

**YÜKSEK GERİLİM PORSELEN İZOLATÖRLERİNİN
DEPREM GÜVENLİĞİNİN ARTIRILMASI İÇİN
BİR SİSMİK YALITIM CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tansu GÖKÇE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

OCAK 2019

**YÜKSEK GERİLİM PORSELEN İZOLATÖRLERİNİN
DEPREM GÜVENLİĞİNİN ARTIRILMASI İÇİN
BİR SİSMİK YALITIM CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Tansu GÖKÇE
(501072022)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN
Eş Danışman: Prof. Dr. Ercan YÜKSEL**

OCAK 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501072022 numaralı Doktora Öğrencisi Tansu GÖKÇE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK GERİLİM PORSELEN İZOLATÖRLERİNİN DEPREM GÜVENLİĞİNİN ARTIRILMASI İÇİN BİR SİSMİK YALITIM CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof.Dr. Ercan YÜKSEL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

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

Prof. Dr. Yasin FAHJAN
Gebze Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Burak BARUTÇU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa

Teslim Tarihi : 20 Aralık 2018
Savunma Tarihi : 22 Ocak 2019





Eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında beni destekleyip motivasyonumu artıran çok değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tez danışmanlarım Prof. Dr. Engin Orakdöğen ve Prof. Dr. Ercan Yüksel'e gösterdiği ilgi ve destek için teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince yaptıkları değerli öneri ve eleştiriler ile çalışmanın ilerlemesine katkıda bulunan Prof. Dr. Zekai Celep, Prof. Dr. Yasin Fahjan ve Dr. Öğr. Üyesi Burak Barutçu'ya şükranlarımı sunarım.

Porselen elektrik izolatörleri için bir sismik yalıtım cihazı geliştirilen bu tez çalışması, 39552 numaralı İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü BAP projesinin sağladığı imkanlar ile İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Doktora eğitimi süresi boyunca TÜBİTAK BİDEB tarafından 2211 Lisans Üstü Burs Programı tarafından destek sağlanmış olup, bu kuruluşlara vermiş oldukları destekten ötürü teşekkür ederim.

Laboratuvar deneylerinin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarından başta İnş. Yük. Müh. Hakan Saruhan olmak üzere tüm teknik personele vermiş oldukları katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Tez kapsamında geliştirilen sismik yalıtım cihazının imalatları sırasında sağladığı katkı nedeniyle Dr. İnş. Müh. Cihan Soydan'a teşekkür ederim. Tez çalışması boyunca sağladığı destek ve dostluklarından ötürü Bilg. Müh. Önder Ali Türkel ve İnş. Yük. Müh. Barış Şahin'e teşekkür ederim.

Son olarak, tez çalışmam boyunca verdiği sınırsız destek ve anlayış için değerli eşim Elif Selin Gökçe'ye ve aileme teşekkür ederim.

Ocak 2019

Tansu Gökçe



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç	2
1.2 Önceki Çalışmalar	2
1.3 Sismik Yalıtım Cihazı Önerisi	7
1.4 Özgün Değer ve Motivasyon.....	7
1.5 Tezin Genel Yapısı.....	8
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	9
2.1 Geliştirilen Sismik Yalıtım Cihazının Özellikleri	9
2.2 Yay Deneyleri	10
2.3 Çevrimsel Statik İtme Deneyleri	13
2.3.1 Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı	14
2.3.2 Poliüretan yaylar ile oluşturulan yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı....	16
2.3.3 Poliüretan yay ile oluşturulan düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı.....	17
2.3.4 Porselen elektrik izolatörlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan statik itme deneyleri.....	18
2.3.4.1 Moment etkisinin görel olarak büyük olduğu statik itme deneyleri .	19
2.3.4.2 Moment etkisinin görel olarak küçük olduğu statik itme deneyleri .	23
2.4 Sarsma Masası Deneyleri	26
2.4.1 Sarsma masası ve özellikleri.....	27
2.4.2 Veri toplama sistemi ve yazılımı.....	28
2.4.3 Deprem kayıtlarının işlenmesi için yazılım geliştirme ve seçilen kayıtlar	31
2.4.3.1 Deprem kayıtlarının işlenmesi için <i>IS-ISL</i> yazılımının geliştirilmesi	31
2.4.3.2 Deprem kayıtlarının seçilmesi	32
2.4.4 Sismik yalıtım cihazı için sarma masası prototip deneyleri	38
2.4.5 Sismik yalıtım cihazı için sarsma masası deneyleri	42
2.4.5.1 Sarsma masası deney ve ölçüm düzeneği	44
2.4.5.2 Ankastre mesnetlenmiş deney numunesi	47
2.4.5.3 Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı	60
2.5 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması	86
2.5.1 Serbest titreşim özellikleri.....	86
2.5.2 Enerji denklemleri ile sönüm oranının belirlenmesi.....	87
2.5.3 Tepe ivmesi	91
2.5.4 Tepe yerdeğiştirmesi	93
2.5.5 Taban momenti ve kesme kuvveti.....	94
2.5.6 Sismik yalıtım cihazında gerçekleşen dönme ve kayma hareketleri	98

2.5.7 Taban momenti-tepe yerdeğiştrimesi ilişkileri ve sınır değerler ile karşılaştırmalar	99
2.5.8 Genel sonuç	100
3. SAYISAL ÇALIşMALAR	101
3.1 Giriş	101
3.1.1 Ankastre mesnetlenmiş porselen izolatörün üç boyutlu sonlu eleman modeli	101
3.1.2 Ankastre ve sismik yalıtım cihazı üzerine mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörleri için hazırlanan çubuk modelleri	103
3.2 Deneyssel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması ve İrdelemeler	106
3.2.1 Statik deneyler	106
3.2.1.1 Ankastre mesnetlenme durumu.....	106
3.2.1.2 Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1).....	107
3.2.1.3 Düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-2).....	108
3.2.2 Dinamik deneyler.....	109
3.2.2.1 Ankastre mesnetlenme durumu.....	109
3.2.2.2 Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1).....	109
3.2.2.3 Düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-2)	113
3.3 Kırılma Olasılık Eğrilerinin Oluşturulması	115
3.3.1 Hesap yöntemi	115
3.3.2 Performans olasılık eğrileri.....	116
3.4 Genel Sonuç.....	118
4. SONUÇLAR	119
4.1 Sonuçlar	119
4.2 Öneriler.....	120
KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİş	125

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yay rijitlikleri	13
Çizelge 2.2 : Numune-1 statik deney düzeneği ölçüm aletleri	20
Çizelge 2.3 : Numune-2 statik deney düzeneği ölçüm aletleri	24
Çizelge 2.4 : İTÜ ARI-1 sarsma tablası özellikleri	27
Çizelge 2.5 : FEMA P-695 veri seti.....	33
Çizelge 2.6 : FEMA P-695 ivme kayıt seti deprem özellikleri ve ölç. kats.	35
Çizelge 2.7 : Deneyisel ve sayısal çalışmalarda kullanılan deprem ivme kayıtları ve özellikleri.....	36
Çizelge 2.8 : Sarsma masası deneylerinde kullanılan ölçüm aletleri.....	46
Çizelge 2.9 : Ankastre mesnetli porselen elektrik izolatörü için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları	53
Çizelge 2.10 : Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları	65
Çizelge 2.11 : Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları	78
Çizelge 2.12 : Etkin titreşim periyotları	86
Çizelge 2.13 : Enerji grafiklerinden elde edilen sönüm oranları	90
Çizelge 2.14 : En büyük tepe ivmeleri.....	91
Çizelge 2.15 : En büyük tepe yerdeğiştirmeleri.....	93
Çizelge 2.16 : Porselen izolatör en büyük taban kesme kuvveti	95
Çizelge 2.17 : Porselen izolatör en büyük taban momenti	97
Çizelge 2.18 : Sismik yalıtım cihazı en büyük dönme değerleri	98



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sismik yalıtım cihazları.....	10
Şekil 2.2 : Çelik yay ve eksenel basınç deney düzeneği.....	11
Şekil 2.3 : Çelik yayların eksenel kuvvet - yerdeğiştirme ilişkisi	11
Şekil 2.4 : Poliüretan yay eksenel basınç deney düzeneği.....	12
Şekil 2.5 : Poliüretan yayların yük-boy kısalması grafiği	12
Şekil 2.6 : Çevrimsel yerdeğiştirme protokolü	13
Şekil 2.7 : Çelik yaylı sismik yalıtım cihazı	14
Şekil 2.8 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazında alt ve üst plakalar arasında görelî yatay kayma hareketi	14
Şekil 2.9 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı tipik şekildeğ. biçimi .	15
Şekil 2.10 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı moment dön. ilişkisi	15
Şekil 2.11 : Sismik yalıtım cihazı ön eksenel yükleme düzeneği.....	16
Şekil 2.12 : Çevrimsel yükleme deney düzeneği.....	16
Şekil 2.13 : Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı moment - dönme grafiği	17
Şekil 2.14 : Enerji tüketme kapasitelerinin karşılaştırılması	17
Şekil 2.15 : Düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı moment - dönme grafiği.....	18
Şekil 2.16 : Enerji tüketme kapasitelerinin karşılaştırılması	18
Şekil 2.17 : Tepe yerdeğiştirme protokolü	19
Şekil 2.18 : Numune-1 deney düzeneği.....	19
Şekil 2.19 : Numune-1 kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	20
Şekil 2.20 : Numune-1 göçme durumu.....	21
Şekil 2.21 : Taban kesitinde oluşan birim şekildeğiştirme grafiği	21
Şekil 2.22 : 1 no'lu numune kesit değışimi	22
Şekil 2.23 : 1 no'lu numune en büyük yük durumuna karşı gelen yerdeğiştirme	23
Şekil 2.24 : Numune-2 deney düzeneği.....	24
Şekil 2.25 : Numune-2 kuvvet-yerdeğiştirme grafiği	25
Şekil 2.26 : Numune-2 göçme durumuna ait anlık fotoğraflar.....	25
Şekil 2.27 : Taban kesitinde oluşan birim şekildeğiştirme grafiği (hareket doğ.).....	26
Şekil 2.28 : ARI-1 sarsma masası ve tipik deney numunesi.....	27
Şekil 2.29 : ARI-1 PP yazılımının ekran görüntüsü	29
Şekil 2.30 : ARI-1 PP tipik Excell grafiği	30
Şekil 2.31 : IS-ISL yazılımına ait ivme, hız ve yer değışirme dönüşümleri	31
Şekil 2.32 : IEEE-693'de verilen yüksek performans seviyesi için spektral ivme....	32
Şekil 2.33 : IEEE-693 hedef spektrumu ve 22x2 deprem kaydına ait ortalama spektrum eğrileri	34
Şekil 2.34 : IEEE-693 hedef spektrumu ve seçilen 10 deprem kaydına ait ortalama spektrum eğrisi	36
Şekil 2.35 : Seçilen 10 kayıt için ölçeklendirilmiş ivme - zaman grafikleri.....	37
Şekil 2.36 : Seçilen 10 deprem ivme spektrumu, ortalama spektrum ve hedef spek.	38
Şekil 2.37 : Ankastre mesnetlenmiş ve sismik yalıtım cihazına bağlanmış çelik kol	38
Şekil 2.38 : Düzce Depremi (BOL000) ivme, hız ve yer değışirme grafikleri.....	39

Şekil 2.39 : Düzce Depremi Bolu istasyon kaydı ivme spektrumu, ankastre ve sismik yalıtımlı sistem periyodları.....	40
Şekil 2.40 : BOL000 deprem ivme kaydı için tepe ivme ve yerdeğiştirme karş.	40
Şekil 2.41 : Serbest titreşim özelliklerini belirlemeye yönelik deney düzeneği	41
Şekil 2.42 : Ankastre mesnetlenme durumu için deney sonuçları	41
Şekil 2.43 : Sismik yalıtım cihazı kullanılan sistemin serbest titreşimi	42
Şekil 2.44 : 550 kV porselen elektrik izolatörü	43
Şekil 2.45 : Çelik kafes sistem.....	43
Şekil 2.46 : Sarsma masası deney ve ölçüm düzeneği.....	44
Şekil 2.47 : Sarsma masası deneylerinde kullanılan yerdeğiştirme ölçerler.....	45
Şekil 2.48 : Numune üzerindeki sensör konumları.....	45
Şekil 2.49 : Ankastre mesnetlenmiş deney düzeneği.....	47
Şekil 2.50 : Çek-bırak deney düzeneği	48
Şekil 2.51 : Sönümlü bir sistemin harekete cevabının zamanla değişimi.....	49
Şekil 2.52 : Çekiç deneyi tepe ivme geçmişi	49
Şekil 2.53 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıt parçaları	50
Şekil 2.54 : İvme kayıt parçasına ait Fourier dönüşümü	50
Şekil 2.55 : Çekiç deneyi normalleştirilmiş sistem cevabı	50
Şekil 2.56 : Çekiç deneyi FFT grafiği yarım-güç band genişliği metodu.....	51
Şekil 2.57 : Çek-Bırak deneyi tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği.....	52
Şekil 2.58 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı	52
Şekil 2.59 : Çek-Bırak testi yarım-güç band genişliği yöntemi.....	53
Şekil 2.60 : Numune tepe ivme kayıtları	56
Şekil 2.61 : Numune tepe görelî yerdeğiştirme kayıtları	57
Şekil 2.62 : Yükseklik boyunca varsayılan kütle ve ivme dağılımı	55
Şekil 2.63 : Numune taban kesme kuvvet geçmişi	58
Şekil 2.64 : Numune taban momenti geçmişi	59
Şekil 2.65 : GEO-1 sarsma masası deney düzeneği.....	60
Şekil 2.66 : Çekiç deneyi tepe ivme geçmişi	60
Şekil 2.67 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıtları	61
Şekil 2.68 : İvme kaydı parçasına ait Fourier dönüşüm grafiği.....	61
Şekil 2.69 : Çekiç testi normalleştirilmiş sistem cevabı	61
Şekil 2.70 : Çekiç deneyi yarım güç band genişliği yöntemi	62
Şekil 2.71 : Çek-bırak deneyi – tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği	63
Şekil 2.72 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı	63
Şekil 2.73 : Çek-Bırak testi yarım-güç band genişliği yöntemi.....	64
Şekil 2.74 : Numune tepe ivme kayıtları	66
Şekil 2.75 : Numune tepe yerdeğiştirme kayıtları	67
Şekil 2.76 : Numune taban kesme kuvvet geçmişi	68
Şekil 2.77 : Numune taban momenti geçmişi	69
Şekil 2.78 : Sismik yalıtım cihazı dönme geçmişi.....	70
Şekil 2.79 : Sismik yalıtım cihazı rölatif yatay hareketi.....	71
Şekil 2.80 : GEO-1 yalıtım cihazı çelik gergi birim şekildeğiştirme geçmişleri	72
Şekil 2.81 : GEO-2 sarsma masası deney düzeneği.....	73
Şekil 2.82 : Çekiç deneyi tepe ivme kaydı.....	73
Şekil 2.83 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıtları	74
Şekil 2.84 : İvme kaydı parçasına ait Fourier dönüşüm grafiği.....	74
Şekil 2.85 : Çekiç deneyi normalleştirilmiş sistem cevabı	74
Şekil 2.86 : Çekiç deneyi yarım güç band genişliği yöntemi	75
Şekil 2.87 : Çek-bırak deneyi – tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği	76

Şekil 2.88 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı	76
Şekil 2.89 : Çek-Bırak testi yarım-güç band genişliği yöntemi.....	77
Şekil 2.90 : Numune tepe ivme kayıtları	79
Şekil 2.91 : Numune tepe yerdeğiştirme kayıtları	80
Şekil 2.92 : Numune taban kesitinde gerçekleşen kesme kuvvet geçmişi.....	81
Şekil 2.93 : Numune taban kesitinde gerçekleşen eğilme momenti geçmişi.....	82
Şekil 2.94 : Sismik yalıtım cihazı dönme geçmişi.....	83
Şekil 2.95 : Sismik yalıtım cihazı göreceli yatay hareketi	84
Şekil 2.96 : GEO-2 yalıtım cihazı çelik gergi birim şekildeğiştirme geçmişleri.....	85
Şekil 2.97 : IEEE-693 hedef spektrumu ve seçilen deprem kayıtlarının spektrumlarının ortalaması.....	86
Şekil 2.98 : ATMZ-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri	88
Şekil 2.99 : LOS-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri	88
Şekil 2.100 : LOS-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri	89
Şekil 2.101 : CAP-090 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.....	89
Şekil 2.102 : GO-3000 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.....	90
Şekil 2.103 : Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe ivmeleri	91
Şekil 2.104 : Seçilen deprem kayıtları için üretilen elastik ivme spektrumları ve kritik frekanslar	92
Şekil 2.105 : Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe yerdeğiştirme değerleri.....	94
Şekil 2.106 : GO-3000 depremi taban kesme kuvveti karşılaştırması.....	94
Şekil 2.107 : DZC-270 depremi taban kesme kuvveti karşılaştırması	95
Şekil 2.108 : GO-3000 depremi taban moment karşılaştırması.....	96
Şekil 2.109 : BOL090 depremi taban moment karşılaştırması.....	96
Şekil 2.110 : Taban kesme kuvvetleri karşılaştırması	97
Şekil 2.111 : Taban momentleri karşılaştırması	98
Şekil 2.112 : GEO-1 ve GEO-2 cihazları için dönme karşılaştırması	99
Şekil 2.113 : En büyük moment – tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri eğilim çizgileri ve sınır durumlar	100
Şekil 3.1: Numune - 2 sonlu eleman modeli.....	102
Şekil 3.2: Numune 2 için hazırlanan sonlu eleman hesap modeline ait sonuçlar....	103
Şekil 3.3: Ramber-Osgood davranış modeli	104
Şekil 3.4: Sismik yalıtım cihazı kullanılan sistemlerin sonlu eleman modeli	105
Şekil 3.5: Ankastre mesnetlenmiş numune için (Numune-2) deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	106
Şekil 3.6: Deney numunesi ve sayısal hesap modeli	107
Şekil 3.7: Şekil 11. GEO-1 numunesi analitik ve deneysel moment - dönme eğrileri	108
Şekil 3.8: GEO-2 numunesi analitik ve deneysel moment - dönme eğrileri	108
Şekil 3.9: Ankastre mesnetlenme durumu için sayısal ve deneysel tepe ivmelerinin karşılaştırılması	110
Şekil 3.10: GEO-1 durumu için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması ...	111
Şekil 3.11: GEO-1 sayısal ve deneysel tepe ivme spektrumları	112
Şekil 3.12: GEO-2 durumu sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	113
Şekil 3.13: GEO-2 sayısal ve deneysel tepe ivme spektrumları	114
Şekil 3.14: $M_1=7.375$ kNm taban momenti durumu için aşılma olasılık eğrileri ...	117
Şekil 3.15: $M_2=14.75$ kNm taban momenti durumu için aşılma olasılık eğrileri....	117
Şekil 3.16: PSID kapasitelerinin aşılma olasılık eğrisi.....	118



YÜKSEK GERİLİM PORSELEN İZOLATÖRLERİNİN DEPREM GÜVENLİĞİNİN ARTIRILMASI İÇİN BİR SİSMİK YALITIM CİHAZI GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Doktora tez çalışması kapsamında, yüksek gerilim porselen izolatörlerinin deprem güvenliğinin artırılmasına yönelik olarak yeni bir sismik yalıtım cihazı geliştirilmiştir. Çalışma deneysel ve sayısal bölümlerden oluşmaktadır. Çalışmanın deneysel bölümü İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (YDMLab) gerçekleştirilmiştir.

Elektrik iletim hatları ve trafo merkezlerinde kullanılan porselen izolatörler, gevrek davranış sergilediklerinden, depremler sırasında hasar alabilmektedirler. Onarımı mümkün olmayan bu ekipmanların deprem sonrasında değiştirilmesi ve elektrik sisteminin tekrar devreye alınmasında önemli ölçüde gecikmeler yaşanabilmekte, bu da can ve mal kayıplarının artmasına neden olabilmektedir.

Mevcut uygulamalarda, bir porselen elektrik izolatörü işletme koşullarına göre farklı yükseklikteki çelik taşıyıcı sistemler üzerine mesnetlenmektedir. Geliştirilen sismik yalıtım cihazı, porselen elektrik izolatörü ile taşıyıcı çelik sistem arasına yerleştirildiğinde, çelik sistemin özelliklerinden kaynaklanabilecek belirsizlik de ortadan kaldırılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, elektrik iletim hatlarında kullanılan yüksek gerilim porselen izolatörlerinin deprem davranışlarının iyileştirilmesi için etkin ve ekonomik bir sismik yalıtım cihazı geliştirilmiştir. Sismik yalıtım cihazı, porselen elektrik izolatörünün hem salınım periyodunu uzatmakta hem de ilave sönüm sağlamaktadır. Böylece deprem sırasında porselen elektrik izolatörü üzerinde oluşacak iç kuvvetler önemli ölçüde küçültülebilmektedir. Cihaz; dairesel alt ve üst çelik plaklar, merkezden belirli bir mesafede eşit aralıklarla yerleştirilmiş dört adet poliüretan yay ve merkezdeki gergi çubuğundan oluşmaktadır.

Tez çalışması kapsamında 550 kV porselen elektrik izolatörleri için GEO-1 ve GEO-2 olarak adlandırılan iki farklı geometriye (rijitliğe) sahip sismik yalıtım cihazı geliştirilmiştir. Cihazların etkinliğinin irdelenmesi için, bir dizi deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyler, statik ve dinamik karakterli yükler kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar oluşturulan hesap modelleri kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Birinci aşamada, porselen elektrik izolatörü ve iki farklı geometriye sahip sismik yalıtım cihazlarının statik itme deneyleri yapılmıştır. Porselen elektrik izolatörünün yatay yükler etkisindeki davranışı ile kırılma biçiminin belirlenmesi amacıyla FEMA 461 (2007)'de tanımlanan yerdeğiştirme protokolü kullanılarak farklı yüksekliklere sahip iki numune denenmiştir. Bu deneylerde, porselen elektrik izolatörünün gevrek modda ve en büyük eğilme momentinin olduğu kesitten farklı kesitlerden de kırılabildiği gösterilmiştir. Yüksek rijitlikli (GEO-1) ve düşük rijitlikli (GEO-2) sismik

yalıtım cihazlarının yatay yükler etkisindeki davranışlarının belirlenmesi aşamasında; cihazlar üzerine porselen izolatörü temsil edebilecek bir çelik kolon bağlanmıştır. Bu deneylerde, geliştirilen sismik yalıtım cihazlarına ait moment-dönme çevrimsel ilişkileri elde edilmiştir. Bu ilişkilerden hareketle hesap modellerinde kullanılan Ramberg Osgood çevrimsel davranış modelinin değişkenleri belirlenmiştir.

İkinci aşamada, 1/1 ölçekli ve çelik kafes sisteme bağlı porselen elektrik izolatörlerinin gerçek ivme kayıtları etkisindeki dinamik deneyleri, üç farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Birinci grup deneylerde elektrik izolatörü çelik kafes sisteme rijit olarak bağlı iken, ikinci ve üçüncü grup deneylerde bu iki eleman arasına sırasıyla GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım cihazları yerleştirilmiştir. Bu deneylerde elde edilen sonuçlar şunlardır; *i.* Sismik yalıtımlı sistemlerde, porselen izolatörün tepe ivmesi önemli oranda küçülmektedir. *ii.* Sismik yalıtım cihazı kullanılan sistemlerde porselen izolatör taban kesitinde oluşan iç kuvvetler önemli ölçüde azalmaktadır. *iii.* Sismik yalıtım cihazı kullanılan durumlarda, elektrik izolatörü ve sismik yalıtım cihazları üzerinde kalıcı şekilde değişime ve yerdeğiştirme oluşmamıştır. *iv.* Etkitilen ivme kayıtları sonunda sismik yalıtım cihazları ilk konumlarına geri dönmüş ve herhangi bir artık yerdeğiştirme oluşmamıştır. *v.* Geliştirilen sismik yalıtım cihazı sayesinde sistemin titreşim periyodu öngörülen değere ötelenabilmektedir. *vi.* Gerçekleşen sönüm oranları; rijit mesnetlenme durumunda %2 iken, sismik yalıtım cihazı kullanılan durumlarda %3 ~ %8 aralığında olmuştur.

Rijit mesnetlenme durumu ile GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım durumları için hesap modelleri oluşturulmuştur. Geometri bakımından doğrusal olmayan davranışın dikkate alındığı hesaplarda on farklı deprem ivme kaydı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Genel sönüm oranı olarak; rijit mesnetlenme durumunda %2, sismik yalıtım cihazı kullanılan durumlarda ise %0.5 değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sayısal hesap sonuçları deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. İvme, yerdeğiştirme ve porselen izolatör taban kesitinde gerçekleşen iç kuvvet geçmişlerinin uygulanan tüm deprem ivme kayıtları için uyumlu olduğu görülmüştür.

Rijit mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörünün üç boyutlu (hacimsel) sonlu eleman modeli oluşturularak, farklı kesitlerindeki gerilme yığılmaları sayısal olarak elde edilmiştir. Porselen izolatör taban kesitinde elde edilen sayısal sonuçların ilgili deneyde elde edilenler ile oldukça yakın oldukları görülmüştür.

Çalışmanın son aşamasında, rijit ve iki farklı sismik yalıtım cihazı kullanılarak mesnetlenmiş 550kV yüksek gerilim porselen izolatörüne ait *aşılma (kırılma) olasılık eğrileri* oluşturulmuştur. Aşılma olasılık eğrileri, taban momenti ve tepe yerdeğiştirmesi olmak üzere iki farklı büyüklük için hazırlanmıştır. Taban momenti aşılma olasılık eğrileri, IEEE-693(1984) ve IEEE-693 (2005) yönetmeliklerinde verilen sınır değerler için oluşturulmuştur. Tepe yerdeğiştirmesi aşılma olasılık eğrisinde ise geliştirilen sismik yalıtım cihazlarının dönme kapasitesine karşı gelen sınır değerler dikkate alınmıştır. Sismik yalıtım cihazı kullanıldığı GEO-1 ve GEO-2 durumlarında, tasarım depremi düzeyinde (PGA=0.5g) sınır yerdeğiştirme büyüklüklerinin aşılma olasılığı %0, PGA=1g düzeyi için ise sırasıyla %30 ve %10 olarak elde edilmiştir.

Geliştirilen sismik yalıtım sisteminin IEEE-693 (2005)'de sismik taban izolatörleri için tanımlanan koşulları sağladığı ve elektrik izolatörü üzerindeki iç kuvvetleri rijit mesnetlenme durumuna göre önemli ölçüde küçültebildiği gösterilmiştir.

DEVELOPMENT OF A SEISMIC ISOLATION DEVICE FOR HIGH VOLTAGE PORCELAIN ISOLATORS TO ENHANCE THEIR SEISMIC SAFETY

SUMMARY

In this study, a new seismic isolation device is developed for high-voltage porcelain insulators to enhance their seismic safety. The study consists of the experimental and the numerical parts. The experimental studies that consist of static and dynamic tests were conducted in the Structural and Earthquake Engineering Laboratory of ITU Civil Engineering Faculty. The numerical studies are aimed to reproduce the experimental results and to generate the fragility curves.

High voltage porcelain insulators are vulnerable components of the electrical substations during strong earthquakes. It is rather hard to repair them in service. Hence, it will be useful to reduce the internal forces on the insulators to increase their seismic safety. The replacement costs as well as indirect costs due to interruption of the power supply are somewhat significant. In 1994 Northridge-America, 1995 Kobe-Japan, 1999 İzmit-Turkey and 1999 Chi-Chi-Taiwan Earthquakes, the losses were hundreds of millions of dollars for each event. Damage of the electrical substation equipment in Loma Prieta and Northridge Earthquakes resulted to be \$283,000,000 worth of losses.

In the current practice of Turkey, porcelain insulators are supported on steel truss type systems with varying geometry and stiffness properties. The porcelain insulators and steel truss are provided by the independent suppliers. Consequently, the supporting truss is not accounted in design stage of porcelain insulator. The developed seismic isolation device to be placed between the steel truss and the porcelain insulator gives an opportunity to tune stiffness and damping properties of the system.

In this study, a new low-cost seismic isolation device that is mounted underneath of high voltage porcelain insulator is being developed to provide period elongation and supplementary damping. The internal forces arose from the earthquake effect are reduced severely by means of the developed seismic isolation device. Seismic isolation device consists of four polyurethane springs that are positioned between two circular stainless-steel plates. The plates are connected each other by pre-stressed steel rod (M14 bolt, 12.9 quality) positioned at their center. The polyurethane springs are located in the cavities created on the steel plates. Depth of the cavities, which transfer shear forces between the upper and the lower steel plates, is selected as 7 mm depending on the preliminary calculations.

Two independent seismic isolation devices tagged as GEO-1 and GEO-2 were produced for 550 kV porcelain insulators. A series of the experimental and the numerical studies were conducted on the rigid and seismically isolated specimens. The experimental studies that were accomplished in two phases consist of quasi-static and dynamic tests. The experimental results are also utilized to calibrate the numerical model parameters.

In the first phase, it was performed quasi-static cyclic tests on porcelain electrical insulators and seismic isolation devices that have two different geometries. The porcelain insulators tests were performed on two specimens with different heights to determine their behaviors and collapse modes. The displacement pattern given in FEMA – 461 (2007) was utilized in the quasi-static tests. The pattern consists of ten distinct displacement targets and each target were applied in two cycles. It has been experienced that the porcelain insulator is very brittle and the collapse observed in any sections rather than bottommost section. A steel column was utilized in the tests in which the behavior of GEO-1 and GEO-2 devices were examined. The hysteretic moment – rotation relations of the devices were obtained from the tests. Moment-rotation relation, stiffness variation, damping property and Ramberg Osgood model parameters are the quantities extracted from the quasi-static tests.

In the second phase, full scale dynamic tests of porcelain insulators on the support structure are performed for three distinct cases for a set of historical earthquakes selected according to IEEE-693. In the first case, rigid connection was utilized between the steel support structure and the porcelain insulator. In the second and third cases, GEO-1 and GEO-2 seismic isolation devices were utilized for the connections, respectively. The general results obtained from the dynamic tests are as follows; *i.* Top acceleration of porcelain insulator is reduced drastically in the seismically isolated cases. *ii.* The internal forces at the bottommost section reduced severely in the seismically isolated cases. *iii.* No residual deformations and displacements were observed of the porcelain insulators and the seismic isolation devices. *iv.* The seismic isolation devices returned to their original positions after the completion of dynamic tests. *v.* The predominant vibrational periods of the systems are elongated to the target values. *vi.* Equivalent viscous damping ratio extracted from the distinct testing methods for the systems with seismic isolation devices were in the range of 3~8%, while it was 1-2% for fixed base system.

The numerical models were generated to represent the structural behavior of the rigid and seismically isolated specimens. The models consist of the members to represent steel support, seismic isolation device components and porcelain insulators. All the members were represented by “*Elastic Frame Elements*” depending on the experimental observations. The mass and stiffness properties of the porcelain insulator were directly determined from the measurements. Free vibration tests in discrete displacement ranges were performed to determine equivalent flexural stiffness of the porcelain insulator system. It involves the effect of the porcelain end connections. The lateral stiffness obtained from the failure tests executed for the porcelain insulators are consistent with the results of the free vibration tests. Nonlinear elastic behavior of polyurethane springs was represented by Ramberg-Osgood model. Relatively high shear resistance was utilized for polyurethane springs. Although 2% global damping was consigned in fixed base case, 0.5% damping was assigned for the isolated cases. The inherent damping of seismic isolation device was accounted through the nonlinear behavior model utilized for the polyurethane springs. In the comparison of absolute top accelerations, general forms of the curves are well-matched, but there are some discrepancies particularly for low amplitude peaks. In the relative top displacement comparison, it is observed that the main peaks are compatible but then again there are some disagreements for the succeeding peaks. A Good correlation was obtained for the base moment that is the most critical quantity for design of seismic isolation device and porcelain insulator.

Three-dimensional finite element model by using solid elements was generated for rigidly supported porcelain insulator to observe the stress concentrations at any section. The numerical estimation of the stress concentration at the bottommost cross-section are quite consistent with the experimental measurements.

In the last stage of the study, the fragility curves were generated for the rigid and seismically isolated 550 kV high voltage porcelain insulators. The curves were produced for two quantities specifically the base flexural moment and horizontal top displacement. The target stress limits defined in IEEE-693 (1984) and IEEE-693 (2005) were utilized in the generation of the base moment fragility curves. How about, in the construction of top displacement fragility curves, it was utilized the displacement limits arose from the rotational capacity of the developed isolation devices. For the seismic isolation cases (GEO-1 and GEO-2), the probability of exceedance of the target displacements is 0% for design earthquake ($PGA=0.5g$). However, the probability rises to 30% and 10% for $PGA=1g$ for GEO-1 and GEO-2, respectively.

The developed seismic isolation device meets the requirements given by IEEE-693 (2005) for the seismic base isolators and it reduces the internal forces of high voltage porcelain insulator severely compared with the rigid type connection.

1. GİRİŞ

1994 Northridge/Amerika, 1995 Kobe/Japonya, 1999 İzmit/Türkiye ve 1999 Chi-Chi/Tayvan depremlerinin tümünde elektrik iletim hatları, trafo merkezleri ve şalt sahaları da önemli hasarlar görmüştür. Bu depremler sonrasında elektrik iletimin tekrar sağlanabilmesi için geçen süre Northridge’de 1 gün, Kobe’de 3 gün ve Chi-Chi’de 2 hafta olmuştur. Bunun yanı sıra, depremler sonrasında tesislerde oluşan hasarların giderilmesi için harcanan paranın yüzlerce milyon dolar düzeylerinde olduğu ifade edilmiştir. 1999 Kocaeli depremi sonrasında elektrik dağıtımının tekrar aktif hale getirilebilmesi için geçen süre sadece 1 gün olmasına rağmen, oluşan hasarın mali boyutu 70 Milyon dolardır, (Erdik, 2001). Deprem sonrasında oluşan elektrik kesintisinin neden olduğu karmaşa nedeni ile can kaybı sayısı artabilmekte, haberleşmede ve yardımların ulaştırılmasında zorluklar yaşanabilmektedir.

Trafo merkezleri elektrik dağıtım hatlarının anahtar noktalarından biridir. Trafo merkezlerinde bulunan ekipmanlar oldukça pahalı olmakla beraber, sismik etkilere karşı tasarımı yeterli düzeyde yapılmadığından deprem sırasında hasar görmeye oldukça eğilimlidirler. 1990’lı yıllara kadar bu konu ile ilgili oldukça sınırlı çalışma varken; yaşanan depremler sonrasında, özellikle 2000’li yılların başından itibaren araştırmacıların bu konuya olan ilgileri artmıştır. Özellikle Amerika Birleşik Devletleri’nde trafo merkezlerinde bulunan ekipmanların deprem güvenliğinin araştırılması konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda IEEE-693 (2005) “*Recommended Practices for Seismic Design of Substations*” yönetmeliği güncellenerek yayımlanmıştır.

Bu tür tesislerde deprem sırasında oluşan hasarların önemli bölümü porselen izolatörlerde yoğunlaşmaktadır. Tamir edilmesi mümkün olmamakta, porselen izolatörün değiştirilmesi gerekmektedir.

1.1 Amaç

Bu tez çalışmasında, yüksek gerilim iletim hatlarında kullanılan porselen elektrik izolatörlerinin deprem etkisindeki davranışlarını iyileştirilmek amacıyla etkin ve ekonomik bir sismik yalıtım cihazı geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Porselen izolatörler, elektrik nakil hatlarının en önemli bileşenlerinden biri olup yüksek maliyetlerinin yanı sıra ilave kablo ağırlığı ve buzlanma gibi belirsiz yükleme koşullarına da maruz kalabilmektedir.

Porselen izolatörlerin deprem güvenliğini artırmak amacıyla geliştirilen sismik yalıtım cihazı, tarihi eserlerin ve ikincil sistemlerin (makinalar, hassas elektrikli ekipmanlar, vb.) depremden korunması amacıyla da kullanılabilecektir.

1.2 Önceki Çalışmalar

Yüksek gerilim hatlarında kullanılan ekipmanların depreme göre tasarımı için, farklı ülkelerin yönetmeliklerinde farklı koşullar yer almaktadır. Başta Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Meksika ve Avrupa olmak üzere yönetmeliklerde tanımlanan farklı koşullar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri

9 Şubat 1971 San Fernando (California) depreminde oluşan hasarlar sonrasında, enerji iletim hatlarında ve trafo merkezlerinde bulunan ekipmanların ve yapıların dinamik davranışlarının dikkate alındığı bir analiz ve tasarım yönteminin gerekliliği ortaya çıkmış ve *Institute of Electrical and Electronic Engeneering* tarafından “*IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations*” (IEEE-693,1984) isimli yönetmelik yayımlanmıştır. 1997 ve 2005 yıllarında güncellenen yönetmelik, günümüzde kullanılan en kapsamlı yönetmeliktir. IEEE-693 (2005) farklı performans seviyeleri için detaylı değerlendirme yöntemleri ve kabul kriterleri içermektedir. Sayısal ve deneysel geliştirilmiş yöntemlerin yanı sıra farklı ekipman sınıfları için özel yöntemler ve kabul kriterleri yer almaktadır.

IEEE-693 (2005)’de *Düşük (Low, $PGA=0.1g$)*, *Orta (Moderate, $PGA=0.5g$)* ve *Yüksek (High, $PGA=1.0g$)* olmak üzere üç farklı performans seviyesi tanımlanmıştır. Orta ve yüksek performans seviyeleri için deneysel çalışma yapılmasına ilişkin koşul bulunurken, düşük performans seviyesi için deneysel çalışma koşulu bulunmamaktadır. Yönetmelikte, yapılması istenen deneysel çalışmanın türü (statik

veya dinamik deney), ekipmanın önemine göre (üzerinden geçen voltaja göre) tariflenmiştir. Yüksek gerilim hatlarında ve trafo merkezlerinde bulunan çoğu ekipman için iki eksenli dinamik deney (bir eksen yatay doğrultuda diğer eksen düşey doğrultuda olmak üzere) zorunluluğu bulunmaktadır. IEEE-693’de tanımlanan tasarım spektrumuna uygun olarak ölçeklendirilmiş bir depremde, eleman gerilmeleri kapasitenin %50’sini geçmemesi gerektiği bildirilmiştir.

Avrupa

Yüksek gerilim hatlarının deprem güvenliği ile ilgili çalışmalar Avrupa’da 2000’li yıllarda başlamıştır. *International Electrotechnical Commission* (IEC) tarafından IEC 62271 (2007) yönetmeliği yayımlanmıştır. AF5 (PGA=0.5g), AF3 (PGA=0.3g) ve AF2 (PGA=0.2g) olmak üzere üç farklı performans seviyesi tanımlanmıştır. 50 yılda aşılma olasılığı %10 (475 yıl dönüş periyodu) olan bir tasarım depreminde oluşacak olan gerilmeler eleman kapasitesini aşmamalı, ekipman deprem sonrasında hasar almadan servis hizmetine devam edebilmelidir.

Japonya

JEAG 5003 (2010), ilk olarak 1985 yılında yayınlanan elektrik tesislerinin deprem performansının belirlenmesi için hazırlanmış bir Japon yönetmeliğidir. 1999 ve 2010 yıllarında yönetmelik güncellenerek tekrar yayınlanmıştır. Porselen izolatörler için 0.3g, trafolar için 0.5g genliğindeki rezonans sinüs hareketi sonrasında ilgili ekipmanın hasar almadan servis hizmetine devam etmesi istenmektedir.

Çin

“*Elektrik Ekipmanlarının Sismik Tasarımı (GB50260, 1996)*” adlı yönetmelik 1996 yılında yayınlanmıştır. Yaşanan depremler sonrasında yönetmelik koşulları güncellenerek 2013 yılında tekrar yayınlanmıştır (GB50260, 2013). 50 yılda aşılma olasılığı %10 (475 yıl dönüş periyodu) olan tasarım depreminde oluşacak gerilmelerin eleman kapasitesini aşmaması, ekipmanın deprem sonrasında hasar almadan servis hizmetine devam etmesi istenmektedir. IEC tarafından yayınlanan yönetmelikler ile benzer koşullar içerdiğinden IEC yönetmelikleri de kabul edilmektedir.

Elektrik iletim hatlarının deprem performansı ile ilgili akademik çalışmalar 2000’li yıllara kadar oldukça sınırlı iken yaşanan depremler sırasında meydana gelen hasarlar ve bu hasarlar nedeniyle oluşan elektrik kesintilerinden kaynaklanan ekonomik kayıplar nedeniyle araştırmacıların bu konuya olan ilgileri artmıştır. Son yirmi yılda

yapılan önemli çalışmalardan biri Hatami ve diğ. (2004) tarafından yapılmıştır. Trafo ve üzerinde bulunan porselen izolatörün sismik performansının belirlenmesi amacıyla sarsma masası üzerinde çok sayıda deney gerçekleştirmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar kullanılarak farklı yüksekliğe ve rijitliğe sahip sayısal modeller oluşturulmuştur. Göçme olasılığının azaltılması ve mevcut sistemlerin deprem performanslarının iyileştirilmesine yönelik bazı yöntemler önerilmiştir.

Murota ve diğ. (2006), iki farklı sismik yalıtım sistemi kullanılan trafo ekipmanının üç eksenli sarsma masasında dinamik deneylerini gerçekleştirmiştir. Kullanılan sismik yalıtım sistemleri; sürtünmeli sarkaç tipi kayıcı mesnet ile birlikte kullanılan kauçuk izolatörler ve yüksek sönümlü bölümlenmiş kauçuk izolatör sistemidir. Deneysel çalışmalarda, trafo üzerinde bulunan porselen elektrik izolatörüne bağlanan kablo ile etkileşim dikkate alınmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda; trafo sistemlerinin deprem güvenliğinin artırılmasında, kablo bağlantısının dikkate alındığı durumlarda dahi sismik taban izolasyonunun etkili olduğu belirtilmiştir.

Kong and Reinhorn (2009) taşıyıcı yapısı ile birlikte gerçek ölçekli bir devre kesici sistemin dinamik deneylerini gerçekleştirmiştir. Porselen izolatörlerin sismik tehlikesinin azaltılması için birbirinden farklı iki sismik yalıtım sistemi; sürtünmeli sarkaç ve çelik tel halat sistemi, çelik taşıyıcı yapının altına yerleştirilmiştir. Sürtünmeli sarkaç tipi sismik yalıtım sistemi porselen izolatörlerde oluşan iç kuvvetleri %50~%90 oranında azaltmıştır. Koliou ve diğ. (2009) porselen elektrik izolatörlerinin sismik istemlerinin azaltılması için bir güçlendirme yöntemi önermiştir. Trafo üzerine yerleştirilen ilave rijitlik plakaları ile porselen izolatörün deprem performansı iyileştirilmiştir.

Alessandri ve diğ. (2015a, 2015b) yüksek gerilim porselen izolatörler için bir sismik yalıtım cihazı geliştirmiştir. Çalışma sonucunda, porselen izolatörde oluşan gerilmelerin %75 oranında azaltıldığı belirtilmiştir. Bu sayede porselen izolatörlerin deprem güvenliği artırılmıştır. Takhirov ve diğ. (2017) de benzer bir sismik yalıtım sistemi önermiştir. Yapılan dinamik deneylerde, önerilen sismik yalıtım sisteminin deprem talebini 2.5 kat azaltıldığı belirtilmiştir.

Lee and Constantinou (2018) yüksek gerilim trafoları için yatay ve düşey doğrultuda çalışan bir sismik yalıtım sistemi geliştirmiştir. Cihaz, yatay doğrultuda üç yüzeyli sürtünmeli sarkaç tipi izolatör, düşey doğrultuda ise çelik yaylar ve doğrusal viskoz

sönümleyiciden oluşmaktadır. Dinamik deneylerde, tüm deprem kayıtları için yatay sismik yalıtım sisteminin etkin bir şekilde çalıştığı, bazı deprem kayıtları için düşey yalıtım sisteminin olumlu sonuçlar verirken bazılarında olumsuz cevap verdiği bildirilmiştir.

Villaverde ve diğ. (2001) 230 kV ve 500 kV trafo sistemleri için dinamik deneyler gerçekleştirmiştir. IEEE-693’de tanımlanan büyütme katsayısı; 500 kV için benzer şekilde 2 olarak belirlenirken, 230 kV için 3.95 olarak elde edilmiştir. Bu değer, IEEE-693’de verilen değer yaklaşık iki katıdır.

Filiatrault ve Matt (2006) trafo üzerine yerleştirilen porselen elektrik izolatörlerinin dinamik davranışını incelemiştir. Esnek mesnet durumlarında elde edilen dinamik özellikler, rijit mesnetlenme durumunda elde edilen sonuçlardan oldukça farklıdır. Bu nedenle IEEE-693’de verilen büyütme katsayılarının tüm porselen elektrik izolatörleri için güvenli tarafta kalamayacağı belirtilmiştir.

Whittaker ve diğ. (2004) 196 kV, 230 kV ve 550 kV porselen elektrik izolatörlerinin dinamik deneylerini gerçekleştirmişlerdir. IEEE-693 (2005) doğrultusunda kırılma eğrileri oluşturmuşlardır. Porselen izolatörün spektral ivmesine dayalı kırılma eğrisinin hasar tahmini için iyi bir veri olduğunu, ancak taşıyıcı sistemin sönüm ve esnekliğinin ihmal edildiğini belirtmişlerdir. İhmal edilen bu etkiler porselen elektrik izolatörlerinin davranışını etkileyebilmektedir.

Porselen elektrik izolatörünün deprem güvenliğinin artırılması için geliştirilen sismik yalıtım cihazı içerisindeki poliüretan malzeme endüstride tekerler, mesnet, sönümleyici gibi çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Kimyasal etkilere dayanıklılığı, poliüretanın endüstride yaygın olarak kullanılmasına imkân vermektedir (Clemison, 2015). Poliüretan malzemelerin çevresel etkilere dayanıklılığı ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla beraber sismik yalıtım sistemleri içerisinde kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır.

Buckle ve diğ. (2006) otoyol köprülerinde kullanılan sismik yalıtım sistemleri ve bunların tasarım yöntemlerine ilişkin bir çalışma yayınlamışlardır. Çalışma, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör, sürtünmeli sarkaç tipi izolatör ve “*Eradiquake*” tipi izolatörleri içermektedir. Eradiquake, düz yüzeyli kayıcı diskler ile bu disklerin merkezde kalmasını sağlayan yatay doğrultuda yerleştirilmiş ve öngerme kuvveti

uygulanmış poliüretan yaylardan oluşmaktadır. Bu sistem Kuzey Amerika otoyol köprülerinin %20'sinde uygulanmıştır.

Jeong ve diğ. (2016) sürtünmeli aramid fren balata sistemi kullanarak bir sönümleyici geliştirmiştir. Sönümleyicinin hareket sonrasında merkeze tekrar dönmesi poliüretan yaylar ile sağlanmaktadır.

Falborski ve Jankowski (2017) polimerik malzeme kullanılarak oluşturulan bir prototip sismik yalıtım sisteminin etkinliğini incelemiştir. Tek katlı ve iki katlı modellerin dinamik davranışları, ankastre mesnetlenme ve sismik yalıtım sistemi kullanılan durumlarında farklı deprem hareketleri için çalışılmıştır. Sismik yalıtım sistemi kullanıldığı durumda, pik ivmelerin önemli ölçüde azaltılabildiği belirtilmiştir.

Lihong ve diğ. (2014) poliüretan izolatörlerin denize yakın bölgelerde kullanımı durumunda yaşlanma etkilerini araştırmıştır. Kauçuk ve poliüretan malzemenin hızlandırılmış deneysel yöntem ile elde edilen yaşlanma ve yorulma değerleri karşılaştırılmıştır. Kauçuk (r) ve poliüretan (p) malzemelerin 23°C, 40°C ve 60°C sıcaklıktaki yaşlanma ömürleri sırasıyla (r=8.19, p=104.23), (r=1.24, p=18.13) ve (r=0.27, p=4.5) yıl olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre poliüretan malzemenin, kauçuk malzemeye oranla yaşlanma ömrü oldukça uzundur. Her iki malzemenin dinamik yorulma performansları %20 başlangıç birim şekildeğiştirme ve 10 Hz 1.27 mm genlikteki bir etki ile test edilmiştir. Poliüretan malzemedeki değişim 1.000.000 çevirim sonrasında ortaya çıkarken, kauçuk malzemedeki değişim 500.000 çevirim sonrasında yüzeysel çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Poliüretan malzemenin yorulma ömrü kauçuk malzemeye göre iki kat fazla elde edilmiştir. 1.000.000 çevrim sonrasında oluşan rijitlik değişimi, poliüretan malzeme için %5 iken, kauçuk malzemedeki %18'dir. Tüm bu sonuçlar ışığında, poliüretan malzemenin ömrünün kauçuk malzemeye oranla 2-3 kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. Sıcaklık etkisi arttığında poliüretan malzemenin kauçuk malzemeye göre üstünlüğü daha da ön plana çıkmaktadır.

Davies ve Evrard (2007) farklı sertlikteki poliüretan malzemeleri iki yıl boyunca 50°C ve 100°C sıcaklıklarda deniz suyunda bekletmiş, benzer numuneleri 5 yıl boyunca normal sıcaklıkta deniz suyunda bekletmiş, ardından mekanik özelliklerdeki değişimler incelemiştir. Yaşlanma deney sonuçlarına göre, 5 yıl boyunca deniz suyu etkisine maruz kalan poliüretan numuneleri %100 oranında ilk rijitlik değerlerine geri dönmüşlerdir.

Clemitson (2015) sıcaklık değişimlerinin poliüretan malzeme üzerindeki etkilerini incelemiştir. Rijitlik özelliği, 20 °C ile -25 °C sıcaklık aralığında çok küçük oranda artarken -25 °C sonrasında hızla artmaktadır. Ayrıca 80°C üzerindeki sıcaklıklarda poliüretan malzeme özelliklerinde kalıcı değişimler oluşmaktadır. Yapılan bu çalışma sonucunda poliüretan malzemenin -40°C ile +70°C aralığında mekanik özelliğini koruduğu belirtilmiştir.

Falborski ve Jankowski (2017) poliüretan malzeme üzerinde dinamik – mekanik analiz gerçekleştirerek, sıcaklık ve frekans değişiminin malzeme özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Gerçekleştirilen deneyler, olası atmosfer sıcaklık aralığı (-20°C ile +40°C) ve çoğu gerçek deprem ivme kaydını kapsayan 1 Hz ~ 10 Hz frekans aralığı için yapılmıştır. Ulaşılan sonuçlara göre, poliüretan malzemenin mekanik özelliklerinde yalnızca çok küçük değişiklikler olduğu tespit edilmiştir.

1.3 Sismik Yalıtım Cihazı Önerisi

Yüksek gerilim hatlarında kullanılan porselen izolatör sistemlerin depreme karşı korunması amacıyla basit ancak etkin çalışan bir sismik yalıtım cihazı geliştirilmiştir. Cihaz, porselen izolatörün mesnet bölgesine yerleştirilerek dış ortama yarı rijit bağlanmasını sağlamaktadır. Bu amaç için, çevresel etkilere karşı dayanıklılığı yüksek olan poliüretan yaylar seçilmiştir. Geliştirilen cihaz, porselen izolatör sisteminin etkin titreşim periyodunu kontrollü olarak uzatabilmekte ve aynı zamanda sistemin deprem sırasındaki davranışına göreli olarak yüksek yapısal sönüm sağlayabilmektedir.

Geliştirilen cihaz, bu alandaki bilgi birikiminin toplandığı Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) tarafından yayımlanan IEEE-693 “*Elektrik Dağıtım Hatlarının Depreme Göre Tasarımı*” kılavuzunda belirtildiğı şekilde “*yüksek performans düzeyi*” esas alınarak geliştirilmiştir. Dolayısıyla bu performans düzeyi için gerçek zamanlı dinamik deneylerin yapılması gerekmektedir.

1.4 Özgün Değer ve Motivasyon

Geliştirilen sismik yalıtım cihazı yerli malzeme ve işçilik kullanılarak, yüksek teknoloji gerektirmeden üretilebilmektedir.

Sismik yalıtım cihazının porselen izolatörün hemen altına yerleştiriliyor olması dolayısıyla; üst yapıyı, mesnet olarak kullanılan çelik kafesin mekanik özelliklerinden bağımsız hale getirebilmektedir. Cihazın değişik çevresel etkilere karşı dayanıklılığı da yüksek olduğundan alternatif sistemlere göre tercih edilme olasılığı yüksektir.

Bu özellikler çalışmayı özgün hale getirerek, motivasyonun kaynağını oluşturmuştur.

1.5 Tezin Genel Yapısı

Tez dört ana bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın amacı ve önceki çalışmalar tezin ilk bölümünde yer almaktadır. Sonraki iki bölümde, üç ayrı grup halinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve bu deney sonuçlarına ulaşmayı amaçlayan sayısal çalışmalar bulunmaktadır. Son bölümde, elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

İkinci bölümde, sismik yalıtım cihazı önerisi, cihazın mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan eleman ve sistem deneyleri verildikten sonra ankastre mesnetlenme ve sismik yalıtım cihazı kullanılan durumlar için ayrı ayrı sistem deneyleri verilmektedir.

Üçüncü bölümde, sismik yalıtım cihazının davranışını sayısal olarak modellemeye yönelik çalışmalar ve farklı yay türleri için elde edilen sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırmaları yer almaktadır. Porselen izolator sistem için hazırlanan üç boyutlu sonlu eleman modeli de bu bölümde verilmiştir. Farklı mesnet durumları için elde edilen sayısal sonuçların dinamik deney sonuçları ile karşılaştırılması bu bölüm içerisinde verilmektedir. Deneysel sonuçlar ile doğruluğu ispatlanan sayısal hesap modelleri kullanılarak farklı deprem düzeyleri için çok sayıda tekrarlı sayısal analiz gerçekleştirilmiş, analizlerden türetilen aşılma (kırılma) olasılık eğrileri bu bölümde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde tez kapsamında gerçekleştirilen tüm çalışmalardan çıkarılan sonuçlar ve genel değerlendirmeler yer almaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

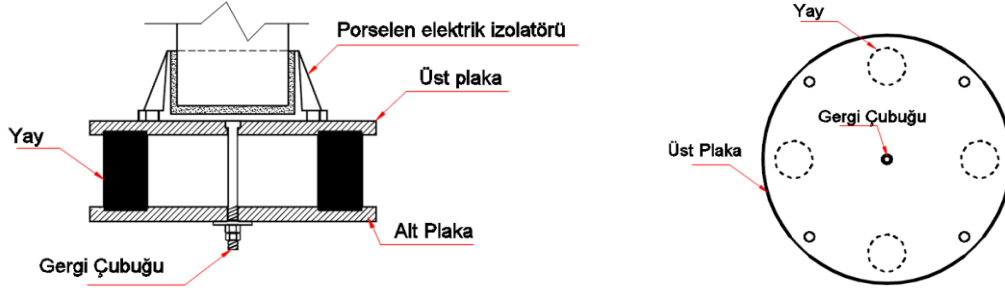
Önerilen sismik yalıtım cihazının davranışının belirlenmesi için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, kullanılacak yay türünün belirlenebilmesi için farklı ürünler üzerinde *eleman deneyleri* yapılmıştır. Sismik yalıtım cihazının ilk prototipi basınç kuvveti etkisinde denenmiş, sonraki aşamalarda ise kesme kuvveti ve moment etkileri irdelenmiştir.

Gerçekleştirilen ilk deneylerin sonuçları, sönüm özelliği ve ilgili yönetmeliklerde istenen koşullar bakımından değerlendirildiğinde *poliüretan* türü yayların kullanımına karar verilmiştir. İki farklı geometride üretilen sismik yalıtım cihazı, porselen izolatör mesnet kesitine yerleştirilerek gerçek deprem kayıtları etkisinde denenmiştir. Deney sonuçlarının birbirleri ve ankastre mesnetlenme durumuna ait sonuçlar ile karşılaştırılmasıyla, geliştirilen sismik yalıtım cihazının etkinliği gösterilmiştir.

2.1 Geliştirilen Sismik Yalıtım Cihazının Özellikleri

Dört adet yay, daire biçimli iki çelik plaka arasına öngerme kuvveti ile sıkıştırılmaktadır. Yaylar, birbirlerine eşit mesafede, çelik plakalarda oluşturulan 7mm derinliğindeki yuvalara yerleştirilmektedir. Çelik plakalar merkezlerinden geçen Ø14 mm çaplı çelik çubuk aracılığı ile istenen öngerme kuvveti kullanılarak birbirlerine bağlanmaktadır. Çelik plakaların üzerinde, alttaki çelik kafes sisteme ve porselen elektrik izolatörüne bağlantılarını sağlamak amacıyla 8'er adet 20 mm çapında delikler bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında kullanılan iki yay türü ile oluşturulan sismik yalıtım cihazının plan ve kesit resimleri Şekil 2.1'de verilmiştir.



a. Sismik yalıtım cihazı tipik kesiti ve planı.



b. Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı.



c. Poliüretan yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazları.

Şekil 2.1 : Sismik yalıtım cihazları.

2.2 Yay Deneyleri

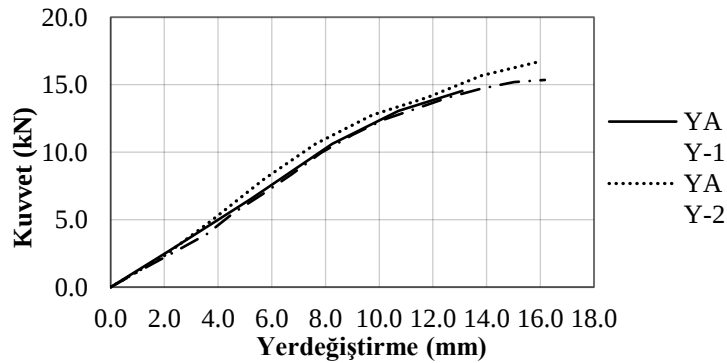
Yapılan çalışmalar iki alt bölümde toplanmıştır. Birinci alt bölümde $\varnothing 54\text{mm}$ çaplı düz başlıklı çelik yaylar, ikinci bölümde ise farklı sertlik derecelerine sahip poliüretan yaylar basınç deneyine tabi tutularak fiziksel özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla bir yükölçer, iki yerdeğiştirmeölçer, bir hidrolik krikove rijit çerçeveden meydana gelen basit bir deney düzeneği kurulmuştur. Yükleme; çelik yay durumunda yay tam olarak kapanana kadar, poliüretan yay durumunda ise üretici tarafından önerilen elastik sınıra kadar adım adım artırılmıştır.

54 mm çap ile 110 mm yükseklik ve 5 adım sayısına sahip elik yaylar üzerinde eksenel basınc deneyi yapılmıştır (şekil 2.2).



şekil 2.2 : elik yay ve eksenel basınç deney düzeneği.

Üç adet yay numunesi için elde edilen eksenel kuvvet-kısalma ilişkisi şekil 2.3’de verilmiştir.



şekil 2.3 : elik yayların eksenel kuvvet - yerdeğiştirme ilişkisi.

Deneyler sonucunda tüm yaylarda kalıcı yerdeğiştirme oluşmamıştır. Deneysel alışma sonucunda elde edilen ortalama rijitlik 1.06 kN/mm’dir. Basık helisel basınç yayların eksenel rijitliği, burulma şekildeğiştirme dengesi veya enerji yöntemlerinden (İnan, 1984) biri ile hesaplandığından bulunan değer 1.16 kN/mm’dir. Sayısal ve deneysel yöntemler ile bulunan eksenel rijitlik değerleri arasında %8.5 fark bulunmaktadır.

elik yay deneylerinde elde edilen sönüm özelliğinin çok sınırlı olması nedeniyle benzer rijitliğe sahip ancak daha fazla sönüm sağlayabilecek malzeme arayışına gidilmiştir. Bu kapsamda endüstride farklı amaçlar için kullanılan %90 Shore sertlikte

poliüretan yaylar seçilmiştir. Bu malzemenin sönüm özelliğinin göreceli olarak yüksek oluşunun yanında; korozyon, manyetik alan ve UV problemlerine karşı olumlu özelliklerinin olduğu bilinmektedir (Clemitson (2015)). Poliüretan yaylar, çelik yaylar ile benzer maliyete sahiptir ve seri üretimi yapılmaktadır.

Seçilen %90 shore sertlikteki poliüretan yaylar üzerinde eksenel basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 80mm çaplı ve 125mm yüksekliğe sahip numuneler kullanılmıştır. Yüksüz ve 40mm eksenel kısalma durumlarındaki şekildeğiştirme biçimleri Şekil 2.4a ve Şekil 2.4b’de yer almaktadır.



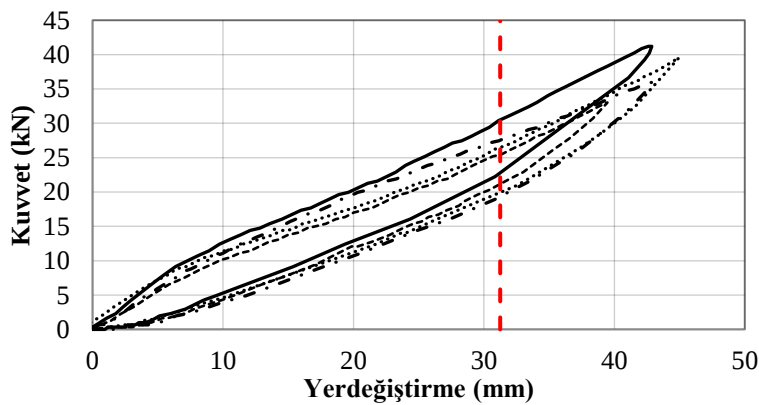
a. Eksenel yük deney şeması - $\Delta=0$



b. Eksenel yük deney şeması - $\Delta=40\text{mm}$

Şekil 2.4 : Poliüretan yay eksenel basınç deney düzeneği.

Dört adet numune için elde edilen eksenel kuvvet-kısalma ilişkisi Şekil 2.5’de verilmiştir. Yükleme ve boşaltma eğrilerinin farklı yörüngeleri izlemesi dolayısıyla diyagramların belirli bir alanı kapladığı görülmektedir. Bu alanın büyük oluşu yapısal sönümün büyüklüğü anlamını taşımaktadır.



Şekil 2.5 : Poliüretan yayların yük-boy kısalması grafiği.

Yük yerdeğiştirme eğrisinde yükleme kolunu yeter yaklaşıklıkla temsil eden doğrunun eğimi eksenel rijitlik olarak tanımlandığında, dört numune için elde edilen eksenel rijitlik değeri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Sonuçların tekrarlanabilirliğini kontrol etmek amacıyla, aynı deney 24 saat sonra tekrarlanmış ve sonuçlar Çizelge 2.1’de “Deney 2” olarak verilmiştir. Eksenel yay rijitliğinin yaklaşık 1.25 kN/mm olduğu ve iki deneyde elde edilen sonuçların çok yakın olduğu görülmüştür.

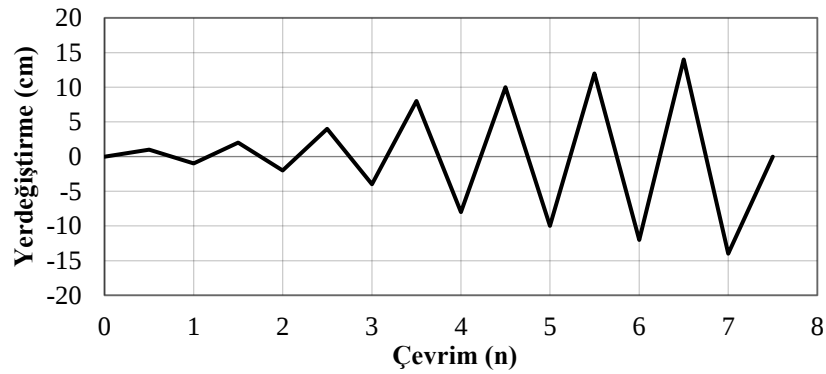
Çizelge 2.1 : Yay rijitlikleri (kN/mm).

Numune	1	2	3	4
Deney-1	1.22	1.25	1.26	1.05
Deney-2	1.24	1.38	1.29	1.12

Deneyler sırasında, üreticinin önerdiği elastik sınır aşılmış olmasına rağmen yay elemanlarda kalıcı boy kısalması olmamıştır.

2.3 Çevrimsel Statik İtme Deneyleri

Sismik yalıtım cihazının kesme kuvveti ve eğilme momenti etkisindeki davranışını deneysel olarak belirlemek üzere, oluşturulan cihaz üzerine 2400 mm yükleme mesafesini sağlayacak çelik bir kolon rijit olarak bağlanmıştır. Sismik yalıtım cihazı dış ortama sabit olarak bağlandıktan sonra, yatay hidrolik veren aracılığıyla çelik kolona bir yerdeğiştirme protokolü etkilmiştir (Şekil 2.6).

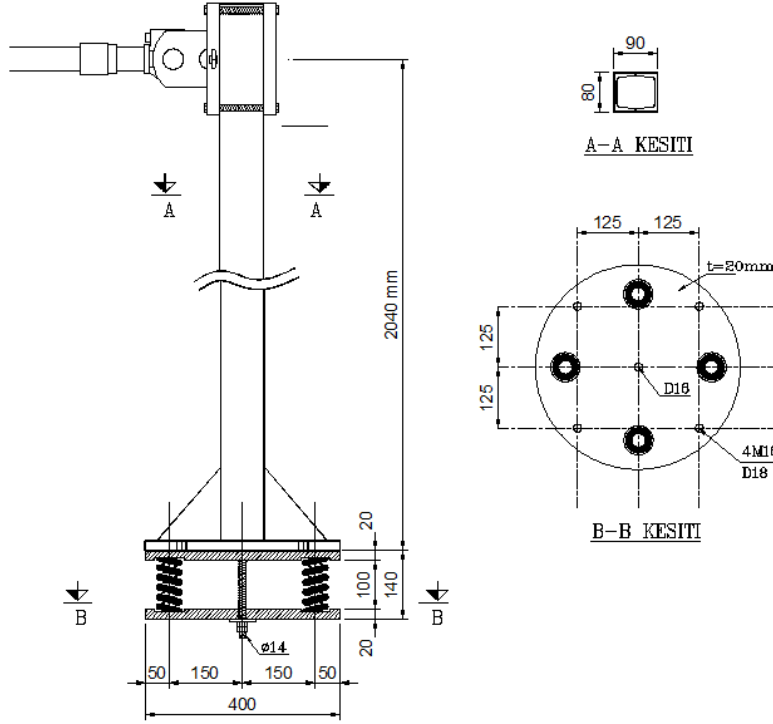


Şekil 2.6 : Çevrimsel yerdeğiştirme protokolü.

Cihazda ortaya çıkan görelî kayma hareketi ile moment-dönme ilişkisi kaydedilmiştir. Ayrıca cihazın alt ve üst plakalarını birbirine bağlayan çelik çubuk üzerinde şekildeğiştirme okuması yapılmıştır.

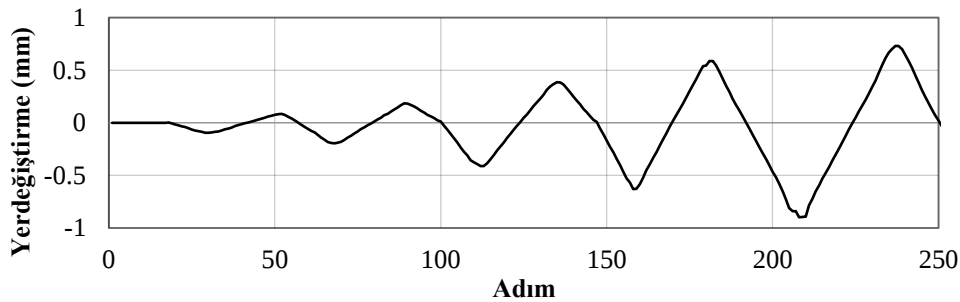
2.3.1 Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı

Çelik yaylı cihaz için oluşturulan deney düzeneği Şekil 2.7’de yer almaktadır. Çelik yaylar 54 mm dış çapa sahip olup, düz başlıklı olarak üretilmiştir. 14 mm çaplı telden 5 adım aralıklı olarak üretilen yaylar sıkışma öncesi 110 mm toplam yüksekliğe sahiptir.

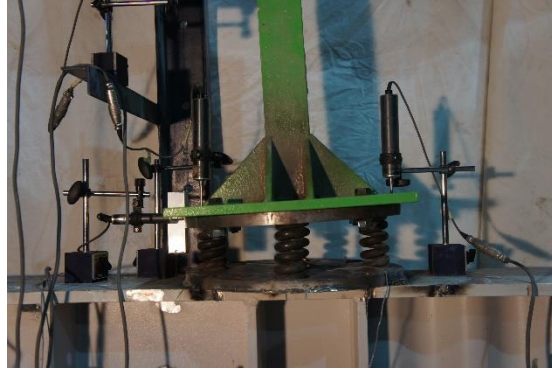


Şekil 2.7 : Çelik yaylı sismik yalıtım cihazı.

Deney sırasında cihazın alt ve üst plakaları arasında ortaya çıkan göreceli kayma hareketinin değişimi Şekil 2.8’de verilmiştir. Gerçekleşen en büyük değer 0.8 mm’dir. Bu büyüklük kendisine karşı gelen 120 mm’lik tepe yerdeğiştirmesi yanında yeterince küçüktür. Sismik yalıtım cihazının yatay rijitliği dönme rijitliğine göre oldukça yüksektir.



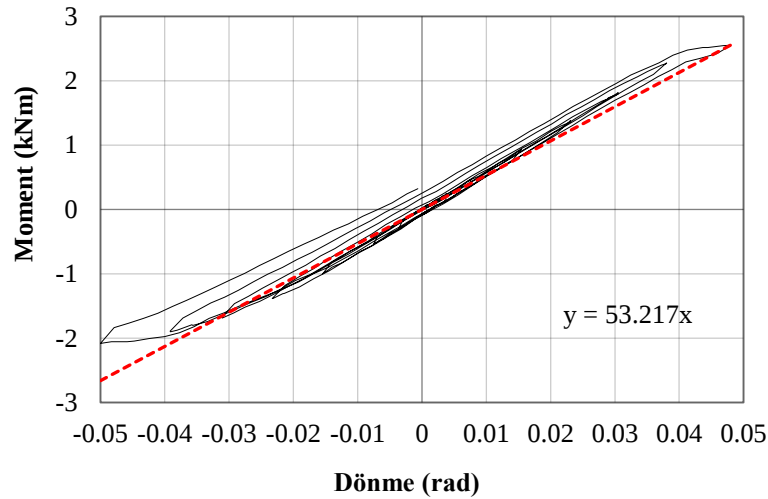
Şekil 2.8 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazında alt ve üst plakalar arasında göreceli yatay kayma hareketi.



Şekil 2.9 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı tipik şekil değiştirme biçimi.

Deney sırasında gözlemlenen tipik şekil değiştirme biçimi Şekil 2.9’da görülmektedir.

Cihaz için oluşturulan eğilme momenti-dönme ilişkisi Şekil 2.10’da verilmiştir. Eğilme momenti, hidrolik verende oluşan kuvvetin 2400 mm ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Dönme ise, aralarındaki mesafe 460 mm olan iki düşey yerdeğiştirme ölçerden elde edilen değerler ile hesaplanmıştır. Moment dönme ilişkisinde yükleme ve boşaltma kollarının birbirine yakın oluşması dolayısıyla, eğrinin kapadığı alan küçüktür. Gerçekleşen etkin rijitlik 53.2 kNm/rad’dır. Çevrimlerin ayrıklaştırılmasıyla ulaşılan en büyük eşdeğer sönüm oranı %2~%3 mertebesindedir.



Şekil 2.10 : Çelik yaylar ile oluşturulan sismik yalıtım cihazı moment dönme ilişkisi.

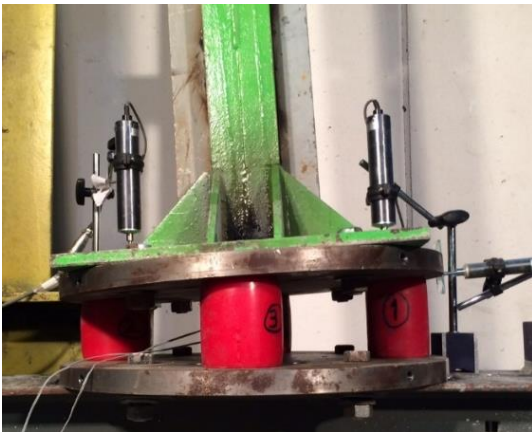
2.3.2 Poliüretan yaylar ile oluşturulan yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı

Dört adet poliüretan yay Şekil 2.11’de görülen düzeneğe yardımıyla yaklaşık %10 boy kısalmasına maruz bırakılarak, sismik yalıtım cihazının alt ve üst plakaları merkezlerinden geçen ankraj çubuğu marifetiyle birbirine bağlanmıştır. Cihazın kullanımı sırasında tüm yayların basınç kuvveti etkisinde kalması amaçlanmıştır.

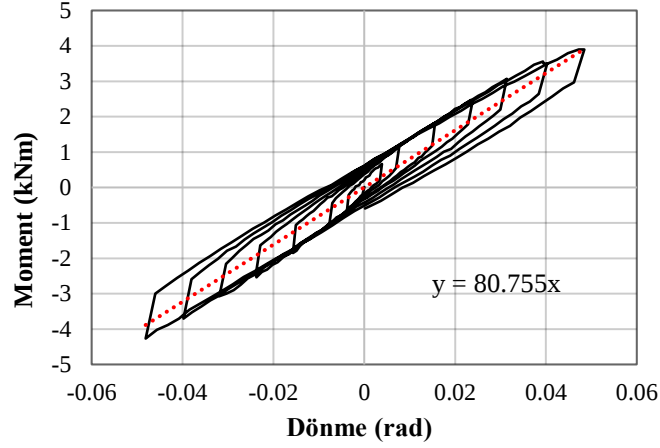


Şekil 2.11 : Sismik yalıtım cihazı ön eksenel yükleme düzeneği.

80 mm çaplı dört adet poliüretan yayın merkezi, cihaz merkezine 150 mm mesafede olacak şekilde oluşturulan cihaz (GEO-1), yatay yükleme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 2.12). Deney sonucunda elde edilen moment-dönme ilişkisi Şekil 2.13’de verilmiştir. Gerçekleşen etkin rijitlik 80.7 kNm/rad’dır. Çevrimlerin ayrıklaştırılmasıyla elde edilen eşdeğer sönüm %4~%8 aralığındadır.

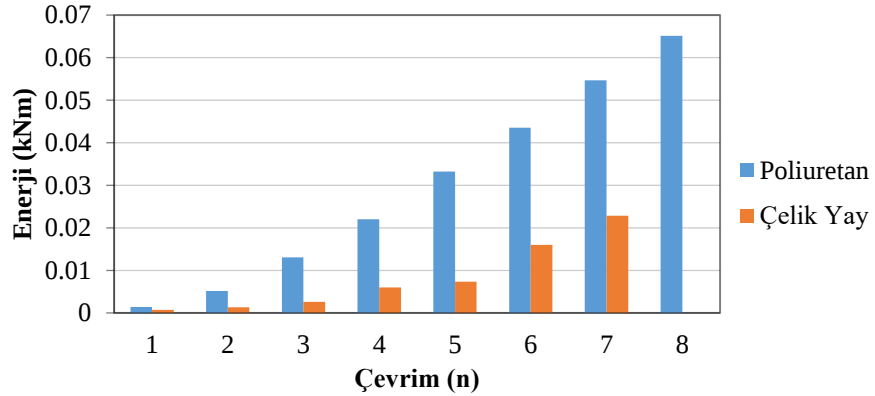


Şekil 2.12 : Çevrimsel yükleme deney düzeneği.



Şekil 2.13 : Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı moment - dönme grafiği.

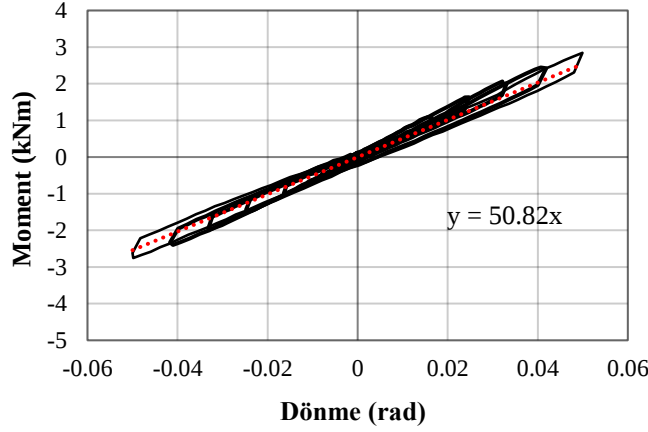
Şekil 2.10 ve 2.13’de görülen çevrimsel döngülerin ayrıklaştırılmasıyla hesaplanan enerji büyüklükleri iki yay durumu için Şekil 2.14’de karşılaştırılmıştır. Her iki yayın birlikte ulaşabildiği yerdeğiştirme seviyesine kadar yapılan bir karşılaştırmada, poliüretan yayın daha büyük enerji tüketebildiği, dolayısıyla daha yüksek sönüm özelliğine sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 2.14 : Enerji tüketme kapasitelerinin karşılaştırılması.

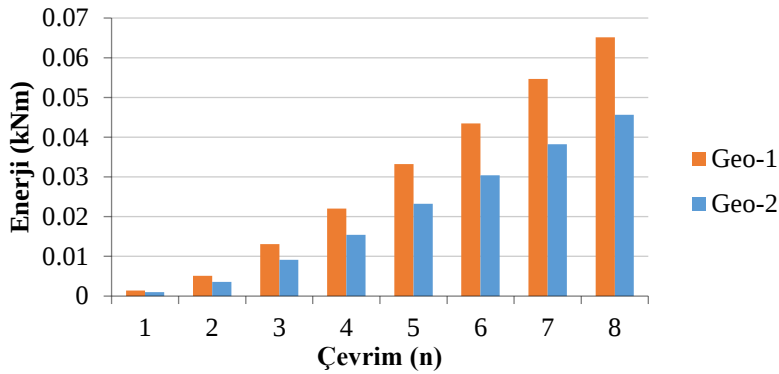
2.3.3 Poliüretan yay ile oluşturulan düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı

80 mm çaplı dört adet poliüretan yayın merkezi, cihaz merkezine 90 mm mesafede olacak şekilde oluşturulan sistem (GEO-2), yatay yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen moment-dönme ilişkisi Şekil 2.15’de verilmiştir. Gerçekleşen etkin rijitlik 50.8 kNm/rad’dır. Çevrimlerin ayrıklaştırılmasıyla elde edilen eşdeğer sönüm %4~%6 aralığındadır.



Şekil 2.15 : Düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı moment - dönme grafiği.

Şekil 2.13 ve 2.15’de görülen çevrimsel döngülerin ayrıklaştırılmasıyla hesaplanan enerji büyüklükleri iki yay durumu için Şekil 2.16’da karşılaştırılmıştır. Her iki yayın karşılaştırılmasıyla, GEO-1 numunesinin daha büyük enerji tüketebildiği, dolayısıyla daha yüksek sönüme sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 2.16 : Enerji tüketme kapasitelerinin karşılaştırılması.

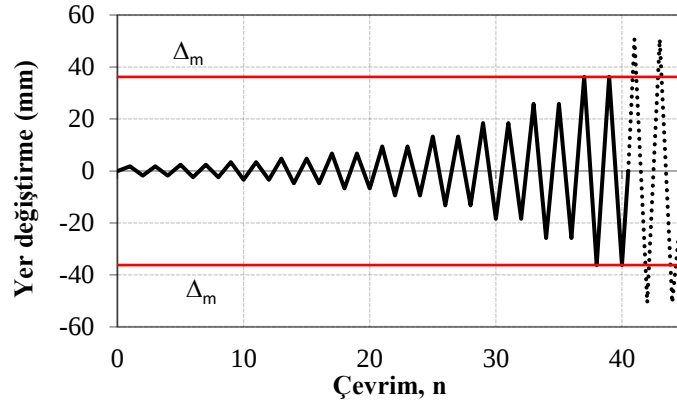
2.3.4 Porselen elektrik izolatörlerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan statik itme deneyleri

Porselen elektrik izolatörünün mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, iki farklı *moment/kesme kuvveti oranına* sahip numune üzerinde çevrimsel statik yükleme yapılmıştır. Bu amaçla, dinamik deneylerde de kullanılan ve 3 parçadan oluşan porselen elektrik izolatörü h=2825 mm ve h=1770 mm yüksekliklerde olacak şekilde düzenlenerek iki farklı numune oluşturulmuştur.

Çevrimsel statik itme deneylerinde FEMA 461’de yapısal olmayan elemanların statik testi için verilen yerdeğiştirme protokolü uygulanmıştır. Üretici tarafından verilen eğilme momenti kapasitesi dikkate alınarak hesaplanan hedef tepe yerdeğiştirme

değeri $\Delta_m = 36.2$ mm 'dir. Hedef yerdeğiştirme değerine on yükleme adımında ulaşılmaktadır. Her bir adımda yerdeğiştirme genlikleri Denklem 2.1 aracılığıyla hesaplanmıştır. Statik deneylerde uygulanan tepe yerdeğiştirme protokolü Şekil 2.17 de verilmiştir.

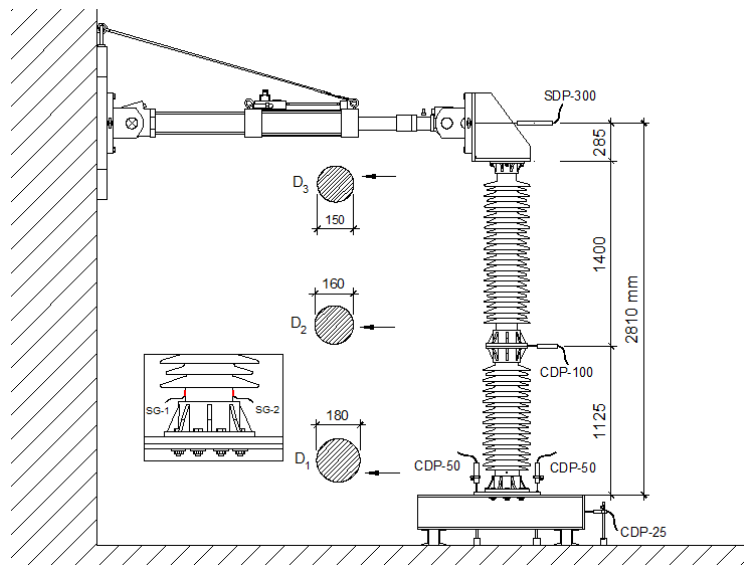
$$\Delta_{i+1} = 1.4\Delta_i \quad (2.1)$$



Şekil 2.17 : Tepe yerdeğiştirme protokolü.

2.3.4.1 Moment etkisinin göreceli olarak büyük olduğu statik itme deneyleri (Numune-1)

Dinamik deneylerde kullanılan ve üç parçadan oluşan porselen elektrik izolatörünün, $h_1=1100$ mm ve $h_2=1400$ mm uzunluğundaki ilk iki parçası kullanılarak toplam moment kolu $h_t=2825$ mm olan bir konsol sistem oluşturulmuştur.



Şekil 2.18 : Numune-1 deney düzeneği.

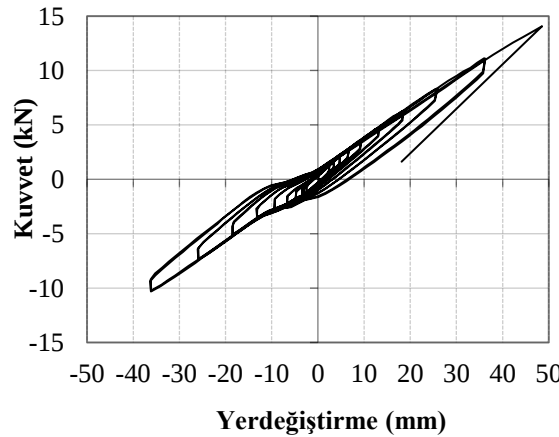
Şekil 2.17’de verilen tepe yerdeğiştirme geçmişi uygulanarak göçme yüküne kadar çevrimsel statik deney uygulanmıştır. Şekil 2.18’de 1 no’lu numuneye ait deney düzeneği sunulmuştur.

1 no’lu deney düzeneğinde kullanılan ölçüm aletleri Çizelge 2.2’de verilmiştir. Yerdeğiştirme ölçümlerinin yanısıra numune taban kesitinden şekildeğiştirme ölçümleri de yapılmıştır.

Hidrolik veren aracılığıyla numune tepe noktasına Şekil 2.17’de verilen yerdeğiştirme protokolü uygulanmıştır. Elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.19’da sunulmuştur.

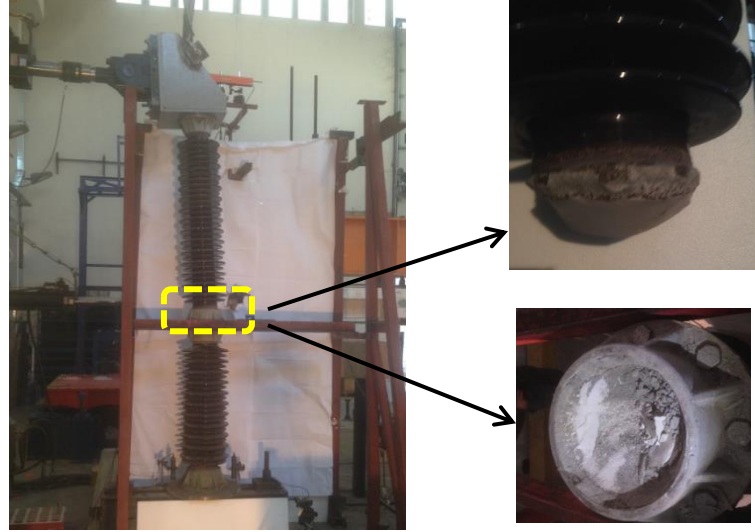
Çizelge 2.2 : Numune-1 statik deney düzeneği ölçüm aletleri.

Kanal No	Sensör Tipi	Açıklama
1	Yükölçer	Hidrolik veren yük ölçer
2	Yerdeğiştirme	Hidrolik veren yerdeğiştirme
30	CDP50	Taban düşey hareketi-Doğu
31	CDP50	Taban düşey hareketi-Batı
32	CDP25	Taban kayması
34	CDP100	Numune orta noktası yatay yerdeğiştirme
35	CDP50	Numune tepe noktası düzlem dışı yerdeğiştirme
36	SDP300	Numune tepe noktası yerdeğiştirme
40	SG-1	Numune taban kesiti şekildeğiştirme-Doğu
41	SG-2	Numune taban kesiti şekildeğiştirme-Batı



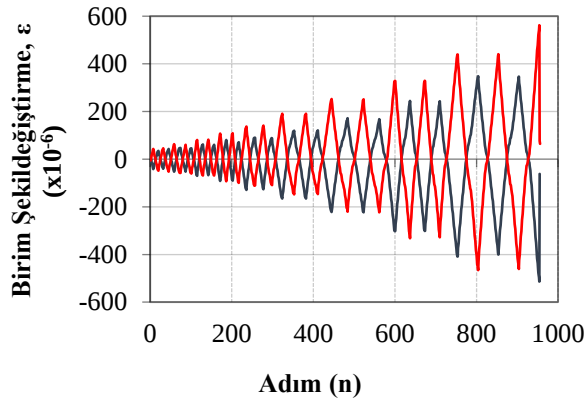
Şekil 2.19 : Numune-1 kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.

İki parçadan oluşan porselen elektrik izolatörü $\delta = 50$ mm tepe yerdeğiştirmesi değerine ulaşıldığında, üstteki parçanın taban kesitinden kırılmıştır. Kırılmanın gerçekleştiği kesit ve kırılma biçimi Şekil 2.20’de verilmiştir.



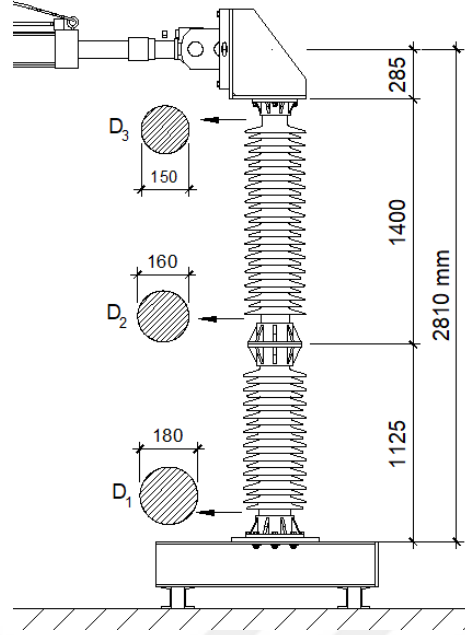
Şekil 2.20 : Numune-1 göçme durumu.

Numunenin taban kesitinde bulunan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan değerler Şekil 2.21’de verilmiştir. Taban kesitinde oluşan en büyük birim şekildeğiştirme değeri, $\varepsilon_{\max} = 521.10^{-6}$ ’dır.



Şekil 2.21 : Taban kesitinde oluşan birim şekildeğiştirme grafiği.

En büyük eğilme momenti numune tabanında oluşmasına karşın; göçme, üst parçanın pik döküm başlığa bağlandığı kesitte oluşmuştur. Porselen elektrik izolatörü çekirdek kesit çapı, Şekil 2.22’den görüldüğü gibi yükseklik boyunca azalmaktadır. Numune taban kesitinde (Kesit 1) ve göçmenin gerçekleştiği kesitte (Kesit 2) oluşan aksenal gerilme değerleri hesaplanmıştır. Göçme anında oluşan en büyük yatay kuvvet değeri $P_{\max} = 14.07 \text{ kN}$ olarak ölçülmüştür. Kesit 1 ve Kesit 2 ‘de oluşan eğilme momenti değerleri ise $M_1 = 14.07 \times 2.66 = 37.42 \text{ kNm}$ ve $M_2 = 14.07 \times 1.56 = 21.94 \text{ kNm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.22 : 1 no’lu numune kesit değişimi.

Kesit özellikleri, porselen elektrik izolatörü çekirdek bölgesinin çapı (D), atalet momenti (I) ve mukavemet momenti (W) olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$D_1=180 \text{ mm} \quad I_1 = \frac{\pi D^4}{64} = 51503850 \text{ mm}^4 \quad W_1 = \frac{\pi D^3}{32} = 572265 \text{ mm}^3$$

$$D_2=160 \text{ mm} \quad I_2 = \frac{\pi D^4}{64} = 32153600 \text{ mm}^4 \quad W_2 = \frac{\pi D^3}{32} = 401920 \text{ mm}^3$$

Kesitte oluşan gerilme değerleri;

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1} = \frac{37.42 \times 10^6}{572265} = 65.38 \text{ N/mm}^2 \quad (2.2)$$

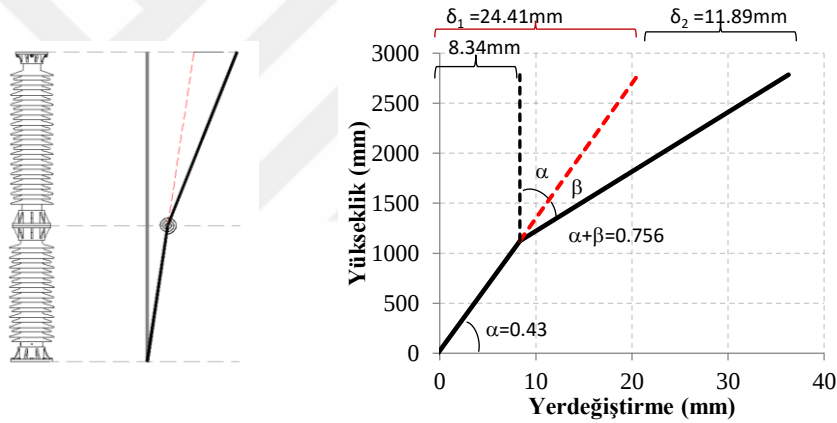
$$\sigma_2 = \frac{M_2}{W_2} = \frac{21.94 \times 10^6}{401920} = 54.58 \text{ N/mm}^2 \quad (2.3)$$

Porselen izolatör elastisite modülü (E) Denklem 2.4 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 2.4’de verilen birim şekildeğiştirme (ε), şekildeğiştirme ölçerler aracılığıyla kaydedilen büyüklük, gerilme (σ) ise Denklem (2.2) de hesaplanan değerdir.

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = 125668 \text{ N/mm}^2 \quad (2.4)$$

Porselen elektrik izolatörünün kesit özellikleri nedeniyle, 1 ve 2 nolu kesitlerdeki eksenel gerilme değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu durum, kırılmanın taban kesiti yerine 2 kesitinde oluşmasını açıklayabilir.

Ulaşılan en büyük yük düzeyinde, yükseklik boyunca gerçekleşen yerdeğiştirme dağılımı Şekil 2.23’de verilmiştir. Porselen izolatörün, bağlantı noktaları arasında rijit davrandığı kabulü ile düğüm noktalarında oluşan α ve β açıları Şekil 2.23’de gösterilmiştir. Gerçekleşen tepe yerdeğiştirmesi, porselen izolatörlerin bağlantı noktası esnekliğinden etkilenmektedir. Pik döküm birleşim aparatı ile porselen izolatörü arasında bulunan harç tabakasının davranışı tüm sistem rijitliğini etkilemektedir.

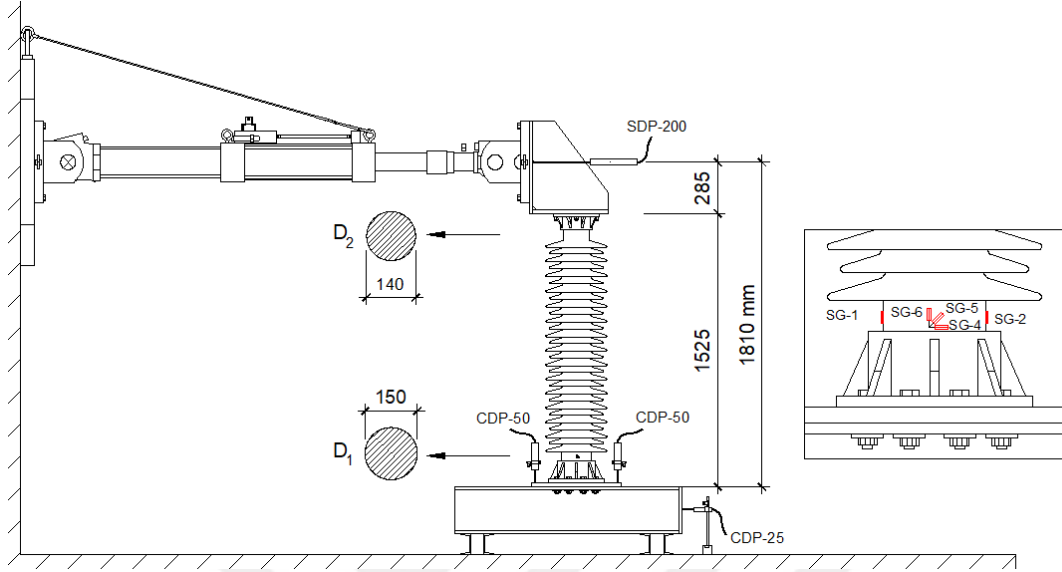


Şekil 2.23 : 1 no’lu numune en büyük yük durumuna karşı gelen yerdeğiştirme durumu.

2.3.4.2 Moment etkisinin göreceli olarak küçük olduğu statik itme deneyleri (numune-2)

Dinamik deneylerde de kullanılan ve üç parçadan oluşan porselen elektrik izolatörünün, $h_3=1500$ mm uzunluğundaki son parçası kullanılarak toplam moment kolu $h_t=1810$ mm olan bir konsol sistem oluşturulmuştur. Şekil 2.17’de verilen yerdeğiştirme protokolü uygulanarak göçme gerçekleşene kadar çevrimsel statik yükleme uygulanmıştır. Şekil 2.25’de 2 no’lu numuneye ait deney düzeneği yer almaktadır.

2 no'lu numuneye ait deneyde kullanılan ölçüm aletleri Çizelge 2.3'de verilmiştir. Yerdeğiştirme ölçümlerinin yanısıra numune taban kesitinden şekildeğiştirme ölçümleri de yapılmıştır.

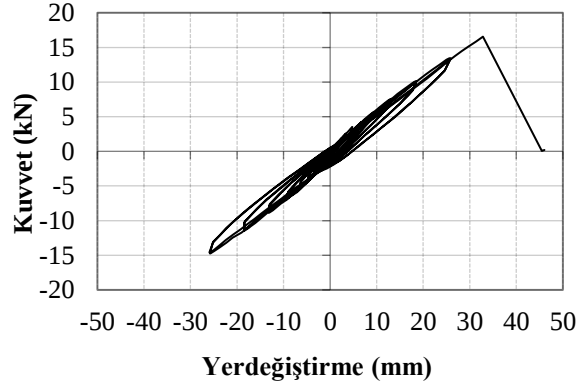


Şekil 2.24 : Numune-2 deney düzeneği.

Çizelge 2.3 : Numune-2 statik deney düzeneği ölçüm aletleri.

Kanal No	Ölçer Tipi	Açıklama
1	Yükölçer	Hidrolik veren yük ölçer
2	Yerdeğiştirme	Hidrolik veren yerdeğiştirme
30	CDP50	Taban düşey hareketi-Doğu
31	CDP50	Taban düşey hareketi-Batı
32	CDP25	Taban kayması
35	CDP50	Tepe noktası düzlem dışı yerdeğiştirme
36	SDP300	Tepe noktası yerdeğiştirme
40	SG-1	Taban kesiti şekildeğiştirme-Doğu
41	SG-2	Taban kesiti şekildeğiştirme-Batı
42	SG-4	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (0°)-Kuzey
43	SG-5	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (45°)-Kuzey
44	SG-6	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (90°)-Kuzey
45	SG-7	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (0°)-Güney
46	SG-8	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (45°)-Güney
47	SG-9	Taban kesiti kayma şekildeğiştirme (90°)-Güney

Elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme grafiği Şekil 2.25'de sunulmuştur. Porselen elektrik izolatörü, $\delta = 31.36$ mm tepe yerdeğiştirmesi değerine ulaşıldığı aşamada gevrek olarak kırılmıştır. Kırılma biçimine ait anlık görüntüler Şekil 2.26'da verilmiştir.



Şekil 2.25 : Numune-2 kuvvet-yerdeğiştirme grafiği.

Şekil 2.26'dan da görüldüğü gibi; numune, pik döküm birleşim aparatının üst kısmından eğimli bir şekilde gevrek olarak kırılmıştır. Numunenin taban kesitinde ve hareket doğrultusunda olan şekildeğiştirme ölçerlerden alınan değerler Şekil 2.27'de verilmiştir. Taban kesitinde oluşan en büyük birim şekildeğiştirme değeri, $\varepsilon_{\max} = 735.10^{-6}$, dır.



Şekil 2.26 : Numune-2 göçme durumuna ait anlık fotoğraflar.

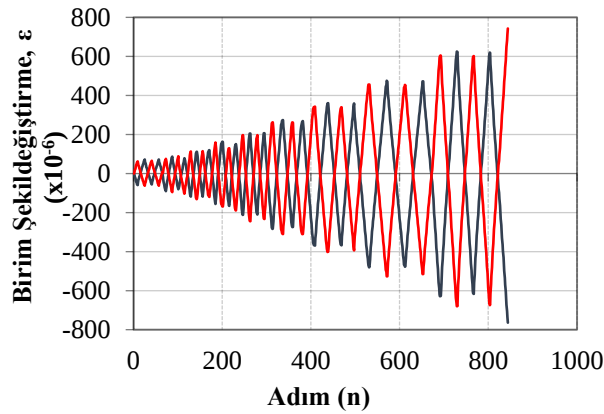
Porselen elektrik izolatörü kırılma yükü, $P_{\max} = 16.55 \text{ kN}$ olarak ölçülmüştür. Taban kesitinde oluşan moment $M_1 = 16.55 \times 1.71 = 28.30 \text{ kNm}$ olarak elde edilmiştir.

Kesit özellikleri, porselen elektrik izolatörü çekirdek bölgesinin çapı (D), atalet momenti (I) ve mukavemet momenti (W) olmak üzere aşağıdaki gibidir.

$$D_1 = 150 \text{ mm} \quad I_1 = \frac{\pi D^4}{64} = 24837890 \text{ mm}^4 \quad W_1 = \frac{\pi D^3}{32} = 331171 \text{ mm}^3$$

Kesitte oluşan gerilme değeri;

$$\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1} = \frac{27.42 \times 10^6}{331171} = 90.45 \text{ N/mm}^2 \quad (2.5)$$



Şekil 2.27 : Taban kesitinde oluşan birim şekildeğiştirme grafiği (hareket doğrultusunda)

Porselen izolatörün nominal elastisite modülü (E) Denklem 2.6 kullanılarak hesaplanmıştır. Denklemden, birim şekildeğiştirme (ε) ölçerler ile kaydedilen büyüklüğe, gerilme (σ) ise Denklem 2.5 ile hesaplanan değere karşı gelmektedir.

$$E_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = 123061 \text{ N/mm}^2 \quad (2.6)$$

2.4 Sarsma Masası Deneyleri

Geliştirilen sismik yalıtım cihazının etkinliğinin belirlenmesi için iki aşamalı dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir.

Birinci aşamada, çelik konsol bir kolonun sarsma masası üzerine ankastre ve prototip sismik yalıtım cihazı kullanılarak bağlandığı durumlar için dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir ve etkinliği irdelenmiştir.

İkinci aşamada ise 1/1 ölçekli ve çelik kafes sisteme bağlı porselen elektrik izolatörlerinin gerçek ivme kayıtları etkisindeki dinamik deneyleri üç farklı durum için gerçekleştirilmiştir. Birinci grup deneylerde porselen elektrik izolatörü çelik kafes sisteme rijit olarak bağlanmıştır. İkinci ve üçüncü grup deneylerde ise porselen elektrik izolatörü ile çelik kafes sistem arasına sırasıyla GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım cihazları yerleştirilmiştir.

2.4.1 Sarsma masası ve özellikleri

Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm dinamik deneylerde İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ARI-1 sarsma masası kullanılmıştır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 : ARI-1 sarsma masası ve tipik deney numunesi.

Tek serbestlik dereceli olan sarsma masasının genel özellikleri Çizelge 2.4'de yer almaktadır.

Çizelge 2.4 : İTÜ ARI-1 sarsma masası özellikleri.

Platform boyutları	2.35 m× 2.35 m
Maksimum numune ağırlığı	60 kN
Devrilme moment kapasitesi	320 kNm
Serbestlik derecesi	1D
Yerdeğiştirme kapasitesi	± 325 mm
Maksimum hız	1000 mm/s
Maksimum ivme	1.0g
Sürtünme katsayısı	1.50%

Sarsma masasının mevcut yerdeğiştirme kapasitesi pek çok gerçek deprem kaydını doğrudan uygulayabilecek düzeydedir. Yerdeğiştirme kapasitesinin aşılması durumu söz konusu olduğunda, ilgili kayıt leklendirilebilmektedir. ARI-1 sarsma masasının etkin olarak çalıştığı frekans bandı 0.1 Hz~15 Hz olarak belirlenmiştir. Genel olarak, sismik yer istasyonlarından alınan ivme kayıtları 10Hz düzeyindeki bir alçak geçirgen filtre ile filtrelendiğinden mevcut sarsma masasında başarılı olarak uygulanmaktadır.

Sarma masasının kontrolü, *TDG-Testlab ShakeTable* yazılımı ile komutlanan Controlbox nitesi ile yapılmaktadır. Bu tez çalışması öncesinde gerçekleştirilen çok sayıdaki hazırlık deneyinde masanın etkin komutlanma özelliği kontrol edilmiştir (Mahdavi, 2014).

2.4.2 Veri toplama sistemi ve yazılımı

Gerçekleştirilen dinamik deneylerde şekildeğiştirme, yerdeğiştirme ve ivme büyüklükleri ölçülmüştür. şekildeğiştirme ölçerler 120 ohm dirençli 5mm kapasiteli olarak seçilmiştir. Yerdeğiştirme ler olarak TML marka CDP25, CDP50 ve OPCON marka 700 mm ve 1250 mm kapasiteli potansiyometrik cetveller kullanılmıştır. Gerçekleşen masa ve numune ivmelerinin ölçülmesinde 2g kapasiteli, 3 eksenli Sensebox 70×3 ivme ölçerleri kullanılmıştır. Tüm sensörler 10m uzunluğundaki düşük gürültü özelliğine sahip kablolar ile topladıkları verileri aktarmaktadır.

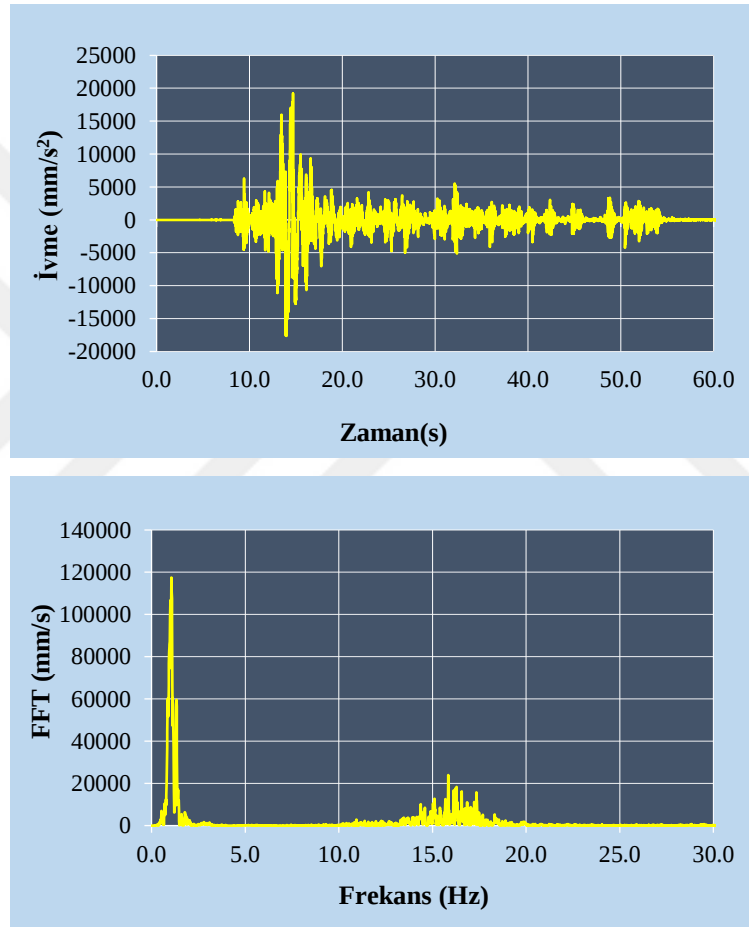
Farklı özellikteki sensörlerden gelen bilgiler iki adet 16 kanallı Testbox veri toplama kutusuna aktarılmaktadır. Veri toplama kutularının örnekleme aralığı 200 Hz'dir.

Veri toplama kutularının ürettiği bilgilerin depolanması ve işlenmesi amacıyla bu tez kapsamında bir yazılım geliştirilmiştir. Matlab ortamında hazırlanan *ARI-1 PP* ismi verilen yazılımın yaptığı işler aşağıda sıralanmıştır:

- Farklı özellikteki veri toplayıcılardan gelen tüm bilgilerin senkronize edilmesi,
- Her bir kanal için ayrı ayrı olmak üzere, merkeze çekme düzeltmelerinin yapılması,
- Her bir kanal için gelen sinyallerin fiziksel büyüklüğe dönüştürülmesi,
- Kaydın bütünü veya kullanıcı tarafından seçilmiş bir parçası için frekans filtrelemesi yapılması. Bu amaçla *Butterworth* (Giovanni, 2007) filtresi kullanılmaktadır. Filtre, alçak geçiren, yüksek geçiren ve belirli bir frekans bandını geçiren özelliklere sahiptir. Bu çalışmada kullanılan tüm sensörler için

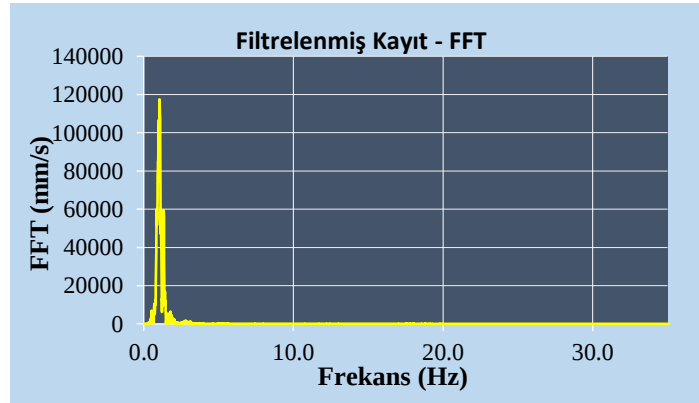
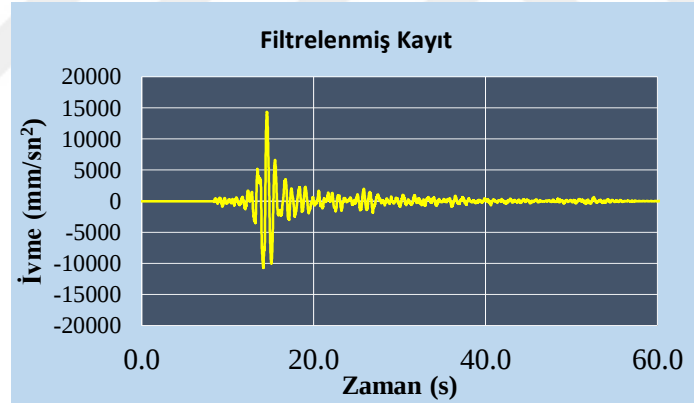
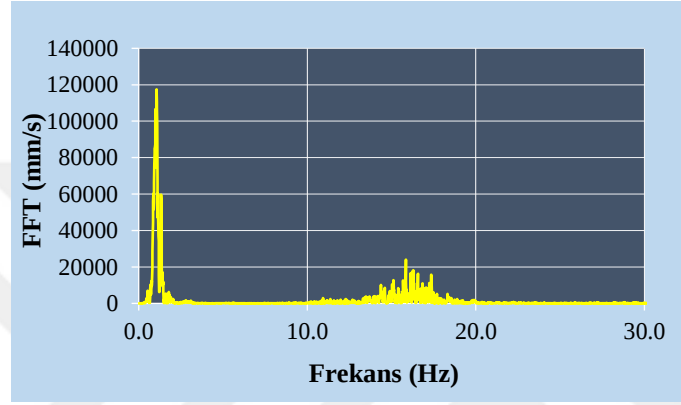
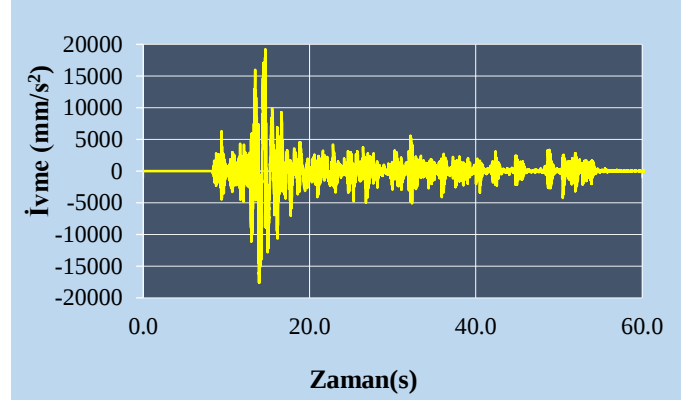
alçak geçiren filtre uygulanmıştır. Seçilen eşik frekans değerleri, şekildegıştırme ölçerler için 10 Hz, ivme ve yerdegıştırme ölçerlerde için 15 Hz'dir.

- Herhangi bir sensörden gelen kaydın bütünü veya kullanıcı tarafından seçilmiş bir parçası için *Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT)* yaparak, zaman tanım alanından frekans tanım alanına geçiş sağlanmaktadır. Bu şekilde, kayıt içerisindeki baskın frekanslar elde edilmektedir. Bu işleme karşı gelen program ekran görüntüsü Şekil 2.29'da verilmiştir.



Şekil 2.29 : ARI-1 PP yazılımının ekran görüntüsü.

- Yazılım, *Excell* formatında sonuç dosyaları oluşturmaktadır. Bu dosyaların sayısı kullanılan data toplama ünitelerinin sayısına karşı gelmektedir. *Excell* dosyaları içerisinde tüm sensörlerden gelen bilgiler sayısal olarak görülebildiği gibi, standart grafikler de üretilmektedir, Şekil 2.30.

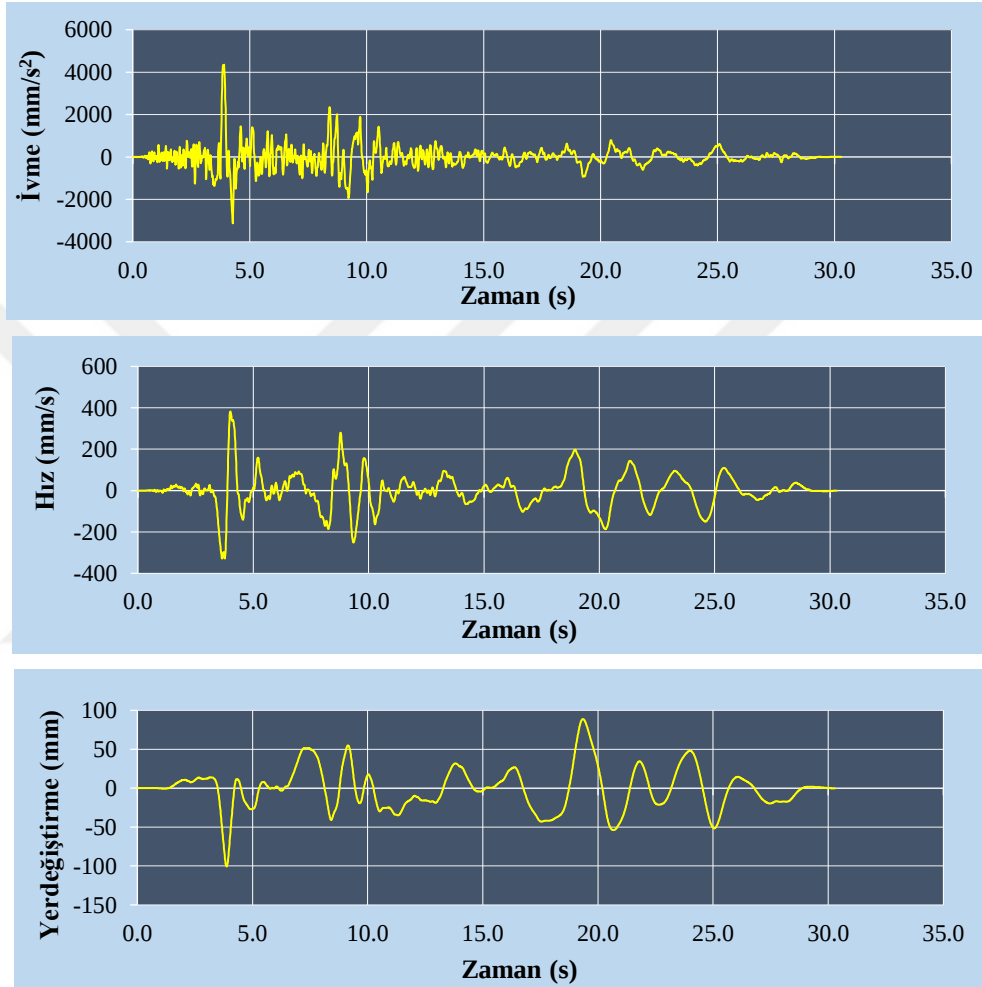


Şekil 2.30 : ARI-1 PP tipik Excell grafiği.

2.4.3 Deprem kayıtlarının işlenmesi için yazılım geliştirme ve seçilen kayıtlar

2.4.3.1 Deprem kayıtlarının işlenmesi için *IS-ISL* yazılımının geliştirilmesi

Bu çalışmanın deneysel ve sayısal bölümlerinde kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi ve özelliklerinin irdelenmesi amacıyla özgün bir işaret işleme yazılımı (*IS-ISL*) geliştirilmiştir.



Şekil 2.31 : *IS-ISL* yazılımına ait ivme, hız ve yer değiştirme dönüşümleri

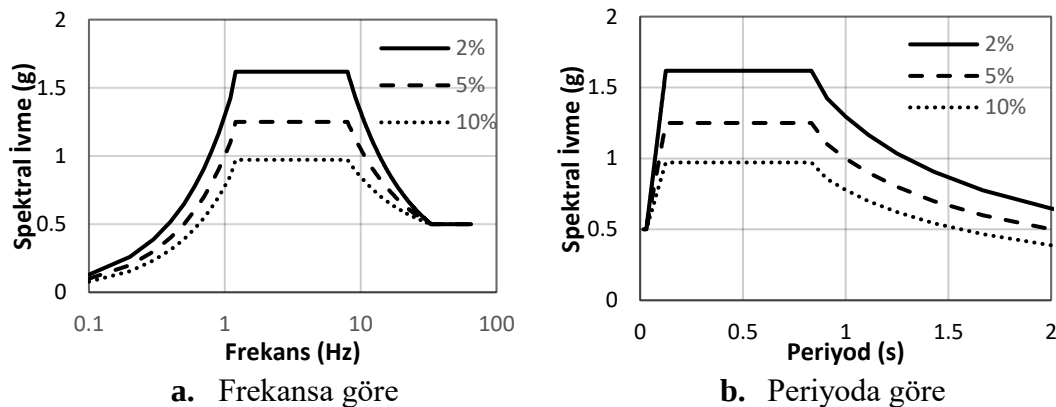
Matlab ortamında geliştirilen *IS-ISL* genel olarak aşağıda sıralanan işlemleri yapabilmektedir. *IS-ISL* yazılımına ait tipik ekran görüntülerinden biri Şekil 2.31’de verilmiştir.

- Deprem kayıtlarının yer aldığı farklı veri bankalarının standart dosya formatlarına uyumlu veri kabul edebilmesi,
- Alınan ivme kayıtlarının hız ve yer değiştirme kayıtlarına dönüştürülmesi,

- Elastik ivme, hız ve yerdeğiştirme spektrum eğrilerinin kullanıcı tarafından belirlenen bir sönüm oranına göre oluşturulması,
- Seçilen zemin ve depremsellik özellikleri için TBDY-2018 ve IEEE-693 yönetmeliklerine göre hedef ivme spektrumlarının oluşturulması.
- Geliştirilen bir algoritma ile seçilen ivme kaydının hedef ivme spektrumuna göre ölçeklendirilmesi.
- Zaman tanım alanından frekans tanım alanına geçiş için FFT analizi,
- Literatürde tanımlanmış farklı deprem büyüklük ölçütlerini kullanarak kayıt analizi yapılması,
- İlgili kaydın, masa yerdeğiştirme sınırı (± 325 mm) ile hız sınırına (1000 mm/s) uygun olup olmadığının kontrol edilmesi,

2.4.3.2 Deprem kayıtlarının seçilmesi

Yüksek gerilim hatlarında kullanılan ekipmanların deprem performansının belirlenmesine yönelik olarak farklı uluslararası kriterler bulunmakla beraber, bu tez çalışmasında IEEE-693 (2005)'de verilen koşullar esas alınmıştır. IEEE-693 (2005)'in yüksek performans düzeyi için önerdiği ivme spektrumu üç farklı sönüm oranı (%2, %5, %10) için frekans ve periyod tabanlı olarak verilmiştir (Şekil 2.32). Deneysel olarak gösterilmediği sürece porselen elektrik izolatörleri için %2 düzeyindeki bir sönüm oranının kullanımı önerilmektedir.



Şekil 2.32 : IEEE-693'de verilen yüksek performans seviyesi için spektral ivme.

IEEE-693'de yüksek gerilim ayırıcılarının deprem performansının belirlenmesi için seçilecek ivme kayıtlarında aşağıdaki özelliklerin bulunması istenmektedir.

- Porselen elektrik izolatörler için teorik sönüm oranı %2 olarak dikkate alınmalıdır.
- Seçilecek deprem ivme kaydında etkin yer hareketinin süresi ($t=0.5 \sim t=0.95$) 20s'den az olmamalıdır.
- Seçilecek deprem ivme kaydında veri adım aralığı 25 Hz'den büyük olmalıdır.

Sıralanan bu koşulları sağlayacak şekilde, FEMA P-695 (2009)'da uzak depremler olarak tanımlanan (fay kırığına olan mesafenin 10km'den büyük olduğu) kuvvetli yer hareketi setleri seçilmiştir. Seçilen deprem ivme kayıtları Çizelge 2.5'de verilmiştir. Her kayıt ismi, X ve Y ana doğrultuları için iki alt kayıt içermektedir. Bu sebeple $22 \times 2 = 44$ adet kayıt incelenmiştir.

Çizelge 2.5 : FEMA P-695 veri seti.

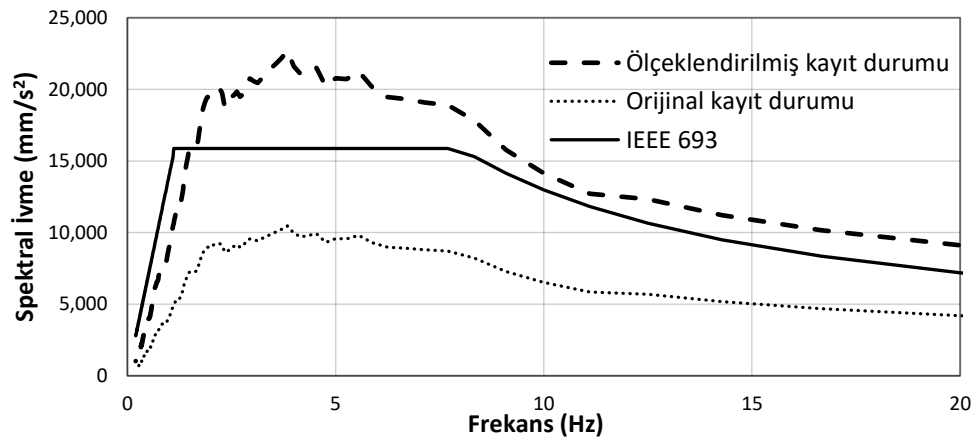
Deprem ID	Deprem			KAYIT İSTASYONU	
	M	YIL	ADI	İSTASYON	Veri Kaynağı
12011	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	USC
12012	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	USC
12041	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	ERD
12052	7.1	1999	Hector Mine	Hector	SCSN
12061	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	UNAMUCSD
12062	6.5	1979	Imperial Valley	El Centro Array #11	USGS
12071	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	CUE
12072	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	CUE
12081	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	ERD
12082	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	KOERI
12091	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	CDMG
12092	7.3	1992	Landers	Coolwater	SCE
12101	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	CDMG
12102	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	CDMG
12111	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	BHRC
12121	6.5	1987	Superstition Hills	El Centro Imp. Co.	CDMG
12122	6.5	1987	Superstition Hills	Poe Road (temp)	USGS
12132	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	CDMG
12141	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	CWB
12142	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	CWB
12151	6.6	1971	San Fernando	LA - Hollywood Stor	CDMG
12171	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	--

Çizelge 2.5’de sıralanan tarihsel ivme kayıtlarının IEEE-693’de yüksek performans düzeyi için önerilen ivme spektrumuna uygun hale getirilmesi amacıyla ölçeklendirme çalışması yapılmıştır. İncelenen yüksek gerilim izolatörlerinin ankastre mesnetlenmesi ve sismik yalıtım cihazı üzerine bağlanması durumlarında gerçekleşen etkin sistem frekansları 1~8 Hz aralığındadır. Bu aralıkta, çalışılan deprem kaydına ait spektral ivme değerlerinin geometrik ortalaması ile hedef ivme spektrumunun geometrik ortalamasının birbirine eşit olması kriteri esas alınarak ölçeklendirme işlemi yapılmıştır. Ölçek katsayısı (SF) için oluşturulan ifade aşağıda verilmiştir.

$$SF = \frac{\text{Geometrik ortalama}(S_{a,IEEE-693})}{\text{Geometrik ortalama}(S_{a,kayıt})}; (f_1 = 1 \text{ Hz}; f_2 = 9 \text{ Hz}) \quad (2.7)$$

Çizelge 2.5’de sıralanan tüm kayıtlar için ölçeklendirme öncesi en büyük ivme ve en büyük yerdeğiştirme büyüklükleri Çizelge 2.6’da yer almaktadır. Deneylerin gerçekleştirildiği ARI-1 sarsma masası yerdeğiştirme kapasitesi $\pm 325\text{mm}$ olduğundan, bu sınır değeri aşan depremler çalışmanın deneysel bölümde kullanılamamıştır. Bu kayıtlar, Çizelge 2.6’nın son kolonunda “kapasite ötesi” olarak tanımlanmıştır. Denklem 2.6’de tanımlanan ölçek katsayısı, tüm deprem kayıtlarının bileşenleri için oluşturularak Çizelge 2.6’nın ilgili kolonunda verilmiştir.

FEMA P695’de verilen 22 çift deprem kaydının elastik ivme spektrumlarının geometrik ortalaması, ölçek katsayıları ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtlarının elastik ivme spektrumlarının geometrik ortalaması ve hedef tasarım spektrumu (IEEE 693) Şekil 2.33 de birlikte verilmiştir.



Şekil 2.33 : IEEE-693 hedef spektrumu ve 22×2 deprem kaydına ait ortalama spektrum eğrileri.

Çizelge 2.6 : FEMA P-695 ivme kayıt seti deprem özellikleri ve ölçek katsayıları.

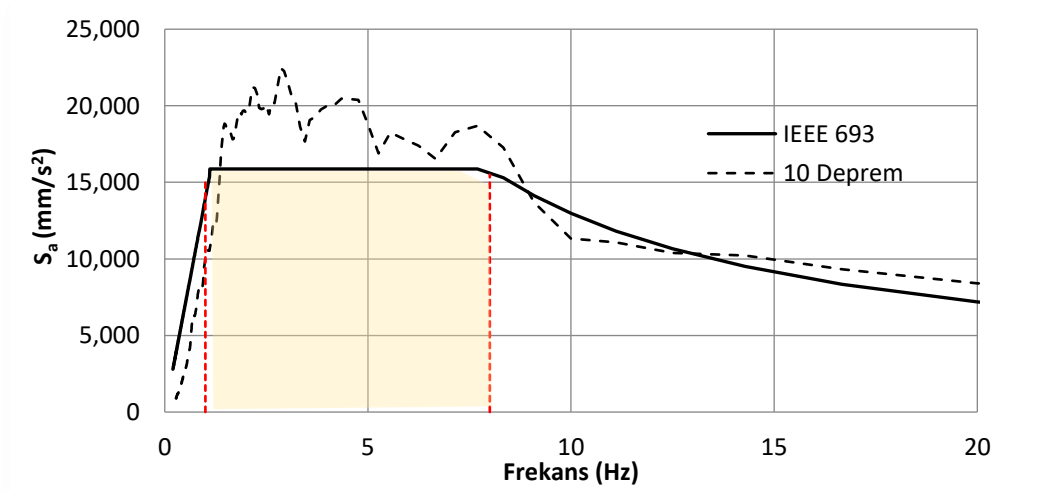
Deprem	İstasyon	PGA (mm/s ²)	Toplam En Büyük Yerd. (ölçeklendirilmemiş) (mm)	Ölçek Kats.	Yerdeğiştirme Kapasitesi
NORTHR	MUL009	4078.83	254.23	1.18	Uygun
NORTHR	MUL279	5066.44	220.16	1.03	Uygun
NORTHR	LOS000	4022.50	200.18	1.65	Uygun
NORTHR	LOS270	4728.44	186.29	1.35	Uygun
DUZCE	BOL000	7137.57	372.10	1.05	Uygun
DUZCE	BOL090	8068.03	222.24	1.12	Uygun
HECTOR	HEC000	2605.34	98.67	4.37	Uygun
HECTOR	HEC090	3303.70	52.21	2.79	Uygun
IMPVALL	H-DLT262	2332.42	226.29	2.28	Uygun
IMPVALL	H-DLT352	3444.48	346.01	1.94	Kapasite ötesi
IMPVALL	H-E11140	3570.62	285.89	2.34	Kapasite ötesi
IMPVALL	H-E11230	3723.67	347.16	2.19	Kapasite ötesi
KOBE	NIS000	4996.61	179.36	1.34	Uygun
KOBE	NIS090	4931.97	196.18	1.61	Uygun
KOBE	SHI000	2386.12	158.74	2.43	Uygun
KOBE	SHI090	2078.90	138.33	2.69	Uygun
KOCAELI	DZC180	3061.98	733.16	2.16	Kapasite ötesi
KOCAELI	DZC270	3510.76	328.75	1.90	Uygun
KOCAELI	ARC000	2146.78	246.95	6.28	Kapasite ötesi
KOCAELI	ARC090	1470.52	697.19	6.25	Kapasite ötesi
LANDERS	YER270	2401.52	739.06	2.62	Kapasite ötesi
LANDERS	YER360	1486.49	475.49	3.47	Kapasite ötesi
LANDERS	CLW-LN	2774.51	238.39	2.19	Uygun
LANDERS	CLW-TR	4089.69	271.82	1.50	Uygun
LOMAP	CAP000	5184.77	161.96	1.31	Uygun
LOMAP	CAP090	4348.70	93.92	1.63	Uygun
LOMAP	G03000	5444.79	155.55	1.65	Uygun
LOMAP	G03090	3603.82	268.84	2.36	Kapasite ötesi
MANJIL	ABBAR—L	5047.85	281.93	1.69	Uygun
MANJIL	ABBAR—T	4869.21	413.24	1.65	Kapasite ötesi
SUPERST	B-ICC000	3510.56	283.13	2.29	Kapasite ötesi
SUPERST	B-ICC000	2534.24	337.50	4.04	Kapasite ötesi
SUPERST	B-POE270	4378.46	167.63	2.09	Uygun
SUPERST	B-POE360	2945.86	203.38	2.26	Uygun
CAPEMEND	RIO270	3780.97	317.35	1.87	Uygun
CAPEMEND	RIO360	5384.97	276.35	1.64	Uygun
CHI-CHI	CHY101-E	3461.82	720.07	1.95	Kapasite ötesi
CHI-CHI	CHY101-N	4317.41	624.84	1.44	Kapasite ötesi
CHI-CHI	TCU045-E	2023.04	1344.82	3.77	Kapasite ötesi
CHI-CHI	TCU045-N	1418.58	832.38	3.62	Kapasite ötesi
SFERN	PEL090	2058.88	222.11	3.56	Kapasite ötesi
SFERN	PEL180	1708.70	124.53	5.05	Uygun
FRIULI	A-TMZ000	3446.54	68.98	2.63	Uygun
FRIULI	A-TMZ270	3088.28	101.14	1.84	Uygun

Çizelge 2.6’da yer alan ölçek katsayılarının 1.03~6.28 aralığında değiştiği görülmektedir. Ölçeklendirme işleminde deprem enerjisinin aşırı artırılmaması için, ölçeklendirme katsayıları 1.03 ~ 3.00 aralığında olan toplam 10 kayıt seçilerek, bu tez çalışmasının deneysel ve sayısal bölümlerinde kullanılmıştır. Bu kayıtlar Çizelge 2.7’de yer almaktadır.

Çizelge 2.7 : Deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan deprem ivme kayıtları ve özellikleri.

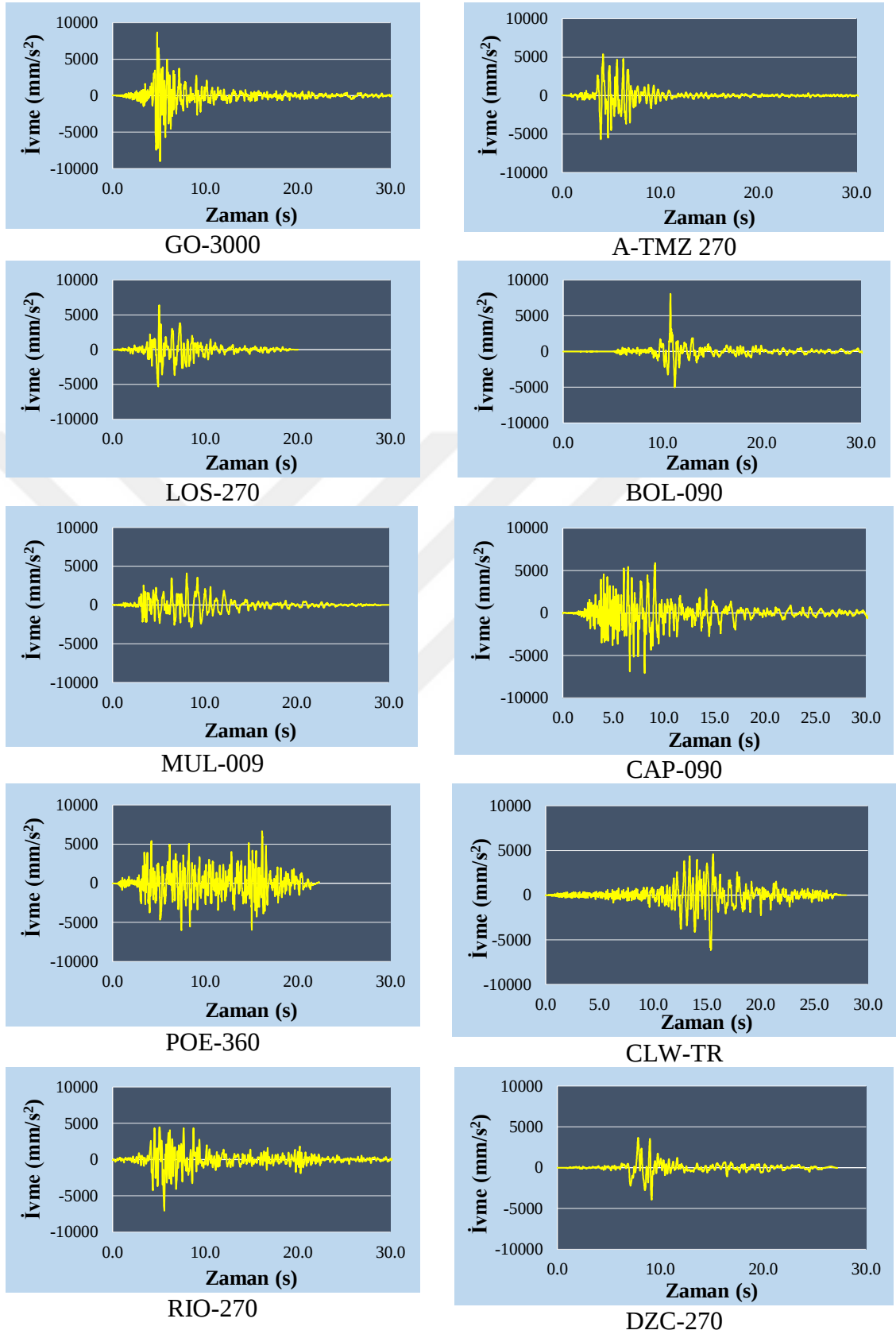
ID	Deprem	İstasyon	PGA (mm/s ²)	Ölçek Kats.
12011-X	NORTHR	MUL009	4078.83	1.18
12012-Y	NORTHR	LOS270	4728.44	1.35
12041-Y	DUZCE	BOL090	8068.03	1.12
12081-Y	KOCAELI	DZC270	3510.76	1.90
12092-Y	LANDERS	CLW-TR	4089.69	1.50
12101-Y	LOMAP	CAP090	4348.70	1.63
12102-X	LOMAP	G03000	5444.79	1.65
12122-Y	SUPERST	B-POE360	2945.86	2.26
12132-X	CAPEMEND	RIO270	3780.97	1.87
12171-Y	FRIULI	A-TMZ270	3088.28	1.84

10 kayıttan oluşan bu gruba ait ortalama spektrum eğrisi, karşı gelen hedef spektrum eğrisi (IEEE 693) ve 1 Hz ~ 8 Hz’e karşı gelen sınırlar Şekil 2.34’de verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, 1 Hz ~ 8 Hz aralığında ortalama spektrum eğrisinin büyük ölçüde hedef spektrum eğrisinin üzerinde kalmaktadır.



Şekil 2.34 : IEEE-693 hedef spektrumu ve seçilen 10 deprem kaydına ait ortalama spektrum eğrisi.

Seçilen deprem kayıtlarına ait ivme geçmişleri şekil 2.35’de verilmiştir.



şekil 2.35 : Seçilen 10 kayıt için ölçeklendirilmiş ivme - zaman grafikleri.

2.4.4 Sismik yalıtım cihazı için sarma masası prototip deneyleri

Technical drawing of a structure with a total height of 3005 mm. The drawing includes a side elevation and two cross-sections, A-A and B-B.

Side Elevation: The structure has a total height of 3005 mm. The top section is a trapezoidal container labeled "Kıvrak Kütü" (Curved Container). The main body is a vertical column. The base is a rectangular foundation with a width of 400 mm and a height of 20 mm. The base is supported by four legs, each with a height of 140 mm. The base is labeled "A-A KESİTİ".

Cross-Section A-A: This section shows the top of the structure. It is a trapezoidal container with a width of 90 mm and a height of 80 mm. It is labeled "Kıvrak Kütü" and "2UNP80".

Cross-Section B-B: This section shows the main body of the structure. It is a circular cross-section with a diameter of 125 mm. The wall thickness is 20 mm. It contains four reinforcement bars, each with a diameter of 16 mm (4-M16 D16). The section is labeled "B-B KESİTİ".

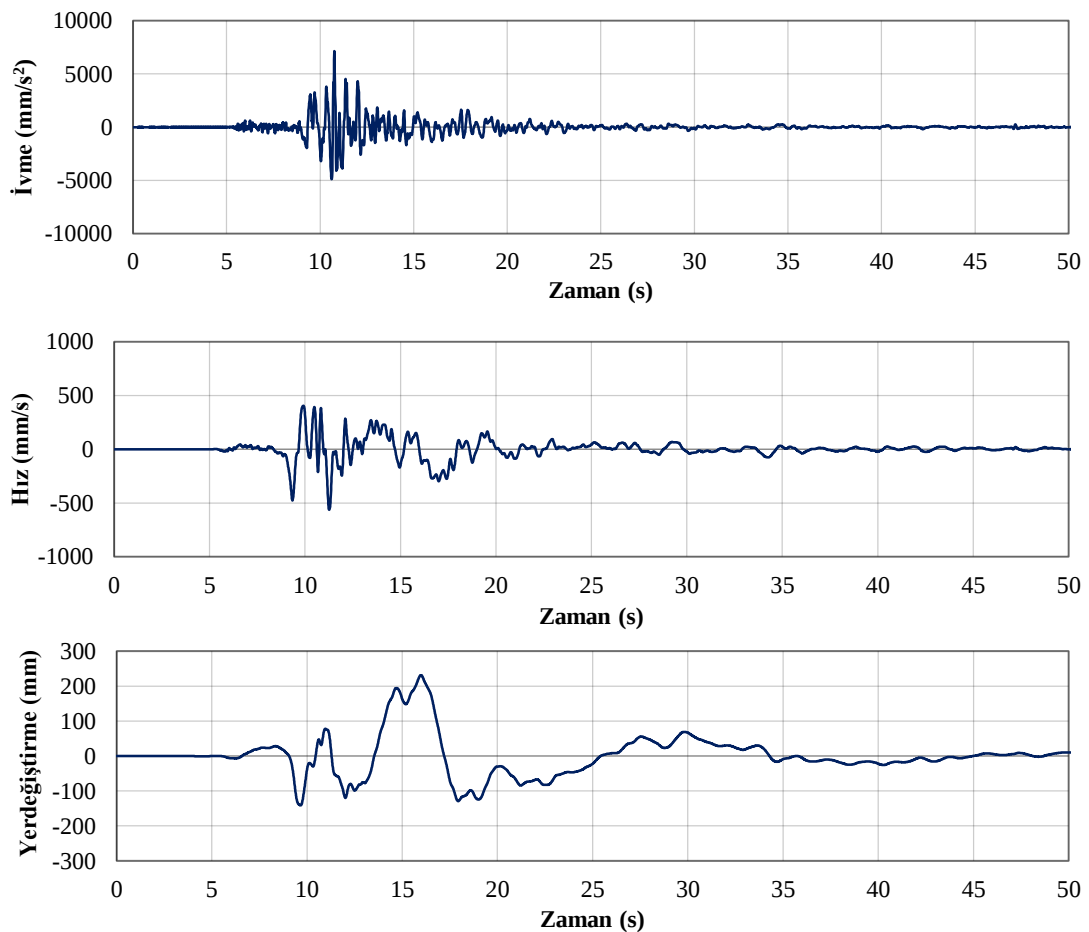
Şekil 2.37 : Ankastre mesnetlenmiş ve sismik yalıtım cihazına bağlanmış çelik kolonlar.

Deneyler iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

- Aşama 1 : Ankastre mesnetlenme durumu
- Aşama 2 : Sismik yalıtım cihazı ile mesnetlenme durumu

Prototip sismik yalıtım cihazı, 20 mm kalınlığında 400 mm çapında alt ve üst plaka, bu plakalar arasına 40 kN luk öngerme kuvveti ile sıkıştırılmış dört adet 60 mm çapında ve 110 mm boyunda poliüretan yay ve merkezde bulunan Ø14 mm gergi çubuğundan oluşmaktadır. %90 sertlikteki (Shore) poliüretan yayların cihaz merkezine olan mesafesi 150 mm'dir.

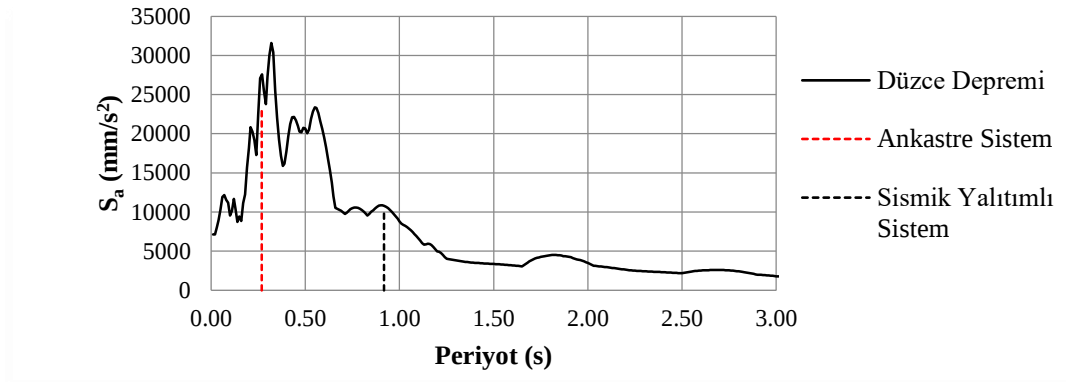
Her iki mesnetlenme durumu için yapılan deneylerde 1999 Düzce Depremi Bolu istasyon kaydı kullanılmıştır. BOL000 kaydına ait özellikler Şekil 2.38'de yer almaktadır.



Şekil 2.38 : Düzce Depremi (BOL000) ivme, hız ve yerdeğiştirme grafikleri.

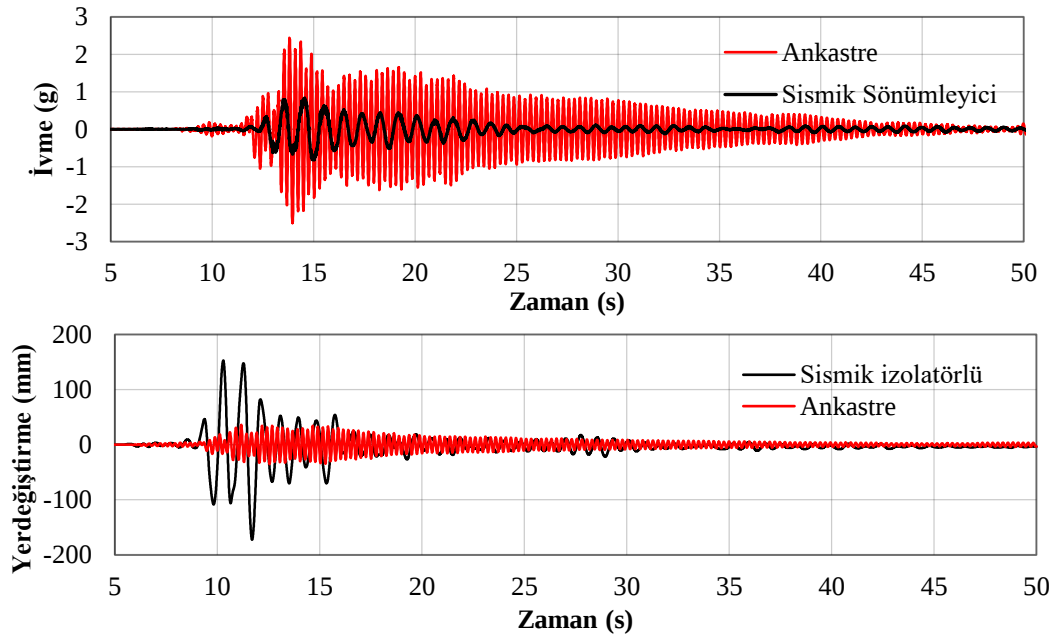
Farklı mesnetlenme durumlarına sahip iki sistemin etkin titreşim periyotları, serbest titreşim deneyleri ile belirlenmiştir. Ankastre mesnetlenme durumu için 0.269 s,

sismik izolasyonlu durum için 0.917 s değerleri elde edilmiştir. Kullanılan ivme kaydı için oluşturulan elastik ivme spektrumu eğrisi üzerinde bu iki kritik periyod büyüklüğü gösterilmiştir, Şekil 2.39.



Şekil 2.39 : Düzce Depremi Bolu istasyon kaydı ivme spektrumu, ankastre ve sismik yalıtımlı sistem periyodları

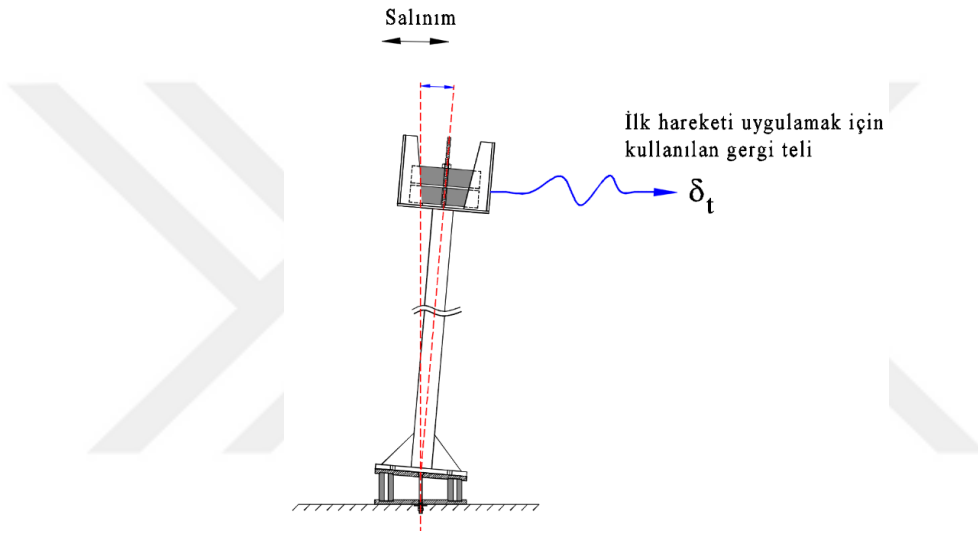
Her iki mesnetlenme durumu için çelik kolon üst ucunda yükleme doğrultusunda ölçülen yatay ivme ve yerdeğiştirmeler Şekil 2.40'da karşılaştırılmıştır. Ankastre mesnetlenme durumunda ölçülen en büyük tepe ivme değeri 2.5 g iken, sismik yalıtım cihazlı durumda ölçülen değer 0.83 g'dir. Sismik yalıtım cihazı kullanılan durumda tepe ivmesi %70 mertebesinde küçülmüştür. Tepe yerdeğiştirmesi için yapılan karşılaştırmada, en büyük yerdeğiştirmeler ankastre durumda 36.07 mm, sismik yalıtım cihazı kullanılan durumda 155.12 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.40 : BOL000 deprem ivme kaydı için tepe ivme ve yerdeğiştirme karşılaştırması.

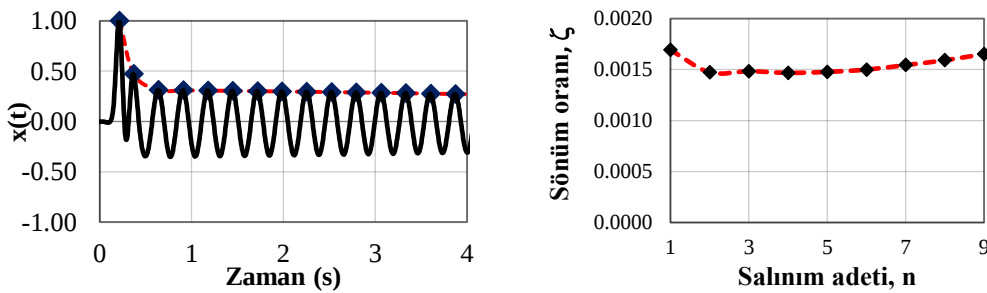
Elde edilen sonuçlara göre, porselen elektrik izolatörünü temsil eden çelik kolon üzerindeki ivmelenmenin, dolayısıyla oluşan atalet kuvvetlerinin önemli ölçüde azaltılabildiği görülmektedir. Buna karşın sismik yalıtım cihazı kullanılan durumda oluşan tepe yerdeğiştirmelerinin büyüdüğü dikkate alınmalıdır.

Her iki mesnetlenme durumu için gerçekleşen sönüm oranlarının belirlenmesi için yapılan serbest titreşim deneyleri, çelik kolon tepe noktasına bağlanan gergin bir kablonun koparılarak sistemin titreşime sokulması ve logaritmik azalım prensibine göre değerlendirilmesiyle yapılmıştır. Bu amaç için oluşturulan deney düzeneği Şekil 2.41’de verilmektedir.



Şekil 2.41 : Serbest titreşim özelliklerini belirlemeye yönelik deney düzeneği.

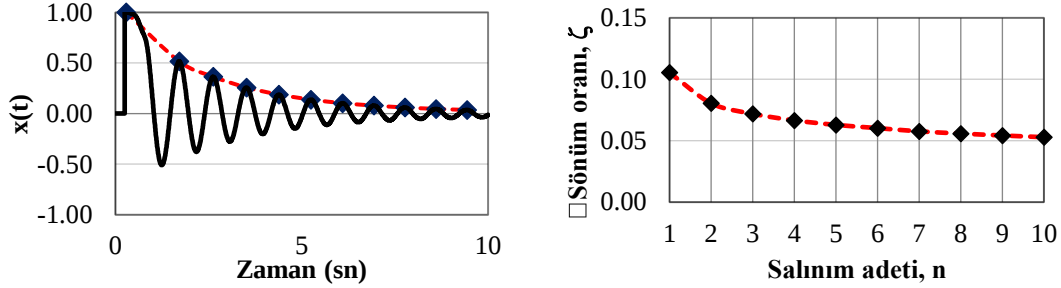
Ankastre durumda elde edilen normalleştirilmiş tepe yerdeğiştirme ($x(t)$) geçmişi ve değerlendirmede kullanılan farklı salınım sayısına bağlı olarak elde edilen sönüm oranları (ζ) Şekil 2.42’de verilmiştir.



Şekil 2.42 : Ankastre mesnetlenme durumu için deney sonuçları.

Ankastre durumda elde edilen sönüm oranının %0.2 mertebesinde olduğu görülmektedir.

Sismik izolasyon cihazının kullanıldığı durumda elde edilen deneysel sonuçlar da Şekil 2.43’de verilmektedir. Elde edilen ζ sönüm oranlarının %5 ~ %8 aralığında değiştiği görülmektedir.



Şekil 2.43 : Sismik yalıtım cihazı kullanılan sistemin serbest titreşimi.

Elde edilen sonuçlara göre önerilen sismik yalıtım cihazı hem etkin yapı periyodunun uzamasını hem de sistem davranışına ilave sönüm özelliği katılmasını sağlamaktadır.

2.4.5 Sismik yalıtım cihazı için sarsma masası deneyleri

Sismik yalıtım cihazının davranışını anlamaya yönelik olarak gerçekleştirilen prototip deneylerin ardından gerçek porselen izolatör ve boyutları iyileştirilmiş sismik yalıtım cihazı kullanılarak 1/1 ölçekli dinamik deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, 4000 mm uzunluğunda üç parçadan oluşan toplam 4297 N ağırlığa sahip 550 kV porselen elektrik izolatörleri kullanılarak üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

Bu aşamalar;

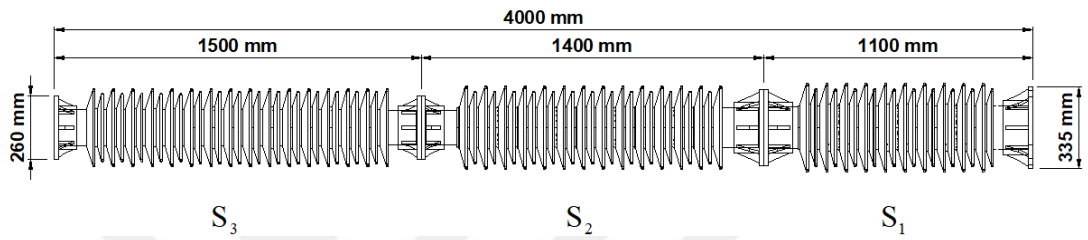
Aşama 1: Porselen elektrik izolatörünün çelik kafese rijit olarak bağlandığı durumda gerçekleştirilen deneyler,

Aşama 2: Porselen elektrik izolatörü ile çelik kafes bağlantısında *yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1)* kullanıldığı durumda gerçekleştirilen deneyler,

Aşama 3: Porselen elektrik izolatörü ile çelik kafes bağlantısında *düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-2)* kullanıldığı durumda gerçekleştirilen deneylerdir.

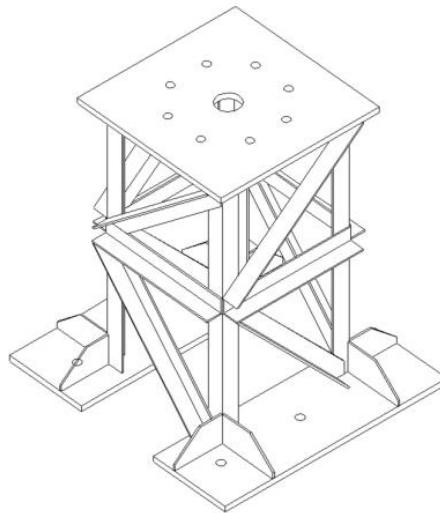
Sismik yalıtımlı ve ankastre mesnetli numunelerin sarsma masası üzerindeki deneyleri sırasında, çalışılan depremin numunelere vereceği etkileri adım adım izleyebilmek amacıyla, deprem kayıtları sırasıyla %33, %66, %100 ve Çizelge 2.7’de verilen ölçek katsayıları (SF) kullanılarak ölçeklendirilmiştir.

Konik geometriye sahip 550 kV porselen elektrik izolatörü, üç parçadan (S1, S2, S3) meydana gelmektedir (Şekil 2.44). Her bir parça dairesel dolu gövdeli bir çekirdeğe sahiptir ve bu bölüm elemanın ana taşıyıcı yapısını oluşturmaktadır. Dairesel kesitli her bir izolatör parçası, pik döküm demirden yapılmış birleşim elemanına özel dolgu harcıyla bağlanmaktadır. Üç parça birbirlerine 8×M16 8.8 kalite civata ile bağlanmaktadır. Mesnet kesiti konumundaki S1 izolatörünün taşıyıcı gövde çapı 180mm'dir. S1, S2 ve S3 parçalarının ağırlıkları sırasıyla 1403 N, 1462 N ve 1432 N dur. Literatürdeki genel yaklaşım izlenerek porselen elektrik izolatörü üzerinde ilave ağırlık ve kablo etkisi dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.44 : 550 kV porselen elektrik izolatörü.

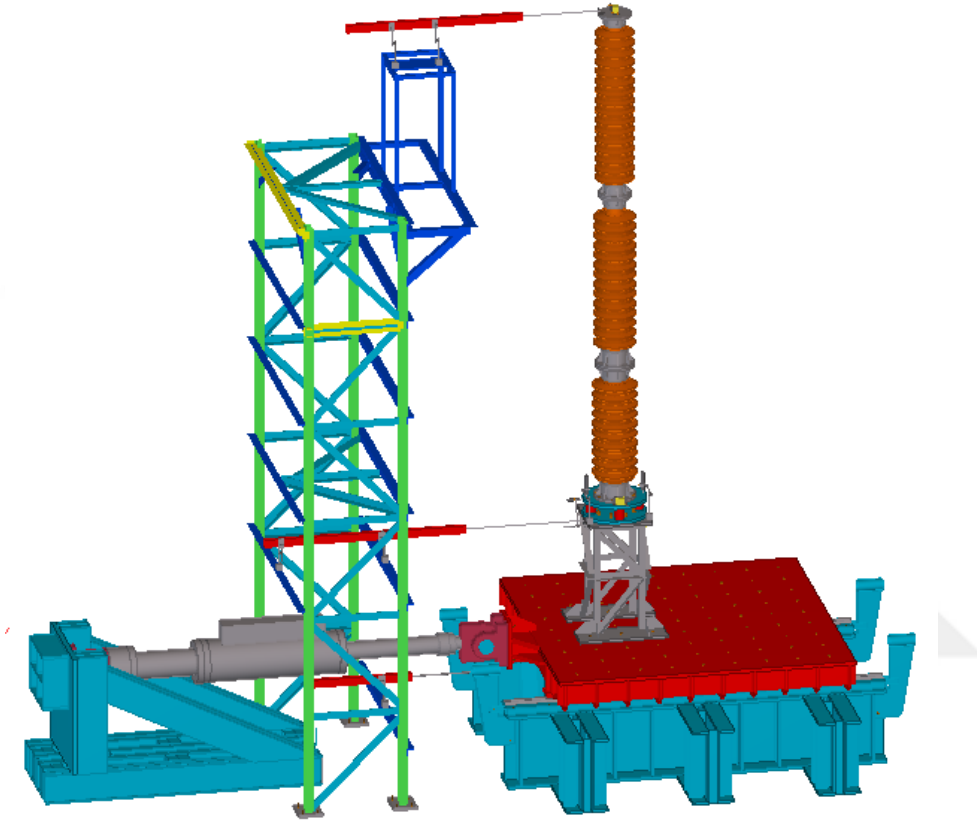
Gerek ankastre gerekse sismik izolasyonlu durumlar için porselen elektrik izolatörü uygulamaya benzer şekilde bir kafes sistem üzerine mesnetlenmiştir. Yüksekliği 920 mm olan, L50×50×5 çelik profillerden oluşturulan kafes taşıyıcı sistemin plan boyutları 400 mm×400 mm'dir. Kafes taşıyıcı sistemin üzerinde yatay elemanlara kaynaklanmış t=20 mm et kalınlığında ve 500 mm×500 mm plan boyutlarında bir levha bulunmaktadır. Bağlantı amacıyla, bu levha üzerinde 8 adet Ø20 delik açılmıştır (Şekil 2.34).



Şekil 2.45 : Çelik kafes sistem.

2.4.5.1 Sarsma masası deney ve ölçüm düzeneği

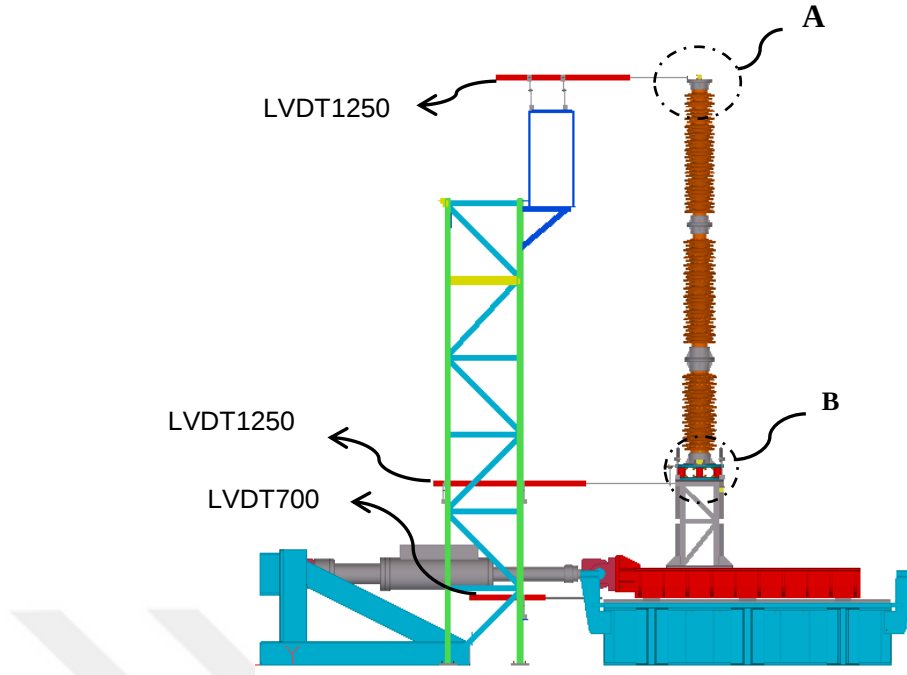
Yüksek gerilim porselen elektrik izolatörlerinin üç farklı mesnetlenme durumu için dinamik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Genel deney düzeneği Şekil 2.46’da verilmiştir. Deney düzeneği; sarsma masası, hidrolik veren, referans çerçeve ve numuneden meydana gelmektedir.



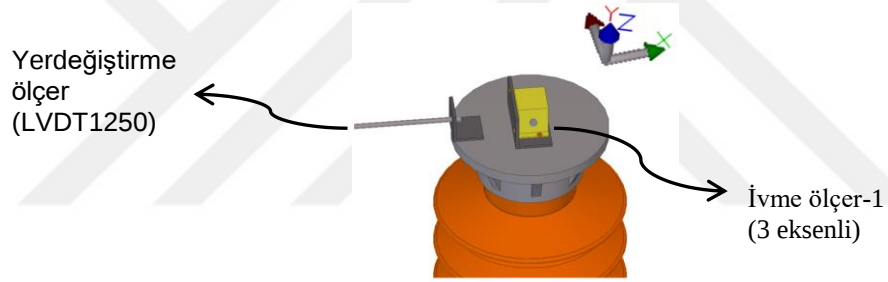
Şekil 2.46 : Sarsma masası deney ve ölçüm düzeneği.

Deneylerde farklı büyüklükleri ölçmek amacıyla çeşitli ölçüm aletleri kullanılmıştır. Şekil 2.46 ve Şekil 2.47’de görülen üç adet yatay yerdeğiştirme ölçer sırasıyla sarsma masasının, porselen izolatör taşıyıcı kafes sisteminin ve numune tepesinin masa hareket doğrultusundaki yatay yerdeğiştirmelerini ölçmek amacıyla kullanılmıştır.

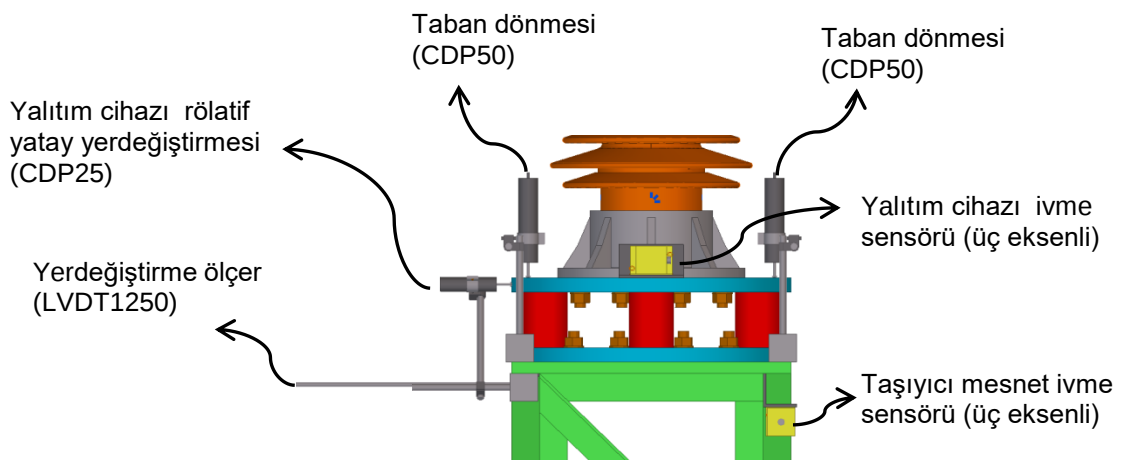
Numunelerin farklı kotlarında gerçekleşen ivmeleri kaydetmek amacıyla $\pm 2g$ ölçüm kapasiteli üç eksenli ivme ölçerler kullanılmıştır. İvme ölçerler sarsma masası üzerinde ve Şekil 2.47’de işaretlenen A ve B bölgelerinde kullanılmıştır. A bölgesinde numune tepesindeki ivmelenmeler kaydedilirken, B bölgesinde sismik izolasyon cihazı alt ve üst kotlarındaki ivmelenmeler kaydedilmiştir. Ayrıca B bölgesinde sismik izolasyon cihazının görelî yatay hareketini ve dönmesini ölçebilmek için üç adet yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır (Şekil 2.48).



Şekil 2.47 : Sarsma masası deneylerinde kullanılan yerdeğiştirme ölçerler.



a. A noktası sensör yerleşimi (porselen izolatör tepe noktası).



b. B noktası sensör yerleşimi (mesnet bağlantı noktası).

Şekil 2.48 : Numune üzerindeki sensör konumları.

Sismik yalıtım cihazının oluşturulması için kullanılan ve çelik disklerin merkezinde yer alan Ø14mm çaplı çelik gergi çubuğu üzerindeki bir kesite 90° aralıklarla dört adet şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Bu şekildeğiştirme ölçerler, sismik yalıtım cihazının oluşturulması aşamasında verilen öngerme kuvvetinin kontrolünde kullanıldıkları gibi, sarsma masası deneyleri süresince bu elemandan şekildeğiştirme okuması alınmasında kullanılmışlardır.

Gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde kullanılan toplam 24 adet ölçüm aleti isim ve konumlarıyla birlikte Çizelge 2.8’de sıralanmıştır.

Çizelge 2.8 : Sarsma masası deneylerinde kullanılan ölçüm aletleri

Kanal No	Sensör tipi	Konumu
1	İvme-126	Numune tepe noktası ivmesi (X doğrultusu)
2	İvme-127	Numune tepe noktası ivmesi (Y doğrultusu)
3	İvme-125	Numune tepe noktası ivmesi (Z doğrultusu)
4	İvme-117	Taşıyıcı mesnet üstü ivme (X doğrultusu)
5	İvme-118	Taşıyıcı mesnet üstü ivme (Y doğrultusu)
6	İvme-116	Taşıyıcı mesnet üstü ivme (Z doğrultusu)
7	İvme-120	Sarsma tablası üstü ivme (X doğrultusu)
8	İvme-121	Sarsma tablası üstü ivme (Y doğrultusu)
9	İvme-119	Sarsma tablası üstü ivme (Z doğrultusu)
11	LPT700	Sarsma tablası yer değiştirmesi
12	LPT1250-DK10	Taşıyıcı mesnet tepe yer değiştirmesi
13	LPT1250-DK5	Numune tepe noktası yer değiştirmesi
14	CDP-50	Yalıtım cihazı dönme-1
15	CDP-50	Yalıtım cihazı dönme-2
16	CDP-25	Yalıtım cihazı rölatif yatay yer değiştirme
17	Rod-1 SG	Yalıtım cihazı -Rod üzerindeki SG
18	Rod-2 SG	Yalıtım cihazı -Rod üzerindeki SG
19	Rod-3 SG	Yalıtım cihazı -Rod üzerindeki SG
20	Rod-4 SG	Yalıtım cihazı -Rod üzerindeki SG
21	Bushing-SG1	Bushing hareket doğrultusundaki SG
22	Bushing-SG2	Bushing hareket doğrultusundaki SG
30	İvme-123	Yalıtım cihazı üstü ivme (Z doğrultusu)
31	İvme-124	Yalıtım cihazı üstü ivme (X doğrultusu)
32	İvme-122	Yalıtım cihazı üstü ivme (Y doğrultusu)

2.4.5.2 Ankastre mesnetlenmiş deney numunesi

Geometrik özellikleri Bölüm 2.4.5’de anlatılan porselen elektrik izolatörü çelik kafese rijit bağlanarak dinamik deneyleri gerçekleştirilmiştir, Şekil 2.49. Birleşik sistem üzerinde serbest titreşim deneyleri gerçekleştirilerek salınım frekansı ve sönüm özelliği belirlenmiş, daha sonra da seçilmiş deprem kayıtları için dinamik deneyler gerçekleştirilmiştir.



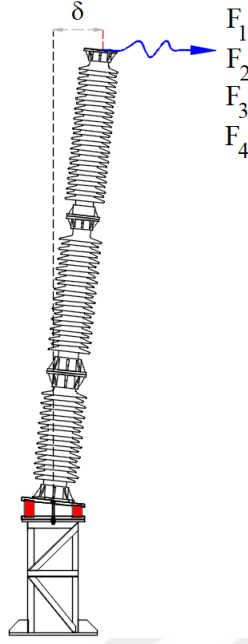
Şekil 2.49 : Ankastre mesnetlenmiş deney düzeneği.

2.4.5.2.1 Serbest titreşim deneyleri

Numunelerin serbest titreşim özelliklerinin belirlenebilmesi için iki farklı deneysel yöntem kullanılmıştır. Bunlar *çekiç* ve *çek-bırak deneyleri* olarak adlandırılabilir.

Çekiç deneylerinde numune yüksekliğinin ortasına karşı gelen bir bölgeye ahşap uçlu çekiç ile belirli zaman aralıklarıyla vurularak bir etki oluşturulmuştur. Çekiç testleri, masa hareket doğrultusu ve ona dik doğrultu için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Numune geometrisinin ve sismik yalıtım cihazının dönel simetrik özelliğe sahip olması nedeniyle iki dik doğrultu için elde edilen sonuçların benzer olma durumu kontrol edilmiştir.

Çek-bırak deneylerinde ise numune tepe bölgesine bağlanan ve taşıma kapasitesi sınırlı olan kablolar yatay doğrultuda gerildikten sonra aniden kesilerek sistemin zorlanmış titreşim yapması sağlanmaktadır, Şekil 2.50. Dört farklı kablo kesiti dolayısıyla dört farklı yük ve tepe yerdeğiştirme seviyesi için *çek-bırak deneyleri* gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.50 : Çek-bırak deney düzeneği.

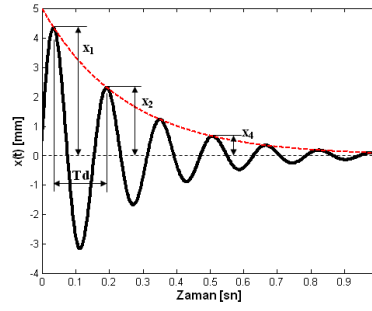
Her iki deney türünde de gerçekleşen yatay titreşimler numune tepesine yerleştirilmiş üç eksenli ivme ölçer ile kaydedilmiştir. Verilen dış etkiler numunelerin doğal sönüm özellikleri ile sönümlenmiştir. Sönüm özelliklerinin sayısal olarak elde edilmesi için *logaritmik azalım* ve *yarım güç bant genişliği* yöntemleri kullanılmıştır. Sözü edilen her iki yöntem IEEE-693’de bu tür sistemlerin sönüm oranının belirlenmesi için önerilmiştir.

Logaritmik azalım yönteminde izlenen yol aşağıda özetlenmiştir.

Kritik sönüm oranından daha küçük sönüm özelliğine sahip bir sistemin titreşim cevabı Denklem 2.8’de verilmiştir. Bu denklemin grafik ifadesi de Şekil 2.51’de gösterilmiştir.

$$x(t) = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \phi) \quad (2.8)$$

$x(t)$:	yerdeğiştirme
A :	genlik
ω_d :	sönümlü serbest titreşim frekansı
ζ :	sönüm oranı
ϕ :	faz açısı
δ :	logaritmik azalım



Şekil 2.51 : Sönümlü bir sistemin harekete cevabının zamanla değişimi.

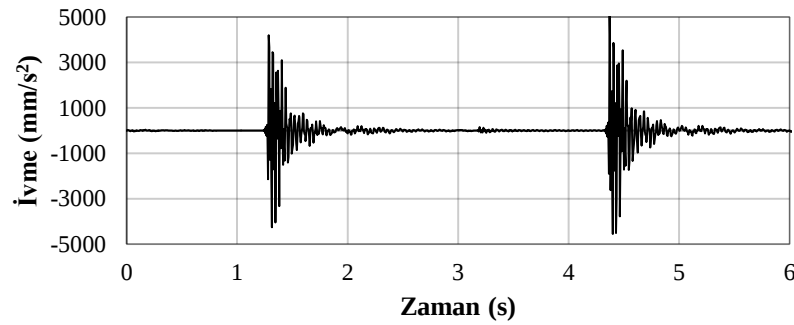
Sistem cevabının ardışık pikleri arasında Denklem 2.9’da verilen ifade kullanılarak sönüm oranı belirlenebilir, (Chopra, 2011). Bu ifadede n , değerlendirmeye alınan salınım sayısına karşı gelmektedir.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) \quad (2.9)$$

Yarım güç bant genişliği yönteminde (*Half-Power Bandwidth Method*), sistem cevabının güç spektrumu çizilerek pik noktası (f_k) belirlenir. Pik değer $1/\sqrt{2}$ ’si esas alınarak çizilen yatay çizginin eğriyi kestiği noktalarındaki frekans değerleri de f_1 ve f_2 olarak isimlendirilir (Şekil 2.51). Gerçekleşen sönüm oranı Deklem 2.10 ile elde edilir.

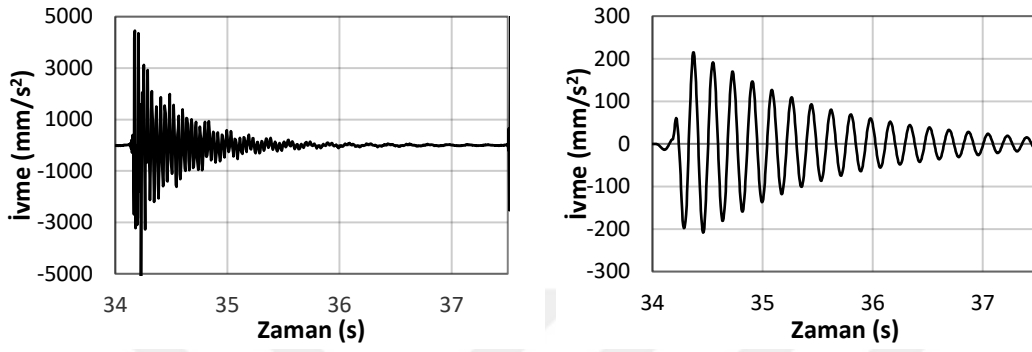
$$\zeta_k = \frac{f_2 - f_1}{2 f_k} \quad (2.10)$$

Sarsma masası üzerine yerleştirilen ankastre mesnetli porselen elektrik izolatörünün $h/3$ yüksekliğinde bir noktasına iki dik doğrultuda ahşap uçlu çekiç ile vurularak tepe ivmesi kaydedilmiştir. Ölçülen tepe ivmesinin zamana göre değişimi Şekil 2.52’de yer almaktadır.



Şekil 2.52 : Çekiç deneyi tepe ivme geçmişi.

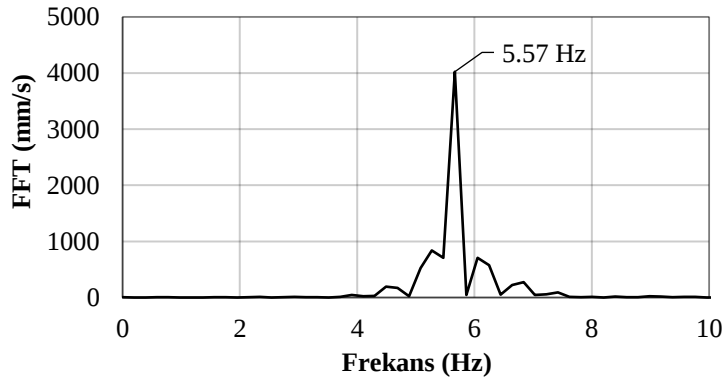
Alınan ivme kaydından koparılan 4 s uzunluğundaki bölümün doğal ve filtrelenmiş halleri Şekil 2.53a ve Şekil 2.53b’de gösterilmiştir. Kayıt üzerinde gerçekleştirilen *Fourier* dönüşümü ile baskın frekans büyüklüğü 5.57 Hz olarak elde edilmiştir, Şekil 2.54. Gerçekleşen titreşim frekansına bağlı olarak alçak geçirgen filtre eşiği 15 Hz olarak seçilmiştir.



a. Doğal kayıt parçası

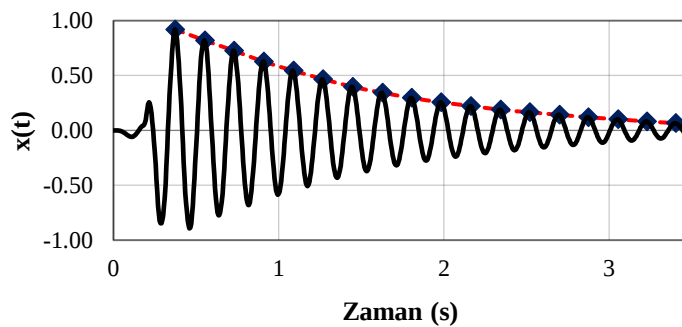
b. Filtrelenmiş kayıt parçası

Şekil 2.53 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıt parçaları.



Şekil 2.54 : İvme kayıt parçasına ait Fourier dönüşümü.

Şekil 2.53b’de yer alan titreşim kaydının, en büyük salınım genliği bir birim olacak şekilde normalleştirme yapıldığında Şekil 2.55’de verilen grafik elde edilmektedir.



Şekil 2.55 : Çekiç deneyi normalleştirilmiş sistem cevabı.

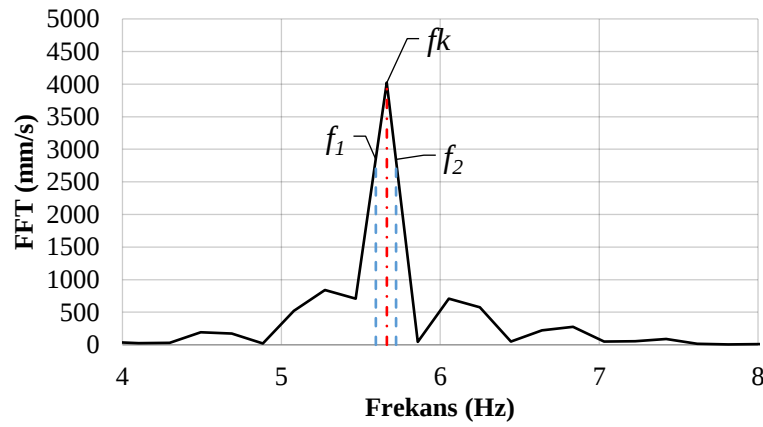
Denklem 2.11’de verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%2.0$ olarak elde edilmiştir.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.11)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.02 \quad (2.12)$$

Şekil 2.53’de verilen 4s uzunluğundaki kayda yarım güç band genişliği yöntemi uygulandığında elde edilen büyüklükler Şekil 2.56’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi f_k frekansı 5.57 Hz, f_1 ve f_2 frekansları ise 5.49 Hz ve 5.62 Hz olarak elde edilmiştir. Denklem 2.13 kullanıldığında bu yöntemle göre elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%1.16$ olmaktadır.

$$\zeta_k = \frac{f_2 - f_1}{2f_k} = \frac{5.62 - 5.49}{2 \times 5.57} = 0.0116 \quad (2.13)$$

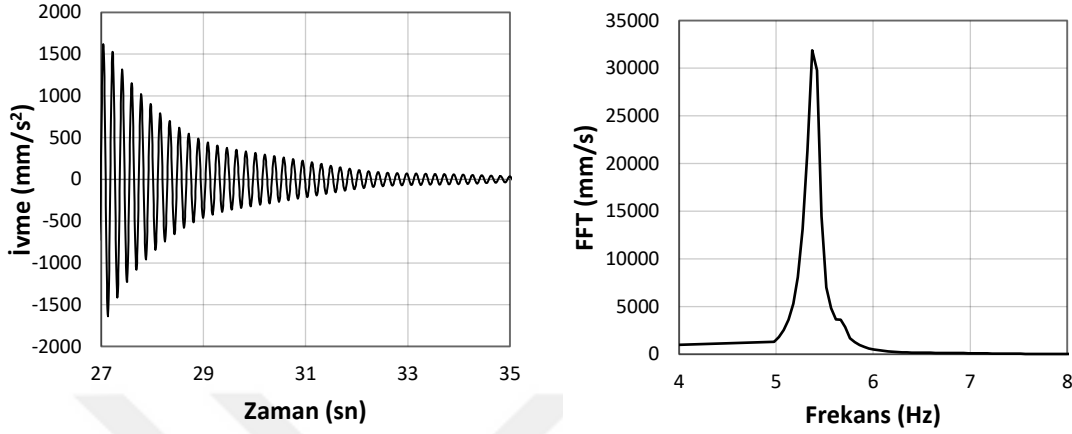


Şekil 2.56 : Çekiç deneyi FFT grafiği yarım-güç band genişliği metodu.

İki farklı yaklaşım aynı veri dosyası üzerinde kullanıldığında elde edilen sönüm oranları $\%2.0$ ve $\%1.16$ olmuştur.

Ankastre mesnetlenmiş sistemin sönüm özelliğinin belirlenmesi için ikinci adımda *çek-bırak yöntemi* kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında dört aşama bulunmaktadır. Her aşamada, porselen elektrik izolatörünün tepe noktasına farklı genliklerde çekme kuvveti etkilmiştir. “F” olarak adlandırılan durum aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmış, $2F$, $3F$ ve $4F$ durumlarına ait sonuçlar ise Çizelge 2.9’da verilmiştir.

“F” durumu için alınan ve yaklaşık uzunluğu 8 s olan kayıt Şekil 2.57a’da, karşı gelen Fourier spektrumu da Şekil 2.57b’de yer almaktadır. Spektrumdan görüldüğü gibi alınan kayıt için etkin frekans 5.57 Hz’dir

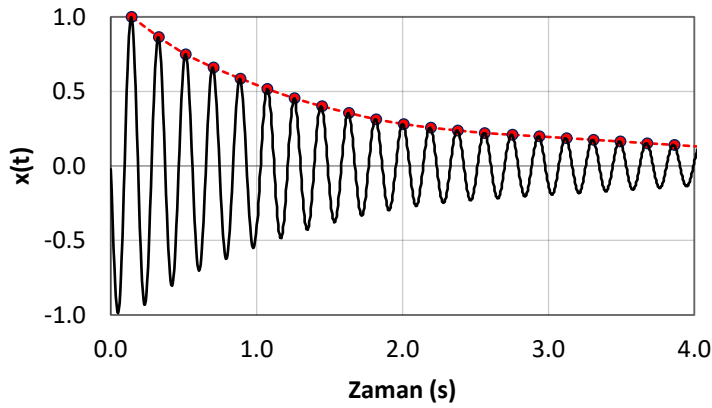


a. Tepe ivme geçmişi

b. Fourier dönüşüm grafiği

Şekil 2.57 : Çek-Bırak deneyi tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği.

Şekil 2.57a’da verilen tepe ivme kaydının, en büyük salınım genliği birim olacak şekilde normalleştirilmesiyle elde edilen grafik Şekil 2.58’de verilmektedir.



Şekil 2.58 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı.

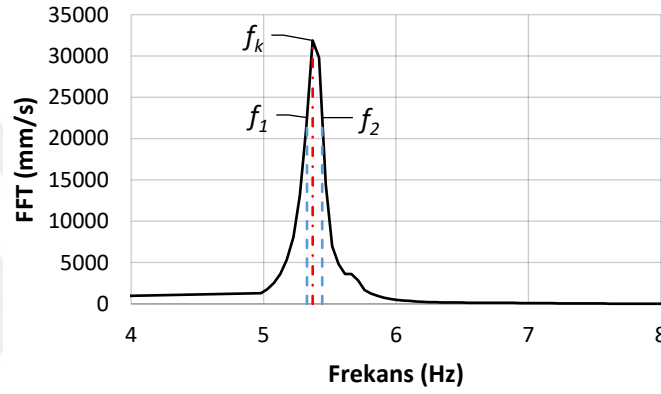
Denklem 2.14’de verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%1.83$ olmuştur.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.14)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.0183 \quad (2.15)$$

Aynı kayıt için yarım güç band genişliği yöntemi kullanıldığında f_k , f_1 ve f_2 büyüklükleri sırasıyla 5.57 Hz, 5.53 Hz ve 5.64 Hz olarak elde edilmiştir, Şekil 2.59. Denklem 2.16 kullanıldığında bu yönteme göre elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%1.07$ olmaktadır.

$$\zeta_k = \frac{f_2 - f_1}{2f_k} = \frac{5.64 - 5.52}{2 \times 5.57} = 0.0107 \quad (2.16)$$



Şekil 2.59 : Çek-Bırak testi yarım-güç band genişliği yöntemi.

İki farklı yaklaşımla elde edilen sönüm oranı değerleri $\%1.83$ ve $\%1.07$ olmuştur. Ayrıntıları yukarıda verilen ve F kuvveti ile yapılan deneye benzer olarak, sırasıyla $2F$, $3F$ ve $4F$ kuvvetleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ulaşılan en büyük tepe yerdeğiştirmesi, en büyük ivme, etkin frekans ve iki farklı değerlendirme yöntemine göre belirlenen sönüm oranları Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9 : Ankastre mesnetli porselen elektrik izolatörü için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları.

		Doğal Titreşim Frekansı (Hz)	Sönüm Oranı	
			Logaritmik Azalım Yöntemi	Yarım-Güç Band Genişliği Yöntemi
Çekiç Testi		5.57	$\%2.0$	$\%1.16$
Çek-Bırak	-F	5.57	$\%1.83$	$\%1.07$
Çek-Bırak	-2F	5.57	$\%1.92$	$\%1.12$
Çek-Bırak	-3F	5.57	$\%2.01$	$\%1.12$
Çek-Bırak	-4F	5.56	$\%1.90$	$\%1.08$

Ankastre mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörüne ait sönüm özelliğinin farklı çekme kuvvetleri ile elde edilen titreşim genliğine bağlı olarak önemli ölçüde değişmediği görülmektedir.

Çizelge 2.9’den da görüldüğü gibi, logaritmik azalım yönteminde elde edilen en küçük ve en büyük değerler %1.83 ~ %2.01 aralığında bulunurken, yarım-güç band genişliği yönteminde bu değerler %1.07~%1.16 aralığında elde edilmektedir.

2.4.5.2.2 Gerçek ivme kayıtları için sarsma masası deneyleri

Bölüm 2.4.3.2, Çizelge 2.7’de özellikleri tanımlanan deprem ivme kayıtları kullanılarak çelik taşıyıcı kafese rijit bağlantısı yapılan porselen elektrik izolatörünün sarsma masası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen ivme kayıtlarının, dört farklı ölçek katsayısı kullanılarak ölçeklendirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu katsayılar sırasıyla %33, %66, %100 ve SF’dir. Burada muhtemel hasar durumunun yakalanması hedeflenmiştir. Deneylerde elde edilen farklı büyüklüklere ait zaman geçmişleri bu bölümde verilmiştir.

Numune tepesinde hareket doğrultusunda elde edilen ivme ve göreceli yerdeğiştirme büyüklükleri sırasıyla Şekil 2.60 ve Şekil 2.61’de yer almaktadır.

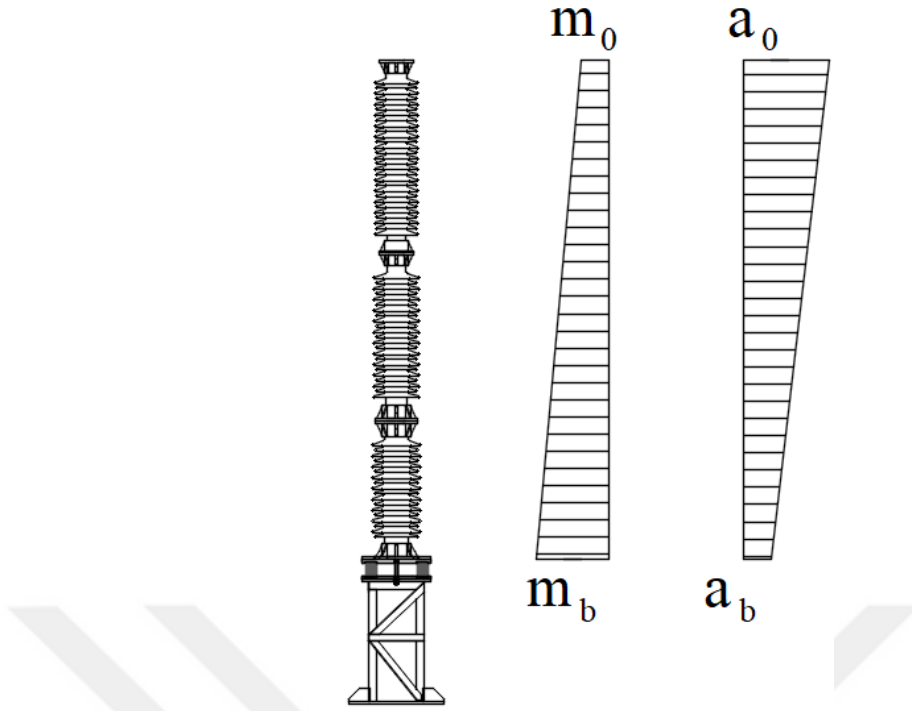
Deneyisel çalışmada kaydedilen büyüklüklerden hareketle porselen elektrik izolatörü taban kesitinde gerçekleşen kesme kuvveti ve eğilme momenti değerleri belirlenebilir. Bu amaçla aşağıda anlatılan hesap yöntemi kullanılmıştır, (Koliou ve diğ., 2009).

Taban kesitinde gerçekleşen kesme kuvveti ve eğilme momenti Denklem 2.17a ve 2.17b ile ifade edilebilir. Bu ifadelerde $m(z)$, $a(z)$, $c(z)$, ve $v(z)$ sırasıyla kütle, ivme, sönüm ve hız fonksiyonlarına karşı gelmektedir.

$$V_b = \int_0^H m(z)a(z)dz + \int_0^H c(z)v(z)dz \quad (2.17a)$$

$$M_b = \int_0^H m(z)a(z)zdz + \int_0^H c(z)v(z)zdz \quad (2.17b)$$

Denklem 2.17a ve 2.17b’de sonuca katkısı göreceli olarak küçük olan ikinci terimler yani sönüm etkisi ihmal edildiğinde ve ayrıca yükseklik boyunca kütle ve ivme değişimleri için Şekil 2.62’de gösterilen varsayım yapıldığında, Denklem 2.18a ve 2.18b de verilen ifadeler elde edilebilmektedir, (Koliou ve diğ., 2009).



Şekil 2.60 : Yükseklik boyunca varsayılan kütle ve ivme dağılımı.

Taban kesme kuvveti;

$$V_b = \int_0^H \left[m_b - (m_b - m_0) \left(\frac{z}{H} \right) \right] \left[a_b + (a_0 - a_b) \left(\frac{z}{H} \right) \right] dz \rightarrow$$

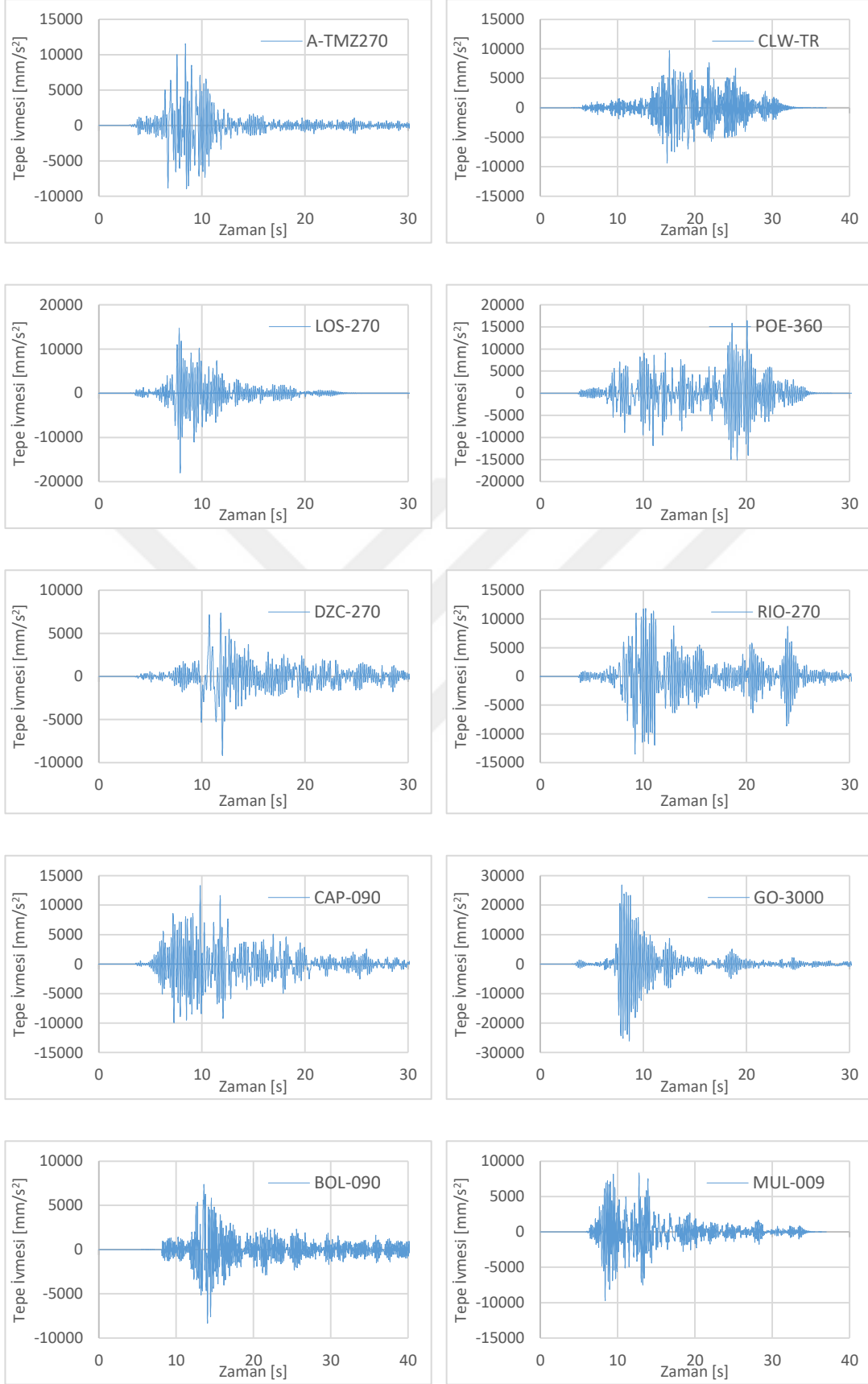
$$V_b = \frac{m_b H a_0}{6} \left[\left(2 \frac{a_b}{a_0} + 1 \right) + \frac{m_0}{m_b} \left(\frac{a_b}{a_0} + 2 \right) \right] \quad (2.18a)$$

Taban momenti;

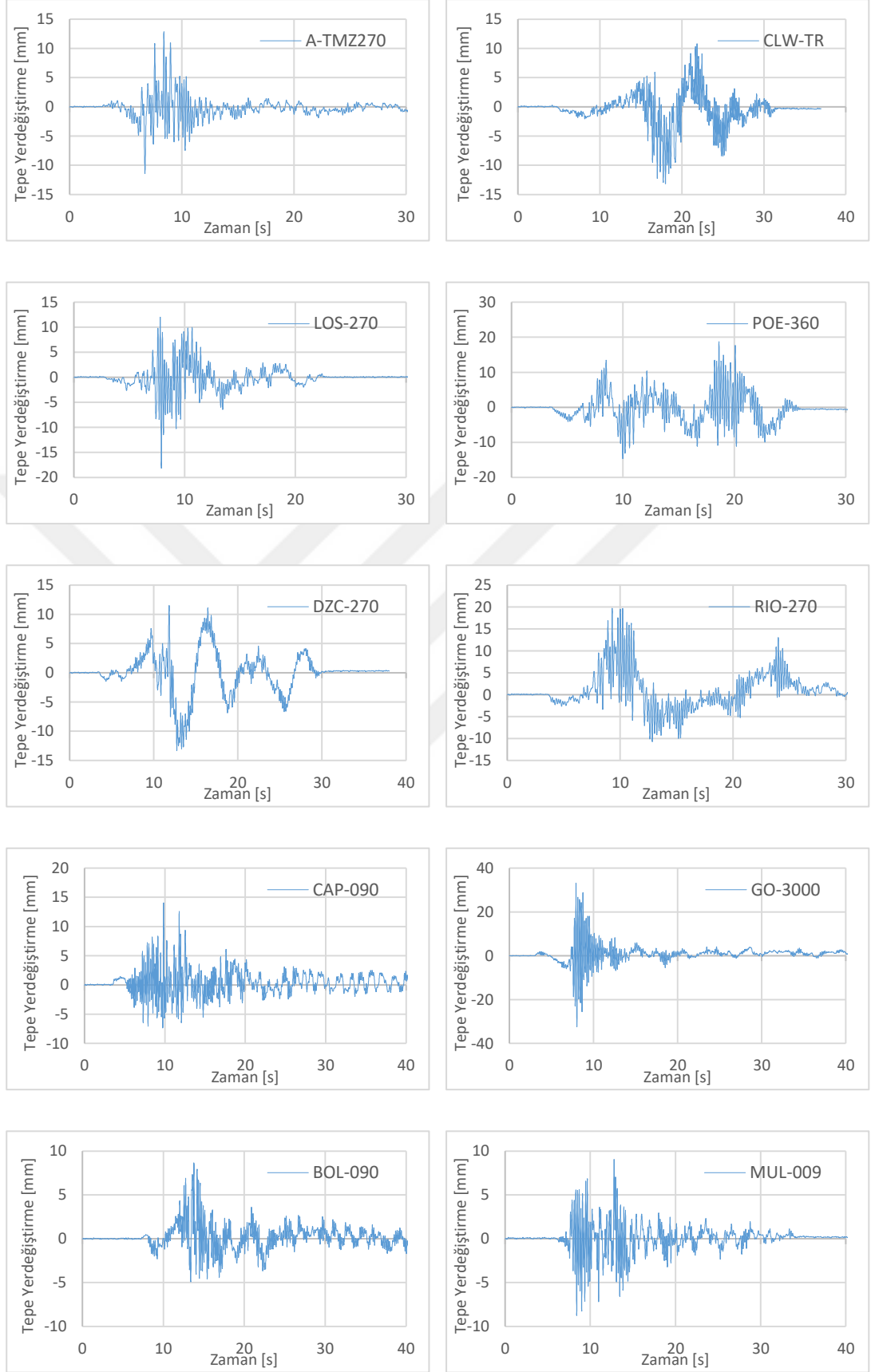
$$M_b = \int_0^H \left[m_b - (m_b - m_0) \left(\frac{z}{H} \right) \right] \left[a_b + (a_0 - a_b) \left(\frac{z}{H} \right) \right] z dz \rightarrow$$

$$M_b = \frac{m_b H^2 a_0}{6} \left[\left(\frac{a_b}{a_0} + 1 \right) + \frac{m_0}{m_b} \left(\frac{a_b}{a_0} + 3 \right) \right] \quad (2.18b)$$

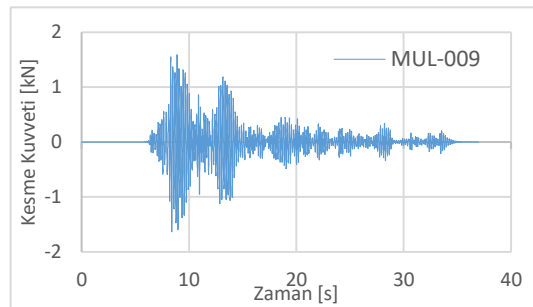
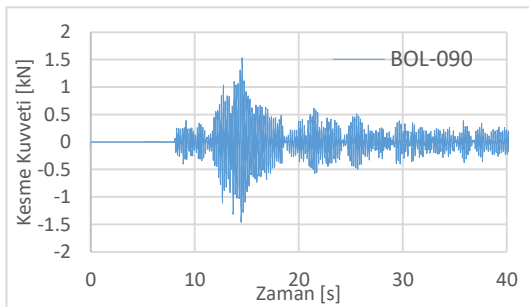
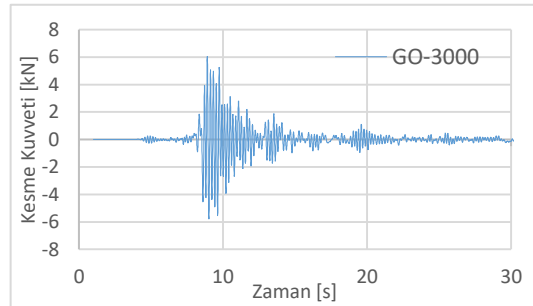
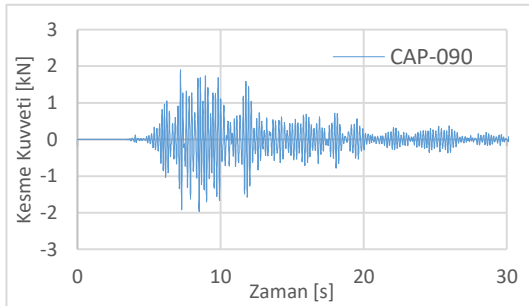
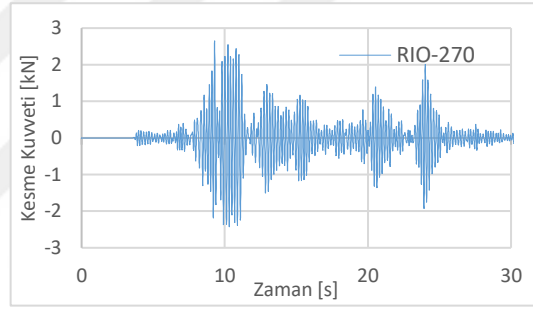
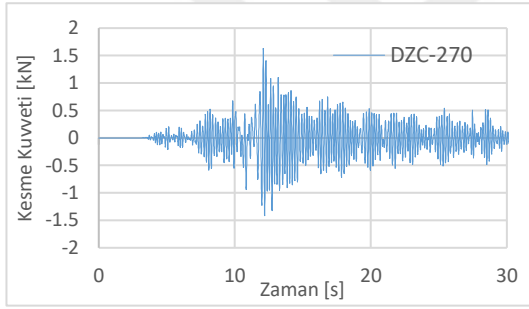
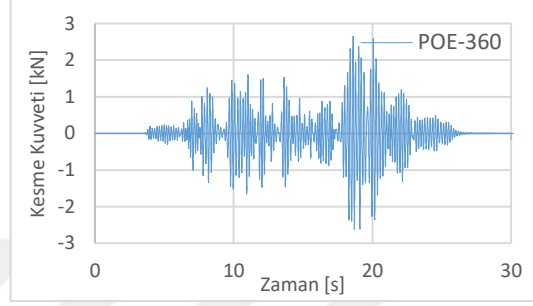
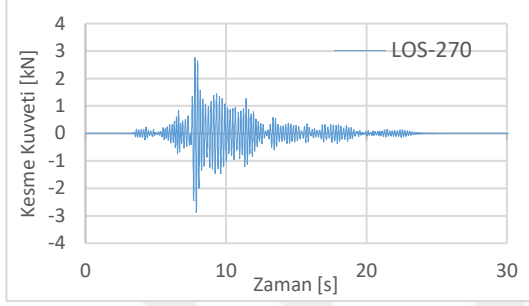
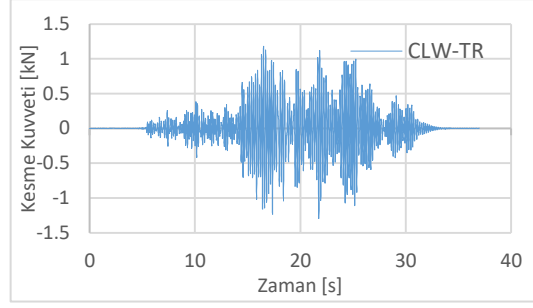
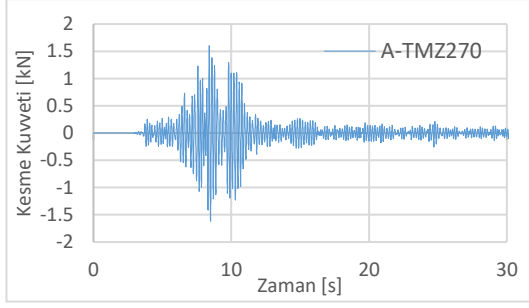
Denklem 2.18a ve 2.18b denklemlerinde “o” tepe kesitini, “b” taban kesitini göstermektedir. Her iki kesitte yer alan ivme ölçerlerden alınan veriler kullanılarak, Denklem 2.18a ve 2.18b ile elde edilen taban kesme kuvveti ve moment geçmişleri Şekil 2.63 ve 2.64’de verilmiştir.



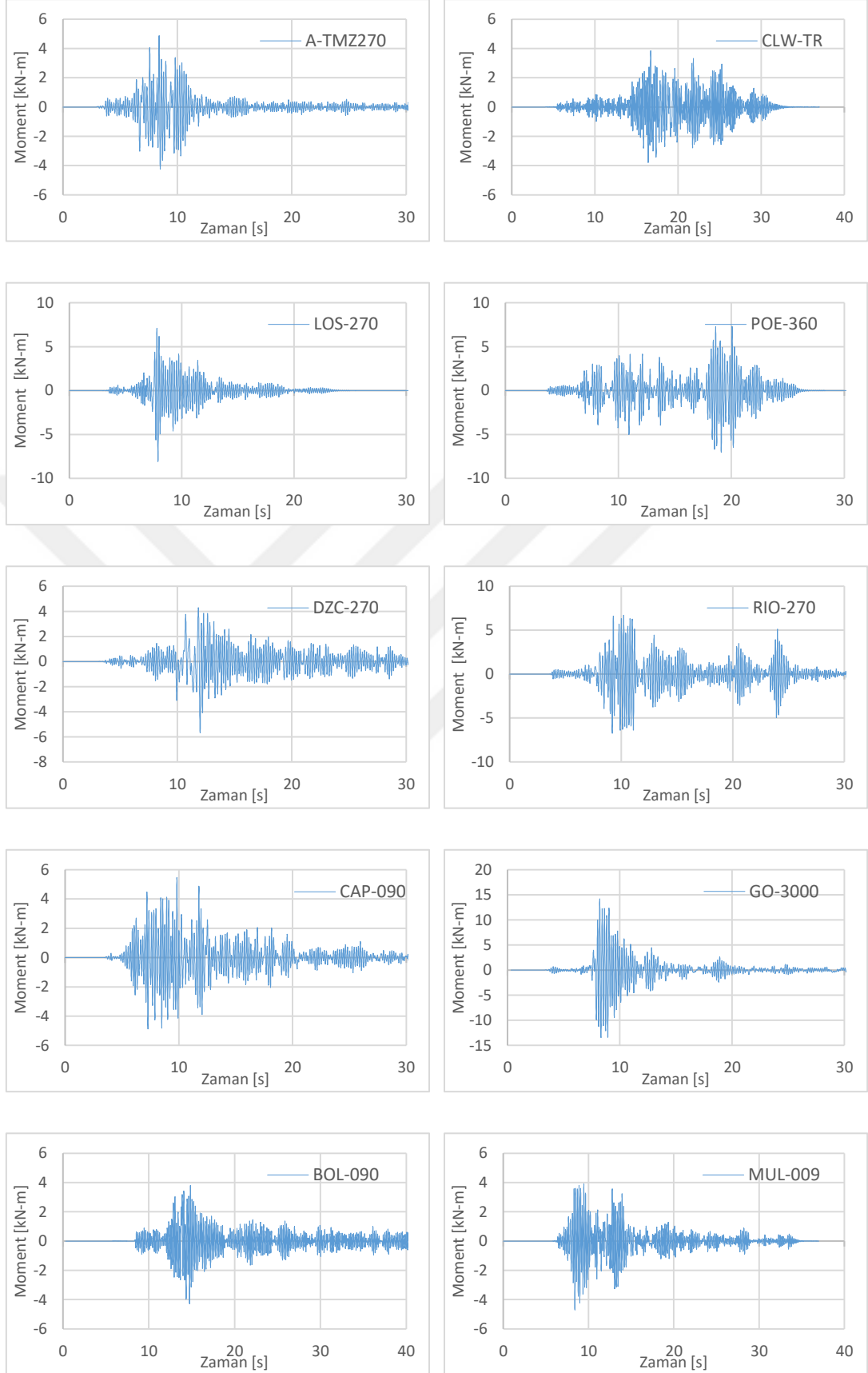
Şekil 2.61 : Numune tepe ivme kayıtları.



şekil 2.62 : Numune tepe grelı yerdeğiştirme kayıtları.



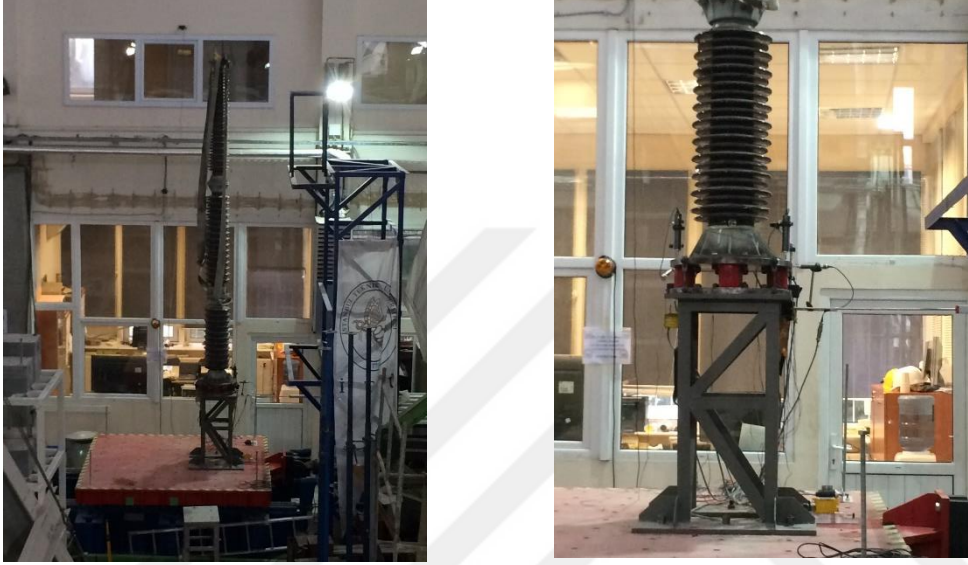
Şekil 2.63 : Numune taban kesme kuvvet geçmişi.



Şekil 2.64 : Numune taban momenti geçmişi.

2.4.5.3 Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı

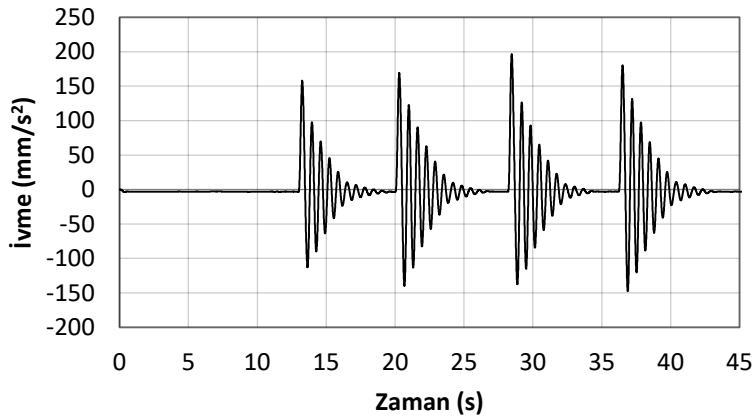
Geometrik özellikleri Bölüm 2.3.2’de anlatılan sismik yalıtım cihazı, sarsma masasına rijit olarak bağlanmış çelik taşıyıcı sistem üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 2.65’de görülen porselen elektrik izolatörleri de onun üzerine bağlanmıştır. Oluşan birleşik sistemin öncelikle serbest titreşim özellikleri çalışılmış, ardından da seçilmiş deprem kayıtları için sarsma masası deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.65 : GEO-1 sarsma masası deney düzeneği.

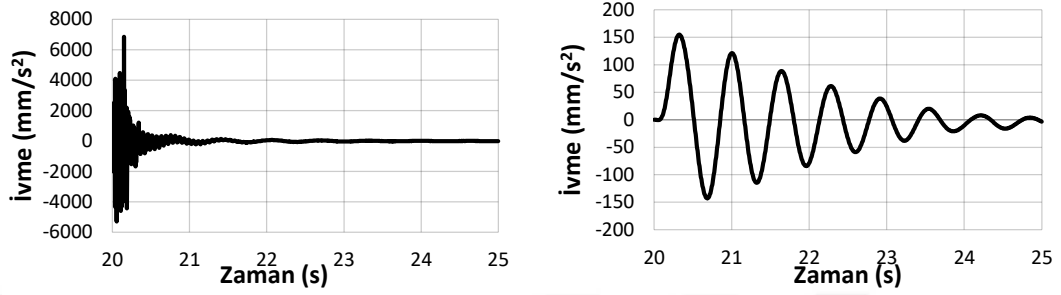
2.4.5.3.1 Serbest Titreşim Deneyleri

Serbest titreşim deneyleri, numunenin iki dik doğrultusu için gerçekleştirilmiştir. Sonuçların benzer olması nedeniyle, sadece sarsma masası hareket doğrultusundaki sonuçlar bu bölümde verilmiştir. 50 s uzunluğundaki bir kayıtda 4 kez çekiç ile uyarı verilmiştir. Ölçülen tepe ivmesinin zamana göre değişimi Şekil 2.66’da yeralmaktadır.



Şekil 2.66 : Çekiç deneyi tepe ivme geçmişi.

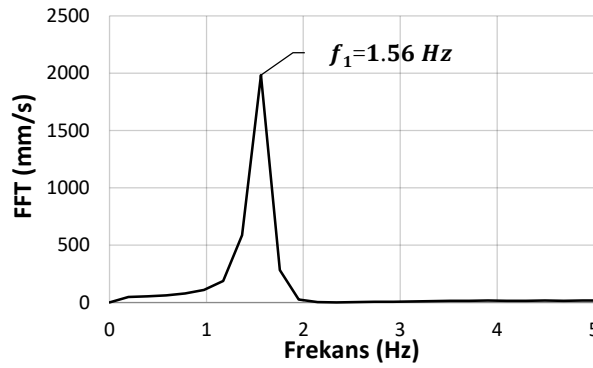
Alınan büyük kayıt içerisinde çıkarılan 5s uzunluğundaki (20s~25s) bölümün doğal ve filtrelenmiş halleri Şekil 2.67a ve Şekil 2.67b’de gösterilmiştir. Kayıt üzerinde gerçekleştirilen Fourier dönüşümü ile baskın frekans büyüklüğü 1.56 Hz olarak elde edilmiştir, Şekil 2.68. Gerçekleşen titreşim frekansına bağlı olarak, alçak geçiren filtre eşiği de 15 Hz olarak seçilmiştir.



a. Doğal kayıt

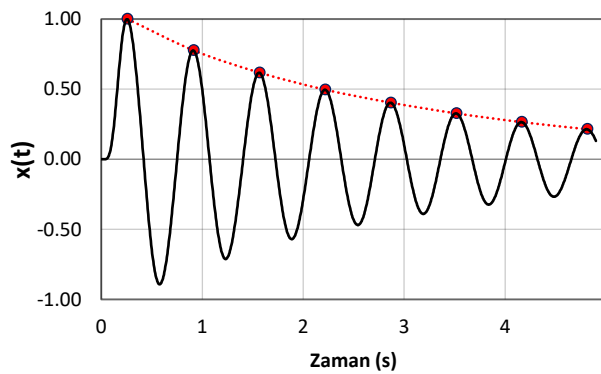
b. Filtrelenmiş kayıt

Şekil 2.67 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıtları.



Şekil 2.68 : İvme kaydı parçasına ait Fourier dönüşüm grafiği.

Şekil 2.67b’de yer alan titreşim kaydında en büyük salınım genliği birim olacak şekilde normalleştirme işlemi yapılırsa, Şekil 2.69’da verilen grafik elde edilmektedir.



Şekil 2.69 : Çekiç testi normalleştirilmiş sistem cevabı.

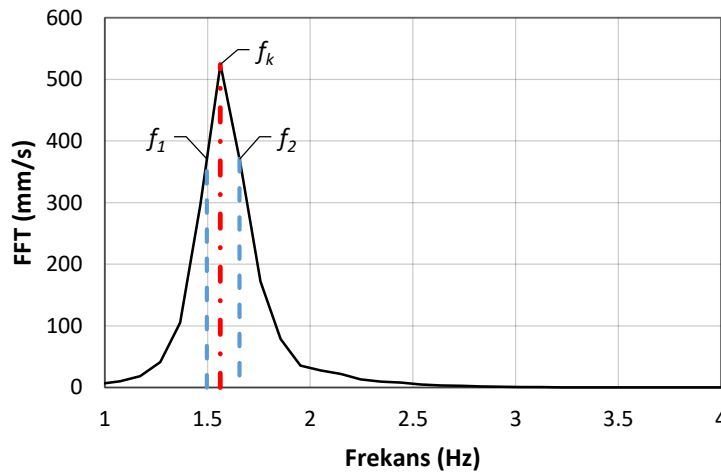
Denklem 2.19’da verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%8.36$ olmuştur.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.19)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.0836 \quad (2.20)$$

Şekil 2.67’de verilen 5s uzunluğundaki kayda yarım güç band genişliği yöntemi uygulandığında elde edilen büyüklükler Şekil 2.70’de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi f_k frekansı 1.56 Hz, f_1 ve f_2 frekansları ise 1.47 Hz ve 1.62 Hz olarak elde edilmiştir. Bu yöntemle göre Denklem 2.21 kullanılarak elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%7.05$ olmaktadır.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2 f_k} = \frac{1.69 - 1.47}{2 \times 1.56} = 0.0705 \quad (2.21)$$

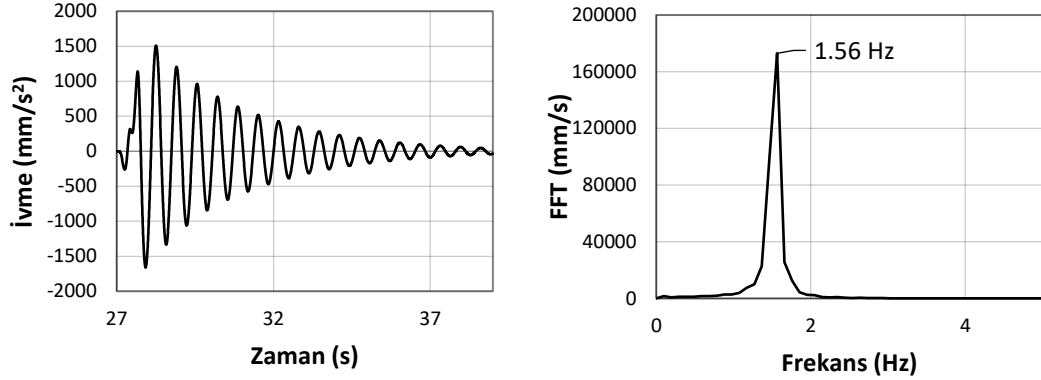


Şekil 2.70 : Çekiç deneyi yarım güç band genişliği yöntemi.

Her iki değerlendirme yöntemi aynı veri dosyası üzerinde kullanıldığında elde edilen sönüm oranları $\%8.36$ ve $\%7.05$ olmuştur.

Sismik yalıtım cihazının sönüm özelliğinin belirlenmesinde ikinci adım olarak *çek-bırak* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında dört aşama bulunmaktadır. Her aşamada, porselen elektrik izolatörünün tepe noktasına farklı genliklerde çekme kuvveti etkilmiştir. “F” olarak adlandırılan durum aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmış, 2F, 3F ve 4F durumlarına ait sonuçlar ise Çizelge 2.10’da özetlenmiştir.

“F” durumu için alınan ve yaklaşık uzunluğu 12 s olan kayıt Şekil 2.71a’da, karşı gelen Fourier spektrumu da Şekil 2.71b’de verilmektedir. Fourier dönüşümünden görüldüğü gibi alınan kayıt için etkin frekans 1.56 Hz’dir.

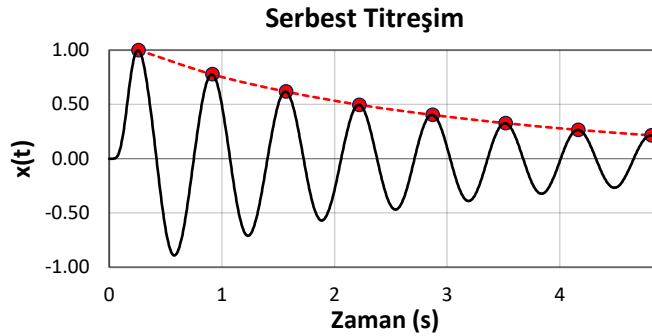


a. Tepe ivme geçmişi

b. Fourier dönüşüm grafiği

Şekil 2.71 : Çek-bırak deneyi – tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği.

Şekil 2.71a’daki tepe ivme kaydının en büyük değeri bir birim olacak şekilde normalleştirilmesiyle elde edilen grafik Şekil 2.72’de verilmektedir.



Şekil 2.72 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı.

Denklem 2.22 ve 2.23’de verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%3.35$ olmuştur.

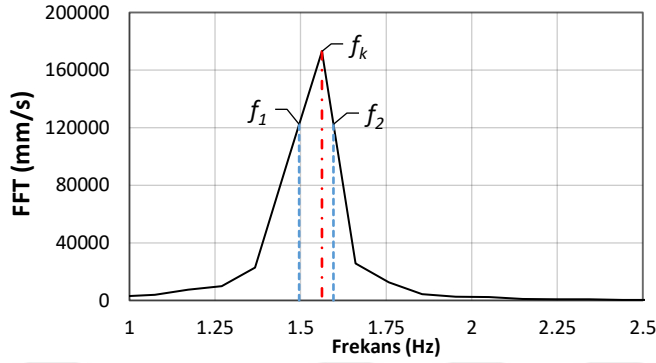
$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.22)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.0335 \quad (2.23)$$

Aynı kayıt için yarı güç band genişliği yöntemi kullanıldığında f_k , f_1 ve f_2 büyüklükleri sırasıyla 1.56 Hz, 1.5 Hz ve 1.6 Hz olarak elde edilmiştir, Şekil 2.73.

Denklem 2.24 kullanıldığında bu yönteme göre elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%3.21$ olmaktadır.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2 f_k} = \frac{1.6 - 1.5}{2 \times 1.56} = 0.0321 \quad (2.24)$$



Şekil 2.73 :  ek-Bırak testi yarım-g   band genişliği yöntemi.

Her iki yöntemle elde edilen sönüm oranı değeri $\%3.35$ ve $\%3.21$ olarak belirlenmiştir. Ayrıntıları yukarıda verilen ve F kuvveti ile yapılan deneye benzer olarak, sırasıyla 2F, 3F ve 4F kuvvetleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ulaşılan en büyük tepe yerdeğiştirmesi, en büyük ivme, etkin frekans ve iki farklı değerlendirme yöntemine göre belirlenen sönüm oranları  izelge 2.10’da verilmiştir.

Farklı  ekme kuvvetleri ile elde edilen sönüm oranlarının titreşim genliğine bağlı olarak değiştiği g r lmektedir. Bu durum özellikle logaritmik azalım yönteminde daha belirginleşmektedir.

Çizelge 2.10’dan da görüldüğü gibi, logaritmik azalım yönteminde elde edilen en küçük ve en büyük sönüm değerleri $\%3.25 \sim \%8.36$ aralığında bulunurken, yarım-g   band genişliği yönteminde bu değerler $\%3.21 \sim \%7.05$ aralığında elde edilmektedir.  ek-bırak yönteminde gerçekleşen sönüm oranlarının uygulanan zorun genliğine bağlı olarak gerçekleşmesi nedeniyle; kuvvetli yer hareketleri için geliştirilmeye çalışılan sismik yalıtım cihazının sönüm  zelliklerinin, 3F veya 4F durumlarıyla daha gerçekçi olarak temsil edilebileceği düşünülmektedir.

Deneyssel sonuçlara göre, yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1) için alınabilecek sönüm oranının $\%5 \sim \%8$ aralığında olduğu söylenebilir.

Çizelge 2.10 : Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları.

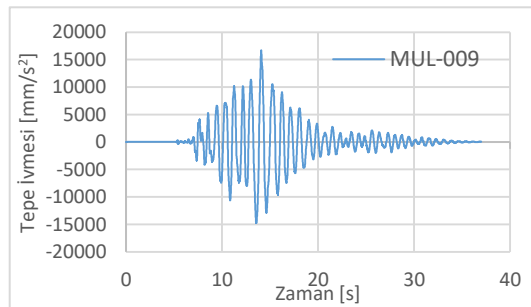
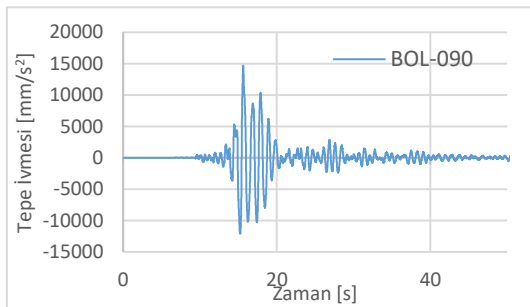
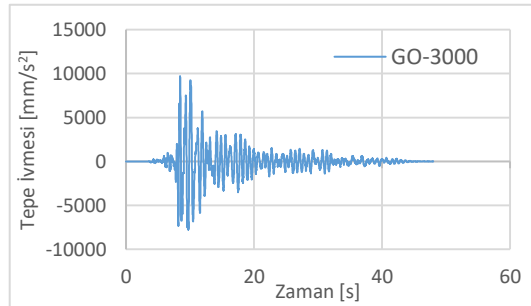
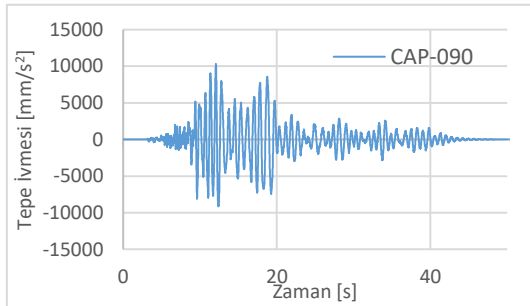
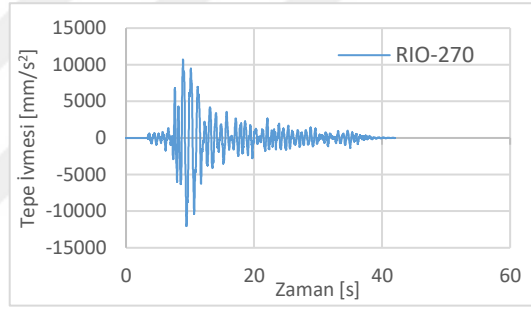
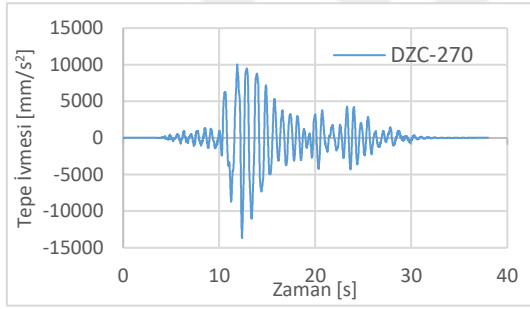
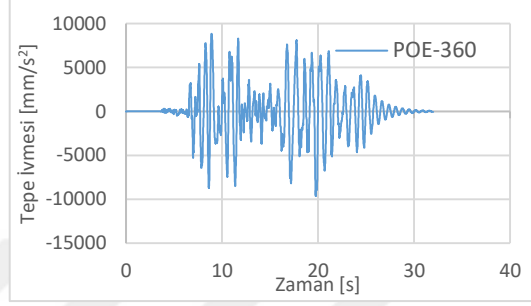
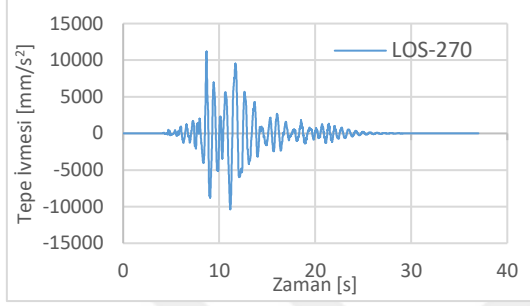
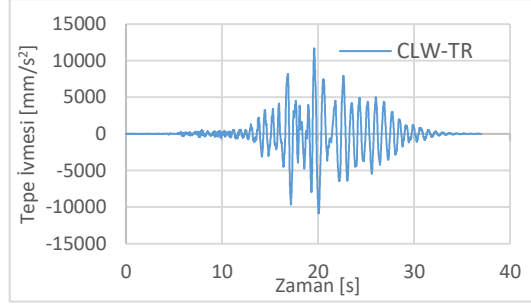
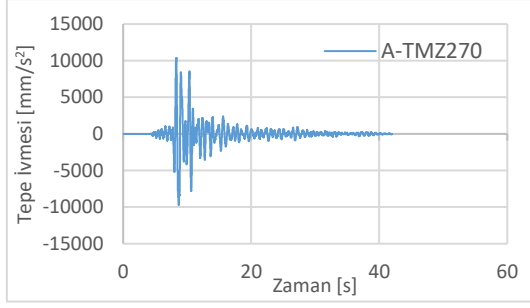
				Sönüm Oranı	
				Logaritmik Azalım Yöntemi	Yarım-Güç Band Genişliği Yöntemi
		Tepe Yerdeğiştirme (mm)	En Büyük İvme (mm/s ²)	Doğal Titreşim Frekansı (Hz)	
Çekiç Testi		1.57	153	1.56	%8.36
Çek-Bırak	F	25.12	1573	1.56	%3.35
Çek-Bırak	2F	52.77	1380	1.56	%4.87
Çek-Bırak	3F	88.14	4511	1.46	%5.59
Çek-Bırak	4F	126.84	5040	1.46	%6.00

2.4.5.3.2 Gerçek ivme kayıtları için sarsma masası deneyleri

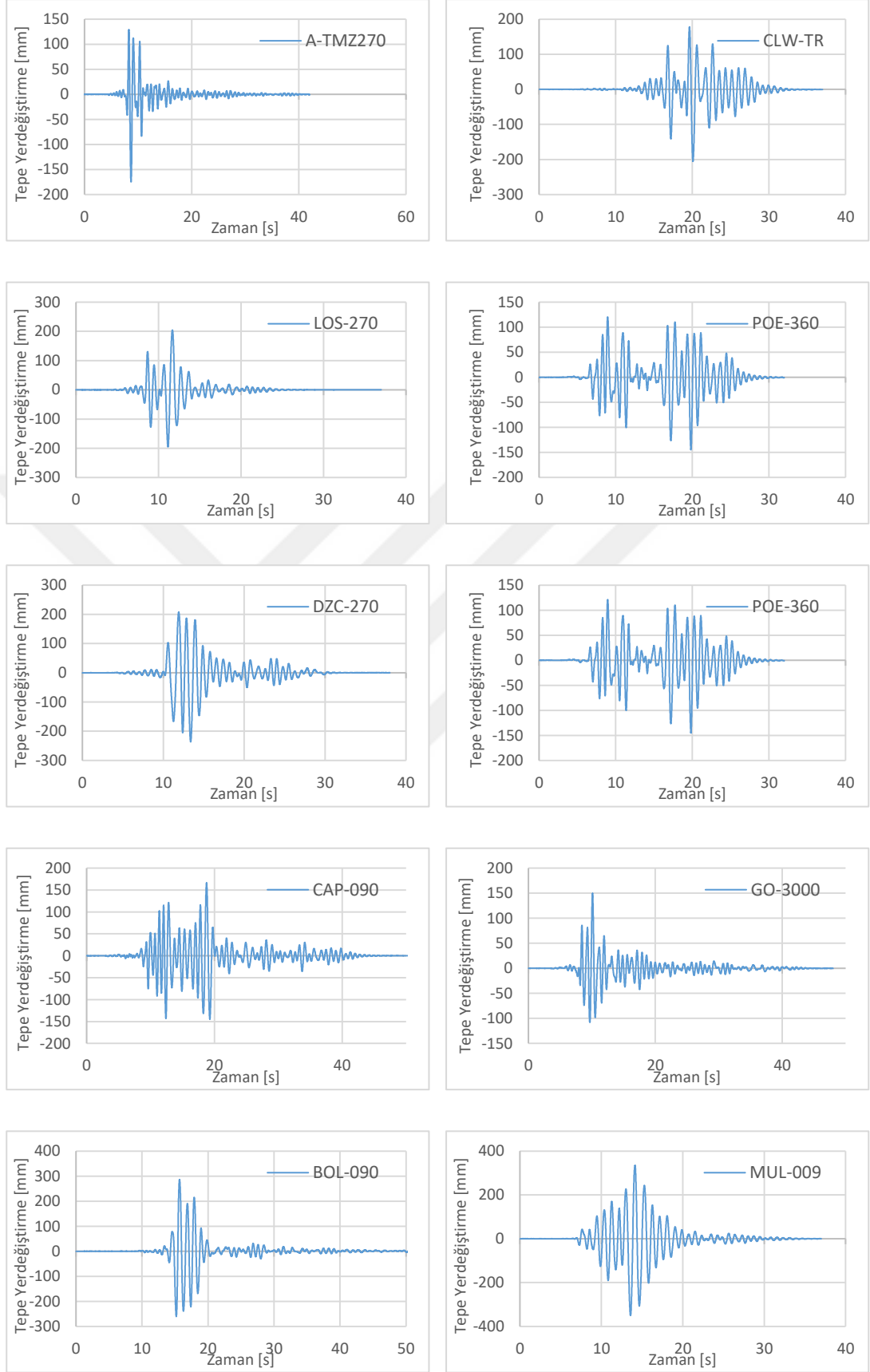
Bölüm 2.4.3.2, Çizelge 2.7’de özellikleri tanımlanan deprem ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde elde edilen farklı büyüklükler aşağıda verilmektedir. Deneylerde, seçilen ivme kayıtlarının dört farklı ölçek katsayısı kullanılarak ölçeklendirilmesi yoluna gidilmiştir. Bu katsayılar sırasıyla %33, %66, %100 ve SF ’dir. Burada muhtemel hasar durumunun yakalanması hedeflenmiştir.

SF katsayıları ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak elde edilen farklı büyüklüklere ait değişimler aşağıda verilmektedir. Numune tepesinde hareket doğrultusunda elde edilen ivme ve yerdeğiştirme büyüklükleri sırasıyla Şekil 2.74 ve Şekil 2.75’de yer almaktadır.

Sismik yalıtım cihazının merkezinde yer alan çelik gergi çubuğu üzerine yapıştırılmış şekildeğiştirme ölçerlerden alınan veriler Şekil 2.80’de yer almaktadır. 12.9 kalite malzeme sınıfından imal edilen çelik gergi elemanının üzerinde, uygulanan tüm deprem ivme kayıtları sonrasında kalıcı (plastik) şekildeğiştirme oluşmadığı görülmektedir.

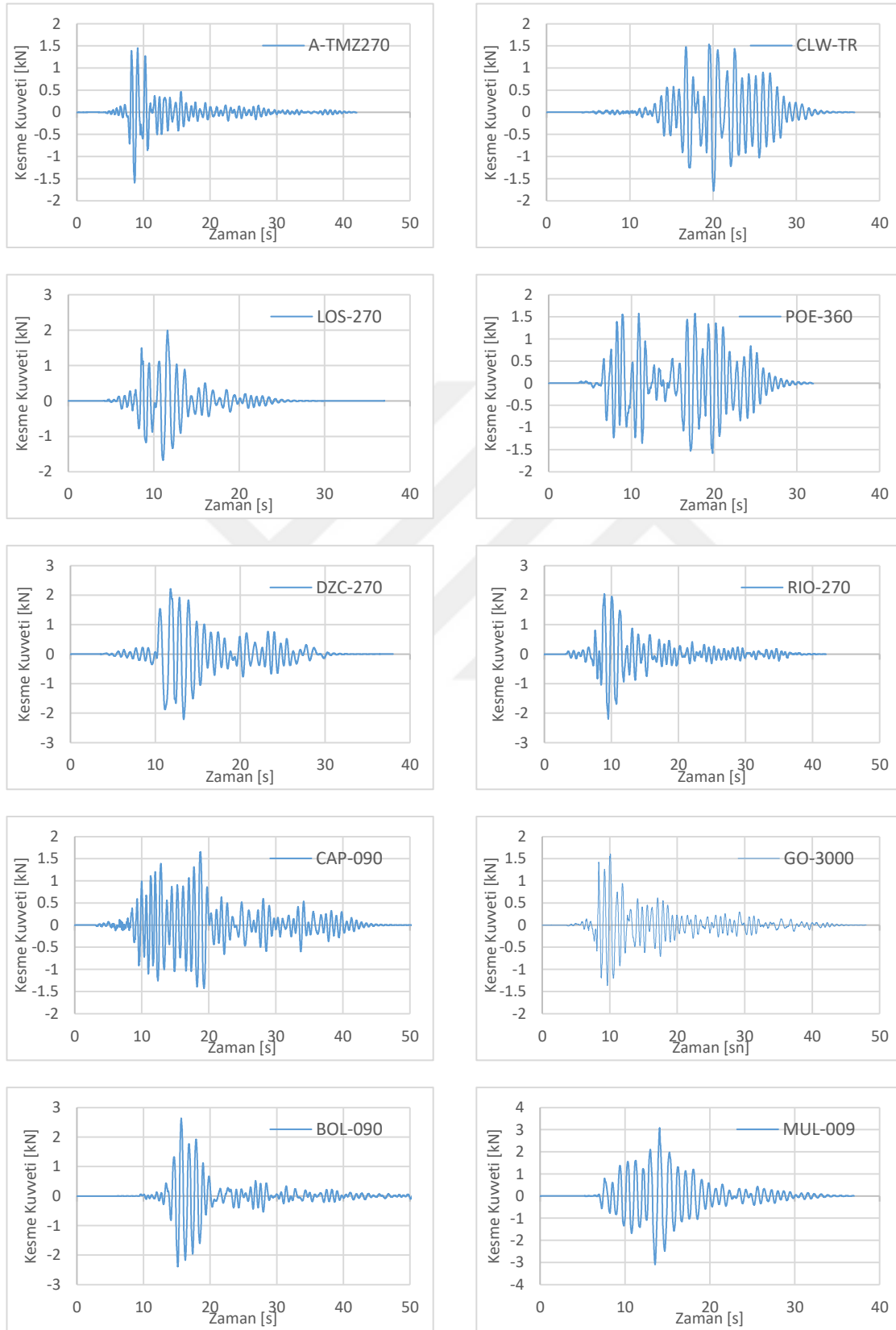


Şekil 2.74 : Numune tepe ivme kayıtları.

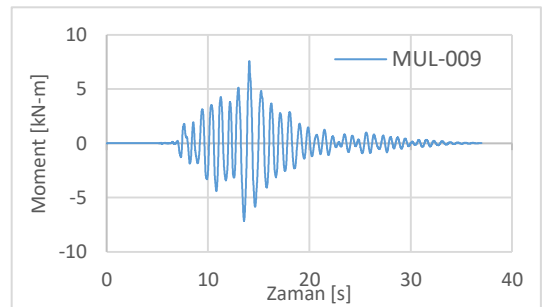
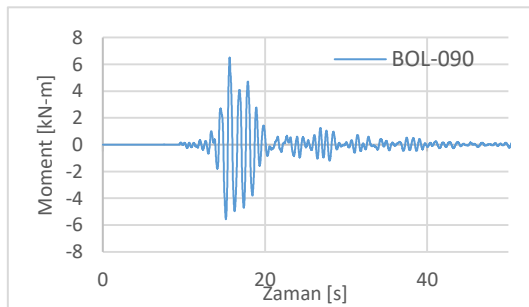
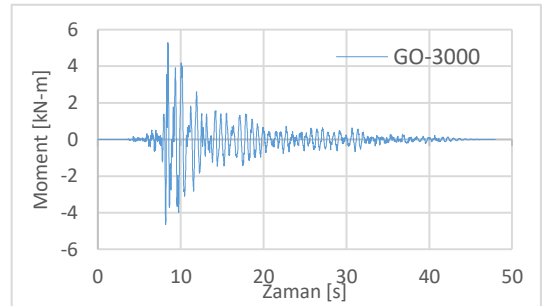
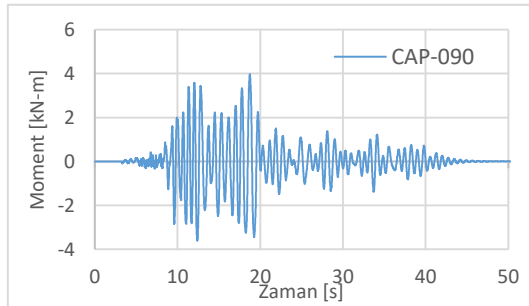
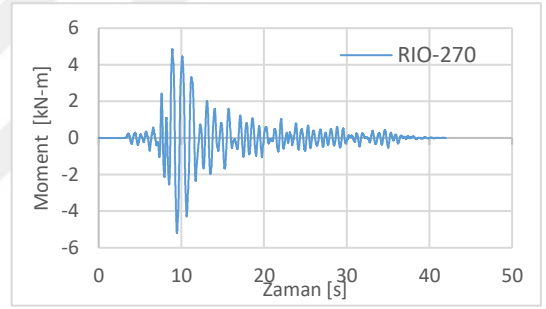
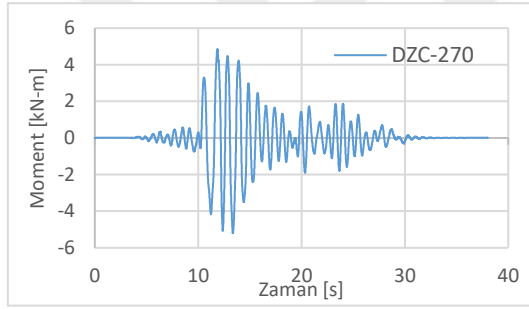
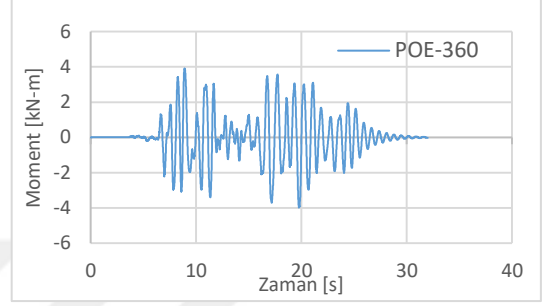
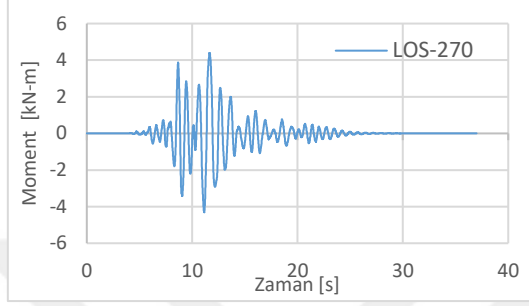
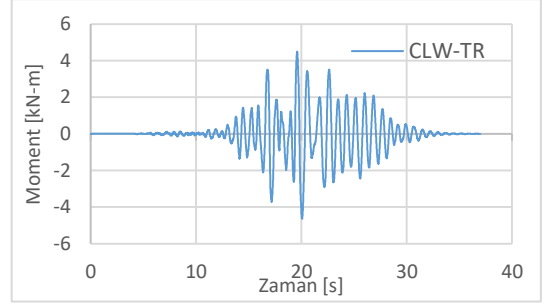
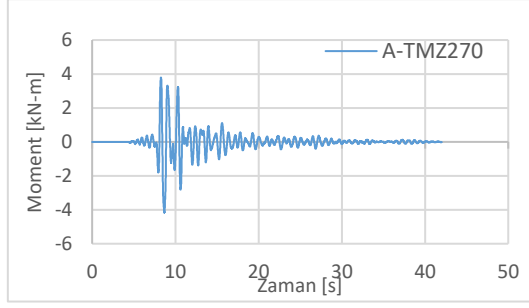


Şekil 2.75 : Numune tepe yerdeğiştirme kayıtları.

Deneyisel veriler kullanılarak Denklem 2.18a ve 2.18b ile elde edilen taban kesme kuvveti ve eğilme momenti grafikleri de Şekil 2.76 ve 2.77’de verilmektedir.

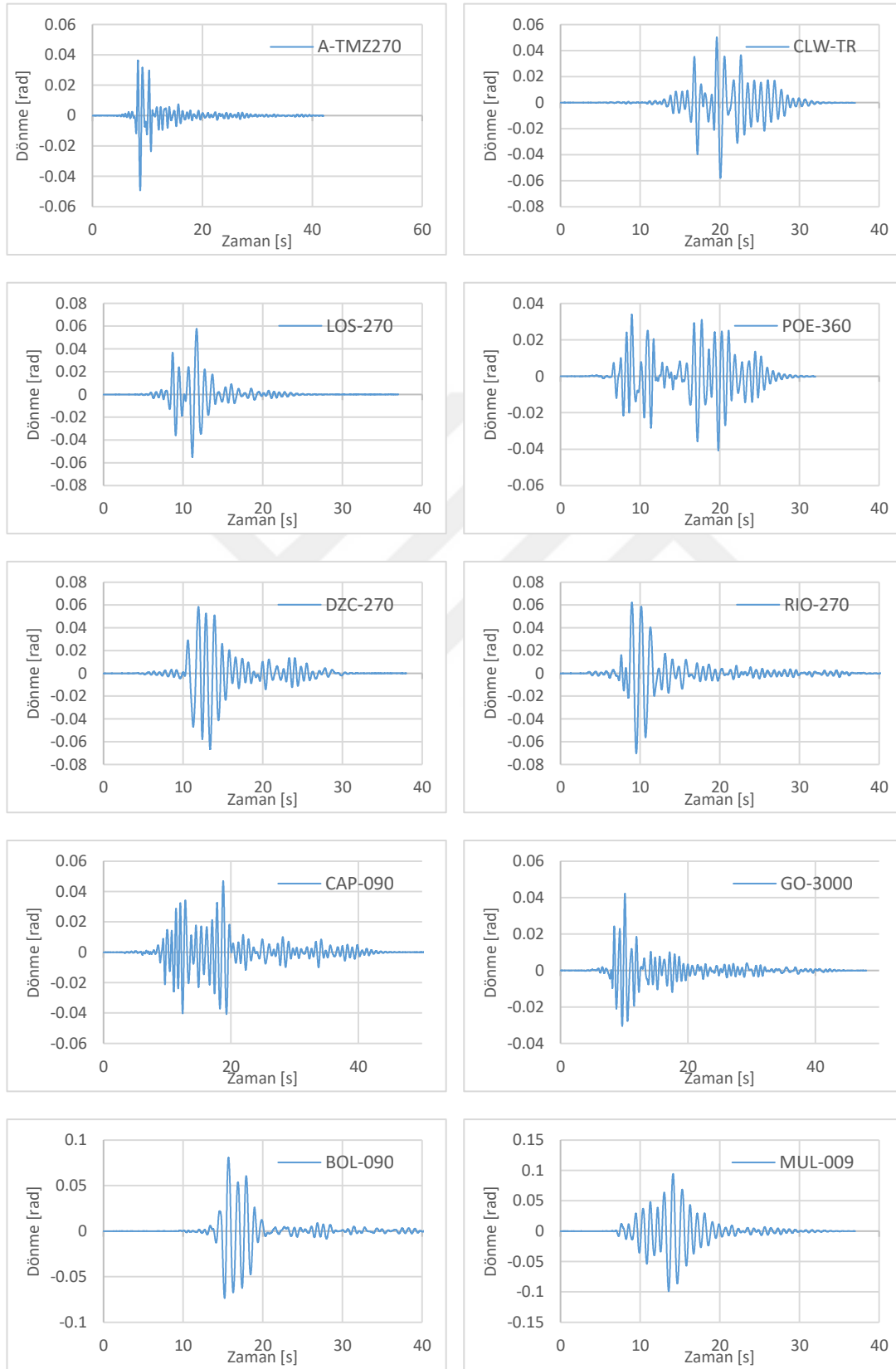


Şekil 2.76 : Numune taban kesme kuvvet geçmişi.

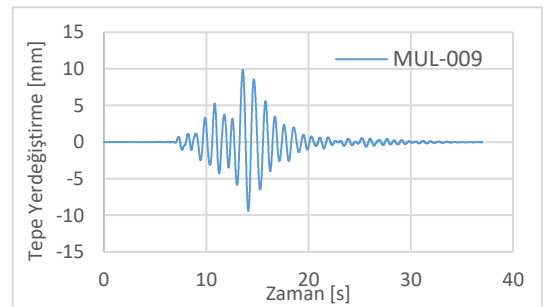
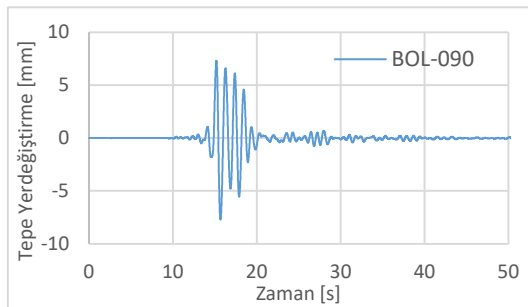
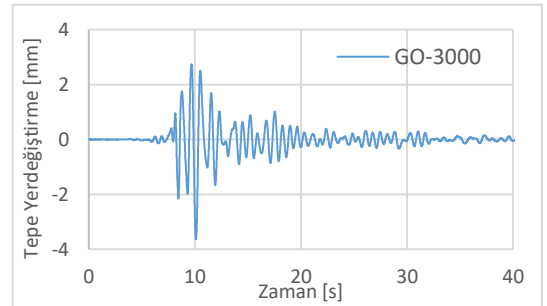
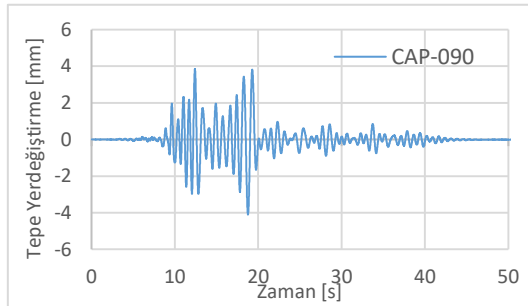
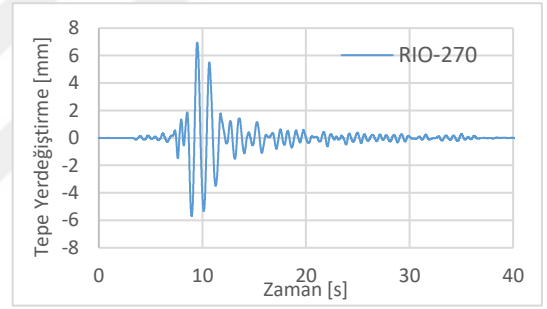
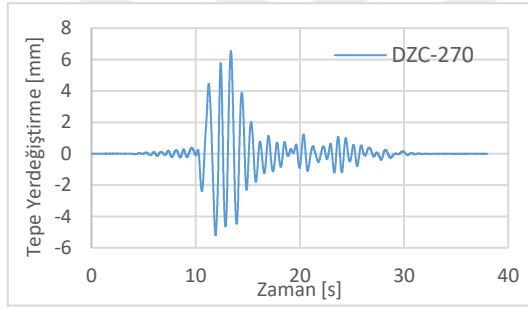
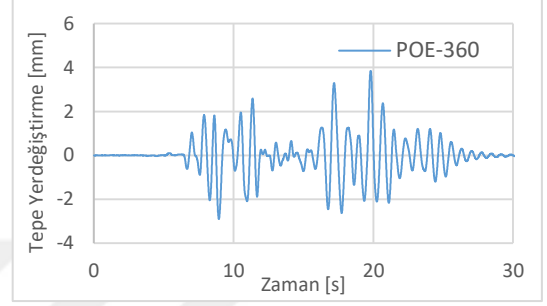
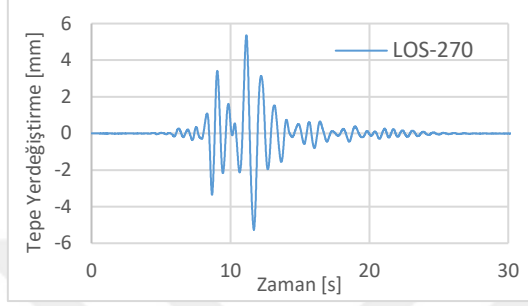
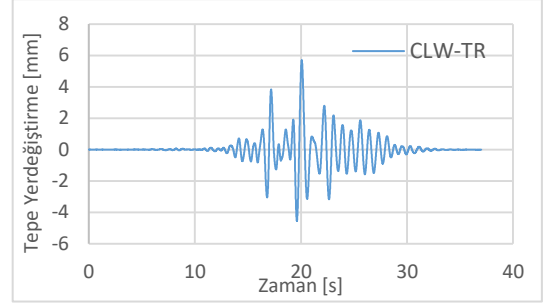
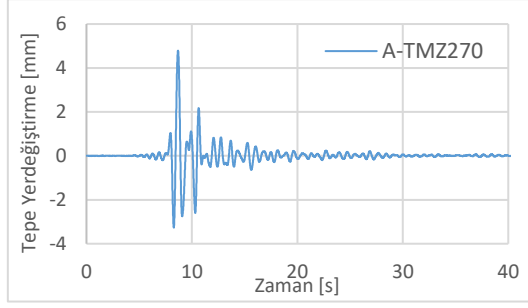


Şekil 2.77 : Numune taban momenti geçmişi.

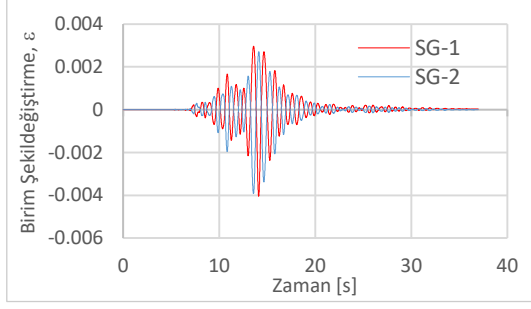
Sismik yalıtım cihazında gerçekleşen dönme ve görelî yatay hareket geçmişleri Şekil 2.78 ve 2.79’da verilmiştir.



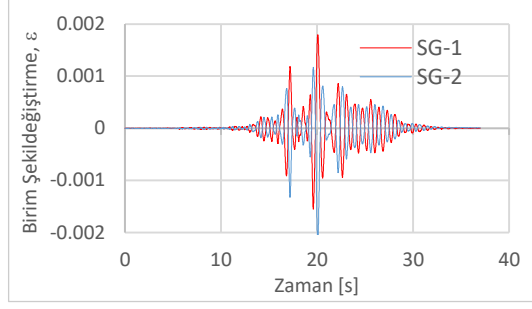
Şekil 2.78 : Sismik yalıtım cihazı dönme geçmişi.



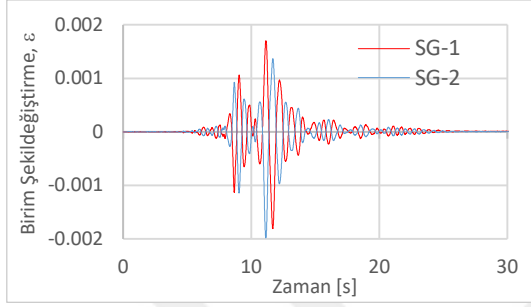
şekil 2.79 : Sismik yalıtım cihazı rölatif yatay hareketi.



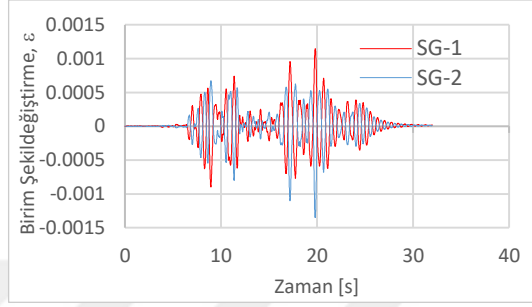
A-TMZ270



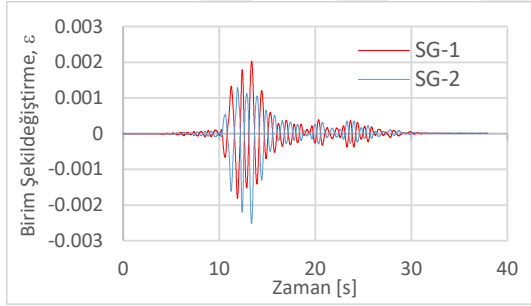
CLW-TR



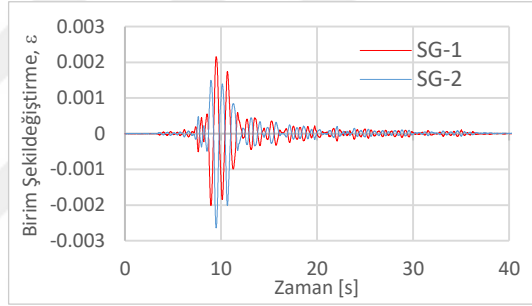
LOS-270



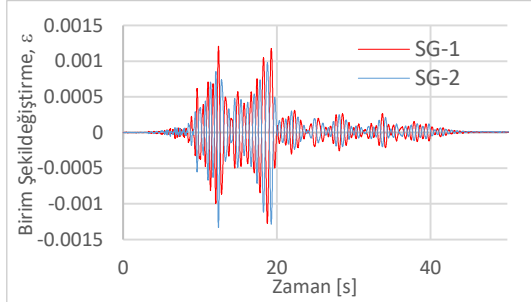
POE-360



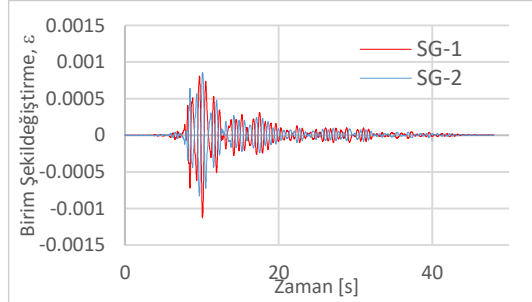
DZC-270



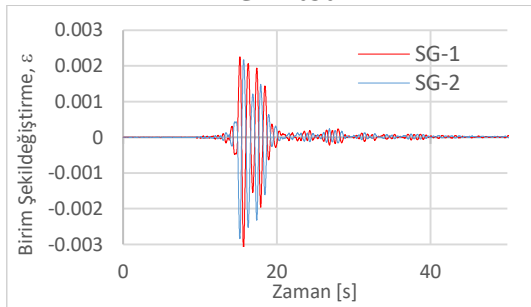
RIO-270



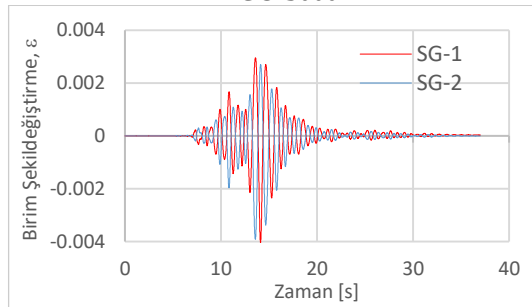
CAP-090



GO-3000



BOL-090

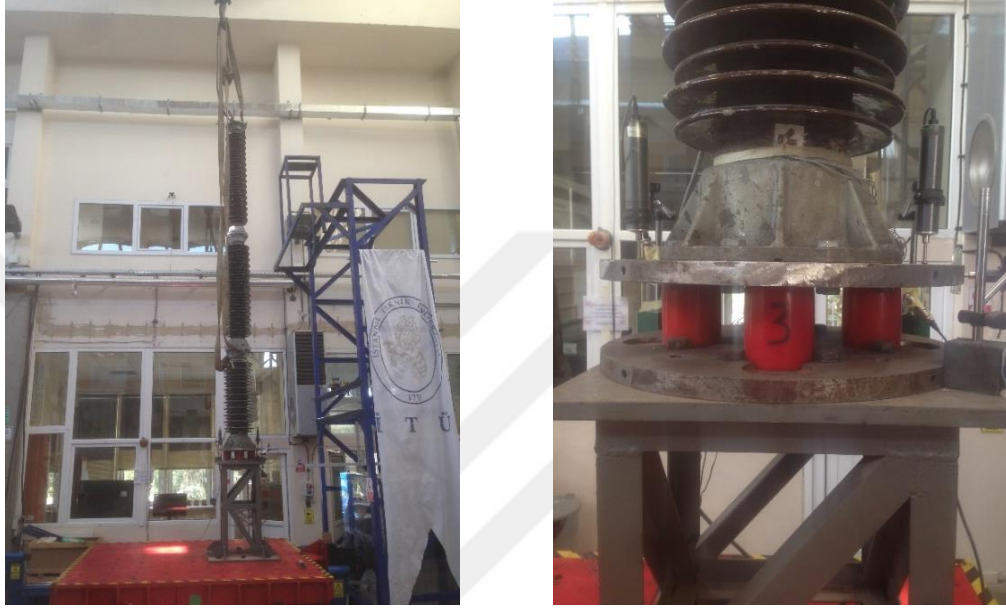


MUL-009

Şekil 2.80 : GEO-1 yalıtım cihazı çelik gergi birim şekildeğiştirme geçmişleri.

2.4.5.4 Düşük rijitlikli (GEO-2) sismik yalıtım cihazı

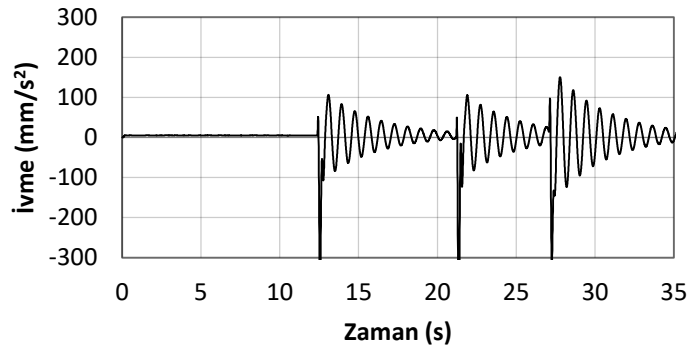
Geometrik özellikleri Bölüm 2.3.3’de anlatılan sismik yalıtım cihazı, sarsma masasına rijit olarak bağlanmış çelik taşıyıcı sistem üzerine yerleştirdikten sonra Şekil 2.81’de görülen porselen elektrik izolatörlerini mesnetlemek üzere kullanılmıştır. Oluşturulan sistemin öncelikle serbest titreşim özellikleri çalışılmış, ardından da seçilmiş deprem kayıtları için sarsma masası deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.81 : GEO-2 sarsma masası deney düzeneği.

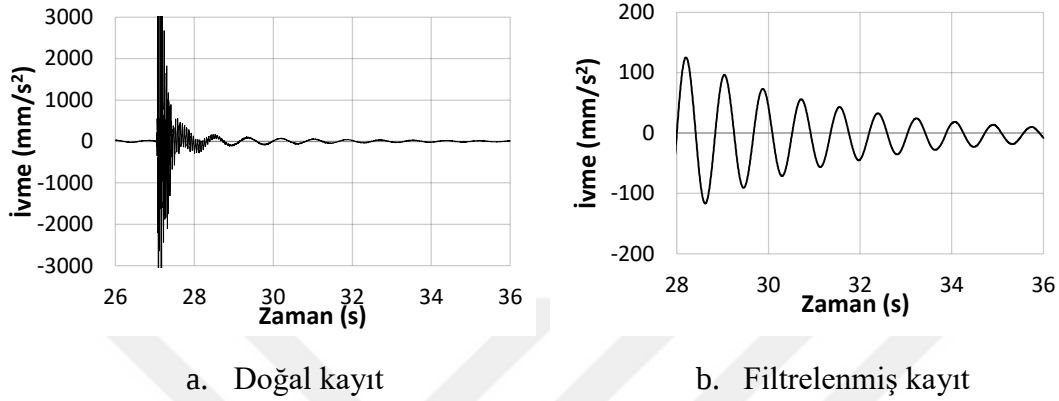
2.4.5.4.1 Serbest titreşim deneyleri

Masa hareket doğrultusu ile ona dik doğrultuda serbest titreşim deneyleri gerçekleştirilmiş olmakla birlikte sonuçların benzer olması nedeniyle burada sadece hareket doğrultusundaki sonuçlar verilmiştir. 40s uzunluğundaki bir kayıt içerisinde 3 kez çekiç ile uyarı verilmiştir. Ölçülen tepe ivmesinin zamana göre değişimi Şekil 2.82’de yer almaktadır.

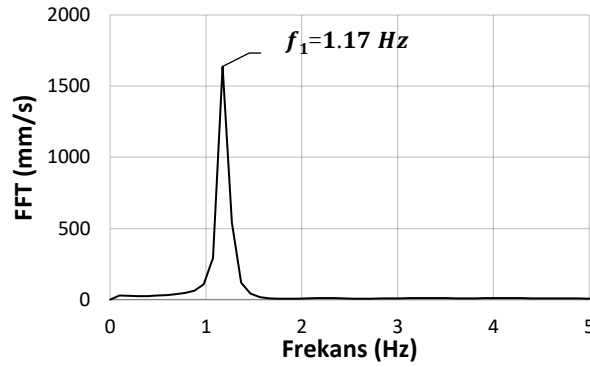


Şekil 2.82 : Çekiç deneyi tepe ivme kaydı.

Alınan toplam kayıt içerisinde çıkarılan 8s uzunluğundaki (28s~36s) bölümün doğal ve filtrelenmiş halleri Şekil 2.83a ve Şekil 2.84b’de gösterilmiştir. Kayıt üzerinde gerçekleştirilen Fourier dönüşümü ile baskın frekans büyüklüğü 1.17 Hz olarak elde edilmiştir, Şekil 2.84. Gerçekleşen titreşim frekansına bağlı olarak, alçak geçiren filtre eşiği de 15 Hz olarak seçilmiştir.

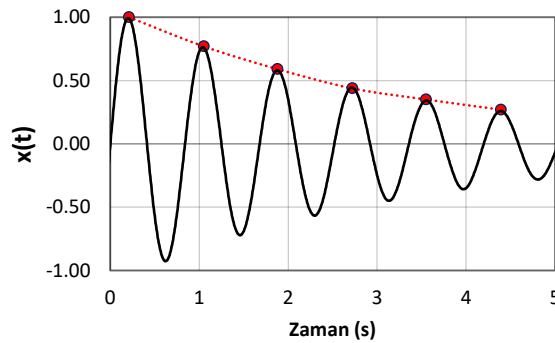


Şekil 2.83 : Çekiç deneyi doğal ve filtrelenmiş tepe ivme kayıtları.



Şekil 2.84 : İvme kaydı parçasına ait Fourier dönüşüm grafiği.

Şekil 2.83b’de yer alan titreşim kaydında en büyük salınım genliği birim olacak şekilde normelleştirme işlemi yapılırsa Şekil 2.85’de verilen grafik elde edilmektedir.



Şekil 2.85 : Çekiç deneyi normelleştirilmiş sistem cevabı.

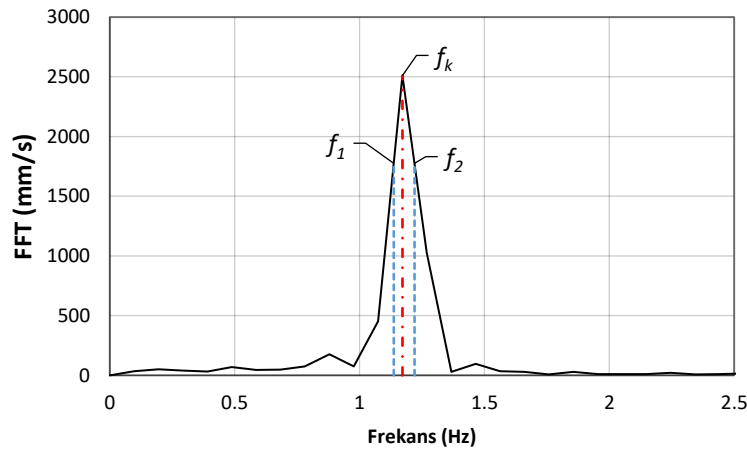
Denklem 2.25 ve 2.26’de verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%5.16$ olmuştur.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.25)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.0516 \quad (2.26)$$

Şekil 2.85’de verilen 5 s uzunluğundaki kayda yarım güç band genişliği yöntemi uygulandığında elde edilen büyüklükler Şekil 2.86’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi f_k frekansı 1.17 Hz, f_1 ve f_2 frekansları ise 1.13 Hz ve 1.23 Hz olarak elde edilmiştir. Denklem 2.27 kullanıldığında bu yöntemle göre elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%4.4$ olmaktadır.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2 f_k} = \frac{1.23 - 1.13}{2 \times 1.17} = 0.044 \quad (2.27)$$

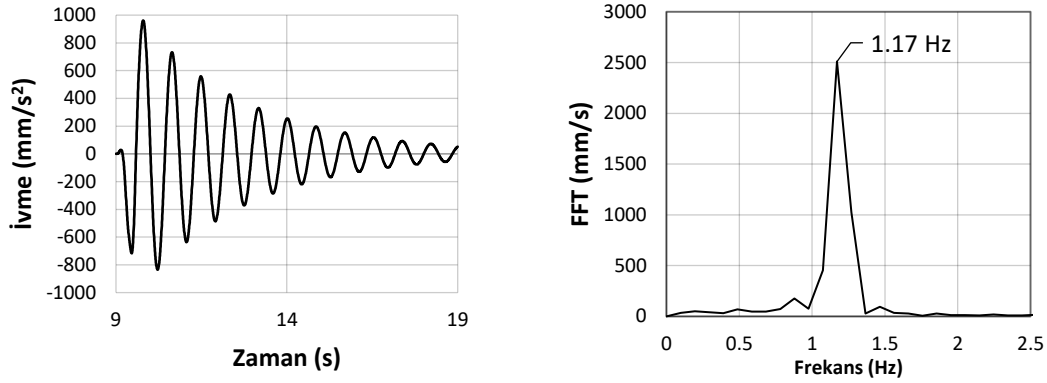


Şekil 2.86 : Çekiç deneyi yarım güç band genişliği yöntemi.

Her iki değerlendirme yöntemi aynı veri dosyası üzerinde kullanıldığında elde edilen sönüm oranları $\%5.16$ ve $\%4.4$ olmuştur.

Sismik yalıtım cihazının sönüm özelliğinin belirlenmesinde ikinci adım olarak çek-bırak yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin uygulanmasında dört aşama bulunmaktadır. Her aşamada, porselen elektrik izolatörünün tepe noktasına farklı genliklerde çekme kuvveti etkilmiştir. “F” olarak adlandırılan durum aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmış, 2F, 3F ve 4F durumlarına ait sonuçlar ise Çizelge 2.11’de verilmiştir.

“F” durumu için alınan ve uzunluğu yaklaşık 12 s olan kayıt Şekil 2.87a’da, karşı gelen Fourier spektrumu da Şekil 2.87b’de yer almaktadır. Spektrumdan görüldüğü gibi alınan kayıt için etkin frekans 1.17 Hz’dir.

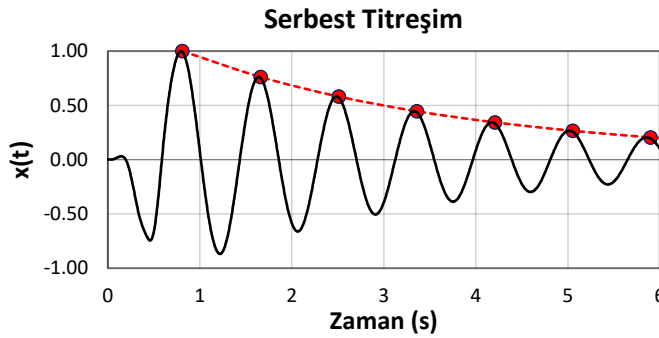


a. Tepe ivme geçmişi

b. Fourier dönüşüm grafiği

Şekil 2.87 : Çek-bırak deneyi – tepe ivme geçmişi ve Fourier dönüşüm grafiği.

Şekil 2.87’deki tepe ivme kaydının en büyük değer birim olacak şekilde normalleştirilmesiyle elde edilen grafik Şekil 2.88’de verilmektedir.



Şekil 2.88 : Çek-bırak testi normalleştirilmiş sistem cevabı.

Denklem 2.28 ve 2.29’de verilen ifade kullanılarak elde edilen sistem sönümü $\zeta = \%4.34$ olmuştur.

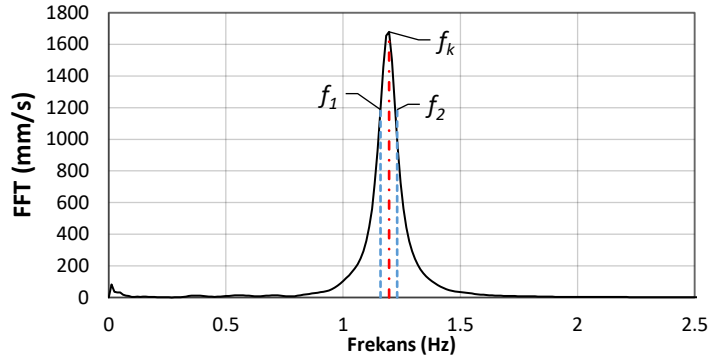
$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{x_1}{x_{n+1}} \right) = 2\pi\zeta \quad (2.28)$$

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi} = 0.0434 \quad (2.29)$$

Aynı kayıt için yarım güç band genişliği yöntemi kullanıldığında f_k , f_1 ve f_2 büyüklükleri sırasıyla 1.17 Hz, 1.14 Hz ve 1.22 Hz olarak elde edilmiştir (Şekil 2.89).

Denklem 2.30 kullanıldığında bu yöntemle göre elde edilen sönüm oranı $\zeta = \%3.41$ olmaktadır.

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{2 f_k} = \frac{1.22 - 1.14}{2 \times 1.17} = 0.0341 \quad (2.30)$$



Şekil 2.89 : Çek-Bırak testi yarım-güç band genişliği yöntemi.

Her iki yöntemle elde edilen sönüm oranı değeri $\%4.34$ ve $\%3.41$ olarak belirlenmiştir.

Ayrıntıları yukarıda verilen ve F kuvveti ile yapılan deneye benzer olarak, sırasıyla 2F, 3F ve 4F kuvvetleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde ulaşılan en büyük tepe yerdeğiştirmesi, en büyük ivme, etkin frekans ve iki farklı değerlendirme yöntemine göre belirlenen sönüm oranları Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Farklı çekme kuvvetleri ile elde edilen sönüm oranlarının titreşim genliğine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durum özellikle logaritmik azalım yönteminde daha belirginleşmektedir.

Çizelge 2.11’den de görüldüğü gibi, logaritmik azalım yönteminde elde edilen en küçük ve en büyük değerler $\%4.34 \sim \%6.00$ aralığında bulunurken, yarım-güç band genişliği yönteminde bu değerler $\%3.41 \sim \%5.02$ aralığında elde edilmektedir.

Çek-bırak yöntemiyle elde edilen sönüm oranlarının uygulanan zorun genliğine bağlı olması nedeniyle; kuvvetli yer hareketi için geliştirilmeye çalışılan sismik yalıtım cihazının sönüm özelliklerinin 3F veya 4F durumlarıyla daha gerçekçi olarak temsil edilebileceği öngörülmektedir. Deneysel sonuçlara göre, düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-2) için alınabilecek sönüm oranının $\%4 \sim \%6$ aralığında olduğu söylenebilir.

Çizelge 2.11 : Yüksek rijitlikli (GEO-1) sismik yalıtım cihazı için farklı yöntemler ile elde edilen sönüm oranları.

	Tepe Yerdeğiştirme (mm)	En Büyük İvme (mm/s ²)	Doğal Titreşim Frekansı (Hz)	Sönüm Oranı	
				Logaritmik Azalım Yöntemi	Yarım-Güç Band Genişliği Yöntemi
Çekiç Testi	1.76	149	1.17	%5.16	%4.44
Çek-Bırak -F	12.37	834	1.17	%4.34	%3.41
Çek-Bırak -2F	37.90	1740	1.17	%4.87	%3.84
Çek-Bırak -3F	47.75	2227	1.17	%5.59	%3.95
Çek-Bırak -4F	48.25	2400	1.17	%6.00	%5.02

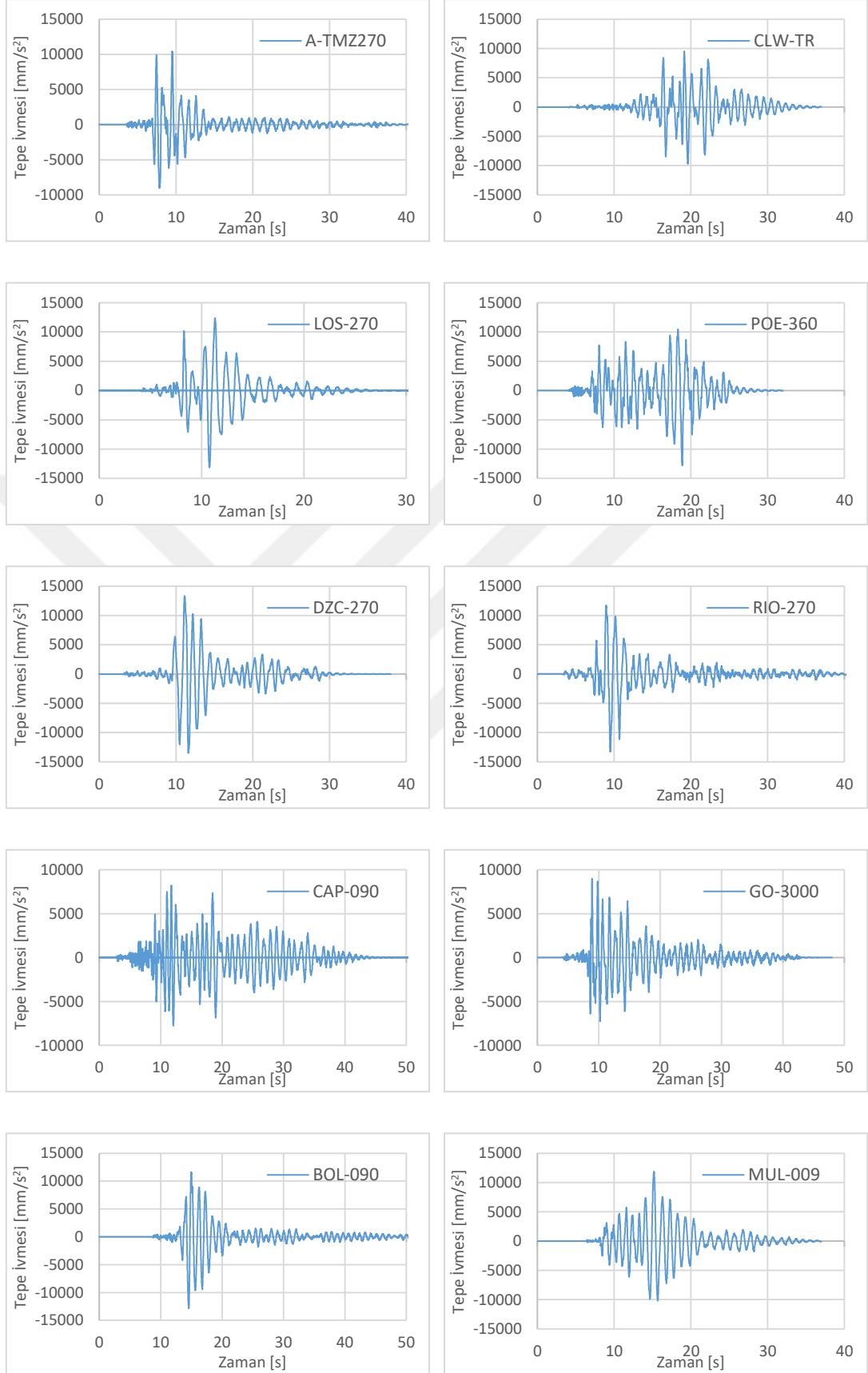
2.4.5.4.2 Gerçek ivme kayıtları için sarsma masası deneyleri

Bölüm 2.4.3.2, Çizelge 2.7’de özellikleri tanımlanan deprem ivme kayıtları kullanılarak gerçekleştirilen sarsma masası deneylerinde elde edilen farklı büyüklüklere ait değişimler aşağıda verilmektedir. Deneylerde, seçilen ivme kayıtları dört farklı ölçek katsayısı ile ölçeklendirilmiştir. Bu katsayılar sırasıyla %33, %66, %100 ve SF’ dir.

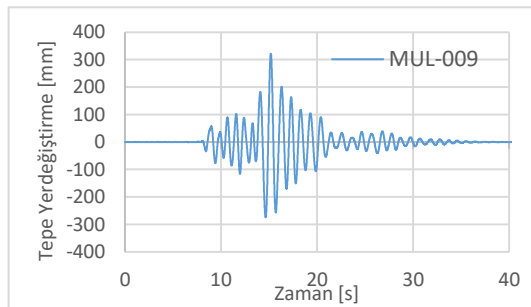
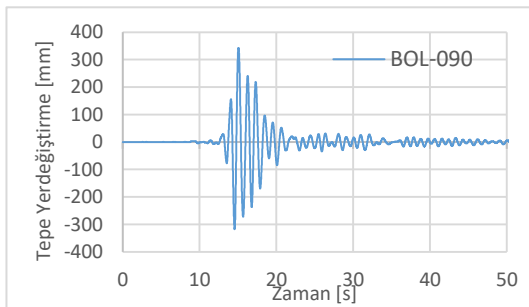
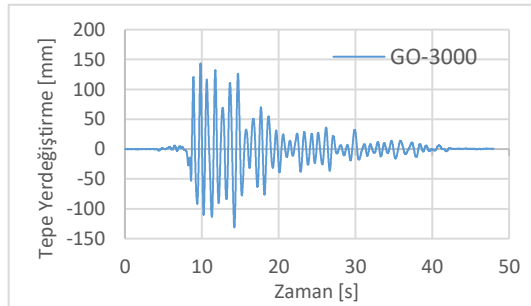
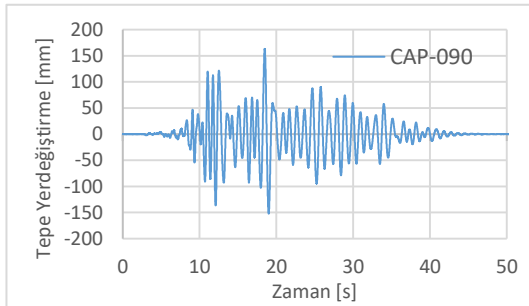
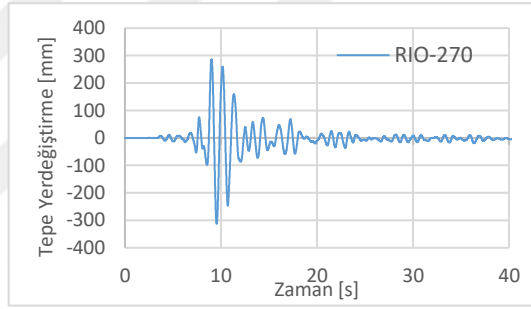
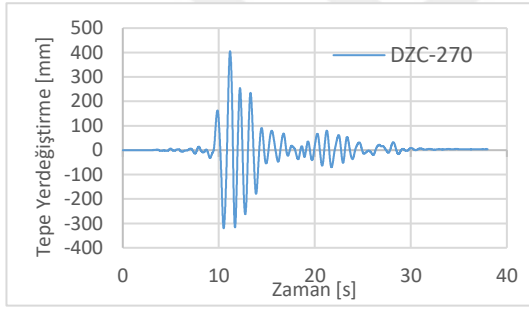
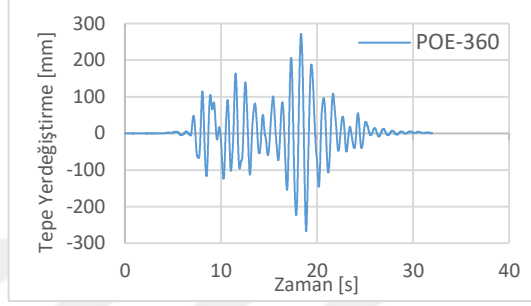
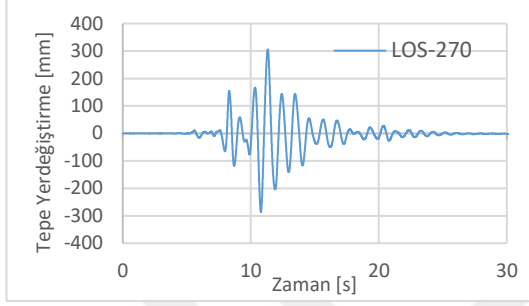
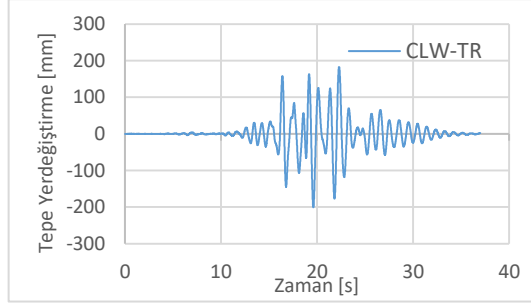
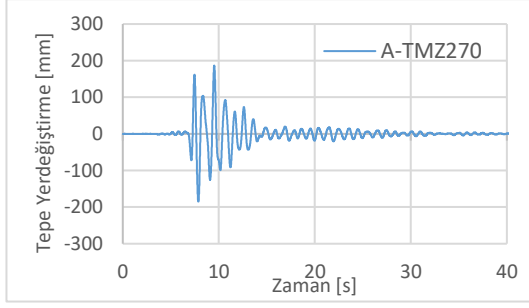
SF katsayıları ile ölçeklendirilmiş deprem kayıtları kullanılarak elde edilen farklı büyüklüklere ait değişim grafikleri aşağıda verilmektedir. Numune tepesinde hareket doğrultusunda elde edilen ivme ve yerdeğiştirme büyüklükleri sırasıyla Şekil 2.90 ve Şekil 2.91’de yer almaktadır.

Deneysel veriler kullanılarak Denklem 2.18a ve 2.18b ile elde edilen taban kesme kuvveti ve eğilme momenti grafikleri Şekil 2.92 ve 2.93’de verilmektedir.

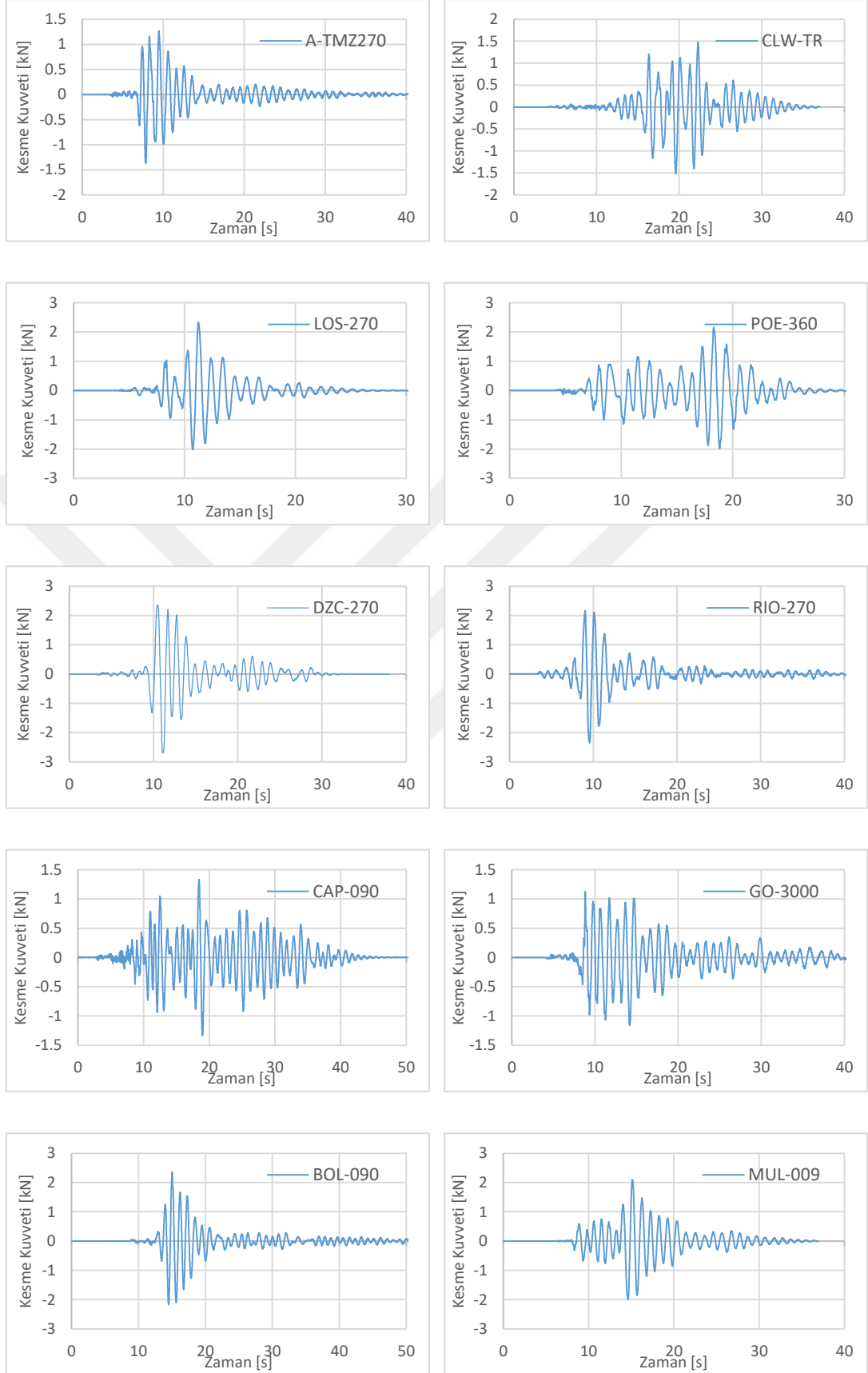
Sismik yalıtım cihazının merkezinde yer alan çelik gergi çubuğu üzerine yapıştırılmış şekildeğiştirme ölçerlerden alınan veriler Şekil 2.96’de yer almaktadır. 12.9 kalite malzeme sınıfından imal edilen çelik gergi elemanının üzerinde, uygulanan tüm deprem ivme kayıtları sonrasında kalıcı (plastik) şekildeğiştirme oluşmamıştır.



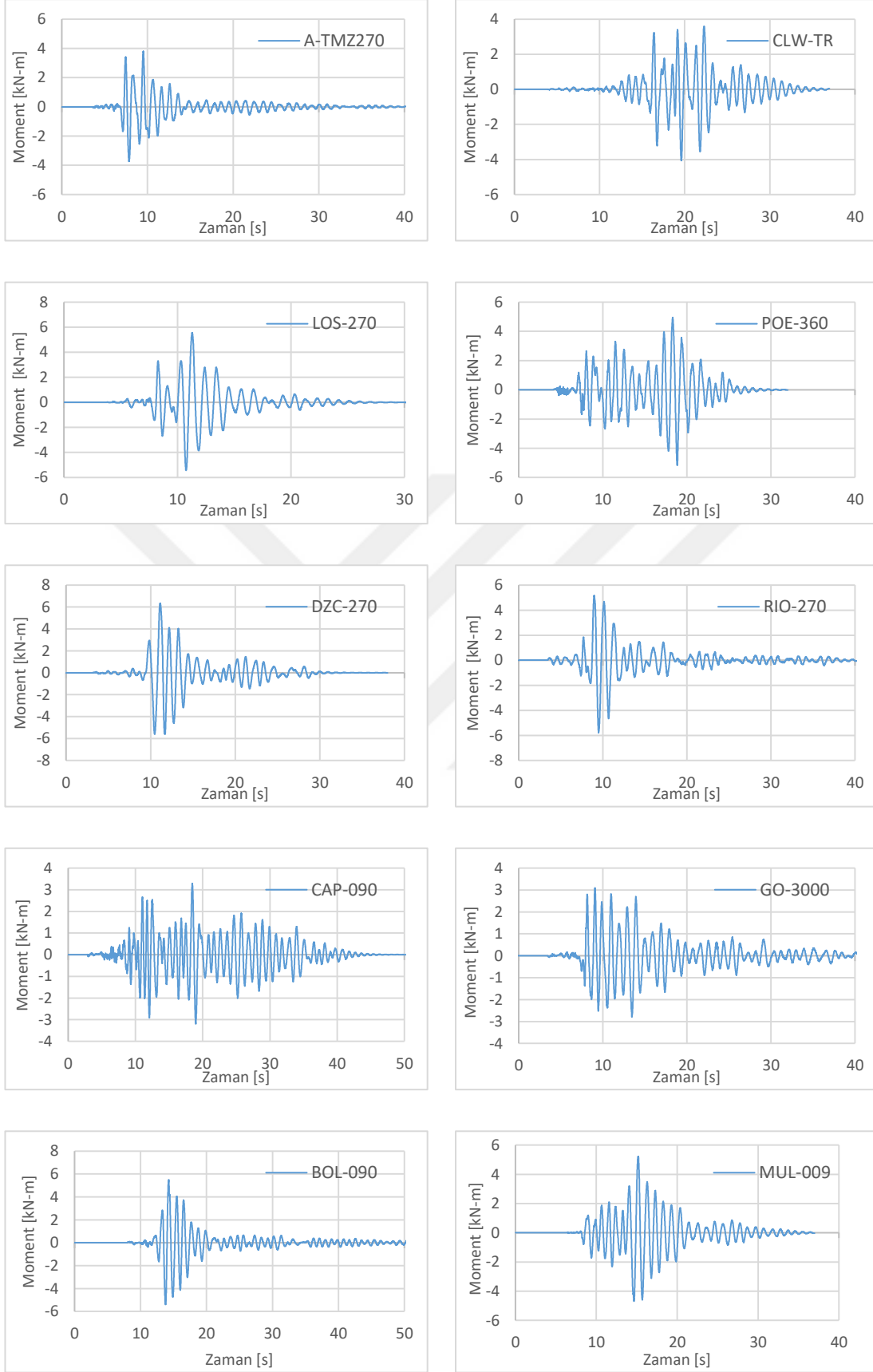
Şekil 2.90 : Numune tepe ivme kayıtları.



şekil 2.91 : Numune tepe yerdeğiştirme kayıtları.

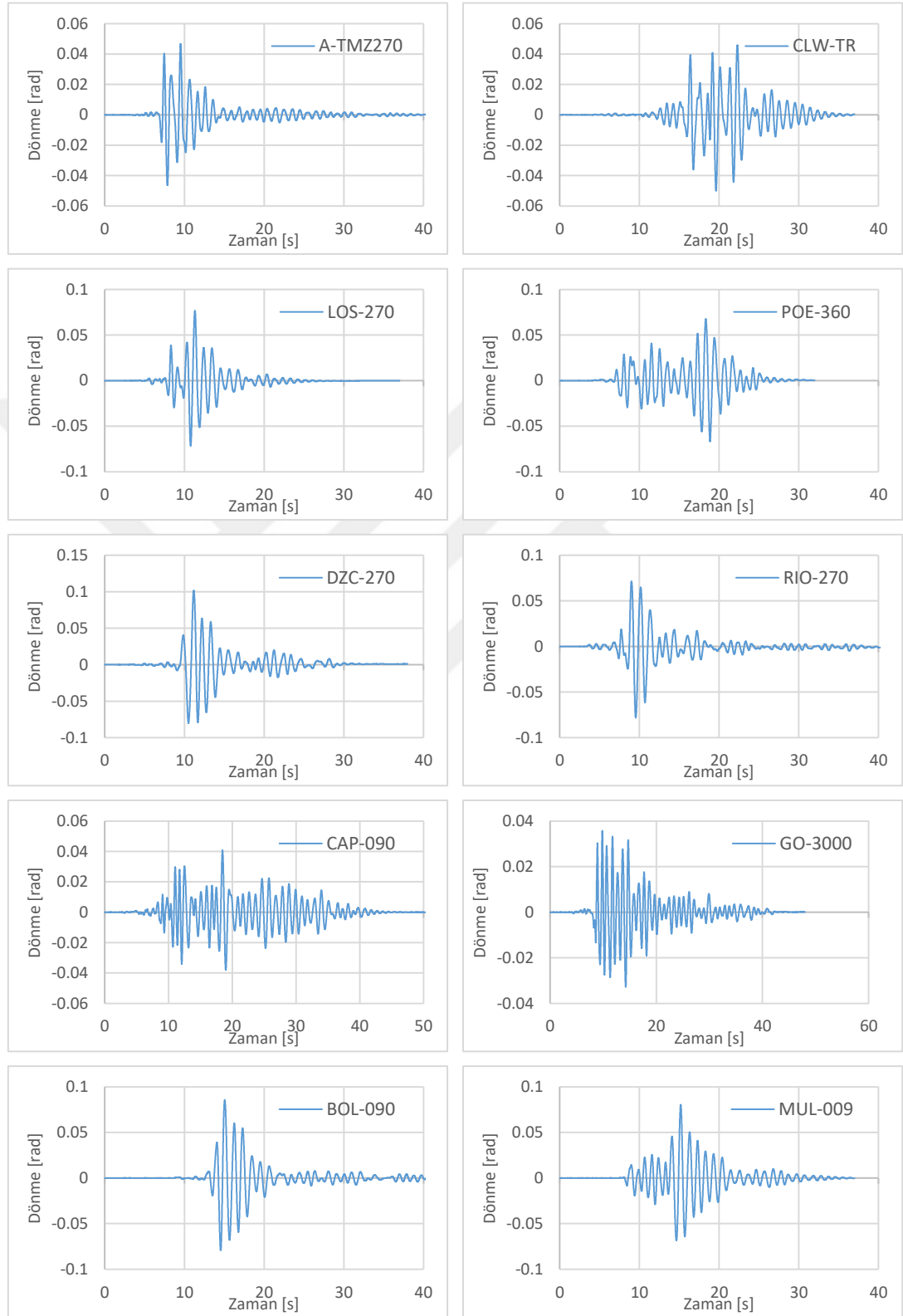


Şekil 2.92 : Numune taban kesitinde gerçekleşen kesme kuvvet geçmişi.

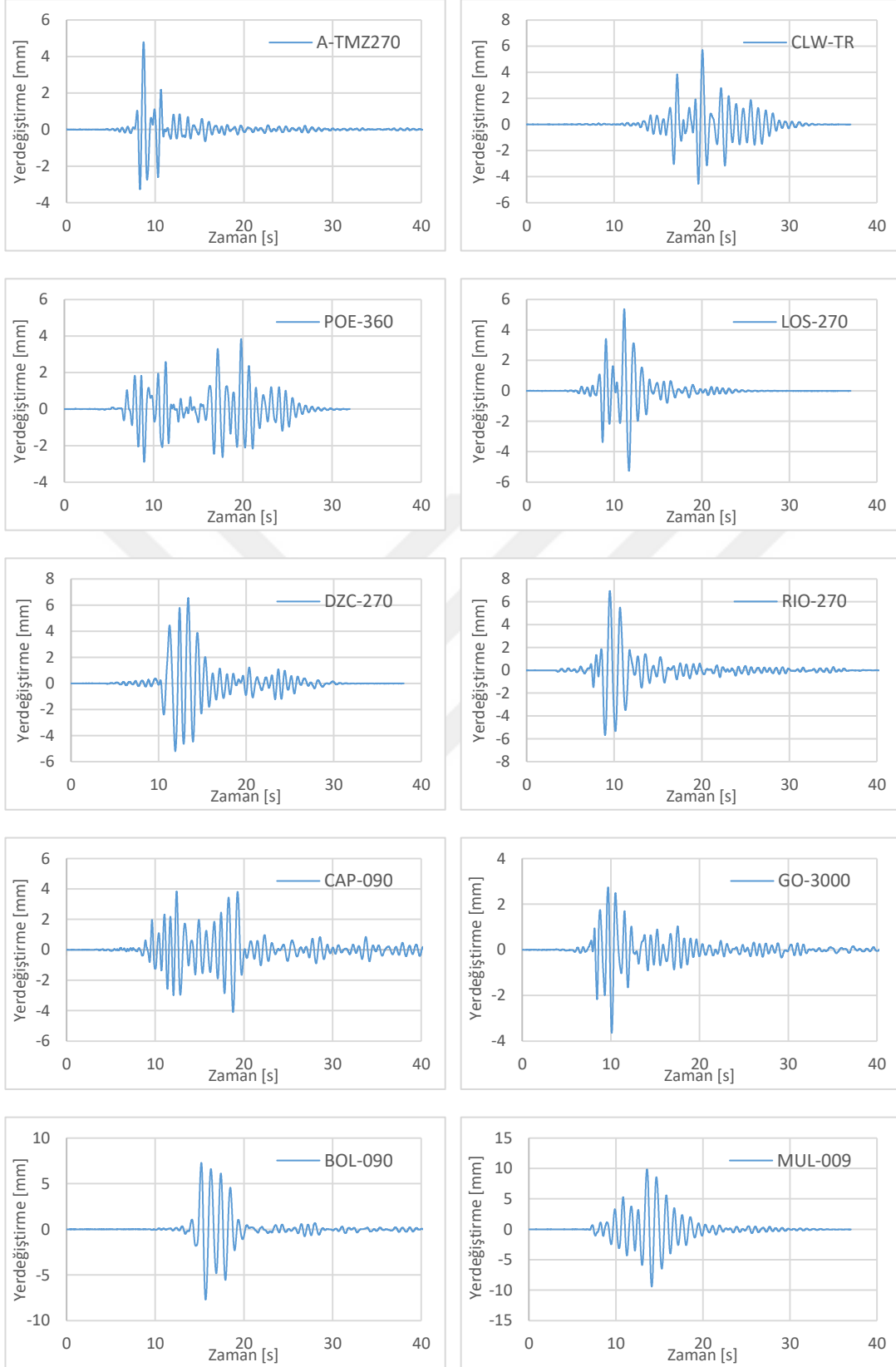


Şekil 2.93 : Numune taban kesitinde gerçekleşen eğilme momenti geçmişi.

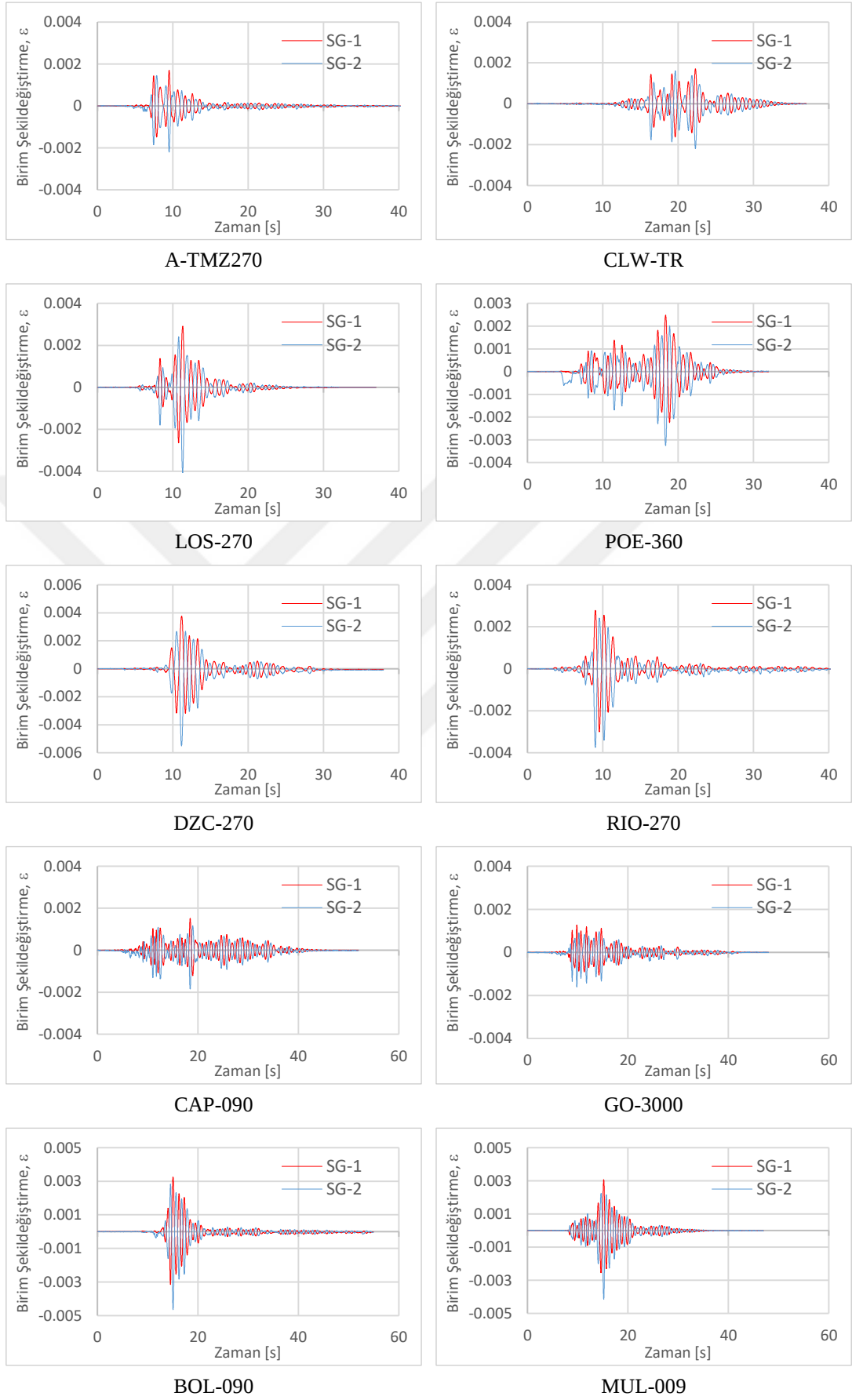
Sismik yalıtım cihazında gerçekleşen dönme ve göreceli yatay hareket geçmişleri de Şekil 2.94 ve 2.95’de verilmiştir.



Şekil 2.94 : Sismik yalıtım cihazı dönme geçmişi.



Şekil 2.95 : Sismik yalıtım cihazı görelî yatay hareketi.



Şekil 2.96 : GEO-2 yalıtım cihazı çelik gergi birim şekildeğiştirme geçmişleri.

2.5 Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 2.4’de üç farklı mesnetlenme durumu için verilen deneysel sonuçlar, beş büyüklük cinsinden birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

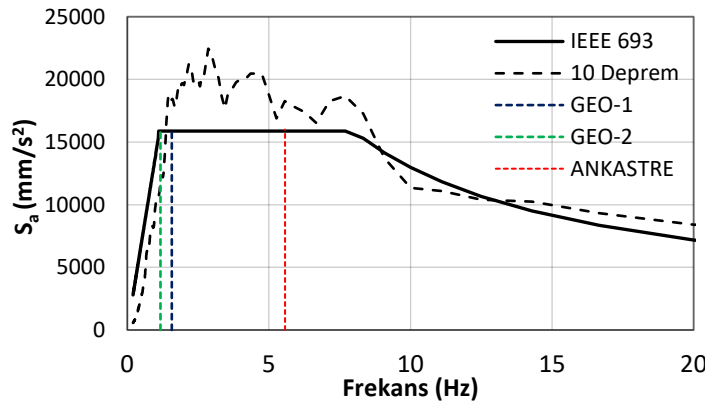
2.5.1 Serbest titreşim özellikleri

Üç farklı mesnetlenme durumu için deneysel çalışma ile elde edilen etkin doğal titreşim periyotları ve karşı gelen sönüm oranları Çizelge 2.12’de verilmiştir. Ankastre mesnetlenme durumunda 0.18 s (5.57 Hz) olan etkin periyot, sismik yalıtım cihazı kullanılan durumlarda iki farklı geometri için 0.64 s (1.56 Hz) ve 0.85 s (1.17 Hz) değerlerini almıştır. Elastik davranış gereği bu periyot ve frekans büyüklükleri deprem hareketi süresince sabit kalmaktadırlar.

Çizelge 2.12 : Etkin titreşim periyotları.

	Ankastre	GEO-1	GEO-2
1. Doğal Titreşim Periyodu (s)	0.18	0.64	0.85
Etkin Frekans (Hz)	5.57	1.56	1.17
Sönüm Oranı, % ξ	2%	%5~%8	%4~%6

Elde edilen titreşim frekanslarının tasarım ivme spektrumu üzerine yerleştirilmesi durumunda ortaya çıkan durum Şekil 2.97’de verilmektedir.



Şekil 2.97 : IEEE-693 hedef spektrumu ve seçilen deprem kayıtlarının spektrumlarının ortalaması.

Hedef spektrum eğrisine göre yapılan değerlendirmede, üç mesnetlenme durumuna karşı gelen frekans büyüklüklerinin plato bölgesinde kaldığı görülmektedir. Ortalama spektrum eğrisine için yapılan karşılaştırmada ise ankastre mesnetlenme ve GEO-1 tipi sismik yalıtım durumlarında spektral ivmenin yaklaşık olarak eşit, GEO-2 tipi sismik yalıtım durumunda ise bir miktar küçük olduğu görülmektedir.

2.5.2 Enerji denklemleri ile sönüm oranının belirlenmesi

Hareket denkleminin zaman tanım alanında doğrudan integrasyonu ile tek serbestlik dereceli bir sistemin Denklem 2.31’de verilen enerji denge denklemi elde edilmektedir (Akiyama, 1985).

$$\int m\ddot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int c\dot{u}(t)\dot{u}(t)dt + \int f_s\dot{u}(t)dt = -\int m\ddot{u}_g(t)\dot{u}(t)dt \quad (2.31)$$

Denklemde m , c ve f_s sırasıyla kütle, sönüm ve tepki kuvveti matrislerini, $\ddot{u}$ ve $\dot{u}$ göreceli ivme ve göreceli hızı, $\ddot{u}_g$ ise yer ivmesini ifade etmektedir. Sönüm matrisi c ise aşağıdaki formda yazılabilmektedir (Denklem 2.32).

$$c = 2\xi\omega m \quad (2.32)$$

Denklem 2.32’da ξ kritik sönüm oranını, ω ise açısal frekansı temsil etmektedir. Denklem 2.31 aşağıdaki şekilde tekrar düzenlendiğinde, enerji denkleminin diğer bir ifade biçimi elde edilmektedir (Denklem 2.33).

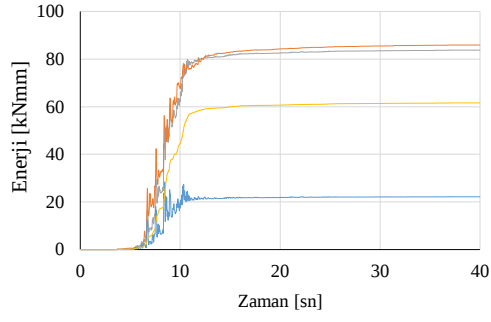
$$E_K + E_D + E_S = E_I \quad (2.33)$$

Denklem 2.33’nın 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 sisteme giren deprem enerjisini temsil etmektedir.

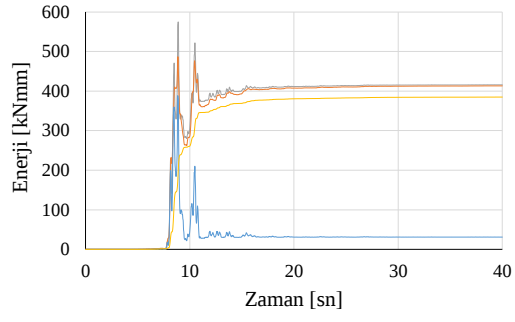
Enerji denklemlerinde verilen terimlerin tümü deney sırasında kaydedilen verilerden elde edilebilmektedir. Bunlar; ivme ölçerlerle ölçülen ivmeler, yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeler ve bu yerdeğiştirmelerden üretilen hızlardır. Deneylerden toplanan bu verilere *Butterworth sayısal filtresi*, 15 Hz olarak uygulanmıştır.

Denklem 2.26’daki E_K , E_S ve E_I deneylerden gelen veriler kullanılarak hesaplanırken, eşdeğer sönüm oranı (ξ) için enerji eşitliğini sağlamak üzere ardışık yaklaşıma dayalı bir tahmin yapılmaktadır. Deneyler sırasında sismik yalıtımlı numunelerde plastik şekildeğiştirme tespit edilmediğinden, f_s olarak elastik tepki kuvvetleri kullanılmıştır. Bu amaçla, Bölüm 2.4’de verilen etkin frekans değerlerine karşı gelen periyotlar (T_{et}) Denklem 2.34’de yerine konularak *etkin yatay rijitlikler* (K_{et}) kullanılmıştır.

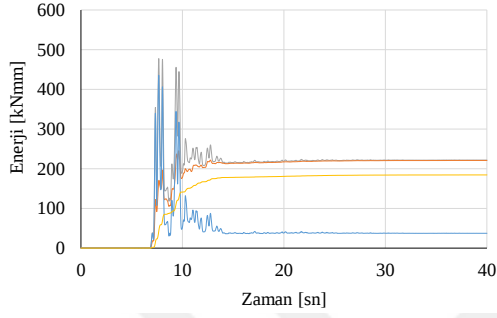
$$T_{et} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K_{et}}} \quad (2.34)$$



Ankastr Mesnetlenme



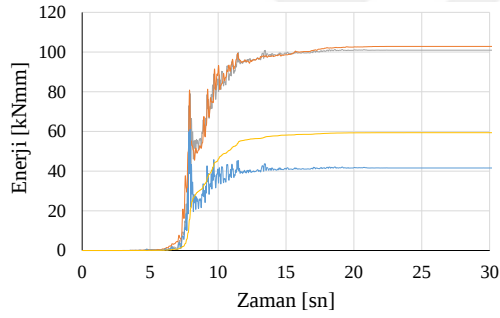
GEO-1



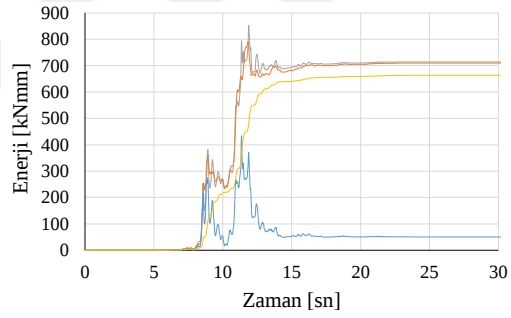
GEO-2

— EI
— EK+ES
— ED
— EK+ED+ES

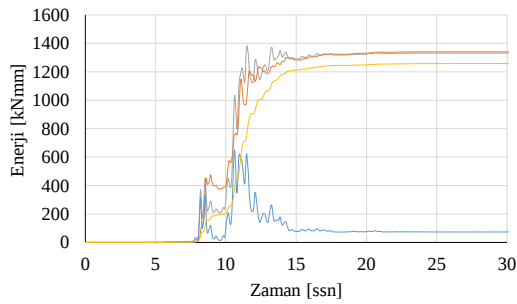
Şekil 2.98 : ATMZ-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.



Ankastr Mesnetlenme



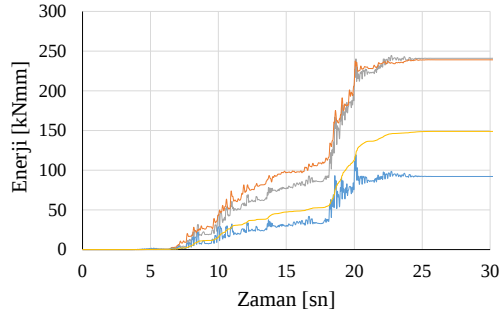
GEO-1



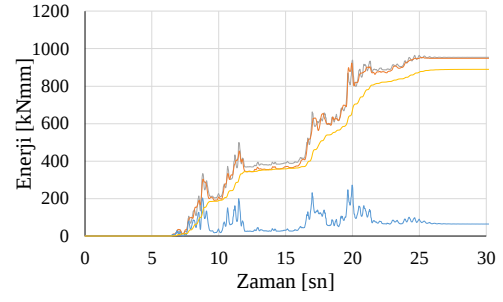
GEO-2

— EI
— EK+ES
— ED
— EK+ED+ES

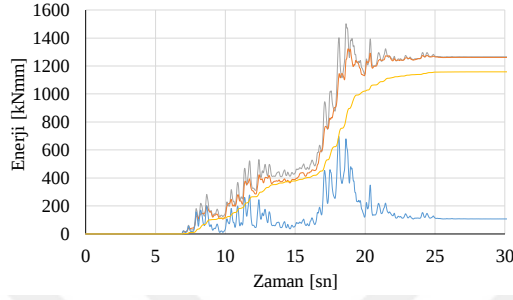
Şekil 2.99 : LOS-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.



Ankastr Mesnetlenme



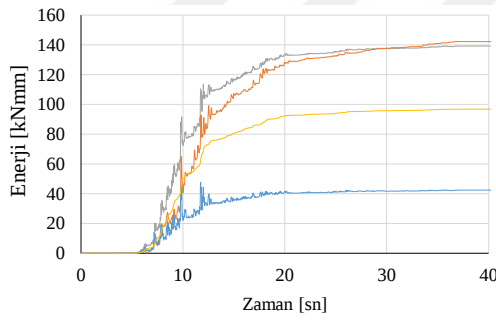
GEO-1



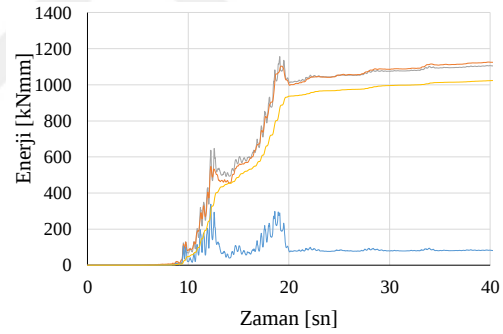
GEO-2

— EI
— EK+ES
— ED
— EK+ED+ES

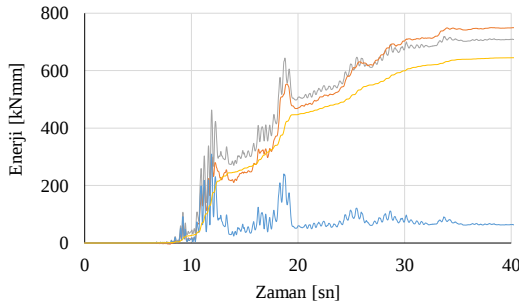
Şekil 2.100 : LOS-270 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.



Ankastr Mesnetlenme



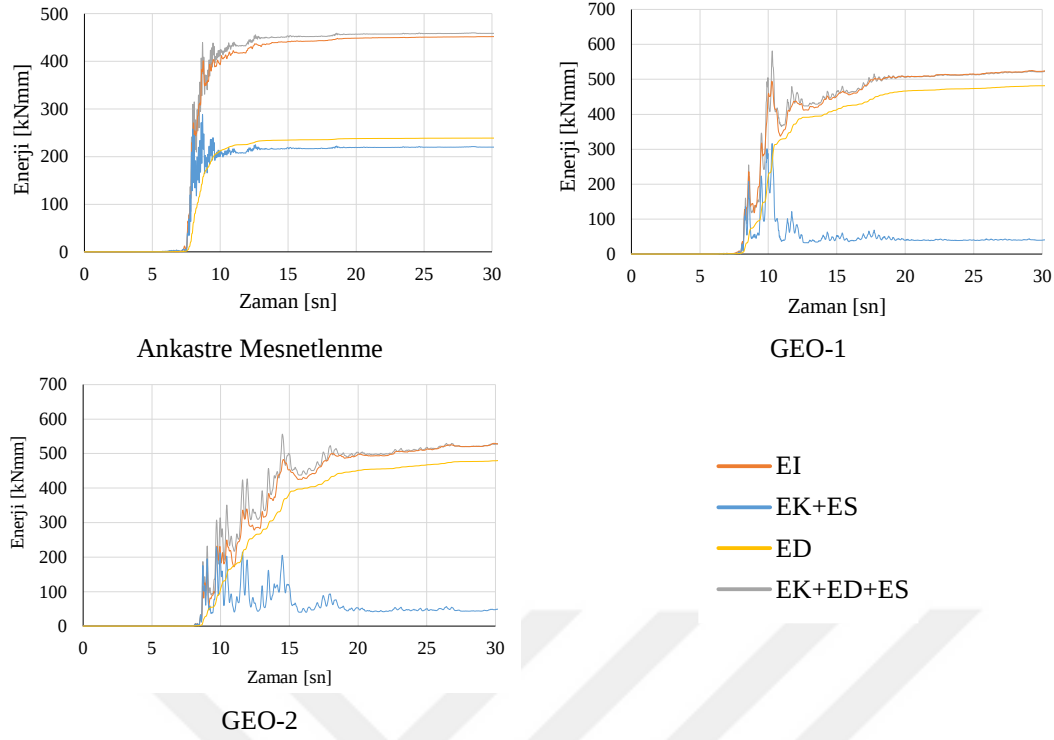
GEO-1



GEO-2

— EI
— EK+ES
— ED
— EK+ED+ES

Şekil 2.101 : CAP-090 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.



Şekil 2.102 : GO-3000 deprem kaydı enerji dengesi grafikleri.

Ankastre mesnetli ve sismik yalıtımlı sistemlere ait deney verileri kullanılarak elde edilen enerji denge grafikleri beş farklı deprem kaydı için oluşturulmuştur (Şekil 2.98 - Şekil 2.102). Ankastre sistem için ardışık yaklaşımla %0.8-2.2 aralığında bir eşdeğer viskoz sönüm oranı (ξ_{eqd}) elde edilirken, sismik yalıtımlı GEO-1 ve GEO-2 için bu değerler sırasıyla %5-6 ve %4-5 olarak elde edilmiştir. Enerji grafikleri kullanılarak elde edilen sönüm oranları Çizelge 2.13’de sunulmuştur. Elde edilen sönüm oranı değerleri Bölüm 2.4’de sunulan serbest titreşim deneylerinden elde edilen değerler ile uyum göstermektedir.

Çizelge 2.13 : Enerji grafiklerinden elde edilen sönüm oranları.

Deprem	İstasyon	Ankastre Mesnetlenmiş (%)	GEO-1 (%)	GEO-2 (%)
FRIULI	A-TMZ270	2.2	5.0	3.8
NORTHR	LOS270	1.1	5.5	5.0
SUPERST	B-POE360	1.3	5.8	4.2
LOMAP	CAP090	1.8	5.3	4.1
LOMAP	G03000	0.8	5.1	4.3

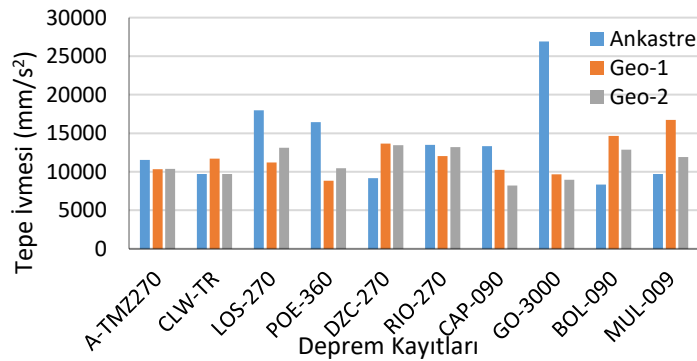
2.5.3 Tepe ivmesi

Seçilen depremler etkisinde, porselen elektrik izolatörünün tepe noktasında elde edilen en büyük yatay ivme büyüklükleri, üç ayrı mesnetlenme durumu için Çizelge 2.14’de verilmektedir. 8 no’lu sırada verilen GO-3000 deprem kaydı için ankastre mesnetlenme durumunda gerçekleşen ivme değeri 26903 mm/s^2 iken sismik yalıtımlı durumlarda sırasıyla 9669 mm/s^2 ve 8944 mm/s^2 değerleri elde edilmiştir. Buna karşın 9 no’lu sırada verilen BOL-090 deprem kaydı için ankastre mesnetlenme durumundaki 8320 mm/s^2 değeri sismik yalıtımlı durumlarda sırasıyla 14672 mm/s^2 ve 12876 mm/s^2 olarak elde edilmiştir.

Çizelge 2.14 : En büyük tepe ivmeleri.

Sıra No	Kayıt Adı	Ankastre (mm/s^2)	GEO-1 (mm/s^2)	GEO-2 (mm/s^2)
1	A-TMZ270	11534	10341	10385
2	CLW-TR	9696	11703	9711
3	LOS-270	17981	11187	13112
4	POE-360	16430	8845	10466
5	DZC-270	9164	13670	13431
6	RIO-270	13495	12041	13218
7	CAP-090	13341	10267	8225
8	GO-3000	26903	9669	8944
9	BOL-090	8320	14672	12876
10	MUL-009	9722	16716	11896
Ortalama		13659	11911	11226
Standard Sapma		5351	2323	1826
Ortalama +1 S.S.		19010	14234	13053

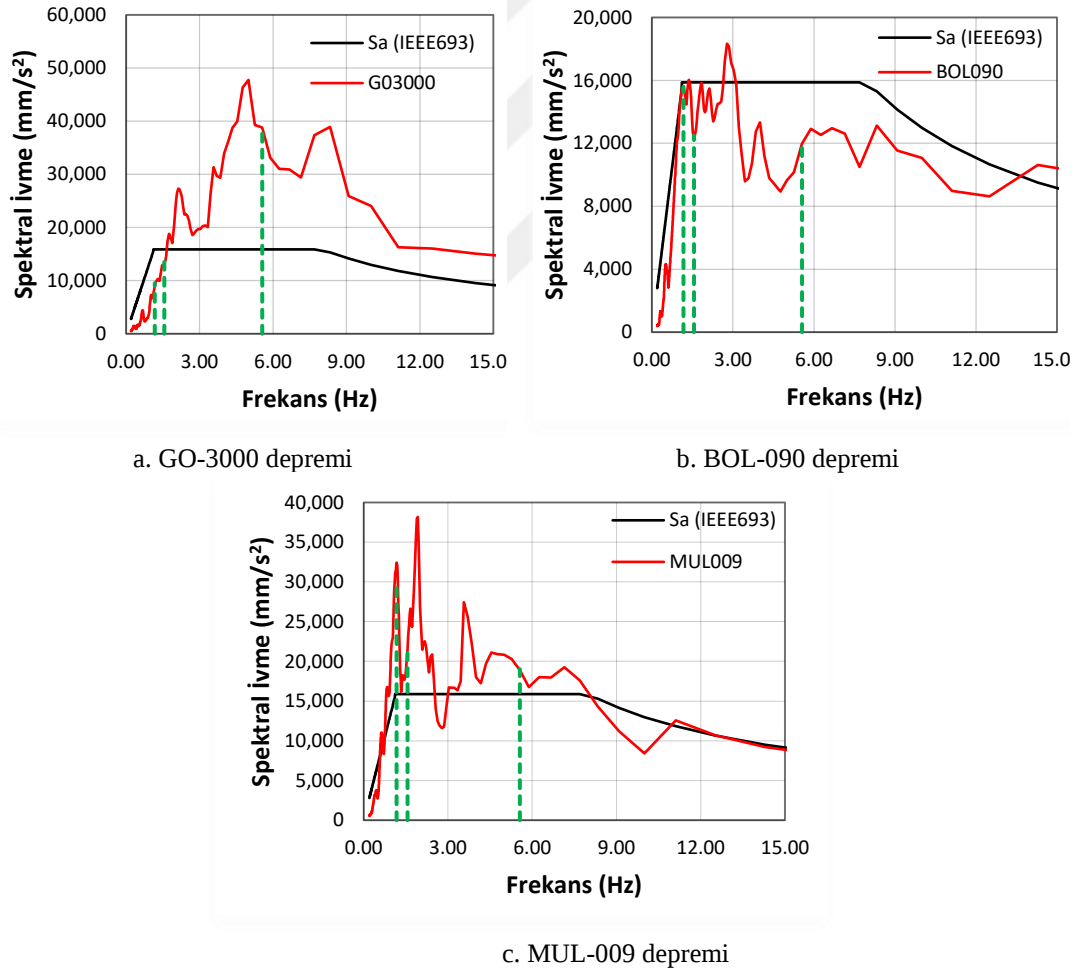
Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe ivmeleri çubuk diyagram biçiminde Şekil 2.103’de karşılaştırılmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, sismik yalıtım cihazının en etkili olduğu durum GO-3000 deprem kaydı, en olumsuz tarafta kaldığı durumlar da BOL-090 ve MUL-009 deprem kayıtlarıdır.



Şekil 2.103 : Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe ivmeleri.

GO-3000, BOL-090 ve MUL-009 deprem kayıtları için üretilen elastik ivme spektrumları Şekil 2.104’de yer almaktadır. GO-3000 deprem kaydı için, ankastre mesnetlenme durumunda 38000 mm/s^2 , sismik yalıtımlı durumlarda 13500 mm/s^2 ve 9500 mm/s^2 spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Sismik yalıtım sistemin en etkili çalıştığı deprem kaydı GO-3000 olmaktadır. Sismik yalıtımlı durumlarda elde edilen spektral ivmenin ankastre mesnetlenmiş duruma oranı sırasıyla $13500/38000 = 0.35$ ve $9500/38000 = 0.25$ olmaktadır.

BOL-090 ve MUL-009 depremlerinde ise ankastre mesnetleme durumundaki spektral ivme büyüklükleri sismik yalıtılmış duruma göre daha küçük gerçekleşmektedir. Çizelge 2.14’ün 9 ve 10. satırlarında yer alan bu depremlerde sismik yalıtım cihazı etkili olamamaktadır.



Şekil 2.104 : Seçilen deprem kayıtları için üretilen elastik ivme spektrumları ve kritik frekanslar.

Seçilen 10 deprem kaydı için elde edilen en büyük ortalama ivmeler ankastre ve sismik yalıtımlı durumlarda sırasıyla 13659 mm/s^2 , 11911 mm/s^2 ve 11226 mm/s^2 olmuştur.

Karşı gelen standard sapmalar ise sırasıyla 5351 mm/s², 2323 mm/s², 1826 mm/s²'dir. Bu durumda, değerlendirmeye esas olan “*ortalama+1×standard sapma*” değerleri sırasıyla 19010 mm/s², 14234 mm/s² ve 13053 mm/s² olarak elde edilmiştir. Sismik yalıtımlı durumlarda elde edilen ivmenin ankastre mesnetlenmiş duruma oranı sırasıyla 14234/19010 = 0.75 ve 13053/19010 = 0.69 olmaktadır.

2.5.4 Tepe yerdeğiştirmesi

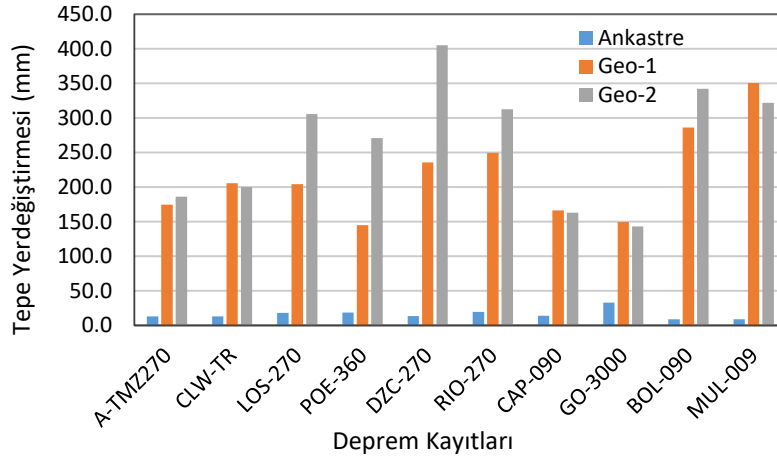
Sismik yalıtımlı durumda, beklendiği gibi tepe yerdeğiştirmeleri ankastre duruma göre oldukça artmaktadır. Çizelge 2.15’de 5 no’lu sırada yer alan DZC-270 deprem kaydı GEO-2 durumu için 405 mm yerdeğiştirme üretirken, ankastre durumda karşı gelen yerdeğiştirme 13.3 mm’dir.

Seçilen 10 deprem kaydı için yapılan istatistik değerlendirmede ankastre ve sismik yalıtımlı durumlar için elde edilen ortalama tepe yerdeğiştirmeleri ve karşı gelen standard sapmalar sırasıyla 16.1 mm, 216.6 mm ve 265.1 mm; 6.7 mm, 62.0 mm ve 82.7 mm olmaktadır. Buna göre “*ortalama+1×standard sapma*” değerleri sırasıyla 22.8 mm, 278.6 mm ve 347.8 mm olarak gerçekteşmektedir.

Çizelge 2.15 : En büyük tepe yerdeğiştirmeleri.

Sıra No	Kayıt Adı	Ankastre (mm)	GEO-1 (mm)	GEO-2 (mm)
1	A-TMZ270	12.8	174.6	186.3
2	CLW-TR	13.2	205.4	200.2
3	LOS-270	18.2	204.0	305.7
4	POE-360	18.7	144.9	271.0
5	DZC-270	13.3	235.8	405.0
6	RIO-270	19.7	249.5	312.3
7	CAP-090	14.0	166.2	163.1
8	GO-3000	33.1	149.5	143.0
9	BOL-090	8.6	286.1	342.0
10	MUL-009	9.0	350.3	321.9
Ortalama		16.1	216.6	265.1
Standard Sapma		6.7	62.0	82.7
Ortalama +1 S.S.		22.8	278.6	347.8

Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe yerdeğiştirmesi değerleri çubuk diyagram biçiminde Şekil 2.105’de karşılaştırılmıştır. Sismik yalıtımlı durumda gerçekteşen en büyük tepe yerdeğiştirmesi 405 mm olarak DZC-270 deprem kaydında gerçekteşmiştir.

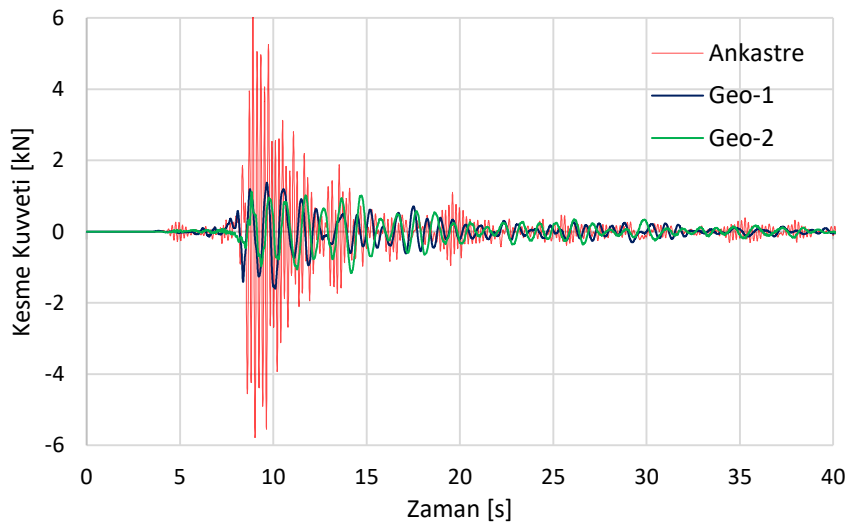


Şekil 2.105 : Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük tepe yerdeğiştirme değerleri.

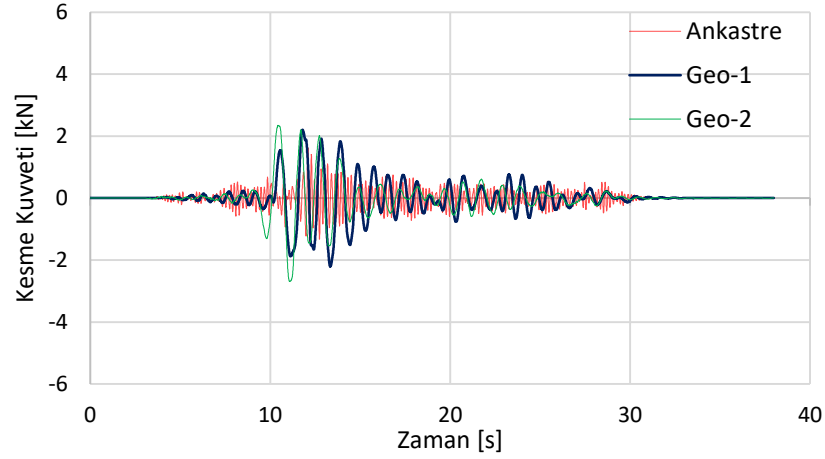
Seçilen deprem kayıtları için elde edilen “*ortalama+1×standard sapma*” değeri 348 mm olmuştur.

2.5.5 Taban momenti ve kesme kuvveti

Denklem 2.15a’da tanımlanan ifade kullanılarak hesaplanan kesme kuvveti değişimi iki uç deprem durumu için Şekil 106 ve Şekil 107’de verilmiştir. Şekil 106, sismik yalıtım cihazının en etkili çalıştığı duruma karşı gelmektedir. Ankaſtre durumda yaklaşık 6 kN olarak hesaplanan taban kesme kuvveti GEO-2 durumunda 1.16 kN düzeyine kadar düşürülebilmiiştir. Buna karşın DZC-270 deprem kaydı için taban izolasyonlu durumda kesme kuvvetleri artmiiştır, bkz. Çizelge 2.16 satır no 5).



Şekil 2.106 : GO-3000 depremi taban kesme kuvveti karşılaştırması.



Şekil 2.107 : DZC-270 depremi taban kesme kuvveti karşılaştırması.

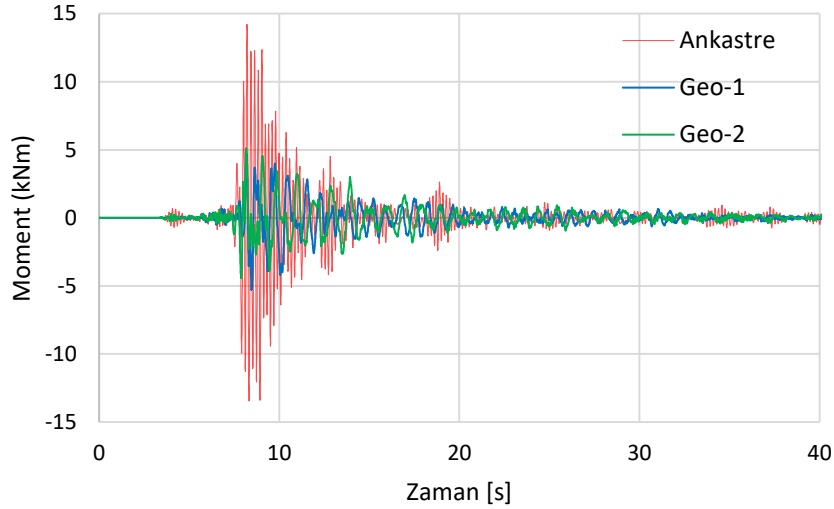
Tüm deprem kayıtları için üç farklı mesnetlenme durumunda elde edilen en büyük taban kesme kuvvetleri Çizelge 2.16’da yer almaktadır. Ulaşılan sonuçlara göre, “*ortalama+1×standard sapma*” değeri ankastre mesnetlenme durumunda 3.71 kN, GEO-1 ve GEO-2 durumlarında ise 2.51 kN ve 2.45 kN olmaktadır. GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım durumlarında, taban kesme kuvvetleri ankastre mesnetlenme durumlarına göre %32 ve %34 oranında küçültülebilmektedir.

Çizelge 2.16 : Porselen izolatör en büyük taban kesme kuvveti.

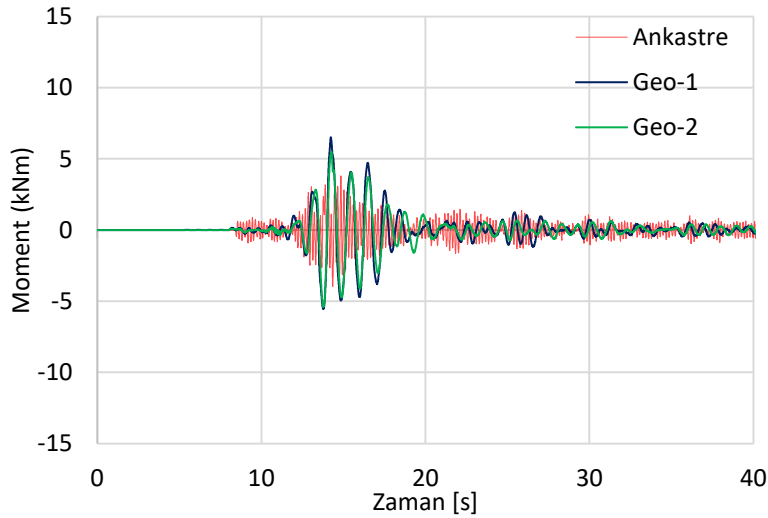
Sıra No	Kayıt Adı	Ankastre (kN)	GEO-1 (kN)	GEO-2 (kN)
1	A-TMZ270	1.62	1.59	1.37
2	CLW-TR	1.29	1.78	1.51
3	LOS-270	2.88	1.98	2.33
4	POE-360	2.65	1.58	2.17
5	DZC-270	1.63	2.21	2.69
6	RIO-270	2.65	2.19	2.34
7	CAP-090	1.97	1.65	1.34
8	GO-3000	6.03	1.61	1.16
9	BOL-090	1.53	2.64	2.36
10	MUL-009	1.63	3.09	2.10
Ortalama		2.39	2.03	1.94
Standard Sapma		1.32	0.48	0.51
Ortalama +1 S.S.		3.71	2.51	2.45

Denklem 2.15b’de tanımlanan ifade kullanılarak hesaplanan taban momenti değişimi iki uç deprem durumu için Şekil 2.108 ve Şekil 2.109’da verilmiştir. Şekil 108, sismik

yalıtım cihazının en etkili çalıştığı duruma karşı gelmektedir. Ankastre durumda yaklaşık 15.25 kNm olarak hesaplanan taban momenti, GEO-2 durumunda 5.29 kNm düzeyine kadar düşebilmektedir. Buna karşın BOL-090 deprem kaydı için taban izolasyonlu durumda moment değerleri artmıştır, bkz. Çizelge 2.17. satır no 9).



Şekil 2.108 : GO-3000 depremi taban moment karşılaştırması.



Şekil 2.109 : BOL090 depremi taban moment karşılaştırması.

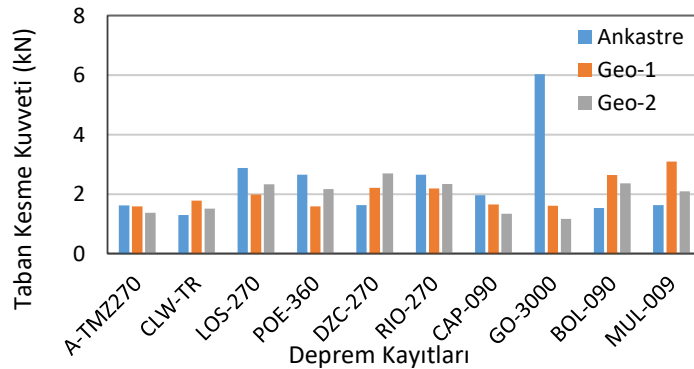
Çalışılan tüm deprem kayıtları için üç farklı mesnetlenme durumunda elde edilen en büyük taban momentleri Çizelge 2.17'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, “ortalama+1×standard sapma” değeri ankastre durumda 10.15 kNm, GEO-1 ve GEO-2 durumlarında ise 6.20 kNm ve 5.89 kN olarak elde edilmiştir. GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım durumlarında, taban momentleri ankastre duruma göre %38 ve %41 oranında küçülmektedir.

Çizelge 2.17 : Porselen izolatör en büyük taban momenti.

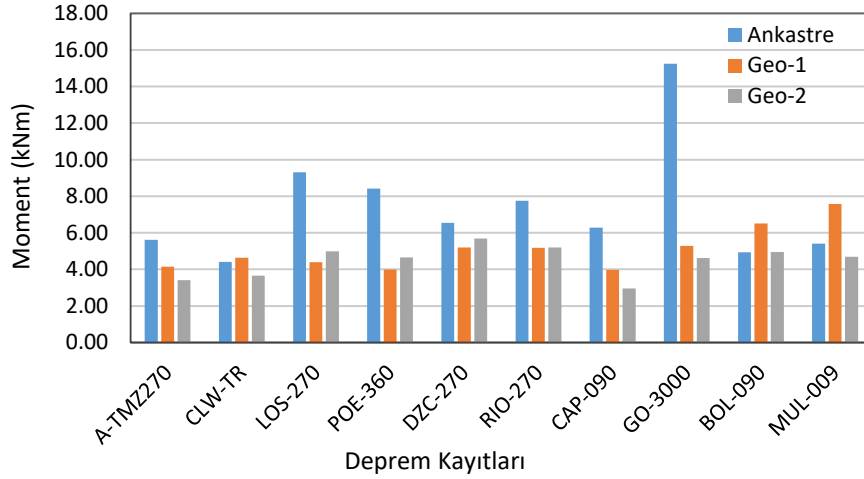
Sıra No	Kayıt Adı	Ankastre (kNm)	GEO-1 (kNm)	GEO-2 (kNm)
1	A-TMZ270	4.88	4.15	3.79
2	CLW-TR	3.84	4.65	4.06
3	LOS-270	8.09	4.40	5.55
4	POE-360	7.33	3.99	5.17
5	DZC-270	5.69	5.19	6.33
6	RIO-270	6.74	5.19	5.77
7	CAP-090	5.46	3.98	3.29
8	GO-3000	15.25	5.29	5.13
9	BOL-090	4.29	6.51	5.50
10	MUL-009	4.70	7.58	5.21
Ortalama		6.52	5.09	4.98
Standard Sapma		3.42	1.11	0.91
Ortalama +1 S.S.		10.15	6.20	5.89

Bölüm 2.3.4.2’de gerçekleştirilen statik yükleme deneyinde porselen elektrik izolatörü taban momenti 28.30 kNm’ye (M_u) eriştiğinde kırılmıştır. IEEE-693 (2005) Bölüm A.2.1’e göre; porselen elektrik izolatörüne etkiyecek yükün, eleman taşıma kapasitesinin %50’sini aşmaması gerekmektedir. Ankastre mesnetlenme durumu için elde edilen 10.15 kNm’lik değer 14.15 kNm’nin ($0.5M_u$) altında kalmakla beraber, bazı tekil deprem durumlarında ve kablo, buz ağırlığı etkisinin dikkate alınması hallerinde aşılması mümkün görünmektedir.

Üç farklı mesnetlenme durumu için elde edilen en büyük taban kesme kuvveti ve moment değerleri çubuk diyagram biçiminde Şekil 2.110 ve Şekil 2.111’de karşılaştırılmıştır. Sismik yalıtım cihazının en etkili çalıştığı deprem GO-3000, olumsuz tarafta çalıştığı depremler ise BOL-090ve MUL-009 kayıtlarıdır. Olumsuz tarafta kalınmasının olası sebebi Bölüm 2.5.2’de açıklanmıştır.



Şekil 2.110 : Taban kesme kuvvetleri karşılaştırması.



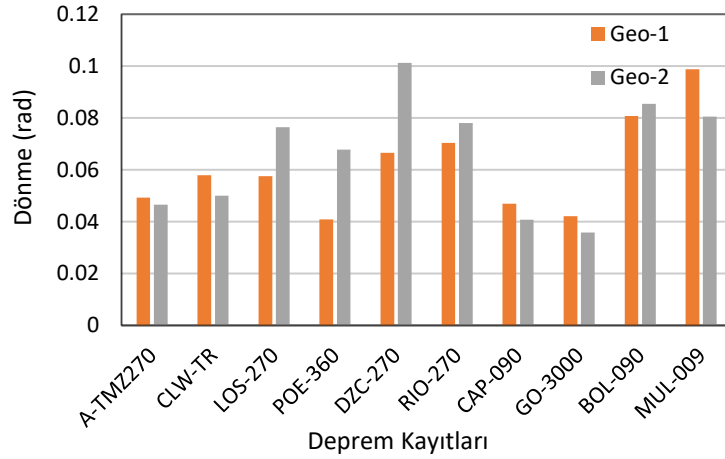
Şekil 2.111 : Taban momentleri karşılaştırması.

2.5.6 Sismik yalıtım cihazında gerçekleşen dönme ve kayma hareketleri

Sismik yalıtım cihazının iki farklı geometrisi için (GEO-1 ve GEO-2) gerçekleşen en büyük dönme değerleri Çizelge 2.18 ve Şekil 2.112’de verilmiştir. En büyük dönmeler 0.10 rad. olarak MUL-009 ve DZC-270 depremlerinde gerçekleşmiştir. “*Ortalama+1 Standard Sapma*” olarak gerçekleşen değerler GEO-1 için 0.08 rad., GEO-2 için de 0.09 rad. olmuştur.

Çizelge 2.18 : Sismik yalıtım cihazı en büyük dönme değerleri.

Sıra No	Kayıt Adı	GEO-1 (rad)	GEO-2 (rad)
1	A-TMZ270	0.05	0.05
2	CLW-TR	0.06	0.05
3	LOS-270	0.06	0.08
4	POE-360	0.04	0.07
5	DZC-270	0.07	0.10
6	RIO-270	0.07	0.08
7	CAP-090	0.05	0.04
8	GO-3000	0.04	0.04
9	BOL-090	0.08	0.09
10	MUL-009	0.10	0.08
Ortalama		0.06	0.07
Standard Sapma		0.02	0.02
Ortalama +1 S.S.		0.08	0.09



Şekil 2.112 : GEO-1 ve GEO-2 cihazları için dönme karşılaştırması.

2.5.7 Taban momenti-tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri ve sınır değerler ile karşılaştırmalar

Ankastre ve sismik yalıtım cihazı üzerine mesnetlenmiş numunelerde farklı deprem kayıtları ve ölçek katsayıları için elde edilen en büyük taban momenti - tepe yerdeğiştirmesi çiftleri Şekil 2.113’de noktalar ile gösterilmiştir. Nokta gruplarından geçirilen eğilim çizgileri genel davranışları temsil etmektedir.

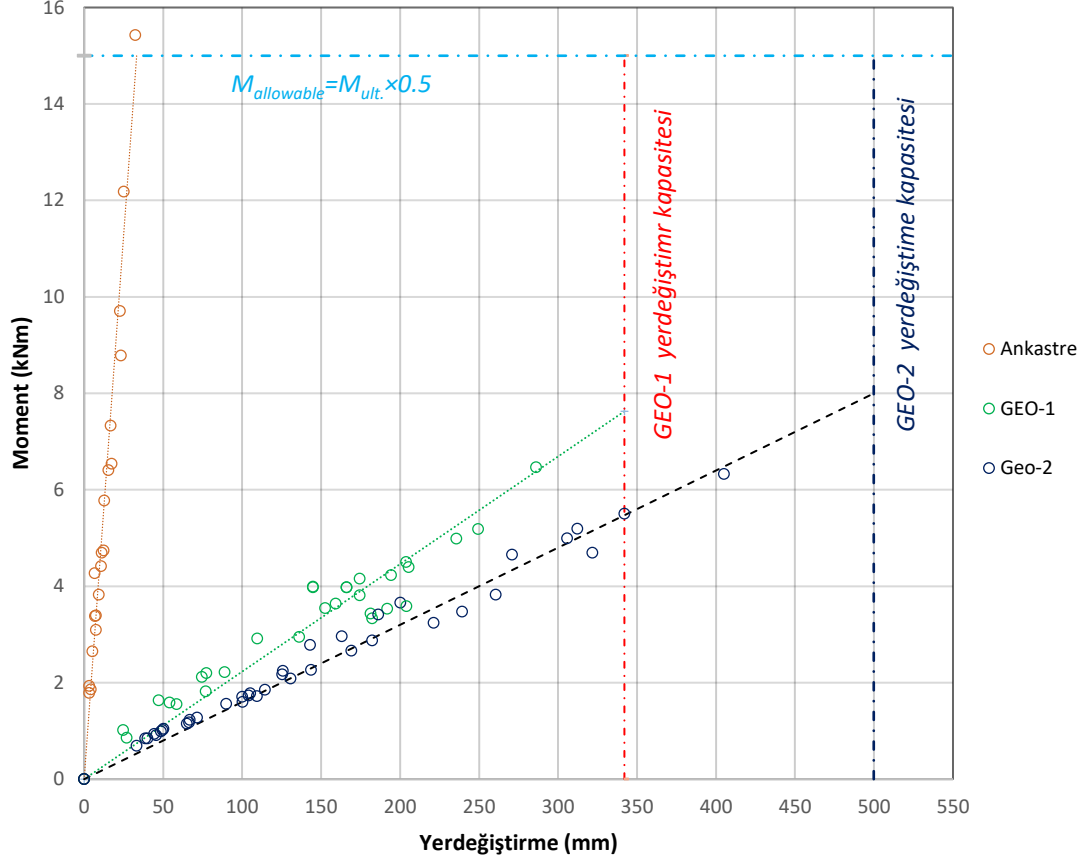
Aynı grafik üzerinde $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm eğilme momenti sınırları gösterilmiştir. Bu sınır değerler; porselen elektrik izolatörü için yapılan statik deneylerde elde edilen kırılma momenti $M_{ult}=28.3$ kNm (bkz. Bölüm 2.3.4) ile IEEE-693 (1984) ve IEEE-693 (2005)’de önerilen $\alpha=0.25$ ve $\alpha=0.50$ katsayıları kullanılarak, $M_1=0.25 \times 29.5=7.375$ kNm ve $M_2=0.50 \times 29.5=14.75$ kNm şeklinde hesaplanmıştır.

Geliştirilen sismik yalıtım cihazlarının dönme kapasitelerine karşı gelen porselen izolatör tepe yatay yerdeğiştirmesi. GEO-1 numunesi için 350 mm, GEO-2 numunesi için de 500 mm olarak seçilmiştir.

Sismik yalıtım cihazının rijitliğinin azalmasıyla, oluşacak taban momentleri küçülürken tepe yerdeğiştirmeleri büyümektedir.

Taban momenti cinsinden yapılan karşılaştırmada; ankastre mesnetlenmiş sistem bazı depremler için güvensiz olurken, sismik yalıtım cihazına mesnetlenmiş sistemler güvenli bölgede kalmaktadır.

İşletme koşullarından dolayı tanımlanabilecek ilave tepe yerdeğiştirme sınırları grafiğe eklenerek tasarlanacak sismik yalıtım cihazının dönme kapasitesi belirlenebilir.



Şekil 2.113 : En büyük moment – tepe yerdeğiştirmesi ilişkileri eğilim çizgileri ve sınır durumlar.

Şekil 2.113 gerek yerdeğiştirme gerekse dayanım sınırlarının birlikte dikkate alındığı ve yeni ürün tasarımında etkin olarak kullanılabilecek bir grafikdir.

2.5.8 Genel sonuç

Farklı değişkenler için yapılan karşılaştırmalarda; porselen elektrik izolatörünün bu tez çalışmasında önerilen sismik yalıtım cihazına mesnetlenerek kullanılması durumunda, depremin belirsizliğinden kaynaklanabilecek risklerin önemli ölçüde azaltıldığı söylenebilir. Şekil 2.113’de verilen grafik bu durumu ispatlamaktadır.

3. SAYISAL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

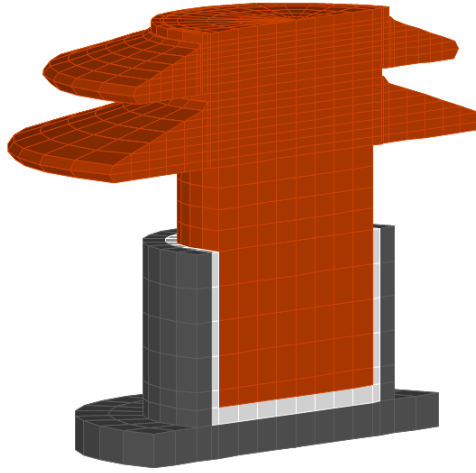
Statik ve dinamik deneylerde elde edilen sonuçların tekrarlanabilirliğini görmek ve genel *hesap modeli* oluşturma konusunun genellenebilmesi için çalışılmıştır. Hesap modellerinde çubuk sonlu elemanlar ve hacim (solid) sonlu elemanları kullanılmıştır. Geliştirilmiş sismik yalıtım cihazının statik yükleme etkisindeki doğrusal olmayan davranışı, sarsma masası deneylerinde dış ortama ankastre ve sismik yalıtım cihazı kullanılarak bağlanmış porselen izolatorların dinamik doğrusal olmayan davranışı sayısal olarak incelenmiştir.

Doğruluğu kanıtlanmış sayısal hesap modelleri kullanılarak ankastre durum ile iki farklı geometriye sahip sismik yalıtım cihazı kullanılan sistemlerin *kırılmalık eğrileri* oluşturulmuştur.

3.1.1 Ankastre mesnetlenmiş porselen izolatorün üç boyutlu sonlu eleman modeli

Ankastre mesnetlenmiş porselen izolatorün sayısal analizleri, üç boyutlu (hacim) sonlu elemanlar kullanılarak SAP2000 v18.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Modelin hazırlanmasındaki ana amaç porselen izolatorün farklı kesitlerindeki gerilme yığılmalarını belirlemektir. Gerilme analizi sonucuna dayalı olarak sistemin bütünü temsil eden etkin *elastisite modülü* (E_{eff}) belirlenmiştir.

Bölüm 2.3.4.2’de anlatılan deney numunesi üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak modellenmiştir. Dış ortama ankastre olarak bağlanan numunenin *eğilme momenti / kesme kuvveti oranı* (M/V) 1.81’dir. Deney numunesi, Şekil 2.17’de verilen yerdeğiştirme çevrimlerine maruz bırakılmış olmasına karşın; sayısal analizde göçme yüküne karşı gelen $P=16.55$ kN değeri için elastik sonlu eleman analizi yapılmıştır. Hazırlanan sonlu eleman modeli Şekil 3.1’de verilmektedir.



a. Üç boyutlu sonlu eleman modeli

b. Sonlu eleman modeli kesit görüntüsü

Şekil 3.1 : Numune - 2 sonlu eleman modeli.

Sonlu eleman analiz modelinde porselen elektrik izolatörü ve bileşenleri üç boyutlu (hacim-solid) sonlu elemanlar kullanılarak tanımlanmıştır. Modeldeki üç farklı tip elemanın özellikleri aşağıda sıralanmıştır;

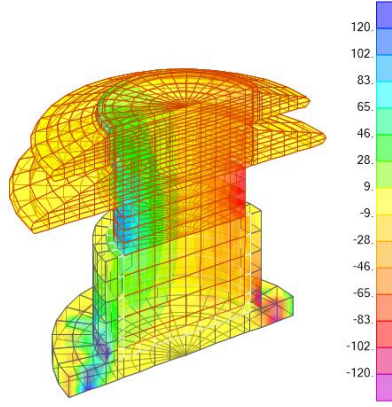
Eleman 1: Dökme demirden üretilmiş üst ve alt başlık birleşim aparatları. Dökme demir *elastisite modülü (E)* IEEE 693 (2005) doğrultusunda 157000 N/mm^2 olarak alınmıştır.

Eleman 2: Porselen izolatör. Deneysel şekildegıştırme okumaları kullanılarak, porselen *elastisite modülü (E)* 125000 N/mm^2 olarak belirlenmiştir.

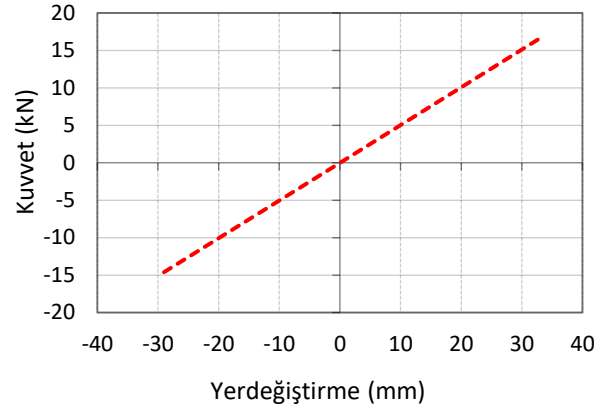
Eleman 3: Pik döküm birleşim aparatı ile porselen izolatörü arasındaki harç tabakası. *Elastisite modülü (E)* 9000 N/mm^2 olarak belirlenmiştir.

Harç tabakasının elastisite modülünün belirlenmesi için, deneysel çalışmada elde edilen kuvvet -tepe yerdegıştırme ilişkisine ulaşmayı amaçlayan deneme yanılma esaslı farklı analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel tepe yerdegıştırmelerinin eşit olduğu durumdaki harç elastisite modülü 9000 N/mm^2 olarak belirlenmiştir.

Ankastre mesnetlenmiş porselen izolatörün üç farklı bileşeninin doğrusal elastik davranışının esas alındığı sonlu eleman modeli Şekil 3.2a’da verilmiştir. Beklendiği gibi, farklı yük düzeyleri için yapılan analizlerde elde edilen doğrusal karakterdeki yük - yerdegıştırme ilişkisi de Şekil 3.2b’de yer almaktadır.



a. En büyük yük durumunda oluşan aksel gerilme



b. Kuvvet- yerdeğiştirme grafiği

Şekil 3.2 : Numune 2 için hazırlanan sonlu eleman hesap modeline ait sonuçlar.

3.1.2 Ankastre ve sismik yalıtım cihazı üzerine mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörleri için hazırlanan çubuk modelleri

Statik ve dinamik olarak incelenen sistemleri oluşturan farklı elemanlar, *çubuk sonlu elemanlar* ve *doğrusal olmayan yaylar* kullanılarak idealleştirilmiştir. Hesaplarda, SeismoStruct v2016 sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Yazılım içerisinde bulunan *Elastic Frame* çubuk sonlu elemanı ile *Ramberg Osgood* davranış modelinin atandığı bağlantı elemanı (link eleman) tipleri kullanılmıştır.

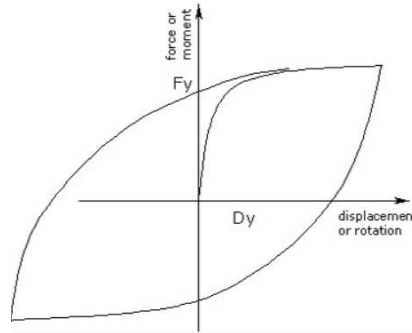
Dinamik yükleme durumunda, porselen elektrik izolatörünün mesnetlendiği *çelik kafes sistem* analiz modellerine dahil edilmiştir. Çelik kafes sistemi oluşturan L50×50×5 kesitli profiller “*elastik çubuk eleman*” olarak tanımlanmıştır. Kafes sistemin üzerinde yeralan 20mm kalınlıklı çelik levha, bağlanan elemanların rijitlikleri de dikkate alınarak sonsuz rijit çubuklar olarak idealleştirilmiştir. Tüm çelik elemanlar S235JR kalitesindedir.

Üç ayrı parçadan meydana gelen porselen elektrik izolatörü “*elastik çubuk elemanlar*” kullanılarak idealleştirilmiştir. Porselen elektrik izolatörü çekirdek kesiti yükseklik boyunca değiştiğinden, yayılı kütle durumu ve değişken kesit atalet momenti (I) özellikleri kullanılmıştır. Gerçekleştirilen statik ve dinamik deney sonuçlarına bağlı olarak; izolatörün bütünsel davranışını temsil etmek üzere, dinamik analizlerde porselen etkin elastisite modülü $E_{eff}=70000 \text{ MPa}$ olarak alınmıştır.

Sismik yalıtım cihazını oluşturan alt ve üst başlık plakaları S275JR, plakaları birbirine bağlayan gergi çubuğu da S355JR kalitesindedir. Dört adet poliüretan yay “*doğrusal davranmayan eleman*” olarak idealleştirilmiş ve davranışları Ramberg-Osgood davranış modeli ile temsil edilmiştir. Poliüretan yayların çevrimsel davranışlarının belirlenmesinde Bölüm 2.3’de anlatılan deneysel çalışmadan sonuçları kullanılmıştır.

Sismik yalıtım cihazının merkezine yerleştirilen gergi çubuğunun doğrusal olmayan davranışı hesap modeline katılmıştır. Alt ve üst çelik plakaları birbirine bağlayan ve üzerine ön gerilme uygulanan Ø14 mm çapındaki gergi çubuğu kesit ve yükseklik boyunca lifli sonlu elemanlara bölünmüştür. Sismik yalıtım cihazının alt ve üst çelik plakaları da bağlandıkları elemanlar dolayısıyla sonsuz rijit elemanlar olarak idealleştirilmiştir.

Poliüretan yayların aksel doğrultudaki (K_v) doğrusal olmayan davranışının idealleştirilmesinde kullanılan *Ramberg Osgood modelinin* akma kuvveti (F_y) ve yerdeğiştirmesi (Δ_y) Bölüm 2.3.2 ve 2.3.3’de anlatılan deneysel çalışma sonuçlarına dayalı olarak $F_y = 13.50$ kN, $\Delta_y = 0.007813$ m olarak alınmıştır. Davranış eğrisinin şişkinliğini kontrol eden, modelin üçüncü parametresi, $\gamma = 1.5$ olarak seçilmiştir. Bölüm 2.3.2 ve 2.3.3’de sunulan deneysel çalışma sonuçlarına göre poliüretan yay eksenine dik doğrultudaki yerdeğiştirmeler göreceli olarak çok küçük olduklarından Şekil 3.4’de tanımlanan poliüretan yay yatay rijitliği (K_h) 10000 kNm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.3 : Ramberg-Osgood davranış modeli.

Oluşturulan hesap modelleri kullanılarak zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan hesaplarda genel sönüm oranı iki farklı şekilde seçilmiştir. Porselen elektrik izolatörünün ankastre mesnetlenmesi durumunda, gerçekleştirilen çekiç testleri ve çek-bırak testleri sonuçlarına dayalı olarak %2 sönüm esas alınmıştır. Bu

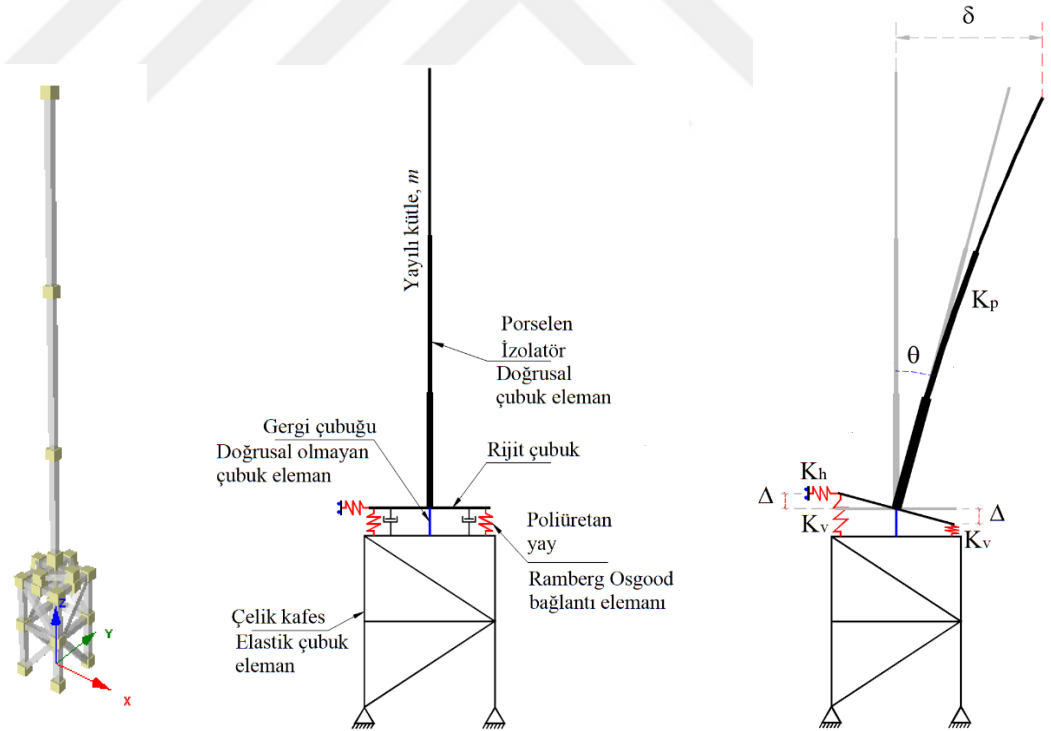
değer Bölüm 2.5.2’de deney sonuçları için oluşturulan enerji denge denklemleri ile de doğrulanmıştır.

Porselen elektrik izolatörünün sismik yalıtım cihazı üzerine mesnetlendiği durumda sönüm ağırlıklı olarak poliüretan yayların eksenel şekildeğiştirmesinden oluşmaktadır. Dolayısıyla bu modellerde, çevrimsel sönüm enerjisi poliüretan yayları temsil eden Ramberg Osgood modeli üzerinden hesaba dahil edilmiştir. Diğer bileşenlerin sönüm özelliklerini temsil etmek üzere sistemin genel sönüm oranı da %0.5 olarak tanımlanmıştır.

Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan analizde, *Hilbert-Hughes-Taylor* sayısal integrasyon yöntemi $\alpha = -0.10$, $\beta = 0.3025$ ve $\gamma = 0.60$ katsayıları ile kullanılmıştır.

Dinamik deneylere karşı gelen sayısal hesaplarda, sarsma masası üzerinde gerçekleşen ivme kayıtları giriş bilgisi olarak kullanılmıştır.

Hesap modeli Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



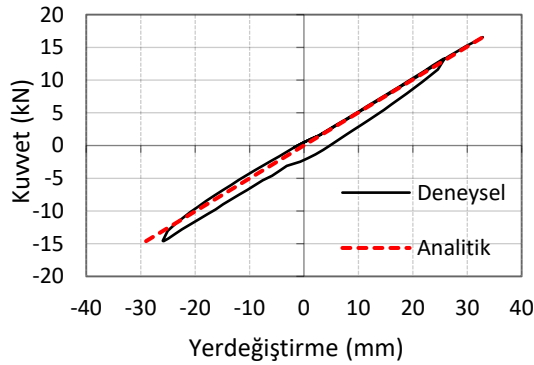
3.2 Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması ve İrdelemeler

3.2.1 Statik deneyler

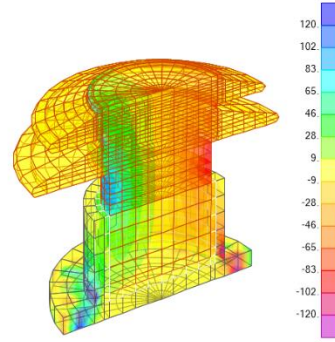
3.2.1.1 Ankastre mesnetlenme durumu

Bölüm 2.3.4.2’de sunulan alttan ankastre mesnetlenmiş deney numunesi hacim elemanlar (solid) kullanılarak modellenmiş ve sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalarda elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.5a’da verilmiştir.

Deneysel çalışmada ulaşılan en büyük yatay yük ($P_{ult}=16.55$ kN) için; porselen izolatörün taban kesitinde gerçekleşen en büyük eksenel gerilme, sayısal ve deneysel çalışmalarda sırasıyla 90.45 N/mm² ve 94.18 N/mm² olarak belirlenmiştir, Şekil 3.5b. Bu iki değerin pratik amaçlar için yakın oldukları söylenebilir.



a. Kuvvet- yerdeğiştirme ilişkileri (deneysel/sayısal)



b. En büyük yük durumu için ($P_{ult}=16.55$ kN) sayısal hesapta bulunan gerilme dağılımı

Şekil 3.5 : Ankastre mesnetlenmiş numune için (Numune-2) deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.

Bölüm 2.3.4.2 Şekil 2.27’de verilen taban kesiti birim şekildeğiştirme grafiğinden de açıkça görüldüğü gibi, porselen malzeme göçme aşamasına kadar doğrusal elastik davranış göstermiştir. Yön değiştiren yükleme etkisinde incelenen deney numunesinde son çevrimde elde edilen yük - yerdeğiştirme ilişkisi ile elastik sonlu eleman analizinde ulaşılan yük – yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.5a.’da birlikte verilmiştir. Deneysel grafiğin bir miktar alanı kapadığı görülmektedir. Bu durumun olası sebeplerinin, sistemdeki civatalı bağlantılar ve pik döküm birleşim aparatı ile porselen izolatör arasındaki dolgu harcının şekildeğiştirmesi olduğu düşünülmektedir.

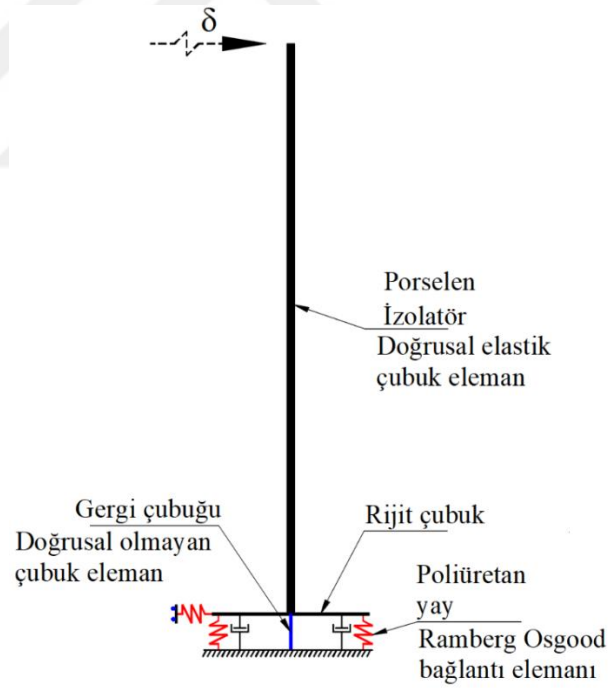
3.2.1.2 Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1)

Bölüm 2.3.2’de yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazına (GEO-1) ait çevrimsel statik deney sonuçları yer almaktadır. Deney numunesinin sayısal modeli SeismoStruct v2016 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Sismik yalıtım cihazı içerisinde bulunan poliüretan yayların çevrimsel davranışı *Ramberg Osgood modeli* kullanılarak temsil edilmiştir. Model için gerekli olan parametreler, deneysel çalışma sonuçlarına bağlı olarak $F_y = 13.5 \text{ kN}$, $\Delta_y = 0.007813 \text{ m}$ ve $\gamma=1.5$ şeklinde tanımlanmıştır. Sismik yalıtım cihazının alt ve üst çelik plakaları ise rijit elastik çubuklar kullanılarak idealleştirilmiştir. Yalıtım cihazının merkezinde yer alan gergi çubuğu doğrusal olmayan çubuk eleman olarak tariflenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde porselen elektrik izolatörünü temsilen kullanılan çelik kolon (2UNP90) elastik çubuk eleman olarak idealleştirilmiştir. Deney numunesinin ve hazırlanan hesap modelinin görünüşleri Şekil 3.6’da verilmiştir.



a. GEO-1 deney numunesi

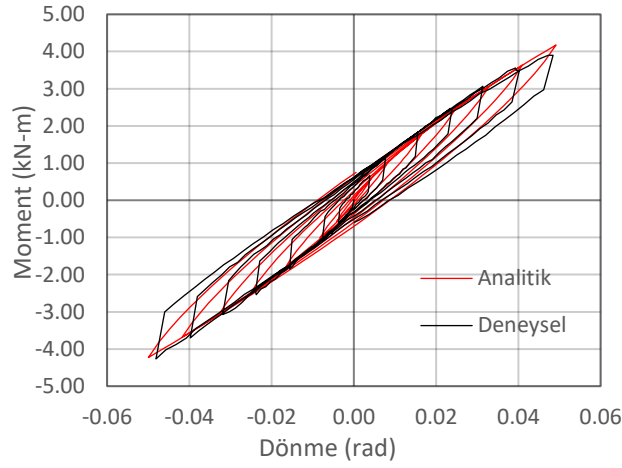


b. Sayısal model (porselen izolatörü temsil eden çelik kolon)

Şekil 3.6 : Deney numunesi ve sayısal hesap modeli.

Şekil 3.6’da verilen çevrimsel yerdeğiştirme fonksiyonu etkisinde statik olarak denenen numunenin taban kesitinde gerçekleşen moment – dönme ilişkileri Şekil

3.7’de karşılaştırılmıştır. Davranış eğrilerinin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir.

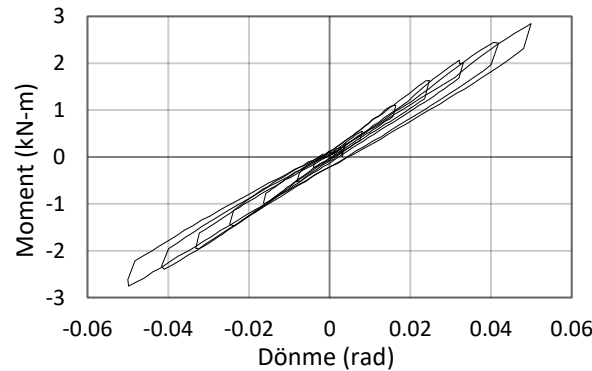


Şekil 3.7 : Şekil 11. GEO-1 numunesi analitik ve deneysel moment - dönme eğrileri.

3.2.1.3 Düşük rijitlikli rismik yalıtım cihazı (GEO-2)

Deneysel ayrıntıları Bölüm 2.3.2’de anlatılan düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazına (GEO-2) ait sayısal hesap modeli, GEO-1 için oluşturulan modelin revizyonu ile elde edilmiştir. Modelde gerçekleştirilen değişiklikler, poliüretan yayların konumları (merkezleri arası 260 mm) ile Ramberg Osgood model parametresi $\gamma=1.2$ ’dir.

Şekil 2.6’da verilen çevrimsel yerdeğiştirme fonksiyonu etkisinde statik olarak denenen GEO-2 numunesinin taban kesitinde gerçekleşen moment – dönme ilişkileri de Şekil 3.8’de verilmiştir. Davranış eğrilerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 3.8 : GEO-2 numunesi analitik ve deneysel moment - dönme eğrileri.

3.2.2 Dinamik deneyler

Altan ankastre bağı durum ile iki farklı sismik yalıtım cihazı kullanımı durumları için sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ankastre mesnetlenme durumunda sadece numune tepe ivmeleri karşılaştırılırken; diğer durumlarda taban ve tepe ivmeleri, tepe yerdeğiştirmesi, taban momenti ve spektral tepe ivmeleri karşılaştırılmıştır.

3.2.2.1 Ankastre mesnetlenme durumu

Ayrıntıları Bölüm 2.4.5.2’de anlatılan deneysel çalışmada kaydedilen numune tepe ivmeleri, sayısal hesap modeli ile elde edilenler sonuçlar ile Şekil 3.9’da karşılaştırılmıştır. 10 farklı deprem kaydı için gerçekleştirilen karşılaştırmalarda, sayısal sonuçların deneysel sonuçlara oldukça yakın oldukları görülmüştür.

3.2.2.2 Yüksek rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-1)

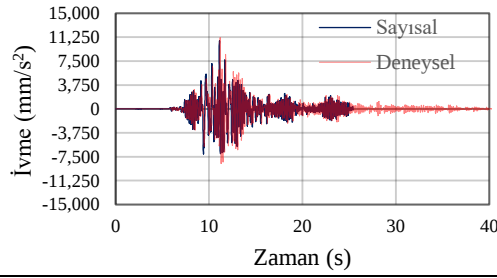
GEO-1 sismik yalıtım cihazının en az ve en çok etkili olduğu BOL-090 ve GO-3000 deprem kayıtları için; tepe ivmesi, tepe yerdeğiştirmesi ve porselen taban kesiti eğilme momenti sonuçları Şekil 3.10’da karşılaştırılmıştır.

Tepe ivmeleri için yapılan karşılaştırmada, sayısal ve deneysel sonuçların genel olarak uyumlu olduğu ancak bazı piklerde farklılıklar bulunduğu görülmektedir.

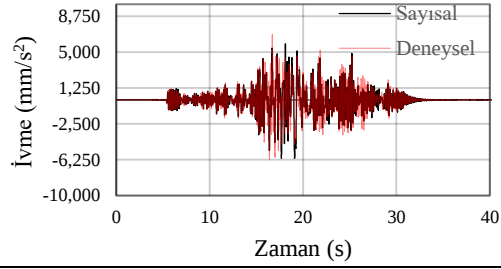
Tepe yerdeğiştirmeleri için, deprem kayıtlarının ana pikleri civarında uyumun iyi olduğu, daha sonraki küçük piklerde ise bir miktar farklılık oluştuğu görülmektedir.

Porselen elektrik izolatörünün performansının değerlendirilmesinde en önemli büyüklük olan taban momenti, deneysel ve sayısal çalışmalarda oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında oluşan en büyük farkın %14 düzeyinde olduğu görülmüştür.

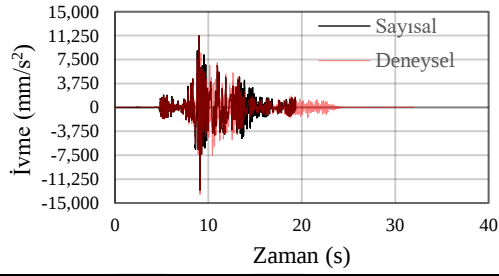
Ayrıntıları Bölüm 4.5.2’de anlatılan deneysel çalışmada porselen elektrik izolatörü tepe noktasında kaydedilen ivme geçmişleri spektral ivmeye dönüştürüldükten sonra aynı yöntemle elde edilen sayısal sonuçlar ile Şekil 3.11’da karşılaştırılmıştır. Geniş frekans aralığında yapılan karşılaştırmalarda sayısal sonuçların deneysel sonuçlara yakınlığı gözlemlenmiştir. Bu durum sayısal modelde kullanılan kütle, rijitlik ve sönüm özelliklerinin uygunluğunu göstermektedir.



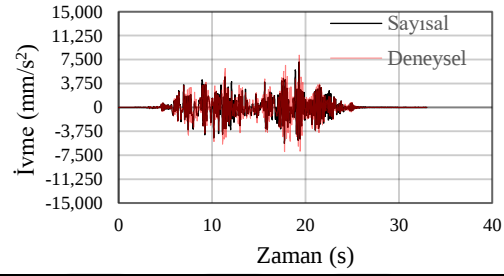
a. ATMZ-270



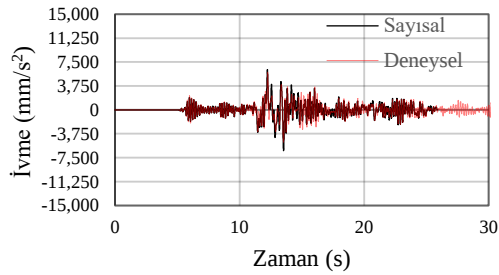
b. CLW-TR



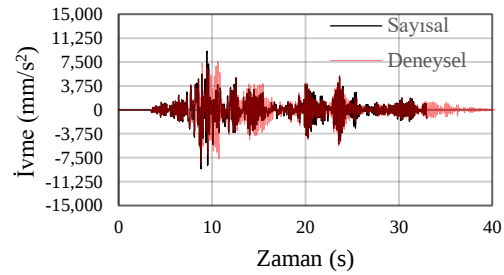
c. LOS-270



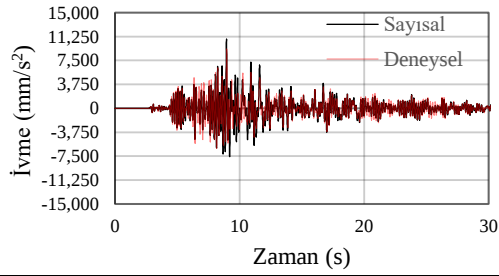
d. POE-360



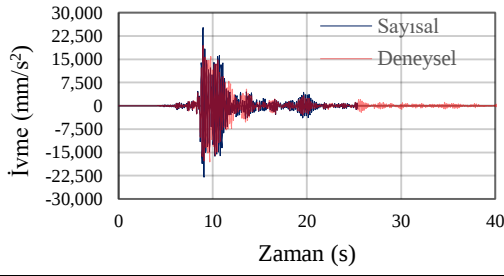
e. DZC-270



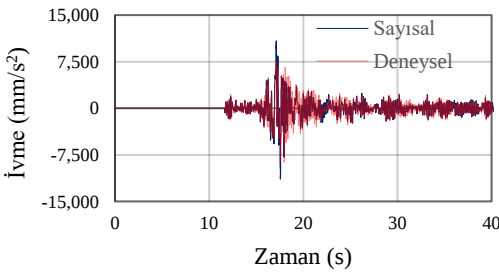
f. RIO-270



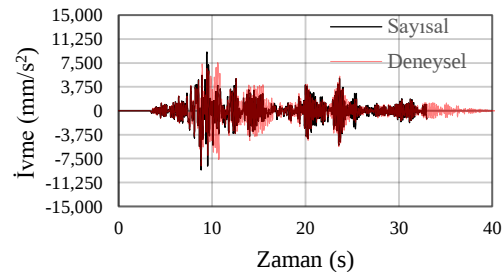
g. CAP-090



h. GO-3000

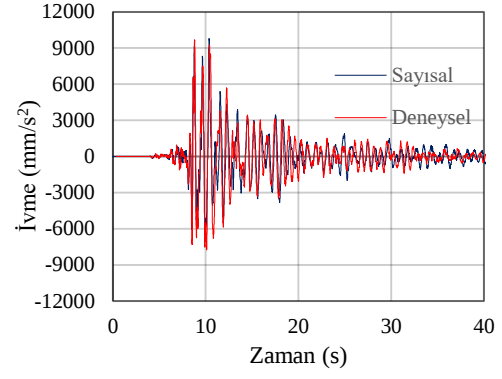
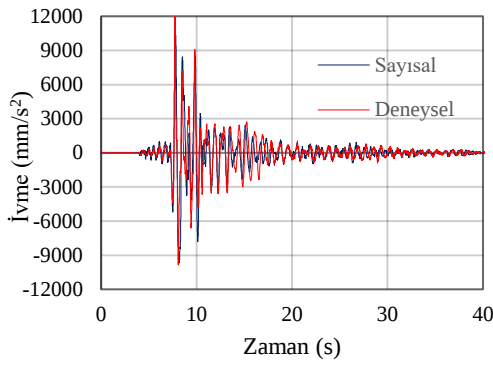


i. BOL090

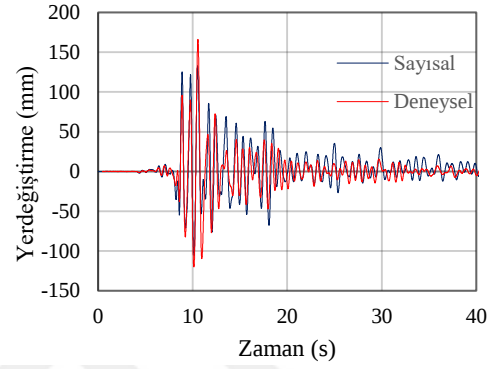
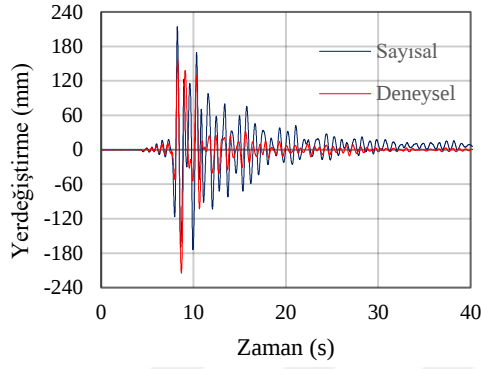


j. MUL-009

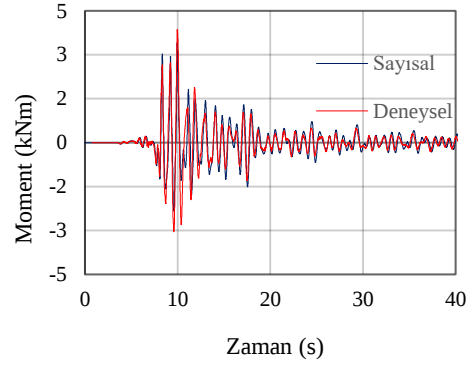
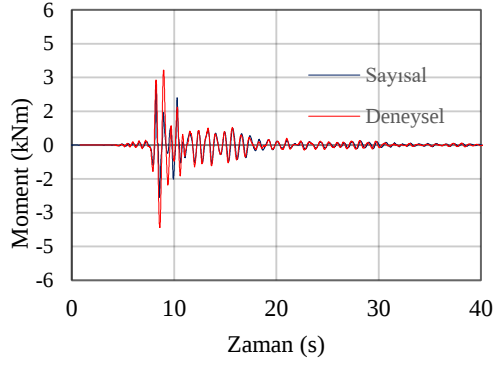
Şekil 3.9 : Ankastre mesnetlenme durumu için sayısal ve deneysel tepe ivmelerinin karşılaştırılması.



Tepe ivmesi



Tepe yerdeğiştirmesi

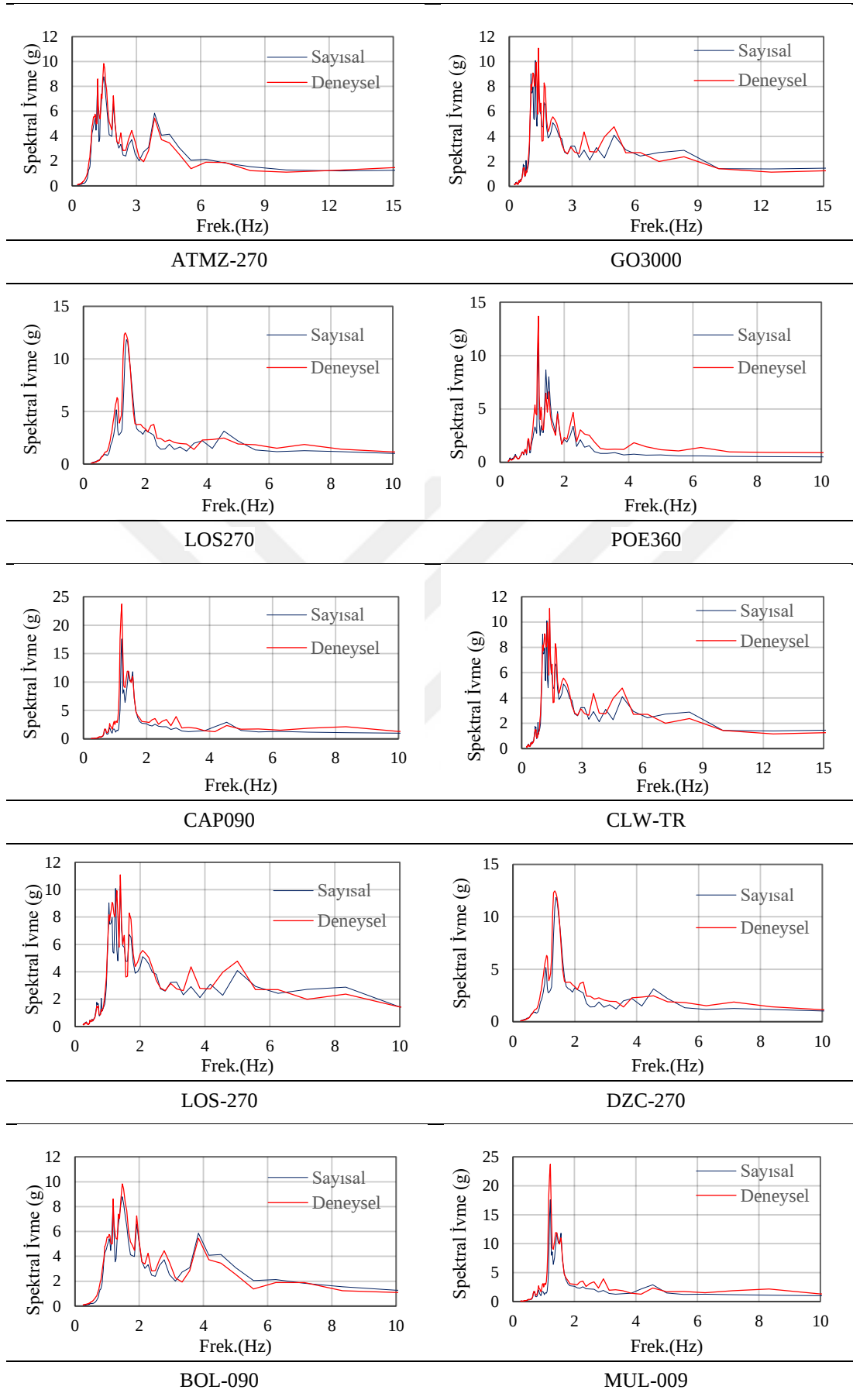


Porselen taban momenti

a. ATMZ-270

b. GO-3000

Şekil 3.10 : GEO-1 durumu için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

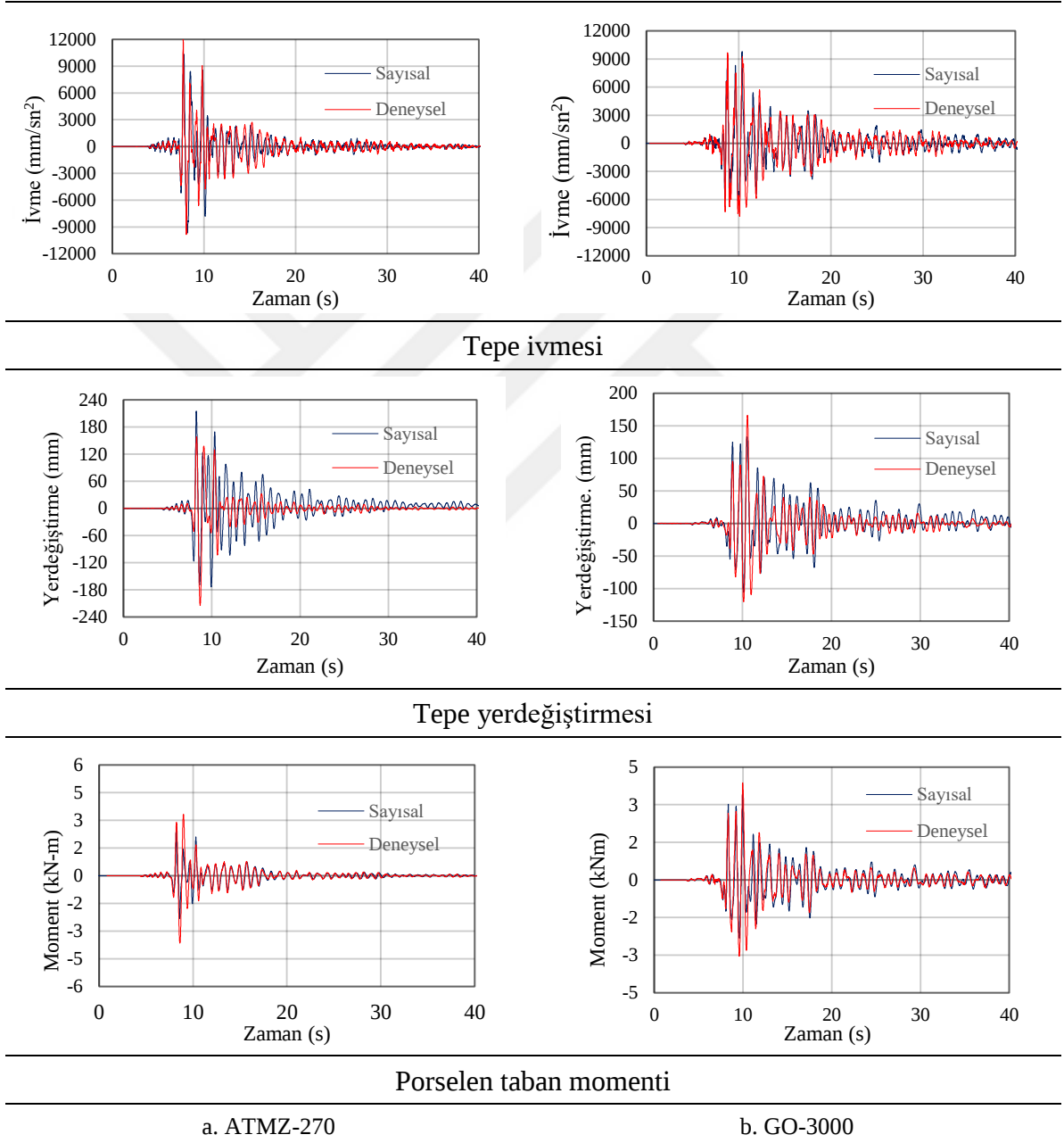


Şekil 3.11 : GEO-1 sayısal ve deneysel tepe ivme spektrumları.

3.2.2.3 Düşük rijitlikli sismik yalıtım cihazı (GEO-2)

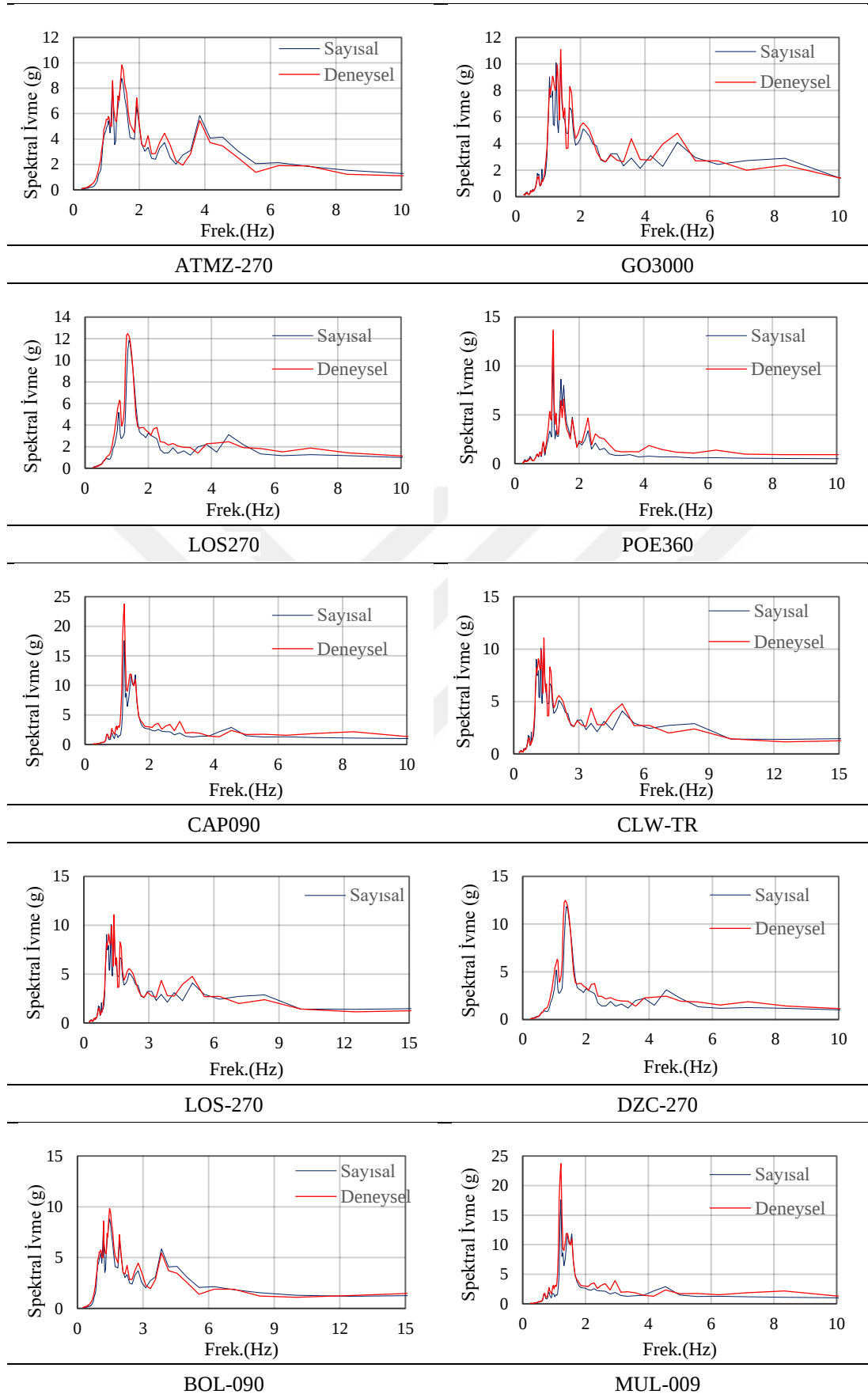
GEO-2 sismik yalıtım cihazının en az ve en çok etkili olduğu BOL-090 ve GO-3000 deprem kayıtları için; tepe ivmesi, tepe yerdeğiştirmesi ve porselen taban kesiti eğilme momenti sonuçları Şekil 3.12’de karşılaştırılmıştır.

Tepe ivmeleri için yapılan karşılaştırmada, sayısal ve deneysel sonuçların genel olarak uyumlu olduğu ancak bazı piklerde farklılıklar bulunduğu görölmektedir.



Şekil 3.12 : GEO-2 durumu sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Tepe yerdeğiştirmeleri için, deprem kayıtlarının ana pikleri civarında uyumun iyi olduğu, daha sonraki küçük piklerde ise bir miktar farklılık olduğu görölmektedir.



Şekil 3.13 : GEO-2 sayısal ve deneysel tepe ivme spektrumları.

Porselen elektrik izolatörünün performansının değerlendirilmesinde en önemli büyüklük olan taban momenti, deneysel ve sayısal çalışmalarda oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçlar arasında oluşan en büyük farkın %14 düzeyinde olduğu görülmüştür.

Porselen elektrik izolatörü tepe noktasında kaydedilen ivme geçmişleri spektral ivmeye dönüştürüldükten sonra aynı yöntemle elde edilen sayısal sonuçlar ile Şekil 3.13’de karşılaştırılmıştır. Geniş frekans aralığında yapılan karşılaştırmalarda sayısal sonuçların deneysel sonuçlara yakınlığı görülmektedir.

3.3 Kırılma Olasılık Eğrilerinin Oluşturulması

3.3.1 Hesap yöntemi

Ankastre ve iki farklı özellikteki sismik yalıtım cihazı üzerine mesnetlenmiş porselen izolatörlerin *kırılma olasılık eğrileri* oluşturulmuştur. Bu amaçla, Bölüm 2.4.3.2’de seçilen 10 adet deprem kaydı [α_{PGA}] = [0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g, 1.0g, 1.1g, 1.2g, 1.3g, 1.4g, 1.5g, 1.6g, 1.7g, 1.8g, 1.9g, 2.0g] vektörüne uygun katsayılar ile ölçeklendirilerek *artımsal dinamik analizler* gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde Bölüm 3.1’de anlatılan hesap modelleri kullanılmıştır.

Kırılma eğrileri iki fiziksel büyüklük için oluşturulmuştur. Bunlar;

- Porselen izolatör taban kesiti momenti. Eğilme momenti sınırları $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm olarak dikkate alınmıştır (bkz. Bölüm 2.3.4)
- Geliştirilen sismik yalıtım cihazlarının dönme kapasitelerine karşı gelen porselen izolatör tepe yatay yerdeğiştirmesi. GEO-1 numunesi için 350 mm, GEO-2 numunesi için de 500 mm olarak seçilmiştir.

Bölüm 3.1.2’de ankastre, GEO-1 ve GEO-2 özelliklerine sahip sismik yalıtım cihazı içeren sistemlere ait hesap modellerinin, SeismoStruct programıyla farklı [α_{PGA}] durumları için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Her farklı mesnetlenme durumu için $20 \times 10 = 200$ adet analiz gerçekleştirilmiş ve bu analizlerde ortaya çıkan en büyük taban momenti ile tepe yerdeğiştirmesi büyüklükleri ayrı ayrı olarak özel bir matriste toplanmıştır.

Farklı deprem ve PGA düzeyleri için yapılan analizlerde; SeismoBatch yazılımının sağladığı imkan kullanılarak, porselen izolatör taban kesitindeki eğilme momenti ve

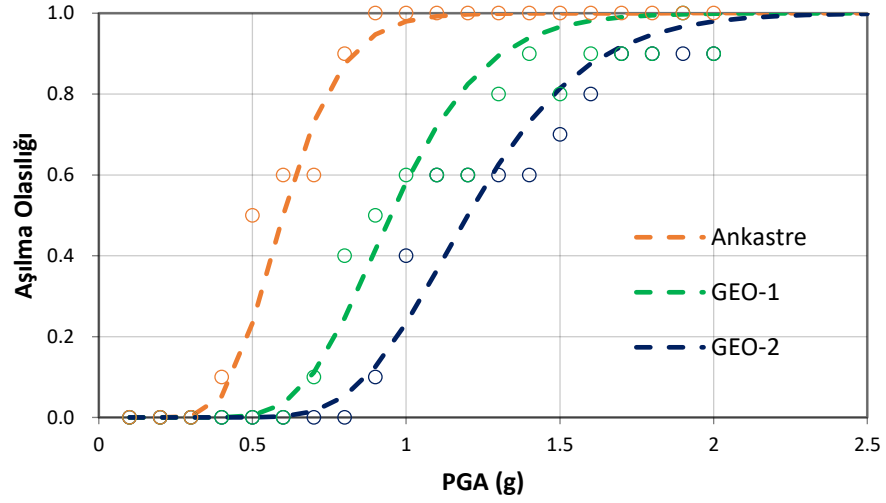
tepe yatay yerdeğiştirmesi genel program çıktısından ayıklanarak ayrı bir dosya içerisinde toplanmıştır.

3.3.2 Performans olasılık eğrileri

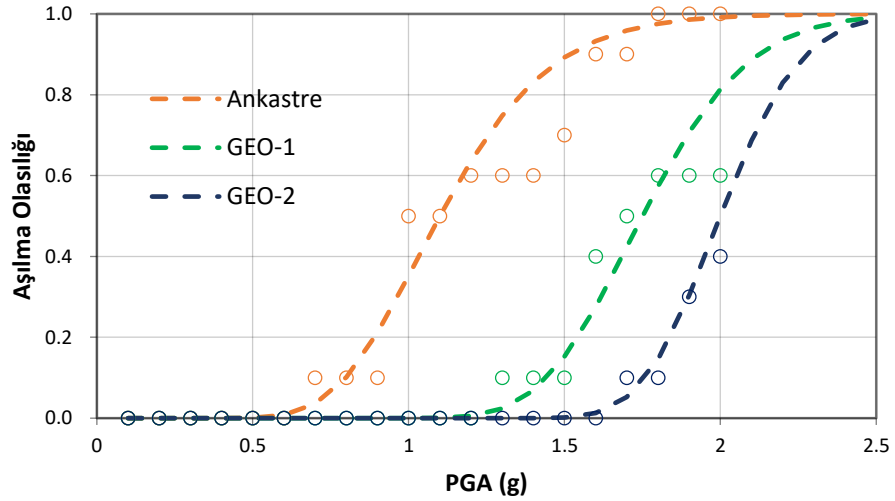
IEEE 693 (1984) ve IEEE 693 (2005)'de tanımlanan güvenlik katsayıları ($\alpha=0.25$ ve $\alpha=0.50$) esas alınarak belirlenen $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm momentleri sınır değerler olarak kullanılarak elde edilen, taban momenti kırılma olasılık eğrileri şekil 3.14 ve şekil 3.15'de verilmiştir. Olasılık eğrilerinin yatay aksında PGA, düşey aksında ise aşılma olasılıkları yer almaktadır.

- Ankastre mesnetlenme durumunda; $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm sınır değerlerinin %10 aşılma olasılığı 0.4g ve 0.7g düzeylerindeki ivmelerle gerçekleşmektedir.
- GEO-1 sismik yalıtım cihazı kullanımı durumunda; $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm sınır değerlerinin %10 aşılma olasılığı 0.7g ve 1.3g düzeylerindeki ivmelerle gerçekleşmektedir.
- GEO-2 sismik yalıtım cihazı kullanımı durumunda; $M_1=7.375$ kNm ve $M_2=14.75$ kNm sınır değerlerinin %10 aşılma olasılığı 0.9g ve 1.7g düzeylerindeki ivmelerle gerçekleşmektedir.
- $M_1=7.375$ kNm sınır moment durumu için; PGA=1.0g düzeyinde yapılan karşılaştırmada, ankastre halde aşılma olasılığı %100 iken GEO-1 durumunda %60, GEO-2 durumunda ise %25 olarak elde edilmiştir.
- $M_2=14.75$ kNm sınır moment durumu için; PGA=1.0g düzeyinde yapılan karşılaştırmada, ankastre halde aşılma olasılığı %35 iken GEO-1 ve GEO-2 durumlarında %0 olarak elde edilmiştir.

şekil 3.14 ve 3.15'e göre, taban izolasyonu uygulanmış sistemlerde (GEO-1 ve GEO-2) kırılma olasılık eğrileri ankastre mesnetlenme durumuna göre önemli ölçüde sağa kaymaktadır. Dolayısıyla, bu sistemlerin daha büyük ivmeleri taşıyabildiği anlaşılmaktadır. Sismik yalıtım cihazının kullanıldığı durumlarda (GEO-1 ve GEO-2) tasarım depremi düzeyinde ($PGA\approx 0.5g$) oldukça yüksek bir güvenlik elde edilmiştir.



Şekil 3.14 : $M_1=7.375$ kNm taban momenti durumu için aşılma olasılık eğrileri.



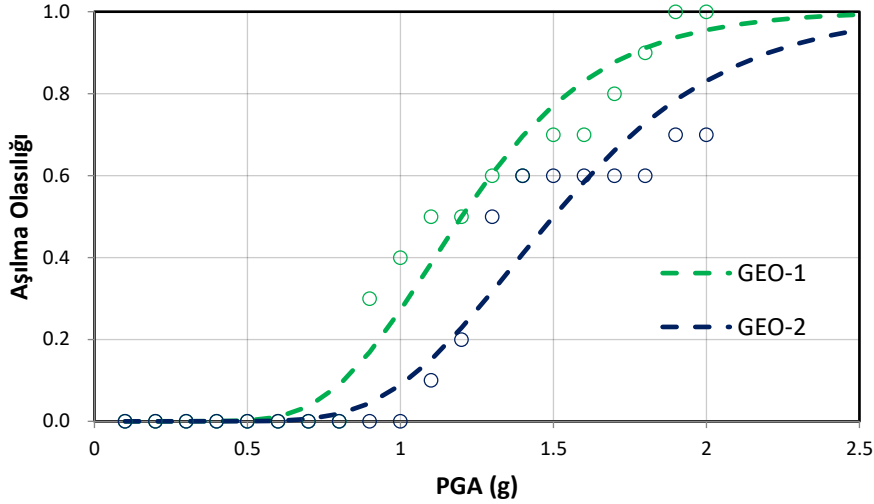
Şekil 3.15 : $M_2=14.75$ kNm taban momenti durumu için aşılma olasılık eğrileri.

Kırılma olasılık eğrilerinden GEO-2 sisteminin GEO-1'den daha büyük ivmeler taşıyıldığı anlaşılmaktadır. Bu durumu GEO-2 sisteminin yatay rijitliğinin daha küçük olması ile açıklanabilir.

GEO-1 ve GEO-2 sismik yalıtım cihazlarının fiziksel yerdeğiştirme kapasitelerinden hareketle belirlenen tepe yerdeğiştirme sınırları (sırasıyla $\Delta_1=350$ mm, $\Delta_2=500$ mm) esas alınarak oluşturulan aşılma olasılık eğrileri Şekil 3.15'de verilmiştir.

Sismik yalıtım cihazının kullanıldığı durumlarda (GEO-1 ve GEO-2) tasarım depremi düzeyinde ($PGA \approx 0.5g$) sınır yerdeğiştirme büyüklüklerinin aşılma olasılıkları %0'dır.

PGA=1g düzeyinde yapılan bir karşılaştırmada ise GEO-1 ve GEO-2 sistemlerinin karşı gelen yerdeğiştirme sınırlarını aşma olasılıkları sırasıyla %30 ve %10 elde edilmiştir.



Şekil 3.16 : PSID kapasitelerinin aşılma olasılık eğrisi.

İyi bir sismik izolasyon cihazı tasarımı için, Şekil 3.14 ve 3.15'de verilen taban momenti kırılma olasılık eğrileri ile Şekil 3.16'da verilen tepe yerdeğiştirmesi aşılma olasılık eğrilerinin birlikte kullanımının gerekli olduğu açıktır.

3.4 Genel Sonuç

Üç boyutlu sonlu eleman kullanılarak hazırlanan hesap modeli gerilme yoğunlaşması durumunu yeterli başarıyla temsil etmiştir. Gerek ankastre gerekse sismik yalıtım cihazına mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörlerinin statik ve dinamik yükler ekisindeki davranışı çubuk sistem modelleri ile yeterli başarıyla temsil edilebilmektedir.

Performans analizinin en son aşamasında kullanılan kırılma (aşılma) olasılık eğrileri deneysel çalışma sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar vermiştir.

4. SONUÇLAR

4.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında; yüksek gerilim hatlarında kullanılan porselen elektrik izolatörleri için ekonomik bir sismik yalıtım cihazı geliştirilmiş, etkinliği deneysel ve sayısal çalışmalarla doğrulanmıştır. Ulaşılan genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Geliştirilen sismik yalıtım cihazına mesnetlenmiş sistemlerde ankastre mesnetlenme durumuna göre; doğal titreşim periyodu, sönüm özellikleri, taban kesme kuvveti ve eğilme momenti büyüklükleri bakımından önemli iyileşmeler gözlenmiştir.
- Etkin titreşim periyotları; ankastre ve GEO-1, GEO-2 türü sismik yalıtım durumları için sırasıyla 0.18 s (5.57 Hz), 0.64 s (1.56 Hz) ve 0.87 s (1.15 Hz) olarak elde edilmiştir. İşletme durumuyla ilgili olası yerdeğiştirme sınırları dikkate alınmak kaydıyla etkin titreşim periyodunun uzatılması sismik yalıtım sisteminin etkinliğinin daha da artırılması için bir yol olabilir.
- Farklı deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen eşdeğer sönüm oranları ankastre ve GEO-1, GEO-2 türü sismik yalıtım durumları için sırasıyla %1~2, %3~8 ve %3~6 olarak elde edilmiştir.
- IEEE 693 (2005)'den alınan yüksek performans seviyesi tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiş ivme kayıtları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda; Ankastre ve GEO-1, GEO-2 türü sismik yalıtım cihazına mesnetlenmiş sistemlerde porselen elektrik izolatörü üst ucunda gerçekleşen ortalama yatay yerdeğiştirmeler sırasıyla 22.8 mm, 278 mm ve 347 mm olarak elde edilmiştir. Elektrik izolatörünün üst ucunun yüksek gerilim kablosuna bağlantısında, bu yerdeğiştirmelere uygun bağlantı araçlarının kullanımı gerekmektedir.
- IEEE 693 (2005)'den alınan yüksek performans seviyesi tasarım spektrumuna göre ölçeklendirilmiş ivme kayıtları kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda; Ankastre ve GEO-1, GEO-2 türü sismik yalıtım cihazına mesnetlenmiş sistemlerde porselen elektrik izolatörü taban kesitinde meydana gelen ortalama

eğilme momenti değerleri sırasıyla 10.15 kNm, 6.20 kNm ve 5.89 kNm olarak elde edilmiştir.

- Üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılarak hazırlanan sayısal hesap modeli gerilme yığılmalarını başarıyla temsil etmiştir.
- Gerek ankastre, gerekse sismik yalıtım cihazları üzerine mesnetlenmiş porselen elektrik izolatörlerinin statik ve dinamik yükler etkisindeki davranışları çubuk system modelleri ile temsil edilebilmektedir.
- Deneysel sonuçlarla doğrulanan sayısal hesap modelleri kullanılarak $PGA=0.1g \sim 2g$ aralığında $20 \times 10 = 200$ deprem kaydı için analizler gerçekleştirilmiş ve ulaşılan en büyük taban momentleri ve tepe yerdeğiştirmeleri kullanılarak kırılma (aşılma) olasılık eğrileri oluşturulmuştur.
- Oluşturulan kırılma (aşılma) olasılık eğrilerine göre, sismik yalıtım cihazının kullanıldığı durumlarda (GEO-1 ve GEO-2) tasarım depremi düzeyinde ($PGA \approx 0.5g$) oldukça yüksek bir güvenlik elde edilmektedir.
- Kırılma olasılık eğrileri, farklı yerdeğiştirme ve taban momenti sınırları esas alınarak yeni ürün tasarımında etkin olarak kullanılabilir.
- Yeni sismik yalıtım cihazının dönme rijitliğinin seçiminde, taban momenti ile tepe yerdeğiştirmesi arasındaki ilişkiyi temsil eden ve Şekil 2.113’de verilen grafik etkili olacaktır. Hedef yerdeğiştirme sınırını ifade eden düşey çizginin amaç taban momentini ifade eden yatay çizgi ile kesiştiği noktayı orjine birleştiren doğru, sismik yalıtım cihazının dönme rijitliğinin seçiminde kullanılabilecek önemli bir büyüklüktür.

4.2 Öneriler

Bu tez çalışmasından sonra gerçekleştirilecek olası çalışmalarda aşağıdaki konuların da dikkate alınması önerilebilir.

- Dinamik deneylerde, porselen elektrik izolatörü üst ucunda elektrik iletim ekipman ve kablo etkilerini temsil edebilecek elemanların bulunması,
- Geliştirilen sismik yalıtım cihazının sönüm özelliklerinin artırılması için, daha farklı poliüretan yaylar ve/veya ilave ince çelik şeritler kullanımı,
- Porselen elektrik izolatörünün mesnetlenmesi için bu çalışmada kullanılan çelik kafes taşıyıcı sistemin daha narin olduğu durumların çalışılması.

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.
- Alessandri S, Giannini R, Paolacci F & Malena M.** (2015). Seismic Retrofitting of an HV Circuit Breaker using Base Isolation with Wire Rope. Part 1: Preliminary Test and Analyses, *Engineering Structures*, 98, pp. 251-262.
- Alessandri S, Giannini R, Paolacci F & Malena M.** (2015). Seismic retrofitting of an hv circuit breaker using base isolation with wire rope. part 2: shaking table test validation, *Engineering Structures*, 98, pp. 263-274.
- Buckle, I. Constantinou, M., Dicleli, M. & Ghasemi, H.,** (2006) Seismic isolation of highway bridges (Report No. MCEER-06-SP07), University at Buffalo, NY: MCEER.
- Chopra, A. K.** (2012). *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Pearson Printice Hall, Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.
- Clemitsen, I. R.** (2015) *Castable polyurethane elastomers*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Davies, P. and Evrard, G.** (2007) Accelerated ageing of polyurethanes for marine applications, *Polymer Degradation and Stability*, 92 (8), 1455-1464.
- Erdik M.,** (2001). Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) Earthquakes, *Structural Control for Civil and Infrastructure Engineering*, pp. 149-186
- Falborski, T. & Jankowski, R.** (2017) Experimental study on effectiveness of a prototype seismic isolation system made of polymeric bearings, *Applied Sciences* 7(8), 808.
- FEMA 461** (2007). *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components*, Applied Technology Council, California.
- FEMA-P695** (2009). *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.
- Filiatrault A. & Matt H.** (2006). Seismic response of high voltage electrical transformer-bushing systems, *Journal of Structural Engineering*, 132(2), pp. 287-295
- GB 50260** (2013). *Code for Seismic Design of Electrical Installations*, National Standards of People's Republic of China.

- Gökçe, T., Yüksel, E., Orakdoğan, E.** (2019). Seismic Performance Enhancement of High-Voltage Post Insulators by a Polyurethane Spring Isolation Device, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17,1739–1762.
- Gokce, T. , Yuksel, E. & Orakdogan, E.** (2017). Seismic Protection of High Voltage Bushings by Using Polyurethane Springs, *16th World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile, Paper no:2381, January 9-13
- Gökçe, T., Yüksel, E., Orakdoğan, E.** (2018). Failure Mode Investigation for High Voltage Porcelain Insulators, *16th European Conference on Earthquake Engineering* June 18-21, Thessaloniki, Greece.
- Hatami M, Ashtiany M.G and Hosseini M** (2014). Experimental and analytical study of a high voltage instrument transformer, *13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada* Paper no:2550
- IEC 62271** (2007). *High-voltage switchgear and controlgear*, International Electrotechnical Commission, Avenue Marnix 17, B - 1000 Brussels, Belgium
- IEEE-693** (1984). *Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, IEEE Standard Department, Piscataway, NJ.
- IEEE-693** (2005). *Recommended Practice for Seismic Design of Substations*, IEEE Standard Department, Piscataway, NJ.
- JEAG 5003** (2010). *Guide for Seismic Design of Electrical Equipment*. Japan Electrotechnical Standards and Codes Committee
- Jeong, K., Choi, E., Back, S. Y. & Kang, J. W.** (2016) Smart damper using sliding friction of aramid brake lining and self-centring of rubber springs, *International Journal of Steel Structures*, 16(4), 1239-1250.
- Koliou M., Filiatrault A, Reinhorn A.M,** (2012). Seismic protection of electrical transformer bushing systems by stiffening techniques, University at Buffalo, NY, Technical Report MCEER-12-002
- Kong D. & Reinhorn A.** (2009). Seismic evaluation and protection of high voltage disconnect switches, *Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment*, ASCE, pp. 221-231
- Lee, D. & Constantinou, M.C.** (2018). Combined horizontal–vertical seismic isolation system for high voltage–power transformers: development, testing and validation, *Bulletin of Earthquake Engineering*, published online.
- Lihong, S., Zhiqiang, L. & Xue, Y.** (2014) Experimental study of marine polyurethane isolator life. *The 21st International Congress on Sound and Vibration*, Beijing, China, July 13-17.
- Mohammadpour, S. & Hosseini, M.** (2017), Experimental system identification of a 63kV substation post insulator and the development of its fragility curves by dynamic finite element analyses, *Earthquake Spectra*, 33(3), 1149–1.
- Mahdavi, M.** (2014). *Arı-ı Sarsma Masası Performans Değerlendirmesi*, (Yüksek Lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Murota N, Feng M.Q and Liu G.Y** (2009). Earthquake Simulator Testing of Base-Isolated Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21, no. 3, pp. 1291-1299
- SAP2000 V18**, (2016). *Integrated Structural Analysis and Design Software*, Computers and Structures Inc. , Berkeley, California, USA. (<https://www.csiamerica.com/>)
- Schiff A.** (1998). Guide to Improved Earthquake Performance of Electrical Power Systems, *National Institute for Standards and Testing*, Washington, D.C., Report No. NIST GCR 98-757
- SeismoStruct** (Version 2016). *A Computer Program for Static and Dynamic Nonlinear Analysis of Framed Structures*, Seismosoft, Pavia Italy (<http://www.seismosoft.com>).
- SeismoBatch** (Version 2016). *Automatic Execution of Numerous Analyses in Sequence*, Seismosoft, Pavia Italy (<http://www.seismosoft.com>).
- Takhirov, S., Fujisaki, E., Kempner, L., Riley, M., Low, B.** (2017). Full-Scale Component Testing of Seismic Isolation Devices and Verification of Their Performance in Full-Scale System Level Tests on A Shaking Table. *7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, pp 89-96, Italy, Pavia, September 6-8.
- Villaverde, R., Pardoen, G.C. & Carnalla, S.** (2001) Ground Motion Amplification at Flange Level of Bushings Mounted on Electric Substation Transformers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, 621-632.
- Whittaker, A.S., Fenves, G.L. & Gilani, A.S.J.** (2004) Earthquake Performance of Porcelain Transformer Bushings, *Earthquake Spectra*, 20, 205-223.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Tansu GÖKÇE
Doğum Tarihi ve Yeri : 23.07.1983 / Taşova
E-posta : tansugokce@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Müh.
- **Yüksek Lisans** : 2008, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Yapı Müh.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018 yılında kurulan Advanced Engineering for Structural Design Ar-Ge şirketinin kurucu ortaklarından.
- 2008-2017 yılları arasında çeşitli mühendislik bürolarında yapı mühendisliği alanında faaliyet göstermiştir.
- 2014-2015 yılları arasında ITU İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Müh. Lab. yürütülen FP7 Safecladding projesinde bursiyer olarak çalışmıştır.
- 2008-2013 yılları arasında Tübitak Yurttiçi Doktora Bursu almaya hak kazanmıştır.
- 2006-2008 yılları arasında Tübitak Yurttiçi Yüksek Lisans Bursu almaya hak kazanmıştır.
- 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Yüksek Lisans eğitimini tamamlamıştır.
- 2005 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezun olmuştur.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gökçe, T.**, Yüksel, E., Orakdöğen, E. 2019. Seismic Performance Enhancement of High-Voltage Post Insulators by a Polyurethane Spring Isolation Device, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17,1739–1762, doi: <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0494-6>
- **Gökçe, T.**, Yüksel, E., Orakdöğen, E. 2018. Failure Mode Investigation for High Voltage Porcelain Insulators. *16th European Conference on Earthquake Engineering* 18-21 Haziran, 2018 Selanik, Yunanistan.
- **Gökçe, T.**, Yüksel, E., Orakdöğen, E. 2017. Seismic Protection of High Voltage Bushings by Using Polyurethane Springs. *16th World Conference on Earthquake Engineering*, 9-13 Ocak, 2017 Santiago, Şili.
- **Gökçe, T.**, Yüksel, E., Orakdöğen, E. 2016. Porselen Elektrik İzolatörleri için Sismik Sönümleyici. Patent numarası: 2016-GE-484317 (*incelemede*)

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Durgun, Y., Güllü, A., **Gökçe, T.**, Yüksel, E. 2017. Shake Table Tests of a Special Raised Floor System, *7th International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering (7AESE)*, 6-8 Eylül, 2017 Pavia, Milano, Italy.
- Çelik, O. C., Yüksel, E., Avci-Karatas, Ç., **Gökçe, T.**, Bago, Z., Koller, G. 2015 Component Testing of Steel-Core Buckling Restrained-Braces (BRBS) with Pinned End Connections, *Eight International Conference on Advances in Steel Structures*, 22-24 Haziran, 2015 Lisbon, Portekiz.
- Özkaynak, H., Güllü, A., Khajehdehi, A., **Gökçe, T.**, Bal, İ. E., Smyrou, E., Yüksel, E., Karadoğan, F. 2015. Bi-Directional Loading Tests of Steel Cushions *14th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, 9-11 Eylül, 2015 San Diego, ABD.
- Khajehdehi, A., Güllü, A., **Gökçe, T.**, Özkaynak, H. Yüksel, E., Karadoğan, F. 2014. Cyclic Test of the Precast Panels Equipped with Steel Cushions, *Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 24-29 Ağustos, 2014 İstanbul
- Gülay, F.G., Bal, İ. E., **Gökçe, T.**, Çelik, N. 2010. Field Applications of P25 Preliminary Assessment Method for Identifying the Collapse Vulnerability of Existing RC Structures, *9th International Congress on Advances in Civil Engineering*, 27-30 Ekim, 2010 Trabzon
- Orakdöğen, E., Girgin, K., Boduroğlu, M.H., Büyüksişli, B., **Gökçe, T.** 2007. Performance Evaluation of a Strengthened Building Considering the Foundation Effects, *International Symposium on Earthquake Loss Estimation for Turkey*, 24-26 Eylül, 2007 İstanbul.
- Karayel, V., Yüksel, E., **Gökçe, T.**, Şahin, F. 2019. Uni-axial shaking table tests and validations of a seismic isolation system made of spring tube braces, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 118, 35-46.

- Karayel, V., Yüksel, E., **Gökçe, T.**, Şahin, F. 2017. Spring Tube Braces for Seismic Isolation of Buildings, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16, 219-231.
- Aydın, R., Yüksel, E., Yardımcı, N., **Gökçe, T.** 2015. Cyclic Behavior of Diagonally-stiffened Beam-to-column Connections of Corrugated-web I-Section, *Engineering Structures*, 121, 120-135
- Aydın, R., Yüksel, E., Yardımcı, N., Kısa, M.H., **Gökçe, T.** 2014. In-plane behavior of beam-to-column connections of corrugated web I-sections *Journal of Constructional Steel Research*, 100, 183-196
- Orakdöğen, E., Girgin, K., Boduroğlu, M.H., Büyüksişli, B., **Gökçe, T.** 2008. Performance Evaluation of a Strengthened Building Considering the Soil-Structure Interaction, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2), 222- 233
- Gülay F.G., Bal, I. E., **Gökçe, T.** 2008. Correlation Between Detailed and Preliminary Assessment Techniques in the Light of Real Damage States, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(S2), 129-139

