{0,25 ZNS_I T_I}{B} \text{ (m)} \quad (11.2)$$

Z : Sismik bölge faktörü

N : Aktif fay yakınlık faktörü

S_I : Zemin faktörü

T_I : Saniye cinsinden efektif periyot

B : Sönüm katsayısı

Tasarım yerdeğiştirmesi kavramı halen aynı olmakla beraber, UBC-97 yönetmeliğindeki ifadeler daha kapsamlıdır. Birçok yeni terim dahil edilmiştir. Örneğın birbirinden farklı 6 adet yerdeğiştirme değeri hesaplanması öngörülmektedir. Zemin profili tiplerinin de sayısı 6'ya yükselmiştir (Kaya, Sert Kaya, Yumuşak Kaya vb.). Hesaplanması gereken 4 adet de sismik katsayı vardır. Bunlar,

Sismik kaynak tipine ve yakınlığına bağlı olarak değışen N_a ve N_v

ZN_v 'ye bağılı olarak değişen C_{AM} ve C_{VM} katsayılarıdır.

Ayrıca yönetmeliğe göre hesaplanması gereken iki temel yerdeğiştirme vardır. Bunlar, DBE düzeyindeki yerdeğiştirme, D_D ve MCE düzeyindeki yerdeğiştirme D_M 'dir. Aşağıda yönetmeliğin hesaplanması için belirlediği ifadeler verilmiştir.

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2} \right) C_{VD} T_D}{B_D} \text{ (mm)} \quad (11.3.a)$$

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2} \right) C_{VM} T_M}{B_M} \text{ (mm)} \quad (11.3.b)$$

11.3.1. Sismik Bölge Faktörü, Z

Sismik bölge faktörü 1 Nolu bölge için 0,075, 4 Nolu bölge için 0,40 olmak üzere bu iki değer arasında değerler alır.

11.3.2. Zemin Faktörü, S

Zemin faktörü de, zeminin üst 30.5 m' sinde kayma dalgasının hızına göre belirlenir. S_A 'dan S_E 'ye kadar zemin profil tipi olarak adlandırılır. S_A (sert kaya zeminler) için kayma hızı 1500m/sn' den büyük ve S_E (yumuşak zeminler) için kayma hızı 180 m/sn' den küçüktür. S_F sıvılaşma tehlikesi bulunan zayıf zeminleri temsil eder ve kayma hızına bağılı olarak değerlendirilemez.

11.3.3. Deprem Kaynak Tipleri; A,B,C

Sismik fay hatları, taşıdıkları riske göre üç gruba ayrılmıştır. A tipi faylar, yüksek aktiviteli ve büyük deprem ($M>7,0$) üretme riskine sahipken, orta magnetütlü depremler ($M<6,5$) oluşturabilecek düşük aktiviteli faylar C tipidir. A ve C tipi fay hatları dışındaki tüm hatlar B tipi olarak adlandırılır.

11.3.4. Kaynak Yakınlık Faktörü; N_a , N_v

Aktif fay yakınlık faktörü de, iki kategoriye ayrılmıştır, kısa periyotlu sabit ivmeli tepki spektrumu için N_a ve orta periyot aralığında tepki spektrasının sabit hızlı bölümü için uygulanan N_v 'dir. 10 km'den daha derinde olan kırılmalar için fay yakınlık faktörü ihmal edilebilir.

Yönetmelikte hesaplanması gereken altı farklı yerdeğiştirme vardır. Zemin profili tipleri altıya yükselmiş ve dört adet sismik katsayısının hesabı gerekmektedir. Ayrıca Bölge 4' te sismik kaynak tipi ve sismik kaynak uzaklığına bağlı olarak N_A , ve N_V ; ZN_V ' ye bağlı olarak değişen M_M ayrıca M_M , N , ve N_V ' ye bağlı olarak değişen C_{AM} ve C_{VM} ' nin de hesaplanması gerekmektedir.

11.3.5. MCE Davranış Katsayısı, M_M

M_M , MCE tepki katsayısı olarak adlandırılır. DBE karakteristiklerinde MCE tepkisini dikkate almak için kullanılır. M_M , ZN_V çarpımının bir fonksiyonu olarak $ZN_V=0,075$ için 2,67'den $ZN_V> 0,50$ için 1,20'e kadar değer alır. Daha ufak DBE etkilerinde M_M değerinin büyük olmasının nedeni, deprenselliği az olan bölgelerden, deprenselliği yüksek bölgelere göre DBE ve MCE etkileri arasındaki farkın daha büyük olmasıdır.

11.3.6. Spektral Deprem Katsayıları; C_{VD} , C_{VM} ve C_{AD} , C_{AM}

Tasarımda kullanılacak minimum spektral ordinatları tanımlamak için C_{VD} , C_{VM} ve C_{AD} , C_{AM} spektral sismik katsayıları kullanılmaktadır. C_{VD} , C_{AD} DBE spektrumunun sabit hız ve sabit ivmesine karşı gelirken; C_{VM} , C_{AM} MCE spektrumunun sabit hız ve ivmesine karşı gelmektedir. C_{VD} , C_{AD} sismik bölge faktörü ve zemin profilinin fonksiyonudur ve bu C_{VM} , C_{AM} için de geçerlidir. Fakat MCE tepki katsayısı C_{VM} , C_{AM} katsayılarında işin içine girer ve $M_M ZN_V$ veya $M_M ZN_A$, değerlerinden birinin 0.40 büyük olması durumunda ilgili grafikteki değerlerle çarpılır.

11.3.7. Sönüm Katsayıları; β_D , β_M

Sistemdeki efektif sönüm DBE düzeyinde β_D ve MCE düzeyinde β_M ' dir ve aşağıda verildiği şekilde hesaplanır.

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{Histeresis} \quad \text{Egrisinin} \quad \text{Toplam Alan 1}}{K_{D, \max} D_M^2} \right) \quad (11.4.a)$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\text{Histeresis} \quad \text{Egrisinin} \quad \text{Toplam Alan 1}}{K_{M, \max} D_M^2} \right) \quad (11.4.b)$$

$K_{D,max}$ ve $K_{M,max}$ efektif rijitliklerdir. Sönüm azaltma faktörü B (DBE için B_D , MCE için B_M) ara değerlerin doğrusal enterpolasyonu ile bulunacağı, β 'nın bir fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$\frac{1}{B} = 0.25 (\ln \beta) \quad (11.5)$$

Buna göre çeşitli sönüm oranlarına karşılık gelen sönüm katsayıları Tablo 11.1'de verilmiştir.

Tablo 11.1 Sönüm katsayıları

Efektif Sönüm (β) (Kritik sönümün yüzdesi cinsinden)	Sönüm Katsayısı (B)
%2 ve daha az	0.8
5%	1.0
10%	1.2
20%	1.5
30%	1.7
40%	1.9
%50 ve daha çok	2.0

11.3.8. Efektif Sistem Titreşim Periyotları

DBE ve MCE düzeyindeki deprem durumlarına karşılık gelen, T_D ve T_M periyotları aşağıdaki formüllerden hesaplanır :

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D,min} \cdot g}} \quad (11.6.a)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M,min} \cdot g}} \quad (11.6.b)$$

Burada,

W : Binanın ağırlığı

G : Yerçekimi ivmesi

$K_{D,eff}$: $(F_D^+ - F_D^-) / (D_D^+ - D_D^-)$

$K_{M,eff}$: $(F_M^+ - F_M^-) / (D_M^+ - D_M^-)$

$K_{D,min}$: Test sonucunda belirlenen D_D yerdeğiştirmesi için $K_{D,eff}$ değerinin minimumu,

$K_{D,max}$: Test sonucunda belirlenen D_D yerdeğiştirmesi için $K_{D,eff}$ değerinin maksimumu,

$K_{M,min}$: Test sonucunda belirlenen D_M yerdeğiştirmesi için $K_{M,eff}$ değerinin minimumu,

$K_{M,max}$: Test sonucunda belirlenen D_M yerdeğiştirmesi için $K_{M,eff}$ değerinin maksimumu,

$K_{D,min}$, $K_{D,max}$, $K_{M,min}$ ve $K_{M,max}$ değerleri ön boyutlama safhasında tasarımcı tarafından bilinmezler. Tasarım işlemine, benzer elemanlar üzerinde yapılmış önceki testler veya malzeme karakteristikleri ve önerilen izolatörün şematiğinden yararlanarak, varsayımsal bir K_{eff} değeri ile başlanır. Ön boyutlama işlemi tam anlamıyla tamamlandıktan sonra, prototip izolatörler sipariş edilir ve teste tabi tutulur. Prototipler üzerinde uygulanan testlerin sonuçlarından; $K_{D,min}$, $K_{D,max}$, $K_{M,min}$ ve $K_{M,max}$ değerleri elde edilecektir. F_D^+ , F_D^- , D_D^+ , D_D^- , F_M^+ , F_M^- , D_M^+ , D_M^- terimleri sırasıyla DBE ve MCE davranış düzeylerine karşılık gelen, prototip mesnetlerdeki maksimum ve minimum kuvvet ve yerdeğiştirmelerdir. Bu değerler, sistemin mekanik karakteristiklerini belirlemek için kullanılmaktadır. Bundan sonra ön boyutlandırmaya rötuş vermek üzere prototip mesnetlerin sonuçları kullanılır ve dinamik analizin kullanılması halinde bu sonuçlar, çeşitli tasarım büyüklükleri için, sınır değerleri teşkil ederler. Genellikle efektif rijitlik ve efektif sönüm değerleri yerdeğiştirmeye bağlı olduklarından, efektif sistem periyotlarını ve efektif sönüm değerini hesaplama işlemi iterasyonla yapılabilir.

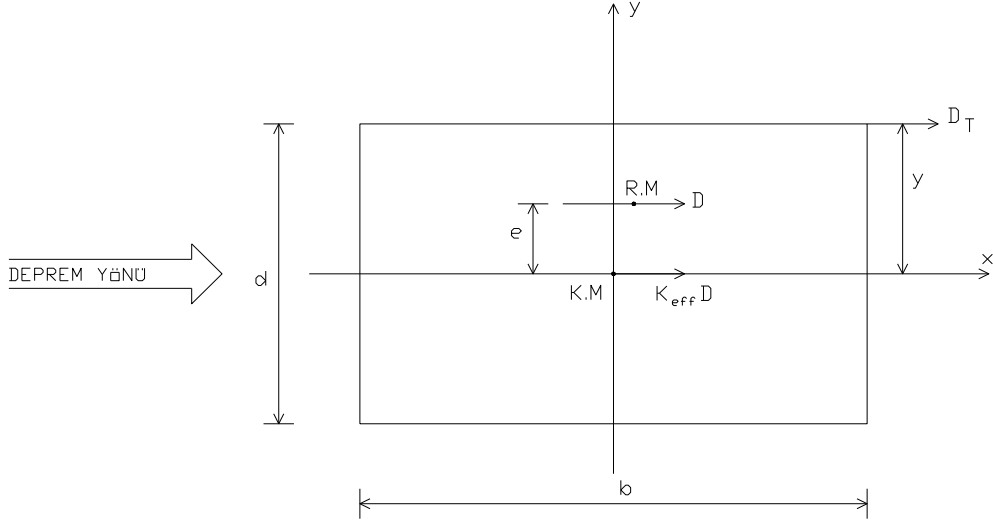
11.3.9. Toplam Tasarım Yerdeğiştirmeleri : D_{TD} ve D_{TM}

Burulma etkilerini de içeren toplam tasarım yerdeğiştirme (D_{TD} ve D_{TM}) ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$D_{TD} = D_D \left(1 + y \cdot \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (11.7.a)$$

$$D_{TM} = D_M \left(1 + y \cdot \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (11.7.b)$$

Burada e gerçek dışmerkezlik ve onun % 5'i oranındaki ek dışmerkezliğin toplamı, ve y ise deprem yüklemesinin doğrultusuna dik kenara olan uzaklıktır. Bu formüllerde; deprem yükü $K_{eff}D$ 'nin, rijitlik merkezinden e mesafedeki kütle merkezinde etki ettiği kabul edilmektedir. Anlatılan kavramlar aşağıdaki Şekil 11.1'de görülmektedir.



Şekil 11.1 UBC-97 Burulma Parametrelerinin Şematik Gösterimi

İzolatörlerin düzgün yayılı olarak yerleştirildiği, $b \times d$ boyutlarındaki dikdörtgen bir planı varsayarsak, izolasyon sisteminin burulma rijitliği $K_{eff} (b^2 + d^2) / 12$ olur ve böylece dönme terimi yani Θ aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Theta = \left(\frac{K_{eff} D e}{K_{eff} (b^2 + d^2) / 12} \right) = \frac{12 D e}{b^2 + d^2} \quad (11.8)$$

Dönmeden kaynaklanan ek yerdeğiştirme

$$\frac{12 D e}{b^2 + d^2} \cdot y \text{ olur.} \quad (11.9)$$

Sistemin gerçek burulma rijitliği hesaplandığında $K_{eff}D$ 'den kaynaklanan ek yerdeğiştirme yukarıdaki eşitliklerde verilenlerden küçük kalırsa bu değer kullanılabilir. Ancak bu değer sırasıyla D_D ve D_M 'nin en az 1,1 katı olmak zorundadır.

Toplam maksimum yerdeğiştirme D_{TM} , izolasyon sisteminin stabilitesinin belirlenmesi için gereklidir.

11.3.10. Tasarım Kuvvetleri

Üstyapı ve izolasyon arayüzeyinin altında kalan elemanların tasarımı için kullanılacak olan tasarım kuvvetleri, tasarım yerdeğiştirmesi D 'ye bağlı olarak belirlenir. İzolasyon sisteminin altında kalan elemanlar aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$V_b = K_{d,max} \cdot D_D \quad (11.10)$$

İzolasyon sisteminin üzerinde bulunan elemanların tasarımı için kullanılacak tasarım kuvvetleri ise aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$V_s = \frac{K_{D,max} \cdot D_D}{R_I} \quad (11.11)$$

Burada R_I , tasarım kuvveti azaltma faktörü veya “süneklik faktörü” olarak isimlendirilir ve 1.4 ile 2 arasında değişmektedir. Aşağıdaki Tablo 11.2’de çeşitli taşıyıcı sistemler durumunda, ankastre mesnetli ve izolasyonlu sistemlere ait süneklik faktörü değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 11.2 Süneklik Faktörü Değerleri

Taşıyıcı Sistem	R_I	R
Moment Aktaran Çerçeve	2	8.5
Perde Duvar	2	5.5
Merkezi Çaplı Çerçeve	1.6	5.6
Dışmerkez Çaplı Çerçeve	2	7

Hiçbir durumda V_s değeri aşağıda belirtilen değerlerden daha az olmamalıdır.

- UBC Yönetmeliği’nde, ankastre temelli bir yapı için belirlenmiş deprem kuvvetinden,
- Tasarım rüzgar yüküne karşı gelen taban kesme kuvvetinden, ve
- Kurşun-çekirdekli kauçuk izolatörler için akma yükü, kayıcı izolatör sistemleri için kayma sınırı olarak tanımlanabilen, taban izolasyon sistemini tamamıyla

harekete geçirmek için gerekli olan yanal kuvvetin 1.5 katından daha az olmamalıdır.

Aynı tipteki taşıyıcı sistemlerin; ankastre temelli ve izolasyonlu tasarımı için azaltma katsayıları arasında aşağıda ifade edilen birkaç sebepten ötürü çok büyük fark bulunmaktadır.

Bu nedenlerden en önemlisi, izolasyonun yapı periyodunu artırmasıdır. Yapı elastik sınır ötesi şekil değiştirmeler yaptıkça, periyot uzamakta ve yapıya gelecek deprem kuvveti azalmaktadır. Aynı zamanda yapı sistemindeki elastik olmayan şekil değiştirmelere bağlı olarak meydana gelen histeretik davranış nedeniyle, yapıdaki sönüm artmaktadır. Bunlara ek olarak, yeniden dağılım ilkesi gereğince, kapasite üstü etkiler taşıyıcı sistemin tüm elemanları tarafından karşılanır. Taban izolasyonlu bir yapı durumunda, sadece yeniden dağılım ilkesi söz konusudur.

Örneğin üstyapı için; taşıyıcı sistem olarak moment aktaran çelik bir çerçevenin kullanılması halinde, yönetmelik tarafından izin verilen azaltma faktörü 2 olacaktır. Bu durum şuna işaret etmektedir;

- Yapı sistemi, nominal akma seviyesinin iki katı büyüklüğündeki bir kuvvet düzeyinde akacaktır.
- Sistem, yönetmelik formülüyle belirlenen kuvvetler etkisi altında gerçek akma sınırının eşiğindedir.

Yapı periyodunun artması, izolasyon sisteminin etkinliğini ön plana çıkarır, çünkü ankastre temelli yapı periyodu ile izolasyon periyodu arasındaki ayırım azalır ve yapıya daha büyük kuvvetler etkir. Ayrıca yüksek modların katkısı artar. Buna ek olarak, izolasyonlu yapıdaki sönüm, ankastre temelli yapıdaki sönüm kadar büyük olmayacaktır. Tüm bu sebeplerden ötürü aynı taşıyıcı sistem için R_1 faktörleri, R faktörlerinden önemli ölçüde küçük alınırlar. Şunu da göz önünde tutmak gerekir ki; büyük süneklik nedeniyle, yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda hasar meydana gelebilir. Bu yüzden taban izolasyonlu sistemlerde, düşük R_1 değerlerinin alınması zorunluluğu hasar kontrolüne eşdeğer bir fayda sağlamaktadır.

11.3.11. Yatay Deprem Yükünün Katlara Dağılımı

UBC-97 Yönetmeliği'nin önceki versiyonlarında, yapı sistemi üzerindeki atalet kuvvetlerinin düşey dağılımı, yüksek modların katılımının ihmal edilebilir düzeyde

olduğu ve yapının tüm seviyelerinde ivmelerin aşağı yukarı aynı olduğu kabulüne dayanmaktaydı. Bununla birlikte kaygı duyulan bir husus daha vardı ki o da bu kabulün yeterli derecede korunumlu olmayabileceği idi. Bu nedenle UBC yönetmeliğinin sonraki baskılarında, düşey dağılım değiştirildi. X nolu kat seviyesindeki yatay deprem yükü (F_x ile gösterilen), V_s taban kesme kuvveti cinsinden aşağıdaki formülasyon ile hesaplanmaktadır.

$$F_x = V_s \frac{h_x w_x}{\sum w_i h_i} \quad (11.12)$$

Burada

w_x ve w_i : x. veya i. katın ağırlığı

h_x ve h_i : İzolasyon seviyesinden itibaren ölçülen kat yükseklikleridir.

Bu formülasyon, elastomer mesnetlerdeki kurşun çekirdekler veya kayıcı mesnetlerdeki sürtünme etkileri örneklerinde olduğu gibi izolasyon sistemindeki doğrusal olmayan davranışın neden olduğu yüksek mod katkılarını da hesaba katan düşeyde üçgensel bir dağılıma yol açmaktadır.

11.3.12. Yerdeğiştirme Sınırları

Taban izolasyonlu binalardaki maksimum görelî kat ötelemesi için UBC-97'de koyulan sınırlar, yine ankastre temelli binalar için koyulan sınırlardan daha serttir. İzole edilmiş binalarda maksimum görelî kat ötelemesi $0.01/R_1$ değerini aşmamalıdır. Bu sınır değeri, asal periyotları 0.70 sn'den daha az olan ankastre temelli binalar için % 2.5'un yarısından daha azdır. Yine aynı şekilde daha uzun asal periyotları olan ankastre temelli binalar için % 2'nin yarısından daha azdır.

11.4. Dinamik Analiz

Tasarım spektrumu, yerel zemin koşullarına bağlı spektrumdur ve aşağıdaki hallerde gereklidir:

- MCE deprem durumunda görülen periyot değerinin (T_M) 3 saniyeden büyük veya eşit olduğu ya da,
- Zemin tipinin S_E , S_F olması durumunda veya,

- Yapı, aktif bir fay hattına 10 km mesafe dahilinde bulunuyorsa gereklidir.

UBC-97 Yönetmeliği gereği, dinamik analiz ayrıca, izole edilmiş yapının efektif periyodunun yani T_D 'nin, izolasyon sistemi üzerindeki elastik ankastre temelli yapının periyodundan üç kat daha fazla olması halinde yine gereklidir. Yerel zemin koşullarına bağlı bir spektrumun kullanılması halinde, kullanılan bu spektrum yönetmelik tarafından belirlenmiş davranış spektrumunun % 80'inin altına düşemez.

11.4.1. Zaman Tanım Alanında Analiz

- Zaman tanım alanında yapılacak bir analiz için en az üç adet kaydedilmiş yatay bileşen çiftleri gerekmektedir.
- Analizde göz önüne alınan bu kayıtlar; yapının üzerinde bulunduğu sahayı, zemini ve kaynak karakteristiklerini DBE ve MCE düzeyindeki deprem durumları ile tutarlı süreklilikleri olacak şekilde, temsil etmek zorundadır.
- Bir saha için, büyük bir aktif fay hattının 15 km dahilinde geliştirilmiş deprem kayıtları gerekmektedir. Böylelikle fay hattına yakınlık olgusu da yansıtılmış olacaktır.

11.4.2. Ölçeklendirme

Her bir yer hareketi çifti için, % 5 sönümlü spektrumların, karelerinin toplamının karekökü hesaplanmaktadır. Yer hareketleri, bu işlemten sonra ölçeklendirilmektedir (bir çarpan ile çarpılmaktadır). Burada amaç, spektrumların karelerinin toplamının karekökünün ortalamasının, DBE veya MCE depremleri için hedeflenen spektrumun 1.3 katının altına düşmemesi içindir. Dinamik analizin kullanılması halinde, tasarım değerleri aşağıda ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

- Üç tane zaman kaydının kullanılması halinde; tasarım, maksimum davranış niceliklerine göre yapılmalıdır.
- Yedi tane zaman kaydının kullanılması halinde; tasarım ortalama davranış niceliklerine göre yapılmalıdır.

Dinamik analiz yapıldığında, tasarım yerdeğiştirmeleri ve tasarım yükleri için, yönetmeliğin statikçe eşdeğer formüllerince belirlenen değerlerden daha küçük değerlere ulaşmak mümkündür. Yönetmelik tarafından belirlenen sınır değerler aşağıdaki Tablo 11.3'de özetlenmiştir.

Tablo 11.3 UBC-97 yönetmeliği minimum değerleri

Parametre	Statik Analiz	Davranış Spektrumu Analizi	Zaman Tanım Alanında Analiz
D_{TD}	$D_{TD} \geq 1.10 D_D$	$0.90 D_{TD}$	$0.90 D_{TD}$
D_{TM}	$D_{TM} \geq 1.10 D_M$	$0.80 D_{TM}$	$0.80 D_{TM}$
V_b	$V_b = k_{D,max} D_D$	$\geq 0.90 V_b$	$\geq 0.90 V_b$
V_s düzenli yapı	$V_s = k_{D,max} D_D / R_I$	$\geq 0.80 V_s$	$\geq 0.60 V_s$
V_s düzensiz yapı	$V_s = k_{D,max} D_D / R_I$	$\geq 0.10 V_s$	$\geq 0.80 V_s$
Görelî Yerdeğiştirme	$0.010 / R_I$	$0.015 / R_I$	$0.020 / R_I$

İzolasyon sistemi için belirlenecek toplam tasarım yerdeğiştirmesi, D_{TD} , statik formül tarafından belirlenen değerin % 90'ından daha aza indirilemez. Yine aynı şekilde toplam maksimum yerdeğiştirme, D_{TM} , statik formül sonucunda bulunan değerin % 80'inden daha aza indirilemez. D_{TD} ve D_{TM} yerdeğiştirme değeri, sırasıyla D_D ve D_M çarpanlarının kullanılmasıyla hesap edilmektedir. UBC-97 Yönetmeliği; aşağıda gösterildiği üzere, statik formüllerde geçen D_D ve D_M değerlerini, D'_D ve D'_M ile yerdeğiştirerek ilave bir azaltmaya izin vermektedir.

$$D'_D = \frac{D_D}{\sqrt{1 + (T / T_D)^2}} \quad (11.13.a)$$

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + (T / T_M)^2}} \quad (11.13.b)$$

Burada T, yönetmelikte verilen ampirik formül yardımıyla hesaplanan, üstyapının elastik-ankastre temelli periyodudur.

Yukarıda, (11.13) ifade edilen azaltmaların kullanılmasının sebebi, üstyapının elastikiyetine izin vermek içindir. Statik formüllerde, üstyapının rijit davrandığı kabul edilir. Ayrıca, üstyapıda bir miktar yerdeğiştirme meydana gelmesi halinde, izolasyon sistemindeki yerdeğiştirmenin azalacağı kabul edilir.

11.5. Yapısal Olmayan Elemanlar İçin Diğer Gereksinimler

Yapısal olmayan elemanların dayanım tasarımına yönelik olarak; ya ankastre temelli yapılar için belirlenen şartlar kullanılır ya da olabilecek en büyük davranış deprem yükü hesaplanır. İzolasyon arayüzeyinden geçen elemanlar, D_{TM} yerdeğiştirmesi değeri için tasarlanmalıdır. Buna karşın, izolasyon sisteminin altında, ankastre temelli tasarım yöntemleri kullanılmaktadır. Buna ek olarak gözönüne alınması

zorunlu olan başka detaylı sistem gereksinimleri bulunmaktadır. Bunlar içinde, çevresel koşullar, rüzgar kuvvetleri, yangına dayanıklılık ve yatay geri döndürücü kuvvet sıralanabilir.

11.6. Göz Önüne Alınması Gereken Diğer Hususlar

Uniform Building Code'un tüm versiyonlarında anlatılan taban izolasyonu düzenlemelerinde, üzerinde ısrarla durulan özelliklerden bir tanesi de deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesidir, yani bir davranış spektrumu gibi sunulmasıdır. Yönetmelik aslen, iki taraflı yer hareketini dikkate almak amacıyla hedef spektrumda % 30'luk bir artışı zorunlu kılmaktadır. Taban izolasyon sistemlerinin daima izotropik olmalarına karşın, maksimum izolatör yerdeğiştirmesi de her yönde olabilmektedir. Bu nedenle maksimum yerdeğiştirme için kullanılan temel statik formüllerin, her yönde uygulanması amaçlanır. Dinamik analizin, neden iki yönlü yerdeğiştirmeleri kapsamı gerektiği açık değildir. Ayrıca bu gereksinim, eski tip (konvansiyonel) yapılarıdaki detay sistemlerin tasarım şartları ile doğrudan çelişmektedir. Bu tasarım şartlarında şöyle ifade edilmektedir: *"Öyle elemanlar tasarlanır ki, bir yönde önceden tarif edilmiş tasarım deprem yüklerinin % 100'ü için ve buna ek olarak o yöne dik doğrultu için de önceden tarif edilmiş deprem yüklerinin % 30'u için, birbirine dik (ortogonal) etkilerin şartları yerine getirilmelidir."*

Prototip izolatörlerin kapsamlı bir şekilde test edilmesi için gereken şartlar UBC Yönetmeliği'nin önceki versiyonlarından alınmıştır. Denetleme işlemi için yeni şartlar eklenmiş ve bazı eski şartlar yenileriyle değiştirilmiştir. Bu yeni şartlar içinde; periyodik gözlemlene, izolasyon sisteminin onarımı ya da iyileştirilmesi ve yatay yerdeğiştirme için bir gözlem cihazı kullanılması gibi konulara yönelik şartlar bulunmaktadır.

11.7. Statik Analiz Şartları Kullanılarak Adım Adım İzlenecek Yol

11.7.1. Ön Tasarım Adımları

1. Sismik Bölge Faktörü (Z) : Taban izolasyonlu projenin bulunduğu sahanın sismik bölge sınıfı, UBC-97 Yönetmeliği'nde Fig. 16-2'den tespit edilir. Ardından bu bölgeye karşılık gelen sismik bölge faktörü (Z) Tablo 16-I'dan belirlenir.

2. Yerel Zemin Profili Kategorisi : UBC-97 Yönetmeliği'nde Tablo 16-J'den belirlenir.
3. Sismik Kaynak Tipi : Herbir sismik fay hattı için, karşılık gelen sismik kaynak tipi UBC-97 Yönetmeliği'nde Tablo 16-U'dan seçilir.
4. Kaynak Yakınlık Faktörleri (N_d ve N_v) : Yukarıda seçilen herbir sismik kaynak tipi için, kendisine karşılık gelen kaynak yakınlık faktörleri, UBC-97 Yönetmeliği'nde Tablo 16-S ve Tablo 16-T'den belirlenir.
5. Olabilecek En Büyük Deprem Davranış Katsayısı (M_M) : Yukarıda hesaplanan Z ve N_v değerleri çarpılarak ZN_v değeri elde edilir. Buna göre UBC-97 Yönetmeliği'nde Tablo 16-D'den okunur.
6. Sismik Katsayılar (C_{VD} ve C_{AD}) : Yukarıdaki adımlarda belirlenen sismik bölge faktörü ve yerel zemin profili ile, UBC-97 Yönetmeliği'nden C_{VD} ve C_{AD} katsayıları, sırasıyla Tablo 16-R ve 16-Q'dan elde edilir.
7. Sismik Katsayılar (C_{VM} ve C_{AM}) : İkinci adımda belirlenen zemin profili tipini kullanarak M_M , Z ve N_v birbiri ile çarpılır ve M_MZN_v elde edilir. UBC-97 Yönetmeliği'nden C_{VM} ve C_{AM} katsayıları, sırasıyla Tablo 16-G ve 16-F'den elde edilir.
8. Yapısal Sistem Azaltma Faktörü (R_I) : İzolasyon arayüzeyi üzerindeki yapısal sisteme karşılık gelen azaltma faktörü, R_I , UBC-97 Yönetmeliği'nde A-16 E No'lu tablodan seçilir.
9. İzolatör Tipinin ve Sönüm Katsayılarının (B_D ve B_M) Seçilmesi : İzolatör tipi (Yüksek sönümlü kauçuk, kurşun çekirdekli veya kayıcı mesnet) seçilir ve seçilen bu izolatör tipine göre UBC-97 Yönetmeliği'nde Tablo A-16-C'den ilgili sönüm katsayısı belirlenir. Örneğin yüksek sönümlü doğal kauçuk tipteki izolatör sistemleri için % 10-12 mertebesinde sönüm katsayısı kullanılır. B_D ve B_M katsayıları için aynı değer atanır. Gerekirse ara değerler için lineer enterpolasyon kullanılır.
10. İzolasyon Sisteminin Periyodu (T_D) : Tasarım esaslı yerdeğiştirme düzeyi için izole edilmiş sistemin asal titreşim periyodu olarak bir ön değere karar verilir. Taban izolasyonlu sistemlerde genelde 2-3 sn arasında bir periyot değeri arzu edilir. Sürtünmeli sarkaç tipteki izolatör durumunda ise; periyot, eğrilik yarıçapı R 'ye göre tayin edilir.

11. *İzolasyon Sisteminin Efektif Rijitliği (K_{eff})* : (11.6.a) Denklemleri ile basitçe hesaplanan izolasyon periyoduna göre efektif rijitlik belirlenir.

12. *Minimum Tasarım Yerdeğiştirmesi (D_D)* : Minimum tasarım yerdeğiştirmesinin ilk değeri daha önceki adımlarda belirlenen parametre değerleri yardımıyla, Denklem (11.3.a)'da verilen ifadeyle hesaplanır. Bu değerin proje için kabul edilebilecek değerden büyük olması halinde, sistemin daha rijit hale getirilmesi gerektiği anlaşılr. Bu yüzden 10. adıma geri dönölerek daha küçük bir izolasyon periyodu değeri seçilir ve sonraki adımlar tekrarlanır.

13. *Minimum Tasarım Yatay Kuvvetleri (V_b ve V_s)* : (11.10) ve (11.11) denklemleri kullanılarak, izolasyon sistemleri ve izolasyon arayüzeyindeki veya altındaki yapısal sistemin tasarımı için kullanılacak minimum taban kesme kuvveti V_b , ve izolasyon arayüzeyinin üstünde bulunan yapı elemanlarının tasarımı için kullanılacak minimum taban kesme kuvveti, V_s , belirlenir. Hesap edilen V_b ve V_s değerleri; proje için kabul edilebilecek değerlerden büyük çıkarsa, rijitliği daha az olan, esnek bir izolasyon sistemine gidilmelidir. Yani titreşim periyodu daha yüksek olan bir ön değer seçilmeli ve bu adıma kadar yapılan tüm hesaplar tekrarlanmalıdır.

14. *Üstyapı Elemanları için Ön Tasarım* : Bir önceki adımda hesaplanan V_s taban kesme kuvveti değeri, Denklem (11.12) yardımıyla binanın her bir katı hizasında statik yatay kuvvet olarak dağıtılır. Dağıtılan bu yatay kuvvetler, üstyapı elemanlarının gerilme tahkiki için kullanılır. Hesaba esas alınan kat yatay yerdeğiştirmesi için, izolasyon sistemi üzerinde maksimum görelî kat ötelemesi oranı “Statikçe Eşdeğer Kuvvet Yöntemi”nde $0.010 / R_I$ sınır değeri ile karşılaştırılmalıdır (UBC-97 Yönetmeliği’nde Bölüm 1658.6). Yine aynı şekilde davranış spektrumu analizi ve zaman tanım alanında analiz yöntemleri kullanılması halinde, maksimum görelî kat ötelemesi oranı için sınır değerler sırasıyla $0.015 / R_I$ ve $0.020 / R_I$ olarak alınırlar (UBC-97 Bölüm 1659.8).

15. *İzolatör Elemanları İçin Bir Ön Tasarım ve Plan Üzerindeki Dağılımları* : Önceki adımlarda belirlenen ön tasarım yerdeğiştirmesi, rijitlik, kuvvet ve sönüm özellikleri kullanılarak; düşey yüklere, yatay yüklere ve yerdeğiştirmelere dayanabilecek yeterlilikte izolatörler tasarlanır. Ayrıca kullanılan her bir izolatör elemanı tipi için bir ön kuvvet-yerdeğiştirme histeretik eğrisi tespit edilmelidir. Bu

diyagramlar, izolatörleri imal eden firmalarca, benzer tipteki ve benzer boyuttaki izolatör tipleri üzerinde yürütülen testlerden elde edilmiş sonuçlara dayanmalıdır.

11.7.2. Kesin Tasarım Adımları

16. İzole Edilmiş Yapının Matematik Modelinin Oluşturulması : UBC-97 Yönetmeliği'nin Bölüm 1659.5 şartları doğrultusunda, ankastre temelli ve taban izolasyonlu yapıların matematiksel modelinin oluşturulması gerekir. Böyle modellerin oluşturulması için iki tane temel yöntem bulunmaktadır. Bunlar aşağıda ifade edilmektedir:

- a) Üstyapının bir taban izolasyon sistemi modeli ile temsil edilmesi. Bu tür bir yaklaşım, çok sayıda model uygulamasının çeşitli deprem durumlarına maruz kalması halinde ya da minimum dışmerkezlilik koşulunun yerine getirilmesi gereken durumlarda faydalı olmaktadır.
- b) ETABS, SAP2000 veya izolatörlerin nonlinear karakteristiklerini modelleme kapasitesine sahip (DRAIN-2DX, Nonlin, 3D-BASIS vb.) benzer bilgisayar programları yardımıyla izolasyon sisteminin ve üst yapının bütünleştirilmiş bir modelini oluşturmaktır.

Tavsiye edilen yaklaşım, tasarım iterasyonları sırasında birinci yöntemi kullanmak, buna karşın elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için son aşamalarda ikinci yaklaşımı kullanmaktır. Böylelikle birinci yaklaşımdaki yaklaşıklıklar nedeniyle, yetersiz olarak temsil edilen elemanların tasarımı daha doğru bir şekilde yapılmış olacaktır.

17. Uygun Yanal Davranış Yönteminin Seçilmesi : UBC-97 Yönetmeliği'nin 1657 No'lu bölümünde bildirilen şartlar doğrultusunda uygun bir tasarım yöntemi seçilebilir. Örneğin statikçe eşdeğer yanal davranış yöntemi, davranış spektrumu analizi ya da zaman tanım alanında analiz gibi.

18. Tasarım Yerdeğiştirmesinin ve İzolasyon Periyodunun Kesinleştirilmesi : Projeye esas teşkil edecek yerdeğiştirme ve kuvvet davranış hedeflerini yeterli derecede karşılayan, bir üstyapıya ve taban izolasyon sistemine ait tasarım parametreleri belirlenir. Tasarım yerdeğiştirmesi, D_D ve maksimum yerdeğiştirme, D_M proje için kesin olarak belirlenir. Bu değerler, daha önceki adımlarda hesaplanmış sınır yerdeğiştirme değerleri ile aynı değildir. D_M , D_D 'den; D_D ise ön

tasarım aşamasında hesaplanandan daha büyüktür. Tasarım yerdeğiştirmesi ve maksimum yerdeğiştirme düzeyleri için, taban izolasyon periyodu (T_M , T_D) belirlenir.

19. Efektif Rijitliğin Hedef Değerlerinin Kesinleştirilmesi : Birbirinden önemli derecede farklı pozitif ve negatif davranış karakteristikleri sergileyen bir taban izolasyon sistemi haricinde, efektif rijitlik için hedef değerleri belirlemek üzere aşağıdaki ifadeler kullanılabilir :

$$K_{D,max} = K_{D,min} = \frac{\text{DBE Taban Kesme Kuvveti}}{D_D} \quad (11.14.a)$$

$$K_{M,max} = K_{M,min} = \frac{\text{MCE Taban Kesme Kuvveti}}{D_M} \quad (11.14.b)$$

20. Matematiksel Model Sonucu Elde Edilen Efektif Periyodun Değerlendirilmesi : Matematiksel modelleme sonucu elde edilen periyot değerleri (T_D ve T_M), minimum değerler kullanılarak hesaplanan periyotla karşılaştırılır.

21. Matematiksel Model Sonucu Elde Edilen Sönüm Seviyesinin Değerlendirilmesi: Matematiksel modelleme sonucu elde edilen sönüm seviyesiyle, Denklem (11.4.a) ve Denklem (11.4.b) kullanılarak belirlenen sönüm katsayıları β_D ve β_M karşılaştırılır.

22. Tasarım Yerdeğiştirmeleri ve Tasarım Kuvvetlerinin Yönetmelik Minimum Değerleri ile Karşılaştırılması : Yapılacak karşılaştırma sonucunda, hesaplanan tasarım yerdeğiştirmesinin yönetmelik minimum şartından küçük kalması halinde tüm davranış parametreleri (eleman kuvvetleri ve deformasyonları da dahil olmak üzere) yönetmelik minimum değerlerine çıkartılmalıdır. Ayrıca taban kesme kuvvetleri de yine yönetmelik minimum değerlerine çıkartılmalıdır.

23. Prototip Mesnet Test Sonuçlarına Göre Performansın Değerlendirilmesi : Prototip mesnet test sonuçlarının uygunluğuna göre, önceki adımlarda kurulmuş olan matematik model yeniden düzenlenir. Revize edilen bu yeni model, en alt ve en yüksek mesnet özelliklerini yansıtacak şekilde oluşturulmalıdır. UBC-97 Yönetmeliği'nin 1665.5.1 No'lu bölümündeki denklemler kullanılarak $K_{D,max}$, $K_{D,min}$, $K_{M,max}$ ve $K_{M,min}$ efektif rijitlik değerleri yeniden hesaplanıp 20, 21, ve 22. adımları, revize edilmiş yeni matematik modele göre tekrar yapılacaktır.

24. İmalat Mesnetlerinin Test Sonuçlarına Göre Performansın Değerlendirilmesi :

İmalat mesnetlerinin test sonuçlarına bağlı olarak elde edilen, en alt ve en üst mesnet özelliklerini yansıtacak matematiksel model yeniden oluşturulacak ve $K_{D,max}$, $K_{D,min}$, $K_{M,max}$ ve $K_{M,min}$ aşağıda verilen ifadeler yardımıyla tekrar hesaplanacaktır. 20, 21 ve 22. kesin tasarım adımları, revize edilmiş yeni matematik modele göre tekrar yapılacaktır.

$$K_{D,max} = \frac{\sum F_{D,max}^{+} - F_{D,max}^{-}}{D_D^{+} - D_D^{-}} \quad (11.15.a)$$

$$K_{D,min} = \frac{\sum F_{D,min}^{+} - F_{D,min}^{-}}{D_D^{+} - D_D^{-}} \quad (11.15.b)$$

$$K_{M,max} = \frac{\sum F_{M,max}^{+} - F_{M,max}^{-}}{D_M^{+} - D_M^{-}} \quad (11.15.c)$$

$$K_{M,min} = \frac{\sum F_{M,min}^{+} - F_{M,min}^{-}}{D_M^{+} - D_M^{-}} \quad (11.15.d)$$

12. SİSMİK İZOLASYONUN GELECEĞİ

Sismik izolasyon, depreme dayanıklı yapı tasarımında gelecek için oldukça büyük potansiyele sahip, yeni bir trenddir. Sismik izolasyonlu yapılar, hafifletilmiş deprem kuvvet, deformasyon ve ivmelerine maruz kalırlar. Depreme dayanıklı yapı tasarımında geleneksel yaklaşım, şiddetli depremler etkisinde yapının toptan göçmesinin engellenmesine odaklanmıştır ve gösterdiği bu performansın yapısal elemanlarda meydana gelecek hasara dayanmasının da etkisiyle artık yavaş yavaş kabul edilebilirliğini yitirmeye başladığı görülmektedir. Özetle, depremde yıkılmayacak yapılar inşa etmede yeterli olan eski anlayış depremde hasar görmeyecek yapı istendiğinde yetersiz kalmaktadır. Daha önceden kabul edilen hasar seviyeleri çeşitli sebeplerle artık kabul edilemez duruma geldiyse depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni bir metodoloji geliştirme ihtiyacı doğmuştur demektir.

Son yıllarda yapılardan beklenen deprem performansı giderek artmıştır. Şiddetli depremlerden sonra bile yapıda göçme ve can kaybını engellemeyi garanti etmekle kalmayıp, yapının içeriğinin de korunmasını, fonksiyonlarını kesinti olmaksızın yerine getirebilmesini de sağlayan sismik izolasyon gibi yeni yaklaşımlar gittikçe daha çok taraftar bulmaktadır.

Bu tez çalışmasından çıkan sonuçların bir tanesi, sismik izolasyonun deprem etkilerini azaltmakta başarılı bir yaklaşım olduğu şeklindedir. Özellikle doğal periyotları, depremlerin hakim periyotlarına yakın olan, yani rezonans tehlikesi bulunan alçak ve orta yükseklikteki yapılar için çok daha akılcı bir yaklaşım olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca deprem esnasında ve sonrasında operasyonları devam etmesi beklenen hastane, iletişim merkezleri, itfaiye, enerji santralleri, köprü ve viyadükler gibi yapılarda sismik izolasyonun kullanımı çok hızlı yaygınlaşmakta bugün İtalya ve diğer bazı ülkelerde yönetmeliklerce zorunlu hale getirilmektedir. Özellikle tarihi değeri olan yapıların onarım ve güçlendirmesi projelerinde, yapının özgün mimari özellikleri ile hassas ve değerli içeriğini korumak açısından artık sismik izolasyon yaygın olarak kullanılmakta, hatta bazı durumlarda tek alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ticari faaliyetler bakımından deprem zararı, gözden kaçırılmayacak kadar ciddi bir risktir. Bu faaliyetlerdeki depremden sonra meydana gelebilen aksamalar ticari işletmeler için çok yıkıcı kayıplar anlamına gelebilmektedir. Üretim kayıpları, kâr kayıpları, yapılara ve ekipmanlara gelecek zararlar, satışlarda aksama, pazar payının düşmesi, müşteri ilişkilerinde kopukluk, ticari itibarın zedelenmesi gibi birçok olumsuz durum düşünüldüğünde sadece ticari riskin azaltılması bile bazen sismik izolasyonu tek başına fizibil kılabilir.

Sismik izolasyonun her türlü yapı uygun olduğu düşüncesiyle yola çıkmak yanlıştır. Yapının tasarım gereksinimlerine uygun bir ön çalışma yapılmalı ve karar ondan sonra verilmelidir. Dahası, farklı tasarım gereksinimleri farklı sismik izolasyon sistemlerini uygun kılacağından ön çalışmada bu alternatifler de birlikte değerlendirilmelidir.

Tüm yenilikçi yaklaşımlar gibi sismik izolasyon yaklaşımı da köklü ve kabul gören standart bir metod oluncaya kadar bir miktar daha zamana ihtiyaç duymaktadır. Günümüzde sismik izolasyonun çok yaygın olarak kullanılıyor olmamasının önemli sebeplerinden biri, mühendislerin muhafazakar davranmalarıdır. Gerçekten mühendisler ilk yapım maliyetlerinde kayda değer bir düşüş olmadığı takdirde yeni bir yaklaşımı öğrenmekte isteksiz davranmaktadır. Sismik izolasyonun kullanılmasıyla birlikte yapım maliyetlerindeki olası artışlar kullanımın yaygınlaşmasına engel teşkil etmekle birlikte bu engelin muhafazakarlık kadar güçlü olmadığı görülmektedir. Çünkü yapıların şiddetli depremlerde bile hasarsız olarak fonksiyonlarını kesintisiz sürdürebilmesi, çoğu durumda maliyet artışına rağmen büyük avantaj sağlayacak bir özellik olmaktadır.

Sismik izolasyon kavramını içeren yönetmelikler bu yaklaşımın yaygınlaşmasında en büyük katalizör rolünü oynamaktadır. Ülkelerin depreme dayanıklı yapı tasarımını yönetmeliklerinde yer buldukça sismik izolasyon yaklaşımı hızla benimsenecektir.

Dünyadaki birçok yönetmelik minimum şart olarak yapıların göçmesini, dolayısıyla can kaybının engellenmesini öngörmektedir. Dünyada son zamanlarda yaşanan depremler, özellikle bazı yapılarda hasar meydana gelmemesini, yapı içeriğinin korunmasını ve fonksiyonlarının kesintisiz devamını da öngören yeni yönetmeliklerin gelişmesi ihtiyacını göstermektedir. Deprem performans beklentilerindeki bu artış yaygınlaştıkça ve yönetmeliklerde yer buldukça geleneksel

yöntemlere kıyasla sismik izolasyon çok daha avantajlı konuma geçecektir ve kullanımı hızla artacaktır.

Yapı tasarımında otorite kabul edilen kişilerin bu yeni yaklaşıma gösterecekleri olumlu ilgi, büyük kitlelerce hızla kabul görmesinin yolunu açacaktır.

Sigorta şirketleri sismik izolasyon tekniği ile inşa edilmiş veya güçlendirilmiş yapılara uyguladığı poliçelerde, deprem riskinin azalması neticesinde büyük prim indirimleri sağlarsa kullanımın artacağı açıktır.

Yeni yapılacak yapıların sahipleri, depreme dayanıklı yapı tasarımı konusundaki bilgisizlikleri nedeniyle sahibi oldukları yapıların şiddetli depremlerde dahi hasar görmeyeceği şeklinde bir yanlış inanış içindedirler. Kendilerine gayrimenkullerinin karşı karşıya oldukları deprem riski doğru bir şekilde anlatıldığı takdirde gerekirse daha fazla maliyete katlanarak sismik izolasyon yöntemini seçmek konusunda daha istekli olacaklardır. Bu saptamanın, özellikle ticari faaliyetlerin sürdürüleceği yapılar söz konusu olduğunda çok daha isabetli olacağı açıktır.

Sismik izolasyon uygulamalarının yaygınlaşması konusunda son kullanıcı faktörünün önemi yadsınamaz. Son yıllarda meydana gelen depremler sonucunda artık halk deprem konusunda çok daha duyarlı davranmaktadır. Bu duyarlılık bilince dönüşürse, insanlar depreme dayanıklı yapılar konusunda daha talepkâr ve gerektiğinde bu talepler karşılığında uzun vadede ekonomik olabilecek yaklaşımlara daha fazla para harcamaya açık hale gelirlerse, bu durum sismik izolasyon yaklaşımı lehine büyük bir avantaj olacaktır.

Sismik izolasyon sistemlerinin kullanımını kolaylaştırmak için bir standardizasyona gidilirse mühendisler karakteristik özellikleri belirli bu standart ürünler arasından, gereksinimlerine uygun olanı seçip derhal uygulayabilecektir. Bunun yaygın kullanımda olumlu etkileri olacağı düşünülmektedir.

Dünyada birçok konuda olduğu gibi bu yaklaşım konusunda da ekonomi olgusu belirleyici faktördür. Sismik izolasyon sistemlerinin tüm dünyada çok yaygın olarak kullanılması ancak deprem etkilerini azaltmada ucuz, ekonomik bir yaklaşım olmasıyla mümkündür. Uzun vadede ekonomik olabilen, fakat genellikle başlangıç maliyetinde az da olsa artışa neden olan sismik izolasyon bu yönüyle halen geleneksel yöntemlere göre daha dezavantajlı bir konumda bulunmaktadır.

Sismik izolatör içeren yapıların sayıları arttıkça, bu sektör gelişecektir. Firma sayısı ve toplam ciro arttıkça bu alana yapılan yatırımı da artacak ve birim maliyetler düşecektir.

Yönetmelikler sismik izolasyon içeren yapılarda, daha az muhafazakar olurlarsa, (örneğin bazı emniyet katsayılarında azaltma yaparak) sismik izolasyon kullanımı daha ekonomik hale gelecektir.

Gelişen teknoloji ile birlikte daha modern yapı malzemelerinin kullanılabilir olması sismik izolatör üretim maliyetlerinde düşüş sağlayacaktır. Örneğin tabakalı mesnetlerin üretiminde çelik tabakaların kauçuk ile vulkanizasyona tabi tutulması üretimde maliyetleri büyük ölçüde artırmaktadır. Fiber takviyeli kauçuk mesnetler gibi yeni bir teknolojinin kullanılabilir hale gelmesi ile maliyetlerde kayda değer azalmalar görülecektir.

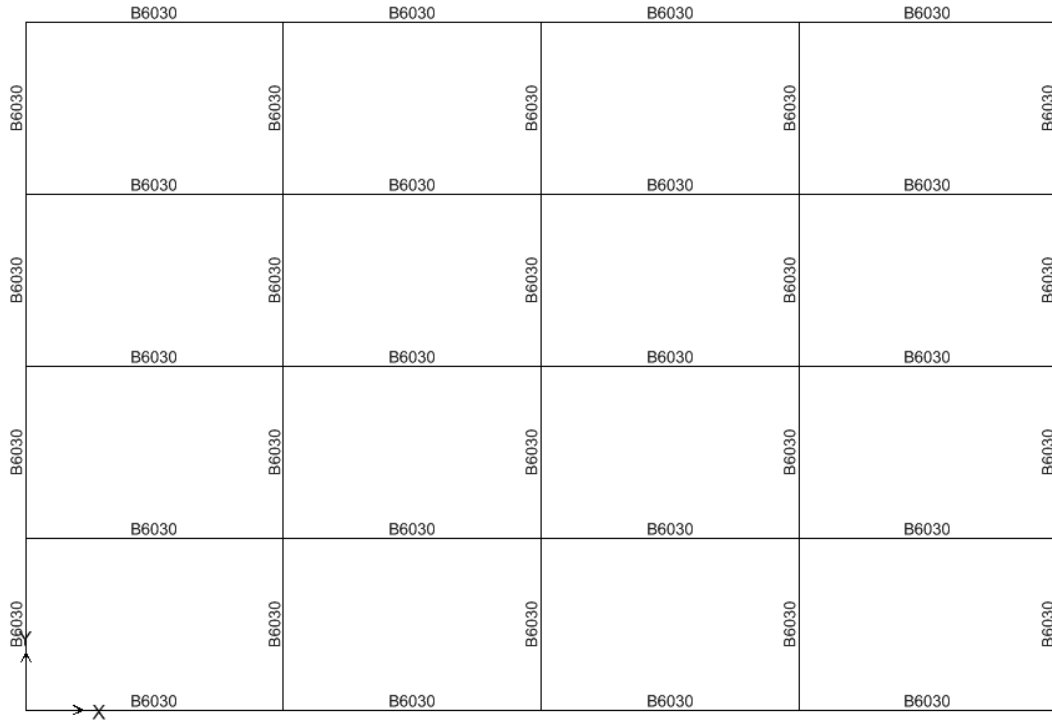
Sismik izolasyon tekniği ile inşa edilmiş veya güçlendirilmiş yapıların sayıları arttıkça ve bu yapıların gelecekteki depremler etkisindeki performansları gözlemlenince bu yaklaşım konusundaki tecrübe ve bilgi artacaktır. Özellikle şiddetli depremler sonrası sismik izolasyonlu yapıların kendilerinden beklenen performansları gösterdiği görüldükçe mevcut tereddüt ve önyargılar hızla yok olacaktır.

Sismik izolasyon her ne kadar tam olarak olgunlaşmamış bir sistem olsa da aktif kontrol gibi daha yenilikçi yaklaşımlara kıyasla oldukça öndedir. Şüphesiz, sismik izolasyon, aktif kontrol sistemlerine geçiş için önemli bir basamak teşkil edecektir.

Depremleri önceden tespit etmek veya engellemek mümkün olmadığına göre yapılarımızı deprem etkilerine hazır olacak şekilde tasarlamak zorundayız. Yapıların çökmesini engellemek amacıyla aşırı güçlendirerek şiddetli depremler etkisinde hasar görmesini kabullenmek yerine, deprem etkisinin yapıya ulaşmasını sınırlandırmak ve böylece yapıyı sismik tehlikelerden korumak çok daha akılcı bir yaklaşım olacaktır.

13. UYGULAMA I

Bu bölümde kolon ve kirişlerden meydana gelen, planı Şekil 13.1’de belirtilen betonarme bina modeli SAP2000 V8.2.3 programı kullanılarak üç boyutlu olarak analiz edilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.



Şekil 13.1 Uygulama I - Kat Planı

Bina, hem ankastre durum için, hem de çeşitli sismik izolasyon veya deprem koruma alternatifleri kullanılarak, nonlinear zaman tanım alanında ayrı ayrı çözülmüş ve değerler karşılaştırılmıştır. Bu alternatifler ve karşılaştırma kriterleri şöyledir :

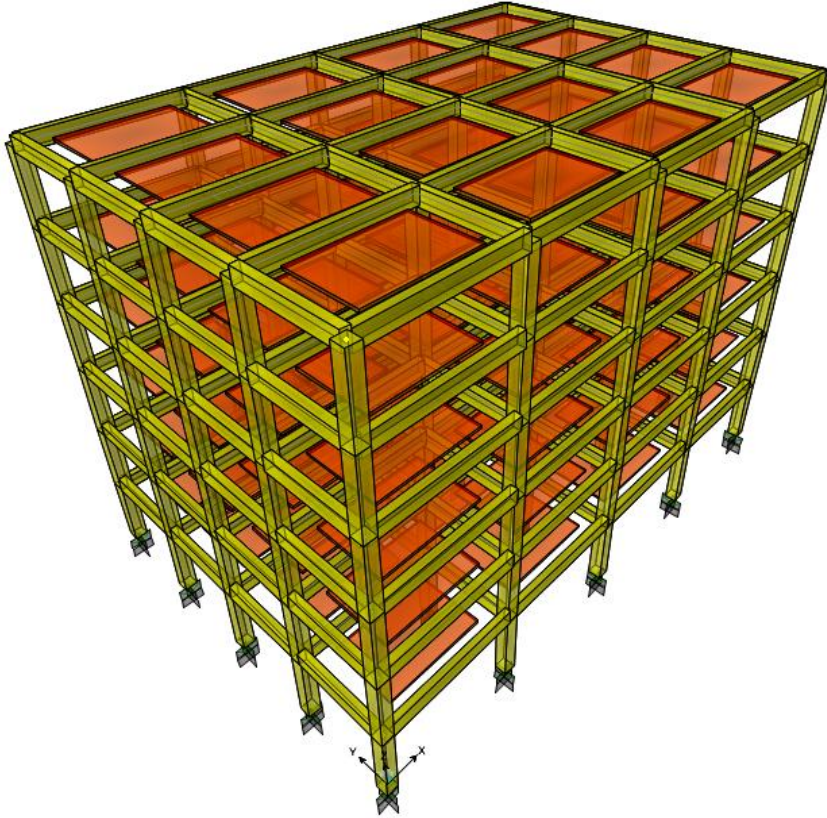
Alternatifler:

- Ankastre Tabanlı
- Kauçuk Mesnetli
- Sürtünmeli Sarkaç Mesnetli
- İzole İlave Kat
- Viskoz Sönümleyicili

Karşılaştırma Kriterleri :

- Toplam Taban Kesme Kuvvetleri
- Orta Kolondaki Maksimum Kat Kesme Kuvvetleri
- Kat Kütle Merkezleri Maksimum Mutlak İvmeleri
- Orta Kolondaki Maksimum Görelî Kat Ötelemeleri

Yapı X yönünde 6'şar, Y yönünde 4'er metre açıklıklı 24x16 m² alana oturmaktadır. Tüm katlarda yükseklik 3 m, döşeme kalınlığı 15 cm dir. Yapıda kullanılan kolon kesitleri 50x50 cm, kiriş kesitleri, 60x30 cm olup, tüm katlardaki döşemeler için hareketli yük 3 kN/m² olarak tanımlanmıştır. Yapı toplam ağırlığı (Ölü Yük + 0,3 x Hareketli Yük) 18.500 kN'dur. Beton malzemesi olarak BS25 seçilmiş ve elastisite modülü 30.250.000 kN/m² olarak alınmıştır.



Şekil 13.2 Yapı Perspektif Görünümü

Deprem ivmesi olarak 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi - Petkim ivme kaydı kullanılmıştır. 0,02 sn aralıklarla 3001 satırdan oluşan 60 sn.lik bu kaydın Kuzey-Güney bileşeni maksimum ivmesi 323,9034 cm/sn², Doğu-Batı bileşeni maksimum ivmesi 233,8749 cm/sn² dir (Şekil 13.3, Şekil 13.4). Kuzey-Güney bileşeni X yönünde, Doğu-Batı bileşeni ise Y yönünde etki ettirilmiştir.

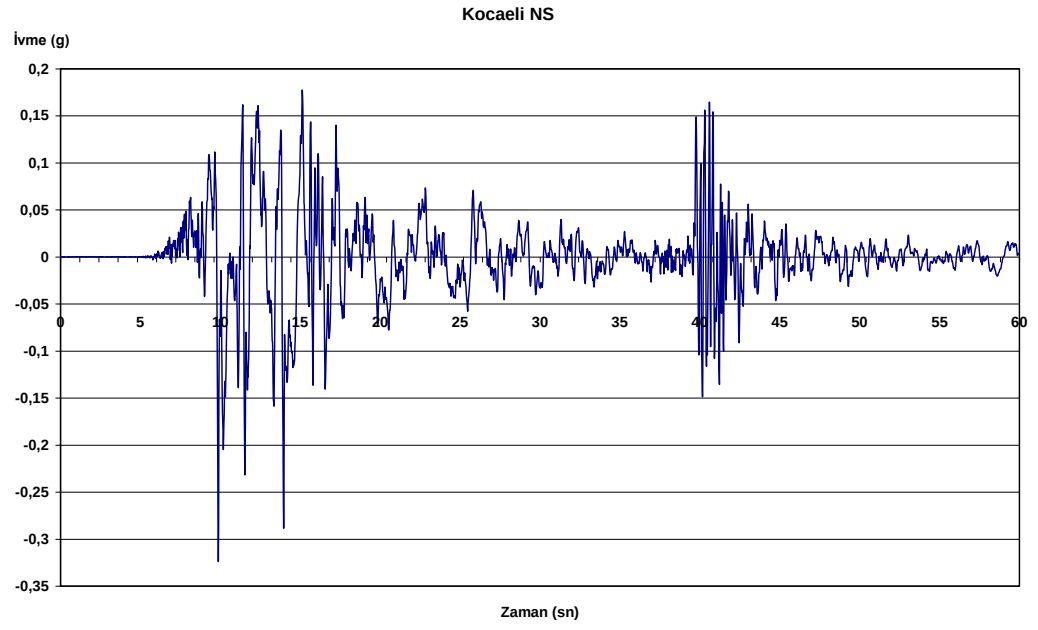
Nonlinear analiz yapıldığı için yapının ve sismik izolatörlerin elastik ötesi davranacağı kabul edilerek, deprem ivme dataları ölçeklendirilirken deprem azaltma katsayısı (süneklik katsayısı) $R=1$ alınmış, yani ivme dataları gerçek değerlerinde bir azalım olmaksızın yapıya etki ettirilmiştir. Yine aynı nedenle tasarım sırasında herhangi bir yönetmeliğe bağlı kalınmamış, sadece görelî kat ötelemelerinin sınırlandırılmasında UBC-97 şartları esas alınmıştır.

Kullanılan izolatör ve sönümleyicilerin özellikleri, üretici firmalardan alınan bilgilerin ışığında, mevcut veya imal edilebilir ürünlerden seçilmiştir. İzolatör özelliklerine karar verilirken, birçok denemeden sonra, kendileri makul ölçüler içinde deplasman yaparken yapıyı; taban kesme kuvveti, kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, görelî kat ötelemeleri gibi kriterlerce minimum etkilere maruz bırakan cihaz özellikleri seçilmiştir. Yine de bunun tam anlamıyla bir optimizasyon olmadığı ve sonuçlara bakarak bu sistemlerin birbirlerine üstünlükleri konusunda yargıya varılamayacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bulunan sonuçlarda asıl amaç, sismik izolasyon alternatiflerinin birbiriyle karşılaştırılması değil, ilk alternatifte gösterilen klasik, ankastre temelli yapı ile kıyaslanmalarıdır.

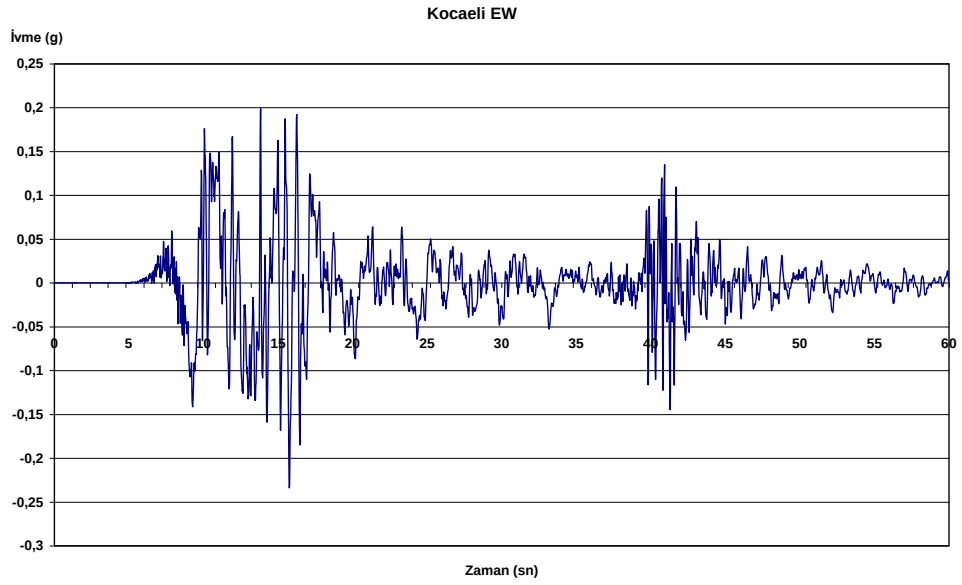
Kat kesme kuvvetleri, kat ivmeleri, görelî kat ötelemeleri değerleri, yapının simetrik olması ve deprem etkisinde büyük burulma etkilerine maruz kalmayacağı düşünülerek, orta kolon üzerinden alınan değerlerle ifade edilmiştir.

Analizde kullanılan kütleler, elemanların kendi ağırlıklarıyla, döşemelere etki eden 3 kN/m^2 'lik yayılı yükün %30'u toplanarak, program tarafından hesaplanmakta ve analize girmektedir. Bu değerler öncelikle ilk 5 sn. de maksimuma ulaşp, 5 sn. daha bu sabit değerle bekleyen bir RAMP fonksiyonu sonrası deprem yüklemesine maruz bırakılmıştır. Modal analiz için, zaman tanım alanında analiz için daha uygun olan Ritz vektörleri kullanılmıştır [14].

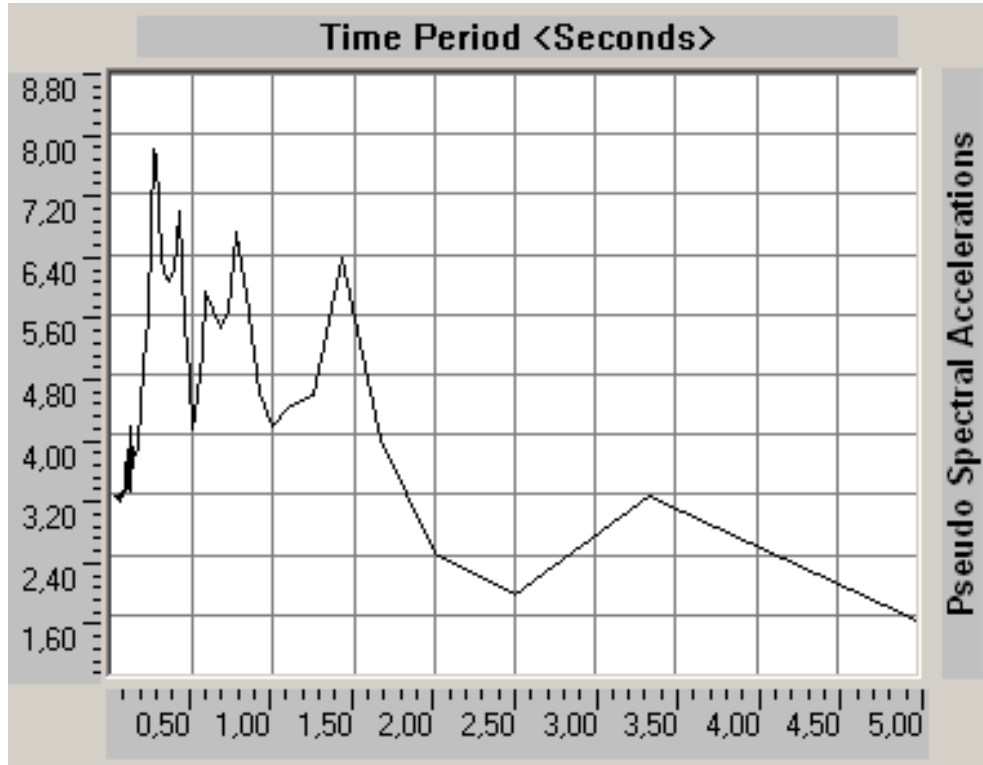
Yapıda izolatör seviyeleri dahil olmak üzere tüm katlar yatayda sonsuz rijit, döşeme diyaframı olarak tanımlanmıştır.



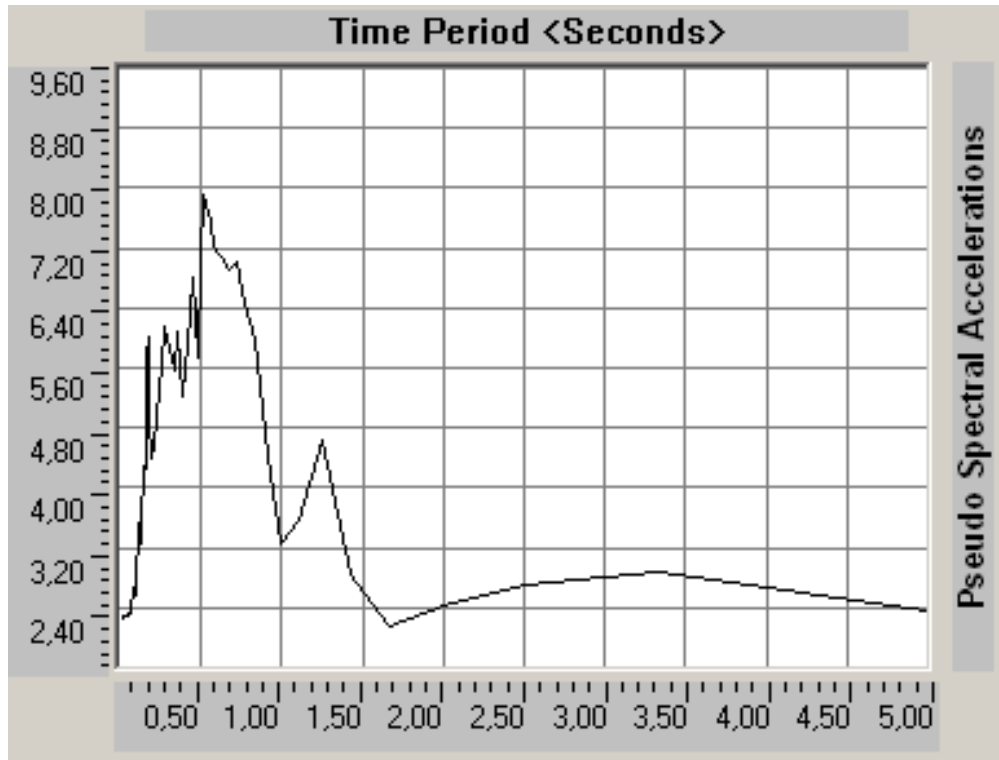
Şekil 13.3 Kocaeli Depremi Kuzey-Güney Bileşeni



Şekil 13.4 Kocaeli Depremi Doğu-Batı Bileşeni

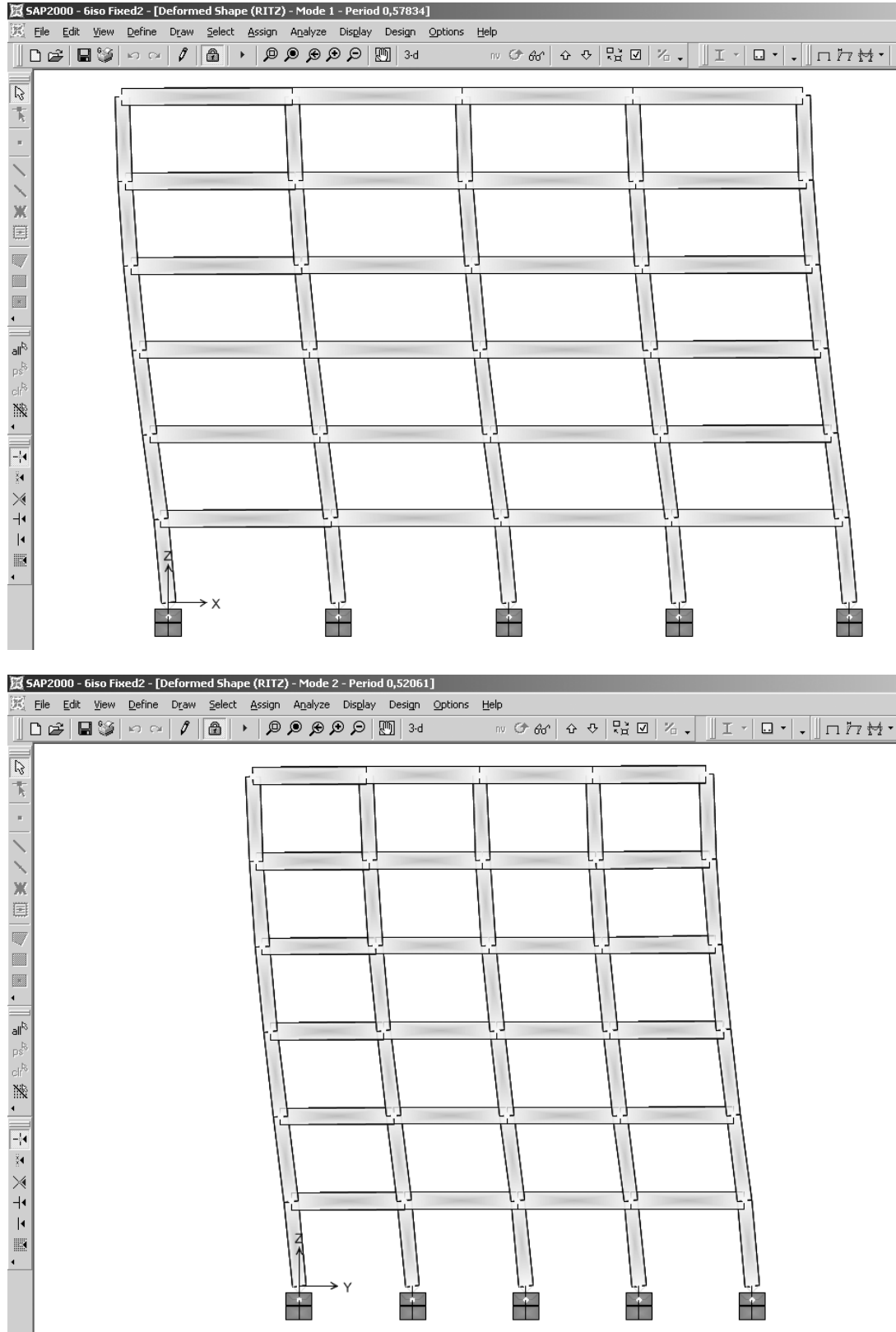


Şekil 13.5 Kocaeli Depremi Kuzey-Güney Bileşeni İvme Spektrumu (m/sn^2)



Şekil 13.6 Kocaeli Depremi Doğu-Batı Bileşeni İvme Spektrumu (m/sn^2)

13.1. Ankastre Tabanlı Alternatif

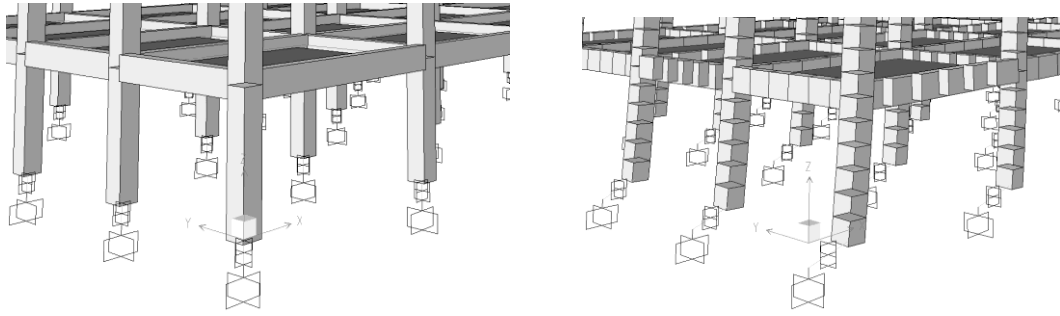


Şekil 13.7 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod)

Yapılan nonlinear dinamik analizde, yapının 1. Mod periyodu X yönünde ve 0,58 sn., 2. Mod periyodu ise Y yönünde ve 0,52 sn. olarak bulunmuştur. Analizde tüm modlar için sönüm oranı 0,05 kabul edilmiştir.

13.2. Kauçuk İzolatörlü Alternatif

Sismik izolatörler sistemde ankastre zemin ile kolonlar arasına yerleştirilen 0,5 m uzunluğunda Nlink elemanlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 13.8).

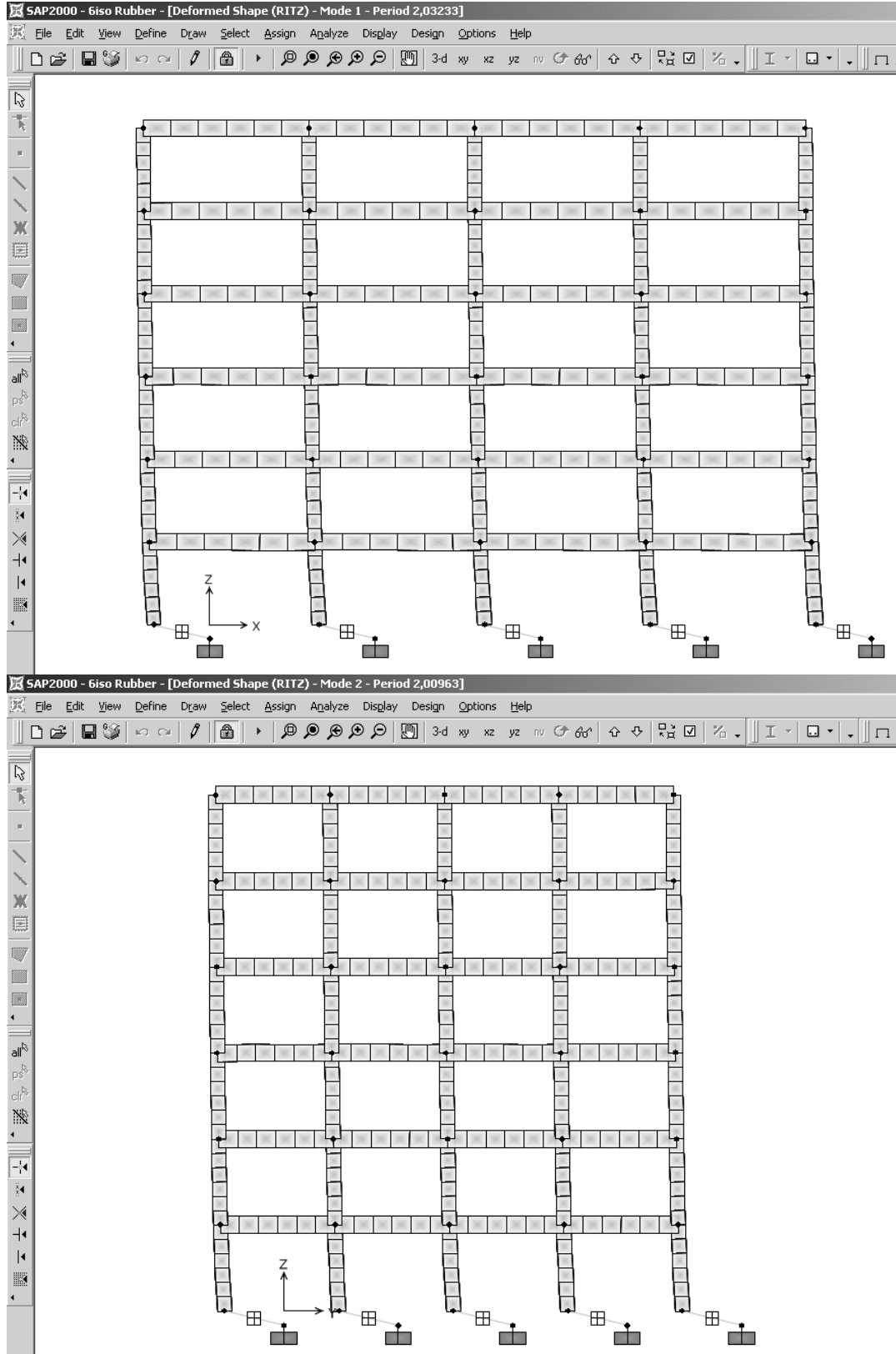


Şekil 13.8 Sismik İzolatör Elemanlarının Tanımlanması

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler (kN-m):

Nonlinear Link Type	: Rubber Isolator
U1 Linear Effective Stiffness	: 1500000 kN/m
U2 and U3 Linear Effective Stiffness	: 800 kN/m
U2 and U3 Nonlinear Stiffness	: 2500 kN/m
U2 and U3 Yield Strength	: 80 kN
U2 and U3 Post Yield Stiffness Ratio	: 0,1

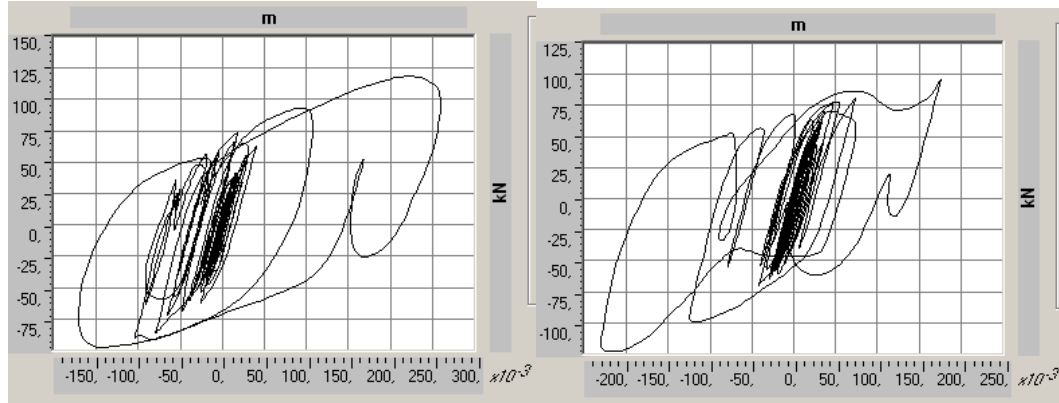
Yukarıda belirtilen parametreler haricinde kalan tüm değerler sıfır olarak girilmiştir. Eşdeğer sönüm değerinin sıfır girilmesinin nedeni nonlinear time history analizinde işlevsiz olmasıdır. Burada sönüm, histeresis eğrisinin deprem yüklemesi etkisindeki çevrimiyle oluşur. Bu sönüm değeri ile modal sönümün çakışmaması için, analiz yaparken ilk 3 mod için modal sönüm değerleri de sıfır kabul edilmiştir. Böylece yapı neredeyse sönümsüz gibi davranacak, tüm sönüm gereksinimi izolatörlerce karşılanacaktır. Burada yapının yaklaşık % 5 olan sönüm yeteneği ihmal edildiği için göreceli kat ötelemeleri, kat ivmeleri gibi değerlerin gerçek değerlerden bir miktar daha yüksek bulunacağı göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 13.9 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod)

Yapılan nonlineer dinamik analizde, yapının 1. Mod periyodu X yönünde ve 2,03 sn., 2. Mod periyodu ise Y yönünde ve 2,01 sn. olarak bulunmuştur.

Şekil 13.10'de yapının ortasında bulunan izolatörün X ve Y yönü için histeresis eğrisi görülmektedir.



Şekil 13.10 Kauçuk Mesnet Histeresis Eğrisi (X ve Yönü)

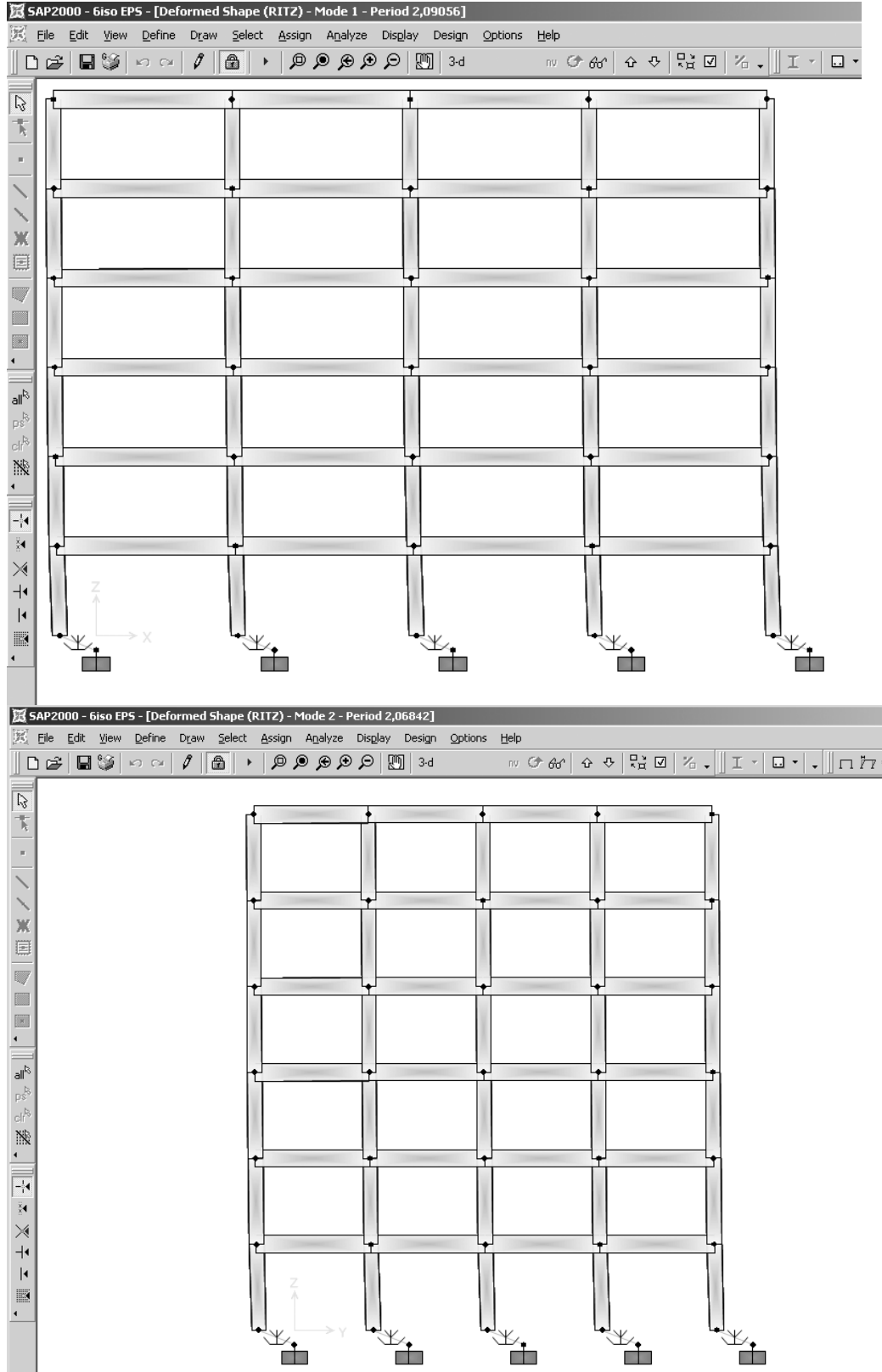
13.3. Sürtünmeli Sarkaç İzolatörlü Alternatif

Sürtünmeli sarkaç izolatörler, kauçuk izolatörler ile aynı şekilde, ankastre zemin ile kolonlar arasına yerleştirilen 0,5 m uzunluğunda Nlink elemanlar olarak tanımlanmıştır (Şekil 13.8).

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler (kN-m):

Nonlinear Link Type	: Friction Isolator
U1 Linear Effective Stiffness	: 15000000 kN/m
U1 Nonlinear Effective Stiffness	: 15000000 kN/m
U2 and U3 Linear Effective Stiffness	: 750 kN/m
U2 and U3 Nonlinear Stiffness	: 15000 kN/m
U2 and U3 Friction Coefficient, Slow	: 0,03
U2 and U3 Friction Coefficient, Fast	: 0,05
U2 and U3 Rate Parameter	: 40
U2 and U3 Radius of Sliding Surface	: 2,23

Yukarıda belirtilen parametreler haricinde kalan tüm değerler sıfır olarak girilmiştir. Kauçuk mesnetli alternatif ile aynı nedenden dolayı eşdeğer sönüm değeri sıfır girilmiştir. Yine aynı nedenden dolayı, analizde ilk 3 mod için modal sönüm değerleri de sıfır kabul edilmiştir.

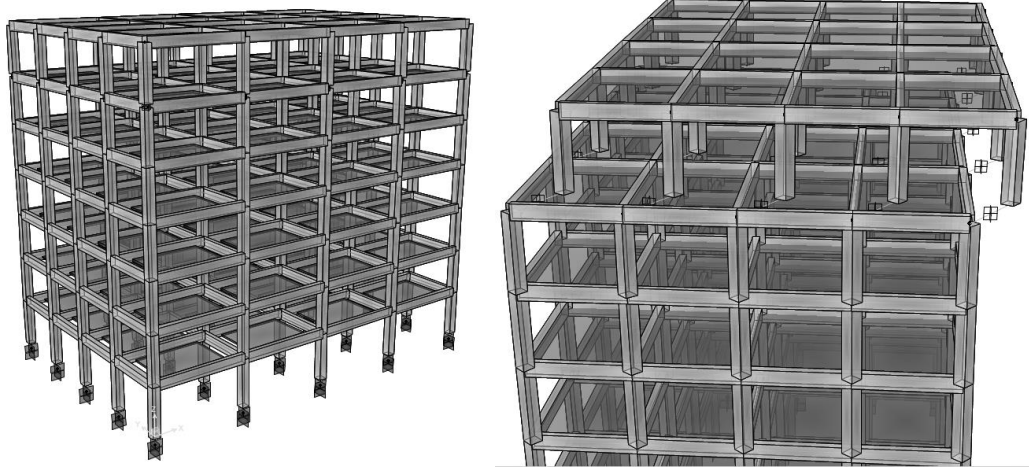


Şekil 13.11 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod)

Yapılan nonlinear dinamik analizde, yapının 1. Mod periyodu X yönünde ve 2,09 sn., 2. Mod periyodu ise Y yönünde ve 2,07 sn. olarak bulunmuştur.

13.4. İlave İzole Kat Alternatifi

Bu alternatifte 6 katlı yapının üzerine, kauçuk sismik izolatörler ile izole edilmiş bir kat daha eklenmiştir. İlave kat, ayarlı kütle sönümleyici (TMD) gibi davranacaktır. 6. kat kolonları ile ilave kat kolonları arasına 0,2 m uzunluğunda Nllink elemanlar tanımlanmıştır (Şekil 13.12).

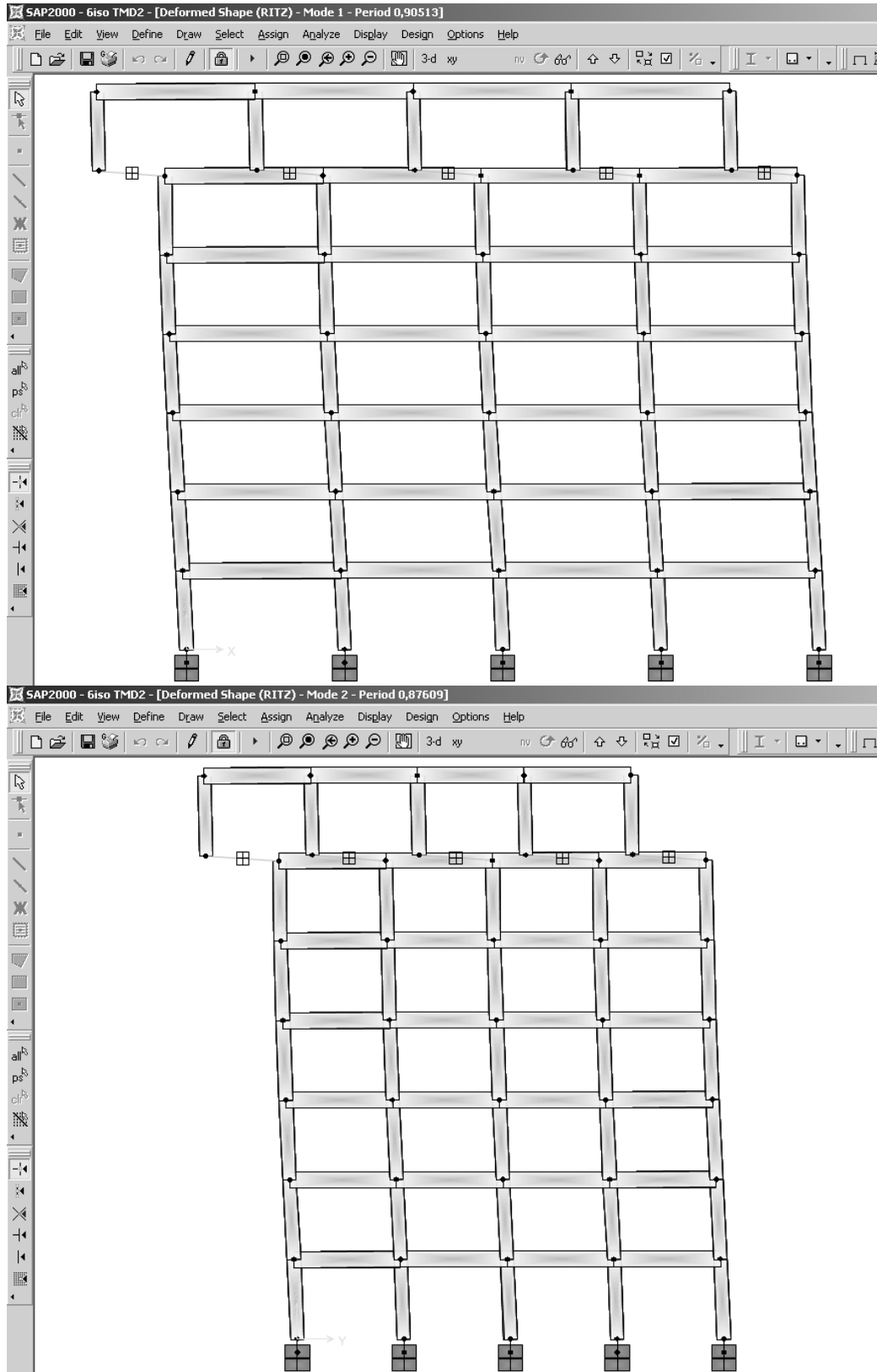


Şekil 13.12 Sismik İzolatör Elemanlarının Tanımlanması

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler (kN-m):

Nonlinear Link Type	: Rubber Isolator
U1 Linear Effective Stiffness	: 1500000 kN/m
U2 and U3 Linear Effective Stiffness	: 800 kN/m
U2 and U3 Nonlinear Stiffness	: 1000 kN/m
U2 and U3 Yield Strength	: 25 kN
U2 and U3 Post Yield Stiffness Ratio	: 0,1

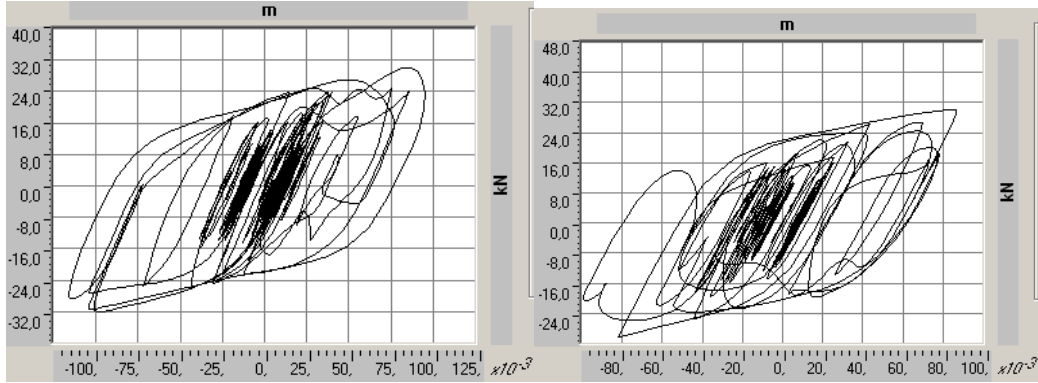
Bölüm 13.2’de belirtilen nedenlerle, yukarıda belirtilen parametreler haricinde kalan tüm değerler ve ilk 3 mod için modal sönüm değerleri sıfır olarak girilmiştir.



Şekil 13.13 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod)

Yapılan nonlineer dinamik analizde, yapının 1. Mod periyodu X yönünde ve 0,91 sn., 2. Mod periyodu ise Y yönünde ve 0,88 sn. olarak bulunmuştur.

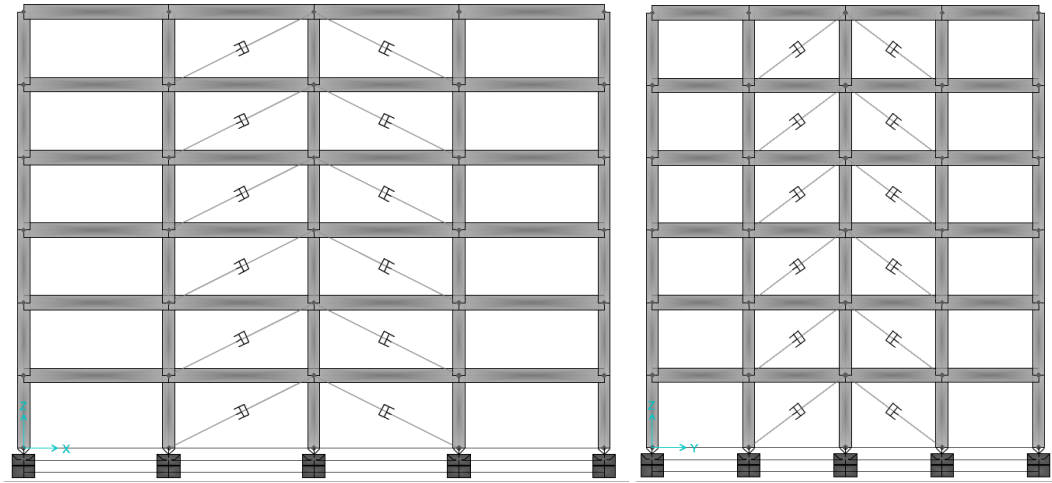
Şekil 13.10’de, ek katın ortasında bulunan izolatörün X ve Y yönü için histeresis eğrisi görülmektedir.



Şekil 13.14 Kauçuk Mesnet Histeresis Eğrisi (X ve Yönü)

13.5. Viskoz Sönümleyicili Alternatif

Bu alternatifte 6 katlı yapının sadece çevre akslarına, Şekil 13.15’te görüldüğü gibi, toplam 48 adet viskoz sönümleyici yerleştirilmiştir.

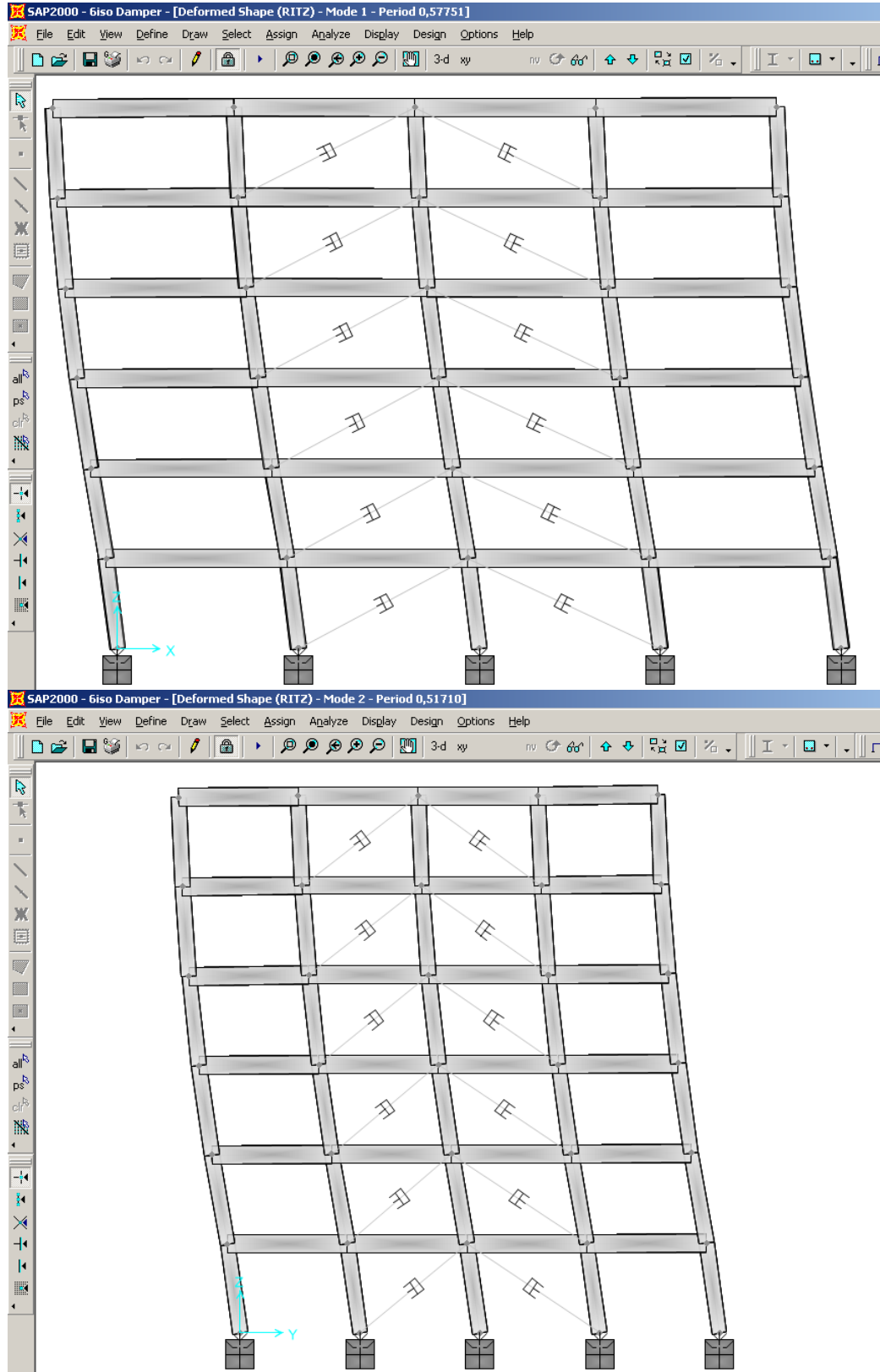


Şekil 13.15 Viskoz Sönümleyicilerin Yerleşimi

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler (kN-m):

Nonlinear Link Type	: Damper
U1 Nonlinear Stiffness	: 210000 kN/m
U1 Nonlinear Damping	: 7000 kN.sec/m
U1 Nonlinear Damping Exponent	: 1

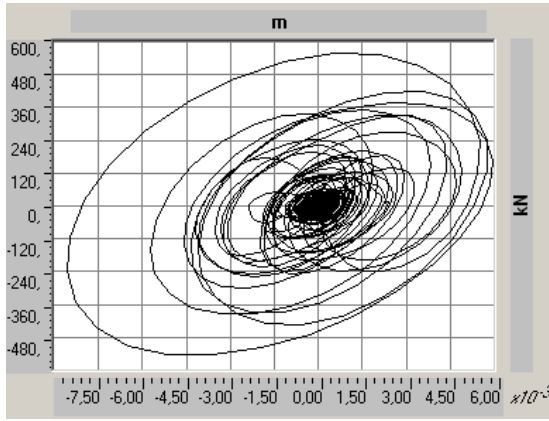
Bölüm 13.2’de belirtilen nedenlerle, yukarıda belirtilen parametreler haricinde kalan tüm değerler ve ilk 3 mod için modal sönüm değerleri sıfır olarak girilmiştir.



Şekil 13.16 Mod Şekilleri (1. Mod ve 2. Mod)

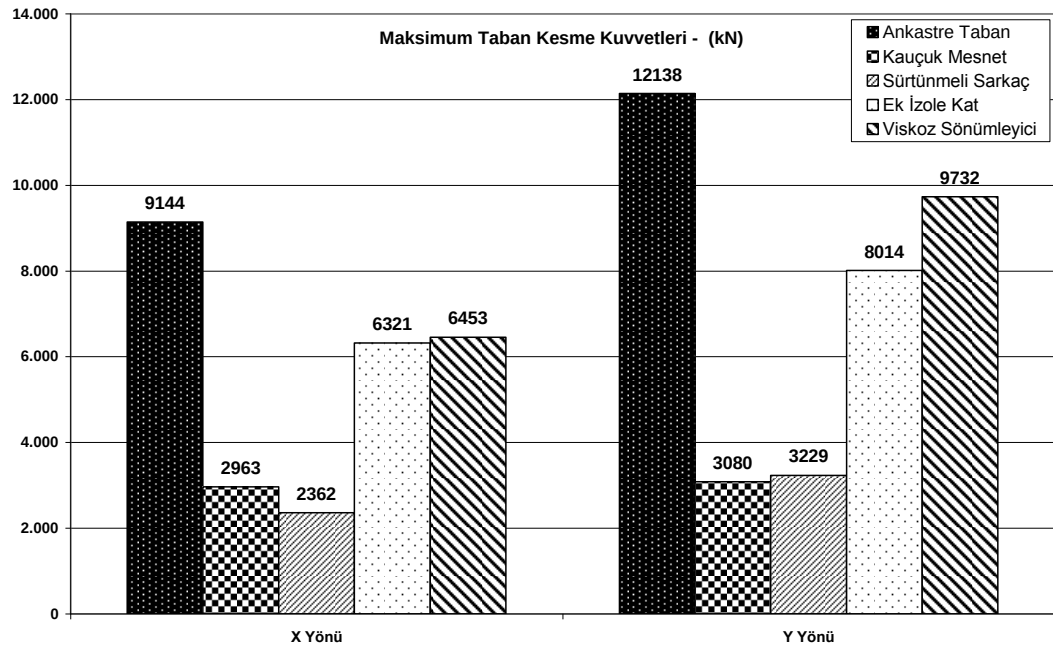
Yapılan nonlinear dinamik analizde, yapının 1. Mod periyodu X yönünde ve 0,58 sn., 2. Mod periyodu ise Y yönünde ve 0,52 sn. olarak bulunmuştur. Ankastre tabanlı çözümün mod şekilleriyle karşılaştırıldığında, viskoz sönümleyicilerin yapının doğal periyodu ve mod şekillerine çok fazla etkisi olmadığı görülmektedir.

Şekil 13.17’de, görelî kat ötelemelerini gösteren grafiğe göre deprem etkisinde en çok zorlandığı görülen 2. kat, Y yönündeki sönümleyicilerden birine ait histeresis eğrisi görülmektedir.



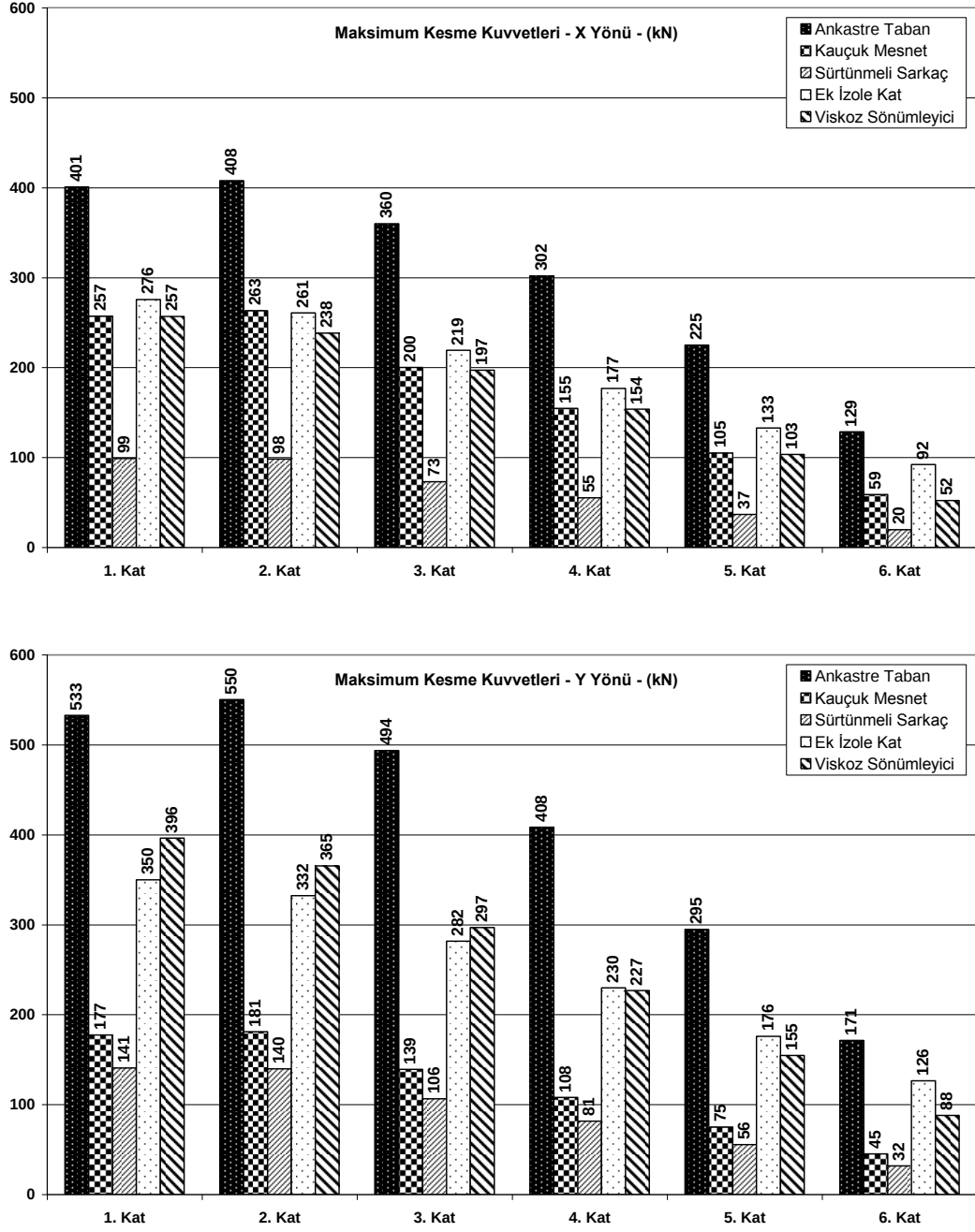
Şekil 13.17 Sönümleyici Histeresis Eğrisi

13.6. Karşılaştırma Kriterleri



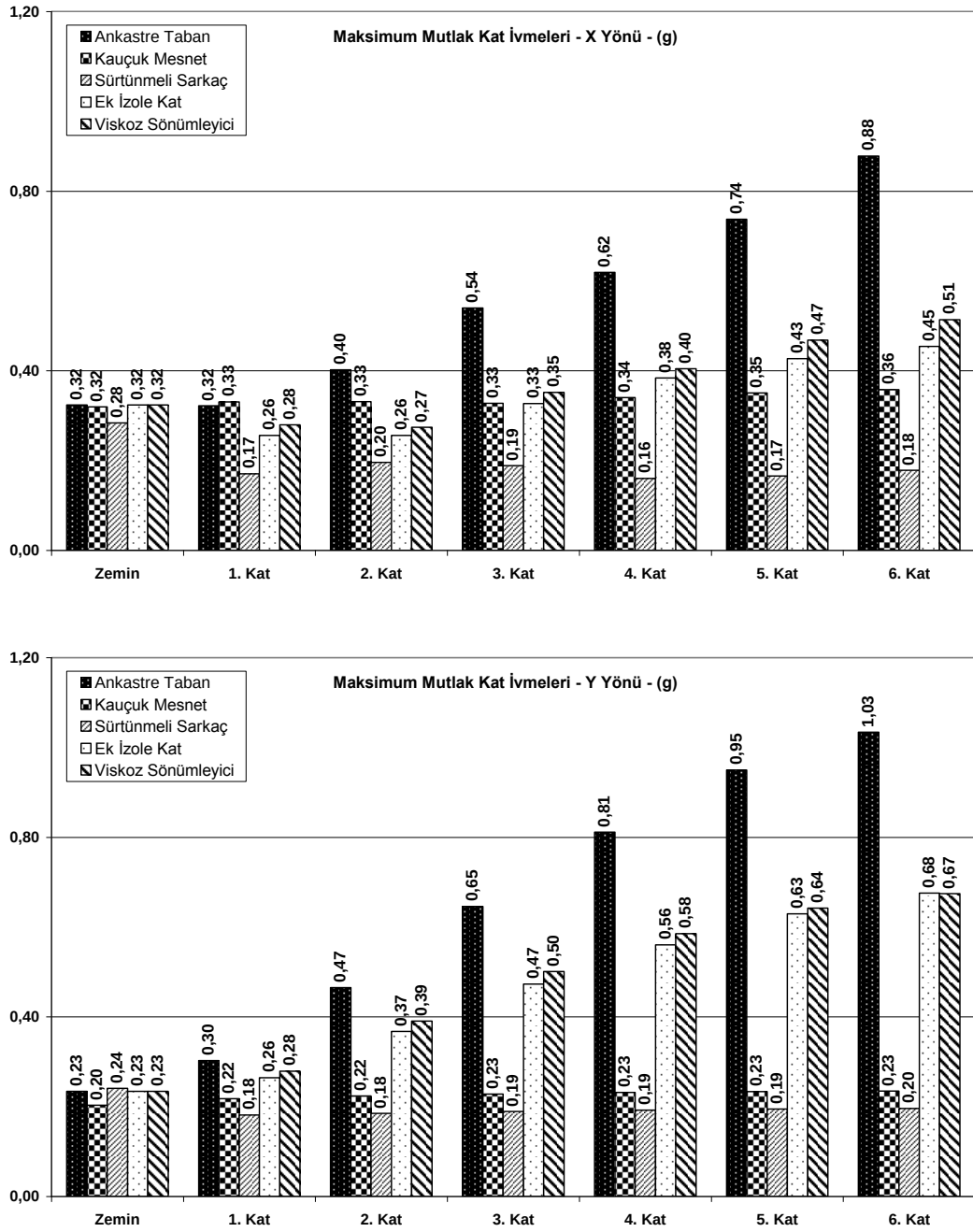
Şekil 13.18 Maksimum Taban Kesme Kuvvetleri – X ve Y Yönü

Şekil 13.19’da X ve Y eksenı için yapının orta kolonlarındaki maksimum kesme kuvvetlerinin katlara göre değışimi görülmektedir.



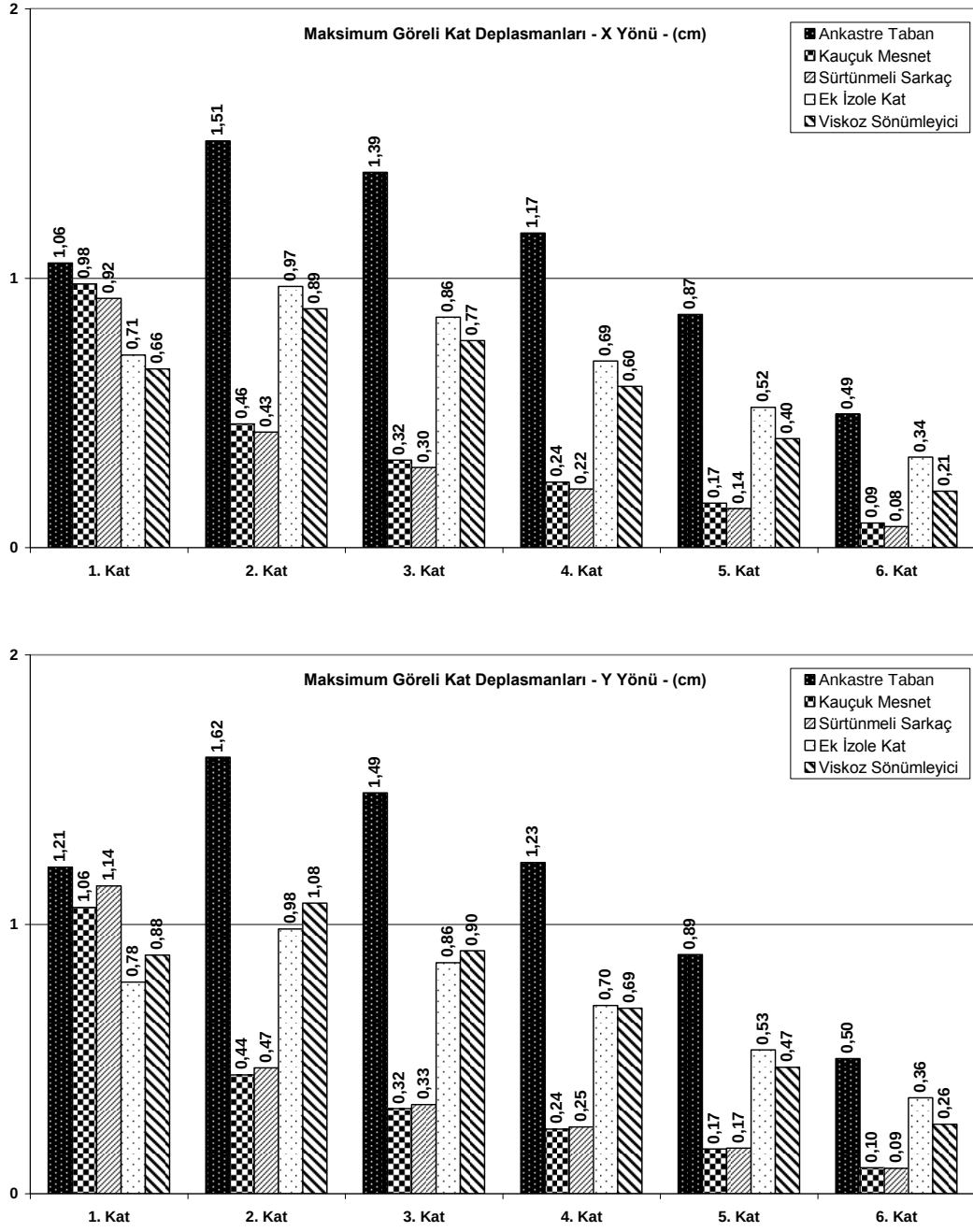
Şekil 13.19 Orta Kolon Maksimum Kesme Kuvvetleri – X ve Y Yönü

Şekil 13.20’da X ve Y eksenı için yapıda kat kütle merkezlerinin maksimum mutlak ivmeleri görölmektedir.



Şekil 13.20 Orta Kolon Maksimum Mutlak Kat İvmeleri – X ve Y Yönü

Şekil 13.21’de X ve Y eksenı için orta kolondaki maksimum görelı kat deplasmanları görölmektedir.



Şekil 13.21 Orta Kolon Maksimum Görelı Kat Deplasmanları – X ve Y Yönü

13.7. Sonuçlar

Bu bölümde, analizlerden elde edilen sonuçlar daha önce belirtilen karşılaştırma kriterleri çerçevesinde incelenmiştir. Bulunan önemli sonuçlar şöyle özetlenebilir :

1. Ankastre durumda yapının 0,58 sn. olan doğal periyodu, taban izolatörleri içeren sistemlerde 2 sn. mertebesine yükselmiştir. Kat kesme, görelilik öteleme ve ivme değerlerine bakıldığında bu değerin, yapının depremin rezonans aralığından tamamen uzaklaşması için yeterli olduğu grlmştir. İlave izole kat alternatifinde ise doğal periyot 0,9 sn. olmuştur. Viskoz sönümleyici içeren alternatifin doğal periyot üzerinde fazla bir etkisi olmadığı grlmektedir.
2. Yapının zayıf olan kısa (Y) yönü, depremin nispeten daha zayıf bileşeni etkisinde kalmasına rağmen deprem etkisinde daha büyük kuvvet, ivme ve deformasyon etkilerine maruz kalmıştır. Bunun bir diğer nedeni de depremin ivme spektrumunda grldğu gibi, ankastre durumda, yapının uzun (X) yönünde doğal periyot değeri olan 0,58 sn. ye karşılık gelen spektral ivme değerinde ani bir düşüş gözlenirken, Y yönünde tam bu periyot değeri için spektral ivmenin maksimuma yakın olmasıdır.
3. Kauçuk ve sürtünmeli sarkaç sistemler için hedef periyot, iki yönde de ivme spektrumunda düşük spektral ivme değerlerine karşılık gelen 2 sn. olarak seçilmiştir. İstenen bu periyot değerine ulaşmak için çeşitli izolatör değerleri denenirken, 1,5 sn. doğal periyot değerine sahip izolatörler kullanıldığında yapının, X yönünde, ankastre durumu da aşan taban kesme kuvvetleri ve görelilik ötelemelerine maruz kaldığı gözlenmiştir. Bunun nedeninin X yönündeki ivme spektrumunda 1,5 sn. periyoda karşılık gelen spektral ivme değerinde gözlenen büyük ve ani yükseliş olduğu anlaşılmıştır.
4. Taban kesme kuvvetlerinde, kauçuk ve sürtünmeli sarkaç alternatiflerin sonuçları birbirine oldukça yakın olup, X yönünde yaklaşık % 71, Y yönünde de yaklaşık % 74 azalma sağlamışlardır. Kuvvetlerdeki bu azalma taban izolasyonunun deprem etkisindeki performansının son derece iyi olduğunu göstermektedir.
5. İlave izole kat alternatifinde taban kesme kuvveti ortalama %32 azalmıştır. Diğer tesirlerdeki azalış da göz önünde bulundurulursa, taban izolasyonu gibi

kat izolasyonunun da (story isolation) yapının özellikleri elverdiği durumlarda bir güçlendirme alternatifi olarak kabul edilebileceği sonucu çıkarılabilir. Bu güçlendirmenin sonucunda yapıda ekstra bir katın kazanılıyor olması, güçlendirme maliyetini azaltan, hatta kârlı hale getiren bir durumdur.

6. Kat ivmelerine bakıldığında, ankastre durumda yukarı katlara gidildikçe 1 g mertebesine ulaşan büyük ivme değerleriyle karşılaşılırken, taban izolatorlular durumlarda ivme değerlerinin katlara bağılı olarak pek değışmediğı ve oldukça düşük değerlerde sabit kaldığı görölmektedir. İvme değerlerinin düşük olması, özellikle yapının değeri ve hassas içeriğinin korunmasında çok önemlidir. Müze ve hastane gibi yapılarda içeriğin, yapının kendisinden çok daha değeri olduğu düşünöldüğünde, sismik izolasyonun özellikle bu tip yapılar için son derece uygun olduğu söylenebilir. İlave izole kat ve viskoz sönümleyici alternatiflerinde de, tüm katlarda sabit kalmasa da, ivmelerde kayda değeri düzeyde azalma sağlandığı görölmektedir.
7. Birinci kat haricinde, tüm alternatiflerde, özellikle de taban izolasyonu alternatifinde göreli kat ötelemelerinin büyük oranlarda azaldığı görölmektedir. Bu durum, taban izolasyonunda üstyapının rijit bir kütleyle yakın davrandığını (rigit body behavior) ortaya koyar. Birinci katta azalmanın az görölmesinin nedeni, Bölüm 13.2’de belirtildiğı gibi, analiz yaparken ankastre taban içeren alternatifte modal sönüm oranı tüm modlar için 0,05 alınırken, diğeri tüm alternatiflerde ilk üç mod için sönüm oranının sıfır alınmasıdır. Böylece ankastre tabanlı olan haricindeki tüm alternatiflerde, yapıların yaklaşık %5 civarındaki doğaı sönüm yeteneğı ihmal edilmiş, sönüm davranışı neredeyse tümüyle sismik koruma cihazlarının davranışına bağılı bırakılmıştır. Bu nedenle sismik koruma cihazları içeren tüm alternatiflerde gerçekte, yapıların doğaı sönümünün de katkısıyla göreli öteleme, ivme ve kesme kuvveti değerlerinin tabloda göröldüğünden de bir miktar daha düşük olacağı bilinmelidir.

14. UYGULAMA II

Sismik izolasyon sistemlerinin çözümünde, basitten karmaşığa doğru gidilirse, sırasıyla aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır; [24]

- Statik eşdeğer deprem yükü analizi : İyi zemine oturan, aktif faylara yakın olmayan, basit, simetrik ve rijit gövde şeklinde davranabilecek derecede alçak yapılarda kullanılabilir. Ülkemizdeki deprem aktivitesi düşünüldüğünde kullanım olanağı oldukça sınırlıdır.
- Lineer karşılık spektrumu analizi : En yaygın kullanım alanı olan analiz tipidir. Özellikle LRB ve HDNR tipi taban izolatörü uygulamalarında gerçeğe oldukça yakın sonuçlar verdiği saptanmıştır.
- Zaman tanım alanında lineer analiz : Harcanan efora oranla verdiği sonuçların oldukça sınırlı olması sebebiyle kullanımı son derece azdır.
- Zaman tanım alanında nonlinear analiz : Sismik izolasyon sistemlerinin analizinde, yönetmeliklerce dayatılan zorunluluk olmadığı durumlarda dahi, çoğu zaman bu yöntem kullanılmaktadır. Doğru modellenmeleri kaydıyla, izolatörlerin gerçek davranışını en iyi ifade etmesi ve yönetmeliklerce teşvik görmesi nedeniyle kullanımı en yaygın yöntem olduğu söylenebilir.

Bu bölümde, temelde LRB tipi dairesel kauçuk izolatörlerle yalıtılmış iki katlı örnek yapı, değişik analiz yöntemleri ile çözülerek sonuçlar değerlendirilmiştir.

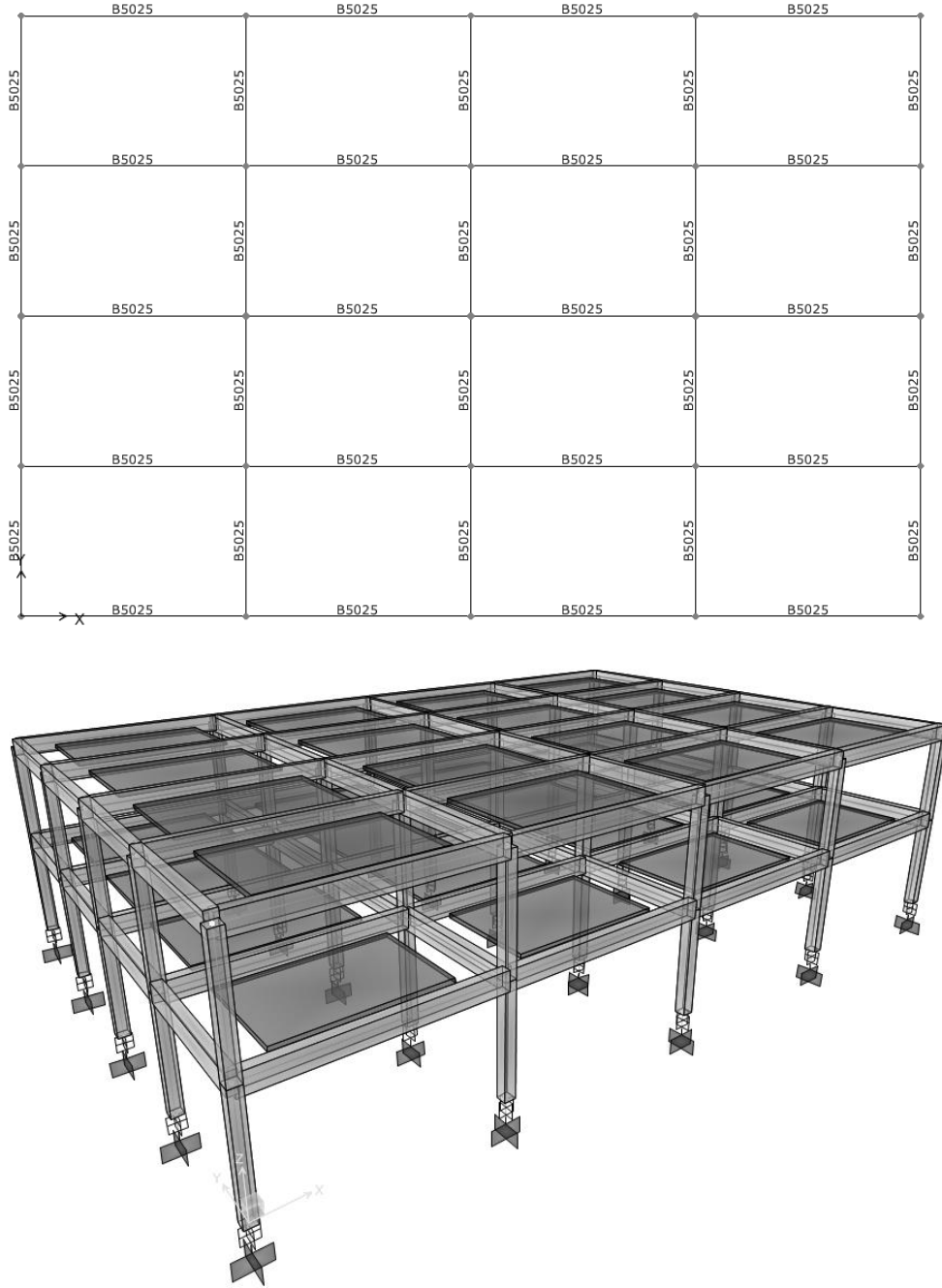
Alternatifler :

- Statik eşdeğer deprem yükü analizi
- Lineer karşılık spektrumu analizi
- Zaman tanım alanında lineer analiz
- Zaman tanım alanında nonlinear analiz

Karşılaştırma Kriterleri :

- Toplam Taban Kesme Kuvvetleri
- Orta Kolondaki Kat Kesme Kuvvetleri
- Mutlak ve görel kat deplasmanları

Yapı, Uygulama I’de incelenen yapı ile aynı plana sahip olup, Uygulama I’deki yapının 2 katlı durumu olarak düşünülebilir. Yani X yönünde 6’şar, Y yönünde 4’er metre açıklıklı 24x16 m² alana oturmaktadır. Kat yükseklikleri 3 m, döşeme kalınlığı 15 cm dir. Farklı olarak bu yapıda kullanılan kolon kesitleri 30x30 cm, kiriş kesitleri, 50x25 cm olarak belirlenmiştir. Hareketli yük 3 kN/m² olup, yapı toplam ağırlığı (Ölü Yük + 0,3 x Hareketli Yük) 4.900 kN’dur. Beton malzemesi olarak BS25 seçilmiş ve elastisite modülü 30.250.000 kN/m² olarak alınmıştır.

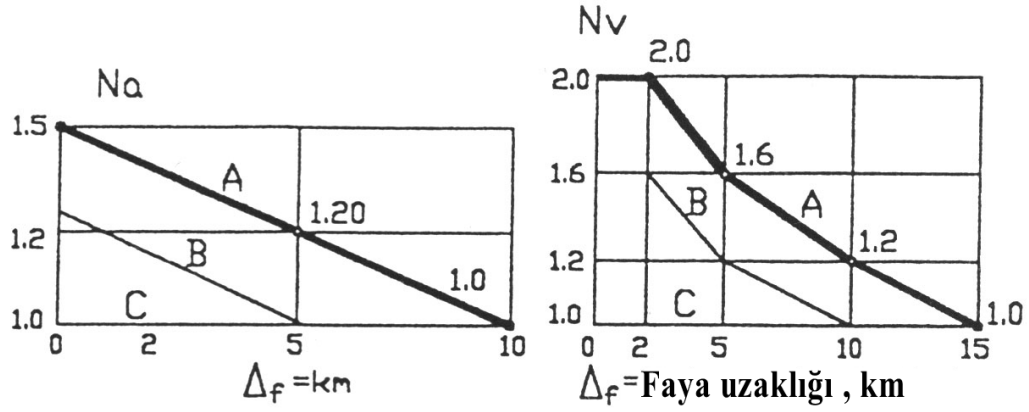


Şekil 14.1 Uygulama II - Kat Planı ve Perspektif Görünüşü

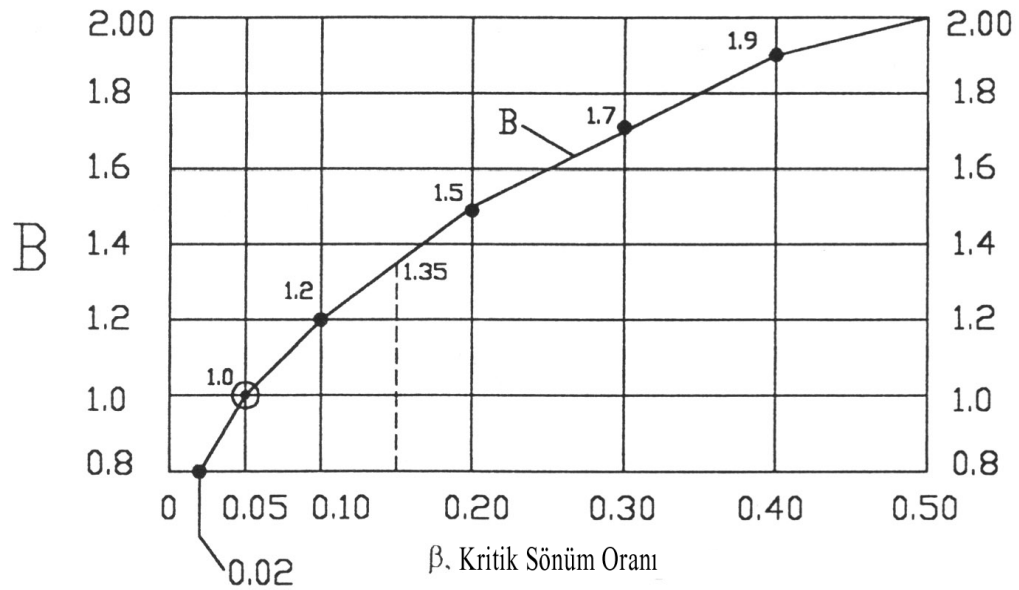
14.1. Statik Eşdeğer Deprem Yüğü Analizi

Bu bölümde, yapıda katlara etkiyen eşdeğer statik deprem yükü, UBC-97 yönetmeliği esaslarına göre Bölüm 11’de açıklanan şekilde bulunacaktır.

14.1.1. Kullanılacak UBC-97 Diyagram ve Tabloları



Fay Tipi	M = Büyüklük	SR = Kayma miktarı/ yıl
Type A	$M \geq 7$	$SR \geq 5 \text{ mm}$
Type B	$6.5 < M < 7$	$2 < SR < 5 \text{ mm}$
Type C	$M < 6.5$	$SR < 2 \text{ mm}$



Şekil 14.2 UBC-97 Fay Tipi, N_a ve N_v Parametreleri

Tablo 14.1 Diğer Katsayılar

C_a	Sismik Bölge Faktörü, Z				
Zemin Tipi	Z=0,075	Z=0,15	Z=0,2	Z=0,3	Z=0,4
S _A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32N _a
S _B	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40N _a
S _C	0,09	0,18	0,24	0,33	0,40N _a
S _D	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44N _a
S _E	0,19	0,30	0,34	0,36	0,36N _a
S _F	S _F zemin tipine ait C _a değerleri, zemin etüdü yapılarak elde edilir.				

C_v	Sismik Bölge Faktörü, Z				
Zemin Tipi	Z=0,075	Z=0,15	Z=0,2	Z=0,3	Z=0,4
S _A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32N _v
S _B	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40N _v
S _C	0,13	0,25	0,32	0,45	0,56N _v
S _D	0,18	0,32	0,40	0,54	0,64N _v
S _E	0,26	0,50	0,64	0,84	0,96N _v
S _F	S _F zemin tipine ait C _v değerleri, zemin etüdü yapılarak elde edilir.				

DBE Sarsıntı Yoğunluğu, ZN_v	MCE Karşılık Katsayısı, M_M
0,075	2,67
0,15	2,00
0,20	1,75
0,30	1,50
0,40	1,25
≥0,50	1,20

C_{AM}	Sismik Bölge Faktörü, Z				
Zemin Tipi	M_MZN_a=0,075	M_MZN_a=0,15	M_MZN_a=0,2	M_MZN_a=0,3	M_MZN_a=0,4
S _A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,8 M _M ZN _a
S _B	0,08	0,15	0,20	0,30	1,0 M _M ZN _a
S _C	0,09	0,18	0,24	0,33	1,0 M _M ZN _a
S _D	0,12	0,22	0,28	0,36	1,1 M _M ZN _a
S _E	0,19	0,30	0,34	0,36	0,9 M _M ZN _a
S _F	S _F zemin tipine ait C _{AM} değerleri, zemin etüdü yapılarak elde edilir.				

C_{VM}	Sismik Bölge Faktörü, Z				
Zemin Tipi	M_MZN_v=0,075	M_MZN_v=0,15	M_MZN_v=0,2	M_MZN_v=0,3	M_MZN_v=0,4
S _A	0,06	0,12	0,16	0,24	0,8 M _M ZN _a
S _B	0,08	0,15	0,20	0,30	1,0 M _M ZN _a
S _C	0,09	0,18	0,24	0,33	1,0 M _M ZN _a
S _D	0,12	0,22	0,28	0,36	1,1 M _M ZN _a
S _E	0,19	0,30	0,34	0,36	0,9 M _M ZN _a
S _F	S _F zemin tipine ait C _{VM} değerleri, zemin etüdü yapılarak elde edilir.				

14.1.2. Analiz

Sismik Bölge Faktörü : $Z=0,40$ (4. Bölge)

Zemin Tipi : S_D

Deprem Kaynak Tipi : A

Kaynak Yakınlık Faktörleri : $\Delta > 10$ km $N_a=1$ $N_v=1$

MCE Davranış Katsayısı : $ZN_v = 0,40 \cdot 1 = 0,40$ olduğuna göre tablodan $M_M=1,25$

Sismik Katsayılar: (tablodan) $C_V=0,64 \rightarrow C_{VD}=0,64$ ve $C_A=0,44 \rightarrow C_{AD}=0,44$

$\alpha = M_M Z N_a = 1,25 \cdot 0,40 \cdot 1 = 0,50 \rightarrow C_{AM} = 1,1 \alpha = 1,1 \cdot 0,50 = 0,55$ (tablodan)

$\alpha' = M_M Z N_v = 1,25 \cdot 0,40 \cdot 1 = 0,50 \rightarrow C_{VM} = 1,6 \alpha = 1,6 \cdot 0,50 = 0,80$ (tablodan)

Sismik İzolatörlerin Sönüm Oranı : $\beta=0,15$ (Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet)

Sönüm Azaltma Faktörü : $B=1,35$ (tablodan interpolasyon ile bulunmuştur)

Yapı Doğal Periyodu (Ankastre) : $T=0,39$ sn. (modal analizden bulunmuştur.)

Yapı Önem Katsayısı : $I=1$

Yapı Davranış Katsayısı : $R_i = 2$

Yapı Toplam Ağırlığı : $(DL + 0,3 LL) = W = 4900$ kN

1. Kat Ağırlığı : $W_1=2450$ kN

2. Kat Ağırlığı : $W_2=2450$ kN

Hedeflenen İzolatör Periyodu ve Malzeme Özellikleri

İzolasyon sisteminin periyot değeri için 2-3 sn. arasında bir değer seçilir.

$T_D = 2,3$ sn. hedef tasarım seviyesi (DBE) periyodu

$T_M = 2,7$ sn. hedef maksimum olası seviye (MCE) periyodu

Şekil 14.3'te, statik yükler altında taban kuvvetlerine bakıldığında, dış akslardaki 16 kolondaki maksimum düşey yük 168,77 kN iken, içte kalan diğer 9 kolona ait maksimum düşey yükün 287,85 kN olduğu görülür. Yapıda, bu iki değer (170 kN ve 290 kN kabul edilebilir) göz önüne alınarak farklı özelliklere sahip, sırasıyla A ve B olmak üzere iki tip LRB izolatör kullanılacaktır.

Rx=1,00 Ry=-0,49 Rz=93,30 Mx=0,48 My=0,99 Mz=0,00	Rx=-0,07 Ry=-0,60 Rz=168,77 Mx=0,60 My=-0,07 Mz=0,00	Rx=0,00 Ry=-0,61 Rz=166,51 Mx=0,61 My=0,00 Mz=0,00	Rx=0,07 Ry=-0,60 Rz=168,77 Mx=0,60 My=0,07 Mz=0,00	Rx=-1,00 Ry=-0,49 Rz=93,30 Mx=0,48 My=-0,99 Mz=0,00
Rx=1,02 Ry=-0,05 Rz=159,09 Mx=0,05 My=1,00 Mz=0,00	Rx=-0,02 Ry=-0,13 Rz=284,24 Mx=0,13 My=-0,02 Mz=0,00	Rx=0,00 Ry=-0,14 Rz=282,68 Mx=0,13 My=0,00 Mz=0,00	Rx=0,02 Ry=-0,13 Rz=284,24 Mx=0,13 My=0,02 Mz=0,00	Rx=-1,02 Ry=-0,05 Rz=159,09 Mx=0,05 My=-1,00 Mz=0,00
Rx=1,03 Ry=0,00 Rz=159,77 Mx=0,00 My=1,01 Mz=0,00	Rx=-0,02 Ry=0,00 Rz=287,85 Mx=0,00 My=-0,02 Mz=0,00	Rx=0,00 Ry=0,00 Rz=286,47 Mx=0,00 My=0,00 Mz=0,00	Rx=0,02 Ry=0,00 Rz=287,85 Mx=0,00 My=0,02 Mz=0,00	Rx=-1,03 Ry=0,00 Rz=159,77 Mx=0,00 My=-1,01 Mz=0,00
Rx=1,02 Ry=0,05 Rz=159,09 Mx=-0,05 My=1,00 Mz=0,00	Rx=-0,02 Ry=0,13 Rz=284,24 Mx=-0,13 My=-0,02 Mz=0,00	Rx=0,00 Ry=0,14 Rz=282,68 Mx=-0,13 My=0,00 Mz=0,00	Rx=0,02 Ry=0,13 Rz=284,24 Mx=-0,13 My=0,02 Mz=0,00	Rx=-1,02 Ry=0,05 Rz=159,09 Mx=-0,05 My=-1,00 Mz=0,00
Rx=1,00 Ry=0,49 Rz=93,30 Mx=-0,48 My=0,99 Mz=0,00	Rx=-0,07 Ry=0,60 Rz=168,77 Mx=-0,60 My=-0,07 Mz=0,00	Rx=0,00 Ry=0,61 Rz=166,51 Mx=-0,61 My=0,00 Mz=0,00	Rx=0,07 Ry=0,60 Rz=168,77 Mx=-0,60 My=0,07 Mz=0,00	Rx=-1,00 Ry=0,49 Rz=93,30 Mx=-0,48 My=-0,99 Mz=0,00

Şekil 14.3 Statik Yükler Altında Taban Kuvvetleri

A tipi izolatör için :

Büyük deformasyonlar için $G=0,5$ Mpa ve $\gamma_{\max}=1,5$

Küçük deformasyonlar için $G=0,7$ Mpa ve $\gamma=0,2$

B tipi izolatör için :

Büyük deformasyonlar için $G=1$ Mpa ve $\gamma_{\max}=1,5$

Küçük deformasyonlar için $G=1,4$ Mpa ve $\gamma=0,2$

Elastisite modülü : $E_c=2000$ Mpa

Minimum Yatay Rijitlik

A tipi izolatör için :

$$k_{D,\min} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 \cdot 170}{2,3^2 \cdot (9,81)} = 129,3 \text{ kN/m} \quad (14.1)$$

$$k_{M,\min} = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = \frac{4\pi^2 \cdot 170}{2,7^2 \cdot (9,81)} = 93,8 \text{ kN/m} \quad (14.2)$$

B tipi izolatör için :

$$k_{D, \min} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 \cdot 290}{2,3^2 \cdot (9,81)} = 220,6 \text{ kN/m} \quad (14.3)$$

$$k_{M, \min} = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = \frac{4\pi^2 \cdot 290}{2,7^2 \cdot (9,81)} = 160,1 \text{ kN/m} \quad (14.4)$$

Minimum Yatay Deplasman

$$d_D = \frac{g C_{vD} T_D}{4\pi^2 B} = \frac{9,81 \cdot (0,64) \cdot (2,3)}{4\pi^2 \cdot 1,35} = 0,27 \text{ m} \quad (14.5)$$

$$d_M = \frac{g C_{vM} T_M}{4\pi^2 B} = \frac{9,81 \cdot (0,80) \cdot (2,7)}{4\pi^2 \cdot 1,35} = 0,40 \text{ m} \quad (14.6)$$

Kullanılacak LRB İzolatörlerin Özellikleri

$$t = \frac{d_D}{\gamma_{\max}} = \frac{0,27}{1,5} = 0,18 \text{ m olduğundan izolatörlerin yüksekliği,} \quad (14.7)$$

t=0,20 m olarak seçildi.

A tipi izolatör için :

$$\text{İzolatörlerin alanı } A = \frac{k_D \cdot t}{G} = \frac{0,1293 \cdot (0,2)}{0,5} = 0,0517 \text{ m}^2 \quad (14.8)$$

$$\text{İzolatörlerin çapı } D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (0,0517)}{\pi}} = 0,26 \text{ m} \quad (14.9)$$

B tipi izolatör için :

$$\text{İzolatörlerin alanı } A = \frac{k_D \cdot t}{G} = \frac{0,2206 \cdot (0,2)}{1} = 0,044 \text{ m}^2 \quad (14.10)$$

$$\text{İzolatörlerin çapı } D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (0,044)}{\pi}} = 0,24 \text{ m} \quad (14.11)$$

Hem A hem de B tipi izolatör için,

D = 0,25 m seçildi.

Buna göre izolatörlerin alanı tekrar

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,25)^2}{4} = 0,049 \text{ m}^2 \text{ olarak hesaplanır.} \quad (14.12)$$

Taban Kesme Kuvvetinin Hesaplanması

İzolatörlerin yatay rijitliği, seçilen yeni özelliklere göre tekrar hesaplanır.

A tipi izolatör için :

$$k_D = \frac{A.G}{t} = \frac{0,049.(0,5)}{0,2} = 122,7 \text{ kN/m} \quad (14.13)$$

B tipi izolatör için :

$$k_D = \frac{A.G}{t} = \frac{0,049.1}{0,2} = 245 \text{ kN/m} \quad (14.14)$$

Yapıdaki izolatörlerin toplam rijitliği hesaplanarak, yapı doğal periyodunun, başlangıçta hedeflenen doğal periyot değerine ($T_D=2,3$ sn) yeterince yakın olup olmadığı değerlendirilecek, eğer yakın değilse izolatör özellikleri değiştirilerek tüm hesaplar baştan yapılacaktır.

$$\Sigma k_D = (16 \cdot 122,7) + (9 \cdot 245) = 4168,2 \text{ kN/m} \quad (14.15)$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_D \cdot g}} = 2\pi \sqrt{\frac{4900}{4168,2.(9,81)}} = 2,17 \text{ sn} \quad (14.16)$$

Bulunan bu değer, 2,3 sn değerine oldukça yakındır. Hesaba devam edilebilir.

Tabandaki yerdeğiştirme değeri

$$d_D = \frac{g C_v T}{4\pi^2 B} = \frac{9,81.(0,64).(2,17)}{4\pi^2 \cdot 1,35} = 0,26 \text{ m} \quad (14.17)$$

Taban kesme kuvveti

İzolatörler için :

$$V_D = (\Sigma \Sigma_D) \cdot d_D = 4168,2.(0,26) = 1084 \text{ kN} \quad (14.18)$$

Üstyapı için :

$$V_{D,s} = (\Sigma \Sigma_D) \cdot d_D \cdot \frac{B}{R_i} = V_D \cdot \frac{B}{R_i} = 1084 \cdot \frac{1,35}{2} = 732 \text{ kN} \quad (14.19)$$

Aynı W ağırlığına ve sismik izolatörlü durumun T_D periyot değerine sahip ankastre tabanlı yapının yatay deprem yükü

$$V_{\text{fixed}} = \frac{C_v I}{RT_D} W \geq 0,11.C_a .I.W \text{ olmalı} \quad (14.20)$$

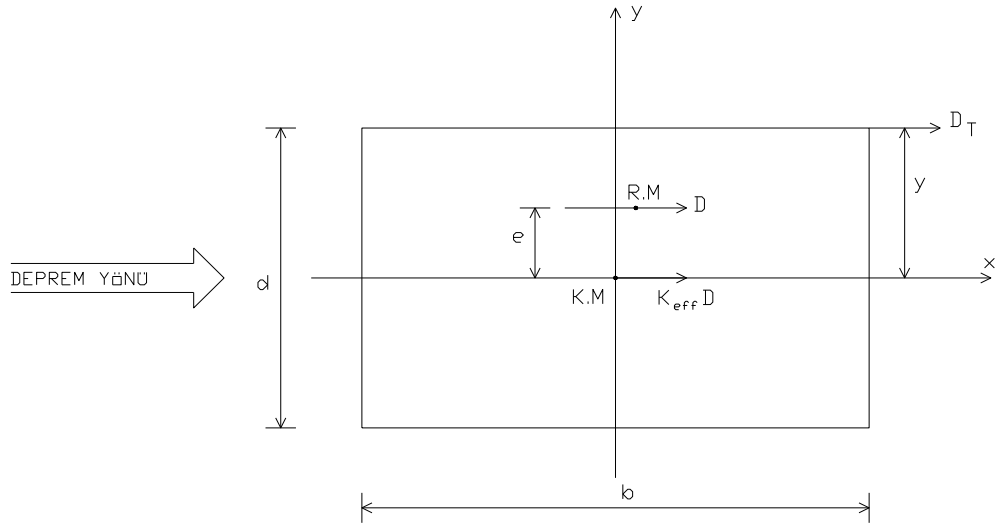
$$V_{\text{fixed}} = \frac{0,64.(1)}{8.(2,17)} 4990 \geq 0,11.(0,44) .1.(4900)$$

$V_{\text{fixed}} = 180,6 \geq 237,2$ kN olmalı. $V_{\text{fixed}} = 237,2$ kN seçilir.

$V_{D,S} > V_{\text{fixed}}$ olmalı. $732 \gg 237,2$ olduğundan O.K.

Burulmaya Göre Toplam Yerdeğiştirme

Yapının burulma etkisi de hesaba katılarak hesaplanan toplam yerdeğiştirmesi (d_{total}), d_D 'nin 1,1 katından az olamaz.



Şekil 14.4 UBC-97 Burulma Parametrelerinin Şematik Gösterimi

$$e = e_r \pm 0,05.d \quad (14.21)$$

Yapı planda simetrik olduğundan $e_r = 0$

Yapının kısa kenarı $d=16$ m

$$e = 0,05 \cdot 16 = 0,8 \text{ m}$$

$$y = (d/2) + e = (16/2) + 0,8 = 8,8 \text{ m} \quad (14.22)$$

$$d_{\text{total}} = d_D \left(1 + \frac{12ey}{b^2 + d^2} \right) = d_D \left(1 + \frac{12.(0,8).(8,8)}{24^2 + 16^2} \right) = 1,101.d_D \quad (14.23)$$

$$d_{\text{total}} = 0,26 \cdot (1,101) = 0,29 \text{ m}$$

Efektif Düşey Modül

$$\frac{D}{80} \leq t_0 \leq \frac{D}{40} \quad (t_0 = \text{Kauçuk katmanlarının her birinin yüksekliği}) \quad (14.24)$$

$$\frac{0,25}{80} \leq t_0 \leq \frac{0,25}{40}$$

$$3,1\text{mm} \leq t_0 \leq 6,2\text{mm}$$

$t_0 = 6 \text{ mm}$ seçildi.

Şekil Faktörü

$$S = \frac{D}{4t_0} = \frac{0,25}{4 \cdot (0,006)} = 10,4 \quad (14.25)$$

Düşey yükler altında basınç etkisinde kalan izolatörler oldukça küçük kesme deformasyonlarına maruz kalacağı için $G_a = 0,7 \text{ Mpa}$ ve $G_b = 1,4$ değerleri kullanılır.

$$E_{\text{eff, v}} = \frac{6GS^2 E_c}{6GS^2 + E_c} \text{ olmak üzere} \quad (14.26)$$

A tipi izolatör için :

$$E_{\text{eff, v}} = \frac{6 \cdot (0,7) \cdot (10,4)^2 \cdot 2000}{6 \cdot (0,7) \cdot (10,4)^2 + 2000} = 370 \text{ Mpa} \quad (14.27)$$

B tipi izolatör için :

$$E_{\text{eff, v}} = \frac{6 \cdot (1,4) \cdot (10,4)^2 \cdot 2000}{6 \cdot (1,4) \cdot (10,4)^2 + 2000} = 625 \text{ Mpa} \quad (14.28)$$

Düşey Titreşim Periyodu

Yapının düşey rijitliği

$$k_v = \frac{A \cdot E_{\text{eff}}}{t} = \frac{0,049 \cdot (16 \cdot 370 + 9 \cdot 625)}{0,2} = 2828555 \text{ kN/m} \quad (14.29)$$

Düşey yerdeğiştirme

$$\Delta t = \frac{W \cdot t}{A \cdot E_{\text{eff}}} = \frac{W}{k_v} = \frac{4900}{2828555} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 1,7\text{mm} \quad (14.30)$$

Düşey Periyot

$$T_v = \frac{T_h}{S \sqrt{6}} = \frac{2,17}{10,4 \sqrt{6}} = 0,085\text{sn} \quad (14.31)$$

Kesme Deformasyonu ve Düşey Yük

Düşey yük etkisinde kesme deformasyonu

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta t}{t} = \frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{0,20} = 0,0085 \quad (14.32)$$

$$\gamma_v = 6S \varepsilon_z = 6 \cdot (10,4) \cdot 0,0085 = 0,53 \quad (14.33)$$

Yatay yük etkisinde kesme deformasyonu

$$\gamma_s = \frac{\tau}{G} = \frac{V_D}{A \cdot G} = \frac{k_D \cdot d_D}{A \cdot G} \quad (14.34)$$

A tipi izolatör için :

$$\gamma_s = \frac{0,1227 \cdot (0,26)}{0,049 \cdot (0,5)} = 1,3$$

B tipi izolatör için :

$$\gamma_s = \frac{0,245 \cdot (0,26)}{0,049 \cdot (1,0)} = 1,3$$

Maksimum kesme deformasyonu

$$\gamma_{\max} = \gamma_v + \gamma_s = 0,53 + 1,3 = 1,83 \quad (14.35)$$

Burkulma Riski Kontrolü

Kritik burkulma yükü

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{A \cdot G \cdot \pi^2 \cdot E_{eff} \cdot I}{3t^2}} \quad (14.36)$$

A tipi izolatör için :

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{0,049 \cdot (0,5) \cdot \pi^2 \cdot 370 \cdot (\pi \cdot 370 \cdot 125)^4 \cdot 0,25}{3 \cdot (0,2)^2}} = 0,378 \text{ MN} > 0,170 \text{ MN}$$

B tipi izolatör için :

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{0,049 \cdot (1) \cdot \pi^2 \cdot 625 \cdot (\pi \cdot 625 \cdot 125)^4 \cdot 0,25}{3 \cdot (0,2)^2}} = 0,695 \text{ MN} > 0,290 \text{ MN}$$

Burkulma riski olmadığı görülmektedir.

Kurşun Çekirdek

Kurşun Çekirdeğin Çapı

$$d_{\text{lead}} < t / 1,5 = 0,20 / 1,5 = 0,13 \text{ m} \quad (14.37)$$

$d_{\text{lead}} = 0,05 \text{ m}$ seçildi.

$$A_{\text{lead}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{lead}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,05)^2}{4} = 0,002 \text{ m}^2$$

Kurşunun Akma Anındaki Kesme Kuvveti

$$Q = \frac{A_{\text{loop}}}{4d_D} \quad A_{\text{loop}} = \beta \cdot 2\pi \cdot k_D \cdot d_D^2 \quad (14.38)$$

A tipi izolatör için :

$$k_D = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T^2 \cdot g} = \frac{4\pi^2 \cdot (170)}{2,17 \cdot (9,81)} = 315 \text{ kN/m} = k_{\text{eff}} \quad (14.39)$$

$$A_{\text{loop}} = 0,15 \cdot (2\pi \cdot 1122,7 \cdot (0,26)^2) = 7,8 \text{ kNm}$$

$$Q_y \approx \frac{A_{\text{loop}}}{4d_D} = \frac{7,8}{4 \cdot (0,26)} = 7,5 \text{ kN} \quad (14.40)$$

$$\tau_y = \frac{Q_y}{A_{\text{lead}}} = \frac{7,5}{0,002} = 3750 \text{ kN/m}^2 = 3,75 \text{ Mpa} < \tau_{y_{\text{max}}} = 10,5 \text{ Mpa} \quad \text{O.K.}$$

B tipi izolatör için :

$$k_D = \frac{4\pi^2 \cdot W}{T^2 \cdot g} = \frac{4\pi^2 \cdot (290)}{2,17 \cdot (9,81)} = 537 \text{ kN/m} = k_{\text{eff}} \quad (14.41)$$

$$A_{\text{loop}} = 0,15 \cdot (2\pi \cdot 1245 \cdot (0,26)^2) = 15,6 \text{ kNm}$$

$$Q_y \approx \frac{A_{\text{loop}}}{4d_D} = \frac{15,6}{4 \cdot (0,26)} = 15 \text{ kN} \quad (14.42)$$

$$\tau_y = \frac{Q_y}{A_{\text{lead}}} = \frac{15}{0,002} = 7500 \text{ kN/m}^2 = 7,5 \text{ Mpa} < \tau_{y_{\text{max}}} = 10,5 \text{ Mpa} \quad \text{O.K.}$$

Eşdeğer Deprem Yüğü

Yukarıdaki kontroller yapıldıktan sonra üstyapı için bulunan taban kesme kuvveti katlara dağıtılabilir. Buna göre :

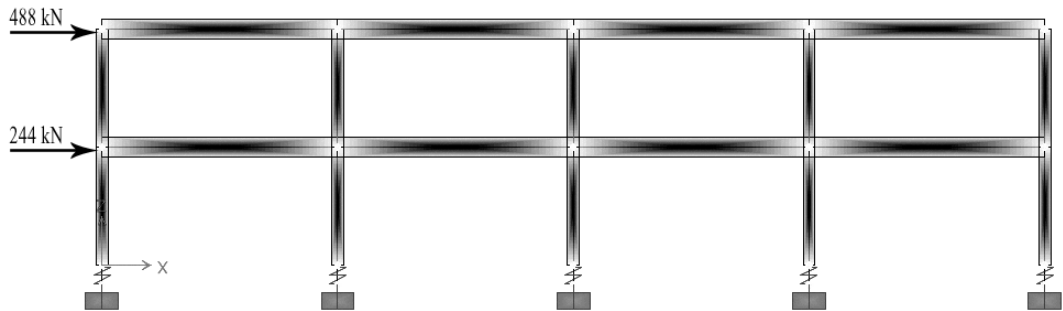
$V_{D,S} = 732$ kN olduğundan her bir kata düşen eşdeğer statik deprem yükü

$$F_i = \frac{W_i \cdot h_i}{\sum W_i \cdot h_i} \cdot V_{D,S} \quad (14.43)$$

$$F_1 = \frac{2450 \cdot (3)}{2450 \cdot (3) + 2450 \cdot (6)} \cdot 732 = 244 \text{ kN}$$

$$F_2 = \frac{2450 \cdot (6)}{2450 \cdot (3) + 2450 \cdot (6)} \cdot 732 = 488 \text{ kN}$$

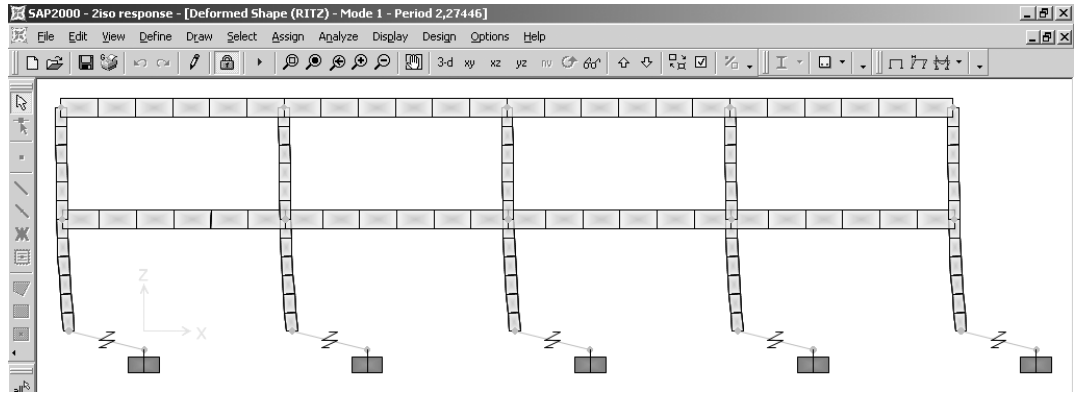
Bu uygulamada karşılaştırma yapmak için sadece bir doğrultu yeterli görülmüştür. Kat kuvvetleri, Şekil 14.5'te görülen şekilde yapının uzun (X) yönünde, katlara etki ettirilir.



Şekil 14.5 UBC-97 Eşdeğer Statik Kat Kesme Kuvvetleri

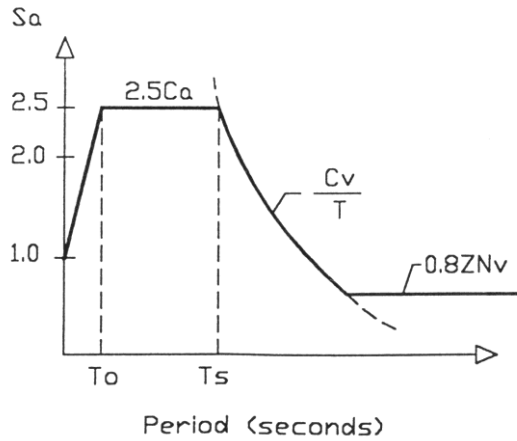
14.2. Karşılık Spektrumu Analizi

Bu uygulamada dinamik analizlerde titreşim modlarının elde edilmesi için Ritz Vektörleri kullanılmıştır. Buna göre Şekil 14.6'da görülen sonuçlar karşılık spektrumunda olduğu gibi lineer ve nonlinear zaman tanım alanı analizlerinde de geçerlidir. Şekilde görüldüğü gibi, Ritz analizinde yapı doğal periyodu 2,275 sn. olarak hesaplanmıştır. Bu değerin statik analizde bulunan doğal periyot değerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.



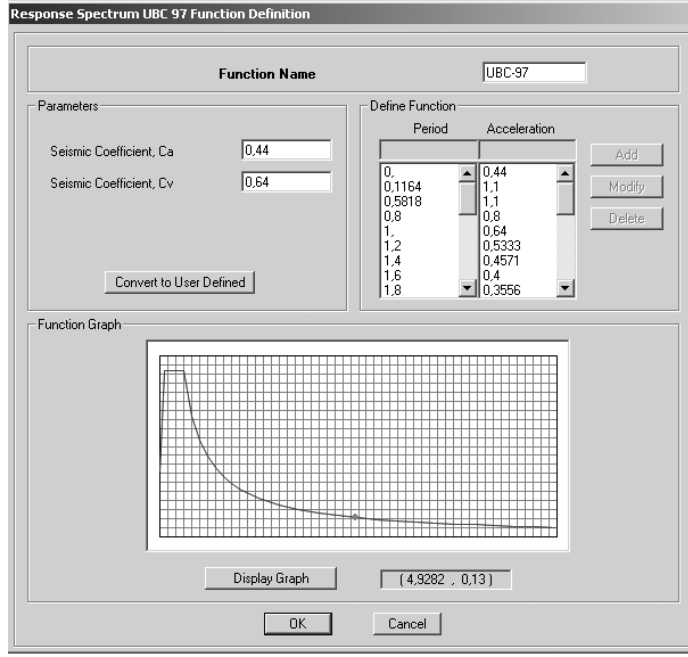
Şekil 14.6 Ritz Vektörleri 1. Mod Şekli

Karşılık spektrumu analizi için, ilk yapılması gereken, Şekil 14.7'da görüldüğü şekilde, UBC-97 yönetmeliği ivme spektrum eğrisini oluşturmaktır.



Şekil 14.7 UBC-97 İvme Spektrumu

SAP2000 V.8 ve sonraki versiyonlarda UBC-97 spektrum eğrisi tanımlıdır. Yani C_a ve C_v değerlerinin girilmesiyle, periyot ve ivme değerleri program tarafından hesaplanmakta ve eğri tanımlanmaktadır (Şekil 14.8).



Şekil 14.8 SAP2000’de UBC-97 İvme Spektrumu

Spektrum eğrisi tanımlandıktan sonra, diğer analiz parametreleri girilmelidir.

Analysis Case : Response Spectrum

Modal Analysis Case : RITZ

Modal Combination : SRSS

Load Type : Accel

Load Name : U1

Function : UBC-97

Scale Factor : 4,905

1998 Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY) esaslarına göre analiz yaparken Response Spectrum Scale Factor değeri; $A_0 \cdot g \cdot I/R$ olarak girilmesi gerekli iken UBC-97’de spektrum eğrisi zaten A_0 değerini içerdiğinden

$$\frac{g \cdot I}{R} = \frac{9,81 \cdot (1)}{2} = 4,905 \text{ olarak girilmiştir (Şekil 14.9).}$$

Analysis Case Data - Response Spectrum

Analysis Case Name: RESPONSE [Set Def Name]

Analysis Case Type: Response Spectrum

Modal Combination: ☐ CQC ☒ SRSS ☐ ABS ☐ GMC ☐ 10 Pct ☐ Dbl Sum

Directional Combination: ☒ SRSS ☐ ABS

GMC I1: [] GMC I2: [] ABS Scale Factor: []

Modal Analysis Case: Use Modes from this Modal Analysis Case: RITZ

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	UBC-97	4.905
Accel	U1	UBC-97	4.905

[Add] [Modify] [Delete]

☐ Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05 [Modify/Show...]

[OK] [Cancel]

Şekil 14.9 SAP2000’de Karşılık Spektrumu Analiz Parametreleri

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler (kN-m):

A Tipi İzolatörler

Nonlinear Link Type : Rubber Isolator
 U1 Linear Effective Stiffness : 40000 kN/m
 U2 and U3 Linear Effective Stiffness : 122,5 kN/m
 Effective Damping : 0,15

B Tipi İzolatörler

Nonlinear Link Type : Rubber Isolator
 U1 Linear Effective Stiffness : 80000 kN/m
 U2 and U3 Linear Effective Stiffness : 245 kN/m
 Effective Damping : 0,15

Bölüm 13.2’de belirtilen nedenlerle, yukarıda belirtilen parametreler haricinde kalan tüm değerler ve ilk 3 mod için modal sönüm değerleri sıfır olarak girilmiştir.

14.3. Zaman Tanım Alanında Lineer Analiz

Bu alternatifte ivme değerleri, karşılık spektrumunda olduğu gibi tüm depremleri temsil eden genel bir spektrum eğrisinden değil, kaydedilmiş gerçek bir deprem ivme datasından alınacak ve yapı ile sismik izolasyon sisteminin bu ivmelere verdiği karşılık adım adım hesaplanacaktır. Deprem ivmesi olarak Bölüm 13'te de kullanılan 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi - Petkim ivme kaydının Kuzey-Güney bileşeni tanımlanmıştır.

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	IZMIT-NS	4.905
Accel	U1	IZMIT-NS	4.905

Şekil 14.10 SAP2000’de Lineer Time History Analiz Parametreleri

Bölüm 13.2’de belirtilen nedenlerle, ilk 3 mod için modal sönüm değerleri sıfır olarak girilmiştir. Scale Factor değeri olarak ise

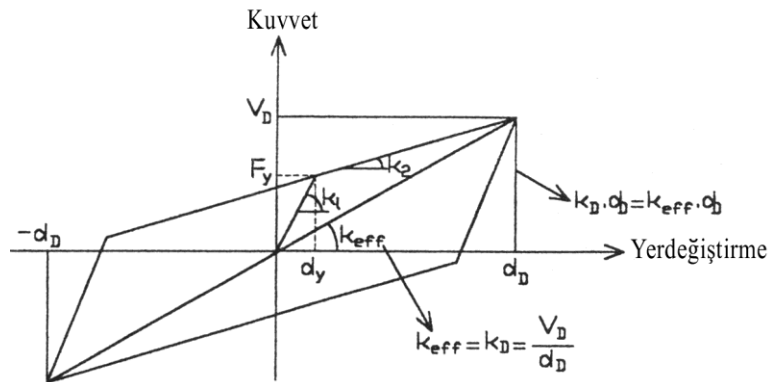
$$\frac{g \cdot I}{R} = \frac{9,81 \cdot (1)}{2} = 4,905 \text{ olarak girilmiştir.}$$

Kullanılan izolatörlerin SAP2000 programında tanımlanabilmesi için seçilen parametreler Bölüm 14.2’de belirtilen değerler ile tamamen aynıdır.

14.4. Zaman Tanım Alanında Nonlineer Analiz

Analiz parametreleri Şekil 14.10'de gösterilen lineer time history analysis durumundaki ile aynıdır. Tek fark olarak, “Analysis Type” bölümünde LINEAR olarak işaretlenmiş olan seçeneği NONLINEAR olarak değiştirmek yeterlidir.

Nonlineer hesap yapılırken kullanılacak izolatörlere ait parametrelerin belirlenmesi için, kullanılan LRB tipi mesnetler bi-lineer olarak modellenmiştir.



Şekil 14.11 Bi-lineer Modelleme Parametreleri

$k_1 = 10.k_2$ olduğu kabul edilebilir. SAP2000’de Post Yield Stiffness Ratio parametresi ile gösterilen değer 0,1 olarak girilecektir.

A tipi izolatör için :

$$k_2 = k_D - \left(\left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \frac{Q_y}{d_D} \right) = 122,7 - \left((0,9) \cdot \frac{7,5}{0,26} \right) = 96,7 \text{ kN/m}$$

$$k_1 = 10 \cdot (96,7) = 967 \text{ kN/m}$$

$$d_y = \frac{Q_y}{k_1 - k_2} = \frac{7,5}{967 - 96,7} = 0,0086 \text{ m}$$

$$F_y = Q_y + k_2 \cdot d_y = 7,5 + 96,7 \cdot (0,0086) = 8,33 \text{ kN}$$

B tipi izolatör için :

$$k_2 = k_D - \left(\left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \frac{Q_y}{d_D} \right) = 245 - \left((0,9) \cdot \frac{15}{0,26} \right) = 193,1 \text{ kN/m}$$

$$k_1 = 10. (193,1) = 1931 \text{ kN/m}$$

$$d_y = \frac{Q_y}{k_1 - k_2} = \frac{15}{1931 - 193,1} = 0,0086 \text{ m}$$

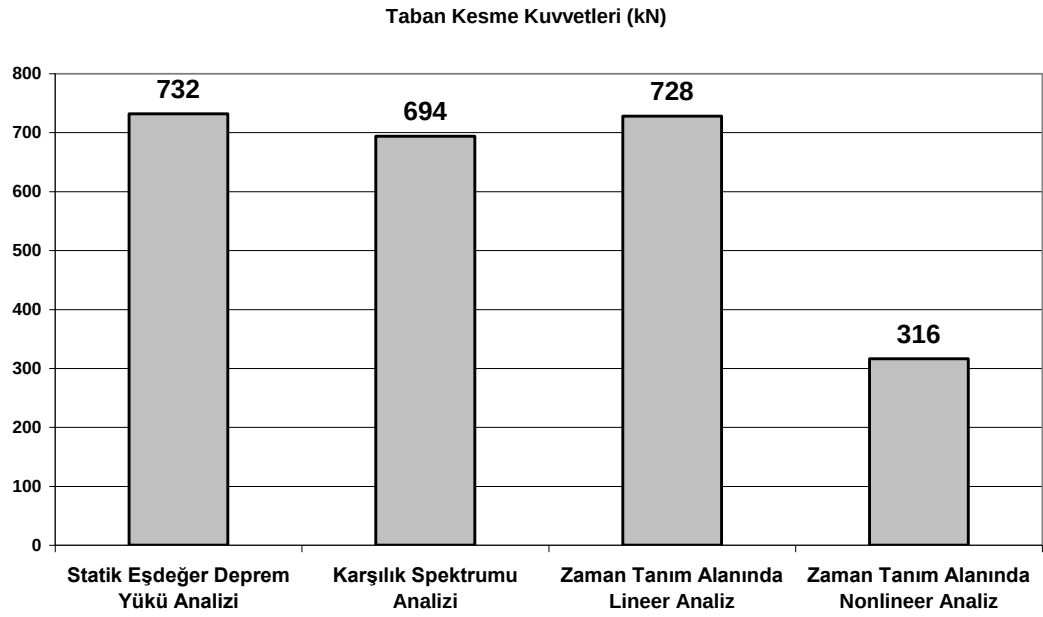
$$F_y = Q_y + k_2.d_y = 15 + 193,1 \cdot (0,0086) = 16,66 \text{ kN}$$

Buna göre, A tipi ve B tipi izolatörlere ait parametreler Şekil 14.12’de görüldüğü gibi olacaktır. SAP2000’deki yapı modeli üç boyutlu olarak oluşturulduğundan şekilde görülen parametreler hem U2 hem de U3 yönünde girilmelidir. U1 yönündeki rijitlik ve sönüm parametreleri ise Bölüm 14.2’dekiler ile aynıdır.

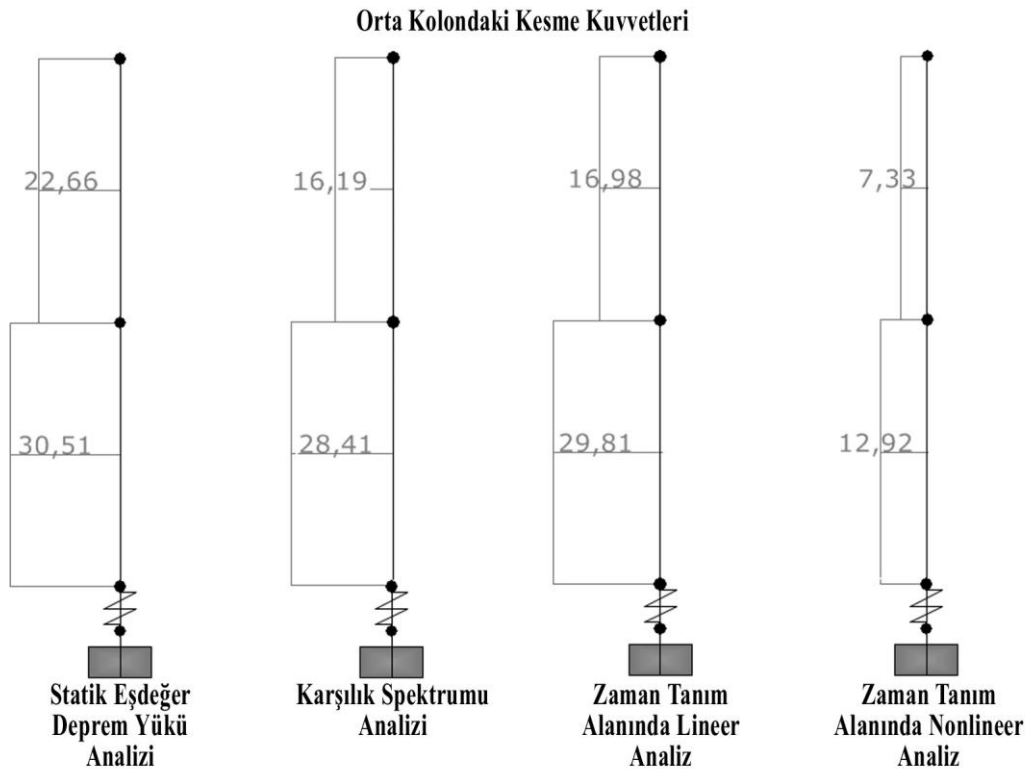
Property	A Tipi	B Tipi
Property Name	A Tipi	B Tipi
Direction	U2	U2
Type	Rubber Isolator	Rubber Isolator
NonLinear	Yes	Yes
Effective Stiffness	122,7	245,
Effective Damping	0,	0,
Distance from End-J	0,	0,
Stiffness	96,7	193,1
Yield Strength	8,33	16,66
Post Yield Stiffness Ratio	0,1	0,1

Şekil 14.12 LRB İzolatörlerin Nonlinear Modelleme Parametreleri

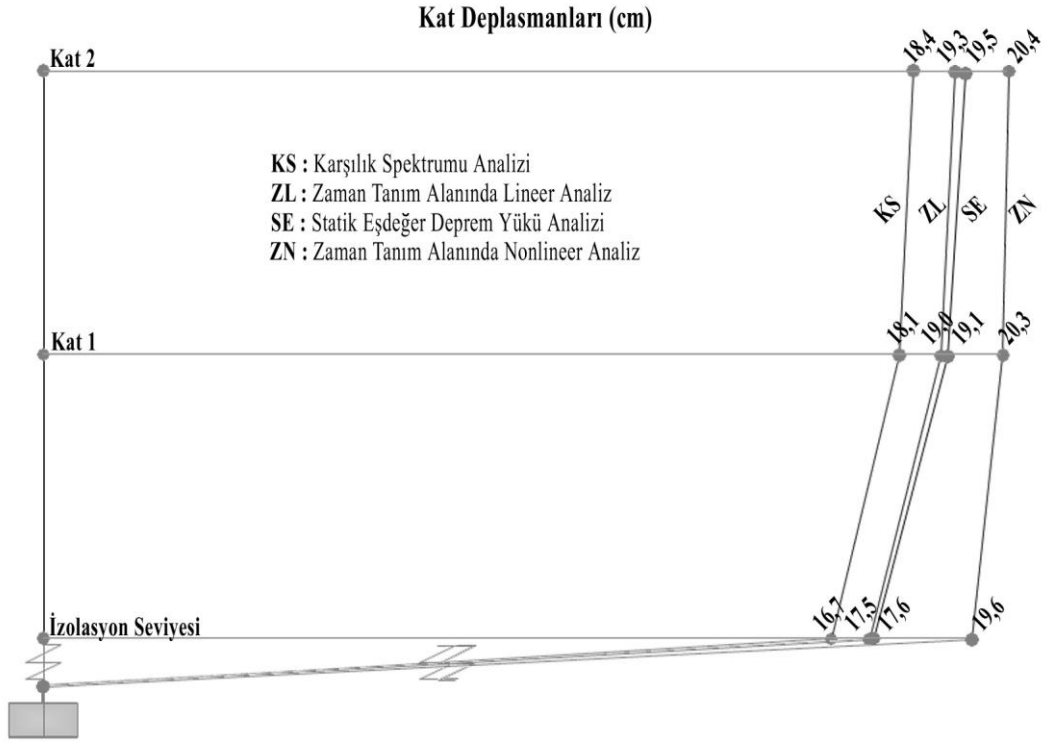
14.5. Karşılaştırma Kriterleri



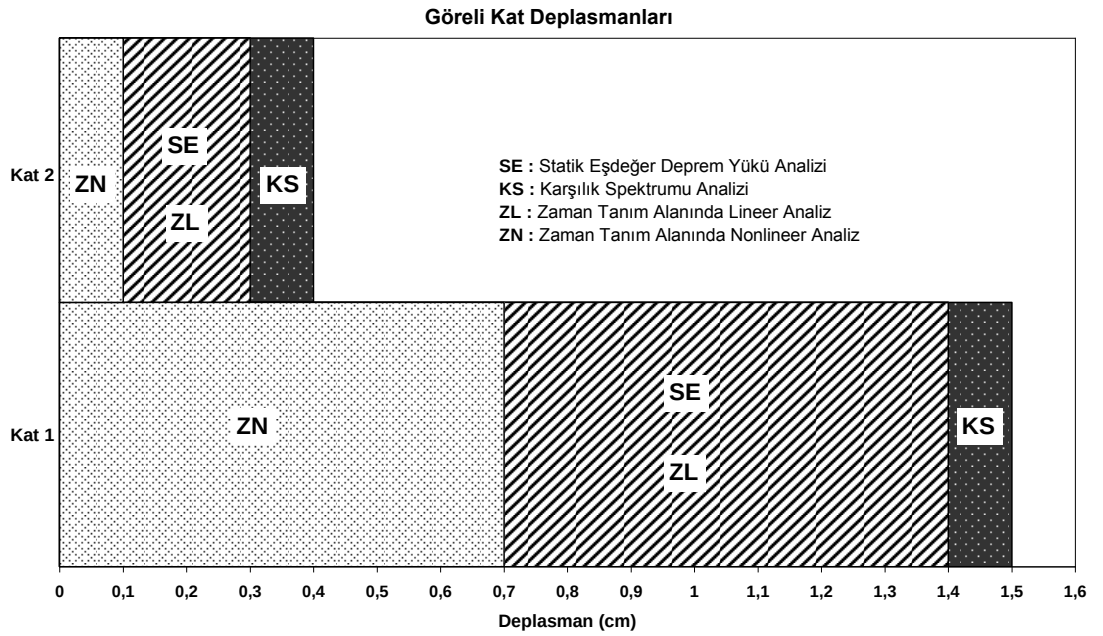
Şekil 14.13 Taban Kesme Kuvvetleri



Şekil 14.14 Orta Kolondaki Kesme Kuvvetleri



Şekil 14.15 Mutlak Kat Deplasmanları



Şekil 14.16 Görelî Kat Deplasmanları

14.6. Sonuçlar

Karşılaştırma kriterleri çerçevesinde bulunan önemli sonuçlar şöyle özetlenebilir :

1. Dinamik analizlerde kullanılacak titreşim modlarını elde etmek için yapılan Ritz analizinde, yapı doğal periyodu 2,275 sn. olarak hesaplanmıştır. Bu değerin statik hesap sonucu bulunan doğal periyot $T_D=2,17$ sn. değerine oldukça yakın olduğu grlmektedir.
2. Taban kesme kuvvetleri, kat deplasmanları ve orta kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri incelendiğinde, özellikle ilk üç analiz alternatifini için (SE, KS ve ZL) makul ve son derece yakın sonuçlar elde edildiği grlmektedir.
3. Nonlinear analiz sonuçları diğer alternatiflere kıyasla daha büyük farklılık arz etmektedir. Bunun nedeni, bu analiz metodunun pekçok parametreye son derece duyarlı olması ve hesapta kullanılan nonlinear parametrelerin basit statik yöntemler ile elde edilmiş olmasıdır. Nonlinear analiz yapılacaksa, linear parametreler hesaplandıktan sonra üretici firma katalogundan bu değerlere en uygun olanı seçmek ve nonlinear parametreleri o izolatörün laboratuvar test sonuçlarından okumak daha uygun olacaktır.
4. Statik eşdeğer deprem yükü yönteminin dahi, özellikle az katlı yapılarda sismik izolasyon sistemleri tasarlanırken, gerçeğe yakın sonuçlar verdiği grlmektedir. Buna göre, tasarım yapılırken önce statik, sonra karşılık spektrumu ve daha sonra zaman tanım alanında analizlerin yapılması mantıklı olacaktır. Böylece yönetmeliklerin karmaşık hesap yöntemlerine gösterdiği teşvikten yararlanılırken sonuçların doğruluğu da kontrol edilmiş olur.
5. Statik eşdeğer deprem yükü hesabı yaparken, başlangıçta seçilen izolatör özellikleri, çeşitli aşamalarda kontrol kriterlerini sağlamamış ve yeni özellikler ile hesap tekrarlanmak zorunda kalınmıştır. Zaman kaybını en aza indirmek için başlangıçtan itibaren hesapların bir veri işleme ve tablolama programında (Excel, Lotus 1-2-3 vs.) yapılması uygun olacaktır.
6. Alternatifler içinde yer almasa da yapı, kontrol amacıyla ankastre tabanlı olarak analiz edilmiş, taban kesme kuvveti 2500 – 2900 kN civarında hesaplanmıştır. Buna göre sismik izolasyon kullanımının yapıdaki taban kesme kuvvetlerinde yaklaşık % 75 oranında azalma sağladığı grlmektedir.

15. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışma göstermiştir ki, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemler, yeni yapıların tasarımında ve mevcut yapıların güçlendirme uygulamalarında son derece olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca sistemlerin modellenmesi ve analizinde, basit çözüm metotları ile gerçeğe yakın sonuçlar bulmanın mümkün olduğu görülmektedir. Bu sistemlerin kullanımının, yapım maliyetlerinde önemli derecede azalma sağlayabileceği de düşünüldüğünde, sismik izolasyon ve enerji sönümleyici sistemlerin, depreme dayanıklı yapı tasarımında mühendislerin elindeki en etkili araçlardan biri olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Komodromos, P.**, 2000. Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures, WIT Press, UK
- [2] **Cimilli, S. ve Tezcan, S.**, 2002. Seismic Base Isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı , İstanbul
- [3] **Erkal, A. ve Tezcan S.**, 2002. Seismic Base Isolation and Energy Absorbing Devices, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı , İstanbul
- [4] **Kelly, J.M.**, 1991. Base Isolation: Origins and Development, University of California, EERC News, Vol. 12, No. 1, January Berkeley
- [5] **Atımtay, E.**, 2001. Çerçevesi ve Perdeli Betonarme Sistemlerin Tasarımı – Temel Kavramlar ve Hesap Yöntemleri, Ankara
- [6] **Khashaee, P. and Mohraz, B.**, 2003. Distribution of Earthquake Input Energy in Structures, U.S. National Institute of Standards and Technology,
- [7] **Blandon, C.A.**, 2004. Equivalent Viscous Damping Equations for Direct Displacement Based Design, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk (Rose School)
- [8] **Medeot R.**, 2004, Seismic Isolation, Energy Dissipation And Related Seismic Hardware, İ.M.O. İstanbul Semineri, İstanbul.
- [9] **Celep Z., Kumbasar N.**, 1993, Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, İkinci Baskı, İstanbul.
- [10] **Celep Z., Kumbasar N.**, 1996, Yapı Dinamiği ve Deprem Mühendisliğine Giriş, Üçüncü Baskı, İstanbul.
- [11] **Melik, M.**, 2002. Deprem Etkisindeki Yapıların Aktif Kütle Sönümleyici ve Aktif Kiriş Kontrol Sistemleri İle Korunması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

- [12] **FEMA**, 1997, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Report No. 274, Chapter 9: Seismic Isolation and Energy Dissipation, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. October.
- [13] **Constantinou, M.C.**, 2000, Seismic Evaluation and Retrofit of the Ataturk International Airport Terminal Building, MCEER.
- [14] **User Guide**, SAP2000 User Guide, Version 8.0, University Avenue Berkeley, California, USA
- [15] **Yüce, İ.E.**, 2003. Yapılarda Sismik İzolasyon ve Yeni Bir Performans Kavramı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [16] **Albanesi, T., Nuti, C.**, 1999, Seismic Response Of Nonlinear Structures Using The Concepts Of Variable Damping Response Spectrum
- [17] **Almazan, J.L., Llera J.C.**, 1998, Modelling Aspects Of Structures Isolated With The Frictional Pendulum System
- [18] **Türker, H.**, 2003. Taban İzolasyonu ile Klasik Güçlendirme Arasında Bir Maliyet Karşılaştırması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [19] **Melkumyan, M.**, 2003, State-Of-The-Art On Application, R&D And Design Rules For Seismic Isolation Of Civil Structures In Armenia, Engineering Research Center of the American University of Armenia, 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Yerevan, Armenia
- [20] **Çağlar, M.C.**, 2002. Yapılarda Taban İzolasyonu Sistemleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [21] **Buckle, G.B.**, 2000, Passive Control Of Structures For Seismic Loads
- [22] **Clark, P.W., Aiken I.A.**, 1999, New Design Technologies, The 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu) Earthquake as a Trigger For Implementing New Seismic Design Technologies in Japan to appear in: Lessons Learned Over Time, Learning From Earthquakes, Volume III Earthquake Engineering Research Institute

- [23] **Hisayoshi, H., Yoshiaki N.**, Building Vibration Isolation System With Spring And Viscoelastic Damper, Technology Research Center, Taisei Corporation
- [24] **Kelly, T.E.**, 2001, Base Isolations Of Structures, Design Guidelines, Holmes Consulting Group Ltd., New Zeland
- [25] **Kelly, T.E.**, 2001, In-Structure Damping And Energy Dissipation, Design Guidelines, Holmes Consulting Group Ltd., New Zeland
- [26] **Reitherman, R.K.**, 1980, Frank Lloyd Wright's Imperial Hotel: A Seismic Re-Evaluation, Proceedings Of The 7. World Conference on Earthquake Engineering, September 8-13, 1980, Istanbul, Turkey
- [27] **Sharpe, R.L.**, 1992, Earthquake Disasters And Changes In United States Seismic Design Building Codes, Chapter 13 : A New Technology – Seismic Isolation, Proceedings Of The IDNDR International Sysposium On Earthquake Disaster Reduction Technology
- [28] **Olariu, I.**, 1994, Passive Control and Base Isolation, Proceedings of the 10th Conference on Earthquake Engineering, Volume 1, Vienna s.703-713

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VM} T_M}{B_M}$$

ÖZGEÇMİŞ

Cemal Gürol ÖZPALANLAR, 8 Mayıs 1977’de İzmir Karşıyaka’da doğdu. 1994 yılında Karşıyaka Lisesi’nden, 1999 yılında da İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Anabilim Dalı – Deprem Programı’nda yüksek lisans eğitimine başladı.