

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAPRAZ YAY GRUPLARINI KULLANAN
YENİ BİR
SİSMİK YALITIM SİSTEMİ**



DOKTORA TEZİ

Varol KARAYEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

KASIM 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAPRAZ YAY GRUPLARINI KULLANAN
YENİ BİR
SİSMİK YALITIM SİSTEMİ**

DOKTORA TEZİ

**Varol KARAYEL
(501862020)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç.Dr.Ercan YÜKSEL

KASIM 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501862020 numaralı Doktora Öğrencisi Varol KARAYEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÇAPRAZ YAY GRUPLARINI KULLANAN YENİ BİR SİSMİK YALITIM SİSTEMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zekai CELEP**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ünal ALDEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hilmi LUŞ
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : 01 Eylül 2016
Savunma Tarihi : 15 Kasım 2016





Annem merhume Nurhayat Karayel'in anısına

ve aileme.



ÖNSÖZ

Yaklaşık 20 yıl sonra üniversiteme geri dönerek yürüttüğüm bu tez çalışmasının her aşamasında beni destekleyip motivasyonumu artıran çok değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tez danışmanım Doç.Dr.ErcanYüksel'e gösterdiği ilgi ve destek için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince yaptıkları değerli öneri ve eleştiriler ile yol gösterici tutumları için Prof.Dr.Zekai Celep ve Doç.Dr.Cenk Alhan'a şükranlarımı sunarım.

Çapraz yay gruplarını kullanan yeni bir sismik yalıtım sisteminin geliştirildiği bu tez çalışması, 36997 numaralı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü BAP projesinin sağladığı imkanlar ile İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiş olup, bu kuruluşlara vermiş oldukları destekten ötürü teşekkür ederim.

Çalışmanın deneysel bölümündeki dinamik deneylerin gerçekleştirildiği, ARI-I sarsma masasının, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'na kazandırılması için maddi yardımlarını esirgemeyen çoğu İTÜ İnşaat Fakültesi mezunu sevgili meslektaşlarıma ve katkı sağlayıcı diğer tüzel kişilere, ülkemiz biliminin ilerlemesine doğrudan destek anlamını taşıyan bu değerli bağışları için teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Laboratuvar deneylerinin her aşamasında özverili yardımlarını esirgemeyen, İnş.Yük.Müh Tansu Gökçe'ye de teşekkür eder, kendi çalışmalarında da başarılar dilerim. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarından başta İnş. Yük. Müh. M. Fatih Şahin olmak üzere, İnş.Yük.Müh. Hakan Saruhan ve diğer teknik personele vermiş oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Tez kapsamındaki deney numunelerinin imalat resimlerinin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen, 25 yılı aşkın bir süredir beraber çalıştığım, Gazanfer Arıkan'a da teşekkürlerimi sunarım. Deney numunelerini atölyelerinde imal ederek, laboratuvardaki montaj safhalarında da özverili yardımları dolayısıyla, tüm Koçyiğit Metal çalışanlarına Durmuş Koçyiğit nezdinde teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca verdiği sınırsız destek ve anlayış için değerli eşim Hülya Karayel'e de teşekkür ederim.

01 Eylül 2016

Varol Karayel



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY... ..	xxv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Sismik Yalıtım Sistemleri Konusunda Önceki Çalışmalar	2
1.3 Önerilen Sismik Yalıtım Sistemi, Dayanağı ve Hedefleri	14
1.4 Özgün Değer ve Motivasyon.....	15
1.5 Tezin Genel Yapısı	15
2. DOĞRUSAL YAYLAR, YAY KUTUSU VE SİSMİK YALITIM KATI	17
2.1 Giriş	17
2.2 Doğrusal Yaylar	17
2.2.1 Doğrusal yay eksenel rijitliğinin tayini	17
2.2.2 Doğrusal yay deneyleri	18
2.3 Yay Kutusu.....	22
2.3.1 Yay kutusunun geliştirilmesi	23
2.3.2 Eksenel ve yatay rijitliklerin tayini	23
2.3.3 Yay kutusu deneyleri	24
2.4 Sismik Yalıtım Katı.....	26
2.4.1 Teorik I. ve II. mertebe yatay rijitliklerin tayini	26
2.4.2 Geometrik uygunluk ilişkileri	27
2.4.3 Bağımsız sismik yalıtım katının statik deneyleri	29
2.4.4 Deney sonuçlarının analitik olarak doğrulanması.....	33
2.5 Değerlendirme ve Yorumlar.....	35
3. SİSMİK YALITIMLI VE ANKASTRE MESNETLİ NUMUNELERE AİT SARSMA MASASI DENEYLERİ VE KARŞILAŞTIRMALAR	37
3.1 Giriş.....	37
3.2 Sarsma Masası Özellikleri.....	37
3.3 Sarsma Masası Deney Programı	38
3.3.1 Deney numunelerinin üretimi	38
3.3.2 Deney numunelerinin geometrik özellikleri ve malzeme bilgileri.....	39
3.3.3 Deney numunelerine ait ölçüm düzenekleri.....	43
3.4 Deprem Kayıtlarının Seçimi.....	45
3.5 Sarsma Masası Deneyleri	47
3.6 Serbest Titreşim Karakteristikleri	48
3.6.1 Ankastre mesnetli deney numunesi.....	48
3.6.2 Sismik yalıtımlı deney numunesi	49

3.7 Sismik Yalıtımlı Numuneye Ait İlk Değerlendirmeler	52
3.8 Sismik Yalıtımlı ve Ankastre Mesnetli Numune Sonuçlarının Karşılaştırılması	55
3.8.1 Tepe katı ile sarsma masası ivmelerinin karşılaştırılması	56
3.8.2 Tepe katı ile sarsma masası yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	57
3.8.3 Zemin kat kolonları eksenel şekildeğiştirme değerlerinin karşılaştırılması	58
3.8.4 Zemin kat kesme kuvvetlerinin tayini ve karşılaştırmaları	60
3.8.5 Bazı büyüklüklerin en büyük değerlerinin karşılaştırılması	63
3.9 Sönüm Değerlerinin Tayini	64
3.9.1 Ankastre mesnetli sistemin sönümü	64
3.9.2 Sismik yalıtımlı sistemde sürtünme kaynaklı eşdeğer sönüm	65
3.9.2.1 Enerji denge denklemi ile eşdeğer sönümün tayini	65
3.9.2.2 Dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile eşdeğer viskoz sönümün tayini	67
3.9.2.3 Yarı bant genişliği yöntemi ile eşdeğer viskoz sönümün tayini	70
3.10 Sismik Yalıtımlı Sistemde Etkin Yatay Rijitlikler	70
3.11 Kuramsal Hesaplar ve Deneyler ile Karşılaştırmalar	71
3.11.1 Hesap Modelleri	71
3.11.2 Serbest titreşim karakteristikleri	72
3.11.3 Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli sistemler için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	73
3.11.3.1 Sismik yalıtım katı yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	74
3.11.3.2 Sismik yalıtım katı ivmelerinin karşılaştırılması	75
3.11.3.3 Sismik yalıtımlı sistemde zemin kat kesme kuvvetleri karşılaştırması	76
3.11.3.4 Ankastre mesnetli sistemde tepe yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması	77
3.11.3.5 Ankastre mesnetli sistemde tepe katı ivmelerinin karşılaştırılması	78
3.11.3.6 Ankastre mesnetli sistemde zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları	79
3.11.4 Kuramsal hesaplar ile enerji dengesi	79
3.11.4.1 Sismik yalıtımlı sistemin kuramsal hesabına ait enerji dengesi	79
3.11.4.2 Ankastre mesnetli sistemin kuramsal hesabına ait enerji dengesi	80
3.12 Sismik Yalıtımlı Numune İçin Sonuçların Farklı Yazılımlar ile Kontrol Edilmesi	81
3.12.1 Tek serbestlik dereceli kütle-yay modelinin zaman tanım alanında analizi	81
3.12.2 Farklı üç yazılım ile yerdeğiştirme, hız ve ivme karşılaştırmaları	83
3.13 Değerlendirme ve Yorumlar	85
4. KÜRESEL MAFSALLI SİSMİK YALITIM SİSTEMİNE AİT DAVRANIşIN İRDELENMESİ	87
4.1 Giriş	87
4.2 Deney Numunesinin Üretimi	87
4.2.1 Deney numunesinin geometrik özellikleri ve malzeme bilgileri	89
4.2.2 Deney Düzenegi	91
4.3 Deprem Kayıtları	93
4.4 Serbest Titreşim Karakteristikleri	93
4.5 Sarsma Masası Deneyleri	94
4.6 Sarsma Masası Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	94
4.6.1 Sarsma masası ile tepe katı ivmelerinin karşılaştırılması	94

4.6.2 Yalıtım katı görelî yerdeğîştîrmeleri.....	95
4.7 Küresel Mafsallardaki Sûrtünmeden Kaynaklanan Eşdeğîr Sönümün Tayini	97
4.7.1 Enerjî dengesi ile eşdeğîr viskoz sönümün tayin edilmesi.....	97
4.7.2 Dinamik kuvvet-yerdeğîştirme ilişkisi ile eşdeğîr sönümün tayin edilmesi	100
4.7.3 Yarı bant genişliğı yöntemi ile eşdeğîr sönümün tayin edilmesi	102
4.8 Sismik Yalıtım Sisteminin Merkeze Gelme Kabiliyeti.....	102
4.9 Kuramsal Hesaplar ve Deneyler ile Karşılaştîrmalar	104
4.9.1 Hesap modeli.....	104
4.9.2 Serbest titreşim karakteristikleri	105
4.9.3 Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştîrılması.....	106
4.9.3.1 Yalıtım katı yerdeğîştirme geçmişlerinin karşılaştîrılması	106
4.9.3.2 Yalıtım katı ivme geçmişlerinin karşılaştîrılması	107
4.10 Kuramsal Hesaplara Ait Enerjî Dengesi	108
4.11 Bağımsız Yalıtım Katının Statik Deneyleri	110
4.11.1 Deney düzeneğı ve gerçekleştirilen deneyler.....	110
4.11.1.1 Çapraz yay kutusu bulunmayan yalıtım katına ait kuvvet-yerdeğîştirme eğrileri	112
4.11.1.2 Çapraz yay kutuları bulunan yalıtım katına ait kuvvet-yerdeğîştirme eğrileri	113
4.11.2 Statik deneylerden elde edilen sönüm değîrleri	115
4.11.3 Deneyler sırasında ortaya çıkan sûrtünme katsayıları.....	116
4.11.4 Yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğîştirme ilişkisi ile sönümün tayini	118
4.12 Değîrlendirme ve Yorumlar.....	119
5. GELİŞTİRİLEN SİSMİK YALITIM SİSTEMİNİN BEŞ KATLI BETONARME BİR BİNAYA KURAMSAL OLARAK UYGULANMASI	121
5.1 Giriş.....	121
5.2 Malzeme Bilgileri.....	121
5.3 Ankastre Mesnetli ve Sismik Yalıtımlı Binaların Taşıyıcı Sistem Özellikleri	121
5.3.1 Ankastre mesnetli binanın taşıyıcı sistem özellikleri.....	121
5.3.2 Sismik yalıtımlı binanın taşıyıcı sistem özellikleri	123
5.4 Hesap Modelleri	126
5.5 Serbest Titreşim Özellikleri	128
5.5.1 Ankastre mesnetli binanın serbest titreşim özellikleri	128
5.5.2 Sismik yalıtımlı binanın serbest titreşim özellikleri	129
5.6 Kullanılan Deprem Kayıtları	130
5.7 Sismik Yalıtımlı Binanın EC8 (2004) ve FEMA 450 (2003)'de Yer Alan Bazı Temel Kriterlere Göre İrdelenmesi	130
5.7.1 Tasarım yerdeğîştirme isteminin tayini.....	130
5.7.2 Sismik yalıtım katı için merkeze gelme kontrolü	132
5.7.3 Analiz yönteminin tayin edilmesi	132
5.8 Sismik Yalıtımlı Bina ile Ankastre Mesnetli Bina Karşılaştîrmaları	133
5.8.1 Tepe yerdeğîştîrmelerinin karşılaştîrılması.....	133
5.8.2 Mutlak kat ivmelerinin karşılaştîrılması	134
5.8.3 Zemin kat kesme kuvvetlerinin karşılaştîrılması	137
5.9 Sismik Yalıtım Katı Ana Elemanlarına ait Kapasite Kontrolleri.....	139
5.10 Sismik Yalıtımlı Binanın Seçilmiş Deprem kayıtları İçin Yerdeğîştirme İstemlerinin Hesaplanması	139

5.10.1 Seçilen deprem kayıtları.....	139
5.10.2 Zaman tanım alanındaki analizler ve elde edilenler.....	142
5.11 Sismik Yalıtımlı Bina İçin Kırılabilirlik Eğrileri	143
5.12 Değerlendirme ve Yorumlar.....	144
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	147
6.1 Sonuçlar.....	147
6.2 Öneriler.....	151
KAYNAKLAR.....	153
EKLER.....	159
ÖZGEÇMİŞ.....	171



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
EC	: Avrupa Yönetmeliği (Eurocode)
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transformation)
HDRB	: Yüksek Sönümlü Kauçuk Mesnet (High Damping Rubber Bearing)
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
LDRB	: Düşük Sönümlü Kauçuk Mesnet (Low Damping Rubber Bearing)
LRB	: Kurşun Çekirdekli Kauçuk Mesnet (Lead Core Rubber Bearing)
MTS	: Malzeme Deney Sistemleri (Material Testing Systems)
NTHA	: Zaman Tanım Alanında Doğrusal Olmayan Analiz (Non-linear Time History Analysis)
PEER	: Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pasific Earthquake Engineering Research Center)
PSD	: Güç Spektrumu Yoğunluğu (Power Spectrum Density)
PGA	: Etkin Yer İvmesi (Peak Ground Acceleration)
PGV	: Etkin Yer Hızı (Peak Ground Velocity)
RC	: Betonarme (Reinforced Concrete)
STEELab	: Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı (Structural and Earthquake Engineering Laboratory)
TDY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (Turkish Earthquake Code)



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Deneysel ve analitik yay rijitlikleri.	20
Çizelge 2.2 : Deneysel ve analitik olarak hesaplanan yatay rijitlikler.....	33
Çizelge 2.3 : Sismik yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.	33
Çizelge 2.4 : N=30.0 kN düşey seviyesi için yay kutusu kuvvetleri.	34
Çizelge 3.1 : Çeşitli büyüklüklere ait ölçek katsayıları.	42
Çizelge 3.2 : Kullanılan deprem kayıtları.....	45
Çizelge 3.3 : Ankastre mesnetli numune için FFT analizlerinden elde edilen frekanslar (Hz).....	49
Çizelge 3.4 : Sismik yalıtımlı numune için FFT analizlerinden elde edilen frekanslar.	51
Çizelge 3.5 : Kaydedilen en büyük ivmeler.....	54
Çizelge 3.6 : İvme oranları.	54
Çizelge 3.7 : Katlar arası görelı ivmeler.	55
Çizelge 3.8 : Yalıtım katında gerçekteşen en büyük görelı yerdeğiştirmeler ve öteleme oranları.....	55
Çizelge 3.9 : Ankastre numune için zemin kat kolonları eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri.....	60
Çizelge 3.10 : Sismik yalıtımlı numune için zemin kat kolonları eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri.....	60
Çizelge 3.11 : Ankastre mesnetli numune için zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları.	61
Çizelge 3.12 : Sismik yalıtımlı numune için zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları.	61
Çizelge 3.13 : Sismik yalıtımlı numune taban kesme kuvveti istemleri.....	62
Çizelge 3.14 : Sismik yalıtımlı numune etkin yatay rijitlikleri.	66
Çizelge 3.15 : Sismik yalıtımlı sistem için zemin kat kesme kuvvetleri.	77
Çizelge 3.16 : Ankastre mesnetli sistem için zemin kat kesme kuvvetleri.....	79
Çizelge 4.1 : FFT analizlerinden elde edilen numune titreşim frekansları.....	94
Çizelge 4.2 : Numuneye ait birinci frekanslara karşı gelen etkin yatay rijitlikler.	98
Çizelge 4.3 : Statik deneylerden elde edilen sönüm oranları (± 50 mm, yükleme hızı çok düşük).	115
Çizelge 4.4 : Statik deneylerden elde edilen sönüm oranları (± 50 mm, yükleme hızı 0.2 Hz).	116
Çizelge 4.5 : Statik deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları (± 50 mm, yükleme hızı çok düşük).	117
Çizelge 4.6 : Statik deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları (± 50 mm, yükleme hızı 0.2 Hz).	117
Çizelge 4.7 : Statik deneylerden elde edilen sönümler ile ideal kuvvet- yerdeğiştirme ilişkisinden elde edilen sönümlerin karşılaştırılması.....	118
Çizelge 5.1 : Sismik yalıtımlı sistemin EC8 (2004) ve FEMA450 (2003)'e göre yatay yerdeğiştirme istemlerinin hesabı.	131

Çizelge 5.2 : Zemin kat kesme kuvveti istemleri.....	137
Çizelge 5.3 : Analizlerde kullanılan yakın deprem kayıtları.	140
Çizelge 5.4 : Analizlerde kullanılan uzak deprem kayıtları.....	141
Çizelge 5.5 : Sismik yalıtımlı bina için performans hedefleri.	143



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Elastik tasarım spektrumu (Chopra, 2012).....	3
Şekil 1.2 : LRB mesnet özellikleri (Url-1).	5
Şekil 1.3 : Kauçuk esaslı bir mesnet uygulaması.	5
Şekil 1.4 : Sürtünmeli sarkaç tipi mesnet özellikleri (Url-1).....	6
Şekil 1.5 : Tek, iki ve üç kademeli sürtünmeli sarkaç kesitleri (Constantinou ve diğ, 2011).....	6
Şekil 1.6 : Uygulamada kullanılan bir sürtünmeli sarkaç (Url-2).	7
Şekil 1.7 : Büyük kapasiteli akışkan viskoz sönümleyici (Chang ve diğ, 2002).....	8
Şekil 1.8 : İki ayak üzerine oturtulan ¼ ölçekli sismik yalıtımlı köprü numunesi (Tsopelas ve Constantinou, 1994).	9
Şekil 1.9 : Kurşun ekstrüzyonlu bir sönümleyici (Soydan, 2015).	9
Şekil 1.10 : Ekipman titreşimlerini sönümleyici yaylar (Url-3).	10
Şekil 1.11 : Viskoz sönümleyicili ve düşey helisel yaylı bir mesnet tipi (Url-4).	10
Şekil 1.12 : Elastomerik yaylı bir sönümleyici (Pekcan ve diğ, 1995).....	11
Şekil 1.13 : Çok üniteli ahşap bir yapıda yumuşak kat hasarı (CU, Berkeley).	14
Şekil 2.1 : Doğrusal basınç yayları.	17
Şekil 2.2 : Doğrusal çalışan tipik helisel basınç yayı.	18
Şekil 2.3 : Birinci grup yayların basınç deneyleri.	18
Şekil 2.4 : Birinci grup yaylara ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.	19
Şekil 2.5 : İkinci grup deneylere ait doğrusal basınç yayı geometrisi.	21
Şekil 2.6 : İkinci grup yay deneyleri.....	21
Şekil 2.7 : İkinci grup yay deneylerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.	22
Şekil 2.8 : Yay kutusunun boyuna kesiti.	23
Şekil 2.9 : Yay kutusu üretimi.	23
Şekil 2.10 : Yatay birim yüklemeler.....	24
Şekil 2.11 : Yay kutusunun tek eksenli yükleme deneyi.	25
Şekil 2.12 : Sismik yalıtım katının birim yatay yük etkisindeki şekildeğiştirmiş hali.	26
Şekil 2.13 : Sismik yalıtım katının şekildeğiştirmemiş durumu.....	27
Şekil 2.14 : Sismik yalıtım katının geometrik uygunluk ilişkileri.	28
Şekil 2.15 : Statik deneylere ait bağımsız sismik yalıtım katı numunesi.	29
Şekil 2.16 : Sismik yalıtım katı deney numunesi (<i>Tüm ölçüler mm dir</i>).....	30
Şekil 2.17 : Şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerleri de içeren deney düzeneği. ..	30
Şekil 2.18 : 30 kN düşey yük etkisinde gerçekleştirilen statik deney.	31
Şekil 2.19 : Sismik yalıtım katının kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri.	32
Şekil 3.1 : ARI-I Sarsma Masası.	38
Şekil 3.2 : ¼ ölçekli sismik yalıtımlı numune üretimi.....	38
Şekil 3.3 : ¼ ölçekli ankastre mesnetli numune üretimi.....	39
Şekil 3.4 : Deney numunelerinin prototip modelleri.	40
Şekil 3.5 : Deney numune geometrileri.	41
Şekil 3.6 : Sismik yalıtım katı.	42
Şekil 3.7 : Sarsma masası üzerinde yer alan deney numuneleri.	43

Şekil 3.8 : Sismik yalıtımlı sisteme ait ölçüm düzeneği.	44
Şekil 3.9 : Ankastre mesnetli numuneye ait ölçüm düzeneği.	45
Şekil 3.10 : Elastik spektral ivme grafikleri.	46
Şekil 3.11 : Kullanılan deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri.	47
Şekil 3.12 : Ankastre mesnetli numunede serbest titreşim frekansları.	48
Şekil 3.13 : Ankastre mesnetli numuneye ait FFT grafiği.	49
Şekil 3.14 : Sismik yalıtımlı numunenin POE360 depremi için FFT analizi.	52
Şekil 3.15 : İvme karşılaştırmaları.	53
Şekil 3.16 : Tepe katı-sarsma masası ivme karşılaştırmaları.	56
Şekil 3.17 : Tepe katı yerdeğiştirme karşılaştırmaları.	58
Şekil 3.18 : Zemin kat kolonları eksenel şekildeğiştirme değerleri.	59
Şekil 3.19 : Bazı istemlere ait en büyük değerlerin karşılaştırılması.	63
Şekil 3.20 : Ankastre mesnetli numune için eşdeğer sönüm.	64
Şekil 3.21 : Sismik yalıtımlı numune için enerji dengesi.	67
Şekil 3.22 : Sismik yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.	68
Şekil 3.23 : Sismik yalıtım katı için oluşturulan kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.	69
Şekil 3.24 : POE360 ve BOL000 depremleri için yarı bant genişliği uygulaması. ...	70
Şekil 3.25 : Deney numunelerine ait üç boyutlu hesap modelleri.	72
Şekil 3.26 : Sismik yalıtımlı modele ait ilk üç serbest titreşim modu.	73
Şekil 3.27 : Ankastre mesnetli modele ait ilk üç serbest titreşim modu.	73
Şekil 3.28 : POE360 depremi için analiz ve deneyin karşılaştırmasında sönüm değerlerinin etkisi.	74
Şekil 3.29 : Sismik yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.	75
Şekil 3.30 : Sismik yalıtım katı ivmeleri.	76
Şekil 3.31 : Ankastre mesnetli sistemde tepe yerdeğiştirmeleri.	77
Şekil 3.32 : Ankastre mesnetli sisteme ait tepe katı ivmeleri.	78
Şekil 3.33 : Sismik yalıtımlı numunenin kuramsal hesabına ait enerji dengesi.	80
Şekil 3.34 : Ankastre mesnetli numunenin kuramsal hesabına ait enerji dengesi.	80
Şekil 3.35 : Sismik yalıtım katını temsil eden kütle-yay modeli.	82
Şekil 3.36 : POE360 ve BOL000 depremleri için yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.	84
Şekil 3.37 : POE360 ve BOL000 için yalıtım katı hızları.	84
Şekil 3.38 : POE360 ve BOL000 için yalıtım katı ivmeleri.	85
Şekil 4.1 : Küresel mafsallı yay kutuları ve yay kutusu bağlantı plakası imalatları. ..	88
Şekil 4.2 : Küresel mafsallı sismik yalıtım katı atölye imalatı.	88
Şekil 4.3 : Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numune geometrisi.	89
Şekil 4.4 : Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numune ve bileşenlerin geometrisi.	90
Şekil 4.5 : Küresel mafsallı birleşim.	90
Şekil 4.6 : Sarsma masası üzerindeki küresel mafsallı yalıtım katlı test numunesi.	91
Şekil 4.7 : İvme ölçerlerin kat döşemeleri üzerindeki yerleşimi.	92
Şekil 4.8 : Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.	92
Şekil 4.9 : Tepe katı ile sarsma masası ivmelerinin karşılaştırılması.	95
Şekil 4.10 : Sismik yalıtım katı göreceli yerdeğiştirmeleri.	96
Şekil 4.11 : Numuneye ait deneysel enerji dengesi grafikleri.	99
Şekil 4.12 : Sismik yalıtım katı dinamik kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.	101
Şekil 4.13 : POE360 ve BOL000 depremleri için yarı bant genişliği uygulaması. .	102
Şekil 4.14 : Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin hesap modeli.	105
Şekil 4.15 : Numuneye ait ilk iki mod şekli.	105
Şekil 4.16 : Sismik yalıtım katı mutlak yerdeğiştirme karşılaştırmaları.	107
Şekil 4.17 : Sismik yalıtım katı ivme karşılaştırmaları.	108
Şekil 4.18 : Numunenin kuramsal hesaplarına ait enerji denge grafikleri.	109

Şekil 4.19 : Statik deneylere ait küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katı numunesi.....	110
Şekil 4.20 : Çapraz yay kutusuz(yalın) yalıtım katı statik deneyleri.	111
Şekil 4.21 : Çapraz yay kutulu yalıtım katı statik deneyleri.	111
Şekil 4.22 : Çapraz yay kutusuz (yalın) yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı çok yavaş).	112
Şekil 4.23 : Çapraz yay kutusuz (yalın) yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı 0.2 Hz).	113
Şekil 4.24 : Çapraz yay kutusu kullanılan yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı çok yavaş).	114
Şekil 4.25 : Çapraz yay kutusu kullanılan yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı 0.2 Hz).	114
Şekil 4.26 : Bağımsız yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.	116
Şekil 5.1 : Ankastre mesnetli binaya ait tipik üst kat taşıyıcı sistem planı (<i>Durum 1</i>).	122
Şekil 5.2 : Ankastre mesnetli bina bodrum kat taşıyıcı sistem planı (<i>Durum 1</i>).	122
Şekil 5.3 : Ankastre mesnetli bina boy kesiti (<i>Durum 1</i>).	123
Şekil 5.4 : Sismik yalıtımlı binaya ait tipik üst kat taşıyıcı sistem planı (<i>Durum 2</i>).	123
Şekil 5.5 : Sismik yalıtımlı bina bodrum kat taşıyıcı sistem planı (<i>Durum 2</i>).	124
Şekil 5.6 : Sismik yalıtımlı bina boy kesiti (<i>Durum 2</i>).	125
Şekil 5.7 : Ankastre mesnetli binaya ait üç boyutlu hesap modeli.	126
Şekil 5.8 : Sismik yalıtımlı binanın üç boyutlu hesap modeli.	127
Şekil 5.9 : Sismik yalıtımlı modelin yalıtım katı.	127
Şekil 5.10 : Sismik yalıtımlı sistemin hesap modelinde uzun doğrultudaki bir çerçeve (<i>Durum 2</i>).	128
Şekil 5.11 : Ankastre mesnetli sisteme ait ilk iki titreşim modu.	129
Şekil 5.12 : Sismik yalıtımlı sisteme ait ilk iki titreşim mod şekli.	129
Şekil 5.13 : Tepe katı yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırması.	133
Şekil 5.14 : En büyük tepe yerdeğiştirmeleri.	134
Şekil 5.15 : BOL000 ve ERZ-EW depremleri için mutlak kat ivmeleri.	135
Şekil 5.16 : Mutlak kat ivmeleri.	136
Şekil 5.17 : Taban kesme kuvveti istemleri.	137
Şekil 5.18 : <i>Durum 1</i> için karşılıklı etki diyagramı ve M-N çiftleri.	138
Şekil 5.19 : <i>Durum 2</i> için karşılıklı etki diyagramı ve M-N çiftleri.	138
Şekil 5.20 : Yakın depremlere ait elastik ivme spektrumları.	141
Şekil 5.21 : Uzak depremlere ait elastik ivme spektrumları.	142
Şekil 5.22 : Yakın depremlere ait yerdeğiştirme istemleri.	142
Şekil 5.23 : Uzak depremlere ait yerdeğiştirme istemleri.	143
Şekil 5.24 : Sismik yalıtımlı binada farklı performans hedefleri için üretilen kırılma eğrileri.	144
Şekil A.1 : Yay kutusu deney düzeneğine ait imalat resmi.	160
Şekil A.2 : Bağımsız yalıtım katı statik deney düzeneğine ait imalat resmi.	161
Şekil A.3 : Sarsma masası (ARI-I) yerleşim planı.	162
Şekil A.4 : ¼ ölçekli, üç katlı düzlem mafsallı yalıtım katlı deney numunesine ait imalat resmi.	163
Şekil A.5 : ¼ ölçekli, üç katlı ankastre mesnetli deney numnesine ait imalat resmi.	164
Şekil A.6 : ISOTHA-1 Matlab yazılımı açık kodu.	165
Şekil A.7 : Küresel mafsala ait imalat resmi.	166

Şekil A.8 : Prizmatik küresel mafsallı yatağına ait imalat resmi.	167
Şekil A.9 : ¼ ölçekli, üç katlı küresel mafsallı yalıtım katı numuneye ait imalat resmi.	168
Şekil A.10 : Sismik yalıtım katı kolonları kapasite kontrolü.	169
Şekil A.11 : Sismik yalıtım katı kompozit döşeme çelik kirişleri kapasite kontrolü.	169



ÇAPRAZ YAY GRUPLARINI KULLANAN YENİ BİR SİSMİK YALITIM SİSTEMİ

ÖZET

Doktora tez çalışması kapsamında, çapraz yay gruplarını kullanan yeni bir sismik yalıtım sistemi geliştirilmiştir. Çalışmanın deneysel bölümü İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEELab) gerçekleştirilmiştir.

Binaların kuvvetli yer hareketleri sırasında yıkıcı hasarlardan korunabilmesinin, doğal titreşim periyotlarının uzatılması ve ilave sönüm sağlanması ile de mümkün olabileceği bilinmektedir. Pasif sismik yalıtım yöntemlerinin esası da bu prensiplere dayanmaktadır.

Bu tez çalışmasının çıkış noktası *kararlı bir yumuşak kat mekanizması* kullanılarak, az katlı betonarme ve çelik yapılar için yeni bir sismik yalıtım sisteminin geliştirilmesidir. Çalışmanın başlangıcında öncelikle simetrik çekme ve basınç kapasitesine sahip bir yay mekanizması geliştirilmiştir. Bu amaçla her biri özdeş eksenel rijitliğe sahip dört adet basınç yayı, *yay kutusu* olarak isimlendirilen ve iki ucunda oluşturulan pistonlar sayesinde açılıp kapanabilen bir boru içinde konumlandırılmıştır. Çalışma kapsamında özgün olarak geliştirilen iki ucu mafsallı çelik kolonlardan ve çapraz yay kutularından oluşan *yalıtım katı*, binanın temel seviyesinde teşkil edilebileceği gibi uygun bir ara katında da oluşturulabilecektir. Önerilen yalıtım katında, düşey yükler ile ikinci mertebe etkileri iki ucu mafsallı çelik kolonlar tarafından karşılanırken, katın yatay kararlılığı görece düşük eksenel rijitliğe sahip çapraz yay kutuları vasıtasıyla sağlanmaktadır.

Geliştirilen sismik yalıtım sistemine, rüzgar ve küçük depremlerde yer değiştirmeleri sınırlandırarak konfor şartlarını sağlamak üzere, yay kutuları üzerinde oluşturulacak bir kilit mekanizması ile yüksek bir başlangıç rijitliği de kazandırılabilir. Bu özellik tez çalışması kapsamı dışındadır.

Önerilen yeni sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin gösterilmesi amacıyla, bir dizi deneysel ve kuramsal çalışma yapılmıştır. Ölçekli numuneler üzerinde yapılan deneyler üç safhalı olarak gerçekleştirilmiştir. Her bir deney aşamasında elde edilen sonuçlar, kuramsal hesaplar ile de doğrulanmıştır.

Birinci safhada, bağımsız yay deneylerini takiben, yay kutusunun çekme ve basınç durumlarındaki davranışının tespit edilmesi amacıyla; bağımsız yay kutusu düşey hidrolik veren kullanılarak, değişik frekanslardaki tekrarlı eksenel yer değiştirmeler altında test edilmiştir. Ardından bu kez yalıtım katının, üzerinde üst yapı olmaksızın yatay hidrolik veren vasıtasıyla değişik normal kuvvet düzeyleri için yön değiştiren tekrarlı yatay yer değiştirme adımları altında statik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yay kutusunun deneylerden elde edilen eksenel rijitlikleri, analitik hesapla elde edilen değerler ile örtüşmüştür. Bağımsız yalıtım katının birinci ve ikinci mertebe yatay

rijitliği, yay kutusu iç kuvvetleri vb. büyüklükleri ile geometrik uygunluk koşullarının analitik hesaplar ile uyum içinde olduğu tespit edilmiştir.

İkinci aşama deneylerde, $\frac{1}{4}$ ölçekli, tek açıklıklı, üç katlı, üç boyutlu ve moment aktarabilen birleşimlere sahip, önerilen yalıtım sistemli ve temelden ankastre mesnetli elik yapı deney numunelerinin; sarsma masası üzerinde, seçilen yedi farklı deprem kaydı için deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadaki deneylerde sismik yalıtım sisteminin mafsalları, sadece itme doğrultusunda hareket etmek üzere düzlem mafsalları olarak teşkil edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirildiğinde ulaşılanlar řu şekilde özetlenebilmektedir; **i.** Sismik yalıtımlı sistemde katlar hizasındaki ivmeler önemli oranlarda klmştir. **ii.** Düşey yükler ile düşey ve yatay yük kaynaklı ikinci merteye etkiler yalıtım katı kolonları tarafından emniyetle taşınmaktadır. **iii.** Deneyler sırasında, herhangi bir kararsızlık ve merkeze dönme sorunu yaşanmamıştır. **iv.** Modellerin iç kuvvetler bakımından kritik zemin katında, sismik yalıtımlı sistemde oluşan kesme kuvvetinin, ankastre mesnetli sistemin yedide biri düzeyine düştüğü grlmştir. **v.** nerilen sismik yalıtım sisteminin kendi göçme emniyet mekanizmasına sahip olduğu anlaşılmıştır. **vi.** Yalıtım katının, dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinden elde edilen ortalama *etkin yatay rijitliği*, mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmadan hesaplanan teorik yatay rijitliğin yaklaşık %25 üzerinde oluşmuştur. **vii.** Sismik yalıtımlı sistemde; mafsallardaki sürtünmeden ortaya çıkan, enerji denge denklemi ve dinamik kuvvet-yerdeğiştirme eğrilerinden hesaplanabilen eşdeğer snmm %18-20 civarında olduğu anlaşılmıştır.

Bu safhada deneyi gerçekleştirilen ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemin hesap modelleri kurularak, geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da göz önüne alındığı, zaman tanım alanındaki analizleri, benzer yedi deprem kaydı için gerçekleştirilmiştir. Sismik yalıtımlı sistem için yapılan analizlerde, deneylerden elde edilen *etkin yatay rijitlikler* ve yine deneylerden elde edilen eşdeğer sönüm oranının %20 değerini kullanılmıştır. Deney ve analizlerden elde edilen ivme ve yerdeğiştirme geçmişlerinin uygulanan tüm depremler için uyumlu oldukları grlmştir.

Geliştirilen sismik yalıtımlı sistemin, üç boyutlu yapılar için mühendislik pratiğinde de kullanılabileceğinin ispatlanmasını amaçlayan üçüncü safha deneylerde, öncelikle uygun bir küresel mafsalları detayı tasarlanıp üretilmiştir. Daha sonra, bir önceki deneylerde kullanılan $\frac{1}{4}$ ölçekli üç katlı elik st yapı modeli küresel mafsalları sistemin üzerine monte edilerek, bu kez küresel mafsalları sismik yalıtımlı deney modeli oluşturulmuştur. Deney modelinin, iki eksenli yükler altında üç boyutlu davranışını ortaya çıkarabilmek için model, tek eksenli sarsma masasını üzerine uyarı doğrultusu ile 45°'lik bir açı yapacak biçimde monte edilmiştir. Deneyler sonucunda, düzlem mafsalları yalıtımlı sistemde olduğu gibi, herhangi bir kararsızlık ve merkeze dönme sorunu yaşanmamış, katlara gelen ivmeler de önemli ölçüde klmştir. Küresel mafsallar ve yay kutuları her iki doğrultuda da tam uyum göstererek çalışmışlardır. Düşey yükler ve ikinci merteye etkiler, yalıtım katının küresel mafsalları kolonları tarafından emniyetle taşınmıştır. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan enerji denge denklemi, dinamik kuvvet-yerdeğiştirme bağıntıları ve yarı bant genişliği yöntemleri olmak üzere üç farklı yöntem ile ortaya çıkarılan ve küresel mafsallardaki sürtünmeden kaynaklanan eşdeğer sönüm yine %20 civarında oluşmuştur. Deneylerde ortaya çıkan ve dinamik kuvvet-yerdeğiştirme bağıntılarının yanı sıra test numunelerinin temel titreşim frekanslarından da ulaşılan ortalama *etkin yatay rijitliğin*, sürtünme göz önüne alınmaksızın hesaplanan teorik yatay rijitlikten, düzlem mafsalları sisteme benzer olarak yaklaşık %25 büyük olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Küresel mafsallı deney numunesinin, deprem uyarılarının deneye benzer biçimde numune ana eksenleri ile 45°'lik bir açı yapacak biçimde uygulandığı, zaman tanım alanındaki analizleri yine tüm depremler için gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde de, deneylerden elde edilen *etkin yatay rijitlikler* ve eşdeğer sönüm oranının %20 değeri kullanılmıştır. Uygulanan yedi farklı deprem için deney ve analizlerden elde edilen ivme ve yerdeğiştirme büyüklükleri örtüşmüştür.

Üçüncü safha deneylerde, küresel mafsallı bağımsız yalıtım katının MTS hidrolik vereni kullanılarak statik deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Küresel mafsallarda sürtünmeden dolayı ortaya çıkan eşdeğer sönüm, %18 civarında elde edilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında geliştirilen sismik yalıtım sisteminin gerçek bir bina üzerinde değerlendirilmesi amacıyla; beş katlı betonarme bir binanın, sismik yalıtım katlı ve temelden ankastre mesnetli olmak üzere üç boyutlu matematik modelleri kurulmuştur. Ardından her iki modelin de, deneylerde kullanılan yedi farklı deprem kaydı için, zaman tanım alanındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Sismik yalıtım sistemli modelde, yalıtım katının *etkin yatay rijitliği olarak* deneylerde ulaşıldığı biçimde, sürtünmesiz teorik rijitliğin %25 artırılmış değeri kullanılmıştır. Sismik yalıtımlı modelde eşdeğer sönüm oranı olarak yine deneylerde elde edilen %20 değerine yer verilmiştir. Sismik yalıtımlı sistem için dört yerdeğiştirme performans seviyesi göz önünde tutularak, *aşılma olasılık eğrileri* elde edilmiştir. Ayrıca sismik yalıtım sistemli bina, önemli bazı temel parametreler açısından ilgili birkaç uluslararası yönetmelik çerçevesinde de irdelenmiştir. Çalışmalar sonunda; sismik yalıtımlı sistemin en etkili olduğu durumda, ankastre mesnetli sisteme göre tepe ivmelerinin 13.70'de bir, kritik zemin kat kesme kuvvetlerinin 12.20'de bir küçüldüğü görülmüştür. Yalıtım katının en büyük yatay yerdeğiştirme kapasitesi dikkate alındığında, bu değer in aşılma olasılığı yer ivmesinin 0.9g değerine kadar %0.0, 1.5g değerinde ise %75 olarak hesaplanmıştır. Önerilen sismik yalıtım sistemi ilgili uluslararası yönetmeliklerin gereksinimlerini karşılamaktadır. Sismik yalıtım katının ana elemanları olan, iki ucu mafsallı çelik kolonları, yay kutuları ve kompozit tavan kirişlerinin geometrik olarak makul ve ekonomik kesitler ile tasarlanabileceği gösterilmiştir.



A NEW SEISMIC ISOLATION SYSTEM MADE OF SPRING TUBE BRACES

SUMMARY

In the scope of this Ph.D. Thesis, a new seismic isolation system made of spring tube braces has been proposed and studied at the Structural and Earthquake Engineering Laboratory (STEELab) of Istanbul Technical University, (ITU).

Building responses during earthquakes can be controlled by period shifting and/or supplementary damping. The passive structural control method based on the period shifting approach is now widely accepted for protecting structures from EQs.

The motivation behind the proposed seismic isolation system is based on the observations of *buildings damaged due to the soft story mechanism* even though it is an undesirable collapse mechanism in earthquake engineering. Site investigations have shown that principal damages are concentrated on the soft storey, while minor or no damage is observed on upper stories. Two conclusions can be drawn from the observations: *i.* The large part of the seismic energy imparted to the structure during an earthquake is dissipated in the soft storey. *ii.* Relatively low lateral stiffness of the soft storey lengthens the fundamental vibration period of the building, so that the intensity of the lateral accelerations transmitted to the upper part of the building is significantly reduced.

The main objective of this study is to develop a new seismic isolation system based on the *stable soft storey mechanism* to be used for low-rise reinforced concrete (RC) and steel buildings. The proposed system can be used not only for newly constructed buildings, but also for vulnerable existing buildings. Due to its relatively low-cost, it is aimed to be used in the developing countries.

In order to have a two-way spring, multiple compression-type linear springs are positioned in a special cylindrical tube called as *spring tube* which has a symmetrical response in tension and compression-type axial loading. An isolation story, which consists of hinge-ended steel columns and spring tube bracings, is constructed at the foundation level or any intermediate level of the building. Gravitational loads are resisted by the vertical steel columns and the lateral stability of the system is mainly governed by diagonal spring tube braces which have quite low axial rigidity. The columns are connected to the relatively rigid beams of the upper and lower floors or RC foundation by means of hinges.

Moreover, the relatively high initial stiffness of the isolation storey can be supplied by a simple locking mechanism on the spring tubes to satisfy the comfort requirements for low intensity earthquake and wind effects. This feature, however, lies outside the scope of this thesis.

A series of experimental and analytical studies are carried out to evaluate the capability of the proposed seismic isolation system. An experimental campaign on downscaled specimens with three stages is performed. In each step, experimental results have been verified by appropriate analytical calculations.

In the first phase, the behavior of the spring tube subjected to axial displacement reversals with varying frequencies is determined. Then, $\frac{1}{4}$ scaled isolation story subjected to varying axial load levels is assessed in the static tests. The static tests carried out on the spring tubes prove that there is a close compatibility between the analytical and experimental axial stiffness of the spring tube. Static tests performed on the isolation story resume the close agreement with the analytical results in terms of first and second order lateral stiffness of the isolation story and internal forces on the spring tube. The geometric compatibility conditions of the isolation story have also been verified by the static tests.

In the second phase of the experimental campaign, $\frac{1}{4}$ scale one bay three storey 3D steel moment resisting frames, with or without proposed seismic isolation storey, are tested on the uni-axial shake table using selected seven real earthquake records. Isolated specimen used in this period of tests has planer hinge connections to obtain pure uni-directional behaviour of the test specimen under uni-axial shaking. The uni-axial shake table (ARI-I), located in the STEELab of ITU, is used in the dynamic tests of the specimens. The displacement capacity of the shake table is ± 325 mm. The accelerometers with $\pm 2g$ capacity are positioned on each floor of the specimen, as well as on the shake table. The lateral displacements are measured at the level of the shake table and at the top of the specimens. Additionally, one displacement transducer is utilized at the level of the isolation storey for the isolated case and at the level of the first storey for the fixed base specimen. A number of strain gauges are used at both ends of first storey beams and columns of isolated and fixed base specimens. Additionally, in the case of the isolated specimen, strain gauges are glued to the mid height of the pinned columns. After having completed this stage of tests, those results are achieved; **i.** The transmitted accelerations from ground to floor levels are largely diminished by means of the isolation system, contrary to the fixed based specimen. **ii.** It has been proven that significant displacement demands and second order effects of gravity loads can be battled by the proposed seismic isolation storey. **iii.** The critical ground storey shear forces of the isolated case are predominantly smaller than the fixed base case and the average ratio is about $1/7$. **iv.** No stability or self-centering problems for the proposed isolation system are observed. **v.** The proposed isolation system has its own fail-safe mechanism. **vi.** The average effective lateral stiffness of the isolation story obtained from the experimental force-displacement relations of seven earthquakes is around 25% higher than the theoretical value which is calculated without accounting the frictional effects. Hence, there is close agreement between the effective lateral stiffness's and the first fundamental frequencies of the isolated specimen for the applied seven EQs. **vii.** The energy balance equations and dynamic force-displacement relations indicated that the equivalent damping arising from the seismic isolation storey is roughly 18-20%. This relatively high damping property, which can be attributed to the friction on the pinned connections of the columns to beams as well as the period elongation, is effective for diminishing seismic response.

Geometric-wise nonlinear dynamic time history analyses (NTHA) are executed for the fixed and isolated test specimens. The effective lateral stiffness of the isolation story used in the NTHA by means of axial rigidity of linear elastic spring tube braces, which also includes supplementary rigidity due to frictions encountered in the hinge connections is extracted from the experimental force-displacement curves. Furthermore, NTHA analyses are performed using the damping ratio of 20% which is achieved through the experiments. The experimentally and analytically obtained

isolation storey displacement and acceleration histories are well comparable for all earthquakes.

In the third stage of the experimental study; first, a proper spherical hinge details are designed and produced for the isolation storey. Then, the application of the spherical hinges as a part of seismic isolation story is tested in the same $\frac{1}{4}$ scale one bay three storey 3D steel moment resisting frame which is fixed to the uni-axial shake table for the same real EQ records. In this case, the global axes of the specimen are rotated 45° in respect to uni-axial shake direction to evaluate 3D behavior of the seismic isolation system under bi-axial seismic loading. The test setup of the isolated specimen is almost similar to the previous one. Displacement transducers are located in the shaking direction that is inclined 45° from the main axes of the specimen. Uni-axial and multi-axial accelerometers with $\pm 2g$ capacity are placed on the different positions of the specimen, as well as on the shake table. Two multi-axial accelerometers are utilized on the isolation story to verify the symmetrical response of the specimen under shaking. After having evaluated this period of tests, the following results could be drawn; *i.* The story accelerations in two main directions are severely reduced by the isolation story which consists of spherical hinges. *ii.* No stability and self-centering problem are observed. *iii.* The equivalent damping ratio obtained through the energy equations, dynamic force-displacement relations and the half-power bandwidth method is about 20% due to the frictions which arose in spherical hinge connections. *iv.* The average effective lateral stiffness of the isolation story achieved from the experimental force-displacement relations and first fundamental frequencies is around 25% greater than the theoretical value which is calculated without considering the frictional effects. This value is the same to the isolated specimen's tested before which has planer hinge connections. *v.* Spherical hinge connections work properly in each direction. *vi.* The seismic responses of the systems with spherical and planar hinges are consisted with each other.

Geometric-wise NTHA have also been performed for the test specimen with spherical hinges for the selected EQ records. The excitations are applied to the isolated structure with the inclination angle of 45° respect to the main axes of the structure similar to the testing. The effective lateral stiffness of the isolation story considered in the time history analyses which have supplementary rigidity due to frictions encountered in the spherical hinge connections is provided from the experimental force-displacement relations. In addition to this, 20% of equivalent damping ratio obtained from experiments is utilized in the analyses. There are good correlations between the experimental and analytical displacement and acceleration histories.

In the third stage of experimental study, static tests of independent isolation story which has spherical hinge connections have also been carried out. After having completed these tests, the equivalent damping ratio of around 18% has been achieved similar to shake table tests of the isolated test specimen.

Finally, the evaluated seismic isolation system is implemented to a five storey RC building. The effectiveness of the isolation system is studied through the comparisons made between the isolated and fixed base cases. For this purpose, geometrical-wise NTHA have been performed. In the time-history analyses of the isolated case, effective stiffness's and 20% of equivalent damping ratio are utilized depending on the experimental results. The probability of exceedance curves are plotted for the isolation story by considering four performance ranges on the displacement demands. Furthermore, basic response parameters are compared with those specified by the some

related international codes. The achieved results can be summarized as follows; **i.** In the most effective case, the proposed seismic isolation system reduces lateral top acceleration and base shear demand of *Ground Story* in the ratio of 13.70 and 12.20 respect to fix based building. **ii.** When the maximum displacement capacity of the isolation story is concerned, the probability of exceedance is almost zero till PGA of 0.9g and 75% for 1.5g. **iii.** Proposed seismic isolation system satisfies the code specifications. **iv.** Members of the isolation story which are double end pinned steel columns, spring tubes and composite beams are proportioned so that they are practically applicable and have cost-effective cross-sections.

General advantages of the proposed seismic isolation system can be listed as follows:

- i. There is no compulsion to add a service storey to the building. The seismic isolation storey can be used for regular purposes. The orientation of diagonal spring tubes can be defined by considering both the structural and architectural demands.
- ii. The base isolation system cannot be specified as a device contrary the existing isolators. Actually it is one of the stories of the structural system. Hence in the design phase of the building, all members of the isolation story are also considered.
- iii. Members of the isolation storey, specifically steel columns and spring tube braces, can be produced by local and low-profile workmanship.
- iv. Maintenance and replacement of isolation storey parts are relatively easy.
- v. The cost of the proposed technique is low compared to other isolation systems.
- vi. Relatively high supplementary damping is obtained in the isolation storey due to the friction encountered at the joints.
- vii. The self-centering problem has not been observed.
- viii. A fail-safe mechanism is generated by the system itself.
- ix. No durability sensitivity in the lifetime dissimilar to rubber isolators and viscous dampers.

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Amacı

Sismik yalıtım uygulanmayan yapıların depreme karşı tasarımında başlıca iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki yapının, doğrudan elastik kuvvetlerin göz önünde tutularak boyutlandırılmasıdır. Ancak bu durumda taşıyıcı sistemin eleman kesitleri büyüyeceğinden, hem ekonomiden uzaklaşmakta, hem de taşıyıcı eleman boyutlarındaki bu artış, yapıdan beklenen diğer fonksiyonları önemli ölçüde kısıtlayabilmektedir. Bu sebepler ile söz konusu yaklaşım genellikle sadece nükleer santraller, patlayıcılık özelliği yüksek olan yakıtlara ait depolama tankları vb. gibi deprem sırasında hiçbir hasar istenmeyen çok özel yapılar için tercih edilmektedir (Paulay ve Priestley, 1991).

İkinci yaklaşımda ise boyutlandırma sırasında yapının, elastik ötesi davranışı da göz önüne alınmaktadır. Performansa dayalı tasarım olarak adlandırılan bu yöntemde; yapının deprem sırasında elastik ötesi davranışa geçmesi beklenen kolon-kiriş birleşim bölgeleri, kolon ve perdelerin temel birleşim bölgeleri gibi kritik bölümleri tasarım aşamasında özel olarak detaylandırılarak, tasarıma esas olacak deprem yükleri de yapının süneklik ve yedek dayanım kapasitesinin çarpımından oluşan bir faktör ile azaltılmaktadır (Aydinoğlu, 1995). Bunun yapıdaki fiziki karşılığı ise deprem sırasında bu bölgelerin uygun elasto-plastik davranışı göstererek yapıya giren deprem enerjisinin önemli bir bölümünün bu bölgelerde yapılan iş ile tüketilmesi olarak tanımlanabilir. Performansa dayalı tasarımın diğer bir anlamı da, yapının tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmuş performans seviyesine bağlı olarak belirli bir düzeyde yapısal hasarın baştan kabul edilmesidir. Yapının deprem sırasındaki gerçek performansı tasarım ile imalat arasındaki uyumun ne ölçüde sağlanabildiği ile de doğrudan ilişkilidir. Ülkemiz için düşünüldüğünde, inşaat imalat kalitesinin, özellikle işçilikler başta olmak üzere, henüz arzu edilen düzeyde olduğunu söylemek güçtür.

Diğer taraftan, dünyadaki gelişimi ve yaygınlaşması 1980’li yıllardan itibaren hızlanan ve hedefi yapısal elemanların yanı sıra yapısal olmayan elemanlar için de *hasarsızlık*

olan sismik yalıtım sistemlerinin kullanımı, ülkemizde de 2013 yılından itibaren Sağlık Bakanlığı tarafından 100 yatak ve üzerindeki hastane binaları için değerli ekipmanların depremler sırasında korunması da dahil olmak üzere deprem sonrasında hemen kullanıma yönelik olarak zorunlu hale getirilmiştir. Sismik yalıtımlı sistemler 2007 yılında yayınlanan ve halen yürürlükte olan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te (TDY) bulunmamakta, buna karşın hazırlık çalışmaları tamamlanan yeni yönetmelikte bağımsız bir bölüm olarak yer almaktadır.

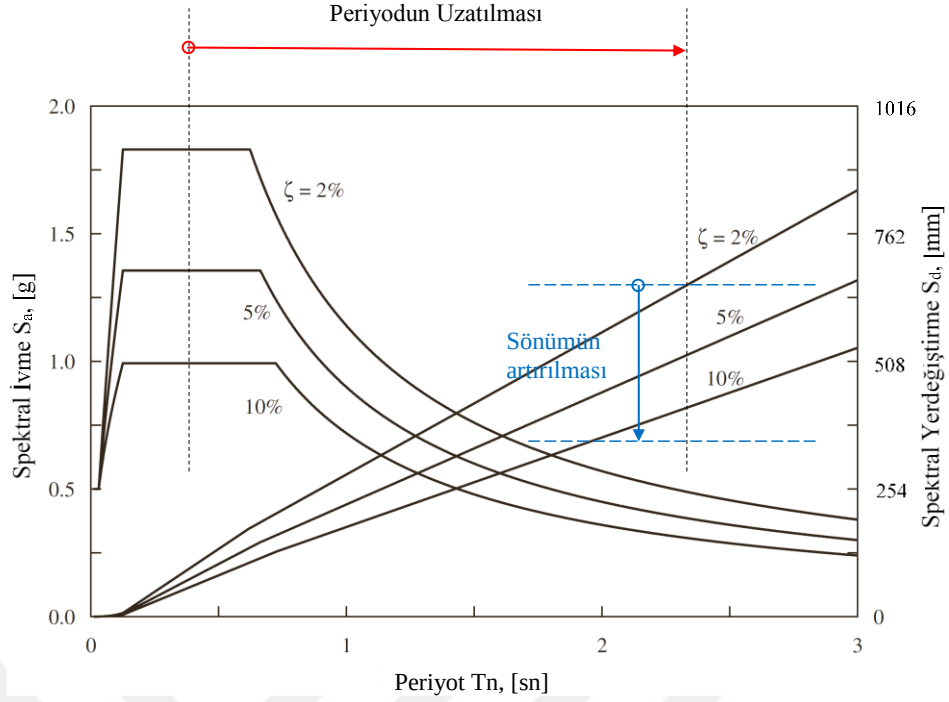
Yukarıda anlatılanların ışığında; bu doktora tez çalışmasının ana amacı, halen kullanımda olan mevcut sismik yalıtım sistemlerine göre daha düşük maliyetli ve ülkemiz şartlarında üretilerek, montajı da yerel işgücü ile gerçekleştirilebilecek *yeni bir sismik yalıtım sisteminin* geliştirilmesidir.

1.2 Sismik Yalıtım Sistemleri Konusunda Önceki Çalışmalar

Dünyada modern sismik yalıtım sistemlerinin gelişiminin ivme kazanması ve kullanımının yaygınlaşması, 1980'li yıllardan itibaren başlamıştır (Kelly, 1986). Sismik yalıtım hali hazırda Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Japonya, Yeni Zelanda, Çin Halk Cumhuriyeti ve İtalya gibi bazı Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sismik yalıtım yöntemleri *aktif* ve *pasif* olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Günümüzde ağırlıklı olarak kullanımı tercih edilenler pasif sismik kontrol yöntemleridir. Deprem anında harekete geçerek, deprem etkilerini azaltmak üzere depreme karşı yönde etki oluşturma mekanizmaları olarak özetlenebilecek aktif sismik kontrol yöntemleri; *kütle sistemleri*, *bağ sistemleri*, *değişik rijitlik ve kütle sistemleri*, *şok sistemler* ve *aerodinamik sistemler* olarak sıralanabilir (Shanmuga ve diğ., 2014). Tez kapsamında geliştirilen yeni sismik yalıtım sistemi pasif bir kontrol yöntemi olduğundan dolayı bu bölümde mevcut pasif sismik yalıtım sistemleri irdelenmiştir.

Binaların depreme karşı davranışlarının kontrol altına alınarak deprem hasarlarından korunması, etkin titreşim modlarına ait periyotlarının uzatılması ve/veya ilave sönüm kazandırılarak sağlanabilmektedir (Makris ve Chang, 2000), (Yamada ve Kobari, 2001),(Şekil 1.1).



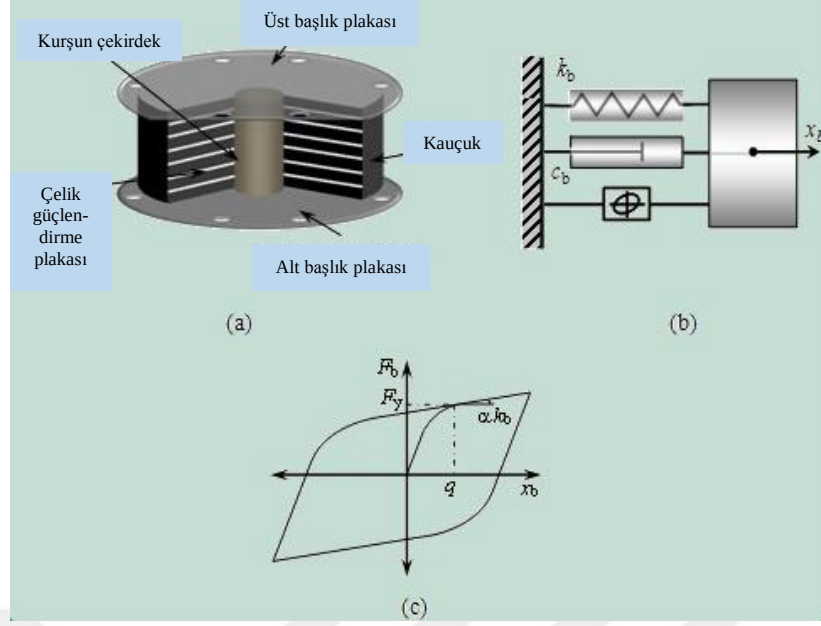
Şekil 1.1 : Elastik tasarım spektrumu (Chopra, 2012).

Yapının etkin titreşim periyodunun uzatılması prensibine dayalı *pasif kontrol yöntemleri*, binaların deprem etkilerinden korunması için yaygın olarak kullanılmaktadır (Cheng ve diğ, 2008), (Chen ve Scawthorn, 2003). Mevcut modern sismik yalıtım sistemleri, taban yalıtımı adı altında öncelikle iki ana grupta toplanmaktadır. Bunlar sırasıyla; kauçuk veya kurşun çekirdekli kauçuk (LRB) mesnetlerden oluşan elastomerik mesnetler ve sürtünmeli sarkaç türü veya sürtünmeli kayıcı mesnetlerdir (Skinner ve diğ, 1993), (Naeim ve Kelly, 1999). Kauçuğun görece düşük sönüm özelliği sebebiyle, düşük sönümlü (LDRB) kauçuğun yanında ilave sönüm sağlayıcı cihazlar da kullanılabilmektedir (Warn ve Ryan, 2012). Bunların yanı sıra, yüksek sönüm ve büyük yerdeğiştirme kapasitelerine sahip olan, yüksek sönümlü kauçuk mesnetler de (HDRB) kullanılmaktadır (Dezfuli ve Alam, 2014). HDRB'ler aynı zamanda en ekonomik ve etkili mesnetlerden biri olarak gösterilmektedir (Tsai ve diğ, 2003). Enerji tüketmek için merkezinde kurşuna yer verilen LRB'lerin Avrupa, Japonya, ABD ve Yeni Zelanda gibi ülkelerinde kullanımı oldukça yaygındır (Tan ve Haung, 2000).

Yassı ve eğrisel yüzeyli sürtünmeli kayıcı mesnetlerde prensip olarak binaya geçen deprem enerjisinin bir bölümü sürtünme ile tüketilmektedir (Komodromos, 2000), (Fenz ve Constantinou, 2006).

Yassı yüzeyli sürtünmeli kayıcı mesnetlerde, statik sürtünme katsayısının düşüklüğü sebebiyle (0.06-0.12) kullanılabilecek en uygun malzemelerden biri de teflondur. Constantinou ve diğ. (1990a) sismik yalıtımlı binalarda kullanılacak, Teflon-çelik sürtünme yüzeyleri için sürtünme karakteristiklerini tayin etmek üzere deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Laboratuvar deneylerinde kayma hızının, ivmelerin, basınç gerilmelerinin, teflon cinsinin ve yüzey özelliklerinin sürtünmeli kayıcı mesnetlerin sürtünme karakteristikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler sonunda ivmelerin sürtünme üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı, buna karşın hızların ve basınç gerilmelerinin çok etkili olduğunu saptanmıştır. Sürtünme katsayısının hız artışı ile artmaya başladığını ancak hızın belirli değerinden sonra sabit kaldığı, basınç gerilmeleri arttığında sürtünme katsayısının düştüğü gösterilmiştir. Deneylerde ayrıca statik sürtünme katsayısı ile dinamik (kinetik) sürtünme katsayısı arasında önemli farklar olduğu ortaya çıkarılmış, genel olarak statik sürtünme katsayısının dinamik sürtünme katsayısından iki ile dört misli değişen oranlarda büyük olduğu saptanmıştır. Bu deneyleri tamamlayıcı olmak üzere, Constantinou ve diğ. (1990b) Teflon-çelik sürtünme yüzeyleri için analitik bir model de oluşturmuşlardır. Model tek ve çok eksenli kayma hareketlerini göz önüne alabilmenin yanı sıra, hıza ve üzerindeki basınca bağlı olarak değişen bir sürtünme katsayısı tanımlayabilme özelliğine de sahiptir. Bu tip sürtünmeli kayıcı mesnetlerde sürtünmeyi azaltmak üzere yağlama da yapılabilmektedir (Dolce ve diğ, 2007).

Pasif sismik yalıtım yöntemlerinden kauçuk tabanlı mesnetlerin genel çalışma prensibi, kauçuğun görece düşük kayma rijitliği sayesinde mesnetlerin büyük şekildeğiştirmeler yaparak, yapının etkin titreşim periyodunun uzatılması ve deprem sırasında ortaya çıkacak yerdeğiştirme istemlerinin karşılanması olarak ifade edilebilir. Bu tip sistemlerde düşey yüklerin taşınabilmesi için kauçuğun düşey rijitliğini artırmak üzere, kauçuk malzemesi ara çelik tabakalar ile de güçlendirilmektedir. Büyük yanal yerdeğiştirmelerden sonra, mesnetlerin tekrar ilk konumuna gelebilmesi için, sisteme değişik yöntemler ile ilave sönüm de kazandırılmaktadır. Şekil 1.2’de LRB tipindeki bir mesnedin belirtilen özelliklerini içeren yapısı, sahip olduğu rijitlik ve sönüm özellikleri ile doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme eğrisi topluca gösterilmektedir.



Şekil 1.2 : LRB mesnet özellikleri (Url-1).

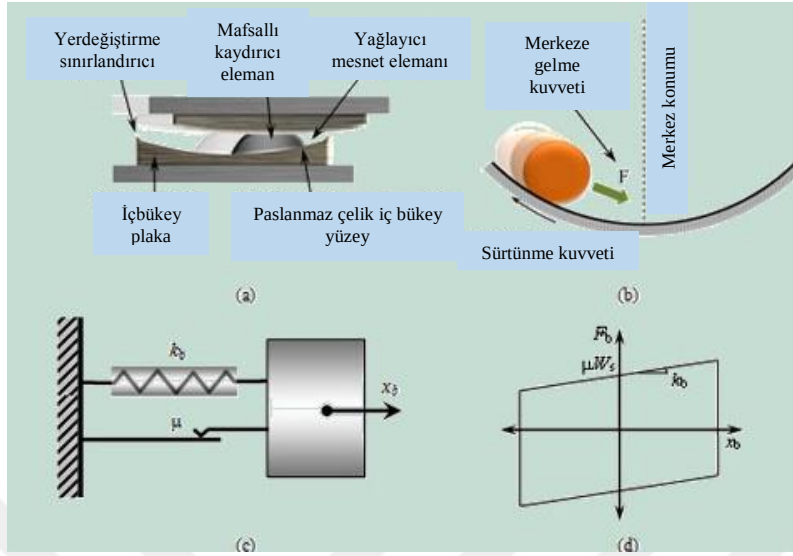
Kauçuk esaslı mesnetlere ait bir uygulama da Şekil 1.3'deki fotoğrafta yer almaktadır.



Şekil 1.3 : Kauçuk esaslı bir mesnet uygulaması.

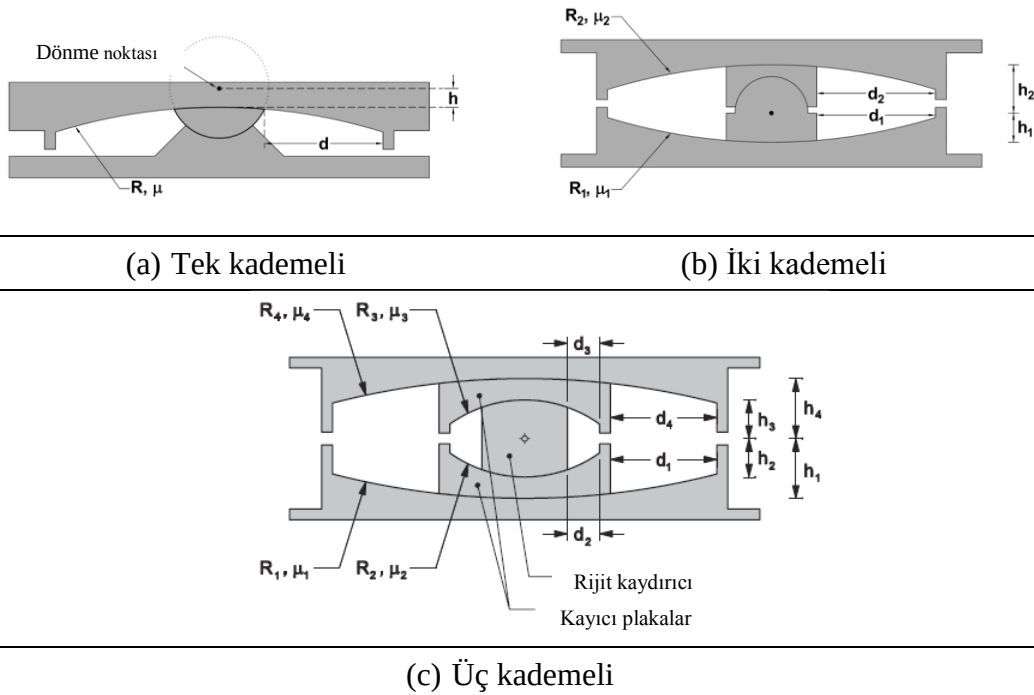
İkinci grupta yer alan sürtünmeli sarkaç tipi mesnetlerde ise, yine görece düşük bir yatay rijitliğe sahip olan sarkaç mekanizması sayesinde yapının doğal titreşim periyodu uzatılmakta, içbükey yüzey üzerinde gerçekleşen salınımlarla da, yer hareketleri sırasında ortaya çıkan yerdeğiştirme istemleri karşılanmaktadır. Bu tip mesnetlerde sönüm eğrisel yüzey üzerindeki sürtünme mekanizması ile sağlanmaktadır. Sürtünmeli sarkaç tipi mesnetlerde fizik kuralı gereği salınımlar sonrası sistem kaçınılmaz olarak içbükey yüzeyin en düşük noktasında yer alan

merkezde durmaktadır. Şekil 1.4’de sürtülmeli sarkaç mesnedin özetlenen yapısı ile sürtünmeden kaynaklı doğrusal olmayan yük- yerdeğiştirme eğrisine yer verilmiştir.



Şekil 1.4 : Sürtülmeli sarkaç tipi mesnet özellikleri (Url-1).

Bu tip mesnetlerde, değişik yerdeğiştirme durumları için eğrisel yüzey üzerinde kademelendirmeler de yapılabilmektedir. Sürtülmeli sarkaç tipi mesnetler tanımlanırken bahsedilen kademe özellikleri ile birlikte anılmaktadır. Şekil 1.5a’da tek 1.5b’de çift, 1.5c’de de üç kademeli bir sürtülmeli sarkaç tipine ait kesitler yer almaktadır.



Şekil 1.5 : Tek, iki ve üç kademeli sürtülmeli sarkaç kesitleri (Constantinou ve diğ., 2011).

Uygulamada kullanılan sürtünmeli sarkaç tipindeki bir mesneden fiziksel byklgn gösteren bir fotoğraf da, Şekil 1.6'da yer almaktadır.



Şekil 1.6 : Uygulamada kullanılan bir sürtünmeli sarkaç (Url-2).

Diğer taraftan, faya yakın ve yüksek hızlı yer hareketlerinin sismik yalıtım sistemleri üzerinde olumsuz etkileri de olabilmektedir. Provikadis, (2007) gerçekleştirdiği doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki analizler ile yalıtım sisteminin sönüm özelliklerinin, yalıtım sistemi ve üst yapı yanıl ötelemelerine etkilerini incelemiştir. Çalışmada değişik tipteki LRB davranışlarının iki gerçek betonarme yapı üzerindeki etkileri karşılaştırılarak tartışılmıştır. Aynı çalışmada ilave viskoz sönümün yalıtım sisteminin yerdeğiştirmelerini azaltırken, üst yapı iç kuvvetlerini uygun değerlerde tutabildiği de gösterilmiştir. Gazi (2015) sismik yalıtımlı binaların, yakın fay depremlerindeki davranışlarını olasılıksal olarak incelemiş ve yakın depremlerinin sismik yalıtım sistemleri üzerindeki olumsuz etkilerini ortaya koymuştur.

Sismik yalıtımda yeni yaklaşımlardan biri de, çok katlı yapıların tercih edilen birden çok katında sismik yalıtım uygulamasıdır. Charnpis ve diğ. (2015) çok katlı bir yapının değişik katlarında sismik yalıtım yapılmasına ait analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada en uygun yapı davranışını verecek, sismik yalıtım sayısı ve yapı yüksekliğince uygulanacak katları belirleyecek bir algoritma da üretilmiştir. Analitik hesap sonuçları, aynı yapıda birden çok katta sismik yalıtım kullanılması ve geliştirilen algoritmanın etkinliğini ortaya koymuştur.

Pasif sismik yalıtım sistemleri ile birlikte kullanılan veya yalıtımsız bir yapı içerisinde bağımsız olarak kullanılabilen diğer grup yalıtım araçları da sönümleyici olarak adlandırılmaktadır. Bu gruptaki tüm sönümleyicilerin işlevi, deprem sırasında yapıya giren enerjinin bir bölümünün sönüm enerjisi olarak tüketilmesidir. Metal sönümleyicilerde genel olarak tekrarlı hareketler sonunda malzemede ortaya çıkan

plastik şekildeğiştirme veya sürtünme ile enerji tüketilmektedir (Naeim ve Mayes, 2001), (Pekcan ve diğ, 1995).

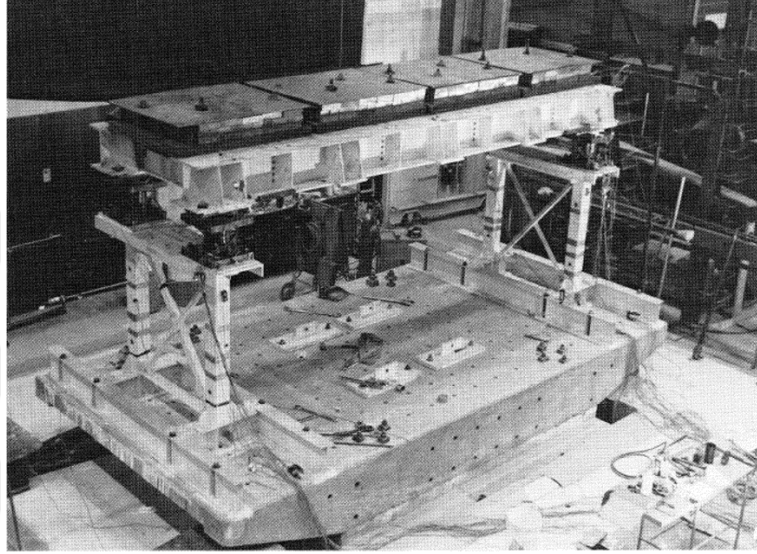
Akışkan viskoz sönümleyicilerde pistonların akışkan içinde tekrarlı hareketleri ile yapılan iş vasıtasıyla, visko-elastik (katı-viskoz) sönümleyicilerde ise malzemenin tekrarlı elasto-plastik deformasyonları ile enerji tüketilmektedir. Şekil 1.7’de büyük kapasiteli bir akışkan viskoz sönümleyici görülmektedir.



Şekil 1.7 : Büyük kapasiteli akışkan viskoz sönümleyici (Chang ve diğ, 2002).

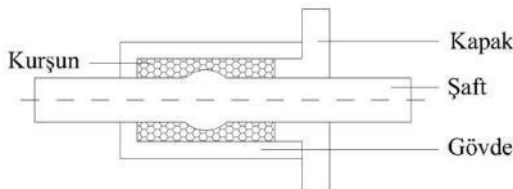
Sorace ve Terenzi, (2001) çalışmalarında, yakın ve tek etkin pik içeren depremlerde viskoz sönümleyiciler ile uygun sönümlerin elde edilebileceğini göstermişlerdir. Çelik-teflon yüzeydeki sürtünmeli yalıtım sistemi, viskoz sönümleyicilerle birlikte İtalya’daki stratejik önemi olan bir bina için, örnek olmak üzere kullanılmıştır (Sorace ve Terenzi, 2008). Çalışmada, aynı bina içinde enerji tüketiminin iki farklı şekilde sağlanmasının oldukça iyi sonuçlar verdiği deneylere dayanılarak ortaya konmuştur. Chang ve diğ. (2002) elastomer mesnetlerle birlikte değişik sönüm değerlerine sahip akışkan viskoz sönümleyicilerin kullanıldığı sistemin, sarsma masası deneylerini gerçekleştirmiştir. Akışkan viskoz sönümleyiciler ile sağlanan ilave sönüm vasıtasıyla, yüksek periyoda sahip yapılar için yakın ve etkin tek pik içeren depremlerde, taban kesme kuvvetini artırmaksızın, yerdeğiştirme taleplerinin azaltılabildiği deneylerle gösterilmiştir. Çalışmada ayrıca, sürtünme ile sağlanan sönümün viskoz sönümden daha etkili olduğu belirtilmektedir. Lu ve diğ. (2013) viskoz sönümleyici tipindeki ilave sönüm sağlayıcıların, sürtünmeli kayıcı mesnetler ile birlikte kullanılması halinde uzun periyotlu tek etkin pik içeren yer hareketlerinde yalıtım sistemi yerdeğiştirme isteminin, üst yapı ivmelerini artırmaksızın önemli miktarda

azaltılabildiği gösterilmiştir. Tsopelas ve Constantinou, (1994) gerçekleştirdikleri deneysel ve analitik çalışmalarda, sürtünmeli kayıcı mesnet ve akışkan viskoz sönümleyiciler kullanılarak sismik yalıtım uygulanmış ¼ ölçekli bir köprü numunesi ile (Bkz. Şekil 1.8) sismik yalıtımsız halin davranışları karşılaştırılmıştır. Ön yükle yüklenmiş bir viskoz sönümleyici tipinin kullanıldığı bu çalışma sonunda, sismik yalıtımlı köprünün yalıtımsız köprü yapısına nazaran daha iyi bir deprem performansı sergilediği ortaya konulmuştur.



Şekil 1.8 : İki ayak üzerine oturtulan ¼ ölçekli sismik yalıtımlı köprü numunesi (Tsopelas ve Constantinou, 1994).

Yüksek plastik şekildeğiştirme özelliğine sahip kurşunun, bir piston içerisinde yer alan odacıklarda tekrarlı yükler altında ekstrüzyon işlemine tabi tutulması prensibine dayalı olarak, ülkemizde geliştirilen özel yeni bir katı viskoz sönümleyici de bu gruptaki sönümleyiciler içerisinde yer almaktadır (Soydan 2015). Bu kurşun ekstrüzyonlu sönümleyicinin tipik kesiti ve öğeleri Şekil 1.9’da görülmektedir.



(a) Sönümleyici kesiti



(b) Sönümleyici parçaları

Şekil 1.9 : Kurşun ekstrüzyonlu bir sönümleyici (Soydan, 2015).

Titreşimleri sönümlemek için helisel yaylardan da çok uzun sürelerden beri faydalanılmaktadır. Doğrusal çalışan helisel yaylar daha çok endüstriyel binalarda makine ve ekipmanlardan oluşan titreşimleri sönümlendirmek ve titreşimlerin binanın diğer bölümlerine geçişini önlemek üzere kullanılmaktadır (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 : Ekipman titreşimlerini sönümleyici yaylar (Url-3).

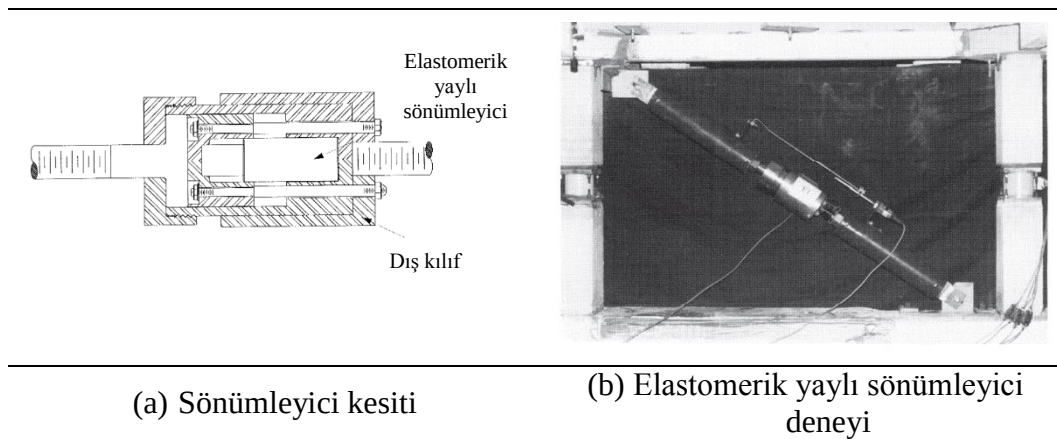
Helisel yayların binaların sismik yalıtımı amacıyla, bina temelini altına düşey olarak yerleştirildiği bazı uygulamalara önceki dönemlerde özellikle Japonya’da rastlanmaktadır. Huffmann, (1985) helisel yaylar ve viskoz sönümleyicilerin beraberce, binaların sismik yalıtımında kullanılabileceğini belirtmiştir. Ancak bu tip uygulamalarda, yayların düşey rijitliği, daha çok düşey yer hareketleri için zayıf kaldığından, bina temelinde önemli miktarlarda kalkma oluşmakta, bunun olumsuz etkisi olarak da binanın uç bölgelerinde çok yüksek düşey ivmelenmeler ortaya çıkmaktadır (Kelly,1986). Günümüzde de kullanılan helisel yaylı ve viskoz sönümleyicili sismik yalıtım uygulamalarında, yalıtım sisteminin yatay rijitliği ve yatay yerdeğıştirme esnekliği, yayların kendi eksenindeki ana çalışma doğrultularına dik yatay rijitliği ve yine o doğrultudaki yatay yerdeğıştirme kapasiteleri ile sağlanmaktadır. Yayların düşey doğrultudaki zayıf eksenel rijitlikleri sebebiyle meydana gelecek düşey yerdeğıştirme ve ivmelenmeler de viskoz sönüm mekanizması ile sönümlendirilmektedir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 : Viskoz sönümleyicili ve düşey helisel yaylı bir mesnet tipi (Url-4).

Makris ve Constantinou, (1992) helisel yaylar ve viskoz sönümleyicilerin birlikte kullanıldığı bu tip sismik yalıtım sistemleri üzerinde yaptıkları çalışmada, binanın ağırlığını taşıyan helisel yayların sahip oldukları zayıf düşey ve yatay rijitlikleri dolayısıyla, mesnetin üç doğrultudaki hareketlerine izin verdiğini, büyük yerdeğiştirmelerin ise aynı zamanda enerji de yutan viskoz sönümleyiciler ile kontrol altına alınabildiği ifade edilmiştir. Çalışma bu tip bir yalıtım sisteminde periyod uzatılmasından daha çok viskoz sönümleyici ile enerji tüketilmesinin etkili olduğunu ortaya koymuştur. Helisel yaylar ile viskoz sönümleyicili sismik yalıtım sisteminin, içinde ekipman olan binalar için de uygun olduğu bildirilen aynı çalışmada, California'daki iki binada bu tip sismik yalıtım sisteminin uygulandığı da belirtilmektedir. Makris ve Deoskar, (1996) çalışmasında, California'da helisel yaylı ve viskoz sönümleyicili sismik yalıtım sisteminin uygulandığı belirtilen yukarıdaki binalardan birinde; 1994 Northridge Depremi'nden sonra binaya daha önceden yerleştirilen ölçüm cihazlarından elde edilen kayıtların, gerçekleştirdikleri analitik çalışmalardan elde edilen değerler ile uyumlu oldukları ifade edilmiştir.

Burkulması önlenmiş merkeze gelme kabiliyeti olan çaprazlar da ilave sönümleyici elemanlar olarak kullanılmaktadır (Zhou ve diğ, 2015), (Erochko ve diğ, 2014), (Addison ve diğ, 2015). Elastomerik yaylı sönümleyicili çaprazlar da bu gruba giren ilave sönümleyici elemanlardır. Elastomerik yaylı sönümleyici bir eleman kesiti ve betonarme bir sistem içerisindeki deneyine ait bir fotoğrafa Şekil 1.12'de yer verilmektedir.



Şekil 1.12 : Elastomerik yaylı bir sönümleyici (Pekcan ve diğ, 1995).

Diğer taraftan, düşük maliyetli sismik yalıtım sistemlerinin geliştirilmesi konusundaki çalışmalar da her dönemde güncelliğini korumaktadır. Calabrese (2013) atık kauçukların çelik liflerle güçlendirilerek, sismik yalıtımda kullanımını önermiştir. Tek

eksenli sarsma masası deneyleri sonunda; düşük kaliteli atık elastomerlerin önerilen yöntem ile sismik yalıtımda kullanılma potansiyeline sahip oldukları belirtilmiştir. Daudoumis ve diğ. (2002) doğal temel zemini ile bina temeli arasına yerleştirilecek, zayıf bir ara tabakanın binaların sismik yalıtımı amacıyla kullanılabileceğini ifade etmiştir. Düşük kayma kapasitesine sahip bu ara tabakanın, kuvvetli depremler sırasında, kayma direncinin aşılmasını takiben binanın harekete geçmesini sağlanabileceği analitik hesaplar ile gösterilmiştir.

Yukarıda özetlenen güncel sismik yalıtım sistemlerinin yanı sıra, deprem mühendisliğindeki *yumuşak kat olgusundan*, binaların sismik yalıtımında faydalanılabileceği fikrini ortaya koyan ve literatür tarama çalışmaları sırasında sınırlı sayıda oldukları anlaşılan önceki çalışmalara da aşağıda yer verilmektedir.

Yirminci yüzyılın ilk yarısına rastlayan bazı çalışmalar yumuşak kat kullanılarak binaların temel titreşim periyotlarının uzatılabileceğine işaret etmektedir (Kelly,1986). Yumuşak katın sismik yalıtım katı olarak kullanılabileceği konusu bazı yapı mühendislerince önerilmiştir (Martel,1929), (Bednarski,1935), (Green,1935), (Jacobsen,1938). Yapı mühendisleri önerilerinde; yapısal tasarım safhasında, ilk kat kolonlarının yatay rijitliklerinin, üst kat kolonlarından daha küçük tasarlanması ile şekil değiştirmelerin birinci katta toplanacağını belirtilmişlerdir. Ancak bu durumda üst kat ivmelerinin küçülmesine karşın, birinci kattaki büyük yanal yer değiştirmeler sebebiyle eksenel yüklerin ikinci merteye etkileri kolonlarda ileri derece hasar oluşturarak, binanın göçmesine sebep olabileceği de vurgulanmıştır. Fintel ve Khan, (1969) *yumuşak ilk kat metodu* adını verdikleri biraz değiştirilmiş bir yaklaşımda; birinci kat kolonlarının deprem sırasında akmasını sağlayacak biçimde tasarlanabileceğini ve böylelikle enerji tüketilerek, yatay yer değiştirmelerin de sınırlanabileceği tezini ortaya sürmüştür. Bu uygulama biçiminde yer değiştirmelerin önemli miktarda küçülmesine karşın, bu kez de akma noktasına gelen kolonları burkulmaya götürecek eksenel yük seviyelerinin düşmekte olduğu belirtilmiştir. Chopra ve diğ. (1973) bahsedilen yöntemde kolon kararsızlığı ve göçmenin kaçınılmaz olacağını belirtmiştir. Bu sebeplerle, üst kat ivmelerinin küçültülmesi için önerilen *yumuşak ilk kat metodu*, uzun bir süre göz önüne alınmamıştır. Ancak mimari nedenlerle, mimarlar tarafından yaygın kullanılması tekrar gündeme gelmesine sebep olmuştur (Arnold, 1984). Comartin (2009) mevcut yumuşak katlı binalarda eksenel yüklerin ikinci merteye etkilerinin karşılanabilmesi amacıyla, ilave çelik kolon önerisi

getirmiştir. Esasen bu öneriyle; ikinci merteye etkileri karşılanabildiğinde, yumuşak katlı binaların üst katlarında deprem sırasında oluşacak atalet kuvvetlerinin küçültülebileceği ortaya koyulmuştur. Yumuşak kat prensibinin sismik yalıtımda kullanılabileceğini ifade eden bir başka çalışmada, Todorovska (1999) eğimli kolonlardan oluşturulacak yumuşak bir katın fiziksel sarkaç olarak davranacağını ve sismik yalıtımda kullanılabileceğini belirtmiştir. Çalışmada uygun eğim açıları ve etkinlikleri yer hareketinin frekans içeriğine bağlı olarak araştırılmıştır.

Tüm pasif yalıtım yöntemlerinin, yapının titreşim periyodunu uzatması ve ilave sönüme sahip olması gibi iki ana özelliğinin yanında, dört temel fonksiyonu da yerine getirmesi gerekmektedir. Bunlar; **i.** Düşey yüklerin aktarılması **ii.** Yatay şekildeğiştirme esnekliği **iii.** Enerji tüketme özelliği **iv.** Merkeze gelme kapasitesi, olarak sıralanabilir (Medeot, 2012). Bunların yanı sıra, yalıtım sisteminin yerdeğiştirme kapasitesinin aşılmasına sebep olabilecek beklenmeyen bir yer hareketinde; sistemin göçmesini önleyecek bir *göçme emniyeti* sistemine sahip olması da oldukça önemlidir. Kelly ve Beucke, (1983) kauçuk mesnetli yalıtım sistemi ile birlikte kullanılabilecek, sürtünmeden yararlanarak sistemin göçme emniyetini oluşturacak bir yöntem önermiştir. Bu çalışmada, kauçuk mesnetler büyük yanal ötelemelere ulaştığında, üst yapı sisteminin geometrik uygunluk ile yapacağı düşey yerdeğiştirme nedeniyle temas ederek sürtünme mekanizması oluşturan bir düzenek üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonunda, büyük yatay yerdeğiştirmelere ulaşıp, sürtünme teması başladığında, üst yapıya ivme geçişlerinin bir miktar artmasına karşın, artan ivmelerin yapı elemanlarının güvenliğini tehdit edecek büyüklüklere ulaşılmadan hareketin sonlandırılabilirdiği belirtilmiştir. Ohori ve diğ. (1988) emniyetli göçme mekanizması için sismik yalıtımlı binayı, dışarıdan sabit bir noktaya belirli yerdeğiştirmelere müsaade edecek bollukta bir zincir sistemi ile bağlamayı önermiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan analizlere dayanan çalışmada, önerilen zincir yöntemi ile Kelly ve Beucke, (1983) tarafından önerilen sürtünmeli mekanizma karşılaştırılmış ve orada önerilen yöntemin daha çok enerji tüketme kapasitesine sahip olması dolayısıyla kendi önerilerine göre daha uygun olduğu belirtilmiştir.

1.3 Önerilen Sismik Yalıtım Sistemi, Dayanağı ve Hedefleri

Tez kapsamında tamamen yerli olanaklar kullanılarak geliştirilen yeni sismik yalıtım sisteminin çıkış noktası; depremler sonrası, deprem mühendisliğinde istenmeyen bir göçme biçimi olan, *yumuşak kat hasarlı* binalar üzerinde yapılan gözlemler olmuştur. Bu gözlemler, çoğu kez hasarların yumuşak katta toplandığını, üst katların ise az hasarlı ya da tümüyle hasarsız olduğunu göstermiştir. Buradan çıkarılabilecek iki kesin sonuç; *i.* Binaya giren deprem enerjisinin çok önemli bir bölümünün hasarlı yumuşak kat tarafından tüketildiği, *ii.* Yumuşak katın üst katlara göre görece düşük yatay rijitliği nedeniyle de üst katlara geçen ivmelerde önemli azalmalar olduğudur. Tipik bir yumuşak kat hasarı, Şekil 1.13’de yer alan fotoğraf ile gösterilmektedir.



Şekil 1.13 : Çok üniteli ahşap bir yapıda yumuşak kat hasarı (CU, Berkeley).

Kararlı bir yumuşak kat mekanizması prensibine dayanarak geliştirilen yeni sismik yalıtım sistemi, az katlı betonarme veya çelik yapılar için kullanılabilecektir. Önerilen sistem yeni binaların yanı sıra, yeni binalara göre daha güç olmakla birlikte deprem dayanımı düşük mevcut binalar için de kullanılabilecektir. İki ucu mafsallı çelik kolonlardan ve çapraz yay kutularından oluşan *sismik yalıtım katı*, binanın temel seviyesinde teşkil edilebileceği gibi uygun bir ara katında da oluşturulabilecektir. Önerilen yalıtım katında, düşey yükler ile düşey ve yatay yük kaynaklı ikinci mertebe etkiler, iki ucu mafsallı çelik kolonlar tarafından karşılanırken; katın yatay kararlılığı, görece düşük eksenel rijitliğe sahip çapraz yay kutuları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sismik yalıtım sisteminin iki ucu mafsallı kolonlarının üst uçları görece büyük eğilme rijitliğine sahip çelik kompozit kirişlere, alt uçları ise yine görece büyük rijitliğe sahip betonarme elemanlara veya doğrudan betonarme temele bağlanmaktadır.

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin rüzgar ve küçük depremlerdeki yerdeğiştirmelerini sınırlandırarak, konfor şartlarını sağlamak üzere yay kutuları üzerinde oluşturulacak bir kilit mekanizması ile yüksek bir başlangıç rijitliği sağlanabilmektedir. Bu özellik tez çalışmasının kapsamı dışındadır.

Geliştirilen yeni sismik yalıtım sistemi ile **i.** Binanın etkin titreşim periyodu 2.0 saniyenin üzerinde istenilen bir değere çıkarılarak, spektral ivmelerin düşürülmesi, **ii.** Enerji tüketimini de içeren yüksek eşdeğer sönüm kapasitesi ile yatay yerdeğiştirme taleplerinin sınırlandırılması, **iii.** Yeterli düzeyde geri çekme kuvvetlerini üreterek, yer hareketi sonunda binanın başlangıç konumuna (merkeze) gelmesinin sağlanması özelliklerinden yararlanılarak, binanın depremleri hasar almadan atlması hedeflenmiştir. Kapasite ötesi bir yer hareketine maruz kalınması halinde, sistemin kendi üreteceği göçme emniyet mekanizması sayesinde binanın yıkılmasının engellenmesi de hedeflerin içinde yer almıştır.

1.4 Özgün Değer ve Motivasyon

Geliştirilen sismik yalıtım sistemini mevcut yalıtım sistemlerinden ayıran iki ana özelliği bulunmaktadır. Bunlardan ilki, diğer sistemler binanın yapısal elemanlarına eklenen birer aygıt olarak tanımlanırken, önerilen yeni sistem doğrudan binanın bir katını oluşturmaktadır. Diğeri de, geliştirilen sistemin tümüyle yerli malzeme ve işçilikler kullanılarak ülkemizde üretilebiliyor olmasıdır. Bu iki özellik çalışmayı özgün kılarak, motivasyonun kaynağını oluşturmuştur.

1.5 Tezin Genel Yapısı

Tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın amacı ve literatür taraması bu ilk bölümün içerisinde yer almaktadır. Takip eden üç bölümde, üç ayrı grup halinde gerçekleştirilen deneyler ve bu deneyleri doğrulamaya yönelik olarak gerçekleştirilen kuramsal hesaplar bulunmaktadır. Her bölümde, elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

İkinci bölümde, eksenel rijitliğin tespit edilmesi için gerçekleştirilen bağımsız yaylara ait yükleme deneyleri ile eşit çekme ve basınç kapasitesine sahip olacak biçimde geliştirilen *yay kutusunun* ve *bağımsız yalıtım katının* statik deneylerine yer

verilmiştir. Bu bölümdeki tüm deneylere ait kuramsal ve sayısal doğrulamalar da ikinci bölüm içinde yer almaktadır.

Üçüncü bölümde, $\frac{1}{4}$ ölçekli, tek açıklıklı, üç katlı, üç boyutlu ve moment aktaran bileşimli, önerilen yalıtım sistemine sahip ve temelden ankastre deney numunelerinin, seçilen yedi farklı deprem kaydı için tek eksenli sarsma masası üzerinde gerçekleştirilen dinamik deneylerine yer verilmektedir. Bu aşamada sismik yalıtım sisteminin mafsalları *düzlem mafsalları* olarak teşkil edilmiştir. Üçüncü bölümde deneylerden elde edilen sonuçları doğrulamak üzere iki tip numune için hazırlanan matematik modeller üzerinde aynı depremler için gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizler de yer almaktadır.

Dördüncü bölümde, önerilen sismik yalıtım sisteminin üç boyutlu yapılar için pratikteki kullanımını örneklemek amacıyla; tez kapsamında geliştirilen ve bu kez sarsma masası üzerine itme doğrultusu ile 45°'lik açı yapacak biçimde yerleştirilen küresel mafsallı modeline ait dinamik deneyler ile bu deneyleri doğrulamak üzere gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlere yer verilmiştir. Bu bölümde ayrıca küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katının statik deneyleri de gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde, geliştirilen sismik yalıtım sisteminin beş katlı betonarme bir binaya kuramsal olarak uygulanması amacıyla; binanın sismik yalıtım sistemli ve temelden ankastre matematik modellerinin, deneylerde kullanılan deprem kayıtları için zaman tanım alanındaki analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sismik yalıtım sistemli binanın, Eurocode 8 (EC8) (2004) ve FEMA450 (2003)'e göre değerlendirmesi de bu bölüm içerisinde yer almaktadır. Beşinci bölümde ayrıca sismik yalıtımlı binanın 66 adet deprem kaydı için yerdeğiştirme istemlerinin hesaplanmasının yanı sıra, sismik yalıtım katının yerdeğiştirmeleri üzerinde kabul edilen dört performans seviyesine göre oluşturulan kırılma eğrilerine de yer verilmektedir.

Altıncı ve son bölümde ise tez kapsamında gerçekleştirilen tüm çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve genel değerlendirmeler yer almaktadır.

2. DOĞRUSAL YAYLAR, YAY KUTUSU VE SİSMİK YALITIM KATI

2.1 Giriş

Bu bölümde, önerilen sismik yalıtım katının ögeleri olan; *doğrusal elastik yaylar*, *yay kutusu* ve *bağımsız yalıtım katının* mekanik özelliklerinin tayin edilmesi ve davranış biçimlerinin ortaya çıkarılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen deneysel ve kuramsal çalışmalara yer verilmektedir. Bu aşamadaki tüm deneyler statik karakterde gerçekleştirilmiştir.

2.2 Doğrusal Yaylar

Doğrusal yaylar genel olarak sadece çekme veya basınca çalışacak biçimde üretilmektedir. Tez çalışması kapsamında, her iki yönde çalışacak bir yay mekanizmasını oluşturmak üzere Şekil 2.1’de gösterilen tipteki helisel basık basınç yaylarından faydalanılmaktadır.



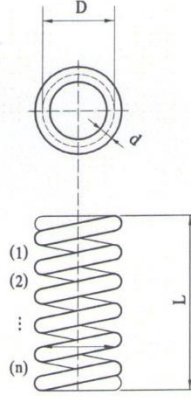
Şekil 2.1 : Doğrusal basınç yayları.

2.2.1 Doğrusal yay eksenel rijitliğinin tayini

Önerilen yalıtım sisteminin yatay rijitliğini doğrusal çalışarak sağlayacak olan basık helisel basınç yaylarının denklem 2.1 ile verilen eksenel rijitliğine, burulma şekildeğiştirme dengesi veya enerji yöntemlerinden biri ile ulaşılmaktadır (İnan, 1984).

$$k = G d^4 / 8 n D^3 \quad (2.1)$$

Denklemden, (k) yayın eksenel rijitliğini, (D) ortalama çapı, (d) tel çapını, (G) yay çeliğinin kayma modülünü, (n) ise aktif halka sayısını ifade etmektedir (Şekil 2.2). Denklem 2.1’den anlaşılacağı üzere, basık yayın eksenel rijitliği L ile ifade edilen yay uzunluğundan bağımsız olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 2.2 : Doğrusal çalışan tipik helisel basınç yayı.

2.2.2 Doğrusal yay deneyleri

Bölüm 2.2.1’de genel tanımları ve teorik eksenel rijitliğinin hesabı verilen doğrusal helisel yayların, deneysel davranışlarının tayin edilmesi amacıyla, değişik özelliklere sahip iki grup basınç yayı üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir.

Birinci grup deneyde; dış çapı 44 mm, ortalama çapı $D=39$ mm, tel çapı $d=5$ mm olarak ortak seçilen doğrusal basınç yaylarının, n aktif halka sayısı ile L yay uzunluğunun değişik değerlerini temsil eden 5 tanesi (Şekil 2.3a), İTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında hidrolik pres altında statik basınç deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 2.3).



(a) Deney yay numuneleri



(b) Hidrolik pres altındaki numune

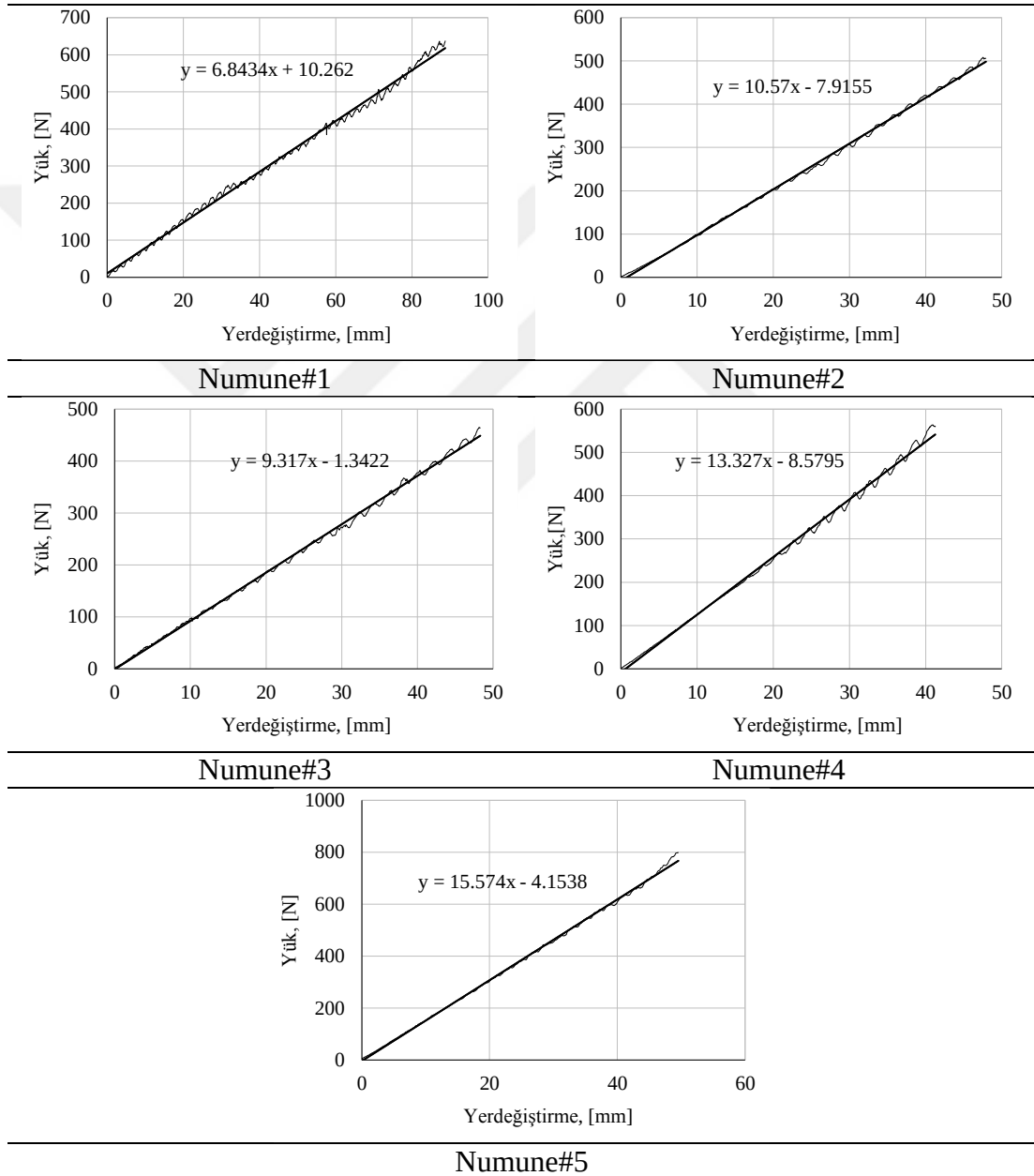


(c) Yayın tümüyle basılı hali

Şekil 2.3 : Birinci grup yayların basınç deneyleri.

Hidrolik pres altında yapılan bu deneyler sırasında, yay numunelerinin presin alt ve üst çenelerinden sıyrılıp tehlikeli bir durum yaratmaması için deneyler, Şekil 2.3b ve 2.3c’de görülen kırmızı ve mavi borulardan oluşan bir aparat kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Düşük bir yükleme hızıyla gerçekleştirilen deneyler sonucu bu gruba ait yaylar için elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ve bu eğrilerden ulaşılan yay eksenel rijitlikleri Şekil 2.4’de yer almaktadır.



Şekil 2.4 : Birinci grup yaylara ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.

Deneylerden elde edilen eksenel rijitlikler ile aynı yaylara ait denklem 2.1’de yay çeliğinin kayma modülü olarak $G=84000 \text{ N/mm}^2$ değeri kullanılarak ulaşılan eksenel

yay rijitlikleri, görelî farklar ile birlikte Çizelge 2.1'in sırasıyla (3), (4) ve (5). kolonlarında gösterilmektedir. Numunelerin n ve L değerlerine de, çizelgenin 2. kolonunda yer verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Deneyssel ve analitik yay rijitlikleri.

Numune No	Deneyssel		Analitik	Görelî Farklar
	$n; L$	$k=P/\Delta$	$k=G d^4 / 8 n D^3$	
	[adet; mm]	[N/mm]	[N/mm]	[%]
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	17; 200	6.843	6.507	5.0
2	11; 150	10.570	10.057	5.0
3	13; 150	9.317	8.510	9.4
4	9; 100	13.320	12.290	8.3
5	7; 100	15.570	15.804	1.5
Ortalama				5.84

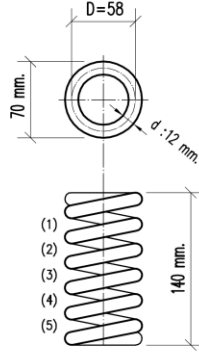
Çizelge 2.1'den görüleceği üzere, deneylerden elde edilen yaylara ait eksenel rijitlikler ile analitik hesap değerleri uyumlu olup, ortalama görelî fark %5.84 olarak gerçekleşmiştir.

İkinci grup yay deneyleri, sonraki aşama deneylerde sismik yalıtım katında kullanılan yay kutularına yerleştirilecek yaylar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla öncelikle, çalışmanın daha sonraki bölümlerinde ayrıntıları verilecek olan, üst yapı kütlesi ve hedeflenen birinci titreşim periyodu kullanılarak elde edilen eksenel rijitliklere sahip yaylar numuneleri ürettirilmiştir (Şekil 2.5).

Hesaplanan hedef yay eksenel rijitliği, $k=220$ N/mm değerine, denklem 2.1'de ortalama yay çapı $D=58$ mm, tel çapı $d=12$ mm, aktif halka sayısı $n=5$, yay malzemesi kayma modülü $G=84000$ N/mm² olmak üzere;

$$k = 84000 \times (12)^4 / 8 \times 5 \times (58)^3 = 223 \text{ N/mm olarak ulaşılmıştır.}$$

Deneylerde kullanılacak yay uzunluğu da Bölüm 2.3'de ele alınacak yay kutusu geometrisine uygun olacak biçimde, $L=140$ mm. olarak seçilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : İkinci grup deneylere ait doğrusal basınç yayı geometrisi.

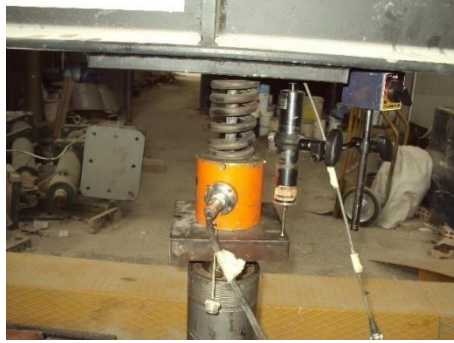
Deney yayları içerisinde rastgele seçilen altı adedinin, İTÜ STEELab’da hidrolik kriko altında statik yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Deneyler sırasında yaylar tümüyle kapanıncaya kadar yük artırılmıştır (Şekil 2.6d).



(a)



(b)



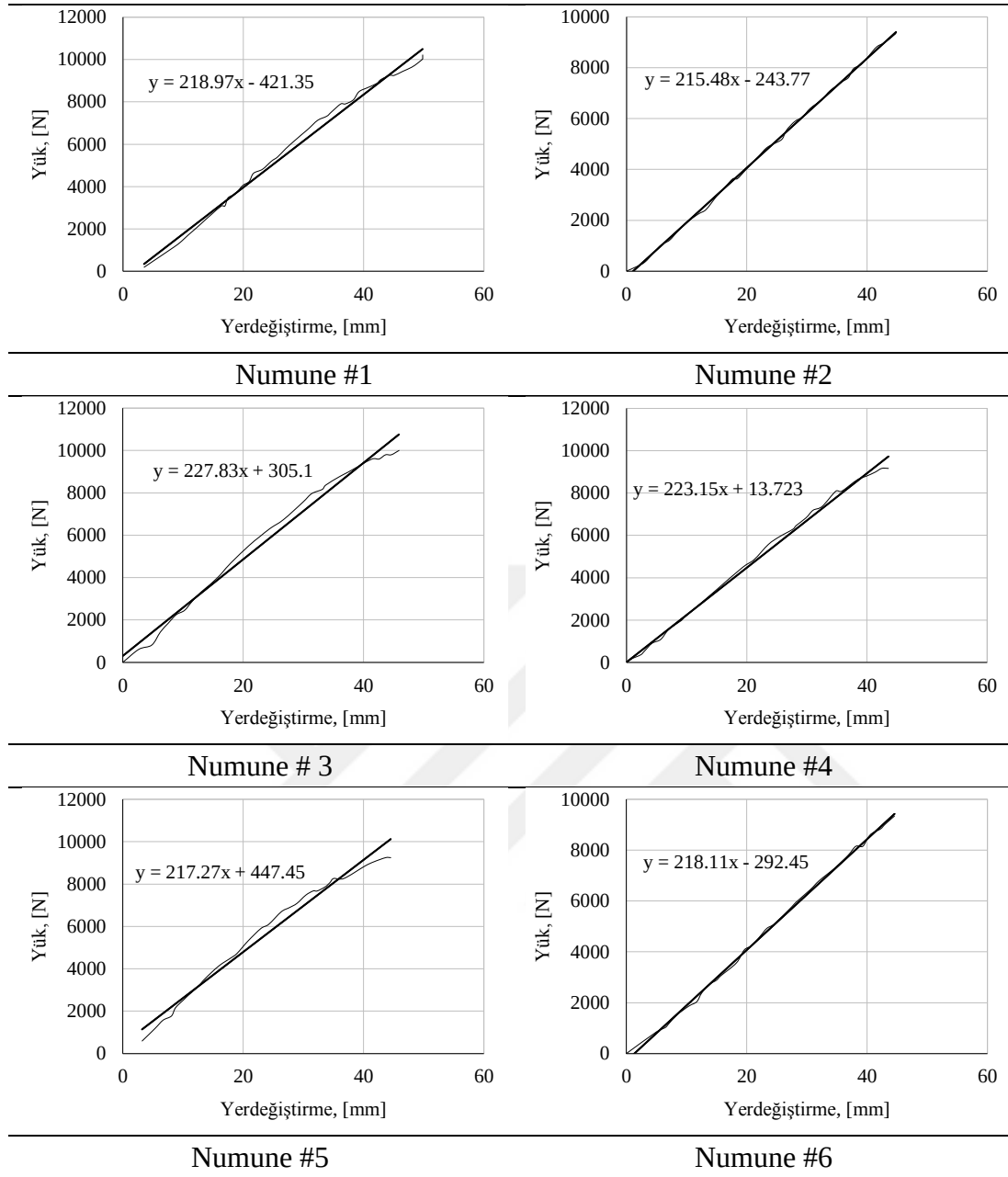
(c)



(d)

Şekil 2.6 : İkinci grup yay deneyleri.

İkinci grup yay deneylerinden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 2.7’de verilmektedir. Altı adet numunenin ortalama aksenal rijitliği $k_{ort}=220.3$ N/mm olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değerin de yukarıda hesaplanan, $k=223$ N/mm teorik yay rijitliği ile uyumlu olduğu söylenebilir.



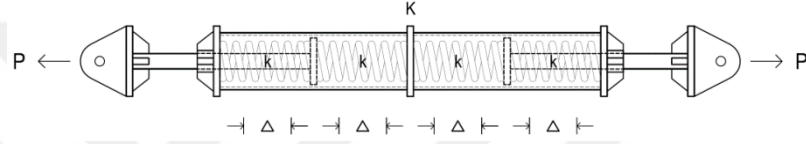
Şekil 2.7 : İkinci grup yay deneylerine ait yük-yerdeğiştirme eğrileri.

2.3 Yay Kutusu

Önerilen sismik yalıtım sisteminin yatay rijitliğini sağlamak üzere, simetrik çekme ve basınç özelliklerine sahip bir yay mekanizmasının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu bölümde, özgün yay kutusunun geliştirilmesi, yay kutusu eksenel ve eşdeğer yatay rijitliklerinin kuramsal olarak hesaplanması ile yay kutusu eksenel rijitliğinin deneysel olarak tayini çalışmalarına yer verilmektedir.

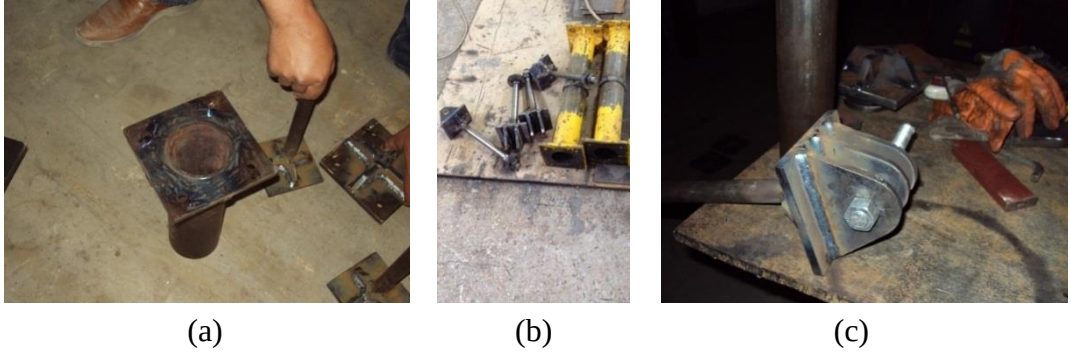
2.3.1 Yay kutusunun geliştirilmesi

Simetrik çekme ve basınç özelliğine sahip, doğrusal elastik çalışacak bir yay mekanizması elde etmek üzere, iki ucunda açılıp kapanabilen pistonlar bulunan bir boru içerisine, her birinin eksenel rijitliği (k) olan dört adet özdeş helisel basınç yayı yerleştirilmiştir. Özdeş yaylardan iki tanesi silindirik gövdenin uçlarındaki pistonların içinde, diğer ikisi de gövde merkezine komşu olarak serbest vaziyette konumlanmaktadır (Şekil 2.8). *Yay kutusu* olarak isimlendirilen ve eksenel rijitliği (K) olan mekanizma; çekmeye maruz kaldığında, uçlardaki basınç yayları çalışmakta, basınca maruz kaldığında ise bu kez merkezdeki basınç yayları görev yaparak, iki yönlü yükler altında simetrik davranış sergilemektedir.



Şekil 2.8 : Yay kutusunun boyuna kesiti.

Yay kutusu ve tüm sistem deneylerinde kullanılan özdeş yaylar, (Şekil 2.5)'de dış çapı, ortalama çapı, tel çapı, aktif halka sayısı ve uzunluk bilgileri verilen yaylardır. Aynı şekilden görüleceği üzere helisel yayların uçları, pistonların düz yüzeyleri ile tam temas sağlamalarına yönelik olarak, düzlem biçiminde üretilmiştir. Yay kutusu üretimine ait bazı fotoğraflara da, Şekil 2.9'da yer verilmektedir.



Şekil 2.9 : Yay kutusu üretimi.

2.3.2 Eksenel ve yatay rijitliklerin tayini

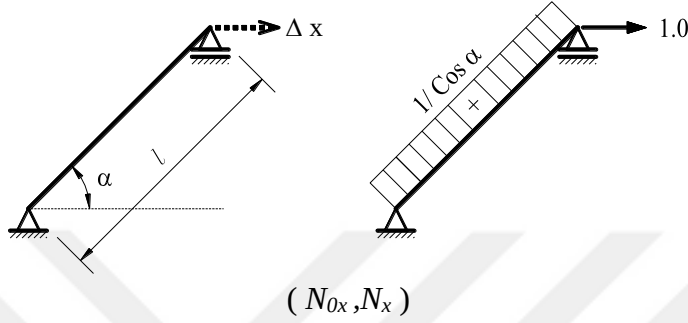
Yay kutusunun teorik eksenel rijitliği (K) eksen doğrultusundaki dengeden, içerisinde yer alan özdeş yayların eksenel rijitliğinin (k) yarısına eşit olarak belirlenmektedir (Denklem 2.2).

$$P=K \times 2\Delta$$

$$k=P/\Delta \quad (2.2)$$

$$K=k/2$$

Sisteme çapraz ve iki ucu mafsallı elemanlar olarak yerleştirilecek yay kutusunun eşdeğer yatay rijitliği (K_x) ise virtüel iş teoremi ile Şekil 2.10’da gösterilen eğik çubuğa yatay doğrultudaki birim yüklemeler yapılarak elde edilebilmektedir.



Şekil 2.10 : Yatay birim yüklemeler.

Bu yöntem kullanılarak, birim yük değerindeki dış yüke ait normal kuvvet diyagramı (N_{0x}), birim yüke ait normal kuvvet diyagramı da (N_x) olmak üzere; yatay yerdeğiştirmeye denklem (2.3), çapraz yay kutusunun yatay rijitliğine de denklem 2.4 ile ulaşılır.

$$\Delta_x = \int_0^l N_{0x} \times \frac{N_x}{EF} \times ds = \frac{1}{\cos \alpha} \times \frac{1}{\cos \alpha} \times \frac{l}{EF} = \frac{1}{\cos^2 \alpha} \times \frac{l}{EF} \quad (2.3)$$

$$K_x = \frac{1}{\Delta_x} = \cos^2 \alpha \times \frac{EF}{l} \quad (2.4)$$

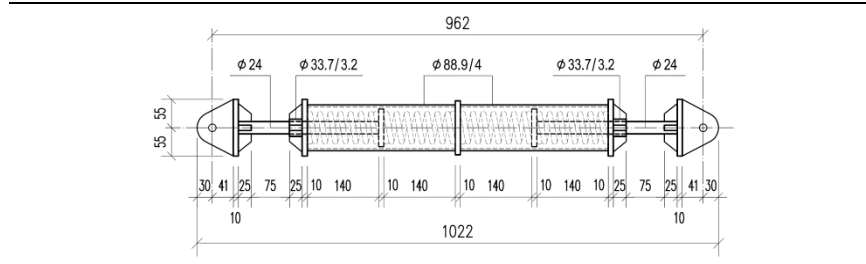
Denklem 2.4’de EF/l çubuğun eksenel rijitliğini ifade ettiğinden, EF/l yerine yay kutusunun eksenel rijitliği (K) yerleştirilirse, çapraz yay kutusunun eşdeğer yatay rijitliği, kendi eksenel rijitliği cinsinden ifade edilmiş olacaktır. (Denklem 2.5).

$$K_x = K \times \cos^2 \alpha \quad (2.5)$$

2.3.3 Yay kutusu deneyleri

Düşey hidrolik veren altında gerçekleştirilen yay kutusu deneyleri öncesinde düzeneğin imalat resmi, yay kutusunu üst uçta hidrolik verene, alt uçta ise sabit mesnete bağlayacak çelik plakalar da dahil olmak üzere hazırlanmış olup, EK A’da verilmektedir.

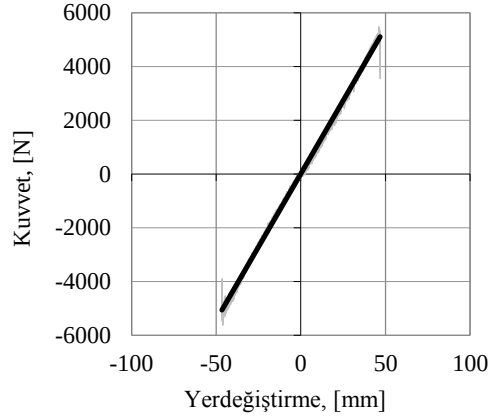
Deneyde kullanılan yay kutusunun geometrik bilgileri ve deney düzeneğinin fotoğrafı, sırasıyla Şekil 2.11a ve 2.11b’de yer almaktadır.



(a) Yay kutusu geometrisi (tüm ölçüler mm dir.)



(b) Deney düzeneği



(c) Kuvvet- yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 2.11 : Yay kutusunun tek eksenli yükleme deneyi.

Deney numunesine ait yay kutusunun içerisinde yer alan dört adet özdeş doğrusal basınç yayı, Bölüm 2.2.2’de verilen ikinci grup yay deneylerinde kullanılan yaylar olup, eksenel rijitlikleri $k=220$ N/mm dir. Yay kutusunun her iki ucu deney düzeneğine mafsallı olarak bağlanmıştır (Şekil 2.11b). İTÜ STEELab’da düşey konumdaki servo hidrolik kontrollü MTS vereni ile deney numunesine; 10 mm’den başlayıp, ± 10 mm’lik adımlar ile ± 50 mm’ye kadar çıkan yön değiştiren tekrarlı yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır. Yay kutusunda kalıcı yerdeğiştirme oluşup oluşmayacağını anlamak amacıyla, deneyler aynı düzendeki yerdeğiştirme çevrimleri ile birkaç kez tekrarlanmıştır.

Deneyler sonunda yay kutusu için ulaşılan doğrusal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, Şekil 2.11c’de verilmektedir. Grafikten yay kutusunun çekme ve basınç yönlerindeki davranışının simetrik olduğu görülmektedir. Aynı grafikteki doğrunun eğiminden ulaşılan yay kutusu eksenel rijitliği, $K=110$ N/mm olarak elde edilmektedir. Bu değer, yay kutusu içerisindeki özdeş basınç yaylarının, $k=220$ N/mm olan eksenel rijitliklerinin yarısına karşı gelmekte olup, yay kutusunun teorik eksenel rijitliğinin

hesabı için verilen denklem 2.2 ile uyumludur. Deney numunesi üzerinde birkaç kez tekrarlanan deneyler sonunda, davranışında hiçbir değişim gözlenmediğinden doğrusal elastik çalışan yay kutusunda herhangi bir plastik şekildeğiştirme oluşmadığı kesinleştirilmiştir.

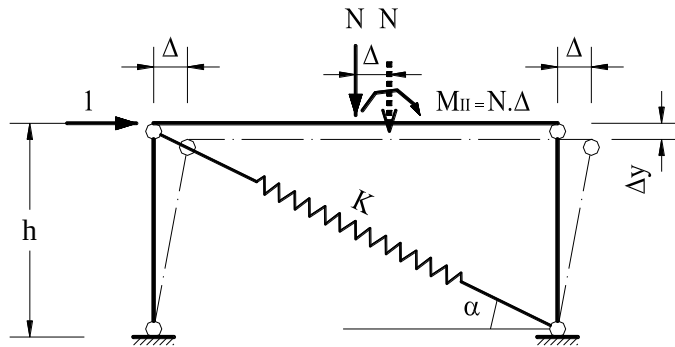
2.4 Sismik Yalıtım Katı

Önerilen yeni sismik yalıtım sistemini oluşturan ve *sismik yalıtım katı* olarak isimlendirilen kat, esas itibarıyla iki ucu mafsallı çelik kolonlardan ve çapraz yay kutularından oluşmaktadır. Sismik yalıtım katı binanın temel seviyesinde teşkil edilebileceği gibi, istenilen bir ara katta da oluşturulabilecektir. Sismik yalıtım katında, düşey yükler ile düşey ve yatay yük kaynaklı ikinci mertebe etkileri, iki ucu mafsallı çelik kolonlar tarafından karşılanırken, katın yatay kararlılığı, çapraz yay kutuları vasıtasıyla sağlanmaktadır. Sismik yalıtım katının iki ucu mafsallı çelik kolonlarının üst uçları göreceli rijit kirişlere bağlanırken, alt uçları bina içerisinde uygulanacağı kata bağlı olarak, yine göreceli rijit kat kirişlerine veya doğrudan betonarme temele bağlanabilecektir.

2.4.1 Teorik I. ve II. mertebe yatay rijitliklerin tayini

Şematik olarak Şekil 2.12’de gösterilen sismik yalıtım katının teorik I.ve II. mertebe yatay rijitlikleri, katın yatay dengesinden veya birim yatay yük etkisinde oluşan yatay yerdeğiştirmeden faydalanılarak hesaplanabilmektedir.

İki ucu mafsallı çelik kolonlardan oluşan sismik yalıtım katının teorik yatay rijitliği (K_x), yay kutusunun yatay rijitliğine eşit olup, Bölüm 2.3.2’de yay kutusunun yatayla yaptığı (α) açısına bağlı olarak denklem (2.5) ile verilmiştir.



Şekil 2.12 : Sismik yalıtım katının birim yatay yük etkisindeki şekildeğiştirilmiş hali.

Denklem (2.5) ile verilen yay kutusunun yatay rijitliği, yalıtım katının teorik birinci mertebe yatay rijitliği olarak tanımlanır (Denklem 2.6).

$$K_x^I = K \times \cos^2 \alpha \quad (2.6)$$

Yalıtım katının ikinci mertebe yatay rijitliğine, sistem üzerindeki normal kuvvet (N) yalıtım katı yüksekliği (h) olmak üzere, (N/h) oranına bağlı olarak denklem 2.7 veya 2.8 ile ulaşılmaktadır. Denklemlerdeki (N/h) oranı, sistem üzerindeki basınç kuvvetinin yatay rijitlik üzerindeki azaltıcı etkisini ifade etmektedir (Wilson ve Habibullah, 1987), (Çakıroğlu ve diğ, 1970).

$$K_x^{II} = K \times \cos^2 \alpha - (N/h) \quad (2.7)$$

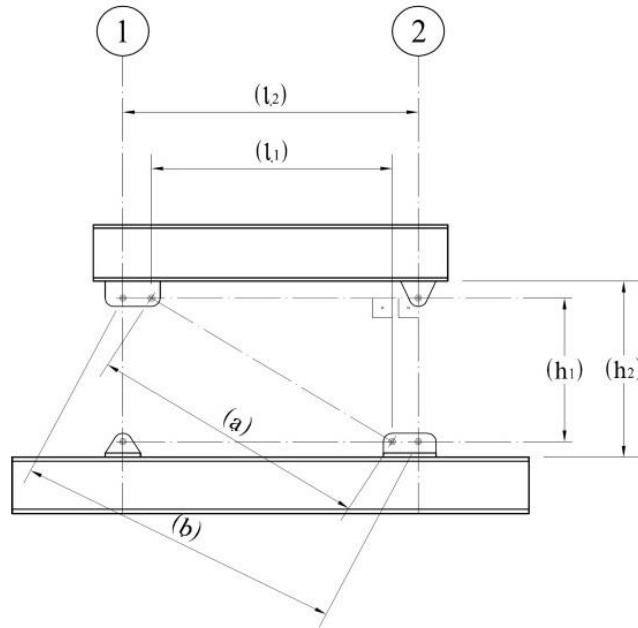
$$K_x^{II} = K_x^I - (N/h) \quad (2.8)$$

Sismik yalıtım katının teorik I. ve II. mertebe yatay rijitlikleri, Şekil 2.12'deki sisteme yapılan yatay birim yüklemelerden oluşacak yatay yerdeğiştirmenin (Δ) tersi alınarak da hesaplanabilmektedir (Denklem 2.9).

$$K_x = 1 / \Delta \quad (2.9)$$

2.4.2 Geometrik uygunluk ilişkileri

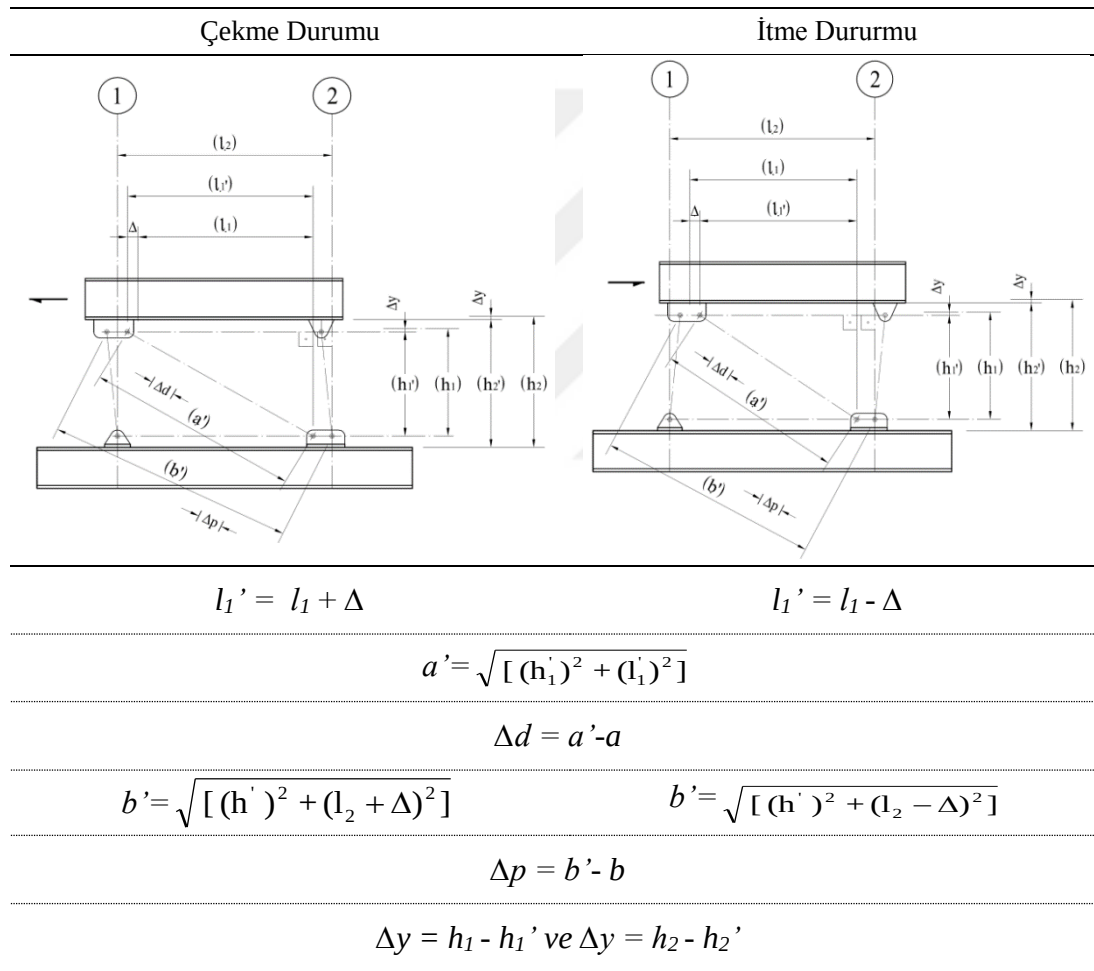
Bu aşamadan sonra gerçekleştirilecek statik ve dinamik deneylerde sismik yalıtım katını temsil edecek olan sistemin şekildeğiştirmemiş durumu şematik olarak Şekil 2.13'de verilmektedir.



Şekil 2.13 : Sismik yalıtım katının şekildeğiştirmemiş durumu.

Şekil 2.13’de (a) ve (b) ile gösterilen diyagonal uzunluklar, sırasıyla yay kutusunun mafsaldan mafsala boyu ile kolon uç mafsalları arasındaki diyagonal uzunluğunu göstermektedir. Aynı şekildeki (h_1) mafsaldan mafsala kolon boyunu, (h_2) yalıtım katı tavan kirişinin altı ile temel üstü arasındaki mesafeyi, (l_1) yay kutusunun mafsaldan mafsala yatay düzlemdeki uzunluğunu, (l_2) ise mafsaldan mafsala kolonlar arasındaki yatay mesafeyi (1 ve 2 aksları arasındaki uzunluk) ifade etmektedir.

Yalıtım katında çekme ve itme durumlarında diyagonal boylarda ortaya çıkacak boy uzama ve kısalmaları ($\pm\Delta d$ ve $\pm\Delta p$) ile düşey çökme (Δy) Şekil 2.14’de verilen geometrik uygunluk ilişkileri ile tayin edilebilmektedir.



Şekil 2.14 : Sismik yalıtım katının geometrik uygunluk ilişkileri.

2.4.3 Bağımsız sismik yalıtım katının statik deneyleri

Sarsma masası üzerindeki dinamik sistem deneylerine başlamadan önce, bağımsız yalıtım katının genel davranışının anlaşılması amacıyla, statik deneylerinin yapılması uygun görülmüştür. Bu amaçla, $\frac{1}{4}$ ölçekli 3 katlı sismik yalıtım sistemli modelin, sadece sismik yalıtım katı önceden imal edilerek laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.15). Bağımsız izolatör katının bu deneylere ait atölye imalat resmi de Ek A'da yer almaktadır. Dinamik deneylerde kullanılacak orijinal sismik yalıtım katı modeli üzerinde, statik deneylerin gerçekleştirileceği mevcut deney çerçevesinin içine sığdırabilmek için, bu deneylere mahsus bazı ilave düzenlemeler de yapılmıştır. Bu amaçla, iki adet çaprazlı çerçevenin orijinalinde eksenden eksene 1000 mm olan ara mesafesi 390 mm'ye düşürülmüş, taban kirişlerinin uzunlukları kısaltılmıştır.



(a)



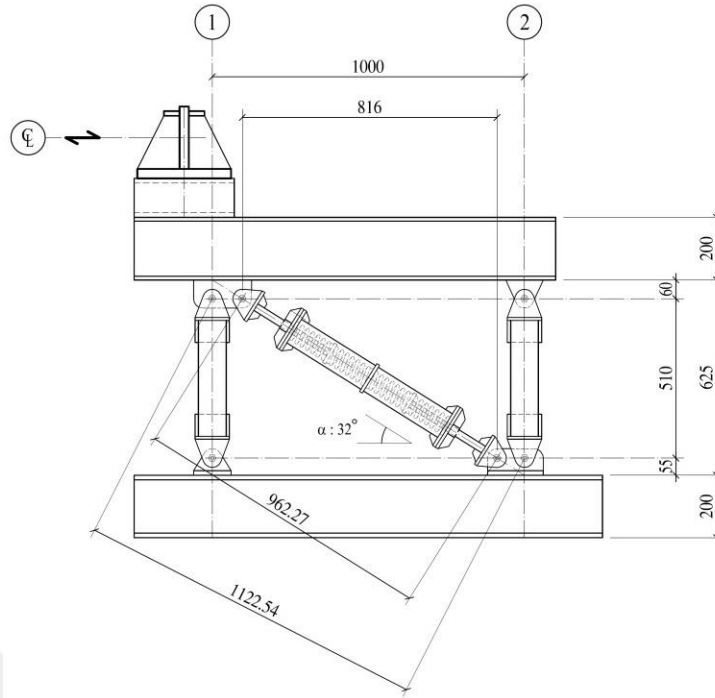
(b)

Şekil 2.15 : Statik deneylere ait bağımsız sismik yalıtım katı numunesi.

Bu ilave düzenlemeler, bağımsız yalıtım katının Şekil 2.15'deki deney modeline ait fotoğraflardan izlenebilmektedir.

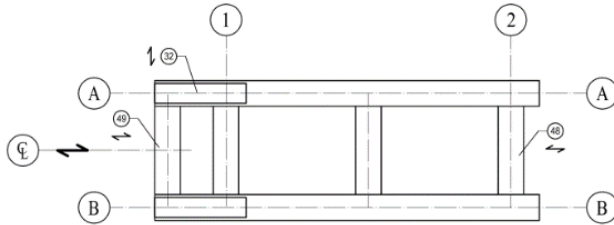
Bağımsız sismik yalıtım katının deney modelinin geometrisi Şekil 2.16'da verilmektedir.

Ayrıntılı geometrisi Şekil 2.11a' da verilen yay kutusunun yatayla yaptığı açı $\alpha=32^\circ$, iki ucu mafsallı kolonların mafsaldan mafsala uzunluğu $h=510$ mm, boru kolonların çap ve et kalınlıkları da sırasıyla 88.9 mm ve 4 mm'dir. Yay kutusunun aksenal rijitliği, Bölüm 2.3.3'de hesaplandığı şekilde, $K=110$ kN/m (N/mm)'dir.



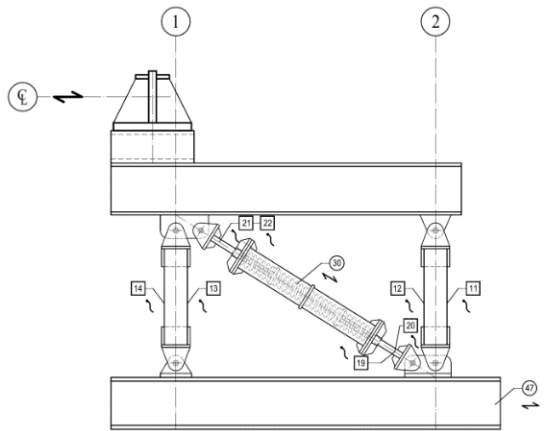
Şekil 2.16 : Sismik yalıtım katı deney numunesi (Tüm ölçüler mm dir).

Bağımsız sismik yalıtım katını temsil eden deney modeli, çapraz yay kutularını da içeren iki adet özdeş çerçeveden oluşmaktadır (Şekil 2.17b, 2.17c). Çerçeveler üst tabliye kotunda rijit kirişler ile birbirine bağlanmaktadır (Şekil 2.17a).

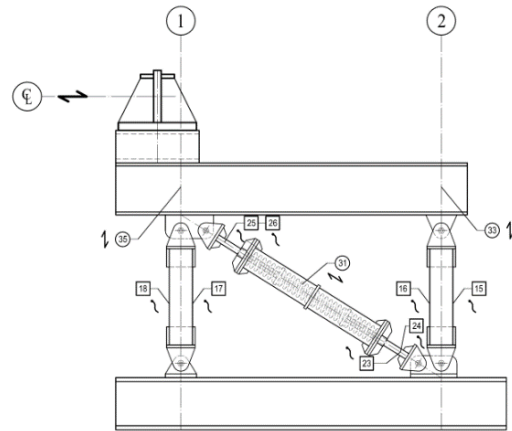


Kare ve yuvarlak içine alınmış numaralar şekildegıştırme ve yerdegıştırme ölçerleri ifade etmektedir.

(a) Numunenin üstten görünüşü



(b) B aksı görünüşü



(c) A aksı görünüşü

Şekil 2.17 : Şekildegıştırme ve yerdegıştırme ölçerleri de içeren deney düzeneği.

Tüm kolonların orta yüksekliğinde karşılıklı yüzlerde olmak üzere ikişer adet, yine her bir yay kutusunun iki ucundaki silindirik uç piston boruları üzerinde karşılıklı ikişer adet olmak üzere toplam 16 adet FLA3-11-3L tipi şekil değiştirme ölçer numune üzerinde konumlandırılmıştır (Şekil 2.17b, 2.17c). Üst tablaya, yükleme düzlemindeki yer değiştirmeleri ölçmek üzere iki adet SDP200'lük yatay, iki adet de düşey doğrultuda konumlanmış CDP50'lik, olası düzleme dik yatay yer değiştirmeleri ölçebilmek için de bir adet CDP50'lik olmak üzere toplam 5 adet yer değiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Sabit alt mesnette olası kayma hareketini ölçmek üzere bir adet CDP50'lik yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. Her iki çapraz yay kutusu üzerinde de birer adet SDP100'lük yer değiştirme ölçer bulunmaktadır (Şekil 2.17).

Deney numunesi reaksiyon çerçevesine taban kirişlerinin arasından geçirilen bulonlar ile rijit olarak bağlanmıştır. Reaksiyon çerçevesi içinde yer alan deney numunesinin kolonları ve üst tabliyesi yeşil renk, çapraz yay kutuları da sarı renk ile boyalıdır (Şekil 2.18).



(a) $\Delta=50$ mm itme durumu



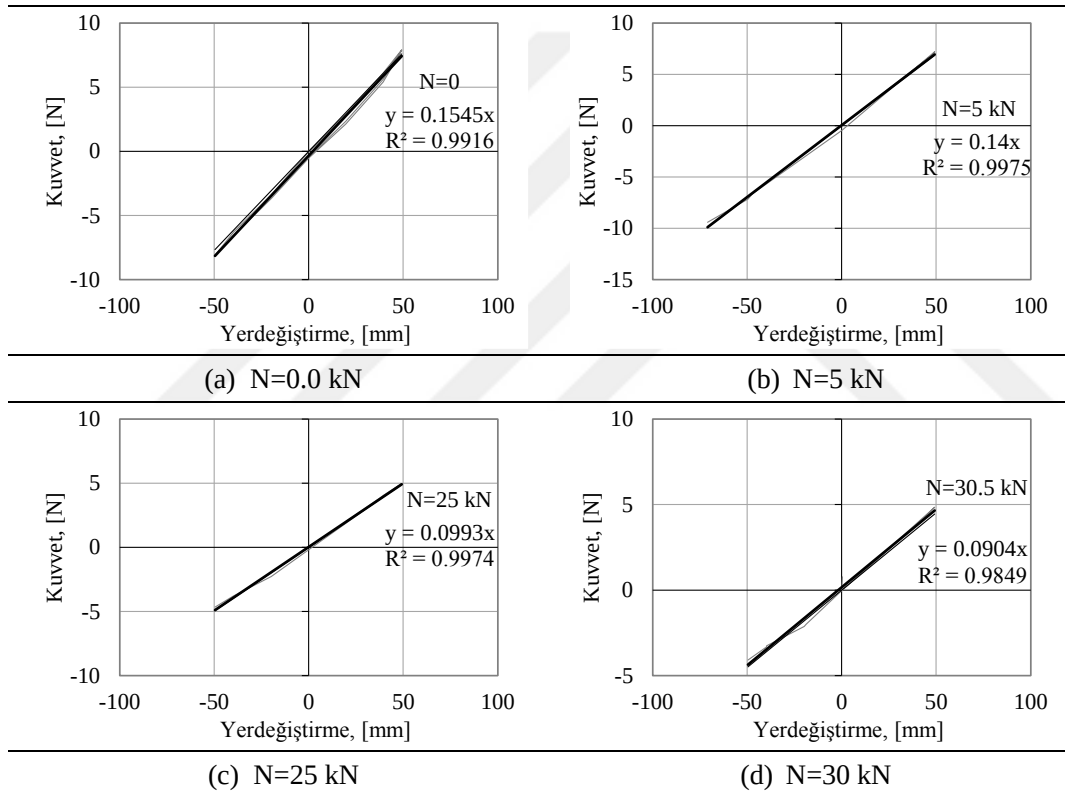
(b) $\Delta=50$ mm çekme durumu

Şekil 2.18 : 30 kN düşey yük etkisinde gerçekleştirilen statik deney.

Düşey kolonlar ve çapraz yay kutuları, alt ve üst rijit kirişlere düzlem mafsalar ile bağlıdır. Bölüm 2.4.1'de sismik yalıtım katının mafsallardaki sürtünme gözönüne alınmaksızın hesaplanan teorik I. ve II. mertebe yatay rijitlikleri ile deneylerden elde edilecek değerlerin sağlıklı karşılaştırması amacıyla, sürtünmenin etkisini en aza indirmek üzere mafsallı bağlantıyı sağlayan bulonlar pul kullanılmadan ve somunlar sıkılmadan yerlerine yerleştirilmiştir. Ayrıca bulonların etrafı bir miktar yağlanmıştır. Hızlara bağlı olarak değişiklik gösterdiği Constantinou ve diğ. (1990a) tarafından ortaya konulan sürtünmenin, sönüm ve rijitlik üzerindeki etkilerinin, dinamik masa deneylerinde incelenmesi daha uygun görülmüştür.

Deneylerde düşey yükler, numune tabliyesi üzerine serbest yerleştirilen çelik kütleler ile oluşturulmuştur. Numunenin kararlılığının korunabilmesi için en fazla 30 kN ilave ağırlığa çıkılabilmektedir. STEELab’da bulunan servo hidrolik kontrollü DARTEC vereni kullanılarak gerçekleştirilen deneyler; 0.0 kN, 5.0 kN, 25.0 kN, 30.0 kN olmak üzere dört farklı düşey yük seviyesi için tekrarlanmıştır. Her deneyde numuneye ± 5 mm artımlarla ± 50 mm.’ye kadar tekrarlı yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır. Düşey yük 30.0 kN iken, 50 mm itme ve 50 mm çekme durumlarına ait numunenin şekildeğiştirmiş halleri sırasıyla, Şekil 2.18a ve 2.18b ’de verilmiştir.

Deneyler sonunda dört farklı düşey yük seviyesi için doğrusal elastik formda elde edilen kuvvet - yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 2.19’da verilmektedir.



Şekil 2.19 : Sismik yalıtım katının kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri.

Deneyler tamamlandığında numune üzerinde artık kuvvetler gözlenmemiştir. Şekil 2.19’deki doğruların yalıtım katının yatay rijitliğini ifade eden eğimleri, düşey yük seviyesi arttıkça düşmekte olup, 0.0 kN, 5.0 kN, 25.0 kN, 30.0 kN düşey yük seviyeleri için elde edilen değerler sırasıyla 0.155, 0.140, 0.099 ve 0.090 kN/mm’ye karşılık gelmektedir. Düşey yük artışı ile oluşan yatay rijitliklerdeki bu düşüş, düşey yükün ikinci mertebe (P- Δ) etkisi olarak ortaya çıkmaktadır.

2.4.4 Deney sonuçlarının analitik olarak doğrulanması

Dört farklı düşey yük düzeyi için deneyler ve analitik hesaplardan elde edilen yatay rijitlikler Çizelge 2.2’de yer almaktadır. Çizelgede; yay kutularının yatayla yaptığı açı $\alpha=32^\circ$, kolonların iki ucundaki mafsaldan mafsala olan mesafeye karşı gelen sismik yalıtım katı yüksekliği $h=510$ mm ve iki adet yay kutusunun toplam eksenel rijitliği olarak da $K=2 \times 110=220$ kN/m değerleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2 : Deneyssel ve analitik olarak hesaplanan yatay rijitlikler.

N	Deneyssel	Analitik	Görelî Farklar
	$K_x=P/\Delta$	$K_x=K\cos^2\alpha-N/h$	
[kN]	[kN/m]	[kN/m]	%
(1)	(2)	(3)	(4)
0.0	157.0	158.2	0.8
5.0	140.0	148.4	6.0
25.0	100.0	109.2	9.2
30.5	91.0	98.3	8.0

Aynı çizelgenin (4). kolonundan, deneyssel ve analitik rijitlikler arasındaki en küçük ve en büyük görelî farkların sırasıyla %0.8 ve %9.2 olarak gerçekleştiği görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Sismik yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.

Deneyssel Sonuçlar				Analitik Sonuçlar	
DARTEC Pistonu Yatay Yerdeğiştirme	Çapraz Yerdeğiştirme Aks A	Çapraz Yerdeğiştirme Aks B	Düşey Yerdeğiştirme (aşağı)	Çapraz Yerdeğiştirme Δd	Düşey Yerdeğiştirme Δy
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
mm	mm	mm	mm	mm	mm
19.67	-15.30	-15.38	0.26	-16.83	0.38
39.34	-32.68	-33.28	1.30	-33.96	1.52
49.17	-41.80	-42.24	2.00	-42.64	2.37
39.34	-34.28	-33.66	1.30	-33.96	1.52
19.67	-16.94	-16.44	0.26	-16.83	0.38
-19.80	12.02	15.20	0.44	16.65	0.38
-39.68	28.38	31.10	1.75	33.08	1.55
-49.62	37.12	39.48	2.66	41.20	2.42
-39.67	31.00	33.40	1.73	33.07	1.55
-19.84	18.12	17.64	0.49	16.68	0.39

Deneyler sırasında ölçülen, çapraz yay kutularının eksenel boy değişimleri ile üst tablanın düşey yerdeğiştirme değerleri Çizelge 2.3’ün (2), (3) ve (4). kolonlarında yer almaktadır. Her bir yatay yerdeğiştirme adımı için Bölüm 2.4.2’de verilen geometrik

uygunluk ilişkileri ile hesaplanan çapraz yay kutusu eksenel boy değişimleri ve düşey yerdeğiştirmeler ise Çizelge 2.3'ün (5) ve (6). kolonlarında verilmektedir. Deney ve analitik hesaplardan elde edilen değerlerin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 2.4'ün (1) ve (2). kolonlarında deneye ait bir kuvvet-yerdeğiştirme çiftinden ulaşılabilen yay kutusu iç kuvveti, değişik yöntemler ile elde edilerek doğrulaması yapılmıştır.

Bunlardan ilkinde, yatay rijitlik $K_x = P/\Delta = 93.21$ kN/m olmak üzere, denklem 2.2 vasıtasıyla α açısı da göz önünde tutularak hesaplanan toplam çapraz yay kutusu kuvveti Çizelge 2.4'ün (4). kolonunda verilmiştir. Sistemde iki adet yay kutusu bulunduğundan, (4). kolondaki kuvvetin yarısı alınarak, aynı çizelgenin (5). kolonunda sunulan bir yay kutusuna ait kuvvete ulaşılmıştır. Çapraz yay kutularının her bir ucunda ikişer adet olmak üzere toplam dört adet şekildeğiştirme ölçerden okunan değerlere Çizelge 2.4'ün (7). kolonunda, bunlara ait ortalama değerler de (8). kolonunda yer verilmektedir.

Çizelge 2.4 : N=30.0 kN düşey seviyesi için yay kutusu kuvvetleri.

Δ	P	$K_x=P/\Delta$	$F=P/\cos\alpha$	$F_1=F/2$	Yay Kutusu	ε	$\varepsilon_{ortalama}$	$\sigma = \varepsilon.E$	$F = \sigma.A$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
[mm]	[kN]	[kN/m]	[kN]	[kN]		mμ	mμ	[kN/m ²]	[kN]
49.85	-4.65	93.21	-5.48	-2.74	1	15	-79	-16600	-2.97
						-173			
						-43			
						-97	-70	-14800	-2.64
					2	-194	-75	-15600	-2.79
						45			
						-54			
						-101	-78	-16400	-2.92

Ortalama şekildeğiştirmeler, yay kutusu malzemesinin elastisite modülü (E) ile çarpılarak Çizelge 2.4'ün (9). kolonunda yer alan gerilmelere ulaşılmakta, bu gerilmeler de uç pistonu kesit alanı ile çarpılarak, (10). kolondaki yay kutusu eksenel kuvvetleri elde edilmektedir. Hesaplamalar sırasında; yay kutusu malzemesinin elastisite modülü olarak $E=21 \times 10^7$ kN/m², yay kutusu uç pistonu kesit alanı olarak da $A=179$ mm² değerleri kullanılmıştır. Çizelge 2.4'ün (5). ve (10). kolonlarında farklı ölçüm yolları ile hesaplanan yay kutusu kuvvetlerinin birbirlerine oldukça yakın düştüğü görülmektedir.

İkinci yöntemde, deneyler sırasında yerdeğiştirme ölçerden elde edilen yay kutusu yerdeğiştirmesi ile yay kutusu eksenel rijitliğinden yararlanılmıştır. Çizelge 2.4'ün (1). kolonunda yalıtım katının 49.85 mm olarak verilen yatay yerdeğiştirmesine karşı gelen yay kutusu ortalama boy değişikliği, $\Delta_d = 43.0$ mm'dir. Çizelge 2.4'ün (3). kolonunda yatay rijitlik $K_x = 93.21$ kN/m olarak hesaplanmaktadır. Yalıtım katının toplam eksenel rijitliği $K = K_x / \cos^2 \alpha = 129.60$ kN/m olarak elde edilebilmekte, bu değerin yarısı olan 64.8 kN/m değeri de her bir yayın eksenel rijitliğine karşı gelmektedir. Buradan bir yay kutusunun hesaplanan eksenel rijitliği ile yay kutusu yerdeğiştirmesi çarpılarak, $F_1 = 64.8 \text{ kN/m} \times 43 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.78$ kN yay kutusu eksenel kuvveti elde edilmiştir. Bu değerin de Çizelge 2.4'ün (5). ve (10). kolonlarında yer alan değer ile uyumlu olduğu görölmektedir.

Son doğrulama yönteminde, Çizelge 2.4'ün (1). kolonunda 49.85 mm olarak verilen yalıtım katı yatay yerdeğiştirmesine karşı gelen ve Şekil 2.13'deki geometrik uygunluk ilişkileri kullanılarak hesaplanan yay kutusu eksenel boy değişimi $\Delta_d = 43.24$ mm ile Çizelge 2.2'nin (3). kolonunun son satırında 98.3 kN/m olarak verilen analitik yatay rijitlik büyüklüklerinden faydalanılmıştır. Sisteme ait toplam yatay rijitlik değerinin yine yarısı alınarak, bir adet yay kutusunun yatay rijitliği $K_x = 49.15$ kN/m olarak ulaşılmakta, bu yatay rijitlik değeri kullanılarak yay kutusunun eksenel rijitliği $K = K_x / \cos^2 \alpha = 68.35$ kN/m elde edilmektedir. Yay kutusunun hesaplanan eksenel rijitliği ile yerdeğiştirme miktarı çarpılarak, yay kutusu kuvveti $F_1 = 68.35 \text{ kN/m} \times 43.24 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.95$ kN olarak elde edilmiştir. Bu değer ile Çizelge 2.4'ün (5) ve (10). kolonlarında yer alan kuvvetler de çok yakın düşmüştür.

2.5 Değerlendirme ve Yorumlar

Önerilen sismik yalıtım sisteminin temel elemanlarını oluşturan doğrusal yaylar, yay kutusu ve bağımsız sismik yalıtım katının statik deneyleri ve ilgili analitik hesapları içeren bu bölümdeki çalışmaların değerlendirmesiyle ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilecektir.

- Doğrusal elastik davranış gösteren basık helisel yayların teorik eksenel rijitlikleri, deneylerden elde edilen eksenel rijitlikler ile uyumludur.

- Özdeş çekme ve basınç rijitliğine sahip olacak biçimde geliştirilen özgün yay kutusunun analitik olarak hesaplanan eksenel rijitliği, statik deneylerden elde edilen eksenel rijitlik ile birebir örtüşmektedir.
- Mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmaksızın hesaplanan I. ve II. mertebe teorik yatay rijitlikleri ve yay kutusu iç kuvvetleri, mümkün olduğunca sürtünmeden arındırılarak gerçekleştirilen statik deneylerden elde edilen değerler ile yeterli uyum içerisinde.
- Bağımsız sismik yalıtım katının statik deneylerinden elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmeleri ile çapraz yay kutularının eksenel boy değişimleri, geometrik uygunluk ilişkileri ile hesaplanan değerlerle uyumludur.
- Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin ana bileşenleri üzerinde gerçekleştirilen statik deneylerden elde edilen olumlu performanslar, sarsma masası üzerinde gerçekleştirilecek dinamik deneylere geçilebileceğini göstermektedir.

3. SİSMİK YALITIMLI VE ANKASTRE MESNETLİ NUMUNELERE AİT SARSMA MASASI DENEYLERİ VE KARŞILAŞTIRMALAR

3.1 Giriş

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin gösterilmesi amacıyla, sarsma masası üzerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Sarsma masası üzerindeki deneyler önerilen sismik yalıtımlı sistemi içeren numune ve ankastre mesnetli numune için aynı deprem kayıtları kullanılarak ayrı ayrı icra edilmiştir. Deney sonuçları, sismik yalıtımlı model ve ankastre mesnetli model için kurulan hesap modelleri üzerinde, benzer deprem kayıtları etkisinde gerçekleştirilen, geometrik bakımdan doğrusal olmayan davranışın da göz önünde tutulduğu zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sarsma masası özellikleri, deney numunelerine ait bilgiler, kullanılan deprem kayıtlarının seçimi, gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçlar bu bölümde sunulmaktadır. Deney sonuçlarını kontrol etmek üzere gerçekleştirilen sayısal hesaplar ve bu hesaplardan elde edilen sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılmaları ve elde edilen bulguların genel değerlendirilmesi de bu bölüm içerisinde yer almaktadır.

3.2 Sarsma Masası Özellikleri

Dinamik deneylerin gerçekleştirildiği STEELab'da bulunan ARI-I sarsma masası tek doğrultuda çalışmaktadır. Masanın plandaki boyutları 2.35m×2.35m dir (Şekil 3.1). Hidrolik verenin piston hızı 1m/sn, yatay yerdeğiştirme kapasitesi ±325 mm'dir. Masanın etkin ivme kapasitesi 1.0g iken, devrilme momenti kapasitesi 320 kNm, sürtünme kaybı ise %1.5 civarındadır. ARI-I Sarsma masasının yerleşim planı EK A'da yer almaktadır.



Şekil 3.1 : ARI-I Sarsma Masası.

3.3 Sarsma Masası Deney Programı

Sarsma masası üzerinde önce $\frac{1}{4}$ ölçekli ve üç katlı sismik yalıtım sistemli numunenin seçilecek farklı deprem kayıtları etkisindeki deneylerinin gerçekleştirilmesi, ardından da aynı deprem kayıtları için, ankastre mesnetli deney numunesine ait deneylerin yapılması planlanmıştır.

3.3.1 Deney numunelerinin üretimi

Bölüm 2.4’de ayrıntıları verildiği biçimde statik yükleme deneyleri gerçekleştirilen Şekil 2.15’deki bağımsız sismik yalıtım katı modeli, deneylerin tamamlanmasını takiben, bu kez $\frac{1}{4}$ ölçekli ve üç katlı sismik yalıtım sistemli modelin yalıtım katını oluşturmak üzere, önceden hazırlanmış atölye imalat resimlerine göre, laboratuvarda revize edilmiştir (Şekil 3.2a,3.2b). Ardından üç katlı üst yapı, yalıtım katının üzerine monte edilerek $\frac{1}{4}$ ölçekli, üç katlı ve üç boyutlu sismik yalıtım sistemli deney modeli hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.2c). Düzlem mafsallı birleşimlere sahip sismik yalıtım katlı deney numunesinin imalat resmine ait bir görünüşü EK A’da verilmektedir.



(a)



(b)

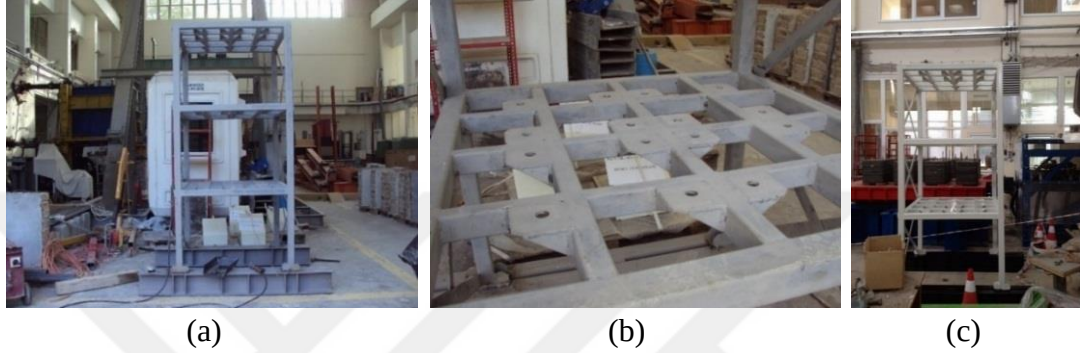


(c)

Şekil 3.2 : $\frac{1}{4}$ ölçekli sismik yalıtımlı numune üretimi.

$\frac{1}{4}$ ölçekli, üç katlı ankastre mesnetli deney numunesinin oluşturulması aşamalarına ait bazı fotoğraflar da Şekil 3.3’de sunulmaktadır. Ankastre mesnetli deney numunesinin atölye imalat resimlerine ait bir görünüşü EK A’da yer almaktadır.

Şekil 3.2c ve Şekil 3.3c’de sismik yalıtım sistemli ve ankastre mesnetli deney numunelerinin tabanlarında yer alan siyah renkli 2NPU 200 çelik kirişler, aralarındaki boşluklardan geçirilen bulonların sarsma masası üzerinde yer alan deliklerden geçirilerek masaya sabitlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

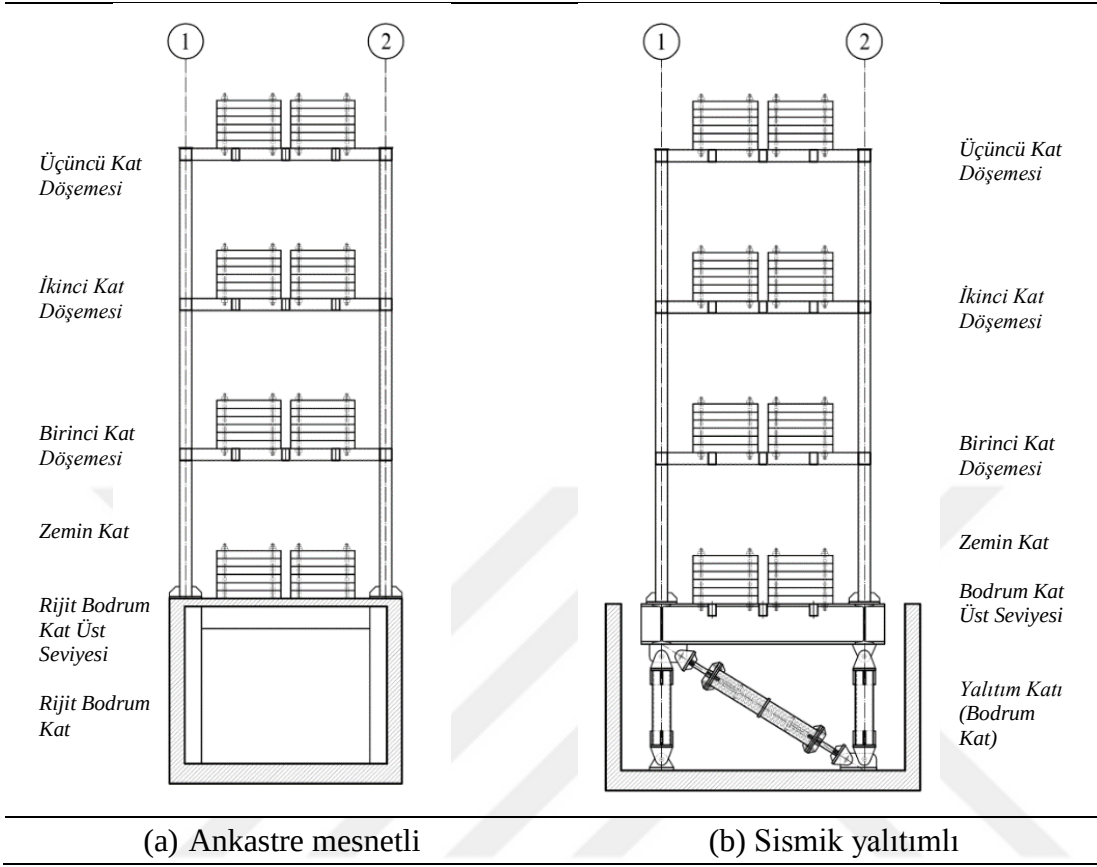


Şekil 3.3 : $\frac{1}{4}$ ölçekli ankastre mesnetli numune üretimi.

3.3.2 Deney numunelerinin geometrik özellikleri ve malzeme bilgileri

Deney modellerinin seçiminde sarsma masasının kapasitesi de göz önünde tutularak, sismik yalıtım katının üzerine yerleştirilecek üst yapının üç tam kat olmasına karar verilmiştir. Bu durumda sarsma masası üzerindeki deneylerde sismik yalıtımlı numune ile ankastre mesnetli numunenin kat sayıları farklı gözükmesine karşın, her iki sistemin prototiplerinde birer adet bodrum kat olması dolayısıyla kat sayısı bakımından, bodrum kat + üç adet üst kat olmak üzere toplam dörder kat olarak özdeşleştirilir (Şekil 3.4). Şekil 3.4a’da verilen ankastre mesnetli numunenin prototipinden görüleceği üzere, bodrum katın etrafı rijit betonarme perdeleri ile çevrilidir. TDY (2007)’de de belirtildiği biçimde, rijit bodrum kata sahip binalarda bodrum kat kütlelerinin üst katlar ile birlikte titreşime katılmayacağı dolayısıyla rijit bodrum katın varlığının yer hareketleri sırasında üst katların davranışını değiştirmeyeceği bilinmektedir. Ankastre binanın davranışına etkili olmayacak rijit bodrum kat, aynı zamanda sarsma masası üzerindeki ağırlığı da artıracığından, deneyler sırasında ankastre mesnetli modelin altına betonarme bir rijit bodrum kat ilave edilmesi anlamlı görülmemiştir. Diğer taraftan Şekil 3.4b’deki sismik yalıtımlı sistemde yer alan betonarme bodrum çevre perdeleri ise sismik yalıtım katının yanal yerdeğiştirmelerine izin verecek bir mesafe kadar sistemden ayrı teşkil edileceğinden, sismik yalıtımlı model yapı ile bir etkileşimi

söz konusu olmayacaktır. Bu sebeple sismik yalıtımlı deney numunesine ait modelde de, betonarme çevre perdelerine yer verilmemiştir.

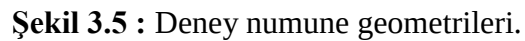


Şekil 3.4 : Deney numunelerinin prototip modelleri.

Kat sayısı bakımından özdeşlikleri yukarıda ifade edilen ve Şekil 3.4’de gösterilen ankastre mesnetli ve sismik yalıtım sistemli prototip yapıların, sarsma masası üzerinde deneyleri yapılacak modellerine ait geometri Şekil 3.5’de verilmektedir. Deney modellerinin kat sayısı, üst katlar esas alınarak, üç katlı ankastre mesnetli ve üç katlı sismik yalıtım sistemli olarak ifade edilmektedir.

$\frac{1}{4}$ ölçekli, üç katlı, üç boyutlu ve moment aktarabilen kaynaklı birleşimlere sahip çelik çerçevelerden teşkil edilmiş olan ankastre mesnetli numune ile yine $\frac{1}{4}$ ölçekli ve aynı özellikli üst yapıya sahip sismik yalıtımlı numunelerin her iki doğrultuda 1.0’er m’lik açıklıkları olup, kat yükseklikleri 0.75 m’dir.

Modellerin döşeme düzlem içi rijitlikleri iki doğrultuda da tertiplenmiş ikincil kirişler vasıtasıyla sağlanmaktadır. Kutu kesitli kolonların, ana çerçeve kirişleri ve tali kirişlerin kesit özellikleri Şekil 3.5a’da gösterilmektedir.



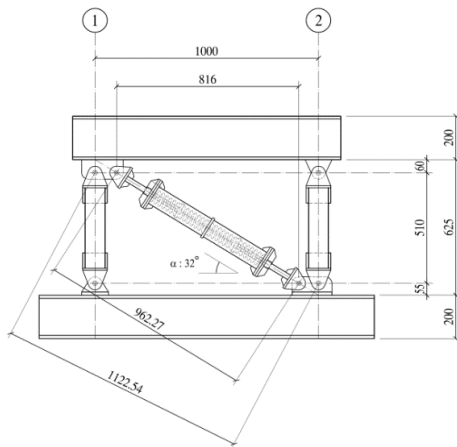
41

Çizelge 3.1 : Çeşitli büyüklüklere ait ölçek katsayıları.

Büyüklük	Sembol	İlişki	Ölçek Katsayısı
Boyut	l	λ_l	4.0
Elastisite Modülü	E	λ_E	1.0
İvme	a	$\lambda_a = 1/\lambda_l \lambda_E / \lambda_\rho$	1.0
Hız	v	$\lambda_v = (\lambda_l \lambda_a)^{1/2}$	2.0
Kuvvet	F	$\lambda_f = \lambda_E \lambda_l^2$	16.0
Gerilme	σ	$\lambda_\sigma = \lambda_E$	1.0
Şekil Değiştirme	ε	$\lambda_\varepsilon = 1.0$	1.0
Alan	A	$\lambda_A = \lambda_l^2$	16.0
Hacim	V	$\lambda_v = \lambda_l^3$	64.0
Atalet Momenti	I	$\lambda_I = \lambda_l^4$	256.0
Yoğunluk	ρ	$\lambda_\rho = \lambda_E / (\lambda_l \lambda_a)$	0.25
Kütle	m	$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_l^3$	16.0
Momentum	i	$\lambda_i = \lambda_f^3 / (\lambda_l \lambda_a)^{1/2}$	32.0
Enerji	e	$\lambda_e = \lambda_E \lambda_l^3$	64.0
Zaman	t	$\lambda_t = (\lambda_l / \lambda_a)^{1/2}$	2.0
Frekans	ω	$\lambda_\omega = 1/\lambda_t (\lambda_E / \lambda_\rho)^{1/2}$	0.5
Yer İvmesi	g	$\lambda_g = 1.0$	1.0
Yer Çekimi Kuv.	fg	$\lambda_{fg} = \lambda_\rho \lambda_l^3$	16.0
Sönüm	ζ	$\lambda_\zeta = 1.0$	1.0

Deneyler tek eksenli sarsma masası üzerinde gerçekleştirildiğinden, her iki numunenin de tek eksende çalışmasını sağlamak üzere, üç boyutlu çerçevelerin itme düzlemine dik doğrultudaki rijitlikleri 1 ve 2 aksları üzerinde tertiplenen düşey çaprazlar vasıtasıyla artırılmıştır (Şekil 3.5a). Bu çaprazların yükleme doğrultusundaki kalınlıkları 3 mm olarak seçilerek sistemin düzlem içi eğilme rijitliği üzerindeki etkileri önemsiz hale getirilmiştir.

Sismik yalıtımlı sistemin yalıtım katındaki yay kutuları, Bölüm 2.3.3’de çalışılan ve Şekil 2.11a’da verilen yay kutusudur. Deneylerde kullanılan sismik yalıtım katının ayrıntılı geometrisi de Şekil 3.6a’da sunulmaktadır.



(a) Yalıtım katı geometrisi

(b) Yalıtım katı görünümü

Şekil 3.6 : Sismik yalıtım katı.

Yay kutularının yatayla yaptığı açı $\alpha = 32^\circ$ dir. Yalıtım katının boru kesitli kolonlarının dış çapı 88.9 mm, et kalınlıkları da 4 mm' dir. Yalıtım katının yüksekliği $h=510$ mm, her bir yay kutusunun eksenel rijitliği de $K=110$ kN/m' dir. Belirtilen özellikleri içeren yalıtım katının fotoğrafı Şekil 3.6b' de verilmiştir.

Ankastre mesnetli ve sismik yalıtım katlı numunelerin sarsma masası üzerindeki görüntüleri Şekil 3.7' de sunulmaktadır.



(a) Ankastre mesnetli numune



(b) Sismik yalıtım katlı numune

Şekil 3.7 : Sarsma masası üzerinde yer alan deney numuneleri.

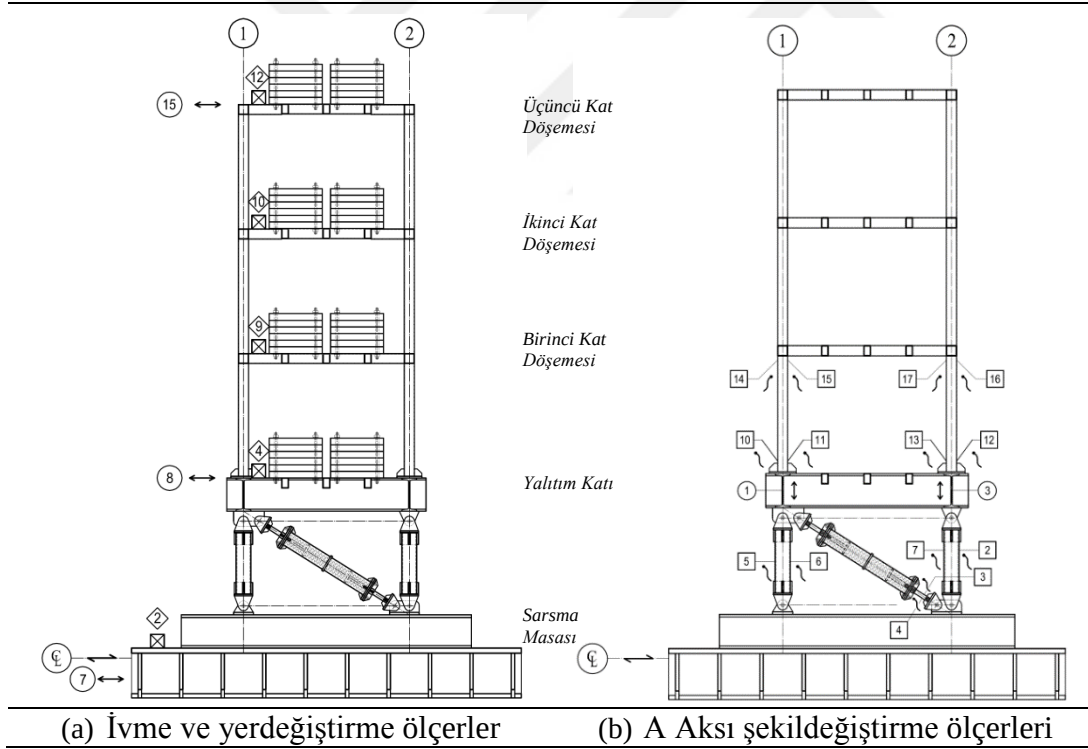
Sismik yalıtımlı numunenin sarsma masası deneylerine başlanılmadan önce, yalıtım katının mafsallarındaki bulonların somunları pul da kullanılarak el gücü ile tamamıyla sıkılmıştır.

Sismik yalıtım katı ve üç katlı üst yapıda kullanılan yapısal çelik malzemesi St 37-2 olup, malzemenin elastisite modülü ve akma gerilmesi değerleri sırasıyla, $E=21 \times 10^4$ N/mm², $f_{yk}=240$ N/mm²'ye karşı gelmektedir.

3.3.3 Deney numunelerine ait ölçüm düzenekleri

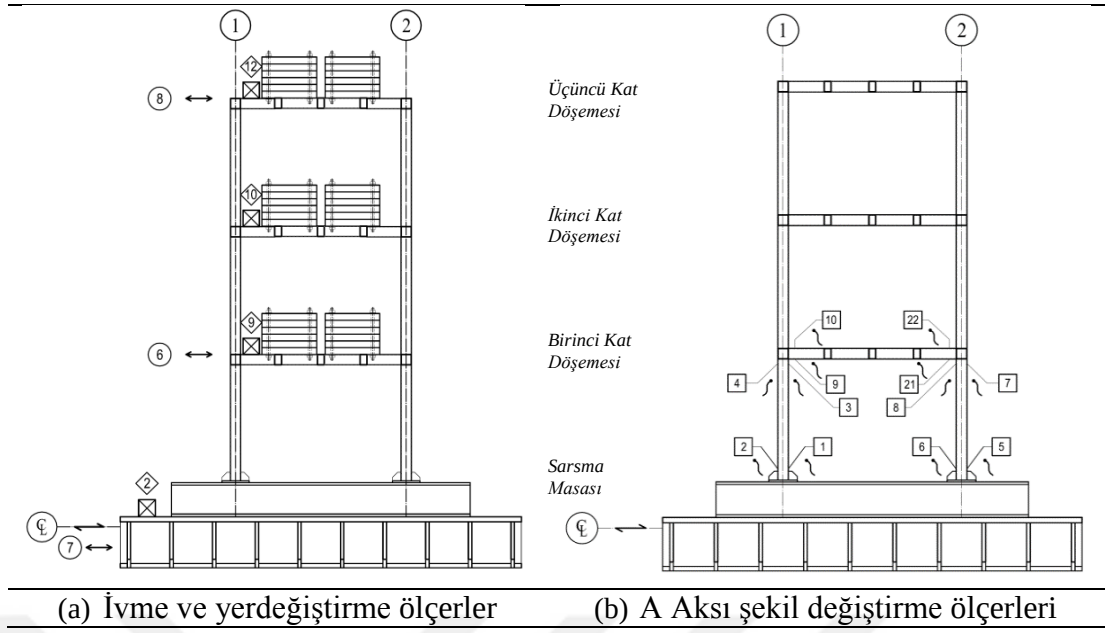
Deney numunelerinin her katına sarsma masasının üzeri de dahil olmak üzere, üç eksenli ve $\pm 2g$ kapasiteli ivme ölçerler yerleştirilmiştir. Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numunelere yerleştirilen ivme ölçerlerin konumları, Şekil 3.8a ve 3.9a'da eşkenar dörtgenlerle verilmektedir. Yatay yerdeğiştirmeler, her iki numune için sarsma masası üzerinde ve numunelerin tepe kotlarında ölçülmüştür. Bunlara ilave olarak sismik yalıtımlı sistemde yalıtım katı üzerinde, ankastre mesnetli sistemde de birinci kat döşemesinde birer adet ilave yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Sarsma masası üzerindeki yerdeğiştirme ölçer LPT 700, numuneler üzerindeki diğer iki yerdeğiştirme

ölçer ise LPT 1250'lik doğrusal yerdeğiştirme ölçerlerdir. Sismik yalıtımlı sistemin yalıtım katı üzerinde ayrıca iki adet SDP 100'lük düşey yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli sistemdeki yerdeğiştirme ölçerlerin konumları da Şekil 3.8a ve 3.9a'da daire içerisinde gösterilmektedir. Yalıtım katı üzerindeki iki adet düşey yerdeğiştirme ölçer konumlarına ise Şekil 3.8b'de yer verilmiştir. Sismik yalıtımlı numunenin yalıtım katının iki ucu mafsallı kolonlarının ortalarında iki adet, çapraz yay kutularının birer ucunda yine iki yüzde olmak üzere ikişer adet, zemin kat kolonlarının alt ve üst uçlarında da ikişer adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Ankastre mesnetli numunenin kritik zemin kat kolonlarının alt ve üst uçlarına yine iki yüzde olmak üzere ikişer adet, zemin kat tavan kirişlerinin her iki ucuna alt ve üst yüzde olmak üzere ikişer adet şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numuneye yerleştirilen akma sonrasında da ölçüm yapabilen şekildeğiştirme ölçerlerin konumları da sırasıyla Şekil 3.8b ve 3.9b'de kare içerisinde gösterilmektedir.



Şekil 3.8 : Sismik yalıtımlı sisteme ait ölçüm düzeneği.

Çizelge 3.1'de verilen ölçeklendirme kuralları uygulanarak ulaşılan zati ağırlıklara ilave uygulanacak kat kütleleri sismik yalıtım katı ve üst katlar için sırasıyla, 1.38 kNsn²/m ve 1.04 kNsn²/m dir. Ankastre mesnetli sistemin tüm katları için de kat kütlesi olarak 1.04 kNsn²/m değeri kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : Ankastre mesnetli numuneye ait ölçüm düzeneği.

Çelik kütleler, katlardaki ikincil kirişlerden teşkil edilen ızgara döşeme kirişleri üzerinde tertiplenen plakalardaki (Bkz. Şekil 3.3b) delikler ve kendi üzerindeki deliklerden geçirilen saplamalar vasıtasıyla sabitlenmiştir (Şekil 3.5).

3.4 Deprem Kayıtlarının Seçimi

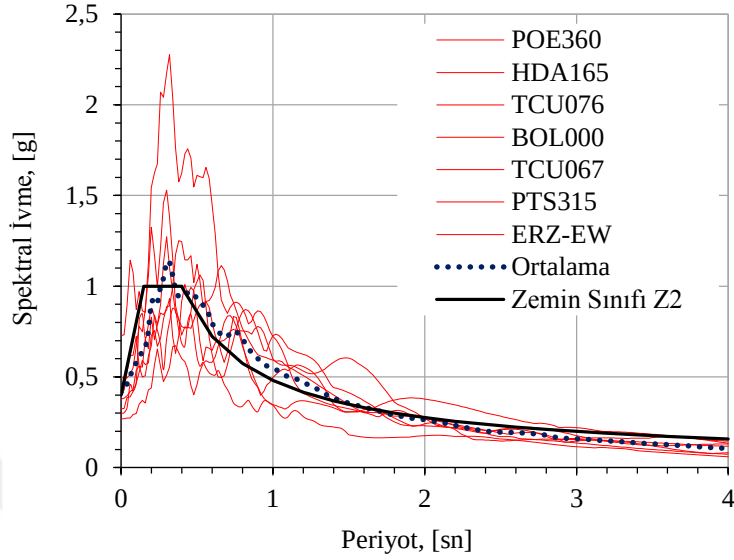
Çalışmanın deneysel ve sayısal bölümlerinde, PEER *Yer Hareketleri Veri Tabanından* dördü yakın fay, üçü uzak fay depremi olmak üzere seçilen yedi farklı deprem kaydı kullanılmıştır (Çizelge 3.2), (PEER NGA Database). Depremlere ait en büyük ivme (PGA) ve hızlar (PGV) Çizelge 3.2'nin son iki kolonunda verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Kullanılan deprem kayıtları.

Kayıt	Sembol	M_s	d [km]	PGA [cm/sn ²]	PGV [cm/sn]
Superstition Hills 11/24/1987 USGS 9400 Poe Road S.	POE360	6.60	11.20	294.3	32.8
Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU076 S.	TCU076	7.62	16.03	408.1	64.2
Duzce 12/11/1999 Bolu S.	BOL000	7.14	17.16	714.2	56.4
Loma Prieta 10/18/1989 Hollister Diff. Array S.	HDA165	7.10	45.10	263.9	43.9
Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU067 S.	TCU067	7.62	28.70	318.8	66.6
Superstition Hills 11/24/1987 USGS 5051 P. Test Site S.	PTS315	6.60	15.99	369.8	43.9
Erzincan 03/13/1992 Erzincan S.	ERZ-EW	6.90	8.97	486.6	64.3

Kullanılan deprem kayıtlarına ait elastik ivme spektrumları, bu spektrumların ortalaması ve TDY (2007)'de Z_2 zemin sınıfı için verilen elastik ivme spektrumu Şekil

3.10'da yer almaktadır. Elastik spektrumların ortalamasının, TDY (2007)'ye göre birinci derece deprem bölgelerinde inşa edilecek binaların tasarımında kullanılması gereken etkin yer ivmesi $PGA=0.4g$ ile uyumlu olduğu görülmektedir.

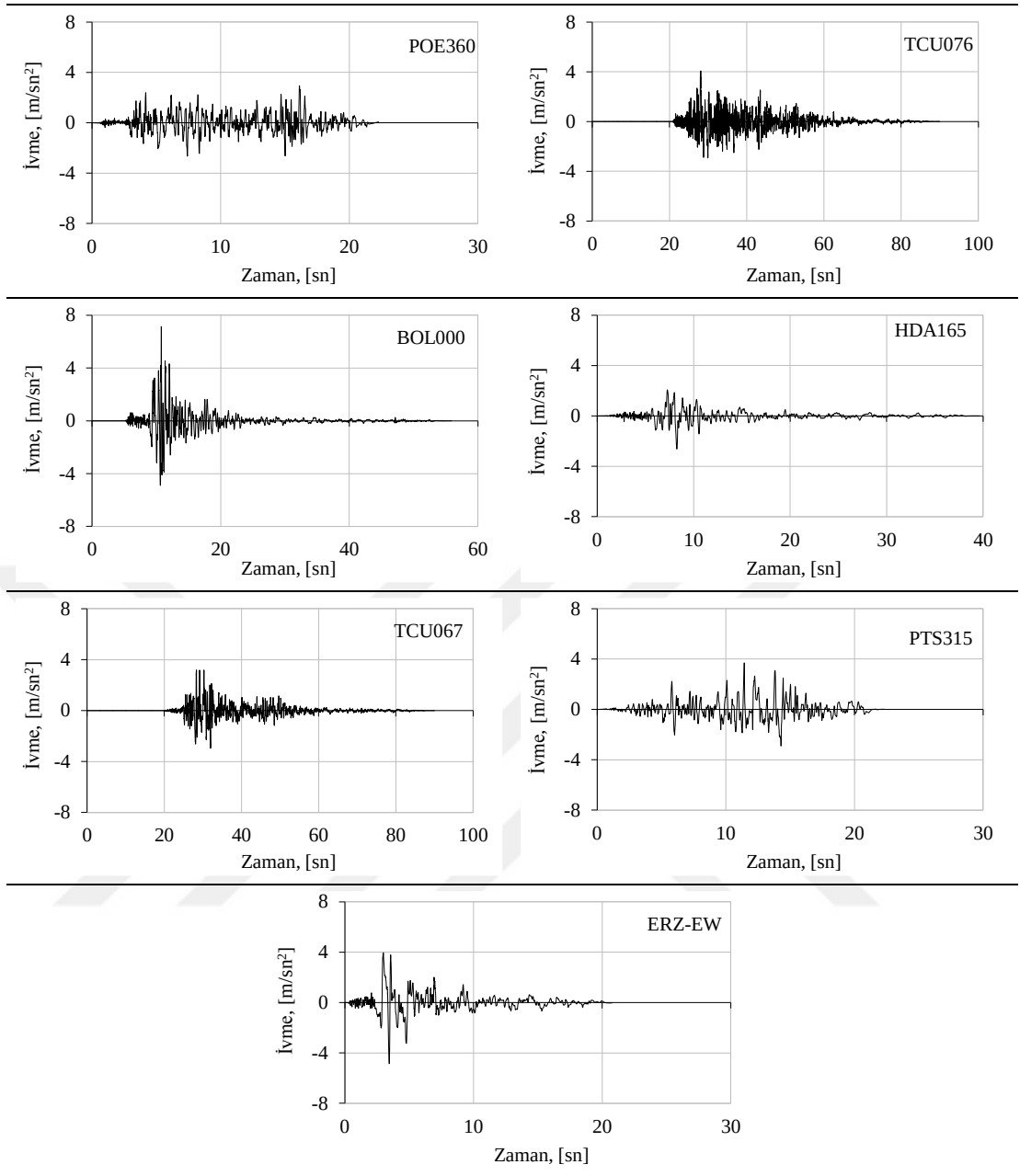


Şekil 3.10 : Elastik spektral ivme grafikleri.

Ayrıca, deprem kayıtlarına ait ortalama spektral ivme eğrisinin, TDY (2007)'de Z_2 türü zemin için tanımlanan spektral ivme eğrisinin üzerinde kaldığı görülmektedir.

Deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri Şekil 3.11'de verilmektedir.

Şekil 3.11 ve Çizelge 3.2'den görüleceği üzere, deney numunelerine uygulanan 7 farklı deprem kaydına ait en küçük etkin yer ivmesi HDA165 depreminde $PGA=0.264g$, en büyük yer ivmesi ise BOL000 depreminde, $PGA=0.714g$ değerlerine sahiptir. Ortalama etkin yer ivmesi değeri de $PGA=0.407g$ 'dir.



Şekil 3.11 : Kullanılan deprem kayıtlarına ait ivme-zaman grafikleri.

3.5 Sarsma Masası Deneyleri

Deney numuneleri ve uygulanacak deprem kayıtlarına ait yukarıda ayrıntıları verilen hazırlıkların tamamlanmasını takiben, sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli deney numunelerinin sarsma masası üzerindeki deneylerine geçilmiştir. Önce sismik yalıtımlı numune deneyleri ardından da ankastre mesnetli numune deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, öncelikle serbest titreşim karakteristiklerinin tayinine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli deney numunelerinin sarsma masası üzerindeki deneyleri sırasında, ilgili depreme numunelerin vereceği tepkileri anlamak ve tüm deney sürecini kontrol altında tutmak amacıyla, depremler sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 ölçekli olarak uygulanmıştır.

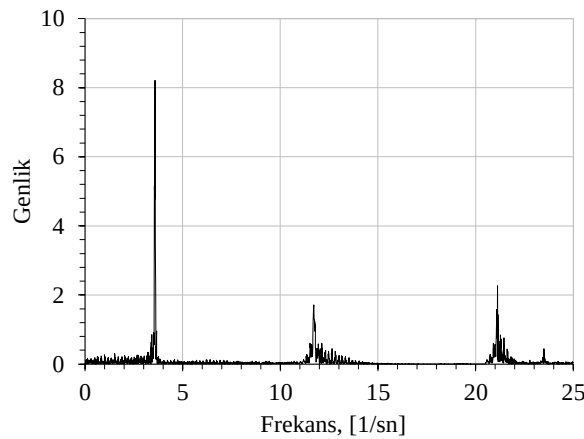
Numuneler ¼ ölçekli olarak üretildiklerinden, deprem kayıtlarının zaman büyüklüğü Çizelge 3.1'e göre 0.5 ölçek katsayısı ile azaltılmıştır.

3.6 Serbest Titreşim Karakteristikleri

Serbest titreşim karakteristiklerini tayin etmek üzere, öncelikle her iki numuneye *çekiç darbe* deneyleri uygulanmıştır. Ankastre mesnetli numunede olumlu sonuç alınan bu klasik deneyden sismik yalıtımlı sistem için beklenen sonuç alınamamıştır. Bunun üzerine sismik yalıtımlı numuneye *beyaz gürültü* ve *basamak fonksiyonu* yöntemleri de uygulanmıştır. Bu yöntemlere ait deneylerde sismik yalıtımlı numuneden alınan cevaplar Bölüm 3.6.2'de anlatılmaktadır.

3.6.1 Ankastre mesnetli deney numunesi

Ankastre mesnetli deney numunesi üzerinde birkaç kez tekrarlanan *çekiç darbe* deneylerinde ulaşılan birinci serbest titreşim frekansı $f=3.60$ Hz' dir (Şekil 3.12). Ankastre mesnetli numuneye ait çekiç deneylerinin hızlı Fourier dönüşümlerinden (FFT) elde edilen ilk üç frekansa ait pikler Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 : Ankastre mesnetli numunede serbest titreşim frekansları.

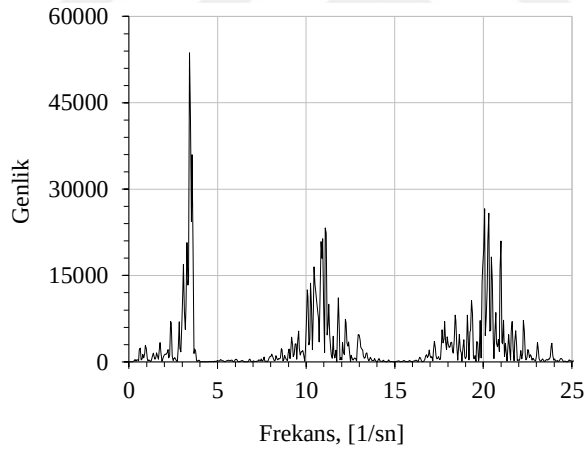
Ankastre mesnetli numuneye etkitilen yedi deprem kaydı için oluşturulan FFT'lerden elde edilen 1, 2 ve 3. frekans değerleri Çizelge 3.3'de verilmektedir. Çizelgeden

deprem zoru etkisinde elde edilen frekansların tüm depremlerde benzerlik gösterdiği görülmektedir.

Ankastre mesnetli numuneye ait ilk üç modu içeren ve tüm depremler için benzer olduğu görülen tipik bir FFT grafiğine de Şekil 3.13’de yer verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Ankastre mesnetli numune için FFT analizlerinden elde edilen frekanslar (Hz).

Deprem	f ₁	f ₂	f ₃
	Hz	Hz	Hz
POE360	3.45	11.32	20.80
TCU076	3.47	11.23	20.73
BOL000 %50	3.40	11.25	20.82
HDA165	3.47	11.93	20.75
TCU067	3.45	11.24	20.72
PTS315	3.42	11.42	20.89
ERZ-EW	3.41	11.52	20.65



Şekil 3.13 : Ankastre mesnetli numuneye ait FFT grafiği.

3.6.2 Sismik yalıtımlı deney numunesi

Sismik yalıtımlı deney numunesinin birinci doğal titreşim periyodu; yalıtım katının düzlem mafsallarındaki sürtünmeler göz önüne alınmaksızın, denklem 2.8 ile hesaplanan teorik ikinci mertebe yatay rijitliği de kullanılarak, sismik yalıtımlı sistemler için geçerli olan tek serbestlik dereceli sistem kabulü ile denklem 3.1’den elde edilebilmektedir.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_x''}} \quad (3.1)$$

Numunenin teorik ikinci mertbe yatay rijitliği sürtünme göz önünde tutulmadan denklem 2.8 kullanılarak, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$K_x^{II} = K \times \cos^2 \alpha - (N/h) = 220 \times 0.719 - (49.8/0.51) = 60.53 \text{ kN/m}$$

Eşitlikteki N yalıtım katı üzerindeki toplam ağırlık olup, numune üzerine yerleştirilen elik kütleler ile numunenin zati ağırlığının toplamından,

$$N = 13.8 + 10.4 \times 3 + 4.8 = 49.8 \text{ kN}$$

olarak elde edilmektedir.

K , α ve h parametreleri için Bölüm 3.3.2’de verilen değerler kullanılmıştır. Sistemde iki adet yay kutusu bulunduğundan, Bölüm 3.3.2’de bir yay kutusunun rijitliği olarak verilen 110 kN/m değerinin iki katı alınarak, $K = 2 \times 110 = 220 \text{ kN/m}$ değerı kullanılmıştır.

Sismik yalıtımlı sisteme ait hesaplanan teorik ikinci mertbe yatay rijitlik değerı denklem 3.1’de yerine konarak, numunenin birinci serbest titreşim frekans değerı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{4.98}{60.53}} = 1.80 \text{ sn}$$

$$f_1 = 1/T_1 = 0.56 \text{ Hz}$$

Sismik yalıtımlı numunenin serbest titreşim karakteristiklerini tayin etmek üzere gerçekleştirilen *eki darbese* deneylerinde; eki darbeleri ile sistemdeki yay kutularının alıştırılamaması ve yerdeğiştirme genliklerinin yeterince büyük olmayışı nedenleriyle yukarıda hesaplanan teorik serbest titreşim frekansına bu yöntemle ulaşılamamıştır.

Sistemin serbest titreşim frekansına ulaşmak için farklı frekanslardaki titreşimleri numuneye göndererek rezonans frekansını ayıklama amaçlı *beyaz gürültü* adı verilen ikinci bir deney grubu daha gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde; $\pm 3 \text{ mm}$ den başlanılarak $\pm 3 \text{ mm}$ adımlar ile arttırılan genliklerin $\pm 10 \text{ mm}$ ’nin üzerine çıkmasıyla numune aşırı sesli ve sert tepkiler vermeye başlamıştır. Bu sebeple deneylere bu adımda son verilmiştir. Beyaz gürültü deneyleri sonunda ulaşılabilen hakim frekans değerı $f = 0.93 \text{ Hz}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerın, denklem 2.6 ile hesaplanan birinci mertbe yatay rijitlik göz önünde tutularak denklem 3.1 ile ulaşılan $f = 1.08 \text{ Hz}$ ’lik frekans değerinin biraz altında kaldığı anlaşılmıştır. Bu deney yönteminde,

yatay yerdeğiştirme genliklerinin sistemi ikinci merteye rijitliğe ulaştıracak düzeye çıkarılması, deney güvenliği bakımından uygun bulunmadığından 0.56 Hz olarak hesaplanan teorik hakim titreşim frekansına yaklaşılamamıştır.

Yalıtımlı numunenin hakim serbest titreşim frekansına ulaşmak için *basamak fonksiyonu* adı verilen üçüncü bir deney daha geręekleřtirilmiřtir. Numune basamak biçimdeki fonksiyonlar ile uyarılmakta, uyarı sonrası sistem sükunete erişene kadar serbest titreşim kaydı alınmaktadır. Bu kayıt değerlendirilerek, frekanslar ile logaritmik azalım yaklaşımı kullanılarak kritik sönüm oranını elde edilebilmektedir. Ancak ± 10 mm den başlanarak, ± 30 mm'ye kadar aralıklar ile uygulanan yöntemde hareketin serbest titreşim bölümündeki yerdeğiştirme genlikleri istenilen düzeylerde olamadığından, bu yöntem ile de sismik yalıtımlı numunenin serbest titreşim frekansları ve kritik sönüm oranının tespit edilmesi mümkün olamamıştır.

Serbest titreşim ölçümünü amaçlayan bu deneyler sonunda, *ęekię darbesi*, *beyaz gürültü* ve *basamak fonksiyonu* gibi geleneksel yöntemlerin, ankastre mesnetli sistemin serbest titreşim frekansları ve kritik sönüm oranlarının tayin edilmesinde yeterli olduğu görülmüştür.

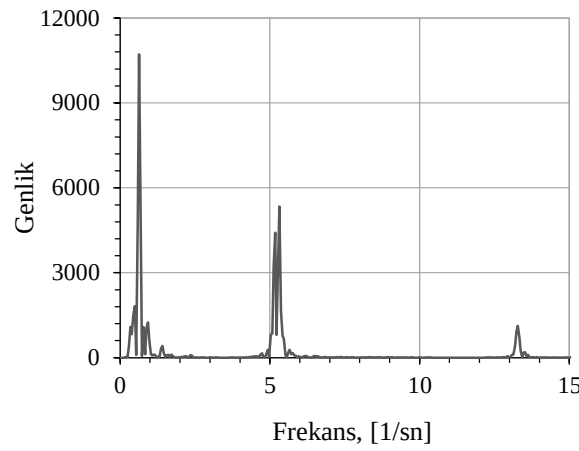
Sismik yalıtımlı sistem için uygulanan depremler sırasında oluşturulan FFT'lerden, temel titreşim frekanslarının 0.58 Hz ile 0.70 Hz arasında değiştiği anlaşılmıştır (Çizelge 3.4). En düşük frekans değeri olarak elde edilen 0.58 Hz'in mafsallardaki sürtünmeler göz önüne alınmadan, yalıtım katının teorik ikinci merteye yatay rijitliği kullanılarak hesaplanan 0.56 Hz değerinin de biraz üzerinde olduğu görülmektedir. Frekans değerlerinde, depremden depreme sınırlı bir aralıkta ortaya çıkan bu değişikliğin muhtemel sebepleri, mafsallardaki sürtünme nedeniyle ortaya çıkan rijitlik artışı ile deprem etkisinde oluşan yatay yerdeğiştirme genliklerinin doğurduğu farklı ikinci merteye etkilerinin olduğu görüşüne varılmıştır.

Çizelge 3.4 : Sismik yalıtımlı numune için FFT analizlerinden elde edilen frekanslar.

Deprem	f ₁ Hz	f ₂ Hz	f ₃ Hz
POE360	0.63	5.32	13.28
TCU076	0.60	5.28	13.27
BOL000	0.70	5.27	13.26
HDA165	0.63	5.26	13.25
TCU067	0.58	5.35	13.33
PTS315	0.59	5.25	13.28
ERZ-EW 75%	0.63	5.32	13.25

Sismik yalıtımlı sistemin FFT grafiklerine örnek olmak üzere, POE360 depremi için ilk üç moda ait frekansların yer aldığı FFT grafiğine de Şekil 3.14’de yer verilmektedir.

Diğer taraftan sismik yalıtımlı numune için yukarıda belirtilen sebepler dolayısıyla serbest titreşim deneylerinden anlamlı sönüm oranı elde edilememektedir. Bu nedenle, sismik yalıtımlı sistemin eşdeğer sönüm oranı; doğrudan deney verilerinin kullanıldığı enerji denge denklemi, dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri ve güç spektrumu yoğunluğundan (PSD) faydalanılarak uygulanan yarı bant genişliği yöntemi olmak üzere üç ayrı yol ile elde edilmiştir.



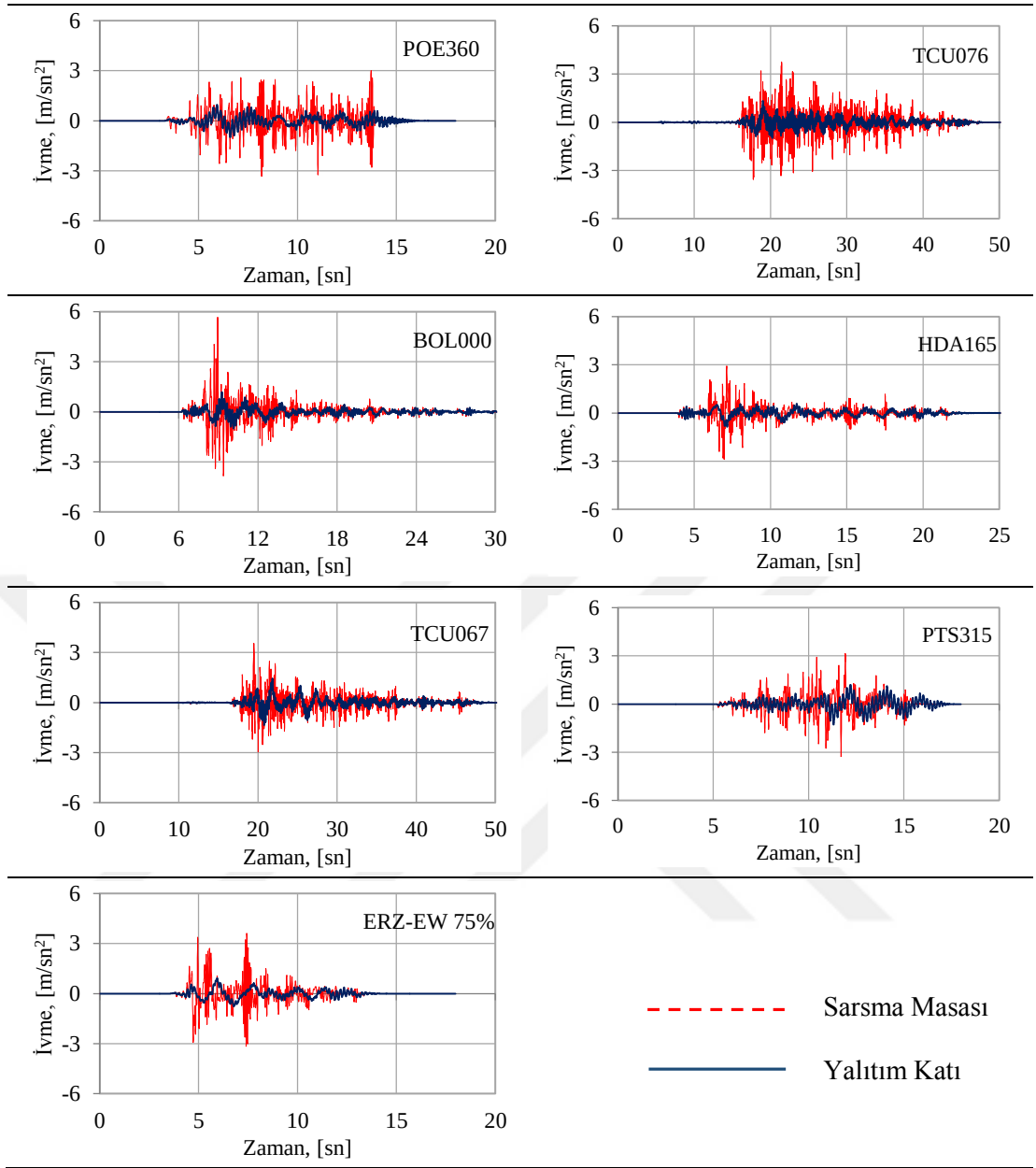
Şekil 3.14 : Sismik yalıtımlı numunenin POE360 depremi için FFT analizi.

Sismik yalıtımlı numunenin eşdeğer sönüm oranının tayinine yönelik çalışmalar Bölüm 3.9.2.1, 3.9.2.2 ve 3.9.2.3’de yer almaktadır.

3.7 Sismik Yalıtımlı Numuneye Ait İlk Değerlendirmeler

Sismik yalıtımlı numunenin yedi farklı deprem kaydı etkisinde masa üzerinde gerçekleştirilen deneylerinin tamamlanmasının ardından, sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin ortaya konması amacıyla öncelikle sadece kat ivmeleri ve yalıtım katı yerdeğiştirmelerine dayalı bir ön değerlendirme yapılmıştır.

Numuneye uygulanan yedi farklı deprem kaydı için, sarsma masası ivmeleri ile yalıtım katında oluşan ivmelere ait karşılaştırmalar, Şekil 3.15’de sunulmaktadır. Şekil 3.15’den görüleceği gibi, masa üzerindeki ivmeler ile yalıtım katına geçen ivmeler arasında azalma yönünde önemli farklar oluşmaktadır. İvme oranlarındaki en büyük fark BOL000 depreminde $1.18/5.66=0.21$ olarak ortaya çıkmaktadır. Yalıtım katında oluşan en büyük ivme ise, TCU067 depreminde 1.44 m/sn^2 olmaktadır.



Şekil 3.15 : İvme karşılaştırmaları.

Masaya gönderilen hedef ivmeler ile gerçekleşen ivmeler, Çizelge 3.5'in (2) ve (3). kolonlarında gösterilmektedir. Numunenin kat döşemelerinde oluşan en büyük ivmeler de, çizelgenin (4), (5), (6) ve (7). kolonlarında yer almaktadır. Tüm katlarda kaydedilen ivme değerlerinin, sarsma masası üzerinde kaydedilen ivme değerlerinin altında olduğu yine aynı çizelgeden görülmektedir.

Çizelge 3.6'da verilen katlarda sarsma masasına göre oluşan ivme oranları incelendiğinde, oranların 0.17 ile 0.54 arasında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 3.5 : Kaydedilen en büyük ivmeler.

Deprem	Hedef İvme	Sarsma Masası Üzeri	Yalıtım Katı	Birinci Kat	İkinci Kat	Üçüncü Kat
	m/sn ²	m/sn ²	m/sn ²	m/sn ²	m/sn ²	m/sn ²
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
POE360	2.946	3.320	0.981	0.827	0.840	1.170
TCU076	4.079	3.768	1.329	1.171	1.356	1.637
BOL000	7.138	5.663	1.181	0.971	1.055	1.600
HDA165	2.636	2.920	0.859	0.822	0.914	1.112
TCU067	3.192	3.539	1.435	1.371	1.534	1.916
PTS315	3.700	3.272	1.276	1.181	1.176	1.642
ERZ-EW 75%	3.646	3.623	0.935	0.951	0.983	1.084

Yalıtım katındaki ortalama oran ise 0.32’dir. Uygulanan yedi deprem kaydı için sarsma masası ivmelerinin %68 yaklaşık 2/3 oranında düşürülebildiğini göstermektedir.

Çizelge 3.6 : İvme oranları.

Deprem	Sarsma Masası	Yalıtım Katı	Birinci Kat	İkinci Kat	Üçüncü Kat
POE360	1.00	0.30	0.25	0.25	0.35
TCU076	1.00	0.35	0.31	0.36	0.44
BOL000	1.00	0.21	0.17	0.19	0.29
HDA165	1.00	0.29	0.29	0.31	0.38
TCU067	1.00	0.41	0.39	0.43	0.54
PTS315	1.00	0.39	0.36	0.36	0.50
ERZ-EW 75%	1.00	0.26	0.26	0.27	0.30
Ortalama		0.32	0.29	0.31	0.40
Standart Sapma		0.07	0.07	0.08	0.10
CoV		0.22	0.24	0.26	0.25

Sismik yalıtımlı numunede, katlar arasında ortaya çıkan görel ivmeler Çizelge 3.7’de sunulmaktadır. Çizelgede verilen değerlerin, ankastre numune için daha önce gerçekleştirilen kuramsal hesaplar ile elde edilen değerlerin çok altında kaldığı anlaşılmıştır (Karayel ve Yüksel, 2013). Deprem sırasında taşıyıcı sistemde iç kuvvet oluşumunun, katlar arasındaki görel ivmelere bağlı olması dolayısıyla, sismik yalıtımlı sistemde görel ivmelerin bu seviyelere düşürülmesi, sistemin yapısal hasar alma olasılığının önemli ölçüde azaltılması anlamına gelmektedir.

Çizelge 3.7 : Katlar arası görelı ivmeler.

Deprem	Birinci Kat	İkinci Kat	Üçüncü Kat
	m/sn ²	m/sn ²	m/sn ²
POE360	-0.154	0.013	0.330
TCU076	-0.158	0.185	0.281
BOL000	-0.210	0.084	0.545
HDA165	-0.037	0.092	0.198
TCU067	-0.064	0.163	0.382
PTS315	-0.095	-0.005	0.466
ERZ-EW 75%	0.016	0.032	0.101

Çalışılan depremler etkisinde oluşan yalıtım katı görelı yatay yerdeğıştirmeleri ve öteleme oranlarına Çizelge 3.8’de yer verilmektedir. En küçük ve en büyük görelı yerdeğıştirmelerin sırasıyla 46.86 mm ve 85.84 mm olduğu görölmektedir. Bu değırlere karşı gelen kat öteleme oranları da %9.19 ve %16.83 olmaktadır. Sismik yalıtım katının en büyük yatay yerdeğıştirme durumuna karşı gelen ve geometrik uygunluk formülleri ile hesaplanan eksenel boy değıştirme miktarı da 75.77 mm. olup, bu değır de kendi eksenel yerdeğıştirme kapasitesinden küçüktür.

Çizelge 3.8 : Yalıtım katında gerçekteşen en büyük görelı yerdeğıştirmeler ve öteleme oranları.

Deprem	Görelı Yerdeğıştirme [mm]	Öteleme Oranı [%]
POE360	51.61	10.12
TCU076	68.57	13.45
BOL000	46.86	9.19
HDA165	69.62	13.65
TCU067	85.84	16.83
PTS315	60.65	11.89
ERZ-EW 75%	60.00	11.76

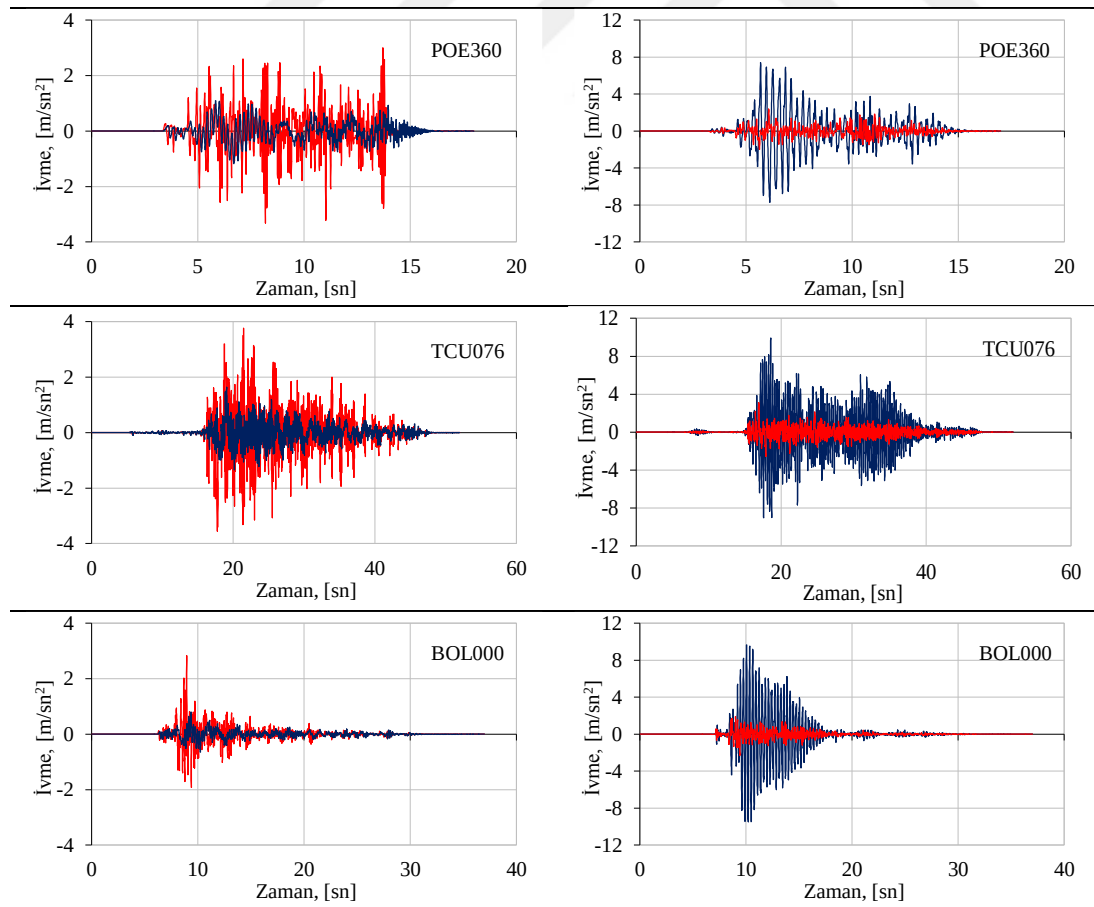
3.8 Sismik Yalıtımlı ve Ankastre Mesnetli Numune Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numunelerin sarsma masası deneylerinden elde edilen, ivme, yerdeğıştirme, şekildeğıştirme, eğilme momenti, kat ve taban kesme kuvvetleri gibi büyüklüklerin karşılaştırmalarına bu bölümde yer verilmektedir. Sismik yalıtımlı numune için ERZ-EW ve ankastre mesnetli numune için de BOL000 depremleri hariç olmak üzere, diğır tüm depremler için karşılaştırmalar depremlerin

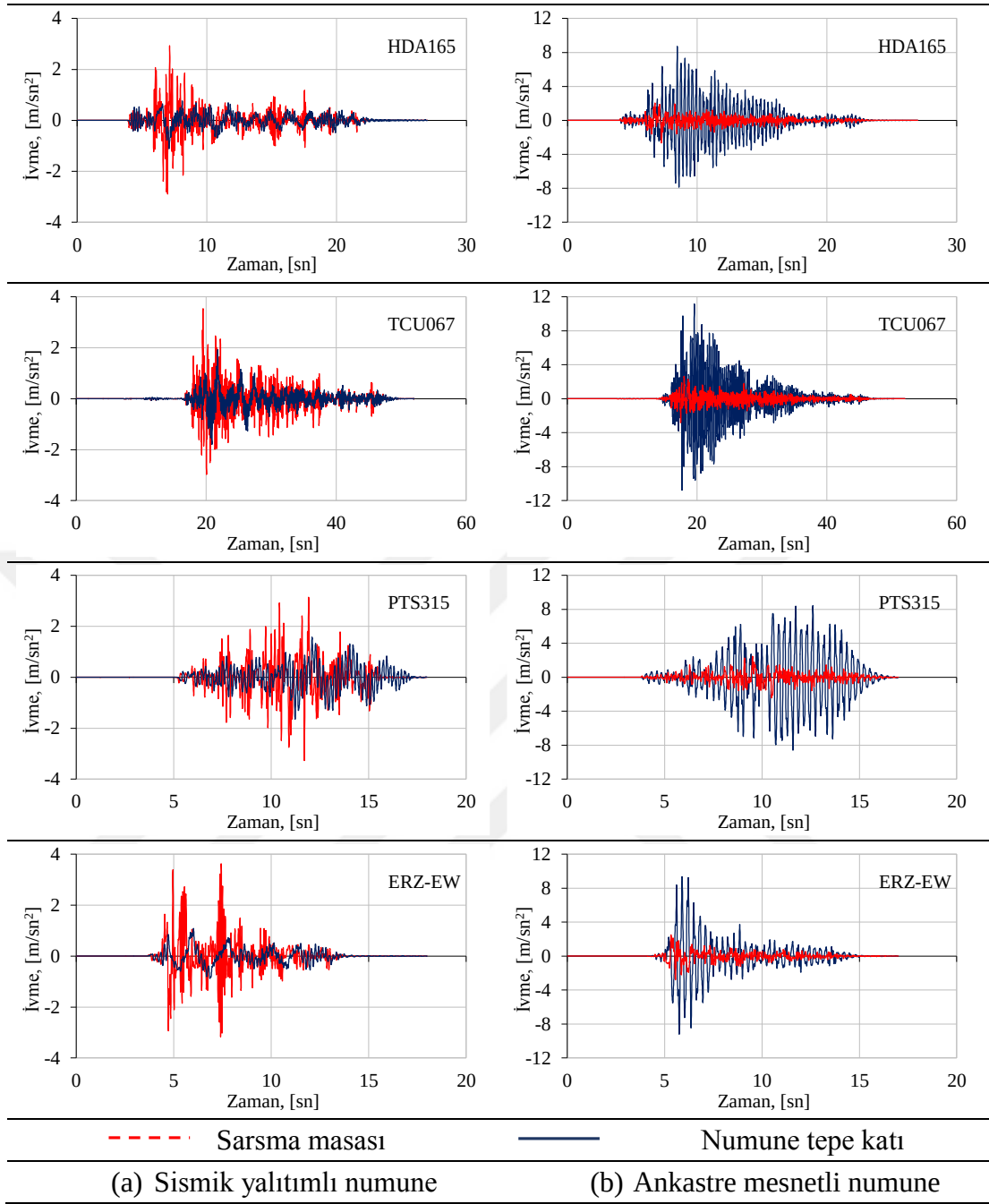
tam ölçekli (%100) uygulanmasına ait sonuçlar üzerinden yapılmıştır. Sismik yalıtımlı sistemde ERZ-EW depremi için uygulanan en büyük ölçek katsayısı 0.75 (%75), ankastre mesnetli numunede de BOL000 depremi için uygulanan en büyük ölçek katsayısı 0.50 (%50) olmuştur. Tam ölçekli olarak uygulanamayan biri sismik yalıtımlı diğeri de ankastre mesnetli sisteme ait bu depremler ile ilgili açıklamalar aşağıdaki karşılaştırmalar sırasında yapılmaktadır.

3.8.1 Tepe katı ile sarsma masası ivmelerinin karşılaştırılması

Uygulanan yedi ayrı deprem kaydı etkisinde, sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numuneler için sarsma masası ve tepe katında elde edilen ivmeler Şekil 3.16’da yer almaktadır. Şekil 3.16’dan görüleceği üzere, uygulanan tüm depremler için sismik yalıtımlı sistemde ivmeler ankastre mesnetli sisteme göre çok önemli oranda azalmaktadır. Sismik yalıtımlı numunede tepe katı ile sarsma masası arasındaki en büyük ivme oranı $0.80/2.83=0.28$ iken, ankastre mesnetli numunede bu oran $9.66/2.27=4.26$ olmaktadır. Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numune için ulaşılan en büyük tepe katı ivmeleri de sırasıyla, 1.80 ve 10.76 m/sn^2 olarak elde edilmiştir.



Şekil 3.16 : Tepe katı-sarsma masası ivme karşılaştırmaları.

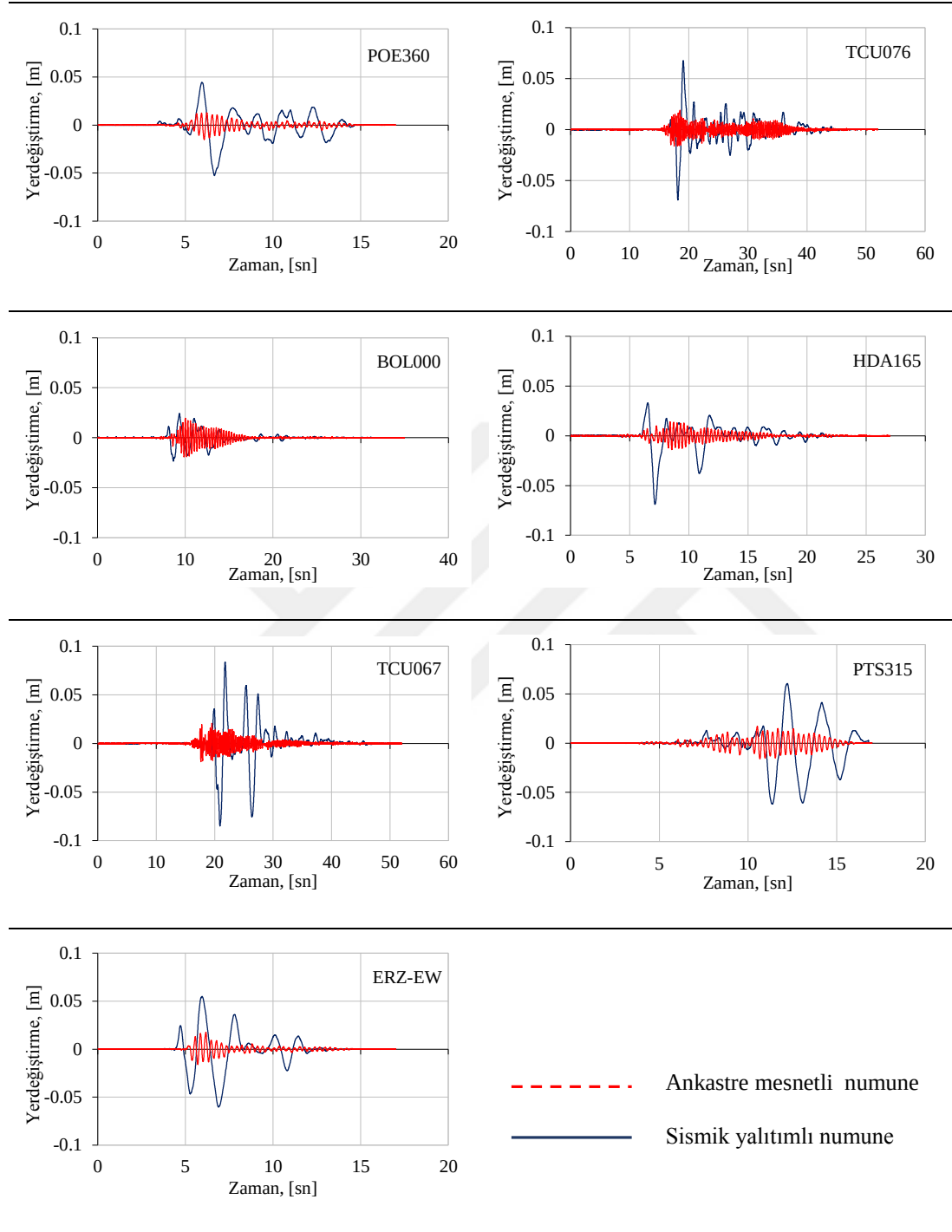


Şekil 3.16 (devam):Tepe katı-sarsma masası ivme karşılaştırmaları.

3.8.2 Tepe katı ile sarsma masası yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması

Sismik yalıtımlı sistem ile ankastre mesnetli sisteme ait tepe katı yerdeğıştirmeleri, Şekil 3.17’de sunulmaktadır. Sismik yalıtımlı numunenin tepe katı yerdeğıştirmelerinin ankastre mesnetli numuneden büyük olduğu aynı şekilden görülmektedir. Sismik yalıtımlı sistemde en büyük kat yerdeğıştirmesi yalıtım katında toplanmakta olup, üst katlardaki görelî yerdeğıştirmeler ise çok küçüktür. Sismik yalıtımlı sistem ve ankastre mesnetli sistem için elde edilen en büyük yatay

yerdeşiftirmeler TCU067 depreminde oluşmakta, değerleri de sırasıyla 84 mm ve 15 mm' ye karşı gelmektedir.

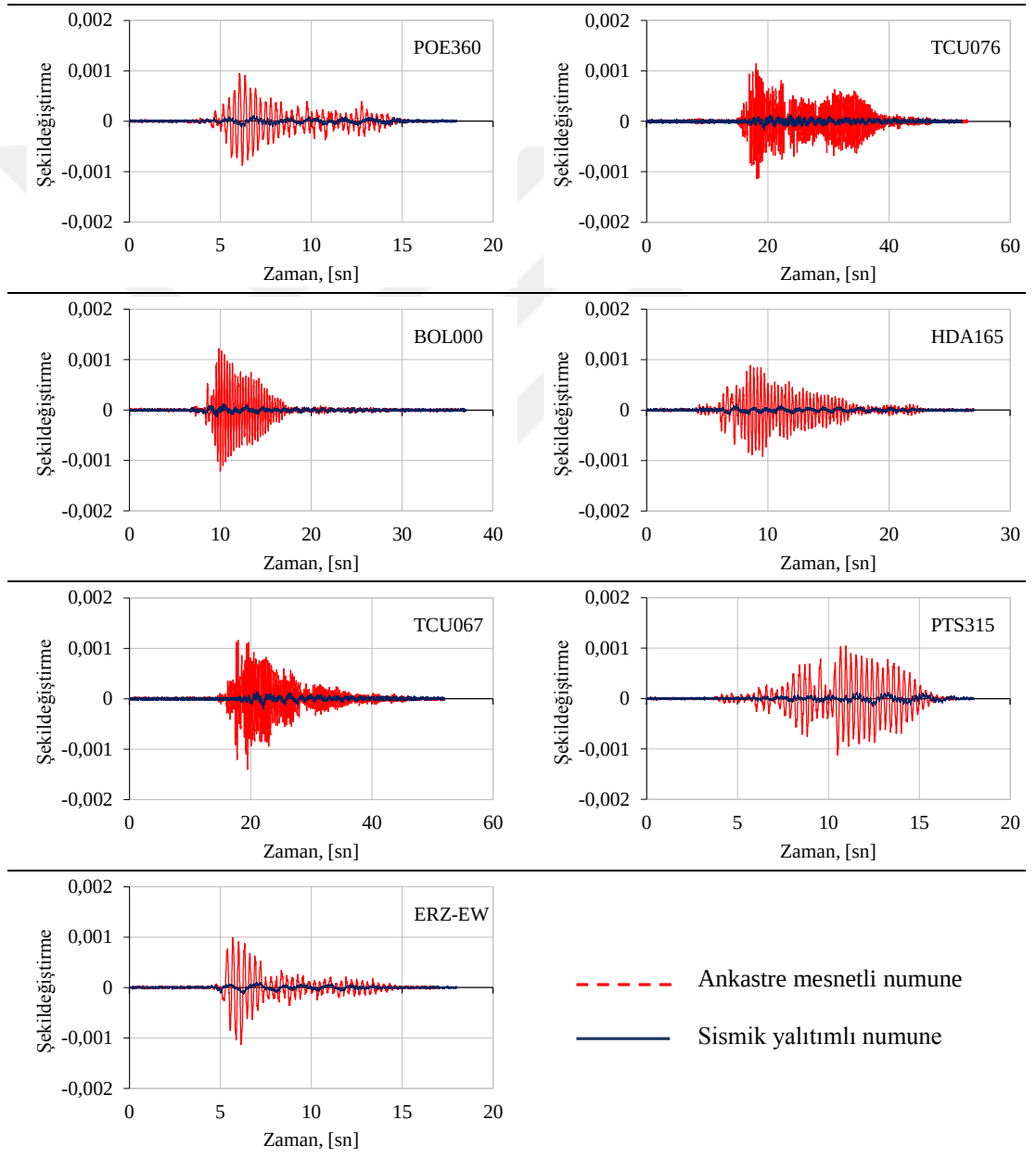


şekil 3.17 : Tepe katı yerdeğiftirme karşılaştırmaları.

3.8.3 Zemin kat kolonları eksenel şekildeğiftirme değerlerinin karşılaştırması

Deneyler sırasında eğilme momentlerinin en büyük değerlere ulaştığı zemin kat kolonlarında ölçülen eksenel şekildeğiftirmeler, şekil 3.18'de verilmektedir. şekil 3.18'den açık olarak görüleceği üzere, sismik yalıtımlı sistemin zemin kat kolonlarına

ait şekildeğiştirme değerleri ankastre mesnetli numuneye göre çok küçük kalmaktadır. Ankastre mesnetli numunede şekildeğiştirme değerlerinin ise akma sınırına yaklaştığı görülmektedir. Bu sebeple, ankastre mesnetli numune için BOL000 depremi, diğer depremlerin deney süresince numunede ileri hasar oluşmadan uygulanabilmesi ve doğrusal elastik davranıştan faydalanılarak gerekli bazı büyüklüklerin daha doğru hesaplanmasına yönelik olmak üzere %50 ölçekli olarak uygulanmıştır (Çizelge 3.9). Şekil 3.18'den sismik yalıtımlı sistemde zemin kat kolonlarının elastik ötesi davranış sergilemesi ihtimalinin çok düşük olduğu da anlaşılmaktadır.



Şekil 3.18 : Zemin kat kolonları eksenel şekildeğiştirme değerleri.

3.8.4 Zemin kat kesme kuvvetlerinin tayini ve karşılaştırmaları

Zemin kat kolonlarının alt ve üst uçlarında oluşan eğilme momentleri, “düzlem kesit şekildeğiştirmeden sonra da düzlem kalır” prensibi kullanılarak şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen değerler yardımıyla hesaplanmıştır. Ardından, elde edilen kolon uç momentleri kat yüksekliğine bölünerek, zemin kat kolon kesme kuvvetlerine geçilmiştir. Zemin kat kolon kesme kuvvetleri toplamından da, zemin katın kat kesme kuvveti elde edilmiştir. Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı numunelerin zemin kat kolonlarına ait hesaplanan eğilme momentleri ve kesme kuvveti değerleri ile kat kesme kuvvetleri Çizelge 3.9 ve 3.10’da yer almaktadır.

Çizelge 3.9 : Ankastre numune için zemin kat kolonları eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri.

Deprem	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	V	V _{kat}
	$\varepsilon_b=(SG11+SG12)/2$	$\varepsilon_t=(SG13+SG14)/2$	$\sigma_b=E\varepsilon_b$	$\sigma_t=E\varepsilon_t$	M	M		
			kN/m ²	kN/m ²	kNm	kNm		
POE360	0.000765	0.000328	160650	68775	1.932	0.827	4.31	17.24
TCU076	0.000925	0.000410	194250	86100	2.336	1.036	5.27	21.08
BOL000 50%	0.001000	0.000390	210000	81900	2.526	0.985	5.49	21.96
HDA165	0.000750	0.000335	157500	70350	1.895	0.846	4.28	17.12
TCU067	0.001150	0.000465	241500	97650	2.905	1.174	6.37	25.48
PTS315	0.000905	0.000405	190050	85050	2.286	1.023	5.17	20.68
ERZ-EW	0.001160	0.000460	243600	96600	2.930	1.162	6.39	25.56

Zemin kat kesme kuvvetleri gerçekleşen kat ivmeleri ile katın üzerindeki toplam kütlenin çarpımı yoluyla da elde edilmiştir. İki farklı yöntem ile elde edilen zemin kat kesme kuvvetleri Çizelge 3.11 ve 3.12’de ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı numuneler için verilmiştir.

Çizelge 3.10 : Sismik yalıtımlı numune için zemin kat kolonları eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri.

Deprem	Alt	Üst	Alt	Üst	Alt	Üst	V	V _{kat}
	$\varepsilon_b=(SG11+SG12)/2$	$\varepsilon_t=(SG13+SG14)/2$	$\sigma_b=E\varepsilon_b$	$\sigma_t=E\varepsilon_t$	M	M		
			kN/m ²	kN/m ²	kNm	kNm		
POE360	0.000110	0.000055	23100	11550	0.278	0.139	0.65	2.60
TCU076	0.000164	0.000084	34335	17640	0.413	0.212	0.98	3.92
BOL000	0.000135	0.000075	28350	15750	0.341	0.189	0.83	3.32
HDA165	0.000098	0.000050	20475	10500	0.246	0.126	0.58	2.32
TCU067	0.000190	0.000087	39900	18270	0.480	0.220	1.09	4.36
PTS315	0.000140	0.000062	29400	12915	0.354	0.155	0.80	3.20
ERZ-EW 75%	0.000108	0.000058	22575	12075	0.272	0.145	0.65	2.60

İki farklı yöntemle elde edilen zemin kat kesme kuvvetlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Değerler arasındaki ortalama göreceli farklar ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı durumlar için sırasıyla, %11.28 ve %7.50'dir. Aynı çizelgelerden sismik yalıtımlı numunenin kritik zemin kat kesme kuvvetinin ankastre mesnetli numuneye göre önemli miktarda küçük kaldığı da izlenebilmektedir. Aralarındaki oran 1/7 olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 3.11 : Ankastre mesnetli numune için zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları.

Deprem	Şekildeğiştirme Ölçer Değerlerinden [kN]	İvme Ölçerlerden [kN]	Göreceli Farklar [%]
	(1)	(2)	[(1)-(2)]/(2)
POE360	17.24	17.86	3.47
TCU076	21.08	25.55	17.50
BOL000 50%	21.96	23.32	5.83
HDA165	17.12	20.82	17.77
TCU067	25.48	27.22	6.39
PTS315	20.68	22.46	7.93
ERZ-EW	25.56	31.98	20.08
Ortalama			11.28

Çizelge 3.12 : Sismik yalıtımlı numune için zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları.

Deprem	Şekildeğiştirme Ölçer Değerlerinden [kN]	İvme Ölçerlerden [kN]	Göreceli Farklar [%]
	(1)	(2)	[(1)-(2)]/(2)
POE360	2.60	2.59	0.39
TCU076	3.92	3.65	7.40
BOL000	3.32	3.03	9.57
HDA165	2.32	2.56	9.38
TCU067	4.36	4.27	2.11
PTS315	3.20	3.68	13.04
ERZ-EW 75%	2.60	2.91	10.65
Ortalama			7.50

Seçilen deprem kayıtları için, sismik yalıtımlı sistemde yalıtım katında gerçekleşen en büyük taban kesme kuvveti değerleri de, Çizelge 3.13'de verilmektedir. Çizelge 3.13 oluşturulurken, yalıtım katı üzerindeki toplam kütle olarak 4.98 kNsn²/m değeri kullanılmıştır. Aynı çizelgeden sismik yalıtım katına uygulanan yedi farklı deprem kaydı etkisinde ortaya çıkan ortalama taban kesme kuvveti talebi, 5.68 kN olarak

hesaplanmaktadır. Bu değerin ankastre numune karşılığı ise Bölüm 3.3.2’de belirtildiği üzere, deneyde ankastre numunenin rijit bodrum katı göz önünde tutulmadığından, (Bkz. Şekil 3.4) elde edilememektedir. Bu değerin ankastre numune için elde edilen zemin kat ortalama kesme kuvveti ile karşılaştırılması gerçekçi olmamaktadır. Burada karşılaştırılacak doğru değerler, yukarıda 1/7 olarak verilen zemin kat kesme kuvveti oranlarıdır.

Çizelge 3.13 : Sismik yalıtımlı numune taban kesme kuvveti istemleri.

Deprem	İvme m/sn ²	F = m a kN
POE360	0.981	4.89
TCU076	1.329	6.62
BOL000	1.181	5.88
HDA165	0.859	4.28
TCU067	1.435	7.15
PTS315	1.276	6.35
ERZ-EW 75%	0.935	4.66

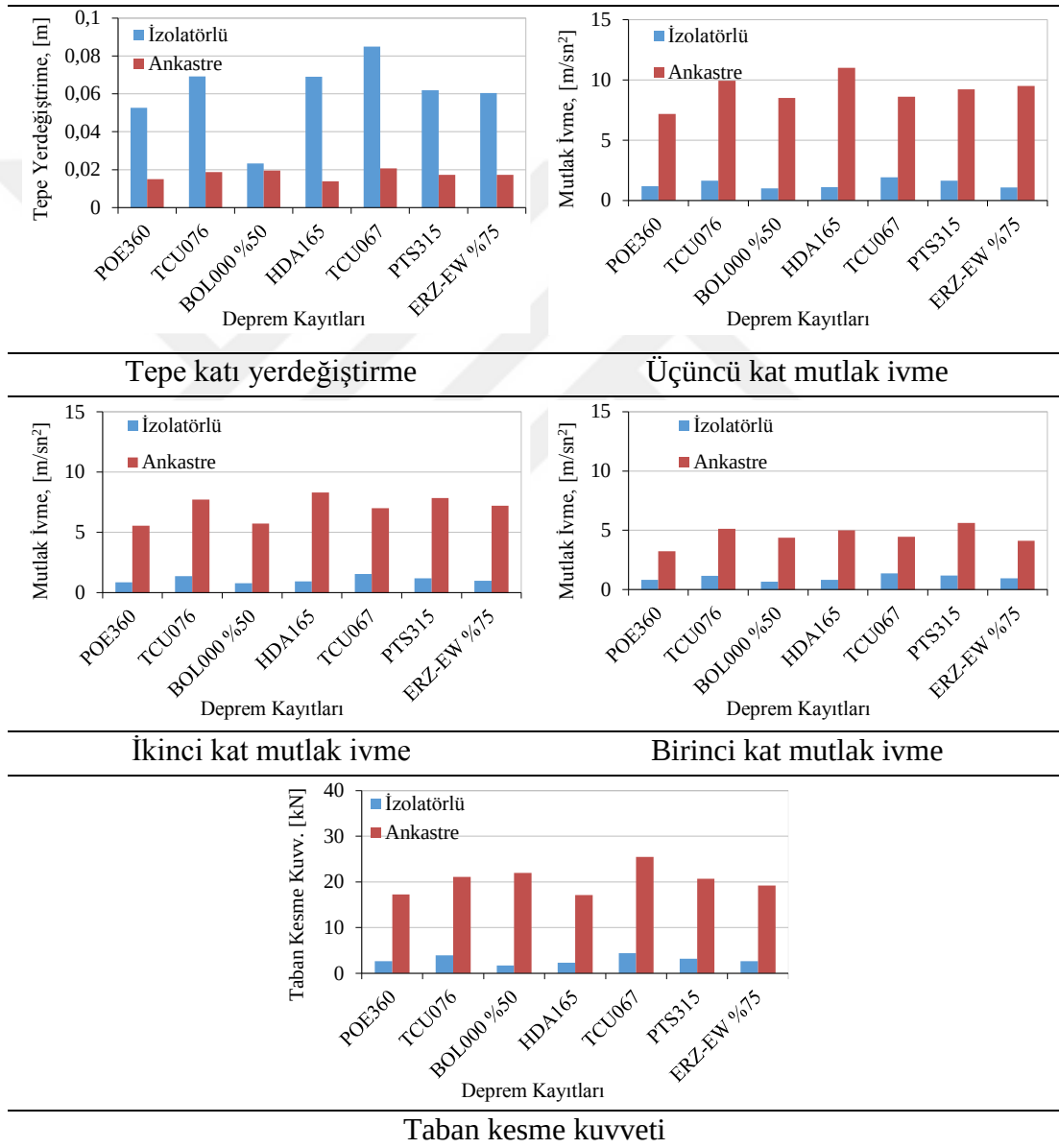
Sismik yalıtımlı numuneye uygulanan yedi farklı deprem hareketi sonunda, gerek kayıt altına alınan yerdeğiştirme eğrilerinden, gerekse deneyler boyunca yapılan gözlemlerden, numunede herhangi bir kalıcı şekildeğiştirme tespit edilmediğinden dolayı, önerilen sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme özelliğine sahip olduğu ispatlanmaktadır. Sismik yalıtımlı sistemin merkeze gelme özelliği, 5. Bölümde ilgili yönetmelikler çerçevesinde ayrıca değerlendirilmektedir.

Diğer taraftan sismik yalıtımlı numuneye ERZ-EW depreminin %100 ölçekli uygulanması durumunda, yay kutularının eksenel şekildeğiştirme (yerdeğiştirme) kapasiteleri aşıldığından sistem kendini geri çekememiş ve yay kutusu işlevsiz hale gelmiştir. Yay kutusu pistonları tümüyle açık kalarak, rijit bir çubuk gibi çalışmıştır. Bu durumda üst yapıya geçen ivmeler bir miktar artmış ancak üst yapı elemanlarını tehlikeye sokacak büyüklükte iç kuvvetler oluşmamıştır. Bu depremin ardından, bazı yaylarda kalıcı şekildeğiştirme gözlemlendiğinden sistemdeki tüm yaylar yenilenerek, deneylere devam edilmiştir. Numune ve sarsma masası güvenliği için, tekrarlanan ERZ-EW depreminde %75 ölçek katsayısının üzerine çıkılmamıştır (Bkz. Çizelge 3.10). Sismik yalıtımlı sistem için en etkili yakın fay depremi olan tam ölçekli ERZ-EW depremi sırasında yaşanan bu olay, önerilen sistemin göçme güvenliğini kendi içinde bulundurduğu anlamına gelmektedir. Bu güvenliğin ana sebebi, tümüyle açık

veya kapalı kalan yay kutularının, o andan itibaren görelî büyük eksenel ritijliklere sahip bir çubuk olarak çalışarak, sistemin kararlılığını korumaya devam etmesidir.

3.8.5 Bazı büyüklüklerin en büyük değerlerinin karşılaştırılması

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numuneye ait en büyük tepe yerdeğıştirmeleri, mutlak kat ivmeleri ve taban kesme kuvveti istemlerinin çubuk diyagramlar biçiminde verildiğı Şekil 3.19 incelendiğinde, sismik yalıtımlı numunenin etkinliğı açık olarak görölmektedir.



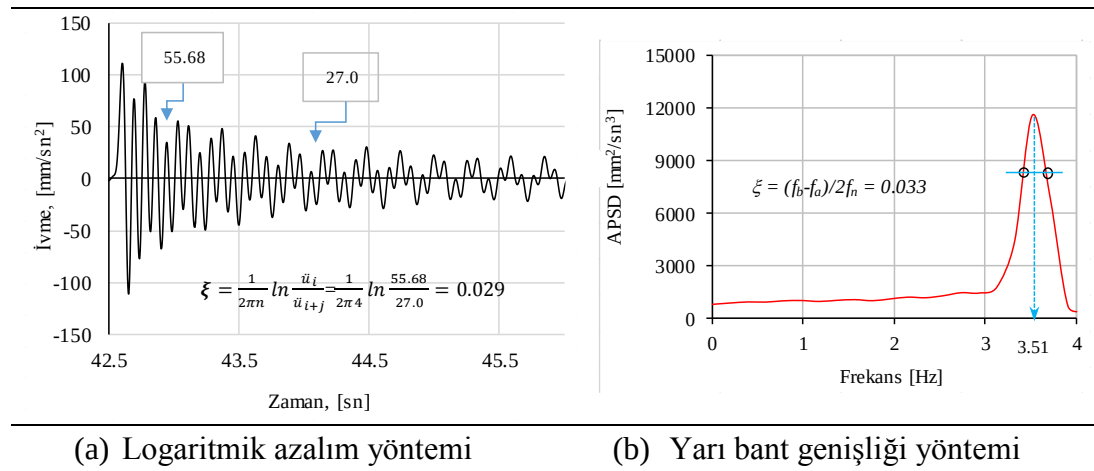
Şekil 3.19 : Bazı istemlere ait en büyük değerlerin karşılaştırılması.

3.9 Sönüm Değerlerinin Tayini

Ankastre mesnetli numuneye ait kritik sönüm oranına, serbest titreşim deneylerinden elde edilen verilere geleneksel yöntemlerin uygulanması ile erişilebilmektedir. Buna karşılık sismik yalıtımlı numunede klasik yöntemler ile sistemin sönüm özelliklerine ulaşılamamaktadır. Bu nedenle sismik yalıtımlı sistemin sönüm oranının tayini için diğer yöntemlere başvurulmuştur. Aşağıdaki bölümlerde ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemlerin sönüm oranlarını tayin etmek üzere uygulanan yöntemler ve ulaşılan sönüm değerlerine yer verilmektedir.

3.9.1 Ankastre mesnetli sistemin sönümü

Ankastre mesnetli numunenin Bölüm 3.6.1’de belirtilen serbest titreşim deneylerinden elde edilen titreşim genliklerine *logaritmik azalım yöntemi* uygulandığında, numune için kritik sönüm oranı $\xi = \%2.9$ olarak elde edilmektedir (Şekil 3.20a), (Chopra, 2012). Ankastre mesnetli numunenin kritik sönüm oranı serbest titreşim deneyleri sırasında oluşturulan FFT grafiklerindeki birinci titreşim modu frekansı üzerinde, *yarı bant genişliği yöntemi* kullanılarak da hesaplanmıştır. Bu yöntem ile ulaşılan kritik sönüm oranı da $\xi = \%3.3$ olup, diğer yöntem ile elde edilen oran ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.20b). Diğer taraftan ankastre mesnetli numune için deneylerden elde edilen $\%3$ civarındaki kritik sönüm oranının, kaynaklı rijit birleşimlere sahip bir çelik yapı için uygun bir değer olduğu da bilinmektedir (Çakıroğlu ve diğ, 1974).



Şekil 3.20 : Ankastre mesnetli numune için eşdeğer sönüm.

3.9.2 Sismik yalıtımlı sistemde sürtünme kaynaklı eşdeğer sönüm

Geliştirilen sismik yalıtım sistemine ait çalışmaların başından itibaren, yalıtım katının mafsallarındaki sürtünmeden dolayı oluşacak eşdeğer sönümün mertebesinin ne olacağı; elde edilecek sönümün, yalıtım sisteminin farklı büyüklükteki depremlerin yerdeğiştirme istemlerini karşılayıp karşılayamayacağı, karşılayamaması durumunda sisteme ilave bir sönüm sağlayıcı mekanizmanın eklenmesi konuları tartışılmıştır. Bölüm 2.4.3’de belirtildiği üzere; sürtünmenin hızlara bağlı değişiklik göstermesi kütlelerin sönüm üzerindeki etkileri ile birlikte düşünüldüğünde, sismik yalıtımlı numunede mafsallardaki sürtünme nedeniyle ortaya çıkacak eşdeğer sönümün dinamik deneyler ile tayin edilmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Aşağıdaki bölümlerde, sismik yalıtımlı sistem için tek serbestlik dereceli sistemin enerji dengesi, dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri ve güç spektrumu yoğunluğundan (PSD) faydalanılarak uygulanan yarı bant genişliği yöntemi olmak üzere üç ayrı yol kullanılarak sismik yalıtımlı sistem için eşdeğer sönüm oranı elde edilmektedir.

3.9.2.1 Enerji denge denklemi ile eşdeğer sönümün tayini

Hareket denkleminin zaman tanım alanında doğrudan integrasyonu ile tek serbestlik dereceli bir sistemin denklem 3.2’de verilen enerji denge denklemi elde edilmektedir (Akiyama, 1985).

$$\int m\ddot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int c\dot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int f_s\dot{u}(t)dt = -\int m\ddot{u}_g(t)\dot{u}(t)dt \quad (3.2)$$

Denklemdaki, m , c ve f_s sırasıyla kütle, sönüm ve karşı kuvveti, $\ddot{u}$ ve $\dot{u}$ görelî ivme ve görelî hızı, $\ddot{u}_g$ ise yer ivmesini ifade etmektedir. Sönüm terimi c ise aşağıdaki formda yazılabilir (Denklem 3.3).

$$c = 2\xi\omega m \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’de ξ kritik sönüm oranını, ω ise açısal frekansı temsil etmektedir. Denklem 3.2 aşağıdaki şekilde tekrar düzenlendiğinde, enerji denkleminin diğeri bir ifade biçimi elde edilmektedir (Denklem 3.4).

$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (3.4)$$

Denklem 3.4’ün sol tarafı yapının enerji bileşenlerini temsil etmekte olup, sırasıyla (E_K) kinetik, (E_D) sönüm, (E_S) şekildeğiştirme enerjilerini ifade etmektedir. Denklemin

sağ tarafındaki (E_I) ise deprem hareketi sırasında binaya giren enerjiyi temsil etmektedir.

Deney numuneleri için, enerji terimleri tümüyle deney sırasında toplanan verilerden oluşturulmaktadır. Bunlar ivme ölçerlerle ölçülen ivmeler, yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerden üretilen hızlardır. Deneylerden toplanan bu verilere *Butterworth* sayısal filtresi, 15 Hz olarak uygulanmıştır. Denklem 3.4'deki E_K , E_S ve E_I doğrudan deneylerden gelen veriler kullanılarak hesaplanmakta, buna karşılık eşdeğer sönüm oranı (ξ) için enerji eşitliği sağlamak üzere, ardışık yaklaşım şeklinde tahmin yapılmaktadır. Deneyler sırasında sismik yalıtımlı numunede herhangi bir plastik şekildeğiştirme tespit edilmediğinden, f_s olarak elastik kuvvetler kullanılmıştır. Elastik kuvvetler hesaplanırken, ilgili depreme ait Çizelge 3.4'de sunulan FFT'lerdeki birinci frekans değerlerinin tersleri ile ulaşılan etkin periyotlar ($T_{(et.)}$), denklem 3.1'de yerine konularak elde edilen etkin yatay rijitlikler ($K_{x(et.)}$) kullanılmıştır (Çizelge 3.14).

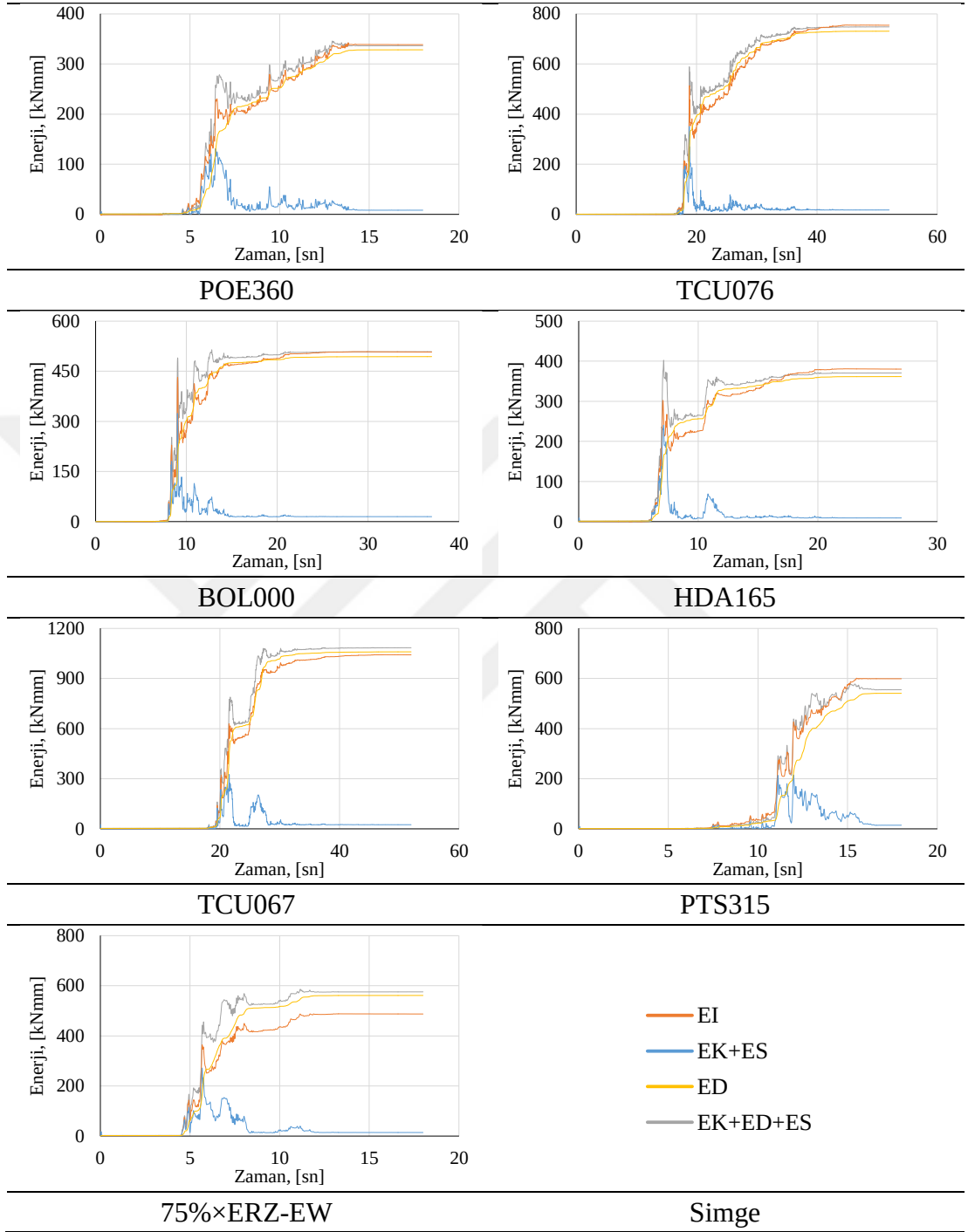
Çizelge 3.14 : Sismik yalıtımlı numune etkin yatay rijitlikleri.

Deprem	f_1	$T_{(et.)}=1/f_1$	$K_{x(et.)}$
	Hz	sn	kN/m
POE360	0.63	1.59	77.05
TCU076	0.60	1.67	69.65
BOL000	0.70	1.43	94.90
HDA165	0.63	1.59	77.05
TCU067	0.58	1.72	65.44
PTS315	0.59	1.69	67.63
ERZ-EW 75%	0.63	1.59	77.05

Sismik yalıtımlı numuneye ait yedi farklı deprem hareketinin uygulandığı deney verileri kullanılarak elde edilen enerji denge grafikleri, Şekil 3.21'de yer almaktadır. Tüm depremler için ardışık yaklaşımla %18-20 aralığında bir eşdeğer viskoz sönüm oranı ($\xi_{eşd.}$) elde edilmiştir. Sismik yalıtımlı sistemde ortaya çıkan göreceli yüksek eşdeğer viskoz sönümün esas sebebinin, yalıtım katı kolonlarının alt ve üst uçlarında yer alan mafsallardaki sürtünmeler olduğu yargısına ulaşılmıştır.

Bölüm 3.11'de yer alan sismik yalıtımlı numunenin hesap modelleri kullanılarak zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizlerde, kritik sönüm oranı ($\xi_{eşd.}$) sistematik olarak artırılarak analizler tekrarlandığında, eşdeğer sönüm

oranının ($\xi_{eşd.}$) %18-20 değerleri için, deney ve analiz sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür (Şekil 3.28), (Şekil 3.29).



Şekil 3.21 : Sismik yalıtımlı numune için enerji dengesi.

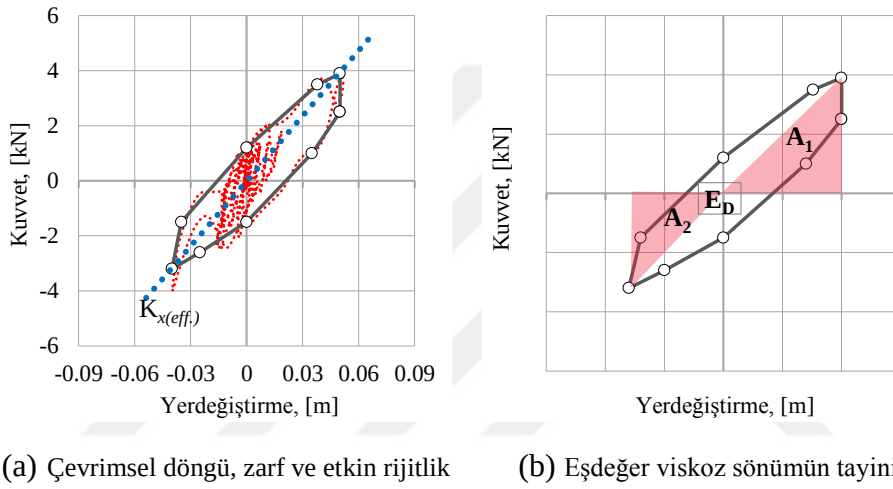
3.9.2.2 Dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile eşdeğer viskoz sönümün tayini

Sismik yalıtımlı numuneye ait kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi, uygulanan her bir yer hareketi sırasında, sismik yalıtım katı üzerinde oluşan mutlak ivmeler ile katın üzerindeki toplam kütlenin çarpımıyla elde edilen anlık kuvvet ve buna karşı gelen

anlık görel yerdeğiştirmeler göz önünde bulundurularak oluşturulabilmektedir (Şekil 3.22). Kuvvet-yerdeğiştirme döngülerinin etrafından geçirilen zarflar kullanılarak, etkin yatay rijitlikler $K_{x(et.)}$ elde edilmektedir (Şekil 3.22a). Numuneye ait eşdeğer viskoz sönüme ise denklem 3.5 ile ulaşılmaktadır.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{[2\pi(A_1 + A_2)]} \quad (3.5)$$

Denklemdeki, E_D en büyük çevrimin alanı olup, o çevrimde tüketilen enerji miktarına karşı gelmekte, A_1 ve A_2 ise şekildeğiştirmeye ait enerji miktarlarını ifade etmektedir (Şekil 3.22b).

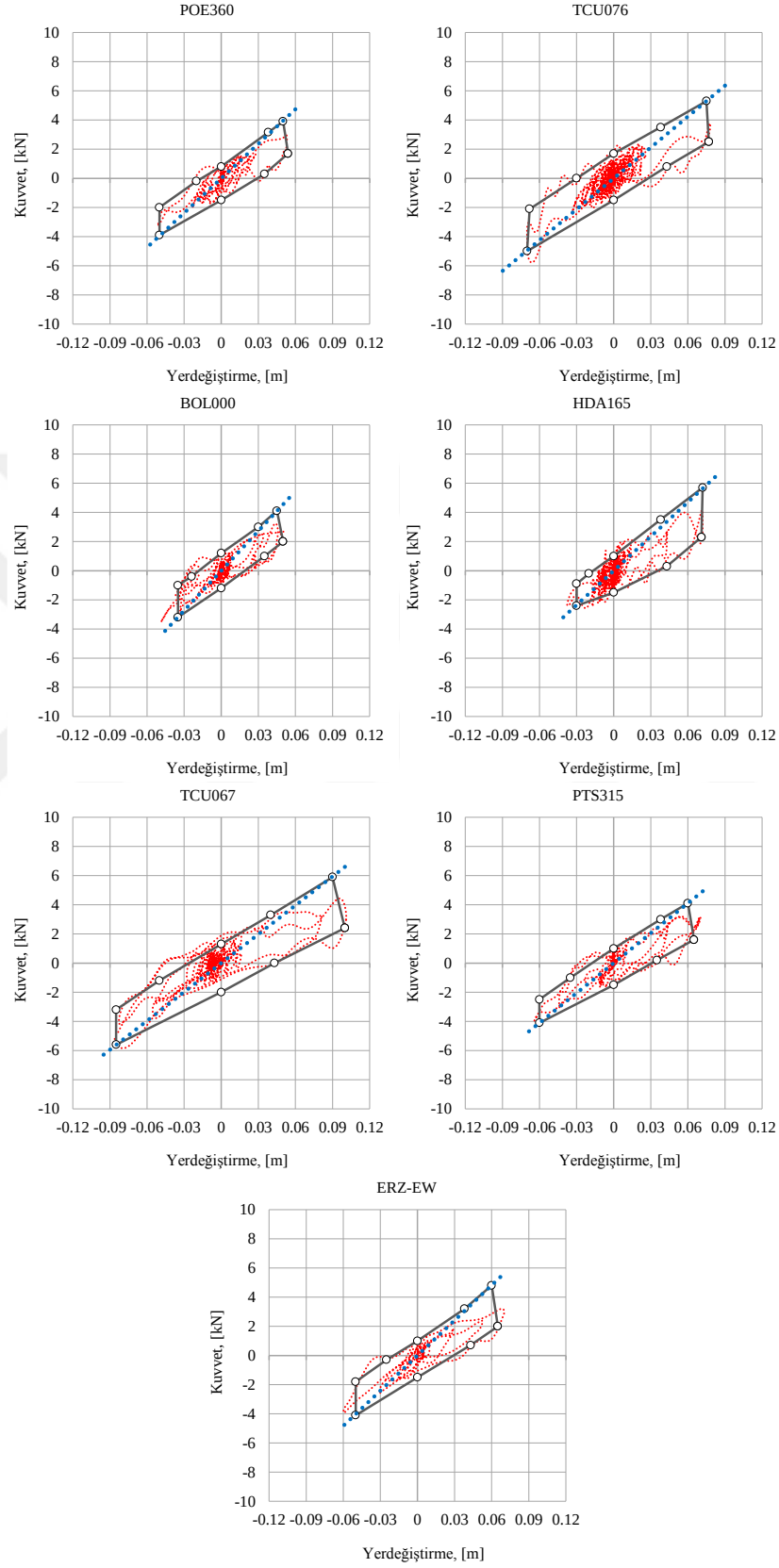


Şekil 3.22 : Sismik yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.

Sismik yalıtımlı numunede yedi farklı deprem kaydı etkisinde gerçekleştirilen, dinamik deneylere ait Şekil 3.23'deki kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri üzerinde yukarıda belirtilen işlemler uygulandığında, numuneye ait eşdeğer viskoz sönüm oranı ($\xi_{eşd.}$) %18-20 olarak elde edilmektedir. Bu değerlerin de Bölüm 3.9.2.1'de sunulan *enerji denge metodu* ile elde edilen değerlere benzer olduğu görülmektedir. Eşdeğer viskoz sönüm oranı için elde edilen bu değerler, Bölüm 3.9.2.3'de yarı bant genişliği yöntemi ile elde edilen değerler ile de uyumludur.

Şekil 3.23'de sunulan dinamik kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri üzerine işaretlenen yedi ayrı deprem kaydına ait etkin yatay rijitliklerin ($K_{x(et.)}$) ortalaması 75.4 kN/m olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık Bölüm 3.6.2'de sismik yalıtım katının mafsallarındaki sürtünmeler göz önüne alınmaksızın hesaplanan teorik ikinci mertebe yatay rijitliği ise 60.53 kN/m olarak elde edilmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç ise sismik yalıtımlı sisteme uygulanan yedi farklı deprem kaydı için mafsallardaki

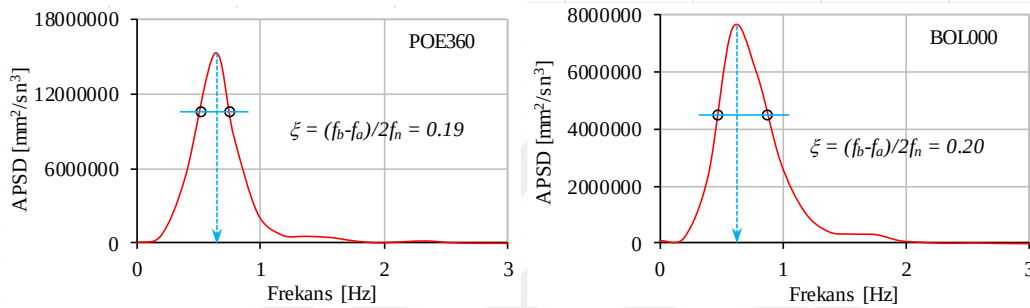
sürtünmeden kaynaklanan ortalama yatay rijitlik artışının %25 mertebesinde olduğudur.



Şekil 3.23 : Sismik yalıtım katı için oluşturulan kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.

3.9.2.3 Yarı bant genişliği yöntemi ile eşdeğer viskoz sönümün tayini

Sismik yalıtımlı sistem için uygulanan depremlerden elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan güç spektrumu yoğunluk fonksiyonlarından (PSD) faydalanılarak uygulanan yarı bant genişliği yöntemi ile de eşdeğer viskoz sönüm oranlarına ($\xi_{eşd.}$) ulaşılmaktadır. Bu yöntem ile elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranlarının da diğer iki yöntem ile benzer olarak %18-20 aralığında olduğu anlaşılmıştır. Şekil 3.24’de POE360 ve BOL000 depremlerine ait, yarı bant genişliği uygulamalarına yer verilmektedir.



Şekil 3.24 : POE360 ve BOL000 depremleri için yarı bant genişliği uygulaması.

3.10 Sismik Yalıtımlı Sistemde Etkin Yatay Rijitlikler

Sismik yalıtımlı numunede yalıtım katındaki kolonların iki ucunda yer alan mafsallarda oluşan sürtünme sebebiyle, yalıtım katının yatay rijitliğinin mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmadan hesaplanan ikinci mertebe teorik yatay rijitlikten büyük olduğu sarsma masası deney verilerinin çeşitli yöntemler ile değerlendirilmesi sonucu ortaya konulmuştur. Uygulanan yedi farklı deprem kaydı için; sismik yalıtım katının etkin yatay rijitliğinin ($K_{x(et.)}$) teorik yatay rijitliğin yaklaşık %20-%25 üzerinde olduğu Bölüm 3.9.2.2’de gösterilmiştir. Aynı bölümde uygulanan depremler için ortaya çıkarılan etkin yatay rijitliklerin, Bölüm 3.9.2.1’deki Çizelge 3.14’de sunulan ve her deprem kaydı için oluşturulan FFT’lerden elde edilen yatay rijitlikler ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

Sismik yalıtımlı sistem için elde edilen deney sonuçlarına kuramsal olarak da ulaşmak üzere aşağıdaki bölümde ayrıntıları verilen ve her bir deprem kaydı için ayrı ayrı gerçekleştirilen kuramsal hesaplarda, sismik yalıtım katının yatay rijitliği olarak ilgili deneyden elde edilen etkin yatay rijitlikler kullanılmaktadır. İlgili bölümde etkin rijitliklerin hesap modelinde nasıl tanımlandığına ait ayrıntılara da yer verilmektedir.

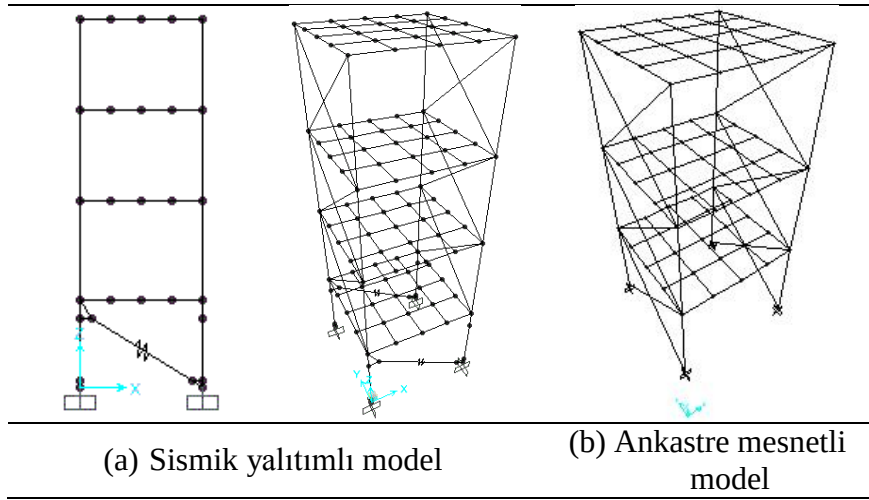
3.11 Kuramsal Hesaplar ve Deneyler ile Karşılaştırmalar

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli sistemler için gerçekleştirilen deneylerden ulaşılan yerdeğiştirme, ivme ve taban kesme kuvveti gibi büyüklüklere kuramsal olarak da ulaşılması amacıyla, her iki numunenin hesap modelleri oluşturularak, sarsma masasında uygulanan yedi farklı deprem kaydı için, zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesap modelleri, gerçekleştirilen analizlerin ayrıntıları ile elde edilen sonuçlar ve bunların deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmalarına bu bölümde yer verilmektedir.

3.11.1 Hesap Modelleri

Her iki numunenin hesap modelinde, kolon ve kiriş gibi ana elemanlar ile döşeme düzlemlerinde yer alan ikincil kirişler çubuk sonlu elemanlar ile modellenmiştir (Şekil 3.25). Sismik yalıtımlı modelde, yay kutuları çekme ve basınçta simetrik eksenel rijitliğe sahip doğrusal elastik yaylar olarak temsil edilmiştir. Sismik yalıtım katının yatay rijitlikleri olarak, mafsallardaki sürtünmeden oluşan ilave yatay rijitlikleri de içiren ve uygulanan her bir deprem için deneylerden ortaya çıkarılan, Şekil 3.22'deki etkin yatay rijitlikler ($K_{x(et.)}$) kullanılmıştır (Diotalleve ve diğ., 2014). Etkin yatay rijitlikler, diyagonal yay kutusu açısı ile dönüştürülmek suretiyle, doğrusal yayların eksenel rijitlikleri olarak tanımlanmıştır. Bu işlem yapılırken, denklem 2.9 ile verilen sistemin ikinci mertebe rijitliği (K_x^{II}) yerine ($K_{x(et.)}$) yerleştirilerek, elde edilen doğrusal eksenel yay rijitliği (K) modele tanıtılmaktadır.

Sismik yalıtımlı modelde, yalıtım katının kolonları ile yay kutularının uçlarında yer alan bağlantı plakaları sonsuz rijit çubuklar olarak modele dahil edilmişlerdir (Şekil 3.25a). Yalıtım katının kolonları iki ucundaki görelî rijit kirişlere düzlem eğilme mafsalları ile bağlanmıştır. Deney numunelerinde üst yapı katlarında itme düzlemine dik doğrultudaki kararlılığın sağlanması amacıyla kullanılan düşey çaprazlara da her iki modelde yer verilmiştir. Modellerde, kütleler katlardaki tüm düğüm noktalarına dağıtılan yığılı kütle olarak temsil edilmişlerdir. Geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da göz önünde tutulduğu, SAP2000n yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerde, Hilber-Huges-Taylor direkt integrasyon yöntemi ve Rayleigh tipi sönüm kullanılmıştır.



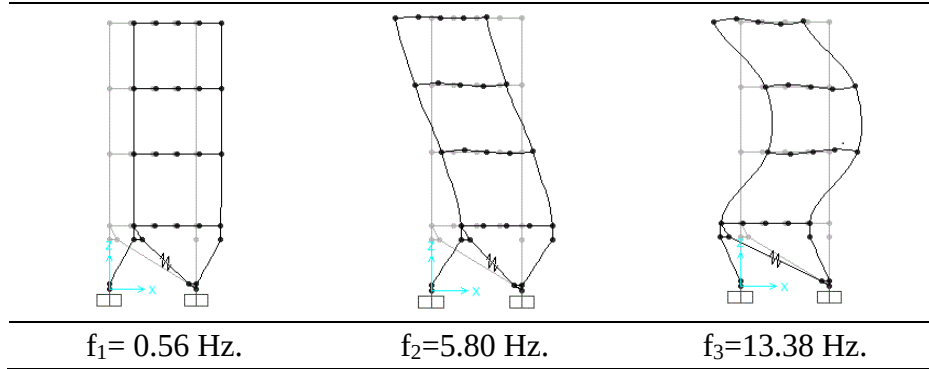
Şekil 3.25 : Deney numunelerine ait üç boyutlu hesap modelleri.

3.11.2 Serbest titreşim karakteristikleri

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli modeller üzerinde ilk olarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sırasında sismik yalıtımlı sistemin yay rijitliği olarak öncelikle mafsallardaki sürtünmenin etkisi dikkate alınmadan elde edilen yatay rijitlik değeri kullanılmıştır. Denklem 2.8 ile verilen söz konusu yatay rijitlik için, SAP2000n yazılımına yayın doğrusal rijitliğinin tanımlanması yeterli olmaktadır. Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli sistemler için elde edilen ilk üç serbest titreşim mod şekli ve ulaşılan frekans değerleri sırasıyla, Şekil 3.26 ve 3.27’de yer almaktadır. Sismik yalıtımlı sistem için mafsallardaki sürtünme dikkate alınmadan teorik ikinci mertbe rijitliği kullanılarak SAP2000n yazılımı ile ulaşılan birinci titreşim frekansı $f_1 = 0.56$ Hz değerinin, Bölüm 3.6.2’de denklem 3.1 kullanılarak elde edilen değer ile üst üste düştüğü görülmektedir. Buna karşılık aynı bölümde deneyler sırasında elde edilen FFT’lerden ulaşılan ve Çizelge 3.4’de verilen, mafsallardaki sürtünmeden kaynaklı rijitlik değişimleri sebebiyle ortaya çıkan ve 0.58-0.70 Hz. aralığında değişen frekans değerlerinin, %4-%25 oranında büyük olduğu ortaya konmuştur. Sismik yalıtımlı numune için serbest titreşim analizleri ile elde edilen ikinci ve üçüncü frekans değerlerinin Çizelge 3.4’de verilenler ile yeterince uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

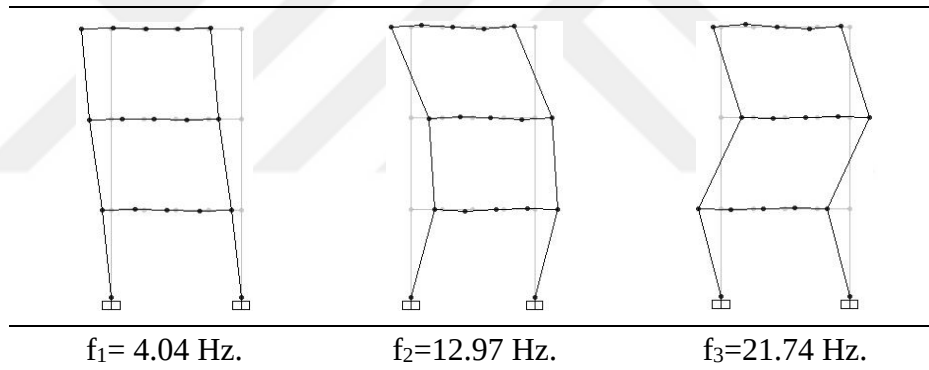
Ankastre mesnetli numune için serbest titreşim analizleri sonunda ulaşılan birinci serbest titreşim frekansı $f_1 = 4.04$ Hz. değerinin ise deneyden elde edilen 3.60 Hz ile uyumlu olmakla birlikte, deneysel büyüklüğün biraz üzerinde kaldığı görülmüştür. Bunun muhtemel sebeplerinin ankastre mesnetli numunenin sarsma masasına

bağlantısının ideal ankastre olarak yapılamaması ve çok küçük miktarda da olsa masanın düzlem içi ve dışı deformasyonlarının olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.26 : Sismik yalıtımlı modele ait ilk üç serbest titreşim modu.

Buna karşılık sismik yalıtımlı numunede bu özelliklerin önemi daha da azalmaktadır. Ankastre mesnetli numune için serbest titreşim analizlerinden elde edilen ikinci ve üçüncü frekans büyüklüklerinin deneylere ait FFT'lerden ulaşılan, Bölüm 3.6.1 Çizelge 3.3'de verilen frekans değerleri ile uyumlu oldukları söylenebilmektedir.



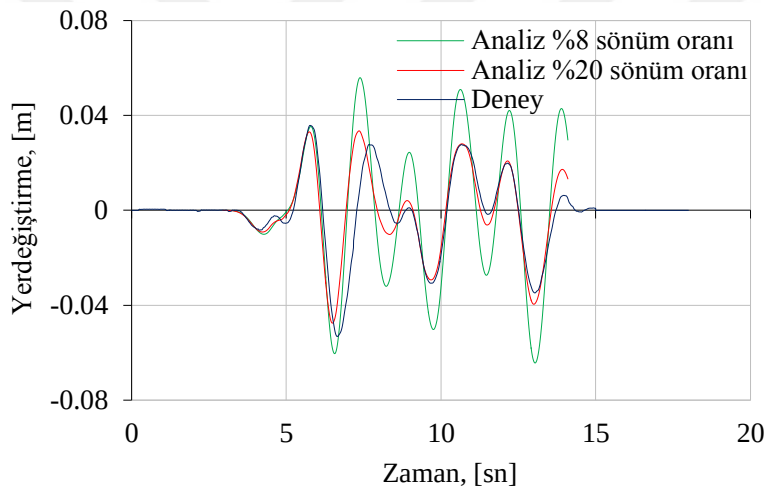
Şekil 3.27 : Ankastre mesnetli modele ait ilk üç serbest titreşim modu.

3.11.3 Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli sistemler için deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numuneler için uygulanan yedi deprem kaydı etkisinde deneylerden elde edilen değerler ile SAP2000'n yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerinden ulaşılan değerlerin karşılaştırmalarına aşağıda yer verilmektedir. Bu karşılaştırmalar, sismik yalıtımlı sistem için yalıtım katı yerdeğiştirmeleri, ivmeleri ve yalıtım katı üzerindeki zemin kat kesme kuvvetleri, ankastre mesnetli sistem için ise tepe katı yerdeğiştirmeleri, ivmeleri ve zemin kat kesme kuvvetleri için yapılmıştır.

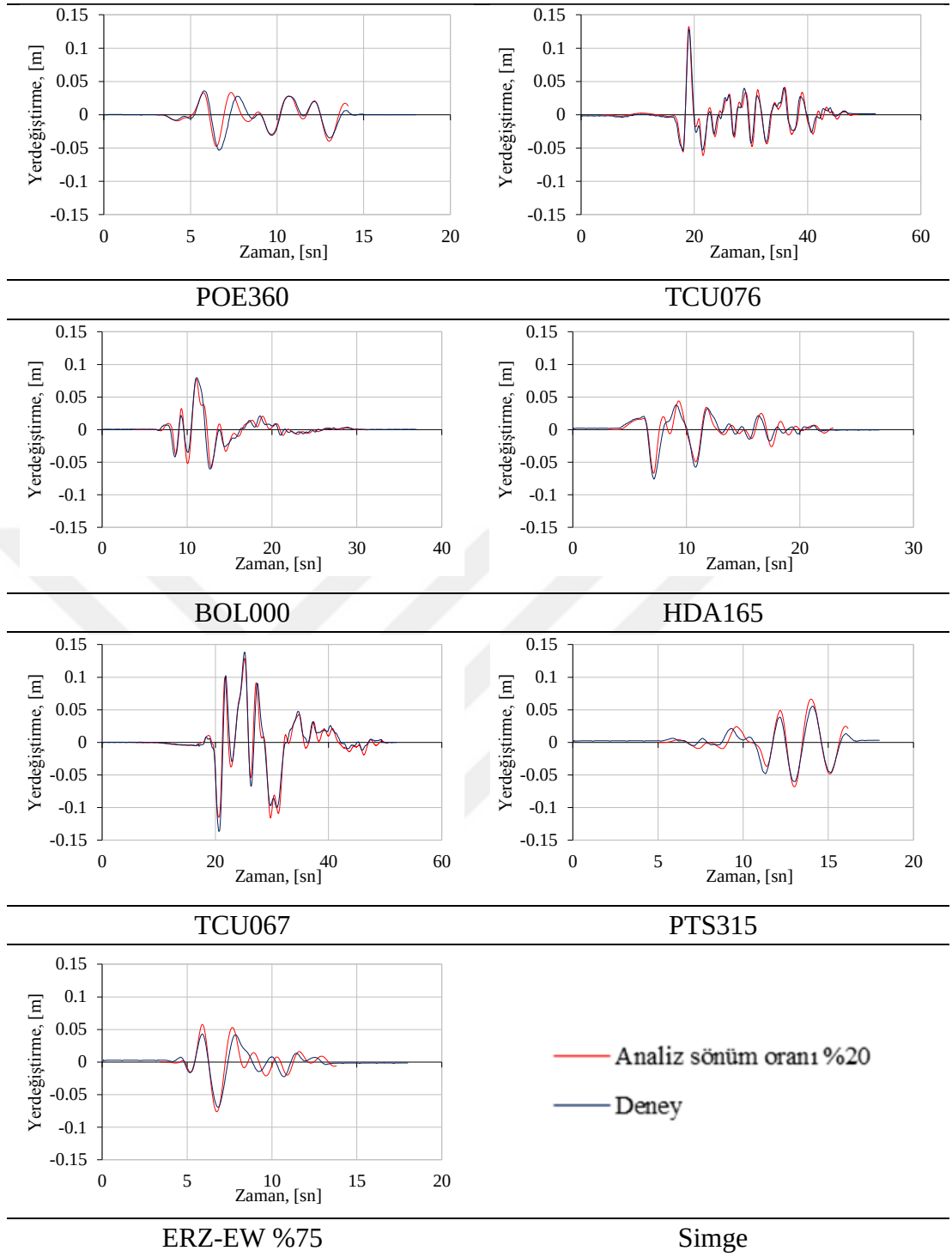
3.11.3.1 Sismik yalıtım katı yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması

Deneylerden elde edilen eşdeğer sönüm oranının etkisini görmek üzere, sismik yalıtımlı sistemin zaman tanım alanındaki analizlerinde sönüm oranının çeşitli değerleri için analizler tekrarlanmıştır. Kritik sönüm oranı (ξ) %20 'ye ulaştığında tüm depremler için deney ve analiz sonuçlarının yeter yakınsaklıkta örtüştüğü anlaşılmıştır. Şekil 3.28'de POE360 depremi için gerçekleştirilen analizlerde ξ 'nin %8 ve %20 olarak alınması durumları için elde edilen yalıtım katı yerdeğıştirmeleri ile deneyden elde edilen yerdeğıştirmelerin karşılaştırılması yer almakta olup, şekilden sönüm oranının yerdeğıştirmeler üzerindeki etkisi açık olarak görülmektedir. Sönüm oranı ξ 'nin %20 değeri, Bölüm 3.9.2.1 ve Bölüm 3.9.2.2'de enerji dengesi ve dinamik kuvvet-yerdeğıştirme zarflarından elde edilen %18-20 aralığındaki eşdeğer sönüm oranı $\xi_{eşd.}$ ile de uyumludur.



Şekil 3.28 : POE360 depremi için analiz ve deneyin karşılaştırmasında sönüm değerlerinin etkisi.

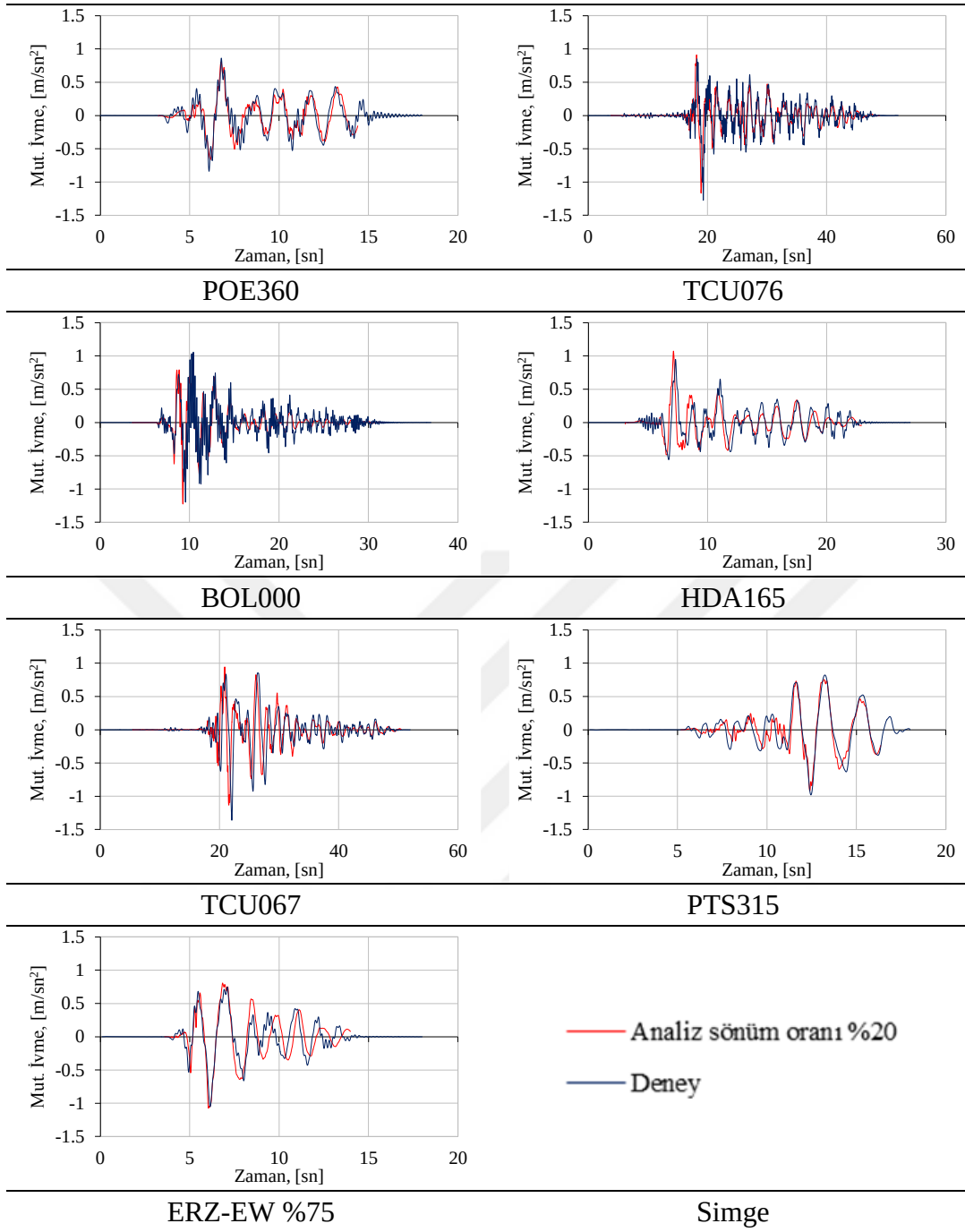
Şekil 3.29'da sönümün kritik sönümün %20'si kabul edilerek tüm depremler için gerçekleştirilen analizlerden ve deneylerden elde edilen yerdeğıştirme geçmişleri yer almaktadır. Tüm depremler için kuramsal hesaplar ile elde edilen yerdeğıştirmelerin deneylerden elde edilenler ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.29 : Sismik yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.

3.11.3.2 Sismik yalıtım katı ivmelerinin karşılaştırılması

Sönüm oranının %20 değeri için gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerden elde edilen yalıtım katı ivmelerinin deneylerden elde edilen ivmeler ile karşılaştırmalarına Şekil 3.30'da yer verilmektedir. Analiz ve deney ivmelerinin arasında yeterli uyum olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.30 : Sismik yalıtım katı ivmeleri.

3.11.3.3 Sismik yalıtımlı sistemde zemin kat kesme kuvvetleri karşılaştırması

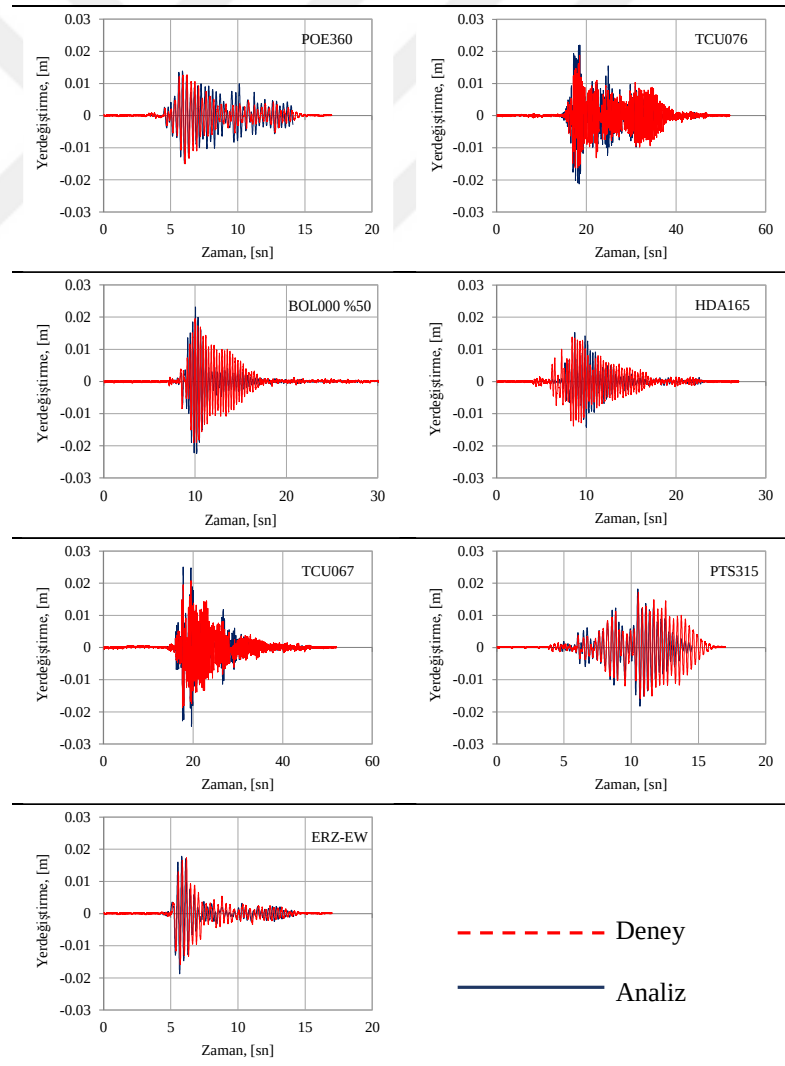
Sismik yalıtımlı sistemin yedi farklı deprem etkisindeki sarsma masası deneylerinden ve SAP2000n yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizleri sonunda elde edilen zemin kat kesme kuvvetleri, Çizelge 3.15’de verilmiştir. Çizelgeden deney ve analiz sonuçlarının yeterli uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Aynı çizelgede ortalama göreceli farkda %9.27 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.15 : Sismik yalıtımlı sistem için zemin kat kesme kuvvetleri.

Deprem	Deney kN	Analiz kN	Görelî Farklar %
	(1)	(2)	$[(1)-(2)]/(2)$
POE360	2.59	2.36	9.74
TCU076	3.65	3.40	7.35
BOL000	3.03	3.13	2.65
HDA165	2.56	3.15	18.70
TCU067	4.27	3.98	7.28
PTS315	3.68	3.40	8.20
ERZ-EW %75	2.91	3.27	11.01
Ortalama			9.27

3.11.3.4 Ankastre mesnetli sistemde tepe yerdeğıştirmelerinin karşılaştırılması

Uygulanan yedi farklı deprem kaydı için ankastre mesnetli sisteme ait sarsma masası deneyleri ve SAP2000n yazılımı ile elde edilen tepe yerdeğıştirme grafikleri Şekil 3.31’de yer almaktadır.

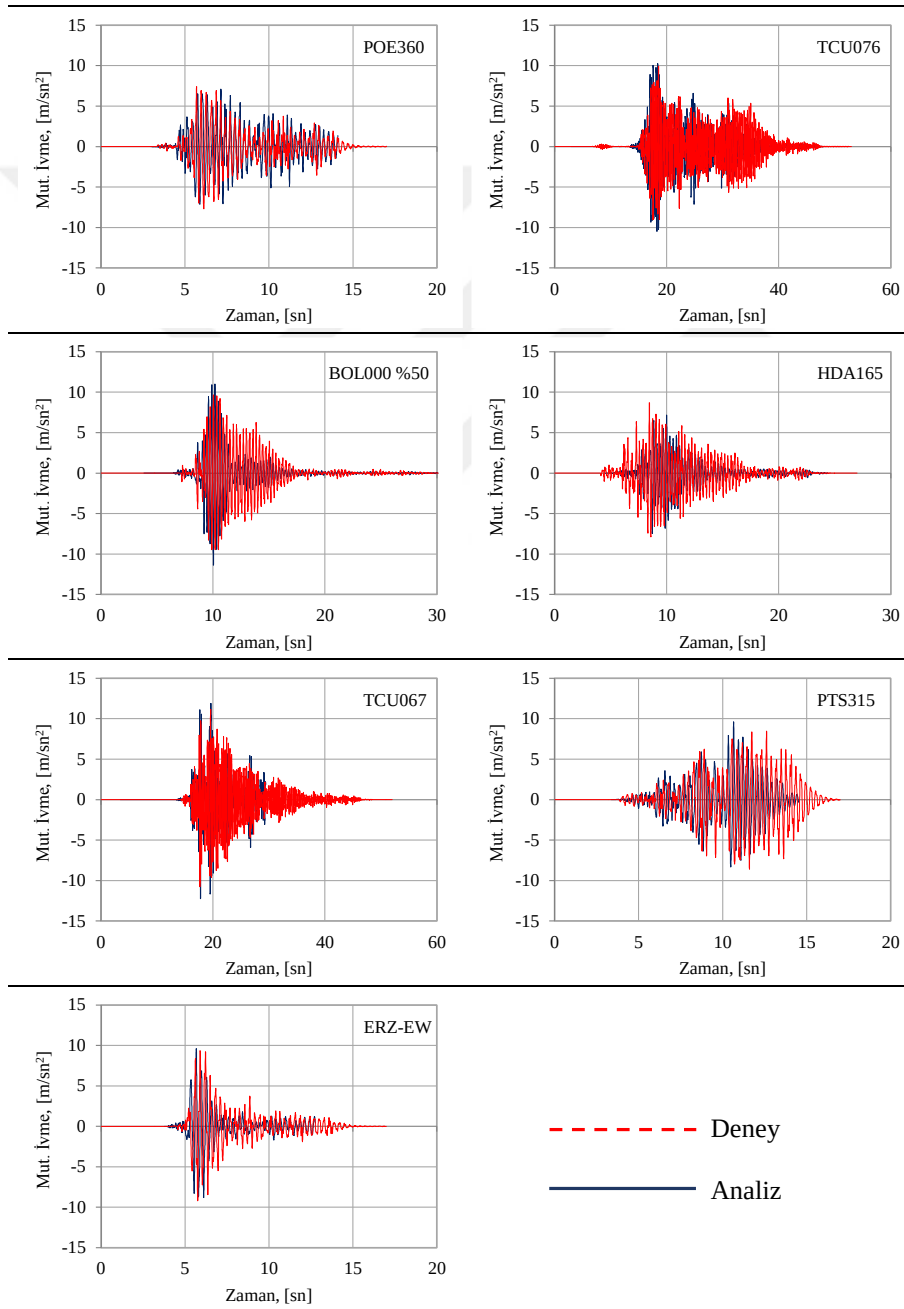


Şekil 3.31 : Ankastre mesnetli sistemde tepe yerdeğıştirmeleri.

Deney ve analizlerden elde edilen tepe yerdeğiştirme geçmişlerinin birbirleriyle uyumlu oldukları görülmektedir.

3.11.3.5 Ankastre mesnetli sistemde tepe katı ivmelerinin karşılaştırılması

Ankastre mesnetli sistemde sarsma masası deneyleri ve SAP2000n yazılımı kullanılarak ulaşılan tepe katı ivmelerini gösteren şekil 3.32 incelendiğinde, deney ve analiz değerlerinin uyum içerisinde oldukları görülebilecektir. şekil 3.32'deki BOL000 Depreminin katsayısı %50 olarak uygulanmıştır.



şekil 3.32 : Ankastre mesnetli sisteme ait tepe katı ivmeleri.

3.11.3.6 Ankastre mesnetli sistemde zemin kat kesme kuvveti karşılaştırmaları

Ankastre mesnetli deney numunesinin sarsma masası deneylerinden elde edilen zemin kat kolonlarına ait toplam kesme kuvveti değerlerinin, SAP2000n yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerinden elde edilen değerler ile karşılaştırması Çizelge 3.16'nın sırasıyla (1). ve (2). kolonlarında yer almaktadır. Deney ve analiz sonuçlarının yeterli uyumu sağladıkları, uygulanan depremler için ortama göreli farkın %5.3 olduğu yine aynı çizelgeden anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.16 : Ankastre mesnetli sistem için zemin kat kesme kuvvetleri.

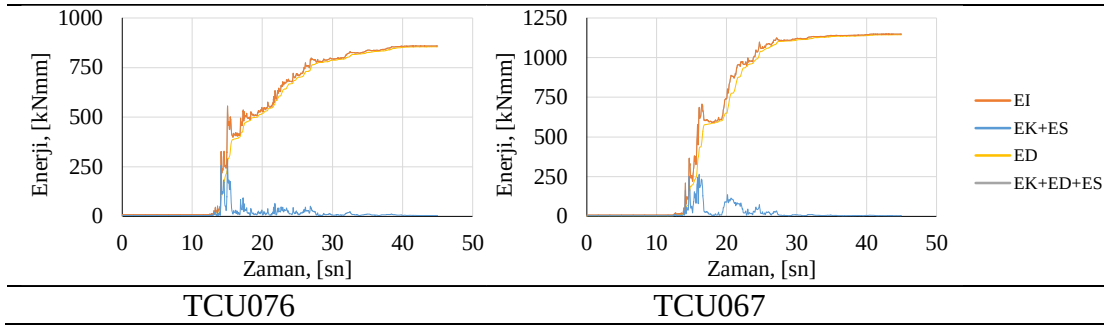
Deprem	Deney (kN)	Analiz (kN)	Görelî Farklar %
	(1)	(2)	[(1)-(2)]/(2)
POE360	17.86	18.00	0.70
TCU076	25.55	24.40	4.70
BOL000 50%	23.32	24.90	5.83
HDA165	20.82	16.70	6.30
TCU067	27.22	27.00	0.80
PTS315	22.46	21.50	4.40
ERZ-EW	31.98	27.90	14.62
Ortalama			5.33

3.11.4 Kuramsal hesaplar ile enerji dengesi

Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numuneler için gerçekleştirilen deneylerde ulaşılan sönüm oranları kullanılarak icra edilen zaman tanım alanındaki analiz sonuçları ile enerji denge grafikleri elde edilmektedir. Aşağıda her iki numune için analizler sonunda ulaşılan enerji denge grafikleri ve ilgili değerlendirmelerine yer verilmektedir.

3.11.4.1 Sismik yalıtımlı sistemin kuramsal hesabına ait enerji dengesi

Tek serbestlik dereceli sistem kabulü ile sismik yalıtımlı numuneye ait deneysel veriler kullanılarak uygulanan enerji dengesi yöntemi sonunda elde edilen ve eşdeğer sönüm oranının $\xi_{esd.} = \%20$ olarak kullanıldığı kuramsal hesaplarda, uygulanan tüm depremler için enerji grafikleri çizilmiştir. Şekil 3.33'de TCU076 ve TCU067 depremleri için sismik yalıtımlı numuneye ait zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizler sonunda oluşturulan enerji denge grafikleri yer almaktadır.

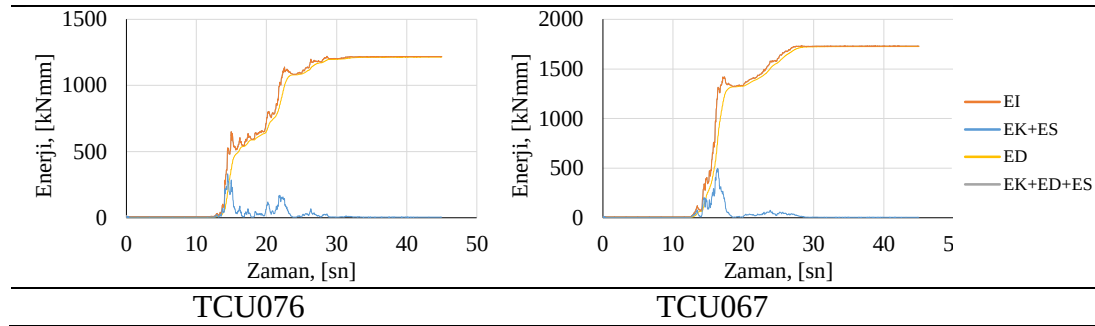


Şekil 3.33 : Sismik yalıtımlı numunenin kuramsal hesabına ait enerji dengesi.

Şekildeki enerji grafiklerinin, Bölüm 3.9.2.1 Şekil 3.21’de yer alan TCU076 ve TCU067 depremleri için deneysel olarak ulaşılan grafikler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 3.33’den ayrıca; (E_K) kinetik, (E_D) sönüm, (E_S) şekildeğiştirme enerjileri toplamının, binaya giren enerjiye (E_I) kritik sönüm oranı $\xi_{esd}=\%20$ olduğunda eşitlendiği de görülmektedir.

3.11.4.2 Ankastre mesnetli sistemin kuramsal hesabına ait enerji dengesi

Çok serbestlik dereceli bir sistem olan ankastre mesnetli numune için, deneylerde ulaşılan kritik sönüm oranı $\xi=\%3$ kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerinden yine TCU076 ve TCU067 depremleri için elde edilen enerji grafikleri Şekil 3.34’de sunulmaktadır. Şekil 3.34’den (E_K) kinetik, (E_D) sönüm, (E_S) şekildeğiştirme enerjileri toplamının, binaya giren enerjiye (E_I) kritik sönüm oranı $\xi=\%3$ alındığında eşit olduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.34 : Ankastre mesnetli numunenin kuramsal hesabına ait enerji dengesi.

3.12 Sismik Yalıtımlı Numune İçin Sonuçların Farklı Yazılımlar ile Kontrol Edilmesi

Geliştirilen sismik yalıtım katının üst yapı ile birlikte modellenerek analizlerinin gerçekleştirildiği SAP2000n yazılımından elde edilen sonuçların doğrulanması amacıyla, iki farklı yazılımdan daha faydalanılmıştır.

Bunlardan ilki, sadece sismik yalıtımlı sistemlerin analizi için geliştirilmiş olan ve tüm dünyada yaygın olarak kullanılan 3DBASIS isimli bilgisayar yazılımıdır. Bu yazılımla yapılan modellemede üst yapı ayrıntılı olarak temsil edilmeyip, kayma çerçevesi olarak idealleştirilmektedir. Analizlerde, sismik yalıtımda kullanılan mesnetlenmenin doğrusal veya doğrusal ötesi davranışını temsil eden kuvvet-yerdeğiştirme veya kuvvet-şekildeğiştirme modellerinden faydalanılırken, üst yapının kütle, sönüm oranı ve titreşim karakteristiklerini barındıran özdeğerleri hesaba katılmaktadır.

İkincisi yazılım ise bu çalışma kapsamında geliştirilen ve tek serbestlik dereceli basitleştirilmiş kütle-yay modeline dayalı bir sistemin seçilen deprem kayıtları etkisinde, zaman tanım alanındaki analizlerini yapan Matlab tabanlı ISOTHA-1 isimli yazılımdır. ISOTHA-1 yazılımının esaslarına Bölüm 3.12.1’de yer verilmektedir.

3.12.1 Tek serbestlik dereceli kütle-yay modelinin zaman tanım alanında analizi

Çok serbestlik dereceli bir yapı sisteminin şekildeğiştirme ve iç kuvvetlerini oluşturan yerdeğiştirmeler, temelin rijit hareketinden arındırılmış görelî yerdeğiştirmelerdir. Sistemin düğüm noktalarında oluşan yerdeğiştirme, hız ve ivmeler sırasıyla $[d]$, $[\dot{d}]$, $[\ddot{d}]$ vektörleri ile ifade edilirse, $[U]$ birim matris, temel yerdeğiştirme, hız ve ivmeleri de $[u_g]$, $[\dot{u}_g]$, $[\ddot{u}_g]$ olmak üzere, düğüm noktalarındaki görelî yerdeğiştirme, hız ve ivmeler denklem 3.6 ile hesaplanabilmekte, hareket denklemi de bu görelî büyüklükler kullanılarak oluşturulabilmektedir (Çakıroğlu ve diğ., 1970).

$$\begin{aligned} [u] &= [d] - [U][u_g] \\ [\dot{u}] &= [\dot{d}] - [U][\dot{u}_g] \\ [\ddot{u}] &= [\ddot{d}] - [U][\ddot{u}_g] \end{aligned} \quad (3.6)$$

Görelî yerdeğiştirme, hız ve ivmeler göz önünde bulundurularak, çok serbestlik dereceli sistemin hareket denklemi matris formunda denklem 3.7’deki biçimde yazılabilmektedir.

$$[m] [\ddot{u}] = -[m] [U][\ddot{u}_g] - [K] [u] - [c] [\dot{u}] \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'deki $[m]$, $[K]$ ve $[c]$ sırasıyla kütle, rijitlik ve sönüm matrislerini temsil etmektedir. Denklem 3.7'nin her iki tarafı $[m]^{-1}$ matrisi ile çarpılırsa, hareket denkleminin Denklem 3.8 'de verilen biçimine ulaşılmaktadır.

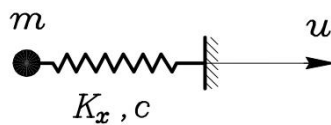
$$[\ddot{u}] = -[U][\ddot{u}_g] - [m]^{-1}[K] [u] - [m]^{-1}[c] [\dot{u}] \quad (3.8)$$

Doğrusal ve doğrusal olmayan sönümlü sistemlerin titreşimleri *doğrusal ivme yöntemi* ile tayin edilebilmektedir. Yöntemin esası, belirli bir anda bilinen yerdeğiştirme ve hızlara bağlı olarak Δt zaman sonraki yerdeğiştirme ve hızların rekürans formülleri ile bulunması ve böylece başlangıç anından itibaren istenilen andaki yerdeğiştirme ve hızların tayinine dayanmaktadır. Gerekli olan rekürans formülleri Taylor açılımından faydalanılarak elde edilebilmektedir. Herhangi bir n anındaki yerdeğiştirme hız ve ivmeler $[u]_n$, $[\dot{u}]_n$, $[\ddot{u}]_n$ bundan Δt zaman sonrakiler de $[u]_{n+1}$, $[\dot{u}]_{n+1}$, $[\ddot{u}]_{n+1}$ ile ifade edilirse, Taylor açılımı uygulanıp gerekli basitleştirmeler yapıldığında Denklem 3.9'da verilen rekürans formüllerine ulaşılmaktadır (Çakıroğlu, 1970).

$$\begin{aligned} [\ddot{u}]_{n+1} &= [\ddot{u}]_n + \Delta t [\ddot{u}]_n \\ [\dot{u}]_{n+1} &= [\dot{u}]_n + \frac{\Delta t}{2} [\ddot{u}]_n + \frac{\Delta t}{2} [\ddot{u}]_{n+1} \\ [u]_{n+1} &= [u]_n + \Delta t [\dot{u}]_n + \frac{\Delta t^2}{3} [\ddot{u}]_n + \frac{\Delta t^2}{6} [\ddot{u}]_{n+1} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Başlangıçta $[\ddot{u}]_{n+1}$ bilinmediğinden, $[\ddot{u}]_{n+1} = [\ddot{u}]_n$ kabulü yapılabilir. Ayrıca, $t=0$ anı için $[d]=0$, $[\dot{d}]=0$, $[\ddot{d}]=0$ yerine koyularak, rekürans formüllerinin Denklem 3.8 ile verilen hareket denkleminde uygulanması başlatılmaktadır.

Diğer taraftan, geliştirilen sismik yalıtım sisteminde davranış yalıtım katı tarafından kontrol edildiğinden, üst yapı sadece kütlesi ile göz önünde tutularak, Şekil 3.35'de gösterilen tek serbestlik dereceli bir kütle-yay sistemi ile ifade edilebilmektedir. Şekil 3.35'deki (m) yalıtım katı üzerindeki toplam kütle, (K_x) yalıtım katının yatay rijitliğini, (c) ise sönümü ifade etmektedir.



Şekil 3.35 : Sismik yalıtım katını temsil eden kütle-yay modeli.

Bu durumda çok serbestlik dereceli sistemler için denklem 3.8 ile matris formunda verilmiş olan hareket denklemi, Şekil 3.35’deki tek serbestlik dereceli basitleştirilmiş kütle-yay sistemi için denklem 3.10’daki biçimde yazılabilecektir.

$$\ddot{u} = -\ddot{u}_g - \left(\frac{1}{m}\right)K_x u - \left(\frac{1}{m}\right)c\dot{u} \quad (3.10)$$

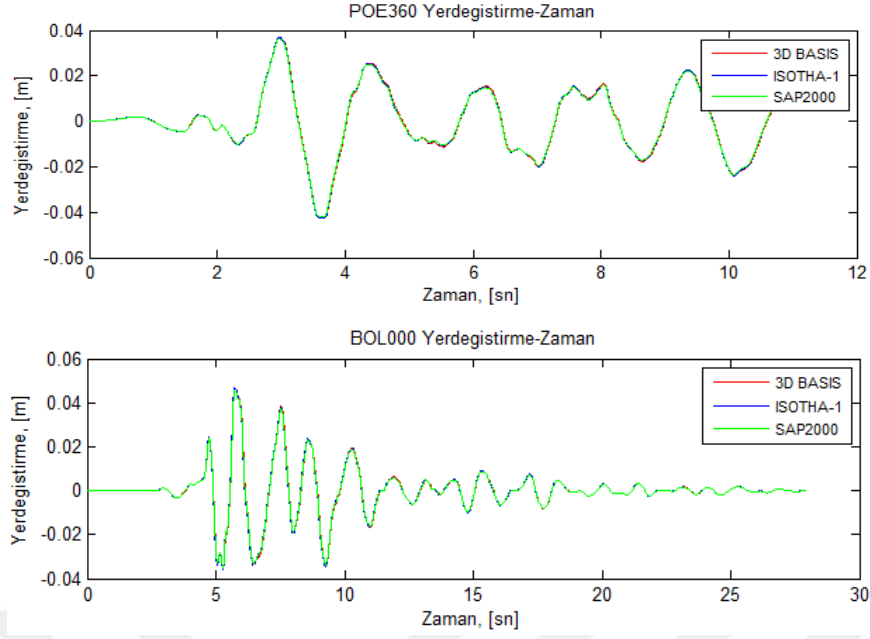
Denklemdeki sönüm terimi (c), (ξ) kritik sönüm oranı olmak üzere, $c = 2\xi\omega m$ olarak hesaplanmaktadır.

Çalışma kapsamında denklem 3.10 ile verilen hareket denklemi kullanılarak, yukarıda özetlenen doğrusal ivme yönteminin uygulaması ile tek serbestlik dereceli kütle-yay sisteminin zaman tanım alanındaki analizlerini gerçekleştiren ISOTHA-1 isimli yazılım Matlab’de oluşturulmuştur. ISOTHA-1 yazılımının açık kodu EK.A’da yer almaktadır.

Önerilen sismik yalıtım sisteminin üst yapı ile birlikte ayrıntılı matematik modelleri oluşturulmadan önceki tasarım aşamasında, Şekil 3.35’de verilen basit model üzerinde; sisteme ait (m), (K_x) ve (c) değerleri ve istenilen deprem kayıtları girilip, ISOTHA-1 yazılımı kullanılarak, hızlı bir biçimde gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki hesaplar ile yalıtım katının yerdeğiştirme, hız ve ivme talepleri elde edilebilmektedir.

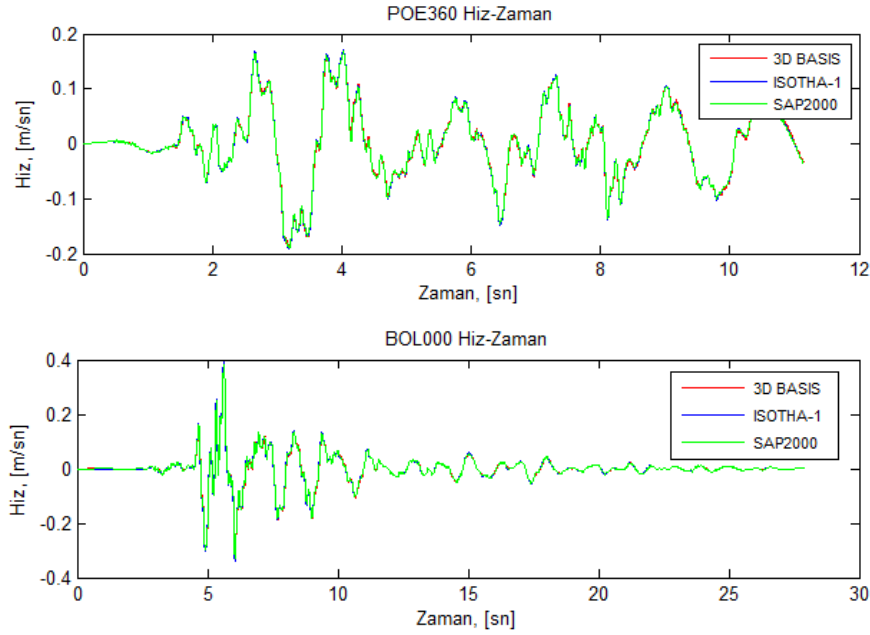
3.12.2 Farklı üç yazılım ile yerdeğiştirme, hız ve ivme karşılaştırmaları

Sismik yalıtımlı sistemin POE360 ve BOL000 depremleri için, SAP2000n, 3DBASIS ve ISOTHA-1 yazılımları kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizleri sonunda ulaşılan yerdeğiştirme, hız ve ivme geçmişleri sırasıyla Şekil 3.36, 3.37 ve 3.38’de yer almaktadır. Kullanılan üç farklı yazılımdan SAP2000n yazılımında; sistemin birinci mertebe yatay rijitliği yayın eksenel rijitliğine dönüştürülmüş olarak tanımlandıktan sonra program ikinci mertebe etkilerini ($P-\Delta$) kendi içinde hesaplarken, 3DBASIS ve ISOTHA-1 yazılımlarında sistemin yatay rijitliği olarak, Denklem 2.8 ile önceden hesaplanan ikinci mertebe rijitliği giriş bilgisi olarak tanımlanmaktadır.

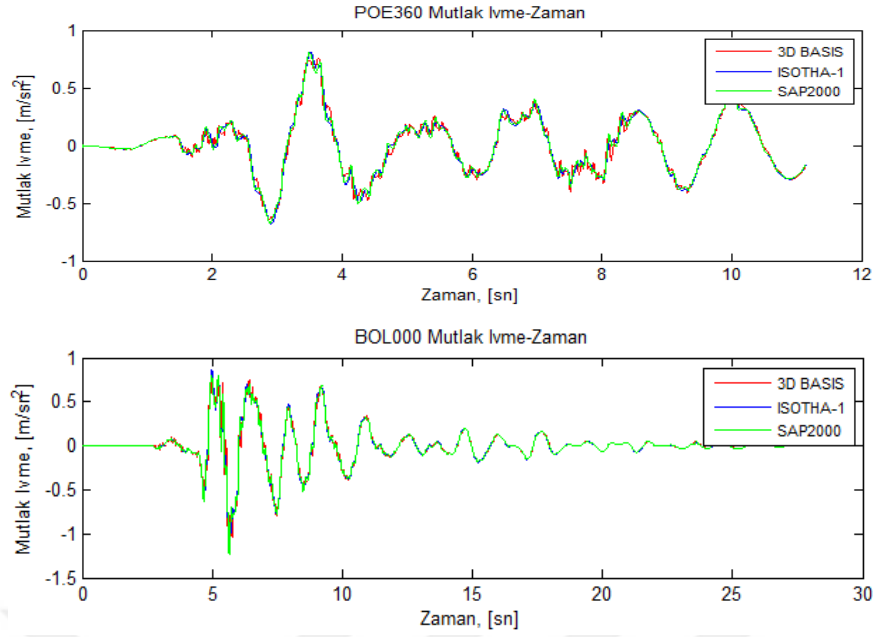


Şekil 3.36 : POE360 ve BOL000 depremleri için yalıtım katı yerdeğiştirmeleri.

Şekil 3.36, 3.37 ve 3.38 incelendiğinde, üç farklı yazılım ile elde edilen yerdeğiştirme, hız ve ivme taleplerinin her iki deprem için de üst üste düştüğü görülmektedir. Dolayısıyla, tüm çalışma boyunca kuramsal hesaplarda sismik yalıtımlı sistem için üst yapı ile beraber kurulan matematik model üzerinde SAP2000n yazılımı ile gerçekleştirilen, zaman tanım alanındaki analizlerin güvenilirliği ortaya konulmaktadır.



Şekil 3.37 : POE360 ve BOL000 için yalıtım katı hızları.



Şekil 3.38 : POE360 ve BOL000 için yalıtım katı ivmeleri.

3.13 Değerlendirme ve Yorumlar

Önerilen sismik yalıtım sistemli ve ankastre mesnetli $\frac{1}{4}$ ölçekli deney numuneleri üzerinde seçilen deprem kayıtları etkisinde gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri ve aynı deprem kayıtları için geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da hesaba katıldığı zaman tanım alanındaki analizler sonunda elde edilenler aşağıda özetlenmektedir.

- Deneysel ve kuramsal çalışmalar, önerilen sismik yalıtım sistemi ile üst yapıya aktarılan yer ivmelerinin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Bu oran %70 düzeylerine kadar çıkabilmektedir. Böylelikle yapının kuvvetli yer hareketleri sırasında hasar alma olasılığı önemli ölçüde azaltılmaktadır.
- Önerilen sismik yalıtım sistemi ile ankastre mesnetli sisteme göre kat ivmeleri ve taban kesme kuvvetleri önemli oranda azaltılmaktadır. Uygulanan deprem kayıtları için, yalıtım katı ivmeleri ile taban kesme kuvvetlerindeki azalma oranı ortalama $\frac{1}{7}$ olarak ortaya çıkmaktadır.
- Düzlem mafsallara sahip sismik yalıtım sisteminde, yalıtım katı mafsallarındaki sürtünme sebebiyle, %18-20 düzeyinde bir eşdeğer sönüm oranı ortaya çıkmaktadır.

- Sismik yalıtım katı mafsallarındaki sürtünme göz önüne alınmadan hesaplanan teorik ikinci mertebe kat yatay rijitliği, sürtünme nedeniyle %20-25 oranında artmaktadır.
- Sismik yalıtımlı numunede üst yapı görelî yerdeğıştirmeleri yok denecek düzeye indirilebilmekte, üst yapının sadece rijit öteleme yaptığı söylenebilmektedir. Tüm şekildeğıştirmelerin toplandığı yalıtım katındaki yanal öteleme oranı %20 civarına kadar ulaşabilmektedir. Bu oranın da farklı tasarım depremlerinin oluşturabileceğı yerdeğıştirme istemlerini karşılayabilecek düzeyde olduğu anlaşılmaktadır.
- Farklı depremlerin yerdeğıştirme istemleri ile düşey ve yatay yük kaynaklı eksenel yüklerin ikinci mertebe etkileri, geliştirilen sismik yalıtım sistemi tarafından karşılanabilmektedir.
- Deneyler sırasında, sismik yalıtım katında herhangi bir kalıcı şekildeğıştirme kaydedilmediğı gibi deneyler sonlandırıldığında numune üzerinde yapılan gözlemlerde de hiçbir kalıcı şekildeğıştirme tespit edilmemiştir. Böylelikle önerilen sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme özelliğine sahip olduğu da deneysel olarak ispatlanmaktadır.
- Sismik yalıtım katındaki diyagonal yay kutularının eksenel boy değıştirme (yerdeğıştirme) kapasitesinin aşılması durumunda; incelenen deney numunesinde toptan göçme meydana gelmemiş, numunenin yalıtım katı büyük yanal yerdeğıştirme yaparak çekme yerdeğıştirmesi yönünde merkeze gelme özelliğini kaybederek kalmıştır. Bu durum sistemin “*göçme emniyeti*” olarak değeriendirilmekle beraber, yay kapasitelerinin belirlenmesinde daha çok sayıda deprem kaydı kullanılarak bu olayın daha yakından incelenmesi yerinde olacaktır.

4. KÜRESEL MAFSALLI SİSMİK YALITIM SİSTEMİNE AİT DAVRANIŞIN İRDELENMESİ

4.1 Giriş

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin mühendislik pratiğinde de kullanılabileceğinin ispatlanması amacıyla, öncelikle bir küresel mafsallı tasarım yapılmıştır. Daha sonra Bölüm 3’de düzlem mafsallı olarak incelenen $\frac{1}{4}$ ölçekli sismik yalıtım katlı numunenin yalıtım katı küresel mafsallı hale getirilmiştir. Küresel mafsallı sismik yalıtım katının üzerine aynı üç katlı üst yapının montajını takiben; numune, sarsma masasının üzerine masa itme doğrultusu ile 45° ’lik açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Ardından küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları, kurulan hesap modeli üzerinde benzer deprem kayıtları için gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerden elde edilen sonuçlar ile de karşılaştırılmıştır.

Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı deney numunesine ait bilgiler, kullanılan deprem kayıtları, gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçlar bu bölüm içerisinde sunulmaktadır. Deney sonuçlarını kontrol etmek üzere gerçekleştirilen kuramsal hesaplar, bu hesaplardan elde edilen sonuçların deney sonuçları ile karşılaştırılmaları ve elde edilen bulguların genel değerlendirilmesine de bu bölümde yer verilmektedir.

4.2 Deney Numunesinin Üretimi

Küresel mafsallı sismik yalıtım katı imalatı için, düzlem mafsallı yalıtım katı modelinin yalıtım katı sökülerek atölyeye götürülmüştür. Mevcut yalıtım katı kolonlarının sökümünü takiben, yeni tasarımı yapılan küresel mafsalların hazırlanan imalat resimlerine göre mevcut kolonların iki ucuna montajı için gerekli revizyonlar yapılmıştır (Şekil 4.1a). Küresel mafsallı yalıtım katı için mevcut iki adet yay kutusu ile aynı geometriye sahip iki ilave yay kutusu imal edilmiştir (Şekil 4.1b). Diyagonal yay kutularının yalıtım katının alt ve üst uçlarına irtibatını sağlayan düzlem plakalar ile birleştiği düğüm noktalarında, yay kutularının düzleme dik hareketini sağlamak

üzere bırakılan boşluklara oynaklığı önlemek için kauçuk pullar yerleştirilmiştir (Şekil 4.1c). Küresel mafsallı sismik yalıtım katı imalatı, hazırlanan imalat resimleri çerçevesinde atölyede tamamlanmıştır. Yalıtım katı numunesinin montaj safhasına ait bir fotoğrafı Şekil 4.2a’da montajın tamamlanmış hali de Şekil 4.2b’de yer almaktadır.



(a) İki ucu küresel mafsallı kolon



(b) Yay kutuları



(c) Yay kutusu uç bağlantı plakası birleşimi

Şekil 4.1 : Küresel mafsallı, yay kutuları ve yay kutusu bağlantı plakası imalatları.

Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numune için geliştirilen küresel mafsallı topu ve mafsallı yatağına ait imalat resimleri ile küresel mafsallı $\frac{1}{4}$ ölçekli sismik yalıtım katı deney numunesinin imalat resmine ait bir görünüş EK.A’da yer almaktadır.



(a) Montaj safhası

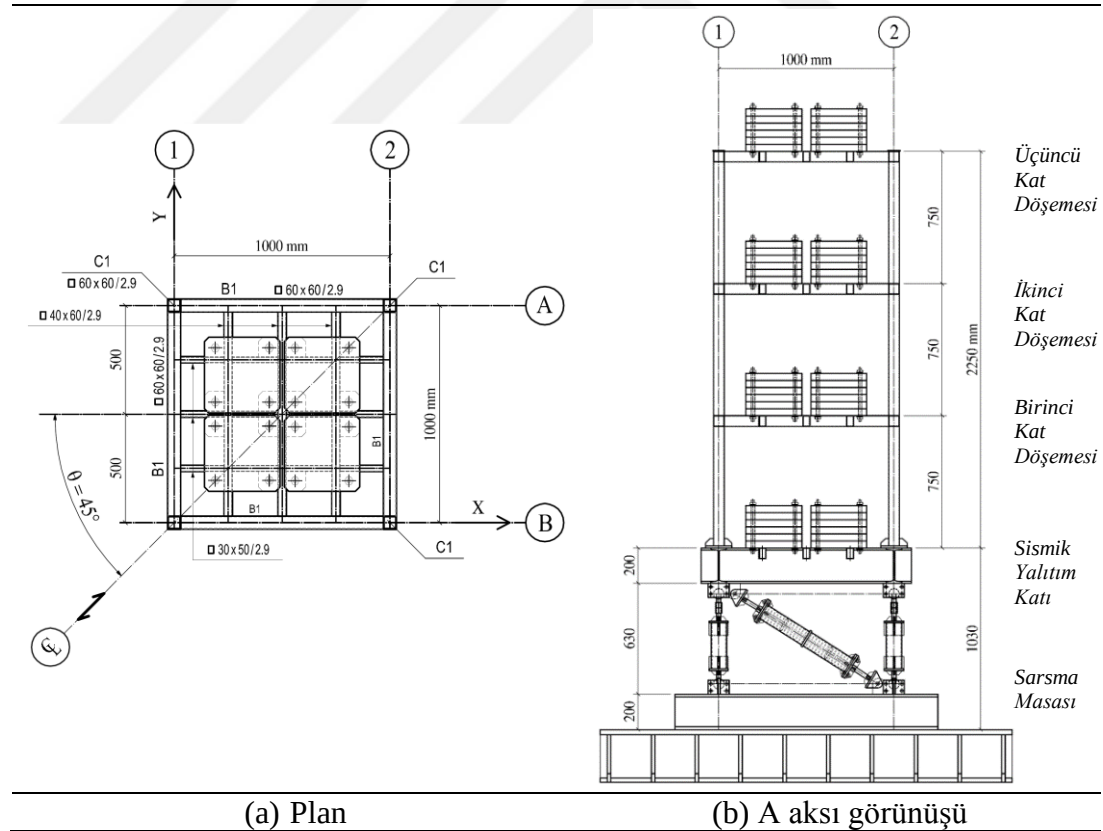


(b) Montajın tamamlanmış hali

Şekil 4.2 : Küresel mafsallı sismik yalıtım katı atölye imalatı.

4.2.1 Deney numunesinin geometrik özellikleri ve malzeme bilgileri

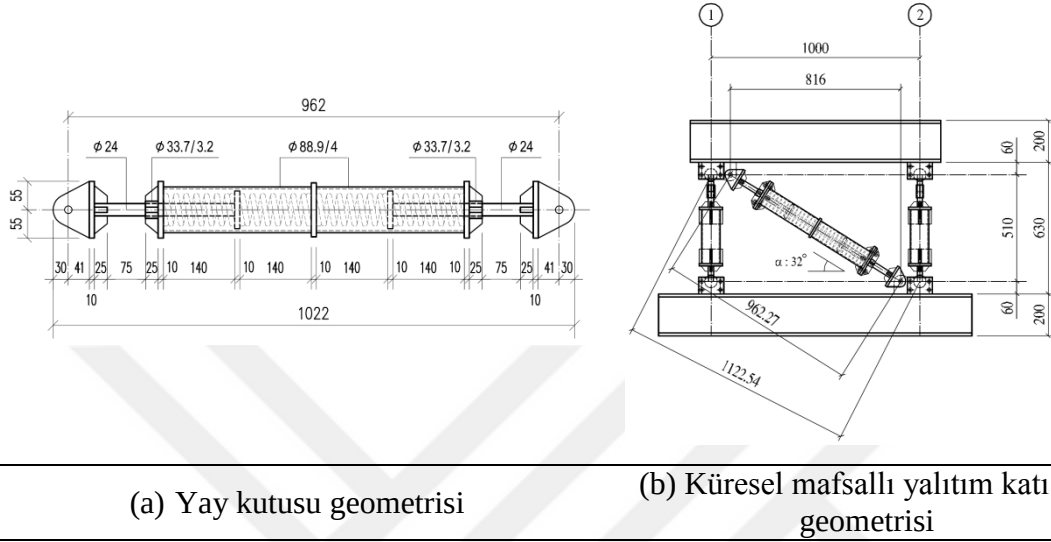
$\frac{1}{4}$ ölçekli, küresel mafsallı sismik yalıtım sistemli deney numunesinin üst yapısı Bölüm 3’de sunulan düzlem mafsallı sismik yalıtım sistemli numunenin üst yapısı olup, geometrik özellikleri Bölüm 3.3.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Küresel mafsallı sismik yalıtım katı numunesinin genel geometrisi yine bir önceki bölümde yer alan düzlem mafsallı yalıtım katı numunesi ile benzer olmakla birlikte, küresel mafsallı detayları sebebiyle sadece 88.9 mm çaplı boru kolonların boyları kısalmıştır. Buna karşılık boru kolonların iki ucundaki mafsaldan mafsala olan uzaklığı ve yalıtım katının yüksekliğini temsil eden uzunluk (h) ise yine 510 mm olarak teşkil edilmiştir. Yalıtım katında her iki doğrultuda ikişer adet olmak üzere dört adet olarak tertiplenen diyagonal yay kutularının geometrisi de, düzlem mafsallı yalıtım katı için kullanılan yay kutuları geometrisi ile tamamen aynıdır. Diyagonal yay kutularının yatayla yaptığı açı (α) geometri benzerliği sebebiyle 32° ’dir. Küresel mafsallı sismik yalıtım sistemli numunenin üst yapısına ait tipik bir kat planı ve numunenin görünüşü Şekil 4.3a ve 4.3b’de verilmektedir.



Şekil 4.3 : Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numune geometrisi.

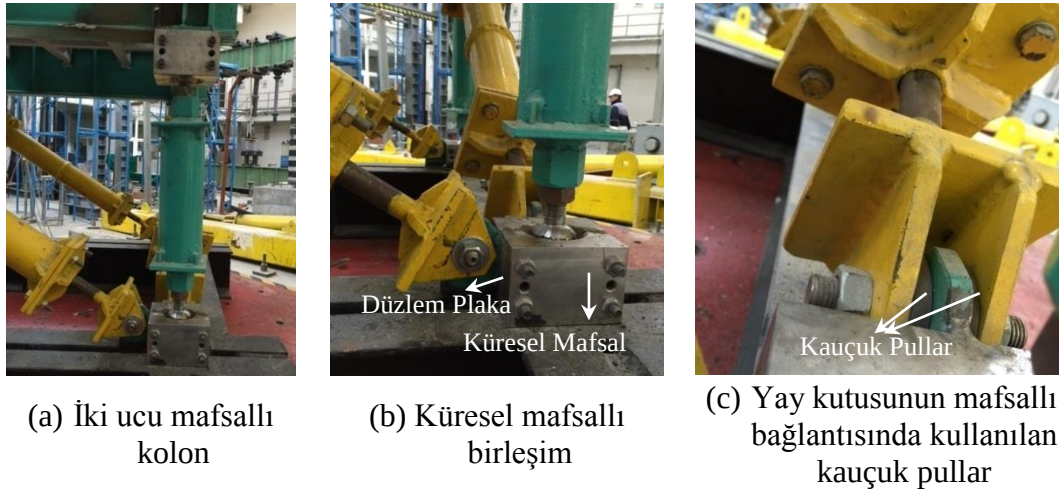
Yay kutusu ve yalıtım katının ayrıntılı geometrisi de sırasıyla, Şekil 4.4a ve 4.4b’de yer almaktadır. Yay kutularının her iki yöndeki toplam eksenel rijitliği birbirlerine eşit

olmak üzere, $K=2 \times 110=220$ kN/m'dir. Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin belirtilen geometrik ve rijitlik özellikleri ile birbirine dik iki doğrultudaki özdeş yatay rijitliği, bir önceki bölümde irdelenen tek doğrultulu düzlem mafsallı yalıtım katlı numunenin yatay rijitliğine eşit olmaktadır.



Şekil 4.4 : Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numune ve bileşenlerin geometrisi.

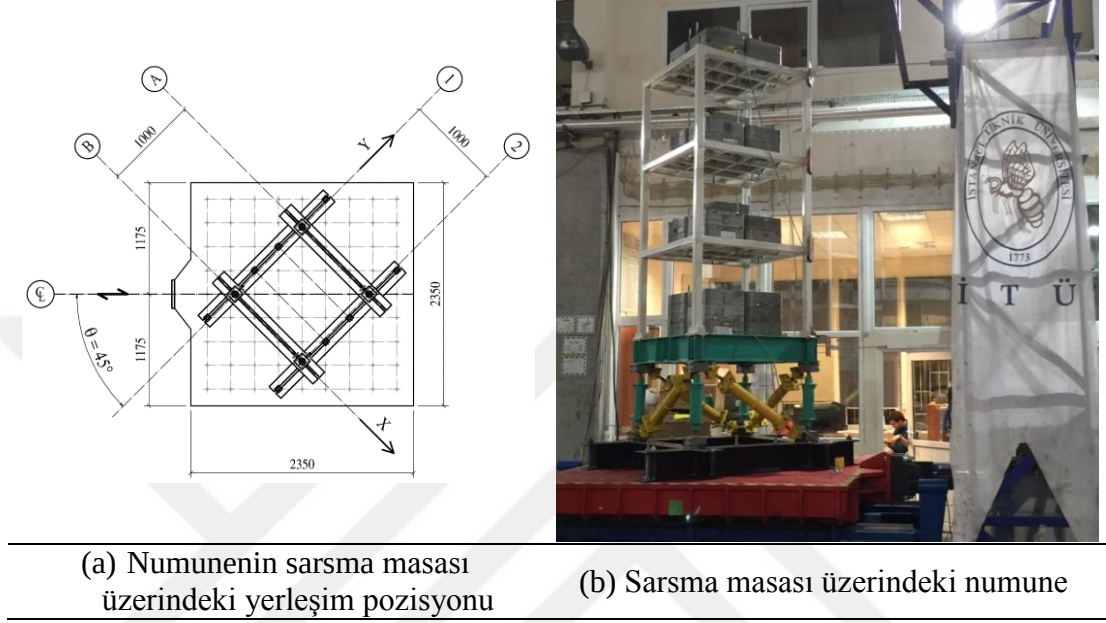
Sismik yalıtım katı için tasarımı yapılan küresel mafsallar, yalıtım katı kolonlarının alt ve üst uçlarında teşkil edilmişlerdir (Şekil 4.5a). Küresel mafsallı mekanizması, küresel mafsallı topu ve topun içine konumlandırıldığı prizmatik yataktan oluşmaktadır.



Şekil 4.5 : Küresel mafsallı birleşim.

Çapraz yay kutusu prizmatik yatağın dış duvarına ve rijit kirişe kaynaklı olarak bağlanan düzlem plaka ile bulonlu olarak birleşmektedir (Şekil 4.5b). Yay kutularının düzlem dışı hareketine müsaade etmek üzere, temel ve üst kat kirişlerine bağlandığı düzlem plakalı birleşimlerde bırakılan boşluklara, kauçuk pullar yerleştirilmiştir (Şekil

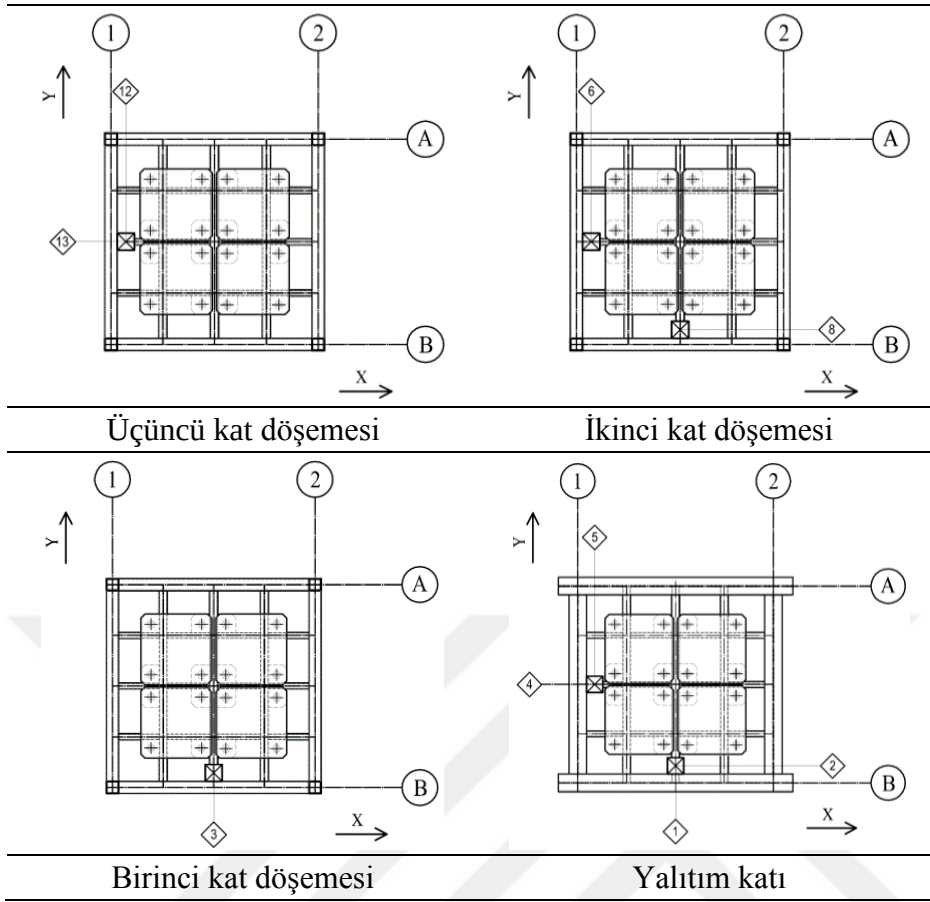
4.5c). İki ucu küresel mafsallı kolonları ve iki doğrultuda toplam dört adet yay kutusunu bulunduran sismik yalıtım katlı numune, sarsma masası üzerine itme doğrultusu ile 45°'lik açı yapacak biçimde yerleştirilmiştir (Şekil 4.6). Böylelikle, numunenin yer hareketleri sırasında iki eksenli davranışının incelenme imkanı elde edilmiştir.



Şekil 4.6 : Sarsma masası üzerindeki küresel mafsallı yalıtım katlı test numunesi.

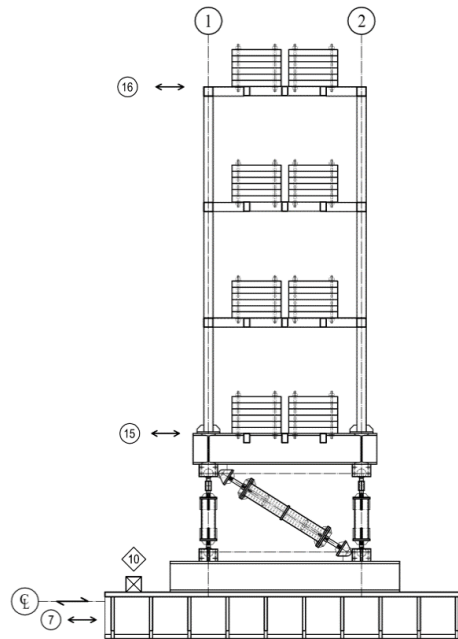
4.2.2 Deney Düzenegi

Tek eksenli ve üç eksenli $\pm 2g$ kapasiteli ivme ölçerler numunenin katlarına değişik pozisyonlarda konumlandırılmıştır. Sarsma masası üzerinde hareket doğrultusunda olmak üzere bir adet tek eksenli, yalıtım katında iki adet üç eksenli, birinci katta bir adet tek eksenli, ikinci katta iki adet tek eksenli, üçüncü katta da bir adet üç eksenli olmak üzere, numune üzerine toplam yedi adet ivme ölçer yerleştirilmiştir. Kullanılan ivme ölçerlerin pozisyonları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Şekillerde ivme ölçerlerin doğrultularına ait numaralar eşkenar dörtgen işaretinin içinde yer almaktadır. Numuneye, sismik yalıtım katı ve tepe katında iki adet LPT 1250’lik yerdeğiştirme ölçer bağlanmıştır. Bir adet LPT 700’ lük yerdeğiştirme ölçer de sarsma masasına bağlanmıştır. Numune üzerine bağlanan yerdeğiştirme ölçerler numunenin x ve y ile gösterilen birbirine dik ana eksenini ile 45°'lik açı yapacak biçimde diyagonal doğrultuda yerleştirilmiştir. Yerdeğiştirme ölçerlerin numaraları Şekil 4.8’ de daire işareti içerisinde verilmektedir.



Şekil 4.7 : İvme ölçerlerin kat döşemeleri üzerindeki yerleşimi.

Sismik yalıtım katı ve üst yapı katlarına yerleştirilen ve çelik plakalardan oluşan ağırlıklar kat döşemelerinde yer alan iki doğrultudaki kirişlere rijit olarak bağlanmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 : Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.

Katlara yerleştirilen kütle değerleri Bölüm 3 ile benzer olarak, sismik yalıtım katında 1.38, üst katlarda ise 1.04 kNsn²/m'dir.

4.3 Deprem Kayıtları

Sismik yalıtımlı numuneye; Çizelge 3.2 ve Şekil 3.10 ile verilen dördü yakın üçü de uzak fay depremi olmak üzere toplam yedi deprem kaydı uygulanmıştır.

4.4 Serbest Titreşim Karakteristikleri

Sismik yalıtımlı numunenin titreşim frekansları, uygulanan depremler sırasında gerçekleştirilen FFT analizlerinden elde edilmiştir. Numuneye ait ilk etkin titreşim frekanslarının, Bölüm 3'deki düzlem mafsallı numuneye benzer olarak, 0.58-0.70 Hz aralığında olduğu görülmüştür. Numunenin titreşim frekanslarındaki bu değişimlerin muhtemel sebeplerinin, bir önceki bölümde irdelenen düzlem mafsallı sistemde olduğu gibi bu kez küresel mafsallarda oluşan sürtünmeler ve yerdeğiştirme genliklerine göre değişen ikinci mertebe etkileri olduğu anlaşılmaktadır.

Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numune geometri, rijitlik ve kütle özellikleri bakımından Bölüm 3'de incelenen düzlem mafsallı sismik yalıtım katlı numune ile tamamıyla özdeştir. Numuneye ait birinci serbest titreşim frekansı, tek serbestlik dereceli sistem kabulü ve mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmaksızın hesaplanan teorik ikinci mertebe yatay rijitlik kullanılarak, Bölüm 3.6.2'de hesaplandığı biçimde;

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_x}} , T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{4.98}{60.53}} = 1.80 \text{ sn}$$

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = 0.56 \text{ Hz.}$$

şeklinde elde edilebilmektedir.

Numuneye uygulanan depremler sırasında gerçekleştirilen FFT analizlerinden elde edilen frekans değerleri Çizelge 4.1'de verilmektedir. Çizelgedeki frekans değerlerinin bir önceki bölümde düzlem mafsallı yalıtım katlı numune için ulaşılan frekans değerleri ile benzer olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 : FFT analizlerinden elde edilen numune titreşim frekansları.

Deprem	f_1	f_2	f_3
	Hz	Hz	Hz
POE360	0.63	5.33	13.29
TCU076	0.60	5.29	13.30
BOL000	0.70	5.30	13.28
HDA165	0.63	5.28	13.27
TCU067	0.58	5.37	13.36
PTS315	0.59	5.27	13.29
ERZ-EW	0.63	5.35	13.27

4.5 Sarsma Masası Deneyleri

Sarsma masası üzerine itme doğrultusu ile 45°'lik açı yapacak şekilde yerleştirilen, küresel mafsallı sismik yalıtım katlı, ¼ ölçekli deney numunesinin masa üzerinde yedi farklı deprem kaydı için sırasıyla %25, %50, %75 ve %100 ölçekli deneyleri gerçekleştirilerek, deneyler sırasında oluşan yerdeğiştirme ve ivme değerleri kayıt altına alınmıştır.

4.6 Sarsma Masası Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Numunenin sarsma masası deneyleri sırasında ortaya çıkan ivme ve yerdeğiştirme büyüklüklerinin irdelenmesine aşağıdaki iki alt bölümde yer verilmektedir.

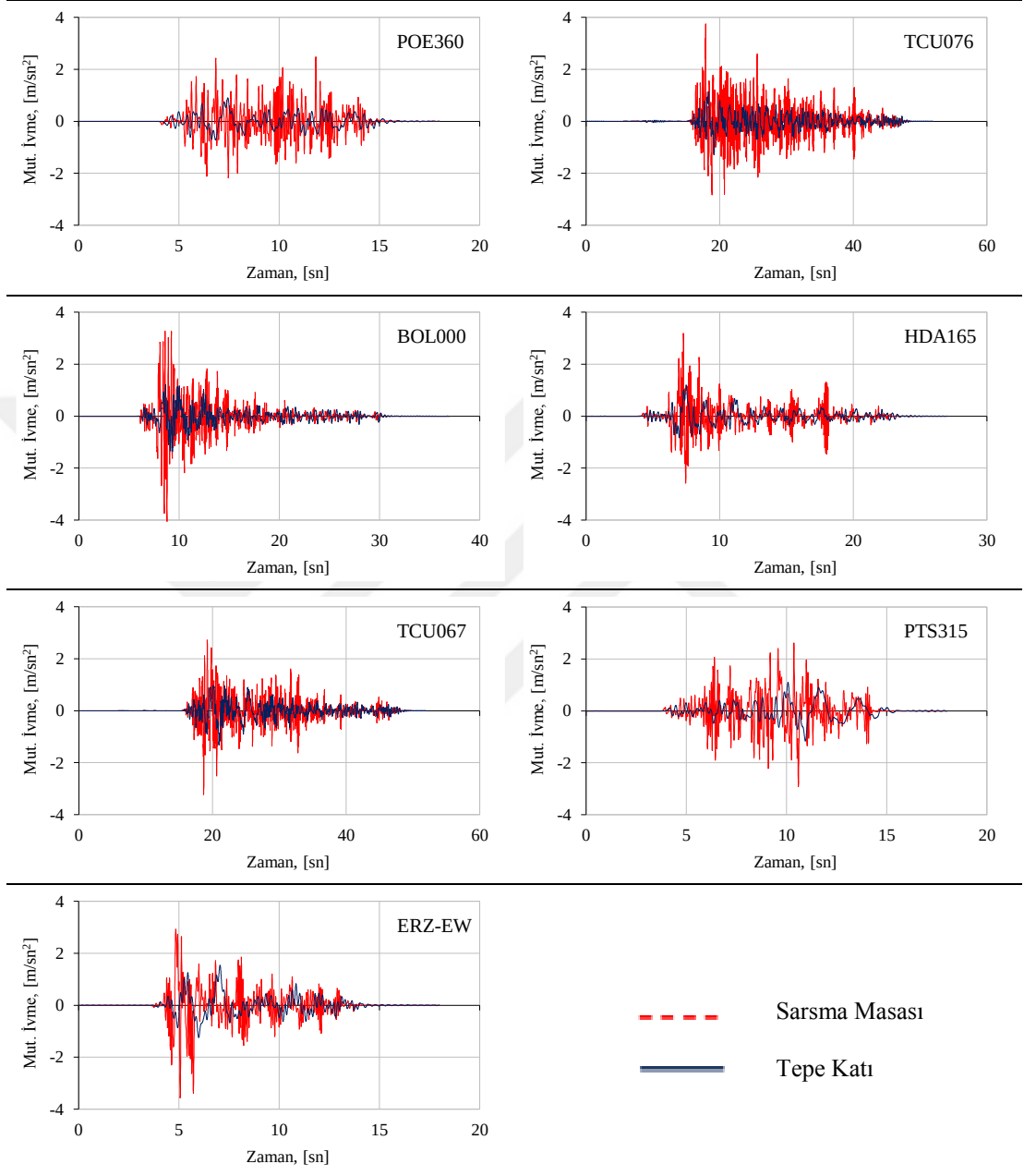
4.6.1 Sarsma masası ile tepe katı ivmelerinin karşılaştırılması

Numuneye uygulanan tümü tam ölçekli (%100) yedi farklı deprem kaydı etkisinde, sarsma masası ve tepe katında ortaya çıkan ivmeler, Şekil 4.9'da verilmektedir. Katlardaki ivme ölçerlerden numunenin iki ana doğrultusu için okunan $\ddot{u}_x$ ve $\ddot{u}_y$ ivmeleri, vektörel birleştirme ile sarsma doğrultusuna $(\ddot{u})_s$ dönüştürülmektedir (Denklem 4.1).

$$\ddot{u}_s = \sqrt{(\ddot{u}_x^2 + \ddot{u}_y^2)} \quad (4.1)$$

Tepe katı ile sarsma masası arasındaki en büyük ivme oranı $1.36/4.10=0.33$ olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer bir değişle, sismik yalıtımlı numunede yer hareketi etkisinde yapının maruz kaldığı yer ivmeleri, yalıtım katı vasıtasıyla %70 oranında

azaltılabilmektedir. Tepe katında oluşan en büyük mutlak ivme 1.55 m/sn^2 olarak oluşmaktadır. Bu değer, bir önceki bölümde yer alan ankastre mesnetli numunede oluşan ivme değerinin 1/10'u düzeyinde kalmaktadır.

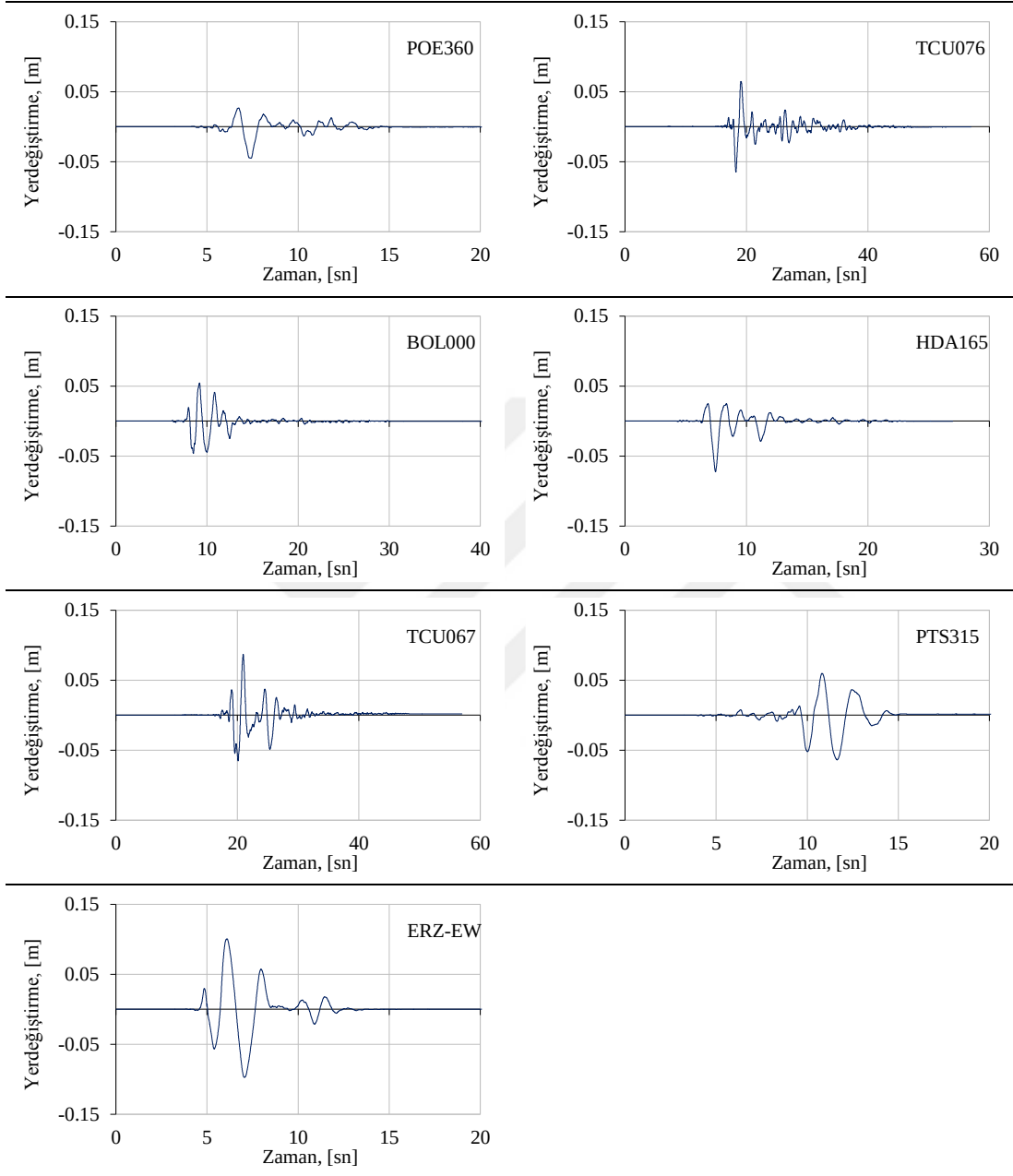


Şekil 4.9 : Tepe katı ile sarsma masası ivmelerinin karşılaştırılması.

4.6.2 Yalıtım katı görelî yerdeğıştirmeleri

Numunenin yalıtım katında ölçülen yerdeğıştirmelerden, sarsma masasında oluşan yerdeğıştirmeler anlık olarak çıkarıldığında elde edilen yalıtım katı görelî yatay yerdeğıştirme geçmişleri Şekil 4.10'da verilmektedir. Sismik yalıtımlı numunenin üst katlarının deneyler sırasında, rijit cisim hareketi yaptığı görülmüştür. Bu sebeple de

üst katların kendi içlerindeki göreceli yerdeğiştirmeleri çok küçük kalmaktadır. Yalıtım katında ortaya çıkan en büyük göreceli yerdeğiştirme 100 mm olarak ERZ-EW depreminde oluşmaktadır.



şekil 4.10 : Sismik yalıtım katı göreceli yerdeğiştirmeleri.

Sismik yalıtımlı sisteme uygulanan yedi farklı deprem sırasında, deney numunelerinde herhangi bir kalıcı yerdeğiştirme oluşmamıştır (şekil 4.10). Bu sebeple, geliştirilen sismik yalıtım sisteminin, doğrusal elastik çalışan yay kutuları vasıtasıyla, merkeze gelme becerisine sahip olduğunu söylenebilmektedir. Bu konu Bölüm 4.8’de ayrıca irdelenmektedir.

4.7 Küresel Mafsallardaki Sürtünmeden Kaynaklanan Eşdeğer Sönümün Tayini

Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin, küresel mafsallarındaki sürtünmeden dolayı ortaya çıkan eşdeğer sönüm, bir önceki bölümde anlatılan düzlem mafsallı sismik yalıtım katlı sistemde olduğu gibi üç ayrı yöntem ile hesaplanmıştır. Bunlar sırasıyla, enerji dengesi yöntemi, dinamik kuvvet-yerdeğiştirme yöntemi ve yarı bant genişliği yöntemi olup, aşağıdaki üç alt bölümde adı geçen yöntemler ile hesaplara ve ulaşılan eşdeğer sönüm oranlarına yer verilmektedir.

4.7.1 Enerji dengesi ile eşdeğer viskoz sönümün tayin edilmesi

Küresel mafsallı numunede uygulanan depremler sırasında mafsallardaki sürtünme dolayısıyla ortaya çıkan sönümün enerji dengesi yöntemi ile tayini için, Bölüm 3’de sırasıyla denklem 3.2, 3.3 ve 3.4 ile verilen aşağıdaki eşitliklerden faydalanılmaktadır.

$$\int m\ddot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int c\dot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int f_s\dot{u}(t)dt = -\int m\ddot{u}_g(t)\dot{u}(t)dt$$

$$c = 2\xi\omega m$$

$$E_K + E_D + E_S = E_I$$

Tümüyle deneyden gelen veriler kullanılarak oluşturulan enerji denge denklemi masanın hareket doğrultusu için yazılmıştır. Bu doğrultu numunenin birbirine dik iki ana eksenini (x,y) ile $\theta=45^\circ$ ’lik açı yapan diyagonal doğrultuya karşı gelmektedir (Şekil 4.6a). Numunenin hareket doğrultusundaki yatay rijitliği K_s birbirine dik iki ana doğrultudaki yatay rijitlikler K_x ve K_y kullanılarak, denklem 4.2 ile hesaplanabilmektedir.

$$K_s = K_x \cos^2 \theta + K_y \sin^2 \theta \quad (4.2)$$

Sismik yalıtım katının iki ana doğrultudaki özdeş yatay rijitliği sebebiyle K_x ve K_y birbirine eşittir (Denklem 4.3).

$$K_x = K_y \quad (4.3)$$

Denklem 4.2’nin sağ tarafı K_x cinsinden tekrar yazılacak olursa numunenin diyagonal doğrultudaki yatay rijitliği, denklem 4.4 ile yazılan formda ifade edilebilir.

$$K_s = K_x (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) \quad (4.4)$$

Böylece, yalıtım katının sarsma masası hareket doğrultusundaki yatay rijitliği K_s denklem 4.5’de verilen biçimde elde edilebilmektedir.

$$K_s=K_x= K_y \quad (4.5)$$

Denklem 4.5’den görüldüğü gibi, numunenin masa hareketi doğrultusundaki yatay rijitliği kendi ana eksenlerindeki yatay rijitliklerine eşit olmaktadır.

Deney numuneleri için, enerji terimleri tümüyle deney sırasında toplanan verilerden oluşmaktadır. Bunlar, ivme ölçerler ile ölçülen ivmeler, yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerden üretilen hızlardır. Deneylerden toplanan bu verilere yine Bölüm 3’deki düzlem mafsallı sismik yalıtım katında olduğu gibi, *Butterworth* alçak geçiren sayısal filtresi, 15 Hz eşik değeri ile uygulanmıştır.

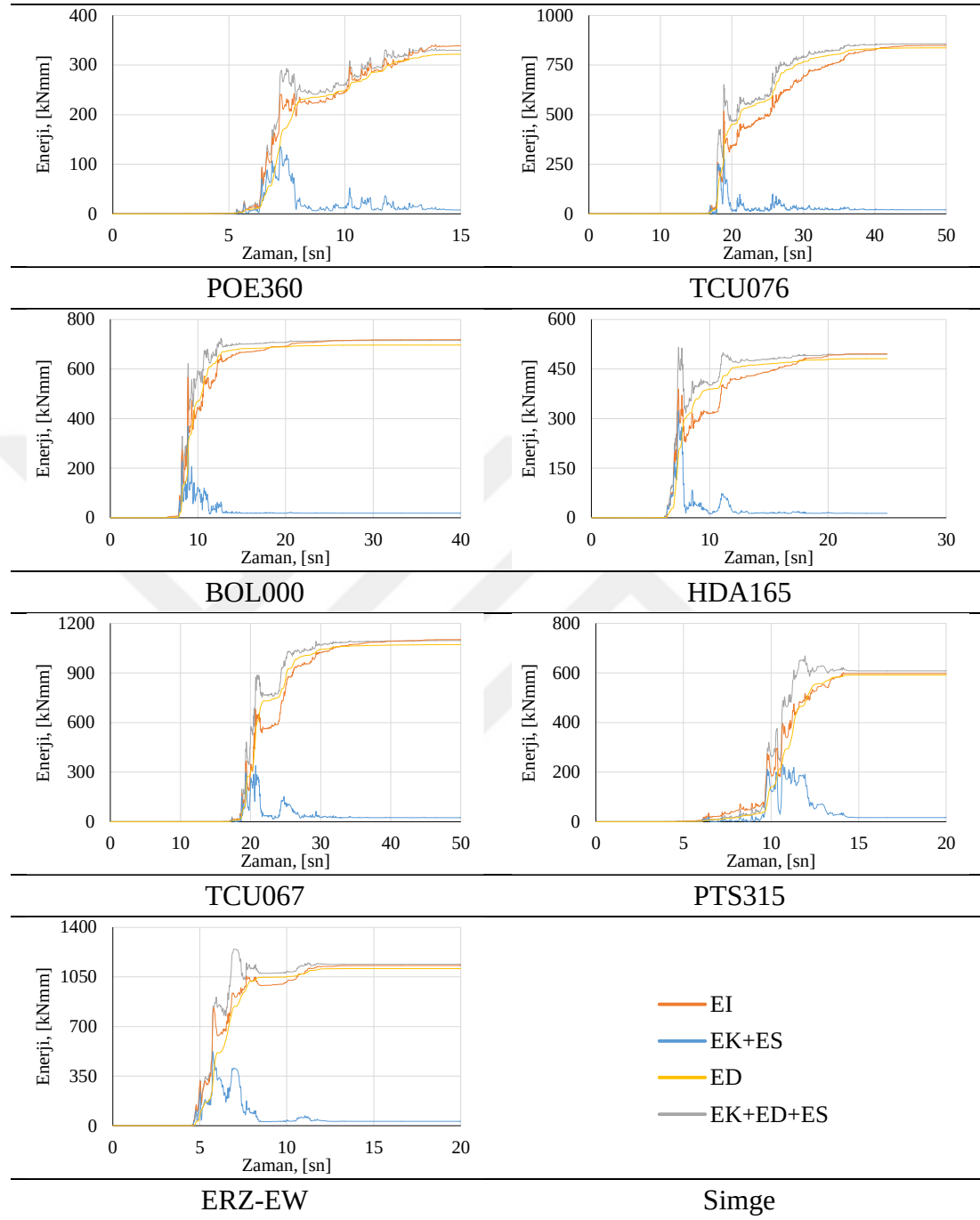
Deney numunelerine enerji denge denklemi uygulanırken ardışık yaklaşım yöntemi kullanılmıştır. Denklemdaki E_K , E_S ve E_I enerji bileşenleri doğrudan deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanmakta, buna karşın eşdeğer sönüm oranı (ξ) için enerji eşitliğini sağlamak üzere ardışık yaklaşım uygulanmaktadır. Deneyler sırasında sismik yalıtımlı numunede herhangi bir plastik şekildeğiştirme tespit edilmediğinden, f_s olarak elastik kuvvetler kullanılmaktadır. Elastik kuvvetler hesaplanırken, ilgili depreme ait Çizelge 4.1’de sunulan birinci frekans değerlerinin tersleri alınarak ulaşılan etkin periyotlar ($T_{(et.)}$), Denklem 3.1’de yerine konularak elde edilen etkin yatay rijitlikler ($K_{X(et.)}$) ,kullanılmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 : Numuneye ait birinci frekanslara karşı gelen etkin yatay rijitlikler.

Deprem	f_1	$T_{(et.)}=1/ f_1$	$K_{X(et.)}$
	Hz	sn.	kN/m
POE360	0.63	1.59	77.05
TCU076	0.60	1.67	69.65
BOL000	0.70	1.43	94.90
HDA165	0.63	1.59	77.05
TCU067	0.58	1.72	65.44
PTS315	0.59	1.69	67.63
ERZ-EW %75	0.63	1.59	77.05

Küresel mafsallı sismik yalıtımlı numunede yedi farklı deprem için deney verileri kullanılarak elde edilen enerji denge grafiklerine, Şekil 4.11’de yer verilmektedir. Tüm depremler için ardışık yaklaşım yöntemi ile önceki bölümde düzlem mafsallı yalıtım katı için elde edilen değere benzer olarak, %18-20 aralığında bir eşdeğer sönüm oranı ($\xi_{esd.}$) elde edilmiştir. Sismik yalıtımlı sistemde ortaya çıkan bu yüksek eşdeğer

sönümün esas sebebinin, yalıtım katı kolonlarının alt ve üst uçlarında yer alan küresel mafsallardaki sürtünme olduğu savı kesinleştirilmiştir.



Şekil 4.11 : Numuneye ait deneysel enerji dengesi grafikleri.

Bölüm 4.9’da yer alan küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin hesap modelleri kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizlerde, kritik sönüm oranı (ξ) sistematik olarak artırılarak analizler tekrarlandığında, yine bir önceki düzlem mafsallı yalıtım katlı numuneye benzer olarak sönüm oranının %18-20 değerleri için, deney ve analiz sonuçlarının örtüştüğü görülmüştür (Şekil 4.17), (Şekil

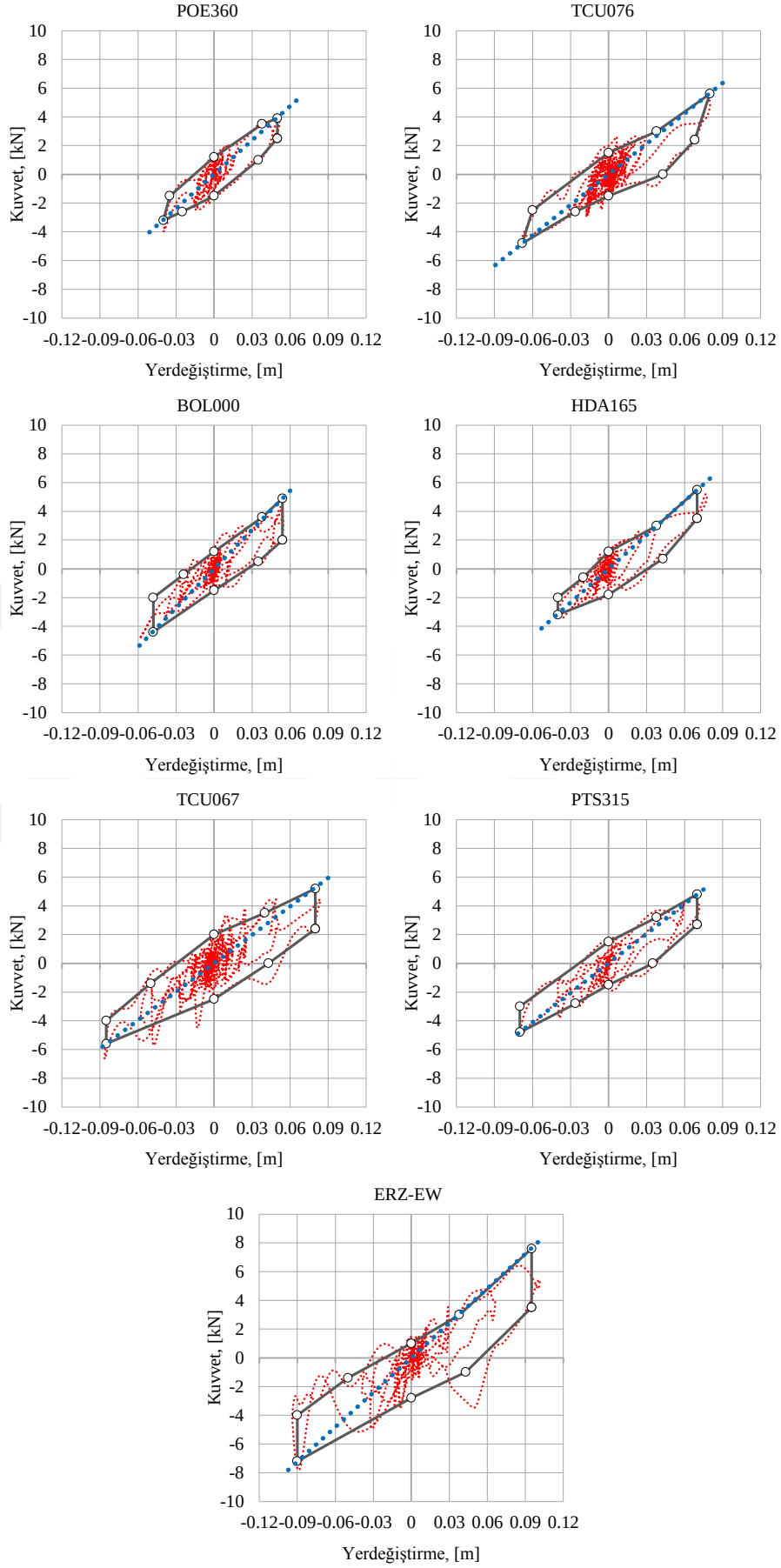
4.18). Bu da esasen deneysel veriler kullanılarak enerji denge denklemi yardımıyla, %18-20 olarak hesaplanan eşdeğer sönüm oranına ($\xi_{eşd.}$) ulaşmanın diğer bir yolu olmaktadır.

4.7.2 Dinamik kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile eşdeğer sönümün tayin edilmesi

Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numuneye ait kuvvet- yerdeğiştirme ilişkisi; uygulanan her bir deprem sırasında, sismik yalıtım katı üzerinde oluşan mutlak ivmeler ile katın üzerindeki toplam kütlelerin çarpımıyla elde edilen anlık kuvvet ile karşı gelen anlık göreceli yerdeğiştirmeler kullanılarak oluşturulabilmektedir (Şekil 3.22). Oluşturulan çevrimsel döngülerin zarfları kullanılarak da etkin yatay rijitlikler $K_{x(et.)}$ elde edilmektedir (Şekil 3.22a). Numuneye ait eşdeğer sönüm oranına ise denklem 3.5 ile ulaşılmaktadır.

Sismik yalıtımlı numuneye etkitilen yedi farklı deprem kaydı için gerçekleştirilen dinamik deneylere ait Şekil 4.12'deki kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri üzerinde yukarıda belirtilen işlemler uygulandığında, eşdeğer sönüm oranı ($\xi_{eşd.}$) %18-20 olarak elde edilmektedir. Bu değerlerin de Bölüm 4.7.1'de sunulan *enerji denge denklemleri* ile elde edilen büyüklüğe benzer olduğu görülmektedir. %18-20 aralığındaki eşdeğer sönüm oranının Bölüm 4.7.3'de anlatılan *yarı bant genişliği yöntemi* ile ulaşılan eşdeğer sönüm oranı ile de uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

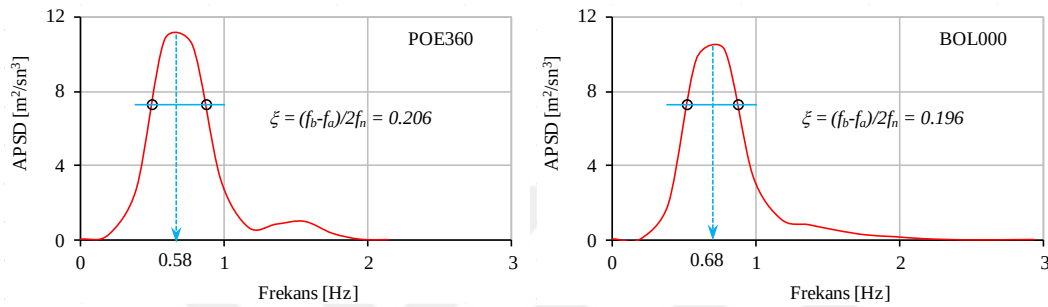
Şekil 4.12'de sunulan dinamik kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri üzerine işaretlenen etkin yatay rijitliklerin ($K_{x(et.)}$) ortalaması 75.4 kN/m olarak ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, Bölüm 3.6.2'de kütle, rijitlik ve geometri bakımından tamamen benzer düzlem mafsallı sismik yalıtım katının mafsallarındaki sürtünmeler göz önüne alınmaksızın hesaplanan teorik ikinci mertebe yatay rijitliği ise 60.53 kN/m olarak elde edilmektedir. Buradan da küresel mafsallı sismik yalıtımlı sistemde mafsallardaki sürtünmeden kaynaklı ortalama yatay rijitlik artışının %25 mertebesinde olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.12 : Sismik yalıtım katı dinamik kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri.

4.7.3 Yarı bant genişliği yöntemi ile eşdeğer sönümün tayin edilmesi

Küresel mafsallı sismik yalıtımlı sistemde deney sonuçlarından elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan güç spektrumu yoğunluk fonksiyonlarından (PSD) faydalanılarak uygulanan yarı bant genişliği yöntemi ile de eşdeğer viskoz sönüm oranları ($\xi_{eşd.}$) elde edilmiştir. Bu yöntem ile elde edilen eşdeğer viskoz sönüm oranlarının da %18-20 aralığında olduğu görülmüştür. Şekil 4.13’ de POE360 ve BOL000 depremlerine ait, yarı bant genişliği uygulamalarına yer verilmektedir.



Şekil 4.13 : POE360 ve BOL000 depremleri için yarı bant genişliği uygulaması.

4.8 Sismik Yalıtım Sisteminin Merkeze Gelme Kabiliyeti

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin, deneyler sırasında sergilemiş olduğu merkeze gelme kabiliyetinin yanı sıra, sismik yalıtım ürünlerinin merkeze gelme özelliğine sahip olabilmesi için farklı yönetmeliklerde önerilen iki koşulu da sağladığı aşağıda gösterilmiştir.

- Sismik yalıtım sistemi, tasarım yerdeğiştirmesi (d_{dc}) ile tasarım yerdeğiştirmesinin % 50’ si ($0.5d_{dc}$) arasında, 0.025W’lik bir kuvvet üretme kapasitesine sahip olmalıdır. Burada, W yalıtım sistemi üzerindeki toplam ağırlığı ifade etmektedir (AASHTO Guide, 1991), (EC8, 2004 Madde 10.9.2.5d).

Sismik yalıtımlı numunenin ortalama etkin yatay rijitliği, $K_{x(ett)}=75.4$ kN/m’dir. Numunenin etkin periyodu aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir;

$$T_{et.} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{x(et.)}}} = 2\pi \sqrt{\frac{4.98}{75.4}} = 1.60 \text{ s}$$

Prototip yapı için, $T_{et.} = 2 \times 1.60 = 3.20 \text{ s}$, ($\lambda = 2$)

$$K_{x(et.)} = 4 \times 75.4 = 301.6 \text{ kN / m}, (\lambda = 4)$$

$$m = 16 \times 4.98 = 79.68 \text{ kN s}^2 / \text{m}, (\lambda = 16)$$

EC8 (2004):

Zemin sınıfı B; $T_B(s) = 0.15 \text{ sn}$; $T_C(s) = 0.50 \text{ sn}$; $T_D(s) = 2.0 \text{ sn}$; $S = 1.20$

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{(5 + \xi)}} \geq 0.55$$

$$\xi = 20.0 \quad \eta = 0.63$$

$$T_D \leq T \leq 4 \text{ sn}$$

$$S_{et}(T) = a_g S \eta 2.5 \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] = 0.4g \times 1.2 \times 0.63 \times 2.5 \times \left[\frac{0.5 \times 2.0}{3.2^2} \right] = 0.724 \text{ m/sn}^2$$

$$d_{dc} = \frac{MS_e(T_{et}, \xi_{et.})}{K_{et, \min}} = \frac{79.68 \times 0.724}{301.6} = 0.191 \text{ m}$$

$$\text{Numune için, } d_{dc} = \frac{0.191}{4} = 0.048 \text{ m} \quad (\lambda = 1/4)$$

$$F(d_{dc}) = K_{x(et.)} \times d_{dc} = 75.4 \times 0.048 = 3.62 \text{ kN}$$

$$F(0.5d_{dc}) = K_{x(et.)} \times 0.5 \times d_{dc} = 75.4 \times 0.5 \times 0.048 = 1.81 \text{ kN}$$

$$\Delta F = F(d_{dc}) - F(0.5d_{dc}) = 1.81 \text{ kN} > 0.025W = 0.025 \times 49.8 = 1.24 \text{ kN} \quad \checkmark$$

- Sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme kapasitesine sahip olduğunun doğrulanması, deprem sırasında sistemde ortaya çıkan hesaplanabilen veya deneysel olarak ölçülebilen iki tip enerjinin basit karşılaştırması ile mümkün olabilmektedir. Yalıtım sisteminin sıfır yerdeğiştirme değerinden tasarım yerdeğiştirme değerine d_{dc} ulaşınca kadar sahip olduğu geri kazanılabilir depolanmış enerji E_s miktarı, çevrimsel döngüler ile tüketilen enerji miktarı E_H 'ın λ katından daha büyük olmalıdır (Medeot, 2012).

$$E_s \geq \lambda E_H$$

burada; E_s geri kazanılabilir depolanmış enerjiyi (elastik şekil değiştirme enerjisi, potansiyel enerji ve kinetik enerji) temsil etmektedir. EC8, Bölüm 2,

$$\lambda = 0.25$$

$$E_s \geq 0.25 E_H$$

Şekil 4.11'de verilen enerji denge grafikleri incelendiğinde; çalışılan tüm depremler için kinetik enerji (E_k) ve şekildeğiştirme enerjisi (E_s)'nin toplamının $0.25 \times E_D$ 'den büyük olduğu görülmektedir.

$$(E_K + E_S) \geq 0.25 E_D$$

burada, E_D sismik yalıtım katının küresel mafsallarında sürtünme ile tüketilen sönüm enerjisini ifade etmektedir (Çevrimsel döngüler için Bkz. Şekil 4.12).

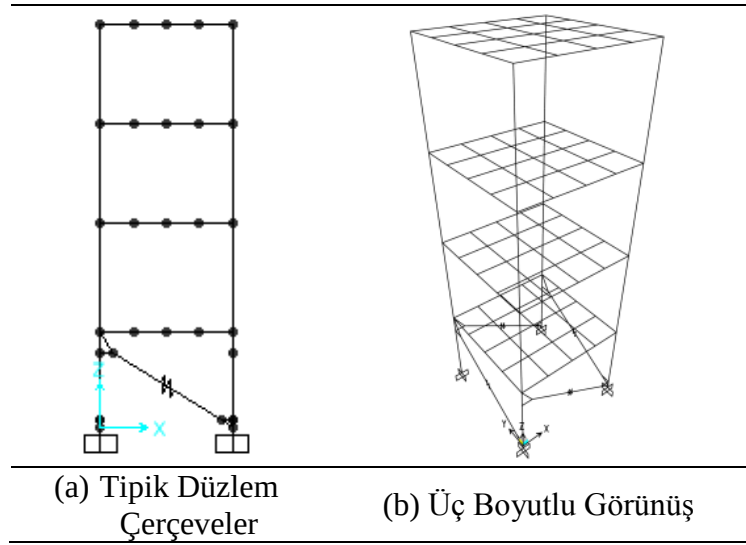
4.9 Kuramsal Hesaplar ve Deneyler ile Karşılaştırmalar

Küresel mafsallı sismik yalıtım katına sahip numune deneylerinden elde edilen yerdeğiştirme ve ivme büyüklüklerine kuramsal olarak da ulaşmak amacıyla, numunenin hesap modeli oluşturularak, zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Kuramsal hesaplara esas hesap modeli, gerçekleştirilen analizlerin ayrıntıları, elde edilen sonuçlar ve deney sonuçları ile karşılaştırmalar çalışmanın bu bölümünde yer almaktadır.

4.9.1 Hesap modeli

Geometri, kütle ve rijitlik bakımından önceki bölümde irdelenen düzlem mafsallı sismik yalıtım katlı numuneye benzer özellikler taşıyan bu numunenin hesap modelinde de, kolon ve kiriş elemanlar ile ikincil döşeme elemanları çubuk sonlu elemanlar ile idealleştirilmiştir (Şekil 4.14). Yay kutuları çekme ve basınçta simetrik eksenel rijitliğe sahip, doğrusal elastik yaylar ile temsil edilmiştir. Sismik yalıtım katının yatay rijitlikleri olarak, mafsallardaki sürtünmeden oluşan ilave yatay rijitlikleri de içiren ve uygulanan her bir deprem için deneylerden elde edilen, Şekil 4.12'deki etkin yatay rijitlikler ($K_{x(et.)}$) kullanılmıştır. Etkin yatay rijitlikler sisteme diyagonal yay kutusu açısı ile dönüştürülmek suretiyle, doğrudan doğrusal yayların eksenel rijitlikleri olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem yapılırken, denklem 2.8 ile verilen sistemin ikinci mertebe rijitliği (K_x^{II}) yerine ($K_{x(et.)}$) yerleştirilerek, elde edilen doğrusal eksenel yay rijitliği (K) modele tanıtılmaktadır.

Yalıtım katının kolonlarının ile yay kutularının uçlarında yer alan prizmatik yataklar ve bağlantı plakaları sonsuz rijit çubuklar olarak modele dahil edilmişlerdir (Şekil 4.14a). Yalıtım katının kolonları iki ucundaki görelî rijit kırılgara üç eksen etrafında dönme serbestliğine sahip mafsallar ile bağlanmıştır. Modelde, kütleler katlardaki tüm düğüm noktalarına dağıtılan yığılı kütle olarak temsil edilmişlerdir. Geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da dikkate alındığı, SAP2000n yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde, Hilber-Huges-Taylor direkt integrasyon yöntemi ve Rayleigh tipi sönüm kullanılmıştır.

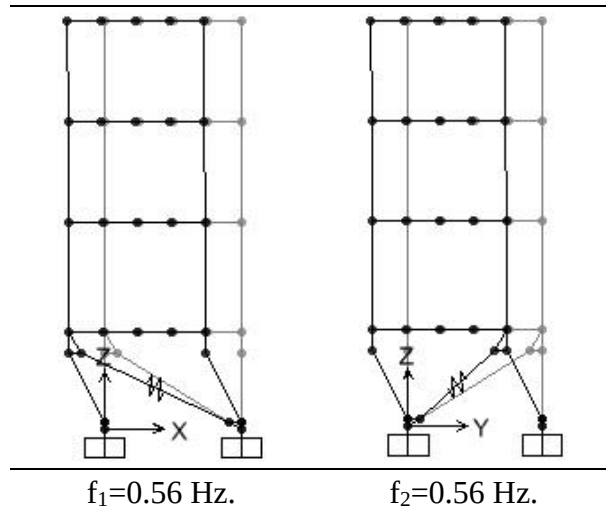


Şekil 4.14 : Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin hesap modeli.

Matematik modelde deprem uyarıları, sarsma masasındakine benzer olarak, modelin ana aksları (x,y) ile 45° 'lik açı yapacak biçimde yani diyagonal doğrultuda etkilmiştir.

4.9.2 Serbest titreşim karakteristikleri

Numunenin serbest titreşim analizlerinde sistemin yay rijitliği olarak öncelikle küresel mafsallardaki sürtünmenin etkisi dikkate alınmadan elde edilen yatay rijitlik değeri kullanılmıştır. Denklem 2.8 ile hesaplanan yatay rijitlik için, SAP2000n yazılımına yayın doğrusal rijitliğinin tanımlanması yeterli olmaktadır. Numunenin iki doğrultudaki birinci titreşim modları Şekil 4.15' de verilmektedir.



Şekil 4.15 : Numuneye ait ilk iki mod şekli.

Küresel mafsallı sismik yalıtımlı sistem için mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmadan teorik ikinci mertebe yatay rijitliği kullanılarak SAP2000n yazılımı ile ulaşılan her iki doğrultudaki birinci titreşim frekansı $f_1 = 0.56$ Hz değeri, Bölüm 4.4’de denklem 3.1 kullanılarak elde edilen değer ile üst üste düşmektedir.

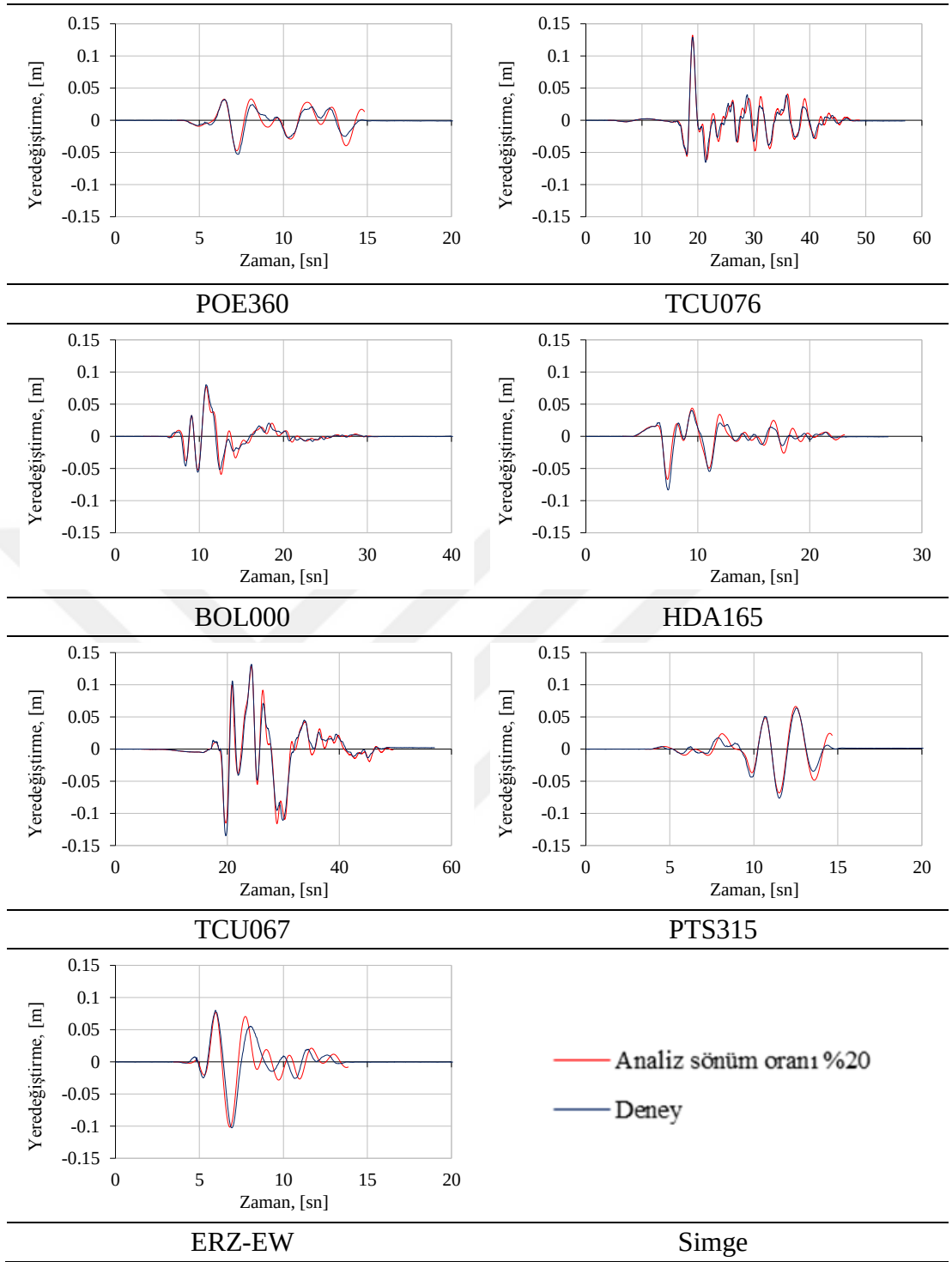
Buna karşılık aynı bölümde elde edilen ve Çizelge 4.1’de verilen, 0.58-0.70 Hz aralığında değişen frekans değerlerinin, 0.56 Hz değerinden %4-%25 mertebesinde büyük olduğu görülmektedir.

4.9.3 Deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Küresel mafsallı sismik yalıtım sistemine sahip numunede uygulanan yedi deprem kaydı etkisinde elde edilen yalıtım katı yerdeğiştirmeleri ve ivmeleri SAP2000n yazılımı kullanılarak, geometrik bakımdan doğrusal olmayış da dikkate alınarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerden ulaşılan yerdeğiştirme ve ivme büyüklükleri ile karşılaştırılmıştır. Belirtilen karşılaştırmalara aşağıda yer verilmektedir.

4.9.3.1 Yalıtım katı yerdeğiştirme geçmişlerinin karşılaştırılması

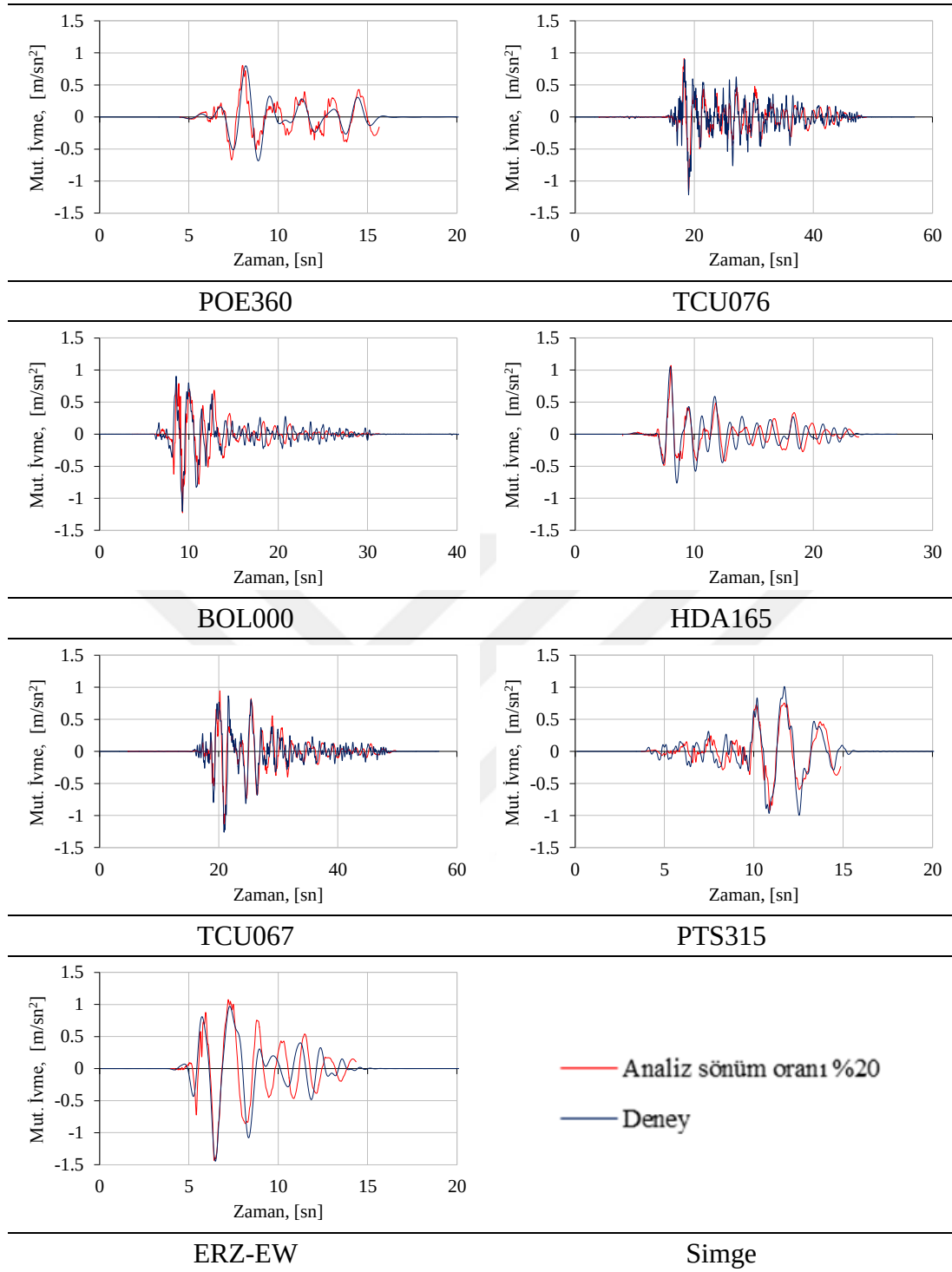
Küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numune için deneylerden elde edilen eşdeğer sönüm oranının etkisini irdelemek üzere, zaman tanım alanında yapılan analizlerde düzlem mafsallı sismik yalıtım katı analizlerine benzer olarak yine farklı sönüm oranları kullanılmıştır. Analizlerde kritik sönüm oranı (ξ) %20 ’ye ulaştığında tüm depremler için deney ve analiz sonuçlarının yeter yakınlıkla örtüştüğü görülmüştür (Şekil 4.16). Sönüm oranı ξ ’nin %20 değerinin, Bölüm 4.7.1 ve Bölüm 4.7.2’de enerji dengesi ve dinamik kuvvet-yerdeğiştirme zarflarından elde edilen %18-20 aralığındaki eşdeğer sönüm oranı $\xi_{eşd.}$ ile de uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16 : Sismik yalıtım katı mutlak yerdeğiştirme karşılaştırmaları.

4.9.3.2 Yalıtım katı ivme geçmişlerinin karşılaştırılması

Kritik sönüm oranının (ξ) %20 olması durumu için, matematik model üzerinde gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizlerden elde edilen yalıtım katı ivmelerinin deneylerden elde edilen ivmeler ile karşılaştırmalarına Şekil 4.17’de yer verilmektedir.



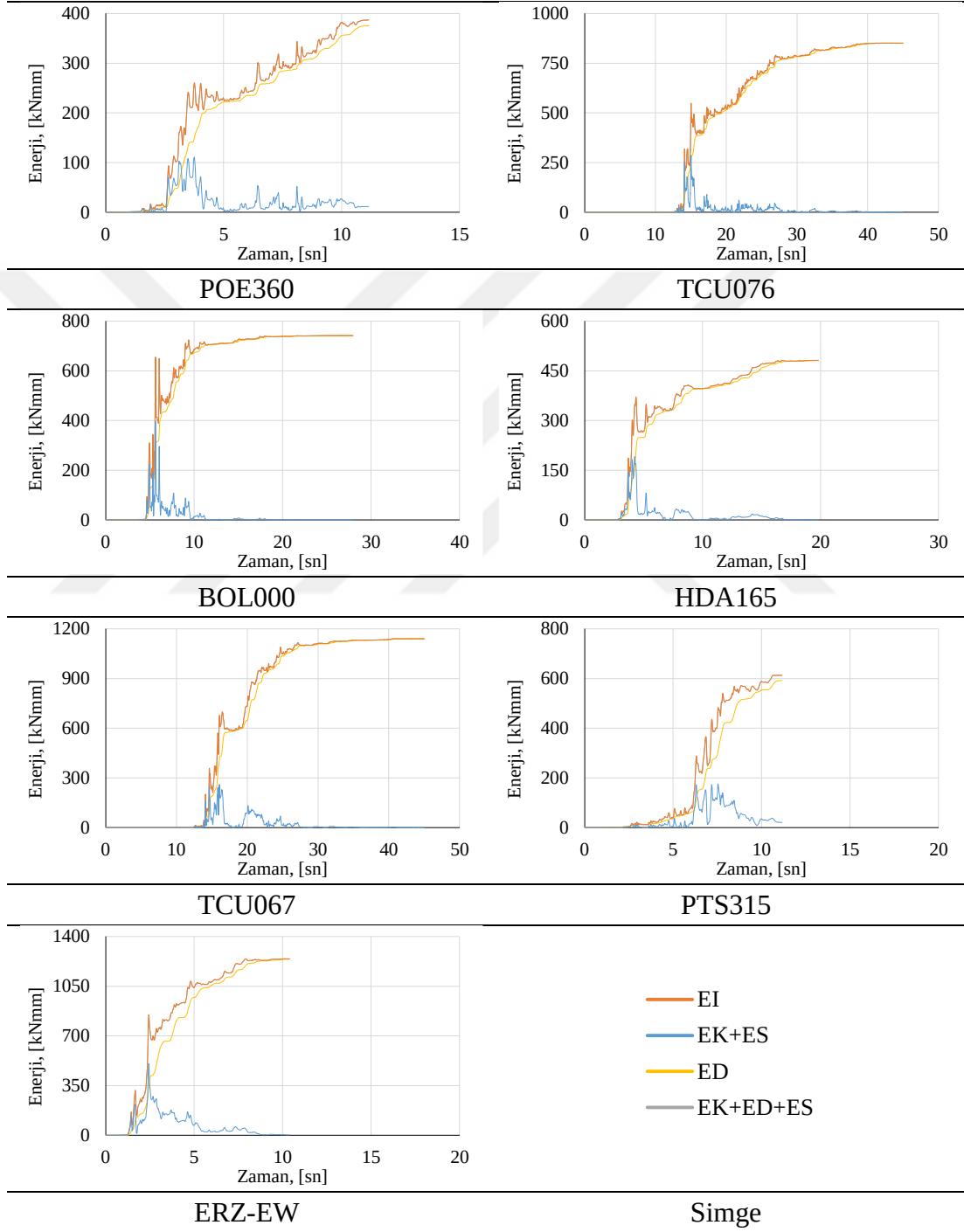
Şekil 4.17 : Sismik yalıtım katı ivme karşılaştırmaları.

Şekilden analiz ve deney ivmeleri arasında da yeterli uyum olduğu görülebilmektedir.

4.10 Kuramsal Hesaplara Ait Enerji Dengesi

Tek serbestlik dereceli sistem yaklaşımı ile sismik yalıtımlı numuneye ait deneysel verilere dayalı eşdeğer sönüm oranı $\xi_{eşd.} = 0\%20$ değerinin kullanıldığı kuramsal

hesaplarda, yedi deprem için enerji grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 4.18). Bu enerji grafiklerinin Şekil 4.11’de deneysel olarak ulaşılan grafikler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.18’den (E_K) kinetik, (E_D) sönüm, (E_S) şekildeğiştirme enerjileri toplamının, binaya giren enerji (E_I)’ya kritik sönüm oranının $\xi_{eşd.}=\%20$ olması durumunda eşitlendiği görülmektedir.



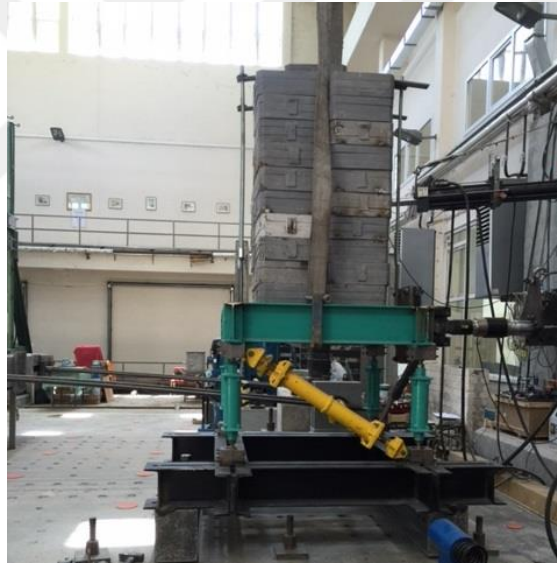
Şekil 4.18 : Numunenin kuramsal hesaplarına ait enerji denge grafikleri.

4.11 Bağımsız Yalıtım Katının Statik Deneyleri

Dinamik deneylerde elde edilen %20 mertebesindeki eşdeğer sönümün teyit edilmesine amacıyla, küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katının statik yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. MTS hidrolik vereni kullanılarak icra edilen bu deneylerde ayrıca küresel mafsallı birleşimlerde ortaya çıkan sürtünme katsayısının yalıtım katı üzerindeki kütleye bağlı değişimi de irdelenmiştir.

4.11.1 Deney düzeneği ve gerçekleştirilen deneyler

Küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katı, rijit üst kiriş seviyesinden bir bağlantı plakası ile MTS hidrolik verene bağlanmıştır. Ardından dinamik deneylerde kullanılan kütlelerin tümü, üst yapı çerçeve ağırlığını da içerecek biçimde bağımsız yalıtım katının üzerine yerleştirildikten sonra özel bir sıkıştırma mekanizması vasıtasıyla birbirlerine ve yalıtım katı döşemesine bağlanmıştır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Statik deneylere ait küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katı numunesi.

Daha sonra çapraz yay kutusuz (yalın) ve çapraz yay kutulu olmak üzere sırasıyla; $W=49.8$ kN, $W=39.5$ kN, $W=30.2$ kN, $W=21.0$ kN ve $W=0.0$ ağırlık durumları için, küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katının, ± 10 mm'lik adımlar ile ± 50 mm'ye ulaşıncaya kadar statik yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde yükleme hızı olarak, çok yavaş durum ile 0.2 Hz durumu kullanılmıştır. Yalın ve çapraz yay kutulu statik yükleme deneylerine ait bazı fotoğraflar sırasıyla, Şekil 4.20 ve 4.21'de verilmiştir.



(a) Çekme durumu, $W=49.8$ kN



(b) İtme durumu, $W=49.8$ kN



(c) Çekme durumu, $W=20.1$ kN



(d) İtme durumu, $W=20.1$ kN

Şekil 4.20 : Çapraz yay kutusuz(yalın) yalıtım katı statik deneyleri.



(a) Çekme durumu, $W=49.8$ kN



(b) İtme durumu, $W=49.8$ kN



(c) Çekme durumu, $W=20.1$ kN



(d) İtme durumu, $W=20.1$ kN

Şekil 4.21 : Çapraz yay kutulu yalıtım katı statik deneyleri.

Bu deneylerde esas amaç, dinamik masa deneylerine tabi tutulan ¼ ölçekli, 3 katlı, küresel mafsallı, çapraz yay kutulu ve üzerindeki ağırlığı $W=49.8$ kN olan numuneden elde edilen sönüm oranının başka bir deneysel yöntemle irdelenmesidir.

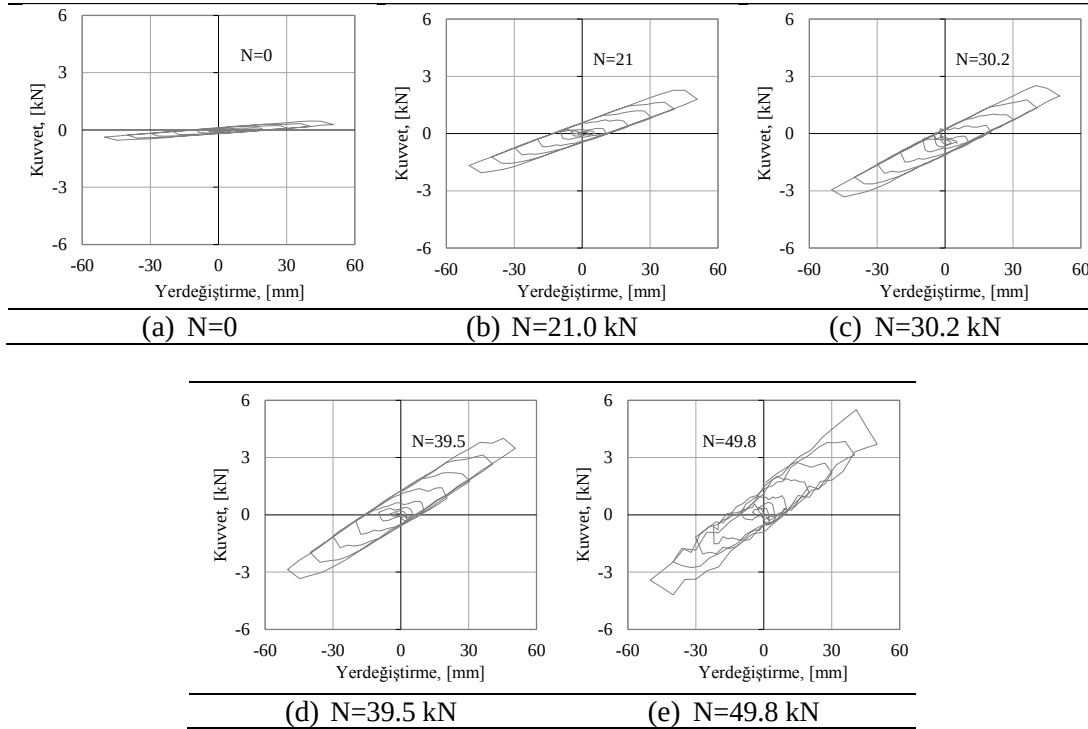
Deneylerde kullanılan yay rijitlikleri çalışmanın başında toplam ağırlığın $W=4.98$ kN olması hali için seçildiğinden, yay kutulu durumda ağırlıklar 4.98 kN'un altına inmeye başladığında, sistemin yatay rijitliği azalan kütleler için büyük kalacaktır. Bu durumda, rijitlik terimini paydasında bulundurun denklem 4.6 gereği sönümün de azalma eğilimine gireceği görülmektedir.

$$\xi = E_D / (2\pi \omega^2 m \Delta^2) = E_D / (2\pi k \Delta^2) \quad (4.6)$$

Denklemden, E_D kuvvet-yerdeğiştirme grafiğindeki en büyük çevrimin alanını, ω açısal frekansı, m kütleyi, k yatay rijitliği, Δ ise genliği (yatay yerdeğiştirme) ifade etmektedir.

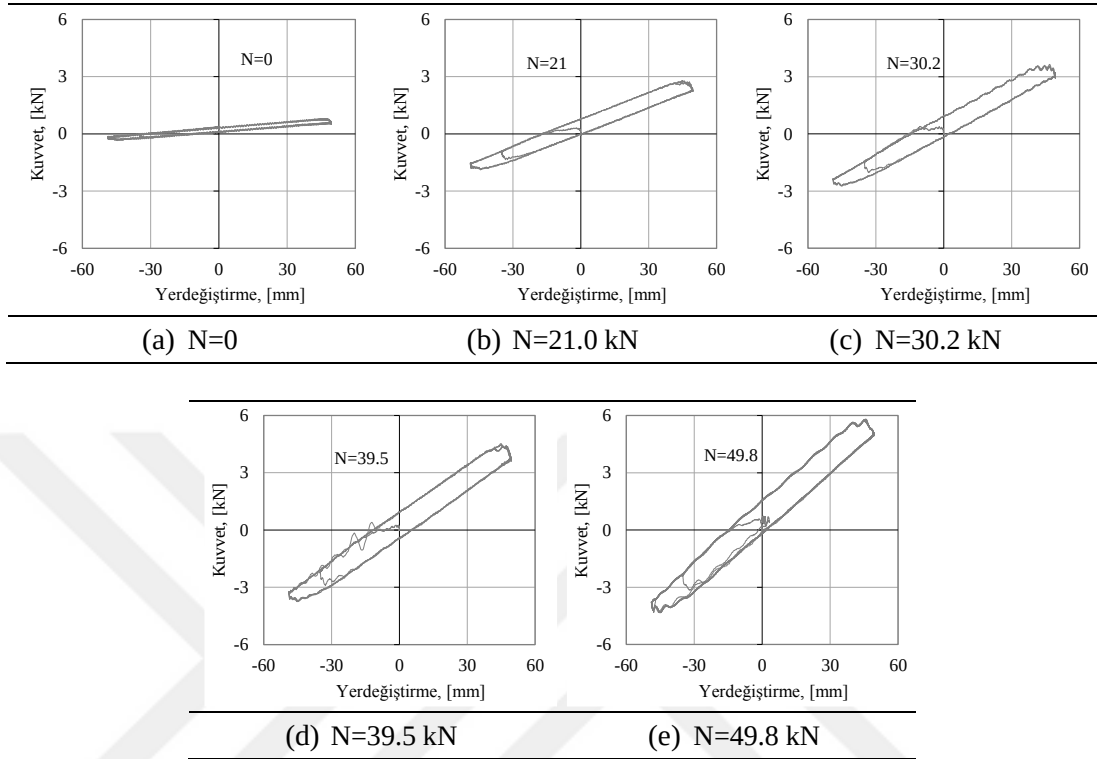
4.11.1.1 Çapraz yay kutusu bulunmayan yalıtım katına ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri

Çapraz yay kutusuz (yalın) bağımsız yalıtım katının çok yavaş formda gerçekleştirilen statik deneylerinde ulaşılan kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri Şekil 4.22'de yer almaktadır.



Şekil 4.22 : Çapraz yay kutusuz (yalın) yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı çok yavaş).

Çapraz yay kutusuz(yalın) bağımsız yalıtım katının 0.2 Hz yükleme hızı kullanılarak gerçekleştirilen statik deneylerinden elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri de Şekil 4.23’de sunulmaktadır.



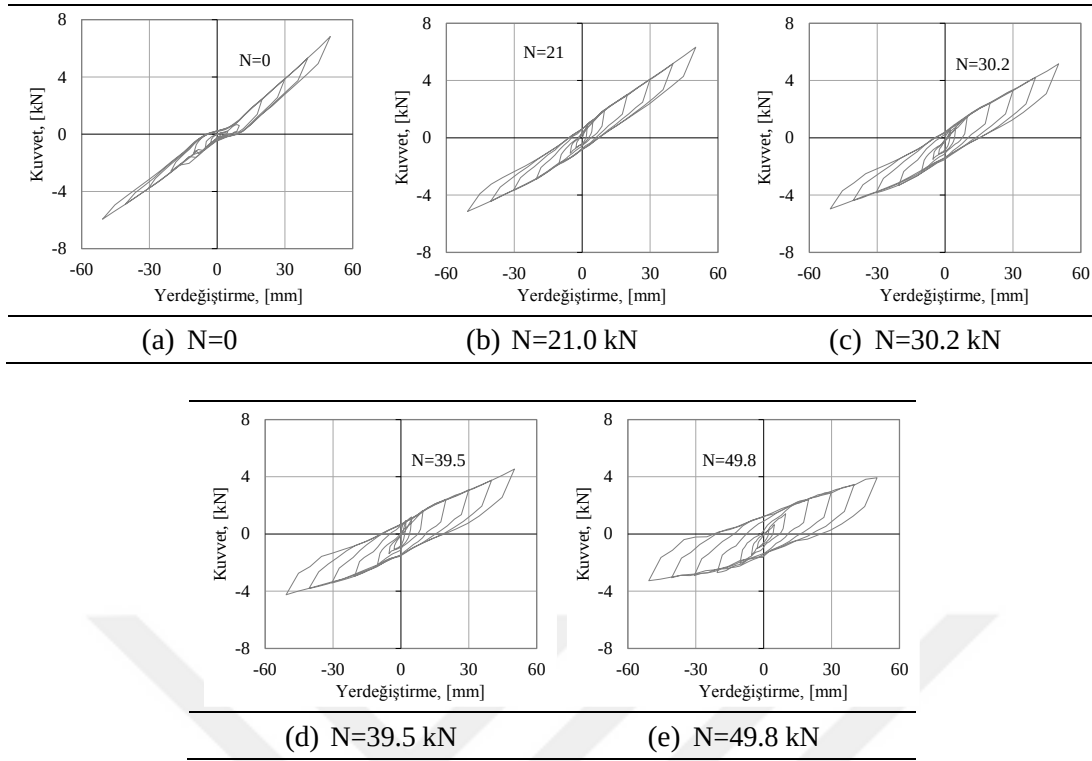
Şekil 4.23 : Çapraz yay kutusuz (yalın) yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı 0.2 Hz).

Bağımsız yalıtım katında çapraz yay kutularının bulunmadığı durumda, düşey yüklerden kaynaklanan negatif rijitlikler (W/h) ile mafsallardaki sürtünmeden oluşan ilave rijitlikler dolayısıyla, Şekil 4.22 ve 4.23’de verilen kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin sönümü ifade eden şişkinliklere sahip olduğu görülmektedir.

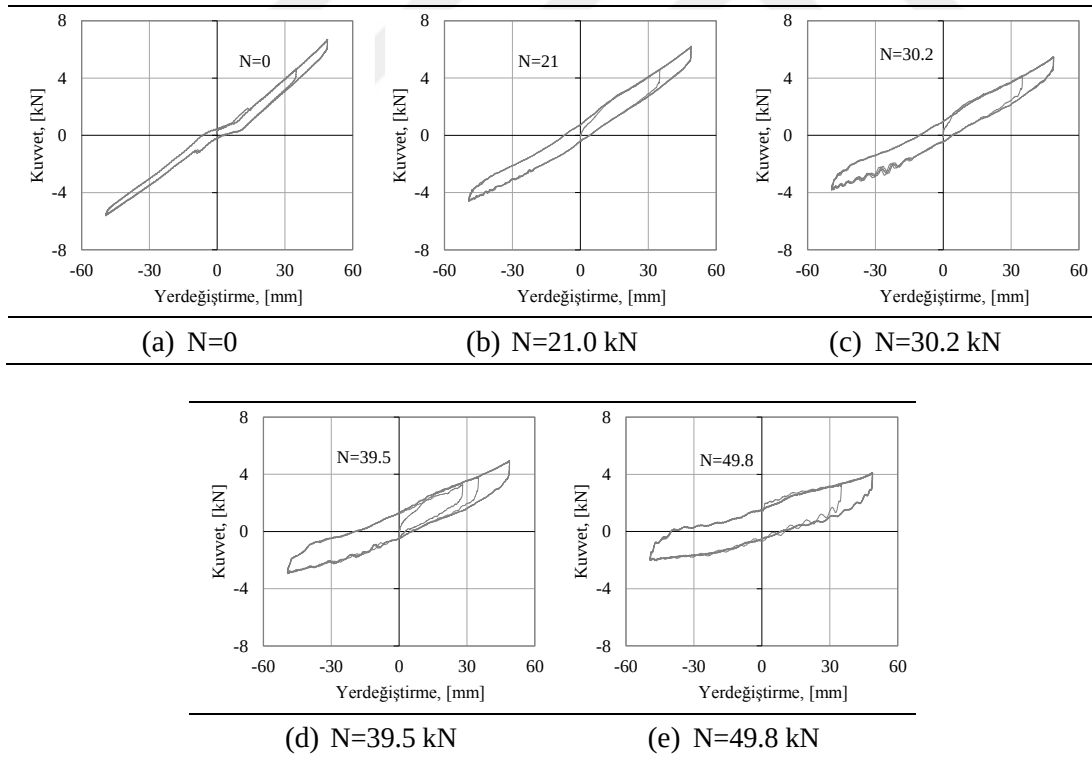
4.11.1.2 Çapraz yay kutuları bulunan yalıtım katına ait kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri

Çapraz yay kutusu bulunan sismik yalıtım katının yükleme hızı çok yavaş biçimde gerçekleştirilen statik deneyleri sonunda elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri Şekil 4.24’de verilmiştir.

Çapraz yay kutusu bulunan sismik yalıtım katının 0.2 Hz yükleme hızı kullanılarak gerçekleştirilen statik deneyleri sonunda ulaşılan kuvvet-yerdeğiştirme grafiklerine de Şekil 4.25’de yer verilmektedir.



Şekil 4.24 : Çapraz yay kutusu kullanılan yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı çok yavaş).



Şekil 4.25 : Çapraz yay kutusu kullanılan yalıtım katı kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri (Yükleme hızı 0.2 Hz).

Yay kutulu bağımsız yalıtım katının iki farklı yüklem hızıyla gerçekleştirilen statik deneyleri sonunda elde edilen ve Şekil 4.24 ile 4.25’de verilen kuvvet-yerdeğiştirme

grafiklerindeki şişkinlik, küresel mafsallardaki sürtünmeden kaynaklı sönümü işaret etmektedir.

4.11.2 Statik deneylerden elde edilen sönüm değerleri

Bağımsız yalıtım katının statik deneylerinden elde edilen ve Şekil 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25 'de sunulan kuvvet-yerdeğiştirme grafiklerinden denklem 3.5 ile elde edilen sönüm oranları Çizelge 4.3 ve 4.4'de verilmektedir. Yay kutulu bağımsız yalıtım katının statik deneylerine ait sonuçlardan elde edilen en büyük sönüm oranının, üst yapı ağırlığının $W=49.8$ kN'a olması durumu için $\xi=\%17-18$ olarak gerçekleştiği görülmektedir. Bu sönüm oranları Çizelge 4.3'de, Deney No:9 ve Çizelge 4.4,'de Deney No:19'a karşılık gelmektedir. Bu değerlerin de, aynı üst yapı ağırlığı ve yatay rijitliğe sahip $\frac{1}{4}$ ölçekli, 3 katlı küresel mafsallı yalıtım katlı sistem için dinamik masa deneyleri ile elde edilen $\%18-20$ düzeyindeki eşdeğer sönüm oranına oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3 : Statik deneylerden elde edilen sönüm oranları (± 50 mm, yükleme hızı çok düşük).

Deney No	Yay Kutusu	Ağırlık (W)	ξ
		[kN]	
1	Var	0.00	0.039
2	Yok	0.00	0.197
3	Var	21.0	0.074
4	Yok	21.0	0.149
5	Var	30.2	0.101
6	Yok	30.2	0.139
7	Var	39.5	0.136
8	Yok	39.5	0.138
9	Var	49.8	0.175
10	Yok	49.8	0.172

Buna karşın Bölüm 4.11.1'de bahsedildiği gibi üst yapı ağırlığının daha küçük değerlerinde, yalıtım katı yatay rijitliği görece olarak büyük kaldığından sönüm değerlerinin azaldığı ve yalıtım katı üzerine konan ağırlığa bağlı olarak $\%3.5$ ile $\%13.9$ arasında değiştiği görülmektedir. Bu durum, Çizelge 4.3'de Deney No 1, 3, 5 ve 7'den Çizelge 4.4'de Deney No 11, 13, 15 ve 17'den izlenebilmektedir.

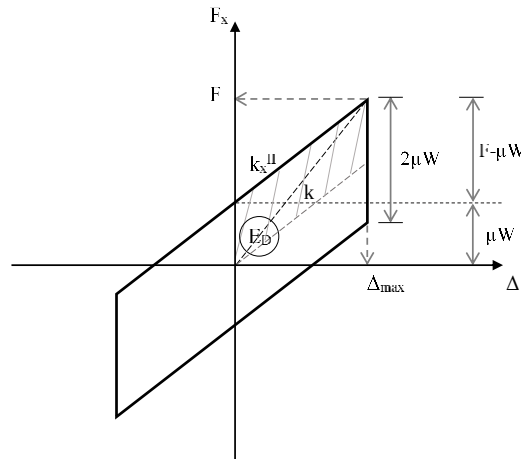
Çizelge 4.4 : Statik deneylerden elde edilen sönüm oranları (± 50 mm, yükleme hızı 0.2 Hz).

Deney No	Yay Kutusu	Ağırlık (W) [kN]	ξ
11	Var	0.00	0.035
12	Yok	0.00	0.127
13	Var	21.0	0.071
14	Yok	21.0	0.114
15	Var	30.2	0.094
16	Yok	30.2	0.109
17	Var	39.5	0.139
18	Yok	39.5	0.121
19	Var	49.8	0.180
20	Yok	49.8	0.159

Yay kutusuz yalıtım katında, Bölüm 4.11.1.1’de belirtildiği gibi sistemin (W/h) negatif rijitliği ve mafsallarda gerçekleşen sürtünme sebebiyle oluşan sönüm, sistem üzerindeki ağırlıklara bağlı olarak %10.9 ile %19.7 arasında değişmektedir. Bu değerler Çizelge 4.3’de Deney No 4, 6, 8, 10’dan Çizelge 4.4’de Deney No 14, 16, 18, 20’den görülebilecektir. Ancak yatay kararlılığı kendisine bağlı hidrolik veren ile sağlanan yay kutusuz yalıtım katının kararsız bir sistem olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle; incelemenin, yay kutusuz sistemin küresel mafsallarında sürtünmeden dolayı ortaya çıkan sönümün gözlenmesi dışında pratik bir anlamı yoktur.

4.11.3 Deneyler sırasında ortaya çıkan sürtünme katsayıları

Bağımsız yalıtım katının statik yükleme deneylerinden elde edilen ve Şekil 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25’de sunulan kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri, sürtünmeli sarkaç türü yalıtım sistemlerindeki benzer olarak, Şekil 4.26’da yer alan ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi biçiminde ifade edilebilmektedir.



Şekil 4.26 : Bağımsız yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi.

Yalıtım katının statik deneylerinden elde edilen Şekil 4.22, 4.23, 4.24 ve 4.25’de verilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimlerine ait zarflarına Şekil 4.26’da tanımlanan işlemin uygulanması ile küresel mafsallarda yatay doğrultuya dönüştürülmüş sürtünme katsayıları (μ) elde edilmiştir. İki farklı yükleme hızı için elde edilen değerler Çizelge 4.5 ve 4.6’da verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Statik deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları (± 50 mm, yükleme hızı çok düşük).

Deney No	Yay Kutusu	$2\mu W$ kN	W kN	μ
1	Var	1.20	0.00	(-)
2	Yok	0.30	0.00	(-)
3	Var	1.45	18.34	0.0395
4	Yok	1.00	18.34	0.0273
5	Var	2.10	28.55	0.0368
6	Yok	1.30	28.55	0.0228
7	Var	2.30	38.75	0.0297
8	Yok	1.60	38.75	0.0206
9	Var	2.60	48.85	0.0266
10	Yok	2.00	48.85	0.0205

Çizelge 4.5 ve 4.6’dan yay kutulu bağımsız yalıtım katının küresel mafsallarında yatay doğrultuya dönüştürülmüş sürtünme katsayılarının, W ağırlığına bağlı olarak, $\mu=0.0205$ ile 0.0395 aralığında değiştiği görülmektedir. Yay kutulu yalıtım katının dinamik masa deneylerine esas olan $W=49.8$ kN ağırlığa karşı gelen sürtünme katsayılarının ise $\mu=0.0205-0.0266$ aralığında olduğu anlaşılmaktadır, Bkz. Çizelge 4.5, Deney No 9 ve Çizelge 4.6, Deney No:19. Aynı çizelgelerden yay kutusuz (yalın) yalıtım katına ait sürtünme katsayılarının da $\mu=0.0174$ ile 0.0273 aralığında değiştiği görülmektedir.

Çizelge 4.6 : Statik deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları (± 50 mm, yükleme hızı 0.2 Hz).

Deney No	Yay Kutusu	$2\mu W$ kN	W kN	μ
11	Var	0.90	0.00	(-)
12	Yok	0.20	0.00	(-)
13	Var	1.20	18.34	0.0327
14	Yok	0.80	18.34	0.0218
15	Var	1.60	28.55	0.0280
16	Yok	1.10	28.55	0.0193
17	Var	1.90	38.75	0.0245
18	Yok	1.40	38.75	0.0181
19	Var	2.00	48.85	0.0205
20	Yok	1.70	48.85	0.0174

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 'da yer alan sürtünme katsayılarının yalıtım katı üzerindeki ağırlıklar arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu durumun Constantinou ve diğ. (1990a) çalışmasında elde edilen sonuçlar ile de uyumlu olduğu söylenebilir.

4.11.4 Yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile sönümün tayini

Şekil 4.26'da verilen yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisindeki yerdeğiştirmeler, yalıtım katının yatay yerdeğiştirmeleri olup, küresel mafsallarda dönme doğrultusunda oluşan sürtünme etkisinin yataya dönüştürülmüş halidir. Sürtünmeli sarkaç türü yalıtım sistemlerine benzer olarak, geliştirilen küresel mafsallı yalıtım sisteminde de sürtünmeden kaynaklı sönüm, denklem 4.6'nın Şekil 4.26'daki ilişki için kullanılmasıyla analitik olarak aşağıdaki biçimde tayin edilebilmektedir (Denklem 4.7).

$$\xi = \frac{2}{\pi(1 + \frac{k_x^{II} \Delta_{max}}{\mu W})} \quad (4.7)$$

Yay kutulu yalıtım sistemi için sönüm oranı (ξ) denklem 4.7 kullanılarak, deneylerden elde edilen ve Çizelge 4.6'da yer alan sürtünme katsayıları da (μ) ile $\Delta_{max}=50$ mm (0.05 m) yerdeğiştirmesi için analitik olarak hesaplanmıştır. Deneysel ve analitik sönüm değerlerinin karşılaştırmaları Çizelge 4.7'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.7 : Statik deneylerden elde edilen sönümler ile ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinden elde edilen sönümlerin karşılaştırılması.

W	$K_x^{II} = K \cos^2 \alpha - W/h$	μ (Deney)	ξ (Deney)	ξ (Analitik)	Görelî Farklar (4)-(5)/(4)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
kN	kN/m				%
21.0	117.0	0.033	0.071	0.067	5.60
30.2	98.90	0.028	0.094	0.093	1.06
39.5	80.60	0.024	0.139	0.121	12.9
49.8	60.30	0.020	0.180	0.160	11.1
Ort.					7.64

Çizelge 4.7'nin (2). kolonunda yer alan, bağımsız yalıtım katının ikinci mertebe yatay rijitliğinin hesaplanmasında kullanılan büyüklükler, Bölüm 2.4.4'de verilmiş olup, sırasıyla $K=220$ kN/m, $\alpha=32^\circ$, $h=0.51$ m' dir. Çizelge 4.7 incelendiğinde, bağımsız sismik yalıtım katının küresel mafsallarındaki sürtünmeden ortaya çıkan sönümün deneysel ve analitik olarak hesaplanan değerlerinin yeterli uyum içerisinde olduğu, ortalama görelî farkın % 8 civarında olduğu görülmektedir.

Sürtünmeli sarkaç türündeki yalıtım sistemlerinde, hızın sürtünme katsayısı üzerindeki etkisinin ihmal edildiği uygulamaların yapıldığı bilinmektedir (EC8, 2004), (Diotavelli ve diğ, 2014). Bu durumda statik yükleme deneylerinden elde edilen ve Şekil 4.26'da yer verilen ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi , geliştirilen küresel mafsallı sismik yalıtım sisteminin mafsallarındaki sürtünmeyi temsil edecek bir davranış modelinin (NLINK) oluşturulması aşamasında da kullanılabilecektir.

4.12 Değerlendirme ve Yorumlar

Küresel mafsallı sismik yalıtım sistemini içeren $\frac{1}{4}$ ölçekli üç katlı deney numunesi üzerinde, yedi farklı deprem kaydı etkisinde gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri, geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da dikkate alındığı zaman tanım alanındaki çözümlemeler ve küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katının statik deneyleri sonunda elde edilenler aşağıda özetlenmiştir.

- Sismik yalıtım katının küresel mafsalları yapının iki doğrultusunda da uygun biçimde çalışmıştır. İki ana doğrultuda tertiplenen çapraz yay kutuları da görevlerini tam olarak yapmışlardır. Yay kutularını sismik yalıtım katının alt ve üst rijit kirişlerine bağlayan düğüm noktalarında tertiplenen uygun detay vasıtasıyla, çapraz yay kutuları tüm deneyler süresince düzlem dışı hareketlere uyum sağlamışlardır.
- Önerilen küresel mafsallı sismik yalıtım katı ile, değişik yer hareketleri sırasında ortaya çıkan önemli yatay yerdeğiştirme talepleri ve bu yerdeğiştirmelerden oluşan ikinci mertebe etkilerin karşılanabileceği, gerçekleştirilen sarsma masası deneyleri ile ispatlanmıştır.
- Deneysel ve kuramsal çalışmalar, önerilen küresel mafsallı sismik yalıtım sisteminin üst yapıya aktarılan ivmeleri önemli oranda azalttığını göstermiştir. Bu oran %70 düzeylerine kadar çıkabilmektedir. Böylelikle yapının kuvvetli yer hareketleri sırasında hasar alma olasılığı önemli ölçüde azaltılmaktadır.
- Küresel mafsallara sahip sismik yalıtım sisteminde de, yalıtım katı mafsallarındaki sürtünme sebebiyle, %18-20 düzeyinde görece yüksek bir eşdeğer sönüm oranı ortaya çıkmaktadır.

- Sismik yalıtım katının küresel mafsallarındaki sürtünme sebebiyle, katın sürtünme göz önüne alınmadan hesaplanan teorik ikinci merteye yatay rijitliği %20-25 oranında artabilmektedir.
- Küresel mafsallı sismik yalıtım katı içeren numunede üst yapı görelî yatay yerdeğıştirmeleri dikkate alınmayacak seviyelere indirilebilmekte, üst yapının sadece rijit öteleme yaptığı söylenebilmektedir. Tüm şekildeğıştirmelerin toplandığı yalıtım katındaki yanal öteleme kapasitesi (yerdeğıştirme/kat yüksekliği) %20 düzeyine ulaşabilmektedir. Bu yerdeğıştirme kapasitesinin de farklı tasarım deprem��lerinin yerdeğıştirme istemlerini karşılayabilecek düzeyde olduğu anlaşılmıştır.
- Küresel mafsallı sismik yalıtım sistemi ve düzlem mafsallı sismik yalıtım sistemi deprem etkileri altında benzer davranış sergilemiştir. Ancak düzlem mafsallı durumun bir ara çözüm olduğu unutulmamalıdır.
- Deneyler sırasında, küresel mafsallı sismik yalıtım katında herhangi bir kalıcı şekildeğıştirme kaydedilmediğı gibi deneyler sonlandırıldığında numune üzerinde yapılan gözlemlerde de hiçbir kalıcı şekildeğıştirme tespit edilmemiştir. Böylelikle önerilen sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme özelliğine sahip olduğu deneysel olarak ispatlanmıştır. Önerilen sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme kabiliyetinin deneysel olarak ispatlanmasının yanı sıra, merkeze gelme özelliğine sahip sismik yalıtım ürünlerinin ilgili yönetmelik ve çalışmalarda sağlaması gerektiğı belirtilen iki ayrı koşulun da, geliştirilen sismik yalıtım sistemi tarafından sağlandığı gösterilmiştir.
- Küresel mafsallı bağımsız sismik yalıtım katının statik deneylerinden, mafsallardaki sürtünmeden dolayı %18 civarında sönüm oranı ortaya çıkmaktadır.
- Sismik yalıtım katının küresel mafsallarında, yatay doğrultuya dönüştürülmüş sürtünme katsayısı 0.02 (%2) düzeyindedir.

5. GELİŞTİRİLEN SİSMİK YALITIM SİSTEMİNİN BEŞ KATLI BETONARME BİR BİNAYA KURAMSAL OLARAK UYGULANMASI

5.1 Giriş

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminden ülkemizde kullanımı çok yaygın olan betonarme binalarda etkin olarak yararlanılabileceğinin gösterilmesi amacıyla, çalışmanın son aşamasında 5 katlı betonarme bir yapının temelden ankastre ve sismik yalıtım katlı hesap modelleri üzerinde zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiştir. Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binaya ait hesap modelleri, kullanılan deprem kayıtları, gerçekleştirilen analizler, ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistem davranış karşılaştırılmaları ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi bu bölüm içerisinde yer almaktadır.

5.2 Malzeme Bilgileri

Betonarme binanın tasarımında kullanılan beton ve betonarme çeliğine ait malzeme sınıfları, C25 ve S420 olup, bunlara karşı gelen karakteristik dayanımlar da sırasıyla, $f_{ck}=25$ MPa, $f_{yk}=420$ MPa'dır. Sismik yalıtım katının tasarımında kullanılan yapısal çelik malzeme sınıfı S235, buna ait karakteristik akma dayanımı da $f_{yk}=240$ MPa olarak göz önünde tutulmuştur.

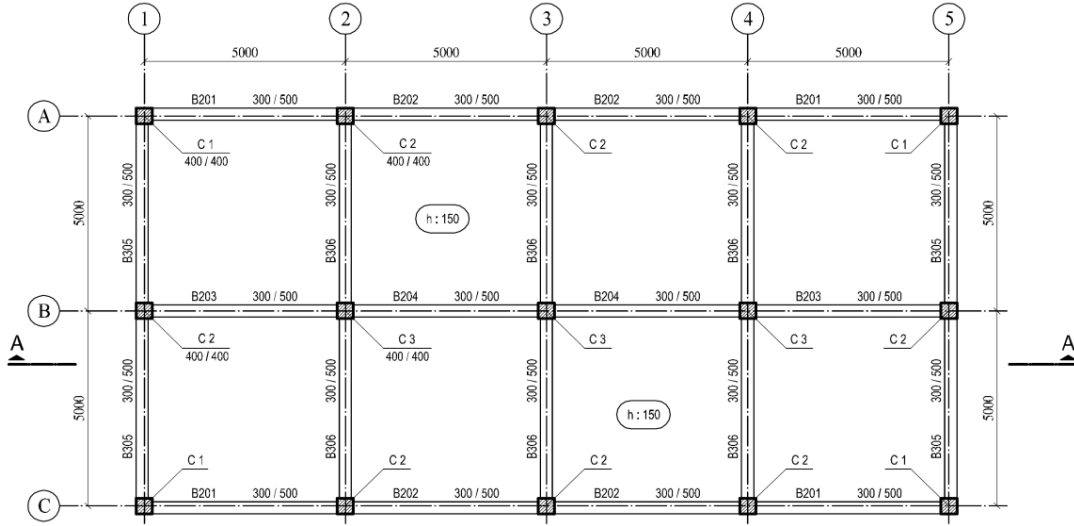
5.3 Ankastre Mesnetli ve Sismik Yalıtımlı Binaların Taşıyıcı Sistem Özellikleri

Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binaların genel geometri, yapısal eleman boyutları, kütle bilgileri vb. taşıyıcı sistem karakteristik bilgilerine 5.3.1 ve 5.3.2 bölümlerinde yer verilmektedir.

5.3.1 Ankastre mesnetli binanın taşıyıcı sistem özellikleri

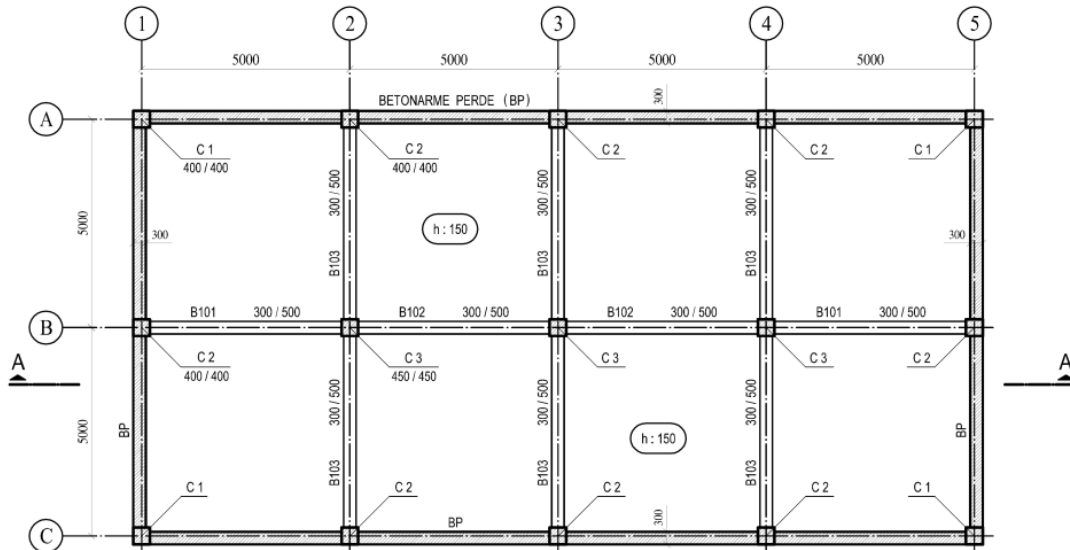
Temelden ankastre betonarme bina (*Durum 1*) rijit bodrum kat ve onun üzerinde yer alan dört kat olmak üzere toplam beş katlı olup, yatay yükler etkisindeki tasarımı TDY (2007)'ye göre gerçekleştirilmiştir. Bina, uzun doğrultuda açıklıkları 5.0'er metre olan

dört aks, kısa doğrultuda ise açıklıkları yine 5.0'er metre olan iki aksa sahiptir. Binanın tipik normal katına ait taşıyıcı sistem planı Şekil 5.1'de yer almaktadır. Yapının bodrum kat orta aks kolonları hariç, diğer tüm kolonları 400×400 mm ebatlarında olup, bodrum kat orta aks kolonları ise 450×450 mm'dir. Betonarme kiriş boyutları, tüm katlarda 300×500 mm, döşeme kalınlığı da 150 mm'dir. Rijit bodrum katın etrafı betonarme perde ile çevrilidir (Şekil 5.2).



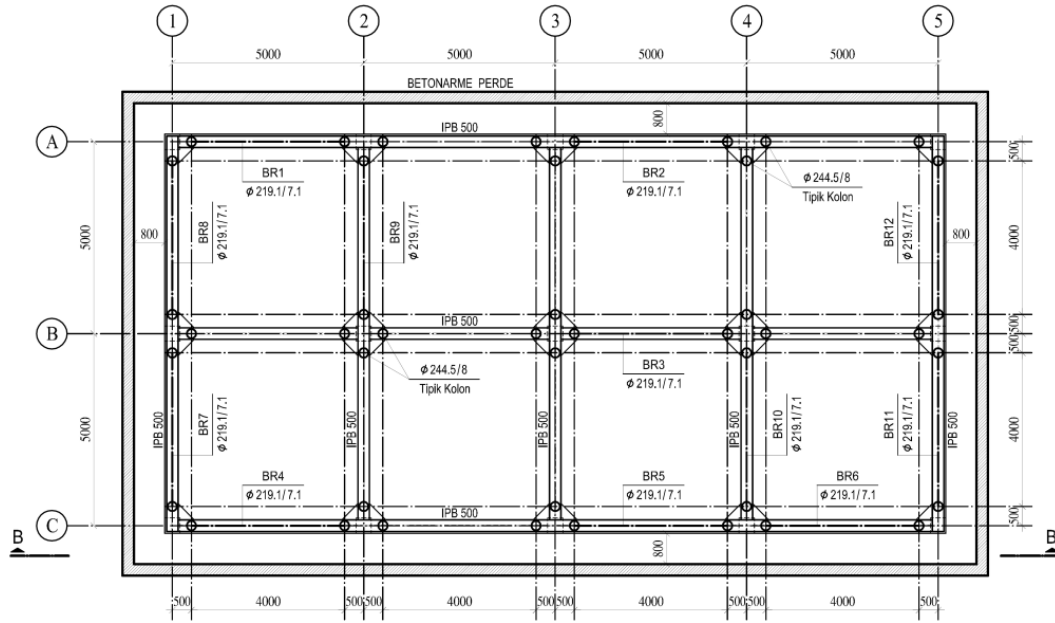
Şekil 5.1 : Ankastr mesnelli binaya ait tipik üst kat taşıyıcı sistem planı (Durum 1).

Binanın kat yükseklikleri tüm katlarda 3 m olup, her bir kata ait kütle değeri de 240 kNsn²/m'dir. Bina 500 mm kalınlığında radye temele oturmaktadır (Şekil 5.3).



Şekil 5.2 : Ankastr mesnelli bina bodrum kat taşıyıcı sistem planı (Durum 1).

Sismik yalıtımlı binanın aynı zamanda bodrum katı olan yalıtım katının etrafındaki betonarme perdeler, her iki doğrultuda yalıtım katının yatay yerdeğiştirme istemlerine izin vermek üzere yalıtım katı taşıyıcı sistem elemanlarından belirli bir mesafede konumlandırılmıştır. Yalıtım katı ile çevre betonarme perdeler arasındaki boşluğu oluşturan bu mesafe, yalıtım katının yatay yerdeğiştirme kapasitesi göz önünde tutularak bu örnekte 800 mm olarak tasarlanmıştır (Şekil 5.5). Sismik yalıtım katında üst kat köşe betonarme kolonlarının altında ikili, üst kat çevre betonarme kolonlarının altında üçlü, üst kat orta betonarme kolonlarının altında ise dördü $\phi 244.5 \times 8$ mm' lik çelik boru kesitli kolon olmak üzere toplam 44 adet iki ucu mafsallı kolon tertiplenmiştir (Şekil 5.5). Yalıtım katında her iki doğrultuda altışar adet olmak üzere, BR1, BR2, BR3,...., BR12 olarak isimlendirilen $\phi 219.1$ mm'lik borulardan teşkil edilmiş olan toplam 12 adet diyagonal yay kutusu kullanılmıştır (Şekil 5.5) ve (Şekil 5.6). Her bir yay kutusunun içerisine dört adet doğrusal elastik helisel basınç yayı yerleştirilmektedir.

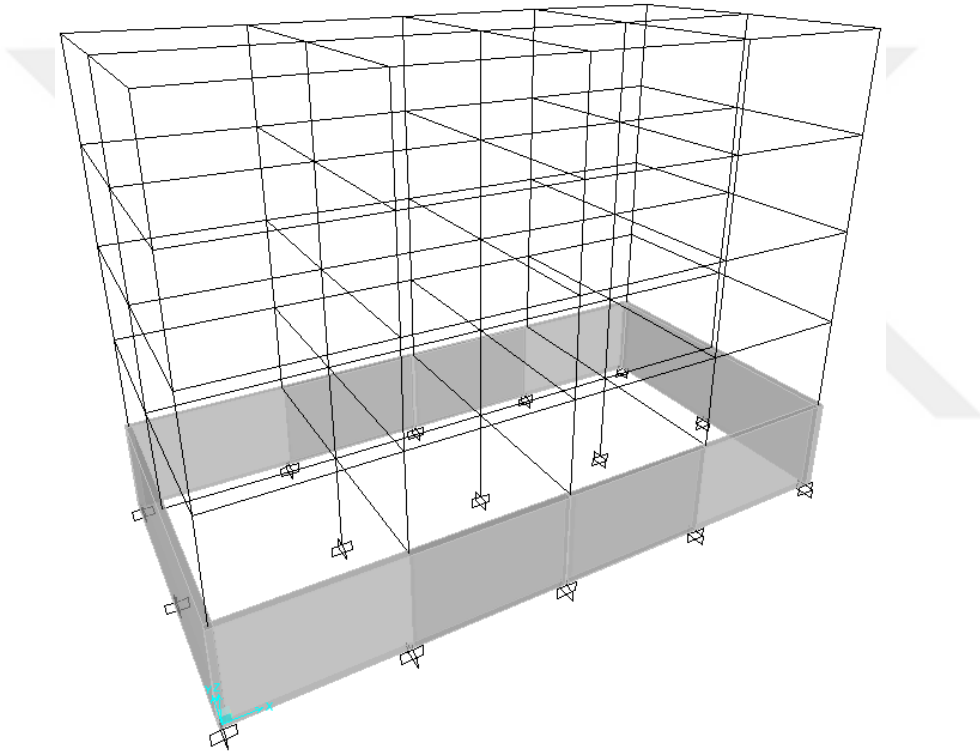


Şekil 5.5 : Sismik yalıtımlı bina bodrum kat taşıyıcı sistem planı (Durum 2).

5.4 Hesap Modelleri

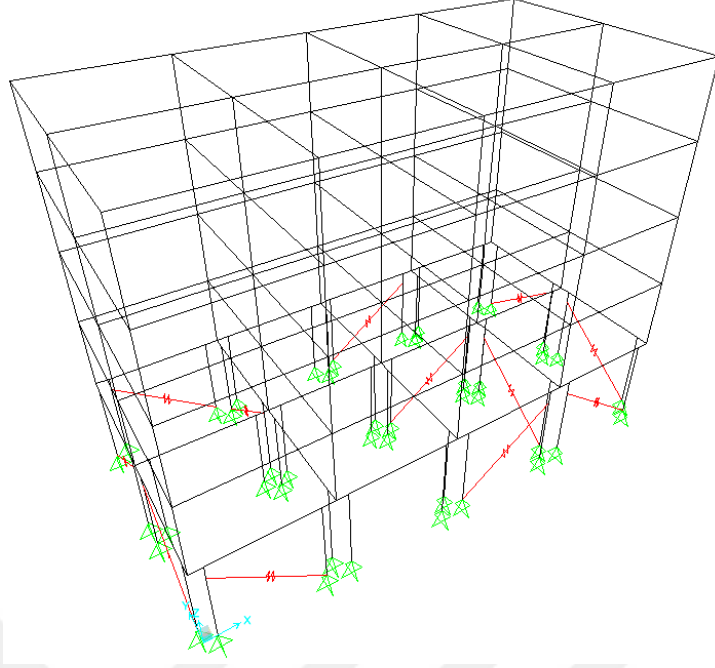
Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemler için oluşturulan hesap modellerinin özelliklerine aşağıda yer verilmektedir.

Ankastre mesnetli binanın üç boyutlu modelinde, rijit bodrum kat çevre perdeleri düzlemleri içindeki yüksek rijitlikleri dikkate alınarak temsil edilmişlerdir. Tüm kat döşemelerinin düzlem içi rijitlikleri sonsuz kabul edilerek, kütlelere her katta iki doğrusal bir de düşey eksen etrafında dönme olmak üzere üç kütle serbestliği tanımlanmıştır. Modelde tüm elemanlar çubuk sonlu elemanlar ile temsil edilmektedir. Ankastre mesnetli sistemin üç boyutlu hesap modeli Şekil 5.7’de sunulmaktadır.



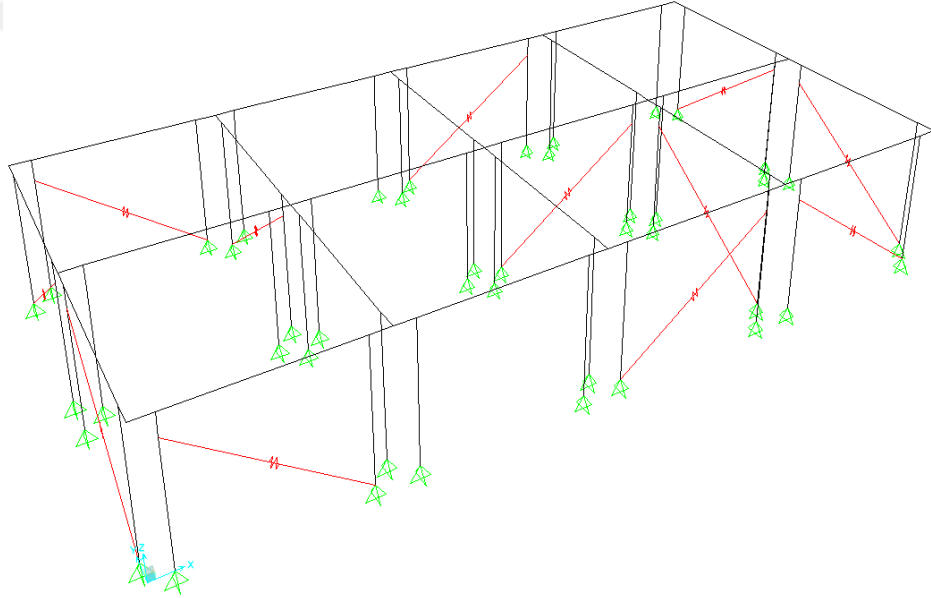
Şekil 5.7 : Ankastre mesnetli binaya ait üç boyutlu hesap modeli.

Sismik yalıtımlı sistemin üç boyutlu modelinde, yalıtım katının üzerindeki betonarme üst yapı bölümünün tüm özellikleri ankastre mesnetli sistem ile özdeşdir. Çelik olarak tasarlanan sismik yalıtım katının kolonlarının iki ucuna üç eksen etrafında dönme serbestliği olan mafsallar atanmıştır. Sismik yalıtımlı sistemin üst yapıyı da içeren üç boyutlu hesap modeli ile modelin sismik yalıtım katını daha ayrıntılı gösteren bölümü, sırasıyla Şekil 5.8 ve 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.8 : Sismik yalıtımlı binanın üç boyutlu hesap modeli.

Modelde, çapraz yay kutuları iki yönde çalışan doğrusal elastik yaylar olarak temsil edilmişlerdir. Doğrusal yayların eksenel rijitlik değeri olarak da ($K_{(et.)}$) kullanılmaktadır.



Şekil 5.9 : Sismik yalıtımlı modelin yalıtım katı.

Sismik yalıtımlı sisteme ait hesap modelinde, yalıtım katı kolonlarının üst uçlarında yer alan küresel mafsallı yataklarının merkezi ile kompozit döşeme kirişlerinin boyuna eksenleri arasında kalan bölümdeki elemanlar sonsuz rijit çubuk olarak idealleştirilmiştir (Şekil 5.10).

— Betonarme elemanlar

— Kompozit kirişler

○— İzolasyon katı çelik kolonları

— Yay kutuları

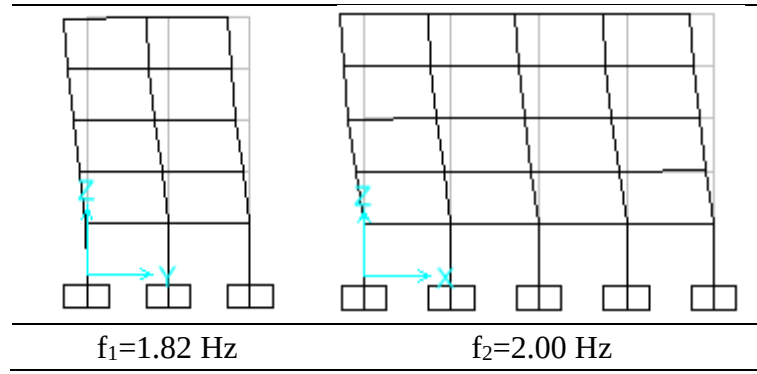
$I = \infty$
(Tipik)

36.86°

5.5 Serbest Titreşim Özellikleri

5.5.1 Ankastre mesnetli binanın serbest titreşim özellikleri

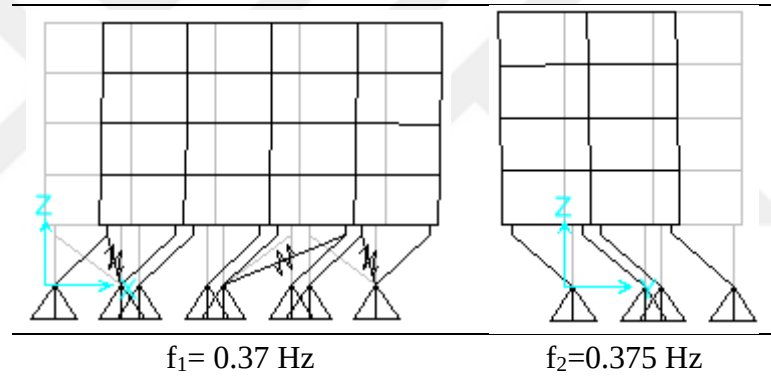
128



Şekil 5.11 : Ankastre mesnetli sisteme ait ilk iki titreşim modu.

5.5.2 Sismik yalıtımlı binanın serbest titreşim özellikleri

Sismik yalıtımlı sistem için gerçekleştirilen serbest titreşim analizleri sonunda her iki doğrultu için ulaşılan ortak etkin titreşim frekansı 0.37 Hz'dir. Sismik yalıtımlı sisteme ait Şekil 5.12'de verilen ilk iki titreşim moduna ait şekillerinden tüm göreceli yerdeğiştirmelerin yalıtım katında toplandığı açık olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.12 : Sismik yalıtımlı sisteme ait ilk iki titreşim mod şekli.

Sismik yalıtımlı modelin birinci temel titreşim periyoduna, aşağıdaki şekilde basit el hesabı ile de ulaşılabilmektedir.

Her bir çapraz yay kutusunun etkin eksenel rijitliği $K_{(et.)}=2880 \text{ kN/m}$, yay kutusunun yatayla yaptığı açı $\alpha=36.86^\circ$, sismik yalıtım katının üzerindeki toplam ağırlık $N=12000 \text{ kN}$ ve bu ağırlığa karşı gelen kütle $m=1200 \text{ kNsn}^2/\text{m}$, yalıtım katı kolonlarının iki ucunda yer alan mafsallar arası mesafe de $h=3.0 \text{ m}$ olmak üzere; önce yalıtım katının toplam etkin eksenel rijitliği, $\Sigma K_{(et.)}=6 \times K_{(et.)}=6 \times 2880=17280 \text{ kN/m}$ elde edilmektedir. Bu toplam etkin eksenel rijitlik değeri ve yukarıda belirtilen diğer parametreler kullanılarak, Denklem 2.8 yardımı ile yalıtım katının etkin yatay rijitliği,

$$K_{x(et.)} = K_{(et.)} \times \cos^2 \alpha - (N / h) = 17280 \times 0.64 - 12000 / 3 = 7059.2 \text{ kN / m}$$

olarak elde edilmektedir. Hesaplanan bu etkin yatay rijitlik değeri de Denklem 3.1’de yerine konarak, sismik yalıtımlı sistemin birinci etkin periyodu, bu değerin tersi alınarak da birinci titreşim frekansına ulaşılmaktadır.

$$T_{et.} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K_{x(et.)}}} = 2\pi \sqrt{\frac{1200}{7059.2}} = 2.59 \text{ sn}$$

$$f_1 = \frac{1}{2.59} = 0.38 \text{ Hz}$$

Yalıtım katının küresel mafsallarındaki sürtünmeyi içermeyen teorik ikinci mertebe yatay rijitliği (K_x^{II}) değerine ise Denklem 5.1 kullanılarak, $K_{(et.)}/(1+\phi)$ ifadesi ile ulaşılmaktadır. Yalıtım katının sürtünmesiz teorik ikinci mertebe rijitliğinden faydalanılarak da yay kutusunun imalatı sırasında kullanılacak tasarım teorik eksenel rijitlik değeri (K) yine Denklem 2.8 yardımıyla elde edilmektedir.

5.6 Kullanılan Deprem Kayıtları

Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemlerin hesap modelleri üzerinde gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki doğrusal olmayan analizlerde, Bölüm 3 ve Bölüm 4’deki sarsma masası deneylerinde kullanılan ve Çizelge 3.2 ile Şekil 3.10’da yer alan yedi farklı deprem kaydı kullanılmıştır.

5.7 Sismik Yalıtımlı Binanın EC8 (2004) ve FEMA 450 (2003)’de Yer Alan Bazı Temel Kriterlere Göre İrdelenmesi

Sismik yalıtımlı bina, ilgili EC8 (2004) yönetmeliği ve FEMA450 (2003) dokümanındaki bazı temel kriterlere göre irdelenmiştir. Bunlar sırasıyla, tasarım yerdeğiştirmelerinin tayini, merkeze gelme kriteri ve analiz yönteminin seçimini içermekte olup, gerekli irdelemeler aşağıdaki bölümlerde yer almaktadır.

5.7.1 Tasarım yerdeğiştirme isteminin tayini

Sismik yalıtımlı sistemin tasarım yerdeğiştirme istemleri, EC8 (2004) ve FEMA450 (2003)’e göre hesaplanmıştır. Çizelge 5.1’de toplu olarak verilen hesaplamalar yapılırken, ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemler için TDY (2007)’ye göre seçilen tasarım yer ivmesi $a_g=0.4g$, zemin grubu B, kayma dalgası hızı da 300-1000 m/sn değerleri göz önünde tutularak, ilgili yönetmeliklerin bu değerlere karşı gelen parametreleri seçilmiştir.

Çizelge 5.1 : Sismik yalıtımlı sistemin EC8 (2004) ve FEMA450 (2003)'e göre yatay yerdeğiştirme istemlerinin hesabı.

	EC8	FEMA 450
Zemin Sınıfı	B; $T_B(s) = 0.15sn$; $T_C(s) = 0.50sn$ $T_D(s) = 2.0sn$ $S = 1.20$	B; $S_s = 1.50$; $S_1 = 0.75$, $F_a = 1.0$, $F_v = 1.0$
Yer İvmesi	Tasarım yer ivmesi, $a_g = 0.40g$	(-)
Etkin Sönüm ve Spektral Büyüklükler	$\eta = \sqrt{10 / (5 + \xi)} \geq 0.55$ $\xi = 5.0 \quad \eta = 1.0$; $\xi = 20.0 \quad \eta = 0.63$ $T_D \leq T \leq 4sn$ $S_{el}(T) = a_g \times S \times \eta \times 2.5 \times \left[\frac{T_c \times T_D}{T^2} \right]$ $\eta = 1.0$ $S_{el}(T) = 0.40g \times 1.2 \times 1.0 \times 2.5 \times \left[\frac{0.50 \times 2.0}{2.59^2} \right]$ $S_{el}(T) = 1.754m / sn^2$ $\eta = 0.63$ $S_{el}(T) = 0.40g \times 1.2 \times 0.63 \times 2.5 \times \left[\frac{0.50 \times 2.0}{2.59^2} \right]$ $S_{el}(T) = 1.105m / sn^2$ $\eta = \text{Sönüm doğrulama çarpanı}$ $\xi = \%5 \text{ için } \eta = 1$	$S_{MS} = F_a S_s = 1.0 \times 1.5 = 1.5$ $S_{M1} = F_v S_1 = 1.0 \times 0.75 = 0.75$ $S_{DS} = \left(\frac{2}{3} \right) S_{MS} = \frac{2}{3} \times 1.5 = 1.00$ $S_{D1} = \left(\frac{2}{3} \right) S_{M1} = \frac{2}{3} \times 0.75 = 0.50$ Sismik yalıtım sisteminin tasarım yerdeğiştirmesine karşı gelen etkin sönüm ile ilgili katsayılar $B_D = 1.50$, $B_M = 1.50$ Etkin sönüm (Kiritik sönüm yüzdesi) $\beta_D = 20$
Tasarım Yerdeğiştirme	$d_{dc} = \frac{MS_e(T_{et}, \xi_{et})}{K_{x(et.)_{min}}}$ $d_{dc} = \frac{1200 \times 1.754}{7059.2} = 0.298m \quad (\xi = 5\%)$ $d_{dc} = \frac{1200 \times 1.105}{7059.2} = 0.188m \quad (\xi = 20\%)$	$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{D1} T_D}{B_D} = 0.248 \times \frac{0.5 \times 2.59}{1.50} = 0.214m$
En büyük Yerdeğiştirme	(-)	$D_M = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{M1} T_M}{B_M} = 0.248 \times \frac{0.75 \times 2.59}{1.50} = 0.320m$

Sismik yalıtımlı sistem için FEMA450'ye göre tasarım ve en büyük yatay yerdeğiştirme istemleri sırasıyla, 0.214 m ve 0.320 m olarak hesaplanmaktadır. Yalıtım katının en büyük yerdeğiştirme kapasitesi 0.735 m olarak seçilmiş olup, bu değer FEMA450'ye göre hesaplanan en büyük yerdeğiştirme isteminin 2.3 katına karşı gelmektedir. Bu da Çizelge 5.3'de, Hedef # 1'e karşı gelen $0.60 \times \Delta_m$ yerdeğiştirmesinin aşılma olasılığının tasarım depremi için sıfır olacağı anlamına gelmektedir.

Yalıtım katının 735 mm olan yatay yerdeğiştirme kapasitesine karşı gelen yay kutusu eksenel boy değiştirme (yerdeğiştirme) kapasitesi ise Şekil 2.14'de verilen geometrik uygunluk ilişkilerinden 587 mm olarak hesaplanmaktadır.

5.7.2 Sismik yalıtım katı için merkeze gelme kontrolü

Sismik yalıtım katının EC8 (2004), Madde 10.9.2.5d'ye göre merkeze gelme kontrolü aşağıda verildiği biçimde yapıldığında;

$$d_{dc} = 0.188 \text{ m}, (\xi = \%20).$$

$$F(d_{dc}) = K_{x(et.)} \times d_{dc} = 7059.2 \times 0.188 = 1327.13 \text{ kN}$$

$$F(0.5d_{dc}) = K_{x(et.)} \times 0.5 \times d_{dc} = 7059.2 \times 0.5 \times 0.188 = 663.57 \text{ kN}$$

$$\Delta F = F(d_{dc}) - F(0.5d_{dc}) = 663.57 \text{ kN} > 0.025 \times W = 0.025 \times 12000 = 300 \text{ kN} \checkmark$$

Bölüm 4.8'de kontrolü yapılan deney numunesinde olduğu gibi, sismik yalıtımlı örnek bina uygulaması için de gerekli şartın sağlandığı anlaşılmaktadır.

5.7.3 Analiz yönteminin tayin edilmesi

Sismik yalıtımlı binalarda basitleştirilmiş doğrusal analiz yönteminin, eşdeğer sönüm özellikleri de göz önünde tutularak kullanılabilmesi için sağlanması gerekli bazı şartlar EC8, 10.9.3 maddesinde verilmektedir. Geliştirilen sismik yalıtım sistemi, aşağıdaki sayısal bazlı iki koşul da dahil olmak üzere diğer tüm şartları sağlamaktadır.

1. Sismik yalıtım sisteminin düşey rijitliğinin, yatay rijitliğine oranı 150'den büyük olmalıdır.

$$\frac{K_v}{K_{et.}} = \frac{18295200}{7059.2} = 2592 > 150 \checkmark$$

2. Etkin periyod $T_{et.}$, $3T_f \leq T_{et.} \leq 3 \text{ sn.}$ şartını sağlamalıdır. Burada; T_f üst yapının ankastre mesnetli olmasına ait temel titreşim periyodunu ifade etmektedir. Ankastre binanın temel titreşim periyodu, serbest titreşim analizlerinden, $T_f=0.55 \text{ sn.}$ olarak elde edilmektedir.

$$3 \times 0.55 = 1.65 \text{ sec} \leq T_{et.} = 2.59 \text{ sec} \leq 3 \text{ sn.} \checkmark$$

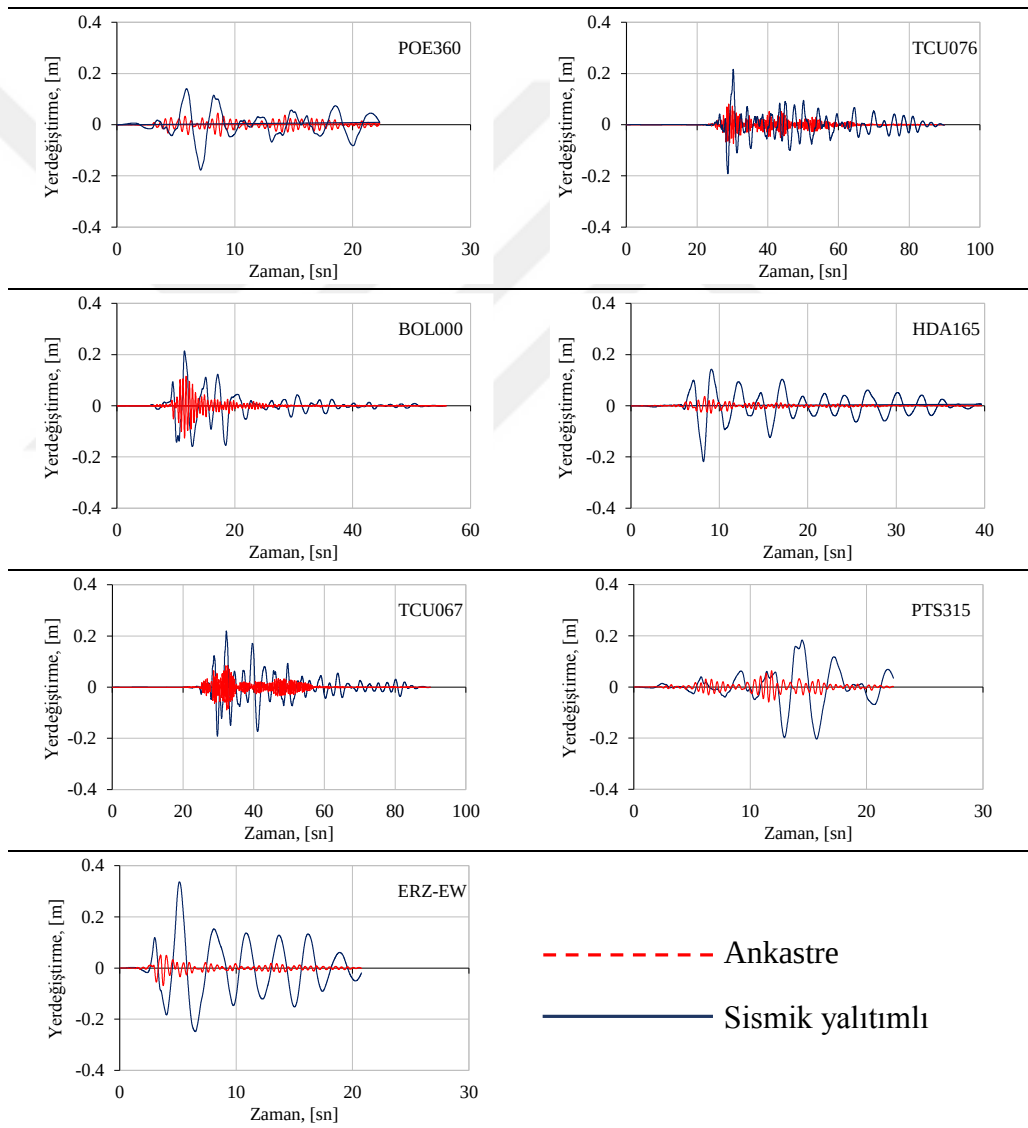
Ele alınan sismik yalıtımlı sistemin geometrik bakımdan doğrusal olmayışın da dikkate alındığı zaman tanım alanında analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde kullanılan depremler için ulaşılan yerdeğiştirme istemlerinin, Çizelge 5.1'de hesaplanan yönetmelik tabanlı tasarım yerdeğiştirme değerleri ile karşılaştırma imkanı da elde edilmiştir. Analizlerde eşdeğer sönüm oranı olarak, sarsma masası deneylerinden elde edilen $\xi_{esd}=\%20$ değeri kullanılmıştır.

5.8 Sismik Yalıtımlı Bina ile Ankastre Mesnetli Bina Karşılaştırmaları

Sismik yalıtımlı bina ile ankastre mesnetli binaya ait yerdeğiştirme, ivme ve taban kesme kuvveti karşılaştırmalarına, Bölüm 5.8.1, 5.8.2 ve 5.8.3’de yer verilmektedir.

5.8.1 Tepe yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması

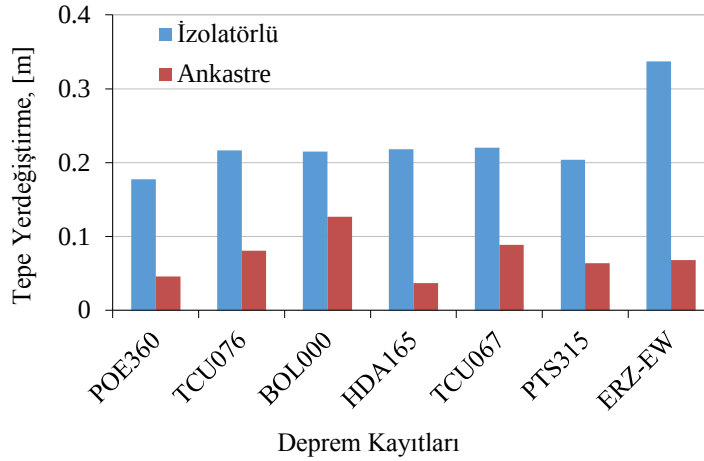
Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binalara ait tepe katı yatay yerdeğiştirmelerinin verildiği Şekil 5.13 incelendiğinde, beklenildiği gibi sismik yalıtımlı sistemin tepe katı yerdeğiştirmelerinin tüm depremler için ankastre sisteme göre büyük değer aldığı görülmektedir.



Şekil 5.13 : Tepe katı yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırması.

Sismik yalıtımlı bina için en büyük yerdeğiştirme istemi ERZ-EW depreminde 0.32m (320 mm) olarak gerçekleşmiştir.

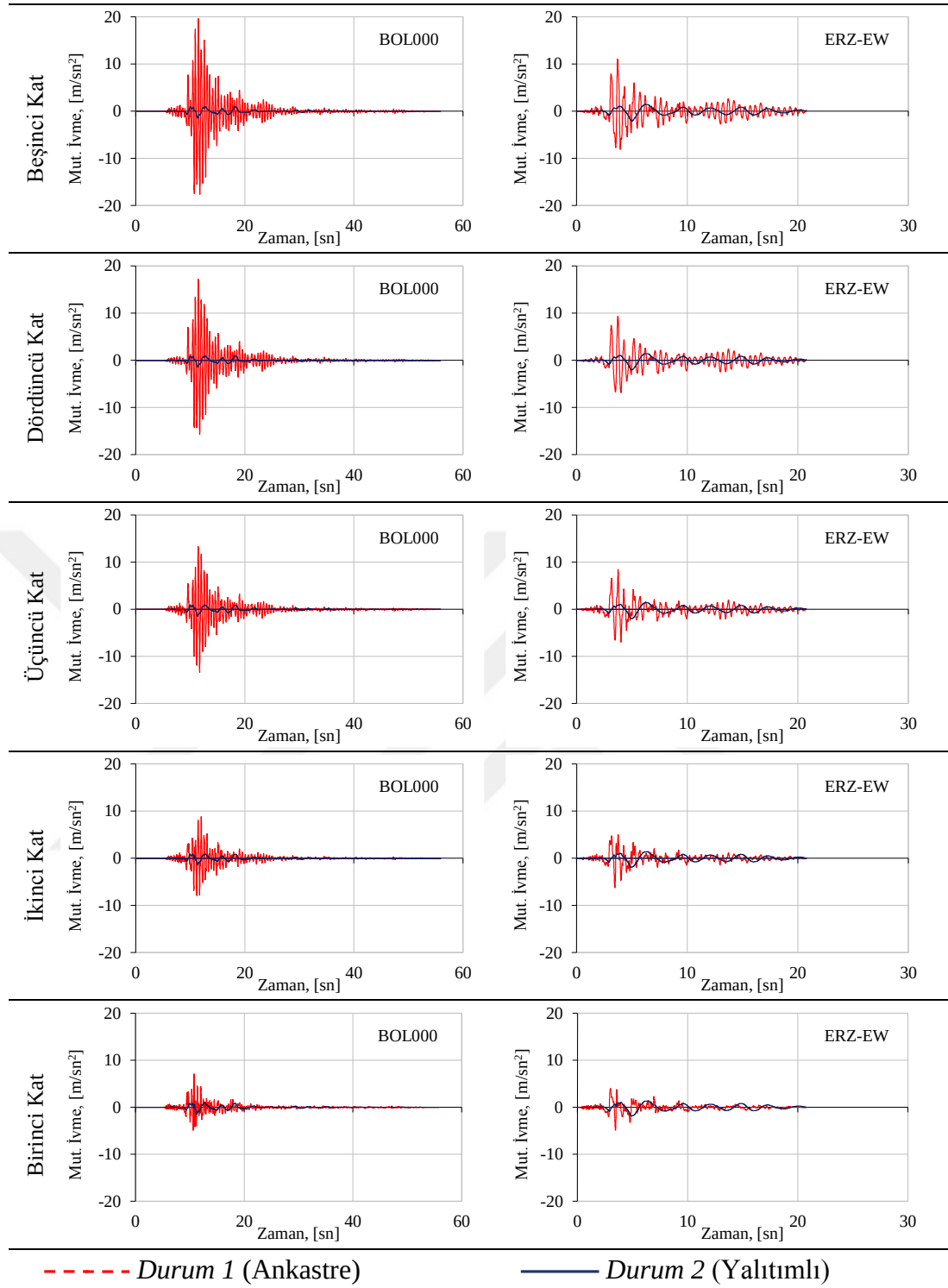
Tüm depremler için tepe yerdeğiştirmelerinin en büyük değerleri, Şekil 5.14’de çubuk diyagram biçimiyle karşılaştırılmıştır. Aynı diyagramdan sismik yalıtımlı binaya ait yerdeğiştirme istemlerinin, ankastre binaya göre çok daha büyük olduğu görülebilmektedir.



Şekil 5.14 : En büyük tepe yerdeğiştirmeleri.

5.8.2 Mutlak kat ivmelerinin karşılaştırılması

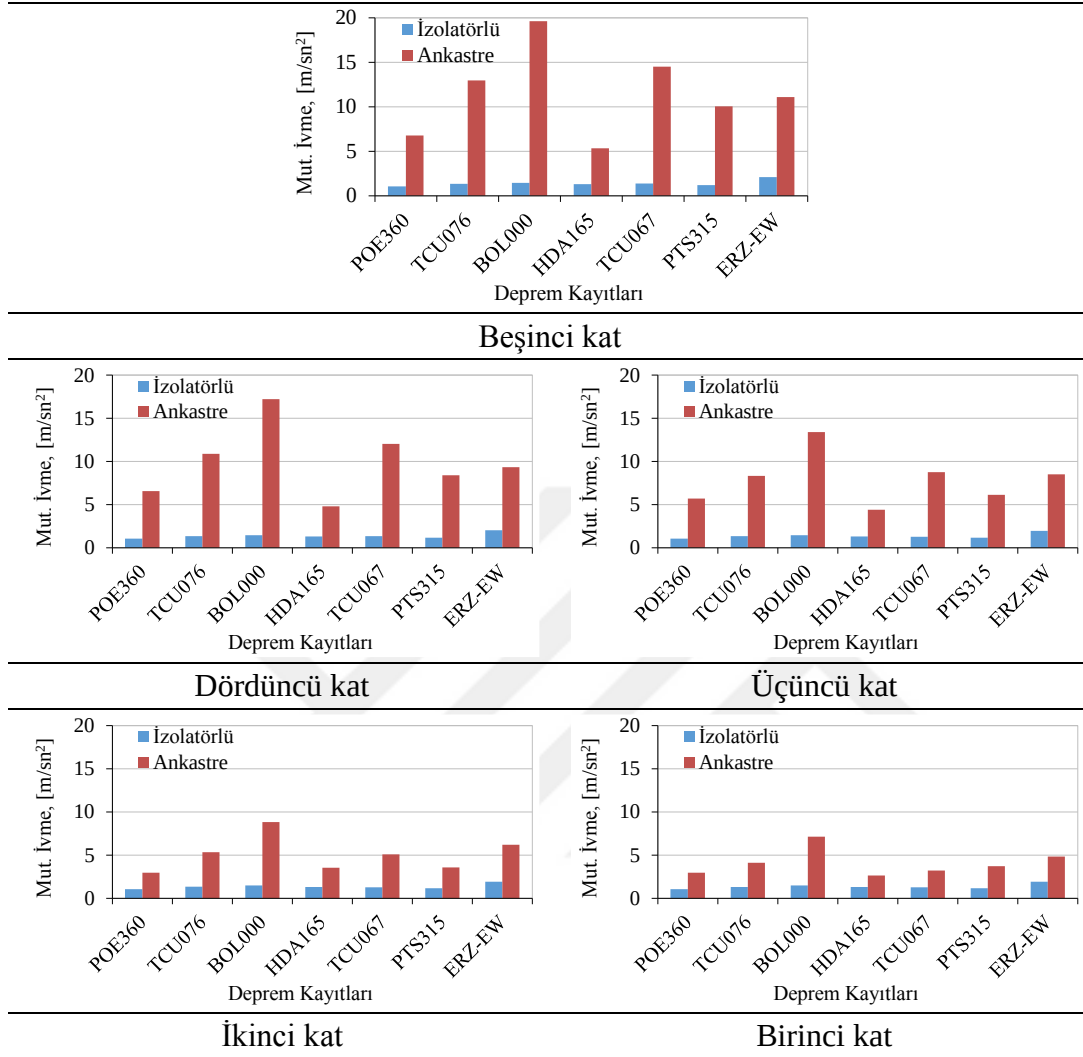
Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binalar için BOL000 ve ERZ-EW depremlerine ait kat ivmelerine Şekil 5.15’de yer verilmektedir. Şekilden sismik yalıtımlı sistemin tüm katlarında mutlak ivmelerin ankastre mesnetli sisteme göre önemli miktarda azaldığı görülmektedir. Aynı şekilden sismik yalıtımlı bina için her iki deprem etkisi altında katlarda ortaya çıkan ivmelerin hemen hemen hiç değişmediği görülebilmektedir. Bunun anlamı da sismik yalıtımlı binada katlar arasında orata çıkan göreceli ivmelerin çok küçük olduğudur. Bunun doğal sonucu da sismik yalıtımlı binanın depremler sırasında hasar alma olasılığının oldukça azaldığıdır. Tüm katlarda ortaya çıkan ivmelerine yer verilemeyen diğer 5 deprem için de durum benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.15 : BOL000 ve ERZ-EW depremleri için mutlak kat ivmeleri.

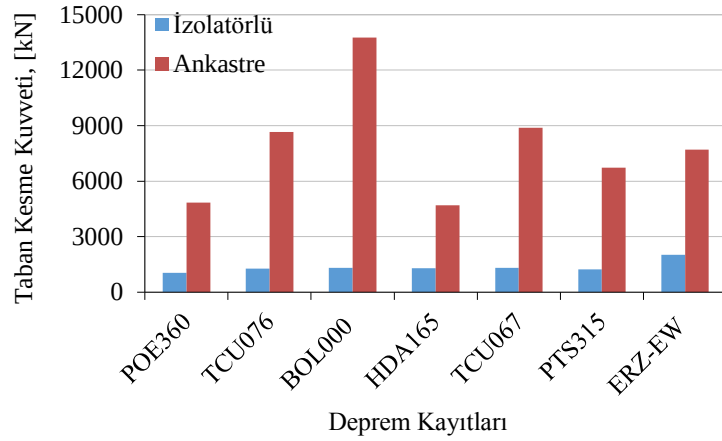
Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli binalar için tüm katlarda ortaya çıkan mutlak ivmelerin en büyük değerleri ise Şekil 5.16’da sunulmaktadır. Şekilden tüm depremler için sismik yalıtımlı binanın katlarında oluşan en büyük ivme değerlerinin ankastre mesnetli binaya göre oldukça küçük olduğu görülebilmektedir. Ankastre mesnetli bina

için kaydedilen en büyük ivme 20 m/s^2 iken, sismik yalıtımlı binada buna karşı gelen ivme değeri 2.0 m/s^2 olup, aradaki oran 1/10 olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.16 : Mutlak kat ivmeleri.

Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binaların tüm depremlerde ortaya çıkan taban kesme kuvveti talepleri Şekil 5.17’de yer almaktadır. Ankastre mesnetli binada en büyük taban kesme kuvveti istemi BOL000 depreminde 13770 kN olarak ortaya çıkarken, sismik yalıtımlı binada buna karşı gelen taban kesme kuvveti istemi 1305 kN olmaktadır. Şekil 5.17’den yedi farklı deprem kaydı için sismik yalıtımlı sistemde taban kesme kuvveti istemlerinin önemli miktarda azalabildiği açık olarak görülmektedir.



Şekil 5.17 : Taban kesme kuvveti istemleri.

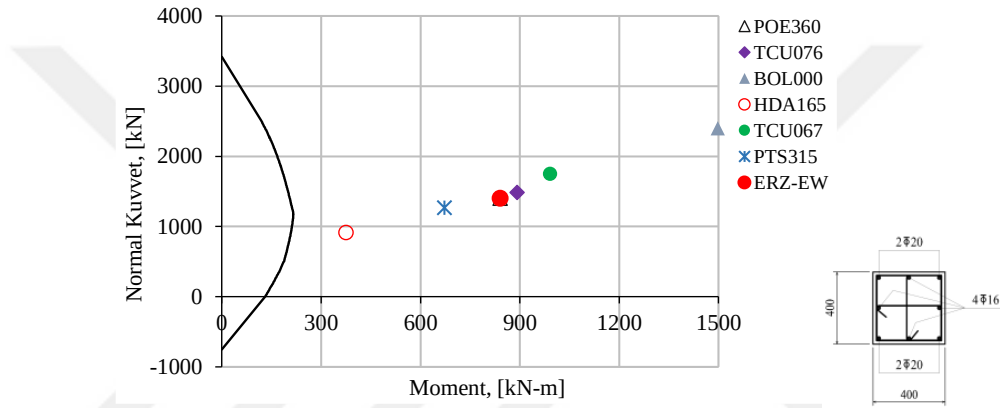
5.8.3 Zemin kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

Bodrum katın üzerinde, üst yapı için kritik kat olan (Bkz.Şekil 5.3 ve Şekil 5.6) zemin kat kesme kuvveti istemleri, ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı bina için Çizelge 5.2’de verilmektedir. Çizelgenin (4). kolonunda ankastre mesnetli durumla sismik yalıtımlı durumda oluşan zemin kat kesme kuvvetleri oranlanmıştır. Oranın 3.92 ile 12.12 arasında değiştiği görülmektedir. Ortama değer ise 7.0 olmaktadır. Bu değer, TDY (2007)’de süneklik düzeyi yüksek olarak tasarlanmış moment aktarabilen çerçeveler için önerilen taşıyıcı sistem davranış katsayısı R (yatay yük azaltma) ile uyumludur. Bu nedenle, ankastre mesnetli bina için ortalama plastik kesme kuvveti talebi $7682/7=1097$ kN olarak hesaplanabilecektir. Sismik yalıtımlı binada ise ortalama elastik kesme kuvveti talebi 1113 kN olarak hesaplanmaktadır.

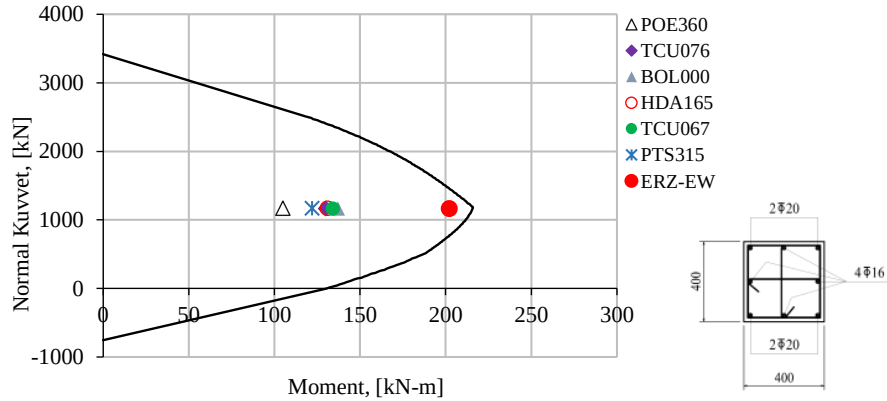
Çizelge 5.2 : Zemin kat kesme kuvveti istemleri.

Depremler	Ankastre Mesnetli [kN]	Sismik Yalıtımlı [kN]	Oran
(1)	(2)	(3)	(4) = (2)/(3)
POE360	4981	852	5.84
TCU076	8046	1053	7.64
BOL000	13434	1108	12.12
HDA165	4174	1064	3.92
TCU067	8845	1083	8.17
PTS315	6691	991	6.75
ERZ-EW	7606	1642	4.63
Ortalama	7682	1113	7.01

Bunun anlamı da sismik yalıtımlı binada üst bölümün tümüyle elastik davranış ($R=1$) sergileyebileceğidir. Bu davranış sismik yalıtımlı binanın kritik elemanları için gerçekleştirilen ve aşağıda verilen kapasite kontrolleri ile de ispatlanmaktadır. Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı binaların kritik zemin katına ait tipik kolonlarından birinin karşılıklı etki diyagramları çizilerek, düşey ve yatay yüklerin süperpozisyonundan oluşan (M,N) çiftleri diyagramlara işlenmiştir (Şekil 5.18 ve 5.19). Ankastre mesnetli bina için (*Durum 1*) tüm M, N çiftlerinin karşılıklı etki diyagramlarının dışında kaldığı, buna karşılık sismik yalıtımlı bina için (*Durum 2*) ise tüm çiftlerin, karşılıklı etki diyagramlarının içinde yer aldığı görülmektedir. Bunun anlamı da *Durum 2* için üst yapının herhangi bir süneklik talebine ihtiyacı olmadığıdır.



Şekil 5.18 : *Durum 1* için karşılıklı etki diyagramı ve M-N çiftleri.



Şekil 5.19 : *Durum 2* için karşılıklı etki diyagramı ve M-N çiftleri.

5.9 Sismik Yalıtım Katı Ana Elemanlarına ait Kapasite Kontrolleri

Sismik yalıtımlı binanın yalıtım katının ana elemanları olan iki ucu mafsallı çelik kolonlar ile yalıtım katı tavanında yer alan kompozit döşeme çelik kirişlerinin kesit kontrolleri, yalıtım katının her bir elemanı hesap modeline dahil edildiğinden, analizler sonunda ulaşılan iç kuvvetler kullanılarak AISC360 (2005)'e göre kolaylıkla yapılabilmektedir. Kolon ve kirişler için ulaşılan en büyük istem/kapasite oranları sırasıyla 0.553 ve 0.615 olarak elde edilmiştir. Kontrollere ait SAP2000n yazılımı çıktılarına EK A'da yer verilmektedir.

5.10 Sismik Yalıtımlı Binanın Seçilmiş Deprem kayıtları İçin Yerdeğiştirme İstemlerinin Hesaplanması

Sismik yalıtımlı binanın, PEER *Yer Hareketleri Veri Tabanından* seçilen 60 yakın fay, depremi ve 6 adet uzak deprem kaydı için yerdeğiştirme istemlerinin hesaplanması amacıyla, Bölüm 3.12'de ayrıntıları verilen ISOTHA-1 yazılımı kullanılarak, eşdeğer sönüm oranı $\zeta_{esd}=\%20$ için zaman tanım alanında analizleri gerçekleştirilmiştir. Sismik yalıtımlı binanın seçilen 66 adet deprem kaydı etkisinde analizinin yapılmasındaki amaç, sismik yalıtım katının 735 mm olan yatay yerdeğiştirme kapasitesinin aşılp aşılmayacağını ortaya çıkarılmasıdır. Sismik yalıtım sisteminin %20 civarındaki eşdeğer sönüm kapasitesinin yeterliliği ve ilave sönüm gereksinimi olup olmadığı da belirlenecektir.

5.10.1 Seçilen deprem kayıtları

PEER arşivinden deprem kayıtlarının seçimi sırasında kayma dalgası hızları (V_s) dikkate alınmış, $V_s=300-1000$ m/sn arasındaki değerlere sahip depremler arasından seçim yapılmıştır. Uzak deprem kayıtlarının seçiminde faya 100 km'den uzak olan depremlere yer verilmemiştir. Analizlerde kullanılan 60 adet yakın deprem kaydı Çizelge 5.3, 6 adet uzak deprem kaydı da Çizelge 5.4'de verilmektedir. Depremlerin moment büyüklükleri (M_s), kayıt istasyonunun faya uzaklığı (d) ile depremlere ait PGA ve PGV değerleri de ilgili çizelgelerde yer almaktadır.

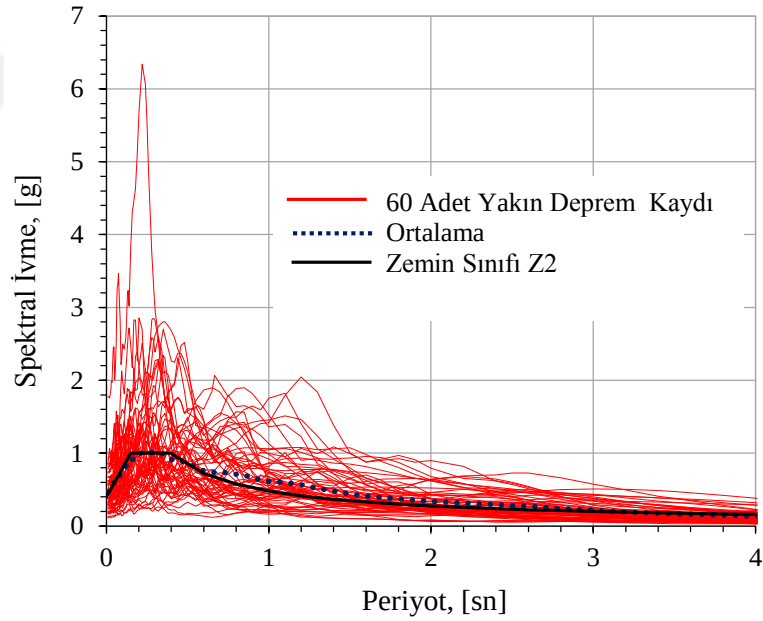
Çizelge 5.3 : Analizlerde kullanılan yakın deprem kayıtları.

No.	Kayıt	M _s	d [km]	PGA [cm/sn ²]	PGV [cm/sn]	No.	Kayıt	M _s	d [km]	PGA [cm/sn ²]	PGV [cm/sn]
1	Imperial Valley 1979 Agrarias	6.53	0.65	187.7	41.7	31	Northridge-01 1994 Pardee - SCE	6.69	7.46	546.8	76.0
2	Imperial Valley 1979 Brawley Airport	6.53	10.42	159.5	36.6	32	Northridge-01 1994 Rinaldi Receiving Sta	6.69	6.5	463.3	74.7
3	Imperial Valley 1979 El Centro - Meloland Geot. Array	6.53	0.07	291.9	92.6	33	Northridge-01 1994 Sylmar - Converter Sta	6.69	5.35	611.1	116.2
4	Imperial Valley 1979 El Centro Array #10	6.53	8.6	148.7	50.7	34	Northridge-01 1994 Sylmar - Converter Sta East	6.69	5.19	836.5	120.9
5	Imperial Valley 1979 El Centro Array #4	6.53	7.05	264.3	80.4	35	Northridge-01 1994 Sylmar - Olive View Med FF	6.69	5.3	827.3	129.3
6	Imperial Valley 1979 El Centro Array #5	6.53	3.95	368.2	96.9	36	Kobe_ Japan 1995 KJMA	6.9	0.96	579.2	91.1
7	Imperial Valley 1979 El Centro Array #6	6.53	1.35	440.5	113.5	37	Kobe_ Japan 1995 Takarazuka	6.9	0.27	574.2	86.2
8	Imperial Valley 1979 El Centro Array #7	6.53	0.56	460.2	113.1	38	Kobe_ Japan 1995Takatori	6.9	1.47	658.3	122.9
9	Imperial Valley 1979 El Centro Differential Array	6.53	5.09	345.9	75.5	39	Duzce_ Turkey 1999 Bolu	7.14	12.04	725.2	55.9
10	Imperial Valley 1979 Holtville Post Office	6.53	7.5	206.6	53.1	40	Duzce_ Turkey 1999 Bolu	7.14	12.04	790.3	65.8
11	Irpinia_ Italy-01 1980 Bagnoli Irpinio	6.9	8.18	186.1	34.7	41	Cape Mendocino 1992 Bunker Hill FAA	7.01	12.24	202.5	48.3
12	Irpinia_ Italy-01 1980 Sturmo (STN)	6.9	10.84	314.4	71.9	42	Cape Mendocino 1992 Centerville Beach_ Naval Fac	7.01	18.31	468.5	51.2
13	Superstition Hills-02 1987 Kornbloom Road (temp)	6.54	18.48	111.7	18.3	43	Bam_ Iran 2003 Bam	6.6	1.7	792.3	124.1
14	Superstition Hills-02 1987 Parachute Test Site	6.54	0.95	423.6	134.2	44	Niigata_ Japan 2004 NIG021	6.63	11.26	709.1	54.2
15	Loma Prieta 1989 Gilroy - Historic Bldg.	6.93	10.97	279.8	43.4	45	Niigata_ Japan 2004 NIGH11	6.63	8.93	374.3	58.1
16	Loma Prieta 1989 Gilroy Array #2	6.93	11.07	316.5	40.4	46	Montenegro_ Yugoslavia 1979 Bar-Skupstina Opstine	7.1	6.98	340.9	52.8
17	Loma Prieta 1989 Gilroy Array #3	6.93	12.82	529.6	36.3	47	Montenegro_ Yugoslavia 1979 Ulcinj - Hotel Olympic	7.1	5.76	287.1	43.6
18	Loma Prieta 1989 Gilroy Array #3	6.93	12.82	361.2	45.4	48	Chuetsu-oki_ Japan 2007 Joetsu Kakizakiku Kakizaki	6.8	11.94	446.9	89.0
19	Loma Prieta 1989 Saratoga - Aloha Ave	6.93	8.5	302.0	41.6	49	Darfield_ New Zealand 2010 GDLC	7.0	1.22	750.0	116.0
20	Loma Prieta 1989 Saratoga - W Valley Coll.	6.93	9.31	302.0	42.0	50	Darfield_ New Zealand 2010 HORC	7.0	7.29	441.5	105.9
21	Cape Mendocino 1992 Petrolia	7.01	8.18	648.9	88.5	51	Darfield_ New Zealand 2010 LINC	7.0	7.11	380.2	56.9
22	Landers 1992 Barstow	7.28	34.86	127.9	20.4	52	Darfield_ New Zealand 2010 Riccarton High School	7.0	13.64	229.1	62.7
23	Landers 1992 Yermo Fire Station	7.28	23.62	165.7	51.1	53	Darfield_ New Zealand 2010 ROLC	7.0	1.54	299.9	57.0
24	Northridge-01 1994 Jensen Filter Plant Adm. Bld.	6.69	5.43	402.7	111.4	54	Darfield_ New Zealand 2010 Shirley Library	7.0	22.33	137.6	57.8
25	Northridge-01 1994 Jensen Filter Plant Generator Bld.	6.69	5.43	560.3	76.1	55	Darfield_ New Zealand 2010 Styx Mill Transfer S.	7.0	20.86	166.9	60.1
26	Northridge-01 1994 LA - Sepulveda VA Hospital	6.69	8.44	665.7	76.2	56	Darfield_ New Zealand 2010 TPLC	7.0	6.11	294.0	76.3
27	Northridge-01 1994 LA Dam	6.69	5.92	318.0	47.4	57	Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU076 S.	7.62	16.03	408.1	64.2
28	Northridge-01 1994 Newhall - Fire Sta	6.69	5.92	554.8	74.9	58	Duzce 12/11/1999 Bolu S.	7.14	17.16	714.2	56.4
29	Northridge-01 1994 Newhall - W Pico Canyon Rd.	6.69	5.48	411.4	118.1	59	Superstition Hills 11/24/1987 USGS 5051 P. Test Site S.	6.60	15.99	369.8	43.9
30	Northridge-01 1994 Pacoima Kagel Canyon	6.69	7.26	424.6	51.4	60	Erzincan 03/13/1992 Erzincan S.	6.90	8.97	486.6	64.3

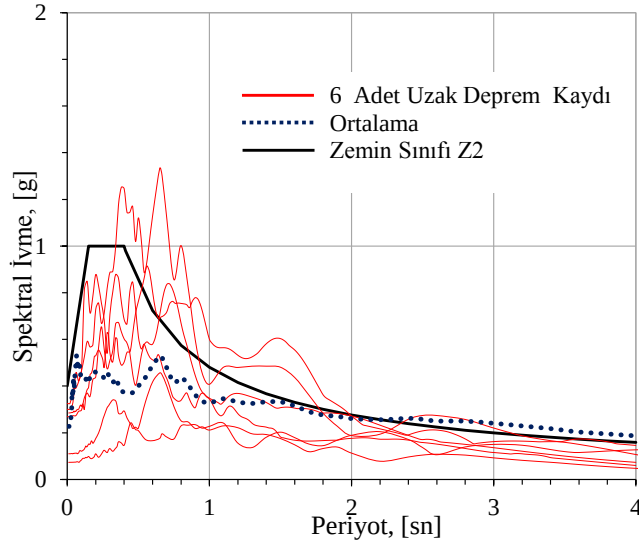
Çizelge 5.4 : Analizlerde kullanılan uzak deprem kayıtları.

No.	Kayıt	M_s	d [km]	PGA [cm/sn ²]	PGV [cm/sn]
1	Loma Prieta 1989 Foster City - APEEL 1	6.93	43.94	279.1	46.3
2	Loma Prieta 1989 Foster City - Menhaden Court	6.93	45.58	95.5	22.0
3	Chi-Chi_ Taiwan 1999 ILA004	7.62	88.89	58.4	29.6
4	Loma Prieta 10/18/1989 Hollister Diff. Array S.	7.10	45.10	263.9	43.9
5	Chi-Chi, Taiwan 09/20/1999 CWB 99999 TCU067 S.	7.62	28.70	318.8	66.6
6	Superstition Hills 11/24/1987 USGS 9400 Poe Road S.	6.60	11.20	294.3	32.8

Seçilen 60 adet yakın depreme ait elastik ivme spektrumu Şekil 5.20’de, 6 adet uzak deprem kaydına ait elastik ivme spektrumu da Şekil 5.21’de yer almaktadır. Bu şekillerde, TDY (2007)’ de birinci derece deprem bölgesi (PGA =0.40g) ve Z₂ zemin sınıfı için tanımlanan spektrum eğrisi düz siyah çizgi ile seçilen depremlere ait ortalama spektrum da kesikli mavi çizgi ile gösterilmiştir. Her iki grafikten, yapı etkin periyodu olan T=2.59 sn. civarında ortalama spektral ivmenin yönetmelik spektral büyüklüne yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir.



Şekil 5.20 : Yakın depremlere ait elastik ivme spektrumları.

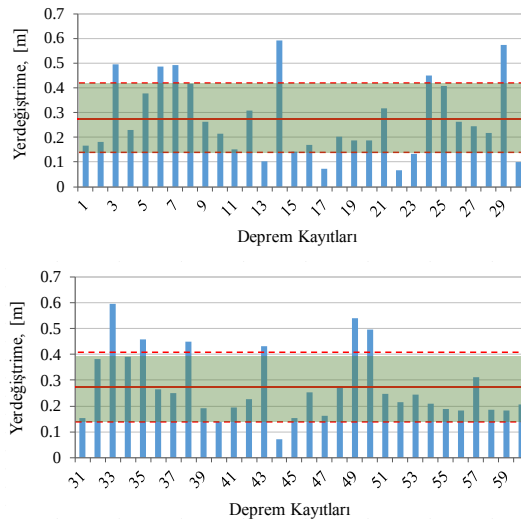


Şekil 5.21 : Uzak depremlere ait elastik ivme spektrumları.

5.10.2 Zaman tanım alanındaki analizler ve elde edilenler

Beş katlı sismik yalıtımlı betonarme bina; Bölüm 3.12.1’de tanımlanan tek serbestlik dereceli kütle-yay sistemi ile modellenerek, seçilen 60 adet yakın deprem ve 6 adet uzak deprem kaydı için ISOTHA-1 yazılımı ile zaman tanım alanındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Modeldeki kütle yay sisteminin rijitliği yalıtım katının etkin yatay rijitliği olan $K_{x(et)}=7059.2 \text{ kN/m}$ dir. Eşdeğer sönüm oranı olarak $\zeta_{eq}=\%20$ değeri açısal frekans olarak da sismik yalıtımlı binanın birinci serbest titreşim moduna karşı gelen, $\omega=2.42 \text{ 1/sn}$, değerleri kullanılmıştır.

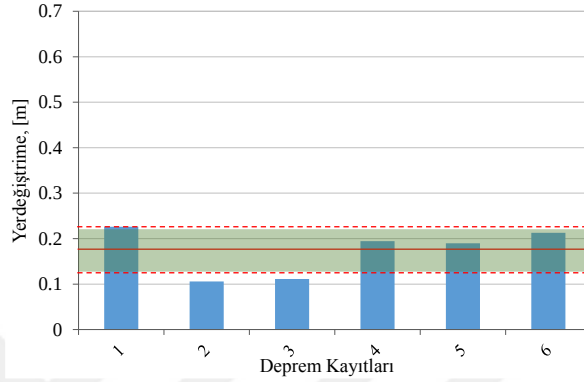
Sismik yalıtımlı binanın kütle-yay sistemi kullanılarak gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizleri sonunda, yakın ve uzak depremler için elde edilen yerdeğiştirme istemleri sırasıyla, Şekil 5.22 ve 5.23’deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 5.22 : Yakın depremlere ait yerdeğiştirme istemleri.

Yakın depremler için elde edilen en büyük yerdeğiştirme istemi 0.596 m, ortalama yerdeğiştirme istemi 0.274 m, standart sapma da 0.141 m olarak elde edilmiştir (Şekil 5.22). Uzak depremler için ise en büyük yerdeğiştirme istemi 0.226 m, ortalama yerdeğiştirme 0.173 m, standart sapma da 0.052 m olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.23).

Toplam 66 adet depremin hiç birinde sismik yalıtım katının fiziksel yerdeğiştirme kapasitesi olan 0.735 m (735 mm) aşılmamıştır.



Şekil 5.23 : Uzak depremlere ait yerdeğiştirme istemleri.

5.11 Sismik Yalıtımlı Bina İçin Kırılgenlik Eğrileri

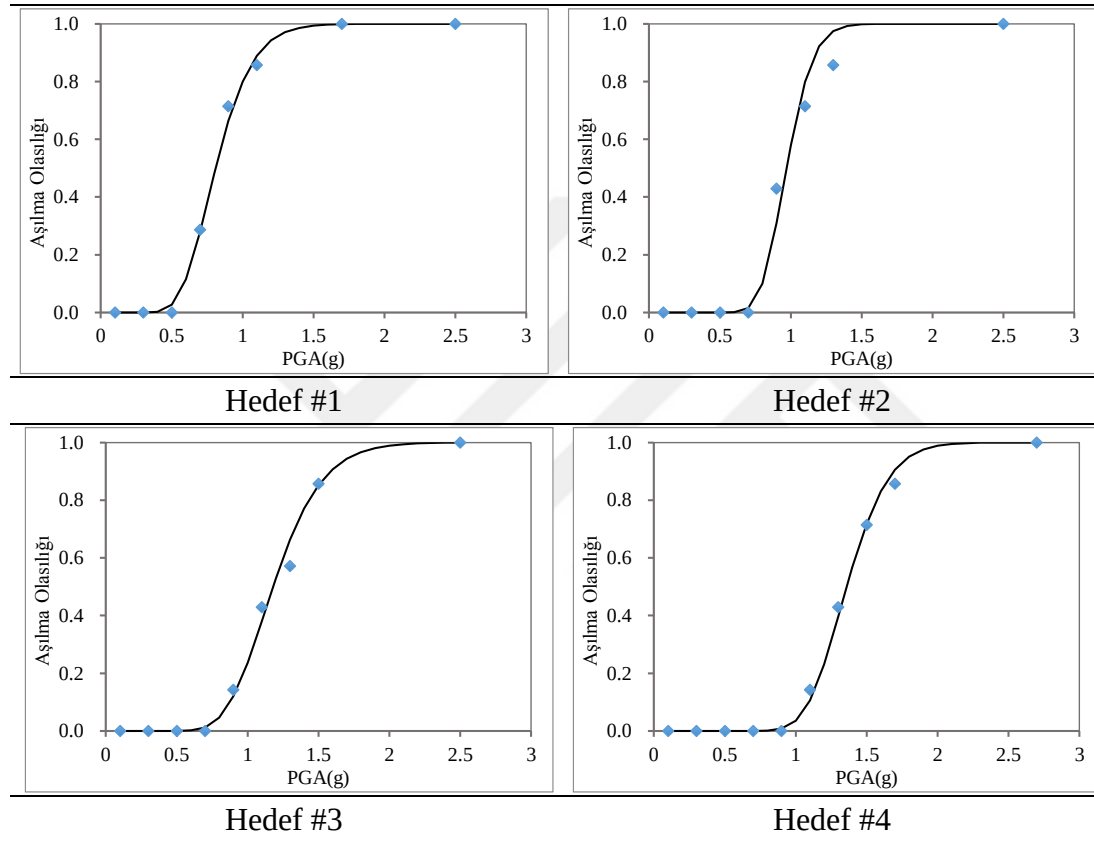
Sismik yalıtımlı bina için, deneyler sırasındaki gözlemlere dayanılarak, yalıtım katının fiziksel yerdeğiştirme kapasitesi $\Delta_m=735$ mm'ye bağlı dört adet performans hedefi belirlenmiştir. Bu performans hedefleri Çizelge 5.5'de verilmektedir. Çizelgedeki performans hedefleri esas alınarak, sismik yalıtımlı binada artımsal dinamik analizler (IDA) gerçekleştirilmiştir (Baker, 2015). Depremler uygulanırken çarpan olarak sırasıyla, 0.1, 0.2, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9, 2.1, 2.3 ve 2.5 değerleri kullanılmıştır. Analizlerde eşdeğer sönüm oranı olarak, deneylerden elde edilen $\zeta_{esd}=\%20$ değeri kullanılmıştır.

Çizelge 5.5 : Sismik yalıtımlı bina için performans hedefleri.

Hedef	$\% \Delta_m$	Yerdeğiştirme
		[mm]
#1	$\%60 \times \Delta_m$	440
#2	$\%75 \times \Delta_m$	551
#3	$\%90 \times \Delta_m$	661
#4	$\%100 \times \Delta_m$	735

Analizler sonunda sismik yalıtımlı bina için belirlenen dört adet performans seviyesine bağlı olarak oluşturulan kırılma olasılığı eğrileri (aşılma olasılığı eğrileri) Şekil 5.24’de sunulmaktadır. Şekilden sismik yalıtımlı binanın fiziksel yatay yerdeğiştirme kapasitesine karşı gelen performans hedefinin (hedef #4) aşılma olasılığı $PGA=0.9g$ ’ye kadar sıfır, $PGA=1.5g$ için ise %50 olmaktadır.

Kırılma olasılığı eğrilerinden, sismik yalıtım sisteminin tasarım depremi yer ivmesine karşı gelen $PGA=0.4g$ için oldukça yüksek bir güvenliğe sahip olduğu da anlaşılmaktadır.



Şekil 5.24 : Sismik yalıtımlı binada farklı performans hedefleri için üretilen kırılma olasılığı eğrileri.

5.12 Değerlendirme ve Yorumlar

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin ülkemizde kullanımı çok yaygın olan betonarme binalarda etkin olarak kullanılabileceği göstermek amacıyla, beş katlı betonarme bir binanın temelden ankastre mesnetli ve sismik yalıtım katlı hesap modelleri üzerinde gerçekleştirilen analizler sonunda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- Beş katlı sismik yalıtımlı betonarme binanın çelik malzemeden oluşan sismik yalıtım katının iki ucu mafsallı kolonları, yay kutuları ve kompozit döşeme çelik kirişleri makul boyutlardaki kesitler ile tasarlanabilmektedir.
- Sismik yalıtımlı bina ilgili uluslararası yönetmelikte belirtilen şartları sağlamaktadır.
- Sismik yalıtımlı binada kat ivmeleri ve taban kesme kuvveti istemleri önemli oranlarda küçültülmektedir. Ankastre mesnetli bina için en elverişsiz deprem olan BOL000 depreminde, sismik yalıtımlı binanın tepe katı ivmeleri ve taban kesme kuvveti değerleri, ankastre mesnetli binaya göre sırasıyla 13.70 ve 12.20 kez küçültülebilmektedir.
- Sismik yalıtımlı bina, EC8 (2004)'de sismik yalıtım aletlerinin merkeze gelme şartı olarak verilen kriteri de sağlamaktadır.
- Ankastre mesnetli binanın uygulanan yedi farklı deprem için ortalama süneklik talebi 7 iken, sismik yalıtımlı bina herhangi bir sünekliğe gereksinim duymadan aynı depremlerde oluşan iç kuvvetleri taşıyabilmektedir.
- Sismik yalıtımlı binanın 60 adet yakın, 6 adet de uzak deprem kaydı etkisinde, eşdeğer sönüm oranı $\zeta_{esd}=\%20$ kabul edilerek gerçekleştirilen zaman tanım alanındaki analizleri sonunda, hiçbir deprem için yalıtım katının fiziksel yerdeğiştirme kapasitesi aşılmamaktadır. Bu da geliştirilen yalıtım sisteminin sahip olduğu %20 civarındaki eşdeğer sönümün artırılmasına gerek duyulma olasılığının oldukça düşük olduğunu işaret etmektedir.
- Sismik yalıtımlı binanın tasarımında öngörülen, fiziksel yatay yerdeğiştirme kapasitesinin aşılma olasılığı $PGA=0.9g$ için %0, $PGA=1.5g$ için %75 olmaktadır.
- Sismik yalıtımlı bina, tasarım depremi yer ivmesine karşı gelen $PGA=0.4g$ için oldukça yüksek bir güvenliğe sahiptir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında önerilen sismik yalıtım sistemi ile ilgili olarak öncelikle yay, yay kutusu ve bağımsız sismik yalıtım katı numuneleri üzerinde statik ve tekrarlı yükler etkisinde deneyler ve doğrulamaya yönelik analitik hesaplar yapılmıştır. Bir sonraki aşamada, $\frac{1}{4}$ ölçekli, üç katlı, üç boyutlu ve moment aktarabilen birleşimlere sahip çelik üst yapısı bulunan düzlem mafsallı sismik yalıtım sistemli numune ile buna karşı gelen ankastre mesnetli sistemin tek eksenli sarsma masası deneyleri ve sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin mühendislik pratiğinde de kullanılabileceğinin gösterilmesi amacıyla, $\frac{1}{4}$ ölçekli, üst yapısı yine aynı olan küresel mafsallı sismik yalıtım katlı numunenin sarsma masası deneyleri ve doğrulamaya yönelik sayısal analizleri icra edilmiştir. Son olarak, önerilen sismik yalıtım sisteminin ülkemizde yaygın olan betonarme binalarda etkin olarak kullanılabileceğinin gösterilmesi amacıyla, beş katlı örnek betonarme bir binanın temelden ankastre mesnetli ve sismik yalıtım katlı hesap modelleri üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalardan ulaşılan sonuçlar ve çalışmanın ileri götürülmesi için sonraki aşamalarda yapılması gerekenler bu bölümde verilmektedir.

6.1 Sonuçlar

1. Doğrusal elastik basık yayların teorik eksenel rijitlikleri, deneylerden elde edilen eksenel rijitlikler ile uyumludur.
2. Özdeş çekme ve basınç rijitliğine sahip olacak biçimde geliştirilen yay kutusunun analitik olarak hesaplanan eksenel rijitliği, statik deneylerden elde edilen eksenel rijitlik ile birebir örtüşmektedir.
3. Bağımsız sismik yalıtım katının, mafsallardaki sürtünme göz önüne alınmaksızın hesaplanan I. ve II. mertebe teorik yatay rijitlikleri ve yay kutusu iç kuvvetleri, mümkün olduğunca sürtünmeden arındırılarak gerçekleştirilen statik deneylerden elde edilen değerler ile uyumludur.

4. Bağımsız sismik yalıtım katının statik deneylerden elde edilen yatay ve düşey yerdeğiştirmeleri ile çapraz yay kutularının eksenel boy değişimleri, geometrik uygunluk ilişkileri ile elde edilen değerlerle uyumludur.
5. Sarsma masası deneyleri ve analitik çalışmalar, onerilen düzlem mafsallı ve küresel mafsallı sismik yalıtım sistemleri ile st yapıya aktarılabilecek ivmelerin önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermektedir. Bu oran %70 düzeylerine çıkabilmektedir. Böylelikle yapı, kuvvetli yer hareketleri sırasında hasar alma sınırlarından uzaklaştırılmaktadır.
6. Sismik yalıtımlı sistemde ankastre mesnetli sisteme göre kat ivmeleri ve taban kesme kuvvetleri önemli oranda azaltılmaktadır. Uygulanan deprem kayıtları dikkate alındığında, yalıtım katı ivmeleri ve taban kesme kuvvetleri için ortalama azalma oranı 1/7 olarak ortaya çıkmaktadır.
7. Düzlem ve küresel mafsallara sahip sismik yalıtım sistemlerinde, yalıtım katı mafsallarındaki sürtünme sebebiyle, %18-20 düzeyinde bir eşdeğer sönüm oranı ortaya çıkmaktadır.
8. Düzlem ve küresel mafsallı sismik yalıtım katında, sürtünme göz önüne alınmadan hesaplanan teorik ikinci mertebe yatay rijitlik mafsallardaki sürtünme dolayısıyla ortalama %20-25 civarında artabilmektedir.
9. Düzlem ve küresel mafsallı sismik yalıtımlı numunede st yapı göreli yerdeğiştirmeleri çok çok küçülmekte, st yapının sadece rijit öteleme yaptığı sylenabilmektedir. Tüm şekildeğiştirmelerin toplandığı yalıtım katındaki yanal öteleme oranı %20 civarına kadar ulaşabilmekte, bu oranın da farklı tasarım depremlerinin ihtiyaç duyacağı yerdeğiştirme istemlerini karşılayabilecek düzeyde olduğu anlaşılmaktadır.
10. Farklı depremlerin yerdeğiştirme istemleri ile düşey ve yatay yük kaynaklı eksenel yüklerin ikinci mertebe etkileri, geliştirilen düzlem ve küresel mafsallı sismik yalıtım sistemi tarafından karşılanabilmektedir.
11. Deneyler sırasında, sismik yalıtım katında herhangi bir kalıcı şekildeğiştirme kaydedilmediği gibi deneyler sonlandırıldığında numune üzerinde yapılan gözlemlerde de hiçbir kalıcı şekildeğiştirme izi tespit edilmediğinden, onerilen sismik yalıtım sisteminin merkeze gelme özelliğine sahip olduğu deneysel olarak ispatlanmıştır. onerilen sismik

yalıtım sisteminin merkeze gelme kabiliyetinin deneylere dayanılarak ispatlanmasının yanı sıra, merkeze gelme özelliğine sahip sismik yalıtım ürünlerinin ilgili yönetmelik ve düzenlemelere göre sağlaması gereken iki ayrı koşul da, önerilen yalıtım sistemi tarafından sağlanmaktadır.

12. Sismik yalıtım katındaki çapraz yay kutularının eksenel boy değiştirme (yerdeğiştirme) kapasitesinin aşılması durumunda; incelenen deney numunesinde toptan göçme meydana gelmemiş, numunenin yalıtım katı büyük yanal yerdeğiştirme yaparak çekme yerdeğiştirmesi yönünde merkeze gelme özelliğini kaybederek kalmıştır. Bu durum sistemin “*göçme emniyeti*” olarak değerlendirilmekle birlikte, yay kapasitelerinin belirlenmesinde daha çok sayıda deprem kaydı kullanılarak bu olayın daha yakından incelenmesi yerinde olacaktır.
13. Sismik yalıtım katının küresel mafsalları her iki doğrultuda da benzer davranış göstermektedir. Yalıtım katının her iki doğrultusunda tertiplenen çapraz yay kutuları benzer davranış sergilemiştir. Yay kutularını sismik yalıtım katının alt ve üst görelî rijit kirişlerine bağlamak üzere düğüm noktalarında tertiplenen uygun detay vasıtasıyla, çapraz yay kutuları tüm deneyler süresince düzlem dışı hareketlere uyum sağlamışlardır.
14. Küresel mafsallı sismik yalıtım sistemi ve düzlem mafsallı sismik yalıtım sistemi benzer davranış sergilemiştir.
15. Uygulamaya yönelik olarak incelenen beş katlı sismik yalıtımlı betonarme binanın çelik malzemeden oluşan sismik yalıtım katının iki ucu mafsallı kolonları, yay kutuları ve kompozit döşeme çelik kirişleri geometrik olarak makul boyutlardaki kesitler ile tasarlanabilmektedir.
16. Sismik yalıtımlı bina ilgili uluslararası yönetmeliklerde belirtilen temel şartları sağlamaktadır.
17. Sismik yalıtımlı örnek binada kat ivme ve taban kesme kuvveti talepleri önemli oranlarda küçülmektedir. Ankastre mesnetli bina için en elverişsiz deprem olan BOL000 depreminde, sismik yalıtımlı binanın tepe katı ivmeleri ve taban kesme kuvveti değerleri, ankastre binaya göre sırasıyla 13.70 ve 12.20 oranlarında küçültülebilmektedir.

18. Sismik yalıtımlı bina, EC8(2004)'de sismik yalıtım ürünlerinin merkeze gelme şartı olarak verilen kriteri de sağlamaktadır.
19. Ankastre mesnetli binanın uygulanan yedi farklı deprem için ortalama süneklik talebi 7.0 iken, sismik yalıtımlı bina sünekliğe gereksinim duymadan deprem etkilerini elastik olarak taşıyabilmektedir.
20. Sismik yalıtımlı betonarme örnek binanın 60 adet yakın deprem 6 adet de uzak deprem olmak üzere, toplam 66 adet deprem kaydı esas alınarak zaman tanım alanında gerçekleştirilen analizleri sonunda, yalıtım katı için elde edilen en büyük yerdeğiştirme istemi 569 mm olarak hesaplanmıştır. Bu değer yalıtım katının 735 mm olan fiziksel yerdeğiştirme kapasitesinden küçüktür. Seçilen farklı karakterdeki depremler için, geliştirilen sismik yalıtım sisteminin sahip olduğu %20 civarındaki eşdeğer sönümün artırılmasına gerek olmadığı görülmüştür.
21. Sismik yalıtımlı binada yatay yerdeğiştirme kapasitesinin aşılma olasılığı $PGA=0.9g$ için %0, $PGA=1.5g$ için %75 olmaktadır. Sismik yalıtımlı binada tasarım depremine karşı gelen $PGA=0.4g$ için güvenlik çok yüksektir.
22. Önerilen sismik yalıtım sisteminin üretimi, bakımı ve eleman değişimi kolaydır. Yalıtım katının iki ucu mafsallı çelik kolonları, yay kutuları ve çelik kompozit döşemesi yerli ve ortalama kalitedeki işçilik ile imal edilebilecektir.
23. Geliştirilen sismik yalıtım sistemi, hali hazırda binanın bir katı olduğundan, bazı yalıtım sistemlerinin istediği ilave bir servis katına ihtiyaç duymamaktadır. Yalıtım katının iki doğrultusunda tertiplenecek çapraz yay kutuları yapısal ve mimari bakımdan uygun yerlerde konumlandırılarak, katın etkili kullanımı sağlanabilecektir.
24. Yalıtım katının tüm malzemesi çelik olduğundan, servis ömrünün betonarme veya çelik üst yapı ile uyumlu olduğu söylenebilir. Ayrıca çeliğin korozyona karşı korunması için farklı yöntemler de kullanılabilecektir.

Yukarıda sıralanan sonuçlara incelenen deney numuneleri ile ulaşıldığı, başka deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulabileceği de gözden kaçırılmamalıdır.

6.2 Öneriler

1. Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin eksik fonksiyonunu tamamlamak üzere, sismik yalıtım sisteminde, rüzgar ve küçük depremler için konfor şartlarını sağlayacak, göreceli yüksek bir başlangıç rijitliği kazandırılmasına yönelik çalışmaya öncelik verilmelidir. Bu amaçla; yay kutusu uç pistonları uygun bir pimli kilit sistemi ile kilitlenerek, yay kutuları ömürleri boyunca kuvvetli yer hareketleri dışında uç piston boruları ve gövde borularından oluşan göreceli rijit bir çubuk olarak çalışarak, rüzgar ve küçük depremlerde binanın yatay yerdeğiştirmelerini sınırlandırmalıdır. Kuvvetli yer hareketi sırasında kilit piminin önceden tasarlanan kesme kapasitesi aşılr aşılmaz, kırılması sonrasında sismik yalıtım sistemi devreye girmelidir.
2. Tez kapsamında geliştirilen sismik yalıtım sisteminin, bir araştırma projesi kapsamında tercihen tam ölçekli, olamıyorsa ½ ölçekli bina modelleri kullanılarak çok serbestlik dereceli sarsma masasında deneyleri gerçekleştirilmelidir. Bu deneylerde uygun sonuçlar alındıktan sonra uygulamaya geçilmelidir.
3. Çok serbestlik dereceli sarsma masası deneylerinde netleştirilecek öncelikli konulardan biri; yakın depremler için önerilen sismik yalıtım sisteminde ilave sönümün gerekip gerekmeyeceğinin belirlenmesidir.
4. Gerçekleştirilecek ilave deneylerden elde edilecek veriler ve Bölüm 4.11.3’de verilen bağımsız yalıtım katı ideal kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinden faydalanılarak, sismik yalıtım katının küresel mafsallarına atanacak; hız, yerdeğiştirme ve temas gerilmelerine bağılı, yatay serbestlik doğrultusunda sürtünme davranışını temsil edebilen bir NLINK elemanı geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- AASHTO Guide** (1991). *Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC 20001, USA.
- Addison, J., Naish, D., Lanning, J.** (2015). Ambient Vibration Control of Suspended Bridges Using Self-Centering Friction Damping Brace, *Structures Congress* : 2010-2020.
- AISC360** (2005). *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, One East Wacker Drive, Suite 700, Chicago, Illinois 60602-1802, USA.
- Akiyama, H.** (1985). *Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings*, University of Tokyo Press, ISBN 0-86008-377-2.
- Arnold, C.** (1984). Soft First Stories: Truths & Myths. 8th Word Conference on Earthquake Engineering, San Francisco 5: 943-950.
- Aydınoğlu, N.** (1995). Depreme Dayanıklı Bina Tasarım Yönetmeliklerinde Temel Yaklaşımlar, *Üçüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, (s.43-53) 27-31 Mart, İstanbul.
- Baker, J.W.** (2015). Efficient Analytical Fragility Function Fitting Using Dynamic Structural Analysis, *Earthquake Spectra*, 31(1).
- Bednarski, E. J.** (1935). Discussion of Paper No. 1906, Flexible First Story Construction for Earthquake Resistance, *Transactions ASCE*, 100, 657-660.
- Calabrese, A.** (2013). *Analytical, numerical and experimental study of a novel low-cost base isolation system*, (Ph.D Thesis) Submitted to University of Naples, “Federico II”, 227 Pages.
- Chang, S-P., Mikras N., Whittaker, A.S., Thompson, A.C.T.** (2002). Experimental and Analytical Studies on the Performance of Hybrid Isolation Systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31:421-443.
- Charmpis, D.C., Phocas, M. C., Komodromos, P.** (2015). Optimized Retrofit of Multi-storey Buildings Using Seismic Isolation at Various Elevations: Assessment for Several Earthquake Excitations, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13:2745-2768.
- Chen, W. & Scawthorn, C.** (2003). *Earthquake Engineering Handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press.
- Cheng, F.Y., Jiang, H., Lou, K.** (2008). *Smart Structures Innovative Systems for Seismic Response Control*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 8-0-8493-8532-2.

- Chopra, A. K.** (2012). *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson Printice Hall, Pearson Education Inc.,Upper Saddle River, NJ 07458.
- Chopra, A.K., Clough D.P.,Clough R.W.** (1973). Earthquake Resistance of Buildings With a Soft First Storey, *International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1:347-355.
- Comartin, C.D.** (2009). Supplemental Vertical Support as a Means for Seismic Retrofit of Buildings, *Seismic Risk Assessment and Retrofitting with Special Emphasis on Existing Low Rise Structures* Editors: Ilki, A., Karadogan, F., Pala, S., Yuksel, E., Chapter 16, pp. 329-342, Springer.
- Constantinou, M.C., Kalpakidis, I., Filiatrault, A.,Lay, E.R.A.** (2011). *Lrfd-Based Analysis and Design Procedures for Bridge Bearings and Seismic Isolators*, Technical Report MCEER, 2011.
- Constantinou, M.C., Mokha, A., Reinhorn, A.** (1990a). Teflon Bearings in Base Isolation. I: Testing, *Journal of Structural Engineering*, 116(1), 435-455.
- Constantinou, M.C., Mokha, A., Reinhorn A.** (1990b). Teflon Bearings in Base Isolation. II: Modelling, *Journal of Structural Engineering*, 116(2), 455-474.
- Çakıroğlu, A., Özden E., Özmen G.** (1970). *Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metotları ve Elektronik Hesap Makinası Programları*, Cilt I, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:813, Dizerkonca Matbaası, İstanbul.
- Çakıroğlu, A., Özden E., Özmen G.** (1974). *Yapı Sistemlerinin Hesabı İçin Matris Metotları ve Elektronik Hesap Makinası Programları*, Cilt II, İTÜ Kütüphanesi, Sayı:813, Dizerkonca Matbaası, İstanbul.
- Dezfuli, F. & H., Alam M.S.** (2014). Sensitivity Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators Based on Experimental Tests and Finite Element Simulations, *Bulletin of Earthquake Engineering* 12, 1025-1043.
- Diotallevi, P.P., Landi, L., Grazi, G.** (2014). Modelling of Friction Pendulum Isolators in Structures Subjected to Horizontal and Vertical Ground Motions, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Istanbul, Aug. 25-29, 2014.
- Dolce, M., Cardone, D., Palermo, G.** (2007). Seismic Isolation of Bridges Using Isolation Systems Based on Flat Sliding Bearings, *Bulletin of Earthquake Engineering* 5(4), 491-509.
- Doudoumis, I.N., Papadopoulos, P., Papaliangas, T.** (2002). A Low-cost Base Isolation System on Artificial Soil Layers with Low Shearing Resistance, *12 th European Conference on Earthquake Engineering*, Paper Reference 661, 2002.
- Erochko, J., Christopoulos, C., Tremblay, R.** (2014). Design and Testing of an Enhanced-Elongation Telescoping Self-Centering Energy-Dissipative Brace, *Journal of Structural Engineering*, 141(6): 04014163.
- Eurocode 8** (2004). *Design of Structures for Earthquake Resistance Part 1: General Rules, Seismic Actions, and Rules for Buildings*, CEN on 23 April 2004.

- FEMA450** (2003). *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations For New Buildings and Other Structures*, Building Seismic Safety Council, 2003 Edition.
- Fenz, D.M. & Constantinou, M.C.** (2006). Behavior of the Double Concave Friction Pendulum Bearing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 1403-1424.
- Fintel, M. & Khan, R.F.** (1969). Shock Absorbing Soft Story Concept for Multistory Earthquake Structures, *Journal of the American Concrete Institute*, 66-29, 318-390.
- Gazi, H.** (2015). *Sismik izolasyonlu binaların deprem etkileri altındaki olasılıksal davranışı*, (Doktora tezi). İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Green, N.B.** (1935). Flexible First Storey Construction for Earthquake Resistance, *Transactions ASCE*, 100, Paper No. 1906, 644-674.
- Huffmann, G.** (1985). Full Base Isolation for Earthquake Protection by Helical Springs and Viscodampers, *Nuclear Engineering and Design*, Volume 84, Issue 3, 331-338.
- İnan, M.** (1984). *Cisimlerin Mukavemeti*, 5.Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Jacobsen, L.S.** (1938). *Effects of a Flexible First Story in a Building Located on Vibrating Ground*, S. Timoshenko, 60th Anniversary Vol., Macmillan Co., New York.
- Karayel, V. & Yuksel, E.** (2013). A New Seismic Base Isolation System Using Spring Tube Bracings, *International Conference on Earthquake Engineering*, Paper No: 222, Skopje, Macedonia.
- Kelly, J.M.** (1986). Aseismic Base Isolation: Review and Bibliography. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5(3): 202-216.
- Kelly, J.M. & Beucke, K.E.** (1983). A Friction Damped Base Isolation System with Fail-Safe Characteristics, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11: 33-56.
- Komodromos, P.** (2000). *Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures*, Advances in Earthquake Engineering Series, WIT Press, Southampton, UK.
- Lu, L.Y., Lin, C.C., Lin G.L.** (2013). Experimental Evaluation of Supplemental Viscous Damping for a Sliding Isolation System under Pulse-Like Base Excitations, *Journal of Sound and Vibration* 332:1982-1999.
- Makris, N. & Chang, S.** (2000). Effect of Viscous, Viscoplastic and Friction Damping on the Response of Seismic Isolated Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 85-107.
- Makris, N. & Constantinou, M.C.** (1992). Spring-Viscous Damper Systems for Combined Seismic and Vibration Isolation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21: 649-664.
- Makris, N. & Deoskar, H.S.** (1996). Prediction of Observed Response of Base-Isolated Structure, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 122:485-493.

- Martel, R.R.** (1929). The Effects of Earthquake on Buildings with a Flexible First Storey, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 19(3), 167-178.
- Medeot, R.** (2012). Re-centering Capability of Seismic Isolation Systems: A controversial matter moving scarcely towards its settlement, *15th Word Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon.
- Naeim, F. & Kelly, J.M.** (1999). *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*, Wiley, New York, ISBN: 0-471-14921-7.
- Naeim, F. & Mayes, R.L.** (2001). *The Seismic Design Handbook-Design of Structures with Seismic Isolation*, Chapter-14:723-755, ISBN:978-1-4613-5681-3:Springer,US.
- Noor, F.A. & Boswell, L.F.** (1992). *Small Scale Modeling of Concrete Structures*, Elsevier Science Publisher Ltd.
- Ohari, M., Minami, T., Osawa, Y.** (1988). Earthquake Response Analyses of Base Isolation Systems with and without Fail-Safe Mechanism. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Vol 5, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Paulay, T. & Priestley, M. J. N.** (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonary Buildings*, Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- PEER NGA Database.** Pacific Earthquake Engineering Research Center: NGA database, (http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database/).
- Pekcan, G., Mander, J.B., Chen, S.S.** (1995). *Experimental Performance and Analytical Study of a Non-Ductile Reinforced Concrete Frame Structure Retrofitted with Elastomeric Spring Dampers*, Technical Report NCEER-95-0010, 1995.
- Providakis, C.P.** (2007). Effect of LRB Isolators and Supplemental Viscous Dampers on Seismic Isolated Buildings Under Near-Fault Excitations, *Engineering Structures*, 30: 1187-1198.
- SAP2000n**, *Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures*, CSI, Berkeley, California, USA.
- Shanmuga, P. D., Cinitha, A., Umesha, P. K., Nagesh, R. I.** (2014). Enhancing the Seismic Response of Buildings with Energy Dissipation Methods - An Overview, *Journal of Civil Engineering Research*, 4(2A), 17-22 doi:10.5923/c.jce.201401.04.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H.** (1993). *An introduction to seismic isolation*, UK: John Wiley & Sons.
- Sorace, S. & Terenzi G.** (2001). Non-Linear Dynamic Modelling and Design Procedure of FV Spring-Dampers for Base Isolation, *Engineering Structures*, 23:1556-1567.
- Sorace, S. & Terenzi G.** (2008). Analysis and Demonstrative Application of a Base Isolation/Supplemental Damping Technology, *Earthquake Spectra* 24:775-793.

- Soydan, C.** (2015). *Yeni bir enerji sönümleyici eleman ve prefabrik yapı sistemlerindeki moment aktarmayan birleşimlere uygulanması*, (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tan, R.Y. & Huang, M.C.** (2000). System Identification of a Bridge with Lead Rubber Bearings, *Computers and Structures*, 74, 267-280.
- TDY** (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara.
- 3DBASIS**, *Computer Program Series for Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Structures*, Department of Civil, Structural and Earthquake Engineering of University at Buffalo, USA.
- Todorovska, M.I.** (1999). Base Isolation by a Soft First Story with Inclined Columns, *Journal of Engineering Mechanics*, 124(4): 448-457.
- Tsai, C.S, Chiang, T.C, Chen B.J., Lin, S.B.** (2003). An Advanced Analytical Model for High Damping Rubber Bearings, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32:1373-1387.
- Tsopelas, P. & Constantinou, M.C.** (1994). *NCEER-Taisei Research Program on Sliding Seismic Isolation Systems for Bridges: Experimental and Analytical Study of a System Consisting of Sliding Bearings and Fluid Restoring Force/Damping Devices*, Technical Report NCEER-94-0014, 1994.
- Url-1** <<http://www.nptel.ac.in/courses/105101004/chapters/chapter8/chapter8.html>>, erişim tarihi 10.02.2016.
- Url-2** <<http://www.slideshare.net/aritrabanerjee1/seismic-retrofitting-techniques>>, erişim tarihi 26.03.2016.
- Url-3** <<http://www.resistoflex.in/Open-Spring-Damper-4.html>>, erişim tarihi 22.02.2016.
- Url-4** <http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/doc/WS_335/S8_EC8-Lisbon_Ph%20BISCH.pdf>, erişim tarihi 25.02.2016.
- Warn, P. & Ryan, K.L.** (2012). A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs, *Buildings*, 2, pp.300-325.
- Wilson, E.L. & Habibullah, A.** (1987). Static and Dynamic Analysis of Multi-Story Buildings Including P-Delta Effects. *Earthquake Spectra* 3: Vol.3.
- Yamada, K. & Kobari, T.** (2001). Fundamental Dynamics and Control Strategies for Aseismic Structural Control, *International Journal of Solids and Structures*, 38 (34-35), pp.6079.
- Zhou, Z., Xie, Q., Lei, X., He, X., Meng, S.** (2015). Experimental Investigation of the Hysteretic Performance of Dual-Tube Self-Centering Buckling-Restrained Braces with Composite Tendons, *Journal of Composites for Construction*, 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000565, 04015011.

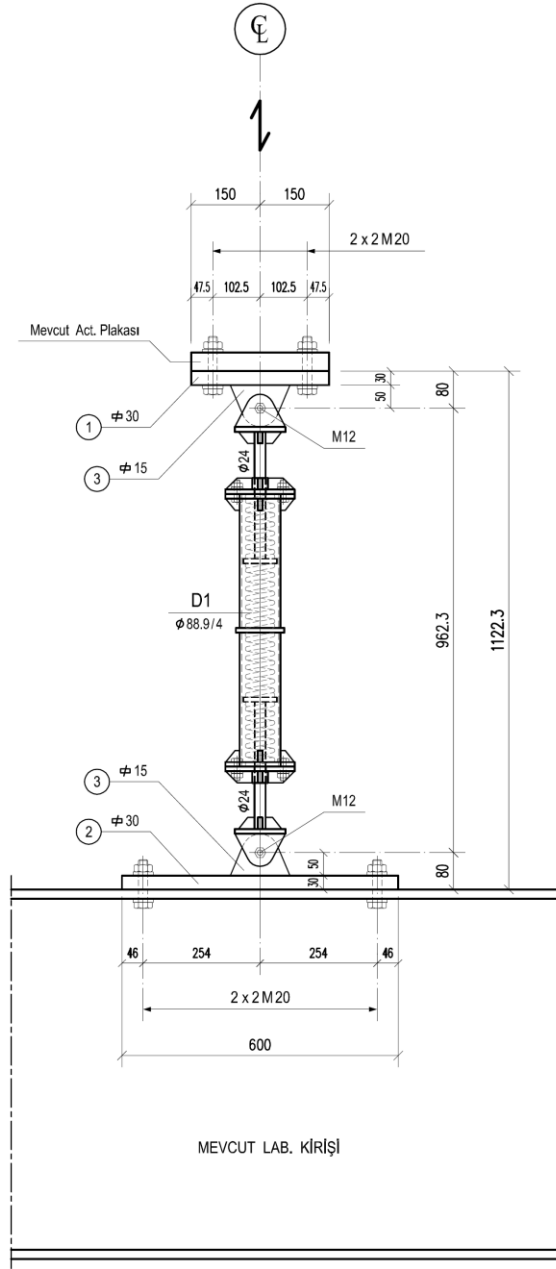


EKLER

EK A:

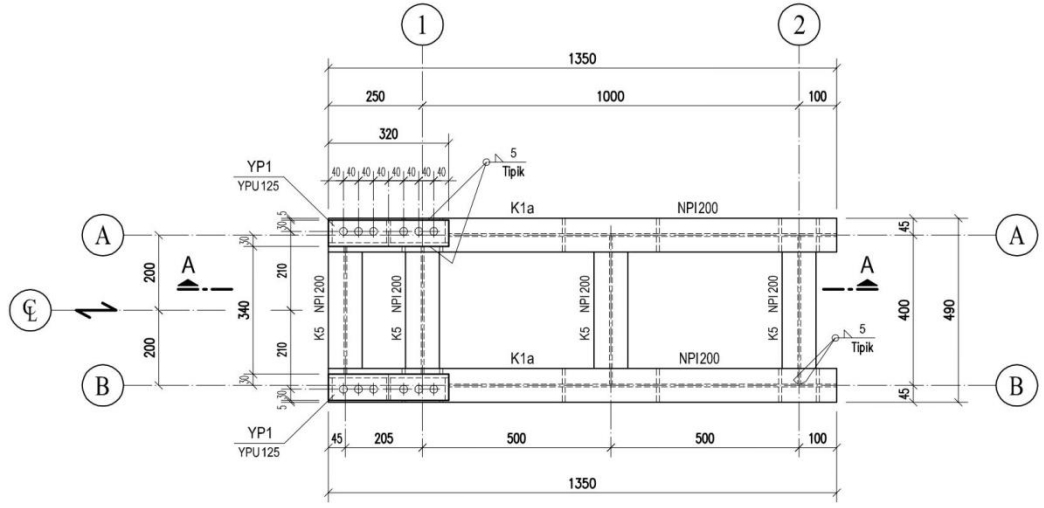
- Sismik yalıtım katı ve elemanlarına ait imalat resimleri.
- ISOTHA-1 Matlab yazılımı açık kodu.
- Sismik yalıtım katı ana elemanları kapasite kontrolleri.



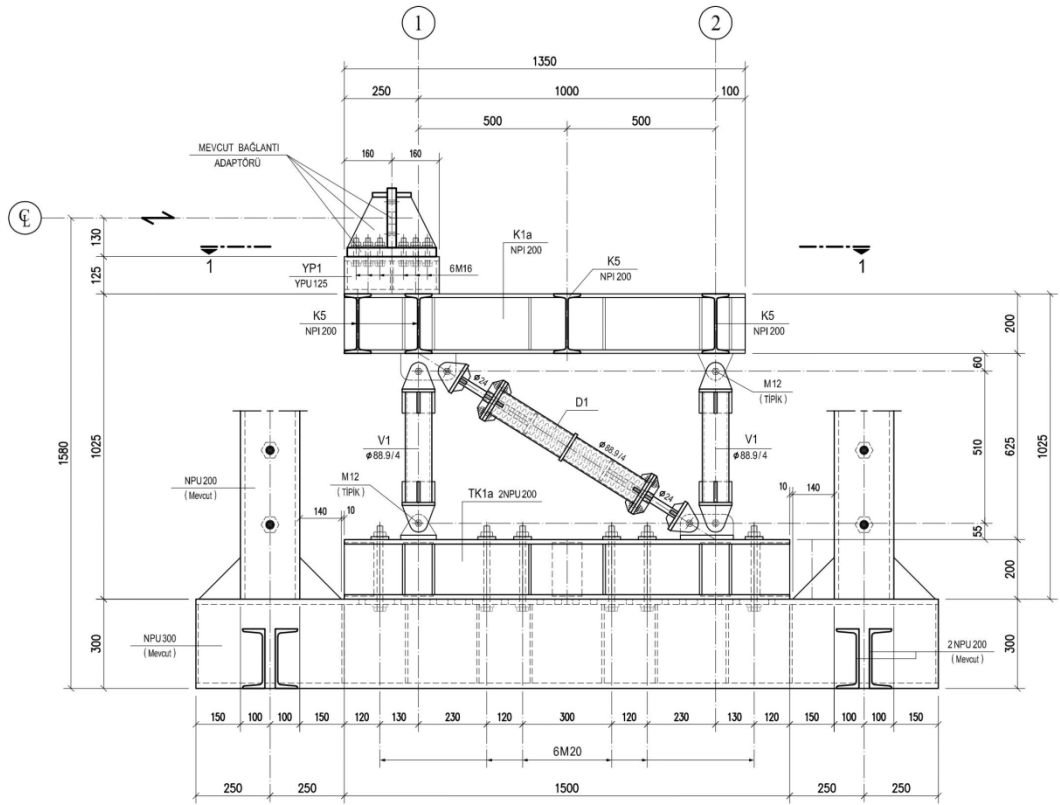


D1 ELEMANI BAĞIMSIZ DENEY DÜZENEGİ (1/4 ÖLÇEKLİ DENEY MODELİ DIYAGONALI)

Şekil A.1 : Yay kutusu deney düzeneğine ait imalat resmi.

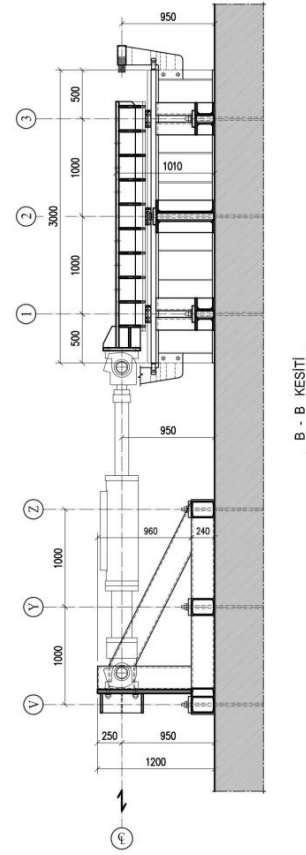
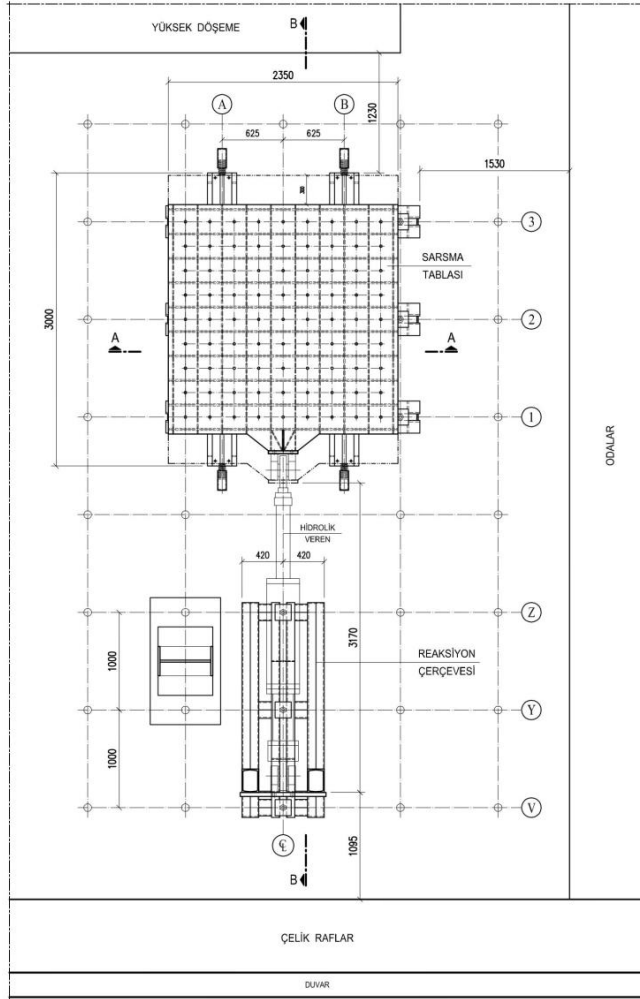
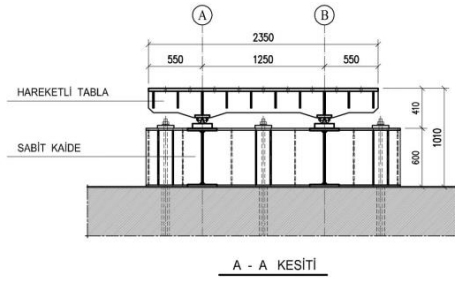


1-1 PLANI



A - A KESİTİ

Şekil A.2 : Bağımsız yalıtım katı statik deney düzeneğine ait imalat resmi.



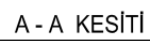
Şekil A.3 : Sarsma masası (ARI-I) yerleşim planı.


```

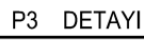
clear all
M=[0.498];
K=[6.1686];
C=[0.56];
U=[1];
za=[0.0025];
ku=[4156];
yf=[1.00];
da=load('ERZ-EW.txt');
da=da.*yf;
dv=[0.0];
dd=[0.0];
t=[za:za:ku*za];
tt=ku-1;
delt=za;
p=50;
ba=[];
bd=[];
bv=[];
ca=[];
cd=[];
cv=[];
% t=nxdelt=0xdelt t=0 anında
bd(1,1)=(-1)*dd(1);
bv(1,1)=(-1)*dv(1);
ba(1,1)=(-1)*da(1);
for n=1:tt
    for i=1:p
        ca(1)=ba(n,1);
        cv(i+1)=bv(n,1)+(delt/2)*ba(n,1)+(delt/2)*ca(i);
        cd(i+1)=bd(n,1)+delt*bv(n,1)+((delt^2)/3)*ba(n,1)+((delt^2)/6)*ca(i);
        ca(i+1)=U(1)*(-1)*da(n+1)-(M(1)^(-1))*K(1)*cd(i+1)-(M(1)^(-1))*C(1)*cv(i+1);
        if ca(i+1)-ca(i)>0.001
            continue
        end
    end
    bd(n+1,1)=cd(end);
    ba(n+1,1)=ca(end);
    bv(n+1,1)=cv(end);
end
subplot(3,2,[1 2]);
plot(t,da)
title('Yer Ivme-Zaman');
xlabel('Zaman (sn)');
ylabel('Yer Ivmesi (m/sn2)');
subplot(3,2,3);
plot(t,bd)
title('Yerdegistirme-Zaman');
subplot(3,2,4);
plot(t,bv)
title('Hiz-Zaman');
subplot(3,2,5);
plot(t,ba)
title('Ivme-Zaman');

```

Şekil A.6 : ISOTHA-1 Matlab yazılımı açık kodu.



1/5



(4 ADET)



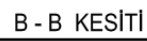
(8 ADET)



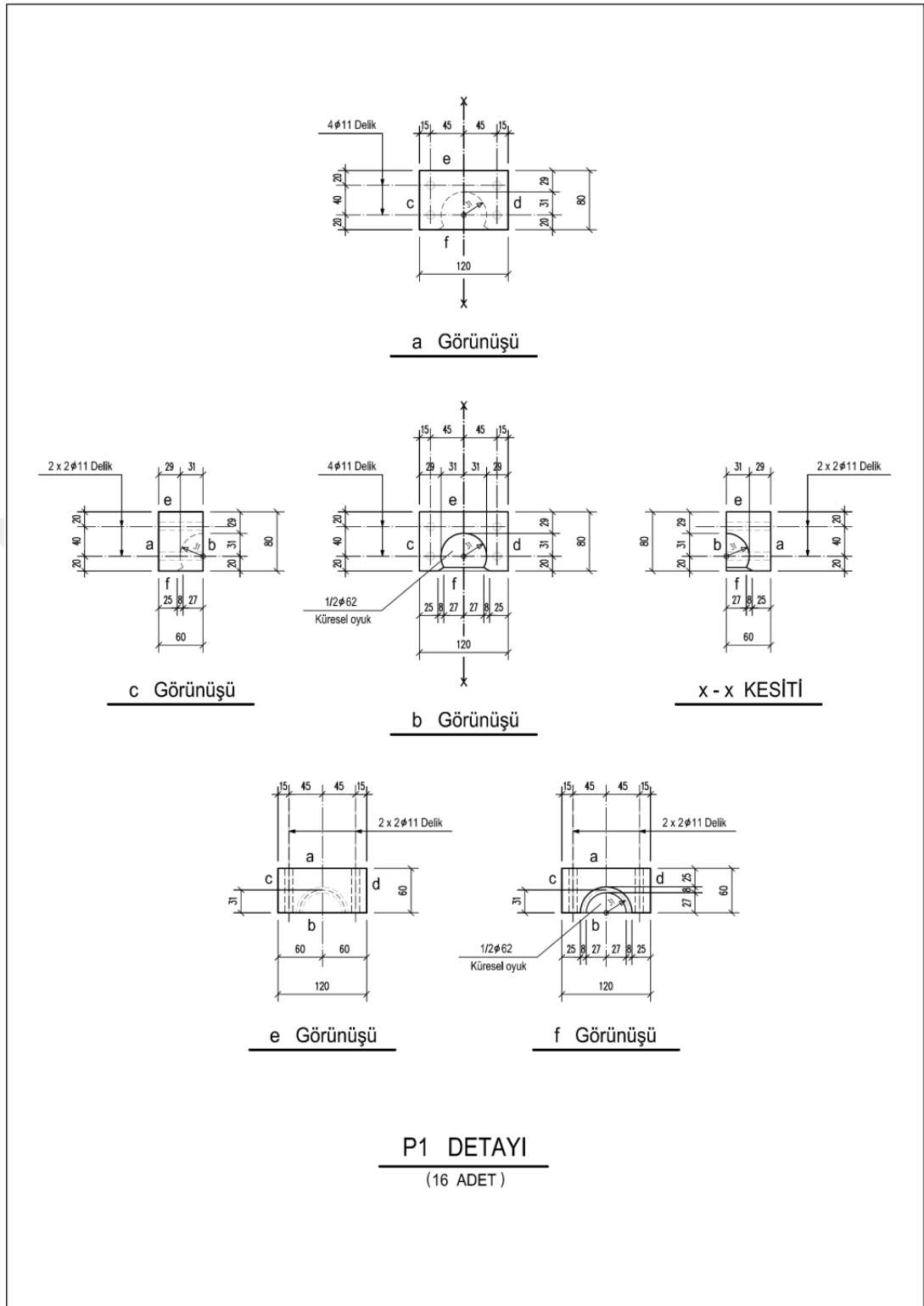
(4 ADET)



(8 ADET)



B - B KESİTİ



şekil A.8 : Prizmatik küresel mafsala yatağına ait imalat resmi.

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)

Units : KN, m, C

Frame : 323	X Mid: 9.500	Combo: UDSL3	Design Type: Column
Length: 3.000	Y Mid: 5.000	Shape: S-244.5/8	Frame Type: Special Moment Frame
Loc : 3.000	Z Mid: 1.500	Class: Seismic	Princpl Rot: 0.000 degrees

Provision: LRFD	Analysis: Direct Analysis	Reduction: Tau-b	Variable
D/C Limit=0.950	2nd Order: General	2nd Order	
AlphaPr/Py=0.382	AlphaPr/Pe=0.057	Tau_b=1.000	EA factor=0.800
Ignore Seismic Code? No		Ignore Special EQ	Load? No
			EI factor=0.800
			D/P Plug Welded? Yes

SDC: D	I=1.000	Rho=1.000	Sds=0.500
R=8.000	Omega0=3.000	Cd=5.500	
PhiB=0.900	PhiC=0.900	PhiTY=0.900	PhiTF=0.750
PhiS=0.900	PhiS-RI=1.000	PhiST=0.900	

A=0.006	I33=4.160E-05	r33=0.084	S33=3.403E-04	Av3=0.003
J=8.321E-05	I22=4.160E-05	r22=0.084	S22=3.403E-04	Av2=0.003
E=205939654.2	Fy=235000.000	Ry=1.100	z33=4.476E-04	
RLLF=1.000	Fu=360000.000		z22=4.476E-04	

HSS Welding: ERW Reduce HSS Thickness? Yes

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo UDSL3)

(ASCE 12.4.3.2(5): $(1.2+0.2 \cdot S_{ds}) \cdot D + 1.0 \cdot L - \Omega_0 \cdot Q_e$)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
3.000	-532.997	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1a)

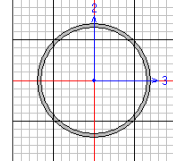
D/C Ratio: 0.553 = 0.553 + 0.000 + 0.000
 = $(P_r/P_c) + (8/9) (M_{r33}/M_{c33}) + (8/9) (M_{r22}/M_{c22})$

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1a)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Minor Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

LTB	Lltb	Kltb	Cb
	1.000	1.000	1.000

	Pu	phi*Pnc	phi*Pnt
	Force	Capacity	Capacity
Axial	-652.757	1181.295	1257.133



Şekil A.10 : Sismik yalıtım katı kolonları kapasite kontrolü.

AISC360-05/IBC2006 STEEL SECTION CHECK (Summary for Combo and Station)

Units : KN, m, C

Frame : 216 X Mid: 15.250 Combo: UDSL2 Design Type: Beam
 Length: 0.500 Y Mid: 5.000 Shape: IPE500 Frame Type: Special Moment Frame
 Loc : 0.000 Z Mid: 3.550 Class: Seismic Princpl Rot: 0.000 degrees

Provision: LRFD Analysis: Direct Analysis
 D/C Limit=0.950 2nd Order: General 2nd Order Reduction: Tau-b Variable
 AlphaPr/Py=0.000 AlphaPr/Pe=0.000 Tau_b=1.000 EI factor=0.800
 Ignore Seismic Code? No Ignore Special EQ Load? No D/P Plug Welded? Yes

SDC: D I=1.000 Rho=1.000 Sds=0.500
 R=8.000 Omega0=3.000 Cd=5.500
 PhiB=0.900 PhiC=0.900 PhiTY=0.900 PhiTF=0.750
 PhiS=0.900 PhiS-RI=1.000 PhiST=0.900
 A=0.012 I33=4.820E-04 r33=0.204 S33=0.002 Av3=0.005
 J=0.000 I22=2.142E-05 r22=0.043 S22=2.142E-04 Av2=0.005
 E=205939654.2 fy=235000.000 Ry=1.100 z33=0.002 Cw=1.254E-06
 RLLF=1.000 Fu=360000.000 z22=3.360E-04

STRESS CHECK FORCES & MOMENTS (Combo UDSL2)

Location	Pu	Mu33	Mu22	Vu2	Vu3	Tu
0.000	0.000	281.714	0.000	518.815	0.000	1.019E-04

PMM DEMAND/CAPACITY RATIO (H1-1b)

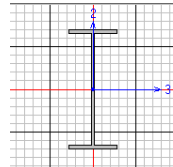
D/C Ratio: 0.607 = 0.000 + 0.607 + 0.000
 = (1/2) (Pr/Pc) + (Mr33/Mc33) + (Mr22/Mc22)

AXIAL FORCE & BIAXIAL MOMENT DESIGN (H1-1b)

Factor	L	K1	K2	B1	B2	Cm
Major Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.625
Minor Bending	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
LTB	Lltb	Kltb	Cb			
	1.000	1.000	1.600			
	Pu	phi*Pnc	phi*Pnt			
	Force	Capacity	Capacity			
Axial	0.000	2437.379	2453.400			
	Mu	phi*Mn	phi*Mn			
	Moment	Capacity	No LTB			
Major Moment	281.714	464.031	464.031			
Minor Moment	0.000	71.064				

SHEAR CHECK

	Vu	phi*Vn	Stress	Status
	Force	Capacity	Ratio	Check
Major Shear	518.815	719.100	0.721	OK
Minor Shear	0.000	812.160	0.000	OK



Şekil A.11 : Sismik yalıtım katı kompozit döşeme çelik kirişleri kapasite kontrolü.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Varol Karayel
Doğum Tarihi ve Yeri : 27/05/1962-İstanbul
E-posta : vkarayel@ifmuhendislik.com.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1983, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 1986, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM :

- Ulusal ve uluslararası yönetmelikler göz önünde tutularak, her türlü betonarme ve çelik yapının; yapısal tasarım projelerinin hazırlanması, başka gruplar tarafından hazırlanmış mevcut projelerin kontrol edilmesi ve müşavirlik hizmeti verilmesi konularında 30 yıla yakın bilgi birikimi ve deneyim.
- Yapı mühendisliği alanında çeşitli bilgisayar programlarının oluşturulmasının yanı sıra, uğraşı konusu projeye özel mevcut bilgisayar programlarına çeşitli alt programlar hazırlanması ile ilgili deneyim.
- Yapı sistemlerinin doğrusal ve doğrusal ötesi analizlerine esas olacak matematik modellerinin kurulması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi konularında önemli deneyim.
- Mevcut yapıların deprem güvenliğinin tayini ve güçlendirilme projelerinin hazırlanması hususlarında da 20 yılı aşkın bir deneyimi bulunmaktadır.

• Üyesi Olduğu Meslek Kuruluşları

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye-1983
Türk Milli Deprem Komitesi-2006
Türkiye Deprem Vakfı Deprem Mühendisliği Komitesi -2009
TMMOB Yetkin İnşaat Mühendisi-2007

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karayel, V.**, Yuksel, E., 2013. A New Seismic Base Isolation System Using Spring Tube Bracings, *International Conference on Earthquake Engineering*, Paper No: 222, Skopje, Macedonia.
- **Karayel, V.**, Yuksel, E., Gokce, T., Sahin, F. 2015. Spring Tube Braces for Seismic Isolation of Buildings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, October 2015. 'de kabul edildi.
- **Karayel, V.**, Yuksel, E., Gokce, T., Sahin, F. 2016. A Novel Low-cost Seismic Isolation System Made of Spring Tube Braces: Uni-axial Shake Table Tests and Validations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, değerlendirme aşamasında.

ARAŞTIRMA PROJELERİ

- Yüksel E. (Yürütücü), **Karayel V.**(Araştırmacı), 2013. Çapraz Yay Gruplarını Kullanan Yeni Bir Sismik Yalıtım Sisteminin Geliştirilmesi. Proje No: 36997. İ.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi.

DİĞER YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- **Karayel, V.** 1986. *Yapı Sistemlerinin Hesap Yöntemlerinin Karşılaştırılması Bölüm-I, Gelişigüzel Geometriye Sahip Betonarme Kesitlerin Taşıma Kapasitelerinin Hesabı İçin Bir Bilgisayar Programı, Bölüm-II*, (Yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Karadoğan F., Pala,S., **Karayel V.** 1991. Döşemelerinde Boşluk Olan Yapıların Depreme Karşı Davranışı, VII. *Ulusal Mekanik Kongresi*, Eylül 1991, Antalya.
- **Karayel, V.**, Karadoğan F. 1995. Deprem Sırasında Burulabilen Yapıların Hesabı (Basit Bilgisayar Programlarının Etkin Kullanımı-I), *İnşaat Mühendisliğinde Bilgisayar Kullanımı IV. Sempozyumu*, 14-16 Haziran 1995 , İstanbul.
- Karadoğan, F., **Karayel V.**, Anaç H. 1996. Betonarme Perde Kullanımının Uygulamaya Yönelik Önemi, *Erzincan ve Dinar Depremleri Işığında Türkiye'nin Deprem Sorunlarına Çözüm Arayışları TÜBİTAK Deprem Sempozyumu* 15-16 Şubat 1996, Ankara.
- Karadoğan F., Yüksel E., Balcı A., **Karayel V.** 1998. Çapraz Çiftlerin Düzlemine Dik Burkulmaları(Basit Bilgisayar Programlarının Etkin Kullanımı-II), III. *Ulusal Hesaplamalı Mekanik Konferansı*,16-18 Kasım 1998, İstanbul.
- **Karayel, V.** 2001. 17 Ağustos 1999 Depreminde Orta Hasar Gören Bir Fabrika Binasının Onarım ve Güçlendirilmesi, *Yapıların Deprem Güvenliği Değerlendirilmesi ve Takviyesi-Uluslararası Atölye Çalışması*, 8-9 Ocak 2001, Atina, 11-12 Ocak 2001, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

- **Karayel, V.** 2007. Yapısal Tasarımda Paket Bilgisayar Programı Kullanımının Ülkemizdeki Tasarım Mühendislerinin Gelişimi Üzerindeki Etkileri, *İMO Dergisi, İnceleme-Görüş*, Temmuz-Ağustos 2007, Sayı:91, İstanbul.
- **Karayel, V., Taştan, D.** 2008. Depremde Bina Performansının 2007 Deprem Yönetmeliği Çerçevesindeki Doğrusal Elastik Hesap Yöntemleri ile Belirlenmesine Alternatif Bir Yaklaşım, *İMO Dergisi*, Kasım-Aralık 2008, Sayı:99, İstanbul.



