

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİNALARIN TABANLARINA ELASTOMER MESNETLER  
YERLEŐTİREREK SİSMİK YALITIM UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Emre MURAT**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : DEPREM MÜHENDİSLİĞİ**

**OCAK 2007**

**BİNALARIN TABANLARINA ELASTOMER MESNETLER  
YERLEŐTİREREK SİSMİK YALITIM UYGULAMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İnş. Müh. Emre MURAT  
501021209**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Ocak 2007**

**Tez Danıőmanı : Doç. Dr. Derin N. URAL  
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Recep İYİSAN (İ.T.Ü.)  
Doç. Dr. Mehmet BERİLGİN (Y.T.Ü.)**

**OCAK 2007**

## ÖNSÖZ

Yapıların depreme dayanıklı tasarımı, genellikle yapıları, depremde gelen yükleri taşıyabilecek ya da bir başka deyişle depremde gelen titreşim enerjisini tüketebilecek dayanımda tasarlayıp inşa etmekle sağlanmaktadır. Bu yaklaşımda depremin yapıya getirdiği zamana bağımlı olan dinamik yük ya da yüksek titreşim enerji girdisi, olduğu gibi kabul edilmekte ve bu girdinin düzeyinde herhangi azaltım yapılmadan yapının elastik ötesi kalıcı deformasyonu ile sönmelendirilmeye çalışılmaktadır.

Oysa depreme dayanıklı yapı tasarımında depremde yapıya gelebilecek sismik yükleri azaltan tasarım yaklaşımları da olabilir. Yapıların temellerinin zeminden yalıtılması, depremde yapıya gelen yatay sismik yüklerin veya yüksek titreşim enerjisinin azaltılması, depreme dayanıklı yapı tasarımında bir başka seçenek olabilir. Geçmiş yıllarda depreme dayanıklı yapı tasarımında yapıya gelen deprem yüklerini azaltma yolunda sismik taban yalıtım sistemleri üzerinde önemli adımlar atılmış, buna yönelik yöntemler geliştirilip, yönetmeliklerde bu tasarım yaklaşımlarından bahsedilmiş ve yapılarda uygulanmıştır. Bu yöntemle tasarlanıp, inşa edilmiş önemli sayıda bina ve köprü türündeki yapılar şiddetli depremlerin deneyiminden geçip, yapısal hasar olmaksızın, kendilerini ve sismik yalıtım tekniğinin etkinliğini kanıtlamışlardır.

Sunulan bu çalışmada, dünyada bir çok binada uygulama alanı bulan taban yalıtım sistemlerden biri olan kurşun çekirdekli elastomer mesnetler (LRB) yakın merceğe alınmıştır ve bu tür mesnetlerin yapıların zeminden yalıtılmasında kullanılabilirliğini, depremlerin binalar üzerindeki sismik etkilerinin azaltılmasında, klasik ankastre mesnetli bir bina ile çeşitli açılardan kıyaslama yapılarak, yapının dinamik tepkisi üzerindeki etkinliği hakkında bir takım yargılara varılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde zamanını ve engin bilgilerini benimle paylaşan değerli hocam sayın Doç. Dr. Derin N. URAL'a, verdikleri eğitimle yüksek lisans tezimi tamamlamamda büyük katkısı olan Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerine sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tezin hazırlanma sürecinde her türlü destekleriyle yanımda olan Parlar Mühendislik ve Müşavirlik Firması Genel Müdürü Sayın Niyazi PARLAR'a, Obayashi firması Türkiye temsilcisi Em-ke İnşaat Taahhüt Sanayi ve Ticaret Ltd. Şirketi Genel Müdürü İnşaat ve Deprem Yüksek Mühendisi Sayın Mehmet Emre ÖZCANLI'ya, Doka Endüstri Ltd. Şti. Koordinatörü Sayın Göksel AYBEK ve İnşaat Yüksek Mühendisi Sayın Cumhuriyet KORKMAZ'a ve özellikle eğitim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman üzerimden eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık, 2006

Emre MURAT

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xvi</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Genel Bakış	5
1.2. Sismik İzolasyonun Ana Hatları	10
<b>2. DEPREME KARŞI KLASİK YAPI TASARIMI VE SINIRLAMALARI</b>	<b>12</b>
2.1. Amaçlar ve Tasarım Felsefesi	12
2.2. Yöntemin Dezavantajları	14
2.2.1. Orta Yükseklikteki Yapıların Rezonans Problemleri	14
2.3. Depreme Karşı Klasik Yapı Tasarımı Yönteminin Sonuçları	18
2.4. Farklı Bir Tasarım Yaklaşımına İhtiyaç	19
<b>3. DEPREME KARŞI YAPI TASARIMINDA ALTERNATİF BİR YAKLAŞIM : SİSMİK İZOLASYON</b>	<b>20</b>
3.1. Genel Bilgiler ve Tarihçe	20
3.2. Sismik İzolasyonun Avantajları ve Yaygın Uygulamaları	23
3.2.1. Binaların güçlendirilmesindeki uygulamalar	25
3.3. Sismik İzole Edilen ve Ankastre Mesnetlenen Modellerin Karşılaştırılması	28
3.4. Uygulamadaki Sınırlamalar	31
3.4.1. Üst yapı özellikleri	32
3.4.2. Sismik tehlike ve arazi özellikleri	33
3.4.3. Bitişik yapıların durumları	35
3.4.4. Küçük ölçekli yatay yükler	36
<b>4. SİSMİK İZOLASYONUN KULLANIMINI ETKİN KILAN FAKTÖRLER</b>	<b>37</b>
<b>5. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİNİN EKONOMİK BOYUTU</b>	<b>38</b>
<b>6. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİ</b>	<b>42</b>
6.1. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Türleri ve Sınıflandırılması	42
6.2. İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması	42
6.3. Kayıcı Tip İzolasyon Sistemleri	42
6.3.1. Esnek sürtünmeli taban izolasyonu mesnetleri	46

6.3.2. Fransız elektrik kurumu sistemi	47
6.3.3. EERC bileşik sistemi	47
6.3.4. TASS sistemi	48
6.3.5. Yay tipi sistemler	48
6.4. Kauçuk Esaslı Elastomer İzolasyon Mesnetleri	50
6.4.1. Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler (LRB)	53
6.4.2. Yüksek sönümlü elastomer mesnetler (HDRB)	58
6.4.3. Düşük sönümlü elastomer mesnetler	60
6.4.4. Karma tip izolasyon sistemi (LRB+HDRB = LHDRB)	62
<b>7. DÜNYADAKİ SİSMİK İZOLASYON UYGULAMALARI</b>	<b>65</b>
7.1. Giriş	65
7.2. A.B.D' de Sismik İzolasyon Uygulamaları	66
7.2.1. The Foothill Communities Law and Justice Center	67
7.2.2. The Salt Lake City and County binası	68
7.2.3. Güney California üniversite hastane binası	69
7.2.4. San Francisco belediye binası	71
7.2.5. Oakland belediye binası	72
7.2.6. Los Angeles belediye binası	73
7.3. Japonya'da Sismik İzolasyon Uygulamaları	74
7.3.1. Tohoku elektrik güç şirketi bilgisayar merkezi	75
7.3.2. C-1 binası	76
7.4. Yeni Zelanda' da Sismik İzolasyon Uygulamaları	77
7.4.1. The William Clayton binası	77
7.4.2. Wellington merkezi polis istasyonu	78
7.4.3. Yeni Zelanda parlamento binası	80
7.5. İtalya'da Sismik İzolasyon Uygulamaları	82
7.6. Türkiye'de Sismik İzolasyon Uygulamaları	82
7.6.1. Antalya havalimanı	82
7.6.2. Tarabya oteli güçlendirme projesi	83
7.6.3. Atatürk uluslararası havalimanı terminali	85
<b>8. ELASTOMER MESNETLERİN MEKANİKSEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ</b>	<b>86</b>
8.1. Elastomer Mesnetlerin Stabilitesi ve Tasarım Hususları	90
8.2. Sürtünmeli Sarkaç Mesnetlerin Mekaniksel Özellikleri	102
8.3. Sismik İzolasyon ve Enerji Dağıtım Mekanizmalarının Değerlendirme Testleri	103
<b>9. TABAN İZOLASYONU İÇİN UBC-97 YÖNETMELİĞİ</b>	<b>105</b>
9.1. Giriş	105
9.2. Sismik Risk Düzeyi	106
9.3. Tasarım Metotları	106
9.4. Statik Analiz	106

9.4.1. Sismik bölge katsayısı	108
9.4.2. Zemin tipi	108
9.4.3. Sismik kaynak tipi	108
9.4.4. Aktif fay yakınlık faktörü	109
9.4.5. MCE tepki katsayısı	110
9.4.6. Spektral sismik katsayılar	110
9.4.7. Sönüm katsayıları	112
9.4.8. Efektif sistem periyotları	112
9.4.9. Toplam tasarım yerdeğiştirmeleri	113
9.4.10. Tasarım kuvvetleri	115
9.4.11. Yatay kuvvetlerin katlara dağıtılması	116
9.4.12. Göreli kat ötelenmeleri	117
9.5. Dinamik Analiz	117
9.6. Yapısal Olmayan Elemanlar	118
9.7. Tasarım ve Prototip Testleri Hakkında Bilgiler	118
<b>10. TABAN YALITIMLI YAPILARIN ANALİZİ VE YAPISAL MODELLENMESİ</b>	<b>120</b>
10.1. Davranışın Modellenmesi	120
10.2. Titreşimin Doğal Modları	120
10.3. Lineer Davranış	125
10.4. Lineer Olmayan (Bilinear) Sistemler	128
10.5. Bilinear Davranışın Lineerleştirilmesi	129
10.5.1. Etkin rijitlik	129
10.5.2. Etkin sönüm	130
10.5.3. Üst yapı rijitliğinin davranışa etkisi	133
<b>11. ANALİZDE KULLANILACAK YAPI VE DEPREM PARAMETRELERİ</b>	<b>136</b>
11.1. Analizde Kullanılacak Yapı Özellikleri	136
11.2. Deprem Parametreleri	138
<b>12. ANALİZ</b>	<b>141</b>
12.1. Yapının Statik Analizi (Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi)	141
12.2. Dinamik Analiz (Zaman Tanım Alanında Çözümleme)	155
12.2.1 Zemine ankastre yapı	156
12.2.2 Sismik taban yalıtımlı yapı	163
<b>13. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR</b>	<b>172</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>181</b>
<b>EKLER</b>	<b>184</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>226</b>

## **KISALTMALAR**

<b>AASHTO</b>	: American Association of State Highway and Transportation Officials
<b>AMS</b>	: Ankastre Mesnetli Sistem
<b>ATC</b>	: Applied Technology Council
<b>CERF</b>	: Civil Engineering Research Foundation
<b>DBE</b>	: Design Basis Earthquake
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency
<b>FHWA</b>	: Federal High-way Administration
<b>FPS</b>	: Friction Pendulum System
<b>GLIS</b>	: Gruppo de Lavoro Isolamento Sismico
<b>HITEC</b>	: Highway Innovative Technology Center
<b>HDRB</b>	: High Damping Rubber Bearing
<b>IBC</b>	: International Building Code
<b>ICC</b>	: International Code Council
<b>LRB</b>	: Lead Rubber Bearing
<b>LDRB</b>	: Low Damping Rubber Bearing
<b>LHDRB</b>	: Lead-High Damping Rubber Bearing
<b>MCE</b>	: Maximum Capable Earthquake
<b>NRB</b>	: Natural Rubber Bearing
<b>OSHPD</b>	: California Office of Statewide Health Planning and Development
<b>SDFS</b>	: Single Degree of Freedom System
<b>TDY</b>	: Türk Deprem Yönetmeliği
<b>TYS</b>	: Taban Yalıtımlı Sistem
<b>UBC</b>	: Uniform Building Code
<b>USC</b>	: The University Hospital of Southern California

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 3.1</b> : Yapısal özellikler ve her iki sisteme ait maksimum tepkiler .....	28
<b>Tablo 8.1</b> : Teflon malzemesi için tavsiye edilen sürtünme katsayısı değerleri .....	103
<b>Tablo 9.1</b> : Sismik bölge katsayıları .....	108
<b>Tablo 9.2</b> : Zemin tipi .....	108
<b>Tablo 9.3</b> : Sismik kaynak tipi .....	109
<b>Tablo 9.4</b> : Aktif fay yakınlık faktörü ( $N_a$ ) .....	110
<b>Tablo 9.5</b> : Aktif fay yakınlık faktörü ( $N_v$ ) .....	110
<b>Tablo 9.6</b> : MCE tepki katsayısı .....	110
<b>Tablo 9.7</b> : Spektral sismik katsayı ( $C_{VD}$ ) .....	111
<b>Tablo 9.8</b> : Spektral sismik katsayı ( $C_{AD}$ ) .....	111
<b>Tablo 9.9</b> : Spektral sismik katsayı ( $C_{AM}$ ) .....	111
<b>Tablo 9.10</b> : Spektral sismik katsayı ( $C_{VM}$ ) .....	111
<b>Tablo 9.11</b> : Sönüm katsayıları ( $B_D, B_M$ ) .....	112
<b>Tablo 9.12</b> : Karşılaştırmalı süneklik katsayısı tablosu .....	116
<b>Tablo 9.13</b> : Farklı analiz tipleri için yönetmelik hükümleri .....	118
<b>Tablo 10.1</b> : Ankastre mesnetli sistemin yapısal özellikleri .....	123
<b>Tablo 10.2</b> : Sismik izole edilmiş sistemin yapısal özellikleri .....	123
<b>Tablo 10.3</b> : Ankastre mesnetlenmiş sistemin doğal karakteristikleri ve etkin modal kütlesi .....	123
<b>Tablo 10.4</b> : Taban izolasyonlu sistemin doğal karakteristikleri ve etkin modal kütleleri .....	124
<b>Tablo 12.1</b> : DBE düzeyi için spektral katsayılar .....	142
<b>Tablo 12.2</b> : MCE düzeyi için spektral katsayılar .....	143
<b>Tablo 12.3</b> : Kurşun çekirdek mesnetli taban yalıtım sistemi için kat kesme kuvvetleri .....	155
<b>Tablo 12.4</b> : AMS serbest titreşim modal değerler .....	158
<b>Tablo 12.5</b> : AMS kütleli katılım oranları .....	159
<b>Tablo 12.6</b> : AMS kat yer değiştirmeleri .....	159
<b>Tablo 12.7</b> : AMS maksimum rölatif kat ötelenme değerleri .....	160
<b>Tablo 12.8</b> : AMS rijit diyaframlar içerisinde bulunan 1 numaralı düğüm noktalarının yer değiştirmelerine ait sayısal veriler .....	160
<b>Tablo 12.9</b> : AMS C1 kolonuna ait iç kuvvetler .....	161
<b>Tablo 12.10</b> : AMS katlara etkiyen kesme kuvvetleri .....	161
<b>Tablo 12.11</b> : AMS kat kütlelerine etkiyen ivme değerleri .....	162
<b>Tablo 12.12</b> : Analizde kullanılan elastomer mesnetlerin boyutları ve mekaniksel özellikleri .....	164
<b>Tablo 12.13</b> : TYS serbest titreşim modal değerler .....	166
<b>Tablo 12.14</b> : TYS kütleli katılım oranları .....	166



<b>Tablo 12.15</b>	: TYS kat yer değiştirmeleri.....	167
<b>Tablo 12.16</b>	: TYS maksimum rölatif kat ötelenme değerleri.....	167
<b>Tablo 12.17</b>	: TYS rijit diyaframlar içerisinde bulunan 1 numaralı düğüm noktalarının yer değiştirmelerine ait sayısal veriler.....	168
<b>Tablo 12.18</b>	: TYS C1 kolonuna ait iç kuvvetler.....	169
<b>Tablo 12.19</b>	: TYS katlara etkiyen kesme kuvvetleri.....	170
<b>Tablo 12.20</b>	: TYS kat kütlelerine etkiyen ivme değerleri.....	170
<b>Tablo 13.1</b>	: AMS ve TYS yapısal periyotlar.....	172
<b>Tablo 13.2</b>	: AMS ve TYS karşılaştırmalı 1 numaralı düğüm noktası yer değiştirme değerleri .....	173
<b>Tablo 13.3</b>	: AMS ve TYS karşılaştırmalı C1 kolonu üst uç moment (M3-3) değerleri .....	174
<b>Tablo 13.4</b>	: Dinamik analiz AMS ve TYS için karşılaştırmalı taban kesme kuvvetleri.....	175
<b>Tablo 13.5</b>	: Dinamik analiz AMS ve TYS için karşılaştırmalı kat ivme değerleri.....	175
<b>Tablo 13.6</b>	: USC binası ve Analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	178

## ŞEKİL LİSTESİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1.1 : Sert zeminler üzerinde alınmış tipik kuvvetli yer hareketi ivme spektrumu .....	2
Şekil 1.2 : Sert zeminler üzerinde alınmış kuvvetli yer hareketi öteleme spektrumu .....	3
Şekil 1.3 : Ankastre mesnetli ve taban yalıtım sistem uygulanmış yapı davranışları .....	4
Şekil 1.4 : Deprem esnasında ankastre mesnetli ve sismik izolasyon uygulanan yapının deformasyon şekilleri .....	7
Şekil 1.5 : Tipik tepki spectrum eğrileri .....	9
Şekil 2.1 : Tipik bir tasarım spektrumu .....	14
Şekil 2.2 : Farklı bölgelerden alınmış deprem kayıtları .....	15
Şekil 2.3 : Maksimum görelî deplasman grafikleri (Sd).....	16
Şekil 2.4 : Sönüm oranları $\xi$ %0-%20 arası değişen pseudo ivme - spektrum grafikleri (Sa) .....	16
Şekil 2.5 : Tek serbestlik dereceli yay sistemine bağlı tekil kütlenin yer hareketine verdiği tepki grafikleri .....	17
Şekil 3.1 : Çeşitli sönüm oranları için spektral ivme grafiği .....	21
Şekil 3.2 : Los Angeles belediye binasının temel güçlendirmesi .....	27
Şekil 3.3 : Zemine ankastre mesnetli 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına ait görelî deplasmanlar ( $\Delta U$ (m)).....	29
Şekil 3.4 : Zeminden izole edilmiş 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına ait görelî deplasmanlar ( $\Delta U$ (m)).....	29
Şekil 3.5 : Zemine ankastre mesnetli 3 serbestlik dereceli sistemin katlarına etkiyen yanall kuvvetler (F (N)) .....	30
Şekil 3.6 : Zeminden izole edilmiş 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına etkiyen yanall kuvvetler (F (N)) .....	30
Şekil 3.7 : Vrança depremi, 1977, kuzey-güney bileşeni deprem ivme spektrumu .....	34
Şekil 3.8 : Los Angeles belediye binası temel güçlendirmesi için oluşturulan istinat duvarı ve bırakılan sismik boşluk .....	35
Şekil 6.1 : Kayıcı tip izolatör ve yapıda uygulamaları .....	43
Şekil 6.2 : Sürtünmeli sarkaç tip izolatörlerin çalışma prensibi .....	44
Şekil 6.3 : Sürtünmeli sarkaç mesnedin kesit ve elemanları .....	45
Şekil 6.4 : Sürtünmeli sarkaç sisteminin karakteristik davranış modeli .....	45
Şekil 6.5 : Sürtünmeli sarkaç sistemine uygulanan çevrimsel deplasmanların sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini gösteren davranış modeli .....	46
Şekil 6.6 : Esnek sürtünmeli taban yalıtım mesnedin kesit ve elemanları.....	47
Şekil 6.7 : Gerb yay tipi sistemler .....	49
Şekil 6.8 : Viskoz sönümleyicinin bileşenleri .....	49
Şekil 6.9 : Kurşun çekirdekli elastomer mesnet .....	50

<b>Şekil 6.10</b>	: Uygulanan düşey yüke karşılık elastomer mesnedin bel vermesi.....	51
<b>Şekil 6.11</b>	: Çelik ve kurşun sönümleyiciler.....	52
<b>Şekil 6.12</b>	: Elastomer mesnetlerin histeresis döngüler esnasında tükettikleri enerji miktarını gösteren grafikler.....	53
<b>Şekil 6.13</b>	: Kurşun çekirdekli elastomer mesnet kesiti ve binalarda uygulanması.....	54
<b>Şekil 6.14</b>	: Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerde histeresis döngü ve enerji dağıtma kapasitesini gösteren kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	55
<b>Şekil 6.15</b>	: Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin tipik histeresis eğrileri.....	55
<b>Şekil 6.16</b>	: Kauçuğun ve kurşunun kuvvet-yer değiştirme grafikleri.....	56
<b>Şekil 6.17</b>	: Deforme edilen bir elastomer mesnedin davranışı.....	57
<b>Şekil 6.18</b>	: Yardımcı sönümleyici sistemler.....	58
<b>Şekil 6.19</b>	: Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	59
<b>Şekil 6.20</b>	: Düşük sönümlü kauçuk mesnedin kesit ve elemanları.....	62
<b>Şekil 6.21</b>	: Düşük sönümlü kauçuk mesnedin şematik modeli ve kuvvet-yer değiştirme davranışı.....	62
<b>Şekil 7.1</b>	: Amerika'daki sismik izolasyon uygulamalarının yapılarla ve köprülere göre dağılım oranları.....	67
<b>Şekil 7.2</b>	: The Foothill Communities Law And Justice Center.....	68
<b>Şekil 7.3</b>	: Salt Lake City binası.....	68
<b>Şekil 7.4</b>	: Güney California üniversite hastanesi.....	70
<b>Şekil 7.5</b>	: San Francisco belediye binası.....	72
<b>Şekil 7.6</b>	: Oakland belediye binası ve dinamik analizde kullanılan mod şekilleri.....	72
<b>Şekil 7.7</b>	: Los Angeles belediye binası.....	73
<b>Şekil 7.8</b>	: Tohoku elektrik güç şirketi bilgisayar merkezi.....	76
<b>Şekil 7.9</b>	: C-1 binası.....	76
<b>Şekil 7.10</b>	: William Clayton binası.....	78
<b>Şekil 7.11</b>	: Wellington merkezi polis istasyonu temelindeki 20m uzunluğunda esnek kazıklar.....	79
<b>Şekil 7.12</b>	: Wellington merkezi polis istasyon binası temel yalıtım elemanları... ..	80
<b>Şekil 7.13</b>	: Yeni Zelanda parlamento binası.....	81
<b>Şekil 7.14</b>	: Antalya havalimanı.....	83
<b>Şekil 7.15</b>	: Kolonların elmas tel ile kesilip izolatörün yerleştirilmesi.....	83
<b>Şekil 7.16</b>	: Tarabya oteli.....	84
<b>Şekil 7.17</b>	: Kolonlara yerleştirilen sürtünmeli sarkaç tip izolatör ve kolonların diyagonaller ile desteklenmesi.....	84
<b>Şekil 7.18</b>	: Atatürk havalimanı'nın dışarıdan görüntüsü.....	85
<b>Şekil 7.19</b>	: Atatürk havalimanında kullanılan bir sürtünmeli sarkaç mesnet.....	85
<b>Şekil 8.1</b>	: Düşük sıcaklığın kauçuğun davranışına etkisi.....	88
<b>Şekil 8.2</b>	: Çelik plakalar arasındaki dairesel kauçuk bir tabakanın şekil faktörü ( $S_1$ ).....	90
<b>Şekil 8.3</b>	: Kauçuk tabakasının deformasyon hali.....	91
<b>Şekil 8.4</b>	: İzolatörün yanal deplasmanla azalan etkin yük alan kesiti.....	98
<b>Şekil 8.5</b>	: Sürtünmeli sarkaç mesnede etkiyen kuvvetler.....	102
<b>Şekil 8.6</b>	: Sürtünmeli sarkaç mesnedin salınım hareketleri.....	102
<b>Şekil 9.1</b>	: UBC-97 spektrum eğrisi.....	109
<b>Şekil 9.2</b>	: Burulma etkisinin planda gösterilmesi.....	114

<b>Şekil 10.1</b>	: Taban yalıtımlı yapıların analizinde kullanılan tek serbestlik dereceli sistem modeli.....	120
<b>Şekil 10.2</b>	: Modal kütlelerin yalıtım derecesi ile değişimi .....	122
<b>Şekil 10.3</b>	: Ankastre mesnetli üç serbestlik dereceli sistemin serbest titreşim mod şekilleri .....	124
<b>Şekil 10.4</b>	: Sismik taban yalıtımı uygulanmış doğrusal bir sistemin mod şekilleri .....	125
<b>Şekil 10.5</b>	: Doğrusal bir yalıtım sisteminin yapısal karakteristikleri .....	127
<b>Şekil 10.6</b>	: Viskoz sönümün doğrusal davranış sergileyen bir yalıtım sistemi üzerindeki etkisi .....	128
<b>Şekil 10.7</b>	: Doğrusal olmayan sisteme ait kuvvet-yer değiştirme ilişkisi ve lineerleştirilmesi .....	130
<b>Şekil 10.8</b>	: Viskoz sönüme sahip lineer-elastik tek serbestlik dereceli sistem davranışı .....	131
<b>Şekil 10.9</b>	: Taban yalıtımlı sistemin yapısal özellikleri.....	134
<b>Şekil 10.10</b>	: Üst yapı rijitliğinin yalıtım seviyesindeki yer değiştirmeler üzerindeki etkisi.....	134
<b>Şekil 10.11</b>	: Üst yapı rijitliğinin taban kesme kuvveti ve katlara etkileyen ivme değerleri üzerindeki etkisi .....	135
<b>Şekil 11.1</b>	: Analizde kullanılacak olan iki katlı, üç açıklıklı taban yalıtımlı bina.....	137
<b>Şekil 11.2</b>	: Yapının 2. kat plan görünümü ve giriş boyutları.....	137
<b>Şekil 11.3</b>	: Yapının kesit görünümü (Global x-z eksen takımı) .....	138
<b>Şekil 11.4</b>	: Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G doğrultu bileşeni deprem kaydı .....	139
<b>Şekil 11.5</b>	: Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G doğrultu bileşeni ivme spektrum eğrisi.....	139
<b>Şekil 11.6</b>	: Düzce Meteoroloji İstasyonu D-B doğrultu bileşeni deprem kaydı .....	140
<b>Şekil 11.7</b>	: Düzce Meteoroloji İstasyonu D-B doğrultu bileşeni ivme spektrum eğrisi.....	140
<b>Şekil 12.1</b>	: Mesnet tipleri ve çapları .....	146
<b>Şekil 12.2</b>	: Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlere ait histeresis eğrisi.....	153
<b>Şekil 12.3</b>	: Kat planı içerisinde yer alan 1 ve 47 numaralı düğüm noktaları.....	156
<b>Şekil 12.4</b>	: C1 kolonunun profildeki görünümü .....	157
<b>Şekil 12.5</b>	: AMS birinci doğal titreşim modu, $T_x$ .....	157
<b>Şekil 12.6</b>	: AMS ikinci doğal titreşim modu, $T_y$ .....	158
<b>Şekil 12.7</b>	: AMS 2. Kat 47 nolu kütle merkezi.....	162
<b>Şekil 12.8</b>	: AMS 1. Kat 48 nolu kütle merkezi.....	163
<b>Şekil 12.9</b>	: TYS birinci doğal titreşim modu, $T_x$ .....	165
<b>Şekil 12.10</b>	: TYS ikinci doğal titreşim modu, $T_y$ .....	165
<b>Şekil 12.11</b>	: TYS 2. Kat 68 nolu kütle merkezi.....	171
<b>Şekil 12.12</b>	: TYS 1. Kat 69 nolu kütle merkezi.....	171
<b>Şekil 13.1</b>	: Spektrum eğrisinde periyot büyütme .....	176
<b>Şekil A.1.1</b>	: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği.....	186
<b>Şekil A.1.2</b>	: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği .....	187
<b>Şekil A.1.3</b>	: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği.....	188

<b>Şekil A.1.4</b>	: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği .....	189
<b>Şekil A.1.5</b>	: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği .....	190
<b>Şekil A.1.6</b>	: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği .....	191
<b>Şekil A.2.1</b>	: Ankastre mesnetli yapı ikinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3).....	193
<b>Şekil A.2.2</b>	: Ankastre mesnetli yapı birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3).....	194
<b>Şekil A.3.1</b>	: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu taban kesme kuvveti .....	196
<b>Şekil A.3.2</b>	: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu taban kesme kuvveti .....	197
<b>Şekil B.1.1</b>	: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği.....	199
<b>Şekil B.1.2</b>	: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği.....	200
<b>Şekil B.1.3</b>	: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu temel kat yer değiştirme grafiği.....	201
<b>Şekil B.1.4</b>	: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği.....	202
<b>Şekil B.1.5</b>	: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği.....	203
<b>Şekil B.1.6</b>	: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği.....	204
<b>Şekil B.1.7</b>	: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu temel kat yer değiştirme grafiği.....	205
<b>Şekil B.1.8</b>	: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği.....	206
<b>Şekil B.2.1</b>	: Taban yalıtımlı yapı ikinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3).....	208
<b>Şekil B.2.2</b>	: Taban yalıtımlı yapı birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3).....	209
<b>Şekil B.3.1</b>	: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu taban kesme kuvveti.....	211
<b>Şekil B.3.2</b>	: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu taban kesme kuvveti.....	212
<b>Şekil C.1.1</b>	: X-X ve Y-Y doğrultulu karşılaştırmalı ikinci ve birinci katlar arası yer değiştirmeler.....	214
<b>Şekil C.1.2</b>	: X-X ve Y-Y doğrultulu karşılaştırmalı katlar arası rölatif kat yer değiştirmeleri.....	215
<b>Şekil C.2.1</b>	: İkinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3) grafiği .....	217
<b>Şekil C.2.2</b>	: Birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3) grafiği .....	218
<b>Şekil C.2.3</b>	: İkinci kat C1 kolonu burulma momenti (T) grafiği.....	219
<b>Şekil C.2.4</b>	: Birinci kat C1 kolonu burulma momenti (T) grafiği.....	220
<b>Şekil C.3.1</b>	: X-X doğrultulu taban kesme kuvveti grafiği.....	222
<b>Şekil C.3.2</b>	: Y-Y doğrultulu taban kesme kuvveti grafiği.....	223
<b>Şekil D.1</b>	: Karşılaştırmalı pseudo-spektral ivme grafikleri.....	225

## SEMBOL LİSTESİ

$A, A_r$	: Kauçuk mesnet alanı
$A_{eff}$	: Yatay yer değiştirme yapan mesnedin düşey yük taşıma alanı
$A_{loop}$	: Kauçuk mesnedin tek bir histeresis döngüsü altında kalan alan
$A_L$	: Kurşun çekirdek alanı
$a_g(t)$	: Yer hareketinin zamana bağlı ivme fonksiyonu
$B_D$	: DBE düzeyi depremler için sönüm azaltma katsayısı
$B_M$	: MCE düzeyi depremler için sönüm azaltma katsayısı
$b, d$	: Planı dikdörtgen olan yalıtım düzlemi uzun ve kısa kenarları
$C_a, C_v$	: UBC-97, ankastre mesnetli yapılar için spektrum katsayıları
$C_{VD}, C_{AD}$	: UBC-97, DBE düzeyi depremler için spektrum katsayıları
$C_{VM}, C_{AM}$	: UBC-97, MCE düzeyi depremler için spektrum katsayıları
$C_{cr}$	: Kritik sönüm katsayısı
$C_{eff}$	: Taban yalıtımlı sistemin efektif sönüm katsayısı
$[C]$	: Modal sönüm katsayı matrisi
$D$	: Kauçuk mesnet çapı, FPS maksimum yatay yer değiştirmesi
$D_D$	: DBE düzeyli deprem için tasarım yer değiştirmesi
$D_{TD}$	: Taban yalıtım sistemlerde, DBE düzeyli deprem için burulmadan kaynaklı toplam tasarım yer değiştirmesi
$D_{TM}$	: Taban yalıtım sistemlerde, MCE düzeyli deprem için burulmadan kaynaklı toplam tasarım yer değiştirmesi
$D_D'$	: DBE düzeyi depremler için izin verilen azaltılmış tasarım yer değiştirmesi
$D_M'$	: MCE düzeyi depremler için izin verilen azaltılmış tasarım yer değiştirmesi
$d_x, d_y, d_z$	: Sonsuz küçüklükteki bir kauçuk elemanın boyutları
$d_L$	: Kurşun çekirdek çapı
$D$	: FPS mesnet kayma hızı
$d_y$	: Kurşun çekirdeğin akma noktasındaki deformasyonu
$E$	: Elastisite modülü
$E_c$	: Düşey yük altında kauçuk mesnede ait sıkışmadaki elastisite modülü
$E_d$	: Histeretik çevrim alanı
$E_e$	: Elastik potansiyel enerji
$E_{eff,v}$	: Kauçuk mesnedin düşey yöndeki etkili elastisite modülü
$e$	: Dışmerkezlik
$F_s$	: FPS ait sürtünme kuvveti
$F_1$	: FPS geri döndürücü kuvvet
$F$	: FPS harekete karşı tepki kuvveti
$F_x$	: UBC-97, taban yalıtımlı binaların eşdeğer deprem yüküne göre hesaplanmış kat kesme kuvveti
$F_y, Q_y$	: Kurşun çekirdeğin akma dayanımı
$f_r$	: Kauçuk mesnede ait düzeltme katsayısı

<b>g</b>	: Yerçekimi ivmesi
<b>G<sub>r</sub>, G<sub>L</sub></b>	: Kauçuk ve kurşun çekirdeğe ait kayma modülü
<b>G<sub>a</sub>, G<sub>b</sub></b>	: Tip-a ve Tip-b kauçuk mesnetlerine ait kayma modülleri
<b>G</b>	: Ölü yük
<b>h<sub>x</sub>, h<sub>i</sub></b>	: x ve i düzeyindeki katların yalıtım seviyesinden ölçülen toplam yüksekliği
<b>I</b>	: Atalet momenti, bina önem katsayısı
<b>l</b>	: Kolon yüksekliği
<b>K<sub>i</sub></b>	: Kurşun çekirdeğin elastik rijitliği
<b>K<sub>r</sub></b>	: Kauçuğun yanal rijitliği
<b>K<sub>el</sub></b>	: Kauçuk mesnedin elastik rijitliği
<b>K<sub>pl</sub></b>	: Kauçuk mesnedin elastik ötesi (plastik) rijitliği
<b>K</b>	: Tek bir kauçuk tabakanın sıkışmadaki hacimsel değişim modülü
<b>K<sub>e</sub></b>	: Kauçuk mesnedin düşey rijitliği
<b>K<sub>γ</sub></b>	: Eksenel deformasyonları dikkate alarak kayma gerilmelerinden meydana gelen düşey rijitlik
<b>K<sub>v</sub></b>	: Kauçuk mesnedin efektif düşey rijitliği
<b>K<sub>D</sub></b>	: DBE düzeyli depreme göre hesaplanmış yanal rijitlik
<b>K<sub>h</sub></b>	: Sıfır yük altında kauçuk mesnedin yanal rijitliği
<b>K<sub>h</sub><sup>*</sup></b>	: P yükü altındaki kauçuk mesnedin efektif rijitliği
<b>K<sub>D,min</sub></b>	: DBE düzeyi depremler için D <sub>D</sub> tasarım yer değiştirmesinde minimum yanal rijitlik
<b>K<sub>M,min</sub></b>	: MCE düzeyi depremler için D <sub>M</sub> tasarım yer değiştirmesinde minimum yanal rijitlik
<b>K<sub>eff</sub></b>	: Kauçuk mesnede ait efektif yanal rijitlik (Secant modülüs)
<b>K<sub>S</sub></b>	: Üst yapı rijitliği
<b>K<sub>i</sub></b>	: Taban yalıtım sistemi toplam yanal rijitliği
<b>[K]</b>	: Modal elastik rijitlik katsayı matrisi
<b>M<sub>M</sub></b>	: MCE tepki katsayısı
<b>[M]</b>	: Modal kütle katsayı matrisi
<b>M<sub>2</sub></b>	: Kolonlarda X-X eksen doğrultulu eğilme momenti
<b>M<sub>3</sub></b>	: Kolonlarda Y-Y eksen doğrultulu eğilme momenti
<b>M(3-3)</b>	: Kolonlarda 3 eksen etrafında eğilme momenti
<b>M<sub>i</sub><sup>*</sup></b>	: Modal kütleli katılım oranı
<b>N<sub>a</sub>, N<sub>v</sub></b>	: Aktif fay yakınlık faktörleri
<b>n<sub>r</sub></b>	: Mesnetteki kauçuk tabaka adedi
<b>n</b>	: Hareketli yük katılım katsayısı
<b>p</b>	: Tek bir kauçuk tabaka üzerine etkiyen parabolik yayılı yük
<b>P<sub>cr</sub>, P<sub>E</sub></b>	: Narin kolonlara ve elastomer mesnetlere ait burkulma yükü
<b>P</b>	: Kauçuk mesnet ve kolon üzerine etkiyen eksenel yük
<b>Q<sub>y</sub></b>	: Kurşun çekirdeğin akma dayanımı
<b>Q</b>	: Hareketli yük
<b>r, R</b>	: Kauçuk mesnet yarıçapı
<b>R<sub>o</sub></b>	: FPS eğrilik yarı çapı
<b>R<sub>i</sub></b>	: Taban yalıtımlı binalar için taban kesme kuvveti azaltma katsayısı
<b>R</b>	: Ankastre mesnetli binalar için taban kesme kuvveti azaltma katsayısı
<b>R<sub>x</sub></b>	: X-X eksen etrafında dönme
<b>R<sub>y</sub></b>	: Y-Y eksen etrafında dönme
<b>R<sub>z</sub></b>	: Z-Z eksen etrafında dönme
<b>S</b>	: Zemin faktörü

$S_d$	: Spektral yer değiştirme
$S_a$	: Spektral ivme
$S_v$	: Spektral hız
$S_1, S_2$	: Kauçuk mesnetlere ait birincil ve ikincil şekil faktörleri
$T$	: Ankastre mesnetli binanın doğal titreşim periyodu, burulma momenti
$T_D$	: DBE düzeyi için efektif sistem periyodu
$T_M$	: MCE düzeyi için efektif sistem periyodu
$T_x, T_y$	: Binanın x-y eksenlerindeki titreşim periyodu
$T_0$	: Spektrum karakteristik periyodu
$T_s$	: Zeminin baskın titreşim periyodu, spektrum karakteristik periyodu
$t_r$	: Kauçuk mesnetlerin içeriğinde kullanılan çelik tabaka kalınlığı
$t$	: Toplam kauçuk mesnet yüksekliği
$t_o$	: Tek bir kauçuk tabaka kalınlığı
$T_{eff}$	: Taban yalıtımlı sisteminin $K_{eff}$ 'e göre hesaplanan etkin titreşim periyodu
$T_D$	: DBE düzeyi depremler için efektif periyot
$T_M$	: MCE düzeyi depremler için efektif periyot
$U_g(t)$	: Yer hareketinin zamana bağlı yer değiştirme fonksiyonu
$U_{max}$	: Kauçuk mesnede ait maksimum yatay yer değiştirme
$U_x$	: Binalarda X-X eksen doğrultulu kat yer değiştirmesi
$U_y$	: Binalarda Y-Y eksen doğrultulu kat yer değiştirmesi
$U_z$	: Binalarda Z-Z eksen doğrultulu kat yer değiştirmesi
$V_2$	: Kolonlarda X-X eksen doğrultulu kesme kuvveti
$V_3$	: Kolonlarda Y-Y eksen doğrultulu kesme kuvveti
$V_x$	: Binalarda X-X eksen doğrultulu kat kesme kuvveti
$V_y$	: Binalarda Y-Y eksen doğrultulu kat kesme kuvveti
$V_{tx}$	: Binalarda X-X eksen doğrultulu taban kesme kuvveti
$V_{ty}$	: Binalarda Y-Y eksen doğrultulu taban kesme kuvveti
$V_D$	: UBC-97, taban yalıtımlı binalar için DBE düzeyi depremlerde eşdeğer deprem yükü yöntemine göre hesaplanmış toplam tasarım taban kesme kuvveti
$V_{s,D}$	: UBC-97, yalıtım düzlemi üzerindeki üst yapı elemanlarına etkileyen toplam tasarım taban kesme kuvveti
$W$	: Binanın, hareketli yük katılım katsayısı eklenerek bulunan toplam ağırlığı
$w_x, w_i$	: Binanın x ve i düzeyi katının hareketli yük katılım katsayısı kullanılarak hesaplanan ağırlığı
$x, y$	: Sismik yükleme doğrultusuna dik bir köşe noktasına olan uzaklık
$Z$	: UBC-97, Sismik bölge katsayısı
$\beta_{eff}$	: Yalıtım sistemine ait efektif sönüm oranı
$\beta, r, A, \eta$	: FPS'e ait boyutsuz sabitler
$\beta_D$	: DBE düzeyi depremler için efektif sönüm oranı
$\beta_M$	: MCE düzeyi depremler için efektif sönüm oranı
$\gamma_{xz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}$	: Sonsuz küçük kauçuk elemanın xz, xy, yz düzlemlerindeki kayma birim uzamaları
$\gamma_{max}$	: Kauçuk mesneden maksimum kayma birim uzaması
$\gamma_v$	: Kauçuk mesnette düşey yükten dolayı meydana gelen kayma birim uzaması
$\Delta t$	: Kauçuk mesneden düşey yük altındaki yer değiştirmesi, ivme kaydı zaman artım aralığı



$\Delta V$	: Tek bir kauçuk tabakanın hacimsel değişimi
$\epsilon_c$	: Kauçuk mesnette dūřey yūk altında birim kısalma
$\mu$	: FPS sūrtünme katsayısı
$\Phi_i$	: Binanın i. titreşim modu
$\theta$	: Yalıtım dūzleminin rijitlik merkezi etrafındaki dōnme ağısı
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	: Kauçuk mesnet üzerinde herhangi bir noktadaki normal gerilmeler
$\sigma_y$	: LRB mesnetlerinde kurşun çekirdeğin akma gerilmesi
$\tau_{xz}, \tau_{xy}, \tau_{yz}$	: Sonsuz küçük kauçuk elemanın xz, xy, yz dūzlemlerindeki kayma gerilmeleri
$\xi$	: Sōnüm oranı
$\xi_1$	: 1. moda ait sōnüm oranı
$\xi_{eff}$	: Kauçuk mesnede ait efektif sōnüm oranı
$\omega$	: Açısal frekans
$\omega_d$	: Sōnūmlū sistem aęısal frekansı
$\psi_i$	: Genelleştirilmiş koordinat eksenleri
$\Gamma_i$	: i. Moda ait modal katılım oranı
$\nu$	: Poisson oranı
$u, v, w$	: Tek bir kauçuk tabakasına ait eksenel yer değiştirmeler
$r, \theta, z$	: Silindirik koordinat eksenleri

## **BİNALARIN TABANLARINA ELASTOMER MESNETLER YERLEŐTİREREK SİSMİK YALITIM UYGULAMASI**

### **ÖZET**

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın ilk beş bölümünde depreme karşı yapı tasarımında alternatif bir yaklaşım olarak sismik taban yalıtımının uygulamaları, avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Bölüm 6'da sismik taban izolatörlerinin türleri, Bölüm 7'de dünyada bu tekniği kullanan birkaç ülkedeki uygulamalar özetlenmiştir. Bölüm 8'de elastomer mesnetlerin mekaniksel ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Bölüm 9'da ise Türk deprem yönetmeliğinde (TDY-1998) sismik taban yalıtımı kullanılarak binaları depreme karşı güvenli hale getirmeye dair herhangi bir hüküm bulunmadığından UBC-97 yönetmeliğinin ilgili maddeleri esas alınmıştır. Bölüm 10'da sismik taban izolatörlerin davranışlarını modellemek için kullanılan tekniklerden bahsedilmiştir.

Bölüm 11'de sismik taban yalıtımının binanın dinamik tepkisi üzerindeki pozitif etkilerini göstermek amacı ile iki katlı örnek bir binanın önce temele ankastre hali, sonra sismik taban yalıtımlı hali ele alınmış, analiz için gerekli olan bina ve deprem parametreleri belirlenmiştir. Bölüm 12'de örnek binanın statik eşdeğer deprem yükü hesap yöntemi ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında deprem davranış analizleri için 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi Düzce Meteoroloji İstasyonu Kuzey-Güney ve Doğu-Batı doğrultu bileşenlerindeki ivme kayıtları kullanılmıştır. Bölüm 13'de sismik taban yalıtımının yararları, her iki sınır koşulu için modal titreşim periyotları, katlar arası görelî yerdeğıştirmeler, eğilme momentleri, katlara etkiyen kütleli ivmeler ve taban kesme kuvvetlerindeki değışimler gibi bir çok davranış parametresinin aldığı değerlerin kıyaslanması yolu ile gösterilmiştir.

## **APPLICATION OF SEISMIC ISOLATION BY PLACING ELASTOMER BEARINGS AT BUILDING FOUNDATIONS**

### **SUMMARY**

In the first five sections of this study, offered as Master Thesis, as an alternative approach to earthquake resistant structural design, the seismic base isolation case applications, its advantages and disadvantages were analyzed. In Section 6, the seismic base isolator types, in Section 7, the applications in few countries that employ this technique were summarized. In Section 8, gives the mechanical and physical properties of the elastomer bearings. In Section 9, the related articles of the UBC-97 Code were taken into account as there is no provision in Turkish Earthquake Code (TDY-1998) to secure buildings against earthquake by using seismic base isolation. In Section 10, the techniques for modeling the behaviors of the seismic base isolators were mentioned.

In Section 11, in order to show the positive effects of seismic base isolation on the dynamic response of the buildings, a two storey sample building was analyzed first in the fixed-base case then in the seismic base-isolated form and the necessary building and earthquake parameters for analysis were determined. In section 12, static and dynamic analyses were carried out using static equivalent earthquake load calculation method and in the non-linear time history analyses. For the time history earthquake response analyses, 17 August 1999 Kocaeli Earthquake Düzce Meteorology Station North-South and East-West direction components acceleration records were used. In section 13, the benefits of the seismic base isolation, the modal vibration periods for both boundary conditions, relative displacements between storeys, bending moments, mass accelerations imposed on the storeys and the variations in the base sheer forces were given by comparing the values of many response parameters.

## 1. GİRİŞ

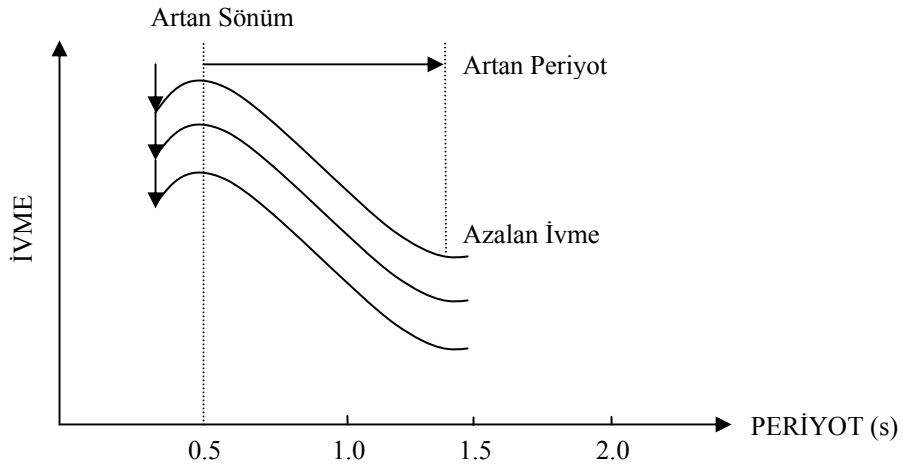
Dünya popülasyonunun büyük bir çoğunluğu sismik risk bakımından yüksek tehlike arz eden bölgelerde yaşamaktadır. Her yıl, depremler birçok insan kaybına ve yaşam alanlarına zarara neden olmaktadır. Yıllardır, depremlerin yıkıcı etkilerini binalardan, köprülerden ve potansiyel olarak korunmasız alanlardan uzaklaştırmak için birçok tasarım prensibi geliştirilmektedir. Türkiye’ de iki yılda bir belli aralıklarda meydana gelen büyüklüğü  $M= 6,5$  ve üzeri kuvvetli depremlerin yıkıcı etkileri binlerce insanın ölümüne ve yaklaşık olarak 5000 binanın kullanılmaz hale gelmesine neden olmaktadır [1]. Ülkemizin % 92 sinin deprem kuşağında olması, yapı ve yapı sistemlerinin tasarım ve projelendirilmesindeki unsurları önemli kılmaktadır. Üst yapı ve temelin kayıcı ve esnek izolasyon sistemleriyle ayrılması yöntemi günden güne önem kazanmaktadır. Dolayısıyla taşıyıcı sisteme olduğu kadar yapı içerisinde can ve mal kaybına da sebebiyet veren şiddetli depremlerin etkilerinin, yapıya yerleştirilen izolasyon sistemleri ile azaltılması araştırmacılara çekici gelmekte ve günden güne yeni sistemler üzerinde çalışılmaktadır [2].

Yapıların ekonomik ömürleri içinde değişik şiddetlerde çok sayıda deprem olabilir. Bununla birlikte, yapının ekonomik ömrü içinde beklenen en şiddetli deprem vardır. Depreme dayanıklı yapının değişik elemanlarından değişik şiddetlerdeki depremlerde beklenen davranış aşağıdaki gibidir.

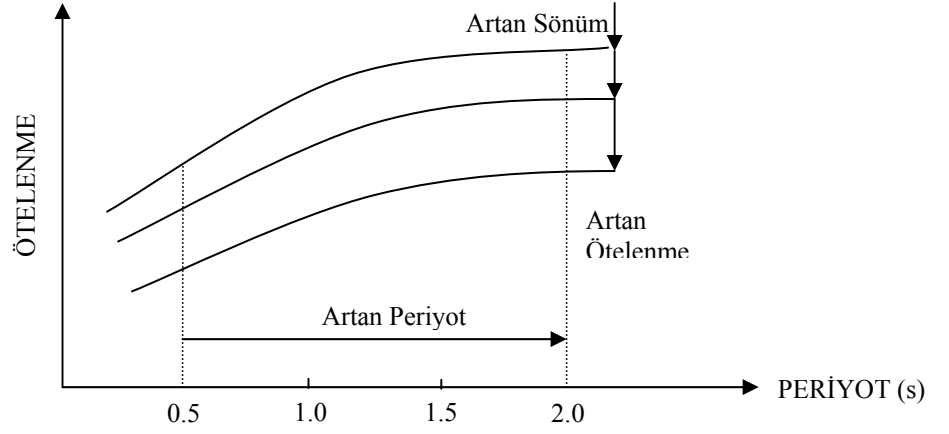
- Yapının faydalı ömrü içerisinde çok sayıda olması beklenen hafif şiddetli depremlerde, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarda, yapı içindeki ekipmanlarda hiç hasar olmamasıdır.
- Yapının faydalı ömrü içerisinde çok sayıda olması beklenen orta şiddetli depremlerde mimari elemanlarda ve az da olsa taşıyıcı sistem hasarı başlangıcı olabilir.
- Yapının faydalı ömrü içerisinde olması beklenen en şiddetli depremde yapı taşıyıcı sistemi ileri düzeyde hasar görebilir, ancak yıkılmamalı ve can kaybına neden olmamalıdır.

Taban izolasyonu uygulanmış bir yapıda ise hafif ve orta şiddetli depremlerde yapının taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanlarında hiçbir hasar olmaması, en şiddetli depremlerde yapının kullanım işlevinde herhangi bir aksama meydana gelmemesi beklenmektedir.

Şekil 1.1'den görüldüğü üzere ankastre mesnetli yapılarda kat adedi arttıkça yapı periyodu artmakta ve yapı ağırlığı cinsinden taban kesme kuvveti azalmaktadır. Yapının periyodu 2 saniye civarına kadar uzatılırsa sismik kuvvetlerde önemli bir azalma meydana gelmektedir. Kat kuvvetleri ve yapıdaki yer değiştirmeleri kontrol etmek açısından bir başka yöntem de yapıya ekstra sönüm sağlamak olabilir. Şekil 1.1 ve Şekil 1.2'de artan sönüm değerleri için kuvvet ve yer değiştirme spektrumları görülmektedir. Sönüm arttıkça periyoda bağlı olarak yapıya etkiyen kuvvetler ve kuvvet-periyot eğrisinin hassasiyeti azalmaktadır ve ayrıca yapıdaki yer değiştirmeler de kontrol edilebilir seviyelere inmektedir. Ancak yapı sönümü henüz tam olarak formüle edilememiştir ve ankastre mesnetli yapılar için deneysel çalışmalardan çıkarılan sonuçlara göre yönetmelikler bu değeri % 5 olarak varsaymaktadır. Böylece, yapıda ekstra sönüm elemanları kullanmadan yapının sönümünü arttırmak mümkün görülmemektedir.



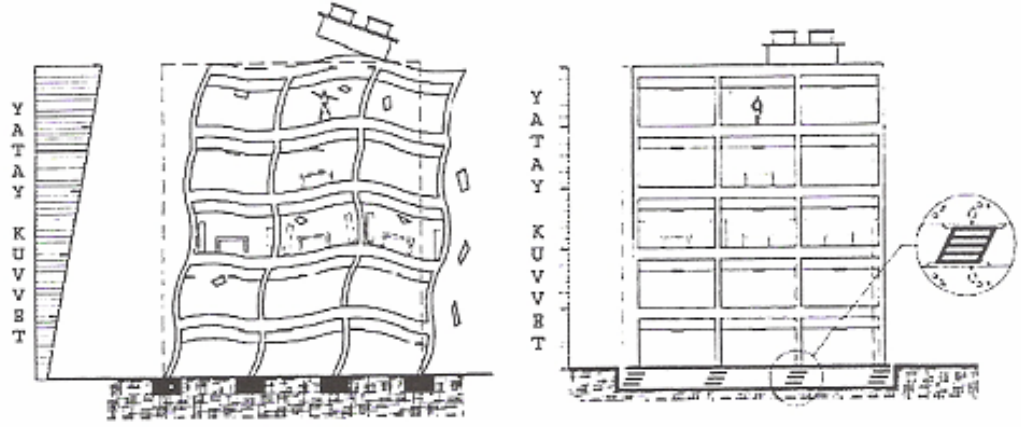
**Şekil 1.1:** Sert zeminler üzerinde alınmış tipik kuvvetli yer hareketi ivme spektrumu ([3]'ten alınmıştır.)



**Şekil 1.2:** Sert zeminler üzerinde alınmış kuvvetli yer hareketi öteleme spektrumu ([3]'ten alınmıştır.)

Yukarıdaki şekilde ankastre mesnetli yapılar için yer değiştirme-periyot ilişkisi görülmektedir. Yapının periyodu arttırıldığında yapıda daha büyük yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Katlar arası görelî yer değiştirme sınır değerleri aştığında taşıyıcı sistem hasarı meydana gelebilir ve ayrıca yapı içerisindeki eşyalar aşırı yer değiştirmeler sonucunda devrilerek can ve mal kaybına da sebebiyet verebilir. Büyük kat ötelemeleri daha rijit sistemler oluşturularak azaltılabilir ancak bu sayede kat ivmeleri artmaktadır. Kat kütlelerine etkiyen büyük ivmelerden dolayı oluşan atalet kuvvetleri ancak daha sünek sistemler oluşturularak azaltılabilir ancak bu da kat ötelemelerini artırıcı bir unsurdur.

Şekil 1.3'de ankastre mesnetli bir yapı ile taban izolasyonu uygulanmış yapının deprem esnasındaki davranışı görülmektedir. Ankastre mesnetli taşıyıcı sistem yatay deprem yükünü binaya üst katlara doğru lineer artan şekilde uygulamakta ve dolayısıyla yüksek kat kuvvetleri ve büyük kat ötelemeleri meydana gelmektedir.



**Şekil 1.3:** Ankastr mesnetli ve taban yalıtım sistem uygulanmış yapı davranışları ([23]'den alınmıştır.)

Taban izolasyonlu bir yapıda ise, önemli yer değiştirmeler izolasyon katı seviyesinde oluşur ve üst yapı nerede ise rijit öteleme hareketi yapar. Kat kuvvetlerinin azalması sonucu yapıdaki yer değiştirmelerin istenen sınırlar içerisinde kalması sağlanır. Böylece taşıyıcı sistem ve yapısal olmayan mimari elemanlardaki hasar önlenerek yapı güvenliği artırılmış olur.

Kısa ve orta yüksek, küçük periyotlu yapılarda uygun olan bu yöntem uzun periyotlu yapılarda uygun değildir. Yumuşak zemin üzerine oturan yapılarda taban izolasyonu uygulanması deprem kuvvetlerini azaltacağına aksine arttırıcı bir unsur olabilir. Taban izolasyonu mevcut yapılardaki klasik güçlendirme yöntemlerine alternatif oluşturmaktadır [3].

Bu tez kapsamında günümüzde yaygın olarak kullanılan taban izolatörleri hakkında araştırma yapılmış, taban izolasyonu mesnetlerinin mekanik özellikleri, bu mesnetlerin modellenmesi ve bina tipi yapılar için yaygın olarak kullanılan UBC-97 yönetmeliği içeriğinde yer alan taban izolasyonu hükümleri incelenmiştir. İzolasyon mesnetlerinin modellenmesinde kullanılan sonlu elemanlar programlarından biri olan ETABS ile 3 boyutlu bir yapının yalıtım elemanının matematik modeli kurulmuştur. İcra edilen lineer statik ("Eşdeğer Deprem Yüğü" yöntemi) ve lineer olmayan zaman tanım alanında dinamik analiz sonuçları, ankastr mesnetli durum ile karşılaştırılmıştır.

## 1.1. Genel Bakış

Depremler büyüklüklerine bağlı olarak yıkıcı olabilen doğal olaylardır. Yüksek sismik bölgeler için deprem yükleri, dünya çapında büyük çoğunluğa sahip düşük ve orta yükseklikteki yapılar için en önemli ve en fazla yıkıcı özelliklere sahip dış yükler olarak göz önünde tutulur. Aksine, rüzgâr yükleri genelde yüksek yapıların (sismik alanlarda olsa bile) tasarımında kullanılır. Bugün, teknolojik yenilikler şiddetli depremlerin tehlikelerini ve sonuçlarını kontrol etme imkânını bize sunmaktadır. Maalesef, tasarım ve inşaa teknolojilerindeki gelişmeler, özellikle şiddetli bir depremden sonra insan yaşamının kaybedilebilmesi ve çok büyük hasarlardan sonraki deneyimler üzerine kurulmuştur. Ancak bu tür yenilikler çok nadir olarak günümüzdeki yaygın inşaa projelerinde depreme karşı yapı tasarımı içerisinde kullanılmaktadır.

Günümüzdeki depreme dayanıklı yapı tasarımında, sonuçlanan hasara daha az önem vermeye yönelik ölçümleri düşünmekten çok güvenlik konusu daha ön plana çıkarılmaktadır. Analiz, tasarım ve depreme dayanıklı yapıların üretimi son yüz yılda geliştirilmesine rağmen, çok şiddetli depremler hala yapıların en güvenli ve ileri sismik yönetmeliklere göre inşaa edilmelerine rağmen istenmeyen hasarlara neden olmaktadır [4]. Örneğin en son yayımlanan UBC (Uniform Building Code) yönetmeliğinin amacı 1626 no'lu maddesinde açıkça şu cümlelerle ifade edilmektedir :

“Burada depreme karşı yapıların tasarımındaki hazırlıklar öncelikli olarak büyük depremlerde yaşam kaybına ve yapısal göçmelere karşı bir güvenlik oluşturmaktadır. Hasarı sınırlamak veya yapının fonksiyonelliğini sürdürmek değildir.” [5].

Benzer şekilde Türk Deprem Yönetmeliğinde de depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkesinden bahsederken şu sözlere yer verilmektedir:

“Bu Yönetmelikte depreme dayanıklı bina tasarımının ana ilkesi; hafif şiddetteki depremlerde binalardaki yapısal ve yapısal olmayan sistem elemanlarının herhangi bir hasar görmemesi, orta şiddetteki depremlerde yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda oluşabilecek hasarın onarılabilir düzeyde kalması, şiddetli depremlerde ise can kaybını önlemek amacı ile binaların kısmen veya tamamen göçmesinin önlenmesidir.” [6].



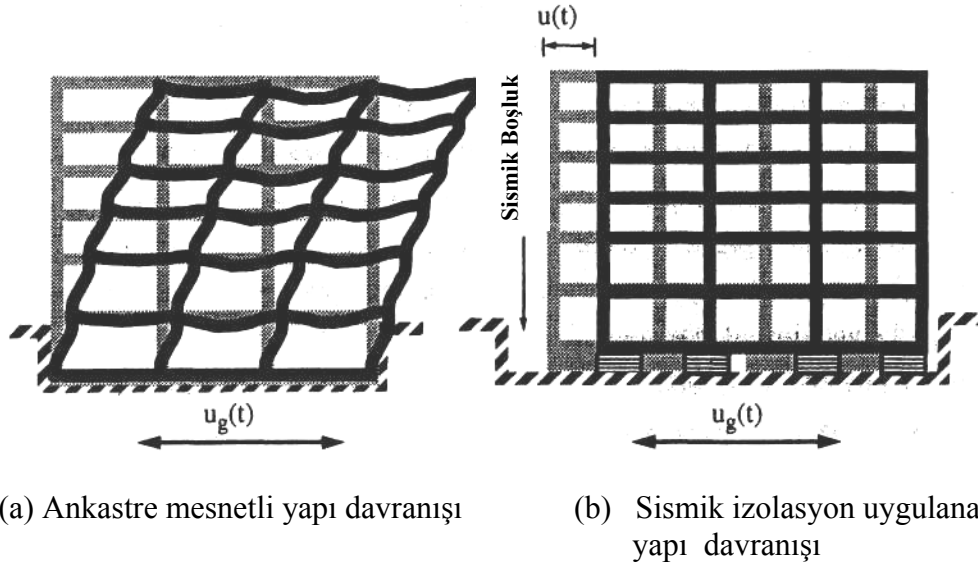
Gerçekte, sismik yönetmelikler yaşam güvenliğini ön planda tutarak, mülkiyetteki hasarı önlemeyi amaç edinmez. Ancak, büyük seviyelerdeki hasar ve fonksiyonelliğin kaybı, özellikle kritik operasyonlarda günümüzdeki teknolojik ilerlemeler tarafından ifade edilen daha yüksek performans talebini düşürerek artık kabul edilir seviyelerde görülmemektedir ve yapılardaki yüksek maliyetli ekipmanların korunması niteliğini taşımamaktadır.

Bu nedenle tasarım ve yapım metotları, yapılara ve onun içeriğini tehdit eden deprem tehlikelerine adres göstererek uygulanmalıdır. Bundan yola çıkarak birçok ticari tasarım metotları yapının depreme karşı performansını yükseltmeyi hedeflerken sismik izolasyon depremin neden olduğu sismik yükleri azaltmayı hedefler. Bu tasarım yaklaşımı mühendis zekâsının aradığı, depremin sonuçları ile ilgilenmekten çok problemlerden kaçınmayı amaç edinen bir adım olduğu için yapı mühendislerine oldukça çekici gelmektedir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımını “arz talep” denklemi olarak göz önüne alabiliriz ( $arz > talep$ ). Depreme karşı klasik tasarım konsepti insan yaralanmalarından ve yapısal göçmeden kaçınmak için bazı seviyelerde “talep” e eşitlenmesi için yapıya daha yüksek dayanım sağlayacak “arz” isteğini artırmayı hedefler. Ancak çoğu zaman hasardan kaçınmak için gerekli olan talebe denk düşecek gerekli dayanım sağlanması imkânsızdır. Dahası, arz tarafını arttırmadaki çaba (dayanımın artırılması), talep tarafını artıran sismik kuvvetlerden dolayı arttırmaktadır (deprem büyüklüğünün artması ile birlikte artan, kat kütlelerine etkiyen ivmenin büyümesi). Aksine sismik izolasyon sismik kuvvetleri azaltarak “arz talep” denklemindeki talep tarafını azaltmayı hedefler.

Bir yapının temellerinin deprem hareketinden yalıtımı fikri 19. yüzyıl sonlarında önerilmiştir. Yapıların sismik izolasyonu için bilinen ilk öneri bir yüzyıl önce Japonya’da ortaya atılmıştır. Gelecek birkaç yüzyılda diğer öneriler ortaya atılmasına rağmen hiçbiri gerçekte uygulama alanı bulamadı. Sismik izolasyon kavramının bir yapı için depreme karşı koruyucu niteliğine ulaşmasında bir metot olarak oluşturulması ve pratikte bina projelerinde uygulanması sadece son birkaç on yıllık dilim içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Deprem mühendisliği ve sismolojideki en son gelişmeler, bilgisayar ve yazılım mühendisliğindeki ilerlemeler, yapıların izolasyonunda kullanılan elastomer mesnetlerin üretimindeki gelişmeler ve sönümleyici sistemlerindeki yenilikler deprem hasarlarını azaltmak için sismik izolasyonun kullanılmasına imkân sağlamaktadır. Son birkaç yıldır yapıların depreme karşı tasarlanmasında tarihsel özelliğe sahip yapıların ve var olan binaların sismik güçlendirilmesinde sismik izolasyon kullanımı artmaktadır. Sismik yalıtımın bu tür yapılardaki etkinliği, kuvvetli sismik hareketler altında yapının kat ivmelerini ve içsel kat ötelemelerini azaltmasından anlaşılabilir. Şekil 1.4 (a) ve Şekil 1.4 (b), temelden ankastre ve yalıtımlı yapının deprem anındaki davranışlarını göstermektedir.



**Şekil 1.4:** Deprem esnasında ankastre mesnetli ve sismik izolasyon uygulanan yapının deformasyon şekilleri ([8]'den alınmıştır.)

Katların göreceli deplasmanları veya kat kesme gerilmeleri/kuvvetleri döşeme plakasına içten bağlı elemanlara ve yapının taşıyıcı olmayan elemanlarında olduğu gibi taşıyıcı elemanlarında da hasar meydana getirir. Kat ivmeleri, özellikle nükleer enerji santrallerinde, yapının taşıyıcı sisteminde yıkıcı etkilere neden olan hasarları meydana getirir. Yapının katlar arası göreceli ötelenmelerini en aza indirmek için yapı rijitleştirilmelidir. Ancak bu durumda katlarda yüksek ivmelenmelere neden olan depremin zemin ivmesinin büyütülerek yapı iletilmesi sağlanmış olur. Tam tersine yapının rijitliği azaltılarak katlara gelen ivmeler azaltılabilir, fakat bu durumda da yapısal süneklikten dolayı göreceli kat ötelemeleri arttırılmış olur. Sismik izolasyon eş zamanlı olarak hem kat ötelemelerinin, aynı zamanda, zemin ivmesinin katlardaki büyüklüğünün azaltılmasında önemli bir rol üstlenir.

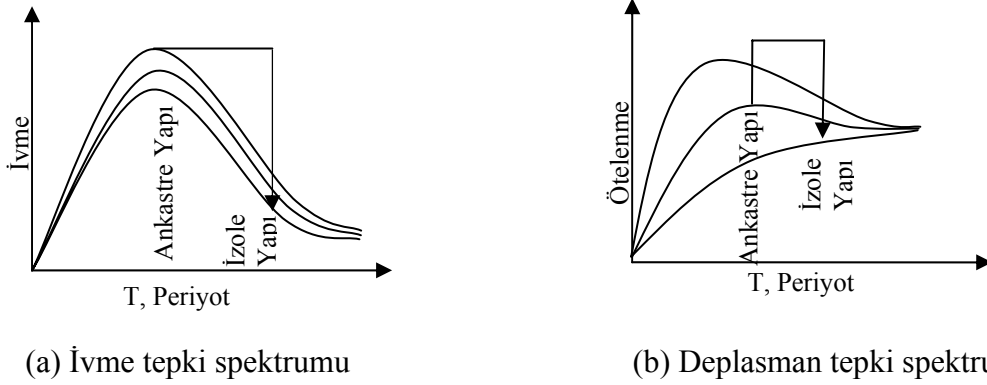
Depreme karşı klasik yapı tasarım metotları, depremin yüksek frekanslı enerjisini sönümlendirmek için yapıya elastik ötesi davranış yapması için yapısal hasarın taşıyıcı sistemin belli başlı bölgelerinde oluşumuna izin vererek yapının tümünden göçmesinden kaçınmayı hedefler (plastik mafsallaşma). Aksine, sismik izolasyon konsepti yapıyı, depremin hareketinden ayırarak yapıya esneklik sağlayıp deprem enerjisinin yapının bütününe girmesine izin vermez. Ayrıca, yapı içerisinde olmayıp yapının sönümünü arttırmak amacı ile tasarlanan enerji dağıtma mekanizmalarına sismik izolasyon sistemi içerisinde yer verilir. Sismik izolasyon yapılmış bir yapının etkin frekansı, aynı özelliklere sahip ankastre yapıların ve tipik bir depremin baskın yer hareketi frekansından daha düşüktür. Buna, yapıyı yatayda düşük rijitlik sağlayan izolatörler üzerine mesnetleyerek ulaşılabilmek ve sonuç olarak yapının etkin frekansını daha düşük değerlere dönüştürmeye bu izolatörler neden olmaktadır [7].

Sismik olarak izole edilen bir yapı tümüyle bir ankastre yapıya oranla çok daha fazla öteleme yapmasına rağmen, ez fazla deformasyon izolasyon seviyesinde meydana gelir. Üstyapı, onun yapısal olan veya olmayan taşıyıcı sistemini hasardan korumasına neden olan rijit bir cisimmiş gibi hareket ederek önemli oranda deformasyona uğramadan hareketini gerçekleştirir Şeki 11.4(b). Beklenen maksimum deplasmanların izolasyon seviyesinde olmasını kabul ederek dizayn edilebilen izolasyon sistemi, yapı içerisindeki en fazla deformasyona maruz kalan kısım olarak karşımıza çıkar. Genellikle ankastre yapılarda zemin büyütmesi olarak yapıya etkiyen büyük ivmeler, sismik izolasyon uygulanmış binalar ile karşılaştırıldığında gözle görülür ölçüde azalma göstermektedir.

Sismik izolasyon yapılmış bir yapının maksimum kat ivmeleri aynı zamanda zeminin pik ivmesinden daha büyük değerler alabilir. Sismik izolasyon sistemini kullanmanın en büyük avantajı, zemin ivmelerini büyütülmesinden kaynaklanan rezonans olayının tehlikeli bölgesinden yapının etkin frekansını daha uzak alanlara ötelemek olarak söylenebilir.

Yapının unsurlarının korunmasında çok önemli olan kat ivmelerinin büyüklüğünün azaltımı, depreme karşı klasik yapı tasarım metotlarında kullanılması mümkün değildir. Şekil 1.5 (a)'da tipik bir ivme spektrumunu, Şekil 1.5 (b)'de ise deplasman tepki spektrumunu göstermektedir. Şekil 1.5(a)'da ivmede önemli bir azalmaya ulaşan bir yapının periyodunu arttırarak rezonans olayından kaçınılabilmek. İzolasyon

sistemi sayesinde sisteme dâhil edilen ek sönümlenmeler sayesinde ivmelenmeleri daha ileri düzeyde azaltma imkânı bulunabilmektedir. Bu nedenle, yapının temeline esnek izolatörler yerleştirildiğinde yapının artan sünekliği ile birlikte etkin periyodu arttırılabilir ve artan periyot ile spektrumlardan anlaşılacağı gibi yapının maruz kalacağı sismik kuvvetleri ve kat kütlelerine etkiyen ivmelenmeleri önemli ölçüde azaltabilir ve bu sayede rezonans olayından kaçınılabilir.



**Şekil 1.5:** Tipik tepki spectrum eğrileri ([8]'den alınmıştır.)

Deplasmanları göz önünde tutarak, yer değiştirme tepki spektrumunda gözlemleneceği gibi (Şekil 1.5(b)) sistemin periyodu arttırılarak deplasmanların artabileceği gözlemlenebilir. İzolasyon sistemine sağlanan veya dıştan destekli sönümleyiciler sayesinde artan enerji dağıtım mekanizması sayesinde bu artan deplasmanlar azaltılabilir. İzole edilmiş bir yapının tüm deplasmanları aynı özelliklere sahip benzer bir ankastre yapınınkinden fazla olmasına rağmen, deplasmanlar izolasyon seviyesinde yoğunlaştırılmaktadır ve üst yapı büyük ölçüde rijit kalmaktadır. Göreli kat ötelemeleri ve sonucunda oluşan kat kesme kuvvetleri; yapının yapısal olan ve olmayan elemanlarının hasarlarından kaçınılarak benzer ankastre yapının kesme kuvvetlerinden çok daha alt düzeylere çekilebilmektedir. Sadece deplasmanlar değil aynı zamanda enerji dağıtım mekanizmasını da tüm yapıya yaymak yerine sadece izolasyon seviyesinde yoğunlaştırmak mümkün olmaktadır. İzolasyon sistemi büyük birim deplasmanlara maruz kalabilecek şekilde tasarlanabilir ve ayrıca yapının tümüne oranla kolayca gözlemlenebilir ve onarılabilir. Sismik izolasyonun kullanımındaki en önemli gereksinim şiddetli bir deprem esnasında izolasyon seviyesindeki büyük deplasmanlar olacağını umarak yapının serbest hareketine izin vermek için yapı çevresinde gerekli sismik boşluklar sağlanmasıdır. Yapı etrafındaki bu gerekli boşluk sismik izolasyonun

fonksiyonelliğini engellemek için şarttır ve yapının tüm ömrü boyunca sağlanmalıdır. Bazı durumlarda yapıyı izole etmek için temel çevresinde yeterli izolasyon boşluğunun olmamasından dolayı sismik izolasyon sisteminin kullanılması zor hatta imkansızdır.

Sismik izolasyon bir yapının sadece bir kısmını izole etmek için kullanılabilir veya tüm yapıyı izole etmektense binanın içerisinde bulunan pahalı ekipmanları kritik öneme dahil belli değerli eşyaları izole etmekte de kullanılabilir. Yapıdaki değerli, pahalı ve hassas ekipmanlar titreşim izolasyonu sağlayan aletler üzerinde onları mesnetleyerek depremin etkilerinden korunabilir. Yapı genelinde herhangi bir kat bile izolatörler üzerinde mesnetlenebilir. Bu tür izolatörler hastaneler, nükleer reaktörler ve diğer kritik tesisler için idealdir [7].

Sismik izolasyon, kritik tesislerin veya bünyesinde değerli ekipmanlar bulunduran binalar için artan ölçülerde kullanım alanı bulmasına rağmen, halen yapıların güçlendirilmesi veya yaygın binalar için sismik koruma olarak geniş çapta kullanılmamaktadır. Yapı teknolojilerindeki başlangıçtaki yüksek yatırımlar ve malzemelerin üretilme maliyetleri nedeni ile bu tür sistemlerin kamu binalarına uygulanması toplumu oluşturan bireyler için daima pahalı gelmiştir. Dahası, insan yaşamının göz ardı edilmemesi gereken alanlardan biri olan inşaat mühendisliği sahasındaki yenilikler daima muhafazakâr bir tavırla karşılanmıştır. Sismik izolasyon uygulanmış yapıların yıkıcı depremlerde üstün performansları gözlemlendikçe, bu tasarım yönteminin kullanımını ve geniş çapta binalara uygulanması gerekliliği gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Sismik izolasyon sisteminin yaygın kullanımı inşa ve güçlendirme projelerinde uygulanabilir seviyelerde sismik izolasyonun maliyetini önemli ölçüde düşürecektir [8].

## **1.2. Sismik İzolasyonun Ana Hatları**

Sismik izolasyon, özellikle orta yükseklikteki titreşim frekansı büyük yapıların deprem yüklerini ele almak için depreme karşı klasik yapı tasarımına alternatif bir yoldur. Depreme dayanıklı klasik yapı tasarımı sadece orta şiddetteki depremlerde yapılardaki aşırı hasarı önleme amacını taşıyan bir yaklaşımdır. Çok şiddetli depremler için, depremden hemen sonra yapının göçmesine bakılmaksızın amaç; yapısal göçme ve sonucunda gelen yaralanmalardan kaçınmaktır. Buna, depremin

yapıya verdiği sismik enerjiyi, yapının taşıyıcı sistemi üzerinde belirli yerlerde yoğunlaştırarak, elemanların inelastik deformasyona izin verecek şekilde sönmümlendirmek ve taşıyıcı sistem elemanlarının göçmesini önleyecek uygun dayanımı sağlayarak ulaşılabilir. Yapısal elemanların ve birleşim noktalarının dikkatli tasarımı ile yönetmeliklere uygun bir şekilde tasarlanan yapısal sistemin, hayat kurtarıcı niteliği olmasına rağmen, gerçekte taşıyıcı sistem bir bütün olarak korunamaz. Hasar sorununu adres göstermek için alternatif bir tasarım yaklaşımının gerekliliği vurgulanmalıdır. Özellikle kritik tesisleri barındıran ve depremden sonra fonksiyonelliğine devam etmesi gereken binalar için veya şiddetli bir depremden sonra şehirlerin hayati damarlarını oluşturan altyapılarda ve ana yollara bağlantılı bulunan köprülerdeki istenmeyen hasarların oluşması artık kabul edilemez bir gerçektir. Büyük kültürel değerlere sahip tarihi yapılar ve önemli sergilere ev sahipliği yapan müzeler alternatif bir tasarım yaklaşımı olan taban yalıtım sistemleri ile korunabilir. Benzer şekilde ekonomiye yön veren anonim şirketlerin merkez üstleri, iletişim ve kontrol merkezleri, yüksek teknolojik ve maliyetli endüstriyel fabrikalar gibi yapıların içeriklerinin hasar görmesi veya operasyonel faaliyetlerinin aksaması ekonomik boyutta yıkıcı etkiler doğurabileceği için bu tür yapıların sismik tehlikelerden uzak tutulma zorunluluğu vardır. Ancak, sismik izolasyon maliyet yönünden ekonomik ve yapılabirliği toplumsal binaların mülkiyetlerini ve sahip olduğu elemanları korumaya yönelik olursa, bu tür ileri düzey tasarım yaklaşımları özel konutlarda bile tercih edilebilir .

## **2. DEPREME KARŞI KLASİK YAPI TASARIMI VE SINIRLAMALARI**

### **2.1. Amaçlar ve Tasarım Felsefesi**

Oldukça yüksek sismik özelliği olan alanlara şiddetli bir depreme karşı koyabilecek uygun maliyette, ortalama yükseklikte ankastre düzende, klasik konseptle oluşturulmuş yapı yönetmelikleri ile tasarlanmış bir yapı inşa etmek zordur. Bu nedenle, ana vurgu genellikle yapısal göçmeden kaçınmak ve olabilecek yaralanmaların sınırlandırılmasına verilmiştir. Yapı eğer uygun tasarlanırsa yapının göçme olasılığını azaltmak için inelastik davranıştan kaynaklanan hasar, deprem tarafından yapıya verilen anlık enerjinin dağıtılması için bir emniyet supabı işlevi görür. Bu tasarım yaklaşımı teknolojik bakımdan ileri düzey ülkelerde uygun ölçütlerde uygulandığında birçok yaşam kurtarmasına rağmen, hala şiddetli depremlerde yapılarda meydana gelen aşırı hasar nedeni ile ülke ekonomisine olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.

Depreme karşı klasik yapı tasarımındaki amaç; birçok tasarım yönetmeliklerinde belirtildiği gibi küçük ölçekli depremlerde tüm hasara engel olmak ve bu depremlerden hasarsız çıkmak, orta büyüklüklü depremlerde yapısal olmayan elemanlarda sınırlı hasar ile karşı koymak, şiddetli depremlerde hem yapısal olan hem de yapısal olmayan taşıyıcı sistem elemanlarının kabul edilebilir seviyelerde hasar görmesine izin verip, ancak yapının tümünden göçmesine engel olmaktır.

Yapısal hasar, yapının taşıyıcı sistem elemanlarının belli bölümlerinde istenen hasar seviyesine, yapısal olmayan hasar ise yapının taşıyıcı sistemine katkıda bulunmayan (mimari çıkıntılar, bölme duvarlar ve tavanlar v.b.) yapı elemanlarındaki gözlenen hasarlara işaret eder. Özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımında kullanılan yönetmeliklere göre uygun şekilde tasarlanan yapıların sismik kuvvetlere karşı koyabilmesi için süneklik ve dayanım özellikleri arttırılır, ancak bu durum hasarların oluşumuna davetiye çıkartmaktadır. Orta yükseklikli yapılar için yapının kat kütlelerine etkiyen ivmelerden dolayı sismik yükler, zemin ivmesinin büyütülmesi olarak ortaya çıkar. Depreme karşı klasik yapı tasarımı, yapının elastik ötesi

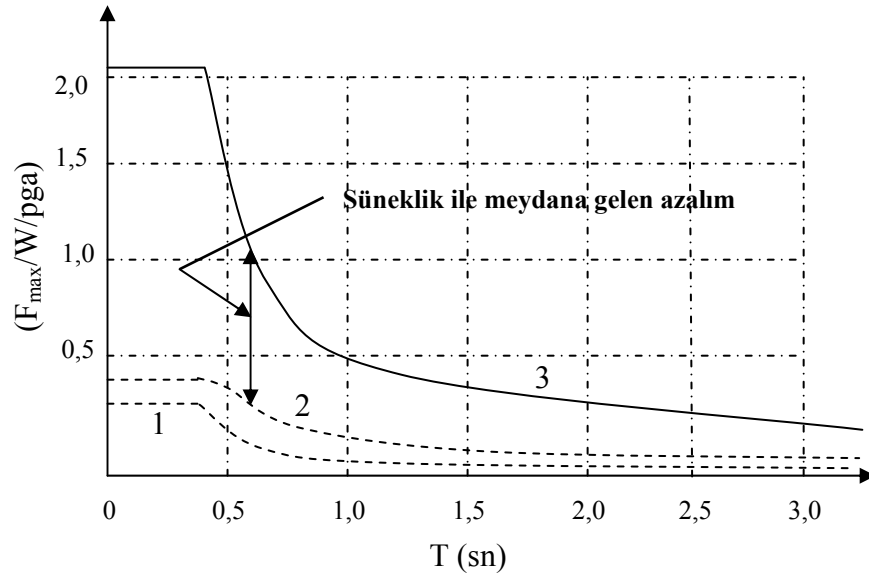
davranışı ile depremin yüksek frekanslı enerji içeriğini önceden düşünülen noktalarda sönümlendirmeyi hedefler. Aksi takdirde kabul edilebilir ekonomik ve mimari maliyetlerle inelastik deformasyondan kaçınmak için gereken dayanımı sağlamak pratik olarak imkânsızdır. Buna, deprem esnasında yapıda göçme meydana gelmeden yapının elastik olmayan deformasyonları karşılayabilmesi bakımından yapısal taşıyıcı sistem elemanlarına yeterli seviyede süneklik sağlayarak ulaşılabılır.

Süneklik kapasitesi, yapının seçilen bölümlerindeki elemanlara birçok tersinir yükler altında gevrek kırılmaksızın bu çevrimlere karşı koyabilme yetisini kazandırarak, bu bölgelerin akma seviyesine ulaştırılması, yapısal elemanların bu kıstaslar altında uygun bir şekilde tasarlanması yoluyla sağlanır. Yapıya giren deprem enerjisinin bir kısmı yapıda önemli ve arzu edilmeyen hasarlara neden olan plastik deformasyonlar sayesinde sönümlenir. Bu tür enerji sönümleme mekanizması sadece yapısal taşıyıcı elemanlara değil aynı zamanda taşıyıcı olmayan elemanlara da oldukça zararlı etkileri mevcuttur. Enerji sönümlendirilmesi, kesin olarak süneklik için hesaplanan azaltım faktörlerini kullanarak bir elastik analiz çerçevesi içerisinde göz önünde bulundurulur. Nispeten rijit yapıların sismik kapasiteleri, yapı inelastik deformasyonlara maruz kaldıkça artar. Bu artım, sismik etkilerin daha az olduğu ölçeklere doğru yapının etkin frekansını değiştiren rijitliğin azaltımı etkisinin sonuçlarından kaynaklanmaktadır [4].

Çoğu sismik yönetmelikler birçok deprem datalarını ve onun yerini tutan tepki spektrumlarını kullanarak oluşturulan tasarım spektraları üzerine kurulmuştur. Bir tepki spektrumu, belli bir deprem datasından tek serbestlik dereceli bir sistemin bazı özellikleri her defasında değiştirilerek oluşturulan maksimum deplasman, hız ve ivmelerini gösteren ölçekli bir çizimden ibarettir [9].

Bu tasarım spektrumları genellikle ana değer altı birçok tepki spektrum değerlerinin standart sapmalarının toplanması ile bir araya getirilmesi yoluyla oluşturulur. Hem yapısal özellikler hem de beklenen depremle ilgili belirsizlikleri düşünerek bir tasarım spektrumu bir tepki spektrumuna tercih edilebilir (Şekil 2.1).





**Şekil 2.1:** Tipik bir tasarım spektrumu ([11]'den alınmıştır.)

Grafiğin en üst seviyesi (3), California yapı mühendisleri kurumuna göre bir ankastre mesnetli yapının sismik yüklere elastik sınırlar içerisinde karşı koyabilmesi halinde yapıya gelen maksimum deprem kuvvetini göstermektedir [10]. En alt seviyedeki grafik (1), UBC yönetmeliğine göre ankastre mesnetli yapı tasarımında kullanılan kuvvetlerle ilişkilidir [11]. Tasarımda kullanılan güvenlik faktörlerini göz önünde tutarak ankastre bir yapının tahmin edilen dayanımı grafiği (2)' de verilmiştir. Yapının elastik sınırlar içerisinde karşı koyabileceği maksimum elastik kuvvetle, inelastik davranışıyla elde edilen muhtemel dayanım arasındaki fark, yapının süneklik kapasitesi ile ilişkilidir.

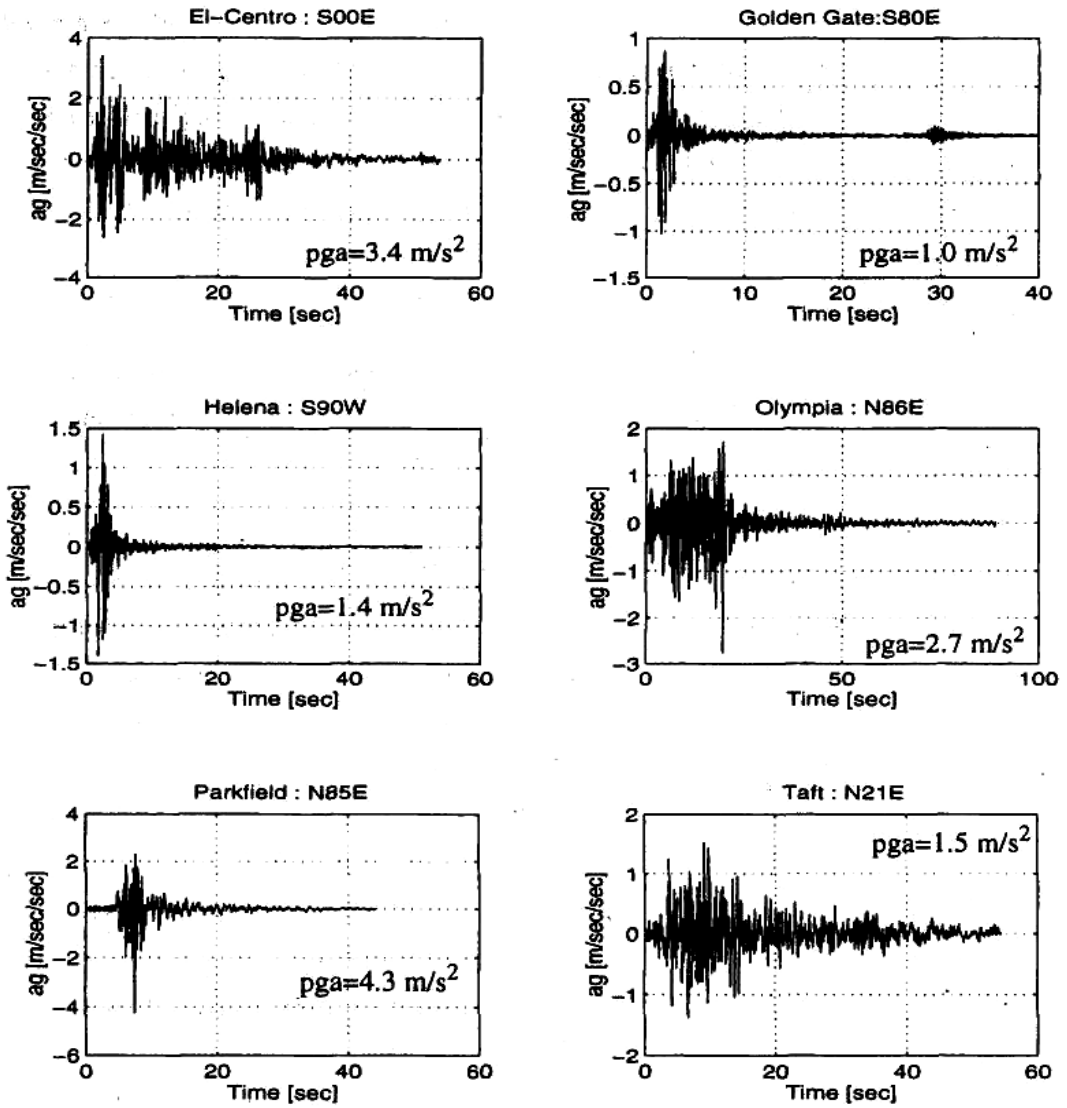
## 2.2. Yöntemin Dezavantajları

Daha öncede anlatıldığı üzere depreme karşı klasik yapı tasarım yöntemi bazı dezavantajlara sahiptir. En önemli olanları özetlenecek olunursa;

### 2.2.1. Orta yükseklikteki yapıların rezonans problemleri

Orta yükseklikteki yapılarda ortaya çıkabilecek en büyük problemlerden biri yapının etkin periyodunun depremin baskın periyodu ile aynı sınır değerler arasına düşmesidir. Bu olay yapıların ve onların taşıyıcı unsurlarının aşırı hasarına sebep olan zemin ivmesinin büyütülmesine neden olur. Depreme karşı klasik yapı tasarımının neden olduğu bu dezavantajı bir tepki spektrumunun oluşturulması sayesinde gösterilebilir.

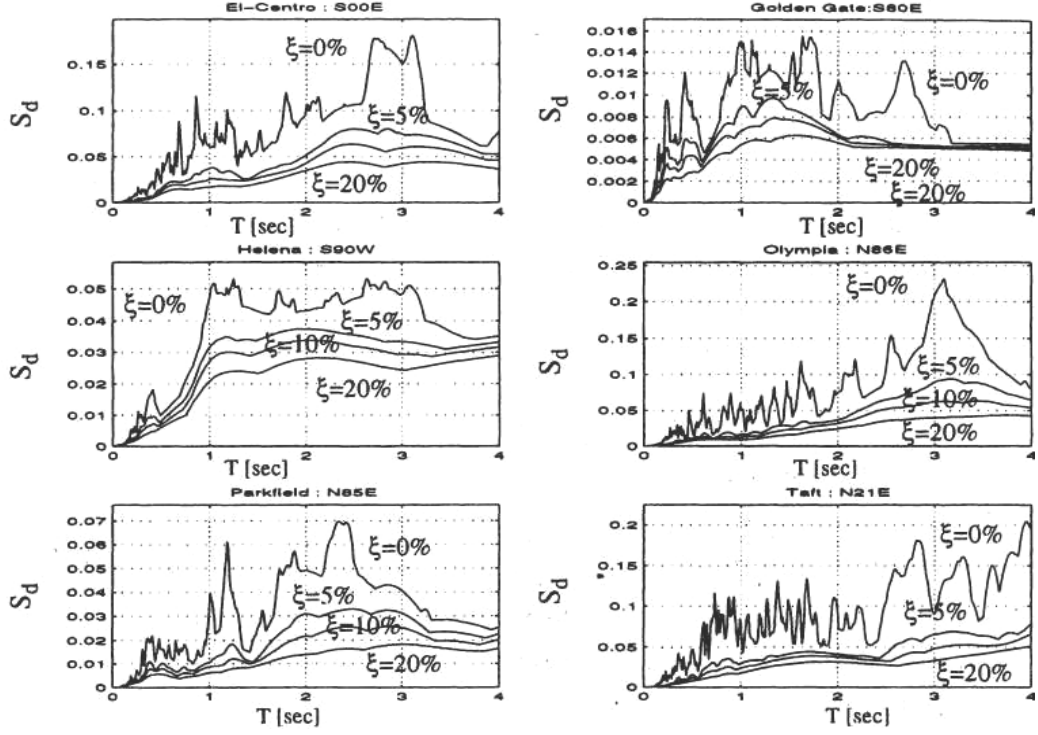
Modların süper pozisyonu analiz yolu ile birçok yapının deprem hareketlerine tepkisi temel olarak ilk birkaç serbest titreşim Eigen modları tarafından karakterize edildiği görülebilir. Etkin titreşim modunun harekete katılımı birçok durumda, yapısal dinamik cevabın en önemli ana unsuru olduğundan dolayı büyük önem taşır. Birçok modern sismik tasarım yönetmelikleri sadece yapının etkin modunun harekete katılımını düşünerek denk bir statik yükleme üzerine oluşturulmuştur. Şekil 2.2'deki 6 adet deprem kaydının tepki spektrumu New mark  $\alpha$ - $\delta$  metodu kullanılarak oluşturulmuştur.



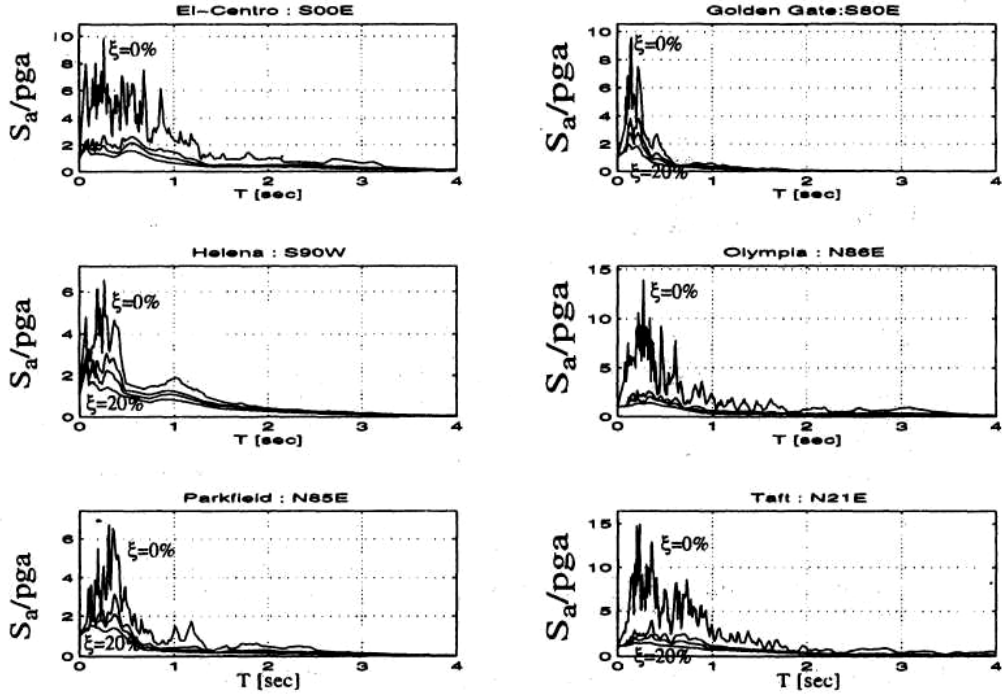
Şekil 2.2: Farklı bölgelerden alınmış deprem kayıtları. ([8]'den alınmıştır.)

Bir yapının etkin periyodunun, yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisi tepki spektrumlarından kolayca elde edilebilir. Maksimum rölatif deplasmanlardan oluşan

tepki spektrumu ve maksimum pseudo ivme spektrumu bu kayıtlar için sönüm oranları  $\xi$  %0 - %20' ye doğru sıralı şekilde Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de çizilmiştir.



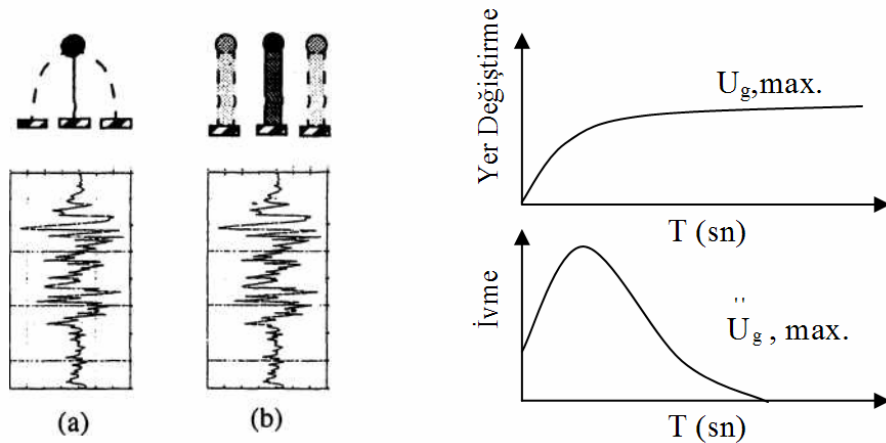
Şekil 2.3: Maksimum görelî deplasman grafikleri ( $S_d$ ) ([8]'den alınmıştır.)



Şekil 2.4: Sönüm oranları  $\xi$  %0- %20 arası değişen pseudo ivme - spektrum grafikleri ( $S_a$ ) ([8]'den alınmıştır.)

Spektral ivme ve deplasman, sönüm oranının ( $\xi$ ) artması ile birlikte azalım gösterir. Rölatif deplasman ( $S_d$ ), etkin periyot değeri arttıkça yükselirken, maksimum ivme değeri ( $S_a$ ) azalım gösterir. Tipik bir orta yükseklikteki yapının baskın periyodunun 0,1 ile 0,7 arasında değiştiğini farz ederek yapının bu periyot aralığında rezonans olayına maruz kalacağı açık bir şekilde spektral gösterimlerden anlaşılabilir. Bu tür durumlardan kaçınmak için yapının periyodu arttırılmalı (sünek davranış) veya dayanımı (rijitliği) arttırılarak periyotta azaltıma gidilmelidir. Dayanımdaki artış rölatif deplasmanları azaltmasına karşın, yapının sünekliğinin arttırılması ivme değerlerinin azalım göstermelerine neden olmaktadır. Sünek davranışı sağlamak için yapı elemanlarının, yapının ağırlığının %10 – %15'i gibi bir yatay yük ve düşey yükleri emniyetle taşıyabildiği hesaplarla gösterilir. Yapı elemanlarına şiddetli depremlerdeki enerjiyi tüketebilecek donatı, en kesit ve düşey yük kısıtlamaları uygulanır.

Bir yapının serbest titreşim doğal periyodunun etkisi Şekil 2.5'de gösterilen zemine sonsuz esnek bir yay ile bağlantılı bir kütle için göz önünde bulundurularak gösterilebilir. Sisteme dışardan deprem hareketine benzer bir titreşim verildiğinde kütle yer hareketini takip edemeyeceği için orijinal pozisyonundan ayrılmayacaktır. Bu tepki yayın içinde sıfır ivme ve sıfır kuvvete yol açar. Ancak, yere göre göreceli deplasman yer hareketine eşit olacaktır  $U_g(t)$ .



**Şekil 2.5:** Tek serbestlik dereceli yay sistemine bağlı tekil kütle için yer hareketine verdiği tepki grafikleri ([8]'den alınmıştır.)

Kütleyi zemine oldukça rijit bir yay ile bağladığımız düşünülürse, Şekil 2.5 (b), kütle yer hareketini takip edecektir. Bu tepki sistemde göreceli ötelenmelerin sıfır olmasını sağlar. Ancak, ivme kabul edilebilir limitin ötesinde yer ivmesine eşit olacaktır  $a_g(t)$ .

Tekil kütle örneğindeki gibi çok esnek bir yapı çok fazla kat ötelemelerine maruz kalacak, ancak küçük ivmelerle birlikte küçük yanal kuvvetlere karşılık gelecektir. Aksine, rijit bir yapı çok küçük ölçeklerde kat ötelemelerine maruz kalmasına karşın, kat kütlelerine etkiyen ivme değerleri muhtemelen yer hareketinin ivmesine eşit olacak bunu sonucunda büyük sismik kuvvetlere maruz kalacaktır. Bu nedenle, klasik depreme dayanıklı yapı tasarım konseptinde yapısal hasardan kaçınmak için hem göreceli kat ötelemelerini hem de ivmelenmeleri eş zaman sürecinde azaltmak mümkün olmamaktadır.

### **2.3. Depreme Karşı Klasik Yapı Tasarımı Yönteminin Sonuçları**

Depreme dayanıklı yapı tasarım felsefesi, insan yaşamına ve böylelikle yapısal hasardan kaçınma yönünde önem kazanır. Bir depremin ortaya çıkmasının sonuçları, bu tür yapılarda büyük oranda göreceli kat ötelemelerinin ve belirli kat kesme gerilmelerinden dolayı yapısal ve yapısal olmayan hasarların ortaya çıkmasından oluşmaktadır. Bunlar kat yüksekliği boyunca bölünen iki kat arasındaki rölatif deplasmanlardır. Kabul edilebilir göreceli kat ötelemeleri tipik olarak 1/500'den az olmalıdır ki taşıyıcı sisteme dâhil olmayan elemanların hasar görmesinden kaçınılabilsin.

Diğer bir sonuç, kat yüksekliği ile genellikle artan kat ivmelerinden dolayı binanın içeriğinde meydana gelen hasarlardır. Oldukça hassas binaların ve genellikle değerli ekipmanları barındıran özel amaçlı yapıların olması durumunda çok daha yıkıcı etkiler meydana gelebilmektedir. En önemli etki, ağır hasar gören yapıların depremden sonra onarılması için faaliyetinin kesintiye uğratılmasıdır. Özellikle hastaneler, itfaiye ve afet yönetim merkezleri gibi afet durumlarının ortaya çıkması halinde fonksiyonelliğine 24 saat devam etmek zorunda olan bu tür binalar, depremin ardından özelliklerini yitirmeden faaliyetlerine devam etmek zorundadırlar.

#### 2.4. Farklı Bir Tasarım Yaklaşımına İhtiyaç

Yukarıda bahsedilen etkileri en aza indirmek veya tamamen ortadan kaldırmak için ve halen klasik yapı tasarım yaklaşımını kullanmak için;

- inşa maliyetleri önemli derecede arttırılmalı
- yapı, planda ve düşey doğrultuda düzensiz olmamalı
- depreme dayanıklı yapı tasarımı yönetmeliklerine uygun olmayan yapıım metotları ortadan kaldırılmalıdır.

Eğer yapı elemanları uygun ölçülerde seçilirse ve yapı şiddetli bir sismik olayda elastik olarak davranabilirse, meydana gelen gerilmeler malzemenin akma gerilmelerinden çok daha yüksek kademelere ulaşabilecektir. Yapı mühendislerinin depreme karşı klasik yapı tasarımını benimsemeleri ve beklenen sismik kuvvetlerden daha düşük kuvvetleri göz önüne almalarının gerçek nedeni budur. Bu düşünceye, deprem anında yapıda yüksek seviyelerde süneklik sağlanması ve meydana gelebilecek olan hasarı yapıda kabullenip, depremin yıkıcı etkilerini yapının performansı ile azaltılması yolu ile varılabilir.

Son yıllardaki yapı teknolojilerindeki ileri düzey gelişmeler, depreme karşı yapı tasarımında odak noktasının insan yaşamını korumanın yanın sıra, yapısal hasarı önlemeye yönelik tasarımların geliştirilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Öncelikle, depreme karşı klasik yapı tasarım yaklaşımı ile inşa edilen yapılarda deprem sonrası yüksek onarım ve güçlendirme maliyetleri oldukça yüksektir. İkinci olarak, depremden sonra operasyonel faaliyetlerinin devam etmesi gereken tesislere sahip binaların fonksiyonelliklerinin kaybedilmemesi ve üstelik çok hassas ve pahalı donanımların korunma gereksinimi oldukça önemli konuları teşkil etmektedirler. Son olarak, şiddetli bir deprem esnasında insanların depremden kaynaklanan rahatsızlıkları ve bunun sonucunda meydana gelen psikolojik etkileri (kat ivmeleri ile doğru orantılı) dikkat verilmesi gerek bir konudur. Bu nedenle, farklı bir tasarım yaklaşımı sismik olayların yukarıda anlatılan olumsuz etkilerini göz önünde tutmak için gereklidir.

### **3. DEPREME KARŞI YAPI TASARIMINDA ALTERNATİF BİR YAKLAŞIM : SİSMİK İZOLASYON**

#### **3.1. Genel Bilgiler ve Tarihçe**

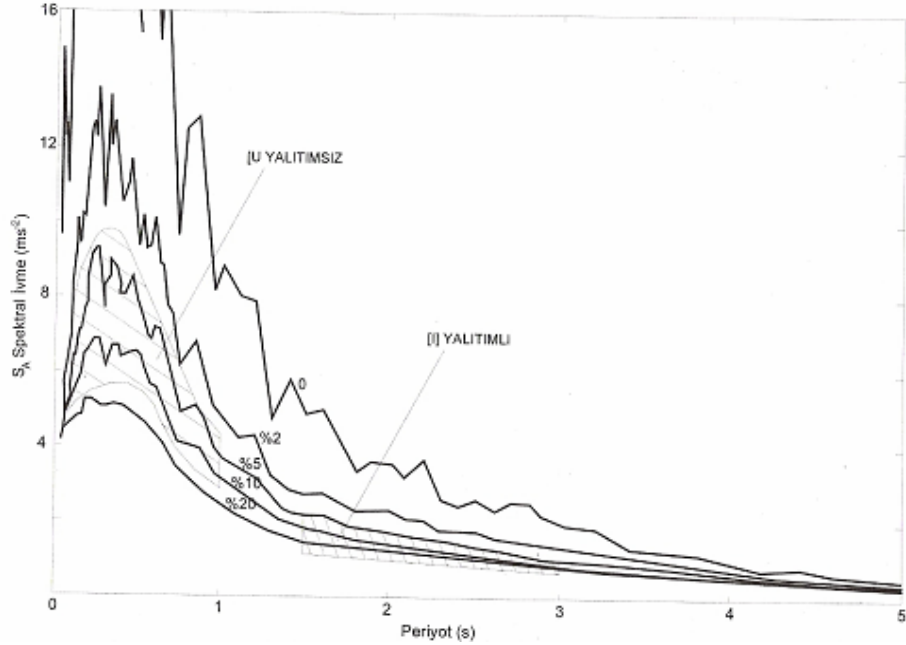
Sismik izolasyon zemin ivmelerinin yıkıcı etkilerinden yapı içerisindeki ekipmanların veya yapının taşıyıcı sistemini korunmasını hedefleyen, üst yapıyı zeminden izole etmeyi amaç edinen eski ancak yeni güncelliğini kazanan bir tasarım yaklaşımıdır. Sismik izolasyonun amaçlarından biri yapının etkin frekansını, yer hareketinin baskın frekansından ötede tutmaktır. Bu yenilikçi tasarım yaklaşımı, deprem hareketlerinin yatay bileşenlerinin yapıya geçmesini önlemek için ana felsefede yapının oturduğu zeminden üst yapıyı temelinden izole etmektir. En çok görülen uygulama alanları yapının temel seviyesinde teşkil edilmesidir ve bu uygulama “ temel yalıtımı” kavramının doğmasına neden olmuştur.

Üç boyutlu izolasyon sistemleri hem düşey hem de yatay sismik etkileri karşılamak bakımından geliştirilmiş olmasına rağmen, bu sistemlerin kullanımları oldukça karışıktır ve bu nedenle pratik yönden uygulanması çok zordur. Dahası, çoğu yapıda düşey deprem etkileri yatay etkilere nazaran daha az önem taşır. Bunun ana nedeni yapıların büyük çoğunluğu düşey yükleri taşıması için tasarlanırlar ve inşa edilirler. Bu nedenle bu tür ek yükler daha az önem taşır. Zemin hareketinin düşey bileşeni, yatay bileşene oranla daha zayıf kalmaktadır.

Yapıların ve deprem kuvvetli yer hareketlerinin özellikleri göz önüne alınarak; yapıların rijitliklerini azaltarak periyotlarını uzatıp, sönümlerini arttırarak yapılara daha küçük deprem yüklerinin gelmesini sağlayarak, yapıların orta şiddetli depremlerdeki hasarının önlenmesi ve çok şiddetli depremlerdeki hasarının da çok küçük boyutlara indirilmesi “taban yalıtımının” temel ilkesidir. Yapılara gelen deprem yüklerini azaltmak için yapı tabanlarına yatay yönde rijitliği çok az olan elastomer mesnetler konulması ile yapının periyodu ve sönümü artmaktadır.

Elastik mesnet kullanılması ile depremde gelecek sismik kuvvetleri azaltarak yapı hasarını önleme ve yapının her koşulda kullanımı sağlanmalıdır. Şekil 3.1'den

görüreceği gibi yapı temellerine yatay yüklere göre rijitliği düşük elastik izolatörler konularak yapının periyodu uzatılırsa yapılara gelen yatay yüklerde (elastik) en az 5 kat kadar bir azalma meydana gelmektedir [3].



**Şekil 3.1:** Çeşitli sönüm oranları için spektral ivme grafiği ([3]'ten alınmıştır.)

Buna karşılık Şekil 3.1'den görüleceği üzere yapının periyodunun artması ile deprem altında ötelenmede 2 kat kadar bir artış olmaktadır. Ancak yapının periyotla birlikte sönümünde arttırılırsa ötelemedeki artış ya hiç olmamakta ya da çok düşük bir düzeyde olmaktadır. Elastik mesnetlerin kullanımı ile yaklaşık %10 civarında sönüm sağlanmaktadır.

Temel izolasyonu için ilk bulgular 1800'lü yıllarda ve 1900'lü yıllarda örnekleri bulunmasına rağmen, sismik izolasyonu kavramının yapısal mühendisliğe girmesi 1970'li yıllarda olmuştur. Sismik izolasyon 1970'lerde önce köprülerde, sonrasında yapılarda kullanılmıştır. Köprüler, üst tabliyesi ile taşıyıcı ayaklar arasındaki izolasyonun sağlanması bakımından elastomer mesnetlerin kullanım alanları hususunda izolasyon konusunda yapılara oranla daha fazla tercih edilmektedir.

Enerji dağıtım mekanizmasını, esnek elastomerler içerisine eklenerek oluşturulan ilk köprü uygulamaları hâlihazırda mevcuttur. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (LRB) 1970'li yıllarda icat edilmiştir ve bu mesnetlerde tek bir ünite içerisine yatay flexibilitate ve sönümün birlikte kullanılmasına izin verilmiştir. Yaklaşık aynı



zamanlarda izolasyon için kauçuk mesnetleri kullanan ilk uygulamalar projelendirilmiştir. Ancak bu tür mesnetler az miktardaki içsel sönümün dezavantajlarına sahiplerdi ve rüzgâr gibi düşük ölçekli yatay yüklere karşı koyabilecek kadar yeterince rijit değillerdi.

1980'den önceki kauçuk teknolojisindeki gelişmeler, yüksek sönümlü kauçuklardan meydana getirilen HDRB olarak isimlendirilen yeni kauçuk bileşimlerinin ortaya çıkmasına vesile olmuştur. Bu kauçuk bileşimi mesnetlere düşük birim uzamalarda yüksek rijitlik, büyük birim uzamalarda düşük rijitlik sağlamaktadır. Yükleme kaldırıldığında bu tür mesnetler önemli ölçüde sönüm miktarına sahip bir histerik döngü oluşturmaktadır. Amerika'daki ilk köprü ve bina uygulamalarında (1980'li yıllar öncesi) ya LRB yada HDRB mesnetleri kullanılmaktaydı.

Tipik olarak merdivenler gibi hafif parçaları desteklemek için LRB ve HDRB' ye paralel olarak bazı önemli projelerde kayıcı mesnetler kullanılmaktadır. Kayıcı tip mesnetler yüksek sönüm kabiliyetlerine sahip olmalarına karşın, geri döndürücü bir kuvvete sahip olmadıkları için sismik izolasyon sistemi olarak tek başlarına kullanılmamaktadır. Kayıcı mesnetlere mesnetlenmiş bir yapı şiddetli bir depremden sonra muhtemelen kendi ekseninden kalıcı olarak kayma gösterecek ve artçı şoklarla birlikte ekseninden kaymaya devam edecektir.

Kayıcı mesnetlerin düz olan kayma yüzeyleri küresel bir yüzeye dönüştürülerek geliştirilen sürtünmeli sarkaç (FPS) mesnetleri, kayıcı mesnetlerin neden olduğu büyük deplasmanların üstesinden gelebilmektedir. Mesnet yatay olarak hareket ettiğinde, üst yapı düşey yönde yükselmektedir. Bu özellik sistemde geri döndürücü kuvvetin oluşmasına neden olmaktadır.

Birçok diğer türden izolasyon sistemleri geliştirilmesine rağmen (bilyalı yatak, yatay yük alan yaylar v.b.), şuan temel izolasyonu alanındaki ortak pazarda temel olarak LRB, HDRB, yatay kayıcı izolatörler ve FPS'ler daha çok rağbet görmektedir. İzolatörleri, geniş dağılım gösteren inşaat sektörü içerisinde pazara açmak konusunda, LRB izolatörleri patent dışı olduğundan dolayı, dünyanın büyük bölümünde üreticiler arasında rekabet mevcuttur. HDRB mesnetlerinin belirli bileşimleri patentli olmasına rağmen, üreticilerin belli bir bölümü aynı performans seviyesine sahip

benzer bileşimleri piyasaya sürmektedirler. FPS sistemleri patentli olmasına rağmen dünyanın birçok bölgesinde kullanımına dair lisansları mevcuttur.

### **3.2. Sismik İzolasyonun Avantajları ve Yaygın Uygulamaları**

Sismik izolasyon yapılmış yapının arttırılmış periyodu sistemin en önemli özelliğidir. Bu sayede zeminin hakim periyodundan yapının serbest titreşim periyodu uzaklaştırılarak olası bir rezonans olayından kaçınılabılır. Aynı zamanlarda yapının farklı seviyelerindeki kat ivmeleri azalmaktadır. Süneklik kapasitesi yüksek binalar çok küçük ivmelere ve çok büyük relatif deplasmanlara maruz kalmasına karşın, çok rijit bir yapı küçük görelî deplasmanlara sahiptir, ancak bu tür yapıların kat ivmeleri zemin ivmelerine eşit olur. Sismik izolasyon hem göreceli kat ötelenmelerini azaltma yönünden hem de kat ivmelerini eşzamanlı olarak azaltması bakımından yukarıda bahsedilen durumların olduğu yapılarda kullanımı oldukça avantajlıdır. Göreceli kat ötelemeleri, üst yapının tek bir kütle gibi rijit cisim hareketinden dolayı minimum seviyelere indirgenebilir. Üst yapı izolasyon seviyesine monte edilen izolatlara oranla nispeten çok daha rijittir. Yapının kat ötelemelerindeki azalış, yapısal ve yapısal olmayan hasarı büyük ölçüde azaltır. Üstelik, izolasyon seviyesine dahil edilen süneklikten dolayı etkili periyodun arttırılması kat ivmelerinide önemli ölçüde azaltmaktadır. Özellikle hassas ekipmanların bulunduğu yapılar için şiddetli bir deprem sonrası yapının işlevine devam etmesi önemli bir kazanımdır. Yalıtım sisteminin uygun tasarımı ile üst yapı ve yalıtım düzlemi arasında dış merkezlik meydana gelmemekte, böylelikle burulma etkileri azalmaktadır. Bu duruma üst yapının kütle merkezi ile izolasyon sisteminin rijitlik merkezinin üst üste düşmesi ile ulaşılabilir.

Sismik izolasyonun bir diğer avantajı enerji dağıtım mekanizması ile ilişkilidir. Depreme karşı klasik yapı tasarımında enerji dağıtım mekanizması yapı içerisinde dağıtılmış bölgelerdeki plastik deformasyonlar üzerine kurulmuştur. Aksine sismik izolasyon uygulamalarında, enerji dağıtım mekanizması izolasyon seviyesine yoğunlaştırılır ve bu sayede özellikle tersinir yükler altındaki bir çok elastik ötesi çevrimlere karşı koymak için çok daha kolay tasarlanabilir ve sönüm mekanizmasının uygun performansını sağlamak için kolayca gözlemlenebilir. Dikkat edilmesi gereken nokta, sistemin tasarlanan enerji dağıtım mekanizmasının kolayca değiştirilebilmesine imkan vermesidir. Sismik izolasyon yapılmış bir yapının

sönümleme mekanizması üst yapının sünekliğine bağlı olmadığı, öncelikli olarak izolasyon sisteminin enerji dağıtım mekanizmasına bağlı olmasından dolayı üst yapının süneklik gereksinimleri kısmen terk edilebilir [8].

Buna rağmen sismik izolasyon konsepti üzerinde kısıtlı deneyimleri düşünerek, metodun kendisi ile ilgili belirsizlikler ve zemin hareketlerinin oluşum sıklığı ve doğası (uzun periyotlu ve kuvvetli düşey içerikli depremler gibi) diğer beklenmeyen doğal olaylarda olduğu gibi yapıda arzu edilmeyen sonuçların doğmasına neden olduğundan üst yapının süneklik kapasitesinde asla bir azaltıma gidilmemelidir. Sismik izolasyon tasarımı izolasyon seviyesinde üst yapının yere göre göreceli deplasman yapabileceği, yapı çevresinde teşkil edilen bir boşluğun oluşturulması ile başlar ve izolatörlerin lokal yerleştirilme noktalarına montesi ile devam edilir. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler tek bir ünite içerisine sismik izolasyonun tüm özelliklerini sağladıkları için yapılardaki uygulama alanları çok daha yaygındır. Buna ek olarak, izolatörler üzerine yerleştirilen rijit diyafram modeline uygun bir yalıtım düzelemi ile yapıya gelen sismik yükler izolatörlere uniform dağıtılmaktadır.

Uygun olarak boyutlandırılmış sismik izolatörler yatay kuvvetlerin aktarılması ve dağıtılması yollarının kontrol altına alınması için kullanılabilir. Sismik izolasyonun bu faydası klasik yöntemlerle depreme karşı dayanımın artırılması yaklaşımı ile karşılaştırıldığında büyük ölçüde maliyetlerin azalımı olarak karşımıza çıktığı görülmektedir.

Son zamanlardaki kuvvetli depremler ve trafik dağılımının sonuçları, bu tür kuvvetli depremlerden sonra köprülerin işlevinin devam etmesi bakımından varolan köprülerin sismik kuvvetlendirilmesinin gerekliliğini göstermektedir. Birçok köprü yetersiz sismik performans kapasitelerinin gereksinimleri ile inşa edilmektedir. Bu köprüler sismik olarak güçlendirilmelidir ve sismik izolasyon, köprülerin günlük trafik akış dağılımlarını bozmaksızın kolayca uygulanması bakımından nispeten ucuz ve bunu yapmanın en etkili metodudur. Üstelik sismik izolasyon, deprem yükleri göz önüne alınmadan tasarlanan yapıların ve özellikle orijinal mimari özelliklerinin korunması zorunda olan tarihi yapıların güçlendirilmesinde de kullanılabilir. Bu durumda, temelden ankastre bir yapı için deprem yüklerine karşı yapının dayanımını arttırmak yerine, hasara neden olan yatay kuvvetlerin önemli ölçüde azaltılmasında sismik izolasyon kullanılması etkin yol olarak karşımıza çıkar. Sismik

kuvvetlere karşı koyabilmek için yapının gerekli olan performans ve süneklik kapasitesi yeterli seviyelere kadar azaltılabilir.

Tipik olarak yapının bodrum katında yoğunlaştırılan çoğu imalat işleri genellikle izolasyon seviyesinde gerçekleştirildiği için klasik güçlendirme teknikleri ile karşılaştırıldığında sismik izolasyon yapıya fonksiyonellik bakımında en az rahatsızlık veren tekniktir. Üst yapının günlük iş saatlerinde işlevinin kaybı önemli ölçüde minimize edilir. Bu kayba neden olmamak için üst yapıda sınırlandırılmış rijitleştirme veya dayanım artırma yollarına başvurulabilir. Aksine, yapıların klasik yöntemlerle güçlendirilmesi tüm kat seviyelerinde limitleri zorlayan değişiklikleri yapmayı ve kaçınılmaz olan yapının fonksiyonelliğinin kaybına neden olan sorunları içinde barındırır. Tasarımda baskın olan yapının mimari özelliklerinin korunması gerekli olan tarihi yapılar için sismik izolasyon estetik olarak en az etkiye sahiptir. Sismik izolasyon tekniği ankastre mesnetlenmiş bir yapının etkiyen büyük deprem kuvvetlerine karşı koyabilmesi için üst yapıda önemli değişimler yapılmaksızın katlara etkiyen deprem kuvvetlerinin büyüklüklerinin azaltılması yönünden her yapı için büyük önem taşır. Aksine, klasik güçlendirme teknikleri yapının yatay deprem kuvvetlerini cezbeden üst yapının dayanımını arttırma yönünde değişikliğe uğratılmasının gerekliliğini savunur. Bunlar içerisinde özellikle tarihi yapılar, sismik izolasyonun tekniğinin bu tür yapılarda kullanımını sınırlamaktadır.

Sonuç olarak, ortaya çıkan sismik yükler yapıların yüksek süneklik kapasitelerine ihtiyaç olmaksızın önemli ölçüde azaltıldığı için sismik taban yalıtım tekniği genellikle depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yapılar için kullanılabilir [8].

### **3.2.1. Binaların güçlendirilmesindeki uygulamalar**

Var olan yapıların güçlendirilmesi onların deprem güvenliğini arttırması için inşasına yeni başlanmış olanlarla karşılaştırıldığında her zaman var olan sınırlamalardan dolayı ek bir dikkat gerektirir. Bazı yapı türleri esasında sismik izolasyon için diğerlerinden daha elverişlidir. Örneğin, köprülerin üst tabliyeleri genellikle elik mesnetler üzerine oturtulur. Bu mesnetlerin elastomer olanları ile değiştirilmesi oldukça basit bir işlemdir ve düşük maliyetli bir operasyon deprem yüklerinde bir azaltıma neden olacaktır. Temellerin ve kenar ayaklardaki zayıf noktalardan bu

sismik yükleri uzaklaştırılması köprü ayaklarının ve tabliyesinin ayakta kalmasını sağlamaktadır.

Binaların güçlendirilmesi köprülerden oldukça daha zordur. Fakat, sismik izolasyon, binanın değerini koruyan özellikleri azaltan yeni yapısal taşıyıcı ek elemanlara ihtiyaç duyulmaksızın var olan yapıların deprem güvenliğini arttırması için etkili bir çözüm olabilir. Sismik izolasyon deprem kuvvetlerini azaltmasına rağmen, onları tamamen ortadan kaldırmaz. Sonuç olarak varolan yapıların dayanımı ve sünekliği en azından izolasyondan kaynaklanan azaltılmış deprem yüklerine direnç gösterebilecek yeterlilikte olmalıdır. Eğer yapının dayanımı yapı ağırlığının % 5' inden çok daha az olursa, ozaman yapı ek bir dayanıma gereksinim duyacaktır. Bu durumda ek dayanım maliyetleri oldukça fazla artmaktadır [12].

Daha önce bahsedilen yeni binaların koşullarına ek olarak, var olan yapıların güçlendirilmesinde sismik izolasyon tekniğinin kullanımını sağlamak için aşağıda sıralanan hususlar dikkatlice düşünülmelidir;

- Bitişik nizam binalarda deprem esnasında yatay yönde üst yapının 10 ile 30 cm'lik bir harekete imkan sağlanabilirliği
- Binalar ve onların varolan temelleri, azaltılmış deprem kuvvetlerine direnç gösterecek yeterli sünekliğe sahip olup olmadıklarını
- İzolasyon düzleminin oluşturulmasında temel seviyesi, bodrum kat seviyesi, zemin seviyesi ve izolatörlerin yerleştirileceği kolonların üst, orta ve alt seviyelerinde sismik yalıtımın uygulanabilirliği

İzolasyon seviyesine gelindiğinde sismik yalıtım için avantajlar ve dezavantajlar şöyle sıralanabilir;

1. Kazıklı temellere sahip bir yapı temel seviyesinde sürekli temellere oranla çok daha kolay güçlendirilebilirler.
2. Bodrum katlarının orta seviyesi, alt seviyesi ve üst seviyesinde ve kolonların boyları boyunca oluşturulacak izolasyon alanları için detaylı bir kolon kapasitelerinin değerlendirme çalışmaları yürütülmelidir. Eğer kolon

kapasitesi, azaltılmış izolasyon kuvvetlerine karşı koymak için yeterli rijitlikte değilse üç potansiyel çözüm mevcuttur;

- Kolon dayanımı artırılabilir ve konsol olarak çalıştırılabilir.
- Rijit kirişlere sahip yeni bir çerçeve sistemi kolon kuvvetlerini azaltmak için izolasyon seviyesinde gerçekleştirilebilir.
- Son olarak kolonların orta seviyelerinde oluşturulan izolasyon seviyesi ile kolon momentleri 2 kat oranında azaltılabilir.

Özet olarak klasik metotlar ile tasarlanan depreme dayanıklı yapılarda, binaların tüm seviyelerinde ek yapısal elemanlara ihtiyaç duyulurken, var olan binalarda sismik güçlendirme sadece izolasyon seviyesinde gerçekleştirilen yapısal değişiklikler ile sınırlı kalmaktadır. Bu ikilem, insanların 24 saat kullandığı yapılardan biri olan hastaneler için oldukça önem kazanmaktadır (Hastanelerde günün her saati operasyonel faaliyetler gerçekleştirildiği için temel seviyesinde yapılacak sismik güçlendirme çalışmaları, hastanelerin gün içerisinde devam eden imkanların kullanımında bir sıkıntı yaratmaz.). Şekil 3.2’de Los Angeles belediye binasının temel güçlendirme çalışmaları görülmektedir.



**Şekil 3.2:** Los Angeles belediye binasının temel güçlendirmesi ([28]’den alınmıştır.)

### 3.3. Sismik İzole Edilen ve Ankastre Mesnetlenen Modellerin Karşılaştırılması

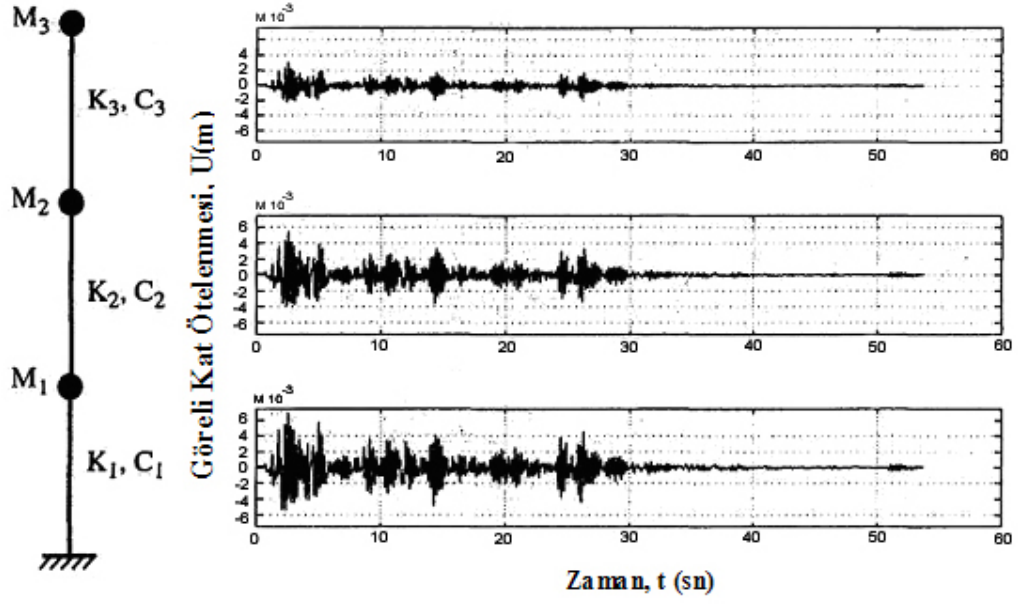
Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de sırası ile gösterilen hem ankastre mesnetli, hem de sismik izolasyon sınır koşulları altındaki üç katlı bir yapıda sismik izolasyonun etkinliğini göstermesi bakımından bir çok çalışma yapılmıştır. Her iki modelin yapısal özellikleri ve tepkileri Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Tabloda ankastre mesnetli ve izole edilen modellerin her bir kat seviyesindeki maksimum kat ivmelerini, ötelemelerini ve kat kesme kuvvetlerini kapsamaktadır. Analiz maksimum zemin ivmesi 0,50 g olarak ölçülen EL-CENTRO depremine göre yürütülmüştür. Sismik izolasyonlu modelin enerji dağıtım mekanizması göz ardı edilmesine rağmen maksimum kat ivmeleri, göreceli kat ötelemeleri ve kat kesme kuvvetlerinin önemli ölçüde azaldığını yapılan analizler sonucunda gözlemlenmiştir. Her iki model için %5 sönüm oranı ( $\xi$ ) kullanılmıştır. Gerçekçi bir düşünce ile sismik izolasyon yapılmış modellemelerde bu sönüm oranı çok daha büyük değerler için kullanılmaktadır. Histeretik veya viskoz sönümlenmelerden her biri sönüm olarak hesaba katılırsa sismik izolasyon yapılan yapılarda çok daha ileri düzeyde yukarıda sayılan etkiler azaltılabilir.

**Tablo 3.1:** Yapısal özellikler ve her iki sisteme ait maksimum tepkiler

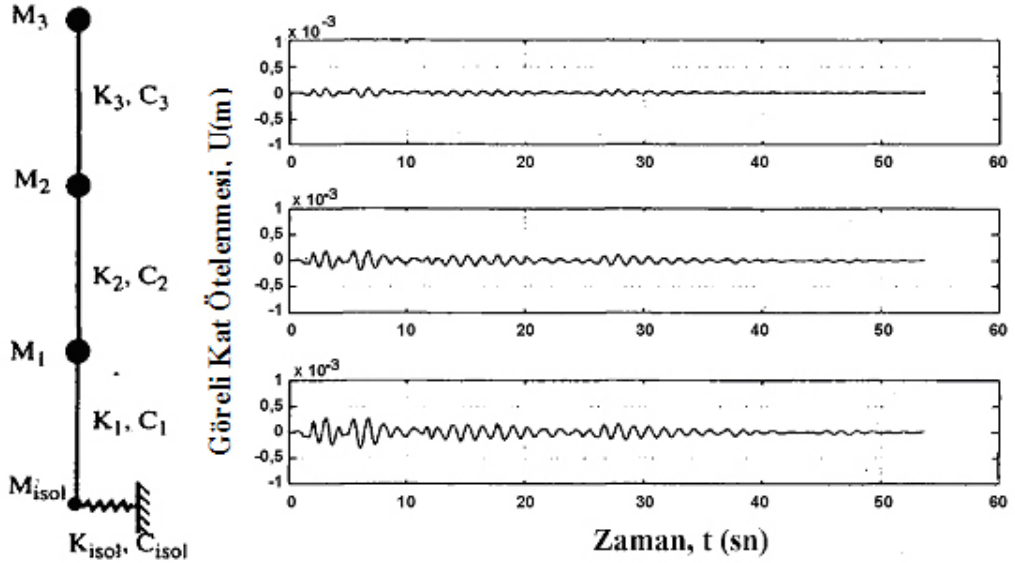
Kat Seviyesi	Kat Kütleleri	Kat Rijitlik	Maksimum kat deplasmanları [mm]		Maksimum kat ivmeleri [m/sn <sup>2</sup> ]		Maksimum yanal kuvvetler [MN]	
			Ankastre	İzole edilmiş	Ankastre	İzole edilmiş	Ankastre	İzole edilmiş
İzolasyon	[Ton]	[MN/m]	—	136,1	—	6,2	—	4,5
1	335	30	5,7	2,4	6,2	6,3	7,1	3,3
2	305	1250	5,1	1,7	9,4	6,4	5,7	2,1
3	285	1125	2,9	0,8	12,1	6,4	3,3	1,0

Yapılan çözümlenmelerde ankastre mesnetli modelin etkin frekansı ve periyodu 29,22 rad/sn ve 0,21 sn olarak sırası ile hesaplanmıştır. Aynı hesaplamalar sismik izolasyon uygulanmış modelde yapılmış ve bu değerler 4,97 rad/sn ve 1,26 sn olarak elde edilmiştir. Ankastre mesnetli modelin etkin kütlesi % 99,98 olarak bulunmuştur.

Şekil 3.3’de zemine ankastre mesnetlenmiş modelin göreceli deplasman sonuçlarını göstermektedir. Aynı sistemin temelden izole edilen modelinin kat ötelemeleri şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Zemine ankastre mesnetli 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına ait görelî deplasmanlar ( $\Delta U$  (m)) ([8]'den alınmıştır.)

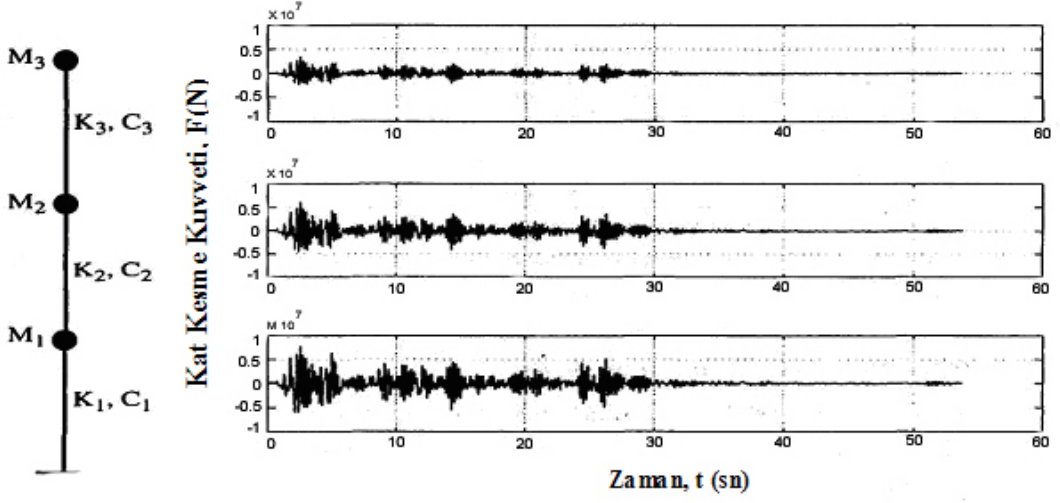


Şekil 3.4: Zeminden izole edilmiş 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına ait görelî deplasmanlar ( $\Delta U$  (m)) ([8]'den alınmıştır.)

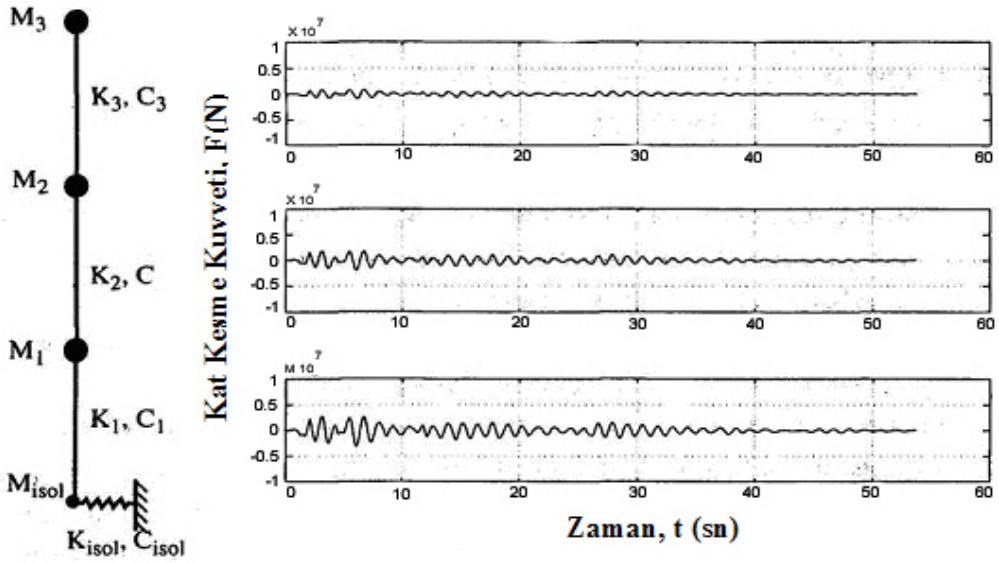
Şekil 3.5 ve 3.6'da sınır koşulları ankastre olan ve temelden izole edilen sistemlerin kat kesme kuvvet diyagramları görülmektedir. Temele elastikiyet sağlayan izolatörlerin kullanımının, kat kesme kuvvetlerinin azaltımını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Sismik izole edilen yapı içerisinde en fazla deformasyon izolasyon seviyesinde meydana gelir ve bunun nedeninin üst yapının tamamen rijit



cisim gibi davrandığı ve genellikle birinci etkin titreşim modunun katkısından dolayı kaynaklandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.5: Zemine ankastr mesnetli 3 serbestlik dereceli sistemin katlarına etkiyen yanal kuvvetler (F(N)) ([8]'den alınmıştır.)



Şekil 3.6: Zeminden izole edilmiş 3 serbestlik dereceli bir sistemin katlarına etkiyen yanal kuvvetler (F(N)) ([8]'den alınmıştır.)

Etkin izolasyon modu (1. titreşim modu) en çok deprem enerjisinin yapıya iletildiği ve yapısal davranışa en fazla hakim olan mod olarak tanımlanabilir. Birinci titreşim moduna ortogonal olan daha yüksek modların yapıdaki deformasyona neden olduğu yapısal analizler sonucu ispat edilmiştir. Bu nedenle birinci titreşim modu (izolasyon

modu), üst yapının deformasyonlarının önemli ölçüde artmasına neden olan yüksek modların üst yapıda meydana getirdikleri yüksek frekanslı titreşim enerjisinin yapıya aktarılmasına izin vermemektedir.

Her iki modelin yapısal özellikleri ve tepkisel cevaplarında, depreme karşı dayanıklı klasik yapı sistemi kullanıldığında sismik kuvvetler, görelî kat ötelemeleri ve ivmelenmeleri sismik izolasyon kullanıldığında ortaya çıkan etkilerden oldukça büyük değerler aldığı yapılan çalışmalar ile ispatlanmıştır.

### **3.4. Uygulamadaki Sınırlamalar**

Sismik izolasyonun pratikteki en temel kısıtlaması yapının tüm ömrü boyunca sağlanması zorunlu olan izolasyon seviyesinde üst yapı ile yapı temeli arasındaki büyük göreceli deplasmanlardır. İzolasyon seviyesindeki büyük göreceli deplasman izolasyon alanının kısıtlanmasına sebebiyet vermektedir. Ancak bu deplasman temelde kullanılan izolatörlerle birlikte bir enerji dağıtım mekanizması kullanılarak azaltılabilmektedir. Bu tür birçok mekanizmalar arasında en yaygın kullanılanlar kurşun veya çeliğin plastik deformasyonu veya bazı tip kauçuk malzemelerin içsel sönüm özellikleri üzerine modellenenlerdir.

Diğer bir kısıtlama ise izolatörlerin artan taban momentlerinden dolayı devrilme olasılığının bulunmasıdır. Şiddetli depremler esnasında yatay yönlü sismik kuvvetler ve neden olan taban momentleri, yapının zati ağırlığından çok daha büyük normal kuvvetler doğurur. Bu durumda, çekme gerilmelerini taşıyacak şekilde tasarlanmayan elastomer mesnetlerde çekme gerilmeleri meydana gelir ve mesnetlerin performansı bu gerilmelerden dolayı zayıflama gösterir. Taşıyıcı sistemin birleşim detayları ve yapının plandaki uygun geometriksel dağılımı elastomerlerin taşıyamayacağı çekme gerilmelerini meydana getiren devrilme momentlerinden kaçınmak için gereklidir [13]. İzolatörlerin çekme gerilmesi alma olasılıkları, devrilme momentlerinden dolayı yapı yüksekliği ile ve özellikle yapının biçim oranı (yükseklik/genişlik) ile artar. Bu olumsuz sonuç, sismik izolatörleri yüksek yapılardaki kullanımının uygun olmadığı en önemli kanıttır. Üstelik süneklik düzeyi yüksek bir yapının sismik temel izolasyonu gerekli olmayabilir. Bunun en önemli nedeni, bu tür yapıların halihazırdaki etkin periyotları genellikle rezonans frekansı sınırları dışında kalmaktadır. Yukarıdaki açıklamadan anlaşılacağı

üzere; sismik izolasyonun başlıca özelliği olan yapı periyodunu uzatarak katlara etkiyen ivmelerin azaltımı ve zeminin baskın frekansı ile üst üste düşen yapı etkin titreşim frekansının neden olduğu rezonanstan kaçınmak için bu tür sünek yapılarda sismik izolasyon önemli bir etki alanına sahip değildir. Ayrıca, yüksek yapılar deprem yüklerinden çok rüzgar yüklerine daha hassas olduklarından ve bu tür yapıların tasarımları büyük oranla yatay rüzgar yüklerine göre yapıldıklarından dolayı, sismik izolasyon bu yükleri kontrol edebilmek için uygun bir yöntem olarak görülmez. Bu nedendir ki, sismik yükler yüksek yapıların tasarımı için etkin bir yöntem olarak kullanılmaz. Bazı mekanizmalar, özellikle yüksek yapılar için, izolasyon konseptini yapıya uygulamaksızın deprem enerjisinin dağıtımını sağlayacak şekilde ve yapının özelliklerine uygun düşecek yöntemler ile geliştirilmektedir. Bu tür aktif kontrol sistemleri (titreşim önleyici kütle sönümleyicileri veya kapalı çevrim actuators) rüzgâr etkilerini yüksek yapılardaki olumsuz etkilerinin azaltımında kullanılabilir.

Sismik izolasyon deprem yüklerinin karşılanmasında oldukça uygun bir tasarım metodu olmasına rağmen, bu teknik tüm yapılar ve bölgeler için kullanılamaz. Bu nedenle, bu tasarım yaklaşımının güvenilirliğini kanıtlamak için tasarım aşamasında önceden bir fizibilite çalışması yürütülmesi gerekir. Bu çalışma bir kaç adet faktör üzerine geliştirilebilir.

#### **3.4.1. Üst yapı özellikleri**

Önceden bahsedildiği üzere sismik temel izolasyon, etkin frekansı depremin baskın frekans sınırları içerisinde düşen orta yükseklikteki (10–12 kat) yapılar için genellikle uygundur. Üst yapı karakteristikleri, (örneğin yüksekliği, genişliği, biçim oranı ve rijitliği) sismik izolasyonun uygulanabilirliği ve verimliliği konuları ile ilişkilidir. Dünya çapındaki birçok yapı, kuvvetli depremlerin olma olasılığı yüksek sismik aktivitesi bulunan bölgelere inşa edildiklerinde sismik izolasyon için potansiyel bir aday niteliği kazanmakta ve yukarıda sayılan karakteristiklere sahip yapılar grubunu teşkil etmektedir [8].

Yeni bir projenin uygunluğunu belirlemedeki ilk düşünülmesi gereken binanın kendisidir. Sismik izolasyon deprem hareketlerine tepki veren yapıların titreşim periyotlarını uzatarak deprem kuvvetlerinde bir azaltımı gerçekleştirir. Temel izolasyonun kullanımının en çok faydalı olduğu yapı türleri etkin titreşim periyodu 1

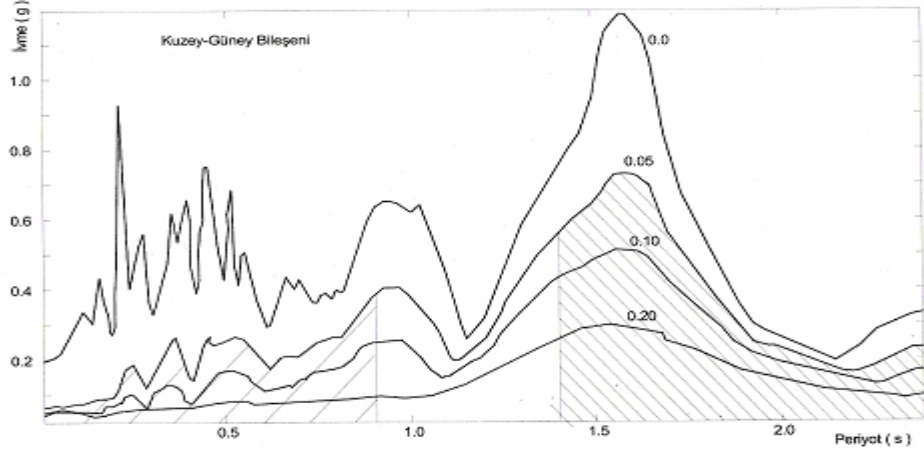
veya daha az olan yapılardır. Yapının doğal periyodu yüksekliğinin artması ile genelde artmaktadır. Daha uzun binalar temel izolasyonu olmaksızın düşük deprem kuvvetlerini sönmlemeye yetecek kadar uzun doğal titreşim periyotlarında bir limite ulaşır. Bu nedenle, sismik izolasyon orta ve düşük yükseklikteki binalarda uygulanabilirliği daha uygundur ve yüksek olanlarda daha az etkilidir. Perde sistemi ile projelendirilmiş ve çapraz bağlantı elemanları içeren çerçevesiz yapılar eşit yükseklikte olan moment aktarımlı çerçevelere oranla daha rijittir. Bu nedenle, perdelerden oluşan çerçeveler için sismik izolasyon 12 ile 15 kata kadar çıkan kat adetlerinde etkili olabilir, buna karşın moment aktarımlı çerçeveler ile bu sayı genelde 8 ile 10 kat arasındadır. Bu rakamlar sadece genelleştirmelerdir ve istisnalar bulunmaktadır [13]. Çoğu izolasyon sistemleri çekme gerilmeleri altında iyi performans sergileyemezler ve monte süreçlerinde bu tür gerilmelerin mesnetlere aktarılmasını önleyecek şekilde tasarlanırlar. Butür yapılardaki izolasyon sistemleri servis yükleri altında, örneğin rüzgar yükleri veya düşük titreşimli yükler, arzu edilmeyen deplasmanlardan kaçınmak için sistemin mukavemetini yitirmeksizin bu tür yüklerin neden olduğu maksimum yatay yüklere direnç göstermesi gerekmektedir. Eğer servis yükleri yapı ağırlığının % 10'unu aşarsa yapının izole edilmesi gerekmektedir.

#### **3.4.2. Sismik tehlike ve arazi özellikleri**

Sismik etkilerden yapıyı izole etmeye karar vermek için binanın oturacağı bölgenin sismik aktivitesi göz önüne alınmalıdır. Yapı temelinin zemin özellikleri, örneğin arazinin etkin periyodu ( $T_s$ ) ve beklenen depremin baskın frekansları belli olan bir alan için bir fizibilite çalışması içerisinde düşünülmesi gereken en önemli unsurlardır. Genel olarak, temel zemini ne kadar sıkı olursa, sismik izolasyon o kadar etkili olur. Arazi özellikleri ve daha önceki deprem kayıtlarından alınan bilgilerden düşük baskın frekans çözümlmelerine sahip yumuşak zeminler üzerine sismik izolasyon uygulamalarından kesinlikle kaçınılması gerekliliği önemle vurgulanmalıdır. Zeminin baskın periyodu ( $T_s$ ), geoteknik özellikleri göz önüne alarak zeminin etkin titreşim periyodunu göstermektedir.

Yumuşak zeminlerin alt katmanları düşük frekanslı hareketleri büyütürken, yüksek frekanslı titreşimleri yok eder ve yapıya düşük frekanslı (büyük periyotlu) deprem dalgalarını yansıtır. Bu durumda, temel zemini sismik izolasyon uygulamalarında

ıslah edilmeli ve üst yapı mümkün olabildiğince rijit olmalıdır. Bunun örneği 1977 Vrança depreminde gözlenmiştir [3]. Ayrıca, arazide beklenen en önemli baskın deprem periyodu, yüksek frekans içeriğinin azalımından dolayı odak noktasından uzaklaştıkça artma eğilimi gösterir. Bu nedenle, sünek bir yapı bu düşük frekanslı deprem dalgalarına maruz kaldığında rezonans olayı rijit bir yapıya oranla daha fazla hassas durumdadır.



**Şekil 3.7:** Vrança depremi, 1977, kuzey-güney bileşeni deprem ivme spektrumu ([3]'ten alınmıştır.)

Son olarak, düşünülmesi gereken diğer bir konu tahmin edilen sismik etkinin büyük periyotlu içeriklerinin olasılığından dolayı aktif faylara yakın olma durumudur. Bu yakın fay etkileri, ilk olarak 1994 Northridge depremi ile temel izolasyon sistemlerini ciddi bir şekilde tehdit etmiştir. Aktif fay yakınlarında elde edilen sismik kayıtlarda yüksek periyotlu bileşenler tespit edilmiştir. Bu bileşenler temel ayırıcı sisteminde rezonans benzeri büyük yatay yer değiştirmeler meydana getirmektedir. Yönetmeliklerde de bu sebeple aktif fayların belli bir mesafe yakınında, yapılara sismik taban izolasyon sisteminin uygulanmaması gerektiği belirtilir.

Bunun üzerine taban izolasyon sistemini korumak için izolasyon seviyesinde pasif viskoz sönümleyiciler eklenmiştir. Bu sayede izolasyon hareketi sınırlandırılmış fakat üst yapıdaki katlar arası deplasmanlar ve ivmeler artmıştır. Bu ise taban izolasyon sistem felsefesine tamamen terstir. Yapılarda izolasyon seviyesinde eklenmesi gereken optimum sönüm miktarı ise yer hareketinin dinamik karakteristiklerine bağlı olduğundan önceden kesin olarak belirlenmesi zordur. Konu ile ilgili olarak 1998 yılında ABD ve Japon araştırmacılar 5 yıl süren ortak bir

çalışma yapmışlar ve izolasyon seviyesinde yerleştirilmek üzere yarı aktif sönümleyiciler geliştirmişlerdir. Bu tür yarı aktif sönümleyiciler sayesinde hem temel seviyesindeki izolatörler korunmakta hem de üst yapıdaki katlar arası deplasman ve ivmeler azaltılmaktadır.

### 3.4.3. Bitişik yapıların durumları

Sismik izolasyon sistemini kısıtlamaya yol açabilen tüm bitişik yapılar veya tesisler özellikle izin verilebilir maksimum deplasmanı tahmin etmek için hesaba katılması gereken önemli unsurlardır. Yaklaşık 10 ile 20 cm olan yapı çevresindeki bir boşluk üst yapı ile yapının temeli arasındaki büyük görelî deplasmanları karşılaması için yapının tüm ömrü boyunca temin edilebilir. Şekil 3.8’de Los Angeles belediye binası çevresinde, üst yapının hareketini kolaylaştırmak için bırakılan sismik boşluk görülmektedir. Yoğun olarak inşaa edilmiş bölgelerde, deprem esnasında yapının diğer yapılarla çarpışmasını engellemek amacıyla özel önlemler mutlaka alınmalıdır.



**Şekil 3.8:** Los Angeles belediye binası temel güçlendirmesi için oluşturulan istinat duvarı ve bırakılan sismik boşluk ([28]’den alınmıştır.)

Diğer dikkat edilmesi gereken husus, çevredeki yapıların sismik izolasyonun kullanımına izin vermeyecek şekilde inşa edildiği durumlardır. Sonuç olarak, bina çevresindeki zemin özellikleri kısıtlamalara neden olabilir ve sismik izolasyonun kullanımını mümkün kılacak özel tasarım detaylarına ihtiyaç duyulabilir. Örneğin, sismik izolasyon uygulanan bir yapı eğimli bir yüzeye inşa edilmişse bu yapı, izolasyon sistemine zararlı etkisi olabilecek zeminin sistem üzerindeki basınç ve

göçük etkilerini engelleyecek özel tasarım ve yapım detayları fizibilite aşamasında hesaba katılması gereken önemli hususlardır.

#### **3.4.4. Küçük ölçekli yatay yükler**

Rüzgâr yükleri ve diğler küçük yatay titreşim yüklerinin (raylı sistemlerin yakınında bulunan veya küçük ölçekli depremlere maruz yapılarda) yapıya etkileri mutlaka sınırlandırılmalıdır. Aksi taktirde sismik izolasyon uygun bir tasarım yöntemi olmayabilir. Sismik izolasyon uygulanan yapının performansının, bu tür küçük yatay yükler altında yeterli olması sağlanmalıdır. Köprülerde ise fren veya merkezkaç kuvvetlerinden dolayı oluşan ek yükler hesaba katılması gerekmektedir [8].

#### **4. SİSMİK İZOLASYONUN KULLANIMINI ETKİN KILAN FAKTÖRLER**

Sismik izolasyonun pratik uygulamaları ve gelişimini destekleyen birçok faktör mevcuttur. Öncelikle, günümüzdeki yapı tasarım tekniklerinin karşılayamadığı şiddetli depremlerin, yapıların performansı üzerinde artan gereksinimlerin karşılanması gerekliliğini gün yüzüne çıkarmıştır. Küçük ölçekli sarsıntılara duyarlı, pahalı ve önemli ekipmanlarla donatılmış yapılar bu sınıfa giren, önlem alınması gereken önemli binaları teşkil etmektedirler.

İkinci sırada yer alan husus, ileri düzey bilgisayar teknolojisi ve modern yapısal analiz metotları binanın statik ve dinamik etkilere karşı gösterdiği davranışlarını simüle etmek için güvenilir yazılımların gelişimlerini mümkün kılmaktadır. Sismoloji ve deprem mühendisliğinin ileri düzey gelişimi ile belirli bir düzeyde beklenen depremler için güvenilir tahminlerin yapılabilir olması diğer bir önemli faktördür. Günümüzde, zaman tanım alanındaki lineer ve lineer olmayan dinamik analizler bilgisayar üzerinden kolaylıkla uygulanabilmektedir. Üstelik deprem etkilerini simüle edebilen sarsma tablalarının geliştirilmesi sismik izolasyon sistemlerinin davranışını gözleme yönünde büyük katkılar sağlamaktadır. Rüzgar yükleri gibi diğer küçük yatay yüklerin beklenen şiddetleri, olma sıklıklarındaki güvenilir bilgiler sayesinde yapılan çalışmalar, sismik yalıtımın kullanımını mümkün kılmaktadır.

Son olarak yapısal malzemeler alanındaki geniş araştırma olanaklarının günümüzdeki artışı, gelişimi ve üretim süreci sismik izolasyon için kullanılan izolatör mesnetleri için modern malzemelerin güvenle kullanımını mümkün kılmaktadır. Kalıcı deplasmanları önlemek için enerji dağıtım ve geri döndürücü bir kuvvet oluşumunu sağlayan mekanizmaların gelişimi aynı zamanda sismik izolasyon yönteminin pratik uygulamalarındaki imkanlarına olanak sağlamaktadır.



## 5. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMİNİN EKONOMİK BOYUTU

Sismik izolasyon uygulamaları yapıya ek bir başlangıç maliyet getirmesine rağmen, izolasyon sisteminin daha iyi sismik performans sağlaması ve zararı azaltma özelliklerinden dolayı yapısal ömrü uzun olan yapılarda maliyetin ekonomik sınırlarda kalması bakımından her zaman tercih nedenidir. Özellikle yeni inşa edilen bir yapıya sismik yalıtım tatbik edebilmek için yapı maliyetinin %1 ile %5 arasında değişen ek bir başlangıç maliyete gereksinim duyulabilir.

Ancak, klasik yöntemler ile tasarlanan zemine ankastre yapıların ayakta kalmasını sağlayan yapısal hasara neden olmaksızın, sismik izolasyon uygulanan yapılar bu tür hasarların oluşumunu engelleyerek kuvvetli depremlere karşı yapıyı başlangıç koşullarında tutmak için tasarlanırlar. Varolan bir yapının sismik güçlendirilmesi için bu metot kullanıldığında, maliyetteki azalım; yapının sismik performans kapasitesinin seviyesine, arzu edilen sismik güçlendirmeye ve yapıda bu sistemi kullanımını engelleyici sınırlamalara göre sonuçlanabilir. Köprü inşaatlarında, sismik güçlendirmelerde ve yapılarda teşkil edilen sismik yalıtım genellikle depremden sonraki yapısal maliyetin azaltılmasına ve özellikle tasarımda yüksek performans gereksinimleri göz önüne bulundurulmak istenirse sisteme büyük oranda katkıda bulunur. Mevcut birçok köprü varolan ısı genleşme derzi mesnetlerinin zamanla özelliklerini yitirmesinden dolayı herhangi bir yolla birçok şekilde izolasyon mesnetleri ile değiştirilebilmekte ve bu mesnetler sayesinde üst tabliyenin göreceli deplasmanları için gereken ötelenme boşluğu sağlanabilmektedir. Bu sisteme ek bir maliyet sağlamasına karşın, uzun vadede köprülerin servis ömrü boyunca maruz kalacakları depremlerden sonra yapısal hasarların önlenmesi için bir kazanç olarak görülebilir.

Klasik tasarım yöntemleri ile sismik yalıtımın farklı performans seviyeleri, davranışları ile ilişkili belirsizlikler ve her bir metodun izin verdiği belirli hasar seviyelerinden dolayı her iki yöntemin ekonomik boyutlarını karşılaştırmak oldukça zordur. Belirli bir deprem kaydı için ve iki farklı tasarımla modellenmiş yapılarda, kabul edilebilir seviyedeki hasarların oluşumu gözönüne alınırsa sismik izolasyon

kesinlikle yapının başlangıç inşa maliyetlerini azaltmaktadır. Bu yargıyı destekleyen bir örnek olarak, depremde performans gereksinimleri kesin bir dille tanımlanmış olan nükleer santraller için verilebilir. Bir nükleer güç santrali için fizibilite çalışması, sismik yalıtımın santralde teşkil edilmesi, toplam yapım maliyeti 1,760 milyon \$ olan santral için depremde ve sonrasındaki hesaplanan maliyet kazancı 34 milyon \$ olmakta ve bu kazanılan maliyet yapının başlangıç maliyetinin % 2 kadarlık bir kısmını oluşturmaktadır [8].

Sismik yalıtım ile depreme karşı klasik yapı tasarımı arasında detaylı bir karşılaştırma A.B.D' de Los Angeles itfaiye binası için yapılmıştır. Gerekli görülen tasarım gereksinimleri, büyük bir depremden sonra yapının operasyonel işlevinin 24 saat süre ile kalıcı olmasını sağlamaktı. Yapılan bu karşılaştırmada sismik izolasyonun alışıla gelmiş tasarım teknikleri ile inşa edilen zemine ankastre yapıya göre yaklaşık olarak % 6 seviyesinde daha ekonomik olduğu ortaya çıkmıştır.

Maliyet bakımından daha önemli bir kazanım küçük ölçekli, sismik olan veya olmayan titreşimlerin yarattığı yapıdaki mekaniksel ve elektriksel donanım gereksinimlerinin azaltılması olmaktadır. Aksine, daha büyük sismik yükler göz önüne alındığında binadaki yapısal olmayan hasarı azaltmak için klasik yöntemlerle tasarlanan depreme dayanıklı yapılarda daha rijit elemanlar ve yapısal olmayan gereksinimler kullanmak zorunluluğu vardır. Birçok kez sismik izolasyon seçeneği klasik tasarım seçenekleri ile karşılaştırılmaktadır, fakat bu karşılaştırma farklı performans seviyeleri için yapılır. Sismik yalıtımın amacı; aynı performans seviyesi için başlangıçtaki inşa maliyetlerini azaltmaktan çok yapının ankastre olarak zemine mesnetlenmesi ile meydana gelen yapısal hasardan kaçınarak, yapının deprem esnasında daha iyi performans sergilemesini sağlamaktır. Makul bir maliyet ile sismik izolasyonun bu amacına depreme karşı klasik yapı tasarımı ile asla ulaşamaz.

Bununla birlikte, sismik izolasyonun kullanımı ile birlikte yapısal maliyetteki bir artışa neden olabilen birçok faktör mevcuttur. İlk olarak, izolasyon sisteminin içeriğindeki maliyettir. Özellikle izolasyon mesnetlerinin 5.000 ile 25.000 \$ arasında değişen maliyetleri bu faktörlerin ilk sırasını oluşturmaktadır. Üstelik, izolatörleri yerlerine yerleştirmek için ek elemanlar veya yapısal değişikliklere gereksinim duyulabilir. Bu ise yapıya ek bir maliyete neden olmaktadır. Örnek olarak izolasyon seviyesinde mesnetlere düzgün (uniform) deformasyonları ve gerilmeleri

dağıtmak için ek bir döşeme yapımına ihtiyaç duyulur. Temel izolasyon sisteminin büyük göreceli deplasmanlarını karşılayacak yapı etrafındaki perde duvarlar yapısal değişiklik olarak maliyet bakımından hesaba katılması gerekir. Bunun yanında izolasyon boşluğu için gereksinim duyulan potansiyel kullanılabilir alanların kaybıda yapıya ek bir maliyet getirmektedir. Bu kayıp, arazilerin oldukça pahalı olduğu, popülasyon yoğunluğu büyük alanlarda daha fazla olabilir.

Son olarak, sismik izolasyon uygulanan yapılar, yapının oturma ömrü boyunca onların maruz kaldıkları şiddetli depremlerde yapının performansını gözlemlemek ve yıpranan parçaların değiştirip bakımın yapılması için ve yapıya ek bir maliyet getirecek olan büyük bakım işlerine ve sıkça yapılan incelemelere gereksinim duymasıdır. Fakat periyodik incelemelere ihtiyaç duyma fikri, özellikle son zamanlardaki bazı yıkıcı depremlerden sonra klasik yöntemler ile tasarlanan yapılar için bile önem kazanmıştır.

Bunun yanında sismik izolasyon sistemi kullanıldığında maliyeti azaltmaya yönelik de bir çok faktör mevcuttur. Üst yapı inşaa maliyetleri, daha düşük sismik kuvvetler ve azaltılmış sismik kapasite ihtiyacından dolayı yapıların sismik güçlendirilmesinde azaltılmıştır. Dolayısı ile bu yapı maliyetleri daha düşük seviyelere çekilebilmektedir. Azaltılmış sismik yükler üst yapının daha planlı tasarımına müsaade etmektedir, böylelikle sismik kapasitesi yüksek arazilerde uygun olmayan yapı teknikleri izole edilen yapılar için kullanılabilir. Bu tür metotlar arasında yeterli süneklik kapasitesine sahip olmayan öngermeli ve prekast betonları üst yapıda kullanımını muhteva etmektedir. Dahası önemli seviyelerde azaltılmış görel kat ötelemelerini göz önünde tutarak daha ucuz yapısal olmayan parçalar (örneğin sıvalar) kullanılabilir [8]. Ayrıca uzun dönemli yapısal maliyetlerdeki azaltım, büyük oranlarda düşük seviyelere çekilmiş kat ötelemelerinden ve azaltılmış kat ivmelerinden dolayı yapısal olan ve olmayan hasarlar için bina içerisindeki donanımların korunumuna yönelik onarım masraflarının azaltılmasına neden olmaktadır.

Sismik izolasyonun varolan yapılara uygulamalarında, yapıları günlük faaliyetlerinin aksatılmasının önlenmesi ve bundan dolayıdır parasal anlamda ekonomik bir kaybın önüne geçilebilmesi bu sistem sayesinde bir kazanım olarak görülebilir. Genelde, yapılardaki onarım ve tadilat işleri gerçek bir hasardan daha çok sorun yaratabilen

zaman ve günlük üretim faaliyetlerinin kaybına neden olabilmektedir. Sismik izolasyon gibi etkili bir depreme dayanıklı tasarım ilkesinin kullanımı, artan yapı güvenliği yanında yaralanmalar ve ölümlerin azaltılması sayesinde hem ülke ekonomisine hemde yapı sektörüne olumlu faydalar getirmiştir.

Özetlemek gerekirse mevcut yapılara taban izolasyonunun uygulanmasının getirdiği ek maliyet aşağıdaki bileşenlere ayrılabilir;

- İkincil bir zemin kat ve bodrum kat yapılması
- Tasarım, deney ve yapım bedelleri
- Bağlantı elemanları
- Daha derin temel için ek temel kazısı yapılması
- evre istinat duvarı yapılması
- Yapıda mimari değişiklikler
- Projenin onaylanması için harcanan zaman

Yukarıda sıralanan maliyet bileşenlerinin toplamı araştırılarak en uygun ve ekonomik çözüm belirlenmelidir [2].

## **6. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİ**

### **6.1. Sismik İzolasyon Sistemlerinin Türleri ve Sınıflandırılması**

Günümüzde çeşitli türde sismik izolasyon sistemleri geliştirilmekte ve pratiksel olarak uygulanmaktadır. A.B.D’de genel olarak yaygın kullanılan izolatörler elastomer ve kayıcı tip mesnetlerden oluşmaktadır. Taban yalıtım sistemlerinin basitliği, güvenilirliği ve ekonomikliğı birbirleri ile ilişkilendirilmektedir. Isıl değışimlerden kaynaklanan deformasyonları karşılaması için köprü inşaatlarında geniş çapta elastomer mesnetler kullanıldığı için en azından önemli oranda elde edilebilir deneyimler mevcuttur. Diğer birkaç sistem geliştirilmekte, fakat başarılı sonuçlar elde edilememektedir [8].

### **6.2. İzolasyon Sistemlerinin Sınıflandırılması**

Günümüzde kullanılmakta olan izolasyon sistemleri şu şekilde sınıflandırılabilir.

#### **1. Kayıcı Sistemler**

- Sürtünmeli sarkaç mesnetler
- Esnek sürtünmeli taban izolasyon mesnetleri
- Fransız elektrik kurumu sistemi
- TASS sistemi
- EERC bileşik sistemi

#### **2. Kauçuk esaslı elastomer izolasyon sistemleri**

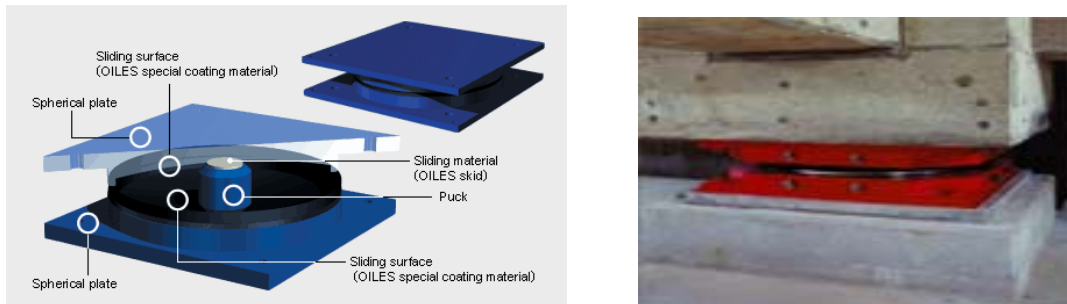
- Kurşun gövdeli elastomer mesnetler (LRB)
- Yüksek sönümlü elastomer mesnetler (HDRB)
- Düşük sönümlü elastomer mesnetler (LDRB)
- Hibrit (karma) tip elastomer mesnetler (LHDRB)

### **6.3. Kayıcı Tip İzolasyon Sistemleri**

Sürtünme esaslı kayıcı sistemler kayma gerçekleştiğinde belli bir seviyenin ötesinde kesme kuvvetlerinin iletilmesini sağlamaktadır ve bu kuvvetlerin üst yapıya

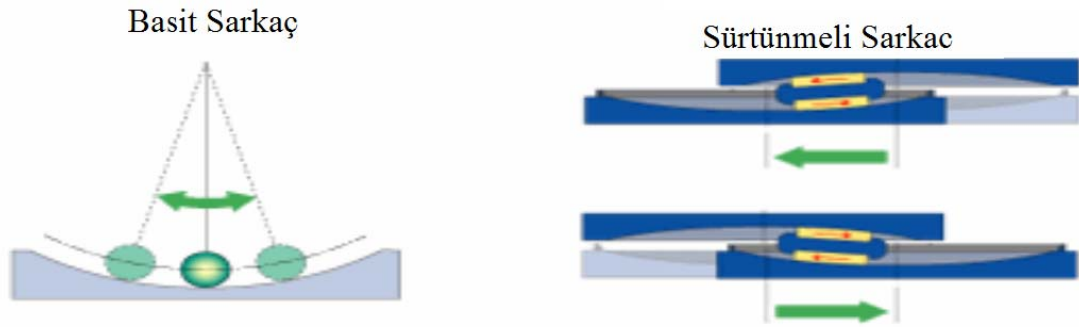
yansıtılması nispeten engellenir. Bu tip sistemler düşük bir sürtünme katsayısı kullanarak çok az bir taban kesme kuvvetine izin vermesi için tasarlanabilirler. En yaygın kullanılan kayıcı sistemler paslanmaz çelik ve teflondan oluşan kayıcı yüzeylere sahip sistemlerdir. Güçlü depremler esnasında üst yapıya iletilen kesme kuvvetlerinin büyüklüğü depremin şiddetine bağlı değildir. Bunun nedeni izolatörlerde kullanılan sürtünme katsayısından kaynaklanmaktadır. Böylelikle, kayıcı sistemler yapısal sistemler üzerinde şiddetli deprem olaylarının etkilerini azaltmada oldukça etkilidir. Dahası, bu sistemler nispeten daha ucuz ve ince boyutları sayesinde yapıların sismik yalıtımında oldukça sık kullanılır. Aynı zamanda yapıların güçlendirilme projelerinde sıkça kullanılmaktadırlar. Ancak, birçok kayıcı mesnetli sistem içeriğinde üst yapıyı geri getirici bir kuvvet olmamasından dolayı depremden sonra orijinal pozisyonlarına dönemeyebilirler. Bu sistemler üzerine izole edilen üst yapının orijinal ekseninden kalıcı sapmaları takip eden bir depremde tasarlanan deplasman miktarlarının karşılanmasında azalmalara neden olabilir. Kayıcı sistemler ile birlikte kullanılan elastomer mesnetler ile bu sorun ortadan kaldırılabilmektedir. Bu iki tür sistemin birlikte kullanılması her iki izolasyon sisteminin avantajlarını içeriğinde barındırmaktadır [14]. Bir geri döndürücü kuvvet sağlamanın ötesinde, elastomer mesnetlerin kullanımı çok büyük birim uzamalar altında kauçuğu sertleştirerek oldukça şiddetli depremlere karşı bir dirençte sağlayabilir.

Geri döndürücü bir kuvvet sağlamanın diğer bir yoluda küresel bir yüzey üzerinde şekillendirilmiş, sürtünmeli sarkaç prensibine (FPS) dayalı kayıcı izolasyon sistemlerinin kullanılmasıdır. Sistemin geometrisi, kendince merkezleme eylemi üreten paslanmaz çelik küresel bir yüzeyden ve bir kayıcı mafsalardan oluşmaktadır (Şekil 6.1).



**Şekil 6.1:** Kayıcı tip izolatör ve yapıda uygulamaları ([29]'dan alınmıştır.)

Bir deprem esnasında yapı izolatörler üzerinde kayabilmektedir. Sarkaç kelimesi, izolatörün bir parçasının diğer bir parçasına göre göreceli hareketinden kaynaklanan sürtünme kuvvetinide düşünerek adeta bir sarkacın hareketini anımsattığı için kullanılmaktadır. Şekil 6.2’de basit sarkacın çalışma prensibi gösterilmektedir. Geri döndürücü bir kuvvet, üst yapının, küresel konkav izolatör yüzeyi üzerinde hareketinden dolayı yatay yönde ötelenerek izolatörün yarı çapı ölçüsünde yukarı doğru yükselmesi ve ağırlığı ile küresel yüzeyin merkezine doğru hareketinden meydana gelir.

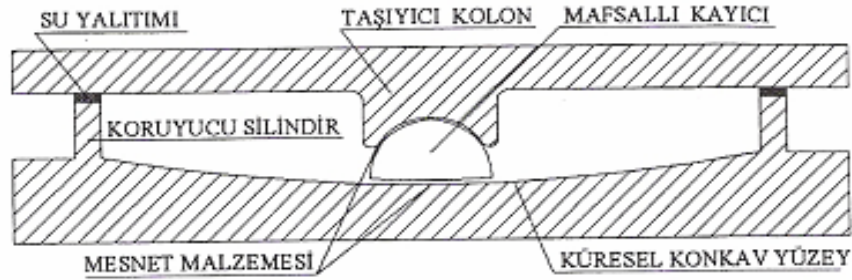


**Şekil 6.2:** Sürtülmeli sarkaç tip izolatörlerin çalışma prensibi ([29]’dan alınmıştır.)

Yapıyı, yatayda öteleme etkisini doğuran gerekli olan yatay kuvvet izolatörün eğrilik çapına ve düşey yüke bağlıdır. Özellikle eğrilik çapı, izolatörün arzu edilen etkili rijitliği sağlaması bakımından özenle seçilmelidir. Bu seçim, yapının etkin salınım frekansını direkt etkilemektedir. Enerji dağıtım mekanizması izolatör içerisindeki kayıcı mafsalları ile küresel yüzey arasında oluşmaktadır. Ancak, kaymanın gerçekleşmesinden önceki ve sonraki rijitliklerde meydana gelen ani değişimler ve önemli derecedeki farklar üst yapıda yüksek frekans etkilerine neden olabilmektedir. Ani kayma ve sticking etkilerinden dolayı rijitlikteki ani değişimler yapının yüksek frekanstaki titreşimleri üretmesine neden olabilir. Bu etki kat ivmelerinin artışı ve sonucunda yapı içeriğinin hasar olasılığını artırıcı yönde geri dönebilmektedir. Bu nedenle, kayıcı sistemler yapı içerisindeki muhteviyatı korumak için yeterli değildir.

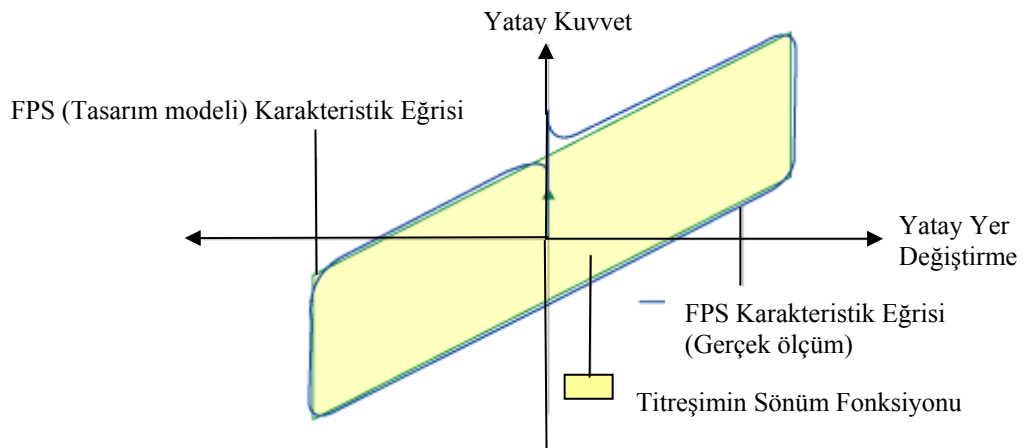
Kayıcı sistemlerinin diğer bir dezavantajı ise izolatör yüzeyindeki sürtünme katsayısının sabit olmamasıdır. Konkav yüzeylerin (Şekil 6.3) zamanla ve sıcaklıkla gitgide özelliğini yitirmesinden dolayı bu kat sayı değişkenlik gösterebilmektedir. Eğer tasarım aşamasında daha düşük seviyeli sismik kuvvetler düşünülür ise

katsayıdaki bu olumsuz etki, daha fazla hasara neden olabilen sismik kuvvetlerin ani bir artışına olanak sağlamaktadır. Elastomer mesnetlerin kayıcı tip mesnetler ile kombinasyonu, herbir bireysel sistemin avantajlarına sahip hibrid tip sistemlerin oluşumuna imkan vermekte, fakat bunun yanında bu sistemlerin bazı dez avantajları ve sınırlamaları azda olsa kullanım alanlarını etkileyebilmektedir.



**Şekil 6.3:** Sürtünlü sarkaç mesnedin kesit ve elemanları ([2]'den alınmıştır.)

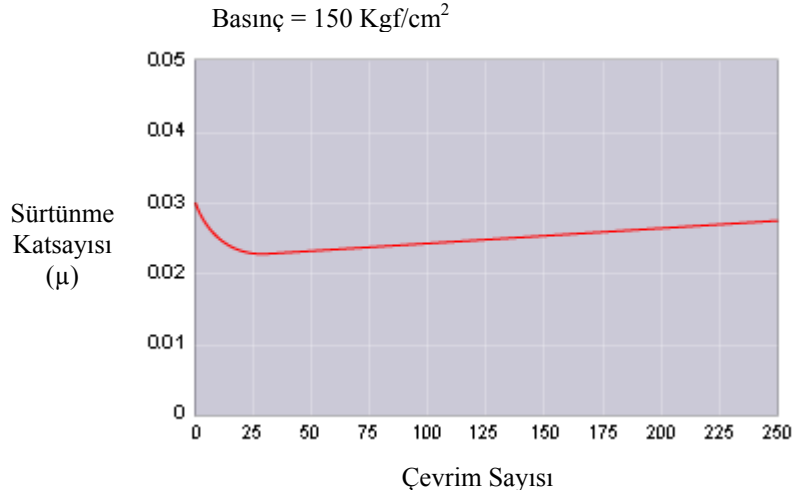
Tasarım ve test modellerinin davranışlarının bir karşılaştırması olarak Şekil 6.4'deki kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden anlaşılacağı gibi öngörülen şiddetli bir depremde sistemde oldukça büyük yanal deplasmanlar oluşmaktadır. Tasarım metodunun doğruluğunu göstermek için tasarımda belirlenen değerlerin, performansın fiziksel ölçüm değerleri ile hemen hemen üst üste düştüğü görülmektedir. Ayrıca grafikte sürtünlü sarkaç sisteminin geri döndürücü kuvvetinin karakteristiğide gösterilmektedir (Şekil 6.4, çift çizgi ile). Bu özellik, yapısal modellemeyi daha basit yapmaktadır.



**Şekil 6.4:** Sürtünlü sarkaç sisteminin karakteristik davranış modeli ([29]'dan alınmıştır.)



Şekil 6.5’de sürtünmeli sarkaç sistemi üzerinde gerçek bir sismik olaya eşit frekansta gerçekleştirilen çevrimsel deplasman testinin sonuçları, sistemin karakteristiklerinin (sürtünme katsayısı) sabit kaldığını, iyi bir dayanıklılık sergilediğini göstermektedir.



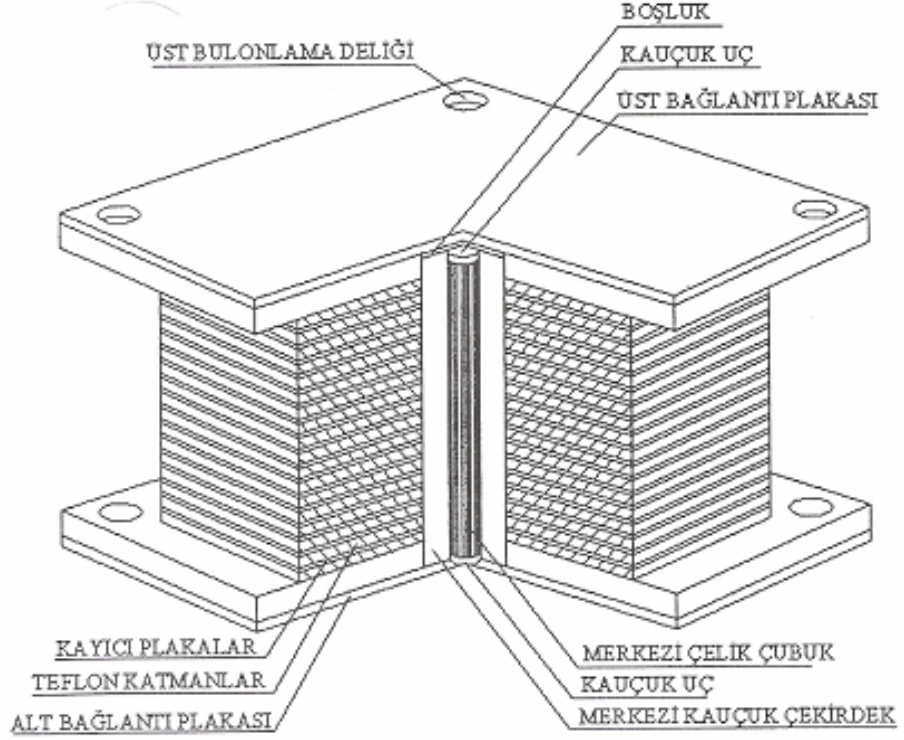
**Şekil 6.5:** Sürtünmeli sarkaç sistemine uygulanan çevrimsel deplasmanların sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini gösteren davranış modeli ([29]’dan alınmıştır.)

### 6.3.1. Esnek sürtünmeli taban izolasyonu mesnetleri

Esnek sürtünmeli taban izolasyonu sistemi, son yıllarda Mostaghel ve Khodaverdian tarafından önerilmiştir. Bu taban izolatörleri birbirleri ile sürtünmeli olarak temas eden teflon kaplamalı eşit merkezli daireler halindeki plakalardan ve merkezi kauçuk çekirdekten oluşmaktadır. Merkezi kauçuk çekirdek, mesnedin yer değiştirmesi esnasında hızın mesnet yüksekliği boyunca dağıtılmasını sağlamaktadır. Kauçuktaki kesme gerilmesini sınırlandırmak ve daha büyük yer değiştirme yeteneği kazandırmak amacı ile klasik çelik tabakalı kauçuk mesnetlere sürtünmeli plaka eklenerek esnek sürtünmeli izolasyon sistemleri düzenlenmiştir.

Esnek sürtünmeli taban izolasyon sistemi, merkezi ve çevresel kauçuk çekirdeklerle birbiri üzerinde kayabilen yassı kayıcı halkalardan oluştuğu için kayıcı tipli izolasyon sistemleri grubuna girmektedir. Yapıların birçok deneyle deprem etkileri altında davranışı incelenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Esnek sürtünmeli taban izolasyon mesnedinin kesit elemanları Şekil 6.6’da gösterilmiştir.



**Şekil 6.6:** Esnek sürtülmeli taban yalıtım mesnedin kesit ve elemanları ([2]'den alınmıştır.)

### 6.3.2. Fransız elektrik kurumu sistemi

Bu sistem 1970'li yılların başında nükleer güç santrali tesislerine uygulanmak amacıyla Fransız Elektrik Kurumu'nun desteği ile geliştirilmiştir. Bu sistemin kesiti tabakalı kauçuk mesnet sistemi ile aynıdır. Sistem, kompozit neopran mesnetleri paslanmaz çelikle temas halindeki kurşun-bronz alaşımıyla birleştirilerek elastomer mesnetler üzerine oturtulmuş kayma yüzeyleri meydana getirir. Kayma yüzeyinin sürtünme katsayısı, izolatörün servis ömrü boyunca 0,2 olarak düşünülmüştür. Neopran tabakanın muhtemelen  $\pm 5$  cm'den fazla olmayan çok düşük deplasman kapasitesi bulunmaktadır. Bu değeri aşan yer değiştirmeler oluştuğunda kayıcı elemanlar gerekli hareketi sağlamaktadır. Sistemi eski denge konumuna geri getiren bileşenler bulunmadığından kalıcı deplasmanlar oluşmaktadır. Bu sistem sadece bir kere Güney Afrika'daki Koeberg nükleer santraline uygulanmıştır.

### 6.3.3. EERC bileşik sistemi

Elastomer ve kayıcı sistemin birleşimi olan bu sistem EERC'da sarsma tablasında test edilerek geliştirilmiştir. Bu sistemde, yapının iç kolonları paslanmaz çelikten kayıcı elemanlar üzerindeki teflon tarafından ve dış kolonları da düşük sönümlü

doğal kauçuk mesnetler tarafından taşınmaktadır. Elastomer mesnetler yapının burulma davranışını kontrol etmektedir. Sistem denge konumuna geri dönme kapasitesine sahiptir ve sistemdeki kayıcı elemanlar sönüm sağlamaktadır.

Bu sistemin farklı biçimleri Nevada Üniversitesi Mackay okulu ve California'da bir hastane binasının güçlendirilmesinde kullanılmıştır. Üniversite binasında teflon-paslanmaz çelik kayıcı elemanlar kullanılırken, hastane binası için paslanmaz çelik üzerine kurşun-bronz alaşımı plakalar kullanılmıştır.

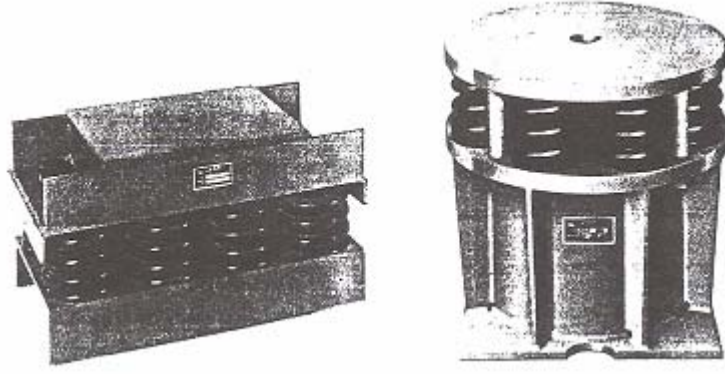
#### **6.3.4. TASS sistemi**

TASS sistemi Japonya'da TASEI şirketi tarafından geliştirilmiştir. Bu sistemde tüm düşey yük teflon-paslanmaz çelik elemanlar üzerinde taşınmaktadır ve ek olarak yük taşımayan kompozit neopran mesnetler kullanılmaktadır. Kompozit neopran mesnetler sistemi denge konumuna getiren dengeleme kuvvetleri sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Teflon kayma yüzeyi 10 MPa civarında basınç alabilmekte ve sürtünme katsayısıda düşük kayma hızlarında 0,05 ile yüksek kayma hızlarında 0,15 aralığında değişmektedir. Bu sistemin en önemli dezavantajı, elastomer mesnetlerin düşey yük taşınamaması olarak gösterilmektedir. Bu nedenle mesnetlerde çekme gerilmeleri ortaya çıkmakta ve kayma yüzeyinin hız hassasiyeti bu sistemin modellenebilmesini zorlaştırmaktadır.

#### **6.3.5. Yay tipi sistemler**

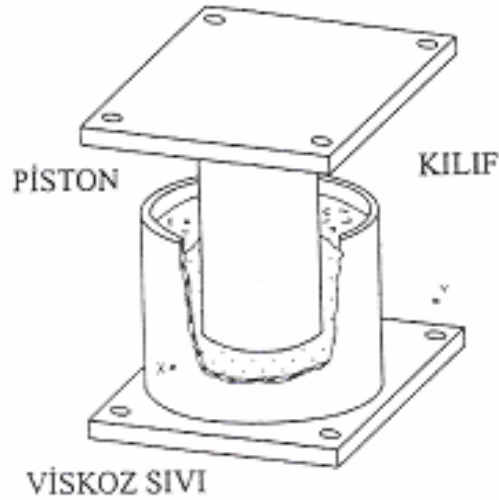
Kauçuk esaslı ve kayıcı izolasyon sistemleri genellikle yatay yönde izolasyonu sağlamak amacıyla kullanılır. Eğer depremin düşey bileşenine karşı düşey yönde de izolasyon sağlanmak isteniyorsa genellikle kullanılması tercih edilen yalıtım sistemleri helisel yaylardan oluşan yay tipi sistemlerdir. Almanya'da Gerb firması yay tipi izolatörler ve bunların değişik kombinasyonları üzerine üretim yapmaktadır. Bu sistemlerde çelik yaylar sönümsüz olup sistem daima viskoz sönümleyicilerle beraber kullanılmaktadır.

Şekil 6.7'de Gerb salt yay tipi bir izolatör ve viskoz sönümleyici ile birleştirilmiş bir yay tipi izolatör görülmektedir.



**Şekil 6.7:** Gerber yay tipi sistemler ([12]'den alınmıştır.)

Çelik yaylar çekme gerilmesi taşıyamadığı için viskoz sönümleyici ile birleşik yay sistemleri üretilmiştir. Bunlar hem çekme hemde basınç gerilmeleri taşıyabilir. Viskoz sönüm iki bileşenden oluşmaktadır. Sönümün ilk parçası, yüksek viskoz sıvı ile doldurulmuş çevresel kılıf, diğer parçasıda yaya mesnetlenmiş pistondur (Şekil 6.8). Bu sistemde mekanik enerji ısı enerjisine dönüşmektedir. Viskoz sönümle birlikte sistemin düşey doğrultusunda %20 ile %30 arası kritik sönüm elde edilmektedir. Düşey frekans genellikle yatay frekansın 3 ile 5 katı arasındadır.

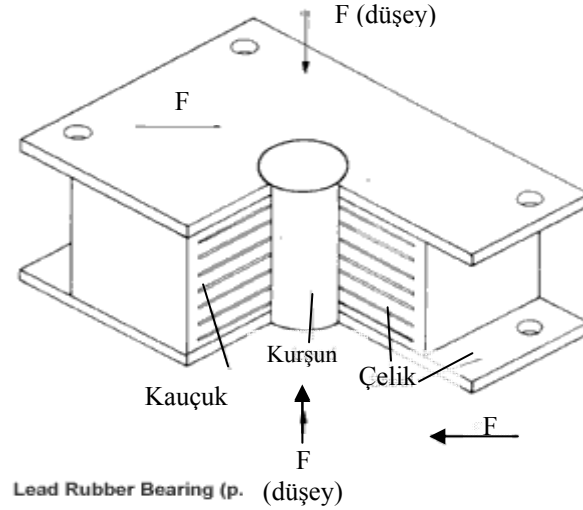


**Şekil 6.8:** Viskoz sönümleyicinin bileşenleri ([2]'den alınmıştır.)

Bu sistemlerin daha çok ağır makine ekipmanlarının titreşim izolasyonu ve nükleer güç santrallerinin titreşim izolasyonunu gibi uygulamaları mevcuttur, ancak konut tipi sistemlerde sık uygulanma alanları olmasada bazı projeleri mevcuttur. Bu sistemlerin matematiksel modellemeleri bir hayli karışıktır [2].

#### 6.4. Kauçuk Esaslı Elastomer İzolasyon Mesnetleri

Şekil 6.9’da kesiti görülen elastomer mesnet, sismik izolasyon sistemlerinin içerisinde en popüler olanıdır ve kalınlıkları 2 mm ~3 mm olan ince çelik plakalara yapıştırılmış kalınlıkları 8 mm ~ 20 mm arasındaki ince kauçuk levhaların üst üste getirilmesi ile meydana getirilip, bir enerji dağıtım mekanizması ile birleştirilerek üretilirler [15].

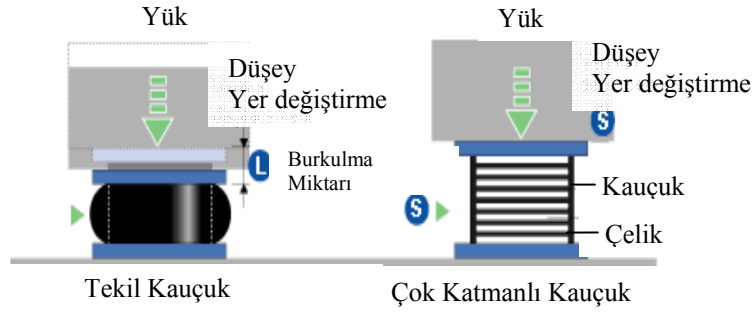


**Şekil 6.9:** Kurşun çekirdekli elastomer mesnet ([30]’dan alınmıştır.)

Doğal kauçuk mesnetler ilk olarak Makedonya’nın Üsküp şehrinde bir okul binasında kullanılmıştır. Bu bina 3 katlı bir betonarme yapı olup 1969 yılında tamamlanmıştır. Mesnet sistemi olarak doğal kauçuk bloklar kullanılmış ancak mesnet içerisine çelik plakalar yerleştirilmediğinden düşey yönde istenen rijitlik sağlanamamıştır. Ayrıca kauçuk blokların yanlara doğru şişmesi söz konusu olmuştur. Sistemin düşey yöndeki rijitliği yaklaşık olarak yatay yöndeki rijitliğinin birkaç katı olduğundan ve kullanılan kauçuk görel olarak sönümsüz olduğundan deprem hareketi esnasında bina ileriye veya geriye doğru salınım yapıp, yukarıya doğru sıçrayabilmektedir. İlerleyen zamanlarda mesnetler çelik plakalarla takviye edilerek bu zorlukların üstesinden gelinmiştir. Bu sistem bugün hala kullanılmaktadır.

Bina tamamlandıktan sonra birçok binada benzer şekilde doğal kauçuk mesnetler ile inşa edilmiş ancak bu binalarda mesnetlerin yanal burkulmasını önleyici ve düşey rijitliği artırıcı çelik plakalar kullanılmıştır. İç çelik plakalar, yatay rijitliğin birkaç yüz katı kadar düşey rijitlik sağlamaktadır. Bu mesnetler aynı zamanda yapıların vibrasyon izolasyonunu da sağlamaktadır.

Kauçuk esaslı elastomer mesnetlerde, kauçuk plakaları ince çelik plakalara yüksek basınç ve ısı altında yapıştırılırlar. Elastomer içindeki ince çelik plakalar kauçuğa düşey yük kapasitesi ve rijitlik sağlamaktadır, aynı zamanda kauçuğun yatay yönde şişmesini engeller (Şekil 6.10). Genellikle, çelik plakalar elastomer mesnede düşey yük uygulandıkça düşey rijitlik sağlayarak kauçuk tabakalarının yatay yönde bel vermesini sınırlandırmaktadır. Yatay yöndeki esneklik, elastomerin çelik plakalarla bu yönde deforme olmasını kısıtlamaksızın, kauçuk tabakaların kesme kuvveti altındaki yatay deformasyonları sayesinde sağlanır.



**Şekil 6.10:** Uygulanan düşey yüke karşılık elastomer mesnedin bel vermesi ([29]'dan alınmıştır.)

Mesnedin üst ve alt kısmında bulunan kalın çelik başlıklar izolatörün altında temele, üstünde üst yapıya uygun bir şekilde monte edilmesine olanak sağlamaktadır. Enerji dağıtım mekanizması ya bir metalin plastik deformasyonu sayesinde veya kauçuğun özünde bulunan yüksek sönüm özelliği sayesinde sağlanmaktadır. Şekil 6.11'de enerji dağıtımında kullanılan sönümleyiciler görülmektedir. İlk bakışta, ya kurşun çekirdek elastomer mesnedin içerisine yerleştirilir yada kurşun veya çelik elemanların elastik ötesi deformasyonları üzerine kurulmuş yardımcı sönümleyiciler kullanılır.



**Şekil 6.11:** Çelik ve kurşun sönümleyiciler ([31]'den alınmıştır.)

Elastomer mesnetler hareketli ve korozyon durumlarına maruz kalan parçalara sahip olmadıkları için minimum bakım gereksinimleri bulunmaktadır. Ancak, ticari ve konut tipi yapılarda bu tip mesnetlerin geniş kullanımını engelleyen elastomer mesnetlerin maliyetleri hala nispeten oldukça yüksektir. Bu dezavantaj sismik izolasyonun geniş alanlarda kullanılması ile gerçekleşecek satış hacmindeki bir artış sayesinde azaltılabilir. Aynı zamanda, elastomer mesnetlerin üretim maliyetlerinde üretim işlemlerinin otomatik bir düzeneğe uydurulması ile hem zaman hemde ekonomik bakımdan önemli ölçüde kazanımlar sağlanabilir. Yüksek maliyet genellikle özel üretim gereksinimleri ve işçilik maliyetlerinden kaynaklanmaktadır.

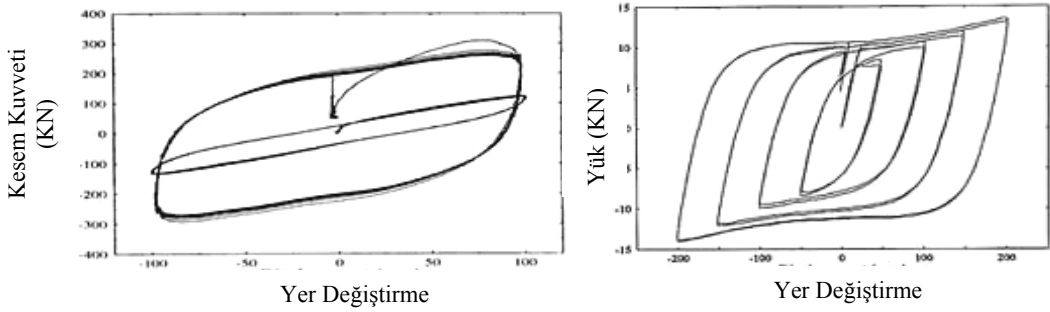
Elastomer mesnetlerin üretim sürecinde çelik plakalar tam ölçülerinde kesilmekte, kum ile yıkanmakta ve kimyasal yöntemler ile temizlenmektedir. Ardından bir bağlayıcı bileşik ile kaplanmaktadır ve kauçuk plakalar vulkanizasyon yöntemi ile yapıştırılmak için bir kalıbın içerisinde hazırlanan bu çelik plakaların arasına yerleştirilmektedirler. Aralara yerleştirilen çelik plakalar ve kauçuk birkaç saat yüksek basınç altında ısıya tabi tutulurlar. Son işlem olarak, çelik plakaları korozyondan korumak için başlangıçta alınan bir önlem olarak elastomer mesneti sarması için dıştan elastik bir zar kullanılır. Üstelik, izolatörü yangından kaynaklanan tehlikelerden korumak için özel olarak ısıya dayanıklı kaplamalarda geliştirilip kullanılmaktadır.

Kurşun gövdeli ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetler aşağıdaki özellikleri tek bir birim içerisinde sağladıkları için sismik izolasyon için en çok kullanılanlardır;

- Çoğu kez yatay rijitliğin bir kaç yüz katı olan, elastomerin büyük düşey rijitliğinden dolayı düşey yönde üst yapıyı güvenle taşıma özelliklerinin

bulunması. Düşey yöndeki rijitlik yapının düşey titreşimlerinden kaçınmak için gereklidir.

- Tehlikeli olan rezonans frekans aralığından, yapının baskın frekansını ötelemeyi sağlayan yatay esnekliğin bulunması.
- Kurşun çekirdek veya elastomerin içsel sönüm özelliklerinin sisteme sağladığı yüksek düzeyde bir enerji dağıtım mekanizmasının varlığı (Şekil 6.12).



**Şekil 6.12:** Elastomer mesnetlerin histeresis döngüleri esnasında tükettikleri enerji miktarını gösteren grafikler ([30]'dan alınmıştır.)

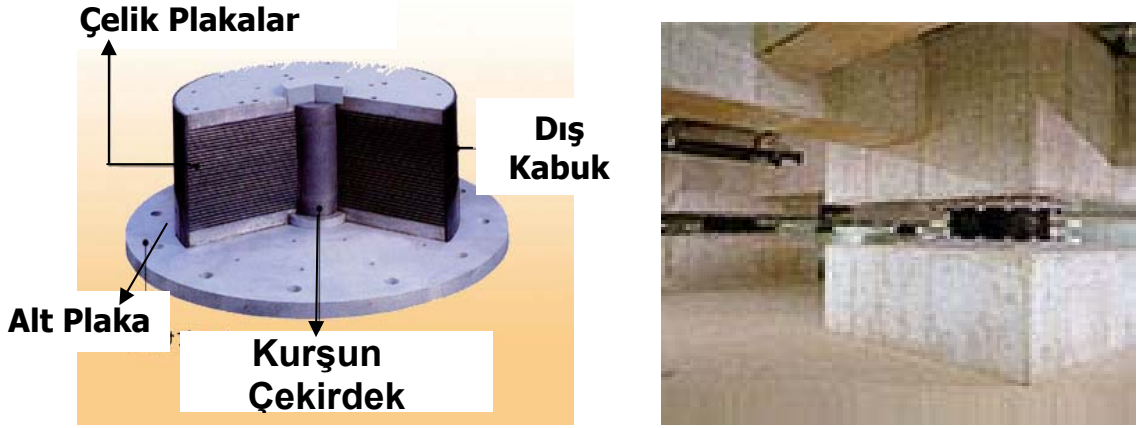
Bunun yanında, kurşun çekirdek muhteva eden bir elastomer mesnette, çekirdeğin akmadan önceki yüksek rijitliğinin varlığından dolayı, rüzgar yükleri gibi yatay yöndeki servis yükleri altında sisteme bir başlangıç rijitliği sağlanmaktadır. Bu durumda enerji dağıtım mekanizması ancak kurşun çekirdek akma konumuna gelir gelmez aktif hale gelir. Aksine, yüksek sönümlü kauçuk mesnetler, (Kurşun çekirdeksiz) sürekli bir temelde yukarıda bahsedilen başlangıç rijitliği olmaksızın sisteme bir enerji dağıtım mekanizması sağlamaktadır. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler depremden sonra sistemi orijinal pozisyonuna geri getirecek bir kuvveti sağlamada gerekli olan kapasiteye fazlası ile sahiptir. Bahsi geçenlerin dışında, ek kurşun ve çelik çubuklardan oluşan sönümlenme mekanizmaları ile birlikte kullanılan doğal kauçuktan (NRB) imal edilen izolatör sistemlerinin kullanıldığı birtakım projeler mevcuttur. Bu durumda, enerji dağıtım mekanizması, sisteme ek olarak yerleştirilen çelik veya kurşun çubukların elastik ötesi deformasyonları sayesinde sağlanmaktadır.

#### 6.4.1. Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler (LRB)

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetler, çelik plakalar arasına sıkıştırılmış düşük sönümlü ince doğal kauçuk katmanlarından oluşmaktadır. Uniform bir kayma şekil değiştirmesi sağlamak ve sisteme sönüm özelliği kazandırmak için izolatörün



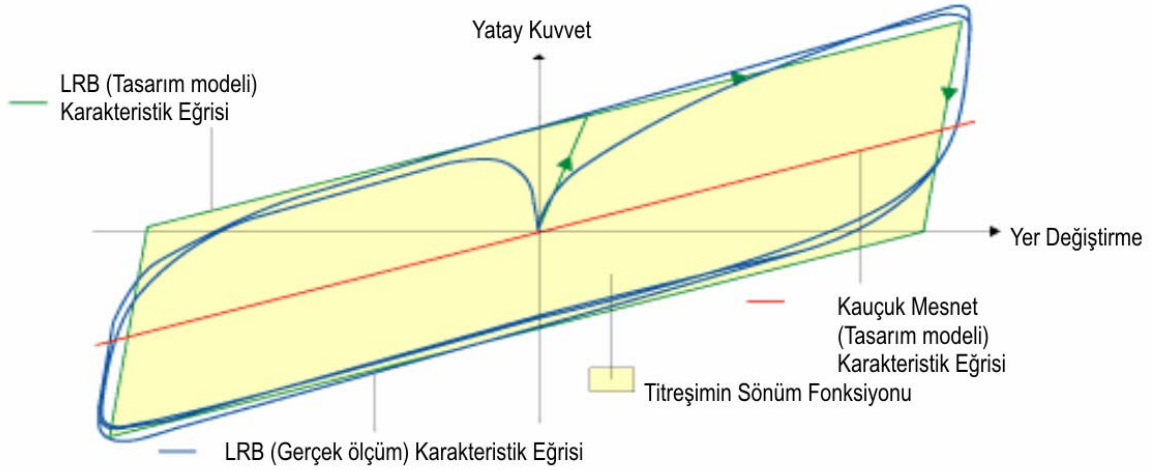
merkezinde bulunan bir deliğin içine sıkı şekilde yerleştirilen kurşun esaslı silindirik bir gövde sağlanmıştır. Elastomer mesnet içerisindeki çelik plakalar bu kurşun çekirdeğe bağlanır. Şekil 6.13’de verilen şekiller kurşun çekirdekli elastomer mesnedin kesitini ve bu tip izolatörlerle mesnetlenmiş bir yapıyı göstermektedir.



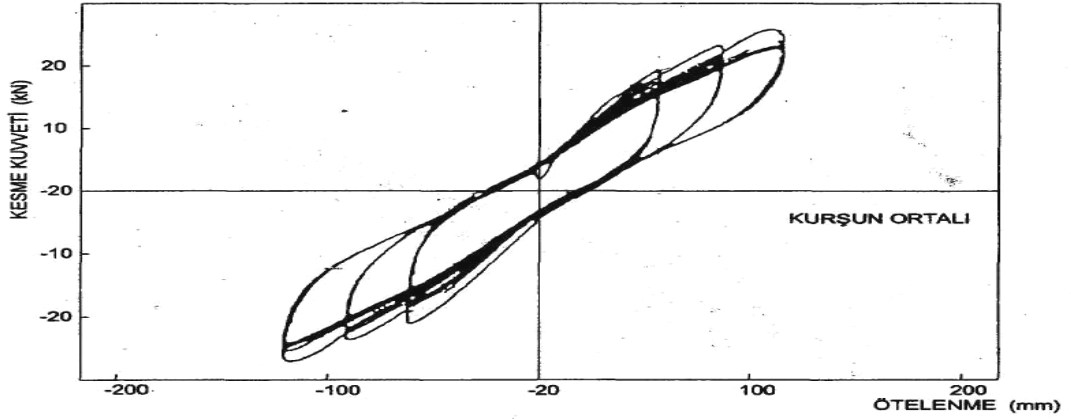
**Şekil 6.13:** Kurşun çekirdekli elastomer mesnet kesiti ve binalarda uygulanması ([29]’dan alınmıştır.)

Genellikle düşük sönümlü kauçuk, kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerde kullanılmaktadır. % 100-250 arasında bir birim uzamaya kadar lineer bir davranış sergileyen kauçuğun çok düşük kayma modülü sayesinde yatay esnekliğe kolayca ulaşabilmektedir [16]. Uygulanan testlerden, düşük sönümlü kauçuğun mekaniksel özelliklerinin sıcaklıkla, yaşla ve yükleme geçmişi ile değişmediği sonucu vurgulanmıştır. Kurşun çekirdek, akma sınır gerilmesi ötesi deformasyonlar altında kendi yapısını geçici olarak değiştiren ve kauçuğun kimyasal özelliğinden dolayı gerçekleştirdiği geri döndürücü kuvvet sayesinde deformasyonlar kaldırılır kaldırılmaz tekrardan kendi elastik ve orijinal yapısını kazanabilen bir kristal malzemedir. Mesnet merkezinde silindirik bir geometriye sahip olan kurşun, çelik plakalar tarafından elastik ötesi bir deformasyon yaratacak bir kesme kuvveti ile zorlandıkça, kendi akma sınır noktasını geçer geçmez histerik bir döngüde (Şekil 6.14 ve 6.15) enerjiyi dağıtmaktadır.

Kurşun yaklaşık olarak  $\sigma_y = 10$  Mpa seviyesindeki akma gerilmesinde bir elasto-plastik davranışa sahiptir. Ayrıca kurşun kendi akma noktasının ötesindeki belli döngüler için oldukça iyi yorulma özelliklerine sahip bir malzemedir.



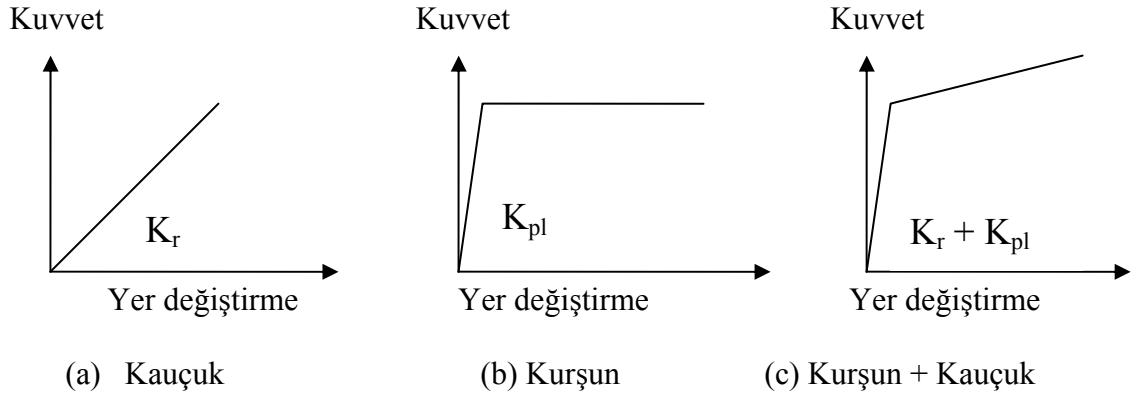
**Şekil 6.14:** Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerde histeresis döngü ve enerji dağıtma kapasitesini gösteren kuvvet-yer değiştirme grafiği ([29]'dan alınmıştır.)



**Şekil 6.15:** Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin tipik histeresis eğrileri ([3]'ten alınmıştır.)

Yukarıdaki şekilden anlaşılacağı gibi elastomer mesnetlerin sönmülendirdiği enerji miktarı, yükleme esnasındaki ve yüklemenin kaldırılması ile oluşan elips biçimli döngüsel alana eşittir. Her bir çevrimde, bu alan ısı şekline dönüşen bir enerji biçimine dönüşmektedir. Bu olay gerçekte yüklemenin kaldırılması esnasında tamamı ile eski seviyesine ulaşamayan başlangıç yüklemelerin yaptığı işten kaynaklanır, ancak bu olay esnasında kinetik enerji ısı enerjisine dönüştürülür ve sönmülendirilir. Kurşun çekirdeğin plastik deformasyonları sisteme sönmüm sağlamasına rağmen, bu deformasyonlardaki lineer ötesi davranışlar yapının daha yüksek modlarının cezbedilmesine neden olabilir [16]. LRB mesnetlerinin rijitliğindeki sürekli ani değişimler yüksek modal etkileri ortaya çıkarabilmektedir.

Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin davranışı (Şekil 6.16), kurşun çekirdeğin varlığından kaynaklanan akma öncesi rijitliği  $K_l$  ve kauçuğun kayma rijitliği  $K_r$ 'ye eşit olan akmadan sonraki pekleşme rijitliği  $K_{pl}$ 'nin toplamına eşit olan büyük başlangıç rijitliği  $K_{el}$  tarafından karakterize edilebilir.



**Şekil 6.16:** Kauçuğun ve kurşunun kuvvet-yer değiştirme grafikleri ([8]'den alınmıştır.)

Kurşun çekirdeğin akma kuvveti ilk kez aşıldığında belli bir deplasman için gerekli olan kuvvet, iki adet paralel bağlanmış yay gibi davranan tekil kuvvetin toplamına eşittir.

Akmadan önceki kuvvet;

$$F = \sigma_y A + K_r U = (K_l + K_r) U \quad (6.1)$$

Akmadan Sonraki Kuvvet;

$$F = K_r U = K_{pl} U \quad (6.2)$$

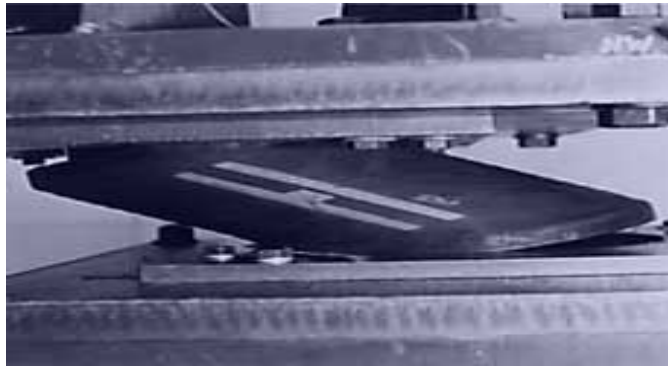
olarak hesaplanmaktadır. Tersinir çevrimsel yükler için yüklemenin kesin bir geçmişi  $F$  kuvvetini elde etmek için gereklidir.

Genellikle, kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin davranışları denk bir lineer viskoz olarak sönümlendirilmiş sistemin etkili rijitliği  $K_{eff}$  ve denk bir viskoz sönüm oranı  $\xi_{eff}$  tarafından modellenmektedir. Fakat, denk bir viskoz sönüm izolasyon sistemi ve yapının özellikleri gibi, depremin şiddeti ve belli karakteristiklerine göre önemli ölçüde değişim gösterebildiği için daima iyi bir yaklaşım değildir. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler, kurşunun oldukça yüksek elastik rijitliğinden dolayı küçük yatay yükler için gerekli olan başlangıç rijitliğini sisteme sağlamaktadır. Kurşun çekirdeğin

ayrıca değişkenlik gösteren etkili bir yatay rijitliğinin olması ve bunun yanında aynı şekilde değişkenlik gösteren yapıların etkin periyotlarının varlığı, yapıyı hasara uğratabilecek tehlikeli rezonans frekans aralığının dışında titreşim yapmasını mümkün kılar.

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin (LRB) başlangıç rijitlikleri oldukça yüksektir, fakat ortaya çıkan enerjinin şiddeti arttıkça bu rijitlik düşüş gösterir ve izolasyon sistemi daha etkin bir hal alır. Başlangıçtaki elastik rijitlik olan  $K_{el}$ , akmadan sonraki ortaya çıkan izolasyon rijitliği olan  $K_{pl}$ ' den yaklaşık 10 kat büyüktür. Kayma birim uzaması arttıkça kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerinin yatay rijitliği azalır. % 200 - %300 birim uzamalarında, pekleşme etkisinden dolayı yatay rijitlik tekrar artış gösterir. Aşırı deformasyonlar altında bu pekleşme etkileri şiddetli bir depreme karşı güvenlik sübabı olarak fayda sağlamaktadır. Bu tür izolatörlerin kırılma noktası % 500 kesme birim uzamaları seviyelerinde gerçekleşir ve bu noktanın, kurşun çekirdeğin varlığından ve basınç veya çekme gerilmelerinden bağımsız olduğu deneysel verilerden ispatlanmıştır. Üstelik kayma birim uzaması, düşey yükten bağımsız olarak göz önünde bulundurulabilir. Tam aksine düşey rijitlik, kayma deformasyonlarına bağımlılık göstermektedir.

Elastomer mesnetler Şekil 6.17'de görüldüğü gibi birçok büyük deplasmanlara dayanıklılık göstererek büyük yer değiştirmeleri kolayca gerçekleştirebilirler. Bir mesnetteki göçme, temel sebep olarak kauçuğun içeriğindeki kusurların (çatlak, yarık v.b.) genişlemesinden ve kullanılan kauçuğun kimyasal özelliğinden kaynaklanır. Dikkatli üretim ve kalite güvence kontrolleri, aşırı yükler altında elastomerin göçmesine neden olabilen kauçuğun içeriğindeki çatlakların oluşmasını önleyebilir.

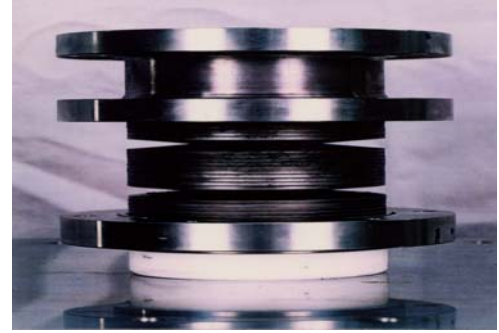


**Şekil 6.17:** Deforme edilen bir elastomer mesnedin davranışı ([32]'den alınmıştır.)

Kurşun çekirdeğin akma gerilmesinden önceki evredeki servis yükleri altında enerji dağıtma mekanizması kurşun çekirdekli mesnetlerde sağlanamaz. Bu durum, hassas ve değerli ekipmanlarda donatılmış yapıların küçük veya çok yüksek frekanslı yatay yüklere karşı, kurşun çekirdekli izolatörlerin enerliyi sönmülendirmesini etkisiz kılan bir etkidir. Yardımcı sönmüleyiciler (Şekil 6.18) bu nedenle elastomer mesnetlerin akma sınır gerilmesine ulaşmadan önceki evrede dış yüklerden meydana gelen enerjiyi dağıtmak için kullanılabilir.



(a) Hidrolik Sönümleyici



(b) Sürtünme Esaslı Sönümleyici  
(Konik disk yayları ile)

**Şekil 6.18:** Yardımcı sönmüleyici sistemler ([31]'den alınmıştır.)

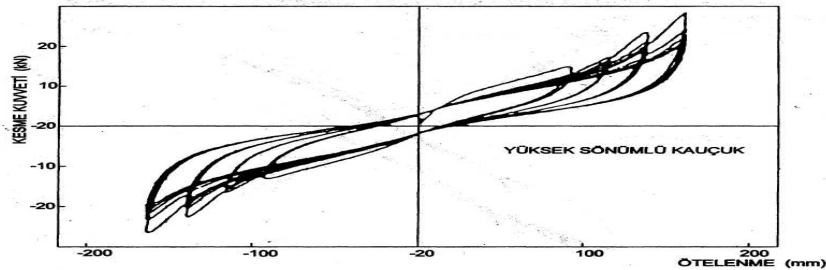
Üstelik, kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin (LRB) gerçekte lineer olmayan davranışı, hem depremin etkin karakteristikleri (şiddet, baskın frekans v.b.), hem de izole edilen yapının özellikleri ile değişiklik gösteren sabit olmayan denk bir sönm oranına neden olmaktadır. Son olarak, kauçuk ve kurşun çekirdeğin birlikte kullanılması, deprem anında mesnette depolanan uzama enerjisini (elastik enerji) kullanarak, depremden sonra yapıyı başlangıç koşullarına geri döndürücü bir kuvvet sağlamaktadırlar. Bu geri döndürücü kuvvetin varlığı, LRB mesnetleri üzerinde izole edilen yapıların, uygulamada deprem etkilerine maruz kaldığında dinamik özellikleri üzerinde ne denli bir etki bıraktığı ispatlanmıştır. Ayrıca, sarsma tablası test deneyleri sonuçları, yapıyı başlangıç konumuna geri döndüren bir geri döndürücü kuvvetin varlığının kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerce nasıl sağlandığını etkin bir biçimde göstermektedir.

#### **6.4.2. Yüksek sönmümlü elastomer mesnetler (HDRB)**

Yeteri kadar bünyesel sönmü içeren ve yapıda ekstra sönmü elemanına ihtiyacı ortadan kaldıran doğal kauçuk mesnetler 1982 yılında İngiltere'de geliştirilmiştir. Yüksek sönmümlü elastomer mesnetler, çelik plakalar arasına sıkıştırılmış yüksek

sönümlü ince kauçuk tabakaların, kurşun çekirdekli mesnetlerde olduğu gibi üst üste birbirleri ile yapıştırılarak üretilmektedir. LRB mesnetlerinde kullanılan vulcanizasyon ve yapıştırma metotları aynı zamanda yüksek sönümlü elastomer mesnetlerin (HDRB) üretimi içinde kullanılmaktadır. Aralarındaki tek fark, sisteme yüksek sönüm sağlayan doğal kauçuk içeriğindeki kimyasal katkı maddelerinde görülmektedir.

Yüksek sönümlü kauçuk, gerçekte karbon blok, reçine ve yağ gibi özel dolguların kauçuğun içerisine eklentisinden dolayı, içsel sönüm özellikleri yüksek oranda arttırılmış bir bileşimdir. Bu tür katkıların eklentisi, izolatörün mekaniksel özelliklerini etkilemeksizin kauçuğun özündeki sönüm özelliklerini arttırır. Kayma gerilmeleri, yüksek sönüm özelliklerine sahip kauçuğa uygulandığında, enerji sönümlendirme mekanizmasına dönüşen sürtünme ısısı moleküllerin birbirleri üzerinde yer değiştirmesi ile üretilir. Bu tür özel karışımlar olmaksızın üretilen doğal kauçuktaki (LRB mesnetlerinde kullanılan) moleküler etkileşim fiziksel olarak zayıf çapraz bağlardan oluştuğu için sürtünmeden kaynaklanan ısı göz ardı edilir. Yüksek sönümlü bir elastomer mesnedin enerji sönümlenme mekanizması, hem küçük hemde büyük şekil değiştirmeler için eldesi mümkündür, ayrıca değişken değildir ve düzgün bir elips eğrisi şeklinde karakterize edilir [17]. Şekil 6.19’da bu tip mesnetlerin histeretik döngüsü verilmektedir. Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerdeki deneysel çalışmalar, tipik olarak lineer elastik modellere denk olan yaklaşık % 100 kayma şekil değiştirmelerinde % 10 ile % 20 sönüm oranına eşit bir öngörülen enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğunu doğrulamaktadır. Ancak, küçük birim uzamalar altında daha büyük rijitlik gösteren yüksek sönümlü kauçuk bileşiğinin sağladığı başlangıç rijitliğine rağmen, yüksek sönümlü kauçuk mesnetler (HDRB), servis yükleri ve küçük yatay yükler altında sisteme gerekli olan başlangıç rijitliği sağlamayabilir.



**Şekil 6.19:** Yüksek sönümlü kauçuk mesnetlere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği ([3]’ten alınmıştır.)

HDRB ile izole edilen bir yapı, izolasyon sisteminin yatay yöndeki esneklikliğinden dolayı sabit ve büyük bir etkin periyoda sahiptir. Ancak, böyle bir sistemin, baskın frekans değeri izolasyon sisteminin etkin frekansına denk olan rüzgar yüklerine maruz kalması durumunda yapıyı rezonansa zorlayacağıda kaçınılmaz bir gerçektir. Sönüm ve HDRB mesnetlerinin mekaniksel özellikleri, sıcaklığa bağımlı olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşın kurşun gövdeli mesnetlerin enerji sönümleme mekanizması bu etkiden bağımsızdır. Bu nedenle, yüksek sönümlü elastomer mesnetler kurşun gövdeli mesnetlere oranla sismik izolasyon uygulamalarında daha az kullanılmaktadır.

Yüksek sönümlü elastomer mesnetlerin kayma modülü yaklaşık olarak 0.3 - 1.5 MPa arasında değişmektedir. Bazı yüksek sönümlü doğal kauçuk bileşimleri, onları sismik izolasyon için uygun yapan mekaniksel özellikler ve davranışlar sergilerler. Özellikle yüksek sönümlü kauçuğun başlangıç rijitliği küçük birim uzamalarda yüksek değerlere ulaşır ve kayma birim uzamasının yaklaşık 0.5'e eşit olduğu, başlangıç rijitliğinin yaklaşık % 20'sine denk olan minimum bir değere ulaşarak artan birim uzamalarda önemli ölçüde azalır. Strain Hardening etkisinden dolayı % 100'den daha büyük birim uzamalar için tekrar artış gösterir. Bu mekaniksel özellik, rüzgar veya küçük ölçekli deprem yükleri için sisteme faydalı olan yüksek başlangıç rijitliği sağlamaktadır. Rijitlikteki ve yüksek şekil değiştirmelerde sönümdeki artma, düşük sismik yükler altında rijit, tasarım seviyesindeki sismik yükler altında sünek ve lineer, tasarım seviyesini aşan sismik yükler altında ise deplasmanların sınırlanabildiği sistemler üretilmek için kullanılır.

Yüksek sönümlü kauçuk sistemlerin bir diğer avantajı da çevre titreşimlerinin azaltılmasında kullanılabilmesidir. İzolatörler, trafik ve komşu yer altı demiryolu hattı gibi unsurların yapı üzerinde yarattığı yüksek frekanslı düşey titreşimlerinin filtrelenmesinde rol oynar [18].

#### **6.4.3. Düşük sönümlü elastomer mesnetler**

Düşük sönümlü elastomer mesnetler ek sönüm araçları olan viskoz sönümleyiciler, çelik çubuklar, kurşun çubuklar gibi elemanlar ile birleşik olarak Japonya'da yaygın biçimde uygulanmıştır. Japonya'da kullanılan bu mesnetler doğal kauçuk içerirken, Fransa'daki bazı projelerde ise neopran kullanılmıştır. Bu tip izolatörler iki kalın dış çelik plaka arasına pek çok ince çelik levha içerir. Kauçuk tek bir işlemle yüksek

sıcaklık ve basınç altında çeliğe yapıştırılır. Arada kullanılan ince çelik levhalar kauçuğun eğilmesini ve burkulmasını önlerken düşey rijitliğe yüksek derecede katkı yapar.

Ancak bu çelik levhaların yatay rijitliğe önemli bir katkısı yoktur çünkü yatay rijitlik kauçuğun kayma modülü tarafından belirlenmektedir. %100 kayma şekil değiştirmeleri üzerine kadar kaymada malzemenin davranışı lineerdir. Malzemede sünme gözlenmezken kayma modülü uzun dönemli etkiler altında değişmektedir.

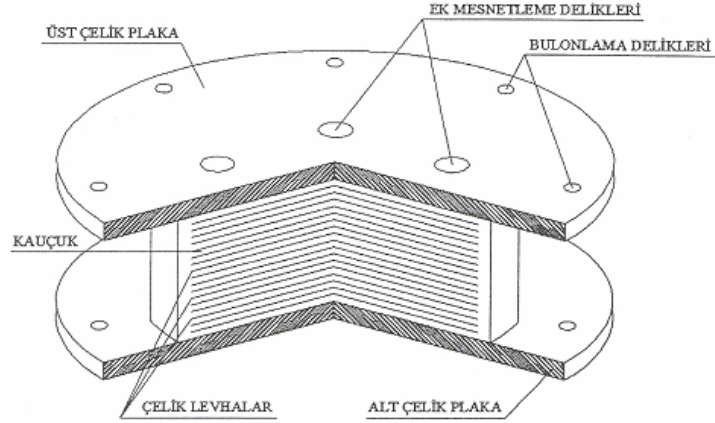
Kauçuk esaslı dairesel izolatörler şu aşamalardan geçerek üretilmektedirler [2].

- Kauçuğa ozon dayanımı, mekanik dayanım, çekme dayanımı, rijit ve sönüm artırıcı katkı maddeleri ilave edilir. Rijitlik ve sönüm artışı için doğal kauçuğa karbon siyahı konur ve karıştırılır.
- Kauçuk rulo yapılır.
- Kauçuk rulo belirli kalınlıklarda daire biçimli kesilir.
- Kauçuk kat kat yerleştirilir ve aralarına birkaç mm kalınlığında çelik levhalar konur. Levhaların kauçuğa iyi yapışması için yüzeyleri parlatılır.
- Yüzeyle yapıştırıcı maddeler sürülür.
- Bir kat kauçuk bir kat çelik sırasındaki elemanlar ağır çelik kalıba konulur. Kalıpla arasına yine kauçuk yerleştirilir. Birleşim 135 ° C’de yaklaşık 14 saat bekletilir.
- Kauçuk vulkanize edilir. Bu işlem sırasında kauçuk kalıptan dışarı taşabilir. Kalıbın çevresine konulan kauçuk çeliği paslanma ve yangın etkilerinden korur.

Doğal kauçuğun yapısındaki değişkenler, katkı maddesindeki değişimler, karıştırma ve kür sırasındaki koşullardaki farklılıklar nedeniyle kauçuk izolatörlerin mekaniksel özelliklerinde önemli farklılıklar olabilmektedir.

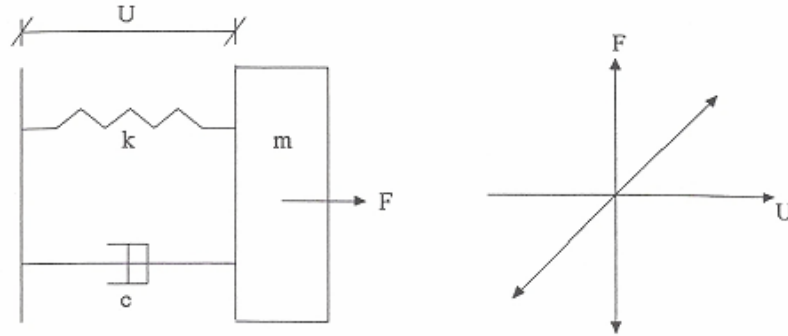
Düşük sönümlü tabakalı kauçuk mesnedin kesiti ve elemanları Şekil 6.20’de gösterilmiştir.





**Şekil 6.20:** Düşük sönümlü kauçuk mesnedin kesit ve elemanları ([22]'den alınmıştır.)

Düşük sönümlü kauçuk mesnetlerin pek çok avantajı vardır. Bu mesnetler kolay imal edilebilirler, kolay modellenebilirler ve mekaniksel özellikleri sıcaklıktan ve zamandan etkilenmez. Tek bir dezavantajı ise genellikle bu mesnetlerle birlikte ek bir sönüm sistemine ihtiyaç duyulur. Bu ek sönüm sistemlerinin düğüm noktası bağlantıları dikkatli ve özenli hazırlanmalıdır. Metal sönümleyicilerin kullanılması durumunda yorulma etkileri oluşabilir. Şekil 6.21'de düşük sönümlü kauçuk mesnedin şematik modeli ve kuvvet-yer değiştirme davranışı gösterilmektedir;



**Şekil 6.21:** Düşük sönümlü kauçuk mesnedin şematik modeli ve kuvvet-yer değiştirme davranışı ([22]'den alınmıştır.)

#### 6.4.4. Karma tip izolasyon sistemi (LRB+HDRB = LHDRB)

Kurşun gövdeli, yüksek sönümlü kauçuktan meydana gelen bir hibrit tip elastomer mesnet, çelik plakalar arasına yerleştirilmiş yüksek sönümlü kauçuk tabakalarından ve daha küçük çaplı kurşun silindir gövdenin mesnedin merkezinde bulunan bir deliğe sıkıştırılarak yerleştirilmesinden oluşmaktadır. Bu tip izolatörler yukarıda bahsi geçen her iki tür elastomer mesnedin avantajlarına sahiptir. LHDRB hem bir

başlangıç rijitliğe (kurşun gövdenin bulunması ile) hemde yüksek sönümlü kauçuğun sönüm özelliklerinden dolayı sürekli bir enerji dağıtma mekanizmasına sahiptir. İzolasyon sisteminin bu özelliğinden dolayı hem küçük hemde büyük ölçekli şiddetli depremlerde ve küçük yatay yükler altında izolasyon sisteminin oldukça iyi performans sergilemesi beklenir. Ayrıca, bu mesnetlerin mekaniksel özellikleri yüksek sönümlü elastomer mesnetlere oranla ısı değişimlere çok daha az duyarlılık gösterir. Üstelik, hibrit tip izolasyon sistemlerinin kullanımı, üst yapı üzerindeki yüksek frekans etkilerinin cezbedilmesini sağlayan izolasyon sisteminin başlangıç rijitliğinin azalmasını da sağlamaktadır. Son bir avantaj olarak, izolatörlerin etkinliği ve uygun boyutları sismik izolasyon uygulamalarının sınırlı olduğu alanlarda bu tür sistemlerin kullanımını kolaylaştırmaktadır. LHDRB mesnetlerinin kullanımı kurşun gövdeli ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerinin avantajları ve kısıtlamaları arasında tercihen pratiksel ve yapısal maliyetin azaltımına yönelik bir uygulama alanı sağlamaktadır.

Pratiksel olarak mümkün olması durumunda, kurşun çekirdekli yüksek sönümlü elastomer mesnetlerin tercihen izole edilen yapının rijitlik ve kütle merkezinden mümkün olduğunca uzağında bulunan yapı çevresindeki kolonların altına monte etmek oldukça etkili olabilmektedir. Kurşun gövdeye sahip olmayan yüksek sönümlü kauçuk mesnetler yapının iç kolonları altında kullanılabilir. Bu düzen kurşun çekirdeklere akma gerilmelerinden önce daha düşük seviyede bir başlangıç rijitliği sağlar ve sonucunda akma ve tersinir yüklemeler altında izolatörün yatay yöndeki rijitliğindeki değişim daha yumuşak mertebelerde gerçekleşir. Yüksek başlangıç rijitliği ve onun ani değişimleri, yüksek modların etkilerini ve başlangıç rijitlik azaltılarak kaçınılabilecek ivme artışlarını tetikler. Üstelik, rijitlikteki değişimin kademeli azaltımı akma sınır gerilmesinden önce izolasyon verimliliğinin daha yüksek bir değere ulaşmasını sağlayacaktır. Rijitlik merkezinden uzaktaki dış kolonların alt kademesine kurşun gövdeli mesnetlerin yerleştirilmesi, izolasyon sisteminin rijitlik merkezi ve atalet kuvvetlerinin uygulama noktaları arası mesafeden kaynaklanabilecek burulma etkisine karşı daha büyük direnç sağlayabilmesine yardımcı olabilmektedir. Plandaki bu düzenin izolasyon seviyesinde, atalet kuvvetlerini LHDRB mesnetlerine uniform dağıtabilen rijit bir diyafram varlığı ile sağlanması yoluyla gerçekleşeceğine dikkat etmek gerekmektedir.

Etkili bir izolasyon sistemi, hem viskoz hemde histerik sönüme sahip olmalıdır ve sürekli bir enerji dağıtım mekanizması sistemde sağlanmalıdır. Özellikle hıza bağımlı olan viskoz sönüm, hem şiddetli hemde küçük ölçekli titreşimler için sürekli bir sönüm mekanizmasını mümkün kılmaktadır. Viskoz sönüm ya gerçek viskoz sönümleyicilerle yada içsel sönüm özelliklerine sahip kauçuk tarafından sağlanabilir. Optimum viskoz sönüm oranı %20 ile %30 arasında bulunmaktadır; daha yüksek sönüm değerleri kat ivmelerinin artışına yol açmaktadır. Ancak, viskoz sönümleyiciler ile izolasyon seviyesindeki deplasmanları azaltmayı hedefleyen sistemler, şiddetli depremler için çok etkili olmamakla beraber genelde rüzgar yükleri gibi küçük yatay yüklemeler için gerekli olan başlangıç rijitliğini sisteme sağlayamamaktadır. Daha önceden bahsedildiği gibi, histerik sönüm genellikle bir metalin, tipik olarak kurşunun veya çeliğin plastik deformasyonu sayesinde sağlanır ve özellikle izolasyon seviyesindeki göreceli deplasmanları önemli ölçüde azaltarak güçlü titreşimler için oldukça etkili olmaktadır [8].

Histerik sönüm servis yükleri için gerekli olan yüksek başlangıç rijitliği sağlamaktadır, ancak viskoz sönümde olduğu gibi sürekli bir enerji dağıtım mekanizması sağlayamamaktadır. Ani rijitlik değişimleri kat ivmelerini arttırabilmektedir. Bu nedenle, sismik izolasyon uygulanan yapılar için tasarım aşamasında bu iki sönümleme sistemi arasında optimum seviyede bir yaklaşım düşünülmelidir.

## 7. DÜNYADAKİ SİSMİK İZOLASYON UYGULAMALARI

### 7.1. Giriş

Yapıların zeminden bir mekanizma ile temellerinden ayrılma fikri 1900'lü yıllarda ortaya atılmıştır [12]. Başlangıçta şiddetli bir depremde yapının ötelenmesine izin vermek için temelde kum tabakaları veya buna benzer bir malzeme önerilmekte idi. Sismik izolasyon kavramı; yumuşak zemin tabakaları üzerine inşa edilen ve deprem sonrasında yapılan incelemelerde, yapısal hasarların oldukça sınırlı kaldığı anlaşılan bu tür binalardaki gözlemler ile güncelliğini kazanmıştır. Bu yapılar yumuşak zemin tabakaları üzerinde rijit cisim olarak öteleme hareketi yapmıştı. Aksine, bitişik yapılar ciddi hasara yada yıkıma uğradılar. O zamandan günümüze kadar birçok sismik izolasyon yapılmış yapılar ya planlı olarak yada tesadüfi bir şekilde projelendirilip, inşa edildi. Birçok durumda bu yapıların şiddetli depremlere dirençli olmasındaki gerçek, bitişik binaların yıkılmasına karşın, depreme dayanıklı yapı tasarımının bir yöntemi olarak sismik izolasyon kavramını ortaya çıkmasına neden oldu.

Zemin hareketinden bir yapıyı izole etmek için bilinen ilk öneri 1891'de Japonya'da yapı mühendisleri tarafından ortaya atıldı. Sismik izolasyona yönelik ilk resmi kaynaklar silindir mesnetler üzerine mesnetlenmiş bir deprem gözlem evi üzerinde 1906 yılında A.B.D' de gerçekleştirildi. Aynı yıllarda İngiltere'de, zemin hareketlerine karşı dirençli yapı tasarlama fikri, yapıyı temelinden izole etmek için temel altındaki zeminin çok ince toz tabakalarına ayrıştırılmasına ve bu şekilde üstyapının zeminden izole edilmesi suretiyle gerçekleştirilmiş oldu [12]. 1908'de İtalya'da deprem sonrası ağır hasar almış bir yapının tekrar inşası için silindir mesnetleme veya kum tabakası yöntemlerini kullanarak yapıyı zeminden ayırma konusunda bir teklif sunuldu [8].

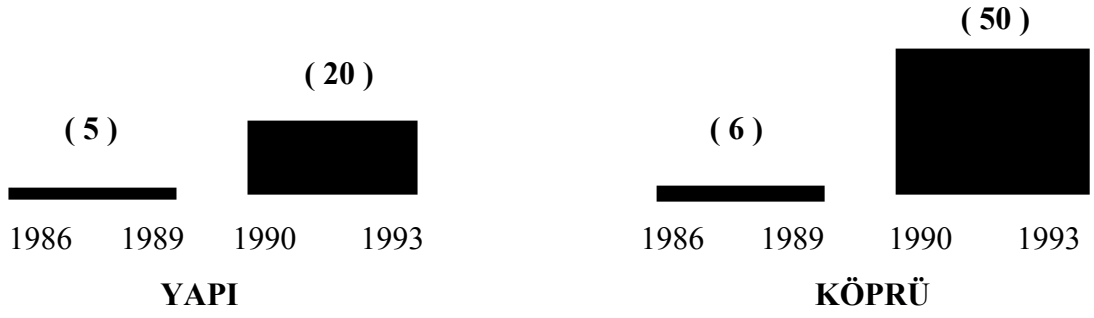
Deprem zararlı etkilerinden bir yapıyı uzaklaştırmak için yapının sismik izole edilmesi hususunda bir çok metot geliştirildi ve uygulandı. Bu yüzyılın son çeyreğinde elastomer mesnetlerin gelişimi ve yaygın elde edilebilir olanakları ile artış gösteren sismik izolasyon kullanımları mevcuttur. Özellikle yapı davranışlarını

bire bir simüle edebilen ve lineer olmayan yapı çözümlerini kolayca gerçekleştirebilen bilgisayar yazılımlarının geliştirilmesi, kullanılan yapı malzemelerinin karakteristik özelliklerinin iyileştirilip test imkanları sayesinde davranışların gözlemlenebilmesi, son yıllarda sismik izolasyon için geliştirilen elastomerler mesnetlerin yada diğer izolasyon sistemlerinin yapılarda kullanılmasını kolaylaştırmıştır. Günümüzde 400'ün üzerinde yapıda sismik izolasyon tekniği uygulanmış ve bu oran her geçen gün artmaktadır [8]. Ancak yeni yapılanmaları göz önünde tutarak, sismik izolasyonun birçok uygulamaları genelde pahalı donanımlara sahip kritik önem taşıyan yapılarda da görülmektedir. Bununla beraber, sismik izolasyon uygulamaları için potansiyel bir alan teşkil etmesi bakımından köprülerin ve var olan yapıların güçlendirilmesinden bahsedilebilir. Varolan yapıların ve köprülerin izolasyonu için kullanılan en yaygın izolatörler kurşun gövdeli elastomer mesnetlerdir (LRB). Özellikle köprü tabliyelerinde araçların ani fren etkilerinden doğabilecek yatay kuvvetlere ve küçük sismik etkileri karşılayabilecek başlangıç rijitliğine sahip olması, aynı zamanda üst tabliyeyi taşıyıcı ayaklardan ayırmak için gerekli esnekliği ve enerji dağıtma mekanizmasını tek bir birim içerisinde barındırması ve en önemlisi depremden sonra tabliyeyi başlangıç konumuna getirecek bir geri döndürücü bir kuvvetin varlığı, kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin (LRB) köprülerde yaygın kullanımını mümkün kılmaktadır.

## **7.2. A.B.D' de Sismik İzolasyon Uygulamaları**

A.B.D' de sismik olarak izole edilmiş köprü sayısı bina sayısından yaklaşık dört kat fazladır. İzole edilen yapılar ayrıca var olan yapıların güçlendirilmesi ve yeni inşaatlar olarak ikiye ayrılabilir. A.B.D' de sismik izolasyon tekniği ile inşa edilen yapılar çoğunlukla kritik konutlar, hastaneler ve yüksek teknoloji enstitüleri gibi pahalı ve kıymetli cihaz ve donanımların bulunduğu binalardır.

Sismik izolasyon yapılmış yapıların sayısı günden güne artış göstermektedir. Örnek olarak 1989'da sadece 5 adet binada ve 6 adet köprüde bu tasarım tekniği uygulanmış olmasına karşın, 1990'da bu rakam binalarda 20'ye köprülerde 50'ye kadar yükseliş göstermiştir (Şekil 7.1) [8].



**Şekil 7.1:** Amerika'daki sismik izolasyon uygulamalarının yapılara ve köprülere göre dağılım oranları ([8]'den alınmıştır.)

A.B.D'de sismik izolasyon uygulanmış bina adedi yaklaşık olarak 50'nin üzerindedir. Bu sayı köprülerde 200 ve üzeridir.

### 7.2.1. The Foothill Communities Law and Justice Center

Şekil 7.2'de gösterilen San Bernardina' da bulunan bu yapı dört katlı çelik çerçevesiz ekzantiriste bir binadır. Ayrıca A.B.D' deki ilk sismik izolasyon tekniğinin uygulandığı yapı özelliğini taşır. Binanın maliyeti yaklaşık 30 milyon \$'dır ve dünyadaki ilk HDRB izolatörlerinin (98 adet) kullanıldığı bir proje niteliğini taşır. Bina, yaklaşık 15,800 m<sup>2</sup> alana yayılmış ve San Andreas fayına 21 km, Los Angeles merkezine yaklaşık 100 km uzaklıkta, sismik tehlike kapasitesi bir hayli yüksek bir alana kurulmuştur. Üst yapı binanın bazı açıklıklarında çapraz bağlantı elemanları (Braced Frame) tarafından yatay yönde rijitleştirilmiş çelik çerçeve sisteminden oluşmaktadır. Bina bir bodrum, izolasyon seviyesindeki alt bodrum ve bunlar üzerinde dört kattan oluşmaktadır. Üstelik potansiyel burulma etkilerini hesaba katarak izolasyon seviyesinde büyük deplasmanlara izin verebilmek için yapının köşelerindeki izolatörler için 40 cm bir sismik boşluk sağlanmıştır.

Yapımına 1994'te başlanmış ve yaklaşık olarak tamamlanması bir yıl sürmüştür. Bina Richter ölçeği ile 8,3 büyüklüğünde bir depreme karşı koyabilecek şekilde tasarlanmış ve inşa edilmiştir. 1990 Upland depremi (5,5 Richter büyüklüğü) sonrasında yapıda hiçbir yapısal hasara rastlanılmamıştır.



**Şekil 7.2:** The Foothill Communities Law And Justice Center ([32]'den alınmıştır.)

### 7.2.2. The Salt Lake City and County binası

The Salt Lake City binası (Şekil 7.3) sismik izolasyon yapılmış ilk tarihi yapı özelliğini taşımaktadır. Plan görünümü  $80 \times 40 \text{ m}^2$ , ortalama ağırlığı 34,000 ton ve toplam beş kat olan bu tarihi yapı 19. yüzyıl sonlarına doğru taş duvar, tuğla ve kum taşından inşa edildi.



**Şekil 7.3:** Salt Lake City binası ([33]'den alınmıştır.)

Plandaki boyutu  $4 \text{ m}^2$  olan, 69 m yüksekliğinde ve 12 katlı saat kulesinin alanı (yapının merkezine konuşturulmuş) aynı zamanda desteklenmemiş taş duvarlardan oluşturulmuştur. Büyük temel sistemi ve yapı arasına 447 adet elastomerik mesnet monte edilmesi ile temel izolasyonu sağlanmıştır (208 LRB, 239 RB).

Kule için rüzgar yüklerini hesaba katmak için dış duvarların altlarına başlangıç rijitliği yüksek olan LRB mesnetleri kullanıldı. Yapı çevresinde, yalıtım seviyesinde görelî deplasman sağlayacak 30 cm'lik bir sismik boşluk oluşturulması için bir betonarme istinat duvarı teşkil edildi. 1989 yılında tamamlanan binanın güçlendirme maliyeti 30 milyon \$'dır.

Sismik izolasyon, diğêr güçlendirme yöntemleri arasında mimari yönden estetik ve üç alternatif güçlendirme planı içerisinde, kuvvetli bir deprem sonrasında hasarı azaltmada en etkili yol olarak seçildi. Bina Wasatch fayına 2 mil uzaklıkta, yüksek sismik potansiyeli olan bir bölgededir. Sismik izolasyon sayesinde sismik kuvvetlerin neden olduğu etki 6 kat azaltılmış ve bu nedenle klasik güçlendirme yöntemleri elenmiştir.

Yapı, değışken deprem kayıtları ile geniş tabanlı bir dinamik analize tabi tutulmuştur. Analizin amacı; maksimum zemin ivmesi 0,20 g olan olası bir depremde taban kesme kuvveti ve deplasman limitlerini belirlemek, aynı zamanda maksimum ivmesi 0,40 g olan bir deprem için izolatörlerin stabilitesini gözlemlemek olmuştur. Lineer olmayan (non-linear) analizlerin sonuçları yapısal kapasitenin kontrolü için kullanılmıştır. Zemin salınımının farklı türlerini, deprem hareketinin doğrultularının değışimi, zeminin titreşim seviyesi, kütle ekzantiristesesi ve duvarların rijitliğindeki değışimin etkileri üzerinde bir dizi non-linear analiz gerçekleştirildi. Gerçekleştirilen simülasyonlarda tasarım zemin ivmesi 0,20 g için yapının elastik sınırlar içerisinde salınım yaptığı ve hasar görmeden bu tür zemin ivmesine sahip bir depreme rahatlıkla karşı koyabileceği hesaplar ile gösterilmiştir.

### **7.2.3. Güney California üniversite hastane binası**

17 Temmuz 1994 Northridge depremi (6,7 Richter ölçeği) 61 kişinin ölümüne ve 9000'den fazla insanın yaralanmasına neden olmuştur. Eğer deprem sabah saatleri (4:31 a.m) değılde gündüz işgünü saatlerinde meydana gelse idi yaralıların sayısı bu rakamdan çok daha fazla olabilirdi. Depremden sonra hasar gören yapıların yeniden yapılanma maliyeti 800 milyon \$, hasar maliyeti 20-50 milyon \$ arasında olduğu tesbit edilmiştir [8]. Northridge depremi aralarında hastane binalarında bulunduğu çok sayıda yapıyı önemli bir şekilde hasara uğrattı (Los Angeles). The USC (The University Hospital of Southern California) hastanesi (Şekil 7.4) depremin merkez üssünden 36 km uzaklıkta bulunmasına karşın, yapısal hasar görmeksizin hizmetine



devam etmiştir. Aksine klasik yöntemler ile tasarlanan yapılar bu depremde oldukça yıkıcı hasarlar almışlardır. Bunun nedeni USC hastane binasında sismik izolasyonun kullanılması ile zemin ivmesi ve neden olduğu sismik kuvvetlerin % 65 oranında azaltılması sağlanmıştır. 1991 yılında inşaatı tamamlanan USC üniversite hastanesi temelinde toplam 149 adet (68 LRB ve 81 RB) elastomer mesnet kullanılarak zeminden izole edilmiştir [19].



**Şekil 7.4:** Güney California üniversite hastanesi ([33]'den alınmıştır.)

Önceden hazırlanan ve California Strong Motion Instrumentation Program tarafından yerleştirilen ivme ölçerler, sismik izolasyonun etkinliğini göstermekle kalmamış aynı zamanda kullanımını teşvik etmiştir. Yapı, zemin ivmesini büyütme yerine, kaydedilen pik zemin ivmesinden çok daha az kat ivmelerine maruz kalmıştır. Kuzey-Güney yönünde en kuvvetli kayıtların elde edildiği zemin ve temeldeki ivme değerleri sırası ile 0,49 ve 0,37 g olmuştur. Maksimum kat ivmeleri sırası ile 0,13 ve 0,21 g olarak temelde ve çatı katında kaydedilmiştir. Zemin ivmesi ile ilgili azaltım değerleri 0,35 ve 0,57 olarak hesaplanabilir [19].

Bu binanın göstermiş olduğu performansın aksine, klasik tasarım yöntemleri ile inşa edilen The Olive View hastanesi depremi, temel seviyesinde 0,82 g olan ivme değerini 2,8 kat büyütürken en üst kat ivmesini 2,31 g gibi çok büyük bir ivme ile atlatmıştır. Olive View hastanesi'nin büyütme oranı, The USC hastanesinin büyütme oranının tam 5 katına eşittir.

Northridge depreminde serbest yüzeyde ölçülen düşey ivme 0,85 g olmasına karşın, The USC hastane binasının serbest yüzeyde kaydedilen düşey ivmesi 0,09 g'yi

geçmemiştir. Yapı temelinde izolasyon seviyesi altındaki iki adet düşey kayıt ölçerlerdeki pik zemin ivmeleri 0,07 ve 0,09 g olarak ölçülmüştür [20].

İlgili pik düşey zemin ivmelerinin %114 ve %144 büyütmesiyle bina içerisinde kaydedilen maksimum düşey ivmeler sırası ile 0,08 ve 0,13 g'dir. Kayıtlar ve bununla ilişkilendirilmiş deplasmanlardan, düşey yönlü hareketlerin izolasyon sistemi tarafından çok fazla büyütülmediğini ve sismik taban yalıtım tekniği kullanılan yapının tepkisinin, düşey yönlü zemin hareketleri ile önemli ölçüde değişmediğini göstermiştir.

USC üniversite hastanesi sismik izolasyon sayesinde başarılı bir şekilde korunmuş olmasına karşın, bu hastaneye yakın 10 adet hastanenin boşaltılmasını zorunlu hale gelmesini sağlayan ağır hasarlara maruz kalmıştır. Buna örnek olarak The USC hastanesine bir km uzaklıkta olan Los Angeles County General hastane kompleksi tamamı ile operasyonel faaliyetlerine son vererek boşaltılmak zorunda kalmış ve toplam 400 milyon \$ hasar meydana gelmiştir.

#### **7.2.4. San Francisco belediye binası**

530 adet elastomer mesnedin kullanıldığı San Francisco Belediye binası (Şekil 7.5) dünyadaki en büyük sismik güçlendirmenin yapıldığı binadır. 1912 yılında inşa edilen yapı 1989 Loma Prieta depreminde hasara uğramıştır. Amaç, yapının sismik kapasitesini arttırırken aynı zamanda mimari özelliklerini mümkün olduğunca korumaktır. Böylelikle, 90 m yüksekliğinde çelik çerçeve sistemle iskeleti oluşturulan yapının beş katının sismik güçlendirilmesinde sismik izolasyon tekniğinin kullanılmasına karar verildi. Güçlendirme çalışmaları üst yapının dayanımını arttırmak için bina içerisinde projelendirilen yeni perde duvarların teşkil edilmesi ile başlamıştır. Yalıtım düzlemi binanın temel seviyesinin hemen üzerinde oluşturulmuştur. Yapı çevresinde bırakılan sismik boşluk DBE düzeyi deprem (0,4g) için üst yapının yaklaşık 45-66 cm hareketine imkan verecek şekilde 71 cm olarak tasarlandı. Taban yalıtım tekniği uygulanmadan önceki serbest titreşim periyodu 0,9 sn olan binanın güçlendirme sonrası periyodu 2,5 sn'ye ötelenmiştir [21].

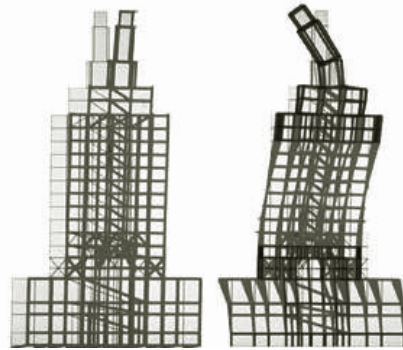


Şekil 7.5: San Francisco belediye binası ([33]'den alınmıştır.)

### 7.2.5. Oakland belediye binası

1914'te yapımı tamamlanan Oakland belediye binası (Şekil 7.6) 18 katlı, 99 m yüksekliğinde ve yaklaşık 15,000 m<sup>2</sup> bir alana kurulmuş A.B.D' deki ilk yüksek yapı özelliğini taşımaktadır. Ayrıca, zamanındaki ilk en yüksek sismik izolasyon ile güçlendirilmesi yapılan tek yapıdır [12]. Yapı Loma Prieta depremini büyük yapısal hasarlar ile atlattıktan sonra dolgu duvarlar ile inşa edilen çelik çerçeve binanın güçlendirilmesi ve yenileme gereksinimleri gündeme gelmiştir.

Yapı düşey yönde 3 katı temel, 10 katı ofis kulesi, 2 katı saat kulesinin temeli ve diğer üç katıda saat kulesinden meydana gelmektedir. Yapı toplam 42 adet kurşun gövdeli izolatör ve 69 adet kauçuk izolatör (kurşun çekirdeksiz) kullanılarak zeminden izole edilmiştir. Beton perde duvarlar ile üst yapının dayanımı artırılmıştır. Üst yapı ile temel arasındaki gerekli olan sismik boşluğu sağlamak için bina çevresine yeni istinat duvarları inşa edilmiştir. 1994 yılında güçlendirmesi tamamlanan binanın toplam güçlendirme maliyeti 48 milyon \$'dır.



Şekil 7.6: Oakland belediye binası ve dinamik analizde kullanılan mod şekilleri ([33]'den alınmıştır.)

### 7.2.6. Los Angeles belediye binası

Şekil 7.7’de gösterilen 32 katlı ve 83,000 m<sup>2</sup> oturma alanına sahip Los Angeles belediye binası herhangi bir depreme karşı tasarım gereksinimi duyulmaksızın 1926 yılında inşa edildi. Yapı, büyüklüğü değişken olan birçok güçlü depremde önemli hasara uğramış ve güçlendirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. 1994 yılında Northridge depremi meydana gelmiş ve bu deprem üzerine yapıda meydana gelen hasarlardan dolayı binanın sismik yöntemler ile güçlendirilmesine karar verilmiştir.

Hedeflenen güçlendirme stratejisi, yapının eşsiz mimari özelliklerini ve yapısal tasarım detaylarını korurken, binanın depreme karşı dayanımını arttırmaya yönelik önlem alınmasını sağlamaktı. Yapının sismik güçlendirilmesi için 3 farklı plan düşünülmüştür. Planlardan ikisi betonarme perde duvarlar ile yapının dayanımını artırılması, üçüncü seçenek ise sismik izolasyon yönteminin kullanılmasıydı. Klasik yöntemler ile güçlendirme planları, sismik kapasite ihtiyacını büyük ölçüde arttıran, binanın rijitliğinin ve dayanımını arttıracak ek yapısal taşıyıcı elemanların sisteme eklenmesi gereksinimine göre tasarlandı. Tam tersine, sismik izolasyon projesi şiddetli bir depremde yapıyı hareketli zeminden ayırarak üst yapıya zemin tarafından aktarılan sismik kuvvetleri azaltmayı hedeflemekteydi.

Tüm ayrıntılı analizler neticesinde, sismik izolasyon tekniği diğer iki klasik tasarım yöntemine oranla performans ve ekonomik boyutunda çok daha etkili olduğuna karar verildi. Bu üç farklı güçlendirme stratejisinin değerlendirilmesi göreceli kat ötelemeleri ve katlara etkiyen ivmeler üzerine yoğunlaştırıldı.



Şekil 7.7: Los Angeles belediye binası ([34]’den alınmıştır.)

Sismik izolasyon yöntemi kabul edildikten sonra güçlendirilme işlerine 1997’de başlandı ve yaklaşık 4 yıl sürdü. Yapı 416 adet HDRB izolatörleri ile ve 90 adet kayıcı mesnet kullanılarak zeminden izole edildi. İzolasyon düzlemi, varolan yapı temeli ile bodrum kat seviyesi arasında teşkil edildi. Kullanılan izolatörlerin sınırlı çekme gerilme kapasitelerinden dolayı, mesnetleri çekme gerilmelerine maruz bırakabilecek yüklemeler olmaksızın, bu tür problemlerden kaçınabilmek için mesnetlerin sınırlandırılmış uplift sağlamasında her bir izolatörde gevşek bir birleşim detayı kullanıldı. Tüm izolatörleri bir arada tutmak ve izolasyon sistemi ile üst yapı arasında düzgün bir yük dağılımı sağlamak amacı ile var olan bodrum kat döşemesi 20 cm’lik betonarme plak ile değiştirildi. Hem yapısal elemanlar arasındaki yük transferini arttırmak hemde gerekli dayanım ve rijitliği sağlamak için üst yapı ve temelde bazı güçlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca, yapının enerji dağıtma kapasitesini arttırmak için izolasyon seviyesine 52 adet viskoz sönümleyici ilave edilmiştir. Diğer 12 adet sönümleyici, yüksek modların yüksek enerji içeriklerinin sönümlenmesi için kulenin 24. ve 25. katları arasına teşkil edilmiştir.

### **7.3. Japonya’ da Sismik İzolasyon Uygulamaları**

Japonya’da, uygulanan ilk sismik izolasyonlu yapı iki katlı betonarme bir konuttur. Üst yapı, temelindeki 6 adet kolon altlarına yerleştirilen 6 adet elastomer izolatör üzerine mesnetlenmiştir. Dört katlı, moment aktarımlı betonarme çerçeveden oluşan ilk büyük ölçekli sismik izolasyon yapılmış yapı 1986 yılında tamamlanmıştır. Günümüzde büyük çoğunluğu Tokyo merkezli olan sismik izolasyon tekniğinin uygulandığı 75’den fazla bina, 20 adet köprü bulunmaktadır. Son birkaç yıldır sismik izolasyon tekniğinin kullanımında önemli bir artış gözlenmektedir. Sismik izolasyonun kullanımı için Japonya iskan bakanlığındaki uygulama sayısı yüzler mertebesinde dir. 1998’in ortalarına kadar iskan bakanlığınca onaylanmış sismik izolasyon uygulanmış bina sayısı 500’ü geçmiştir [12]. Japonya’da yapılarda sismik izolasyon sistemini kurmak için iskan bakanlığından alınan, onaylanmış ve gözden geçirilmiş bir komite kararı almak gerekmektedir.

Özellikle son zamanlarda meydana gelen şiddetli ve yıkıcı depremlerde sismik izolasyon uygulanmış yapıların olağan üstü performans seviyeleri gözlemlendikten sonra her yıl sismik izolasyon kullanımı için bakanlık tarafından onaylanan ve verilen izin sayısı yaklaşık 200 ile 300 arasında değiştiği varsayılmaktadır.

Japonya'daki sismik izole edilen yapıların büyük çoğunluğu özel konutlar ve ofis binalarıdır. Japonlar, şiddetli depremlerde yapılarının üstün performans sağlaması ve depremi mümkün olduğunca hasarsız atlarmak için sismik izolasyon sisteminin yapıya getirdiği başlangıç ek maliyetlerini karşılamak konusunda oldukça istekli olduklarını söylemek gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Ancak, Japonya'da sismik izolasyon tekniğinin Amerika'daki uygulama alanlarının aksine, tarihi veya eski yapıların güçlendirilmesi projelerinde bu tasarım yöntemi çok nadir kullanılmaktadır.

Sismik izolasyon yöntemi ilk olarak 1924 yılında bilyalı mesnet sistemleri üzerinde üst yapıyı zeminden izole edilmesi şeklinde önerilmiştir [8]. 1970'li yılların sonlarında kısmi izolasyon sistemleri viskoz sönümleyicilerle birleştirilerek 100'den fazla köprüde kullanılmıştır. Sismik izolasyon yapılmış yapıların tümünde en yaygın kullanılan sistemlerden biri kurşun gövdeli elastomer mesnetler veya ek mekaniksel sönümleyicilerle kullanılmakta olan doğal kauçuktan üretilen elastomer mesnetlerden oluşmaktadır.

Japonya'da temel yalıtımı uygulanan birçok yapıda deprem kayıtlarını ölçmek için ve yapı performansını gözlemek için tamamiyle donatılmaktadırlar. Böylelikle, Japonya'daki sismik olayların oluş sıklıklarından dolayı, sismik izolasyon yapılmış yapıların göstermiş oldukları performans seviyeleri için önemli bilgiler toplanmaktadır. Her ne zaman izole edilmiş bir yapının davranışı gözlemlendiğinde ve bitişik bir ankastre mesnetli yapı ile karşılaştırıldığında, özellikle yer hareketlerinin büyük ivme değerleri için iki yapının kıyaslanması sismik izolasyon yönteminin üstünlüğü ile teyid edilmektedir [12]. Bu sonuç sismik izolasyon sisteminin Japonya'da daha geniş alanlarda kullanımına neden olmaktadır. Günümüzde The West Japan Postal Computer Center 47.000 m<sup>2</sup>'lik bir alanda dünyanın en geniş oturma alanına sahip sismik izolasyon yapılmış yapısıdır ve bu yapı 1995 büyük Kobe depremini yapısal hasar görmeksizin atlattır.

### **7.3.1. Tohoku elektrik güç şirketi bilgisayar merkezi**

Tohoku Elektrik Güç Şirketi Bilgisayar Merkezi (Şekil 7.8), Sendai, Miyoko Province sınırları içerisinde bulunmaktadır. 6 katlı bilgisayar merkezi, elektrik güç ünitesine bağlı kritik donanımlara ev sahipliği yapması için inşa edildi. 1990 yılında tamamlandığında 10.000 m<sup>2</sup> kat alanı ile Japonya'daki sismik izolasyon uygulanmış yapılar içerisinde en büyüğü olacaktır. Bina, herbiri 400 ile 800 ton arasında düşey

yük taşıyabilen, çapları 0,90 ile 1,20 m arasında değişim gösteren 40 adet yüksek sönümlü elastomer mesnetleri (HDRB) üzerine mesnetlendi. Temel izolasyon sistemi, 20 milyon \$ olan toplam yapı maliyetinin %5'i gibi ek bir yapısal maliyet getirmiştir. İzolatörlerin kolon altlarına yerleştirilme işlemi zahmet istemeyen bir yöntemle yapıldı ve yapının inşaa süreci sadece 1 yıl sürmüştür.



**Şekil 7.8:** Tohoku elektrik güç şirketi bilgisayar merkezi ([32]'den alınmıştır.)

### 7.3.2. C-1 binası

Şekil 7.9'da görülen C-1 binası bir bilgisayar donanım merkezidir ve yapımı Fuchi City (Tokyo) sınırları içerisinde 1992 yılında tamamlanmıştır. 1992'de tamamlandığında, C-1 binası dünyadaki sismik izolasyon yapılmış yapılar arasında en büyüğü olma ünvanını eline geçirmiştir.



**Şekil 7.9:** C-1 binası ([30]'dan alınmıştır.)

Yapı yedi katlı, zemin seviyesinden 41,4 m yükseklikte, beton ve çeliğin birlikte kullanıldığı kompozit betonarme bir yapıdır. Toplam ağırlığı 62,800 ton olan bu yapı, izolasyon seviyesi üzerindeki toplam üst yapı kat alanı 37,85 m<sup>2</sup>'dir. Hassas bilgisayar donanımlarına bina ev sahipliği yapmaktadır. Binanın taşıyıcı sistemini ve donanımını korumak detaylı bir tasarım gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Çapları

180 ile 200 mm arasında değişen kurşun çekirdek ile beraber kullanılan ve çapları 1,1 ve 1,5 m olan 68 adet elastomer mesnet binayı mesnetlemek için kullanılmıştır. Çapı 1,5 m olan dairesel biçimli izolatörler, dünya genelinde kullanılan kurşun gövdeli elastomer mesnetler arasında en büyük çapa sahip olanlardır.

İzolatörler 15 m'ye 15 m aks aralıklarında düzenlendikleri için oldukça büyük yükleri taşıyabilme kapasitesine sahiptirler. Deprem şiddetlerine bağlı olmak koşulu ile üst yapının etkin periyodu 1,4 ile 3,0 sn arasında değişim göstermektedir. Maksimum zemin hızının üç seviyesi için (Standart 25 cm/sn, Standart 50 cm/sn, Standart 75 cm/sn) dinamik analizler gerçekleştirildi.

3 sn olan etkin periyot, ikinci seviye standart zemin hızının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Yapının ayrıca rüzgar yüklerine karşı güvenliğini sağlamak için taban kesme kuvveti izolasyon sisteminde kullanılan izolatörlerin akma noktası dayanımlarının % 43'ünü oluşturmaktadır.

#### **7.4. Yeni Zelanda' da Sismik İzolasyon Uygulamaları**

Japonya ile birlikte, Yeni Zelanda sismik izolasyon yöntemine öncelik veren ülkelerden birisidir. Sismik izolasyonun bir tipi 1929 tarihlerine kadar uzanmış olmasına rağmen, metodun pratiksel uygulamaları izole edilmiş bir köprünün inşasıyla 1973 yılında başlamıştır [8]. Wellington şehrindeki The William Clayton binası, 1981 yılında Yeni Zelanda'daki ilk sismik izolasyon tekniğinin uygulandığı binadır. Özellikle diğer yalıtım sistemleri üzerinde baskınlığı ile ön plana çıkan ve köprülerde oldukça yaygın kullanılan LRB izolatörleri, Yeni Zelanda'da da en yaygın kullanılan sismik izolasyon sistemini oluşturmaktadır.

Günümüzde Yeni Zelanda sınırları içerisinde yaklaşık olarak 10 adet sismik izolasyon sistemi kullanılmış bina ve 50'ye yakın köprünün inşa edildiği bilinmektedir. Bu yapılardaki artış, oldukça yüksek sismik tehlike potansiyeline sahip alanlarda depreme karşı koruma için bu yenilikçi yöntemin geniş çevreler tarafından kabul gördüğünün bir ispatı olarak karşımıza çıkmaktadır.

##### **7.4.1. The William Clayton binası**

Wellington kentindeki The William Clayton binası (Şekil 7.10), dünyadaki ilk kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin kullanıldığı ve aynı zamanda sismik



izolasyon tekniğinin uygulandığı Yeni Zelanda'daki ilk bina özelliğini taşır. Yapımına 1978'de başlanılmış ve 1982 yılında tamamlanmıştır.

97 metreye 40 metre plan görünümüne sahip olan 4 katlı betonarme bina 80 adet kare şekilli elastomer izolatörler üzerine mesnetlenmiştir. Binanın her bir kolunu 60x60x20,7 cm boyutlarında bir elastomer mesnet içerisindeki 10,5 cm çapında kurşun silindir gövde ile desteklenmektedir. Her bir mesnedin taşıdığı düşey yük 1.0 ile 2.0 MN arasında değişim göstermektedir. Yapı çevresindeki bir sismik boşluk, yapısal olmayan elemanların özel tasarım detayları ve izolasyon seviyesini kesen iç donanım, herhangi bir yatay yönde üst yapının 15 cm'lik bir göreceli deplasmanı yapmasına olanak sağlamaktadır.

İzolasyon sisteminin akma dayanımı yapı ağırlığının %7'si olmasına karşın, yapının etkili periyodu uygulanan kuvvetlere ve izin verilen deplasman miktarına bağlı olarak 0,8 ile 2,0 sn arasındadır.



**Şekil 7.10:** William Clayton binası ([30]'dan alınmıştır.)

Aktif halde bulunan Wellington fayına yapının yakınlığından ve yapım sürecindeki dönemde sismik izolasyonun sınırlı deneyimlerinden dolayı, izole edilmiş bu yapının tasarımına oldukça fazla önem verilmiştir.

#### **7.4.2. Wellington merkezi polis istasyonu**

Şekil 7.12'de görülen 10 katlı, 38x31 m<sup>2</sup> plan görünümüne sahip betonarme bina şiddetli bir deprem sonrasında tamamıyla operasyonel faaliyetlerine devam edebilmeyi ve acil durumlarda fonksiyonelliğini eksiksiz yerine getirebilmesini sağlamak amacı ile yapının tasarımında sismik izolasyon yönteminin kullanılması

uygun bulunmuştur. Yapımına başlanmadan önce üç farklı tasarım planı göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar arasında sismik izolasyon, depreme karşı yapıya yüksek dayanım kapasitesi ve toplam yapısal maliyetinde %10'luk bir azaltım sağlaması bakımından en uygun tasarım metodu olarak seçilmiştir. Diğer depreme dayanıklı klasik yapı tasarım yöntemleri, yüksek dayanım ve katlar arası göreceli deplasmanları karşılayabilmek için büyük yapısal taşıyıcı elemanlara gereksinim duydukları için bu derecede önemli bir yapıda uygulanmasında sakıncalı görülmüştür.

Sismik izolasyon, binanın plan boyutları ve yüksekliğinden dolayı elastomer mesnetleri ile uygulanamadı. Bu nedenle, farklı bir izolasyon planı düşünüldü. Çevre zeminden yatay yönlü bir ayırma boşluğu sağlamak için geniş boyutlardaki çerçevelerle çevrilmiş uzun kazıklar kurşun içerikli enerji dağıtım mekanizmaları ile birleştirilerek kullanılmıştır (Şekil 7.11).



**Şekil 7.11:** Wellington merkezi polis istasyonu temelindeki 20m uzunluğunda esnek kazıklar ([30]'dan alınmıştır.)

Bu enerji dağıtım mekanizmaları, kurşunun plastik deformasyon yapması ile meydana getirdiği histerik enerji sönmüleme döngüsü üzerine kurulmuştur. Ayrıca temelde kullanılan bu kazıklar, yapının oturduğu zayıf zeminden 15 metre aşağıdaki sağlam kayaya ulaşmak için yapı temelinde gerekli görülmüştür. Yapı, aktif durumda bulunan Wellington fayının sadece birkaç yüz metre ötesinde inşa edilmiştir. Buna rağmen, uygulanan sismik izolasyon planı sadece başlangıç maliyetlerin azaltımına yol açmamış aynı zamanda şiddetli bir depremde yapının operasyonel faaliyetlerinin devamını sağlamada güvence sağlamıştır.



**Şekil 7.12:** Wellington merkezi polis istasyon binası ve temel yalıtım elemanları ([30]'dan alınmıştır.)

#### **7.4.3. Yeni Zelanda parlamento binası**

165 milyon dolar harcanarak güçlendirilmesi yapılan Yeni Zelanda parlamento binası (Şekil 7.13) ülkenin en büyük projesi olarak kayıtlara geçmiştir. 1912 ve 1898 yıllarında inşa edilen iki tarihi yapı (Parliament House ve Parliament Library) can güvenliğinin sağlanması ve yapısal hasarlardan kaçınılması bakımından büyük şiddetli depremlere karşı yapının yüksek performans sergilemesini sağlamak için sismik güçlendirilmesi gerekmektedir. Bölgenin potansiyel olarak yüksek sismik karakteristiğinden ve binaların aktif durumda olan Wellington fayına yakınlığı düşünülerek güçlendirme zorunlu bir hal almıştır. İki yapının tarihi ve mimari değerlerinin korunması, güçlendirme stratejisinde önemli kararların alınmasında etkili olmuştur.

Sismik izolasyon tekniğinin yapıların mimari dokusu üzerindeki olumlu etkisinden dolayı, uygulanması düşünülen birçok tasarım stratejisi arasından bu tekniğin kullanılması daha uygun görülmüştür. Bu stratejiye göre her iki bina, çoğunluğunda kurşun çekirdek bulunan yüksek sönümlü kauçuk izolatörlerden oluşan hibrit tip sistem üzerine mesnetlenmiştir. Özellikle kullanılan 400 mesnedin %75'inden fazlası kurşun çekirdekli yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerden oluşturulmuştur. Hibrit tip izolasyon sistemi ilk defa bu tür bir projede kullanılmıştır.

Kat diyaframları ve iç duvarların rijitleştirilmesi, aynı zamanda temel seviyesindeki kolonların ve duvarların güçlendirilmesi tamamlandıktan sonra izolasyon sistemi 5 katlı parlamento binasının temelinde monte edilmiştir. İzolatörlerin yerleştirilmesi

sürecinde temelde bulunan 7 ton ağırlığındaki bloklar derece derece kesilerek yerlerinden çıkarılmış ve eski temelin yerine yeni bir betonarme temel oluşturulması ile tamamlanmıştır.



**Şekil 7.13:** Yeni Zelanda parlamento binası ([33]'den alınmıştır.)

İkinci tarihi yapı olan Parliament Library parlamento binası gibi temel seviyesinde projelendirilen hibrit tip izolasyon sistemi ile izole edilmiştir. Yeterli esnekliği sağlamak için temel seviyesindeki duvarlara 400'ün üzerinde izolatör yerleştirilmiştir. Hibrit tip izolasyon sisteminin simülasyonları ve izole edilen yapının göstermiş olduğu performans neticesinde bu tip izolasyon sisteminin, yaygın olarak kullanılan kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerden oluşan izolasyon sistemine (LRB) oranla yapı davranışı üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, analiz edilen modelin ve orijinal mesnetlerin rijitlik karakteristiklerinin uyumluluğunu sağlamak için deneysel testler oldukça iyi sonuçlar alınarak gerçekleştirilmiştir. Önemli ölçüde sismik kuvvetleri ve görelî kat ötelemelerini azaltarak her iki binanın etkin periyodu 0,50 ile 3,5 sn arasında arttırılmıştır. Geleneksel güçlendirme seçenekleri % 3 oranında daha ucuz olmasına rağmen, yapıya depreme karşı daha yüksek performans özellikleri sağlayan ve güçlendirme sürecinde her iki binanın mimari özelliklerinin yitirilmesine yol açabilecek katlar arası taşıyıcı sistem elemanlarının modifiye edilmesine ihtiyaç duyulmaksızın en etkili tasarım tekniği olarak sismik izolasyon sistemi seçilmiştir. İzole edilen bu iki yapının Richter ölçeği ile 7.5 büyüklüğünde bir depreme karşı koyabileceği hesaplar ile ispatlanmıştır.

## **7.5. İtalya’da Sismik İzolasyon Uygulamaları**

Avrupa’da özellikle otoyollardaki köprülerde sismik izolasyon sistemlerinin en çok kullanıldığı ülke İtalya’dır. GLIS isimli bir çalışma grubu sismik izolasyon uygulaması ve araştırmalarını desteklemek için 1989 yılında kurulmuştur. GLIS, sismik izolasyon uygulanmış yapıların tasarımını yapan mühendislere teknik destek sağlamasının yanında sismik izolasyonun kullanımını teşvik etmek, ilgili yönetmeliklerin ve standartların gelişimini desteklemek, sismik izolasyon sistemleri üzerine konferanslar düzenlemek, önerilen sismik izolasyon projelerinin onaylanması ve gerçekleştirilmesinde rol oynamakta ve bu teknik üzerine sayısal ve deneysel çalışmaları yürütmektedir. Bu nedenle GLIS sismik izolasyon kullanımının yaygınlaşmasında önemli bir katkı sağlamaktadır.

İtalya genelinde 30’den fazla sismik izolasyon uygulanmış yapı ve yaklaşık 200 adet köprü olduğu varsayılmaktadır. Ençok yaygın kullanılan izolasyon sistemi yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerden (HDRB) oluşmaktadır. Ancona’da yeni ulusal telekomünikasyon şirketinin idare merkezi olan SIP Complex binası, sismik izolasyon uygulanmış yapılardan biridir. Bu 7 katlı yapı, yüksekliği 19 m ve çapı 50 ile 60 cm arasında değişen 297 adet yüksek sönümlü kauçuk izolatör üzerine mesnetlenmiştir. SIP Complex’in inşası 1989’da başlanıp, 1992 yılında tamamlanmıştır [8].

## **7.6. Türkiye’de Sismik İzolasyon Uygulamaları**

### **7.6.1. Antalya havalimanı**

Sismik izolasyon uygulaması olarak Şekil 7.14’de gösterilen Antalya havalimanı 1. dış hatlar terminal binası seçilmiştir. Sismik izolasyon işi süresince terminal binası tüm hizmet ve fonksiyonlarına kesintisiz olarak devam etmiştir. Hazırlanan proje sonucunda binaya en uygun sismik izolasyon yöntemi olarak seçilen kurşun çekirdekli sismik izolatörlerden 420 adet kullanılmıştır. Fiili yapım süresi 6 ay süren iş sonuçta kapasite ve adet olarak dünyanın 5. büyük sismik izolasyon projesi olarak yerini almıştır.



**Şekil 7.14:** Antalya havalimanı ([35]'den alınmıştır.)

Temel seviyesinden itibaren belli bir mesafeye yerleştirilmesi gereken monte işlemlerine kolonların askıya alınması ile başlanılmış ve kolon kesitleri elmas tel ile kesilip, kesilen parçalar yerlerinden çıkarılmıştır (Şekil 7.15). Bu parçaların kolon bünyesinden alınmasından sonra temizlik ve pürüzlendirme işlemlerine geçilmiştir.



**Şekil 7.15:** Kolonların elmas tel ile kesilip izolatörün yerleştirilmesi ([35]'den alınmıştır.)

Bu işlemler tamamlandıktan sonra izolatörler yerlerine yerleştirilmiş, alt ve üst başlıkları epoksi ile kesilen kolon kesitlerine yapıştırılmıştır. Aynı şekilde perde duvarlar zeminden ayrılıp, kayıcı mesnetler monte edilerek izolasyonu sağlanmıştır.

#### **7.6.2. Tarabya oteli güçlendirme projesi**

Dış görünümü Şekil 7.16'da verilen ve toplam oturma alanı 35.000 m<sup>2</sup> olan, Tarabya otelinin sismik güçlendirme projesi olarak mevcut üst yapının sürtülmeli sarkaç tip izolatörler üzerine mesnetlenmesi en uygun çözüm olarak belirlenmiştir. Boyutları 89x89 ve 110x110 cm<sup>2</sup> olan toplam 139 adet sürtülmeli sarkaç tip sismik izolatör

kullanılmıştır. Yük taşıma kapasiteleri 1 ton olan izolatörlerin (Şekil 7.17) toplam maliyeti 1 milyon \$, toplam güçlendirme maliyeti 4 milyon \$'a mal olmuştur. Kullanılan izolatörlerin sürtünme katsayısı  $\mu = \% 4$  olarak seçilmiştir ve üst yapının toplam deplasmanı  $D_{\max} = 32$  cm olarak tasarlanmıştır . Aşırı maliyet getirisinden dolayı iki aşamalı gerçekleştirilen güçlendirmede sadece bir kısım kolonlarda izolatörler kullanılmıştır. Yapının temel üstü 1. kat döşemesi izolasyon düzlemi olarak seçilerek yalıtım seviyesindeki kolonlarda mantolama ve yanal yönde kolonların birlikte çalışmasını sağlamak için çapraz diyagonaller yerleştirilmiştir. İzolatörler kolonlara 8 adet blon ile bağlanmış ve izolatörlerin monte edildiği kolon kesitini izolatörlere bağlayan beton karışımı olarak 28 günlük basınç dayanımı 80 MPa olan özel olarak tasarlanmış beton karışımı kullanılmıştır.



**Şekil 7.16:** Tarabya oteli (özel çekim)

Güçlendirme öncesi 14 katlı olan yapının hesap edilen en büyük doğal titreşim periyodu  $T_1 = 1,5$  sn iken güçlendirme sonrasında bu değer  $T_1 = 3$  sn mertebelerine ötelenmiştir.



**Şekil 7.17:** Kolonlara yerleştirilen sürtümlü sarkaç tip izolatör ve kolonların diyagonaller ile desteklenmesi (özel çekim)

### 7.6.3. Atatürk uluslararası havalimanı terminali

İstanbul'daki, Atatürk uluslararası havalimanı terminali (Şekil 7.18) 300 milyon \$'a mal olmuş, her yıl 14 milyon hava yolcusunun Türkiye'ye girişine imkân sağlayan, çok büyük bir yapıdır. 235,000 m<sup>2</sup> arazi üzerine kurulan hava limanının ana bölümü, 225 x 250 m<sup>2</sup> boyutunda olup, piramit şeklinde uzay kafes çatıya sahip ve çatısında üçgen şeklinde cam pencereler bulunan bir yapıdır. Bu narin çatı yapısı 130 sürtülmeli sarkaç mesnetle desteklenmiştir. Şekil 7.19'da gösterilen sürtülmeli sarkaç mesnetler, 7 m uzunluğunda kolonlar ile çatı arasında bulunmaktadır. Mesnetler, olabilecek 8 büyüklüğünde bir depreme karşı güvenlikle yapılmıştır [22].



Şekil 7.18: Atatürk havalimanı'nın dışarıdan görüntüsü ([36]'dan alınmıştır.)



Şekil 7.19: Atatürk havalimanında kullanılan bir sürtülmeli sarkaç mesnet ([36]'dan alınmıştır.)



## 8. ELASTOMER MESNETLERİN MEKANİKSEL VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ

Elastomer mesnetler kayma gerilmeleri altında esnek ve düşey yükler altında yeterince rijit olmalıdır. Mesnetlerin özellikleri, mesnedin geometrisine ve elastomer malzemenin uygun seçimi ile kontrol edilebilir. Mesnetler uygun bir güvenlik faktörü ile maksimum yatay deplasmanları göz önünde tutarak beklenen maksimum düşey yükleri ve servis yüklerini taşıyabilecek kadar yeterli genişliğe sahip olacak şekilde tasarlanmalıdır. Son durum için deformasyondan dolayı düşey yükler mesnedin aktif bir alanı ile temele aktarılır. Basınç gerilmeleri altında mesnedin burkulmasını önlemek için çelik plakalar kauçuğa yapıştırılırlar. Çelik plakaların kalınlığı ( $t_r$ ) mesnedin düşey rijitliğini belirler. Eğer kauçuk katmanların kalınlığı düşürülürse mesnedin düşey yük kapasitesi artar.

Mesnedin toplam yüksekliği  $t = n_r \times t_0$ , elastomerin mekaniksel özelliklerini göz önüne alarak gereken yatay esneklik ile belirlenir. Ortadaki kurşunun gövde çapı küçük yükler için gereken başlangıç rijitliğe göre belirlenir. Kurşun çekirdeğin alanı küçük yükler için gövdenin akma sınır gerilmesine ulaşmadan kesme kuvvetlerini güvenle aktarabilecek boyutlarda olmalıdır. Kurşun çekirdeğin akma seviyesi genellikle yapı ağırlığının % 5'i olarak tanımlanır. Yüksek sönümlü elastomer mesnetlerin (HDRB) çapı, akma dayanımı olmaksızın küçük yatay yükleri aktarabilecek şekilde aynı yöntemle seçilebilir [17]. Sonuncu olarak, mesnedin boyutları ve yeri yapının burulmasını önleyecek şekilde olmalıdır. Buna, izolasyon sisteminin rijitlik merkezi ile üst yapının kütle merkezinin çakışmasını sağlayacak şekilde kolayca ulaşılabilir. LRB ve LHDRB beraber kullanıldığında yukarıda bahsedilen merkezlerin çakışmasını sağlayacak şekilde kurşun çekirdeğin akma sınır gerilmesine ulaşmadan önceki ve sonraki durumları için özel önlem alınmalıdır.

Mesnedin mekaniksel ve sönüm özellikleri, yapının tüm ömrü boyunca sabit kalacak şekilde belirlenmelidir. Dahası tasarım detayları sonradan arızalı parçaların yenileri ile yer değiştirilmesine izin verecek şekilde oluşturulmalıdır. Mesnedi dış yüzeyden örten kalın kauçuk katmanı, antioksidanlar ve antiozonlar çevresel etkilerden

izolatörü korumaya yardımcı olmaktadır. Bir yüzyıldan daha fazla süredir köprü mesnetlerinde kullanılmakta olan doğal kauçukların şuan ki durumları, onların servis süresinin en az 100 yıl olduğunu göstermektedir.

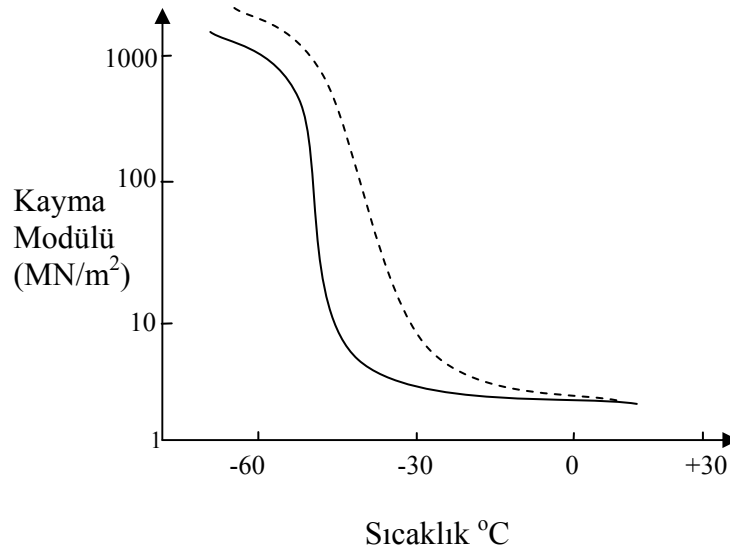
Ancak, elastomer mesnetler üzerine son yıllarda yapılan testlerde bu mesnetlerde zamanla rijitlik artışı (sertleşme) görüldüğü yönünde sonuçlar vermiştir. Son buluntular muhtemelen yaşlanma mekanizmasından kaynaklandığını ispatlar niteliktedir ve bu tür rijitlik artışları üst yapıya aktarılan kuvvetleri önemli ölçüde arttıracak düzeyde değildir. Sonuç olarak, elastomer mesnetler üzerinde yapılan sarsma tablası testleri, elastomer mesnetlerin kuvvet-yer değiştirme özelliklerinin testler boyunca stabil kaldığını göstermektedir.

Mesnetlerin üretiminde kullanılan kauçuk, yüklemmeden sonraki orijinal boyutlarına geri dönebilme kabiliyetlerine göre sınıflandırılmaktadırlar. Bu mesnetler genellikle doğal kauçuk (NR-natural polyisopren), Neoprene (CR-chloroprene), EPDM (ethylen propylene diene monomer) veya nitrile butadiene kauçuk (NRB)'dan oluşur. Doğal kauçuk ve neoprene çok iyi bilinen malzemelerdir ve köprü mesnetlerinde geniş alanda kullanılmaktadırlar. Kimyasal birleşimi ve üretim işlevi elastomerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerini belirler. Bu kimyasal bileşim, vulcanization süreci esnasında ortaya çıkan rastgele dizilmiş uzun moleküler zincirler ve bu zincirler arasındaki çapraz bağlardan oluşmaktadır. Uzun moleküler zincirler kuvvetli kovalent çapraz bağlar ve zayıf Van der Waals bağları ile bir arada tutulurlar. Van der Waals bağları elektronların rastgele dağılımından, kovalent bağları ise atomlar arası elektronların paylaşımından oluşmaktadır.

Elastomer deforme edildikçe moleküller sıralanma eğilimi gösterir ve böylece malzemenin entropisi değişir. Elastomerlerin yüksek sünekliği entropideki bu değişim sayesinde sağlanır. Elastomerin geri döndürücü kuvveti, kayma ve elastisite modülü temelde zincirlerin tekrardan düzenlenmesi ve rastgele dizilime dönme eğiliminden kaynaklanır. Üç eksenli bir yük uygulanması halinde, zincirler arasında tekrardan dizilim gerçekleşmez ve rijitlik oldukça yüksek değerlere ulaşır; bu nedenle kauçuğun hacim modülü kayma ve elastisite modüllerinden kat kat yüksektir. Non-lineer olmasına rağmen elastomerin davranışı, uygulanan yük kaldırıldığında kendi başlangıç değerlerine ulaştığı için ve özelliklerini yitirmemesinden dolayı lineerdir. Çok küçük gerilmelerde elastomer özellikle elastik

sınırlar içinde kalırken, daha büyük gerilmelerde moleküler zincirler dizilimlerini değiştirir ve yüklemeye yönünde hizaya girer.

Elastomer mesnetlerin mekaniksel özellikleri zamana ve sıcaklığa bağlıdır, ancak problem yaratır seviyelere hiçbir zaman ulaşmamaktadır. Genellikle rijitlik ve sönüm özellikleri sıcaklık artışına paralel olarak düşüş göstermektedir. Mesnedin uzun bir süre çok düşük ısıya maruz kalması durumunda moleküler dizilimler arasında meydana gelen potansiyel kristalleşme tehlikesinden dolayı kauçukta sertleşmeler (rijitliğin artışı) gözlemlenebilmektedir. Isının çok düşük olduğu bazı bölgeler için elastomerin ısı rijitliği izolasyon sisteminin fleksibilitesini ve sonuç olarak izolasyonun etkinliğini azalttığı için ciddi bir problem yaratabilmektedir. Bu tür durumlarda, problem ayrıntısı ile göz önüne alınmalı ve çevresel koşullara uyumlu elastomer bileşimi seçilmelidir. Özellikle, Neoprene (CR) – 40 °C sıcaklıklarda oldukça sertleşmekte, kimyasal yapısı neredeyse bir camın kırılabilirlik durumuna eşdeğer bir hal almaktadır. Buna karşılık doğal kauçuk (NR) bu duruma – 55 °C’ de ulaşmaktadır [8]. Şekil 8.1’de kauçuk mesnetlerin kayma modülünün sıcaklıkla değişimi görülebilir. Düşük sıcaklıklarda elastomer mesnetler, izole edilmiş yapılardan beklenen ve tahmin edilen deprem kuvvetlerini büyütürken adeta ankastre mesnetli bir yapı davranışı göstermişçesine üst yapıya ilettebilmektedirler.



**Şekil 8.1:** Düşük sıcaklığın kauçuğun davranışına etkisi ([23]’den alınmıştır.)

Yukarıda bahsi geçen koşullara maruz kalan mesnetlerdeki rijitlik artış miktarı aşağıdaki koşullara bağlıdır [23].

- yükleme hızı
- maruz kalma süresine
- uygulanan gerilmeye
- elastomer bileşimine
- rijitlikteki artış miktarı

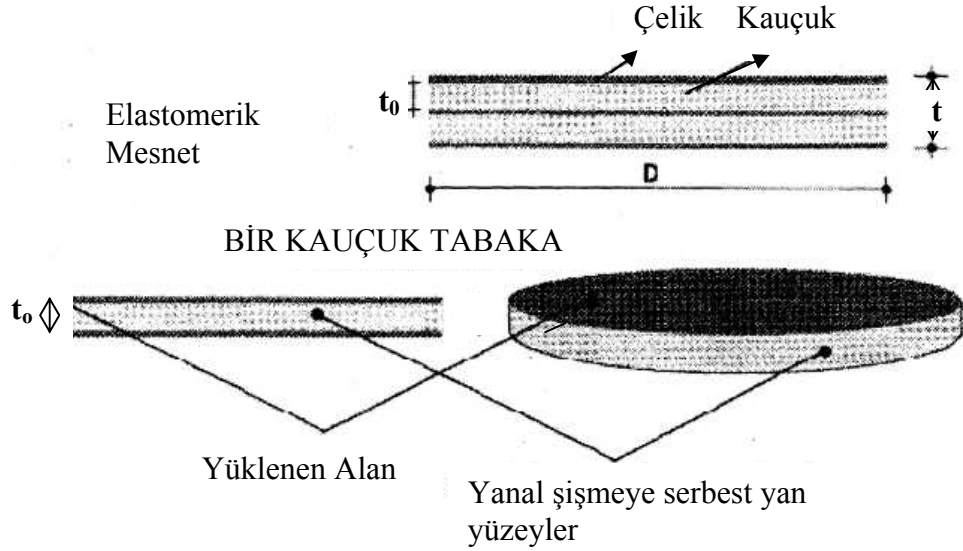
Arazide varolan farklı koşullar altında ölçülen yanlış değerlerden kaçınmak için malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığı hesaba mutlaka katılmalıdır. Yapılan deneysel çalışmalara göre deformasyon kapasitesi ve esas dayanım önemli ölçüde zamandan bağımsızdır. Elastisite ve kayma modülleri kullanılan metoda bağımlıdır. Dinamik testler, statikçe ölçülenden iki kat yüksek değerler vermektedir. Bu nedenle dinamik testlerden elde edilen ölçüm değerleri daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Elastisite ve kayma modülü sertlik testi (hardness) kullanılarak belirlenebilmektedir.

Elastomer mesnetlerin çevresel etkilere maruz kalan kısımları olan yüzeyleri yağ ve kimyasal maddelerin zararlı etkilerine karşı oldukça yüksek dayanım gösterirler. Köprülerde kullanılan elastomer mesnetler, özelliklerinde çevresel etkilerden bozulma göstermeksizin uzun sürelerden beri yaygınca kullanılmaktadır. Yapı uygulamaları dışında kauçuk, otomobillerin motor aksamlarında yağ sızıntılarını engellemek için kullanılmaktadır. Bu ise kauçuğun yağ gibi zararlı akışkanlara karşı oldukça etkili bir kimyasal yapısı olduğunun ispatlarından biridir. Yağ dışında uzun süreli ozon'a maruz kalan mesnet içinde ozon çatlakları meydana gelebilir. Bu çatlaklar büyük çoğunlukla elastomer mesnedin mekaniksel davranışında arzu edilmeyen çekme gerilmelerinin oluşumu ile meydana gelir. İmalat sürecinde kauçuk karışımına eklenen bir antiozinant maddesi sayesinde mesnet içindeki ozon çatlaklarının oluşumu engellenebilir veya kısmen azaltılabilir. Koruyucu bir başlık plakası ve kauçuk katmanlarını dışardan saran kalın bir kauçuk kabuk mesnedi su, nem, ozon ve diğer tehlikeli çevresel etkilere karşı korumak için kullanılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar, mesnedi dışardan saran kauçuk kabuğun, izolatörün yangına karşı direncini arttırmada yeterli olduğunu ispatlar nitelikte sonuçlar vermiştir.

### 8.1. Elastomer Mesnetlerin Stabilitesi ve Tasarım Hususları

Elastomer mesnetlerin mekaniksel karakteristikleri ile ilgili olan iki şekil faktörü  $S_1$  ve  $S_2$  elastik mesnetlerin geometrik özelliklerini tarif etmekte kullanılır. İlk şekil faktörü  $S_1$ , çelik plakalarla yoğunlaştırılmış kauçuk üzerindeki yük alanının tek bir kauçuk plakası alanına oranlayarak bulunur.  $S_1$ ' in uygun değer aralıkları 10 ile 20 arasında değişiklik göstermektedir [12]. Bu şekil faktörü özellikle düşey deplasmanı etkiler.  $S_1$  arttıkça düşey rijitlikte artmaktadır. Dairesel bir izolatör için  $S_1$  (Şekil 8.2) şu formülle hesaplanır [23].

$$S_1 = \frac{\text{Kauçuk tabakanın yüklü alanı}}{\text{Kauçuk tabakanın serbest alanı}} = \frac{\pi D^2}{4\pi Dt_0} = \frac{D}{4t_0} \quad (8.1)$$



**Şekil 8.2:** Çelik plakalar arasındaki dairesel kauçuk bir tabakanın şekil faktörü ( $S_1$ ) ([23]'den alınmıştır.)

İkinci şekil faktörü olan  $S_2$ , kauçuk mesnet çapının tabakalarının toplam kalınlığına oranıdır.

$$S_2 = \frac{D}{n_r t_0} \quad (8.2)$$

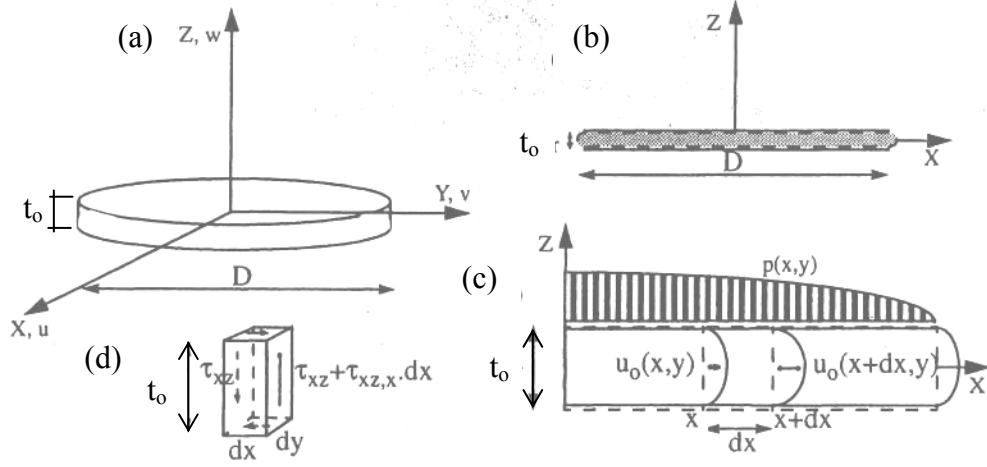
D : mesnedin çapı

$n_r$  : kauçuk tabaka adedi

$t_0$  : tek bir kauçuk tabaka kalınlığı

Elastomerlerin davranışı non-linear olmasına rağmen, bir lineer elastik analiz elastomer mesnetlerin tasarımı için faydalıdır. Böyle bir analiz için şu varsayımlar yapılır;

- Elastomer üzerinde herhangi bir noktada  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = p(x,y)$  (Şekil 8.3(a)).
- Dış yükün dağılımı elastomer üzerinde paraboliktir ve mesnet yüzeylerinde bu basınç 0' a eşittir (Şekil 8.3(b)).
- Yüklemeden önceki düşey düzlemde bulunan noktalar, yüklemen sonra (deformasyon) bir parabol eğrisi üzerinde sıralanırlar (Şekil 8.3(c)).
- Yatay düzlemler deformasyondan sonra yatay kalırlar.



Şekil 8.3: Kauçuk tabakasının deformasyon hali ([8]'den alınmıştır.)

Yukarıdaki varsayımlar kullanılarak üç eksenli deplasmanlar şu şekilde tanımlanabilir;

$$\begin{aligned}
 u(x,y,z) &= u_0(x,y) \left( 1 - \left( \frac{2z}{t_0} \right)^2 \right) \\
 v(x,y,z) &= v_0(x,y) \left( 1 - \left( \frac{2z}{t_0} \right)^2 \right) \\
 w(x,y,z) &= w(z)
 \end{aligned} \tag{8.3}$$

$dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  ve  $t_0$  boyutlarındaki sonsuz küçüklükte bir elemanın X, Y, Z yönlerindeki hacimsel değişimi;

$$\Delta V = \epsilon_c t_o \, dx \, dy - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{4}{6} t_o u_o(x,y) \right) dx \, dy - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{4}{6} t_o v_o(x,y) \right) dx \, dy \quad (8.4)$$

$$\epsilon_c = \frac{\Delta t}{t} \quad (8.5)$$

$\epsilon_c$  : Basınç gerilmeleri altında birim boydaki kısalma

$\Delta t$  : Düşey yönlü yer değişme

$t$  : Mesnet boyu

Bu hacimsel değişim elastomerin hacimsel modülü (Bulk modulus) ile ilgilidir;

$$\Delta V = \frac{pV}{K} = \frac{p \, dx \, dy \, t_o}{K} \quad (8.6)$$

Böylelikle;

$$\frac{p}{K} = \epsilon_c - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial}{\partial x} u_o(x,y) + \frac{\partial}{\partial y} v_o(x,y) \right) \quad (8.7)$$

$$\text{(Hacim ve kayma modülü sırası ile } K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \text{ ve } G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ )}$$

Kayma birim uzamaları, kayma gerilmeleri ve deformasyonları ile ilişkili olarak;

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= G\gamma_{xz} = G \left( \frac{\partial}{\partial x} w(z) + \frac{\partial}{\partial z} u(x,y,z) \right) = G \frac{\partial}{\partial z} u(x,y,z) \\ \tau_{yz} &= G\gamma_{yz} = G \left( \frac{\partial}{\partial y} w(z) + v \right) = G \frac{\partial}{\partial z} v(x,y,z) \end{aligned} \quad (8.8)$$

Deplasmanlar için önceden bulunan değerler (8.8) denkleminde yerine konarak ve uygun diferansiyel denklemleri çözerek aşağıdaki denklemleri elde edebiliriz;

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= G \frac{\partial}{\partial z} u(x,y,z) = - \frac{8Gzu_o(x,y)}{t_o^2} \\ \tau_{yz} &= G \frac{\partial}{\partial z} v(x,y,z) = - \frac{8Gzv_o(x,y)}{t_o^2} \end{aligned} \quad (8.9)$$

Elde ettiğimiz denklemlerden;

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0\end{aligned}\quad (8.10)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} = -\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= \frac{8G u_o(x, y)}{t_o^2} \\ \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} = -\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= \frac{8G v_o(x, y)}{t_o^2}\end{aligned}\quad (8.11)$$

Böylelikle,

$$\begin{aligned}u_o(x, y) &= \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} u_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial^2 \tau_{xx}}{\partial x^2} \\ v_o(x, y) &= \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \Rightarrow \frac{\partial}{\partial y} v_o(x, y) = \frac{t_o^2}{8G} \frac{\partial^2 \tau_{yy}}{\partial y^2}\end{aligned}\quad (8.12)$$

Yukarıdaki denklem takımını (8.7) denkleminde yerine koyarsak;

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \tau_{xx}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{yy}}{\partial y^2} &= \frac{12G}{t_o^2} \left( \epsilon_c - \frac{p}{K} \right) \Leftrightarrow \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} p(x, y) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} p(x, y) &= \frac{12G}{t_o^2} \left( \epsilon_c - \frac{p}{K} \right)\end{aligned}\quad (8.13)$$

Meydana gelen kısmi diferansiyel denklem, düşey uygulanan yükü  $p(x, y)$  ve düşey birim kısalma ile ( $\epsilon_c$ ) ilişkilidir. Dairesel mesnetler için kartezyen koordinatlar yerine  $(x, y, z)$ , silindirik bir koordinat sistemi  $(r, \theta, z)$  kullanmak daha kullanışlıdır.

Bu tür bir durumda aşağıdaki kısmi diferansiyel denklemleri elde ederiz;

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_o^2} \left( \epsilon_c - \frac{p}{K} \right)\quad (8.14)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_o^2} \left( \epsilon_c - \frac{p}{K} \right)$$

Hacim modülü ( $K$ ) nispeten çok büyüktür ve bu nedenle kauçuğun basınç altında sıkışmadığını farz etmek mantıklıdır. Sonuç olarak, hacimsel değişimin sıfır olduğu



var sayılır. Bu yoldan, yukarıdaki denklem başlangıç koşulları  $p(r = R = D/2) = 0$  ile bir Poisson denkleminde düşürülür.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} p(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} p(r, \theta) = \frac{12G}{t_0^2} \epsilon_c \quad (8.15)$$

Yukarıdaki denklemin çözümünden;

$$p(r, \theta) = p(r) = \frac{3G}{t_0^2} (R^2 - r^2) \epsilon_c \quad (8.16)$$

Mesnet üzerindeki alanın integrasyonundan P yükünü elde edebiliriz;

$$P = \int_{r=0}^{r=R} 2\pi r p(r) dr = \frac{3G \pi R^4 \epsilon_c}{2t_0^2} \quad (8.17)$$

Dairesel bir mesnedi göz önünde tutarsak  $S_1 = \frac{R}{2t_0}$  ve  $A = \pi R^2$  için ;

$$P = 6GS_1^2 A \epsilon_c \quad (8.18)$$

denklemini elde edebiliriz.

Bu denklemlerden basınç modülü olan  $E_c$ ' yi tanımlayabiliriz ;

$$E_c \approx E_c(\gamma) = \frac{P}{A \epsilon_c} = 6GS_1^2 \quad (8.19)$$

Eksenel deformasyonları ihmal ederek ve kauçuğun kayma birim uzamalarını  $S_1$  şekil faktörünün bir fonksiyonu olarak düşünerek düşey rijitlik için bir ifade elde edebiliriz  $K_\epsilon(\gamma)$  ;

$$K_\epsilon(\gamma) = \frac{E_c(\gamma)A}{t} = \frac{6GS_1^2 A}{t} \quad (8.20)$$

Eksenel deformasyonları, kayma rijitliği ve kauçuğun eksenel birim uzamalarını paralel yaylar olarak bağlandıklarını kabul ederek hesaba katabiliriz. Böylelikle, düşey rijitlik aşağıdaki gibi ifade edilebilir [18].

$$\frac{1}{K_v} = \frac{1}{K_\varepsilon(\gamma)} + \frac{1}{K_\gamma} \quad (8.21)$$

$$\Delta t = \frac{W}{K_\varepsilon(\gamma)} \quad (8.22)$$

$$K_\gamma = \frac{W}{\Delta t} = \frac{6S_1^2 AG}{t} \quad (8.23)$$

$\Delta t$  : Düşey yönlü yer değiştirme

$K_\gamma$  : Kayma gerilmelerinden kaynaklı düşey rijitlik

$$K_v = \frac{6GS_1^2 AE_c}{(6GS_1^2 + E_c)t} \quad (8.24)$$

$K_v$  : Elastomer mesnedin etkili düşey rijitliği

Kauçuk için Poisson oranını 0,5 kabul ederek Elastisite modülünü  $E = 2(1 + 0,5)G = 3G$  olarak bulabiliriz. Bu nedenle düşey rijitlik,  $K_v$ , düşey sıkışma modülünün,  $E_c$ , bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Bu, çelik tabakalar tarafından zorlanan yatay deplasmanlara karşı sınırlamaları göz önünde bulundurmaktadır.

$$K_v = \frac{6GS_1^2 A3G}{(6GS_1^2 + 3G)t} \quad (8.25)$$

$$E_c = 6GS_1^2 + 3G = E (2S_1^2 + 1) \quad (8.26)$$

Hacimsel değişim göz önünde bulundurulabilir. Örneğin, yukarıda elde edilen rijitlik ile kauçuğun hacimsel değişim modülü birbirlerine paralel bağlı olduğu düşünülürse, basınçtaki etkili elastisite modülü için ( $E_{\text{eff},v}$ ) aşağıdaki ifade kauçuğun sıkışabilirliğini ve aynı zamanda hem kayma hem de eksenel deformasyonları dikkate almaktadır.

$$\frac{1}{E_{\text{eff},v}} = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{K} = \frac{1}{6GS_1^2 + 3G} + \frac{1}{K} \Rightarrow E_{\text{eff},v} = \frac{K(6GS_1^2 + 3G)}{6GS_1^2 + 3G + K} = \frac{6GS_1^2 E_c}{6GS_1^2 + E_c} \quad (8.27)$$

$E_{\text{eff},v}$  : Kauçuğun sıkışmadaki etkili elastisite modülü

$K$  : Sıkışma Modülü

Düşey yükten meydana gelen kayma birim deformasyonları aşağıdaki formül ile hesaplanabilir [18].

$$\gamma_v = 6S_1 \varepsilon_c \quad (8.28)$$

$\gamma_v$  : Düşey yük etkisinde kayma birim uzaması

$S_1$  : Kauçuğun şekil faktörü

Yukarıdaki ifadeler deformasyonun her bir içeriğinin önemine göre elastomerik mesnetlerin tasarımında kullanılabilir. Diğer göz önünde bulundurulması gereken konulardan biri elastomerin kayma esnekliğinden kaynaklanan, kritik burkulma yükünün azalımından meydana gelebilen burkulmanın önlenmesidir. “I” uzunluğunda ve EI eğilme rijitliğine sahip, ister her iki yönden sabit veya uçları mafsallı olsun bir narin kolonun burkulma yükünü veren ifade ;

$$P_{\text{cr}} = P_E = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \quad P_{\text{cr}} = P_E = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (8.29)$$

Kayma esnekliğinden dolayı burkulma yükündeki azalımı veren ifade  $P_{\text{cr}}$  ve  $P_E$  için ;

$$P_{\text{cr}} = \frac{\sqrt{1+4 P_E/P_G} - 1}{2/P_G} \quad (8.30)$$

$$P_G = G A_{\text{eff}} \quad (8.30a)$$

$A_{\text{eff}}$  : Etkili kayma alanı

Elastomer mesnetler kesme kuvvetleri altında çok esnekken, basınç kuvvetleri altında oldukça rijit bir davranış sergilerler. Bu nedenle  $P_E / P_G$  oranı çok büyüktür. Bu oran sonsuza yaklaştıkça, burkulmadaki kritik yük aşağıdaki ifadeye yaklaşır ;

$$P_{\text{cr}} = \sqrt{P_E P_G} \quad (8.31)$$

Çelik tabakaların, tam rijit olmadıklarını düşünerek bir düzenleme katsayısı uygulanabilir. Önerilen düzeltme katsayısı  $f_r = B_r S_1^2$  'e eşittir. Bu denklemde kare mesnetleri için  $B_r = 0,742$ , dairesel kesitler için  $B_r = 0,50$  değerlerini alır. Bir dairesel kesitli mesnet için kritik yük, tasarım detaylarında eğilme momentinden kaçınmak için aşağıdaki formül ile bulunabilir ;

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 E_c \pi D^4 \left(\frac{0,5D}{4t_o}\right)^2 G \pi D^2}{t^2}} \quad (8.32)$$

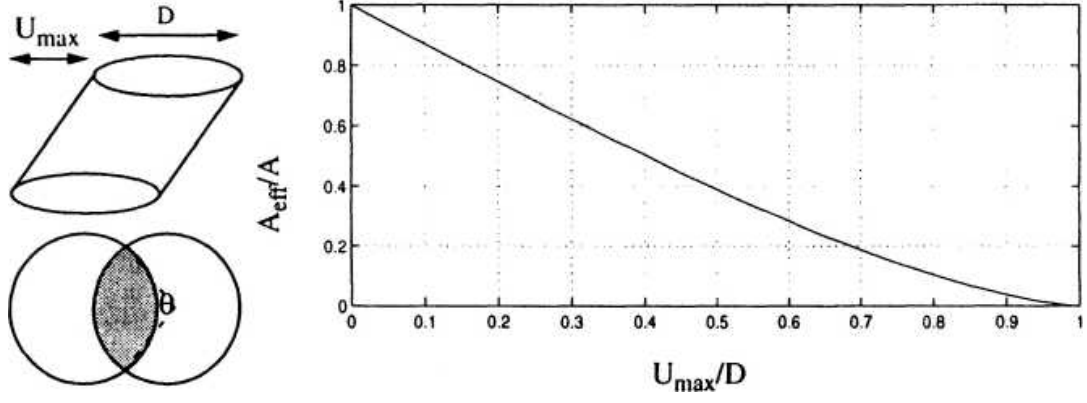
eğer (8.19) denklemi bu ifade içerisinde yerine konursa, elastomer mesnetlerin stabilitesini kontrol etmek için kullanılan burkulma yükünü elde edebiliriz ;

$$P_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 6 G D^2 \pi D^4 0,5 \left(\frac{D}{4t_o}\right)^2 G \pi D^2}{t^2 (4t_o)^2 64}} \quad (8.33)$$

$$\Rightarrow P_{cr} \approx \sqrt{\frac{AG\pi^2 E_{eff,v} I}{3t^2}} = \frac{0,134 G D^4}{tt_o^2} \quad (8.34)$$

Son olarak diğer bir ilgi konusu, mesnedin plandaki alanına ve iç kauçuk tabaka kalınlığına bağlı olarak değişen izolatörün düşey yük taşıma kapasitesinin tayinidir. Etkili bir kolon, aksenal yükleri kolon kesitinin etkili bir alanına yayarak aktarır. Etkili alan, ( $A_{eff}$ ), basit bir geometrik şartları dikkate alarak, maksimum deplasman ( $U_{max}$ ) tanımlandığında plandaki mesnet alanının bir fonksiyonu olarak kolayca hesaplanabilir. Şekil 8.4'de deforme edilmiş bir mesnedin efektif alanının deplasman ile değişimi görülmektedir. Mesnet yatay yönde yer değiştirdikçe, efektif yük taşıma alanı azalmaktadır.

$$\theta = 2\text{acos}\left(\frac{U_{max}}{D}\right), \quad A_{eff} = \left(\frac{\theta}{180} - \frac{\sin\theta}{\pi}\right) A = \left[1 - \frac{2}{\pi}(\theta + \sin\theta \cdot \cos\theta)\right] A \quad (8.35)$$



**Şekil 8.4:** İzolatörün yanal deplasmanla azalan etkin yük alan kesiti ([8]'den alınmıştır.)

Şekil 8.4'de gösterildiği üzere  $\frac{U_{max}}{D}$  oranı 0,40'tan fazla olmamalıdır. Bu değer, plandaki toplam alanın (A) yarısından fazlası olan etkili yük aktarım alanının üst üste düşmesi ile ulaşılabilir.

Bir elastik mesnedin kayma rijitliği kurşun çekirdek olmaksızın aşağıdaki denklem kullanılarak bulunabilir.

$$K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad (8.36)$$

$G_r$  : Kauçuğun kayma modülü

$A_r$  : Kauçuğun kesit alanı

$t$  : Kauçuğun toplam yüksekliği

Kurşun çekirdekli bir elastomer mesnedin kayma modülü, kurşunun akmadan önceki ve sonraki durumu için aşağıdaki iki denklem ile hesaplanabilir ;

$$K_l = \frac{G_L A_L}{h_L} + \frac{G_r A_r}{t} \quad , \quad K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad (8.37)$$

{ Akmadan önceki durum }

{ Akmadan sonraki durum }

$G_L$  : Kurşun çekirdeğin kayma modülü

$A_L$  : Kurşun çekirdeğin kesit alanı

$h_L$  : Kurşunun yüksekliği

Denklem (8.36)'da  $A_r$  mesnedin net alanını ifade etmektedir ( $A_r = A - A_L$ ). Kurşun çekirdeğin varlığı, akmadan sonraki kurşun çekirdekli mesnetlerin, (LRB), rijitliğinde göz önünde bulundurulmayabilir.

Kurşun çekirdeğin çapı bir yaklaşım olarak aşağıdaki formül ile bulunabilir [18].

$$d_L \leq \frac{t}{\gamma_{\max}} \quad (8.38)$$

$\gamma_{\max}$  : Kauçuk mesnedin maksimum kayma birim uzaması

Kurşun çekirdeğin alanı;

$$A_L = \frac{\pi d_L^2}{4} \quad (8.39)$$

Ayrıca kurşun çekirdeğin yatay kuvvet etkisinde akma dayanımı aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$Q_y = \tau_y A_L \quad (\text{Kurşunun akma gerilmesi yaklaşık olarak } \tau_y = 10,5 \text{ MPa alınabilir})$$

Akma dayanımı, alternatif bir yol olarak mesnedin bir çevrimdeki histeresis eğrisi altında kalan alan yardımı ile bulunabilir;

$$A_{\text{loop}} \cong 4Q_y(D_D - d_y) \quad (8.40)$$

$d_y$  : Kurşunun akma deformasyonu

$D_D$  : Maksimum tasarım deplasmanı

Yukarıdaki denklemde  $d_y$  ihmal edilebilir düzeydedir, böylelikle denlem aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$A_{\text{loop}} \cong 4Q_y(D_D) \quad (8.41)$$

Böylelikle, akma noktasına ulaşan kurşunda meydana gelen kesme kuvveti;

$$Q_y \cong \frac{A_{\text{loop}}}{4D_D} \quad (8.42)$$

Yaklaşık olarak mesnedin bir çevrimdeki histeresis eğrisi altında kalan alan;

$$A_{\text{loop}} = \beta_{\text{eff}} (2\pi K_D D_D^2) \quad (8.43)$$

$K_D$  : Tasarım depremi (DBE) efektif rijitlik

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \frac{A_{\text{loop}}}{A_{\text{dikdörtgen}}} \quad (8.44)$$

$\beta_{\text{eff}}$  : Efektif sönüm

Yukarıdaki formüller, taban yalıtımlı binanın ön tasarım aşaması için belirli yaklaşımlarla kullanılabilir. Ancak, bu yaklaşımlar kauçuğun kayma deformasyonları üzerine kurulmuştur ve eksenel yükleri ve deformasyonları kısmen ihmal etmektedir. En son tasarım aşamasında ve analiz sürecinde normal gerilmelerin, birim uzama ve kısalmaların etkisini göz önüne almaya ihtiyaç olabilir. Bununla birlikte, kesme rijitliğine kurşun çekirdeğin akmadan sonraki katkısının varlığını da unutmamakta fayda vardır. Yatay rijitliğin eksenel yük üzerindeki ilişkisi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilmektedir ;

$$K_h^* = K_h \left[ 1 + \left( \frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right] \quad (8.45)$$

$P$  : Eksenel yük

$P_{cr}$  : Burkulma yükü

$K_h$  : Sıfır yük altında yatay rijitlik

$K_h^*$  :  $P$  yükü altındaki etkili rijitlik

Ancak, kritik burkulma yükü,  $P_{cr}$ , yatay deplasmanın artması ile azalabilir. Bu azalım, yatay rijitliğin hem yatay deplasman hemde düşey yük üzerindeki etkisi gibi son analiz sürecinde detaylı bir non-lineer model ile hesaba katılmak zorunda kalınabilir. Kauçuğun kayma modülünün  $G_r(\gamma)$ , onun kayma birim uzaması,  $\gamma$ , üzerindeki etkisi daha detaylı bir model ve non-lineer bir analizle dikkate alınabilir. Elastomer mesnetlerin kayma ve eksenel yükler altında sismik yalıtım için kullanılmasındaki davranışlarına etkisini gösteren deneysel çalışmalara göre, lineer elastik teoriyi kesme rijitliğini hesaplamak için kullanmak, performansın tahmininde

doğru bir yöntem vermeyebilir. Üstelik %200 mertebesinde kesme birim uzamaların mesnetin kenarlarında lift-off etkisinin oluşmasına neden olduğu ve mesnet üzerindeki maksimum normal gerilmelerinin ortalama basınç gerilmelerinden çok daha fazla olduğu bulunmuştur [24].

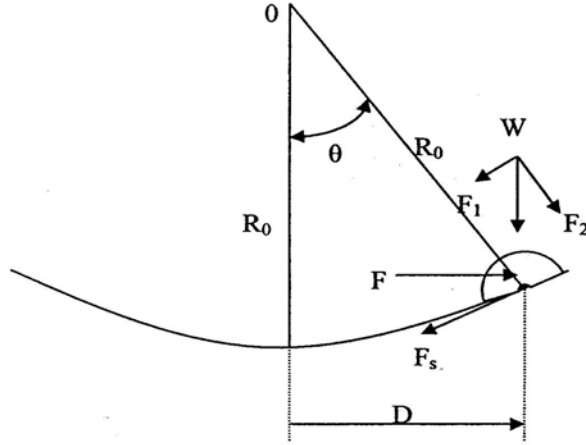
Sismik izolatörler kısa dönemli yükleme seviyelerinde çok büyük kesme deformasyonlarına karşı koyduğu deneysel çalışmalarda gösterilmesine rağmen elik plakalar bu gerilme seviyelerinde eğilme göstermiştir. Bu ise, eğer elastomer mesnetler deprem esnasında çok büyük kesme birim uzamalarına maruz kalırsa, sonradan değiştirilmesi gerekebileceğini göstermektedir. Ayrıca, tasarım detayları mesnetlere eğilme momentlerinin transfer edilmesine izin vermese bile, basınç gerilmelerinin dağılımı düzgün değildir (kesme kuvvetlerinden dolayı) ve bu kontrol altına alınması gereken devrilme momentlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Böylelikle ya mesnet yüzeylerindeki maksimum basınç gerilmelerini kontrol altında tutmak gerekir yada uygun güvenlik faktörleri ortalama basınç gerilmeleri için kullanılmalıdır. Sismik izolasyon için dönme ve eksenel yükler altında kullanılan elastomer mesnetlerin davranışı üzerindeki deneysel çalışmalar, mesnedin dönme rijitliğinin basınçta, eksenel kuvvetin mesnedin lineer olmayan (non-lineer) davranışına sebep olacak kadar büyük olmadığı sürece eksenel yükle bağımsız olduğunu göstermiştir.

Sonuç olarak, elastomer mesnetler yüksek katlı binalarda devrilme momentlerine meydan verecek kadar büyük çekme gerilmelerine karşı koyabilme yeterliliğine sahip değildir. Bu nedenle, sismik izolasyonun yüksek katlı bir yapıda veya biçim oranı (yükseklik/genişlik) yüksek yapılarda kullanımında özel önlemler göz önünde bulundurulmalıdır. Sismik izolasyon uygulanmış yapıların birçoğu 50 metreden az yüksekliğe sahiptir ve yapıların biçim oranı katsayısı yaklaşık 3'tür. İzolatörler üzerinde pull-out kuvvetlerinin oluşumu sezildiğinde, ya elastomer içindeki çekme gerilmelerinden kaçınmak için tasarım detayları kullanılabilir veya özel yüksek dayanımlı elastomer mesnetler kullanılmalı. Yüksek dayanımlı kauçuk mesnetler, mesnedin basınç ve çekme dayanımlarını arttıran kauçukla karıştırılmış karbon kullanılarak sırf bu amaç için retilbilirler. Fiber glendirilmış elastomer mesnetler yüksek çekme dayanımı sağlayabilir ve çekme gerilmelerine karşı koyabilir.

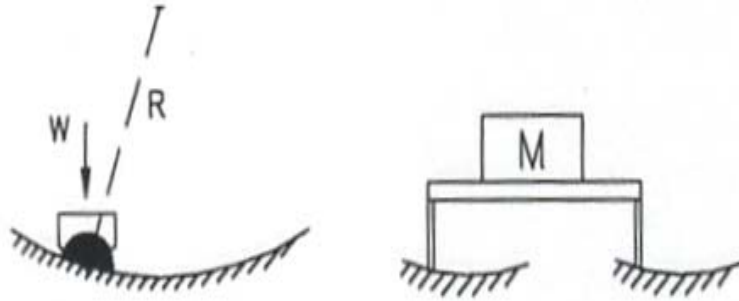


## 8.2. Sürtünlü Sarkaç Mesnetlerin Mekaniksel Özellikleri

Sürtünlü sarkaç mesnetlerde mafsallı kayıcının küresel yüzeyde yükselmesi esnasında mesnet, düşey ağırlıkça desteklenen döndürücü kuvveti ve sürtünme kuvvetinin bileşkesi kadar bir direnç üretir. Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da sürtünlü sarkaç mesnede etkiyen kuvvetler ve hareket prensibi gösterilmektedir.



Şekil 8.5: Sürtünlü sarkaç mesnede etkiyen kuvvetler ([2]'den alınmıştır.)



Şekil 8.6: Sürtünlü sarkaç mesnedin salınım hareketleri ([2]'den alınmıştır.)

$F_1$  ağırlıkça desteklenen geri döndürücü kuvveti,  $F_s$  sürtünme kuvvetini,  $F$  harekete tepki kuvvetini,  $D$  mesnedin yatayda yaptığı yer değiştirmeyi,  $R_0$  küresel yüzeyin eğrilik yarıçapını,  $\mu$  sürtünme katsayısını ve  $W$  mesnedin üzerindeki düşey ağırlığı ifade etmektedir.

$$\sin\theta = \frac{D}{R_0} ; F_1 = W\sin\theta = \frac{W}{R_0} D ; F_s = F_2\mu = \mu W\cos\theta = \mu W\sin(D) = \mu WZ \quad (8.46)$$

$\dot{D}$  mesnedin kayma hızı olup yer değiştirmenin zamana göre türevidir. Sürtünme katsayısı  $\mu$  kayma yüzeyindeki  $p$  basıncına ve mesnedin kayma hızına bağlıdır. Tablo 8.1’de sürtünme yüzeyi olarak kullanılan teflon malzemesine ait düşey yönlü basınç altında sürtünme katsayısının değerleri verilmiştir. Bu katsayısı artan basınçla birlikte azalır ve 14 MPa’ ın üzerindeki basınç değerlerinde ve 51 mm/s üzerindeki hızlarda kayma hızından bağımsız hale gelir.

$$F = F_1 + F_s = \frac{W}{R_o} D + \mu WZ \quad (8.47)$$

**Tablo 8.1:** Teflon malzemesi için tavsiye edilen sürtünme katsayısı değerleri

Düşey basınç (MPa)	Düşük hızlardaki sürtünme katsayısı	Yüksek hızlardaki sürtünme katsayısı
<5	0,04	0,14
5-15	0,03	0,12
>15	0,03	0,10

$\text{sgn}(\dot{D}) = Z$  değişkeninde aşağıdaki diferansiyel denkleme bağlıdır;

$$Y \dot{Z} + r \left| \dot{D} \right| Z |Z|^{n-1} + \beta \dot{D} |Z|^n - A \dot{D} = 0 \quad (8.48)$$

Burada  $\beta$ ,  $r$ ,  $A$ ,  $\eta$  boyutsuz sabitlerdir ve  $Y$  ise akma yer değiştirmesini ifade eder ve deneysel olarak bu değer 0,005 olarak tavsiye edilmiştir.

Sürtünmeli sarkaç sistemlerde merkeze dönüş hareketinin herhangi bir anında geri döndürücü kuvvetin  $Z$  katı, sürtünme kuvvetine eşit veya küçük olursa sistem merkez konumuna geri dönemez. Bu durum özellikle uzun periyotlu sistemler için problem teşkil edebilmektedir [2].

$$F_1 x Z = Z \frac{W}{R_o} D \leq F_s = \mu WZ \rightarrow \frac{D}{R_o} \leq \mu \quad (8.49)$$

### 8.3. Sismik İzolasyon ve Enerji Dağıtım Mekanizmalarının Değerlendirme Testleri

1994 yılında, Otoyol Geliştirme Teknoloji Merkezi (HITEC), Ulusal Yüksek Standartlı Yollar Merkezi (FHWA) ve California Ulaştırma Dairesi (Caltrans),

sismik izolasyon ve enerji dağıtma mekanizmalarının değerlendirilmesine yönelik bire bir ölçekli dinamik testleri gerçekleştirmek için bir araya gelmiştir. Değerlendirme programı, deneysel çalışmalar altında sistemlerin mekaniksel özelliklerini ortaya çıkarmayı ve bu sistemlerin güvenilirliğini doğrulamayı amaç edinen testler üzerinde kuruldu. Testler için belirlenen ana hatlar bir rapor içinde HITEC tarafından yayımlandı. Üstelik bu program, bu teknolojinin yeni ve varolan köprüler için kullanımını destekleyen yönetmeliklerin oluşturulmasını ve aynı zamanda bu sistemlerin tasarımı ve seçimi için bir guidelines hazırlamayı hedefledi.

Gerçekleştirilen testlerde mesnetlerin rijitliği ve sistemin enerji dağıtma mekanizma özellikleri araştırıldı, basınç kuvvetlerinin bu özellikler üzerindeki etkileri değerlendirildi, değişken frekanslar altında dinamik özellikleri tahmin edilmeye çalışıldı, mesnetlerin yorulma, aşınma ve çevresel yaşlanma özellikleri değerlendirildi, yüksek sıcaklığın performans özelliklerinde etkileri araştırıldı ve aşırı deplasmanlar altında performans özellikleri değerlendirildi.

Esas amaç köprü mesnetlerinde sismik izolasyonun kullanımına yönelik bir yönetmelik oluşturmak olmasına rağmen, sonuçlar ve test sonuçlarının yorumlanması, sismik izolasyonun herhangi tür yapılardaki kullanımı için oldukça önem taşımaktaydı. Her bir sistemin avantajları bu testlerin sonuçlarını kullanmak için göz önünde bulundurulabilir. Dahası, bire bir ölçekli dinamik testler sismik izolasyon cihazlarının daha yüksek güvenilirlikle kullanılmasına yardımcı olmaktadır.

Bu programda 11 adet sistem test edildi. Bunların arasında kurşun çekirdekli elastomer mesnetler (LRB), yüksek sönümlü elastomer mesnetler (HDRB), sürtünmeli sarkaç tip izolatörler (FPS) ve viskoz sönümleyicilerdi. Değerlendirilen her bir sistem için sonuçlar özgün raporlarda belgelendi ve İnşaat Mühendisliği Araştırma Kurumu (CERF) tarafından yayımlandı. CERF, Amerin Society of Civil Engineers' in yan kuruluşu olup, hiçbir kar marjı düşünmeksizin kurulmuş bağımsız bir organizasyondur [8].

## 9. TABAN YALITIMI İÇİN UBC-97 YÖNETMELİĞİ

### 9.1. Giriş

Ülkemizde yürürlükte olan mevcut yönetmeliklerde taban izolasyonu hakkında herhangi bir hüküm bulunmamaktadır. Dolayısıyla ABD’de bu konuda yürürlükte olan iki ayrı yönetmelikten 1997 yılında yürürlüğe giren UBC şartnamesi gözden geçirilmiştir [5]. Yürürlükteki diğer yönetmelik olan OSHPD-96 koşulları itibariyle UBC-94 e oldukça benzer hükümler içermektedir [11]. Ayrıca 2000 yılı itibariyle ICC tarafından sunulan ve 2003 yılında güncellenen IBC yönetmeliği taban izolasyonu için daha yeni bir yönetmelik olduğu bilinmekle birlikte, bu yönetmelik elde edilemediği için tez çalışmasının kapsamında UBC hükümleri esas alınmıştır. Karayolu yapıları ve köprülerinin izolasyonu için AASHTO yönetmeliği kullanılmaktadır.

UBC-97 düşey izolasyon, mevcut binaların taban izolasyonu kullanılarak iyileştirilmesi gibi konuları kapsamamakla birlikte bu konularda yaygın olarak kullanılmıştır. İzolasyon sistemleri ile ilgili düzenlemelerde herhangi bir izolasyon sistemi tipinin kabul edilebilir olduğu gibi bir hüküm bulunmamaktadır ancak UBC düzenlemeleri, herhangi bir izolasyon sisteminin gerekli yer değiştirme altında stabil olmasını, artan yer değiştirme ihtiyacı altında daha fazla direnç sağlamasını ve tekrarlanmış periyodik yükler altında benzer özellikler göstermesini ister. Şartnamenin amacı sadece yapı maliyetini düşürmek değil, aynı zamanda yapıda oluşacak hasarı kontrol etmektir. Taban izolasyonu yapıda elastik cevaba izin vererek şiddetli depremlerde düşük kat ivmeleri üretilmesini sağlar.

Mevcut yapıların iyileştirilmesindeki sismik tasarım, artan şekilde FEMA-273 ve FEMA-274 düzenlemelerinden etkilenmektedir. FEMA düzenlemeleri UBC-97 ye oldukça benzemekle birlikte, farklı olarak lineer olmayan statik itki analizi veya pushover metodu denilen yeni bir analiz yaklaşımı getirmektedir [2].

## 9.2. Sismik Risk Düzeyi

Şartnamenin benimsediği sismik kriter, sismik riske iki seviyeli bir yaklaşımdır ;

- Tasarım Amaçlı Deprem (DBE) : 475 yıl tekrar periyotlu ve 50 yılda aşılma olasılığı % 10 olan yer hareketi
- Olabilecek En Şiddetli Deprem (MCE) : 1000 yıl tekrar periyotlu ve 100 yılda aşılma olasılığı % 10 olan yer hareketi

## 9.3. Tasarım Metotları

UBC'nin önceki sürümlerinde, yer değiştirmelerin izolasyon seviyesinde yoğunlaştığı ve böylece üstyapının neredeyse rijit ötelenme hareketi yaptığı basit bir eşdeğer statik yöntem kullanılmaktaydı. Tasarım ilk titreşim moduna dayanmaktaydı. Üstyapı için tasarım kuvvetleri de tasarım yer değiştirmesindeki izolatör kesit tesirlerinden hesap ediliyordu. Yönetmelik geliştikçe, dinamik analiz gerektiren durumlar arttırılmış, dinamik analizi teşvik edici unsurlar geliştirilmiştir ancak statik analiz hala tüm taban izolasyonu tasarımları için temel bir unsur olarak kalmıştır.

Statik analiz, tasarım yer değiştirmesi ve tasarım kuvvetleri için bir minimum seviye tesis eder. Ayrıca statik analiz öntasarım aşamasında ve izolasyon sistemi için yapıda dinamik analiz gerektiren durumlarda da işe yaramaktadır. Hatta bazı durumlarda statik analizden başka bir yöntem kullanmak mümkün olmamaktadır.

## 9.4. Statik Analiz

Statik analiz formülleri, 1-3 sn. aralığında sabit hız spektrumuna dayanan yer değiştirme ve kuvvetler sağlar. UBC-94 ve OSHPD-96'da, sabit hız spektrumu değeri ATC-3-06 düzenlemelerinden türetilmiştir. ( $Z = 0.40$ , Zemin faktörü  $S=1$  ve %5 sönüm oranı için  $0,60$  m/s) yer değiştirme spektrumu şöyle verilmiştir.

$$S_D = \frac{S_v}{\omega} = \frac{T}{2\pi} \frac{Z}{0,4} (0,60) \cong 0,25ZT(m) \quad (9.1)$$

Daha sonra spektrum, zemin faktörü ve sönüm oranı için diğer sismik bölgeler de gözetilerek düzenlenmiştir. Hesaplanacak 3 yer değiştirme düzeyi aşağıdaki gibidir;

- Tasarım Yer değiştirme (D), DBE düzeyindeki bir deprem için izolasyon sisteminin rijitlik merkezinde hesaplanan yer değiştirme
- Toplam Yer değiştirme ( $D_T$ ), Binanın bir köşesindeki mesnette D yönündeki burulma bileşenini içeren yer değiştirme
- Toplam Maksimum Yer değiştirme ( $D_{TM}$ ), MCE düzeyinde yürütülen deprem için toplam tasarım yer değiştirme

UBC-94 ve OSHPD-96 için D tasarım yer değiştirme, tüm tasarım sürecinin başlangıç noktası olup, dinamik analiz gereksin veya gerekmesin hesaplanmak zorundadır [11]. Üstyapıdaki şekil değiştirmelerin ihmal edilebilirliği prensibine dayanarak şöyle verilir ;

$$D = \frac{0,25ZNS_iT_i}{B} \quad (9.2)$$

Z : Sismik bölge katsayısı

N : Aktif fay yakınlık faktörü

$S_i$ : Zemin katsayısı

$T_i$ : Efektif periyot (sn)

B : Sönüm katsayısı

UBC-97 formülasyonu içerik olarak benzer ancak çok daha karmaşıktır. Pek çok sayıda yeni terim eklenmiştir. Sonuç olarak önceki versiyonların statik analiz hesaplamaları yerini bir dizi tablo tanımlamaları ve formüller dizisine bırakmıştır.

UBC-97'ye göre  $D_D$  ve  $D_M$  yer değiştirmelerinin yada izolasyon sistemi rijitlik merkezinde DBE ve MCE düzeyindeki yer değiştirmelerin hesaplanması gerekmektedir.

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VD} T_D}{B_D} \quad (9.3)$$

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) C_{VM} T_M}{B_M} \quad (9.4)$$

#### 9.4.1. Sismik bölge katsayısı

Sismik bölge katsayıları deprem bölgelerine göre Tablo 9.1’de verildiği şekildedir. UBC'nin önceki sürümlerinde de aynıdır.

**Tablo 9.1:** Sismik bölge katsayıları

Deprem Bölgesi	1	2A	2B	3	4
Z	0,075	0,15	0,20	0,30	0,40

#### 9.4.2. Zemin tipi

S<sub>A</sub> dan S<sub>E</sub> ye kadar zemin tipleri, zeminin üst 30,5 m’inde ortalama kayma dalgası hızına göre belirlenirler. Bu hız Tablo 9.2’de görüldüğü üzere yumuşak zeminler için 180 m/s nin altında değerler alabilirken sıkı kaya zeminlerde 1500 m/s nin üzerinde değerler alabilir.

**Tablo 9.2:** Zemin tipi

Zemin Tipi	Açıklama	Zeminin Üst 30,5 metresi için Ortalama Özellikler		
		Kayma Dalgası Hızı (m/s)	Standart Penetrasyon Testi (vuruş sayısı/30.5 m)	Drenajsız Kesme Dayanımı (kPa)
S <sub>A</sub>	Sıkı Kaya	>1500	-	-
S <sub>B</sub>	Kaya	760 ~ 1500		
S <sub>C</sub>	Çok Sıkı Zemin ve Yumuşak Kaya	360 ~ 760	>50	> 100
S <sub>D</sub>	Sıkı Zemin	180 ~ 360	15 ~ 50	50 ~100
S <sub>E</sub>	Yumuşak Zemin	< 180	< 15	< 50
S <sub>F</sub>	Yapı bölgesinde yerel zemin incelemesi gereklidir.			

#### 9.4.3. Sismik kaynak tipi

Sismik faylar risk durumlarına göre gibi 3 kategoride toplanmıştır (Tablo 9.3). Yüksek şiddette deprem üretebilen ve yüksek oranda sismik faaliyete sahip faylar (M<sub>≥</sub>7) A tipi

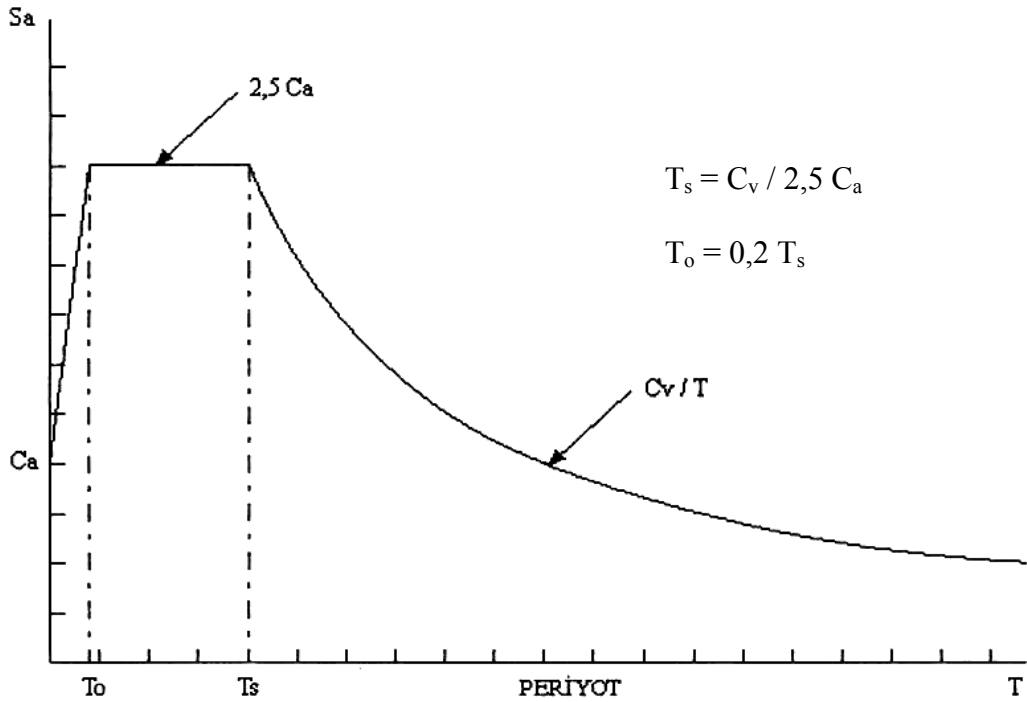
olarak tanımlanmıştır. Orta büyüklükte deprem üretebilen ( $M < 6,5$ ) ve görel olarak düşük oranda sismik faaliyete sahip faylar C tipindedir. A ve C tipi dışındaki tüm faylar ise B tipindedir.

**Tablo 9.3:** Sismik kaynak tipi

Sismik Kaynak Tipi	Açıklama	Sismik Kaynak Tanımlaması	
		Maksimum Deprem Şiddeti (M)	Kayma Oranı (SR) (mm/yıl)
A	Çok şiddetli deprem üretebilen ve yüksek oranda sismik aktivite içeren faylar	$M \geq 7$	$SR \geq 5$
B	A ve C tipi dışındaki tüm faylar	$7 > M \geq 6,5$	$2 < SR < 5$ $SR < 2$
C	Çok şiddetli deprem üretemeyen ve görel olarak düşük sismik aktivite içeren faylar	$M < 6,5$	$SR \leq 2$

#### 9.4.4. Aktif fay yakınlık faktörü

Fay yakınlık etkileri sebebiyle genişleyen yer hareketinin modellenmesi için 2 katsayı kullanılır.  $N_a$  katsayısı tepki spektrumunun (Şekil 9.1) kısa periyotlu sabit ivmeli kısmının karşılığı olarak tasarlanmıştır.  $N_v$  katsayısı ise tepki spektrumunun orta periyot aralığında sabit hızlı bölümüne karşı gelir. Aktif fay yakınlık faktörleri sismik kaynağa en yakın uzaklık ve sismik kaynak tipi parametrelerinin bir fonksiyonudur.



**Şekil 9.1:** UBC-97 spektrum eğrisi ([5]'den alınmıştır.)



UBC-97, aktif faya olan uzaklığı, uygulanacak yapı ile fayın düşeydeki izdüşümü arasındaki en yakın uzaklık olarak tanımlar (Tablo 9.4 ve Tablo 9.5). Bu düşey izdüşüme 10 km den fazla derinlikteki kaynakların etkisi dahil edilmez. Başka bir deyişle 10 km den daha derin bir fayın düşey izdüşümü üzerine oturan bir yapı için fay yakınlık faktörü ihmal edilir.

**Tablo 9.4:** Aktif fay yakınlık faktörü ( $N_a$ )

Sismik Kaynak Tipi	Aktif Faya Bilinen En Kısa Uzaklık		
	$\leq 2$ km	5 km	$\geq 10$ km
A	1,5	1,2	1,0
B	1,3	1,0	1,0
C	1,0	1,0	1,0

**Tablo 9.5:** Aktif fay yakınlık faktörü ( $N_v$ )

Sismik Kaynak Tipi	Aktif Faya Bilinen En Kısa Uzaklık			
	$\leq 2$ km	5 km	10 km	$\geq 10$ km
A	2,0	1,6	1,2	1,0
B	1,6	1,2	1,0	1,0
C	1,0	1,0	1,0	1,0

#### 9.4.5. MCE tepki katsayısı

MCE tepki katsayısı ( $M_M$ ), DBE karakteristikleri üzerindeki MCE tepkisinin hesabında kullanılmak için geliştirilmiştir.  $M_M$ ,  $ZN_v$ ' nin bir fonksiyonu olarak tanımlanır ve  $ZN_v = 0,075$  için 2,67 den  $ZN_v \geq 0,50$  için 1,20 ye kadar bir aralıkta değişir (Tablo 9.6).

**Tablo 9.6:** MCE tepki katsayısı

DBE Deprem Şiddeti ( $ZN_v$ )	MCE Tepki Katsayısı ( $M_M$ )
0,075	2,67
0,15	2,00
0,20	1,75
0,30	1,50
0,40	1,25
$\geq 0,50$	1,20

#### 9.4.6. Spektral sismik katsayılar

Bu katsayılar tasarımda kullanılan minimum spektral ordinatların tanımlanmasını sağlar.  $C_{VD}$  ve  $C_{AD}$  (Tablo 9.7 ve Tablo 9.8) DBE spektrumunun sabit hızlı ve sabit ivmeli bölgelerine karşı gelirken,  $C_{AM}$  ve  $C_{VM}$  (Tablo 9.9 ve Tablo 9.10) katsayıları

ise MCE spektrumu için aynı anlamdadır. Taban izolasyonu uygulanan yapılarda  $C_{VD}$  ve  $C_{AD}$  katsayıları klasik yapılardaki  $C_V$  ve  $C_A$  katsayıları ile aynıdır.

**Tablo 9.7:** Spektral sismik katsayı ( $C_{VD}$ )

Zemin Tipi	Sismik Bölge Katsayısı (Z)				
	Z = 0,075	Z = 0,15	Z = 0,2	Z = 0,3	Z = 0,4
S <sub>A</sub>	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32N <sub>v</sub>
S <sub>B</sub>	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40N <sub>v</sub>
S <sub>C</sub>	0,13	0,25	0,32	0,45	0,56N <sub>v</sub>
S <sub>D</sub>	0,18	0,32	0,40	0,54	0,64N <sub>v</sub>
S <sub>E</sub>	0,26	0,50	0,64	0,84	0,96N <sub>v</sub>
S <sub>F</sub>	Yapı bölgesinde yerel zemin incelemesi gereklidir.				

**Tablo 9.8:** Spektral sismik katsayı ( $C_{AD}$ )

Zemin Tipi	Sismik Bölge Katsayısı (Z)				
	Z = 0,075	Z = 0,15	Z = 0,2	Z = 0,3	Z = 0,4
S <sub>A</sub>	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32N <sub>a</sub>
S <sub>B</sub>	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40N <sub>a</sub>
S <sub>C</sub>	0,09	0,18	0,24	0,33	0,40N <sub>a</sub>
S <sub>D</sub>	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44N <sub>a</sub>
S <sub>E</sub>	0,19	0,30	0,34	0,36	0,36N <sub>a</sub>
S <sub>F</sub>	Yapı bölgesinde yerel zemin incelemesi gereklidir.				

**Tablo 9.9:** Spektral sismik katsayı ( $C_{AM}$ )

Zemin Tipi	MCE Sarsıntı Şiddeti ( $M_M Z_N a$ )				
	$M_M Z_N a = 0,075$	$M_M Z_N a = 0,15$	$M_M Z_N a = 0,2$	$M_M Z_N a = 0,3$	$M_M Z_N a \geq 0,4$
S <sub>A</sub>	0,06	0,12	0,16	0,24	0,8 $M_M Z_N a$
S <sub>B</sub>	0,08	0,15	0,20	0,30	1,0 $M_M Z_N a$
S <sub>C</sub>	0,09	0,18	0,24	0,33	1,0 $M_M Z_N a$
S <sub>D</sub>	0,12	0,22	0,28	0,36	1,1 $M_M Z_N a$
S <sub>E</sub>	0,19	0,30	0,34	0,36	0,9 $M_M Z_N a$
S <sub>F</sub>	Yapı bölgesinde yerel zemin incelemesi gereklidir.				

**Tablo 9.10:** Spektral sismik katsayı ( $C_{VM}$ )

Zemin Tipi	MCE Sarsıntı Şiddeti ( $M_M Z_N v$ )				
	$M_M Z_N v = 0,075$	$M_M Z_N v = 0,15$	$M_M Z_N v = 0,2$	$M_M Z_N v = 0,3$	$M_M Z_N v \geq 0,4$
S <sub>A</sub>	0,06	0,12	0,16	0,24	0,8 $M_M Z_N v$
S <sub>B</sub>	0,08	0,15	0,20	0,30	1,0 $M_M Z_N v$
S <sub>C</sub>	0,13	0,25	0,32	0,45	1,4 $M_M Z_N v$
S <sub>D</sub>	0,18	0,32	0,40	0,54	1,6 $M_M Z_N v$
S <sub>E</sub>	0,26	0,50	0,64	0,84	2,4 $M_M Z_N v$
S <sub>F</sub>	Yapı bölgesinde yerel zemin incelemesi gereklidir.				

#### 9.4.7. Sönüm katsayıları

Sistemdeki efektif sönüm ( $\beta_{\text{eff}}$ ), DBE tepki düzeyi için  $\beta_D$  ve MCE tepki düzeyi için  $\beta_M$  olarak ifade edilir ve aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır. Sönüm katsayıları olan  $B_D$  ve  $B_M$ , efektif sönüm yüzdesine göre Tablo 9.11'den bulunabilir.

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\text{Histeretik döngü alanı}}{K_{D\text{max}} D_D^2} \right) \quad (9.5)$$

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\text{Histeretik döngü alanı}}{K_{M\text{Max}} D_M^2} \right) \quad (9.6)$$

**Tablo 9.11:** Sönüm katsayıları ( $B_D$ ,  $B_M$ )

Efektif Sönüm Yüzdesi ( $\beta_D$ veya $\beta_M$ )	$B_D$ veya $B_M$ Katsayısı
$\leq 2$	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
40	1,9
$>50$	2,0

Tablo değerlerine oldukça yakın bir yaklaşım şu şekilde formüle edilmektedir;

$$\frac{1}{B_D} = 0,25(1 - \ln \beta_{\text{eff}}) \quad (9.7)$$

#### 9.4.8. Efektif sistem periyotları

DBE ve MCE düzeylerindeki cevaba karşı gelen  $T_D$  ve  $T_M$  periyotları aşağıdaki gibidir. Burada  $W$  yapı ağırlığı,  $g$  yerçekimi ivmesidir.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{D\text{min}} g}} \quad (9.8)$$

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{M\text{min}} g}} \quad (9.9)$$

$$K_{Def f} = (F_D^+ + F_D^-) / (D_D^+ - D_D^-)$$

$$K_{Meff} = (F_M^+ + F_M^-) / (D_M^+ - D_M^-)$$

$K_{Dmin}$  : Test sonucu hesaplanan  $D_D$  yer değiştirmesindeki  $K_{Def f}$  'in minimum değeri

$K_{Dmax}$  : Test sonucu hesaplanan  $D_D$  yer değiştirmesindeki  $K_{Def f}$  'in maksimum değeri

$K_{Mmin}$  : Test sonucu hesaplanan  $D_M$  yer değiştirmesindeki  $K_{Meff}$  'in minimum değeri

$K_{Mmax}$  : Test sonucu hesaplanan  $D_M$  yer değiştirmesindeki  $K_{Meff}$  'in maksimum değeri

Öntasarım aşamasında  $K_{Dmin}$ ,  $K_{Dmax}$ ,  $K_{Mmin}$  ve  $K_{Mmax}$  değerleri bilinmemektedir. Tasarım süreci,  $K_{eff}$ 'in, benzer bileşenlerdeki önceki test sonuçlarından veya izolatörün malzeme karakteristikleri ve şeması göz önünde bulundurularak tahmini bir değer ile başlar. Öntasarım yeterli düzeyde tamamlandıktan sonra mesnet prototipleri test edilir ve yukarıdaki  $K_D$  ve  $K_M$  değerleri test sonuçlarından elde edilir.

$F_D^+$ ,  $F_D^-$ ,  $F_M^+$ ,  $F_M^-$  ve  $D_D^+$ ,  $D_D^-$ ,  $D_M^+$ ,  $D_M^-$  terimleri DBE ve MCE tepki düzeylerine karşı gelen ve sistemin mekanik karakteristiklerini belirleyen prototip mesnetlerin maks. ve min. kuvvet ve yer değiştirmeleridir. Prototip mesnetlerin sonuçları ile öntasarım güncellenir.

#### 9.4.9. Toplam tasarım yerdeğiştirmeleri

Burulma etkisini de içeren toplam tasarım yerdeğiştirmeleri şu şekilde verilir ;

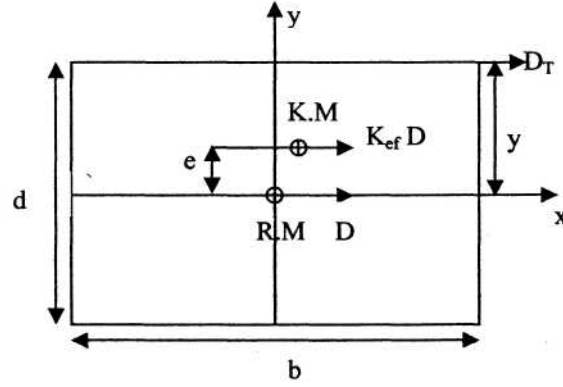
$$D_{TD} = D_D \left( 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (9.10)$$

$$D_{TM} = D_M \left( 1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \quad (9.11)$$

$e$  : Gerçek eksantrisite + %5 rastlantısal eksantrisite

$y$  : Sismik yükleme doğrultusuna dik bir köşe noktasına olan uzaklık

Bu formül,  $K_{\text{eff}}D$  yatay kuvvetinin rijitlik merkezinden  $e$  uzaklığındaki kütle merkezine uygulandığını varsaymaktadır (Şekil 9.2).



**Şekil 9.2:** Burulma etkisinin planda gösterilmesi ([2]'den alınmıştır.)

Planı dikdörtgen şeklinde olan,  $b \times d$  boyutlarında ve izolatörlerin üniform olarak dağıldığı kabul edilen izolasyon sisteminin burulma rijitliği  $K_{\text{eff}} (b^2 + d^2) / 12$  ve  $\theta$  dönmesi ;

$$\theta = \frac{K_{\text{eff}} D e}{K_{\text{eff}} \frac{(b^2 + d^2)}{12}} = \frac{12 D e}{b^2 + d^2} \quad (9.12)$$

$\theta$  dönmesinden dolayı oluşan ek yer değiştirme  $\left( \frac{12 D e}{b^2 + d^2} y \right)$  teriminin (9.10) ve (9.11) denkleminde göz önüne alındığı görülmektedir.

Yönetmelik (9.3) ve (9.4) ile verilen  $D_D$  ve  $D_M$  değerlerinin aşağıda verilen  $D_D'$  ve  $D_M'$  değerleri ile değiştirilerek, toplam tasarım yer değiştirmelerinin azaltılmasına izin vermektedir.

$$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left( \frac{T}{T_D} \right)^2}} \quad (9.13)$$

$$D_M' = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left( \frac{T}{T_M} \right)^2}} \quad (9.14)$$

Yukarıdaki formüllerde T, üstyapı için yönetmelikte ampirik formülle hesaplanan ankastre mesnetli yapı periyodunu ifade etmektedir.

Eğer sistemin gerçek burulma rijitliği hesaplanırsa ve bu değer (9.10) ve (9.11) ile verilen denklemlerden küçükse, kullanılmasına izin verilir ancak büyükse maksimum  $1,1 D_D$  ve  $1,1 D_M$  değerlerini geçmemelidir.

#### 9.4.10. Tasarım kuvvetleri

İzolasyon seviyesinin altında kalan elemanların tasarımında kullanılacak olan tasarım kuvvetleri tasarım yer değiştirmesi cinsindedir ve aşağıda verildiği şekildedir ;

$$V_D = \sum K_D D_D \quad (9.15)$$

İzolasyon seviyesi üzerinde kalan elemanların tasarımındaki kuvvet düzeyi taban kesme kuvvetine göre belirlenir ve formu aşağıdaki gibidir ;

$$V_{s,D} = (\sum K_D) D_D \frac{B_D}{R_i} \quad (9.16)$$

Her durumda  $V_{s,D}$  şunlardan küçük olmamalıdır.

- UBC-97 ankastre mesnetli taban kesme kuvvetinden
- Tasarım rüzgar yükünün karşılığı olan taban kesme kuvvetinden
- İzolasyon sistemini tamamen aktif hale geçiren yatay yükün 1,5 katından

UBC-97 ankastre mesnetli V taban kesme kuvveti şöyle hesaplanır;

$$0,11C_a I W \leq V = \frac{C_v I}{RT} W \leq \frac{2,5C_a I}{R} W \quad (9.17)$$

Bu denklemden  $C_a = C_{AD}$  ve  $C_v = C_{VD}$  olup değerleri Tablo 9.7 ve Tablo 9.8'e göre bulunur. Ayrıca I bina önem katsayısını, R ve T'de sırasıyla ankastre mesnetli durum için taşıyıcı sistem süneklik katsayısını ve birinci doğal titreşim periyodunu ifade etmektedir. UBC-97'ye göre I değişkeni 1,0 ~ 1,25 ve R değişkeni de 2,2 ~ 8,5 aralığında farklı değerler almaktadır.

Tablo 9.12’den görüldüğü üzere süneklik katsayıları ankastre mesnetli duruma göre oldukça küçüktür. Bunun birkaç sebebi bulunmaktadır. Taban izolasyonunda periyot artmakta ve kuvvet talebi azalmaktadır. Eşzamanlı olarak da yapıdaki sönüm histeretik hareket sebebiyle artmaktadır. Elemanlardaki kuvvet uyumu dolayısıyla fazla zorlanan elemanların kuvveti diğerlerine aktarması ile akma diğer elemanlara da yayılmaktadır. Ankastre mesnetli durumda ise sadece uyum ilkesinden bahsedilebilir. Büyük süneklik talepleri, yapısal ve yapısal olmayan elemanlarda hasar anlamına da gelebilir. Düşük süneklik talepleri, izole edilmiş yapılar için aynı zamanda hasarın kontrol edilmesi anlamına gelmektedir.

**Tablo 9.12:** Karşılaştırmalı süneklik katsayısı tablosu

Taşıyıcı Sistem	Yatay Kuvveti Karşılıyıcı Eleman	R	R <sub>i</sub>
Duvar	Betonarme	4,5	2,0
	Yığma	4,5	2,0
Çerçeve	Dışmerkez çelik çaprazlar	7,0	2,0
	Betonarme perde duvarlar	5,5	2,0
	Yığma perde duvarlar	5,5	2,0
	Normal çelik çaprazlar	5,6	1,6
	Özel dışmerkez çelik çaprazlar	6,4	2,0
Moment Taşıyıcı Çerçeve	Süneklik düzeyi yüksek betonarme veya çelik çerçeve	8,5	2,0
	Süneklik düzeyi orta betonarme çerçeve	5,5	2,0
	Süneklik düzeyi düşük betonarme çerçeve	4,5	2,0
Karma	Perde duvar + süneklik düzeyi yüksek betonarme çerçeve	8,5	2,0
	Perde duvar + süneklik düzeyi düşük çelik çerçeve	4,2	2,0
Konsol Kolon	Konsol kolon	2,2	1,4

#### 9.4.11. Yatay kuvvetin katlara dağıtılması

UBC’nin önceki sürümlerinde, yapı sistemi üzerindeki atalet kuvvetlerinin düşey dağıtımı, yüksek modların ihmal edilebilirliği ve tüm kat seviyelerindeki kat ivmelerinin yaklaşık olarak aynı olacağı kabullerine dayanıyordu. Ancak bu kabul yeterince konservatif olmayabileceği için UBC-97’nin sonraki sürümlerinde x düzeyindeki yatay kuvvetin (F<sub>x</sub>), taban kesme kuvvetinden (V<sub>s,D</sub>) hesaplandığı bir şekilde dönüştürülmüştür.

$$F_x = V_{s,D} \frac{h_x w_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (9.18)$$

$w_x, w_i$  : x ve i düzeyi kat ağırlığı

$h_x, h_i$  : x ve i düzeyindeki katların izolasyon seviyesinden ölçülen toplam yüksekliği

#### 9.4.12. Göreli kat ötelenmeleri

İzole edilmiş yapılarda göreli kat ötelenmeleri  $0,010/R_i$  değerini aşmamalıdır. Bu limit değer, periyodu 0,7 sn' den küçük ankastre mesnetli yapılar için  $0,025 \times$  kat yüksekliği ve 0,7 sn'den daha büyük periyotlu ankastre mesnetli yapılar için  $0,020 \times$  kat yüksekliği şeklindedir.

#### 9.5. Dinamik Analiz

Dinamik analiz pek çok durumda gereklidir ve tepki spektrumu analizi veya zaman tanım alanında analiz olarak icra edilebilir.

Aşağıdaki durumlarda yapı bölgesine ait spektrum eğrisi gerekmektedir ;

- İzole edilecek yapı yumuşak zeminde bulunuyorsa ( $S_E$  ve  $S_F$ )
- 10 km ve daha yakında aktif fay hattı bulunuyorsa
- MCE düzeyinde bir deprem için izole edilmiş yapı periyodu 3 sn. den büyükse  
Aşağıdaki durumlarda da dinamik analiz gereklidir ;
- Bölgesel spektrum eğrisi gerekiyorsa
- Üstyapı yatayda ve düşeyde düzensizse
- Bina 4 kattan daha fazla veya 19,8 m. den daha yüksekse

Zaman tanım alanında analiz, tepki spektrumu analizinin yerine kullanılabilir ancak zaman tanım alanında analiz için en az 3 adet ayrı ivme kaydına ihtiyaç bulunmaktadır. Kayıtlar DBE ve MCE düzeylerindeki depremleri temsil edebilmeli ve ayrıca yapının yerine, zeminine ve deprem kaynağı özelliklerine uygun olarak düzenlenmiş olmalıdır. Yapı için düzenlenen kayıtlar aktif faydan en çok 15 km uzaklıkta kaydedilmiş olmalıdır.

Dinamik analiz uygulandığında, statik analizden daha küçük yer değiştirme ve tasarım kuvvetleri bulunabilir. Bu konudaki yönetmelik hükümleri Tablo 9.13'de verildiği gibidir (UBC-97, kısım IV, bölüm 1659-3) [5].



**Tablo 9.13:** Farklı analiz tipleri için yönetmelik hükümleri

	Statik Analiz	Tepki Spektrumu Analizi	Zaman Tanım Alanında Analiz
$D_{TD}$	$D_{TD} \geq 1,10D_D$	$0,90 D_{TD}$	$0,90 D_{TD}$
$D_{TM}$	$D_{TM} \geq 1,10D_D$	$0,80 D_{TM}$	$0,80 D_{TM}$
$V_D$	$V_D = K_{Dmax} D_D$	$\geq 0,90V_D$	$\geq 0,90V_D$
$V_{s,D}$ (Düzenli yapı)	$V_{s,D} = K_{Dmax} D_D B / R_i$	$\geq 0,80V_{s,D}$	$\geq 0,60V_{s,D}$
$V_{s,D}$ (Düzensiz yapı)	$V_{s,D} = K_{Dmax} D_D B / R_i$	$\geq 1,00V_{s,D}$	$\geq 0,80V_{s,D}$
Görelî Yer değiştirme	$0,010/R_i$	$0,015/R_i$	$0,020 / R_i$

### 9.6. Yapısal Olmayan Elemanlar

İzolasyon sistemi seviyesinin üzerinde kalan yapısal olmayan elemanlar,  $D_{TM}$  toplam maksimum yer değiştirmesine göre hesaplanırken, izolasyon sistemi seviyesi altında kalan elemanlar klasik ankastre mesnetli tasarım prosedürlerine göre hesaplanabilirler. Buna ek olarak, çevre koşulları, rüzgar kuvvetleri ve yangına karşı mukavemet gibi konular da tasarımda ele alınması gereken unsurlardır.

### 9.7. Tasarım ve Prototip Testleri Hakkında Bilgiler

Hesapta kullanılan sabit yük ile MCE düzeyindeki sismik yükün etkisinde yapıda oluşan devrilme etkisinin tahkik edilmesi gerekmektedir. Bu tahkikin yapılması koşuluyla izolatörler üzerinde kısmen çekme gerilmeleri oluşumuna izin verilmektedir. Sistemdeki bazı izolatörler çekme gerilmesine maruz kaldığında diğer izolatörler üzerinde daha yüksek düşey yük etkisi oluşmaktadır. Eğer bu durum varsa, izolatörler çekme yükü ve artan düşey yük altında test edilmeli ve tasarlanmalıdır.

MCE düzeyindeki bir deprem için  $1,2DL + 1,0LL + E_{max}$  ve  $0,8DL - E_{min}$  yük kombinasyonları altında ve  $D_{TM}$  toplam maksimum yer değiştirmesi altında izolatörlerin stabil olması yönetmelik şartıdır. Burada  $E_{max}$  en büyük düşey yükü ve  $E_{min}$  de en küçük düşey yükü veya en büyük çekme yükünü ifade etmektedir [5].

Taban izolasyonu projelerinde genellikle üstyapı ve izolasyon sisteminin tasarlanması için gerekli bilgi, yönetmeliklerin kapsamadığı izolatör mesnetlerinin prototip test sonuçlarından elde edilir. Öntasarım aşamasından sonra izolatörler

imal edilerek, çok kapsamlı bir prototip test programı yürütülür. Yönetmeliğe göre her tip izolatör için en az 2 adet (1/1) ölçeğinde prototip test edilmelidir. Testler küçük yer değiştirme döngülerinden en büyük yer değiştirme döngülerine kadar DL+0,5LL yük kombinasyonunda icra edilir. En büyük yatay yer değiştirme döngülerinin en büyük ve en küçük düşey yüklerle birlikte olması durumunda bir diziyi aşkın yük testi uygulanır. Bu testler için en büyük düşey yük  $1,50DL + 0,50LL + E_{max}$  ve en küçük düşey yük de  $0,8DL - E_{min}$  olarak tanımlanmıştır. Bazı durumlarda en küçük yükün çekme yükü olma ihtimali mevcuttur.

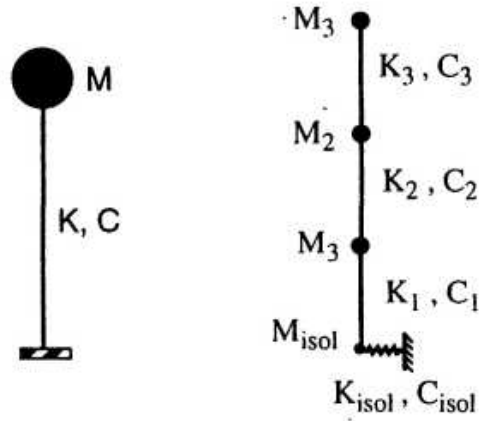
Kauçuk mesnetlerin bir miktar çekme alma kapasitesi olmasına rağmen test ekipmanları genellikle çekme kuvvetleri ile kayma yer değiştirmelerini eşzamanlı olarak uygulayamadığından bu tip bir testi yapmak oldukça zor görülmektedir.

Tasarımda çekme kuvvetleri, yatay yükün sadece birkaç sıra izolatör ile karşılandığı durumlarda meydana gelmektedir. İzolatörlerin üzerindeki sabit yük çekme kuvvetlerini karşılayamadığında, izolatörler üzerinde yüksek devrilme kuvvetleri oluşmaktadır. Eğer tasarımda, üstyapıdaki kolonlar yatay yüke direnci etkili olarak paylaşırsa, her kolondaki sabit yük çekme kuvveti oluşması ihtimalini ortadan kaldırır. Böylece izolatörlerin çekme altında test edilmesi problemi giderilmiş olur. Eğer mesnetlerde çekme ortaya çıkarsa, sadece mesnetler değil, mesnetleri temele bağlayan birleşim elemanları da test edilmek zorundadır.

## 10. TABAN YALITIMLI YAPILARIN ANALİZİ ve YAPISAL MODELLENMESİ

### 10.1. Davranışın Modellenmesi

Sismik izolasyon uygulanan bir yapının tasarımında ve analizinin çeşitli evrelerinde kullanılmasında istenen modelin karmaşıklığı, belirli bir evrede modelin amacına ve sonuçlarının istenen doğrulukta olmasına bağlıdır. Başlangıçtaki tasarım evresinde düşünülen en basit yaklaşım üst yapının tek bir kütle olarak, rijitliği izolasyon sisteminin rijitliğine eşit en basit model olan tek serbestlik dereceli (SDFS) bir sistemdir. Bu model (Şekil 10.1) yeterli bir ölçütte ön hazırlık tasarım aşamalarında sismik izolasyon yapılan yapının tüm özelliklerini en iyi şekilde temsil edebilmektedir. Sismik izole edilen bir yapının davranışı genellikle en baskın eigen mod olarak kabul edildiğinden tek serbestlik dereceli sistem modellemesi ankastre mesnetli yapı tipinden çok izole edilmiş bir yapı için genellikle daha uygun sonuçlar verebilmektedir. Bu sonuç her iki sınır şartları için (Tabandan ankastre ve izole) bir yapının eigen modlarını hesaplayarak ispat edilebilir [8].



**Şekil 10.1:** Taban yalıtımlı yapıların analizinde kullanılan tek serbestlik dereceli sistem modeli ([8]'den alınmıştır.)

### 10.2. Titreşimin Doğal Modları

N serbestlik dereceli lineer-elastik bir yapının davranışı sistemin N adet normal titreşim modunu göz önünde bulundurarak, N adet bağımsız tek serbestlik dereceli sistemlerin tepkilerinin toplamı olarak modal analiz yöntemi ile hesaplanabilir. Her

bir modun katılım oranı baskın eigen mod ve üst yapının rijit cisim hareketinin önemini işaret etmektedir. Ayrıca izole edilmiş bir yapının davranışını anlamada, salınım yapan binanın deformasyon şekillerinin eigen modları olduğunu düşünerek bir yaklaşım sağlanabilir. Sonuç olarak, ön tasarım aşamasında tek serbestlik dereceli model yaklaşımı ile birinci modun harekete en yüksek katılımı yaptığı kolayca doğrulanabilir. Modal analiz ve mod birleştirme metotları çok serbestlik dereceli sistemlerin lineer-elastik analizlerini yürütmek için en çok kullanılan yöntemlerdir; hareketin diferansiyel denklem sistemi, davranışın genellikle bir tepki spektrum formu olarak genellenip, bağımsız tek serbestlik dereceli sistemler grubu olarak ayrıklaştırılabilmektedir. Kütleleri tek bir noktaya yoğunlaştırılmış çok serbestlik dereceli bir sistem için hareket denklemleri, dış yükü deprem hareketi kabul eden zorlanmış titreşim olarak, aşağıdaki formda yazılabilir [15].

$$[M]\left[\ddot{U}(t)\right]+[C]\left[\dot{U}(t)\right]+[K][U(t)]=-[M]\left[\ddot{U}_g(t)\right] \quad (10.1)$$

Eğer sistem lineer-elastik ise, modların süper pozisyonu uygun görülebilir. Bu metodu kullanarak yapının eigen modları ile uyumlu elde edilen bağımsız denklemler aşağıdaki formda yazılabilir;

$$\ddot{\psi}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\psi}_i + \omega_i^2 \psi_i = -\ddot{U}_g \quad (10.2)$$

- $i$  : Herhangi bir moda ait indis
- $\psi$  : Genelleştirilmiş koordinat eksen
- $\xi$  : Sönüm oranı
- $\omega$  : Açısal frekans

Yapı kütlelerinin ivmelenmesi ve yer değiştirmeleri modal süper pozisyon yöntemi ile hesaplanabilir;

$$[U(t)] = [\phi][Y(t)] = \sum_{i=1}^N \left[ \phi_i \right] Y_i(t) = \sum_{i=1}^N \left[ \phi_i \right] \Gamma_i \psi_i(t) \quad (10.3)$$

$$\left[ \ddot{U}_{\text{total}}(t) \right] = \left[ \ddot{U}(t) \right] + \left[ \ddot{U}_g(t) \right] = \sum_{i=1}^N \left[ \phi_i \right] \Gamma_i \ddot{\psi}_i(t) + \left[ \ddot{U}_g(t) \right] \quad (10.4)$$

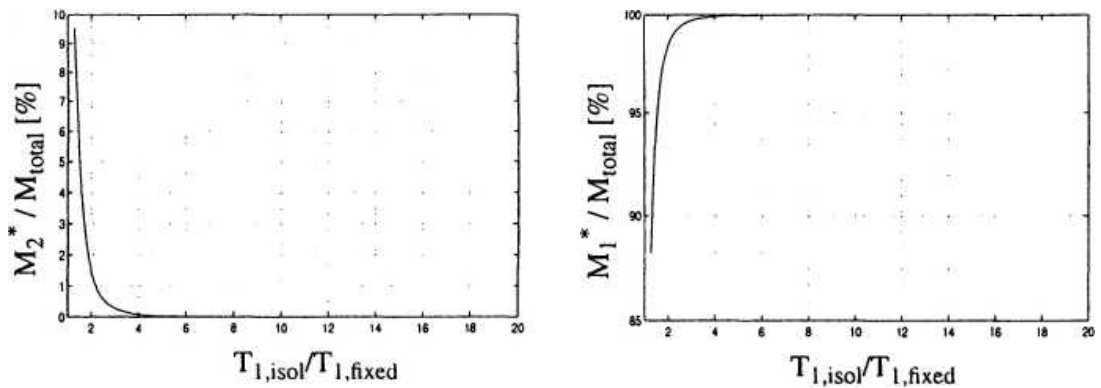
Her bir mod için katılım oranı olan  $\Gamma_i$ 'i aşağıdaki formül ile hesaplanır ;

$$\Gamma_i = \frac{\left[ \phi_i \right]^T [M][1]}{\left[ \phi_i \right]^T [M] \left[ \phi_i \right]} = \frac{L_i}{M_i} \quad (10.5)$$

Etkin modal kütle ( $M_i^*$ ) i. modda salım yapan kütlelerin yüzdesidir ve aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$M_i^* = \frac{L_i^2}{M_i} = \frac{\left( \left[ \phi_i \right]^T [M][1] \right)^2}{\left[ \phi_i \right]^T [M] \left[ \phi_i \right]}, \quad M_{\text{total}} = \sum M_i^* \quad (10.6)$$

Modal analiz, düşük eigen modların harekete daha yüksek katılım sağladığını (özellikle baskın periyottaki modlar için), bu nedenle yüksek modların en azından ön tasarım aşamasında ihmal edilebileceğini göstermektedir. Bu, ilk iki mod için etkin modal kütle olan  $M_i^*$ 'nin toplam kütle olan  $M_{\text{total}}$ 'a oransal değişimi gösteren Şekil 10.2'den anlaşılabilir.



**Şekil 10.2:** Modal kütlelerin yalıtım derecesi ile değişimi ([8]'den alınmıştır.)

Üç katlı yapı için eigen problem iki tip sınır koşulu için (tabandan ankastre ve izole) çözülür. Her iki sistemin yapısal özellikleri Tablo 10.1 ve Tablo 10.2'de gösterilmektedir. Özellikle Tablo 10.1 ankastre mesnetlenmiş sistem karakteristiklerini göstermektedir. Sismik izolasyon yapılan sistem özellikleri Tablo 10.2'de gösterilmektedir. Özellikle dikkat edilmesi gereken nokta izolasyon

seviyesinde kullanılan rijitliğin 50 MN/m seviyelerinde olmasıdır. Bu değer lineer bir sismik izolasyon sistemi için tipik değerdir.

**Tablo 10.1:** Ankastre mesnetli sistemin yapısal özellikleri

Kat Seviyesi	Kütleler (ton)	Rijitlikler (MN/m)
1	305	1250
2	285	1125
3	265	1125

**Tablo 10.2:** Sismik izole edilmiş sistemin yapısal özellikleri

Kat Seviyesi	Kütleler (ton)	Rijitlikler (MN/m)
İzolasyon	335	50
1	305	1250
2	285	1125
3	265	1125

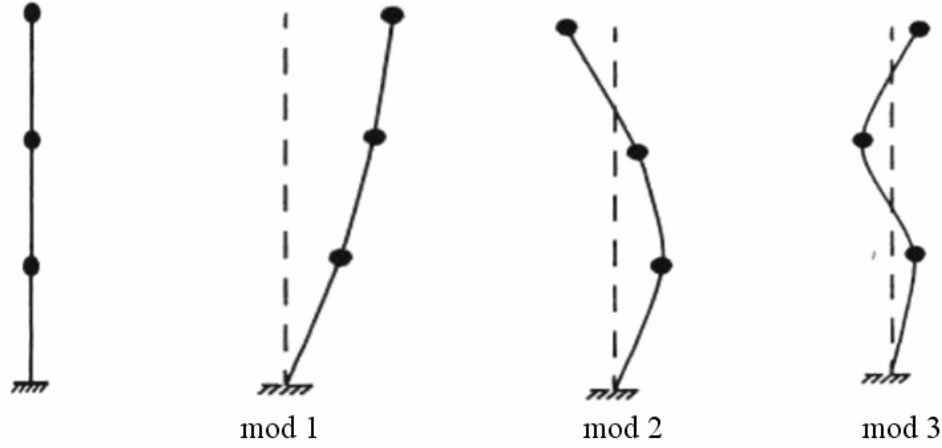
Eigen problem analizinin sonuçları Tablo 10.3’de ankastre sınır koşulları için, Tablo 10.4’de yalıtım sistemi için gösterilmiştir. Her iki sistemin eigen modları Şekil 10.3 ve Şekil 10.4’de sırası ile gösterilmektedir.

**Tablo 10.3:** Ankastre mesnetlenmiş sistemin doğal karakteristikleri ve etkin modal kütlesi

Normal mod	Periyot (sn)	Frekans (rad/sn)	Mode Şekilleri ([M] normalize edilmiş) kütle deplasmanı x 10000			Etkin Kütle (ton)	Toplam kütlenin % değeri
			6,00	1,28	4,11		
1	0,21	29,22	6,00	1,28	4,11	771,5	90,23
2	0,08	79,35	-13,65	5,52	-11,41	73,40	8,58
3	0,06	113,03	10,28	-3,90	6,92	10,1	1,18

**Tablo 10.4:** Taban yalıtımlı sistemin doğal karakteristikleri ve etkin modal kütleleri

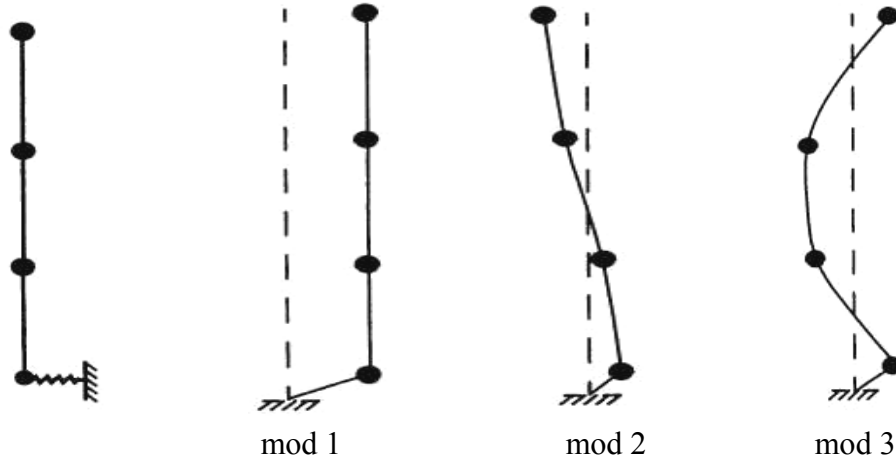
Normal mod	Periyot (sn)	Frekans (rad/sn)	Mode Şekilleri ([M] normalize edilmiş) kütle deplasmanı x 10000			Etkin Kütle (ton)	Toplam kütle nin % değeri
			8,87	9,13	9,41		
1	0,96	6,38	8,87	9,13	9,41	1189,7783	99,929
2	0,13	48,12	11,25	-5,65	-1,26	0,2062	0,068
3	0,07	89,61	8,54	-8,82	9,86	0,0101	0,003
4	0,05	115,66	-4,52	-12,43	5,77	0,0010	0,0002



**Şekil 10.3:** Ankastre mesnetli üç serbestlik dereceli sistemin serbest titreşim mod şekilleri ([8]'den alınmıştır.)

Taban yalıtımlı yapının birinci ve en etkin modu üst yapının rijit cisim hareketi ile karakterize edilmektedir ve Şekil 10.4'de gösterildiği gibi deformasyonlar izolasyon seviyesinde gerçekleşir. Sismik yer değiştirmeden kaynaklanan atalet kuvvetleri temel seviyesinde daha düşük seviyede devrilme momentleri yaratarak bina katları boyunca düzgün yayılı olarak dağılır. Aksine, temelde ankastre yapı olması durumunda, bu kuvvetlerin dağılımı yapı yüksekliğince doğrusal olarak artmaktadır. En etkin durumdaki eigen mod, izolasyon sistemi ve üst yapının rijitlikleri arasındaki büyük farklılıktan dolayı, rijit cisim hareketini göz önüne alarak, üst yapının rijitliğinden ve sönüm özelliklerinden tamamı ile bağımsızdır. Bu nedenle, başlangıç yaklaşımı olarak sismik izolasyon uygulanan bir yapı, izolasyon seviyesi üzerindeki tüm üst yapının toplam kat kütlelerini ve izolasyon sisteminin sönüm ve

rijitlik özelliklerini içinde barındıran tek serbestlik dereceli sistem (SDFS) tarafından karakterize edilebilir.



**Şekil 10.4:** Sismik taban yalıtımı uygulanmış doğrusal bir sistemin mod şekilleri ([8]'den alınmıştır.)

Sismik taban yalıtımlı bir yapının davranışını birinci titreşim modu (fundamental mod) temsil etmesine rağmen, yüksek modların yapı davranışına katkıları izolasyon sisteminin viskoz sönümü ile artabilmektedir. Yer değiştirme tepki spektrumu düşünüldüğünde, özellikle izolasyon seviyesindeki deplasmanlar tamamı ile yapının en etkin eigen modu olan birinci titreşim modunun (izolasyon modu) hakimiyetinde olmaktadır. Ancak, ivme tepki spektrumunda yüksek modların, etkin moda oranla daha yüksek spektral değerlere karşılık geldiği görülmektedir. Bu nedenle, yüksek modların yapı davranışına etkisi göz ardı edilmemesi gereken bir husustur. Bu gerçeğe rağmen, bu tür yüksek yapısal modların modal hareket içerisindeki küçük katılım oranları, yapı davranışına olumsuz etki potansiyellerini azaltmaya yetecek seviyelerdedir.

### 10.3. Lineer Davranış

Bazı yalıtım sistemleri viskoz sönüm özellikleri ile lineer-elastik olarak düşünülmesine karşın, diğer sistemler içsel olarak bir histeretik enerji dağıtma mekanizması ile lineer olmayan inelastik davranış sergilerler. Genelde en çok yaygın kullanılan lineer izolasyon sistemleri ek bir viskoz sönümleyicilerle beraber kullanılan doğal kauçuk mesnetler ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetlerdir (HDRB). Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler bünyesinde histeretik enerji dağıtma mekanizması içeren ve doğrusal olmayan davranış sergilemelerine rağmen denk



sönüm ve rijitlik özellikleri kullanılarak lineer sistemler olarak günümüzde kullanılmaktadırlar. Doğrusal sistemler, baskın frekansı izole edilen yapının baskın frekansına yakın dinamik yüklere maruz bırakılabilen düşük ve sabit bir izolasyon rijitliğine sahiptirler. Doğrusal sistemlerin viskoz enerji sönümleme mekanizması sabittir ve hem düşük hem büyük birim uzamalarda sürekli olarak sistemde mevcut durumdadır. Viskoz sönümleyiciye sahip lineer bir tek serbestlik dereceli (SDFS) sistemin diferansiyel hareket denklemi;

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -m\ddot{U}_g \quad (10.7)$$

veya yukarıdaki denkleme alternatif olarak ;

$$\ddot{U} + 2\xi\omega\dot{U} + \omega^2U = -\ddot{U}_g \quad (10.8)$$

denklemdaki  $\xi$  sönüm oranına karşılık gelmektedir ve aşağıdaki denklem yardımı ile bulunabilir ;

$$\xi = \frac{C}{C_{cr}} = \frac{C}{2M\omega} \quad (10.9)$$

Sistemin serbest titreşim açısal frekansı ( $\omega$ ) ve sönümlü sistem açısal frekansı ( $\omega_D$ ) tek serbestlik dereceli sistem için şu şekilde bulunabilir;

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{M}}, \quad \omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2} \quad (10.10)$$

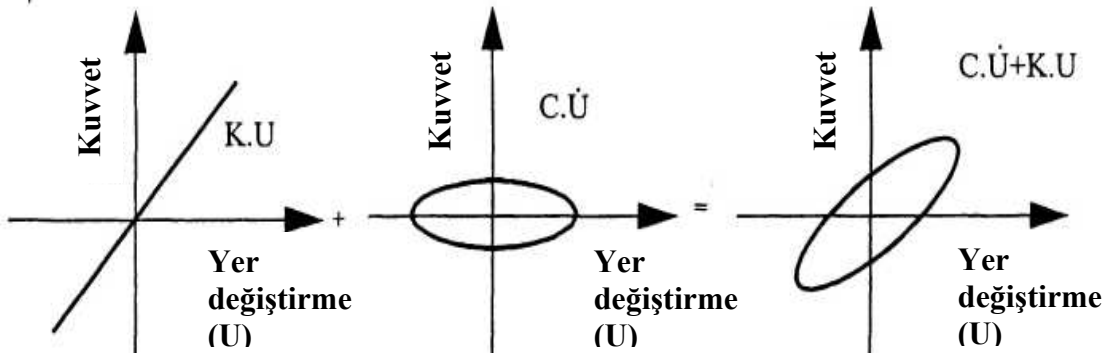
Elastomer mesnedin kayma yanal rijitliği sadece kauçuğun kayma deformasyonlarını göz önünde tutan, dönme ve eksenel kuvvetlerinden kaynaklanan deformasyonları ihmal eden aşağıdaki formül ile hesaplanabilir ;

$$K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad (10.11)$$

Eksenel kuvvetin etkisi; kritik burkulma yük değerinin altındaki, nispeten düşük eksenel gerilmelerin oluşması durumunda ihmal edilebilir. Tipik bir elastomer mesnedin kayma modülü 0.7 ~ 1.0 MPa seviyelerindedir. Yukarıdaki formül sadece

basit analizlerde ve başlangıç tasarım aşamalarında yatay rijitliğin hesabında kullanılan oldukça basit bir yaklaşımdır. En son tasarım aşamalarında ve analiz için daha detaylandırılmış bir model, örnek olarak düşey yükün kayma gerilmeleri üzerinde ve yatay rijitliğe etkisi gibi diğer faktörlerinde hesaba katılması gereken durumlara göre tasarlanmalıdır.

Viskoz olarak dağıtılan enerji kütlenin hızına bağlıdır ve Şekil 10.5(b)'de gösterilen eliptik bir histeretik çevrim ile karakterize edilmektedir.



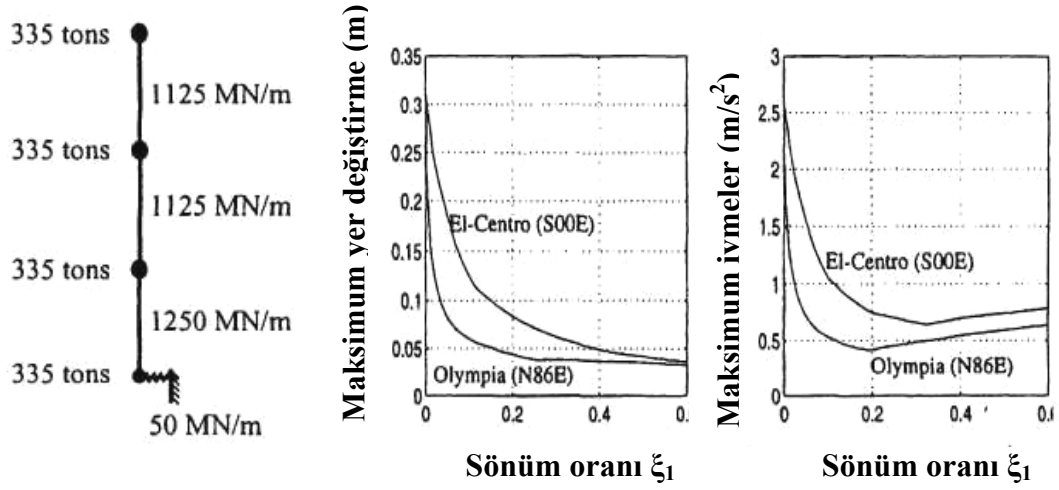
(a) Elastik kuvvet

(b) Sönüm kuvveti

(c) Elastik + Sönüm kuvveti

**Şekil 10.5:** Doğrusal bir yalıtım sisteminin yapısal karakteristikleri ([8]'den alınmıştır.)

Sönüm arttıkça, yapının deplasmanları azalmaktadır; bununla beraber sönüm oranı  $\xi = \%20 \sim \%30$  seviyelerine ulaşana kadar kütleli ivmelerde de azalım gözlenir ve hemen ardından daha yüksek sönüm oranları için küçük mertebelerde artmaya başlar. Bu olayın oluşumu doğrusal olarak izole edilmiş dört katlı modelin zaman tanım alanındaki dinamik analizi yoluyla gösterilebilir. Modelin yapısal özellikleri Şekil 10.6(a)'da verilmektedir. Etkin mod için tanımlanan sönüm  $\%2 \sim \%60$  arasında değişim gösterirken diğer modlar için sönüm oranı  $\%2$  mertebesinde kalmaktadır. Dinamik analiz, peak zemin ivmesi  $0.5g'$  ye eşit olacak şekilde ölçeklendirilmiş iki deprem kaydına göre (El-Centro ve Olympia) yürütülmüştür. Modelin Şekil 10.6(b)'deki maksimum göreceli yer değiştirme ve Şekil 10.6(c)'deki normalize edilmiş kütleli ivme değerleri, değişen sönüm oranının bir fonksiyonu olarak çizilmiştir.



(a) Yapısal özellikler (b) Maksimum yer değiştirme (c) Normalize maksimum ivmeler

**Şekil 10.6:** Viskoz sönümün doğrusal davranış sergileyen bir yalıtım sistemi üzerindeki etkisi ([8]'den alınmıştır.)

#### 10.4. Lineer Olmayan (Bilinear) Sistemler

Doğrusal olmayan davranış sergileyen en yaygın kullanıma sahip izolasyon sistemleri kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler (LRB) ve ek bir kuşun veya çelik sönümlendiricilerle birleştirilmiş doğal kauçuk mesnetlerdir. Lineer olmayan sistemler (Bilinear) yatay servis yükleri için oldukça faydalı olan yüksek başlangıç rijitliğine sahiptirler.

Doğrusal olmayan izolasyon sistemleri tipik olarak daha etkin ve enerji dağıtım mekanizması olarak daha güvenilir sistemlerdir. Ancak, bu enerji sönümlendirme mekanizması sadece çeliğin veya kurşun elemanın akma dayanımları aşıldığı anlarda izolasyon sisteminin etkinliğini arttırdıkları için her durumdaki yatay yüklemelerde fonksiyonelliğini gösterememektedir. Üstelik, yüksek oranda doğrusal olmayan (non-linear) izolasyon sistemleri, kayda değer şekilde kütsel ivmeleri ve bunun sonucunda yapıya ve onun içeriğine olumsuz etkileri olan atalet kuvvetlerini arttıran daha yüksek mod etkilerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedirler. Bu durum, en temel tasarım gereksinimi yapının taşıyıcı unsurlarının hasarını önlemeye yönelik olan durumlarda önem kazanmaktadır. Yüksek modların yapısal davranışa etkisi, tersinir yüklemeler altında izolasyon sisteminin rijitliğindeki ani değişimlerle artmaktadır.

## 10.5. Bilinear Davranışın Lineerleştirilmesi

Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler gibi (LRB), büyük oranda lineer olmayan bazı taban izolasyon sistemlerinin doğrusal olmayan davranışları başlangıç aşamasındaki tasarım amaçları için doğrusal davranışa dönüştürülebilir. Histeretik enerji sönümlemeden kaynaklanan doğrusal olmayan davranış aşağıda anlatılan sistemdeki sönümün lineerleştirme işlemleri sayesinde doğrusal davranışa dönüştürülebilir. Buna histeretik enerji sönümlemenin yerini alabilecek denk bir viskoz sönümün tanımlanması ile ulaşılabilir.

### 10.5.1. Etkin rijitlik

Başlangıçtaki elastik rijitlik, kurşun çekirdeğin tasarım akma dayanım seviyesi olan  $F_y$ ' ye ulaşana kadar küçük yatay yüklemeler için gerekli olan başlangıç rijitliğini sisteme sağlamaktadır.

$$K_{\text{eff}} = \frac{G_L A_L}{h_L} + \frac{G_r A_r}{t}, \quad K_r = \frac{G_r A_r}{t} \quad (10.12)$$

$G_L$  : Kurşun çekirdeğin kayma modülü

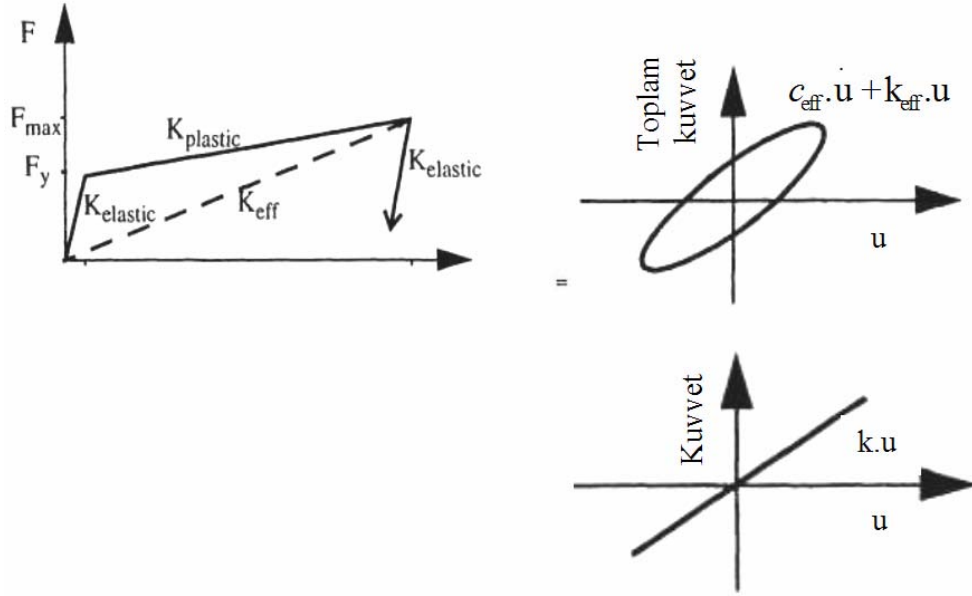
$G_r$  : Kauçuğun kayma modülü

$A_L$  : Kurşun çekirdeğin alanı

$A_r$  : kauçuğun alanı

$h_L, t$  : Kurşun ve kauçuğun toplam boyları

Etkili bir rijitlik ( $K_{\text{eff}}$ ) ve etkili bir sönüm oranı ( $\xi_{\text{eff}}$ ) izolasyon sisteminin lineer olmayan davranışını tanımlamada sıkça kullanılan karakteristiklerdir ve en azından hazırlık aşamasındaki tasarım evresinde oldukça faydalı olan denk bir doğrusal elastik analize imkan sağlamaktadır. Ancak, her iki etkin sistem parametreleri depremin ortaya çıkma şekline ve şiddetine bağlıdır ve bu parametrelerin saptanması birçok belirsizliğide beraberinde getirmektedir. Bu tür sistemlerin etkin rijirliği, pozitif ve negatif deplasmanların maksimum olduğu noktaları birleştirilmesi ile hesaplanır ve sekant modülü olarak tanımlanır [25]. Şekil 10.7'de lineer olmayan bir sistemin tipik bir kuvvet-yer değiştirme ilişkisi ve sekant modülü ( $K_{\text{eff}}$ ) gösterilmektedir.



**Şekil 10.7:** Doğrusal olmayan sisteme ait kuvvet-yer değıştirme ilişkisi ve lineerleştirilmesi ([8]'den alınmıştır.)

$$K_{\text{eff}} = \frac{F_y + K_r(u_{\text{max}} - u_y)}{u_{\text{max}}} = \frac{F_y(1 - K_r/K_l) + K_r u_{\text{max}}}{u_{\text{max}}} \quad (10.13)$$

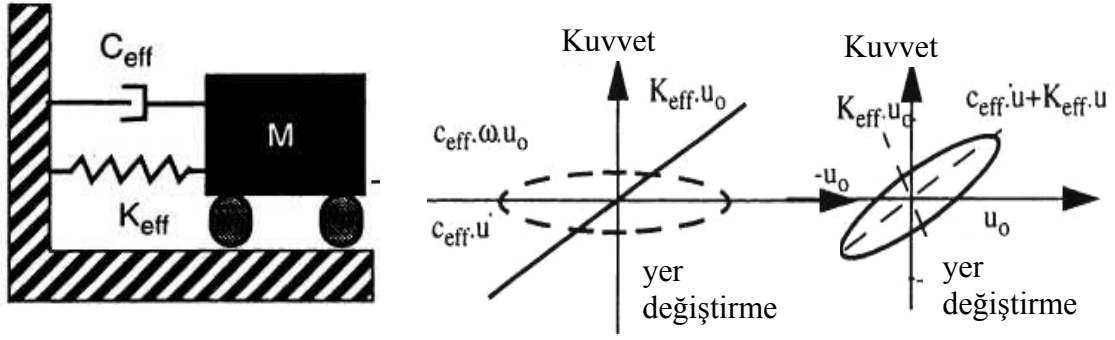
Sonucunda etkin periyot aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir;

$$T_{\text{eff}} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{\text{eff}}}} = 2\pi \sqrt{\frac{M u_{\text{max}}}{F_y(1 - K_r/K_l) + K_r u_{\text{max}}}} \quad (10.14)$$

### 10.5.2. Etkin sönüm

Etkin viskoz sönüm, gerçek histeretik sönümlenen enerjiyi temsil etmesi bakımından denk bir enerji eşitliği temeli üzerine tanımlanabilir. Denk sönüm katsayısı ( $\xi_{\text{eff}}$ ) histeretik sönümlenen enerjinin tam bir çevrim üzerine viskozca sönümlenen enerjiye eşitleyerek elde edilebilir. Ancak, viskoz sönüm ile enerji sönümleme hızın bir oranı olmasına karşın, histeretik yolla enerji sönümleme tersinir çevrimdeki yer değıştirmeler ile ilişkilidir ve ısı enerjisine dönüştürölüp sönümlenen kinetik enerjiye eşittir.

Viskoz sönüm ( $C_{eff}$ ) ve etkin bir rijitliğe sahip ( $K_{eff}$ ) tek serbestlik dereceli bir sistem Şekil 10.8(a)'da gösterilmektedir. Bu tür sistemler, histeretik enerji sönümlenimin yerini tutan denk bir doğrusal elastik sistemi belirlemek için kullanılmaktadır.



(a) Doğrusal SDFS (b) Elastik ve sönüm kuvvetleri (c) Toplam kuvvet

**Şekil 10.8:** Viskoz sönüme sahip lineer-elastik tek serbestlik dereceli sistem davranışı ([8]'den alınmıştır.)

Kütlenin ( $M$ ) serbest bir titreşimi için deplasmanın  $U(t) = U_0 \sin(\omega t)$  ve kütle hızının, yer değiştirme fonksiyonu türevi olduğunu düşünülürse  $\dot{U}(t) = U_0 \omega \cos(\omega t)$ ;

$\omega_i$  : Açısal frekans

toplam kuvvet (sönüm+elastik kuvvet) Şekil 10.8(c)'de gösterildiği gibi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir;

$$P_{dönüş} = C_{eff} \omega U_0 \cos(\omega t) + K_{eff} U_0 \sin(\omega t) \quad (10.15)$$

Sönüm oranı histeresis eğriden yararlanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\xi = \frac{(\text{Histeretik çevrim alanı})}{4\pi (\text{Elastik enerji alanı})} = \frac{E_d}{4\pi E_e} \quad (10.16)$$

ifade edilebilir ve deneysel olarak yukarıda bahsedilen salınımlar ile belirlenebilir.

Her bir çevrimdeki histeretik sönümlenen enerji;

$$E_d = \int_0^T P \frac{du}{dt} dt \quad (10.17)$$

deplasman ve hız için verilen ifadeleri denklemde yerine yazarsak ;

$$E_d = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (C_{\text{eff}} \omega u_0 \cos(\omega t) + K_{\text{eff}} u_0 \sin(\omega t)) \omega \cos(\omega t) dt \quad (10.18)$$

Yukarıdaki enerji denklemi integre edilirse, her bir çevrimdeki histeretik alanı verir ve sonuç olarak aşağıdaki denklem elde edilir;

$$E_d = \pi C_{\text{eff}} \omega u_0^2 \quad (10.19)$$

Maksimum elastik potansiyel enerji ;

$$E_e = 0,5 K_{\text{eff}} u_0^2 \quad (10.20)$$

denklemleri ile elde edilebilir.

Denklem (10.18)'de gerekli düzenlemeler yapılır ve sönümlü sistemin doğal açısal

frekansını  $\omega_D = \sqrt{\frac{K_{\text{eff}}}{M}}$  olarak alırsak, sistemin sönüm oranı ( $\xi$ ), etkin sönüm oranı

ile ( $\xi_{\text{eff}} = \frac{C_{\text{eff}}}{C_{\text{cr}}} = \frac{C_{\text{eff}}}{2\omega_n M}$ ) ilişkilendirilebilir.

$$\xi = \frac{\pi C_{\text{eff}} \omega u_0^2}{2\pi K_{\text{eff}} u_0^2} = \frac{C_{\text{eff}} \omega}{2K_{\text{eff}}} = \frac{2\xi_{\text{eff}} \omega_D M \omega}{2\omega_D^2 M} = \xi_{\text{eff}} \left( \frac{\omega}{\omega_D} \right) \quad (10.21)$$

Serbest titreşim için salınım frekansı yaklaşık olarak sistemin doğal açısal frekansına eşittir ( $\omega = \omega_D$ ) ve bu nedenle efektif sönüm oranı ( $\xi_{\text{eff}}$ ), sistemin sönüm oranına ( $\xi$ ), eşit çıkmaktadır. Efektif sönüm oranı, ( $\xi_{\text{eff}}$ ), deneysel olarak serbest titreşim testleri ile hesaplanır ve yüksek sönümlü kauçuk mesnetler için %10 ~ %15 mertebesindedir [26]. Sönümün yukarıda bahsedilen şekilde lineerleştirilmesi pratikte yanlış sonuçlar verebilecek birçok varsayımlar üzerinde kurulmuştur. Denk bir viskoz sönümün histeretik sönüm ile eşleştirilmesi (büyük oranda doğrusal olmayan sistemler için) birçok belirsizliği içinde barındırır. Birincil olarak, histeretik sönüm çevrimsel alana

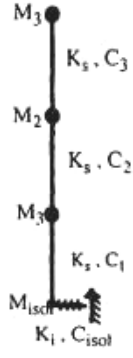
eşit olduğu için yer değiştirmenin büyüklüğüne bağımlıyken (sisteme giren deprem enerjisi ile doğru orantılı), viskoz sönüm hız ile doğru orantılıdır. Bununla birlikte, lineerleştirme prosedürü periyodik olarak tam bir çevrimsel döngü üzerine kurulmuşken bir depremde beklenen düzensiz ve karmaşık dalga hareketinden kaynaklanan minimum seviyede histeretik sönümüne sahip birçok küçük tersinir döngüyü içeriğinde barındırmaktadır. Tam bir periyodik çevrimini tamamlamamış viskoz sönüm değeri, bu tür durumlarda gerçekteki sönüm değeri üzerinde değerler verebilmektedir [26].

Deneysel çalışmaların sonuçları izole edilmiş yapıların maruz kalacağı serbest titreşimler üzerine yapılmaktadır. Buna rağmen, yaklaşık denk bir enerji eşitliği üzerine dayandırılmış eşit bir viskoz sönümün kullanımı başlangıç tasarım amaçları için izole edilen yapının davranışına kaba bir yaklaşım sağlamaktadır.

### **10.5.3. Üst yapı rijitliğinin davranışa etkisi**

Üst yapı rijitliğinin özellikle taban yalıtım sistemi rijitliğinden farkı gözle görülür oranda sismik izolasyonun verimliliğini etkilemektedir. Taban yalıtımlı yapının periyodunun, üst yapının temele ankastre olarak mesnetlenmiş halindeki periyoduna oranı olarak tanımlanan izolasyon sisteminin derecesi, direkt olarak her iki tür sınır koşuluna sahip yapı için üst yapı ve izolasyon rijitliğinin oranı ile ilişkilidir. Genellikle, üst yapı rijitliği arttıkça yalıtım seviyesindeki rölatif deplasman, artan etkili periyottan dolayı önemli bir şekilde artmaktadır. Bunu takriben yalıtım seviyesindeki artan rölatif deplasmanlardan dolayı taban kesme kuvvetinde artış gözlenmektedir [8]. Doğrusal davranış sergileyen bir yalıtım sistemi üzerine mesnetlenmiş üç serbestlik dereceli bir sistem (Şekil 10.9) üst yapının rijitliğindeki değişimden kaynaklanan etkileri göstermek amacı ile El-Centro depremi kuvvetli yer hareketi kayıtlarına maruz bırakılarak analiz edilmiştir.

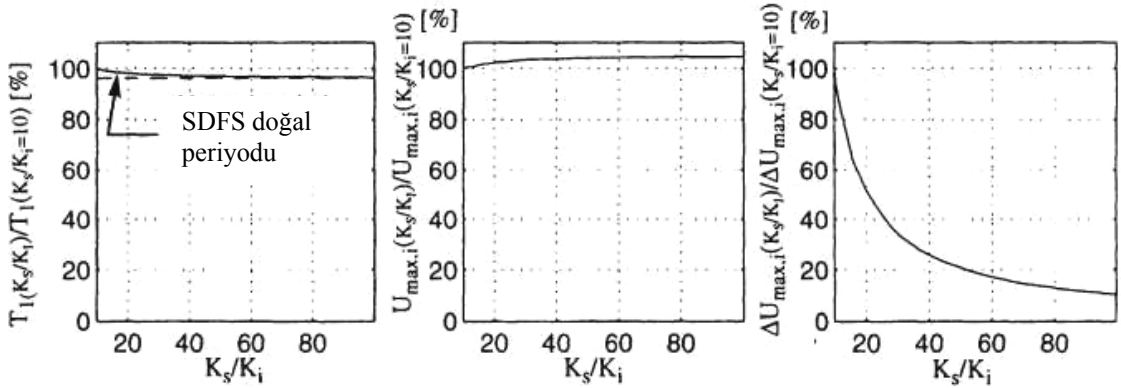




Kat Seviyesi	Kütleler [ton]	Rijitlikler [MN/m]	Sönüm Oranı $\xi$ [%]
Yalıtım	335	50	15
1	305	500 ~ 5000	2
2	285	500 ~ 5000	2
3	265	500 ~ 5000	2

**Şekil 10.9:** Taban yalıtımlı sistemin yapısal özellikleri ([8]'den alınmıştır.)

Üst yapı rijitliğinin, yalıtım sistemi rijitliğine ( $K_i$ ) oranı 10 ile 100 kat arasında değişiklik göstermektedir. Özellikle, yalıtılmış sistemin etkin periyodunun değişimi  $K_s/K_i = 10$  için etkin periyot değerine göre normalize edilerek Şekil 10.10(a)'da verilmiştir. Çok serbestlik dereceli sistemin etkin periyodu şekilde görüldüğü gibi üst yapı rijitliği sonsuza yaklaştıkça tek serbestlik dereceli sistemin periyot değerine yaklaşmaktadır. Yalıtım seviyesindeki rölatif deplasmanların ve rölatif kat ötelenmelerinin maksimum değerleri  $K_s = 10K_i$  değeri ile normalize edilerek Şekil 10.10(b) ve Şekil 10.10(c)'de verilmiştir. Üst yapının rijitliği, başlangıç rijitliğinin 10 katı olduğu durumda izolasyon seviyesindeki rölatif deplasman değeri % 5'ten daha az bir yüzde ile artış gösterirken, rölatif kat ötelenmeleri % 90 oranında azalmıştır.



(a) Etkin periyot

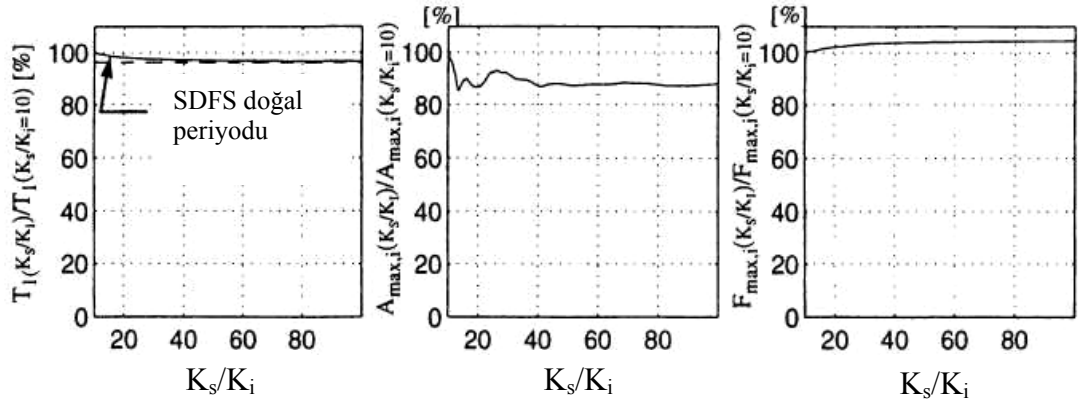
(b) Yalıtım seviyesindeki maksimum yer değiştirme

(c) Maksimum kat ötelenmesi

**Şekil 10.10:** Üst yapı rijitliğinin yalıtım seviyesindeki yer değiştirmeler üzerindeki etkisi ([8]'den alınmıştır.)

Maksimum kat ivmeleri ve taban kesme kuvveti değişimleri Şekil 10.11'de verilmiştir. Katlara etkiyen ivme değerleri yaklaşık olarak rijitlik farkının artması

ile %10 mertebesinde azalım gösterirken, taban kesme kuvvetleri %5'ten küçük bir oranda artış göstermiştir.



(a) Etkin periyot (b) Maksimum kat ivmesi (c) Maksimum taban kesme kuvveti

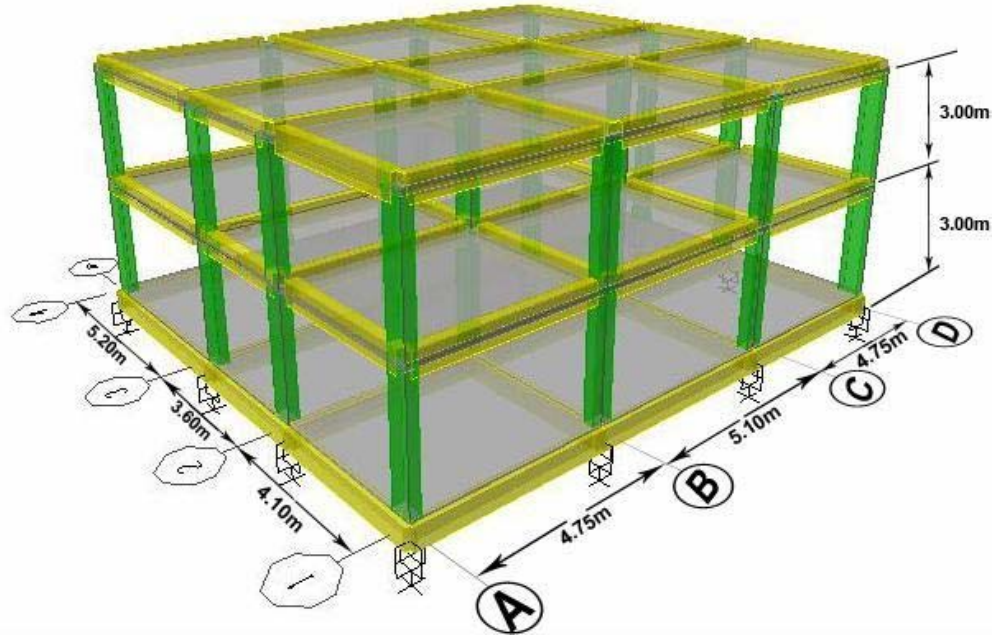
**Şekil 10.11:** Üst yapı rijitliğinin taban kesme kuvveti ve katlara etkiyen ivme değerleri üzerindeki etkisi ([8]'den alınmıştır.)

Sismik yalıtım kullanımında daha iyi bir performans elde etmek için üst yapının mümkün olduğu kadar rijit olmasına özen gösterilmesi gerekmektedir. Sismik taban yalıtım tekniği uygulanan binanın etkin frekansı, ankastre mesnetlenmiş sistemdeki etkin frekansından ne kadar çok uzaklaşırsa, yalıtılan yapının çok daha iyi seviyelerde performans sergilediği doğrulanmıştır.

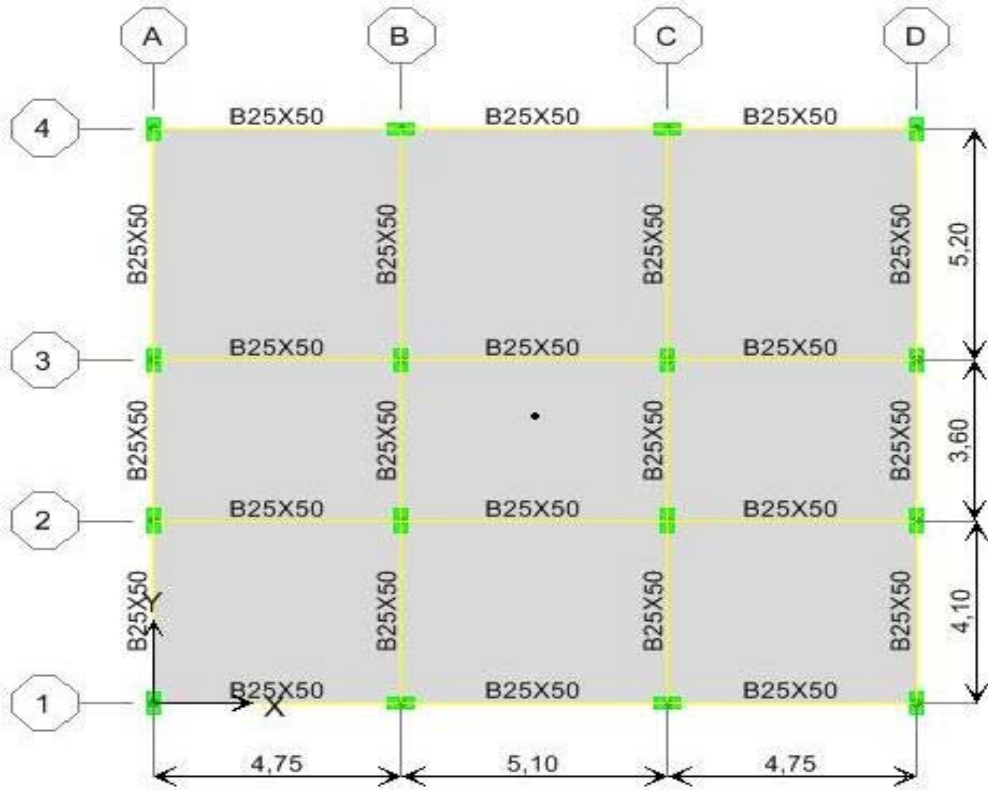
## 11. ANALİZDE KULLANILACAK YAPI VE DEPREM PARAMETRELERİ

### 11.1. Analizde Kullanılan Yapı Özellikleri

Analizde kullanılan yapıya ait örnek model “Seismic Base Isolation” [18] isimli kaynaktan alınmıştır. Binanın modellenmesi ve izolatörlerin programa tanıtılmasında “Örneklerle ETABS” [27] isimli kaynaktan yararlanılmıştır. İki katlı olan yapı, kolon ve kirişleri 25/50 cm boyutlarında ve her iki yönde 3 açıklığa sahip betonarme bir çerçeve sistemidir. Beton ve çelik sınıfları sırası ile C25 ve StIII olarak alınmıştır. Yapının her bir katındaki döşeme kalınlıkları 15 cm, yapının toplam ağırlığı yalıtım düzlemi dahil (%30 hareketli yük dahil edilmiştir) 9900 KN ve kat yükseklikleri 3 metredir (Şekil 11.1, 11.2, 11.3). Dinamik analizde kullanılan yalıtım elemanları kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerdir (LRB, Bölüm 6.4.1) ve iki tip olarak seçilmiştir (Tip-a ve Tip-b). Tip-a mesnetleri yapının dış çevresindeki, Tip-b mesnetleri yapı iç kolon altlarına, yalıtım düzlemi seviyesinde yerleştirilmiştir. Yapı analizinde iki farklı yöntem uygulanmıştır. Birinci yol olarak, ankastre mesnetli ve taban yalıtımlı durum için ‘eşdeğer deprem yükü yöntemi’ ile yapı çözümlenmiş ve yalıtım elemanları boyutlandırılmıştır. Devamında her iki sınır koşulu için dinamik doğrusal olmayan zaman tanım alanı hesap yöntemi kullanılmıştır. Eşdeğer deprem yükü çözümleme yönteminde yapıda kullanılan taban kesme kuvveti azaltma katsayıları sırası ile ankastre mesnetli yapı için  $R=8$  (T.D.Y, Tablo 6.5, 1-1.1), taban yalıtımlı sistem için  $R_f=2$  (UBC-97, Tablo A-16-E) olarak seçilmiştir. Son olarak, analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak sonuçlar bölümünde açıklanmıştır.



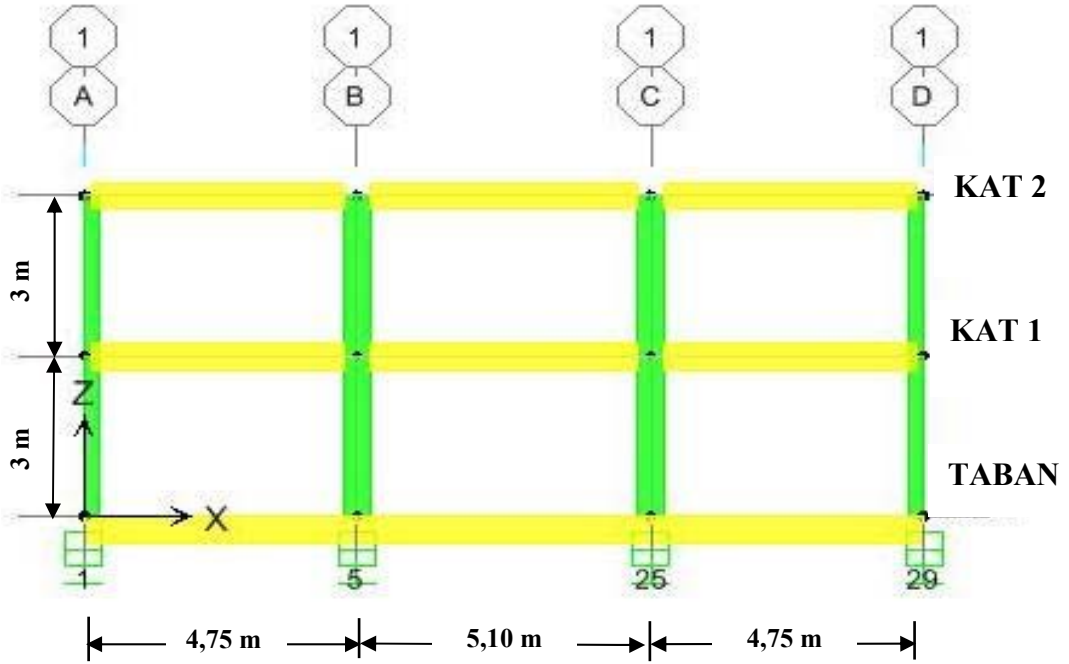
Şekil 11.1: Analizde kullanılacak olan iki katlı, üç açıklıklı taban yalıtımlı bina



Şekil 11.2: Yapının 2. kat plan görünümü ve kiriş boyutları

Kiriş Boyutları : 25x50 cm<sup>2</sup>

Kat Alanı : 188,3 m<sup>2</sup>



Şekil 11.3: Yapının kesit görünümü (Global x-z eksen takımı)

Kolon Boyutları : 25x50 cm<sup>2</sup>

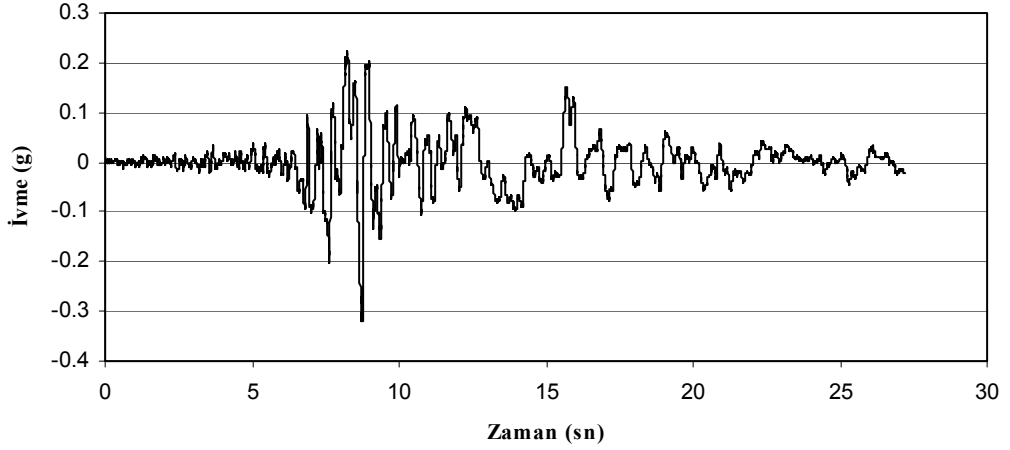
## 11.2. Deprem Parametreleri

Dinamik analizde kullanılmak amacı ile seçilen deprem ivme kayıtları 17 Ağustos 1999 tarihinde Düzce Meteoroloji İstasyonunda kaydedilmiş Kuzey-Güney ve Doğu-Batı doğrultusu bileşenlerini içeren verilerden oluşmaktadır. Deprem bileşenlerine ait detaylı bilgiler ve şekiller (Şekil 11.4, 11.5, 11.6, 11.7) aşağıda verilmiştir;

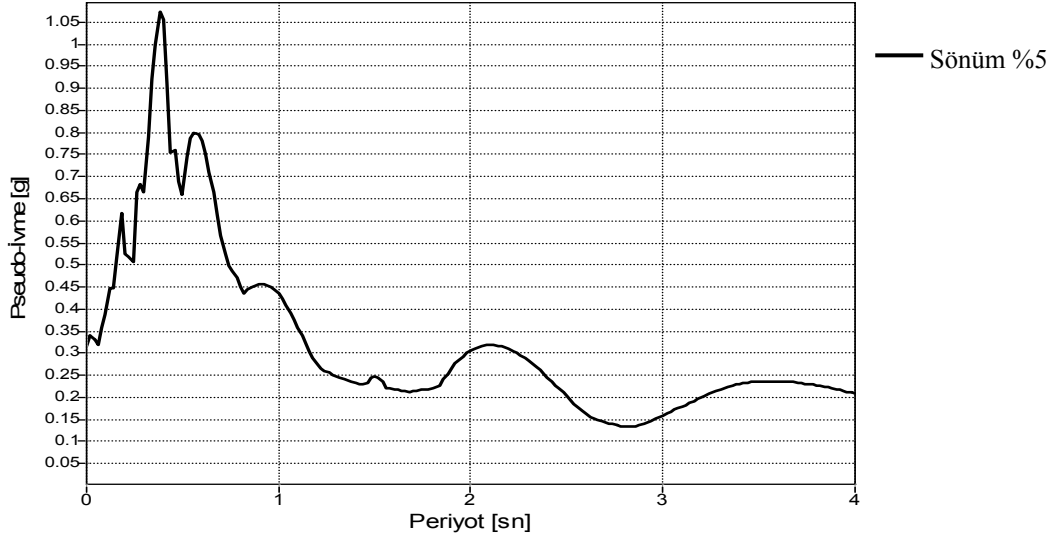
1. Düzce K-G Bileşeni (X-X doğrultusu) :

- Toplam data sayısı : 5438
- Toplam süre : 27,190 sn
- Süre artım miktarı : 0,005 sn
- Ölçülen maksimum ivme değeri : 0,321 g

17/08/1999 Kocaeli Depremi Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G Bileşeni



Şekil 11.4: Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G doğrultu bileşeni deprem kaydı

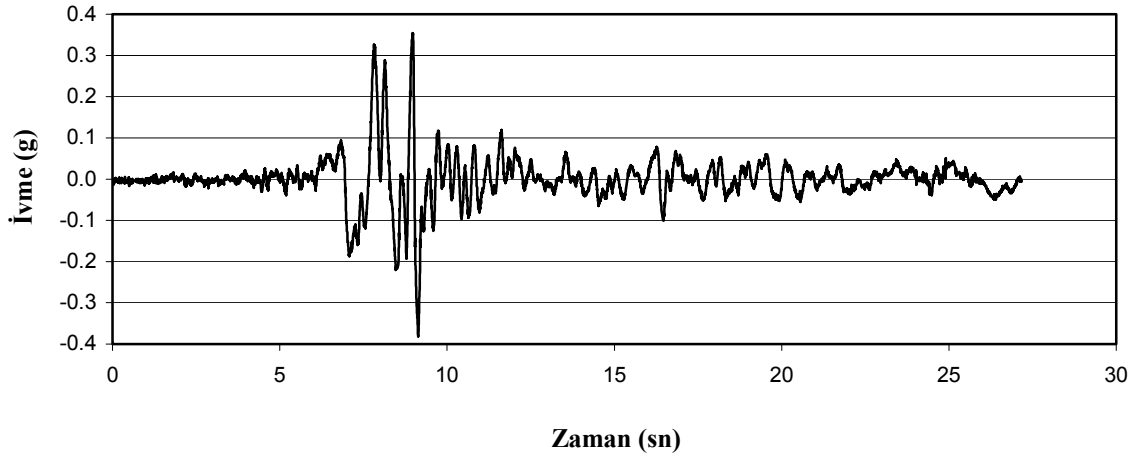


Şekil 11.5 Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G doğrultu bileşeni ivme spektrum eğrisi

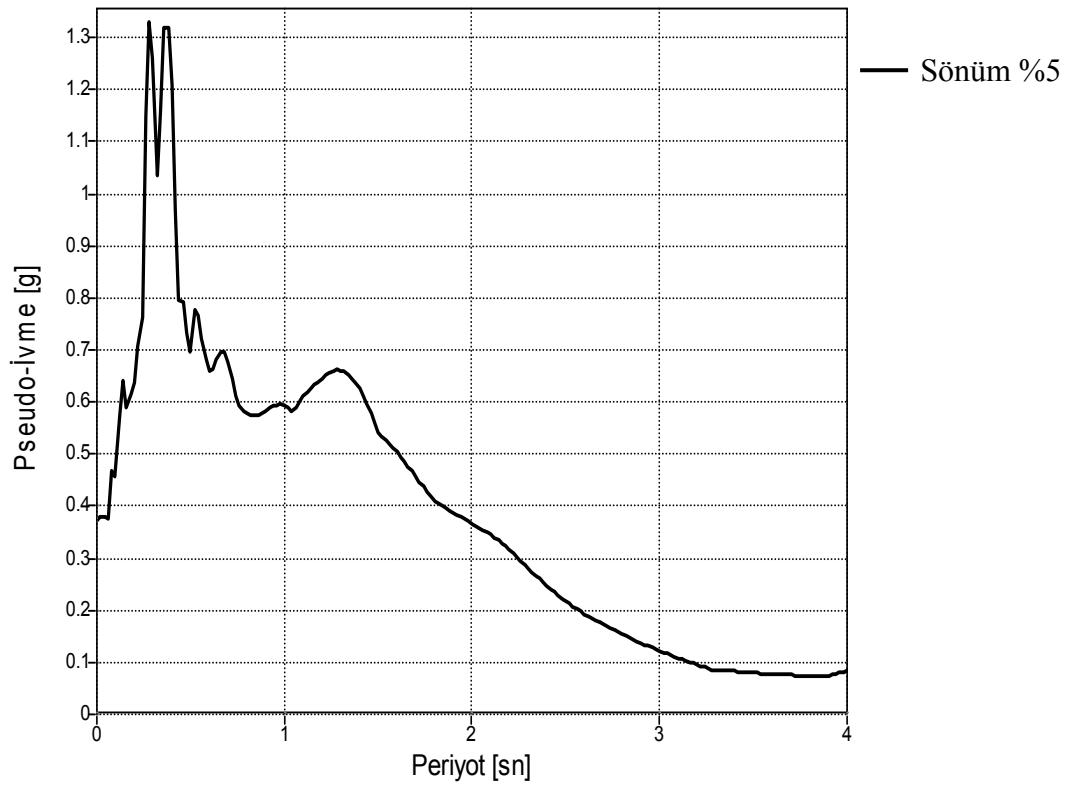
2. Düzce D-B Bileşeni (Y-Y doğrultusu) :

- Toplam data sayısı : 5437
- Toplam süre : 27,185 sn
- Süre artım miktarı : 0,005 sn
- Ölçülen maksimum ivme değeri : 0,381 g

**17/08/1999 Kocaeli Depremi Düzce Meteoroloji İstasyonu D-B  
Bileşeni**



**Şekil 11.6:** Düzce Meteoroloji İstasyonu D-B doğrultu bileşeni deprem kaydı



**Şekil 11.7** Düzce Meteoroloji İstasyonu D-B doğrultu bileşeni ivme spektrum eğrisi

## 12. ANALİZ

Analizde kullanılan yapı ilk olarak zemine ankastre mesnetli ve taban yalıtımlı sistemler için UBC-97 yönetmeliğinde yer alan eşdeğer deprem yükü yöntemi ile çözümlenecektir ve tabanda kullanılacak olan yalıtım elemanlarının boyutlandırılması yönetmelikte geçen kurallara göre yapılacaktır. Ardından, taban yalıtımlı sistem için UBC-97 yönetmeliği kullanılarak taban kesme kuvveti hesaplanıp kat kütle merkezlerine dağıtılacaktır. En son olarak, dinamik çözümleme (zaman tanım alanında) zemine ankastre ve yalıtımlı yapı için yapılacak, elde edilen sonuçlar taban kesme kuvveti, kolon uç momentleri, yer değiştirmeler ve görelî kat ötelenmesi kontrolü olarak karşılaştırılacaktır.

### 12.1. Yapının Statik Analizi (Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi)

UBC-97 yönetmelik hükümlerine göre yapının statik eşdeğer deprem yükü yöntemi ile çözümü yapılmıştır. Elastomer mesnetlerin boyutlandırılmasında ve statik deprem hesabında izlenecek adımlar ve kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir;

Yapı bünyesinde bulunan kirişlerin, kolonların, döşemelerin, duvarların ağırlıkları toplanarak katların toplam ağırlığı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$G_1 = 3131 \text{ KN (1. kata ait ölü yük miktarı)}$$

$$G_2 = 3131 \text{ KN (2. kata ait ölü yük miktarı)}$$

$$Q = 3 \text{ KN/m}^2 \text{ (hareketli yük)}$$

$$\text{Kat alanı} = 188,3 \text{ m}^2$$

$$W_1 = G_1 + n_x Q = 3131 + 0,3(3 \times 188,3) = 3300 \text{ KN}$$

$$W_2 = G_2 + n_x Q = 3131 + 0,3(3 \times 188,3) = 3300 \text{ KN}$$

$$\Sigma W_i = W_1 + W_2 = 6600 \text{ KN}$$



Ayrıca yalıtımlı yapıda yatay yüklerin mesnetlere eşit bir şekilde dağılmasını sağlamak için izolatörler üzerinde bir yalıtım düzlemi oluşturulmuştur. Bu düzlemin tüm en kesit özellikleri ve yük dağılımı üst kat döşemeler ile aynıdır. Bu nedenle sismik yalıtım yapılan yapının çözümünde yapı ağırlığı 9900 KN olarak hesaplanmış ve hesaplara yansıtılmıştır.

UBC-97 yönetmeliğinde ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı yapı için yatay yük hesabında kullanılacak parametreler aşağıdaki gibi seçilmiştir [5].

Sismik bölge katsayısı = Bölge 4,  $Z=0,4$  (UBC-97, kısım IV, Tablo 16.2)

Zemin profili =  $S_D$  (Sıkı Zemin, UBC-97, kısım IV, Tablo 16-J)

Sismik kaynak tipi = Tip A ( $M \geq 7$ ), kayma oranı  $SR \geq 5$  mm/yıl (UBC-97, kısım IV, Tablo 16-U)

Aktif fay yakınlık faktörü =  $\Delta > 15$  Km,  $N_a = 1$  ve  $N_v = 1$  (UBC-97, kısım IV, Tablo 16-S ve Tablo 16-T)

Tasarım depremi (DBE) sarsıntı şiddeti katsayısı ( $ZN_v$ ) = 0,4

Maksimum magnitüdü deprem (MCE) tepki katsayısı ( $M_M$ ) = 1,25 (UBC-97, kısım IV, Tablo A-16-D)

Sismik katsayılar Tablo 12.1 ve 12.2’de verilmiştir; (UBC-97, kısım IV, Tablo 16-Q ve Tablo 16-R)

**Tablo 12.1:** DBE düzeyi için spektral katsayılar

Zemin Tipi	Sismik Bölge Katsayısı (Z)	Aktif Fay Yakınlık Faktörü ( $N_v$ )	Aktif Fay Yakınlık Faktörü ( $N_a$ )	Spektral Sismik Katsayı ( $C_{VD}=0,64N_v$ )	Spektral Sismik Katsayı ( $C_{AD}=0,44N_a$ )
$S_D$	0,4	1	1	0,64	0,44

**Tablo 12.2:** MCE düzeyi için spektral katsayılar

Zemin Tipi	Sismik Bölge Katsayısı (Z)	MCE Tepki Katsayısı (M <sub>M</sub> )	Aktif Fay Yakınlık Faktörü (N <sub>V</sub> )	Aktif Fay Yakınlık Faktörü (N <sub>a</sub> )	Spektral Sismik Katsayısı (C <sub>AM</sub> =1,1M <sub>M</sub> ZN <sub>a</sub> )	Spektral Sismik Katsayısı (C <sub>VM</sub> =1,6M <sub>M</sub> ZN <sub>V</sub> )
S <sub>D</sub>	0,4	1,25	1	1	0,55	0,8

yalıtım sistemine ait etkin sönüm oranı ( $\beta_{eff}$ ),

$$\beta_{eff} = \beta_D = 0,15 \quad (\text{UBC-97, kısım IV, 65-7})$$

Sönüm azaltma katsayısı ( $B_D$ ),

$$\frac{1}{B_D} = 0,25 (1 - \ln \beta_{eff}) \longrightarrow B_D = 1,35 \quad (\text{UBC-97, kısım IV, Tablo A-16-C})$$

Taban yalıtımlı sistem için taban kesme kuvveti azaltma katsayısı ( $R_i$ ),

$$R_i = 2 \quad (\text{UBC-97, kısım IV, Tablo A-16-E})$$

Ankastre mesnetli yapı için taban kesme kuvveti;

$$0,11C_aIW \leq V = \frac{C_vI}{RT}W \leq \frac{2,5C_aI}{R}W \quad (\text{UBC-97, kısım IV, 30-4, 30-5 ve 30-6})$$

formülleri)

$$\frac{C_vI}{RT}W = \frac{0,64(1)}{8(0,49)}6600 = 1074 \text{ KN} \quad \frac{2,5C_aI}{R}W = \frac{2,5(0,44)1}{8}6600 = 907 \text{ KN}$$

(1074>907 olduğu için hesapta maksimum değer olarak V=907 KN kullanılacaktır.)

### 1. Tahmini periyotlar ve malzeme özellikleri

Başlangıç aşamasında yalıtım sistemi için seçilen titreşim periyotları sırası ile;

$$T_D = 2 \text{ sn} \quad (\text{DBE yapısal periyodu})$$

$$T_M = 2,5 \text{ sn} \quad (\text{MCE yapısal periyodu})$$

Yalıtım sistemi için iki farklı tip kuşun çekirdekli elastik mesnet seçilmiştir. Tip-a ve Tip-b türü bu mesnetlerin mekaniksel özellikleri küçük ve büyük birim uzamalarda aşağıda verilmiştir;

- Büyük birim uzamalarında kayma modülleri ( $G_a$  ve  $G_b$ );

$$G_a = 0,5 \text{ MPa}$$

$$G_b = 1,0 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{\max} = 1,5$$

- Küçük birim uzamalar için kayma modülleri ( $G_a$  ve  $G_b$ );

$$G_a = 0,7 \text{ MPa}$$

$$G_b = 1,4 \text{ MPa}$$

$$\gamma = 0,2$$

Her iki mesnet için düşey basınç elastisite modülü ( $E_c$ );

$$E_c = 2000 \text{ MPa}$$

## 2. Minimum yatay rijitlik hesabı

Mesnetlerin yatay rijitliklerini hesaplayabilmek için örnek yapının toplam ağırlığı kolonlara dağıtılmıştır. Plandaki 12 adet dış çevre kolonlarının her biri 530 KN, iç bölgede bulunan 4 adet kolonun her biri 885 KN taşımaktadır. Sismik yalıtımlı yapının çözümünde dış kolonların her birinin altına Tip-a, iç kolonların altına Tip-b türü elastik mesnet yerleştirilmiştir.

$$12 \times (530) + 4 \times (885) = 9900 \text{ KN (yalıtım düzlemi dahil ağırlık)}$$

Minimum yatay rijitlikler, DBE ve MCE düzeyi depremler için her bir elastomer mesnet tipinde aşağıdaki şekilde hesaplanır [5].

**Tip-a;**

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 (0,53)}{(2)^2 9,81} = 0,533 \text{ MN/m}$$

**Tip-b;**

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2 (0,885)}{(2)^2 9,81} = 0,890 \text{ MN/m}$$

**Tip-a;**

$$K_{Mmin} = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = \frac{4\pi^2 (0,53)}{(2,5)^2 9,81} = 0,341 \text{ MN/m}$$

**Tip-b;**

$$K_{Mmin} = \frac{4\pi^2 W}{T_M^2 g} = \frac{4\pi^2 (0,885)}{(2,5)^2 9,81} = 0,570 \text{ MN/m}$$

**3. Minimum yer değiştirme hesabı**

UBC-97 yönetmeliğinde taban yalıtımlı sistemlerin yatay yönde tasarım yer değiştirme hesaplarında kullanılan formüller aşağıdaki gibidir;

$$D_D = \frac{g C_{VD} T_D}{B_D (4\pi^2)} = \frac{9,81 (0,64) 2}{1,35 (4\pi^2)} = 0,24 \text{ m}$$

$$D_M = \frac{g C_{VM} T_M}{B_D (4\pi^2)} = \frac{9,81 (0,80) 2,5}{1,35 (4\pi^2)} = 0,368 \text{ m}$$

**4. Mesnet çaplarının belirlenmesi**

Her iki tip mesnedin  $\gamma_{max} = 1,5$  için kayma modülleri sırası ile;

$$G_a = 0,5 \text{ MPa (Tip-a)}$$

$$G_b = 1,0 \text{ MPa (Tip-b)}$$

UBC-97' ye göre mesnedin yüksekliği;

$$t = \frac{D_D}{\gamma_{\max}} = \frac{0,24}{1,5} = 0,16 \text{ m (seçilen yükseklik } t = 0,20 \text{ m)}$$

Buna göre Tip-a ve Tip-b türü mesnetlerin çapları ve alanları aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$A_a = \frac{K_D t}{G_a} = \frac{0,533(0,2)}{0,5} = 0,213 \text{ m}^2 \quad (\text{Tip-a})$$

$$D_a = \left( \frac{4A_a}{\pi} \right)^{0,5} = \left[ \frac{4(0,213)}{\pi} \right]^{0,5} = 0,52 \text{ m (Seçilen çap; } D_a = 0,60 \text{ m)}$$

$$A_b = \frac{K_D t}{G_b} = \frac{0,890(0,2)}{1} = 0,178 \text{ m}^2 \quad (\text{Tip-b})$$

$$D_b = \left( \frac{4A_b}{\pi} \right)^{0,5} = \left[ \frac{4(0,178)}{\pi} \right]^{0,5} = 0,476 \text{ m (Seçilen çap; } D_b = 0,55 \text{ m)}$$



**Şekil 12.1:** Mesnet tipleri ve çapları

Tip-a ve Tip-b türü mesnetler için kesit alanları tekrar hesaplanırsa;

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} = \frac{\pi(0,60)^2}{4} = 0,283 \text{ m}^2 \quad (\text{Tip-a})$$

$$A_b = \frac{\pi D_b^2}{4} = \frac{\pi(0,55)^2}{4} = 0,238 \text{ m}^2 \quad (\text{Tip-b})$$

## 5. Yalıtımlı yapı için taban kesme kuvveti hesabı

İki tip mesnet için yatay rijitlikler yukarıda hesaplanan yeni boyutlar göz önüne alınarak tekrar hesaplanırsa;

$$K_{Da} = \frac{A_a G_a}{t} = \frac{0,283(0,5)}{0,2} = 0,7075 \text{ MN/m}$$

$$K_{Db} = \frac{A_b G_b}{t} = \frac{0,238(1)}{0,2} = 1,19 \text{ MN/m}$$

yapı temelindeki mesnetlerin toplam rijitlikleri ve sistemin etkin periyodu ( $T_D$ ) aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\Sigma K_D = 12(0,7075) + 4(1,19) = 13,25 \text{ MN/m} = 13250 \text{ KN/m}$$

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{\Sigma K_D g}} = 2\pi \sqrt{\frac{9900}{(13250)9,81}} = 1,73 \text{ sn}$$

Bulunan bu değer başlangıçta tahmini belirlenen periyoda ( $T_D = 2 \text{ sn}$ ) oldukça yakın bir değerdir. Buna göre yalıtım düzeyindeki deplasman değeri yeni boyutlara göre tekrar hesaplanırsa;

$$D_D = \frac{g C_{vD} T}{B_D (4\pi^2)} = \frac{9,81(0,64)1,73}{1,35(4\pi^2)} = 0,21 \text{ m}$$

UBC-97' ye göre taban kesme kuvveti yalıtımlı yapı için aşağıdaki gibi hesaplanır;

- **Taban yalıtımlı sistem**

$$V_D = (\Sigma K_D) x D_D = 13,25 x 0,21 = 2,783 \text{ MN} = 2783 \text{ KN}$$

- **Üst yapıya iletilen taban kesme kuvveti**

$$V_{S,D} = (\Sigma K_D) x D_D (B_D/R_i) = V_D (B_D/R_i) = 2,783(1,35/2) = 1,879 \text{ MN} = 1879 \text{ KN}$$

Yukarıda hesaplanan  $V_{S,D}$  taban kesme kuvveti, aynı yapı ağırlığına sahip ( $W$ ) ve sismik yalıtımlı yapının titreşim periyoduna eşit periyoda sahip temelden ankastre yapı için hesaplanan taban kesme kuvvetinden büyük olmak zorundadır;

$$V_t = \frac{C_v I}{R T_D} W \geq 0,11 C_a I W = \frac{0,64(1)}{8(1,73)} 9,9 \geq 0,11(0,44)1(9,9)$$

$$V_t = 0,458 \text{ MN} < 0,479 \text{ MN} \text{ (büyük değer kullanılır)}$$

$$V_{S,D} = 1,878 \text{ MN} \gg V_t = 0,479 \text{ MN}$$

Böylelikle  $V_{S,D}$  değerinin UBC-97 No.1658.4.3 kısım IV'deki gereksinimleri karşıladığı görülmektedir.

## 6. Burulmadan kaynaklanan toplam yer değiştirme hesabı

Hesaplanacak olan toplam yer değiştirme değeri 1,1  $D_D$  değerinden küçük olmamalıdır. Buna göre toplam yer değiştirme;

$$D_{TD} = D_D \left(1 + \frac{12ex}{b^2 + d^2}\right)$$

$$b = 12,9 \text{ m}$$

$$d = 14,6 \text{ m}$$

$$e = 14,6 \times 0,05 = 0,73 \text{ m}$$

$$x = 0,73 + 14,6/2 = 8,03 \text{ m}$$

Simetrik plandan dolayı  $e_{rx} = e_{ry} = 0$  alınırsa toplam yer değiştirme;

$$D_{TD} = D_D \left(1 + \frac{12(0,73)8,03}{12,9^2 + 14,6^2}\right) = 0,21(1,185) = 0,249 \text{ m} > 0,23 \text{ m}$$

## 7. Etkin düşey modülün hesabı

Ortalama olarak tek bir kauçuk tabakasının kalınlığı Tip-a ve Tip-b mesnetleri için

$$\frac{D}{80} \leq t_o \leq \frac{D}{40} \text{ koşuluna göre hesaplanırsa;}$$

$$t_{oa} = \frac{D_a}{40} = \frac{600}{40} = 15 \text{ mm}$$

$$t_{ob} = \frac{D_b}{40} = \frac{550}{40} = 13,75 \text{ mm} \cong 15 \text{ mm}$$

Bina iç kolonları altında kullanılan Tip-b mesnetlerinin tek bir kauçuk tabakasının kalınlığı 13,75 mm olarak hesaplanmasına rağmen  $t_o = 15 \text{ mm}$  olarak seçilmiştir.

Mesnedin üretim aşamasındaki zorlukları minimize etmek için standartlara uygun olarak kauçuk tabakalarının ve aralarındaki düşey rijitliği arttırmada kullanılan çelik tabakaların kalınlığı ( $t_r=2$  mm) belirlenmiştir.

Kauçuk mesnetler için şekil katsayısı ( $S_{1a}$  ve  $S_{1b}$ );

$$S_{1a} = \frac{D}{4t_{oa}} = \frac{0,60}{4(0,015)} = 10$$

$$S_{1b} = \frac{D}{4t_{ob}} = \frac{0,55}{4(0,015)} = 9,17$$

Düşey yön için her iki tip mesnedin (Tip-a ve Tip-b) basınç kuvveti altındaki etkili düşey elastisite modülleri aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$G_a = 0,7 \text{ MPa (Tip-a)}$$

$$G_b = 1,4 \text{ MPa (Tip-b)}$$

$$E_{\text{eff},v} = \frac{6GS_{1a}^2 E_c}{6GS_{1a}^2 + E_c} = \frac{6(0,7)(10)^2(2000)}{6(0,7)(10)^2 + 2000} = 347 \text{ MPa (Tip-a)}$$

$$E_{\text{eff},v} = \frac{6GS_{1b}^2 E_c}{6GS_{1b}^2 + E_c} = \frac{6(1,4)(9,17)^2(2000)}{6(1,4)(9,17)^2 + 2000} = 522 \text{ MPa (Tip-a)}$$

## 8. Düşey titreşim periyodunun hesabı

Plandaki tüm mesnetlerin (Tip-a ve Tip-b) toplam düşey rijitlikleri;

$$K_\varepsilon = \frac{AE_{\text{eff},v}}{t};$$

$$K_{\varepsilon a} = \frac{A_a E_{\text{eff},v}}{t} = \frac{(0,283)(347000)}{0,2} = 491005 \text{ KN/m}$$

$$K_{\varepsilon b} = \frac{A_b E_{\text{eff},v}}{t} = \frac{(0,238)(522000)}{0,2} = 621180 \text{ KN/m}$$



Toplam efektif düşey rijitlik;

$$\Sigma K_{\varepsilon} = (12K_{\varepsilon a} + 4K_{\varepsilon b}) = [12(491005) + 4(621180)] = 8376780 \text{ KN/m}$$

Düşey yöndeki yer değiştirme aşağıdaki gibi hesaplanırsa;

$$\Delta t = \frac{W}{\Sigma K_{\varepsilon}} = \frac{9900}{8376780} = 0,00118 \text{ m}$$

Düşey yöndeki titreşim periyodu [18].

$$T_V = \frac{T_h}{\sqrt{6S}} = \frac{1,73}{\sqrt{6(9,5)}} = 0,074 \text{ sn}$$

## 9. Kayma birim uzamaları ve düşey yükün hesabı

Düşey yükten kaynaklanan kayma birim uzamaları Tip-a ve Tip-b türü mesnetler için;

### **Tip-a;**

$$\Delta t_a = \frac{W_a}{K_{\varepsilon a}} = \frac{530}{491005} = 0,0011$$

$$\varepsilon_{ca} = \frac{\Delta t_a}{t} = \frac{0,0011}{0,2} = 0,0054$$

$$\gamma_{va} = 6S_{1a}\varepsilon_{ca} = 6(10)0,0054 = 0,324$$

### **Tip-b;**

$$\Delta t_b = \frac{W_b}{K_{\varepsilon b}} = \frac{885}{621180} = 0,0014$$

$$\varepsilon_{cb} = \frac{\Delta t_b}{t} = \frac{0,0014}{0,2} = 0,0071$$

$$\gamma_{vb} = 6S_{1b}\varepsilon_{cb} = 6(9,17)0,0071 = 0,391$$

Yatay yükten meydana gelen kayma birim uzaması Tip-a ve Tip-b türü mesnetler için aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$\gamma_s = \frac{\tau}{G} = \frac{V_D}{AG} = \frac{K_D D_D}{AG}$$

$$\gamma_{s,a} = \frac{K_{Da} D_D}{A_a G_a} = \frac{0,7075(0,21)}{0,283(0,5)} = 1,05 \quad (\text{Tip-a})$$

$$\gamma_{s,b} = \frac{K_{Db} D_D}{A_b G_b} = \frac{1,19(0,21)}{0,238(1)} = 1,05 \quad (\text{Tip-b})$$

Maksimum kayma birim uzamaları,  $\gamma_{\max}$ ,

$$\gamma_{\max,a} = \gamma_{s,a} + \gamma_{va} = 1,05 + 0,324 = 1,374 < \gamma_{\max} = 1,5$$

$$\gamma_{\max,b} = \gamma_{s,b} + \gamma_{vb} = 1,05 + 0,391 = 1,441 < \gamma_{\max} = 1,5$$

## 10. Etkili alan hesabı

Mesnetlerin düşey ve yatay yükler altında kullandıkları etkili yük alanı ( $A_{\text{eff}}$ ) Tip-a ve Tip-b için aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$A_{\text{eff}} = A \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right]$$

### **Tip-a;**

$$A_{\text{eff},a} = A_a \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right]$$

$$\sin\theta = \frac{D_D}{D_a} = \frac{0,21}{0,60} = 0,35$$

$$\theta = 20,49^\circ$$

$$\theta = 0,358 \text{ radyan}$$

$$\cos\theta = 0,937$$

$$A_a = 0,283 \text{ m}^2 \quad (D_a = 0,60 \text{ m})$$

$$A_{\text{eff,a}} = A_a \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (0,358 + 0,35(0,937)) \right] = 0,56A_a = 0,159 \text{ m}^2$$

**Tip-b;**

$$A_{\text{eff,b}} = A_b \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (\theta + \sin\theta \cos\theta) \right]$$

$$\sin\theta = \frac{D_D}{D_b} = \frac{0,21}{0,55} = 0,382$$

$$\theta = 22,46^\circ$$

$$\theta = 0,392 \text{ radyan}$$

$$\cos\theta = 0,924$$

$$A_b = 0,238 \text{ m}^2 \text{ (} D_b = 0,55 \text{ m)}$$

$$A_{\text{eff,b}} = A_b \left[ 1 - \frac{2}{\pi} (0,392 + 0,382(0,924)) \right] = 0,53A_b = 0,126 \text{ m}^2$$

## 11. Burkulma yükü hesabı

Kritik burkulma yükü;

$$P_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{AG\pi^2 E_{\text{eff,v}} I}{3t^2}}$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4}$$

I : Dairesel kesitli mesnetler için atalet momenti

$$P_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{0,283(0,5)\pi^2 347\pi(0,3)^4 0,25}{3(0,2)^2}} = 5,07 \text{ MN} > 0,530 \text{ MN (Tip-a)}$$

$$P_{\text{cr}} = \sqrt{\frac{0,238(1)\pi^2 522\pi(0,275)^4 0,25}{3(0,2)^2}} = 6,77 \text{ MN} > 0,885 \text{ MN (Tip-b)}$$

Mesnetler için burkulma riski bulunmamaktadır.

## 12. Kurşun çekirdeğin boyutlandırılması

Kurşun çekirdeğin çapı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

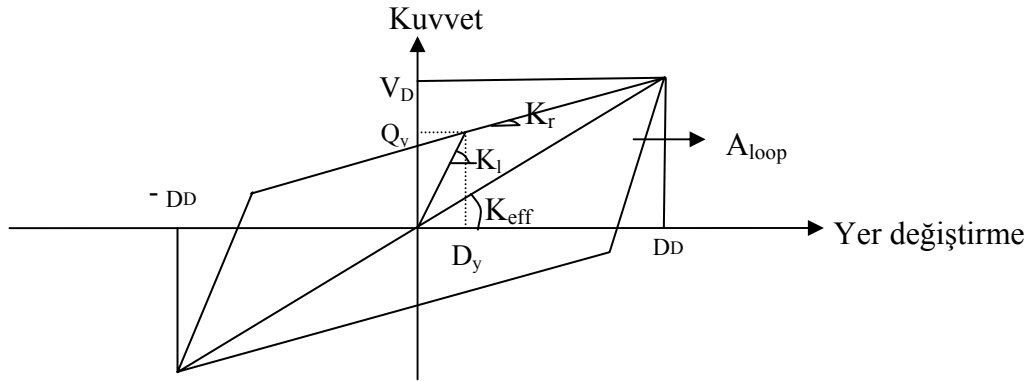
$$d_L \leq \frac{t}{\gamma_{\max}} = \frac{0,2}{1,5} = 0,13 \text{ (} d_L = 0,10 \text{ m seçilmiştir.)}$$

Buna göre çekirdek alanı;

$$A_L = \frac{\pi d_L^2}{4} = \frac{\pi(0,10)^2}{4} = 0,00785 \text{ m}^2$$

## 13. Akmadaki kesme kuvveti hesabı

Kurşun çekirdeğin akma noktasında oluşturduğu kesme kuvveti  $Q_y$  (Şekil 12.2) plandaki iç kolonların alt kısımlarına yerleştirilen Tip-a ve Tip-b türü mesnetler için aşağıdaki gibi formülle yaklaşık olarak hesaplanabilir;



Şekil 12.2: Kurşun çekirdekli elastomer mesnetlere ait histeresis eğrisi

Bir çevrimdeki histeresis eğrisi altında kalana alan Tip-a mesnedi için hesaplanırsa;

$$Q_{ya} = \frac{A_{\text{loop}}}{4D_D}$$

$$A_{\text{loop}} = \beta_{\text{eff}} (2\pi K_{Da} D_D^2)$$

Tip-a mesnedi için efektif rijitlik tekrardan hesaplanırsa;

$$K_{Da} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2(0,530)}{(1,73)^2 9,81} = 0,71 \text{ MN/m} = K_{\text{eff}} \quad (\text{Tip-a})$$

$$A_{\text{loop}} = 0,15(2\pi)0,71(0,21)^2 = 0,0295 \text{ MN-m}$$

$$Q_{ya} \cong \frac{A_{\text{loop}}}{4D_D} = \frac{0,0295}{4(0,21)} = 0,035 \text{ MN}$$

$$\tau_{ya} = \frac{Q_{ya}}{A_L} = \frac{0,035}{0,00785} = 4,46 \text{ MPa} \ll \tau_{y,\text{max}} = 10,5 \text{ MPa}$$

Seçilen kurşun çekirdeğin çapı sonuçtan anlaşılacağı üzere daha küçük seçilebilir. Aynı hesaplamalar Tip-b mesnedi için yapılırsa;

$$K_{Db} = \frac{4\pi^2 W}{T_D^2 g} = \frac{4\pi^2(0,885)}{(1,73)^2 9,81} = 1,19 \text{ MN/m} = K_{\text{eff}} \quad (\text{Tip-b})$$

$$A_{\text{loop}} = 0,15(2\pi)1,19(0,21)^2 = 0,049 \text{ MN-m}$$

$$Q_{yb} \cong \frac{A_{\text{loop}}}{4D_D} = \frac{0,049}{4(0,21)} = 0,058 \text{ MN}$$

$$\tau_{yb} = \frac{Q_{yb}}{A_L} = \frac{0,058}{0,00785} = 7,39 \text{ MPa} \ll \tau_{y,\text{max}} = 10,5 \text{ MPa}$$

#### 14. Kurşun çekirdek için seçilen çapın kontrolü

Tüm yalıtım sistemi için elasto-plastik rijitlik ( $K_r$ ), Tip-a ve Tip-b türü mesnetleri için aşağıdaki formülle hesaplanabilir [18].

$$K_{ra} = K_{\text{eff}} - \frac{Q_{ya}}{D_D} = \frac{V_D}{D_D} - \frac{Q_{ya}}{D_D} = \frac{2,783}{0,21} - \frac{0,035}{0,21} = 13,086 \text{ MN/m} \quad (\text{Tip-a})$$

$$K_{rb} = K_{\text{eff}} - \frac{Q_{yb}}{D_D} = \frac{V_D}{D_D} - \frac{Q_{yb}}{D_D} = \frac{2,783}{0,21} - \frac{0,058}{0,21} = 12,976 \text{ MN/m} \quad (\text{Tip-b})$$

Elasto-plastik rijitliğin kurşunun rijitliğine oranını  $K_r/K_l = 1/10$  alırsak, taban kesme kuvveti aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$V_D = Q_{ya} \left(1 - \frac{K_{ra}}{K_1}\right) + K_{ra} D_D = 0,035 \left(1 - \frac{1}{10}\right) + 13,086(0,21) = 2,7796 \text{ MN}$$

Bulunan bu değer daha önceden hesaplanmış olan taban kesme kuvvetine ( $V_D = 2,783$ ) oldukça yakındır. Çıkan sonuçtan anlaşılacağı üzere, kurşun çekirdeğin akma dayanımından sonraki rijitliği yalıtım sisteminin bütününde ihmal edilebilir seviyededir. Akma dayanımından sonra sisteme kauçuğun elasto-plastik rijitliği, ( $K_r$ ), hakim olmaktadır.

### 15. Sismik yalıtımlı yapı için eşdeğer statik deprem yükü hesabı ve katlara dağılımı

Daha önce hesaplanmış olan yalıtımlı sistem taban kesme kuvveti üst yapı için hesaplanıp, kat yükseklikleri boyunca üçgen yayılı yük şeklinde dağıtılsa (Tablo 12.3), katlara ait kesme kuvvetleri bulunur (UBC-97, kısım IV, 58-9).

$$V_{s,D} = V_D(B_D/R_i) = 2,783(1,35/2) = 1,879 \text{ MN} = 1879 \text{ KN}$$

**Tablo 12.3:** Kurşun çekirdek mesnetli taban yalıtım sistemi için kat kesme kuvvetleri

Kat	$h_x$ (m)	$w_x$ (KN)	$h_x \times w_x$ (KN m)	$F_x = V_{s,D} \frac{h_x w_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$
1	3	3300	9900	626
2	6	3300	19800	1253
	$\Sigma h_x = 9$	$\Sigma w_x = 6600$	$\Sigma h_x \times w_x = 29700$	$\Sigma F_x = 1879$

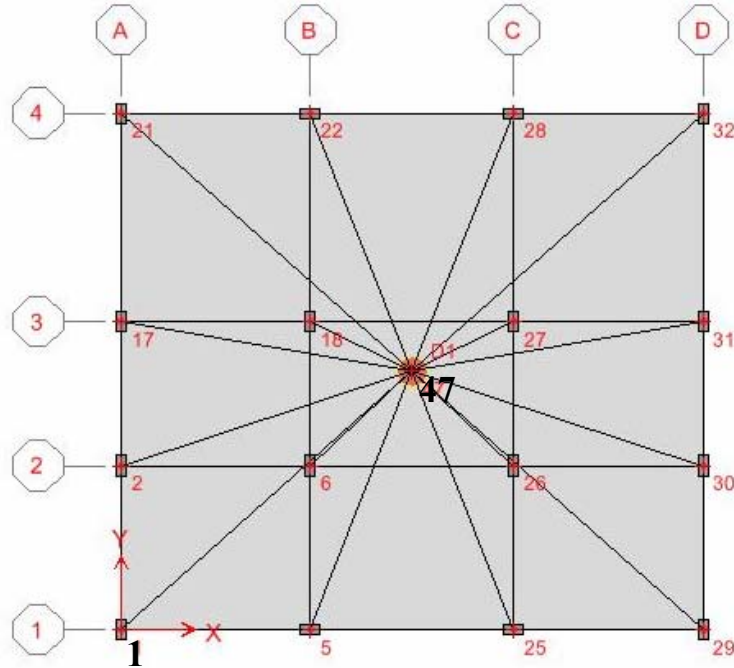
### 12.2. Dinamik Analiz (Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Çözümleme)

Dinamik analizin amacı; iki katlı yapının temelden ankastre ve yalıtımlı sınır koşulları altındaki gerçek davranışlarını belirlemek ve iki durum için yapının deprem etkisi altındaki görelî kat ötelenmelerinin, eğilme momentlerinin, taban kesme kuvvetlerinin ve katlarda meydana gelen ivmelerin sonuçlarının karşılaştırılıp, sismik taban yalıtım konseptinin yapı davranışı üzerindeki pozitif etkilerini ortaya koymaktır. Bu sonuca varmak için aynı yapı sistemi yalıtımlı ve ankastre mesnetli durumlarda Düzce KG ve DB bileşenlerine maruz bırakılıp, katlardaki rijit diyafram modeli içeriğinde yer alan 1 numaralı düğüm noktalarının yer değiştirmelerine, bunun yanında her iki tip yapı sistemi için kat kütle merkezleri olan 47,48 ve

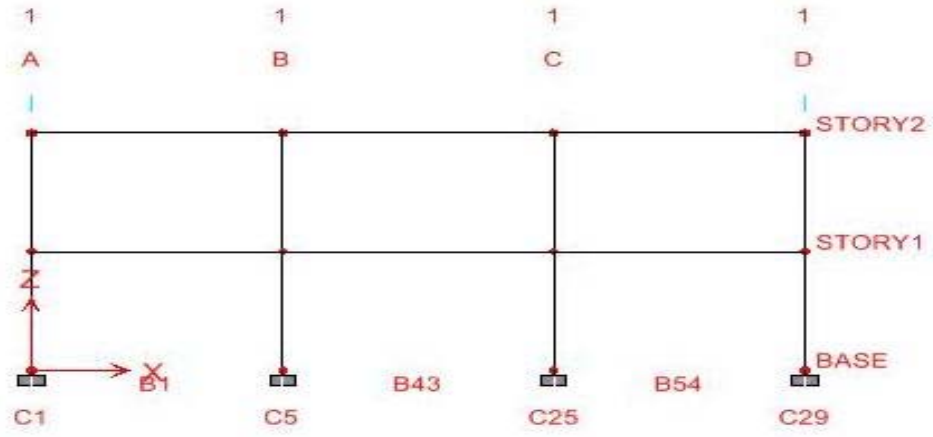
68,69,70 numaralı düğüm noktalarına (Şekil 12.7, 12.8 ve 12.11, 12.12) etkiyen maksimum ivme değerlerinin sonuçlarına ulaşılmış, ayrıca her bir kattaki C1 olarak adlandırılan kolonların M(3-3) eksenindeki üst uç momentlerinin değişimi gözlenmiştir. Aynı zamanda her iki durum için taban kesme kuvvetleri programa hesaplatılıp karşılaştırma yapılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesi sonuç bölümünde açıklanmıştır.

### 12.2.1. Zemine ankastre yapı

Depremın KG bileşeni X-X, DB bileşeni Y-Y doğrultusunda etkilmiştir. Analiz dinamik doğrusal olmayan (non-linear) zaman tanım alanında yapılmış, yapı periyotları hesaplanmış ve katlardaki rijit diyafram içerisinde bulunan tüm noktaların eşit ötelenmeler yaptığı düşünülerek 1 numaralı düğüm noktasının (Şekil 12.3) yer değiştirmesinin deprem hareketi altında gözlenmesi yeterli bulunmuştur. Ayrıca birinci ve ikinci kat köşe kolonlarından biri olan C1 kolonların (Şekil 12.4) üst moment değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 12.3: Kat planı içerisinde yer alan 1 ve 47 numaralı düğüm noktaları

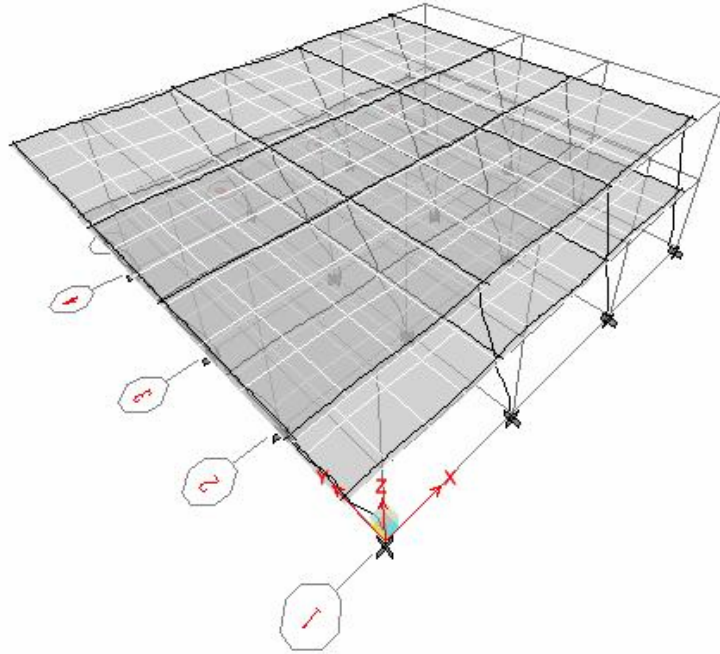


**Şekil 12.4:** C1 kolonunun profilindeki görünümü

Ankastre yapıya ait serbest titreşim mod şekilleri Şekil 12.5 ve 12.6’da gösterilmiştir. Ayrıca binaya ait modal değerler Tablo 12.4’de verilmiştir. Salınım periyotları aşağıda gösterildiği gibidir;

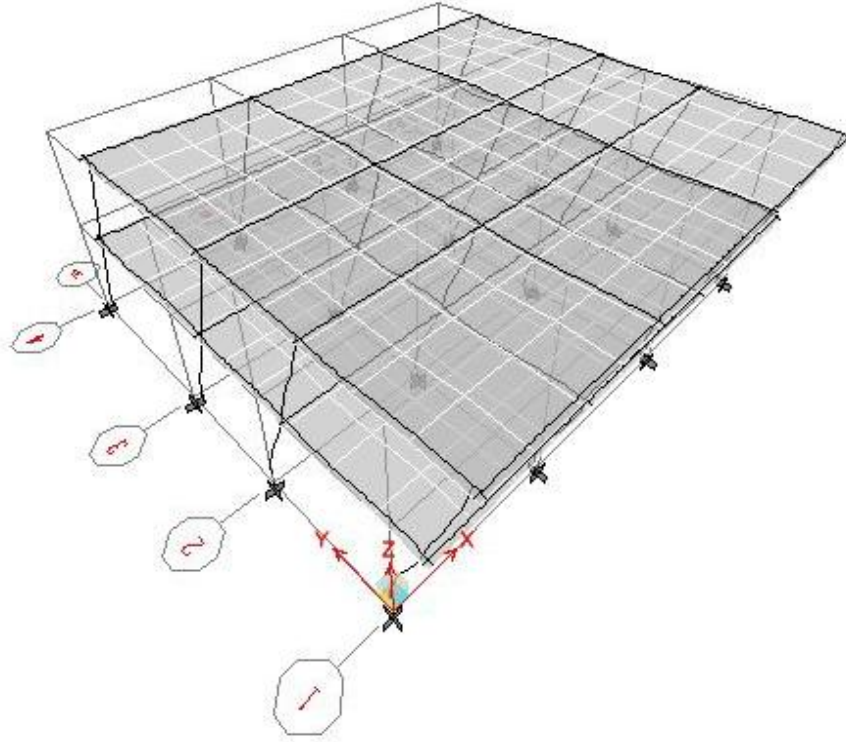
$$T_x = 0,4852 \text{ sn}$$

$$T_y = 0,3804 \text{ sn}$$



**Şekil 12.5:** AMS birinci doğal titreşim modu,  $T_x$





Şekil 12.6: AMS ikinci doğal titreşim modu,  $T_y$

Tablo 12.4: AMS serbest titreşim modal değerler

YAPISAL MODLAR								
Kat	Rijit Diyafram	Mod	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
KAT 2	D1	1	-0,0482	0	0	0	0	0,00021
KAT 1	D1	1	-0,0253	0	0	0	0	0,0001
KAT 2	D1	2	0	-0,0488	0	0	0	0
KAT 1	D1	2	0	-0,0243	0	0	0	0
KAT 2	D1	3	0,0011	0	0	0	0	0,0086
KAT 1	D1	3	0,0007	0	0	0	0	0,00429
KAT 2	D1	4	-0,0253	0	0	0	0	0,00006
KAT 1	D1	4	0,0482	0	0	0	0	-0,00016
KAT 2	D1	5	0	-0,0243	0	0	0	0
KAT 1	D1	5	0	0,0488	0	0	0	0
KAT 2	D1	6	-0,0005	0	0	0	0	-0,00429
KAT 1	D1	6	0,0009	0	0	0	0	0,0086

Modal kütle katılım oranları, modların yapısal harekete ne kadar katkı yaptıklarını gösteren en önemli parametrelerden biridir. Tablo 12.5'ten anlaşılacağı üzere 1. baskın modun kütleli olarak x yönünde % 91 oranında harekete katıldığını aynı

şekilde 2. modun y yönünde % 90 oranında katkı sağladığını anlayabiliriz. Analiz sonucundan görüleceği üzere ilk altı modun çözüm için yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

**Tablo 12.5:** AMS kütleli katılım oranları

MODAL ETKİN KÜTLE KATILIM ORANLARI							
Mod	Periyot	UX (%)	UY (%)	UZ (%)	Toplam UX (%)	Toplam UY (%)	Toplam UZ (%)
1	0,485249	<b>91,1125</b>	0	0	91,1125	0	0
2	0,390447	0	<b>89,8956</b>	0	91,1125	89,8956	0
3	0,312082	0,0537	0	0	91,1662	89,8956	0
4	0,161487	8,831	0	0	99,9973	89,8956	0
5	0,123458	0	10,1044	0	99,9973	100	0
6	0,098926	0,0027	0	0	100	100	0

Rijit diyafram tanımına uyan her bir katın rijitlik merkezlerinin maruz kaldıkları deprem hareketinde x ve y yönlerindeki maksimum ötelenme değerleri aşağıda Tablo 12.6'da verilmiştir. Birimler metre cinsindedir.

**Tablo 12.6:** AMS kat yer değiştirmeleri

RİJİT DİYAFRAM DEPLASMANLARI				
Kat	Diyafram	Yatay Yük Cinsi	UX (m)	UY (m)
KAT 2	D1	DEPREM MAKSİMUM	0,0439	<b>0,0751</b>
KAT 2	D1	DEPREM MİNİMUM	<b>0,0578</b>	0,0698
KAT 1	D1	DEPREM MAKSİMUM	0,0234	<b>0,037</b>
KAT 1	D1	DEPREM MİNİMUM	<b>0,0303</b>	0,0347

Görelî kat ötelemeleri kontrolü için D ve 4 akslarının kesim noktasında bulunan 32 numaralı düğüm noktası ile A ve 4 akslarının kesişim noktasında bulunan 21 numaralı düğüm noktasının bir alt kattaki aynı numaralı düğüm noktalarına göre rölâtif yer değiştirme/kat yüksekliği oranları hesaplanıp Tablo 12.7'de gösterilmiştir.

**Tablo 12.7:** AMS maksimum rölatif kat ötelenme değerleri

RÖLATİF KAT ÖTELENMELERİ								
Kat	Rölatif Yer Değişirme Yönü	Yük Cinsi	Nokta	X (m)	Y (m)	Z (m)	Rölatif Ötelenme (X-X)	Rölatif Ötelenme (Y-Y)
KAT 2	Maks. Ötelenme X	DEPREM	32	14,6	12,9	6	<b>0,009459</b>	
KAT 2	Maks. Ötelenme Y	DEPREM	21	0	12,9	6		<b>0,01301</b>
KAT 1	Maks. Ötelenme X	DEPREM	32	14,6	12,9	3	<b>0,010378</b>	
KAT 1	Maks. Ötelenme Y	DEPREM	21	0	12,9	3		<b>0,012613</b>

Aynı sistemin sismik taban yalıtımlı durumu ile karşılaştırma yapılmak istenmesi bakımından kat planı içerisinde seçilen herhangi bir düğüm noktasının deprem hareketine maruz kaldığı durumdaki yer değiştirme ve etkiyen ivme değerleri hesaplanmış, tablo ve grafiklerle sayısal değerleri gösterilmiştir. Tablo 12.8’de her katta bulunan 1 numaralı düğüm noktasına ait sayısal değerler her iki deprem doğrultusu için verilmektedir.

**Tablo 12.8** AMS rijit diyaframlar içerisinde bulunan 1 numaralı düğüm noktalarının yer değiştirmelerine ait sayısal veriler

NOKTASAL DEPLASMANLAR								
Kat	Nokta	Yatay Yük Cinsi	UX (m)	UY (m)	UZ (m)	RX	RY	RZ
KAT 2	1	DEPREM MAKS.	0,0429	<b>0,0769</b>	0,0032	0,00648	0,00188	0,00026
KAT 2	1	DEPREM MİN.	<b>0,0562</b>	0,069	0,0026	0,00739	0,00223	0,00024
KAT 1	1	DEPREM MAKS.	0,0226	<b>0,0378</b>	0,0043	0,01065	0,00369	0,00013
KAT 1	1	DEPREM MİN.	<b>0,0295</b>	0,0343	0,0034	0,01194	0,00453	0,00012
Temel	1	DEPREM MAKS.	<b>0</b>	<b>0</b>	0	0	0	0

Kat 2, 1 nolu yer değiştirme = 0,0562 m (X-X doğrultusu)

Kat 1, 1 nolu yer değiştirme = 0,0295 m (X-X doğrultusu)

Temel, 1 nolu yer değiştirme = 0,0000 m (X-X doğrultusu)

Yatay deprem yüklerini yapı içerisinde en çok karşılayan elemanlar olan kolonların uç momentlerinin her iki durum için değişimi izlenmiştir. Seçilen C1 kolonlarına ait üst uç momentlerinin (M3-3) sayısal değerleri Tablo 12.9'da verilmiştir. Kullanılan birimler KN ve metre cinsindedir.

**Tablo 12.9:** AMS C1 kolonuna ait iç kuvvetler

KOLON İÇ KUVVETLERİ									
Kat	Kolon Adı	Yatay Yük Cinsi	Konum	P (KN)	V2 (KN)	V3 (KN)	T	M2 (KN-m)	M3 (KN-m)
KAT 2	C1	DEPREM MAKS.	0	374,7	106,64	322,48	0,991	365,669	148,508
KAT 2	C1	DEPREM MAKS.	1,25	374,7	106,64	322,48	0,991	36,211	15,216
KAT 2	C1	DEPREM MAKS.	2,5	374,7	106,64	322,48	0,991	399,665	<b>156,05</b>
KAT 1	C1	DEPREM MAKS.	0	1050,64	148,17	641,34	0,944	1272,265	244,833
KAT 1	C1	DEPREM MAKS.	1,25	1050,64	148,17	641,34	0,944	470,952	60,399
KAT 1	C1	DEPREM MAKS.	2,5	1050,64	148,17	641,34	0,944	312,354	<b>164,145</b>

Kat 2, C1 maks. üst uç momenti, M3-3 = 156,05 KN-M

Kat 1, C1 maks. üst uç momenti, M3-3 = 164,14 KN-M

Katlara etkiyen maksimum kesme kuvvetleri her iki deprem doğrultusu için Tablo 12.10'da verilmiştir. Kullanılan birimler KN ve metre cinsindedir.

**Tablo 12.10:** AMS katlara etkiyen kesme kuvvetleri

KAT KESME KUVVETLERİ								
Kat	Yatay Yük	Konum	P (KN)	VX (KN)	VY (KN)	T	MX (KN-m)	MY (KN-m)
KAT 2	DEPREM MAKS.	Üst	0	3274,94	6114,35	53239,189	0	0
KAT 2	DEPREM MAKS.	Alt	0	3274,94	6114,35	53239,189	20046,19	9824,829
KAT 2	DEPREM MİN.	Üst	0	2470,73	6682,06	54108,936	0	0
KAT 2	DEPREM MİN.	Alt	0	2470,73	6682,06	54108,936	18343,1	7412,18
KAT 1	DEPREM MAKS.	Üst	0	4965,89	9085,29	78074,466	20046,19	9824,829
KAT 1	DEPREM MAKS.	Alt	0	<b>4965,89</b>	9085,29	78074,466	48968,6	24722,49
KAT 1	DEPREM MİN.	Üst	0	3860,01	9654,61	78837,063	18343,1	7412,18
KAT 1	DEPREM MİN.	Alt	0	3860,01	<b>9654,61</b>	78837,063	45593,2	18804,9

Taban kesme kuvveti,  $V_{tx} = 4965,89$  KN (X-X doğrultusu)

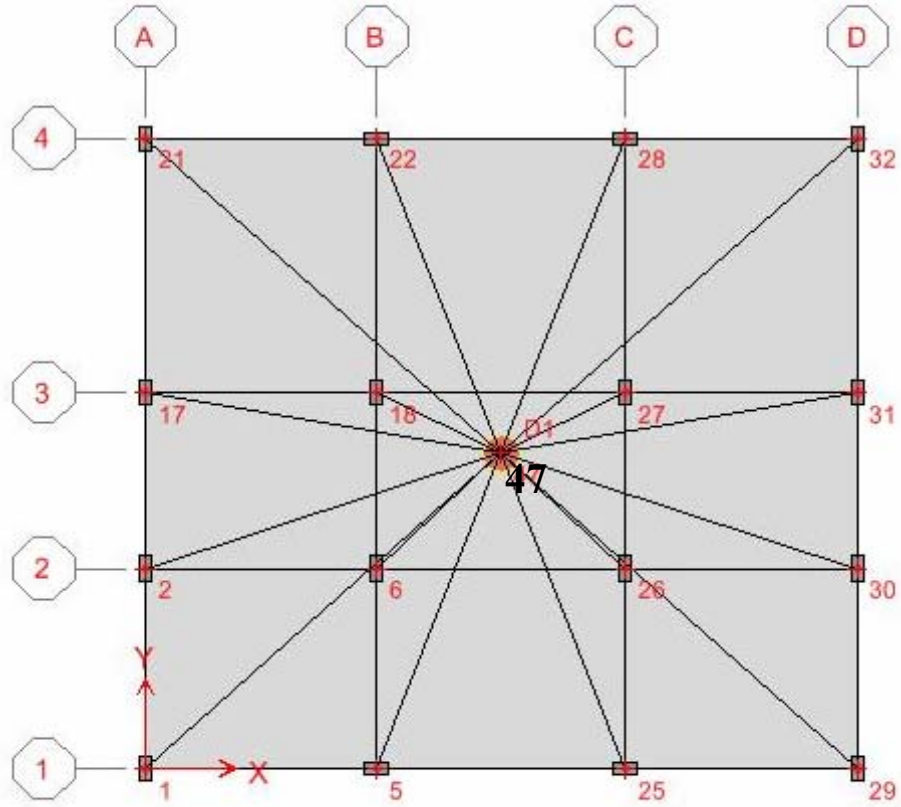
Taban kesme kuvveti,  $V_{ty} = 9654,61$  KN (Y-Y doğrultusu)

Ayrıca kat kütle merkezleri olan 47 ve 48 nolu düğüm noktalarına etkiyen ivme değerleri zaman tanım alanında çözümlenmiş ve maksimum değerleri ve zamanları

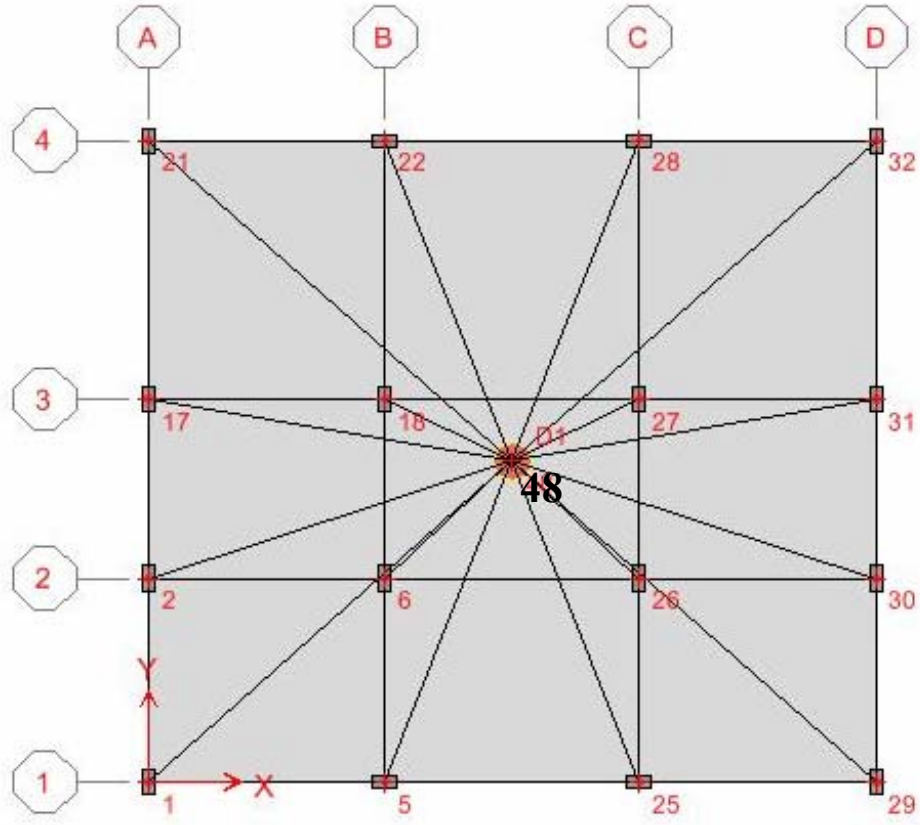
belirlenmiştir. Kat kütle merkezleri olan 47 ve 48 nolu düğüm noktaları Şekil 12.7 ve 12.8’de gösterilmiştir. Hesaplanan maksimum değerler Tablo 12.11’de verilmiştir.

**Tablo 12.11:** AMS kat kütlelerine etkiyen ivme değerleri

Kat Seviyesi (Düğüm No)	Deprem yönü	Maksimum ivme değeri (g)	Zaman (sn)
Kat 2 (47)	UX	0,99	8,37
Kat 1 (48)	UX	0,51	8,37
Kat 2 (47)	UY	1,86	9,84
Kat 1 (48)	UY	0,98	9,22



**Şekil 12.7:** AMS 2. Kat 47 nolu kütle merkezi



Şekil 12.8: AMS 1. Kat 48 nolu kütle merkezi

### 12.2.2. Sismik taban yalıtımlı yapı

Yukarıda ankastre olarak çözümlenen yapı sistemi, karşılaştırma yapılmak istenmesi bakımından taban yalıtımlı sisteme dönüştürülmüş ve çözümlenmiştir. Analizdeki amaç; yapının zeminden ankastre ve yalıtımlı olması durumundaki iki farklı sınır koşulu için yapı davranışını gözlemlemek ve taban yalıtımının depreme dayanıklı yapı tasarımındaki pozitif rolünü açığa çıkartmaktır.

Yalıtımlı yapıda mesnetlere düzgün bir yük dağılımı sağlamak amacı ile 15 cm kalınlığında bir yalıtım düzlemi oluşturulmuştur. Ayrıca ankastre durumdan farklı olarak kolon altlarına mekanik özellikleri ve boyutları farklı iki tip kurşun çekirdekli elastomer mesnet (LRB) yerleştirilmiştir. Bu izolatörlerden 12 adedi bina çevresindeki kolon altlarına (Tip-a), 4 adedi iç kolon altlarına (Tip-b) yerleştirilerek modellenmiştir. Tip-a türü mesnetlerin her biri 530 KN, Tip-b türü mesnetlerin her biri 885 KN'luk düşey yük taşıdıkları varsayılarak boyutlandırılmıştır. Mesnetlere ait boyutsal ve mekaniksel özellikler Tablo 12.12'de verilmiştir.

**Tablo 12.12:** Analizde kullanılan elastomer mesnetlerin boyutları ve mekaniksel özellikleri

Mesnet Tipi	D (cm)	t (cm)	A <sub>r</sub> (cm <sup>2</sup> )	t <sub>0</sub> (cm)	t <sub>r</sub> (cm)	S <sub>1</sub>	K <sub>eff</sub> (KN/m)	ξ <sub>eff</sub>	G <sub>a</sub> (MPa)	d <sub>L</sub> (cm)	A <sub>L</sub> (cm <sup>2</sup> )	Q <sub>y</sub> (KN)
A	60	20	2830	1,5	0,2	10	707,5	0,15	0,5/0,7	10	78,5	35
B	55	20	2380	1,5	0,2	9,17	1190	0,15	1,0/1,4	10	78,5	58

t<sub>0</sub> ve t<sub>r</sub> sırası ile elastomer mesnedi oluşturan tek bir kauçuk ve çelik tabaka kalınlıklarıdır. S<sub>1</sub> ise mesnedin biçim faktörüdür.

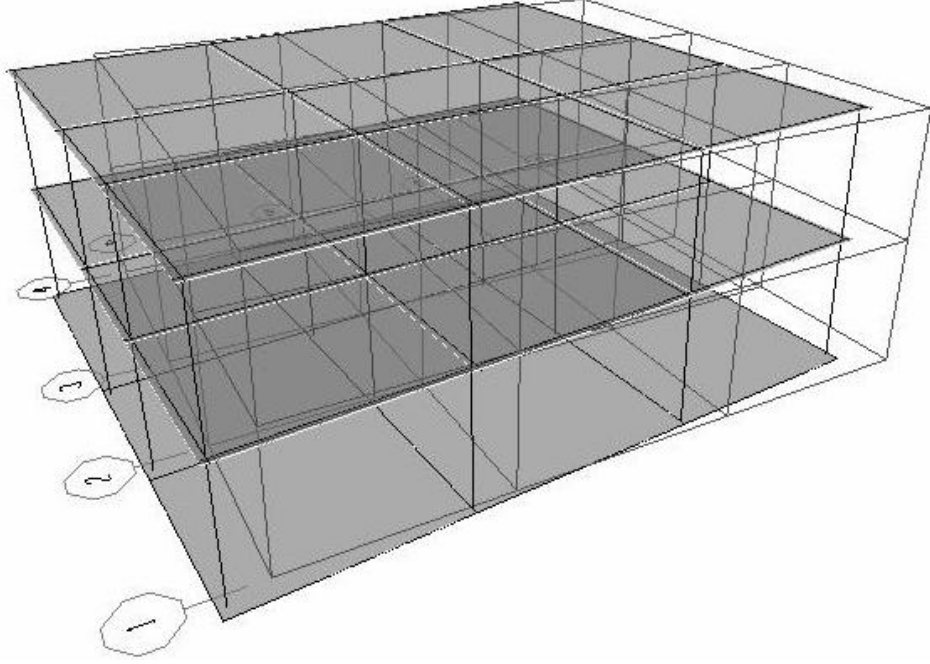
Analizde lineer olmayan zaman tanım alanında çözüm yapılmıştır ve bu çözümleme içinde yapısal modların hesabında kullanılmak üzere lineer efektif rijitlik, elastomer mesnetlerdeki tüm lineer ve non-lineer serbestlik derecelerinde (U<sub>1</sub>, U<sub>2</sub> ve U<sub>3</sub>) kullanılmıştır. Ancak lineer efektif sönüm değeri (ξ<sub>eff</sub> = %15) lineer olmayan zaman tanım alanlı çözümlerinde kullanılmamaktadır. Bunun yerine tasarım aşamasında bir yaklaşım olarak ξ<sub>1</sub>=% 7, ξ<sub>2</sub>=%15 ve ξ<sub>3</sub>=%5 olan modal sönüm oranları ilk 3 modda kullanılarak daha gerçekçi sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Analizde histeresis döngülerde kullanılmak üzere, akma dayanımı ötesi plastik şekil değiştirmelerde mesnetler için yüksek elasto-plastik rijitlik değerleri kullanılmıştır (K<sub>ra</sub> = 13086 ve K<sub>rb</sub> = 12976 KN/m). Bu yüksek değerlerin seçiminde, lineer olmayan zaman tanım alanındaki sayısal çözümlerinde meydana gelen zorlukları ve sayısal hataları minimize etmek en önemli etken olmuştur. Kullanılan deprem dataları bir önceki analizde kullanılan 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi, Düzce Meteoroloji İstasyonu KG (X-X doğrultusu) ve DB (Y-Y doğrultusu) bileşenlerine ait ivme kayıtlarıdır.

Bu çözümlemede de her kattaki 1 nolu düğüm noktasının deprem anındaki yer değiştirmeleri, C1 kolonundaki üst uç momentlerinin (M3-3) zamanla değişimi, taban ve kat kesme kuvvetleri ve kat kütle merkezleri olan 68,69 ve 70 nolu düğüm noktalarına etki eden ivme değerleri gözlemlenmiştir. Rölatif yer değiştirme kontrolü için rijit diyafram içerisinde yer alan 21 ve 32 nolu köşe düğüm noktalarının yer değiştirmeleri referans alınmıştır.

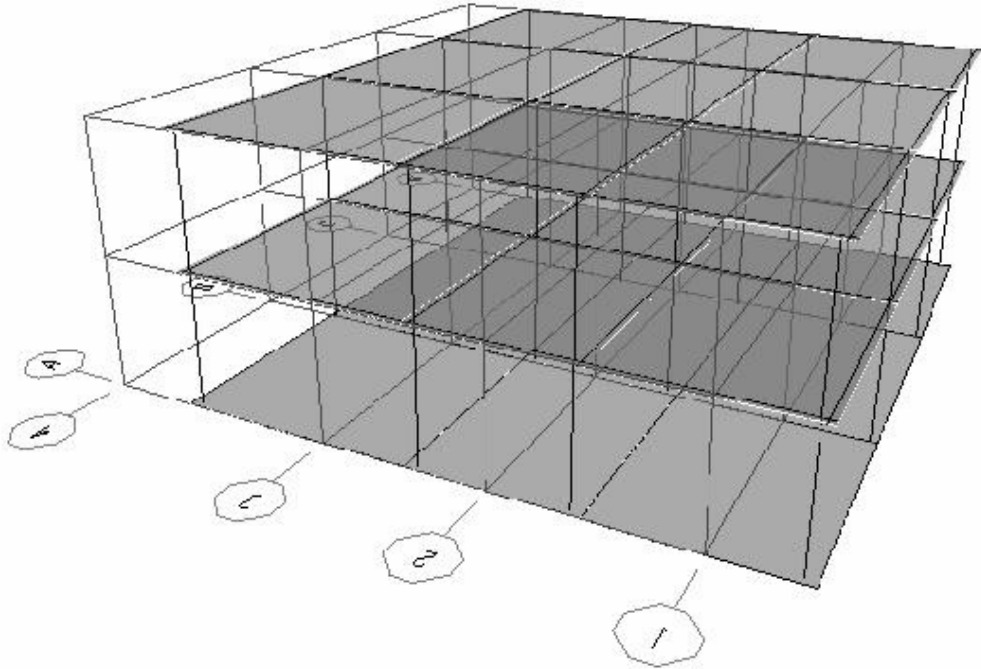
Taban yalıtımlı yapıya ait serbest titreşim mod şekilleri (Şekil 12.9, 12.10), yapısal modların sayısal değerleri (Tablo 12.13) ve salınım periyotları aşağıda gösterilmiştir.

$$T_x = 1,7926 \text{ sn}$$

$$T_y = 1,7658 \text{ sn}$$



**Şekil 12.9:** TYS birinci doğal titreşim modu,  $T_x$



**Şekil 12.10:** TYS ikinci doğal titreşim modu,  $T_y$



**Tablo 12.13:** TYS serbest titreşim modal değerler

YAPISAL MODLAR								
Kat	Diyafram	Mod	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ
KAT 2	D1	1	-0,0322	0	0	0	0	0,00111
KAT 1	D1	1	-0,0309	0	0	0	0	0,00108
KAT 2	D1	2	0	-0,0325	0	0	0	0
KAT 1	D1	2	0	-0,0316	0	0	0	0
KAT 2	D1	3	0,0071	0	0	0	0	0,00508
KAT 1	D1	3	0,0068	0	0	0	0	0,00495
KAT 2	D1	4	-0,0374	0	0	0	0	0,00025
KAT 1	D1	4	0,0019	0	0	0	0	0
KAT 2	D1	5	0	0,038	0	0	0	0
KAT 1	D1	5	0	-0,0017	0	0	0	0
KAT 2	D1	6	0,0015	0	0	0	0	0,00608
KAT 1	D1	6	-0,0001	0	0	0	0	-0,0002
KAT 2	D1	7	-0,0219	0	0	0	0	0,00009
KAT 1	D1	7	0,0443	0	0	0	0	-0,0002
KAT 2	D1	8	0	-0,0216	0	0	0	0
KAT 1	D1	8	0	0,0444	0	0	0	0
KAT 2	D1	9	0,0005	0	0	0	0	0,00351
KAT 1	D1	9	-0,0011	0	0	0	0	-0,0071

Modal kütle katılım oranları, modların yapısal harekete ne kadar katkı yaptıklarını gösteren en önemli parametrelerden biridir. Tablo 12.14'den anlaşılacağı üzere 1. etkin modun kütleli olarak x yönünde % 95 oranında harekete katıldığını aynı şekilde 2. modun y yönünde % 100 oranında katkı sağladığını anlayabiliriz.

**Tablo 12.14:** TYS kütleli katılım oranları

MODAL ETKİN KÜTLE KATILIM ORANLARI							
Mod	Periyot	UX (%)	UY (%)	UZ (%)	Toplam UX (%)	Toplam UY (%)	Toplam UZ (%)
1	1,792605	<b>95,2747</b>	0	0	95,2747	0	0
2	1,76582	0	<b>99,9179</b>	0	95,2747	99,9179	0
3	1,608645	4,5456	0	0	99,8203	99,9179	0
4	0,317045	0,1759	0	0	99,9961	99,9179	0
5	0,262493	0	0,0808	0	99,9961	99,9987	0
6	0,231176	0,0004	0	0	99,9965	99,9987	0
7	0,15567	0,0035	0	0	100	99,9987	0
8	0,121176	0	0,0013	0	100	100	0
9	0,106654	0	0	0	100	100	0

Rijit diyafram tanımına uyan her bir katın rijitlik merkezlerinin maruz kaldıkları deprem hareketinde x ve y yönlerindeki maksimum yer değiştirme değerleri aşağıda Tablo 12.15’de verilmiştir. Birimler metre cinsindedir.

**Tablo 12.15:** TYS kat yer değiştirmeleri

RİJİT DİYAFRAM DEPLASMANLARI				
Kat	Diyafram	Yük Cinsi	UX (m)	UY (m)
KAT2	D1	DEPREM MAKS.	0,06	0,1409
KAT2	D1	DEPREM MİN.	<b>0,1056</b>	<b>0,1532</b>
KAT1	D1	DEPREM MAKS.	0,0561	0,1338
KAT1	D1	DEPREM MİN.	<b>0,0999</b>	<b>0,1459</b>
TEMEL	D1	DEPREM MAKS.	0,0515	0,1243
TEMEL	D1	DEPREM MİN.	<b>0,0907</b>	<b>0,1357</b>

Görelî kat ötelemeleri kontrolü için D ve 4 akslarının kesim noktasında bulunan 32 numaralı düğüm noktası ile A ve 4 akslarının kesişim noktasında bulunan 21 numaralı düğüm noktasının bir alt kattaki aynı numaralı düğüm noktalarına göre rölâtif yer değiştirme/kat yüksekliği oranları hesaplanıp Tablo 12.16’da gösterilmiştir.

**Tablo 12.16:** TYS maksimum rölâtif kat ötelenme değerleri

RÖLATİF KAT ÖTELENMELERİ								
Kat	Rölâtif Yer Değiştirme Yönü	Yük Cinsi	Nokta	X (m)	Y (m)	Z (m)	Rölâtif Ötelenme (X-X)	Rölâtif Ötelenme (Y-Y)
KAT2	Maks. Ötelenme X	DEPREM	32	14,6	12,9	6	<b>0,0024</b>	
KAT2	Maks. Ötelenme Y	DEPREM	21	14,6	12,9	6		<b>0,002527</b>
KAT1	Maks. Ötelenme X	DEPREM	32	14,6	12,9	3	<b>0,003405</b>	
KAT1	Maks. Ötelenme Y	DEPREM	21	14,6	12,9	3		<b>0,003515</b>

Aynı sistemin zemine ankastre durumu ile karşılaştırma yapılmak istenmesi bakımından kat planı içerisinde seçilen herhangi bir düğüm noktasının deprem hareketine maruz kaldığı durumdaki yer değiştirme ve etkiyen ivme değerleri hesaplanmış, tablo ve grafiklerle sayısal değerleri gösterilmiştir. Tablo 12.17’de her

katta bulunan 1 numaralı düğüm noktasına ait sayısal değerler her iki deprem doğrultusu için verilmektedir.

**Tablo 12.17** TYS rijit diyaframlar içerisinde bulunan 1 numaralı düğüm noktalarının yer değiştirmelerine ait sayısal veriler

NOKTASAL YER DEĞİŞTİRMELER								
Kat	Nokta	Yük Cinsi	UX (m)	UY (m)	UZ (m)	RX	RY	RZ
KAT2	1	DEPREM MAKS.	0,0573	0,1357	0,0009	0,00133	0,00046	0,0009
KAT2	1	DEPREM MİN.	<b>0,1015</b>	<b>0,1527</b>	0,0007	0,00138	0,00058	0,00097
KAT1	1	DEPREM MAKS.	0,0538	0,1288	0,0011	0,00253	0,00112	0,00085
KAT1	1	DEPREM MİN.	<b>0,096</b>	<b>0,1455</b>	0,001	0,00241	0,00133	0,00089
TEMEL	1	DEPREM MAKS.	0,0499	0,1194	0,0006	0,00173	0,0004	0,00079
TEMEL	1	DEPREM MİN.	<b>0,0871</b>	<b>0,1354</b>	0,0006	0,00149	0,00069	0,00077

Kat 2, 1 nolu yer değiştirme = 0,1015 m (X-X doğrultusu)

Kat 1, 1 nolu yer değiştirme = 0,0960 m (X-X doğrultusu)

Temel, 1 nolu yer değiştirme = 0,0871 m (X-X doğrultusu)

Yatay deprem yüklerini yapı içerisinde en çok karşılayan elemanlar olan kolonların uç momentlerinin taban yalıtımlı yapı için değişimi izlenmiştir. Seçilen C1 kolonlarına ait üst uç momentlerinin (M3-3) sayısal değerleri Tablo 12.18'de verilmiştir. Kullanılan birimler KN ve metre cinsindedir.

**Tablo 12.18:** TYS C1 kolonuna ait iç kuvvetler

KOLON İÇ KUVVETLERİ									
Kat	Kolon Adı	Yük Cinsi	Konum	P (KN)	V2 (KN)	V3 (KN)	T	M2 (KN-m)	M3 (KN-M)
KAT2	C1	DEPREM MAKS.	0	71,65	26,18	50,19	0,503	49,425	35,023
KAT2	C1	DEPREM MAKS.	1,25	71,65	26,18	50,19	0,503	20,972	3,685
KAT2	C1	DEPREM MAKS.	2,5	71,65	26,18	50,19	0,503	76,556	<b>38,497</b>
KAT2	C1	DEPREM MİN.	0	62,38	33,62	45,52	0,603	37,53	45,56
KAT2	C1	DEPREM MİN.	1,25	62,38	33,62	45,52	0,603	16,582	3,553
KAT2	C1	DEPREM MİN.	2,5	62,38	33,62	45,52	0,603	76,618	30,436
KAT1	C1	DEPREM MAKS.	0	219,87	48,8	114,87	0,619	196,089	78,421
KAT1	C1	DEPREM MAKS.	1,25	219,87	48,8	114,87	0,619	52,838	17,443
KAT1	C1	DEPREM MAKS.	2,5	219,87	48,8	114,87	0,619	108,633	<b>52,78</b>
KAT1	C1	DEPREM MİN.	0	201,9	57,22	128,94	0,893	214,041	90,264
KAT1	C1	DEPREM MİN.	1,25	201,9	57,22	128,94	0,893	53,234	18,744
KAT1	C1	DEPREM MİN.	2,5	201,9	57,22	128,94	0,893	91,659	43,587

Kat 2, C1 maks. üst uç momenti, M3-3 = 38,497 KN-m

Kat 1, C1 maks. üst uç momenti, M3-3 = 52,780 KN-m

Katlara etkiyen maksimum kesme kuvvetleri her iki deprem doğrultusu için Tablo 12.19'da verilmiştir. Kullanılan birimler KN ve metre cinsindedir.

**Tablo 12.19:** TYS katlara etkiyen kesme kuvvetleri

KAT KESME KUVVETLERİ								
Kat	Yatay Yük	Konum	P	VX (KN)	VY (KN)	T	MX (KN-m)	MY (KN-m)
KAT2	DEPREM MAKS.	Üst	0	789,33	1134,1	7975,3	0	0
KAT2	DEPREM MAKS.	Alt	0	789,33	1134,1	7975,3	3643,6	2367,9
KAT2	DEPREM MİN.	Üst	0	596,99	1214,55	10699	0	0
KAT2	DEPREM MİN.	Alt	0	596,99	1214,55	10699	3402,2	1790,9
KAT1	DEPREM MAKS.	Üst	0	<b>1340,48</b>	<b>2197,4</b>	14326,6	3643,6	2367,9
KAT1	DEPREM MAKS.	Alt	0	<b>1340,48</b>	<b>2197,4</b>	14326,6	9573,1	6388,4
KAT1	DEPREM MİN.	Üst	0	1042,69	1996,72	17190,5	3402,2	1790,9
KAT1	DEPREM MİN.	Alt	0	1042,69	1996,72	17190,5	9948,5	4893,5

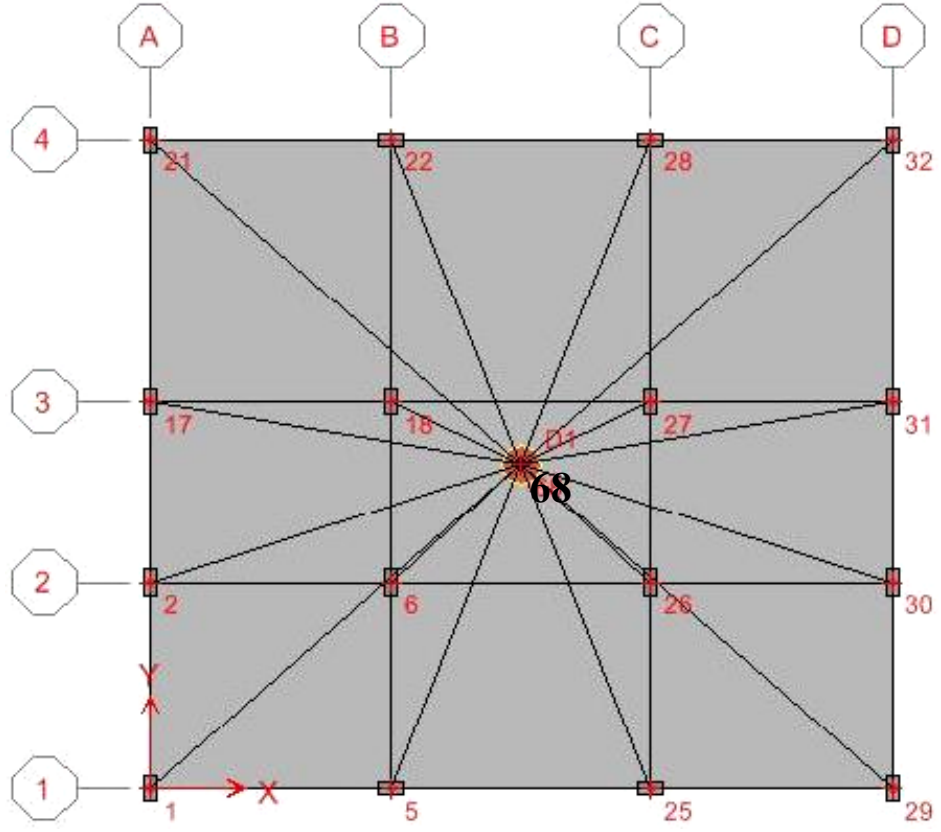
Taban kesme kuvveti,  $V_{tx} = 2377$  KN (X-X doğrultusu)

Taban kesme kuvveti,  $V_{ty} = 3867$  KN (Y-Y doğrultusu)

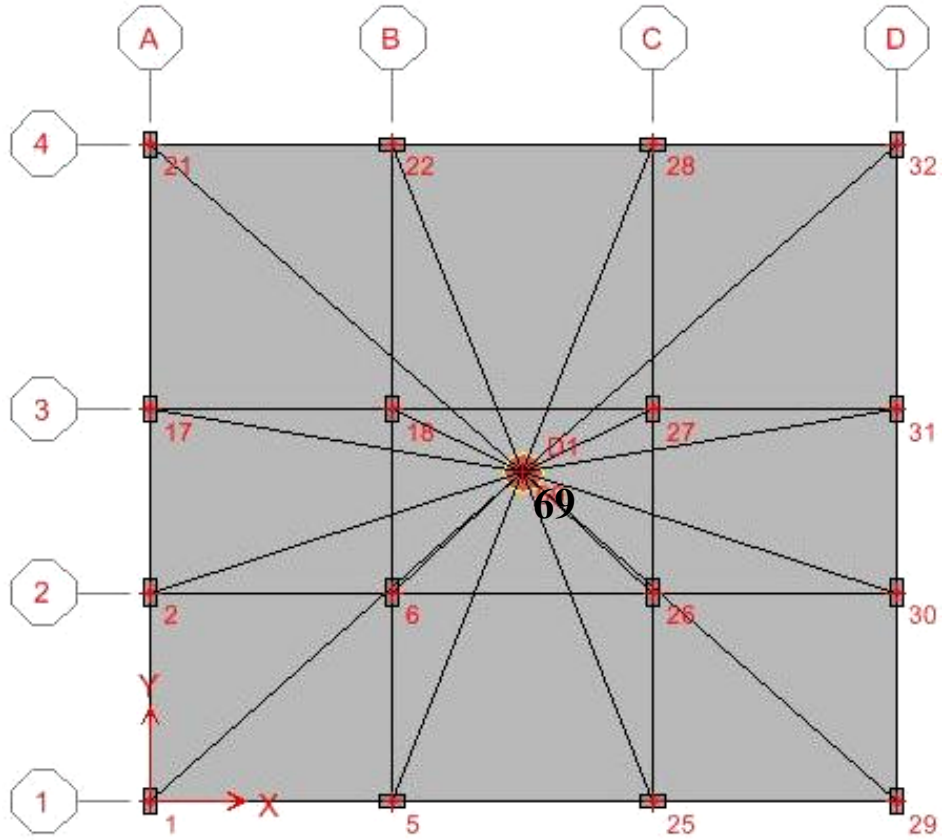
Ayrıca kat kütle merkezleri olan 68,69 ve 70 (Şekil 12.11, 12.12) nolu düğüm noktalarına etkiyen ivme değerleri zaman tanım alanında çözümlenmiş ve maksimum değerleri ve zamanları Tablo 12.20’de verilmiştir.

**Tablo 12.20:** TYS kat kütlelerine etkiyen ivme değerleri

Kat Seviyesi (Düğüm No)	Deprem yönü	Maksimum ivme değeri (g)	Zaman (sn)
Kat 2 (68)	UX	0,24	16,09
Kat 1 (69)	UX	0,21	8,57
Temel (70)	UX	0,23	8,56
Kat 2 (68)	UY	0,36	8,28
Kat 1 (69)	UY	0,33	8,235
Temel (70)	UY	0,36	8,185



Şekil 12.11: TYS 2. Kat 68 nolu kütle merkezi



Şekil 12.12: TYS 1. Kat 69 nolu kütle merkezi

## 13. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

### 13.1. Analizin Değerlendirilmesi

Karşılaştırmalı bir çalışma her iki sınır koşulu için aynı yapı sistemi için yürütülmüş ve sonuçları alınmıştır. Yer değiştirmeler, görelî kat ötelenmeleri, kolon uç momentleri ve taban kesme kuvvetleri sismik yalıtımın etkinliğini göstermek bakımından her iki durum için hesaplanıp, karşılaştırılmıştır. Görelî kat ötelenme oranları her bir kat için hesaplanan değerin, kat yüksekliklerine bölünmesi ile elde edilmiştir. Analizde dinamik doğrusal olmayan zaman tanım alanında çözümleme yapılmıştır. Çalışmaya ait bir değerlendirme aşağıda özetlenmiştir;

1. Temelden ankastre mesnetli yapının etkin titreşim periyodu  $T = 0,49$  sn iken, kurşun çekirdekli elastomer mesnetlerin kullanıldığı sismik taban yalıtımlı binanın hakim periyodu yapılan dinamik analiz sonucunda  $T=1,79$  sn mertebelerine yükselmiştir. Bulunan karşılaştırmalı değerler Tablo 13.1’de verilmiştir.

**Tablo 13.1:** AMS ve TYS yapısal periyotlar

Periyot (sn)	Ankastre Mesnetli Yapı (sn)	Taban Yalıtımlı Yapı (sn)
$T_x$	0,4852	1,7926
$T_y$	0,3804	1,7658

2. Kat ötelenmeleri, ankastre bina ile karşılaştırıldığında taban yalıtımlı binada daha büyük değerlere ulaşmıştır. Örnek olarak zemine ankastre mesnetli yapının ikinci kat C1 kolonu X-X doğrultulu üst uç (1 nolu düğüm noktası) deplasman değeri  $\Delta t = 0,005$  süre artım aralığı için 5,62 cm iken taban yalıtımlı binada bu değer 10,15 cm olarak hesaplanmıştır. Deplasmandaki bu artışa rağmen yalıtımlı yapıdaki görelî kat ötelenme oranları ankastre yapıya oranla oldukça küçük değerler almıştır. Örnek olarak, ankastre yapıda birinci kat C1 kolonu görelî kat ötelenme oranı X-X doğrultulu deprem için 0,010378 iken, LRB mesnetlerinin kullanılması durumunda bu değer 0,003405 mertebesine kadar düşürülmüştür. Ayrıca taban yalıtımlı yapı için

bulunan rölatif kat ötelenme değerleri UBC-97, kısım IV’de yer alan sınır şartını ( $\leq 0,010/R_i$ ) sağlamaktadır. Örnek olarak, birinci kat kolonu iki ucu arasındaki rölatif yer değiştirme (0,003405) değeri, sınır şart değeri olan  $0,010/2 = 0,005$  değerinden küçük bir değerdir ( $R_i=2$ , taban kesme kuvveti azaltım kat sayısı, UBC-97, Tablo A-16-E). 1 numaralı düğüm noktasının her iki durum için karşılaştırmalı değerleri Tablo 13.2’de verilmiştir.

**Tablo 13.2:** AMS ve TYS karşılaştırmalı 1 numaralı düğüm noktası yer değiştirme değerleri

Kat	Ankastre Mesnetli Yapı Maksimum Noktasal Yer Değiştirme		Taban Yalıtımlı Yapı Maksimum Noktasal Yer Değiştirme		Görelî Kat Ötelenme			
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	Ankastre		Yalıtımlı	
					X	Y	X	Y
Kat 2	0,0562	0,0769	0,1015	0,1527	0,00890	0,01301	0,00183	0,0024
Kat 1	0,0295	0,0378	0,0960	0,1455	0,00983	0,01261	0,00296	0,0034
Temel	0	0	0,0871	0,1354	0	0	0	0

Görüldüğü gibi taban yalıtım sistemi, tüm deplasmanların yalıtım seviyesinde yoğunlaştırıldığı zaman yapı sisteminde gerekli esnekliği sağlamanın yanında üst yapıya adeta rijit cisim hareketi yaptırmaktadır.

3. Normalde taban yalıtımlı sistemlerde sismik kuvvet azaltma katsayısı, yapıya ekstra bir güvenlik kazandırmak için  $R_i=2$  olarak alınmakta bunun sonucunda da taşıyıcı sistem elemanlarındaki iç kuvvet değerleri süneklik düzeyi yüksek çerçevesi sistemlerdekine oranla ( $R=8$ ) daha büyük değerler almaktadır. Ancak bu çalışmada yalıtım sisteminin yapıya etkileyen sismik kuvvetleri azaltmadaki etkisini göstermek amacı ile her iki durum için dinamik doğrusal olmayan zaman tanım alanı hesabında eşit süneklik ( $R=1$ ) katsayısı kullanılmıştır ve gerçekleştirilen analizde iç kuvvet değerleri ankastre mesnetli yapıda, yalıtımlı sisteme oranla daha büyük değerler olarak ortaya çıkmıştır. Bu, taban yalıtımlı sistemler için beklenmesi gereken bir sonuçtur. Örnek olarak, ikinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3) ankastre yapı için 156,05 KN-m iken bu değer tabandan yalıtımlı binada 38,497 KN-m değerine kadar düşmüştür (Tablo 13.3). Aynı azalımı kolonlardaki burulma momenti değerlerindedir görmek mümkündür. Örnek olarak, ankastre mesnetli binanın ikinci



kat C1 kolonunun burulma momenti 0,991 KN-m iken taban yalıtımlı binada bu değer 0,603 KN-m, birinci kat C1 kolonu burulma momenti 0,944 KN-m'den 0,893 KN-m değerine düşmüştür. Moment değerlerindeki bu azalım, üst yapıdaki taşıyıcı elemanların boyutlandırılmasında daha küçük enkesitler ve donatı alanları kullanılmasına neden olacak, yapı maliyeti yeterli ölçüde azaltılacaktır.

**Tablo 13.3** AMS ve TYS karşılaştırmalı C1 kolonu üst uç moment (M3-3) değerleri

Kat	Ankastre Mesnetli Yapı C1 Üst Uç Momenti (KN-m)	Taban Yalıtımlı Yapı C1 Üst Uç Momenti (KN-m)
Kat 2	156,05	38,497
Kat 1	164,145	52,780

4. Benzer şekilde her iki sistem için taban kesme kuvvetleri, eşdeğer deprem yükü yönteminde süneklik katsayıları oranında azaltılmıştır. Taban yalıtımlı sistem için süneklik katsayısı, ( $R_i$ ), ankastre mesnetli sistem için seçilen süneklik katsayısından, ( $R$ ), çok daha küçük bir değer alındığından dolayı yalıtımlı sistemde daha büyük taban kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Örnek olarak ankastre mesnetli sistemde eşdeğer deprem yükü  $V_t = 907$  KN, yalıtımlı sistem için hesaplanan taban kesme kuvveti  $V_D = 2783$  KN olarak hesaplanmıştır. Dinamik analizde program tarafından hesaplanan taban kesme kuvvetleri taban yalıtımının etkinliğini göstermek bakımından eşit süneklik katsayılarına göre hesaplanmıştır. Ankastre mesnetli yapı için x-x ve y-y doğrultulu taban kesme kuvveti değerleri sırası ile  $V_{tx} = 4965,89$  KN ve  $V_{ty} = 9654,61$  KN'dur. Taban yalıtımlı sistem için hesaplanılan taban kesme kuvvetleri yukarıda belirtilen ilgili doğrultular için sırası ile  $V_{tx} = 2377$  KN ve  $V_{ty} = 3867$  KN'dur (Tablo 13.4). Zaman tanım alanı hesap yönteminde bulunan bu taban kesme kuvvetleri UBC-97, kısım IV, bölüm 1659-2'de yer alan sınırlandırmaları kısmen sağlamaktadır [5]. Bu sınırlandırmalarda, taban yalıtımlı sistemler için zaman tanım alanı hesabında yeterli görülen taban kesme kuvveti, statik analizde bulunan taban kesme kuvvetinin %90'ından az olmaması gerekliliğini şart koşmaktadır ( $\geq 90V_D$ ). Örnek olarak, Y-Y doğrultulu taban kesme kuvvetinin,  $V_{ty} = 3867$  KN  $\geq 0,90(2783) = 2505$  KN, bu koşulu sağladığı görülmektedir. Her iki doğrultu için taban kesme kuvvetlerindeki bu azalım, sismik taban yalıtım tekniğinin sismisitesi yüksek bölgelerdeki yapılara uygulanabilirliğinin en önemli ölçütüdür.

**Tablo 13.4:** Dinamik analiz AMS ve TYS için karşılaştırmalı taban kesme kuvvetleri

Taban Kesme Kuvveti	Ankastre Mesnetli Yapı (KN)	Taban Yalıtımlı Yapı (KN)
$V_{tx}$	4965,89	2377
$V_{ty}$	9654,61	3867

5. Taban yalıtım sistemlerinde, kat kütle merkezlerine etkileyen yatay deprem kuvvetlerinin azalmasının nedeni, sismik taban yalıtımının kuvvetli yer hareketinden kaynaklı büyük kat ivmelerini azaltmada bir filtre görevi üstlenmesinden dolayıdır. Gerçekleştirilen analiz sonucunda her iki sistem için kat kütle merkezlerine etkileyen ivme değerleri ve etkime zamanları sonlu elemanlar (ETABS) programı ile hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Tablo 13.5'ten görüleceği üzere, taban yalıtım sistemi ankastre mesnetli sisteme oranla kat ivmelerini gözle görülür ölçüde azaltmaktadır. Kat kütle merkezlerine etkileyen ivme değerlerinin azalımı, yatay deprem kuvvetlerinin azalması anlamına gelmektedir ve bu ise sismik taban yalıtımının ankastre mesnetli sistemlerine göre depreme dayanıklı yapı tasarımında daha etkin bir yöntem olduğunun en önemli işaretidir.

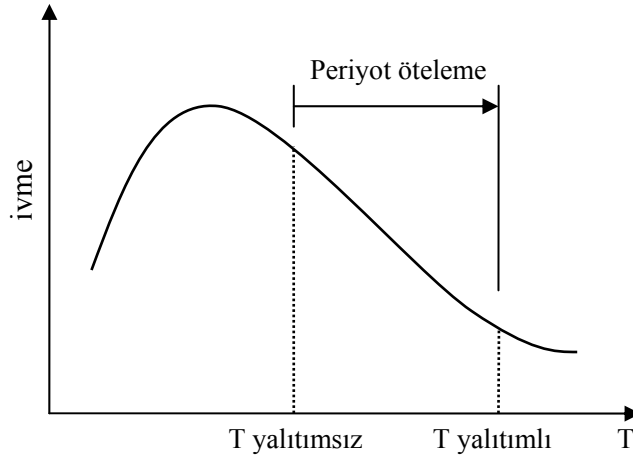
**Tablo 13.5:** Dinamik analiz AMS ve TYS için karşılaştırmalı kat ivme değerleri

Kat Seviyesi	Ankastre Mesnetli Yapı		Taban Yalıtımlı Yapı	
	X (g)	Y (g)	X (g)	Y (g)
Kat 2	0,99	1,86	0,24	0,36
Kat 1	0,51	0,98	0,21	0,33

### 13.2. Sonuçlar

Tez kapsamında yürütülen bu çalışmada iki katlı, moment aktarımlı betonarme çerçeve sisteme sahip örnek bir binanın temelden ankastre ve kurşun çekirdekli elastomer mesnetler ile zeminden yalıtılmış durumları için belli bir deprem kaydı altında zaman tanım alanında çözümlenmeleri yapılmıştır. Yapılan analizin incelenmesinden şu sonuçlara varılmıştır.

1. Yalıtım sisteminde kullanılan kurşun çekirdekli elastomer mesnetler ile tüm yapısal deformasyonlar yalıtım seviyesinde yoğunlaştırılmış, üst yapı adeta rijit cisim hareketi yapmıştır. Azaltılan yanal rijitlik ile iki katlı binanın hakim serbest titreşim periyodu ankastre mesnetli durumu ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde arttırılmıştır. Bina periyodunun büyütülmesi ile yapıya etkiyen spektral ivme değerlerinin azaltılması sağlamıştır (Şekil 13.1). Bu özellik taban yalıtım tekniğinin yapının dinamik tepkisi üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır.



**Şekil 13.1:** Spektrum eğrisinde periyot büyütme

2. Yapılan analizlerden çıkarılabilecek en önemli ikinci sonuç, binanın LRB mesnetleri kullanılarak zeminden yalıtılması ile üstyapının yere göre yer değiştirmesi büyük oranda artmıştır. İlk bakışta ankastre mesnetli binada daha küçük yerdeğiştirme değerlerinin bulunması taban yalıtım tekniğinin bir dezavantajı olarak görülebilir. Fakat bu yer değiştirmelerin çok büyük bir bölümünün LRB'lerin bulunduğu seviyede olması nedeni ile üst yapı yalıtım seviyesi üzerinde adeta rijit cisim hareketi yapmaktadır. Bu rijit cisim hareketini taban yalıtımlı yapıda katlar arası rölatif kat ötelenme farklarından anlamak mümkündür. Tabandan LRB mesnetleri ile zeminden yalıtılan binada temelden ankastre olma durumu ile karşılaştırıldığında daha büyük yer değiştirmeler elde edilmekte ancak rölatif kat yerdeğiştirme değerleri çok daha küçük değerler almasından dolayı yapı içerisindeki önemli ekipmanlar bu hareketten etkilenmemekte ve zarara uğramamaktadır.

3. LRB mesnetleri ile zeminden yalıtılan binanın üstyapı taşıyıcı sistem elemanlarındaki iç kuvvet değerleri, temelden ankastre mesnetli olma durumu ile karşılaştırıldığında daha küçük değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bunun en önemli

nedeninin, depremin kinetik enerjisinin büyük bir kısmının yalıtım sistem elemanlarında bulunan kurşun çekirdeğin elastik ötesi davranışı ile (yüksek plastisite) ısı enerjisine dönüştürülüp sönmelendirilmesi ve üst yapıya kısmende olsa deprem dalgasının büyük frekanslı içeriği yansıtılması olduğu sonucuna varılmıştır. Böylelikle kat kütle merkezlerine iletilen ivme değerleri ankastre mesnetli sisteme oranla gözle görülür oranlarda küçülmüş ve sonucunda kat hizalarına etkiyen yatay deprem kuvvetleri (kat kesme kuvvetleri) büyük oranda azaltılmıştır. Kat kütle ivme değerlerinin ve sonucunda yanal deprem kuvvetlerinin taban yalıtımlı binada azaltılması ile üstyapı taşıyıcı sistem elemanları olan kolon ve kirişlerde nispeten daha küçük mertebelerde iç kuvvetler meydana gelmiştir ve boyutlandırılması bu değerlere göre yapılacaktır. Sonuç olarak azaltılan iç kuvvetlere göre boyutlandırılan üst yapı, maliyet açısından ankastre mesnetli binaya oranla daha ekonomik olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

4. Gerçekleştirilen analizde kullanılan hesap yöntemlerinden biri olan statik eşdeğer deprem yükü yöntemi ile binanın ankastre mesnetli ve taban yalıtımlı olma durumları için taban kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesap sonuçlarında ankastre mesnetli binanın taban kesme kuvveti taban yalıtımlı binaya oranla daha küçük değerler almıştır. Bunun nedeni taban yalıtımlı bina için kullanılan taban kesme kuvveti azaltma katsayısının yönetmelik hükümlerine uyularak ankastre mesnetli durumda kullanılan katsayıdan 4 kat daha küçük seçilmesidir. Elde edilen sonuçlardan çıkarılacak sonuç, günümüzdeki deprem yönetmeliklerinde depreme karşı yapı tasarım tekniklerinin ilkesi olan süneklik kavramı taban yalıtımlı sistemlerde önemini nispeten kaybettiğidir. Her ne kadar taban yalıtımlı sistemlerde üst yapı taşıyıcı sistem elemanları düşük iç kuvvet değerlere maruz kalsada, sismik taban yalıtım tekniğinin yapının dinamik tepkisi üzerindeki hakimiyetinin ortaya çıkmasında gerekli olan üst yapının rijit cisim hareketi ancak süneklik düzeyi düşük rijit kolon, kiriş ve perde elemanlarından oluşan yapı sistemlerinde sağlanması gerekliliği sonucuna varılmıştır. Bu ise yıkıcı özelliği olan depremlere maruz kalan yapılarda, bina içerisindeki yapısal olmayan elemanların hasarını sınırlamada ve önlemede ekstra bir güvenlik unsurunu teşkil etmektedir.

5. Yukarıda gerçekleştirilen analiz ve elde edilen sonuçlar ile karşılaştırma yapılmak istenmesi bakımından LRB ve RB izolatörleri ile modellenen USC (University of

Southern California Hospital Building) hastane binasının 1994 Northridge depremi (0,49 g) esnasında vermiş olduğu dinamik tepki ve bazı peak değerler Tablo 13.6'da özetlenmiştir. Analiz sonuçlarından çıkarılabilecek sonuç, taban yalıtımlı olarak modellenen USC binasının kaydedilmiş verilerinin (kat yer değiştirmeleri, görelî kat ötelenmeleri, kat ivme değerleri, taban kesme kuvvetleri) yukarıda özetlenen sonuçlarla bazı sayısal farklılıklar olduğunu göz önünde tutarak, asıl düşüncede taban yalıtımlı yapılardan beklenen olumlu dinamik tepkilerin, zemine ankastre sistemlere oranla her iki yapıda da daha belirgin olarak ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Binanın Northridge depremi altında vermiş olduğu tepkinin detayları Response of Base-Isolated USC Hospital Building In Northridge Earthquake (Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 10, October, 2000.) isimli makaleden öğrenilebilir [19].

**Tablo 13.6:** USC binası ve Analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Yapı Sistemi	Kat Adedi	Yalıtım Sistem Tipi	Kullanılan İzolatör Cinsleri ve Adedi	Maks. İzolatör ve Kurşun Çekirdek Çapı (cm)		Periyot (T)		Mesnetlerin Maks. Rölatif Yer Değişirmesi (D <sub>D</sub> )	
				İzolatör (D <sub>max</sub> )	Kurşun Çekirdek (d <sub>L</sub> )	DBE (sn)	Dinamik Analiz (sn)	DBE (cm)	Analiz (cm)
USC	8	Pasif	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 68 LRB</li> <li>• 81NRB</li> </ul>	66,04	13,97	2,2	1,3	26,04	3,5
Analiz	2	Pasif	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 16 LRB</li> </ul>	60	10	1,73	1,79	21	13,57

6. LRB izolatörleri ile gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarından belkide en önemlisi farklı geometriksel ve mekaniksel özelliklere sahip taban yalıtım elemanlarının yapı içerisinde aynı yalıtım düzleminde binada büyük burulma etkileri meydana getirmeden uygun yerleşim düzeninde kullanılabilineceği sonucuna varılmasıdır. Analizde kullanılan ve farklı özelliklere sahip Tip-a ve Tip-b türü LRB izolatörleri binanın dış ve iç kolon altlarına yerleştirilerek deprem etkisi altında binanın modal davranışları incelenmiştir. Bina toplam kütesinin yüzdesi olarak ortaya çıkan etkin modal kütlelerin ( $M_1^*$ ,  $M_2^*$ ) x ve y yönlerindeki 1. titreşim modlarında %95-%100 arasında değişim göstererek, binanın yanal yönde serbest titreşim yaptığı görülmüştür. Bunu sağlamanın yolu, seçilen yalıtım sistem

elemanlarının başlangıç tasarım aşamasında doğru bir şekilde boyutlandırılmasından (mesnet ve kurşun çekirdek çapı, mesnet yüksekliği) geçmektedir. Yukarıda yürütülen analizde mesnetlerin boyutlandırılması aşamasında öncelikle küçük mesnet çapları seçilmiştir. Yapılan statik eşdeğer deprem yükü ve deprem kaydı altında gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki hesaplamalardan izolatörlerin hesaplanan DBE düzeyi tasarım yer değiştirmesinden daha büyük rölatif yer değiştirme yaptığı, düşey yükü aktarmak için gerekli olan efektif alanı sağlayamadıkları görülmüştür. Bunun üzerine mesnetlerdeki rölatif yer değiştirmeleri azaltmak, efektif yük aktarım alanını yeter derecede sağlamak için mesnetlerin çapları büyütülmüş, kurşun çekirdeğin akma dayanımını arttırmak için mesnetlerdeki çekirdek çapı azaltılmıştır. Böylelikle taban yalıtım sisteminin yanal rijitliği artırılmış, binanın serbest titreşim periyodu artan yanal rijitlikle birlikte bir miktar azalma göstermiştir. Tekrardan gerçekleştirilen dinamik analizler sonucunda izolatörlerin deprem hareketi altında rölatif yer değiştirmelerinin sınır değer olan tasarım yer değiştirmesinin altında çıktığı gözlemlenmiştir. Mesnet çaplarının büyütülmesi ile efektif yük aktarım alanının mesnet alanının % 50'lik bir kısmına karşılık geldiği görülmüş ve yeterli bulunmuştur.

7. Günümüzdeki klasik depreme dayanıklı yapım tekniklerine alternatif, yenilikçi bir yaklaşım olarak uygulama alanı bulan sismik taban yalıtım tekniği dünyada bir çok ülkenin yönetmeliklerinde (UBC, IBC, OSHPD, FEMA, AASHTO) yer almasına ve yaygın bir şekilde uygulanmasına rağmen, yüz ölçümünün %92'si büyük fay zonları içerisinde yer alan ve geçmişte yaşanan bir çok büyük depremlerde acı sonuçlar çıkaran ülkemizdeki deprem yönetmeliklerinde halen sismik taban yalıtımı tasarım ilkesine yer verilmemektedir. Deprem anındaki performansı gözlemlenerek onaylanan bu yenilikçi tasarım yaklaşımına ülkemizde geçerli olan deprem yönetmeliğinde yer verilmesi artık bir zorunluluk haline gelmiştir. Ancak, son zamanlarda ülkemizde sismik izolasyon şartnamesi hazırlanması konusunda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu şartnamenin hazırlanması ile ilgili olarak geçtiğimiz Mart ayında kurulan Deprem İzolasyon Derneği, Bayındırlık Bakanlığı Yüksek Fen Kurulu Başkanlığı tarafından görevlendirilmiştir. Bu görev kapsamında dernek kurucularından oluşan dört kişilik bir heyet bir taslak çalışması oluşturmak için bir araya gelmiştir. Önümüzdeki sene Mayıs ayında 10.uncusu İstanbul'da düzenlenecek olan Yapılarda Sismik İzolasyon, Enerji Sönümlenme ve Aktif

Vibrasyon Kontrolü Dünya Konferansı'nda bu taslak çalışmanın sunulması düşünülmektedir. Sismik izolasyon şartnamesi yürürlüğe girdiği takdirde bir çok kamu kuruluşu ve belediyelerde proje onay ve kontrol mekanizması rahat işleyeceğinden sismik izolasyon sistemlerinin yaygınlaşması daha kolay olacaktır. Ayrıca, bu sistemlerin önemli kamu binalarında (hastaneler, itfaiye binaları, afet yönetim ve sivil savunma merkezleri v.b.) kullanımı ile deprem sonrası binaların işlev kaybı önlenmekte, hizmetlerine 24 saat devam edebilmektedirler. Bunun yanında tarihi binaların, köprü ve viyadüklerinde aynı zamanda ülke ekonomisine yön veren merkezi binaların, fabrika türü yapıların ve depremden sonra kullanımı gerekli olan enerji güç üretim tesislerinin şiddetli bir depremden sonra korunumu sismik izolasyon sistemleri ile sağlanabilmektedir.

8. Son olarak, gerçekleştirilen bu tez çalışmasında binaların tabanlarına yanal yöndeki rijitlikleri oldukça düşük izolatörler yerleştirip üst yapı ile zemini birbirinden ayırarak yapının aynı özelliklere sahip ankastre mesnetli durumu ile karşılaştırıldığında tek bir deprem datası altında dinamik özelliklerinin değişimi gözlemlenmiştir. Bununla beraber, yapıların sismik yalıtımı ile ilgili daha ileri düzey araştırmalar için birbirinden farklı frekans içeriklerine sahip birden fazla deprem datası altında binanın dinamik davranış parametreleri incelenebilir, kullanılan izolatörlerin stabilitesi kontrol edilebilir ayrıca bir maliyet analizi yapılabilir. Sonuç olarak, yürütülen bu çalışma daha ileri düzey araştırmalara bir başlangıç noktası olabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Tezcan, S.S. and Erkal, A.**, 2002. Seismic Base Isolation and Energy Absorbing Devices, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, İstanbul.
- [2] **Baştuğ, B.K.**, 2004. Yapı Sistemlerinde Depreme Karşı Sismik İzolatör Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Bayülke, N.**, 2002. Yapıların Deprem Titreşiminden Yalıtımı, Sistem Ofset Yayınları, İstanbul.
- [4] **Stewart, J.P., Conte, J.P. and Aiken, I.D.**, 1999. Observed Behaviour of Seismically Isolated Buildings, *Journal of Structural Engineering*, **125**, 955-964.
- [5] **Uniform Building Code (UBC), Division IV**, 1997. Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures.
- [6] **Deprem Yönetmeliği**, 1997. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, *Bayındırlık ve İskan Bakanlığı*, İzmir.
- [7] **Ramallo, J.C., Johnson, E.A. and Spencer, B.F.**, 2002. “Smart” Base Isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, **128**, 1088-1099.
- [8] **Komodromos, P.**, 2000. Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures, *Advances in Earthquake Engineering*, WIT Press, Southampton, Boston.
- [9] **Furukawa, T., Ito, M., Izawa, K. and Noori, M. N.**, 2005. System Identification of Base-Isolated Building Using Seismic Response Data, *Journal of Engineering Mechanics*, **131**, 268-275.
- [10] **SEAOC**, 1989. General Requirements for the Design and Construction of Seismic Isolated Structures, *Structural Engineers Association*, California.



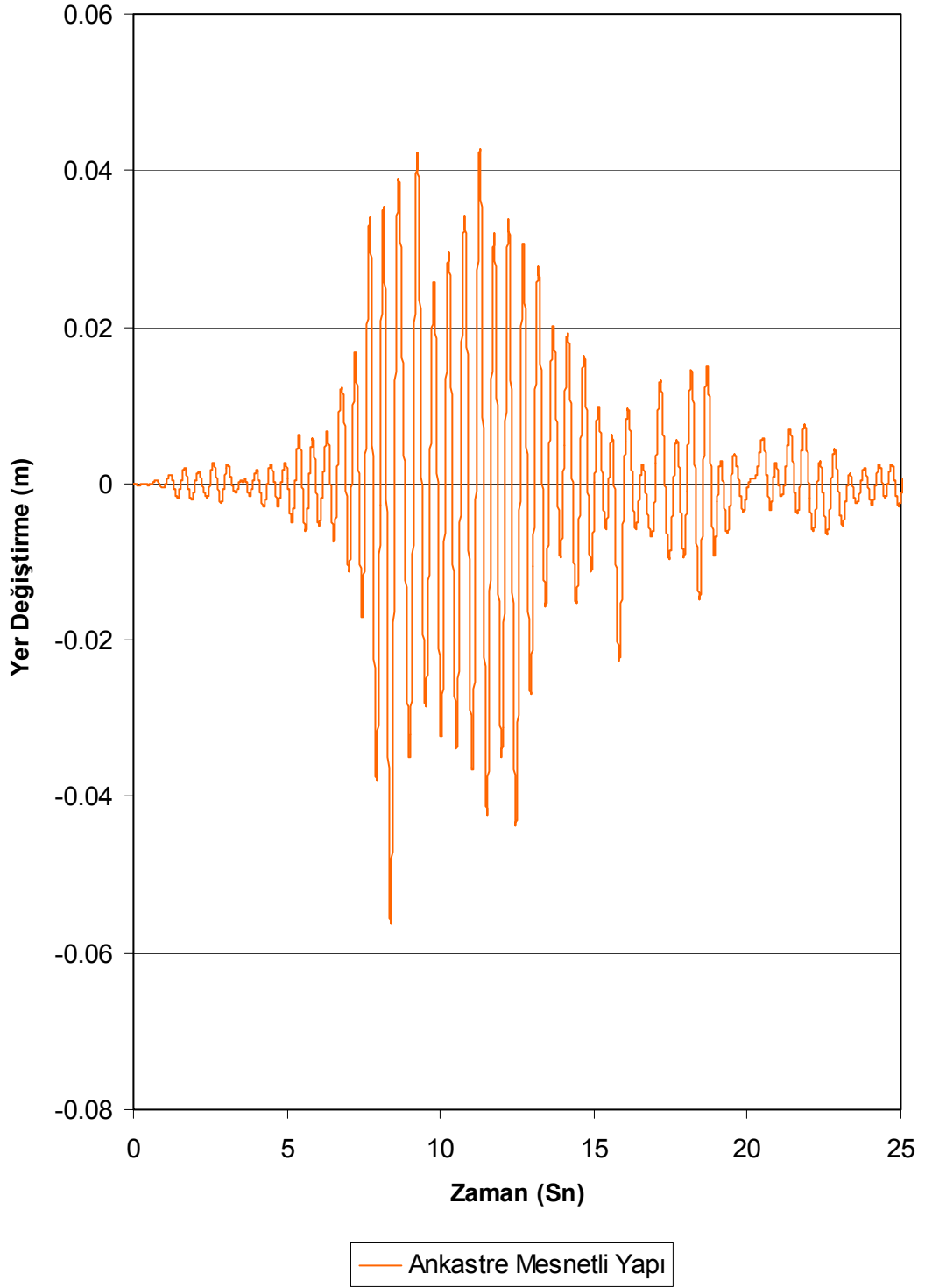
- [11] **Uniform Building Code (UBC)**, 1994. Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures.
- [12] **Naeim, F., Kelly, J.M.**, 1999. Design of Seismic Isolated Structures From Theory to Practice, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [13] **Ryan, K.L. and Chopra, A.K.**, 2006. Estimating Seismic Demands for Isolation Bearings with Building Overturning Effects, *Journal of Structural Engineering*, **132**, 1118-1128.
- [14] **Madden, G.J., Symans, M.D. and Wongprasert, N.**, 2002. Experimental Verification of Seismic Response of Building Frame with Adaptive Sliding Base-Isolation System, *Journal of Structural Engineering*, **128**, 1037-1045.
- [15] **Celep, Z., Kumbasar, N.**, 2004. Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Beta Dağıtım, İstanbul.
- [16] **Ryan, K.L., Kelly, J.M. and Chopra, A.K.**, 2005. Nonlinear Model for Lead-Rubber Bearings Including Axial-Load Effects, *Journal of Engineering Mechanics*, **131**, 1270-1278.
- [17] **Yoshida, J., Abe, M., Fujino, Y. and Watanabe, H.**, 2004. Three-Dimensional Finite-Element Analysis of High Damping Rubber Bearings, *Journal of Engineering Mechanics*, **130**, 607-620.
- [18] **Tezcan, S.S. and Cimilli, S.**, 2002. Seismic Base Isolation, Yüksek Öğrenim Eğitim ve Araştırma Vakfı, İstanbul.
- [19] **Nagarajaiah, S. and Xiaohong, S.**, 2000. Response of Base-Isolated USC Hospital Building in Northridge Earthquake, *Journal of Structural Engineering*, **126**, 1177-1186.
- [20] **Bozorgnia, Y., Mahin, S. and Brady, G.**, 1999. Vertical response of twelve structures recorded during the Northridge earthquake, *Earthquake Spectra*, **14**, 411-432.
- [21] **Chopra, A.K.**, 2001. Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering, *Earthquake Dynamics of Base-Isolated Buildings*, pp. 731-755, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- [22] **Ayhan, O.**, 2006. Binaların depreme karşı güçlendirilmesinde klasik yöntem ile sürtünmeli sarkaç sistemlerin karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [23] **Pınarbaşı, S., Akyüz, U.,** 2005. Sismik İzolasyon ve Elastomerik Yastık Deneyleri, *İMO Teknik Dergi*, **237**, 3581-3598.
- [24] **Mori, A., Moss, P., Cooke, N. and Carr, A.,** 1999. The behaviour of bearings used for seismic isolation under rotation and axial load, *Earthquake Spectra*, **15**, 225-244.
- [25] **Austin, M.A. and Lin, W.J.,** 2004. Energy Balance Assessment of Base-Isolated Structures, *Journal of Engineering Mechanics*, **130**, 347-358.
- [26] **Kelly, T.E.,** 2001. In-Structural Damping and Energy Dissipation Design Guidelines, S.E. Holmes Consulting Group Ltd, Wellington, New Zealand.
- [27] **Özmen, G., Orakdöğen, E., Darılmaz, K.,** 2005. Örneklerle ETABS, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [28] <http://www.lacityhall.org/Moat1.html>, example building applications.
- [29] <http://www.oiles.co.jp/en/menshin/building/index.html>, base-isolation devices.
- [30] <http://www.robinsonseismic.com/products/lrb.html>, example building applications.
- [31] <http://www.emke.com.tr>, base-isolation devices.
- [32] <http://nisee.berkeley.edu/lessons/kelly.html>, example building applications.
- [33] <http://www.dis-inc.com>, example building applications.
- [34] <http://www.fotosearch.com/ISI120/urbpe038/> , for Los Angeles City Hall pictures.
- [35] <http://www.ersetech.com>, example building applications.
- [36] <http://www.earthquakeprotection.com>, example building applications.

## **EKLER**

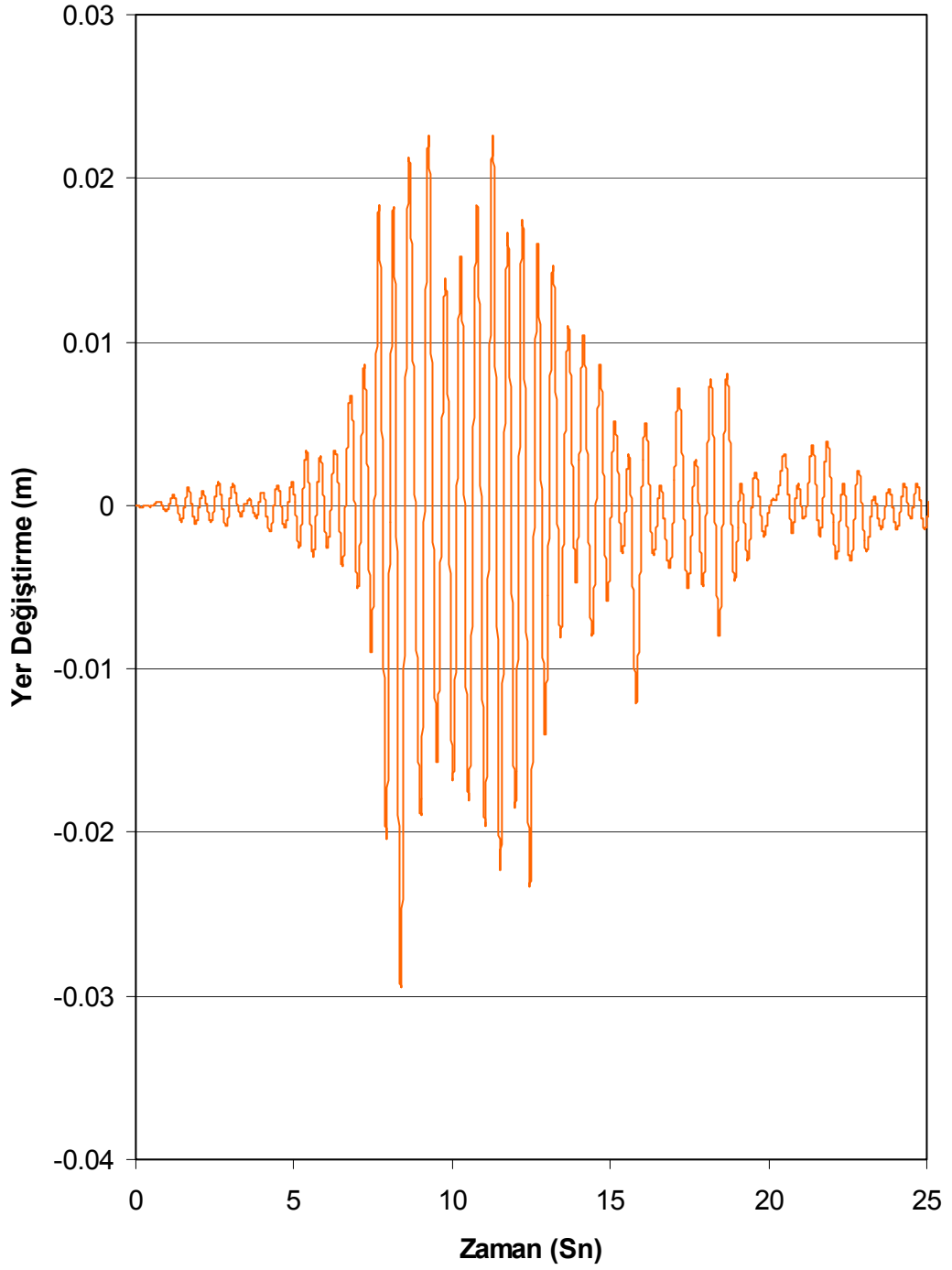
**EK-A.1 : ANKASTRE MESNETLİ YAPI KAT YER DEĞİŞTİRME  
GRAFİKLERİ**

### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.1.1: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği

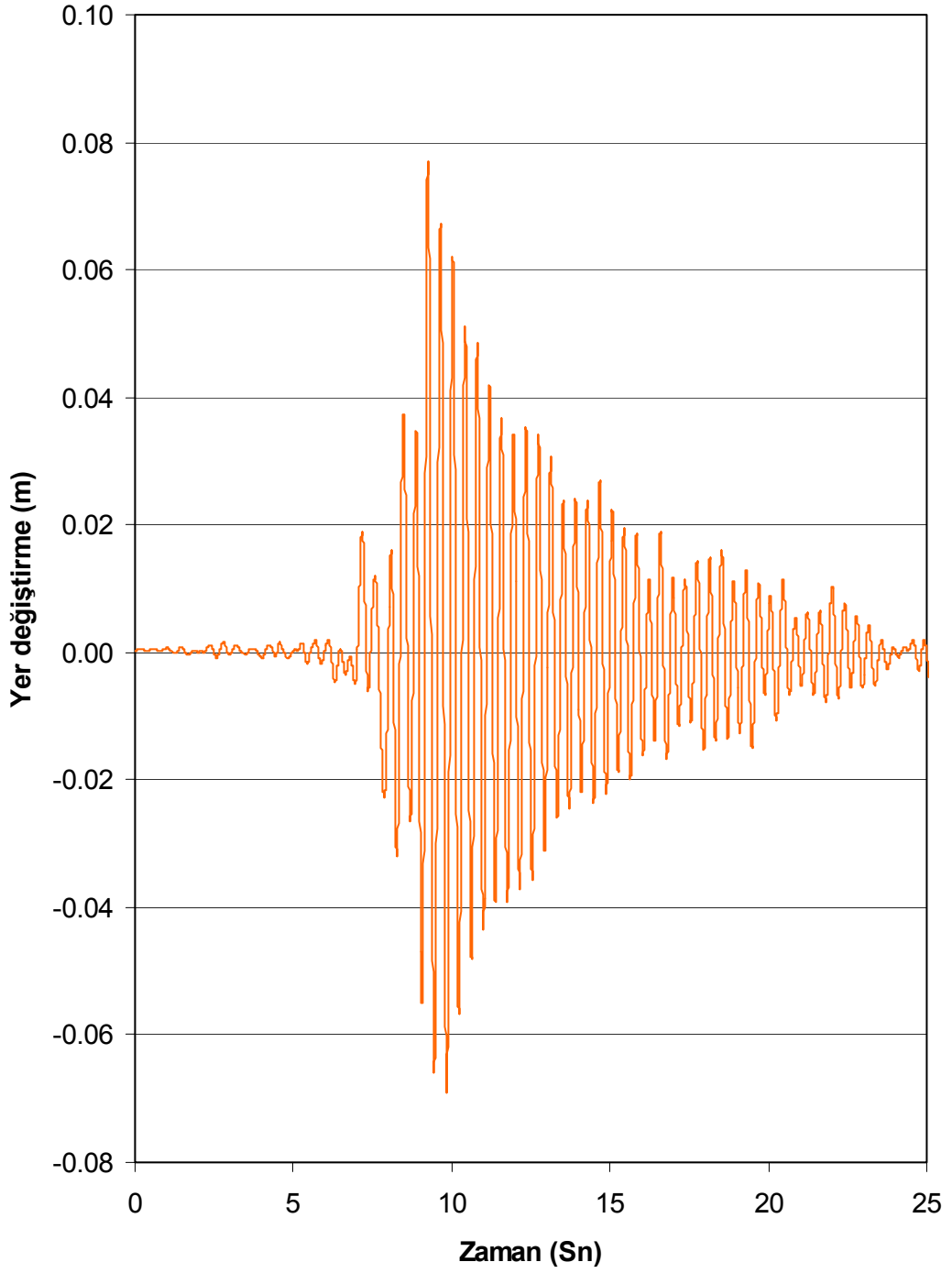
## Ankastre Mesnetli Yapı



— Ankastre Mesnetli Yapı

Şekil A.1.2: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği

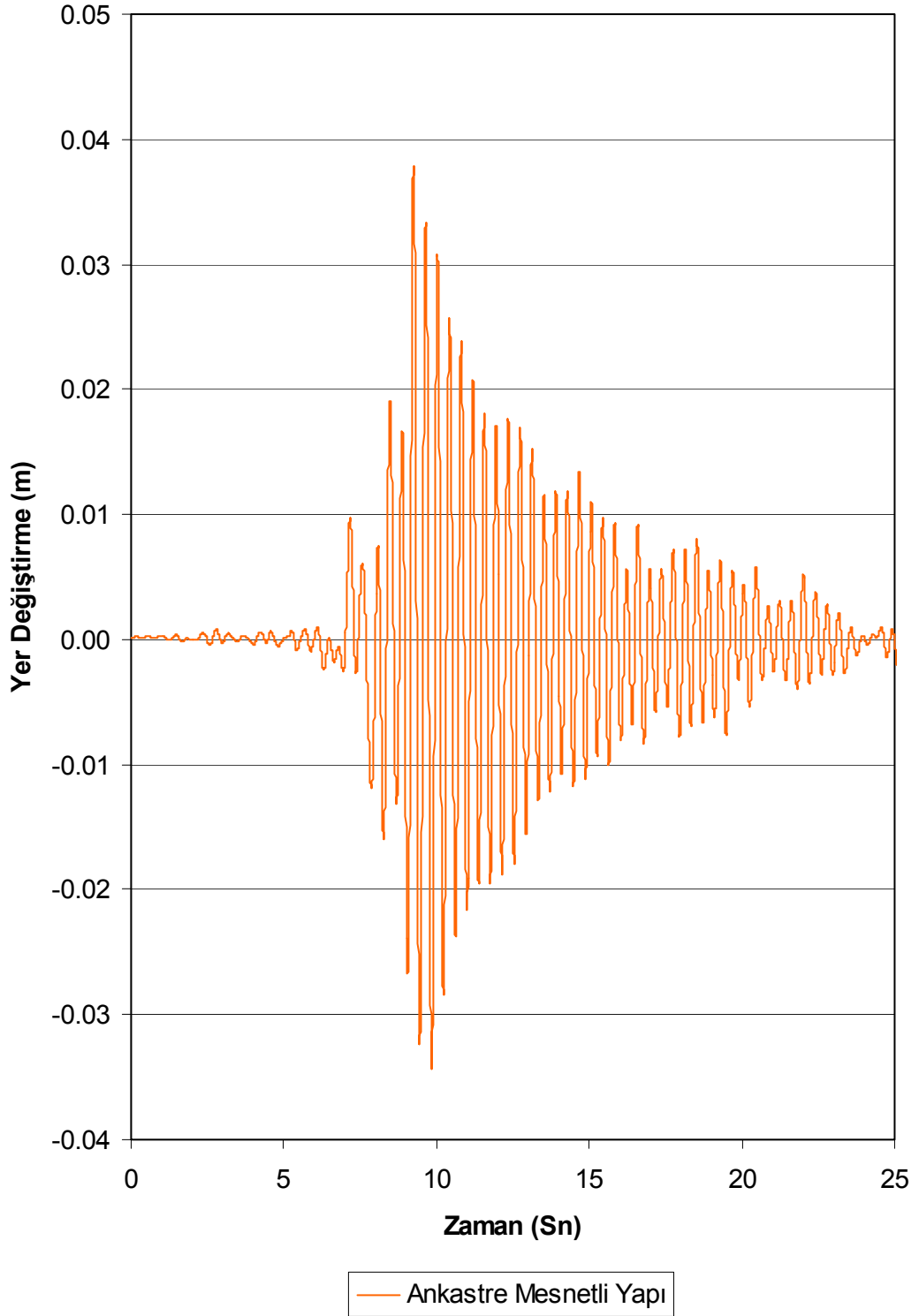
### Ankastre Mesnetli Yapı



— Ankastre Mesnetli Yapı

şekil A.1.3: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu ikinci kat yer değişirme grafiği

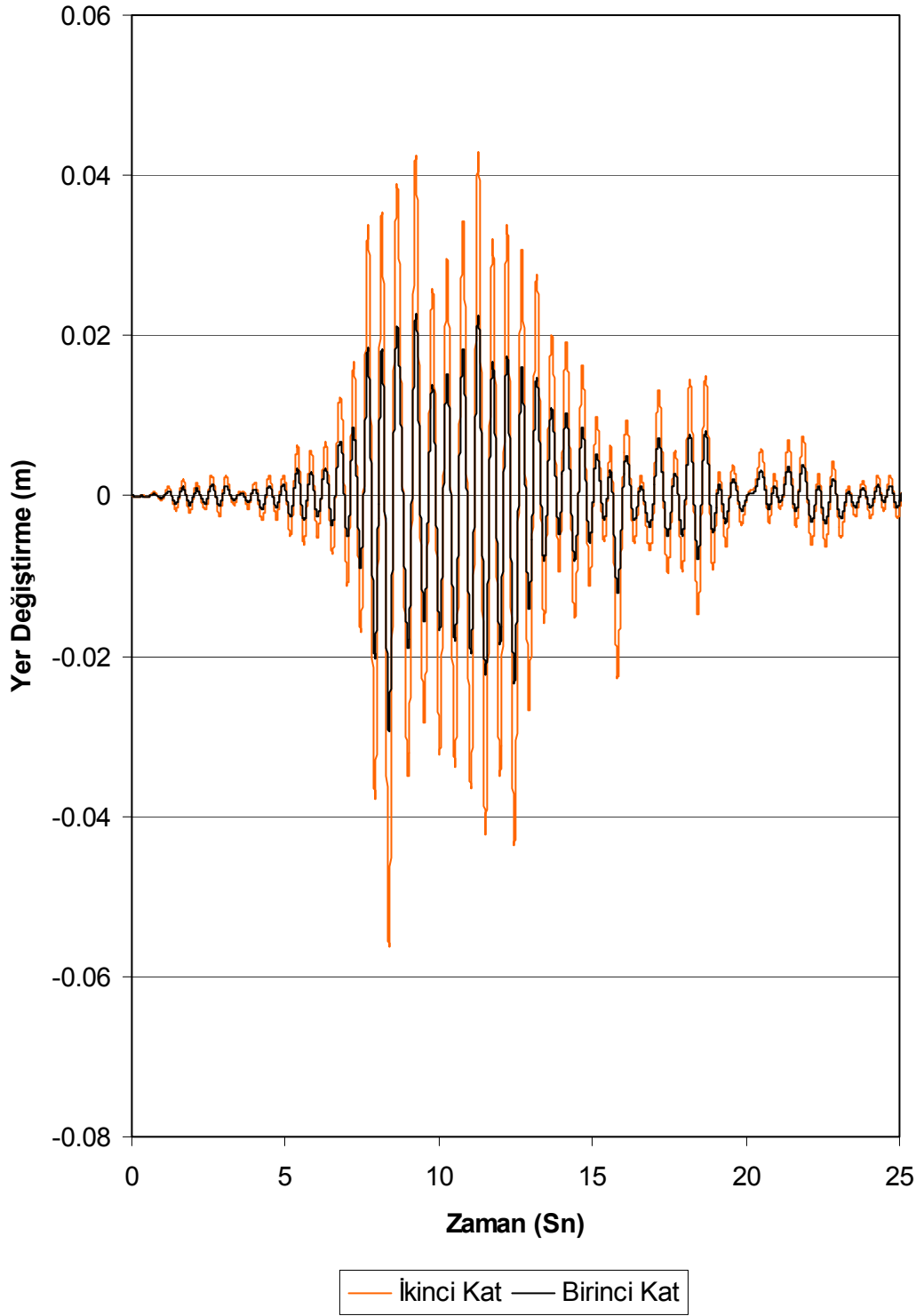
### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.1.4: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği

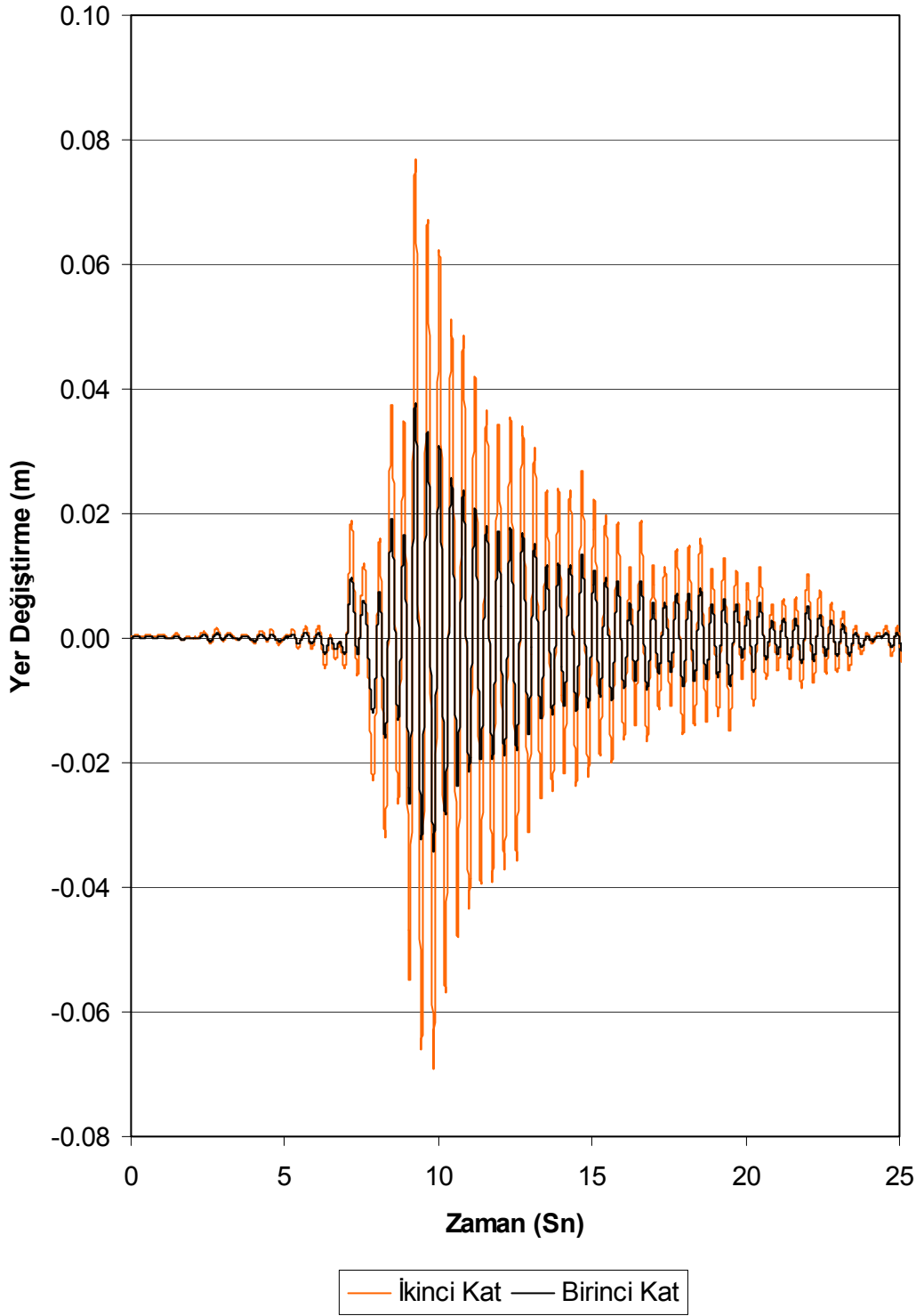


### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.1.5: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği

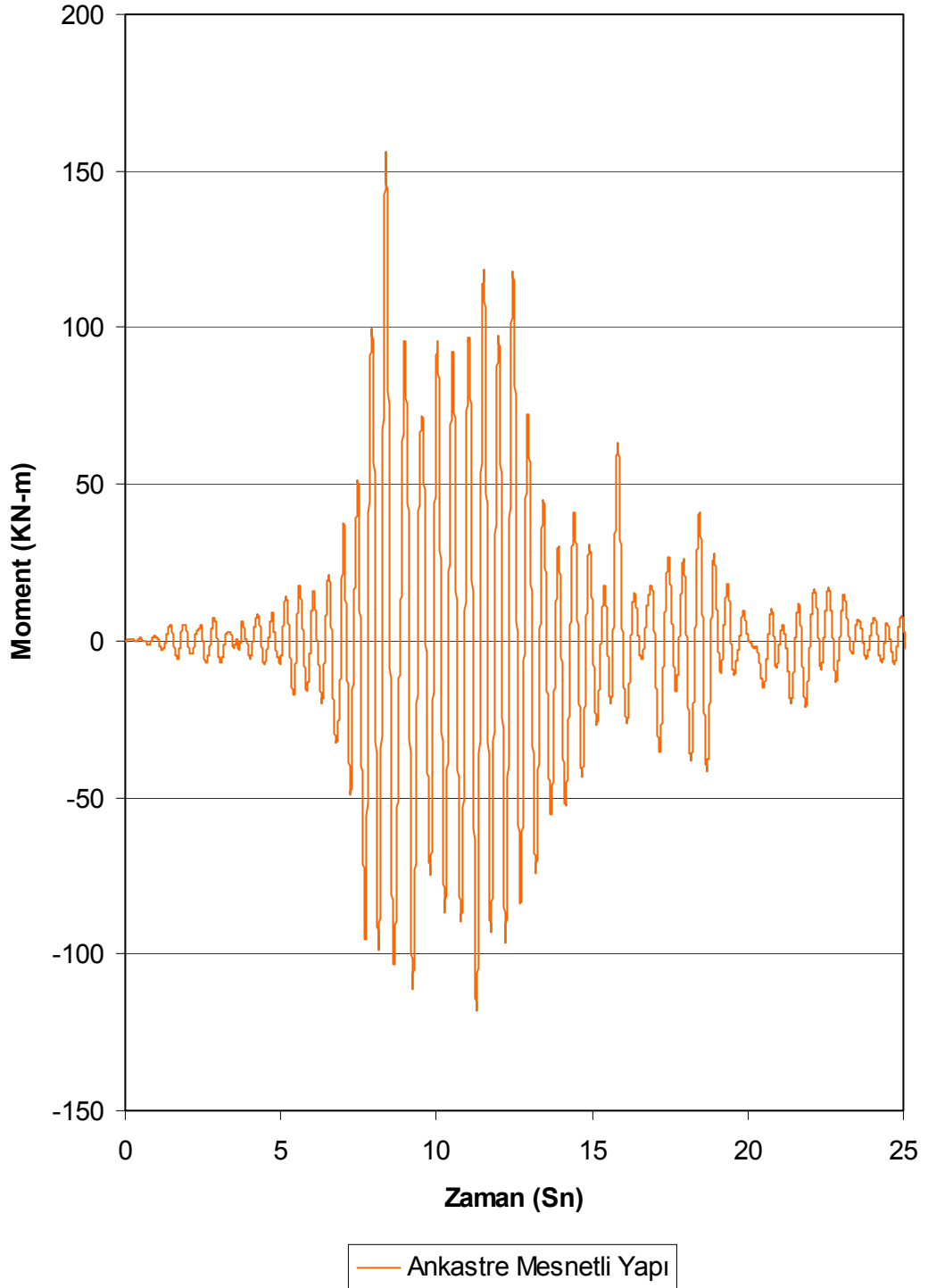
### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.1.6: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği

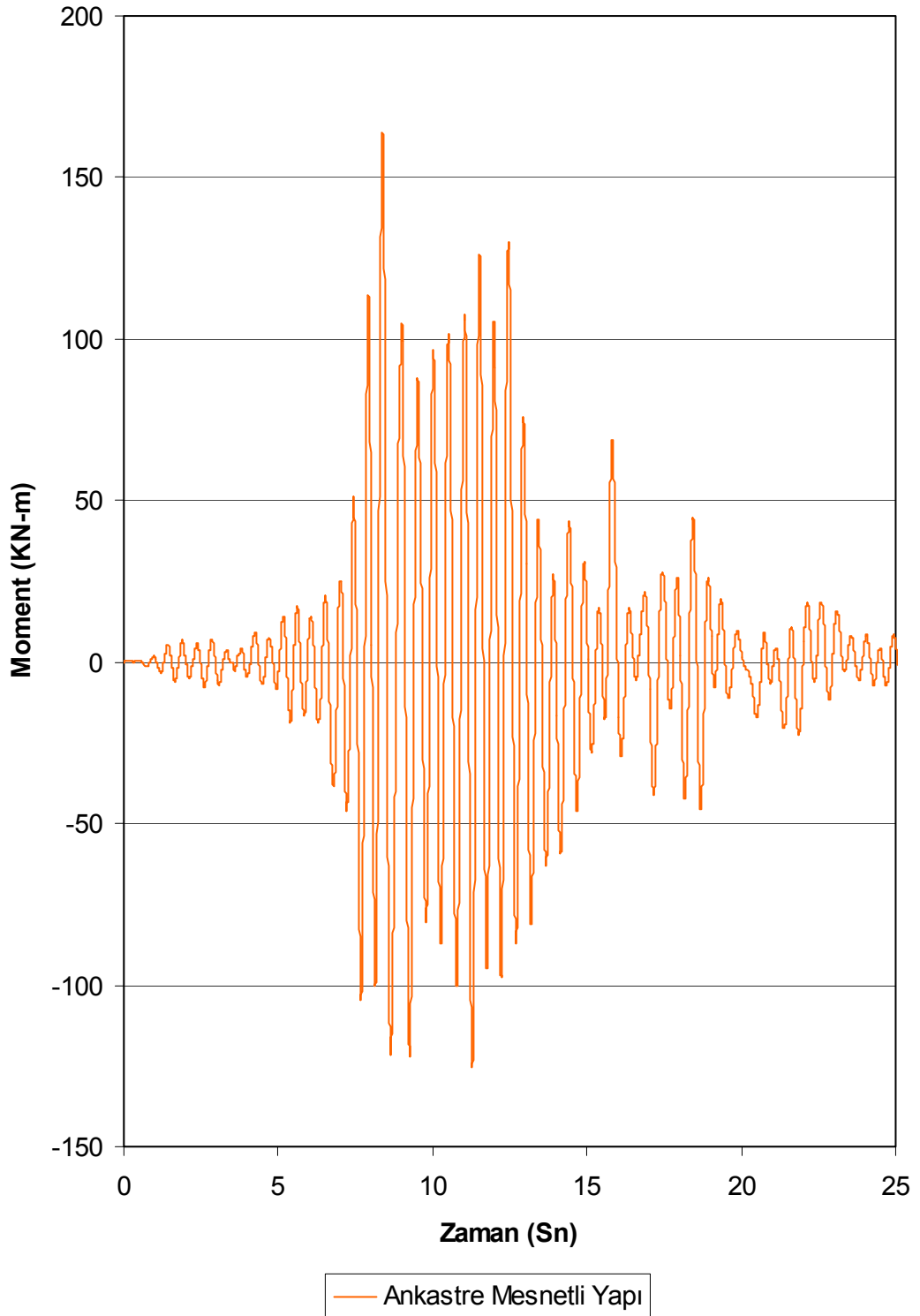
**EK-A.2 : ANKASTRE MESNETLİ YAPI C1 KOLONU ÜST UÇ  
MOMENT DEĞİŞİM GRAFİKLERİ**

### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.2.1: Ankastre mesnetli yapı ikinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3)

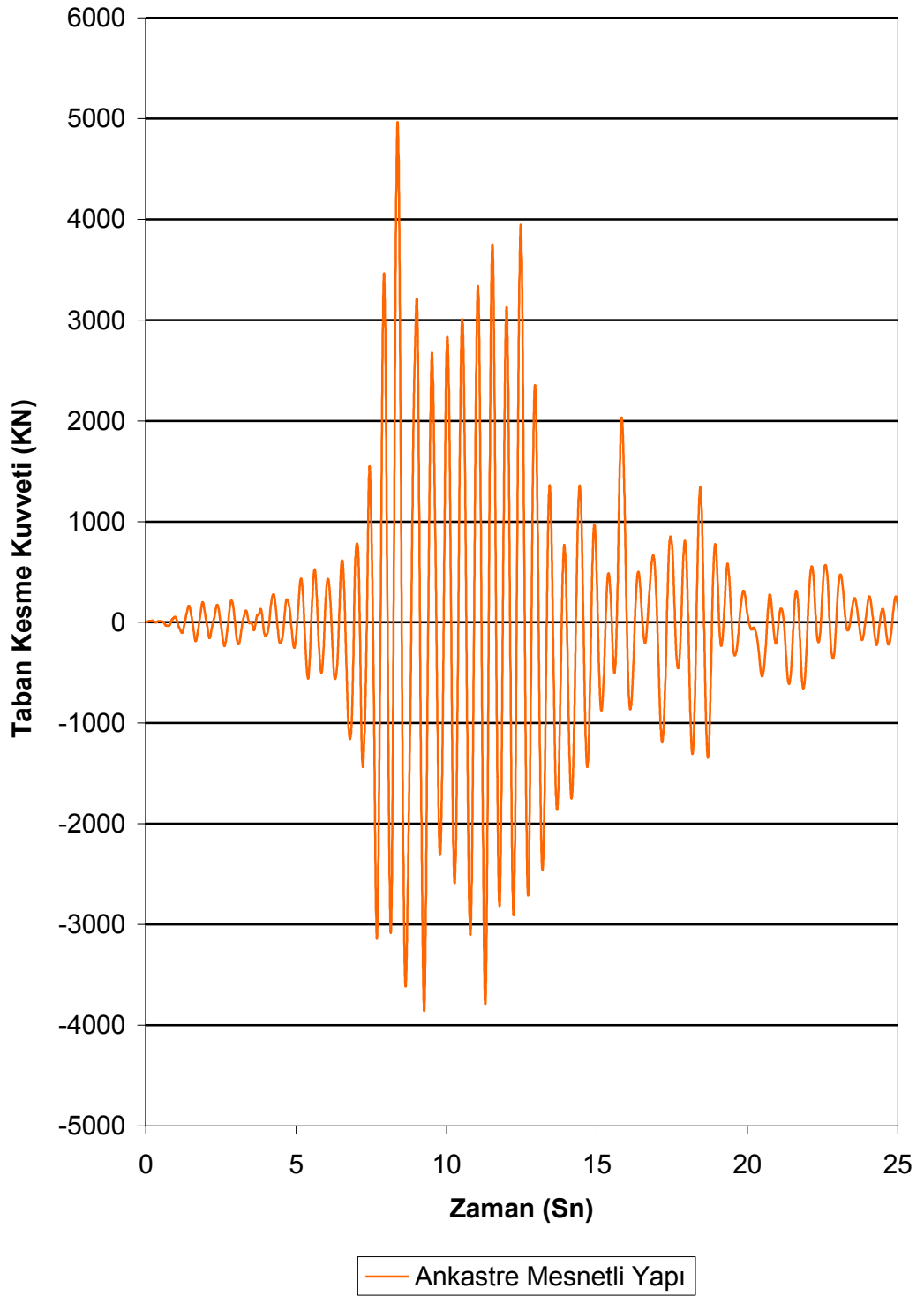
### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.2.2: Ankastre mesnetli yapı birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3)

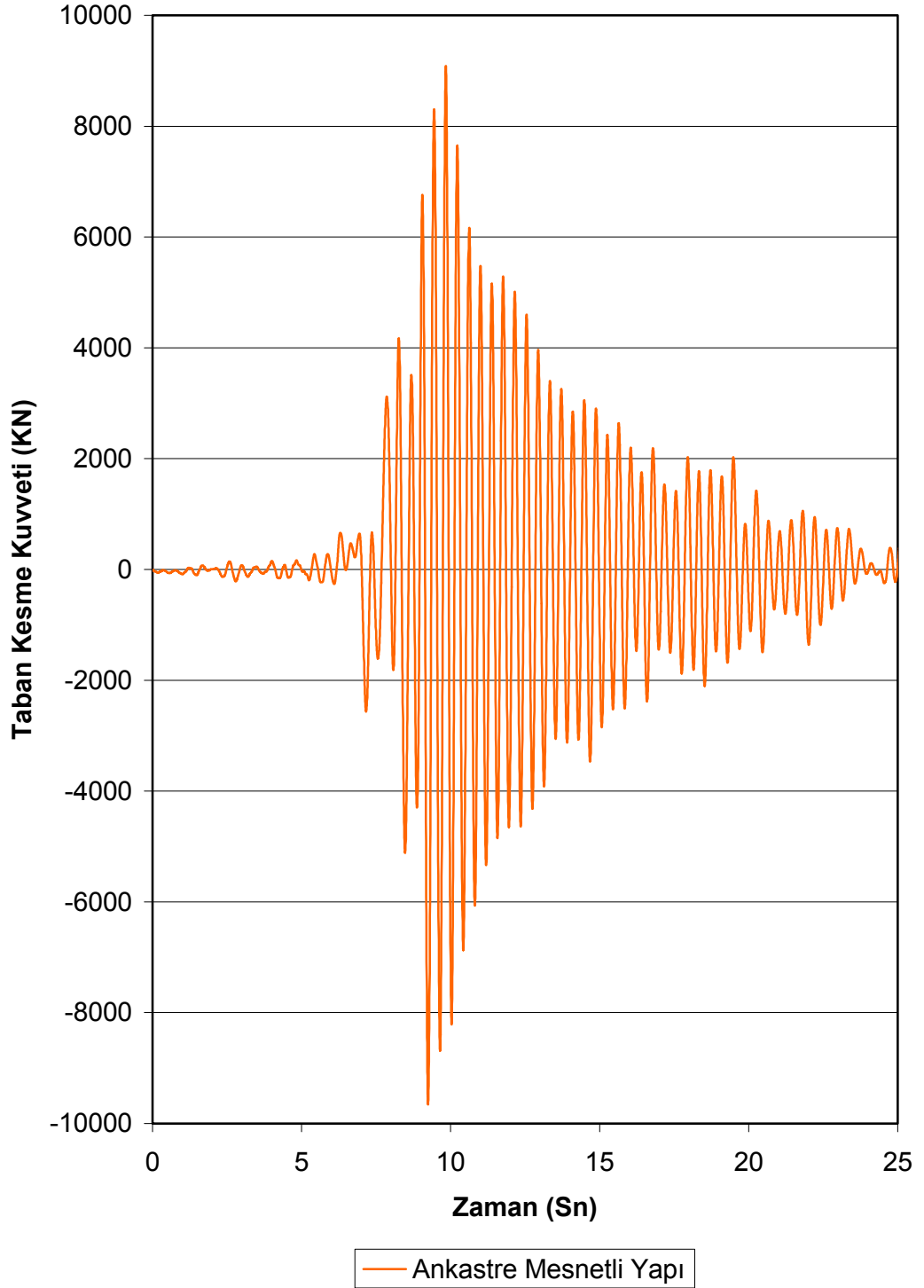
**EK-A.3 : ANKASTRE MESNETLİ YAPI TABAN KESME  
KUVVETLERİ**

### Ankastre Mesnetli Yapı



Şekil A.3.1: Ankastre mesnetli yapı x-x doğrultulu taban kesme kuvveti

### Ankastre Mesnetli Yapı

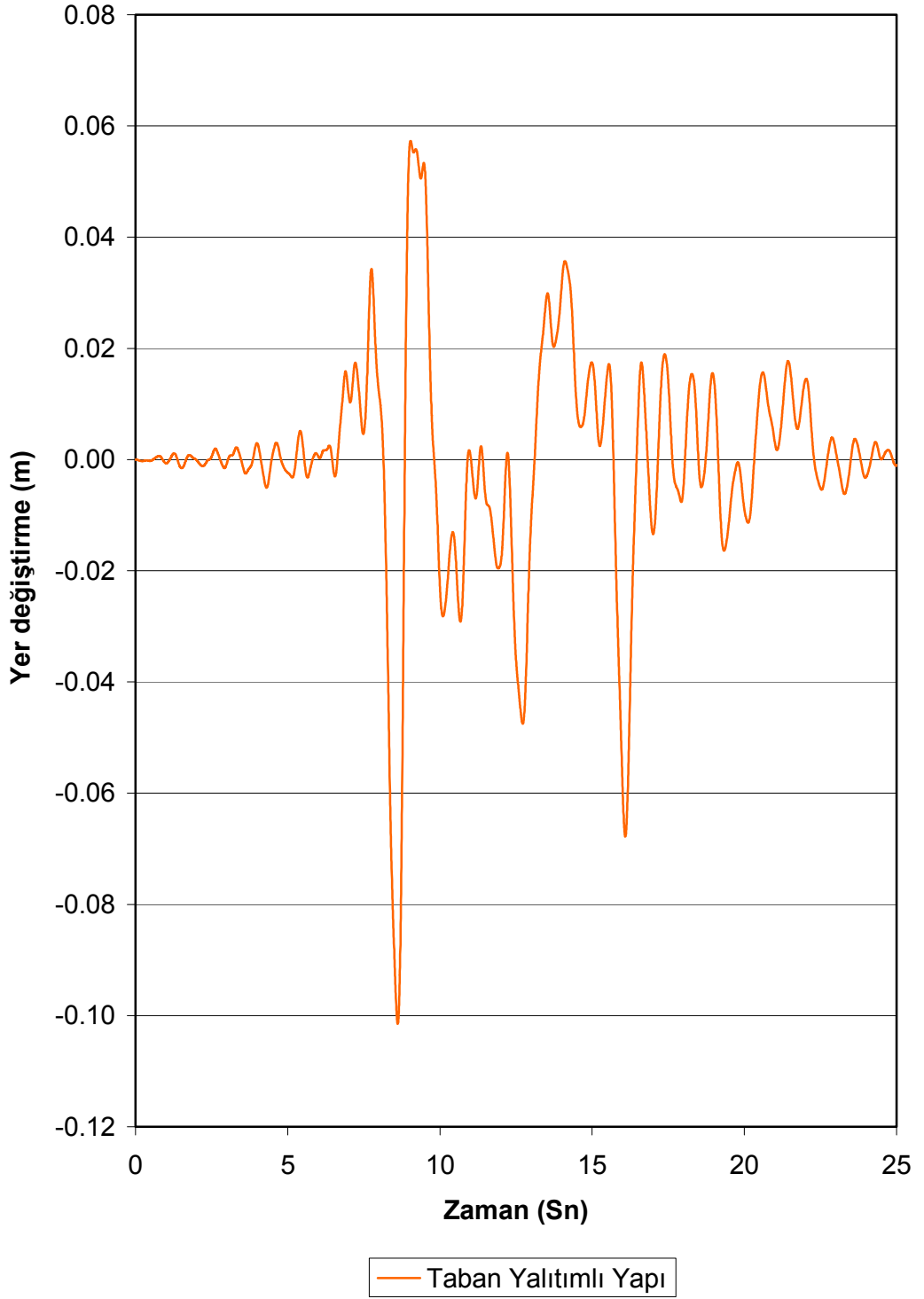


Şekil A.3.2: Ankastre mesnetli yapı y-y doğrultulu taban kesme kuvveti



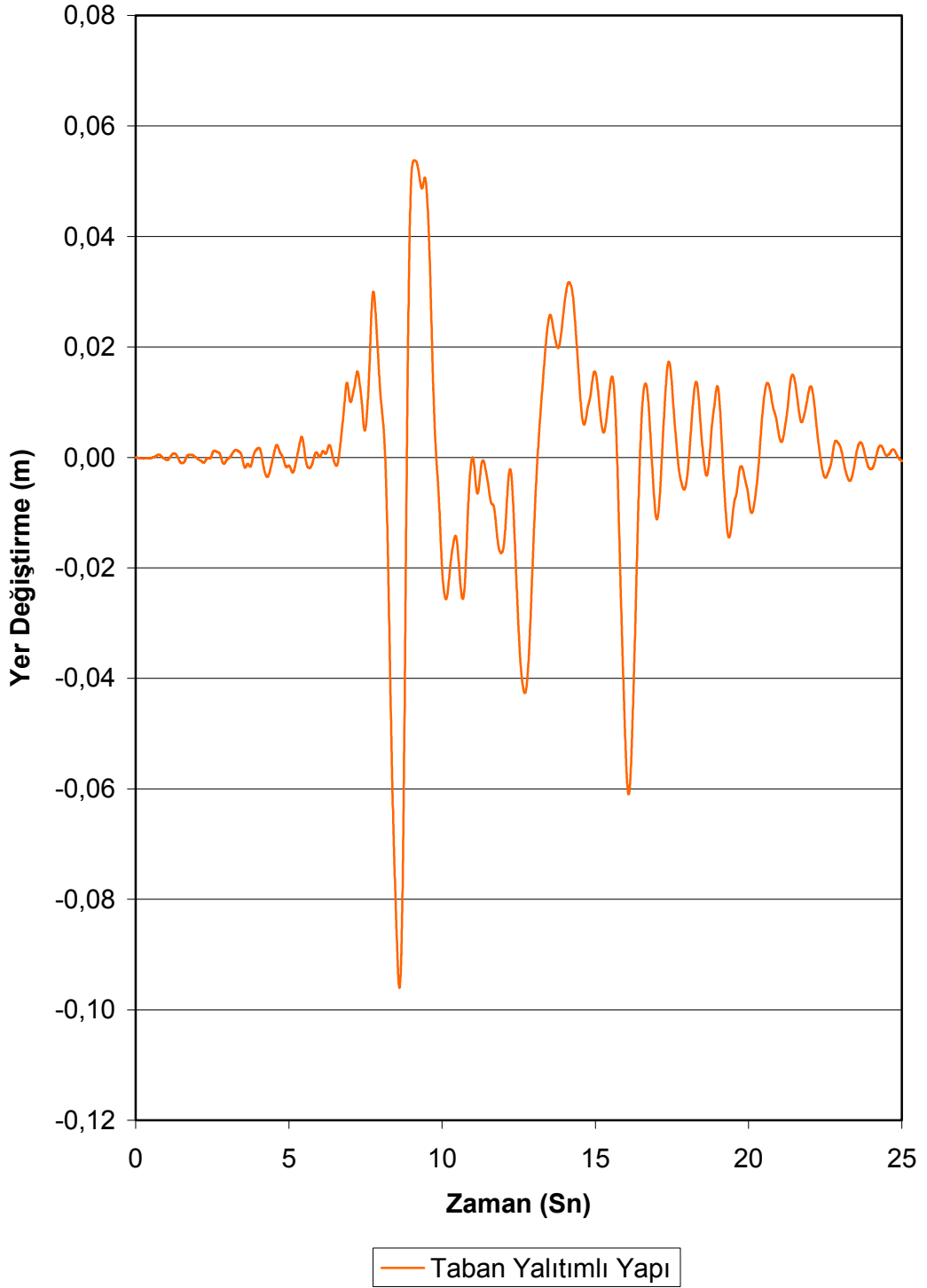
**EK-B.1 : TABAN YALITIMLI YAPI KAT YER DEĞİŞTİRME  
GRAFİKLERİ**

### Taban Yalıtımlı Yapı



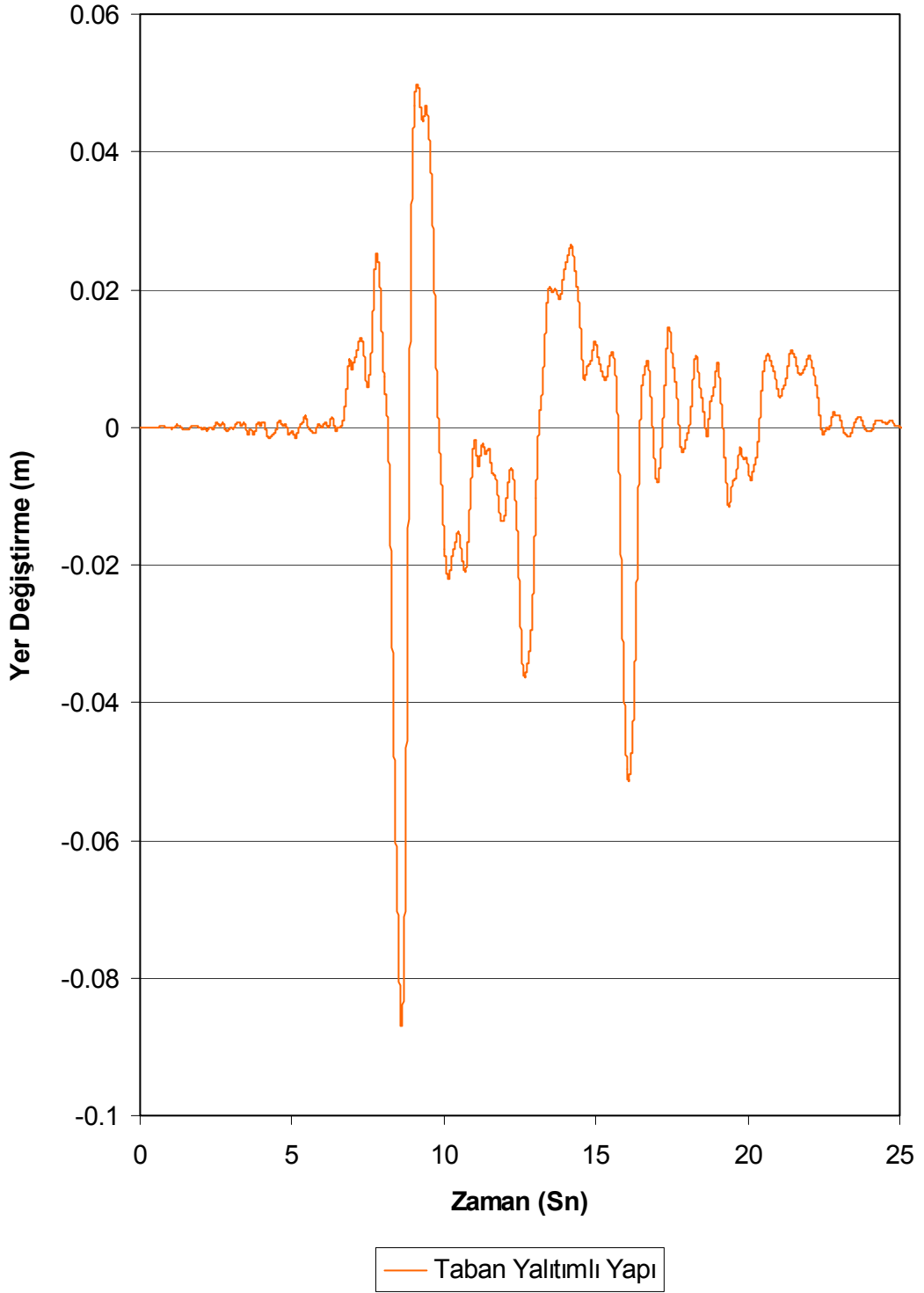
Şekil B.1.1: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu ikinci kat yer değişirme grafiği

### Taban Yalıtımlı Yapı



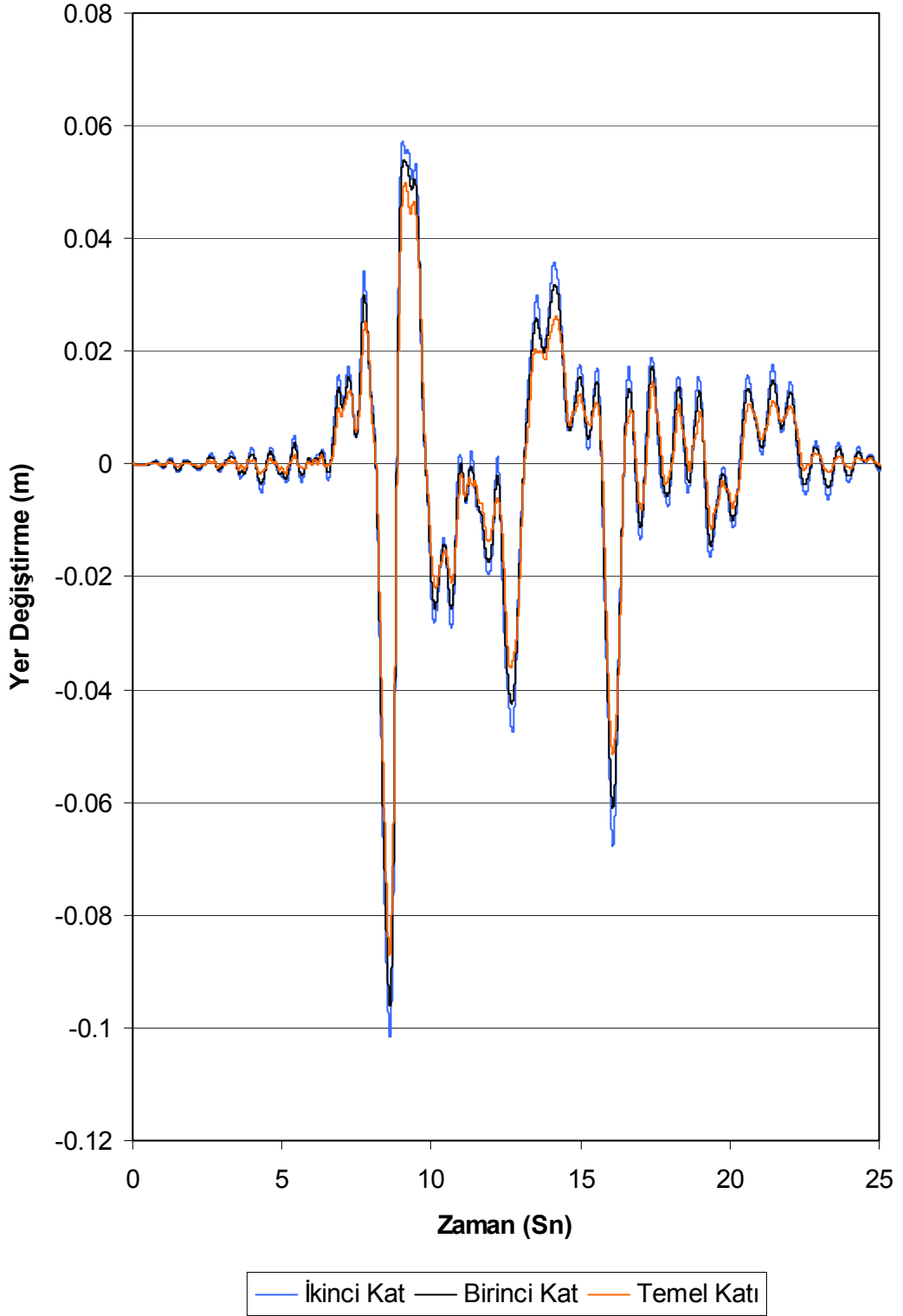
Şekil B.1.2: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği

### Taban Yalıtımlı Yapı



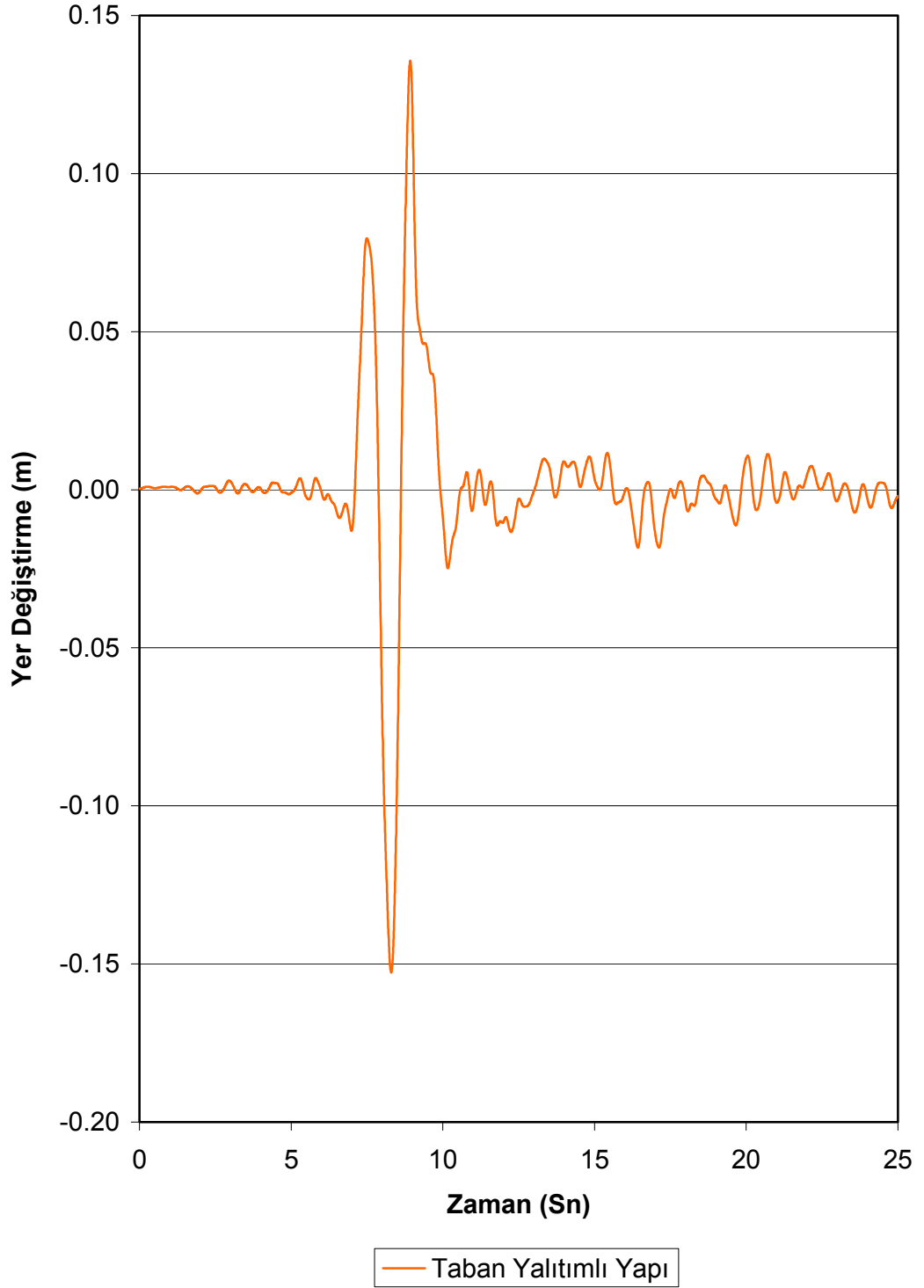
Şekil B.1.3: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu temel kat yer değiştirme grafiği

### Taban Yalıtımlı Yapı



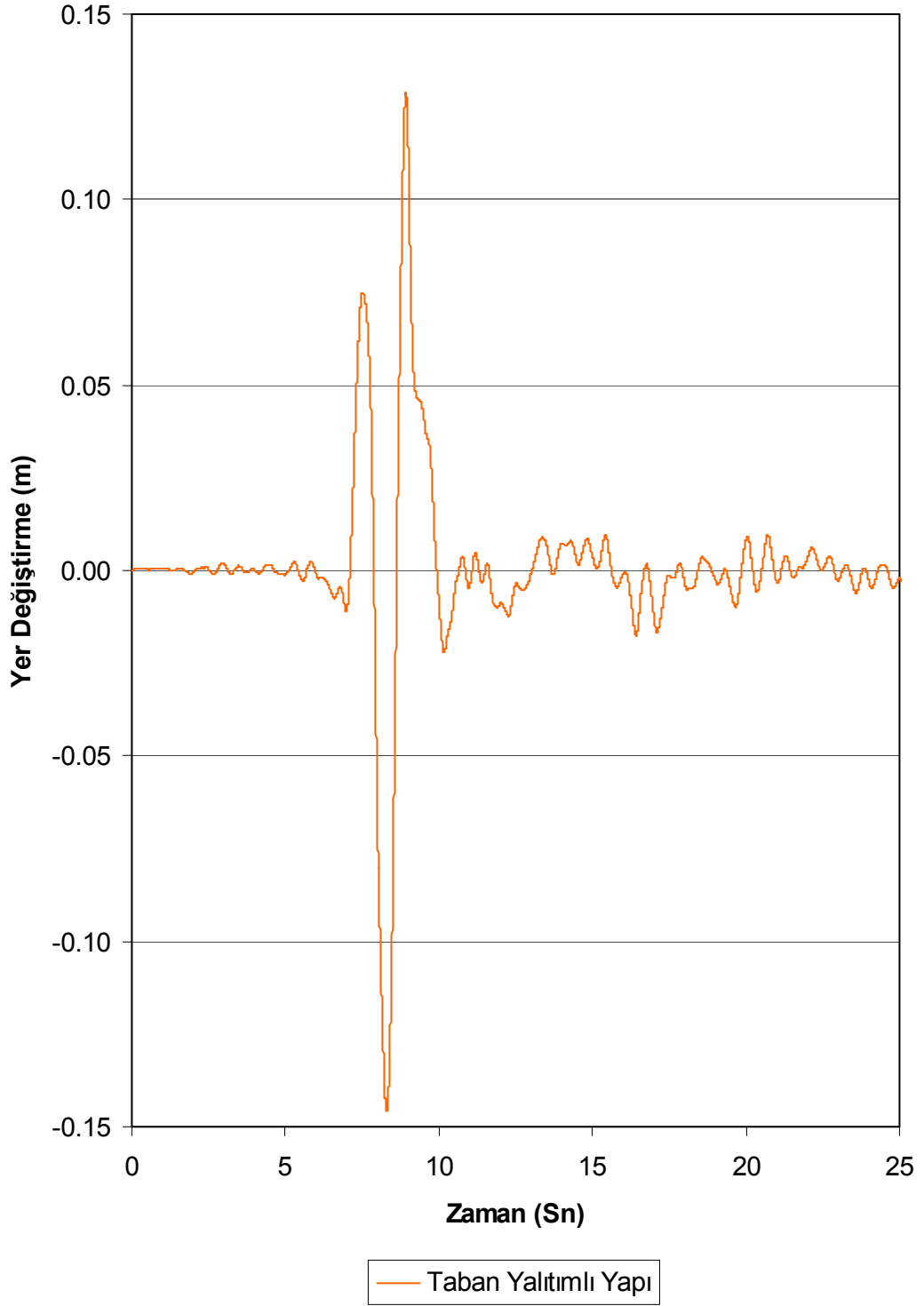
Şekil B.1.4: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği

### Taban Yalıtımlı Yapı



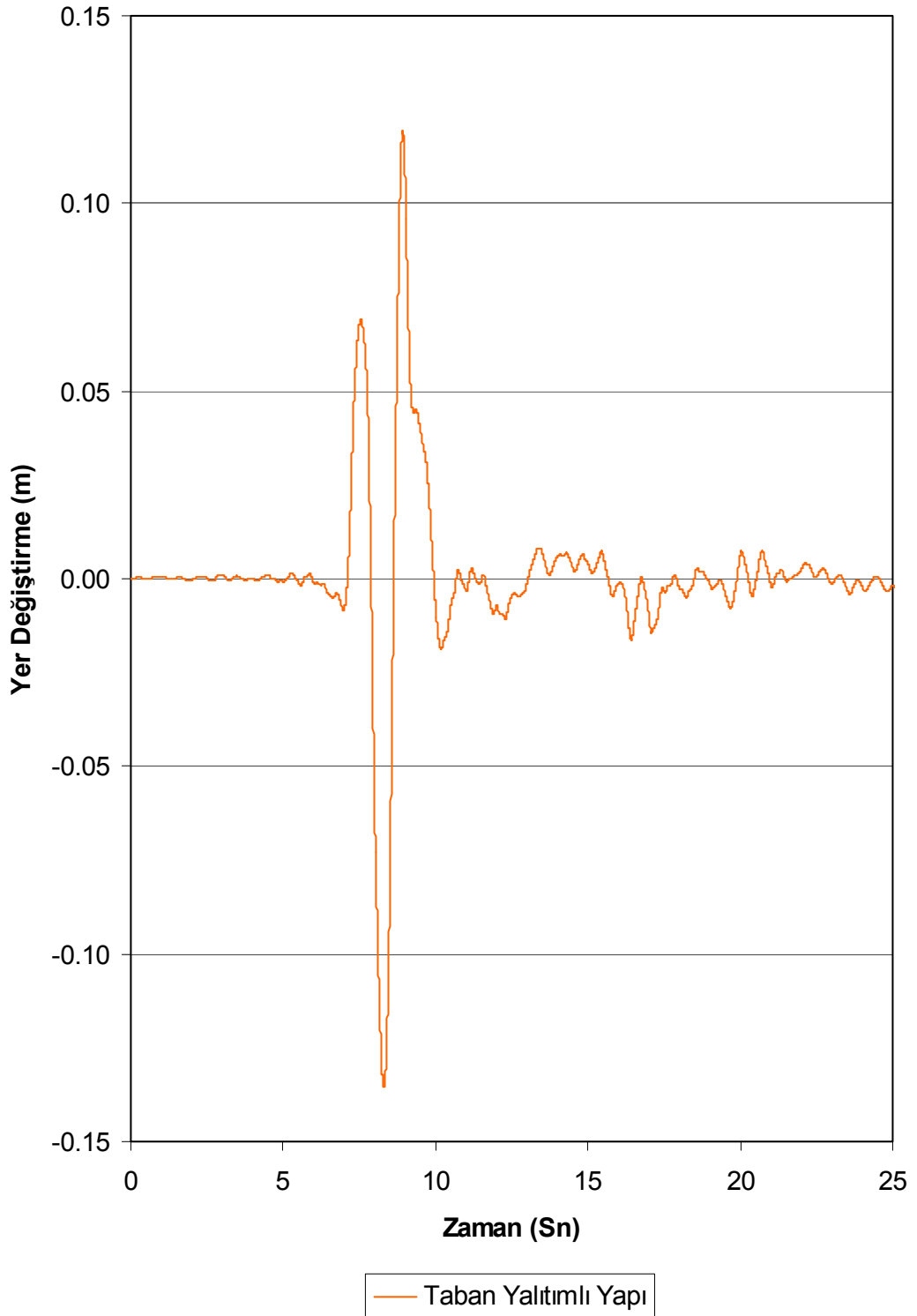
Şekil B.1.5: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu ikinci kat yer değiştirme grafiği

### Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.1.6: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu birinci kat yer değiştirme grafiği

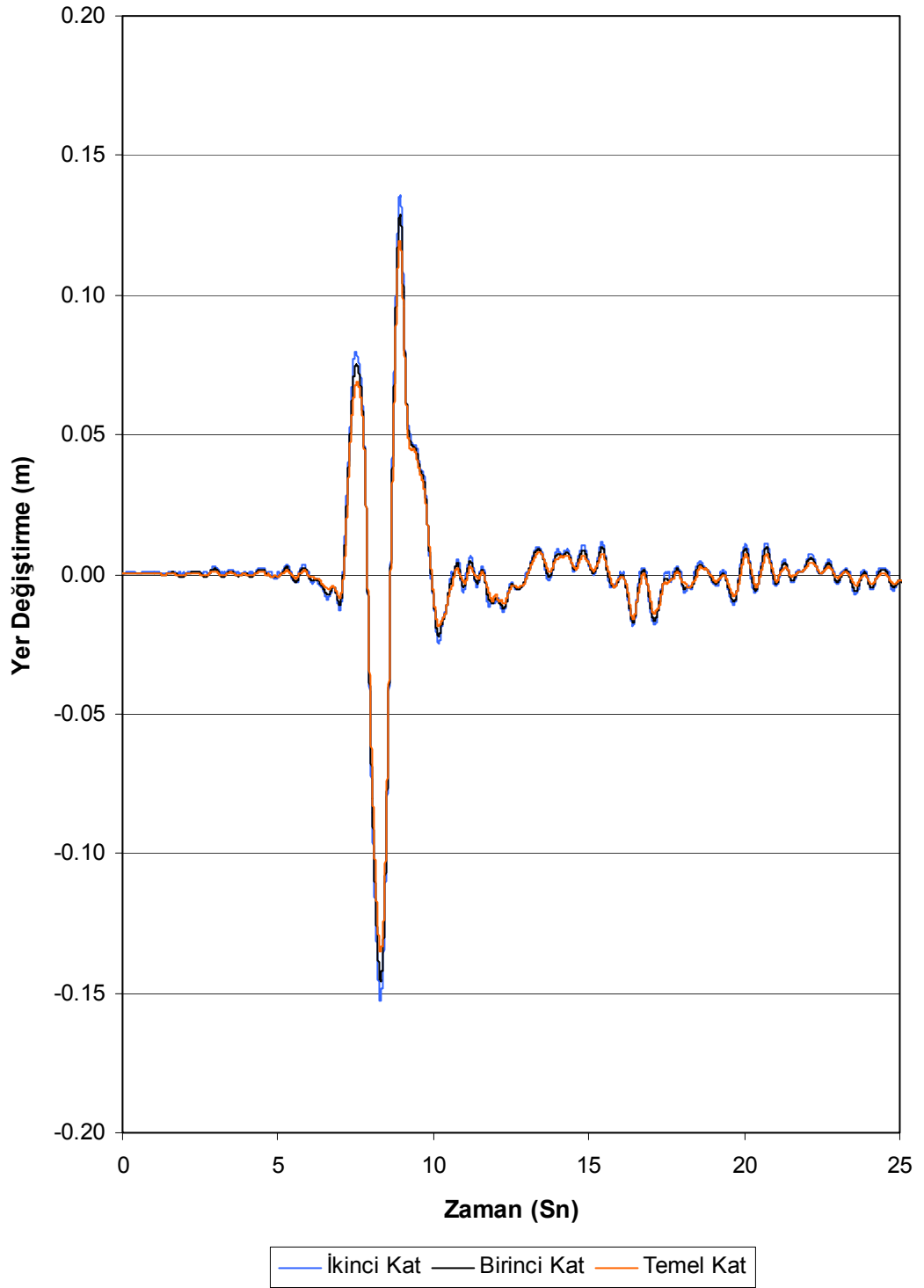
### Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.1.7: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu temel kat yer değiştirme grafiği



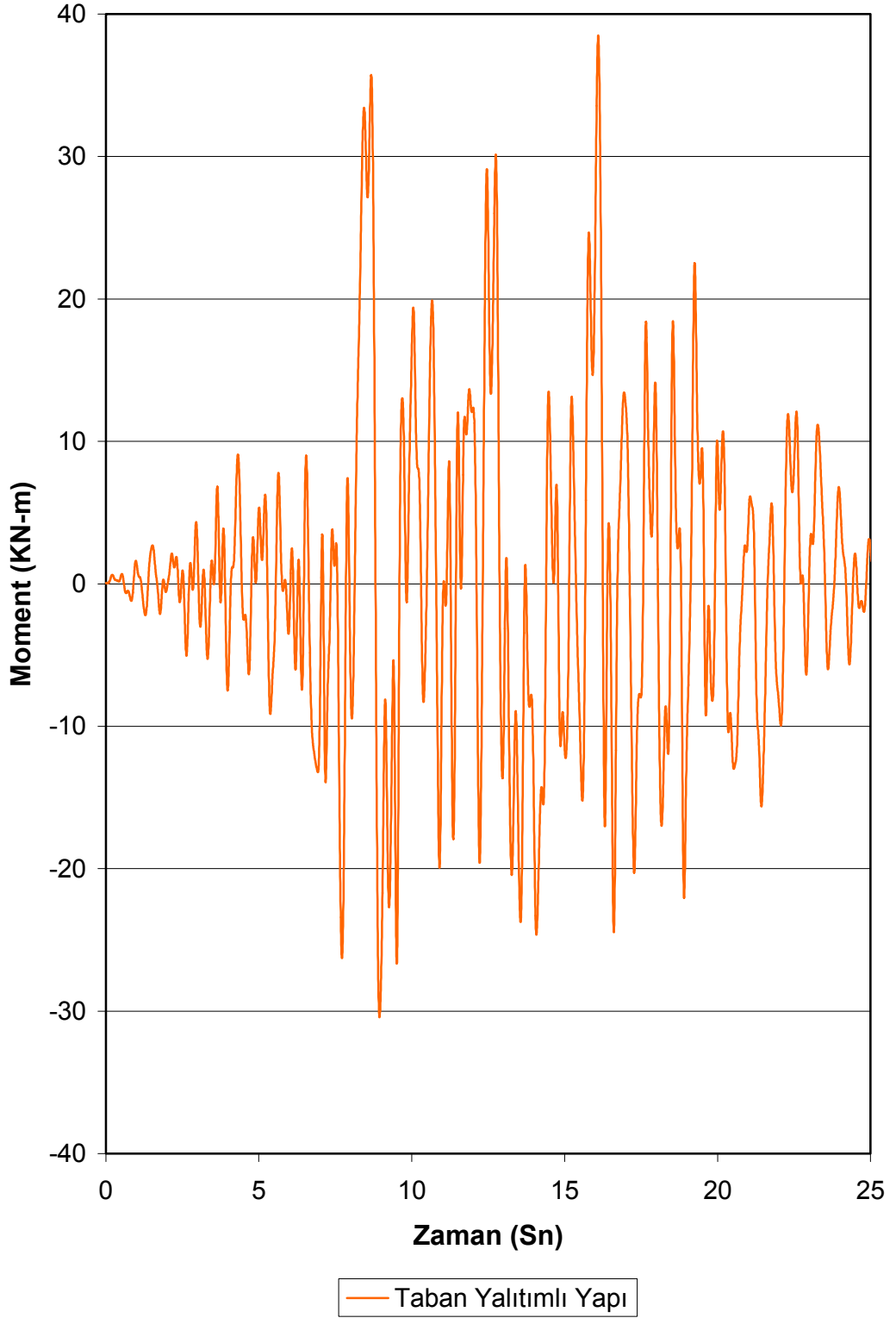
### Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.1.8: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu katlar arası yer değiştirme grafiği

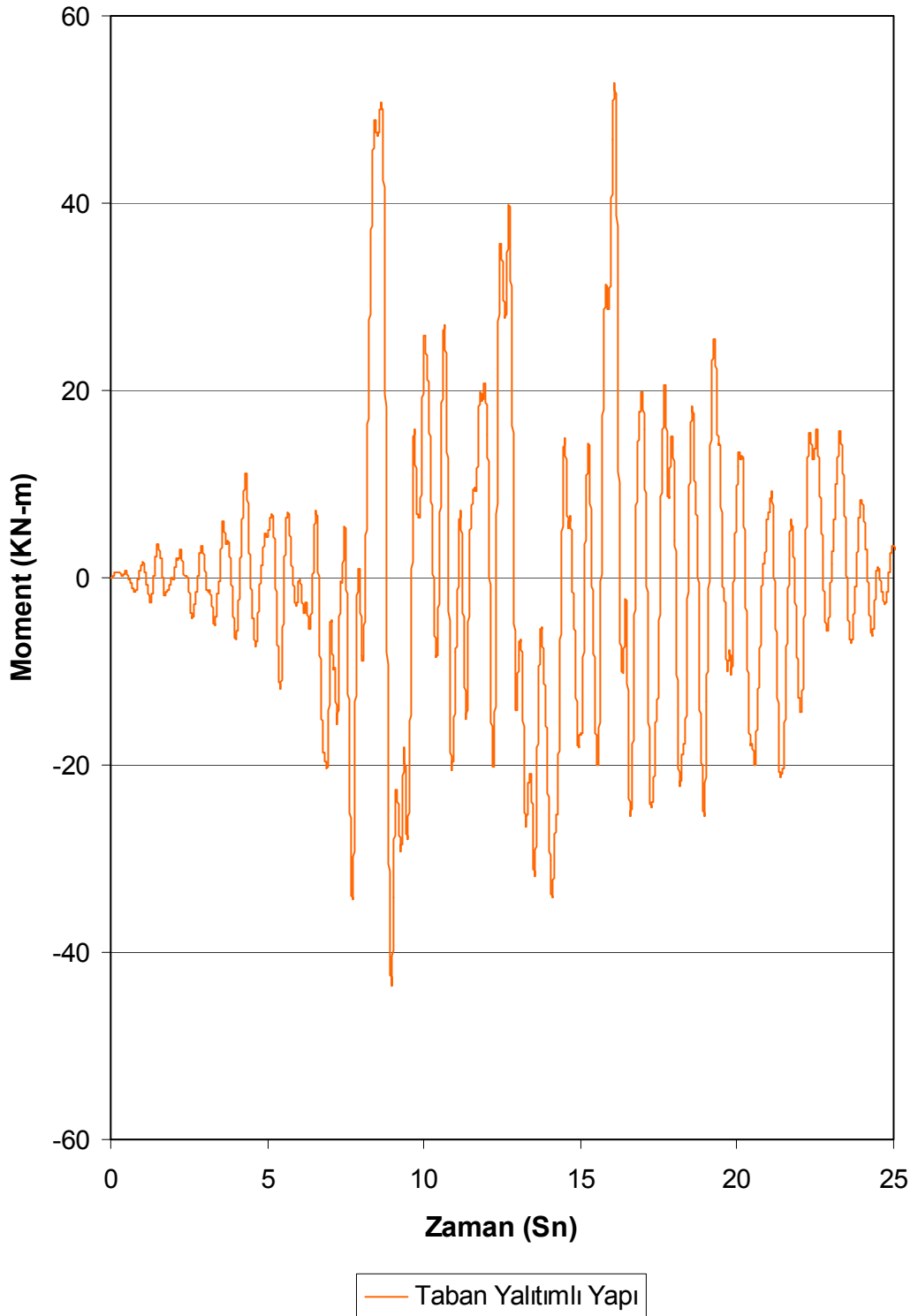
**EK-B.2 : TABAN YALITIMLI YAPI C1 KOLONU ÜST UÇ MOMENT  
DEĞİŞİM GRAFİKLERİ**

## Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.2.1: Taban yalıtımlı yapı ikinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3)

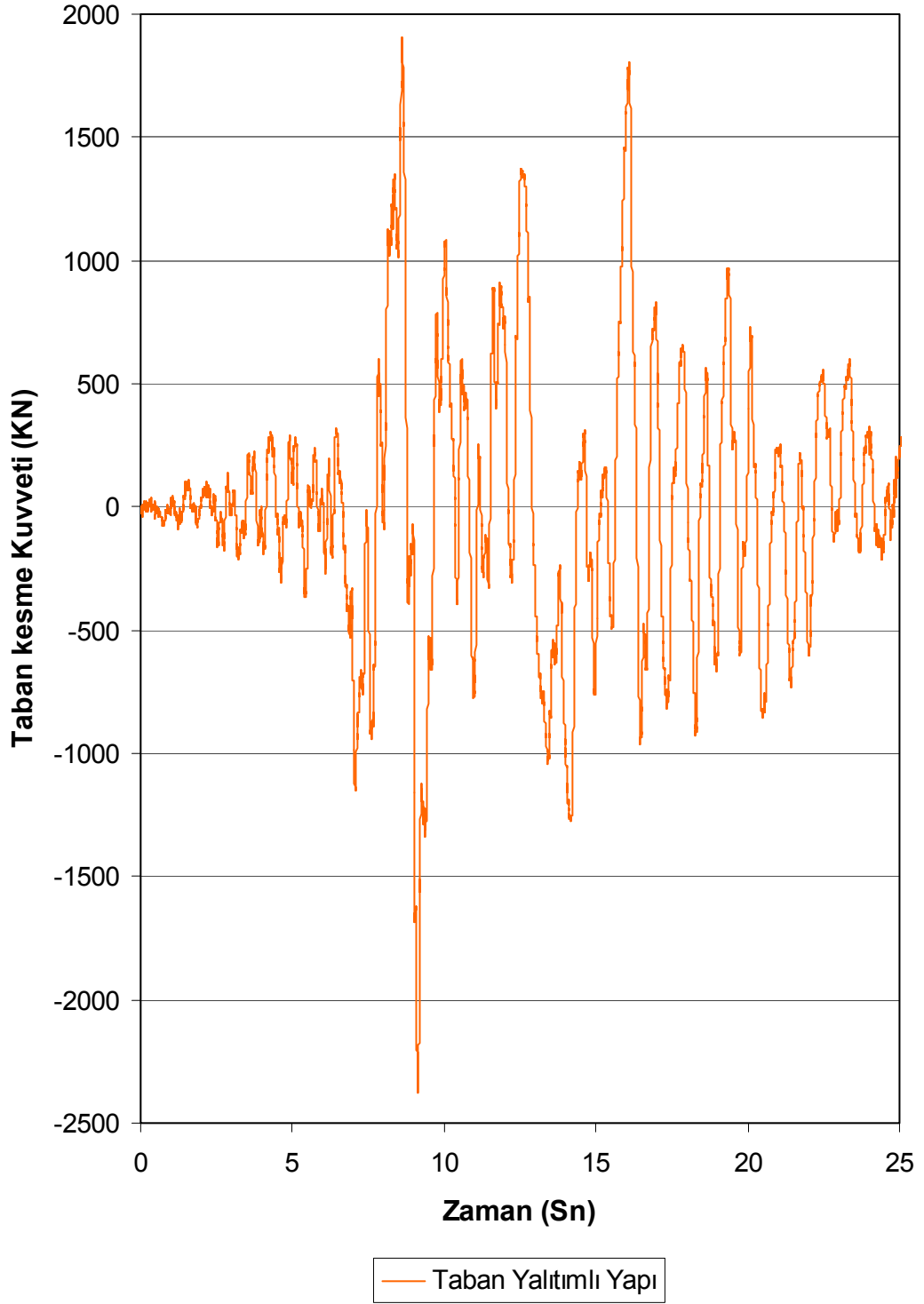
## Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.2.2: Taban yalıtımlı yapı birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3)

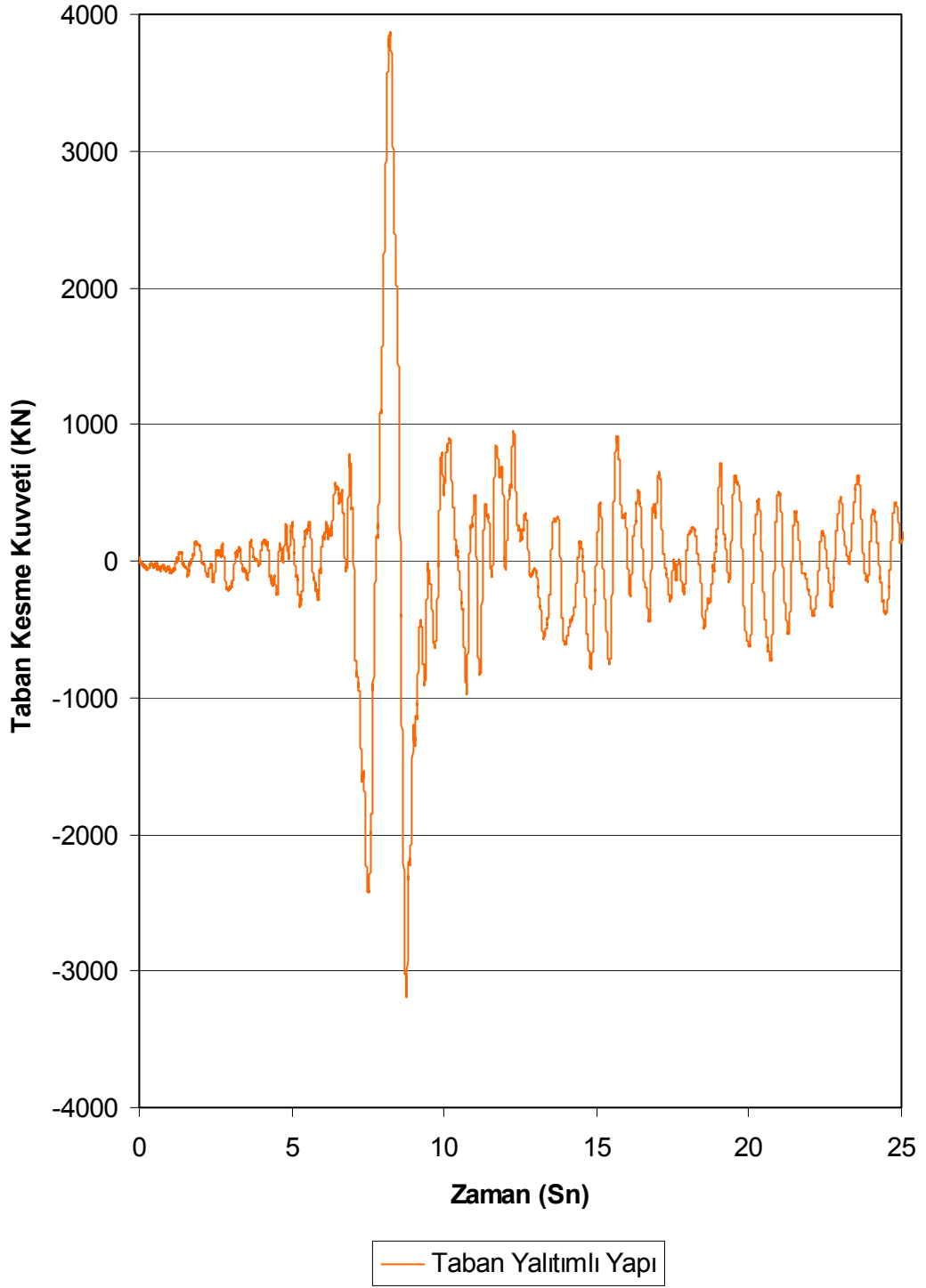
**EK-B.3 : TABAN YALITIMLI YAPI TABAN KESME KUVVETLERİ**

### Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.3.1: Taban yalıtımlı yapı x-x doğrultulu taban kesme kuvveti

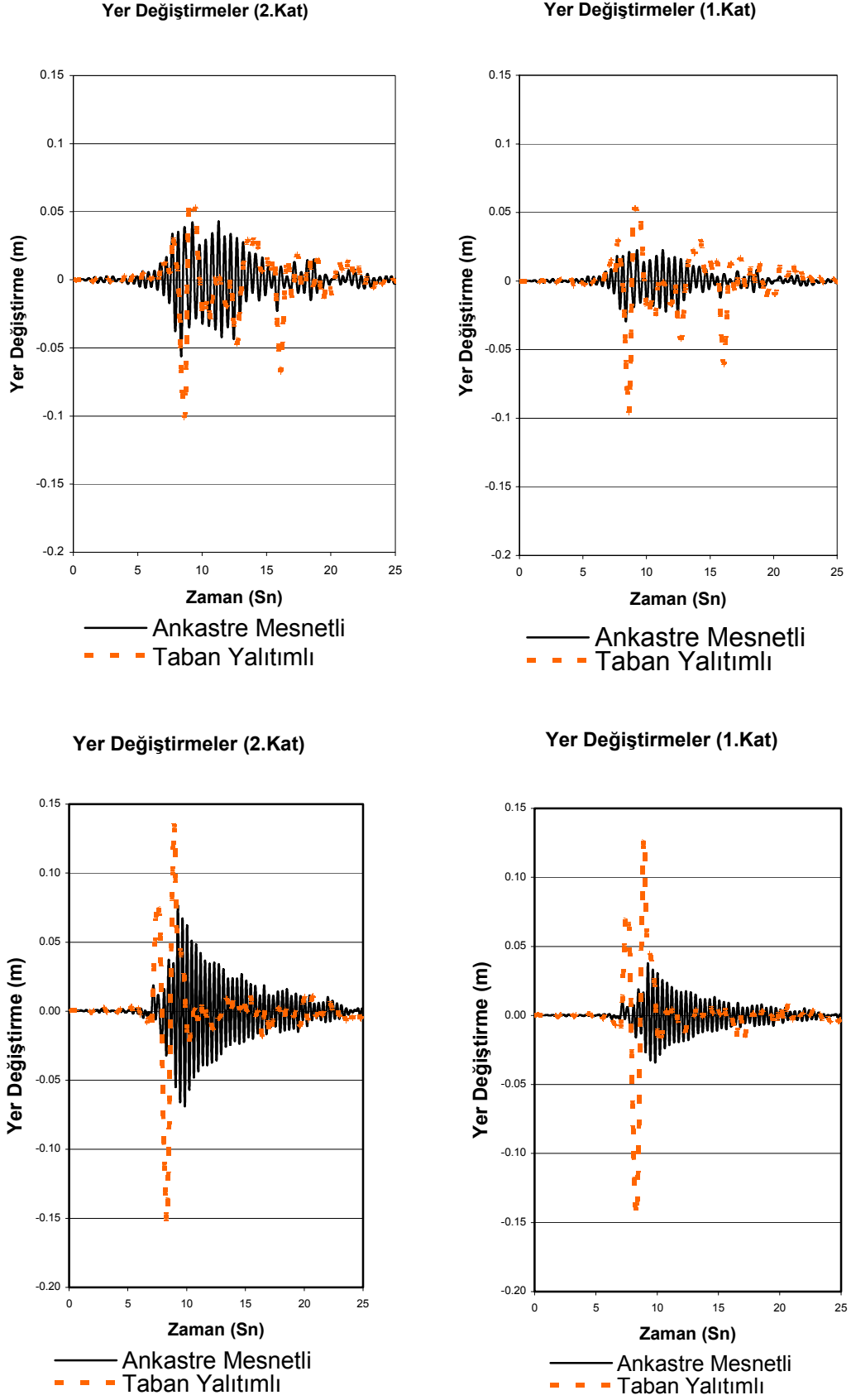
### Taban Yalıtımlı Yapı



Şekil B.3.2: Taban yalıtımlı yapı y-y doğrultulu taban kesme kuvveti

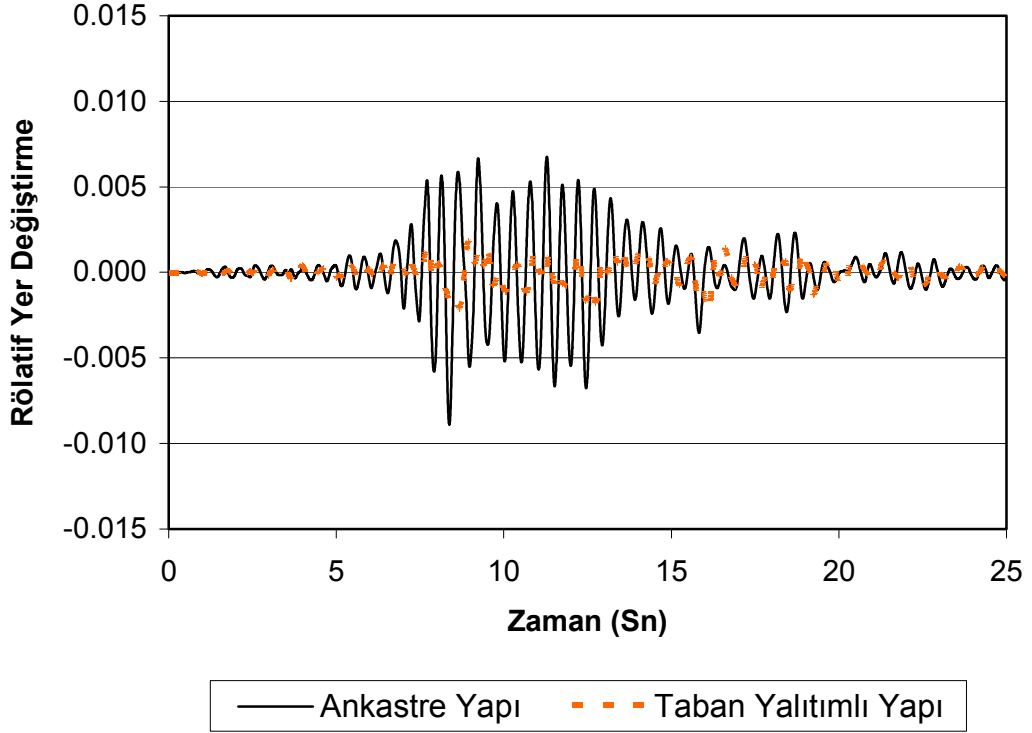
**EK-C.1 : KARŞILAŞTIRMALI KAT YER DEĞİŞTİRMELERİ VE  
KATLAR ARASI RÖLATİF YER DEĞİŞTİRME GRAFİKLERİ**



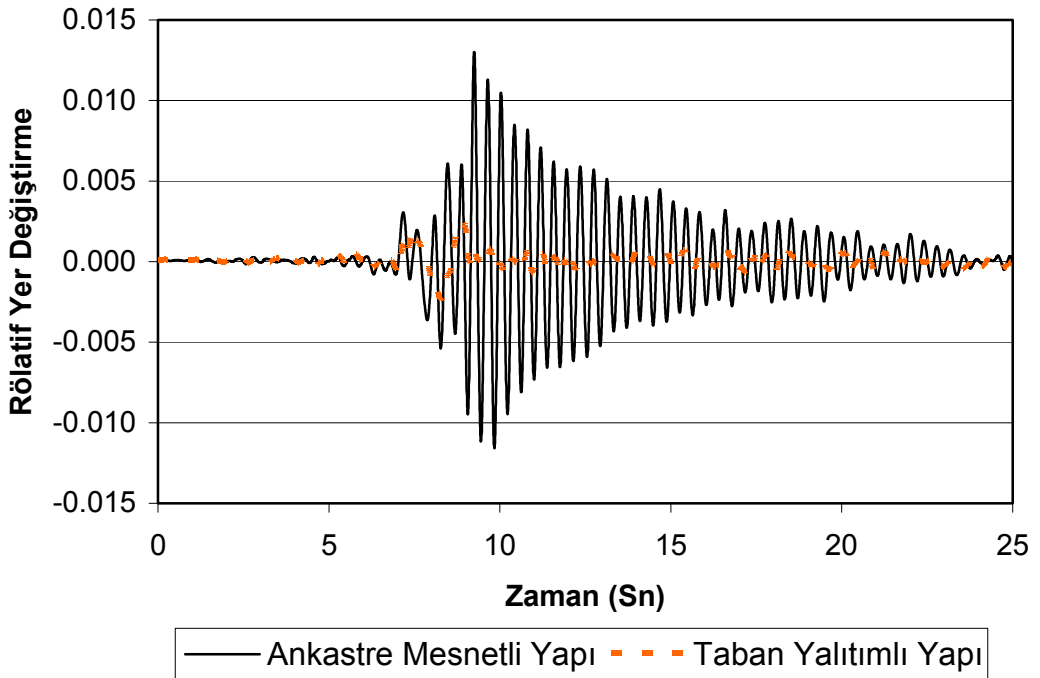


Şekil C.1.1: X-X ve Y-Y doğrultulu karşılaştırmalı ikinci ve birinci katlar arası yer değiştirmeler

**İkinci ve Birinci Katlar Arası Karşılaştırmalı Rölatif Yer Değişirme (X-X Doğrultulu)**



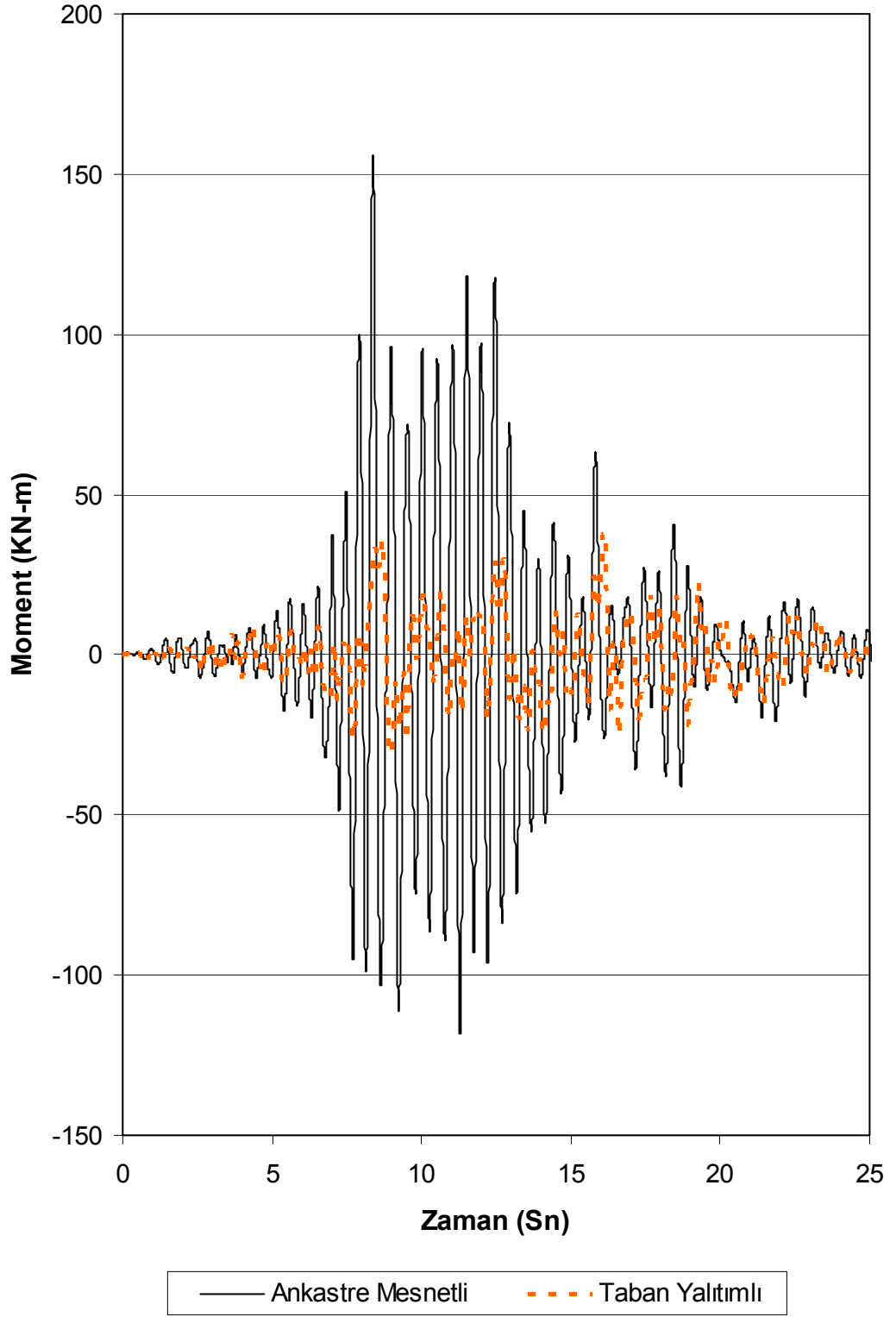
**İkinci ve Birinci Katlar Arası Karşılaştırmalı Rölatif Yer Değişirme (Y-Y Doğrultulu)**



**Şekil C.1.2:** X-X ve Y-Y doğrultulu karşılaştırmalı katlar arası rölatif kat yer değiştirmeleri

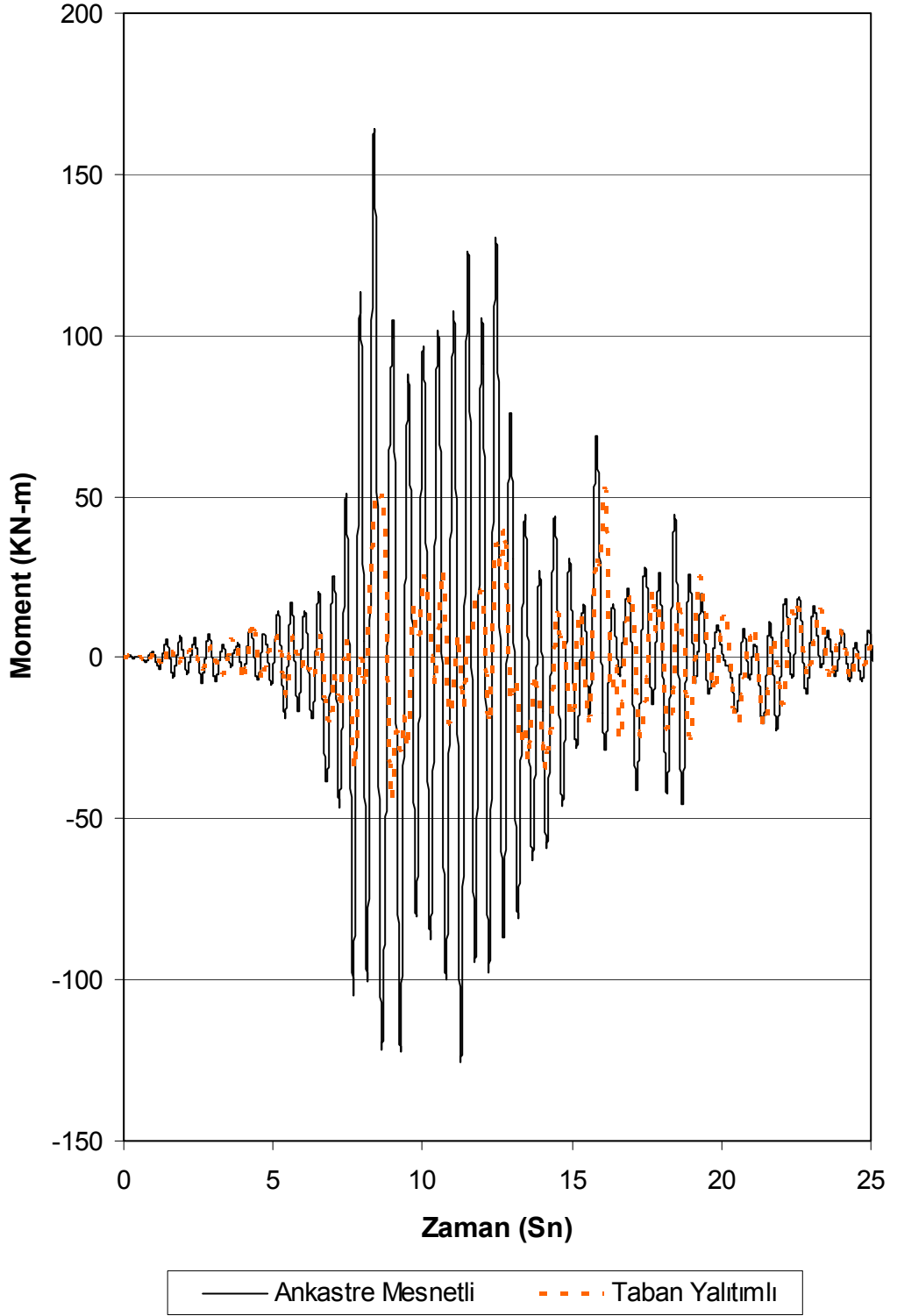
**EK-C.2 : KARŞILAŞTIRMALI ÜST UÇ VE BURULMA MOMENTİ  
GRAFİKLERİ**

## Üst Uç Momentleri (M3-3)



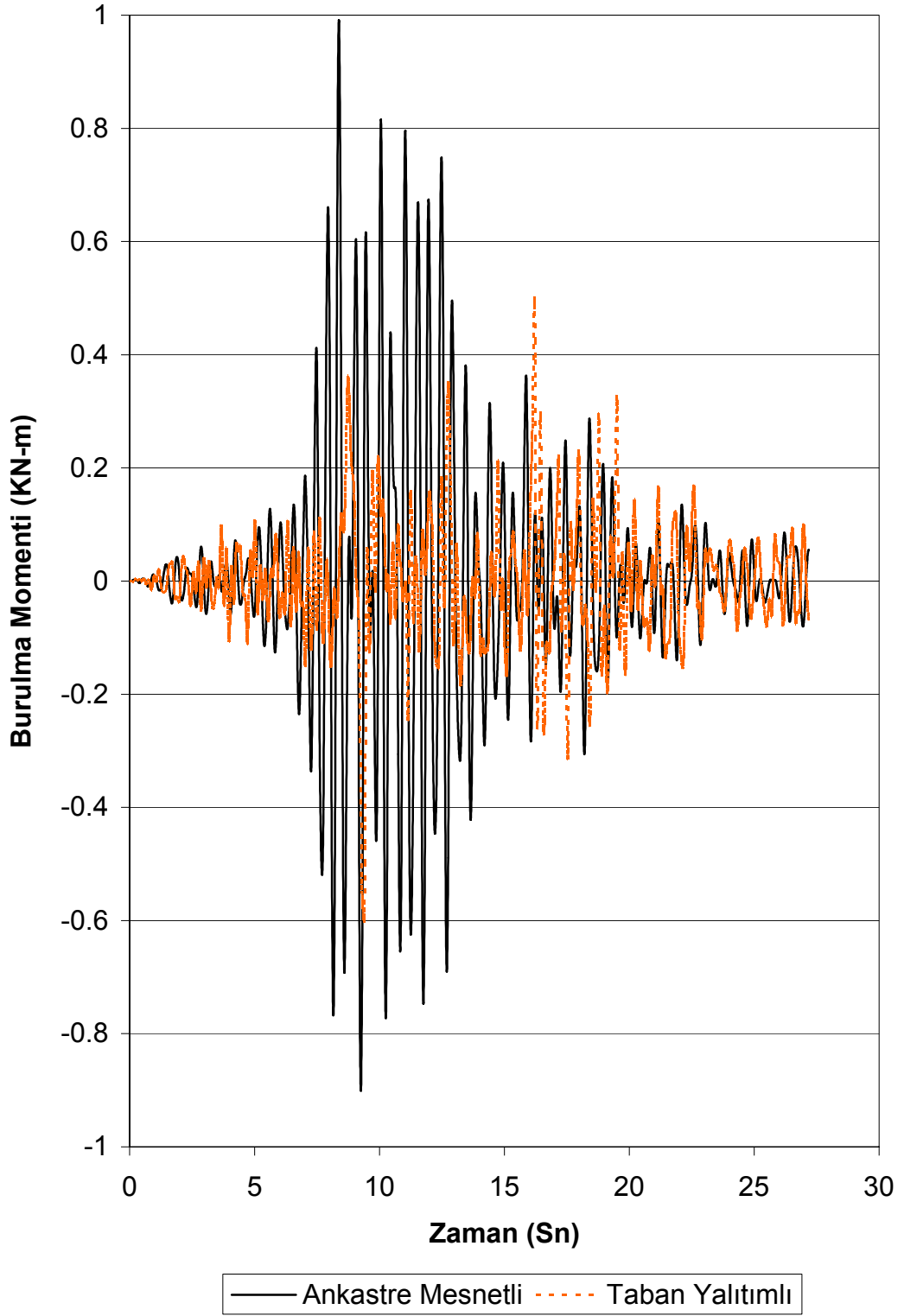
Şekil C.2.1: İkinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3) grafiği

### Üst Uç Momentler (M3-3)



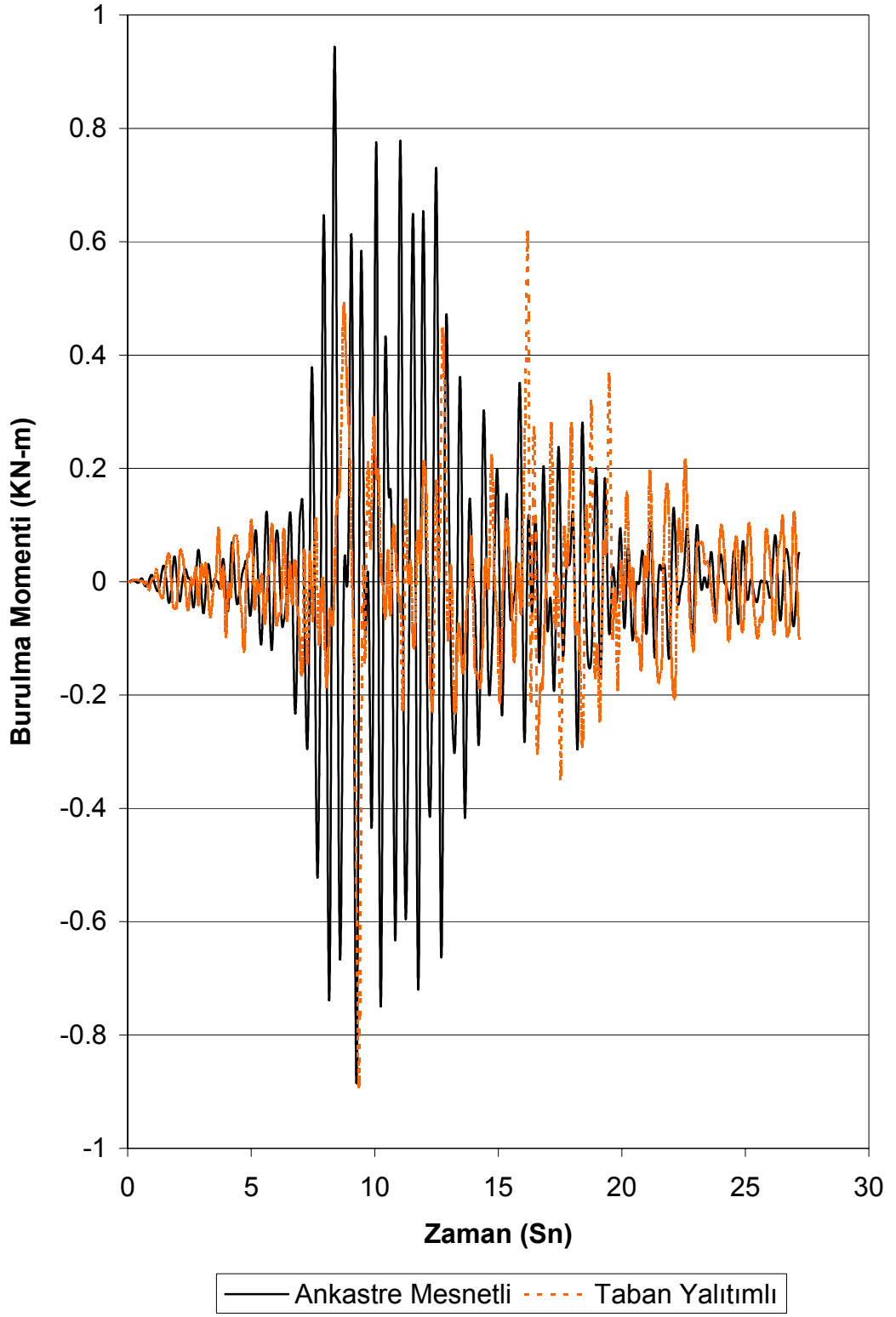
Şekil C.2.2: Birinci kat C1 kolonu üst uç momenti (M3-3) grafiği

### Burulma Momentleri (T)



Şekil C.2.3: İkinci kat C1 kolonu burulma momenti (T) grafiği

### Burulma Momentleri (T)

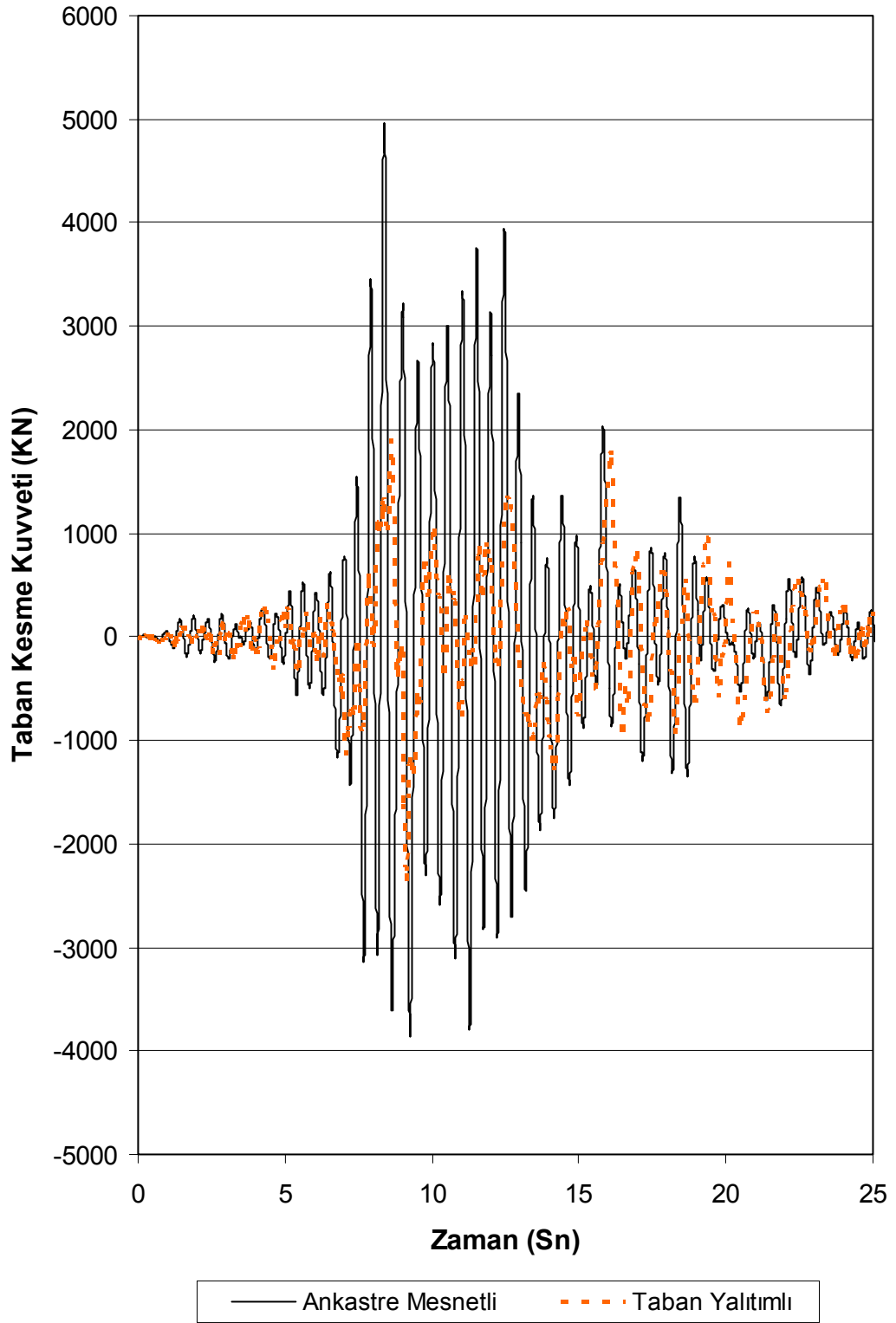


Şekil C.2.4: Birinci kat C1 kolonu burulma momenti (T) grafiği

### **EK-C.3 : KARŞILAŞTIRMALI TABAN KESME KUVVETİ GRAFİKLERİ**

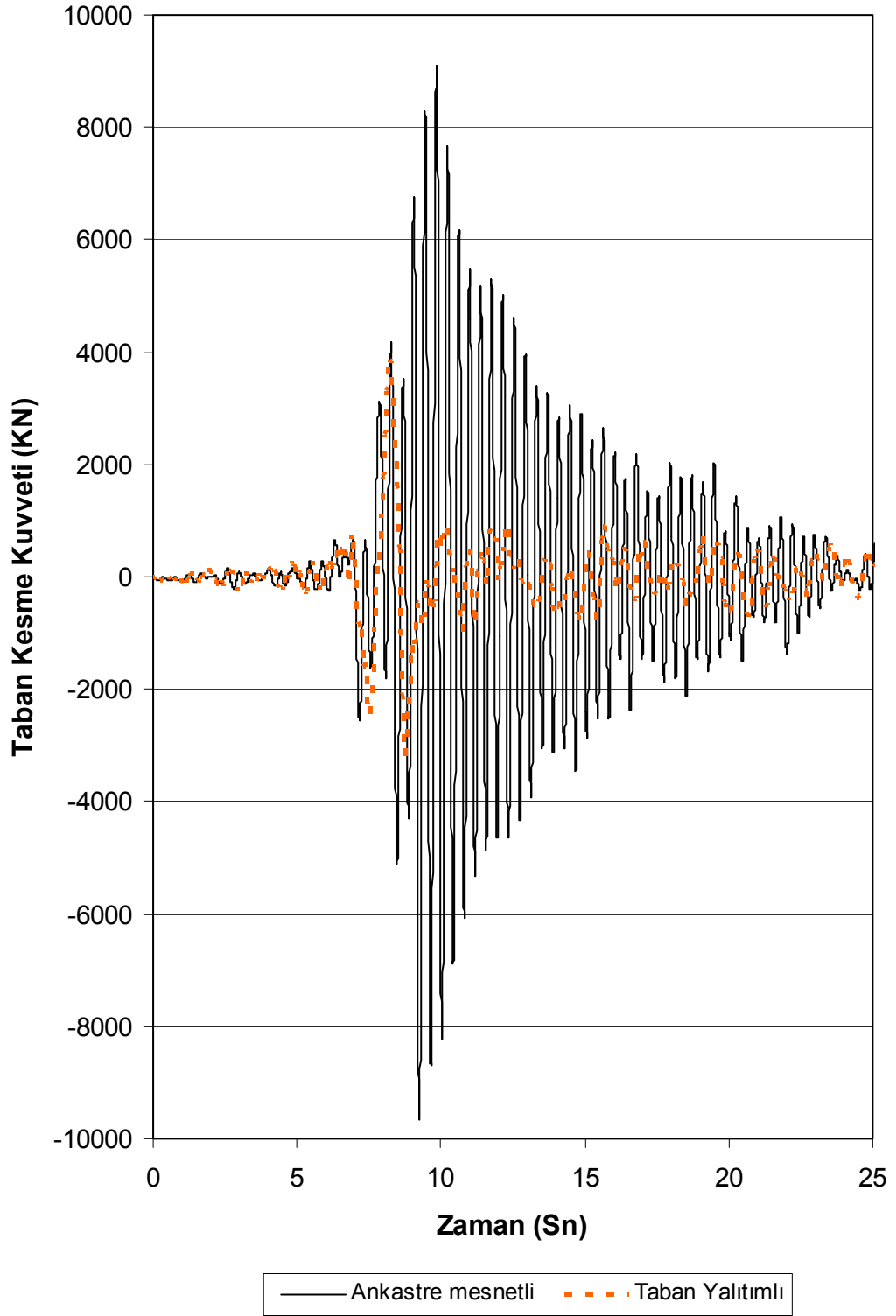


### Taban Kesme Kuvvetleri



Şekil C.3.1: X-X doğrultulu taban kesme kuvveti grafiği

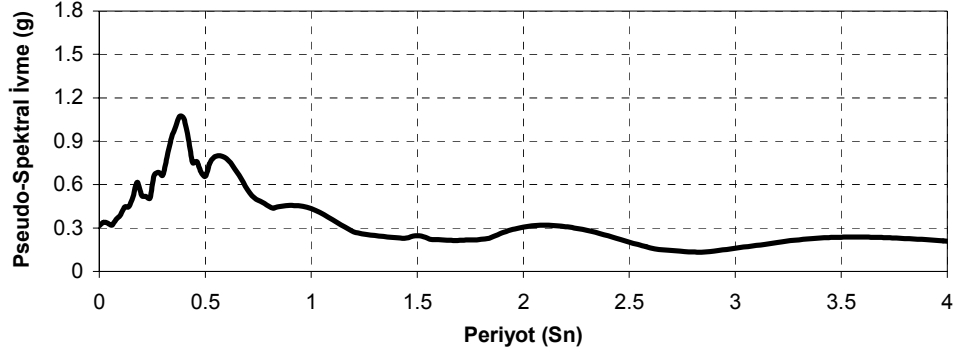
## Taban Kesme Kuvvetleri



Şekil C.3.2: Y-Y doğrultulu taban kesme kuvveti grafiği

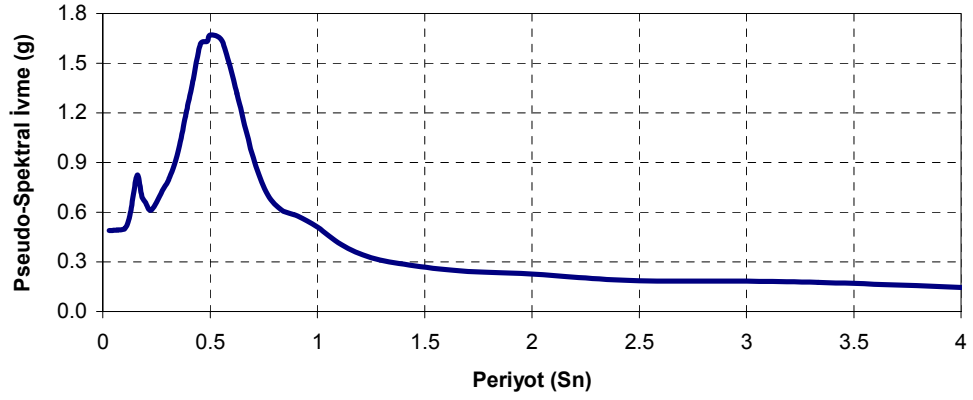
## **EK-D : KARŞILAŞTIRMALI PSEUDO-SPEKTRAL İVME GRAFİKLERİ**

Düzce Meteoroloji İstasyonu K-G Doğrultu Bileşeni Pseudo-Spektral İvme Eğrisi



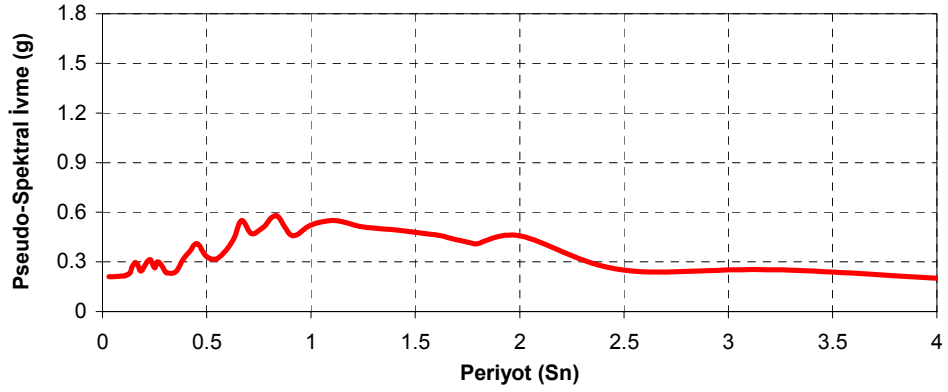
— Pseudo-Spektral İvme (%5 Sönüm)

Ankastre Mesnetli Yapı Pseudo-Spektral İvme Eğrisi



— Pseudo-Spektral İvme (%5 Sönüm)

Taban Yalıtımlı Yapı Pseudo-Spektral İvme Eğrisi



— Pseudo-Spektral İvme (%5 Sönüm)

Şekil D.1: Karşılaştırmalı pseudo-spektral ivme grafikleri

## **ÖZGEÇMİŞ**

Emre Murat 18.05.1980 yılında Sivas'ta doğdu. Lise öğrenimini Adana Şehit Temel Cingöz Lisesi'nde tamamladı. 1998–1999 döneminde Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve 2002 Haziran ayında bölümden mezun oldu. 2002–2003 döneminde İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Deprem Mühendisliği Anabilim dalı Yüksek Lisans programına kaydoldu.