T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL ZEMİN KOŞULLARININ SİSMİK İZOLASYONLU BİNALARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

Adem TEKİN

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Seda ÖNCÜ DAVAS

II. DANIŞMAN
Dr. Sinan SARĞIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Ağustos, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Adem TEKİN tarafından, **Dr. Öğr. Üyesi Seda ÖNCÜ DAVAS** danışmanlığında hazırlanan **" Yerel Zemin Koşullarının Sismik İzolasyonlu Binaların Performansına Etkisi "** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **14/08/2023** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

		İmza	**Sonuç**
DANIŞMAN	Dr. Öğr. Üyesi Seda ÖNCÜ DAVAS İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Doç. Dr. Cihan ÖSER İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret
ÜYE	Dr. Öğr. Üyesi Elif GÜLER Maltepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul ☐ Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Adem TEKİN

(İmza)

Çok değerli aileme ithaf ediyorum…

BÜTÇE DESTEKLERİ

YEREL ZEMİN KOŞULLARININ SİSMİK İZOLASYONLU BİNALARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

Bu tez çalışması için herhangi bir kurumdan bütçe desteği alınmamıştır.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütülmesi aşamasında bana yönlendirmeleri ve destekleriyle rehberlik eden danışmanım Sayın Dr. Öğrt. Üyesi Seda Öncü Davas'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum. Sabrı, emeği ve cesaretlendirmeleri sayesinde bu tezi tamamlamamı sağladı. Aynı şekilde, harika bir iletişim becerisine sahip, bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, bu tezi bitirmemde çok emeği geçen değerli Sayın Dr. Sinan SARĞIN'a teşekkürü borç bilirim.

Tez yazma sürecinde başta canım annem ve Mehmet Salih TEKİN olmak üzere tüm aile bireylerime vermiş oldukları destek için ayrıca teşekkürlerimi iletiyorum.

Son olarak, 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen depremde yaşamını yitiren sevgili Aybüke Cemre ZORLU'yu ve depremlerde hayatını kaybedenleri saygı ile anıyorum. Bu çalışmam onların anısını yaşatmak ve gelecekteki nesillere daha güvenli bir yaşam sunması ümidiyle gerçekleşmiştir. Umarım bu tez, gelecekte alınacak tedbirlerde ve deprem riski azaltılmasına yardımcı olmasını sağlayabilir. Onların anıları her zaman kalbimizde yaşayacak ve bu çalışma onlara olan saygımın bir ifadesi olarak kalacaktır.

Ağustos 2023 **Adem TEKİN**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI ..... **ii**
BEYAN ..... **iii**
BÜTÇE DESTEKLERİ ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **ix**
TABLO LİSTESİ ..... **xiv**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xviii**
ABSTRACT ..... **xx**
1. GİRİŞ **1**
1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 3
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI 6
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE **8**
2.1. SİSMİK İZOLASYON YÖNTEMİ 8
2.2. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI 10
2.2.1. Elastomerik Mesnetli Sistemler 10
2.2.2. Sürtünme Esaslı Sistemler 12
2.3. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE TASARIM İLKELERİ 13
2.4. DEPREM ETKİSİ ALTINDA SİSMİK YALITIMLI BİNALARIN TASARIMI İÇİN GENEL KURALLAR 19
2.5. DEPREM KAYITLARININ ÖLÇEKLENDİRİLMESİ 23
2.6. DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ 24
2.7. YEREL ZEMİN SINIFLARI VE ÖZELLİKLERİ 25
2.8. TASARIM SPEKTRUMLARIN OLUŞTURULMASI 27
2.9. YEREL ZEMİN KOŞULLARI VE ZEMİN TEPKİSİ 30
3. YÖNTEM **36**

3.1. SİSMİK YALITIMLI BİNA ÜSTYAPI TASARIMI 36
3.2. İZOLASYON SİSTEMİ ÖN TASARIMI 38
3.2.1. DD-1 Yer Hareketi Düzeyi İçin Yalıtım Birimi Ön Tasarımı 40
3.2.2. DD-2 Yer Hareketi Düzeyi İçin Yalıtım Birimi Tasarımı 45
3.3. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ 48
3.4. BİR BOYUTLU ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ VE TEMEL SEVİYESİ SPEKTRUMLARI 53
3.4.1. Zemin Tepki Analizleri İçi Kullanılan İnceleme Sahası 54
3.4.2. Plaxis 2D ile Zemin Tepki Analizleri Modelinin Oluşturulması 55
3.4.3. DeepSoil ile Zemin Tepki Analizleri Modelinin Oluşturulması 60
4. BULGULAR 65
5. TARTIŞMA 75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 78
KAYNAKLAR 81
EKLER 87
İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI 135
ÖZGEÇMİŞ 137

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: (a) Taban ankastre bina, (b) Sismik izolasyonlu bina. 9

Şekil 2.2: Kauçuk blok ve çelik levhalı mesnetin yük altındaki şekil değiştirmesi. 11

Şekil 2.3: Elastomer mesnet kesiti. 11

Şekil 2.4: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör detayı (TBDY, 2018). 12

Şekil 2.5: Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS) (Özpalanlar, 2004). 12

Şekil 2.6: Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım biriminin yapısal kısımları (TBDY-2018). 14

Şekil 2.7: Kurşun çekirdekli mesnet kuvvet-yerdeğiştirme grafiği (TBDY, 2018). 14

Şekil 2.8: Zemin dinamik özelliklerinin kayma deformasyonuna göre değişimi (Sarğın,2019). 27

Şekil 2.9: Yatay tasarım spektrumun idealize edilmiş grafiği (TBDY-2018). 29

Şekil 2.10: Yatay elastik tasarım ivme-yerdeğiştirme grafiği (TBDY-2018). 30

Şekil 2.11: Deprem dalgalarının zemin içerisinde ilerlemesi 31

Şekil 2.12: Deprem kaydının ana kayadan yüzeye doğru yayılımı sırasında genlik ve ivmesinin artması (zemin büyütmesi) 32

Şekil 2.13: A ve B sahasının zemin büyütme fonksiyonları (Kramer, 1996). 32

Şekil 2.14: NEHRP Zemin sınıflandırılmasında zemin büyütme fonksiyonları ve bu fonksiyonların profil kesitleri. 35

Şekil 3.1: İzolasyon katının kolon aplikasyon planı. 37

Şekil 3.2: Taban ankastre binanın SAP 2000 programında izometrik görünüşü. 37

Şekil 3.3: İzolasyon katında kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlere etkiyen eksenel yük değerleri. 38

Şekil 3.4: İzolasyonlu yapı periyodu aralığında DD-1 ve DD-2'ye ait hedef ve ölçeklendirme spektrumları ve seçilen kayıtların ortalaması. 50

Şekil 3.5: Seçilen deprem kayıtlarının SeismoMatch yazılımı kullanılarak tasarım spektrumuna tam uyuşumun sağlanması: (a) TBDY-2018, ZC, DD-1 ve X doğrultusundaki

kayıtlar, (b) TBDY-2018, ZC, DD-1 ve Y doğrultusundaki kayıtlar, (c) TBDY-2018, ZC,DD-2 ve X doğrultusundaki kayıtlar, (d) TBDY-2018, ZC,DD-2 ve Y doğrultusundaki kayıtlar. 52

Şekil 3.6: Zemin davranış analizleri için oluşturulmak istenen modelin şematik görüntüsü...53

Şekil 3.7: İnceleme sahasında AFAD(sağ üst köşedeki tablo) ve Çanakkale Belediyesi'nce yapılan geoteknik ve jeofizik araştırmaların sonucu. 54

Şekil 3.8: Plaxis 2D "site response" modülü ekranı ve deprem kayıtlarının programa tanıtılması. 55

Şekil 3.9: (a) Düşey yükleme eğrisinde modüller (b) dinamik ve statik modül ilişkisi (Alpan, 1970). 56

Şekil 3.10: HSS modelde (a) kayma modülü (b) sönüm oranı eğrileri. 57

Şekil 3.11: HSS model formülü ve arazi jeofizik ölçümlerin karşılaştırılması....58

Şekil 3.12: RSN 230 kaydına ait Fourrier spektrumu. 59

Şekil 3.13: Rayleigh sönüm parametrelerinin belirlenmesi. 60

Şekil 3.14: DeepSoil analiz türü belirleme ekranı. 61

Şekil 3.15: DeepSoil zemin parametreleri girdi ekranı. 61

Şekil 3.16: DeepSoil idealize zemin profili. 62

Şekil 3.17: Zemin dinamik özelliklerinin belirlendiği DeepSoil ekranı. 63

Şekil 3.18: DD-2 Deprem Düzeyi RSN139-X doğrultusu ile yapılan analize ait ilave boşluk suyu basıncı oranı-zaman grafiği....64

Şekil 4.1: Yapının X ve Y doğrultusundaki taban deplasmanı: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS. 68

Şekil 4.2: Binanın X ve Y doğrultusunda maksimum taban deplasmanı: (a) DeepSoil, (b) DeepSoil-YASS, (c) Plaxis 2D, (d) Plaxis 2D-YASS....69

Şekil 4.3: Yapının X ve Y doğrultusundaki göreli kat ötelemesi oranları: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS. 71

Şekil 4.4 :Tüm durumlar için X ve Y doğrultusunda ortalama pik göreli kat ötelemesi. 72

Şekil 4.5: Yapının X ve Y doğrultusundaki toplam kat ivmeleri: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS. 73

Şekil 4.6: Tüm durumlar için X ve Y doğrultusunda ortalama pik kat ivmesi. 74

Şekil Ek-1.1: RSN14_KERN_SBA042 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 88

Şekil Ek-1.2: RSN139_TABAS_DAY_L1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 89

Şekil Ek-1.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPET147 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 90

Şekil Ek-1.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 91

Şekil Ek-1.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 92

Şekil Ek-1.6: RSN265_VICT_CPE045 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 93

Şekil Ek-1.7: RSN289_ITALY_A-CTR000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 94

Şekil Ek-1.8: RSN313_CORINTH_COR--L no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 95

Şekil Ek-1.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 96

Şekil Ek-1.10: RSN359_COALINGA.H_H-PV1000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 97

Şekil Ek-1.11: RSN448_MORGAN_AND250 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 98

Şekil Ek-2.1: RSN14_KERN_SBA132 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 100

Şekil Ek-2.2: RSN139_TABAS_DAY-T1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 101

Şekil Ek-2.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPE237 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 102

Şekil **Ek-2.4:** RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK180 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 103

Şekil Ek-2.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 104

Şekil Ek-2.6: RSN265_VICT_CPE315 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 105

Şekil Ek-2.7: RSN289_ITALY_A-CTR270 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 106

Şekil Ek-2.8: RSN313_CORINTH_COR—T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 107

Şekil Ek-2.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10090 T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 108

Şekil Ek-2.10: RSN335_COALINGA.H_H-PV1090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 109

Şekil Ek-2.11: RSN448_MORGAN_AND340 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 110

Şekil Ek-3.1: RSN14_KERN_SBA042 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 112

Şekil Ek-3.2: RSN139_TABAS_DAY_L1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 113

Şekil Ek-3.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPET147 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 114

Şekil Ek-3.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 115

Şekil Ek-3.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 116

Şekil Ek-3.6: RSN265_VICT_CPE045 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 117

Şekil Ek-3.7: RSN289_ITALY_A-CTR000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 118

Şekil Ek-3.8: RSN313_CORINTH_COR--L no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 119

Şekil Ek-3.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 120

Şekil Ek-3.10: RSN359_COALINGA.H_H-PV1000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 121

Şekil Ek-3.11: RSN448_MORGAN_AND250 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 122

Şekil Ek-4.1: RSN14_KERN_SBA132 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 124

Şekil Ek-4.2: RSN139_TABAS_DAY-T1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 125

Şekil Ek-4.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPE237 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 126

Şekil Ek-4.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK180 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 127

Şekil Ek-4.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 128

Şekil Ek-4.6: RSN265_VICT_CPE315 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 129

Şekil Ek-4.7: RSN289_ITALY_A-CTR270 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 130

Şekil Ek-4.8: RSN313_CORINTH_COR—T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 131

Şekil Ek-4.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10090 T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 132

Şekil Ek-4.10: RSN335_COALINGA.H_H-PV1090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 133

Şekil Ek-4.11: RSN448_MORGAN_AND340 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması 134

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: İzolasyon sistemi parametreleri ve formülleri. 13

Tablo 2.2: Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi için dayanım ve rijitlik parametrelerinin alt ve üst sınır değerleri. 20

Tablo 2.3: Yeni yapılacak deprem yalıtımlı binalar- üstyapı (TBDY-2018)..... 25

Tablo 2.4: Yeni yapılacak ve güçlendirilecek deprem yalıtımlı binalar-yalıtım sistemi (TBDY-2018). 25

Tablo 2.5: Yerel zemin sınıfları ve özellikleri (TBDY-2018). 26

Tablo 2.6: Kısa periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY-2018). 28

Tablo 2.7: 1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY-2018). 28

Tablo 3.1: Modal analiz sonuçları, periyot ve kütle katılım oranları. 38

Tablo 3.2: İzolatör için gerekli tasarım parametreleri (DIS) 39

Tablo 3.3: Elastomer yalıtım birimlerinde oluşacak birim şekildeğiştirme kontrolü (DD-1). 44

Tablo 3.4: Elastomer yalıtım birimlerinde oluşacak birim şekildeğiştirme kontrolü (DD-2). 48

Tablo 3.5: Ölçeklendirme periyot aralıkları. 49

Tablo 3.6: Analizlerde kullanılacak olan 11 adet deprem kaydına ait depremsellik ve ölçeklendirme faktörleri. 51

Tablo 3.7: Analizlerde kullanılan HSSmall parametreleri. 58

Tablo 3.8: Matasovic ve Vucetic (1995) tarafından önerilen killi zeminler için boşluk suyu parametreleri. 64

Tablo 4.1: Yapılan analizlerde kullanılan yazılım ve kabul koşulları ile ilgili özet bilgiler ... 65

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Elastomer yalıtım birimin brüt kesit alanı
A_L	: Elastomer katmanı kenar yüzeyi alanı
A_P	: Kurşun çekirdekli elastomer yalıtım birimlerinde kurşun çekirdeğin alanı
A_r	: Tek bir elastomer katmanının çelik plaka ile yapışmış yüzey alanı
B	: Çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapı
B_L	: Kurşun çekirdek çapı
D	: Yalıtım birimi için yerdeğiştirme değeri
D_{TD}	: Tasarım deprem yer hareketi seviyesinde göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak toplam yerdeğiştirme
D_{TM}	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde, göz önüne alınan doğrultuda yalıtım sistemi etkin rijitlik merkezinde oluşacak toplam yerdeğiştirme
D_y	: Yalıtım biriminin etkin akma yerdeğiştirmesi
E_d	: Tasarıma esas toplam deprem etkisi
E_c	: Elastomer yalıtım biriminin basınç modülü
E_o	: Esneklik modülü
E_v	: Düşey rijitlik modülü
F	: Yalıtım biriminde D yerdeğiştirmesine karşı gelen dayanım
F_S	: Üstyapıya etki eden deprem kuvveti
F_y	: Etkin akma dayanımı
F_Q	: Yalıtım biriminin karakteristik dayanımı
g	: Yer çekimi ivmesi
G	: Sabit yük
G_v	: Elastomer malzemenin kayma modülü
h_i	: i'nci kat ile (i-1)'nci kat arasındaki mesafe (kat yüksekliği)
I	: Bina Önem Katsayısı
K	: Kauçuk malzemenin hacim modülü
KK	: Kesintisiz Kullanım Performans Düzeyi
K_D	:Tasarım deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitliği

K_M	:En büyük deprem yer hareketi yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitliği
k_1	: Elastomer yalıtım biriminin başlangıç rijitliği (elastik rijitlik)
k_2	: Elastomer yalıtım biriminin ikincil (elastik ötesi) rijitliği
k_e	: D yerdeğiştirmesine karşılık gelen etkin rijitlik
k_v	: Elastomer yalıtım biriminin düşey rijitliği
P_{cr}	:Yatay yerdeğiştirme olmadığı durumda elastomer yalıtım birimlerinin burkulma yükü
P'_{cr}	:Yatay yerdeğiştirme olduğu durumda elastomer yalıtım birimlerinin burkulma yükü
P_{K1}	: (1.4 G +1.6Q) yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvet
P_{K2}	: (1.2G + Q ± Ed) yük birleşimi altında elde edilen düşey kuvvet
P_{str}	: Elastomer yalıtım birimlerinin, birim şekilde değiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi
S	: Şekil katsayısı
SH	: Sınırlı Hasar Performans Düzeyi
$S_{ae}^{(DD-2)}$	: Tasarım deprem yer hareketi seviyesinde %5 sönüm için yatay spektral ivme [g]
$S_{ae}^{(DD-2)}(T_D)$	: Tasarım deprem yer hareketi seviyesinde T_D periyodundaki spektral ivme [g]
$S_{ae}^{(DD-1)}$	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde %5 sönüm için yatay spektral ivme [g]
$S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)$	: En büyük deprem yer hareketi seviyesinde T_M periyodundaki spektral ivme [g]
t	: Elastomer katman kalınlığı
T_D	:Deprem yalıtımlı binanın tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde etkin titreşim periyodu
T_p	: Yalıtım uygulanmamış binanın brüt kesit rijitliği kullanılarak hesaplanmış hakim mod titreşim periyodu
T_M	: En büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın etkin titreşim periyodu
T_r	: Toplam elastomer kalınlığı
T_v	: Elastomer yalıtım birimleri ile yalıtılmış yapının düşey doğrultudaki titreşim periyodu
V_D	: DD-2 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvvet
V_M	: DD-1 için hesaplanan üstyapıya etkiyen kuvvet
Q	: TS 498'e göre azaltılmış hareketli yük
W	: Binanın deprem sırasındaki toplam kütleye karşı gelen ağırlığı

W_d	: Tüketilen enerji (Kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinin içinde kalan alan)
β_e	: Etkin sönüm oranı
τ_{yp}	: Kurşun malzemenin kayma akma gerilmesi
$\gamma_{c,E}$	: DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen birim şekildeğiştirme
$\gamma_{c,st}$	: Basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme
$\gamma_{r,st}$	: Yalıtım birimi üst ve alt plakaları arasındaki göreli dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme
γ_s	: Toplam deprem tasarım yerdeğiştirmesinden kaynaklanan açısal şekildeğiştirme
$\gamma_{s,E}$	: DD-1 ve DD-2 deprem yer hareketi etkisi altında oluşan yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme
$\gamma_{s,st}$	: Deprem dışındaki diğer etkilerden dolayı (genleşme, rüzgar vb.) oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısal şekildeğiştirme
η_D	: Tasarım deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısı
η_M	: En büyük deprem yer hareketi düzeyi için sönüm ölçeklendirme katsayısı
Δ_s	: Yatay yüklemeden meydana gelen yatay yerdeğiştirme miktarı
θ_s	: Tasarım dönme açısı
ξ	: DD-1 veya DD-2 deprem yer hareketi düzeyindeki yalıtım birimi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesi

Kısaltmalar	**Açıklama**
LRB	: Lead Rubber Bearings
TBDY-2018	: 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
PGA	: Pik yer ivmesi (Peak ground acceleration)
PGV	: Pik yer hızı (Peak ground velocity)
YASS	: Yer Altı Su Seviyesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YEREL ZEMİN KOŞULLARININ SİSMİK İZOLASYONLU BİNALARIN PERFORMANSINA ETKİSİ

Adem TEKİN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Seda ÖNCÜ DAVAS

II. Danışman : Dr. Sinan SARĞIN

Bu tez çalışması kapsamında, yerel zemin koşullarının sismik izolasyonlu betonarme bir binanın sismik performansı üzerine etkisini incelemek amacıyla; Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de yer alan tarihi deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi hususları dikkate alınmıştır. Sismik yalıtımlı binanın izolasyon sisteminin ön tasarımı DD-1 ve DD-2 deprem düzeyine göre izolatör mekanik parametrelerinin nominal, alt ve üst sınır değerleri için ayrı ayrı yapılmış ve bir sonlu elemanlar yazılımı olan SAP 2000 aracılığı ile bina modeli oluşturulmuştur. Seçilen deprem kayıtları önce basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş ve SAP 2000 yazılımında oluşturulan modele doğrusal olmayan zaman tanım analizleri kapsamında etkitilmiştir. Yerel zemin koşullarının sismik izolasyonlu binanın davranışına etkisini anlamak üzere geoteknik açıdan arazi ve laboratuvar deneyleri ile karakterize edilmiş bir saha için; basit ölçeklendirmede seçilen aynı deprem kayıt takımları DeepSoil ve Plaxis 2D yazılımında bir boyutlu zemin tepki analizlerinde kullanılmak üzere tasarım (hedef) spektrumlarına tüm periyotlarda tam uyuşumlu hale getirilmiştir. İleri zemin bünye modellerinin kullanıldığı, yer altı suyu seviyesinin de dikkate alındığı efektif gerilme

analizlerinin yanında; yer altı suyu seviyesinin hesaba katılmadığı toplam gerilme analizleri hem DeepSoil hem de Plaxis 2D'de gerçekleştirilmiştir. Her iki yazılımda, belirlenen temel seviyesinde ivme-zaman kayıtları kaydedilerek; SAP 2000 yazılımında kullanılacak formata dönüştürülmüştür. Dönüştürülen bu kayıtlarla, SAP 2000'de DD-1 ve DD-2 deprem düzeylerine göre oluşturulan nominal, alt ve üst izolasyon sistemi parametreleri dikkate alınarak oluşturulan modeller üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım analizleri tekrar edilmiştir. Sismik izolasyonlu binanın performansı; yapısal tepki parametrelerinden pik taban deplasmanı, pik göreli kat ötelemesi oranı ve pik kat ivmesi sonuçları tüm durumlar altında irdelenmiştir. Buna göre, talep taban deplasman ortalama değerleri tüm durumlar için kapasite taban deplasman değerinin altında kalmıştır. Benzer şekilde, pik göreli kat öteleme oranları ortalaması, tüm analiz durumları için TBDY-2018'de tanımlanan kesintisiz kullanım (KK) limit değerinin altında kalmıştır. Pik kat ivmelerinin ortalama değerleri ise tüm analiz durumlarında; her ne kadar ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde belirtilmemiş olsa da ivmeye duyarlı cihazların deprem esnasında ve sonrasında işlevini sürdürebilmesini sağlayacak eşik ivme değerinin altında kalmıştır. Yerel zemin koşullarının dikkate alındığı zemin tepki analizlerinden elde edilen kayıtlarla yapılan sismik performans analizlerinde yapısal tepki parametreleri bazı deprem kayıtları altında farklılık göstermiştir.

Ağustos 2023 , 134 sayfa.

Anahtar kelimeler: Sismik izolasyon, Zemin tepki analizi, Tam spektrum uyuşumu, Basit ölçeklendirme

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

EFFECTS OF LOCAL SOIL CONDITIONS ON THE PERFORMANCE OF SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS

Adem TEKIN

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Name of Programme

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Seda ÖNCÜ DAVAS

Co-Supervisor: Dr. Sinan SARĞIN

Within the scope of this thesis, in order to investigate the effect of local soil conditions on the dynamic performance of a seismically isolated reinforced concrete building, the matters regarding selection and scaling of historical earthquake records in the Turkish Building Earthquake Code-2018 were taken into account. The preliminary design of the isolation system of the seismically isolated building was determined separately for the nominal, lower and upper limit values of the isolator mechanical parameters according to the strong motion levels defined as DD-1 and DD-2 in the code and the building model was created by means of SAP 2000, a finite element software. First of all, the selected earthquake records were scaled by applying the PGA scaling method and applied to the model created in SAP 2000 software for performing time domain analysis. For better understanding the effects of the local soil conditions on the seismically isolated building in a geotechnical manner, a geotechnically well-characterized site is modeled for 1D nonlinear site response analysis by using both Plaxis 2D and DeepSoil. Moreover, the selected strong ground motions for the PGA scaling are subjected to full

spectrum match process and then, in addition to effective stress analyses using advanced soil constitutive models, where the groundwater level is also taken into account, total stress analyses where the water level is excluded were performed in both DeepSoil and Plaxis 2D. In both software, acceleration-time records were recorded at the specified foundation level and converted into the format to be used in SAP 2000 software. With these converted records, nonlinear time domain analyses were repeated on the models created by considering the nominal, lower and upper isolation system parameters created according to the DD-1 and DD-2 earthquake levels in SAP 2000. The performance of the seismically isolated building was studied by analyzing the peak base displacement, peak relative storey drift ratio and peak storey acceleration results under all numerical analysis conditions. Accordingly, the average demand base displacement values remained below the capacity base displacement value for all cases. Similarly, the average values of peak relative storey drift ratios were below the continuing usage limit value defined in TBDY-2018 for all analysis cases. Although not specified in national and international regulations, the average values of peak floor accelerations were below the threshold acceleration value that will enable acceleration sensitive devices to service during and after the earthquake. In the seismic performance analyses runned with the records obtained from ground response analyses where local ground conditions were taken into account, structural response parameters differed under some earthquake records, specifically.

August 2023, 134 pages.

Keywords: Seismic isolation, Site response analysis, Full spectrum match, PGA scaling

1. GİRİŞ

Yer kabuğu her ne kadar hareketsiz gözükse de içinde bulunan mantonun konveksiyonel akımları nedeniyle sürekli yer değiştirir ve yer kabuğu altındaki kayalar belirli bir deformasyona zorlanır. Deformasyon kapasitesini aştıktan sonra ani olarak kırılır. Bu kırılma ile beraber ortaya çıkan titreşimlerin yeryüzünde neden olduğu sarsıntılara deprem denir. Bu doğal afet, can kayıplarına neden olmakla beraber sebep olduğu maddi zararla ülkelerin ekonomisini olumsuz etkilemektedir.

Depremlerin oluş zamanını önceden tahmin edilmesi oldukça güçtür. Deprem sonrasında ortaya çıkan enerjiyi de kontrol altına almak mümkün değildir. Bu yüzden yapıların tasarım aşamasında göçme durumunun önüne geçmek için sistemin taşıyıcı elemanlarının elastik ötesi davranışa geçerek belirli düzeyde hasarın oluşturulmasına izin veren bir tasarım fikri ortaya çıkmıştır. Bu geleneksel tasarım fikri, artan deprem yüklerine karşın taşıyıcı sistem elemanlarının da kesit boyutlarını arttırarak belirli bir süneklik düzeyinde kalmasını gerektiren kapasite tasarım ilkesidir. Bu kapsamda, taşıyıcı sistem için öngörülen sünek güç tükenmesini sağlayabilmek için tasarımın azaltılmış deprem yüklerine göre yapılması neticesinde taşıyıcı elemanlarda doğrusal olmayan şekil değiştirmelere izin verilir. Bu da deprem anında yapıda oluşacak hasarlara önceden izin vermek anlamına gelmektedir. Bu durumda deprem anında ve sonrasında, hastaneler, telekomünikasyon binaları, acil durum merkezleri, finans merkezleri, nükleer santraller gibi sürekli çalışması gereken kritik yapıların hasar oluşumunu en aza indirgeyecek şekilde tasarlamak fiziksel ve ekonomik açıdan güçtür (Güner, 2012). Bu bakış açısıyla, deprem enerjisini yapıdan olabildiğince izole etmek fikri ortaya çıkmıştır. Bu fikir kapsamında, üstyapının deprem isteminin azaltılması amacıyla temel ile üstyapı arasına konumlandırılan yatay rijitliği düşük elemanlardan oluşturulan sismik izolasyon sistemleri dünya çapında yaygınlaşmıştır. Sismik izolasyon sistemi, yapının doğal periyodunu uzatarak yapıya etkiyen deprem ivmesini azaltıp böylece taban kesme kuvvetini düşürür. Bu sayede üstyapı rijit bir blok gibi hareket eder ve göreli kat ötelemelerinin ve kat ivmelerinin aynı anda azaltılmasına olanak sağlar.

Sismik izolasyonlu binaların sismik performansı ise izolasyon sisteminin mekanik özelliklerine ve binanın bulunduğu sahanın yerel zemin koşullarına bağlıdır. Bu kapsamda, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de yeni yapılacak sismik izolasyonlu binaların üstyapısının tasarımında Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2, yalıtım sistemi ve alt yapının tasarımında ise Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 dikkate alınarak harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak standart biçimde veya sahaya özel deprem tehlikesi analizleri ile belirlenen deprem yer hareketi spektrumları kullanılır. Tasarım spektrumlarının oluşturulması sırasında kullanılan harita spektral ivme katsayıları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu (V_{s30}=760 m/s^2) esas alınarak boyutsuz katsayılar olarak tanımlanmıştır. Tasarım spektrumlarının oluşturulmasında yerel zemin etki katsayıları da göz önünde bulundurulur. Yerel zemin etki katsayıları ise yerel zemin sınıflarına bağlı olarak tanımlanır.

Sismik izolasyonlu binaların yapısal tepki parametrelerini belirlemek açısından, binanın bulunduğu sahaya ait tepki spektrumu ile uyumlu en az on bir adet deprem kaydı takımı seçilmelidir. Deprem kayıtlarının seçimi, tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyiyle uyumlu deprem büyüklükleri, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılmalıdır. Eğer bölgede tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyine uygun geçmiş deprem kayıtları mevcutsa, öncelikle bu kayıtlar kullanılmalıdır. Ancak yeterli sayıda ve nitelikte deprem kaydı mevcut değilse, zaman alanında sentetik yer hareketi kayıtları da kullanılabilir. Bu durumda, binanın bulunduğu bölgenin sismik kaynakları, dalga yayılımı ve yerel zemin özellikleri dikkate alınmalıdır (TBDY 2018).

Tüm bu faktörlerin yanı sıra, özel durumlar da dikkate alınmalıdır. Örneğin, zemin büyütmesi veya zemin sıvılaşması gibi faktörler, sismik dalgaların genliklerinin azalmasına veya artmasına neden olabilir. Zemin büyütmesi, sismik dalgaların yumuşak zemin tabakalarından geçerken genliklerinin artması olarak tanımlanır (Kramer, 1996). Zemin büyütmesi için ana kaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı ve türleri, kayma modülü, sönüm oranı, zemin tabakalarının yanal düzensizliği ve topoğrafik özellikler gibi çeşitli dinamik özellikler ve yerel zemin özellikleri göz önünde bulundurulabilir (Şafak, 2001). Bu nedenle, zemin tepki analizleri, yerel zemin özelliklerini dikkate alarak sismik dalgaların zemin yüzeyindeki davranışını belirlemek için kullanılabilir. Bu analizler sonucunda elde edilen benzeştirilmiş hareketler, zaman tanım alanında analiz için kullanılırken, zemin büyütmesi sonucunda yer hareketlerinin değişen genlik ve frekans içeriğinin etkisi göz önünde bulundurulmaktadır.

Bu çalışmada, yerel zemin etkilerinin sismik izolasyonlu binaların yapısal davranış parametreleri üzerindeki etkisini incelemek için zemin büyütmesi potansiyeli olan bir sahaya ait zemin profili, yer altı suyunun varlığına göre ele alınmıştır. İlgili sahaya uygun deprem kayıtları, sahanın sismik potansiyeline göre seçilerek TDBY-2018 esaslarına uygun olarak belirlenen tasarım ivme spektrumuna göre basit ölçeklenmiştir. Ayrıca, zemin davranış analizleri yer altı suyu durumu da dikkate alınarak geoteknik deprem mühendisliği kapsamında sıklıkla kullanımı tercih edilen analiz programlarında (DeepSoil ve Plaxis) gerçekleştirilmiştir. Basit ölçeklendirme için seçilen deprem kayıtları, bu aşamada tam spektrum olarak ölçeklendirilmiştir. Ardından, seçilen sahaya göre tasarlanan dört katlı bir konut binası modeli sondajlarla geoteknik arazi karakterizasyonu yapılmış bir zemin profilinde yer altı suyu seviyesi de dikkate alınarak, yukarıda bahsi geçen geoteknik yazılımlarla temel seviyesindeki yer hareketi ivme kayıtları elde edilmiştir. Daha sonra, kurşun çekirdekli izolatörlerle yalıtılmış dört katlı betonarme bir binanın sismik performansı, sonlu elemanlar analiz programı SAP2000 aracılığıyla gerek basit ölçeklendirme gerekse de tam spektral uyuşum ile elde edilen kayıtlar kullanılarak zaman tanım alanında analiz edilmiştir. Analiz sonuçları, taban deplasmanları, göreli kat ötelemeleri ve toplam kat ivmeleri açısından her durum için karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

1.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sismik izolasyon sistemleri, yapıların potansiyel deprem hasarını azaltmak için etkili bir yaklaşımdır ve deneysel sonuçlar etkinliğini göstermektedir. Bhandari ve diğ. (2018), asgari veya artırılmış kriterlere göre tasarlanan sismik olarak izole edilmiş binaların genellikle, minimal olarak tasarlanmış herhangi bir yalıtımsız binaya göre 50 yıllık kullanım ömrü içinde hasar alma veya yıkılma olasılıklarının genellikle daha düşük olduğunu belirtmiştir. Naeim ve Kelly (1999) sismik yalıtım sistemleri hakkında geniş çaplı bir çalışma ele almıştır. Çalışmada dönemin yönetmeliğini kullanarak yalıtım sistemlerinin tiplerinden, çalışma prensibinden, mekanik özelliklerinden ve uygulamalarından bahsetmiştir. Lu ve diğ. (2008) tarafından, değişken ve kontrol edilebilen sürtünmeli taban yalıtım sistemi önerilmiştir. Analiz sonuçları bu sistemin yakın fay depremlerinden kaynaklanan düşük frekanslı rezonansın etkisini düşürülebileceğini göstermiştir. Nihayetinde yalıtımlı yapının taban yerdeğiştirmesi ve üstyapının ivmesini aynı anda düşürebileceğini belirtmiştir. Richins (2011) çalışmasında,

kullanılmakta olan bir betonarme köprüyü sismik yalıtım birimleri ile donatarak deprem etkilerini incelemiştir. Yalıtım sistemleri sayesinde sismik kuvvetlerin önemli derecede azaltıldığını tespit etmiştir. Buna bağlı olarak da temel ve kazık maliyetlerinin düştüğünü belirtmiştir. Bir diğer çalışmada (Tafheem ve diğ., 2017), betonarme çok katlı bir binada taban izolatörü kullanmanın, taban kesme değerini %69 oranında ve en üst kat ivmesini %75 oranında azaltabildiğini belirtmiştir. Benzer şekilde, kurşun çekirdekli kauçuk mesnet (LRB) sistemin, deprem sırasında taban kesme kuvvetini %65-85 oranında azaltarak sismik aktivitesi yüksek bölgelerde bulunan binalar için uygun maliyetli ve güvenli bir çözüm olduğu belirtilmiştir (Hadian ve diğ, 2013). Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ile ilgili literatürde çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Taflanidis ve Jia (2011) kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerle donatılmış taban izole yapıların risk değerlendirmesini önerilen bir simülasyon tabanlı çalışma aracılığıyla gerçekleştirmiştir. Park ve Ok (2015) çalışmasında, yeni ve mevcut bitişik nizamlı binaların optimum sismik performansı için yeni kontrol sistemi konfigürasyonu önermiştir. Sayısal benzetimlerden elde edilen karşılaştırmalı sonuçlar, önerilen sistemin sismik uyarımlar altında bitişik nizamlı binaların tepkilerini azaltmada performans açısından verimli ve uygun maliyetli bir çözüm olabileceğini göstermektedir. Alhan ve Öncü-Davas (2016) farklı özelliklerde sismik izolasyon sistemleri ile donatılmış binaların farklı fay mesafelerinde ve farklı yakın-fay depremlerine maruz kaldığında performans limitlerinin değerlendirilmesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmiştir. Albaş (2021) çalışmasında konut tipi bir bina için belirli bir koordinata göre belirlenen spektral ivme verilerini kullanarak kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlerden oluşan sismik izolasyon sistemini tasarlamıştır. Oluşturduğu bina modelinin ilgili kordinata göre ölçeklenmiş deprem kayıtları altında zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile dinamik analizini gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçları aynı modelin taban ankastre analiz sonuçlarına göre de kıyaslamıştır. Darwish ve Bhandari (2022) çalışmasında, kompozit binalarda taban izolasyonunun etkinliğini, temel ankastre betonarme binalar, temel ankastre kompozit binalar ve kurşun kauçuk mesnet kullanılan temel izolasyonlu kompozit binalar olmak üzere üç farklı bina tipi üzerinden sismik tepkileri karşılaştırılarak değerlendirmiştir.

Sismik izolasyonlu yapıların taban kesme kuvvetlerinin ve taban yer değiştirmeleri gibi davranış parametrelerinin depremlerin elastik tepki spektrumlarından doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi mümkündür (Lee ve Medland, 1979). Olasılıksal deprem tehlike analizi prosedürleri dikkate alınarak hazırlanan ve TBDY-2018'de yer alan sismik tehlike haritaları ile

bu haritadaki kooridanatlara özel, zemin bağımlı ve dört farklı deprem düzeyini (DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4) temsil eden elastik tepki spektrumlarının elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Benzer şekilde, Singapur'un farklı sismik tehlike seviyelerinde farklı yaklaşımlar kullanarak saha tepkisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Singapur'un sismik tehlike analizinde saha etkilerinin önemi vurgulanarak, farklı saha tepkisi modellerinin tahminlerinde dikkate değer farklılıklar tespit edilmiştir (Du ve Pan, 2016). Zemin yüzeyindeki deprem kaydının karakteristiğinin belirlenmesinde, geoteknik arazi karakterizasyonu ve zemin davranış analizinin önemi vurgulanmıştır (Ansal ve diğ., 2010). Buna ilavaten, Rodriguez-Marek ve Bray (2006) çalışmasında, saha davranışının ileri yönlü yakın-kaynak depremlerinin hem genliğini hem de periyodunu etkilediğini ve bu nedenle, yakın fay bölgesindeki sismik tasarımları değerlendirirken yerel saha koşullarının dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir. Öte yandan bazı araştırmalarda, suya doygun ve doygun olmayan zeminler için saha tepkilerinde önemli farklılıklar olduğunu ve saha tepkisinin yeraltı suyu seviyesi değişiminden etkilendiği belirtilmiştir. Yapıların sismik tasarımı için saha tepkisinin belirlenmesinde; düşey deprem hareketinin etkisi, yeraltı suyu seviyesinin değişimi gibi farklılıklar dikkate alınmalıdır (Chen ve diğ., 2011). Monaco ve diğ. (2011), 6 Nisan 2009 Abruzzo depreminde ciddi şekilde hasar alan iki farklı bölgede tipik zemin koşulları temsil edilerek gerçekleştirilen sismik tepki analizlerinin sonucunda; farklı zemin koşulları üzerine inşa edilmiş olan yapılarda meydana gelmiş hasarların yerel zemin koşulları ile ilişkili olduğunu doğrulamıştır. Ayrıca, Rodriguez-Marek ve diğ. (2001), zemin derinliğinin efektif gerilmenin belirlenmesinde önem arz ettiğinden sismik saha tepkisini tahmin etmede etkin bir parametre olduğunu belirtmiştir.

Tüm bu faktörlerin yanı sıra, özel durumlar da dikkate alınmalıdır. Yumuşak kıvamlı ya da gevşek-orta sıkı zeminlerde deprem kaynaklı meydana gelen efektif gerilme kaybına bağlı büyük deformasyon problemleri (örn. yumuşama, sıvılaşma ya da yatay yayılım) deprem süresince zemin ortamında kırılarak veya yansıyarak ilerleyen deprem dalgalarının büyümesine, frekans içeriğinin değişmesine neden olabilir. Zemin büyütmesi, sismik dalgaların yumuşak zemin tabakalarından geçerken genliklerinin artması olarak tanımlanır (Kramer, 1996). Zemin büyütmesi için ana kaya derinliği, zemin tabakalarının kalınlığı ve türleri, kayma modülü, sönüm oranı, zemin tabakalarının yanal düzensizliği ve topoğrafik özellikler gibi çeşitli dinamik özellikler ve yerel zemin özellikleri göz önünde bulundurulabilir (Şafak, 2001).

Zemin koşullarının taban ankastre ve sismik izolasyonlu binaların yapısal davranışına etkisinin incelendiği çalışmalar literatürde kısıtlıdır. Ateş ve Yurdakul (2011) çalışmalarında üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç tipi mesnetlerle izole edilmiş sekiz katlı bir kayma çerçevesi modelinin sismik davranışı farklı yerel zemin koşulları altında değerlendirmiştir. Buna göre, yumuşak, orta ve sert zemin sınıfları için sismik izolasyonlu ve izolasyonsuz düzlem çerçevenin analiz sonuçları irdelenmiştir. Hassan ve Pal (2018) çalışmalarında, taban ankastre ve sismik izolasyonlu bir binanın dinamik tepkisi sağlam, orta ve yumuşak zemin koşulları için tasarlanmış spektrumlar ve benzeştirilmiş deprem kayıtları altında analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda, göreli kat ötelemeleri, kat deplasmanları, kat kesme kuvvetleri ve kat ivmeleri incelenmiştir. Castaldo ve Ripani (2016) ise, sağlam, orta ve yumuşak zeminlerdeki frekans içeriği açısından sismik izolasyonlu binaların sismik performansını ve optimal izolatör sürtünme özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, sürtünmeli sarkaç izolatör davranışını dikkate alan bir model kullanılmıştır.

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu çalışmanın temel motivasyonu, deprem yükleri altında taban ankastre binalardan farklı şekilde sismik performans gösteren sismik izolasyonlu binaların davranışına yerel zemin koşullarının ne derecede etki ettiğini göstermektir.

Bu bağlamda, TBDY-2018 Bölüm 14 kapsamında sismik izolasyonlu binalar hakkında verilen hususlar dikkate alınmış ve yerel zemin özellikleri ZC zemin sınıfına uyan gerçek bir inceleme sahası seçilmiştir. TBDY 2018'de belirtilen hususlara göre, bir yapının sismik yükler altında davranışını ve/veya tasarımını belirlemek için yapılacak üç boyutlu analizlerde kullanılacak deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Ölçeklendirme ile ilgili yönetmelikte şu ayrımın yapılması önemle vurgulanmaktadır:

- Üstyapının sismik performansını irdelemek adına yapılacak üç boyutlu analizlerde basit ölçeklendirme yöntemi ile deprem kayıt takımları seçilmesi durumunda ilgili periyot aralığında 11 kayda ait ortalama ivme spektrumunun genliklerinin, yönetmelik tarafından önerilen tasarım spektrumu genliklerine oranının 1.3'te daha küçük olmaması (TBDY-2018, 2.5.2.1(b)).

- TBDY-2018 16.5.2 ve 16.10'da bahsi geçen zemin davranış analizlerinde ise tüm periyotlarda 11 adet deprem kaydının ivme spektrumuna uyuşturulması ve ortalama spektrumun tasarım spektrumundan küçük olmaması beklenmektedir.

Bu noktadan hareketle, bu tez çalışması kapsamında öncelikle, inceleme sahasının depremsellik özelliklerine uygun (moment magnitüdü, kayma dalgası hızı, faylara uzaklık ve yırtılma boyu) belirlenmiştir. Ayrıca, sismik izolasyonlu binanın DD-2 ve DD-1 deprem düzeyine uygun şekilde tasarlanması ile elde edilen izolasyon periyotları aralığında ($0.5T_D$-$1.25T_M$) 11 adet kayıt takımı seçilmiş olup; basit ölçeklendirme metodu ile ölçeklendirilmiştir (Bölüm 3.3).

Yerel zemin koşullarının deprem kayıtlarına etkisini araştırmak için basit ölçeklendirme yöntemi ile belirlenen 11 adet kayıt takımı Hancock ve diğ. (2006) tarafından önerilen uyuşum metodu ile ZC zemin sınıfı DD-1 ve DD-2 spektrumuna tam uyuşumlu hale getirilmiştir (Bölüm 3.3). Tam uyuşum işlemi sonucunda, orijinal ve ölçeklenen deprem kayıtlarına ait ivme-zaman, hız-zaman, deplasman-zaman kayıtlarının uygunluğu irdelenmiş; EK-(1-4)'de her bir kayıt için sunulmuştur.

Efektif gerilme hususunun önemli olduğu zemin kayma mukavemetinin, deprem durumunda zemin tepki analizlerine bağlı elde edilecek temel altı spektrumlara etkisini araştırmak üzere inceleme alanına ait zemin profilindeki yer altı suyu seviyesinin de hesaplara dahil edildiği zemin kolonu modelleri geoteknik yazılımlar (Plaxis2D-DeepSoil) ile analiz edilmiş; aynı analizler yer altı suyu seviyesi tamamen ihmal edilerek tekrarlanmış; sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu aşamada, zemin kolonu modellerine girdi olarak, her iki doğrultuda da DD-1 ve DD-2 spektrumlarına tam uyuşum metodu ile ölçeklendirilmiş kayıtlar kullanılmıştır.

Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler ile sismik olarak yalıtılmış dört katlı betonarme bir binanın üstyapısının tasarımında Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD2), yalıtım sistemi ve alt yapının tasarımında ise Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD1) için binanın bulunduğu sahanın koordinatlarına uygun olarak belirlenen harita spektral ivme katsayıları kullanılmıştır. Oluşturulan sismik izolasyonlu bina modeli, zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri yöntem kapsamında basit ölçeklendirme ve zemin davranış analizleri ile elde edilen deprem kayıtları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, taban deplasmanları, göreli kat ötelemeleri ve toplam kat ivmeleri açısından irdelenmiştir.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

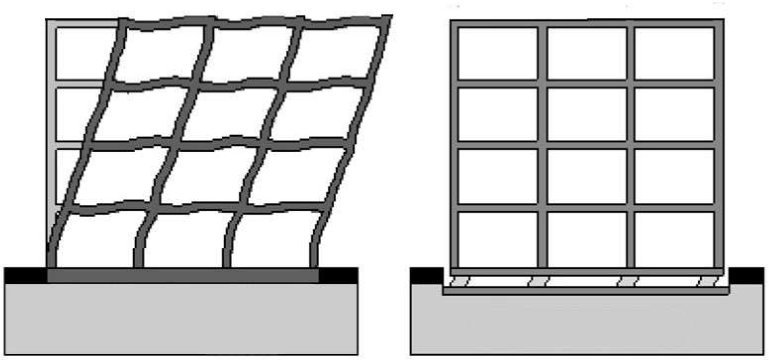
Bu bölümde, ilk olarak sismik izolasyon yöntemine, sismik izolatör türlerine, tez kapsamında ele alınan kurşun çekirdekli kauçuk mesnetlerin mekanik özelliklerine ve deprem etkisi altında sismik yalıtımlı binaların tasarımı için genel kurallara ele alınmıştır. Ayrıca deprem kayıtlarının TBDY-2018 kapsamında basit ölçeklendirme ve tasarım spektrumlarına tam uyuşum yöntemi ile ölçeklendirilmesi koşullarına değinilmiştir. Son olarak zemin tepki analizine değinilmiştir.

2.1. SİSMİK İZOLASYON YÖNTEMİ

Büyük depremler, depreme dayanıklı tasarımın uygun olmamasından kaynaklanan binaların kısmi veya toptan göçmesi nedeniyle can kaybına neden olabilir. Sünek davranış konseptine dayanan klasik depreme dayanıklı tasarım metodolojisine göre tasarlanan binaların can güvenliğini sağlayabildiği deprem sonrası saha çalışmalarında gözlemlenmiştir. Ancak bu durum, katlar arası aşırı yer değiştirmeler nedeniyle duvar, pencere gibi yapısal olmayan hasarlara ek olarak, taşıyıcı elemanlarında plastik mafsal oluşumlarından dolayı yapısal hasarlar olabileceği anlamına gelmektedir. Bu tasarım konseptinde, rijitlik arttırılarak yapının bütünlüğü korunmaya çalışılsa bile kat ivmelerinin artmasına ve bu sebeple yapı içeriğinin hasar görmesine neden olabilir. Bu durum, günlük hayatın aksamadan sürdürülmesinde önemli rol oynayan hastaneler, finans merkezleri ve endüstriyel tesisler gibi görev açısından kritik binalarda çok daha büyük sorunlara yol açabilir (Ramallo ve diğ., 2002). Sismik izolasyon, hem yapısal hem de yapısal olmayan bileşenlerin korunmasını ve aynı zamanda binanın içindekilerin korunmasını sağlama potansiyeline sahip alternatif bir depreme dayanıklı tasarım yöntemi olarak ortaya çıkmıştır.

Sismik izolasyon sistemleri, geleneksel tasarım ilkesi kapsamında gelen deprem etkisine göre taşıyıcıların boyutlarını arttırmak yerine, oluşan sismik kuvvetleri düşürmeye yarayan modern deprem tasarım yöntemidir. Bu teknolojide, yatay doğrultuda hareket edebilme kapasitesi yüksek olan düşey yönde rijit olan izolatör adı verilen birimler kullanılır (Priestley ve diğ., 2007). Belirlenen bir seviyeye yerleştirilen izolatörler daha çok yapının alt kısımlarında kullanıldığı için “taban izolasyonu” olarak da adlandırılır. Sismik izolasyonlu yapılar mevcut

yapı periyodunu uzatarak yapıyı depremin hakim frekasından uzaklaştırarak olası rezonans durumundan yapıyı kurtarmayı hedefler (Türker , 2005). İzolasyonlu binalar depreme maruz kaldığında izolatörlerde oluşacak deplasmanlar sayesinde deprem enerjisinin büyük kısmının izolasyon sistemi tarafından absorbe edilmesine yardımcı olur. Böylece, sismik izolasyon sistemleri: (i) göreli kat ötelemelerini azaltarak taşıyıcı sistem elemanlarında hasar oluşmamasına olanak sağlayarak yapısal bütünlüğün korunmasını ve (ii) kat ivmelerini hedeflenen sınırlara indirerek ve aynı zamanda temel yer değiştirmelerini pratik ve ekonomik sınırların altında tutarak yapının içeriğinin korunmasını sağlayabilir (Alhan ve Öncü-Davas, 2016). Şekil 2.1(a)'de görünen taban ankastre binada deprem ivmesi üstyapıyı daha fazla zorlamış ve katlar arası büyük göreli ötelemeler oluşmuştur. Şekil 2.1(b)'de ise sismik izolatörler ile yalıtılmış bir binanın izolasyon katında gerçekleşen büyük taban deplasmanları sayesinde üstyapının bir bütün olarak hareket etmesine ve böylece göreli kat ötelemesinin en aza indirilmesine olanak sağladığı gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 2.1: (a) Taban ankastre bina, (b) Sismik izolasyonlu bina.

Öte yandan, sismik izolasyon teknolojisi bina içindeki insanların can güvenliğini artırır. Deprem sırasında, sismik izolasyon sistemleri binanın salınımını azaltacağından insanların deprem etkilerinden kaynaklanan tehlikelerden korunmasına yardımcı olur. Ayrıca, uzun vadede maliyet tasarrufu sağlar. Bu teknoloji sayesinde, deprem hasarı ve sonrasındaki onarım gereksinimleri azaldığından, binaların hizmet ömrü uzar ve bakım maliyetleri düşer. Ayrıca, sismik izolasyonlu binaların deprem sigorta primleri genellikle daha düşüktür.

2.2. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Sismik yalıtımlı yapılarda kullanılan izolatör sınıflandırmaları çalışma prensibine, fiziki şekline, boyutsal büyüklüğüne, uygulandığı yer ve kullanılan malzemenin özelliklerine bakılarak değerlendirilir. Literatürde pek çok örnek bulunmasına karşın, burada sıklıkla kullanılan izolatör türlerine değinilmiştir.

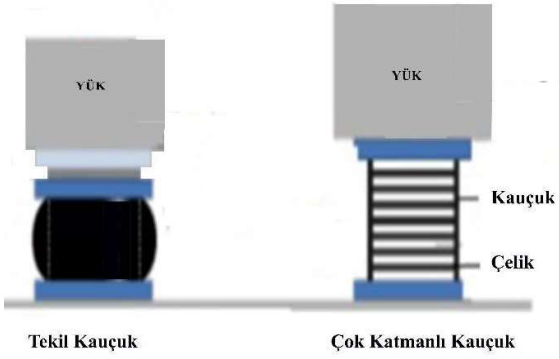
1. Elastomerik mesnetli sistemler
    - Düşük sönümlü kauçuk tip mesnetler (LDRB)
    - Yüksek sönümlü kauçuk tip mesnetler (HDRB)
    - Kurşun çekirdekli kauçuk tip mesnetler (LRB)
2. Sürtünmeli sarkaç tipi sistemler
    - Tek eğrilikli sürtünmeli sarkaç (SFP)
    - İki eğrilikli sürtünmeli sarkaç (DFP)
    - Üç eğrilikli sürtünmeli sarkaç (TFP)

Bahsi geçen izolatör sistemleri hakkında kısaca bahsedilecektir. Tez kapsamı içerisinde tasarım aşamasında kurşun çekirdekli sismik izolatör kullanıldığı için daha detaylı bilgiye yer verilecektir.

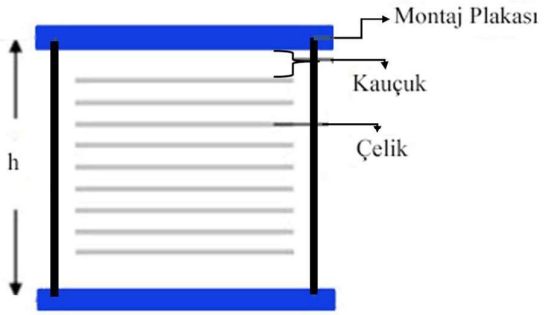
2.2.1. Elastomerik Mesnetli Sistemler

Elastomerik mesnetli sistemler en çok kullanılan izolasyon sistemlerinden biridir. 8-20 mm kalınlığındaki doğal veya sentetik kauçuğun, 2-3 mm çelik levhalarla birleştirildiği izolatör türüdür. Bu işlem özel üretim yerinde yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta vulkanizasyon yöntemi ile gerçekleştirilir. İlk olarak Üsküp'te bir okul inşaatında kullanılan bu yalıtım sisteminde çelik plaka kullanılmadığından dolayı yeterli düşey rijitlik sağlanamamıştır. Daha sonra geliştirilen tekniklerle, Şekil 2.2'de gösterildiği üzere çelik levhaların eklenmesiyle düşey rijitlik artarak yanal burkulmaları da önemli derecede engellenmiştir (Murat, 2007). Şekil 2.3'de elastomer bir izolatörün kauçuk ve çelik plaka montajı daha detaylı bir biçimde gösterilmiştir (Camgöz, 2002). Yatay yöndeki kesme kuvvetlerini yatay doğrultuda esnek olan kauçuk tabakalar karşılamaktadır. Kauçuk tabakaların yatay doğrultuda gerçekleştirdiği büyük

deplasmanlar sayesinde ise deprem enerjisinin büyük bir kısmı sönümlenir. Buna olanak sağlayan izolasyon sisteminin doğrusal olmayan davranışıdır.



Şekil 2.2: Kauçuk blok ve çelik levhalı mesnetin yük altındaki şekil değiştirmesi.



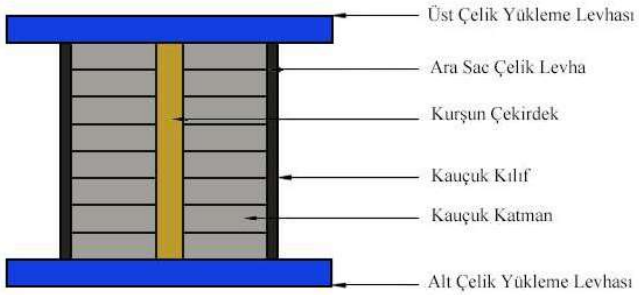
Şekil 2.3: Elastomer mesnet kesiti.

Aşağıda bu elastomerik mesnetli sistemlerin tanımı ve bazı özellikleri Kelly (2001) ve Komodromos (2000)'un çalışmalarından özetlenmiştir.

Düşük sönümlü kauçuk mesnetler, tipik olarak kullanılan 8-20 mm kalınlığında kauçuk 2-3 mm kalınlığında da çelik plakaların montajı ile oluşan yalıtımlı sistemleridir. Kauçuk mesnetlerin sahip olduğu viskoz sönümü genellikle %3 ve çoğunlukla sönümleyici sistemler ile birlikte kullanılırlar. Çelik plakalar kauçuk tabakaların yanal deformasyonlarını sınırlandırır.

Yüksek sönümlü kauçuk mesnetler, viskoz sönüm %8-15'i gibi önemli sayılacak yüksek bir seviyededir. Yüksek seviyedeki sönüm sağlamak için karbon ve reçine gibi ek özel dolgu maddeler kullanılır. Gerilmeler tam kapasitenin üzerine çıktığında sönüm %8-12 aralığında iken düşük gerilme seviyelerinde ise %15'e erişebilir.

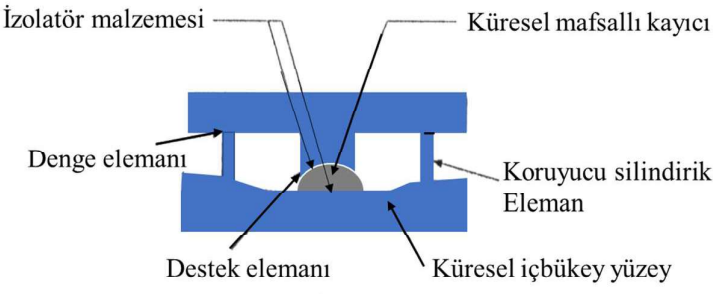
Kurşun çekirdekli kauçuk mesnetler; Şekil 2.4'te gösterildiği üzere elastomerik mesnetin içine kurşun bir dübelin takılması ile oluşturulan mesnetlerdir. Kurşun çekirdek, küçük yatay yüklerin altında rijit davranırken; deprem kuvvetlerinin etkimesiyle artan toplan kuvvet sebebiyle kurşun çekirdeği plastik deformasyona zorlanır böylece deprem enerjisini absorbe eder. Akma sonrası yatay rijitlik azalır. Kurşun çekirdekli kauçuk mesnet genellikle %15-35 aralığında değişen viskoz sönüm sağlar.



Şekil 2.4: Kurşun çekirdekli kauçuk izolatör detayı (TBDY, 2018).

2.2.2. Sürtünme Esaslı Sistemler

Sürtünme esaslı sistemler, basit sarkaç prensibine göre çalışan bir diğer sismik taban izolasyon sistemidir. Temel olarak çalışma düşük sürtünmeli genellikle arasında kayıcı bir bilye bulunan konkav iki veya daha çok yüzeyin birbiri üzerinde kayması şeklindedir. Yapının ağırlığı bu mesnetlerin merkezinde karşılanır. Sürtünme tipi mesnetler, konkav yüzey sayılarına göre tek eğrilikli, çift eğrilikli ve üç eğrilikli olmak üzere sınıflandırabilir (Constantinou, 2004). Bunlardan, tek eğrilikli sürtünmeli mesnet dünya çapında en yaygın olarak kullanılan kayar sismik izolasyon mesnetlerindendir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5: Sürtünmeli Sarkaç Sistemler (FPS) (Özpalanlar, 2004).

2.3. SİSMİK İZOLASYON SİSTEMLERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE TASARIM İLKELERİ

Sismik izolasyonlu tasarım için öncelikle kullanılacak izolatörün fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. İzolasyon sistemi tasarımı sırasında seçilecek izolatörler için ya da üretici firmaların standart ürünleri için sunduğu katalog bilgileri kullanılabilir. Öte yandan, yapılan ön tasarım hesaplarına göre üretici firmalardan özel üretim izolatörler talep edilebilir. Seçilen izolatörler, deprem yönetmeliği kapsamında yer alan üretim ve prototip testlerine tabi tutulmaktadır (Sevim, 2016).

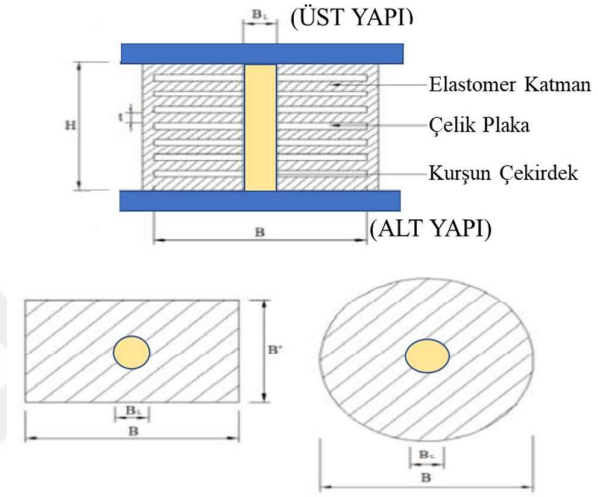
Kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler, Şekil 2.7'de sunulan düzgün ikili lineer kuvvet-deformasyon eğrisi ile etkili bir şekilde temsil edilebilen doğrusal olmayan davranış sergiler. Doğrusal olmayan histeretik davranış matematiksel Bouc-Wen modeline dayanır (Bouc, 1967; Wen, 1976). Bu model, izolasyon sistemlerinin yanı sıra ayrıca betonarme ve çelik yapılar, ahşap bağlantılar, sönümleyiciler vb. gibi mühendisliğin birçok alanında başarıyla kullanılmaktadır.

İzolasyon sistemlerinin ana parametreleri, akma dayanımı F_y, akma deplasmanı D_y, karakteristik dayanım F_Q, akma öncesi rijitlik k_1 ve akma sonrası rijitlik k_2 şeklindedir (Naeim ve Kelly, 1999). İzolasyon sistemi periyodunu belirlemek için rijit cisim üstyapı modu varsayımı dikkate alınır. İzolasyon periyodu T_0, akma sonrası rijitlik k_2 ve üstyapının toplam kütlesi M kullanılarak Denklem (2.1)'deki gibi hesaplanabilir. Akma sonrası rijitlik k_2, karakteristik dayanım F_Q ve akma öncesi rijitlik k_1, akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı α ve akma dayanımı F_y sırasıyla Tablo 2.1'de verilen Denklem (2.2)-(2.6) aralığında belirtilen formüller ile hesaplanabilir (Matsagar ve Jangid, 2004).

Tablo 2.1: İzolasyon sistemi parametreleri ve formülleri.

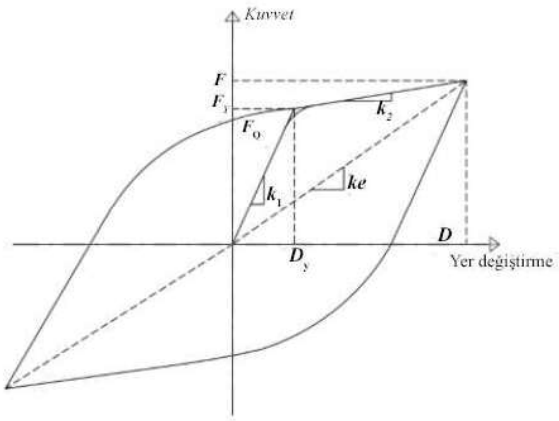
İzolasyon sistemi parametreleri	Formül	Denklem no.
İzolasyon periyodu	$T_0 = 2\pi\sqrt{M/k_2}$	(2.1)
Akma sonrası rijitlik	$k_2 = (4\pi^2 M)/\ T_0^2$	(2.2)
Karakteristik dayanım	$F_Q = (k_1 - k_2)D_y$	(2.3)
Akma öncesi rijitlik	$k_1 = k_2 + F_Q/D_y$	(2.4)
Akma sonrası rijitliğin akma öncesi rijitliğe oranı	$a = k_2/k_1$	(2.5)
Akma dayanımı	$F_y = k_1 D_y$	(2.6)

Bu kısımda, TBDY-2018 "Bölüm 14 Deprem Etkisi Altında Yalıtımlı Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar" başlığı altında yer alan hesap adımları sunulmaktadır. Şekil 2.6 'da mesnet çapı B, kurşun çekirdek çapı B_L, yalıtım biriminin toplam yüksekliği H ve kauçuk katman kalınlığı t şematik olarak gösterilmiştir (TBDY-2018).



Şekil 2.6: Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım biriminin yapısal kısımları (TBDY-2018).

Şekil 2.7'de, kurşun çekirdekli kauçuk izolatörün ikili lineer davranışa ilişkin kuvvet-yerdeğiştirme grafiğinde ise izolatör parametrelerinin geometrik ilişkisi sunulmuştur. Burada; karakteristik dayanım F_Q, başlangıç (elastik) rijitliği k_1, ikincil (elastik ötesi) rijitliği k_2, D izolatör maksimum yerdeğişitirmesine karşılık gelen etkin rijitlik k_e, D yerdeğiştirmesine karşılık gelen yatay dayanım F, etkin akma dayanımı F_y ve etkin akma yerdeğiştirmesi D_y olarak belirtilmiştir (TBDY-2018).



Şekil 2.7: Kurşun çekirdekli mesnet kuvvet-yerdeğiştirme grafiği (TBDY, 2018).

Yükleme döngüsünde uygulanan yatay kuvvetin F bu kuvvete karşılık gelen yatay yerdeğiştirme D değerine bölünmesi ile yalıtım biriminin etkin rijitliği k_e Denklem (2.7) aracılığıyla elde edilir.

$$k_e = \frac{F}{D} \tag{2.7}$$

Yalıtım biriminin etkin rijitliği k_e ayni zamanda Denklem (2.8)'de belirtildiği gibi de hesaplanabilir.

$$k_e = k_2 + \frac{F_Q}{D} \tag{2.8}$$

βe etkin sönüm oranı, bir yükleme döngüsünde tüketilen enerji miktarına W_d, yükleme döngüsünde uygulanan yatay kuvvet F ile bu kuvvete karşılık gelen yatay yerdeğiştirme D'ye bağlı olarak Denklem (2.9)'te sunulmuştur.

$$\beta_e = \frac{1}{2\pi} + \left[\frac{W_d}{FD}\right] \tag{2.9}$$

Sistemin karakteristik kuvveti F_Q ise kurşun akma gerilmesi τ_{yp} ve kurşun çekirdek alanı A_p'ye bağlı olarak hesaplanabilir (Denklem 2.10). Burada, kurşun akma gerilmesi değeri 10 MPa alınabilir. Burada karakteristik dayanım F_Q, akma dayanımı F_y'ye yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir (TBY-2018).

$$F_Q \cong F_y = A_P \tau_{yp} \tag{2.10}$$

Kurşun çekirdeğin elastik rijitliği k_1 ile belirlenir ve yalıtım biriminin başlangıç rijitliği olarak kabul edilir. Genellikle başlangıç rijitliği (k_1), elastik ötesi veya akma sonrası rijitlik olarak da adlandırılan ikincil rijitliğinin (k_2) 10 katı kabul edilebilir (Naeim ve Kelly, 1999). Diğer bir deyişle, akma sonrası rijitliğin k_2, akma öncesi rijitliğe k_1 oranı α=0.1 olarak alınabilir.

Akma sonrası rijitlik k_2, elastomer malzemenin kayma modülü G_r, kauçuk katmanının yüzey alanı A_r ile toplam elastomer kalınlığı T_r parametrelerine bağlı olarak Denklem (2.11)'te verilmiştir.

$$k_2 = G_v\left(\frac{A_r}{T_r}\right) \tag{2.11}$$

Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimleri için daire kesiti alanı A_p Denklem (2.12)'da, dikdörtgen kesiti alanı Denklem (2.13)'de verilmiştir. Burada, B çelik plaka ile yapışmış elastomerin çapı, B' ise TBDY-2018 Bölüm 14 Şekil 14.2'de tanımlanan boyuttur.

$$A_r = \frac{\pi}{4}(B - B_L^2) \tag{2.12}$$

$$A_r = BB' - (\frac{\pi}{4}B_L^2) \tag{2.13}$$

Elastomer yalıtım birimlerinin şekil katsayısı S, kauçuk katmanının yüzey alanının A_r, kauçuk katmanı kenar yüzeyi alanına bölünmesi A_L ile elde edilir (Denklem 2.14). Şekil katsayısı dairesel kesitli kurşun çekirdekli izolatörler için Denklem (2.15) aracılığıyla hesaplanmalıdır. Burada, t elastomer katman kalınlığıdır.

$$S = A_r/A_L \tag{2.14}$$

$$S = (B^2 - B_L^2)/4Bt \tag{2.15}$$

Kauçuk yalıtım birimlerinin düşey rijitliği k_v ve düşey rijitlik modülü E_v sırasıyla Denklem (2.16) ve (2.17) ile hesaplanabilir.

$$k_v = E_v A_r/T_r \tag{2.16}$$

$$E_v = 1/((1/E_c)(1/K)) \tag{2.17}$$

Denklem (2.17)'deki K, kauçuk malzemenin hacim modülü olup 2000 MPa alınacaktır. E_c ise kauçuk yalıtım biriminin basınç modülü olup; kauçuk malzemenin esneklik modülü E_0, kauçuk malzemenin sertlik değeri k ve şekil katsayısı S'e bağlı olarak elde edilebilir (Denklem 2.18). k katsayısı ise kauçuk malzemenin sertlik değerine bağlı olarak 50, 60 ve 70 değerleri için sırası ile 0.75, 0.60 ve 0.55 olarak alınır. Hesapta kullanılan kauçuk malzemenin esneklik modülü E_0 ise elastomer malzemenin kayma modülü G_v ile doğru orantılıdır (Denklem 2.19).

$$E_c = E_0(1 + 2kS^2) \tag{2.18}$$

$$E_0 = 4G_v \tag{2.19}$$

Yalıtım birimlerinin deprem, sabit yükler ve hareketli yükler altında oluşacak birim şekil değiştirmelerin TBDY-2018 Bölüm 14 kapsamında belirlenen sınırlar altında kalması gerekmektedir. Ayrıca, yalıtım birimlerinin düşey kararlılığı da kontrol edilmelidir.

Buna göre, deprem etkilerinin dikkate alınmadığı yük kombinasyonu durumunda meydana gelen birim şekildeğiştirme bileşenleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

i. Basınçtan meydana gelen açısal şekildeğiştirme $\gamma_{c,st}$, şekil katsayısı S, kauçuk katmanının yüzey alanı A_r, kauçuk yalıtım biriminin basınç modülü E_c ve 1.4G+1.6Q yük kombinasyonu altında yalıtım birimine etkiyen düşey yük P_{K1} olmak üzere Denklem 2.20 ile hesaplanır. G ve Q ise sırasıyla ölü ve hareketli yükleri temsil etmektedir.

$$\gamma_{c,st} = \frac{6SP_{K1}}{A_r E_c} \tag{2.20}$$

ii. Genleşme ve rüzgar gibi diğer etkilerden oluşacak yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen açısal şekildeğiştirme $\gamma_{s,st}$ ise Δ_s yatay yüklemeden meydana gelen yatay yerdeğiştirme miktarı, T_r ise elastomer katmanlarının toplam kalınlığına bağlı olarak hesaplanır (Denklem 2.21).

$$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta_S}{T_r} \tag{2.21}$$

iii. Yalıtım birimi üst ve alt plakaları arasındaki göreli dönmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme $\gamma_{r,st}$ tasarım dönme açısı θ_s, elastomer çapı B, elastomer katman kalınlığı t, toplam elastomer kalınlığı T_r kullanılarak aşağıdaki gibi Denklem 2.22 ile hesaplanır. Mesnetin imalat sırasında ve sabit, hareketli yüklere maruz kalması

sırasında oluşabilecek dönme etkilerini kapsayan tasarım dönme açısı θ_S'in değeri en az 0.005 radyan olarak alınmalıdır.

$$\gamma_{r,st} = \frac{B^2\,\theta_s}{2tT_r} \tag{2.22}$$

Deprem düzeyi DD-1 ve DD-2 ve düşey yük etkisiyle elastomer mesnette oluşan basınç altında meydana gelen birim şekildeğiştirme Denklem (2.23) ve yatay yerdeğiştirmeden meydana gelen birim şekildeğiştirme Denklem (2.23) ile hesaplanır. Burada, A_{re} izolatör sisteminin yerdeğiştirme anındaki hali ile durağan haldeki kesişiminin izdüşüm alanı, S şekil katsayısı, E_c kauçuk yalıtım biriminin basınç modülü, D yalıtım birimi için yerdeğiştirme değeri ve T_r elastomer katmanlarının toplam kalınlığıdır. P_{K2} ise 1.2G+Q±E_d yük kombinasyonu altında yalıtım birimine etkiyen düşey yük olmak üzere, G, Q ve E_d sırasıyla ölü, hareketli ve tasarıma esas toplam deprem etkisi yükleri temsil etmektedir.

$$\gamma_{c,E} = \frac{6SP_{K2}}{A_{re}E_c}\ ; \tag{2.23}$$

$$\gamma_{s,E} = \frac{D}{T_r} \tag{2.24}$$

Kurşun çekirdekli sismik izolatörlerin düşey kararlığını incelerken, yatay yerdeğiştirme olmadığı durumda burkulma yükü P_{cr}, DD-1 deprem düzeyinde yatay yerdeğiştirme olduğu durumda burkulma yükü P'_{cr} ve elastomer mesnedin birim şekildeğiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi P_{str} sırasıyla Denklem 2.25-2.27 ile hesaplanacaktır.

$$P_{cr} = 0.218\frac{G_v B^4}{tT_r}\frac{\left(1-\frac{B_L}{B}\right)\left(1-\frac{B_L^2}{B^2}\right)}{\left(1+\frac{B_L^2}{B^2}\right)} \tag{2.25}$$

$$P'_{cr} = P_{cr}\left(\frac{A_{re}}{A_r}\right) \tag{2.26}$$

$$P_{str} = \frac{3.5A_{re}E_c}{6S} \tag{2.27}$$

Yukarıda anlatılan her bir durum için hesaplanan elastomer yalıtım birimlerine ait birim şekildeğiştirme ve düşey kararlılık değerleri, TBDY-2018 kapsamında belirtilen ve burada Denklem 2.27-2.32 arasında sıralanan sınamaları sağlamalıdır.

$$\gamma_{c,st} \leq 3.5 \tag{2.27}$$

$$\gamma_{c,st} + \gamma_{s,st} + \gamma_{r,st} \leq 5.0 \tag{2.28}$$

$$\gamma_{c,E} + \gamma_{s,E} + 0.5\gamma_{r,st} \leq 6.0 \tag{2.29}$$

$$\gamma_{s,E} \leq 2.0 \tag{2.30}$$

$$\frac{\min (P_{cr}, P_{str})}{P_{K1}} \geq 2.0 \tag{2.31}$$

$$\frac{\min (P'_{cr}, P_{str})}{P_{K2}} \geq 1.1 \tag{2.32}$$

2.4. DEPREM ETKİSİ ALTINDA SİSMİK YALITIMLI BİNALARIN TASARIMI İÇİN GENEL KURALLAR

Bu bölümde, tez kapsamında ele alınan kurşun çekirdekli kauçuk yalıtımlı binaların tasarımı için kullanılan genel kurallar ve yine bu kurallar kapsamında yer alan deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi ile ilgili hususlara kısaca değinilmiştir.

TBDY-2018 Bölüm 14.3 kapsamında, izolasyonlu bina tasarımı yapılırken göz önüne alınması gereken genel tasarım ilkeleri hakkında önemli hususlar belirtilmiştir. Buna göre, bina önem katsayısı I = 1 alınarak, alt ve üstyapıların tasarımı için sınırlı süneklik düzeyi kullanılabilir. Yalıtım sistemi tasarlanırken kullanılan en büyük taban deplasmanı hesabında deprem düzeyi DD-1 için izolasyon sistemine ait mekanik parametrelerin alt sınır değerleri dikkate alınırken; üstyapı göreli kat ötelemesi hesabında deprem düzeyi DD-2 için izolasyon sistemine ait mekanik parametrelerin üst sınır değerleri dikkate alınır.

Yalıtım birimi mekanik parametreleri hesabında dikkate alınan alt ve üst sınır değerleri, yalıtım birimlerinin prototip veya üretim kontrol deneyleri ile belirlenir. Ancak, söz konusu sınır değerlerin belirlenmediği durumlarda, TBDY-2018 Bölüm 14.12'de verilen elastomer yalıtım birimleri karakteristik dayanımı (F_Q) ve elastik ötesi rijitliği (k_2) parametrelerine ait alt ve üst limit değerleri bu kısımda Tablo 2.2'de kurşun çekirdekli kauçuk tipi yalıtım birimi için sunulmuştur. Burada, λ_{ae} yaşlanma ve çevresel etkiler, λ_{deney} deney esnasında uygulanan yükleme hızı ve ısınma gibi etkiler, λ_{spek} ise yalıtım biriminin üretimi esnasında meydana gelen diğer etkileri ifade eden çarpanlardır.

Tablo 2.2: Kurşun çekirdekli kauçuk yalıtım birimi için dayanım ve rijitlik parametrelerinin alt ve üst sınır değerleri.

	F_Q		k_2	
	alt	üst	alt	üst
λ_{ae}	1.00	1.10	1.00	1.30
λ_{deney}	0.70	1.30	0.90	1.30
λ_{spek}	0.85	1.15	0.85	1.15

Denklem (2.33) ve (2.34)'de bağıntılar ile tanımlanan alt ve üst sınır değerleri (λ_{alt} ve $\lambda_{üst}$), izolasyon sistemi tasarımında hedef deprem düzeyleri için belirlenen nominal karakteristik dayanım (F_Q) ve elastik ötesi rijitliği (k_2) değerlerle çarpılarak izolasyon sisteminin ön tasarımında kullanılacak diğer mekanik parametreler alt ve üst sınır değerleri için belirlenir.

$$\lambda_{üst}=[1+0.75(\lambda_{ae,üst}-1)]\lambda_{deney,üst}\lambda_{spek,üst} \tag{2.33}$$

$$\lambda_{alt}=[1-0.75(1-\lambda_{ae,alt})]\lambda_{deney,alt}\lambda_{spek,alt} \tag{2.34}$$

TBDY-2018 Bölüm 14.10 kapsamında, yalıtım sisteminin yerleştirildiği arayüz ve arayüz altında bulunan temel sistemine etki eden yüklerin hesabında kullanılan ve burada da Denklem (2.35)-(2.37) ile gösterilen yük birleşimleri dikkate alınacaktır.

$$1.4G+1.6Q \tag{2.35}$$

$$1.2G+Q\pm E_d \tag{2.36}$$

$$0.9G\pm E_d \tag{2.37}$$

Benzer şekilde, TBDY-2018 Bölüm 14.10 kapsamında, üstyapı tasarımında kullanılan deprem etkisini de içeren yük birleşimleri Denklem (2.38)-(2.39)'te verilmiştir.

$$1.2G+Q+0.2S+E_d^{(H)}+0.3E_d^{(Z)} \tag{2.38}$$

$$0.9G+H+E_d^{(H)}-0.3E_d^{(Z)} \tag{2.39}$$

Burada, G ölü yükü, Q hareketli yükü S kar yükü, H yatay zemin itkisi, $E_d^{(H)}$ yatay deprem etkisi ve $E_d^{(Z)}$'de düşey deprem etkisini ifade etmektedir.

TBDY-2018 Bölüm 14.14 kapsamında, sismik yalıtımlı binanın üst ve alt yapısının deprem hesabında kullanılacak analiz yöntemlerine değinilmiştir. Buna göre, etkin deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanında doğrusal hesap yöntemi farklı koşullara (bkz. Bölüm 14.14) bağlı olarak uygulanabilir. Sismik yalıtımlı bir binanın izolasyon sistemi ön tasarımında etkin deprem yükü yöntemi kullanılabilir. Ön tasarım, binanın inşa edileceği zemin sınıfı göz önüne alınarak deprem düzeyleri 1 ve 2 (DD-1 ve DD-2) için izolatör mekanik parametreleri nominal, alt ve üst sınır değerlerine göre yapılır. Ardından, nominal, alt ve üst ön tasarım parametreleri kullanılarak oluşturulan her bir sonlu elemanlar bina modeli, yönetmelik koşullarına uygun deprem analiz yöntemi ile analiz edilir. Bu yöntemlerden detayları TBDY-2018 Bölüm 5.7'de verilen zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yönteminin kullanımı her koşulda uygundur. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi her deprem yer hareketi seviyesinde ve birbirine dik iki yatay doğrultuda en az on bir kayıt çifti için tekrarlanmalıdır.

Etkin deprem yükü yöntemine göre, izolasyon sistemi taban deplasmanı DD-2 yer hareketi düzeyi için D_D ve DD-1 yer hareketi düzeyi için D_M olmak üzere sırasıyla Denklem (2.40) ve Denklem (2.41) ile hesaplanabilir.

$$D_D = 1.3\left(\frac{g}{4\pi^2}\right)T_D^2\eta_D S_{ae}^{(DD-2)}(T_D) \tag{2.40}$$

$$D_M = 1.3\left(\frac{g}{4\pi^2}\right)T_M^2\eta_M S_{ae}^{(DD-1)}(T_M) \tag{2.41}$$

Burada η_D ve η_M sırasıyla DD-2 ve DD-1 deprem düzeyleri için sönüm ölçeklendirme katsayıları; T_D ve T_M ise sırasıyla DD-2 ve DD-1 deprem düzeyleri için bina etkin periyodudur. $S_{ae}^{(DD-2)}(T_D)$ ve $S_{ae}^{(DD-1)}(T_M)$ ise DD-2 yer hareketi seviyesinde T_D periyodundaki spektral ivme ile DD-1 yer hareketi seviyesinde T_M periyodundaki spektral ivme değerini g cinsinden temsil etmektedir. Sismik izolasyonlu binanın tasarım yerdeğiştirmesi seviyesinde etkin titreşim periyodu T_D ile sismik izolasyonlu binanın en büyük yerdeğiştirme seviyesinde etkin titreşim periyodu T_M Denklem (2.42) ile Denklem (2.43)'te verilen bağıntılar aracılığıyla elde edilir.

$$T_D = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_D g}} \tag{2.42}$$

$$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_M g}} \tag{2.43}$$

Bu denklemlerde K_D ile K_M parametreleri sırasıyla DD-2 ve DD-1 deprem düzeyleri için yerdeğiştirmesi seviyesinde yalıtım sisteminin nominal etkin rijitlikleridir. W, binanın deprem sırasındaki toplam kütleye karşı gelen ağırlığı, g ise yer çekimi ivmesidir.

Sönüm ölçeklendirme katsayıları η_D ve η_M ise Denklem (2.44)-(2.45)'da verilmiştir. Denklemdeki ξ her bir yer hareketi düzeyi için hesaplanan etkin sönüm yüzdesidir.

$$\eta_D = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \tag{2.44}$$

$$\eta_M = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \tag{2.45}$$

Ayrıca, Denklem (2.40) ve Denklem (2.41)'de verilen taban deplasmanı değeri aynı zamanda periyot ve sönüm oranına bağlı olarak değiştiğinden, bu değeri belirlemek için iterasyon yapılmalıdır. Bunun için aşağıdaki adımlar izlenebilir.

- Tasarım için bir taban deplasmanı değeri öngörülür.
- Akma sonrası rijitlik ve karekteristik dayanıma bağlı efektif rijitlik belirlenir.
- Efektif rijitliğe bağlı efektif periyot belirlenir.
- Etkin sönüm yüzdesi hesaplanır.
- Efektif periyot değeri için spektral tasarım ivme değeri okunur.
- Spektral tasarım ivme değeri için efektif sönüme bağlı taban deplasmanı hesaplanır.
- Ilk adımda öngörülen taban deplasmanı ile efektif sönüme bağlı olarak hesaplanan deplasman (D') kadar bu işlem devam eder.

TBDY-2018 Bölüm 3 kapsamında, deprem tasarım sınıflarına göre deprem yalıtımlı binalar için performans hedefleri ve uygulanacak değerlendirme/tasarım yaklaşımları sunulmuştur. Ayrıca, sismik izolasyonlu binaların üstyapıdaki göreli kat ötelenmeleri, Kesintisiz Kullanım (KK) performans seviyesi için 0.005hi, Sınırlı Hasar (SH) performans seviyesi için 0.01hi, Kontrollü Hasar (KH) performans seviyesi için ise 0.015hi değerini aşmayacak şekilde sınırlandırılmıştır.

2.5. DEPREM KAYITLARININ ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan sayısal analizlerde kullanılacak kayıtların tümü 2019 yılında yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de bir veya iki ve üç boyutlu hesaplarda kullanılması tavsiye edilen deprem kayıtlarının zaman tanım aralığında seçilip ve ölçekleneceğinden bu bölümde TBDY'2018-Bölüm 2.5'te yer alan hususlar açıklanmıştır.

Zaman tanım alanında deprem hesabı yapabilmek için öncelikle tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyini temsil eden ve sahanın yerel zemin ve coğrafi koordinatlarına bağlı tasarım spektrumu, bölgenin depremselliği ile paralel fay tipi, uzaklığı, deprem büyüklükleri gibi

parametrelere uygun kayıtlar seçilmelidir. Bahsi geçen bu kriterlere uygun sayıda kayıt bulunamaması durumunda kayıtlar bölgenin depremselliği ve yerel zemin koşulları dikkate alınarak benzeştirilmelidir.

Tezin yöntem bölümünde detaylı olarak anlatılacağı üzere üç boyutlu modellenen üstyapıya 11 adet deprem kaydı takımı seçilmiştir. Bu kayıtların seçiminde ve ölçeklendirilmesinde TBDY'2018-Bölüm 2.5.2.1-(b) ve Bölüm 2.5.3'te verilen aşağıdaki hususlara dikkat edilmiştir.

Buna göre TBDY'2018-Bölüm 2.5.2.1-(b)'de yer alan "Üç boyutlu hesaplar için seçilen her bir deprem kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumlar, kareleri toplamının karekökünün bileşke yatay spektrumu elde edilir. Bu ölçekleme için 0.2Tp ve 1.5Tp periyot aralığındaki genlik oranları 2.2.3.1(Yatay Elastik Tasarım Spektrumu) veya Sahaya Özel Elastik İvme Spektrumu'a göre tanımlanan tasarım spekrumunun 1.3' ten daha az olmasına dikkat edilecektir. Bu periyot aralığı, yalıtımlı binalarda değişebilir. Yalıtımlı binalarda kullanılan periyotlar; 0.2Tp yerine 0.5T_M (T_M en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın üst sınır değerleri ile hesaplanmış etkin titreşim periyodu), 1.5Tp yerine ise 1.25T_M (T_M en büyük yerdeğiştirme altında deprem yalıtımlı binanın alt sınır değerleri ile hesaplanmış etkin titreşim periyodu) kullanılacaktır. Her iki yatay bileşkenin ölçeklendirmesi de aynı ölçek katsayısı ile yapılır." kuralı dikkate alınacak ve seçilen kayıtlar basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklenecektir.

Ayrıca, zemin etkisinin analizlerde ortaya konulabilmesi için aynı deprem kayıtları TBDY'2018-Bölüm 2.5.3'te yer alan hususlar doğrultusunda tasarım ya da hedef spektruma tam uyuşumlu bir biçimde ölçeklenecektir.

2.6. DEPREM YER HAREKETİ DÜZEYLERİ

TBDY'2018-Bölüm 3.5.2.1'de verilen aşağıdaki tabloya göre yeni yapılacak deprem yalıtımlı binalarda ve yalıtım sisteminde güvenli tasarımı oluşturmak için aşağıda gösterilen performans hedefleri ve hesap yöntemleri takip edilmelidir (Tablo 2.3 ve Tablo 2.4). Bu nedenle tezin bu bölümünde deprem yer hareketi düzeylerini özetlemek yerinde olacaktır.

Tablo 2.3: Yeni yapılacak deprem yalıtımlı binalar- üstyapı (TBDY-2018).

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-2	SH	DGT	KK	DGT
DD-1	—	—	—	—

Tablo 2.4: Yeni yapılacak ve güçlendirilecek deprem yalıtımlı binalar-yalıtım sistemi (TBDY-2018).

Deprem Yer H. Düzeyi	DTS = 1, 2, 3, 3a, 4, 4a		DTS = 1a, 2a	
	Normal Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı	İleri Performans Hedefi	Değerlendirme/Tasarım Yaklaşımı
DD-2	—	—	—	—
DD-1	KK	ŞGDT[(1)]–DGT[(2)]	KK	ŞGDT[(1)]–DGT[(2)]

[(1)] Yalıtım sistemi için uygulanacaktır.
[(2)] Altyapı için uygulanacaktır.

TBDY-2018'de tanımlanan deprem düzeyleri bir yapının ortalama kullanım süresi Δt=50 yıl baz alınarak Denklem 2.46 ile hesaplanmıştır.

$$p(n \geq 1, \Delta t, T_R) = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_R}} \tag{2.46}$$

Burada, $p(n\geq1, \Delta t, T_R)$ terimi belli bir yılda tekrarlanma periyoduna sahip depremin; bina kullanım süresi içerisinde meydana gelme olasılığını göstermektedir. DD-1 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklükleri aşma olasılığının %2 olduğu ve karşılık gelen tekrarlama periyodunun T_R: 2475 yıl olduğu çok nadir deprem yer hareketlerini tanımlar. Bu deprem yer hareketi aynı zamanda en büyük deprem yer hareketi olarak da adlandırılır. DD-2 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklükleri aşma olasılığı %10 olan ve karşılık gelen tekrarlama periyodu T_R:475 yıl olan seyrek deprem yer hareketini tanımlar. Bu deprem yer hareketine standart tasarım deprem yer hareketi de denir. Benzer şekilde hesaplanan DD-3 yer hareketi seviyesi 50 yılda aşılma olasılığı %50; DD-4 yer hareketi seviyesi de 30 yılda aşılma olasılığı %50 olan deprem düzeylerini temsil etmektedir.

2.7. YEREL ZEMİN SINIFLARI VE ÖZELLİKLERİ

Yeni deprem yönetmeliği TBDY-2018 daha önce yürürlükte olan deprem yönetmelikleri gibi arazide ve laboratuvarda yapılan bir takım zemin deneyi parametrelerine göre kabaca sınıflandırmaktadır. İlk otuz metreye ait ortalama kayma dalgası hızı ($V_{S,30}$), standart

penetrasyon deneyi %60 enerji seviyesine göre düzeltilmiş vuruş sayısı (N_{60}) ve serbest basınç mukavemeti (C_u) değerleri sınıfları belirlemede kullanılır.

Yerel zemin koşullarının belirlenmesi amacıyla saha (arazi) ve laboratuvar çalışmalarını içeren zemin araştırmalarının yapılması yönetmelikçe karar kılınmıştır. Bu araştırmalar zemin tabakalarının özelliklerini, çevredeki binaların durumunu, yer altı sularının durumunu ve bölgenin depremselliğini, kuyu veya inceleme çukurları kazılmasını, gerekli arazi testlerinin uygulanmasını ve araziden toprak numunelerinin laboratuvar testleri için uygun yöntemlerle alınmasını içerir (Feyizoğlu, 2020). Tablo 2.5'de TBDY-2018'de yer alan yerel zemin sınıfları gösterilmiştir.

Tablo 2.5: Yerel zemin sınıfları ve özellikleri (TBDY-2018).

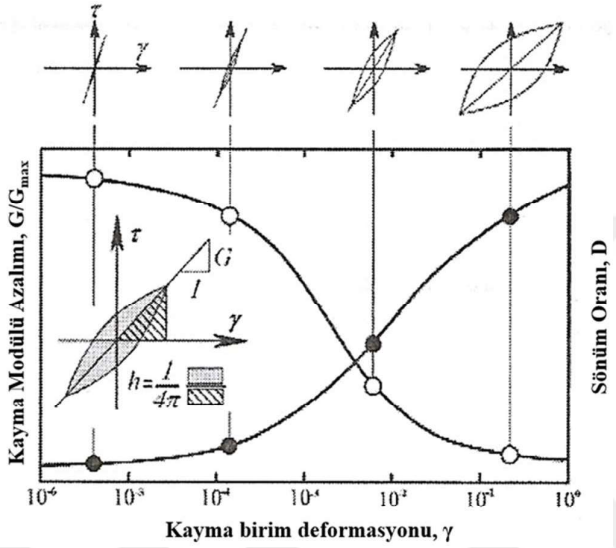
Yerel Zemin Sınıfı	ZEMİN CİNSİ	$(V_S)_{30}$ m/s	(N_{60}) (darbe/30cm)	(C_u) (kPa)
ZA	sağlam sert kayalar	>1500	-	-
ZB	az ayrışmış orta sağlam kayalar	760-1500	-	-
ZC	çok sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakası	360-760	>50	>250
ZD	orta sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakası	180-360	15-50	70-250
ZE	gevşek kum, çakıl veya yumuşak kil tabakası	<180	<15	<70
ZF	Sahaya Özel Araştırma; ● deprem esnasında ayrışabilen zeminler ● organik içeriği yüksek killer ● yüksek plastiteli killer ● çok kalın yumuşak veya orta katı killer			

Sismik dalganın zemin katmanları boyunca yayılmasından kaynaklanan kayma şekil değiştirmesine karşılık gelen kayma modülü ve histeretik sönüm katsayısı, ve bunların deformasyona bağlı değişimi sahaya özel tepki ve dinamik zemin-yapı etkileşimi analizlerinde kullanılacak ve böylece zemin ortamında ilerleyecek olan deprem dalgalarının genlik, frekans vb. karakteristiklerini değiştirecektir. Denklem (2.47)'de elastik teoriden faydalanılarak analizler için maksimum kayma modülünün hesabı verilmiştir (TBDY-2018).

$$G_{maks} = \rho V_S^2 \tag{2.47}$$

Burada, G_{maks} maksimum kayma modülü, ρ zeminin birim hacim kütlesi, V_s kayma dalgası hızıdır.

Bunun dışında modül azalımı ve sönüm oranı değişimleri için laboratuvarda tekrarlı basit kesme ve rezonant kolon deneyleri yapılmalıdır (Şekil 2.8). Bu deneylerin yapılamaması durumunda, literatürde verilen ampirik bağıntılar kullanılarak dinamik zemin özelliklerinin (kayma modülü ve sönüm oranı) kayma deformasyonuna bağlı değişimi tahmin edilebilir.



Şekil 2.8: Zemin dinamik özelliklerinin kayma deformasyonuna göre değişimi (Sarğın,2019).

ZF sınıfı zeminlerin; ZA, ZB, ZC, ZD, ZE zemin sınıflarının analizlerinden farklı olarak sahada incelenmesi gerekmektedir. ZF dışındaki zeminlerin analizi yapılırken 30 metre parametreleri kabul edilecek şekilde tanımlanır. Tablo 2.5'te ZF sınıfına ait tanımlamalar yapılmıştır.

2.8. TASARIM SPEKTRUMLARIN OLUŞTURULMASI

Deprem hareket spektrumları, belirlenen deprem yer hareketi düzeyine göre sönüm oranının %5 olduğu durumlar için harita spektral ivme katsayıları ve yerel yer etkisi katsayılarına göre tanımlanır. Denklem (2.48) ile Tasarım spektral ivme katsayıları S_{DS} (Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı) ve Denklem (4.29) ile de S_{D1} (1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı) sırasıyla hesaplanmaktadır.

$$S_{DS} = S_S F_S \tag{2.48}$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 \tag{2.49}$$

Burada S_S kısa periyot harita spektral ivme katsayısı, S_1 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı ve 1.0 s periyodu için harita spektral ivme katsayılarıdır. F_S ve F_1, kısa ve 1.0 s periyodu için yerel zemin etki katsayılarıdır. Tablo 2.6'te ve Tablo 2.7'te yerel zemin etki katsayılarının harita spektral ivme katsayıları ve yerel zemin sınıfına göre aldığı değerler gösterilmiştir. Tablolarda harita spektral ivme katsayılarının ara değerleri için doğrusal enterpolasyon yapılabilir.

Tablo 2.6: Kısa periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY-2018).

Yerel Zemin Sınıfı	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.50$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1.0$	$S_S = 1.25$	$S_S \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	SAHAYA ÖZEL ANALİZ					

Tablo 2.7: 1 saniye periyot için yerel zemin etki katsayıları (TBDY-2018).

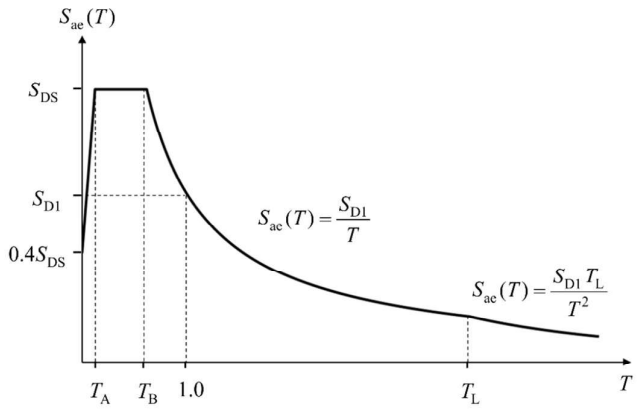
Yerel Zemin Sınıfı	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 = 0.5$	$S_1 \geq 0.6$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	SAHAYA ÖZEL ANALİZ					

Yerel zemin koşulları ile bölgenin depremsellik unsurları bir araya getirilerek tasarım spektrumu oluşturulabilir. Tasarım spektrumu için yerel zemin etkileri son derece önemli bir parametredir. Oluşturulan spektrumlar ile hedef yerdeğiştirmeler saptanabilir. Hedef yer değiştirme yapılarda tahmin edilen ve öngörülen performans ve hasar düzeyleri için çok kritik bir bilgidir (Peker ve Işık, 2021).

Bu tez kapsamında deprem ölçeklendirilmesi yapılırken düşey elastik tasarım spektrumu kullanılmayacak. Düşey elastik tasarım spektrumuna ait bilgiler de aşağıda detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Denklem (2.50)'de tanımlanan herhangi yer hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım ivme spektrumun ordinatları tanımlanmıştır. Şekil 2.9'de gösterildiği üzere yatay elastik tasarım spektral ivmeleri S_{ae} (T), doğal titreşim periyoduna bağlı olarak yerçekimi ivmesi [g] cinsinden verilmiştir.

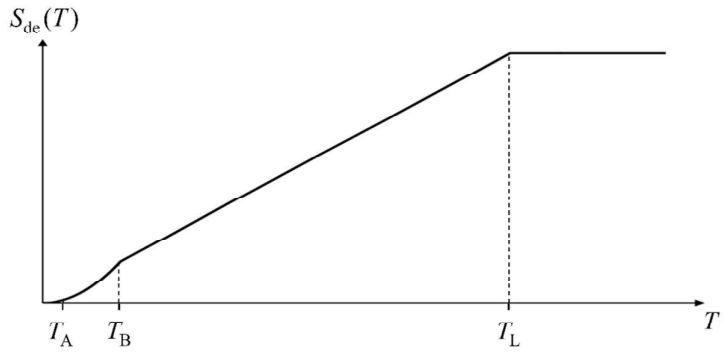
$$\begin{aligned} S_{ae}(T) &= \left(0.4 + 0.6\frac{T}{T_A}\right) S_{DS} && (0 \le T \le T_A) \\ S_{ae}(T) &= S_{DS} && (T_A \le T \le T_B) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{DS}}{T} && (T_B \le T \le T_L) \\ S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}T_L}{T^2} && (T_L \le T) \end{aligned} \tag{2.50}$$



Şekil 2.9: Yatay tasarım spektrumun idealize edilmiş grafigi (TBDY-2018).

Şekil 2.9'de gösterilen S_{D1} ve S_{DS} Denklem (2.48) ve Denklem (2.49) tanımlanan spektral ivme katsayılarını, T ise doğal titreşim periyodunu göstermektedir. T_A ve T_B yatay tasarım spektrumu köşe periyotlarıdır. S_{D1} ve S_{DS}'e baglı olarak Denklem (2.51)'da verilmiştir. Sabit yerdeğiştirme bölgesi geçiş periyodu T_L=6 sn olarak alınır.

$$T_A = 0.2\,\frac{S_{D1}}{S_{DS}} \;\; ; \;\; T_B = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \tag{2.51}$$



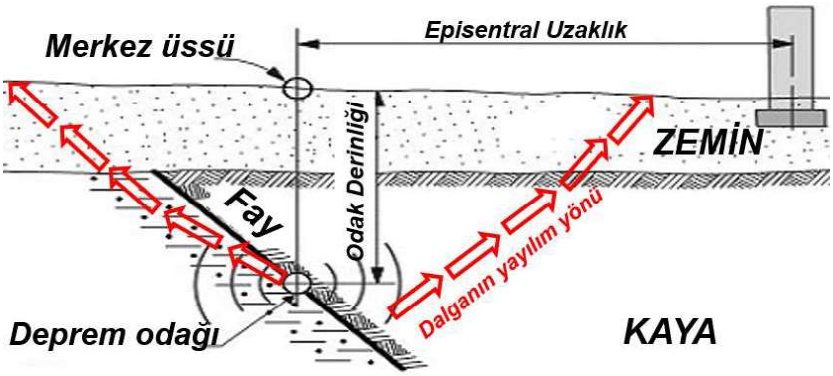
Şekil 2.10: Yatay elastik tasarım ivme-yerdeğiştirme grafiği (TBDY-2018).

Herhangi bir deprem yer hareketi düzeyi için yatay elastik tasarım yer değiştirme ve doğal titreşim periyodu grafiği Şekil 2.10'de verilmiştir. Denklem (2.52)'de gösterildiği gibi grafiğin ordinatı olan yatay elastik tasarım spektral yerdeğiştirmeleri metre cinsinden olup doğal titreşim periyoduna ve yatay elastik tasarım spektral ivmesine bağlıdır.

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_{ae}(T) \tag{2.52}$$

2.9. YEREL ZEMİN KOŞULLARI VE ZEMİN TEPKİSİ

Dünya genelinde her gün şiddeti ya da etkilediği alan bakımından büyük ve lokal olan 50 civarında yıkıcı deprem meydana gelmektedir. Bu depremlerin hepsinde yer kabuğunda oluşan kırılma ve yırtılmalar sonucunda açığa çıkan enerji sismik gerilme dalgaları oluşturur ve bu dalgalar kaynaktan yüzeye kadar ilerlemektedir (Şekil 2.11). Sismik dalgalar yüzeye doğru ilerlerken veya yüzeye vardıkları zaman, içerisinden geçtikleri zemin ortamının özelliklerine (rijitlik ve sönümleme davranışı) ile yerel zemin koşullarına (yeraltı suyu durumu, anakayaya yakınlık, tabaka kalınlığı vb.) bağlı olarak kırılmakta, yansımakta ya da tabaka içine enerjisi soğrularak yok olmaktadır. Geoteknik deprem mühendisliğinin ilgi alanlarından birisi de bu dalga yayınımının yeryüzünde bulunan yapılara nasıl etki edeceğini tahmin etmektir.

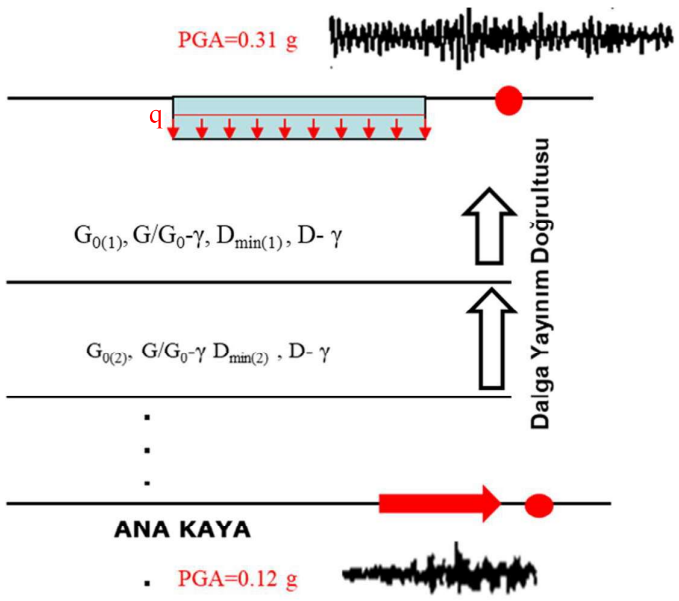


Şekil 2.11: Deprem dalgalarının zemin içerisinde ilerlemesi.

Yaşanan son yıkıcı depremler üzerinde yapılan araştırmalar, sonuç olarak depremlerin yer yüzündeki etkisini iki ana başlık altında toplamıştır. Bunlardan birincisi zemin büyütmesi (amplifikasyon) ya da küçültmesi (de-amplifikasyon); ikincisi ise sıvılaşmadır. Her iki mekanizma, genellikle yumuşak ya da gevşek yerleşimli alüvyonel zeminlerde görülmektedir. Bu çalışma kapsamında geoteknik açıdan incelenen sahaya ait zemin profili zemin büyütmesi potansiyeli olan bir sahaya aittir. Tezin ilerleyen bölümlerinde daha detaylı olarak anlatılacaktır.

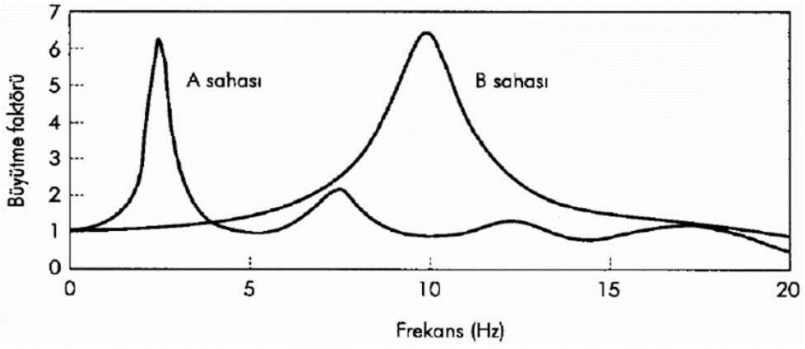
Kuvvetli yer hareketi sonucu meydana gelen kayma dalgalarının kaynaktan yüzeye ilerlerken içinden geçtiği farklı zemin ortamları kayma dalgalarının enerjisini büyüten ya da azaltan bir filtre görevi görür. Bu şekilde deprem dalgalarının farklı zemin katmanlarından geçerken oluşturduğu genlik farkına zemin büyütmesi denir. Zemin büyütmesine (Şekil 2.12) tabaka kalınlığı, tabakaların kayma modülü, sönüm oranı, deformasyon değişimi gibi dinamik özellikler etkilidir. Ayrıca bunun yanında zeminin yatay düzensizliği ve topografik koşullarda zemin büyütmesini etkiyen diğer unsurlardır (İyisan ve Haşal, 2011).

Yerel zemin koşullarına bağlı olarak zemin büyütmesi farklı değerlerde ortaya çıkar. Sismik dalgalar, zemin katmanları ile anakaya arasındaki empedans farkından ötürü yumuşak zeminde sıkışmaya neden olabilir bu da zemin büyütmenin ana nedenlerinden biridir. Alüvyon tabakalar deprem dalgasının genliğini arttırmasından ötürü zemin büyütmede önemli ölçüde etkili olabilir. Aynı şekilde yüzeye yakın zemin tabakaları düşük dirençli ve yüksek oranda sıkıştırılabildiği için zemin büyütmesini tetikleyebilir (Livaoğlu ve diğ. 2019).



Şekil 2.12: Deprem kaydının anakayadan yüzeye doğru yayılımı sırasında genlik ve ivmesinin artması (Zemin büyütmesi).

Yapılarda hasar kayıtlarının değerlendirilmesi genellikle rezonans frekansı ve zemin büyütmesi ile ilişkilendirilir (Cara ve diğ., 2008). Ana kayadaki ivme değerinin zemin tabakasının ivme değerine oranı zemin büyütmesini verir. Zaman ya da frekans tanım aralığında zemin büyütmesi oranları bulunabilir (Şekil 2.13). Dinamik analizler neticesinde yüzeydeki maksimum ivmenin anakayadaki maksimum ivmeye bölünmesiyle zaman tanım alanının ortamdaki zemin büyütmesi hesaplanır. Spektral ivmelerin aynı periyot değerlerinde oranlaması da diğer hesap yöntemidir. Eşdeğer doğrusal modeller en çok kullanılan zemin büyütme modellerinden biridir. Bu bağlamda zemin katmanlarının kayma dalgası hızı, kayma modülü deformasyon ilişkisi ve sönüm oranı deformasyon ilişkisinin tanımlanması ve analizlere dahil edilmesi gerekmektedir (Feyizoğlu, 2020).



Şekil 2.13: A ve B zeminin zemin büyütme fonksiyonları (Kramer, 1996).

Zeminin doğrusal elastik ve anakayanın da rijit davrandığı varsayılırsa zeminin büyütme fonsiyonu Şekil 2.13'deki gibi olur. Görüldüğü üzere A profili daha yumuşak bir zemine sahipken, B profili daha rijit ve anakayadan gelen dalgaları düşük frekanslı ileterek daha az zemin büyütmesi yapması beklenilir.

Sayısal yöntemler ile zemin büyütmesinin belirlenmesinde literatürde sıklıkla kullanılan iki saha parametresi bulunmaktadır: (1) ilk otuz metre derinliğie ait ortalama kayma dalgası hızı ($V_{S,30}$); (2) zemin hakim frekansı (f_0)'dır.

Dünya genelinde birçok deprem şartnamesinde ya da kuvvetli yer hareketi tahmin denklemlerinde yerel zemin etkisi hesaplara katılırken sadece ortalama kayma dalgası hızı ($V_{S,30}$) dikkate alınır. Ortalama kayma dalgası hızı Denklem (2.53)'te olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$V_{S,30} = \frac{30}{\Sigma\left(\frac{h_i}{V_{si}}\right)} \tag{2.53}$$

Burada, h_i ve $V_{S,i}$ sırasıyla i'inci tabakanın kalınlığı ve kayma dalgası hızını göstermektedir. Birçok araştırmacı $V_{S,30}$ değerinin zemin büyütmesi üzerine etkisini sayısal analiz çalışmaları yaparak göstermiştir. Güncel literatüre bakıldığında Steidl (2000) $V_{S,30}$ ve zemin büyütmesine etki eden faktörler arasındaki ilişkiyi incelemiş; düşük genlikli anakaya kayıtlarının (PGA<0.1g) düşük kayma dalgası profiline sahip zeminlerden geçtiği zaman büyütme faktörlerinin uzun periyotlarda arttığını göstermiştir. Ayrıca ana kaya derinliğinin düşük kayma dalgası hızı profiline sahip zeminlerde önemine vurgu yapmış; ana kaya derinliğinin artması ile daha yüksek büyütme oranlarının hesaplandığını söylemiştir.

Spektral ivme değerleri ile ortalama kayma dalgası hızı, $V_{S,30}$ arasındaki ilişkiyi ortaya koymak adına Stewart ve diğ. (2003) tarafından ortalama kayma dalgası hızına göre gruplanan saha verilerinden faydalanılarak bir çalışma yapılmıştır. Yüksek periyotlarda spektral ivmenin ne ortalama kayma dalgası hızından ne de yüzey jeolojisin zemin büyütmesini tahmin etmede etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Buna benzer olarak, Park ve Hashash (2004) tarafından yapılan araştırmada ise zemin büyütmesinin ancak sedimental zemin tabakası kalınlığı ile birlikte $V_{S,30}$ ile ilişkilendirilebileceğini ortaya koymuştur.

Mucciarelli ve Gallipoli (2006) zemin büyütmesinin $V_{S,30}$ bağlı olup olmadığını inceledikleri çalışmalarında; ortalama kayma dalgası hızının ($V_{S,30}$), kayma dalgası hız profilinin derinlikle doğrusal olarak artmadığı ve çok büyük empedans farklarının olduğu zemin profillerinde zemin büyütmesini tahmin etmede yeterli bir gösterge olmadığı sonucuna varmışlardır. Bunun yerine jeofizik arazi deneyleri ile saha özel sismik zemin profilinin belirlenmesinin daha doğru olduğunu vurgulamışlardır. Aynı zamanda, $V_{S,30}$ değeri ile yapılan zemin büyütmesi analizleri ile ilk on metreye ait ortalama kayma dalgası hızı $V_{S,10}$ ile yapılan analizler ile aynı sonuçları verdiğini ortaya koymuştur.

Castellaro ve diğ. (2008) $V_{S,30}$ değerinin tek başına zemin büyütmesi olayını açıklamada ve tahmin etmede güvenilir ve yeterli bir parametre olmayacağı sonucuna varmışlardır. Benzer sonuçları Lee ve Trifunac (2010) ile Bonilla ve diğ. (2011) de elde etmişlerdir.

Krammer (1996) ana kaya üzerinde bulunan üniform, sönümlemesi olmayan bir zemin tabakasında maksimum zemin büyütmesinin en düşük doğal titreşim frekansında olacağını belirten teoriye bağlı kalmış ve bu frekansa zemin hakim frekansı, f_0 olarak tanımlamıştır. Literatürde zemin hakim frekansını tahmin etmede farklı metodlar olmakla beraber temelde referans saha yöntemleri ve alternatif yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır (Parolai, 2012).

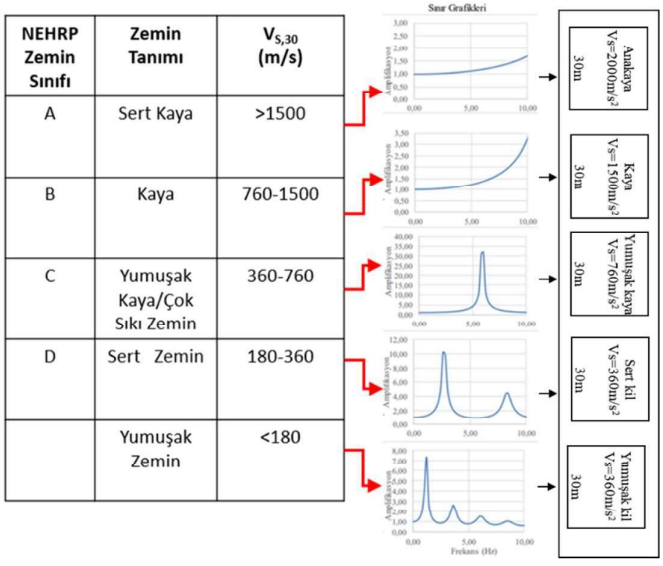
Referans alan tekniği ilk olarak Borcherdt (1970) tarafından önerilmiş ve deprem durumunda zemin büyütmesi, kayalık bir zemine sahip saha referans seçilerek aynı deprem altında ilgilenilen sahadaki Fourrier genlik spektrumları her iki sahada oranlanarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşımda;deprem episentral uzaklığı, zemin içinde dalgaların hareket doğrultuları ve deprem ivmeölçeleri aynı olarak kabul edilmiştir. Böylece zemin ve kaya ölçülen kayıtlar arası oranın yani büyütmenin zemin etkisinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür.

Referans saha metoduna alternatif olarak, Nogoshi ve Igarashi (1971) deprem kayıtlarının düşey ve yatay bileşenlerinin spektral olarak oranlanmasını önermişlerdir. Bu yöntem daha sonra Nakamura (1989) tarafından gerçek mikrotremor ölçümleri ile geliştirilmiş ve günümüzde de sıklıkla kullanılan H/V yöntemi olarak güncellenmiştir. Bu yöntemde, yatay tepki spektrumu ile düşey tepki spektrumu oranının en yüksek genlikte alındığı frekans zemin hakim frekansı olarak tanımlanır.

Yüzeyden başlayarak ilk 30 m'ye ait ortalama kayma dalgası hızı $V_{S,30}$ ile zemin hakim frekansına,f_0 alternatif olarak; geoteknik deprem mühendisliği alanında araştırmalarını sürdüren

araştırmacılar tamamlayıcı parametreler önermişlerdir. Örneğin Kokusho ve Sato (2008) mühendislik taban kayasının kayma dalgası hızının; kayaya kadar olan zemin tabakalarının ortalama kayma dalgası hızına oranı olarak tanımladıkları $\overline{V_S}$ teriminin büyütme katsayısı ile uyumlu sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Regnier ve diğ. (2014) $V_{S,30}$'u tamamlayıcı bir parametre olarak kayma dalgası hızı-derinlik profili değişimi eğrisinin eğimini veren B_{30} tanımlamışlardır. Araştırmacılar bu parametrenin zemin tepkisini değerlendirmede sahaya özel maksimum yer ivmesi (PGA) mertebesini doğru tahmin ettiklerini vurgulamışlardır. Son olarak, Derras ve diğ. (2017) $V_{S,30}$, topografik eğim, f_0 ve H_{800} (kayma dalgası hızı, V_S > 800 m/s olduğu derinlik) gibi parametrelerin büyütme faktörü ile ilişkilendirdikleri çalışmada; $V_{S,30}$ ile büyütme faktörü arasında kısa ve orta periyot seviyelerinde (T<0.6 s); uzun periyotlarda ise f_0 ile H_{800} arasında büyütme faktörü arasında iyi bir korelasyon olduğunu göstermişlerdir.

Ortalama kayma dalgası hızı, $V_{S,30}$'a göre saha ve arazi sınıflandırması ilk olarak Borcherdt ve Glassmoyer (1992) tarafından farklı zemin profillerine ait çok sayıda yüzey kaydını inceleyerek önerilmiştir. Benzer büyütme faktörünün hesaplandığı zemin tabakaları ortalama kayma dalgası hızına göre sınıflandırılmış; sonuç olarak "zemin", "yumuşak (taze) kaya","sert kaya" olarak 3 gruba ayrılmıştır. Borcherdt (1994) benzer sınıflandırmayı büyütme faktörlerine göre tekrarlamıştır. Bundan sonra yerel zemin etkileri sismik tasarım yönetmeliklerine $V_{S,30}$ sınıflarına göre dahil edilmiştir. NEHRP yönetmeliğine ait zemin sınıfları ve büyütme faktörü eğrileri Şekil 2.14'de sunulmuştur.



Şekil 2.14: NEHRP Zemin sınıflandırılmasında zemin büyütme fonksiyonları ve bu fonksiyonların profil kesitleri.

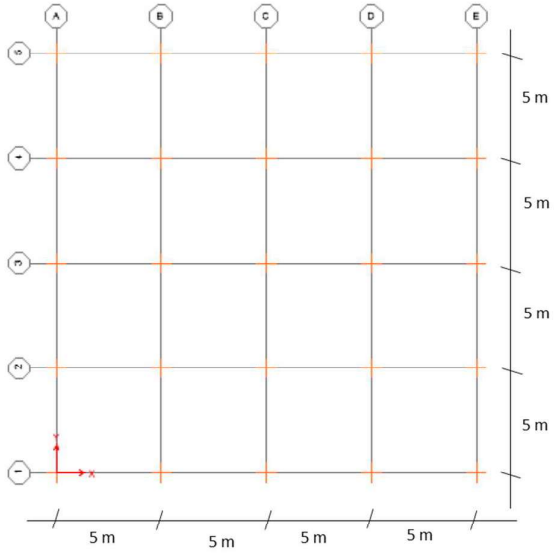
3. YÖNTEM

Bu bölümde, öncelikle sismik yalıtımlı binanın üstyapı tasarımı ile izolasyon sistemi ön tasarımına yer verilmiştir. Ardından, deprem kayıtlarının ölçeklenmesi ve zemin tepki analizlerinin gerçekleştirilmesi ile ilgili hususlar açıklanmıştır

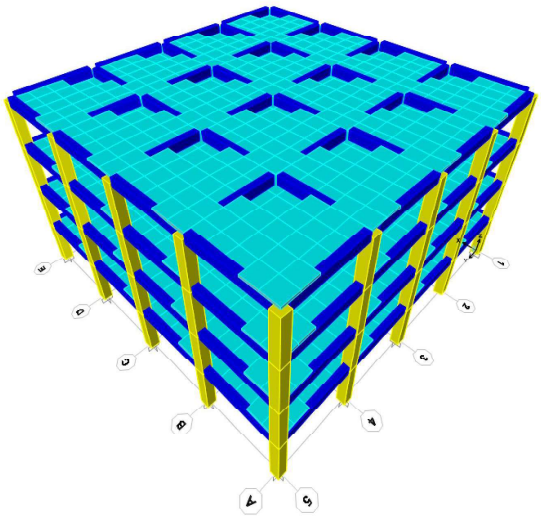
3.1. SİSMİK YALITIMLI BİNA ÜSTYAPI TASARIMI

Bu tez kapsamında, 40.11291° enlem ve 26.42205° boylam koordinatlarında Çanakkale ilinde yer alan ve kullanım amacı konut olan dört katlı moment aktaran betonarme çerçeveden oluşan bir üstyapı tasarlanmıştır. Kat yükseklikleri eşit ve 3 m'dir. Bina Şekil 3.1'de kolon aplikasyon planında gösterildiği üzere her iki doğrultuda dört açıklıklı olup her açıklık 5m'dir. Sismik izolasyonlu yapının 3 boyutlu görünüşü Şekil 3.2'de verilmiştir. Modelde tüm kolonlar 55 cm x 55 cm, tüm kirişler 35 cm x 55 cm boyutlarında olup, döşeme yüksekliği 12 cm'dir. Yapı simetriktir, düşeyde ya da yatayda herhangi bir düzensizlik bulunmamaktadır. Her bir katın rijitlik merkezi karşılık gelen katın ağırlık merkezi ile çakışmaktadır. Beton sınıfı C30/37 ve beton elastite modülü 32000 MPa'dır. Donatı çeliği sınıfı S420 (B420C) ve kullanılan çeliğin elastite modülü 200000 MPa'dır. Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken TBDY-2018 kapsamındaki modellemeye ait hususlar göz önüne alınmıştır.

Yapının sahip olduğu zati yükün dışında, bölme duvar yükü 5 kN/m, kaplama yükü 3 kN/m^2 ve hareketli yük 2 kN/m^2 olarak seçildi. Bunların dışında kalan kar ve rüzgar gibi diğer çevresel etkilerden meydana gelen yükler ihmal edilmiştir. Bahsi geçen bina modeli için TBDY-2018 Bölüm 3 kapsamında yer alan tablolar aracılığıyla bina önem katsayısı (I) ve deprem tasarım sınıfı (DTS) 1, bina kullanım sınıfı (BKS) 3 ve bina yükseklik sınıfı (BYS) 6 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1: İzolasyon katının kolon aplikasyon planı.



Şekil 3.2: Taban ankastre binanın SAP 2000 programında izometrik görünüşü.

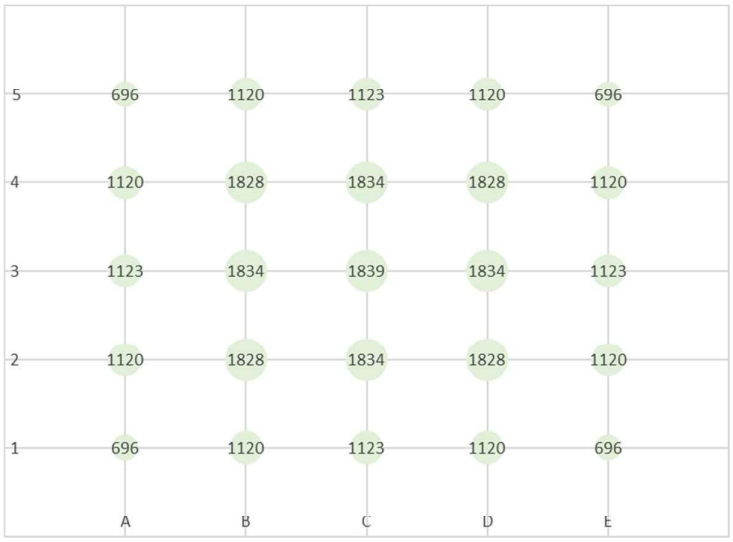
Oluşturulan ankastre tabanlı sonlu elamanlar modelinin modal analizi yapılmış (Tablo 3.1) ve binanın X ve Y doğrultusundaki hakim titreşim periyodu T_p = 0.39 s olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1: Modal analiz sonuçları, periyot ve kütle katılım oranları.

Analiz	Mod	Periyot(s)	UX	UY	UZ	TopUX	TopUY	TopUZ
MODAL	1	0.3979	0.8364	0.0000	0.0000	0.8364	0.0000	0.0000
MODAL	2	0.3979	0.0000	0.8365	0.0000	0.8364	0.8365	0.0000
MODAL	3	0.3434	0.0000	0.0000	0.0000	0.8364	0.8365	0.0000
MODAL	4	0.1230	0.1159	0.0000	0.0000	0.9523	0.8365	0.0000
MODAL	5	0.1229	0.0000	0.1159	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	6	0.1157	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	7	0.1157	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	8	0.1154	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	9	0.1154	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	10	0.1151	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	11	0.1151	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000
MODAL	12	0.1148	0.0000	0.0000	0.0000	0.9523	0.9524	0.0000

3.2. İZOLASYON SİSTEMİ ÖN TASARIMI

Sismik yalıtımlı binaların izolasyon katında her kolona gelen yük eş olmadığı için tasarlanacak izolatörlerin boyutları da farklılık gösterebilir. Farklı eksenel yük kapasiteleri için izolatör boyutlarında optimum tercihlerde bulunulabilir. Bu çalışma kapsamında oluşturulan sonlu elemanlar bina modelinde izolasyon katındaki kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlere etkiyen eksenel yükler Şekil 3.3'te sunulmuştur. Buna göre, eksenel yük düzeyi 1500 kN üzerinde olan izolatörler için A türü, 1000 kN ile 1500 kN arasındaki izolatörler için B türü ve 1000 kN'dan az olan izolatörler için C türü olmak üzere toplam üç tip izolatör seçilmiştir.



Şekil 3.3: İzolasyon katında kurşun çekirdekli kauçuk izolatörlere etkiyen eksenel yük değerleri.

İzolatör türleri ve sayıları belirlenmesinin ardından, kurşun çekirdekli kauçuk izolatör tasarım parametrelerini belirlemek için bir üretici bir firma olan DIS'in veritabanından (Tablo 3.2) her bir izolatör türü için gerekli veriler elde edilmiştir. Eksenel yük düzeyleri ve sismik izolasyonlu binanın en büyük yerdeğiştirme seviyesi için iteratif olarak belirlenen taban deplasmanı değerine bağlı olarak A tipi izolatör için izolatör çapı 700 mm, B tipi izolatör için izolatör çapı 650 mm ve C tipi izolatör için izolatör çapı 570 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 3.2: İzolatör için gerekli tasarım parametreleri (DIS).

Tasarım Parametreleri

İzolatör çapı [D_I (mm)]	Akma dayanımı [K_d (kN/mm^2)]	Karekteristik dayanım [Q_d(kN)]	Basınc rijitliği [K_v (kN/mm^2)]	Maksimum yerdeğiştirme [D_{max}(mm)]	Eksenel yük kapasitesi [P_{max} (kN)]
305	0.2-0.4	0-65	50	150	450
355	0.2-0.4	0-65	100	150	700
405	0.3-0.5	0-110	100	200	900
455	0.3-0.7	0-110	100	250	1,150
520	0.4-0.7	0-180	200	300	1,350
570	0.5-0.9	0-180	500	360	1,800
650	0.5-1.1	0-220	700	410	2,700
700	0.5-1.4	0-220	800	460	3,100
750	0.7-1.6	0-265	900	460	3,600
800	0.7-1.6	0-265	1,000	510	4,000
850	0.7-1.8	0-355	1,200	560	4,900
900	0.7-1.9	0-355	1,400	560	5,800
950	0.7-2.0	0-490	1,800	610	6,700
1000	0.8-2.0	0-490	1,900	660	7,600
1050	0.9-2.1	0-580	2,100	710	8,500
1160	1.1-2.1	0-665	2,800	760	13,800
1260	1.2-2.3	0-755	3,700	810	20,500
1360	1.4-2.5	0-890	5,100	860	27,600
1450	1.6-2.5	0-1,025	5,300	910	33,400
1550	1.8-2.5	0-1,025	6,500	910	40,000

Yapının toplam ağırlığı izolatör katı dahil 20679 kN'dur. Karakteristik dayanım oranı $F_Q\backslash W$=0.1 olarak belirlenmiştir. A, B ve C tipi izolatör adetleri sırasıyla n_a=9, n_b=12, n_c=4'tür. A, B ve C tipi izolatör çapları sırasıyla B_A=700 mm, B_B=650 mm, B_C=570 mm'dir. Kauçuk sertlik değeri k=0.6, kauçuk hacim modülü K=2009 MPa ve Karşun malzemenin akma kayma gerilmesi τ_{pb}=10 MPa ve kauçuk kayma modülü G_v=0.4 MPa olarak seçilmiştir. Kauçuk katman kalınlığı t = 9 mm olmak üzere toplam kauçuk kalınlığı da T_r =300 mm olarak belirlenmiştir.

3.2.1. DD-1 Yer Hareketi Düzeyi için Yalıtım Birimi Ön Tasarımı

Yalıtım sistemi tasarlanırken kullanılan en büyük taban deplasmanı hesabında deprem düzeyi DD-1 için izolasyon sistemine ait mekanik parametrelerin alt sınır değerleri dikkate alınmaktadır. Buna göre, bu tez kapsamında ele alınan sismik izolasyonlu binanın DD-1 hedef deprem düzeyi için alt sınır değerleri λ_{altF_Q}= 0.595 ve λ_{altK_2}=0.765 olarak hesaplanmıştır.

1.Kurşun çekirdek çapının ve alanının belirlenmesi

$$B_L = \sqrt{\frac{4W(F_Q \backslash W)}{\pi n \tau_{pb}}} = \sqrt{\frac{4*20679*0.1}{(\pi*25*10/1000)}} = 102.62\ mm$$

Kurşun çekirdek çapı 100 mm olarak seçildi.

$$A_P = \frac{\pi B_L^2}{4} = \frac{\pi*100^2}{4} = 7853.98\ mm^2$$

2. Üç tip izolatör için toplam kauçuk alanının bulunması Denklem (2.12) ile;

$A_{rA} = \frac{\pi}{4}(B_A - B_L^2)$ =376991.118 mm^2 ; $A_{rB} = \frac{\pi}{4}(B_B - B_L^2)$ =323976.74 mm^2

$A_{rC} = \frac{\pi}{4}(B_C - B_L^2)$ = 247321.882 mm^2

3.Karakteristik dayanımın bulunması Denklem (2.10) ile;

$F_{QA} = n_A A_p \tau_{pb} \lambda_{altF_Q}$=420.5807 kN ; $F_{QB} = n_B A_p \tau_{pb} \lambda_{altF_Q}$= 560.7743 kN

$F_{QC} = n_C A_p \tau_{pb} \lambda_{altF_Q}$=186.9248 kN ; $F_{Qsistem}$= 1168.28 kN

4.Yalıtım sistemi etkin kesit rijitliğinin Denklem (2.11) ile belirlenmesi ve sınır değerleri ile çarpımı;

$k_{2A} = nG_v\left(\frac{A_r}{T_r}\right)\lambda_{altK_2}$= 3.4607 kN/mm^2 ; $K_{2B} = nG_v\left(\frac{A_r}{T_r}\right)\lambda_{altK_2}$= 3.9654 kN/mm^2

$K_{2C} = nG_v\left(\frac{A_r}{T_r}\right)\lambda_{altK_2}$= 1.0090 kN/mm^2 ; $K_{2sistem}$ = 8.4353 kN/mm^2

5. Etkin rijitliğin hesaplanması Denklem (2.8) ile;

$$K_M = K_{2sistem} + \frac{F_{Qsistem}}{D'_M} = 11.9854\ kN/mm^2$$

6. Etkin periyodun hesaplanması Denklem (2.43) ile;

$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{W}{K_M g}} = 2.93\ sn$

7. Etkin sönüm yüzdesini Denklem (2.9) ve Sönüm ölçeklendirme katsayısının hesaplanması Denklem (2.45) ile;

$D_y = \frac{F_{Qsistem}}{9K_{2s}} = 15.388\ mm$

$\beta_e = \left(\frac{4}{2\pi}\frac{F_{Qsistem}\,(D'_M - D_y)}{K_M {D'_M}^2}\right) = 17.9$

$\xi = \beta_e$;

$\eta_M = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} = 0.66$

burada D_y akma yer değiştirmesidir. D'_M, Bölüm 2.4'te açıklanan yer değiştirmedir.

8. Maksimum yerdeğiştirmenin hesaplanması Denklem (2.41) ile;

$S_{ae}^{(DD-1)} T_M = \frac{S_{D1}}{T_M} = 0.22\ m/sn^2$

$D_M = 1.3\left(\frac{g}{4\pi^2}\right) T_M^2 \eta_M S_{ae}^{(DD-1)} T_M = 329.08\ mm$

9.Yalıtım birimi düşey rijitliğinin hesaplanması

Üç tip izolatör için Denklem (2.15) ile Şekil katsayılarinin hesaplanması;

$S_A = (B_A^2 - B_L^2)/4B_A t = 19.04$

$S_B = (B_B^2 - B_L^2)/4B_B t = 17.62$

$S_C = (B_C^2 - B_L^2)/4B_C t = 15.34$

Kauçuk malzemenin esneklik modülü Denklem (2.19) ile;

$E_0 = 4G_v = 1.6$

Yalıtım birimi basınç modülü Denklem (2.18) ile;

$E_{cA} = E_0(1 + 2kS_A^2) = 698.19$

$E_{cB} = E_0(1 + 2kS_B^2) = 598.24$

$E_{cC} = E_0(1 + 2kS_C^2) = 453.75$

Yalıtım birimi düşey rijitlik modülü Denklem (2.17) ile;

$E_{VA} = \frac{1}{\frac{1}{E_{CA}} + \frac{1}{K}} = 522.03\ MPa$

$E_{VB} = \frac{1}{\frac{1}{E_{CB}} + \frac{1}{K}} = 464.06\ MPa$

$E_{VC} = \frac{1}{\frac{1}{E_{CC}} + \frac{1}{K}} = 372.14\ MPa$

Yalıtım birimi düşey rijitliğinin hesaplanması Denklem (2.16) ile;

$K_{VA} = \frac{E_{VA}A_{rA}}{T_r} = 656007.82$

$K_{VB} = \frac{E_{VB}A_{rB}}{T_r} = 501152.99$

$K_{VC} = \frac{E_{VC}A_{rC}}{T_r} = 306797.49$

10. Yalıtım birimi birim şekil değiştirme sınırlarının kontrol edilmesi;

Denklem (2.20) ile basınçtan meydana gelen birim şekil değiştirmeler,

$\gamma_{c,st(A)} = \frac{6S_AP_{KA}}{A_{rA}E_{cA}} = 0.00080326$

$\gamma_{c,st(B)} = \frac{6S_BP_{KB}}{A_{rB}E_{cB}} = 0.00062757$

$\gamma_{c,st(C)} = \frac{6S_CP_{KC}}{A_{rC}E_{cC}} = 0.00057432$

Denklem (2.21) ile diğer etkilerden meydana gelen şekil değiştirme,

$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta_S}{T_r} = 0.00166667$

Denklem (2.22) ile göreli dönmeden meydana gelen şekil değiştirme,

$\gamma_{r,st(A)} = \frac{B_A^2\,\theta_s}{2tT_r}$ =0.4537037

$\gamma_{r,st(B)} = \frac{B_B^2\,\theta_s}{2tT_r}$ =0.3912037

$\gamma_{r,st(C)} = \frac{B_C^2\,\theta_s}{2tT_r}$ =0.30083333

Denklem (2.23) ile deprem etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen şekil değiştirme,

$\delta_A = \delta_B = \delta_C = 2\cos^{-1}\left(\max\left(\frac{D_M}{B_{(A,B,C)}}\right)\right)$ =2.1627413

$A_{reA} = A_{rA}\frac{(\delta_A - sin\delta_A)}{\pi}$ =159946.116

$A_{reB} = A_{rB}\frac{(\delta_B - sin\delta_B)}{\pi}$ =137453.694

$A_{reC} = A_{rC}\frac{(\delta_C - sin\delta_C)}{\pi}$ =104931.317

$\gamma_{c,E(A)} = \frac{6S_A P_{K2A}}{A_{reA}E_{cA}}$ =0.00246592

$\gamma_{c,E(B)} = \frac{6S_B P_{K2B}}{A_{reB}E_{cB}}$ =0.00236902

$\gamma_{c,E(C)} = \frac{6S_C P_{K2C}}{A_{reC}E_{cC}}$ =0.00263648

Denklem (2.24) ile yatay yer değiştirmeden meydana gelen birim şekil değiştirme bulunur.

$\gamma_{s,E} = \frac{T_r}{D_M} = 1.11$

11. Yalıtım birimi düşey kararlılığının incelenmesi;

Denklem (2.25) ile yatay yer değiştirmenin olmadığı durumda kritik burkulma yükü,

$P_{cr(A)} = 0.218\frac{G_v B_A^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_A)(1-B_L^2/B_A^2)}{(1+B_L^2/B_A^2)}$ =6380714.67

$P_{cr(B)} = 0.218\frac{G_v B_B^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_B)(1-B_L^2/B_B^2)}{(1+B_L^2/B_B^2)}$ =4652574.34

$P_{cr(C)} = 0.218\frac{G_v B_C^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_C)(1-B_L^2/B_C^2)}{(1+B_L^2/B_C^2)}$ =2643216.03

Denklem (2.26) yatay yer değiştirmenin olduğu durumda kritik burkulma yükü bulunur.

$$P'_{cr(A)} = P_{cr(A)}\left(\frac{A_{reA}}{A_{rA}}\right) = 2707147.41$$

$$P'_{cr(B)} = P_{cr(B)}\left(\frac{A_{reB}}{A_{rB}}\right) = 1973948.88$$

$$P'_{cr(C)} = P_{cr(C)}\left(\frac{A_{reC}}{A_{rC}}\right) = 1121437.93$$

Birim şekil değiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi Denklem (2.27) ile hesaplanır.

$$P_{str(A)} = \frac{3.5A_{reA}E_{cA}}{6S_A} = 3420021.17$$

$$P_{str(B)} = \frac{3.5A_{reB}E_{cB}}{6S_B} = 2721106.88$$

$$P_{str(C)} = \frac{3.5A_{reC}E_{cC}}{6S_C} = 1809891.41$$

12. Yukarıdaki adımlarda A, B ve C tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler için hesaplanan birim şekildeğiştirme değerlerinin yönetmelik sınır değerlerine göre (bkz. Bölüm 2.4) kontrolü yapılarak Tablo 3.3' te özetlenmiştir.

Tablo 3.3: Elastomer yalıtım birimlerinde oluşacak birim şekildeğiştirme kontrolü (DD-1).

$\gamma_{c,st(A)}$	0.0008		
$\gamma_{c,st(B)}$	0.0006	≤ 3.5	✓
$\gamma_{c,st(C)}$	0.0005		
$\gamma_{c,st(A)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(A)}$	1.5679		
$\gamma_{c,st(B)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(B)}$	1.5052	≤ 5.0	✓
$\gamma_{c,st(C)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(C)}$	1.4148		
$\gamma_{c,E(A)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(A)}$	1.3427		
$\gamma_{c,E(B)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(B)}$	1.3113	≤ 6.0	✓
$\gamma_{c,E(C)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(C)}$	1.2664		
$\gamma_{s,E}$	1.1133	≤ 2.0	✓
$\frac{\min(P_{cr(A)},P_{str(A)})}{P_{K1A}}$	2.1782		
$\frac{\min(P_{cr(B)},P_{str(B)})}{P_{K1B}}$	2.4274	≥2.0	✓
$\frac{\min(P_{cr(C)},P_{str(C)})}{P_{K1C}}$	2.6011		
$\frac{\min(P'_{cr(A)},P_{str(A)})}{P_{K2A}}$	3.3452		
$\frac{\min(P'_{cr(B)},P_{str(B)})}{P_{K2B}}$	3.4827	≥1.1	✓
$\frac{\min(P'_{cr(C)},P_{str(C)})}{P_{K2C}}$	3.1283		

3.2.2. DD-2 Yer Hareketi Düzeyi için Yalıtım Birimi Ön Tasarımı

Üstyapı göreli kat ötelemesi hesabında deprem düzeyi DD-2 için izolasyon sistemine ait mekanik parametrelerin üst sınır değerleri dikkate alınır.

DD-2 için üst sınır değerler $\lambda_{\text{üst}\ Q}$= 1.607 ve $\lambda_{\text{üst}\ 2}$= 1.8314 olarak hesaplanmıştır.

1.Karakteristik dayanımı Denklem (2.10) bulunur ve sınır değerleri ile çarpılması

$F_{QA} = n_A\, A_p \tau_{pb} \lambda_{\text{üst}F_Q}$=1135.921 kN ; $F_{QB} = n_B A_p \tau_{pb} \lambda_{\text{üst}F_Q}$= 1514.562 kN

$F_{QC} = n_C A_p \tau_{pb} \lambda_{\text{üst}F_Q}$= 504.8539 kN ; $F_{Qsistem}$= 3155.337 kN

2. Denklem (2.8) ile etkin rijitliğin hesaplanması,

$K_D = K_{2sistem} + \frac{F_{Qsistem}}{D_D'} =$ 76.3531 kN/mm^2

3. Etkin periyodun hesaplanması Denklem (2.42) ile,

$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_D g}}$= 1.21 sn

4. Etkin sönüm yüzdesini Denklem (2.9) ve Sönüm ölçeklendirme katsayısının hesaplanması Denklem (2.44) ile;

$D_y = \frac{F_{Qsistem}}{9K_{2sistem}}$ =17.36 mm

$\xi = \beta_e$;

$\beta_e = \left(\frac{4}{2\pi} \frac{F_{Qsistem}\,(D_D' - D_y)}{K_D {D_D'}^2}\right) =$ 32.355

$\eta_D = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}}$ =0.517

TBDY 2018 Bölüm 14 kapsamında belirtildiği üzere, etkin sönüm oranı β_e %30'u aştığı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yönteminin kullanılması gerekmektedir.

5. Maksimum yerdeğiştirmenin hesaplanması Denklem (2.40) ile hesaplanır.

$S_{ae}^{(DD-2)} T_D = \frac{S_{D1}}{T_D} =$ 0.308 m/sn^2

$D_D = 1.3 \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) T_D^2 \eta_D S_{ae}^{(DD-2)} T_D =$ 56.185 mm

6. Yalıtım birimi birim şekil değiştirme sınırlarının kontrol edilmesi.

Denklem (2.20) ile basınçtan meydana gelen birim şekil değiştirmeler,

$\gamma_{c,st(A)} = \frac{6S_A P_{K1A}}{A_{rA} E_{cA}}$ =0.00080326

$\gamma_{c,st(B)} = \frac{6S_B P_{K1B}}{A_{rB} E_{cB}}$ =0.00062757

$\gamma_{c,st(C)} = \frac{6S_C P_{K1C}}{A_{rC} E_{cC}}$ =0.00057432

Diğer etkilerden meydana gelen şekil değiştirme Denklem (2.21) ile,

$\gamma_{s,st} = \frac{\Delta_S}{T_r}$ =0.00166667

Göreli dönmeden meydana gelen şekil değiştirme Denklem (2.22) ile,

$\gamma_{r,st(A)} = \frac{B_A^2 \theta_s}{2tT_r}$ =0.4537037

$\gamma_{r,st(B)} = \frac{B_B^2 \theta_s}{2tT_r}$ =0.3912037

$\gamma_{r,st(C)} = \frac{B_C^2 \theta_s}{2tT_r}$ =0.30083333

Deprem etkisi altında oluşan basınçtan meydana gelen şekil değiştirme Denklem (2.23) ile,

$\delta_A = \delta_B = \delta_C = 2\cos^{-1}\left(\max\left(\frac{D_M}{B_{(A,B,C)}}\right)\right)$ =2.98

$A_{reA} = A_{rA}\frac{(\delta_A - sin\delta_A)}{\pi}$ =338505.211

$A_{reB} = A_{rB}\frac{(\delta_B - sin\delta_B)}{\pi}$ =290902.915

$A_{reC} = A_{rC}\frac{(\delta_C - sin\delta_C)}{\pi}$ =290902.915

$\gamma_{c,E(A)} = \frac{6S_A P_{K2A}}{A_{reA} E_{cA}}$ =0.00116516

$\gamma_{c,E(B)} = \frac{6S_B P_{K2B}}{A_{reB} E_{cB}}$ =0.00111938

$\gamma_{c,E(C)} = \frac{6S_C P_{K2C}}{A_{reC} E_{cC}}$ =0.00124576

Yatay yer değiştirmeden meydana gelen birim şekil değiştirme Denklem (2.24) ile hesaplanır.

$$\gamma_{s,E} = \frac{T_r}{D_M} = 0.19$$

7. Yalıtım birimi düşey kararlılığının incelenmesi

Denklem (2.25) ile yatay yer değiştirmenin olmadığı durumda kritik burkulma yükü bulunur.

$$P_{cr(A)} = 0.218\frac{G_v B_A^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_A)(1-B_L^2/B_A^2)}{(1+B_L^2/B_A^2)} = 6380714.67$$

$$P_{cr(B)} = 0.218\frac{G_v B_B^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_B)(1-B_L^2/B_B^2)}{(1+B_L^2/B_B^2)} = 4652574.34$$

$$P_{cr(C)} = 0.218\frac{G_v B_C^4}{tT_r}\frac{(1-B_L/B_C)(1-B_L^2/B_C^2)}{(1+B_L^2/B_C^2)} = 2643216.03$$

Denklem (2.25) yatay yer değiştirmenin olduğu durumda kritik burkulma yükü hesaplanır.

$$P'_{cr(A)} = P_{cr(A)}\left(\frac{A_{reA}}{A_{rA}}\right) = 5729326.39$$

$$P'_{cr(B)} = P_{cr(B)}\left(\frac{A_{reB}}{A_{rB}}\right) = 4177606.79$$

$$P'_{cr(C)} = P_{cr(C)}\left(\frac{A_{reC}}{A_{rC}}\right) = 2373377.92$$

Denklem (2.27) ile de birim şekil değiştirmeye bağlı eksenel yük kapasitesi hesaplanır.

$$P_{str(A)} = \frac{3.5A_{reA}E_{cA}}{6S_A} = 7238031.25$$

$$P_{str(B)} = \frac{3.5A_{reB}E_{cB}}{6S_B} = 5758869.8$$

$$P_{str(C)} = \frac{3.5A_{reC}E_{cC}}{6S_C} = 3830400.44$$

8. Yukarıdaki adımlarda A, B ve C tipi kurşun çekirdekli kauçuk izolatörler için hesaplanan birim şekildeğiştirme değerlerinin yönetmelik sınır değerlerine göre (bkz. Bölüm 2.3) kontrolü yapılarak Tablo 3.4'te özetlenmiştir.

Tablo 3.4: Elastomer yalıtım birimlerinde oluşacak birim şekildeğiştirme kontrolü (DD-2).

$\gamma_{c,st(A)}$	0.0008		
$\gamma_{c,st(B)}$	0.0006	≤ 3.5	✓
$\gamma_{c,st(C)}$	0.0005		
$\gamma_{c,st(A)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(A)}$	0.6446		
$\gamma_{c,st(B)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(B)}$	0.5819	≤ 5.0	✓
$\gamma_{c,st(C)}+\gamma_{s,st}+\gamma_{r,st(C)}$	0.4915		
$\gamma_{c,E(A)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(A)}$	0.4181		
$\gamma_{c,E(B)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(B)}$	0.3868	≤ 6.0	✓
$\gamma_{c,E(C)}+\gamma_{s,E}+0.5\gamma_{r,st(C)}$	0.3417		
$\gamma_{s,E}$	0.19	≤ 2.0	✓
$\frac{\min(P_{cr(A)},P_{str(A)})}{P_{K1A}}$	3.449		
$\frac{\min(P_{cr(B)},P_{str(B)})}{P_{K1B}}$	4.045	≥ 2.0	✓
$\frac{\min(P_{cr(C)},P_{str(C)})}{P_{K1C}}$	3.776		
$\frac{\min(P'_{cr(A)},P_{str(A)})}{P_{K2A}}$	3.345		
$\frac{\min(P'_{cr(B)},P_{str(B)})}{P_{K2B}}$	3.482	≥ 1.1	✓
$\frac{\min(P'_{cr(C)},P_{str(C)})}{P_{K2C}}$	3.128		

3.3. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

Sismik yalıtımlı binanın zaman tanım alanında doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizleri ile performansını irdeleyebilmek için tarihi deprem kayıtlarını kullanmak gerekmektedir. Ancak TBDY-2018 Bölüm 2.5 kapsamında iki ve üç boyutlu analizlerde kullanılacak tarihi deprem kayıtlarının seçilmesi, ölçeklendirilmesi vb. hususlar tanımlanmıştır. Bu doğrultuda, tez çalışması kapsamında SAP 2000 yazılımında yapılacak analizlerde kullanılan kayıtlar Tablo 3.6'da verilen 0.5TD-1.25TM periyot aralığı için en geniş aralıkta basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiştir. Tarihi deprem kayıtlarının seçimi için PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) veri tabanı ve internet tabanlı platformu kullanılmıştır.

Tablo 3.5: Ölçeklendirme periyot aralıkları.

	T_D(DD-2)	T_M (DD-1)
T	1.21	2.93
$0.5T_D$	0.605	1.465
$1.25T_M$	1.512	3.662

TBDY-2018'de seçilen her bir kaydı takımının iki yatay bileşenine ait spektrumların kareleri toplamının karekökü alınarak bileşke yatay spektrum elde edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Aynı şekilde ASCE/SEI 7-10(2010)'de de kayıtların ölçeklendirilmesinde yatay bileşenlerin birleştirilmesi için SRSS değeri kullanılmaktadır. Bu değer Denklem (3.1) ile hesap edilmektedir

$$Sa_{kayıt}(T_i) = \sqrt{[Sa_{H1}(T_i)]^2 + [Sa_{H2}(T_i)]^2} \tag{3.1}$$

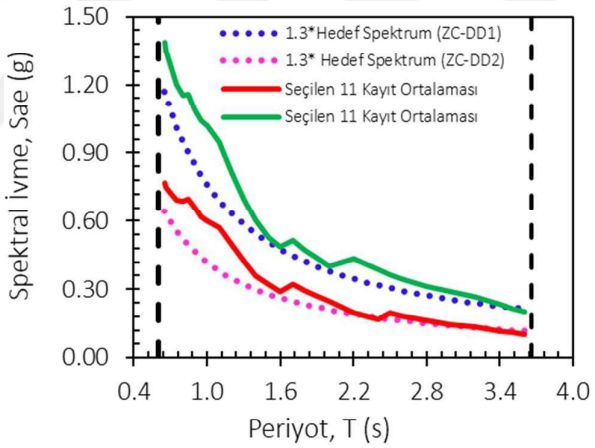
Burada $Sa_{H1}(T_i)$ ve $Sa_{H2}(T_i)$ bir kaydın iki yatay doğrultudaki i saniye periyodundaki spektral ivme değerlerini göstermektedir. Kayıt seçimi ve ölçeklendirmesi için PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) platformu kullanıldığı için, SRSS bir kayıt takımı için tek bir ölçeklendirme katsayısı kullanıldığından yatay bileşenler arası normalize değer korunmaktadır.

TBDY (2018) göre 11 adet kayıt takımı seçilmektedir ve aynı depreme ait en fazla üç kayıt seçilebileceğini belirtmektedir. Bu kritere ilaveten kaydın uzaklığı (R_{JB}), istasyonundaki $V_{S,30}$ hızı, büyüklüğü (M_W) ve ölçek faktörüne dikkat edilerek ve yapılar için geçerli olan maksimum periyod aralığı gözönüne alınarak kayıtlar seçilmiş hedef spektrumlara ölçeklendirilmiştir. Kayıtların filtrelenmesi için fay mekanizması tüm tip faylar olarak seçilmiş; deprem büyüklüğü aralığı olarak $6.0 \leq MW \leq 8.0$, fay-saha mesafesi aralığı olarak $0 \text{ km.} \leq R_{JB} \leq 100 \text{ km.}$ ve zemin koşullarını belirleyici V_S (temel seviyesinin ortalama kayma hızı) aralığı olarak $360 \text{ m/s} \leq VS \leq 760 \text{m/s}$ dikkate alınmıştır. PEER'da ölçeklendirilmiş kayıtların elde edilmesinde aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

1. PEER (https://ngawest2.berkeley.edu)'da istenilen ölçeklendirmede kullanılacak spektrumu oluşturmak için ilgili periyot aralığında 1.3 ile çarpılmış yönetmelik spektrumu "csv" dosyası olarak ilgili web tabanlı veritabanı sayfasına yüklenmiştir.

2. Bir sonraki adımda; yukarıda belirtilen istenen kriter aralıkları girilerek spektruma uygun tüm kayıtlar filtrelenmiştir. Fay mekanizması, Magnitüd, Joyner & Boore Uzaklığı, ortalama kayma dalgası hızı, ölçeklendirme esnasında kullanılacak istatistiksel yöntem en küçük karelerin toplamının karekökü (SRSS) ve sönüm oranı ile ölçeklendirmede özellikle uyuşması beklenen özel periyotların ağırlık oranları ile girilerek kayıtlar aranmıştır.
3. Daha sonra ölçeklendirme yapılarak, kayıtlar ölçeklendirme katsayısına göre (küçükten büyüğe doğru) sıralanarak uygun 11 kayıt seçilmiştir.

Basit ölçeklendirme yönteminde bir kayıt takımına ait iki yatay bileşendeki tüm kayıt boyunca ölçülen ivme kayı değerleri aynı ve sabit bir sayı ile çarpılarak ilgili periyot aralığında ölçeklendirilmiş kayıtların bileşke spektrumunun hedef spektruma eşit ya da daha yüksek olmalıdır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: İzolasyonlu yapı periyodu aralığında DD-1 ve DD-2'ye ait hedef ve ölçeklendirme spektrumları ve seçilen kayıtların ortalaması.

Ölçeklendirilmiş kayıtlara ait depremsellik, basit ölçeklendirme faktörleri, coğrafi ve tarihsel gibi bilgiler Tablo 3.6'da özetlenmiştir.

Tablo 3.6: Analizlerde kullanılacak olan 11 adet deprem kaydına ait depremsellik ve ölçeklendirme faktörleri.

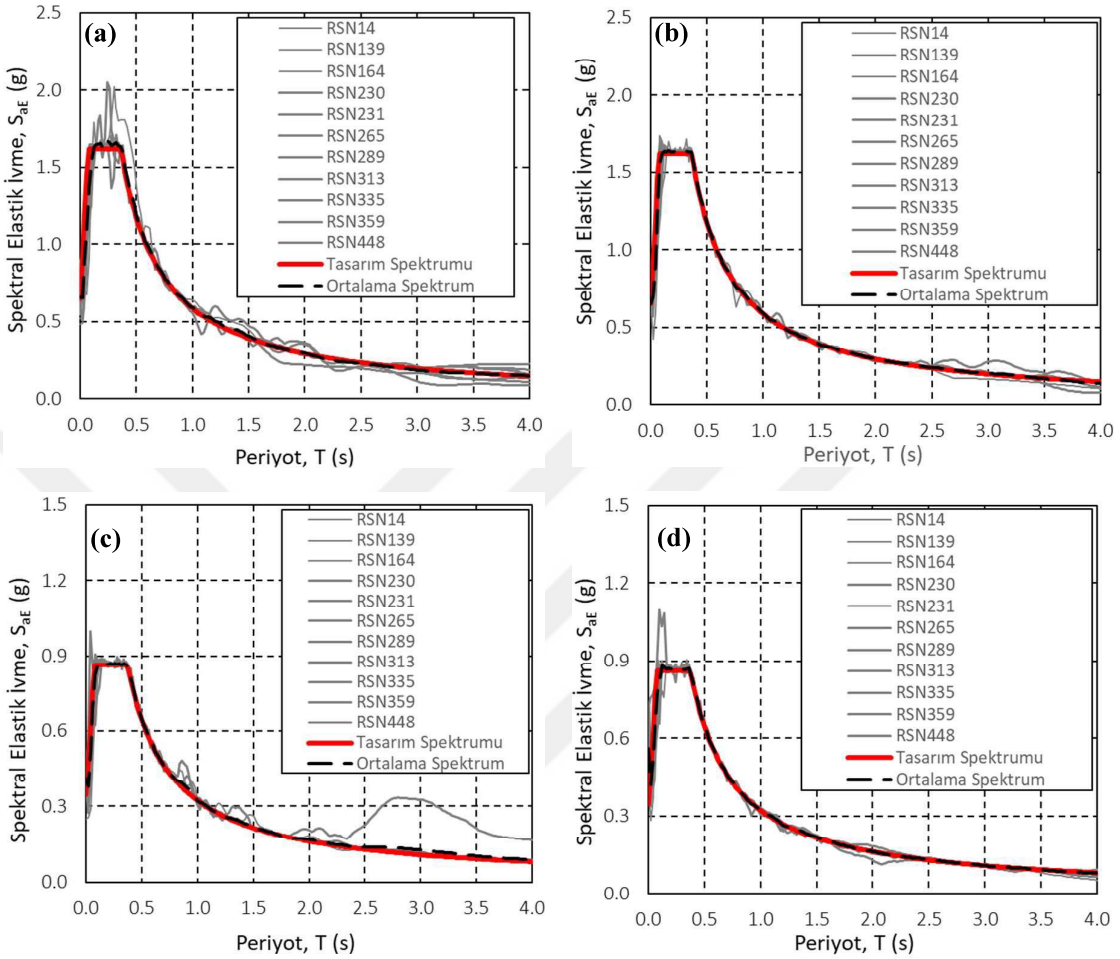
RSN	Yıl	Büyüklük (M_W)	Fay(*) Mekanizması	Rjb (km)	Rrup (km)	$V_{S,30}$ (m/sec)	Ölçek Faktörü	
							DD-1	DD-2
14	1952	7.36	R	81.3	82.2	515.0	2.76	1.51
139	1978	7.35	R	0.0	13.9	471.5	1.99	1.09
164	1979	6.53	SS	15.2	15.2	471.5	2.73	1.5
230	1980	6.06	N	1.1	6.6	382.1	2.11	1.16
231	1980	6.06	N	12.6	15.5	537.2	3.17	1.74
265	1980	6.33	SS	13.8	14.4	471.5	2.01	1.1
289	1980	6.9	N	13.3	17.6	455.9	2.01	1.15
313	1981	6.6	N	10.3	10.3	361.4	1.91	1.05
335	1983	6.36	R	24.8	26.4	381.3	2.59	1.42
359	1983	6.36	R	26.0	27.5	648.1	2.24	1.23
448	1984	6.19	SS	9.9	9.9	663.3	2.26	1.24

*R: Ters Fay, SS: Doğrultu atımlı fay, N: Normal Fay

TBDY-2018 Bölüm 2.5.3'te aktarıldığı üzere zemin davranış analizlerinde zaman tanım alanında yapılacak hesaplarda kullanılacak deprem yer hareketi kayıtları hedef (tasarım) spektrumlarına tam uyuşum ile dönüştürülmelidir. Dönüştürülen kayıtların ortalama spektrum değerleri, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından küçük olmalıdır.

Tezin bir sonraki başlığı altında inceleme sahasına ait jeofizik sismik deneylerden elde edilen bulgulara göre ZC zemin sınıfı geoteknik yazılımlarda oluşturulacak modelin alt sınırı olacağından basit ölçeklendirme yöntemi için seçilen tüm kayıtların ortalama değerlerinin Şekil 3.5'deki gibi her iki doğrultu için TBDY-2018, ZC yerel zemin sınıfı ve DD-1 ile DD-2 deprem düzeylerine göre elde edilen tasarım spektrumlarına tam uyuşumu sağlanmıştır.

Seçilen kayıtların tam uyuşumunun sağlanması için akademik ve uygulamada ölçeklendirme işlemi için sıklıkla kullanılan SeismoMatch (2018) yazılımının akademik lisans kapsamında kullanılabilen versiyonundan faydalanılmıştır. Bu yazılıma, kayıt uyuşumunda kullanılmak üzere iki algoritma dahil edilmiştir: i) Al Atik & Abrahamson (2010); ii) Hancock ve diğ. (2006). Bu çalışmada her iki algoritmada denenmiş; ancak ilk algoritma ile yapılan uyuşumlar sonucunda ölçekli kayıtlarda hız ve deplasman-zaman kayıtları 0 ve civarında kapanmamıştır. Bu nedenle 2.yöntem ile tüm kayıtların uyuşumları sağlanmış; EK-(1-4)'de verildiği üzere tüm kayıtlar orijinal ve ölçekli olarak bir arada kıyaslanmıştır.

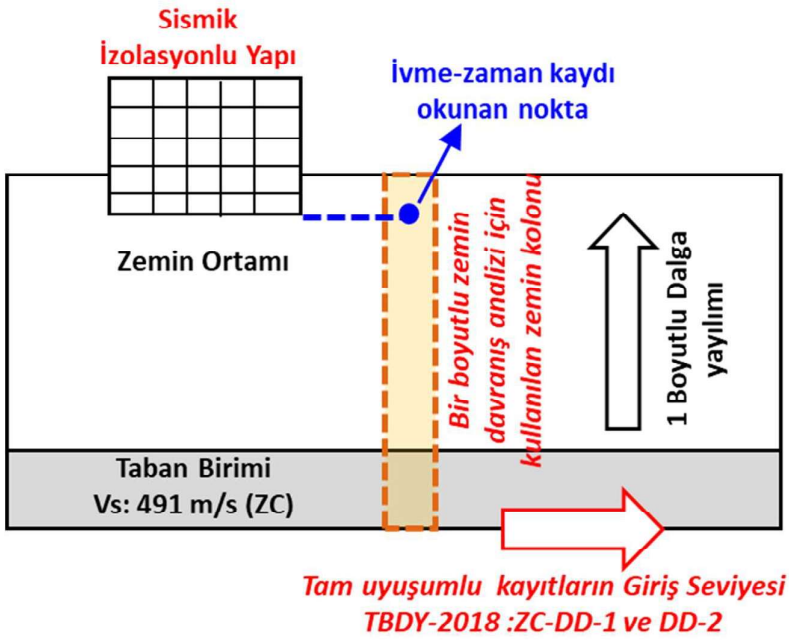


Şekil 3.5: Seçilen deprem kayıtlarının SeismoMatch yazılımı kullanılarak tasarım spektrumuna tam uyuşumun sağlanması: (a) TBDY-2018, ZC, DD-1 ve X doğrultusundaki kayıtlar, (b) TBDY-2018, ZC, DD-1 ve Y doğrultusundaki kayıtlar, (c) TBDY-2018, ZC,DD-2 ve X doğrultusundaki kayıtlar, (d) TBDY-2018, ZC,DD-2 ve Y doğrultusundaki kayıtlar.

3.4. BİR BOYUTLU ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZLERİ VE TEMEL SEVİYESİ SPEKTRUMLARI

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere depremler açığa çıkan enerji gerilme dalgaları halinde kaya ve zemin ortamında hareket ederek mühendislik yapılarının bulunduğu zemin yüzeyine ulaşırlar. Basınç ve kayma dalgaları olarak bilinen bu dalgalar zemin ve kaya ortamında ilerlerken, içlerinden geçtikleri ortamın dinamik zemin özelliklerinden etkilenerek hem genlik hem de frekans içeriği bakımından dönüşüme uğramaktadırlar.

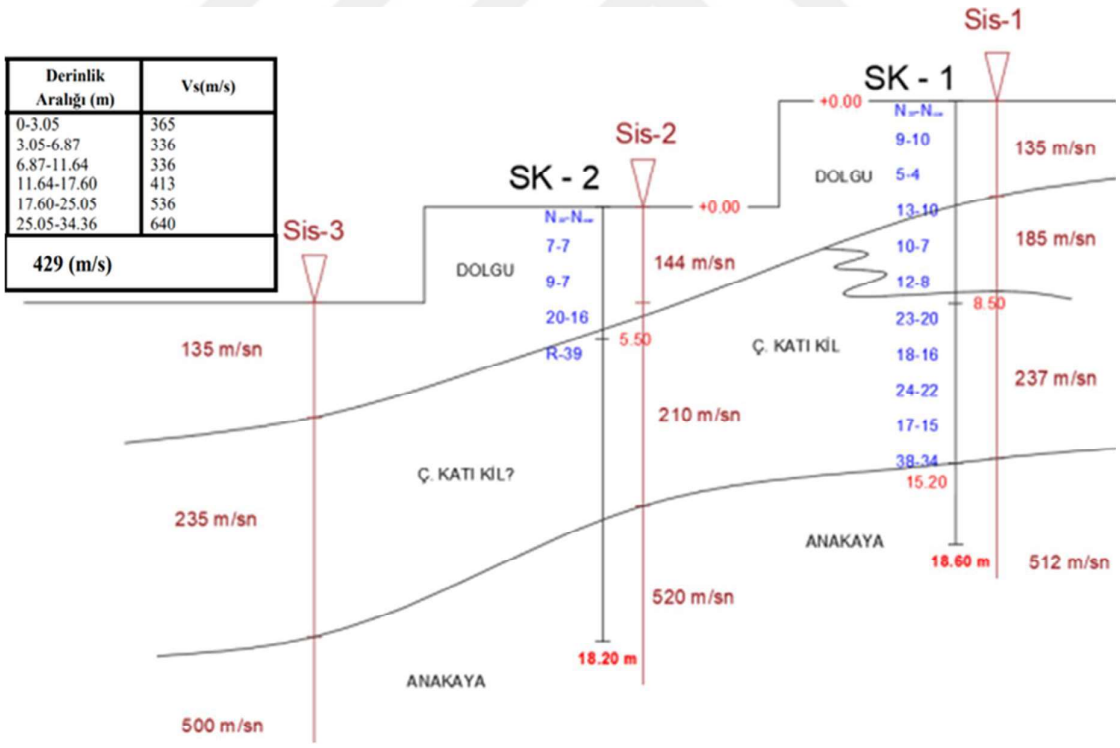
Tezin bu bölümünde, sismik izolasyonlu binaya doğrusal olmayan zaman tanım alanında etki ettirilecek deprem kayıtlarının zemin ortamından nasıl etkilendikleri konusu irdelenecektir. Bu doğrultuda, geoteknik açıdan iyi araştırılmış bir sahaya ait zemin profili üzerinde doğrusal olmayan zemin davranışını gerçeğe yakın temsil edebilen ileri düzey zemin bünye modellerinin hesaplara dahil edildiği bir boyutlu zemin davranış analizleri hem Plaxis 2D sonlu elemanlar hem de DeepSoil yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Bölüm 3.3'te detaylı olarak anlatılan tasarım spektrumuna tam uyuşumu sağlanan kayıtlar kullanılmıştır. Sonuç olarak, SAP 2000 analizlerinde kullanılmak üzere her iki geoteknik yazılımda temel seviyesi kotundan ivmeler okunup kaydedilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Zemin davranış analizleri için oluşturulmak istenen modelin şematik görüntüsü.

3.4.1. Zemin Tepki Analizleri İçi Kullanılan İnceleme Sahası

Sahaya özel gerçekleştirilen zemin davranış analizlerinde, en önemli hususlardan birisi de geoteknik karakterizasyonun doğru bir şekilde ortaya konulmasıdır. Bu bakımdan, araştırma sondajları, jeofizik yöntemlere dayalı arazi deneyleri ve laboratuvar deneylerinin bütünlük arz ettiği bir geoteknik veri raporu ile tamamlayıcı bilgilere erişilmeye çalışılmıştır. Bununla birlikte, TBDY-2018 yerel zemin sınıflarının ayrımının net yapıldığı, zemine ait derinlik-parametre ilişkisinin daha kolay tanımlandığı jeofizik sismik kırılma deneylerinin açıklayıcı olduğu bir saha bulmak için AFAD (2023) tarafından paylaşılan istasyon veri tabanı taranmış; böylece TK-1714 kodlu istasyonun bulunduğu Çanakkale ili Kepez ilçesine bağlı saha seçilmiştir. Ayrıca, bu sahada daha sonra yapılması planlanan bir yapı için T.C. Çanakkale Belediyesi'nce yaptırılan bir geoteknik veri (Geosan,2020) raporundan elde edilen SPT-N vuruş sayıları ile kayma dalgası hızı profilinden (Şekil 3.7) ile zemin tabakalarına ait indeks, rijitlik ve mukavemet parametreleri belirlenmiştir.



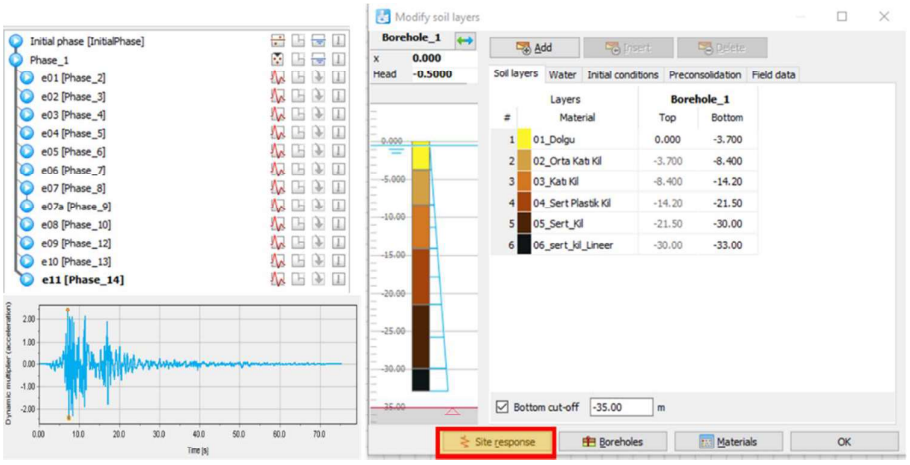
Şekil 3.7: İnceleme sahasında AFAD(sağ üst köşedeki tablo) ve Çanakkale Belediyesi'nce yapılan geoteknik ve jeofizik araştırmaların sonucu.

Ayrıca bahsi geçen geoteknik raporda, üç araştırma sondajının farklı derinliklerinde yapılan presiyometre deneyi ile drenajsız kayma mukavemeti, c_u değeri derinlik arttıkça yüzeyden itibaren 59 ila 800 kPa arasında değişmiştir. Yeraltı suyu seviyesinin yüzeyden itibaren 0.0 ila 0.5 kotları arasında değiştiği belirtilmiştir. Buna göre yüzeyden ilk üç metrede kontrolsüz dolgu yer alırken; hemen altında ilk 30 metreye kadar orta katı-katı- çok sert killerin sıralandığı görülmektedir.

3.4.2. Plaxis 2D ile Zemin Tepki Analizleri Modelinin Oluşturulması

Bir binanın ya da yer altı yapısının dinamik performansını sayısal analizler ile yorumlamanın hazırlık aşaması bir boyutlu serbest alan (free-field) zemin davranış analizlerdir. Çünkü yapıya etkiyecek deprem ivmeleri ve buna bağlı yatay ya da düşey kuvvetler; temel altı zeminin deprem dalgalarını iletmede filtre görevi gördüğü bilinmektedir. Zemin ortamının sonlu elemanlar veya farklar metodu ile modellenip; başlangıç ve deprem etkileri nedeniyle oluşacak deformasyon seviyesi doğru belirlenmelidir. Aynı zamanda laboratuvar ortamında tekrarlı yüklere maruz bırakılarak rijitlik ve mukavemet parametreleri belirlenen zeminlerin davranışının bu modellere gerçeğe yakın tanımlanabilmesi de sonuçlar bakımından son derece önemlidir. Bu noktada dünya genelinde kabul görmüş gerek uygulamada gerekse de araştırmada sıklıkla kullanılan bir sonlu elemanlar geoteknik yazılımı olan Plaxis 2D tez çalışması kapsamında kullanılmıştır.

Plaxis 2D bünyesinde ayrı bir modül olarak bulunan “site response” hesaplama modülü ile istenilen sayıda deprem aynı anda hızlı bir şekilde yazılıma girilerek dinamik analiz yapılabilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8: Plaxis 2D “site response” modülü ekranı ve deprem kayıtlarının programa tanıtılması.

Plaxis 2D ile dinamik analiz modeli kurulurken dikkat edilmesi gerekli en önemli unsur zeminlere atanacak doğru bünye modelinin seçilmesidir. Dinamik yükleme durumunda, zemin tekrarlı kayma gerilmelerine maruz kalırken çok küçük deformasyonlarda bile doğrusal olmayan davranış göstermekle birlikte sönümleyici görevi görür. Tekrarlı yüklemeler altında modül azalımı ve sönümlenme davranışını birlikte göz önünde bulundurabilen bünye modellerinden birisi de HSSmall modelidir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında yapılan Plaxis 2D serbest alan bir boyutlu zemin tepki analizlerinde bu bünye modeli kullanılmıştır.

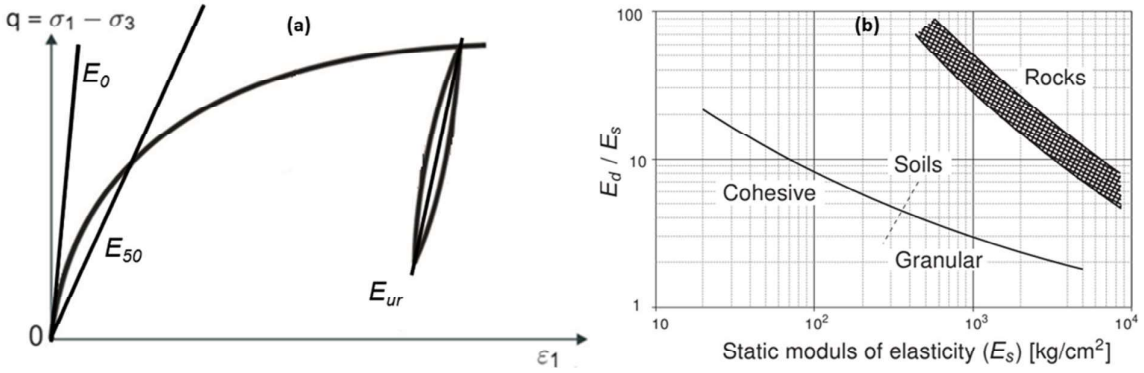
Dinamik analizlerde zemin davranışını belirleyen en önemli parametre, kayma dalgası hızı ve dinamik (yaklaşık olarak kuru) yoğunluğa bağlı hesaplanan başlangıç kayma modülüdür (Denklem 3.2).

$$G_0 = G_{dyn} = G_{max} = \rho V_s^{\,2} \tag{3.2}$$

Dinamik yükleme koşullarındaki Young Modülü, kayma dalgası hızı ve Poisson Oranı'na bağlı olarak Denklem 3.3'deki gibi ifade edilir;

$$E_0 = E_{dyn} = E_{max} = (2 + 2v)G_0 \tag{3.3}$$

Statik yükleme durumundaki yükleme-boşaltma modülü ve E_{dyn} arasındaki ilişki Alpan (1970) yardımı ile kurulabilir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: (a) Düşey yükleme eğrisinde modüller (b) dinamik ve statik modül ilişkisi (Alpan, 1970).

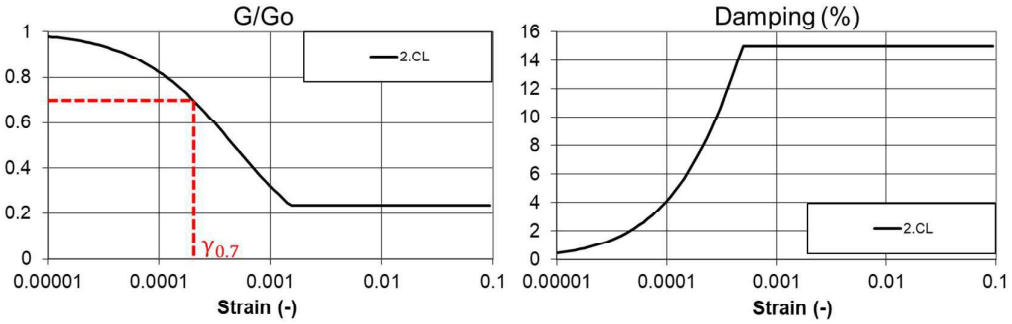
Alpan (1970)'ten elde edilen statik modül, HSsmall modelde girdi parametresi olarak istenen tekrar yükleme boşaltma modülü ile hemen hemen aynıdır (Denklem 3.4).

$$E_{statik} \approx E_{ur} \tag{3.4}$$

Plaxis'deki HS ve HS-Small modeller, girdisi yapılan modülleri her zemin elamanı için, elemanın çevre gerilmesine bağlı aşağıdaki gibi güncellerler. Bu sebeple p'_{ref}, ortalama gerilme girdisi, ilgili zemin tabakasının gerçek arazideki (V_s ölçülen derinlikteki) gerilme durumunu temsil edecek şekilde özenle belirlenmelidir. Başlangıç kayma modülü G_0 Denklem 3.5 ile bulunabilir:

$$G_0 = G_0^{ref} \left(\frac{c \cos\varphi - \sigma'_3 \sin\varphi}{c \cos\varphi + p'_{ref} \sin\varphi} \right)^m \tag{3.5}$$

Kayma modülü azalım ilişkisi, Hardin ve Drnevich (1972) yöntemindeki başlangıç modülünün %70'ine düştüğü referans kayma birim deformasyonuna bağlı olarak ifade edilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10: HSS modelde (a) kayma modülü (b) sönüm oranı eğrileri.

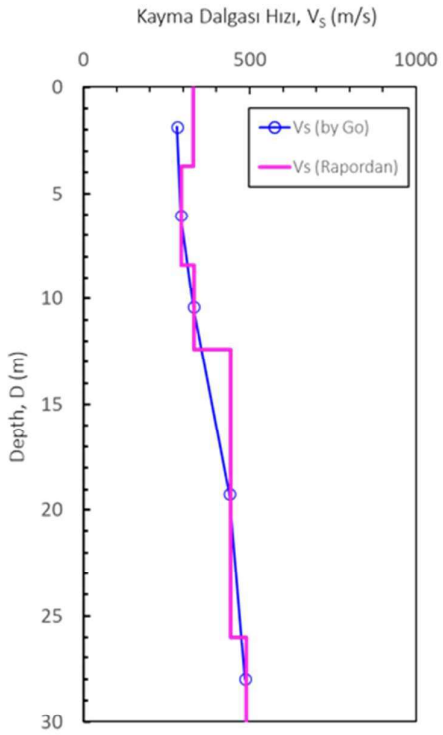
Referans kayma deformasyonu, Mohr-Coulomb göçme kriteri ve başlangıç kayma modülüne bağlı olarak aşağıdaki gibi (Denklem 3.6) hesaplanabilir;

$$\gamma_{0.7} \approx \frac{1}{9G_0} [2c'(1 + \cos(2\varphi')) + \sigma'_1(1 + K_0)\sin(2\varphi')] \tag{3.6}$$

Plaxis 2D modellerinde kullanılan HSSmall modele ait parametreler Tablo 3.7'de sunulmuştur. Seçilen parametrelerin arazide yapılan jeofizik ölçümlerle Denklem 3.5 ve Denklem 3.2'de verilen kayma modülü formüllerinden geri hesaplama ile bulunan kayma dalgası hızı-derinlik karşılaştırması Şekil 3.11'te verilmiştir.

Tablo 3.7: Analizlerde kullanılan HSSmall parametreleri.

Parametre	Birim	1.Dolgu	2.Orta Katı Kil	Katı Kil	Sert Plastik Kil	Sert Kil	Sert Kil Lineer Elastik
		Und-A	Und-B	Und-B	Und-B	Und-B	Geçirimsiz
($V_{s,ref}$)	m/s	330	296	334	443	491	491
(f1)	Hz	0.09567	0.09567	0.09567	0.09567	0.09567	0.09567
(f2)	Hz	0.7597E-3	0.7597E-3	0.7597E-3	0.7597E-3	0.7597E-3	0.7597E-3
(ξ_{target})	(%)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5
(γ_{unsat})	kN/m³	17.5	17.1	18.5	19.0	21.0	21.0
(γ_{sat})	kN/m³	18.0	18.1	19.2	19.5	22.0	22.0
(e_{init})		0.80	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4
($G_{0,ref}$)	MPa	227.0	174.0	223.0	409.0	507.0	507.0
($\gamma_{0.7}$)		0.8E-3	0.17E-3	0.27E-3	0.38E-3	0.34E-3	-
(E_{50}^{ref})	MPa	92.0	56.0	89.0	218.0	270.0	-
(E_{oed}^{ref})	MPa	92.0	56.0	89.0	218.0	270.0	-
(E_{ur}^{ref})	MPa	275.0	169.0	266.0	654.0	811.0	-
(m)		0.5	0.8	0..8	0.8	1.0	-
E'	MPa	-	-	-	-	-	1217
(p_{ref})	kPa	100	100	100	100	100	-
(c_{ref})	kPa	20	60	100	300	380	-
(ϕ)	°	10	-	-	-	-	-
(ψ)	°	0	-	-	-	-	-
(ν_{ur})		0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
(K_0^{nc})		0.83	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
(R_f)		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	-
(k_x)	m/s	0.23E-6	0.23E-6	0.23E-6	0.23E-6	0.23E-6	-



Şekil 3.11: HSS model formülü ve arazi jeofizik ölçümlerin karşılaştırılması.

Sonlu elemanlar analizlerinde, özellikle geoteknik problemler için sınır koşullarını ve sonlu elemanlar ağının en büyük mesh boyutunu doğru belirlemek önemlidir. Analizlerin yatay sınırında "Compliant Base" esnek geçirimli eleman kullanılmıştır. Düşey sınırlarda bir boyutlu analizlerde "Tied Degrees of Freedom" elemanlar kullanılmıştır. Deprem yükleri 11 adet farklı ivme kaydının ön tanımlı deplasman olarak tanımlanmasıyla etkitilmiştir. Kullanılan kayıtlar yüzeyde okunan (outcropping) istasyon kayıtları ait oldukları için referans deplasman $u_{x,ref}$ 0.5 m olarak tanıtılmıştır.Bütün analizlerde bünye modeline ilave olarak Rayleigh Damping etkitilmiştir. HSSmall modellerde ise çok küçük deformasyonlarda histeretik sönüme destekleyici olarak %0.5-%2 arasında kullanılması önerilmektedir; bu nedenle hedef rayleigh sönümü %1 olarak belirlenmiştir. Rayleigh sönüm parametrelerinin elde edilmesi Denklem 3.7 ve 3.8'a gösterilmiştir.

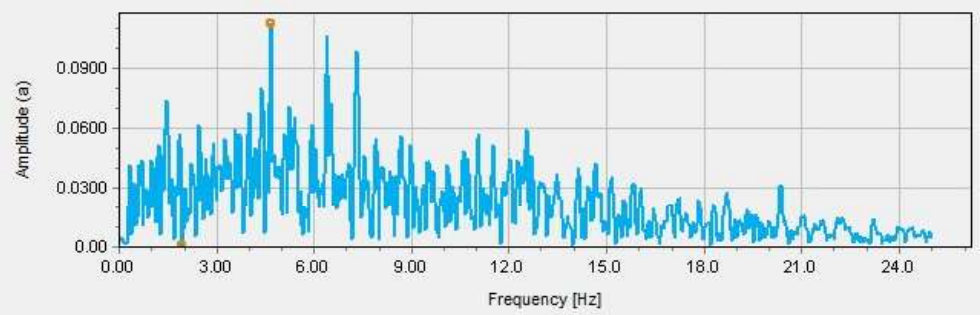
$$\alpha = 2\lambda_q \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \tag{3.7}$$

$$\beta = 2\lambda_q \frac{1}{\omega_1 + \omega_2} \tag{3.8}$$

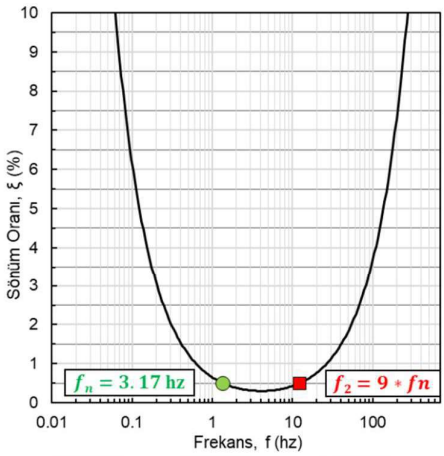
Burada;

- ω_1 = zemin modelinin hakim açısal frekansı
- $\omega_2 = n * \omega_1$
- n = etkiyen yer hareketinin hakim frekansı f_{max}'in, zemin modelinin hakim frekansı f_n'ye oranını aşan en küçük tek tam doğal sayı

On bir adet deprem kaydının frekans içerikleri incelendiğinde f_{max} değeri 24 Hz. olarak görülmektedir (Şekil 3.12). Rayleigh parametreleri ise Şekil 3.13'da grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.12: RSN 230 kaydına ait Fourrier spektrumu.



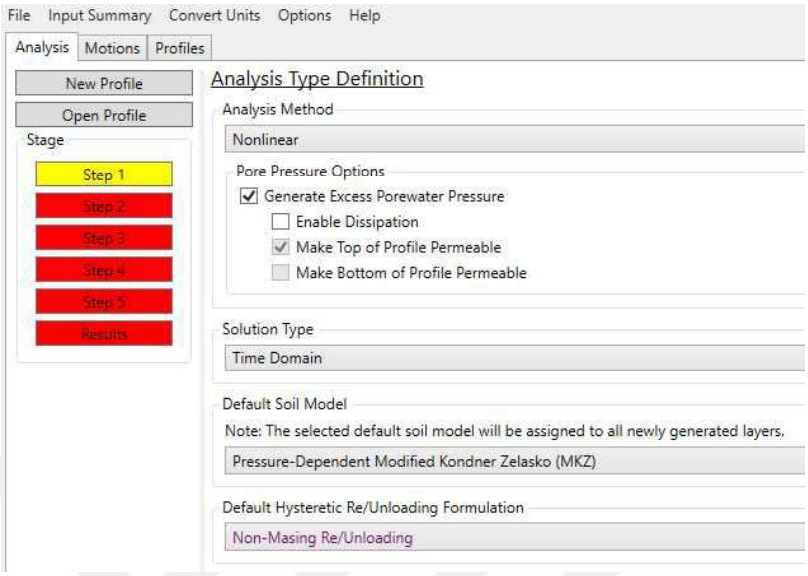
Şekil 3.13: Rayleigh sönüm parametrelerinin belirlenmesi.

3.4.3. DeepSoil ile Zemin Tepki Analizleri Modelinin Oluşturulması

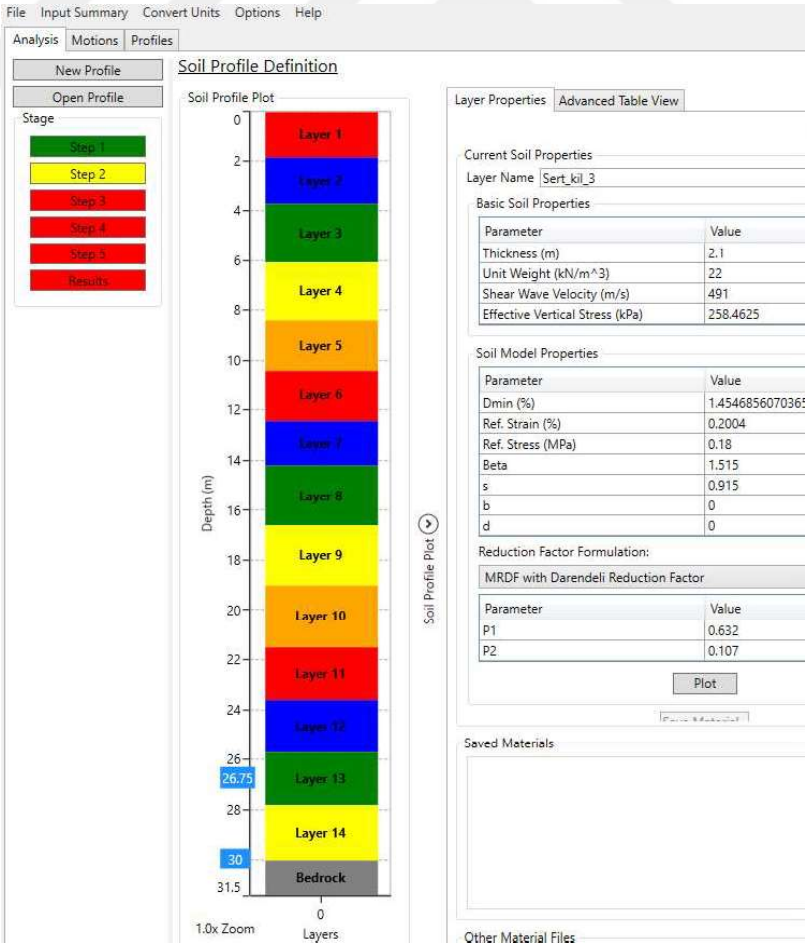
DeepSoil frekans ve zaman tanım aralığında bir boyutlu doğrusal ya da doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinin gerçekleştirilebildiği; oldukça yaygın kullanımı olan pratik bir yazılımdır. Ayrıca, yazılım bünyesinde gömülü olarak bulunan ve literatürde önerilen farklı türdeki zeminlere ait deprem kaynaklı ilave boşluk suyu basınçlarının modellenmesine olanak sağlayan modeller ile efektif gerilme analizi yapılmasına olanak vermektedir. DeepSoil, Prof. Youssef M.A ve diğ. (2020) tarafından Illinois Üniversitesi'nde geliştirilmektedir.

Yazılım penceresi ilk açıldığında; kullanıcıdan analiz türü, deprem kaynaklı ilave boşluk suyu basıncının hesaplara dahil edilip edilmeyeceği, zaman/frekans tanım alanında hangisinde analiz yapılacağı ve zemin dinamik özelliklerinden kayma modülü hesabında gerilme etkisinin dahil edilip edilmeyeceği ile histerik sönüm davranışında Masing kuralının kullanılıp kullanılmayacağı gibi hususları belirlemesi beklenir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde; analiz türü doğrusal olmayan, YASS'ın dikkate alındığı modelde boşluk suyu oluşumuna izin veren, zaman tanım aralığında gerilme bağımlı modül değişimi ile sönümleme davranışında Masing kuralını dikkate almayan durumlar Şekil 3.14'te verildiği gibi seçilmiştir.

DeepSoil yazılımında bir sonraki ekranda zemin profilinde yer alan zeminlerin tabaka kalınlıkları, kayma dalgası hızları ve zeminlere ait doğal birim hacim ağırlıklarının girildiği Şekil 3.12'de sunulan veri ekran kullanıcının karşısına çıkmaktadır. Bu ekranda ayrıca, dinamik zemin özelliklerinin kayma birim deformasyonu ile değişiminin tahmin edildiği bir pencere daha bulunmaktadır. Bir önceki bölümde Plaxis 2D parametrelerinin verildiği Tablo 3.7 kayma dalgası hızı ve birim hacim ağrılık değerler Şekil 3.15'deki gibi girilmiş ve Şekil 3.16'deki gibi nihai zemin profili oluşturulmuştur.

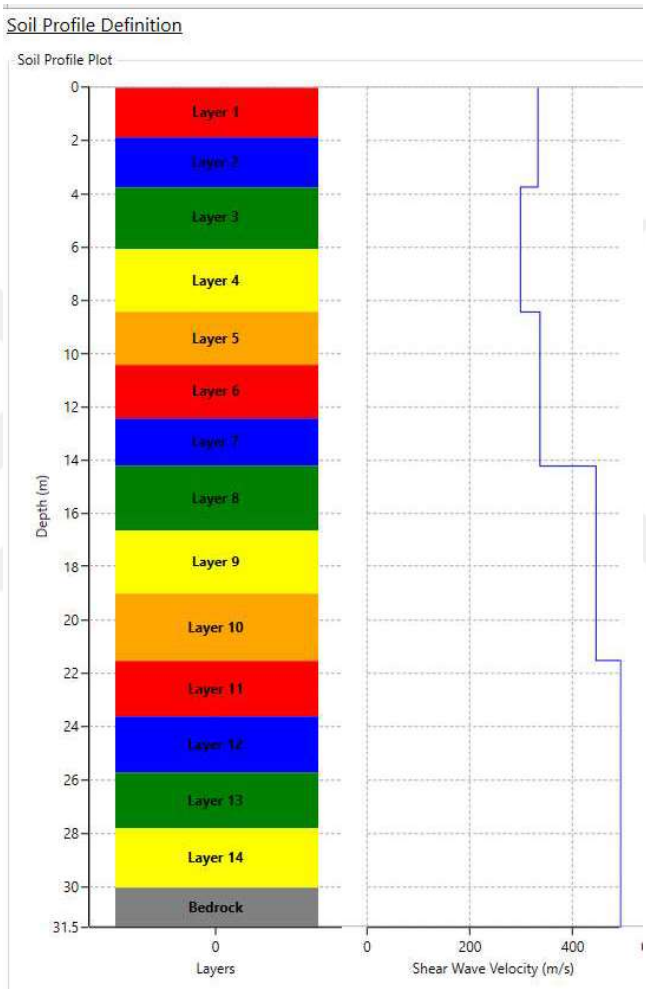


Şekil 3.14: DeepSoil analiz türü belirleme ekranı.



Şekil 3.15: DeepSoil zemin parametreleri girdi ekranı.

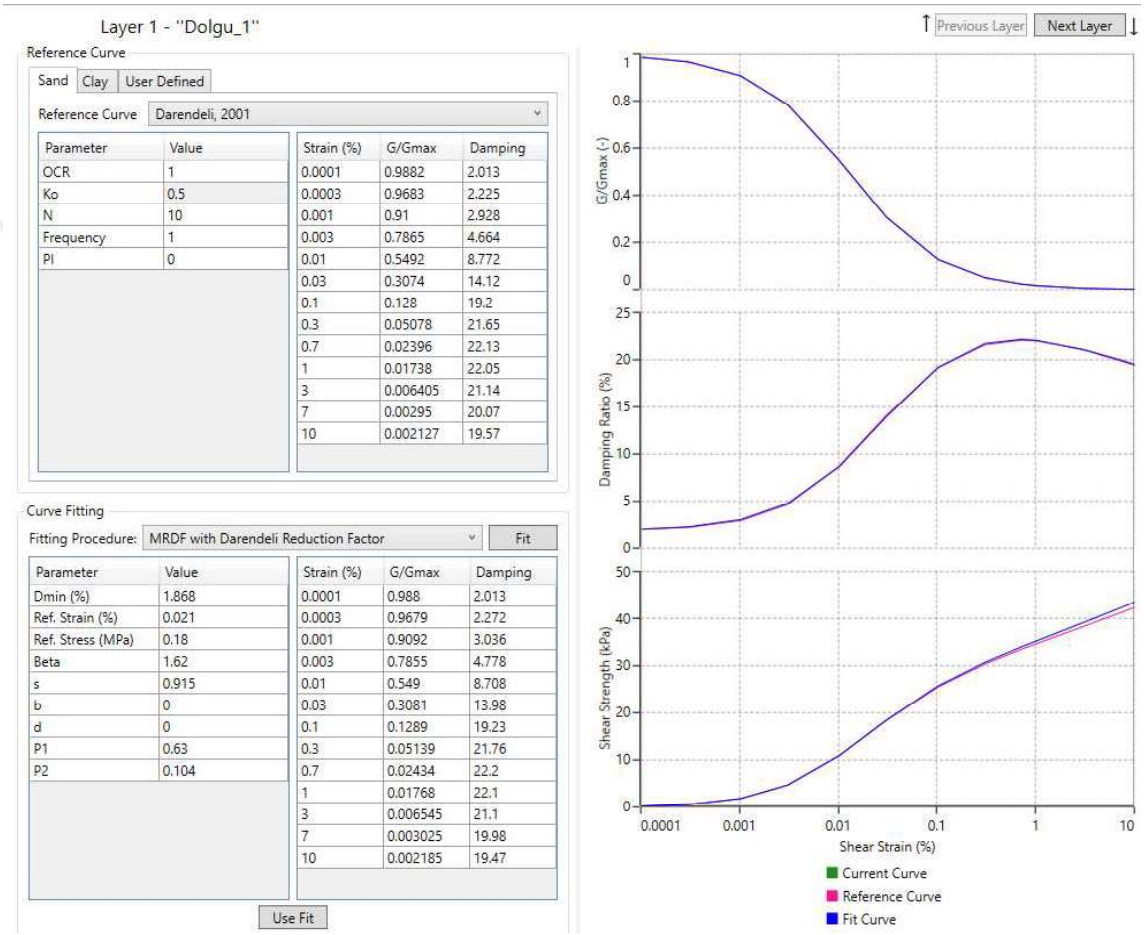
Zemin tabakalarının on dört adet olarak yazılımda görülmesinin sebebi, programın kalın (H ≥ 3 metre) olması durumunda deprem kaydı sağlıklı olarak yukarıya taşıyamamasıdır. Yazılım el kitabı dikkatle incelendiğinde ana zemin tabakalarının alt tabakalara (sublayer) bölünmesi tavsiye edilmiştir.



Şekil 3.16: DeepSoil idealize zemin profili.

Zeminlerin dinamik etkiler altında davranışını kontrol eden iki parametreden birisi kayma modülü, G ve diğeri de histeretik sönüm oranı D'dir. Bu iki parametrenin, zeminde deprem ya da diğer dinamik etkiler sonucunda oluşan kayma modülü ile değiştiği bilinmektedir. Bunlardan kayma modülü, kayma birim deformasyonu ile azalırken; sönüm oranı artmaktadır. Bu trendlerin belirlenmesi laboratuvarda zahmetli ve uzun süren dinamik üç eksenli deney, tekrarlı burulmalı kesme deneyi ve rezonant kolon deneyleri ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle literatürde sayısız araştırmacı 1970'lerden beri büyük bir veri tabanının oluşturulduğu bu deneyler ile ampirik ifadeler türeterek; pratik kullanılmasını sağlamışlardır. Bu araştırmalardan

birisi de Darendeli (2001) tarafından yapılmış ve neredeyse tüm zeminler için kayma modülü azalımı ile sönüm oranının değişimini gerilme ve tekrarlı yükleme periyotlarını da dahil edebilen bir formül takımı önerilmiştir. DeepSoil yazılımı bu yöntemi yazılım içerisinde gömülü bulundurarak; zemin davranışını modellemede kolaylık sunmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: Zemin dinamik özelliklerinin belirlendiği DeepSoil ekranı.

Bu tez çalışması kapsamında, yerel zemin koşulu olarak YASS'ın varlığının bir boyutlu tepki analizlerinde temel altı kayıtlarına ait spektrumlardaki değişimini incelemek üzere; DeepSoil yazılımında hazır olarak bulunan, literatürde daha önce önerilmiş ve deprem esnasında tüm zeminlerde oluşan ilave boşluk suyu basıncı değişimini simüle edebilen metotlardan faydalanılmıştır. Modül azalımı ve sönüm oranındaki değişiminde olduğu gibi yazılımın el kitabında killi zeminler için önerilen yöntemlerden Matasovic ve Vucetic (1995)'in önermiş olduğu yöntem seçilmiştir. Bu yönteme göre, Denklem (3.9)'te verilen eşitlik ile ilave boşluk suyu basıncının başlangıç zemin efektif gerilmesine oranı, u_N hesaplanabilir:

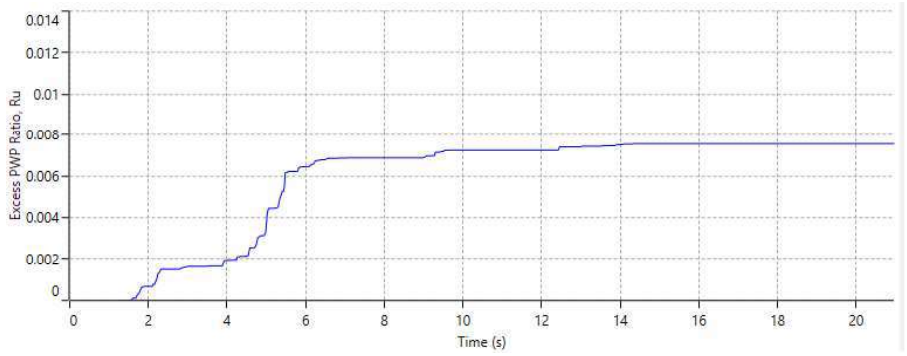
$$u_N = AN_c^{-3s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + BN_c^{-2s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + CN_c^{-2s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + D \quad (3.9)$$

Burada; A,B,C,D,r ve s birer eğri yakalama parametreleri iken; N_{eq} deprem yüklemesi esnasında zemin davranışının aynı davranışı izlediği çevrim sayısıdır. γ_{tvp} zeminde ilave boşluk suyu basıncı gözlemlenmeyen eşik kayma deformasyonu seviyesidir. γ_c ise zeminde herhangi bir tekrarlı yük seviyesinde gözlemlenen kayma birim deformasyon seviyesidir. Bu çalışmada, araştırmacıların normal konsolide killer (AKO=1) için önerdikleri parametre seti kullanılmış ve Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8: Matasovic ve Vucetic (1995) tarafından önerilen killi zeminler için boşluk suyu parametreleri.

Zemin Tanımı	γ_{tvp} (%)	s	r	A	B	C	D
Normal Konsolide Deniz Kili	0.1	0.075	0.495	7.6451	-14.7174	6.38	0.6922

Şekil 3.18'de görüldüğü üzere DD-2 düzeyi RSN 139 istasyon kodlu kayıdın x-doğrultusunda verilen kayıt süresince temel seviyesinde oluşan ilave boşluk suyu basıncı değişimi meydana gelmiştir.



Şekil 3.18: DD-2 Deprem Düzeyi RSN139-X doğrultusu ile yapılan analize ait ilave boşluk suyu basıncı oranı-zaman grafiği.

4. BULGULAR

Bölüm 2'de genel olarak izolasyon sistemlerinin özelliklerinden, izolatörlerin yapıya uygulama koşullarından ve zemin etkilerinden bahsedilmiştir. Bölüm 3'te ise üstyapı ve izolasyon sistemi tasarımı ile nümerik zemin tepki analizleri, sonlu elemanlar ve doğrusal olmayan analiz yazılımları ile (SAP2000, PLAXIS 2D, DeepSoil) gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının bu bölümünde ZC yerel zemin sınıfı dikkate alınarak oluşturulan 4 katlı sismik izolatörlü bir yapı modelinin zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri 11 adet deprem kaydı takımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu analizlere ait detaylar Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu bölümde bahsi geçen analizlerden elde edilen taban deplasmanı, göreli kat ötelemesi ve kat ivmelerine ilişkin sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.1: Yapılan analizlerde kullanılan yazılım ve kabul koşulları ile ilgili özet bilgiler

Analiz No	Kullanılan Uygulama	YASS Durumu	Açıklama
1	PEER SAP2000	Yok	https://ngawest2.berkeley.edu sitesinde bulunan tarihsel gerçek deprem kayıtları inceleme sahasının depremsellik özelliklerine ve uygun ölçek faktörlerine göre seçilmiş ve ölçekli kayıtlar SAP2000 yazılımına girilmiştir.
2	SeismoMatch Plaxis 2D SAP2000	Var	Analiz No.1'de seçilen kayıtlar SeismoMatch yazılımında tasarım spektrumlarına tam uyuşumlu hale getirilmiştir. Bu kayıtlar kullanılarak Plaxis 2D'de zemin tepki analizleri yapılmıştır. Temel seviyesindeki kayıtlar SAP2000 yazılımına girilmiştir.
3	SeismoMatch Plaxis 2D SAP2000	Yok	
4	SeismoMatch DeepSoil SAP2000	Var	Analiz No.1'de seçilen kayıtlar SeismoMatch yazılımında tasarım spektrumlarına tam uyuşumlu hale getirilmiştir. Bu kayıtlar kullanılarak DeepSoil'de zemin tepki analizleri yapılmıştır. Temel seviyesindeki kayıtlar SAP2000 yazılımına girilmiştir.
5	SeismoMatch DeepSoil SAP2000	Yok	

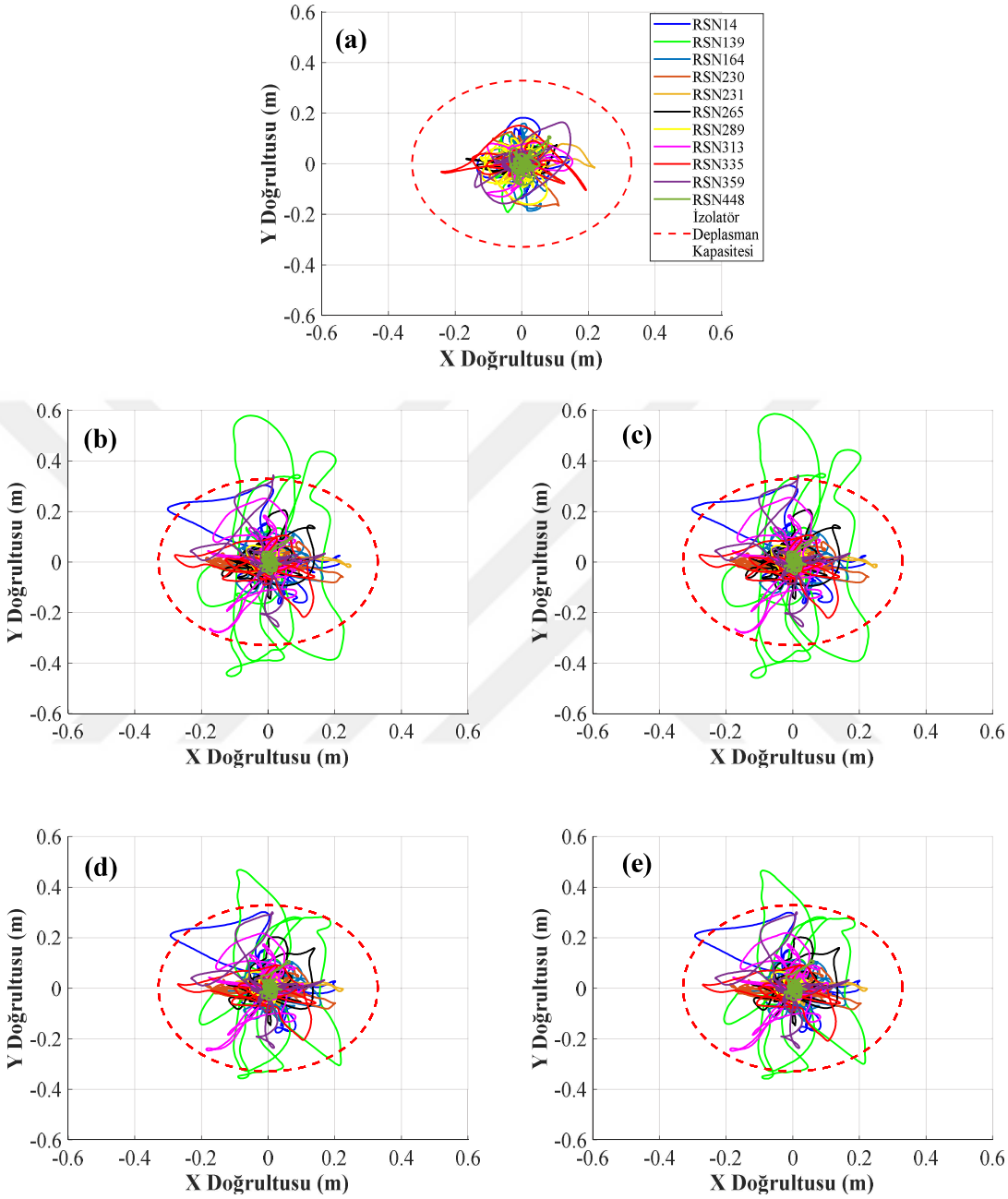
TBDY-2018 Bölüm 14 kapsamında belirtildiği üzere; taban deplasmanı DD-1 alt sınır değeri, göreli kat ötelemesi oranı DD-2 üst sınır değeri ve toplam kat ivmeleri de DD-2 nominal değeri dikkate alınarak oluşturulan SAP2000 modeli doğrusal olmayan zaman tanım analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Bu analizlerde tezin bir önceki bölümü olan Yöntem kısmında belirtildiği gibi seçilen ve ölçeklenen 11 adet deprem kayıt takımı kullanılmıştır.

Yalıtım birimi tasarımı (bkz. Bölüm 3.2) yapılırken maksimum deplasman kapesitesinin belirlenmesi, tasarım için en önemli parametrelerden biridir. Şekil 4.1'de X ve Y doğrultusundaki taban deplasman grafiği, TBDY-2018 basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilen kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarını, YASS durumu dikkate alınarak doğrusal olmayan bir boyutlu zemin tepki analizi neticesinde üstyapı temeli seviyesinde elde edilen kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarını ve sonlu elemanlar metodu ile yapılan, ve benzer şekilde YASS durumu dikkate alınarak tam uyuşumlu kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarını göstermektedir. Burada DD-1 deprem düzeyi izolatör sistemi alt sınır parametreleri göz önünde bulundurularak hesaplanan izolatör deplasman kapasiteleri ile tüm deprem kayıtlarına ait sonuçlar karşılaştırılmalı olarak her bir durum için sunulmuştur. RSN istasyon kodları ile temsil edilen deprem kayıtlarına ait detaylar Bölüm 3'te Tablo 3.6'da sunulmuştur.

Şekil 4.1 (a) incelendiği üzere, basit ölçeklendirilmiş kayıtların kullanıldığı analizlerde her iki doğrultuda elde edilen taban deplasmanları en büyük deprem yer hareketi (DD-1) alt sınır için belirlenen taban deplasmanı kapasitesi olan 329 mm'yi aşmamıştır. Şekil 4.1 (b)'de DeepSoil kullanılarak YASS'ın hesaplara katılmadığı analizlerin sonuçlarının sunulduğu grafikten anlaşılacağı üzere, TBDY-2018'e göre belirlenen deplasman kapasitesi, istasyon kodu RSN14, RSN139, RSN359 olan deprem kayıtları altında sırasıyla 39.7 mm, 259.6 mm ve 14.8 mm aşılmıştır. Benzer şekilde, DeepSoil'de YASS'ın dikkate alındığı analiz sonuçlarının gösterildiği Şekil 4.1 (c)'de, deplasman kapasitesinin RSN14, RSN139, RSN359 deprem kayıtları için taban deplasmanı kapasitesinin sırasıyla 39.3 mm, 252.8 mm ve 13 mm aşıldığı belirtilmiştir.

Doğrusal olmayan ve ileri zemin bünye modellerinin zemin davranışını temsil ettiği Plaxis 2D sonlu elemanlar analizi ile üstyapı temel seviyesinde elde edilen deprem kayıtlarının, SAP 2000 yazılımda sismik yalıtımlı yapı modeline etki ettirilmesi sonucunda elde edilen taban deplasman değerleri ve bu değerlerin kapasiteyi aşma durumu Şekil 4.1 (d) ve (e)'de sırasıyla YASS'ın bulunmadığı ve bulunduğu koşullar için sunulmuştur. Buna göre, Şekil 4.1(d)'de

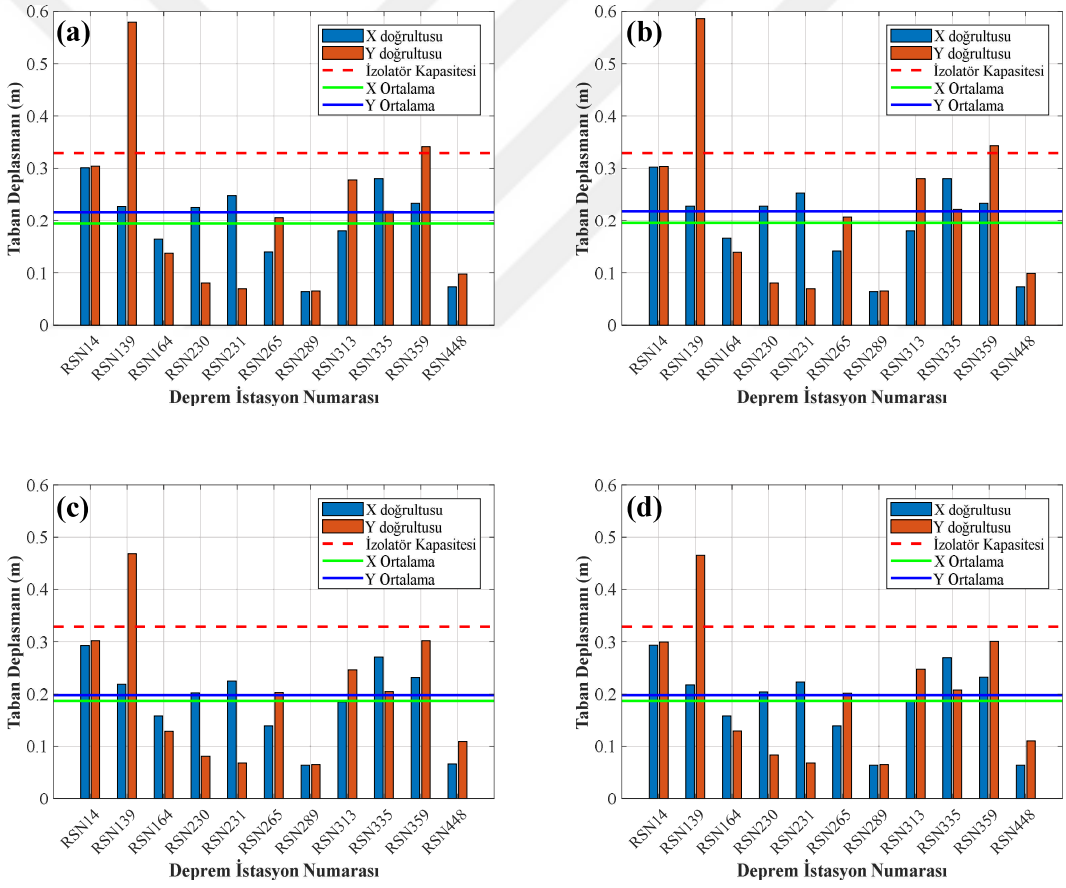
taban deplasman kapasitesi RSN14 ve RSN139 deprem kayıtları dışında aşılmamıştır. Burada, RSN14 deprem kaydı altında taban deplasman kapasitesi 32.4 mm, RSN139 deprem kaydı altında 147.5 mm aşılmıştır. Buna paralel olarak Şekil 4.1(e)'de verildiği üzere RSN14 ve RSN139 deprem kayıtları için kapasite aşımı sırasıyla 32.3 mm ve 145.1 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.1: Yapının X ve Y doğrultusundaki taban deplasmanı: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS.

Şekil 4.1'de tüm deprem kaydı süresi boyunca her iki doğrultuda taban deplasmanı verilen durumlardan taban deplasmanı kapasitesini aşanlar ayrıca sütun gfrafikler üzerinde on bir deprem kaydının ortalaması ile Şekil 4.2'de kıyaslanmıştır.

Genel olarak bakıldığında taban deplasman kapasitesi aşımının sadece Y doğrultusunda, DeepSoil'den elde edilen kayıtlarla yapılan analizlerde RSN139 ve RSN335'de; Plaxis 2D yazılımından elde edilen kayıtlarla yapılan analizlerde RSN139'da olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, on bir deprem kayıt takımına ait hesaplanan ortalama değerin her iki doğrultuda; kapasitenin altında kaldığı açıkça görülmektedir.



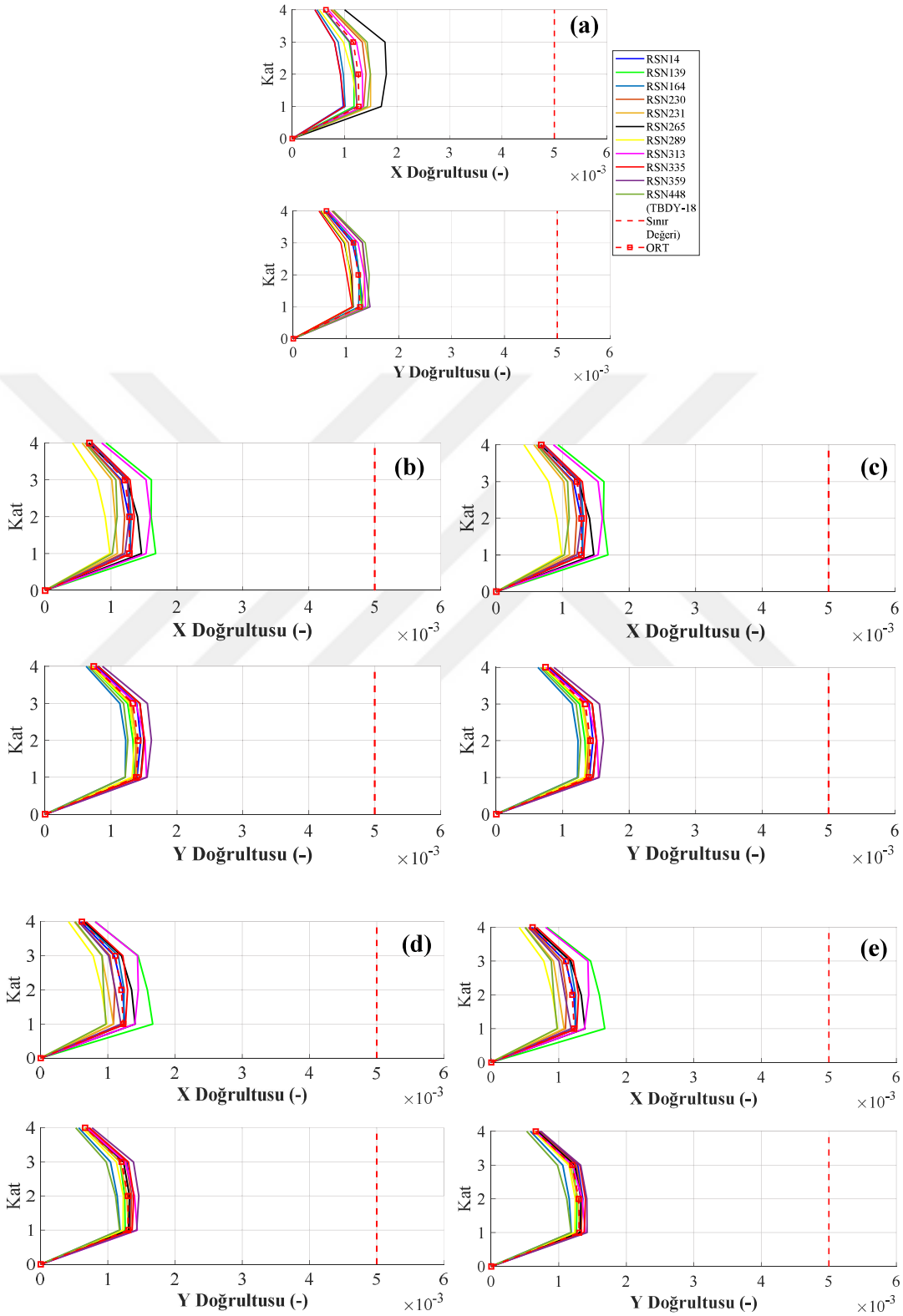
Şekil 4.2: Binanın X ve Y doğrultusunda maksimum taban deplasmanı: (a) DeepSoil, (b) DeepSoil-YASS, (c) Plaxis 2D, (d) Plaxis 2D-YASS.

DD-2 deprem düzeyi izolasyon üst limit tasarımı yapılan modelde Tablo 4.1'de sunulan her bir durum için doğrusal olmayan zaman tanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu elde edilen göreli kat ötelemesi oranları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu grafikler üzerinde, on bir deprem kayıt takımına ait sonuçlar ve bu sonuçlara ait ortalama değerler katlara göre

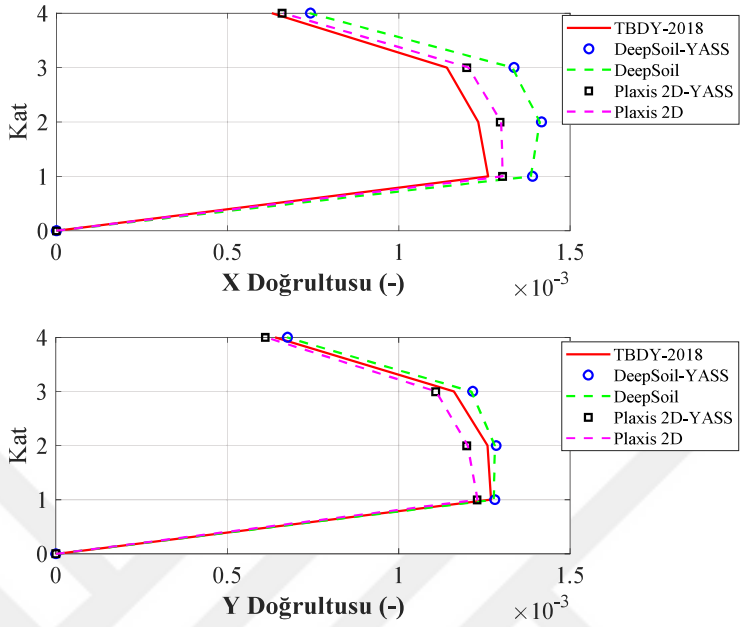
sunulmuştur. Grafiklerin Y-ekseninde belirtilen 0 değeri izolasyon katını sembolize etmektedir. Burada, tüm depremler için elde edilen pik göreli kat ötelemeleri oranı TBDY-2018 kapsamında binanın kesintisiz kullanımı (KK) için belirtilen sınır değeri olan 0.005 ile kıyaslanmıştır. Şekil 4.3(a)'da ise basit ölçeklendirilmiş kayıtlar kullanılarak elde edilen pik göreli kat ötelemesi oranları verilmiştir. En büyük göreli kat oranı da RSN265 depreminde 0.00179 olarak bulunmuştur.

Yerel zemin koşullarının dikkate alındığı duruma ait analiz sonuçları bir arada incelendiğinde ise TBDY-2018'e göre belirlenen binanın kesintisiz kullanımı (KK) için belirtilen sınır değeri aşılmadığı görülmüştür. DeepSoil için Şekil 4.3(b)'de pik göreli ötelemesi oranını RSN139'da 0.001677 iken Şekil 4.3(c)'de 0.001679 olarak gözlemlenmiştir. Şekil 4.3(d) ve Şekil 4.3(e)'de her iki durum için pik göreli ötelemesi oranı RSN139 deprem kaydı altında meydana gelmiştir. Buna göre pik değerler, Plaxis 2D YASS'nin olmadığı durumda 0.001666 iken YASS'nin olduğu durum için 0.001681 olarak tespit edilmiştir.

Ayrıca, tüm durumlar için ortalama pik göreli kat ötelemesi oranları da Şekil 4.4'te sunulmuştur. Buna göre, geoteknik yazılımları ile elde edilen kayıtlar kullanılarak yapılan analizlerden hesaplanan X doğrultusundaki ortalama pik göreli kat ötelemesi oranları, TBDY-2018 basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilen kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarından bir miktar yüksektir. Y doğrultusundaki TBDY-2018 kayıtların kullanıldığı analizlerden elde edilen ortalama pik göreli kat ötelemesi oranları DeepSoil ve Plaxis 2D analiz sonuçlarının arasında kalmıştır.

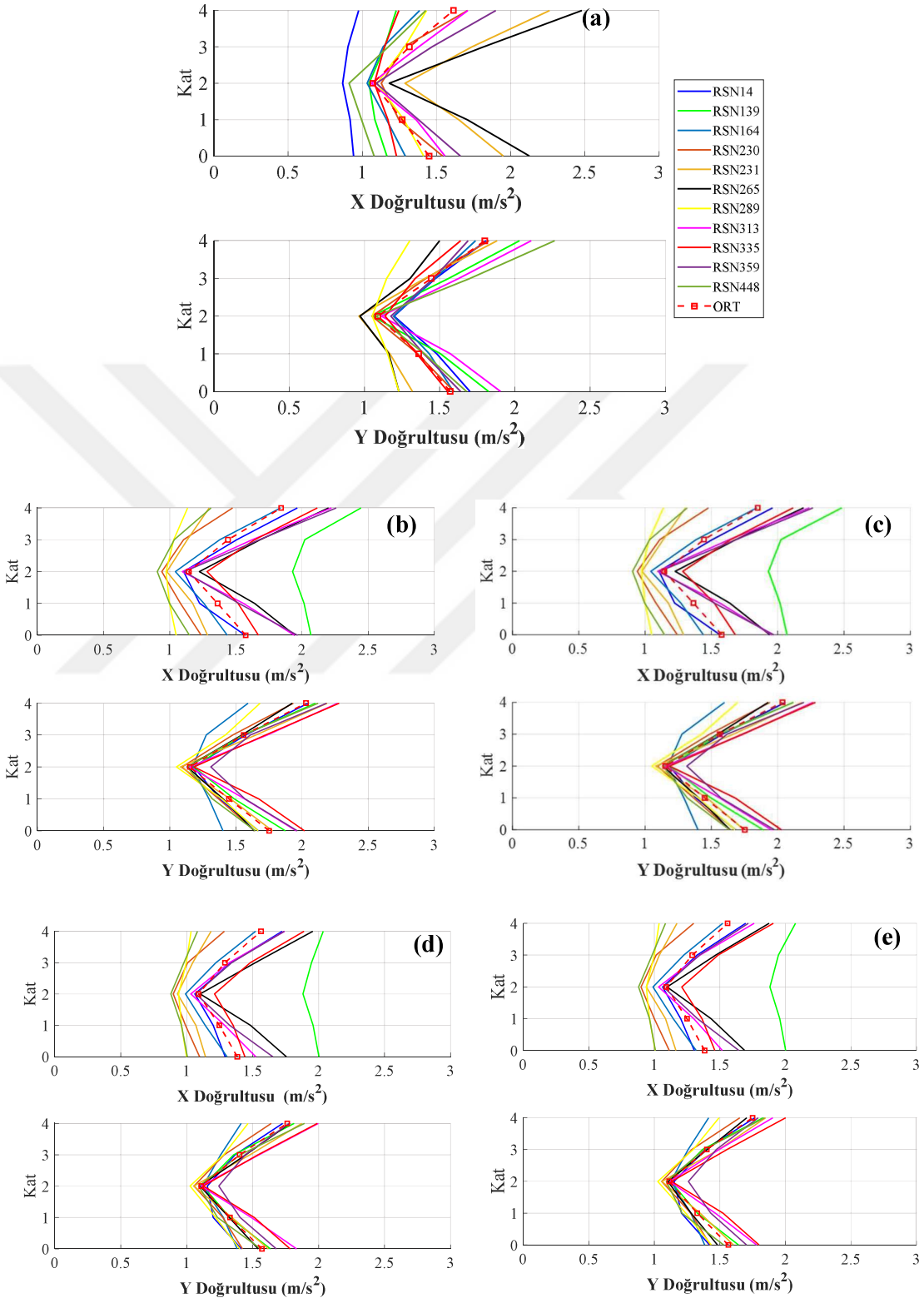


Şekil 4.3: Yapının X ve Y doğrultusundaki göreli kat ötelemesi oranları: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS.

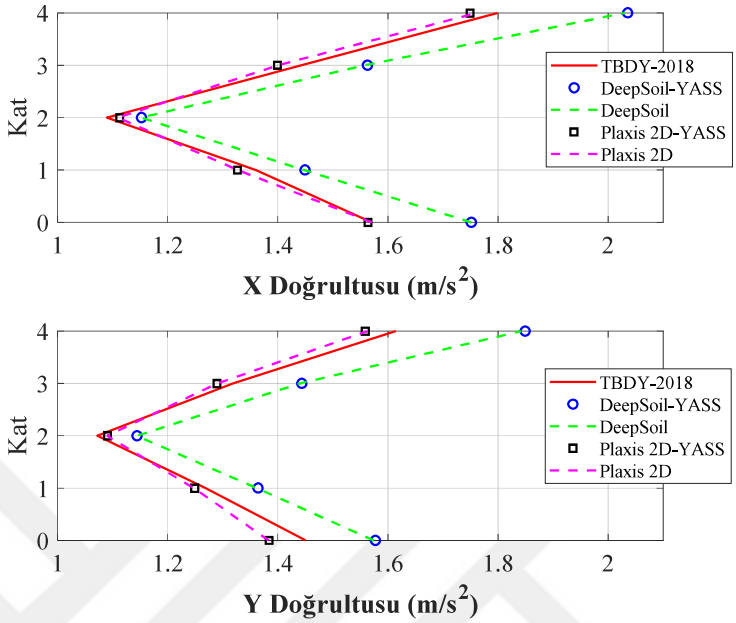


Şekil 4.4 :Tüm durumlar için X ve Y doğrultusunda ortalama pik göreli kat ötelemesi.

DD-2 deprem düzeyi izolasyon nominal tasarımı yapılan modelde Tablo 4.1'de sunulan her bir durum için doğrusal olmayan zaman tanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucu ulaşılan bulgular pik toplam kat ivmeleri Şekil 4.5'te ve bunların tüm durumlar için ortalama değerleri de Şekil 4.6'da ortaya konulmuştur. Her ne kadar on bir deprem kaydına ait pik toplam kat ivme değerleri farklılık gösterse de ortalama değerler açısından TBDY-2018 ile Plaxis 2D sonuçları oldukça yakınken DeepSoil sonuçları diğerlerine göre bir miktar artış göstermiştir. Pik ivmelerin katlara göre dağılımına bakıldığında, tüm durumlarda maksimum değere beklendiği gibi en üst kat seviyesinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, Şekil 4.5(a)'da TBDY-2018 basit ölçekli analizden elde edilen pik kat ivmesi X doğrultusunda ve RSN265 kaydı altında en üst katta 2.480 m/s^2'dir. Yerel zemin koşullarının dikkate alındığı DeepSoil analizlerinden elde edilen tüm deprem kayıtları ile yapılan SAP 2000 analizlerinden ulaşılan pik kat ivme değerinin en üst katta, YASS'nin bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda sırasıyla 2.446 m/s^2 ve 2.483 m/s^2 olduğu sonucuna varılmıştır. Bu iki pik değerin ulaşıldığı analizde kullanılan deprem kaydının ait olduğu istasyon kodu RSN 139'dur (Şekil 4.5 (b)-(c)). Benzer şekilde, Şekil 4.5(d)-(e)'de sunulduğu gibi Plaxis 2D yazılımı ile elde edilen deprem kayıtlarının SAP 2000 programına dahil edilmesiyle yapılan analizlerde pik kat ivmesi değeri göreli olarak azalmış ve 2.05 m/s2 civarında bulunmuştur. Ayrıca DeepSoil kayıtları ile yapılan analizlerde olduğu gibi bu pik değerlere RSN 139 istasyon kodlu kayıtta rastlanılmıştır.



Şekil 4.5: Yapının X ve Y doğrultusundaki toplam kat ivmeleri: (a) TBDY-2018, (b) Deepsoil, (c) Deepsoil-YASS, (d) Plaxis 2D, (e) Plaxis 2D-YASS.



Şekil 4.6: Tüm durumlar için X ve Y doğrultusunda ortalama pik kat ivmesi.

5. TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında, yerel zemin koşullarının sismik izolasyonlu betonarme bir binanın sismik performansı üzerine etkisini incelemek amacıyla; TBDY-2018 Bölüm 2.5'te yer alan gerçek deprem kayıtlarının seçimi ve ölçeklendirilmesi hususları dikkate alınmıştır. Buna göre;

i. Basit ölçeklendirme yöntemine göre; inceleme sahasının yerel zemin sınıfına uyumlu kayma dalgası hızı ($V_{S,30}$) aralığı, depremsellik (faya olan en yakın mesafe, kırılma uzunluğu, moment magnitüdü vb.) kıstaslarına göre on bir adet deprem kayıt takımı seçilmiştir. Ölçeklendirmede kullanılan ölçek faktörleri sismik izolasyonlu binanın $0.5T_D$-$1.25T_M$ periyot aralığı dikkate alınarak seçilmiştir.

ii. Yukarıdaki maddede belirlenen on bir adet kayıt takımı, bir boyutlu zemin tepki analizlerinde kullanılmak üzere; tasarım (hedef) spektrumlarına tam uyuşumlu hale getirilmiştir. Geoteknik deprem mühendisliği yazılımları ile bir boyutlu zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiş; sismik yalıtımlı yapının temel seviyesi için deprem kayıtları oluşturulmuştur.

Yerel zemin koşullarının, sismik yalıtımlı binanın dinamik davranışına etkisini incelemek için hem DeepSoil hem de Plaxis 2D yazılımlarında yer altı suyu seviyesinin (YASS) olduğu ve olmadığı durumlar modellenerek analizler tekrarlanmıştır.

Sismik yalıtımlı binanın izolasyon sisteminin ön tasarımı DD-1 ve DD-2 deprem düzeyine göre izolatör mekanik parametrelerinin nominal, alt ve üst sınır değerleri için ayrı ayrı yapılmış ve bir sonlu elemanlar yazılımı olan SAP 2000 aracılığı ile bina modeli oluşturulmuştur. Söz konusu modellerin yukarıda özetlenen yöntemlerle elde edilen ölçekli deprem kayıt takımları altında doğrusal olmayan zaman tanım analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları; taban deplasmanı, kat ivmesi ve göreli kat ötelemeleri açısından oluşturulan her bir durum için incelenmiş ve elde edilen bulgular bu bölümde tartışılmıştır.

Elde edilen bulgulardan ön tasarımı DD-1 deprem düzeyi alt limit değerlerine göre yapılan modelin taban deplasmanı değerleri, TBDY-2018'e göre ZC yerel zemin sınıfı ve DD-1 deprem düzeyi tasarım ivme spektrumuna göre basit ölçeklendirilen kayıt takımları altında değerlendirildiğinde sismik izolasyon sistemi taban deplasmanı kapasitesinin her iki doğrultuda aşılmadığı sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla basit ölçeklendirilmiş kayıtların kullanıldığı zaman tanım analizlerine göre yapılan bu ön tasarımın uygun olduğu sonucuna varılmaktadır. Ancak, yerel zemin koşullarının dikkate alındığı bir boyutlu zemin tepki analizlerinden elde edilen kayıtlar kullanılarak gerçekleştirilen doğrusal olmayan zaman tanım analizleri sonuçları incelendiğinde bazı deprem kayıtlarında, talep taban deplasmanının kapasite taban deplasmanını aştığı gözlemlenmiştir. Buna rağmen, talep taban deplasmanı değerlerinin her iki doğrultudaki ortalamalarının kapasite taban deplasmanını aşmadığı anlaşılmıştır. Geoteknik yazılımlar ve yer altı suyu seviyesi açısından bulgular irdelendiğinde; DeepSoil tabanlı kayıtların kullanıldığı analizlere ait taban deplasmanı değerlerinin hem spesifik olarak bazı deprem kayıtları için hem de buna bağlı olarak genel ortalama için Plaxis 2D'ye göre daha yüksek değerler verdiği görülmüştür.

DD-2 deprem düzeyi üst limit değerlerine göre oluşturulan modelin göreli kat ötelemeleri sonuçları farklı analiz durumları için bir arada değerlendirilmiştir. Buna göre, basit ölçeklendirilmiş ve zemin tepki analizlerinden elde edilen kayıtlar ile gerçekleştirilen tüm analiz sonuçlarından elde edilen göreli kat ötelemesi oranları TBDY-2018 kapsamında binanın kesintisiz kullanımı (KK) için belirtilen sınır değeri 0.005'in oldukça altında kalmıştır. Göreli kat ötelemesi oranlarının katlara göre dağılımına bakıldığında, beklendiği gibi orta katlarda hemen hemen değişmediği; ancak en üst katta azaldığı sonucuna varılmıştır. Ortalama değerler açısından, göreli kat ötelemesi oranları tüm durumlar için 0.0015 değerini aşmamıştır.

Bu tez kapsamında ayrıca, DD-2 deprem düzeyi nominal limit değerlerine göre oluşturulan sismik izolasyonlu bina modelinin her durum için gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz sonuçlarına göre pik kat ivmeleri de değerlendirilmiştir. Pik ivmelerin katlara göre dağılımına bakıldığında, tüm durumlarda maksimum değere sismik izolasyonlu binalarda beklenen davranışa uygun olarak en üst kat seviyesinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Yer altı suyu seviyesi bulunup bulunmaması koşuluna göre pik kat ivmeleri incelendiğinde; DeepSoil tabanlı kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarının TBDY-2018 basit ölçeklendirme kapsamında gerçekleştirilen analiz sonuçlarından yaklaşık olarak %15 fazla olduğu belirlenmiştir. Ancak Plaxis 2D kayıtları ile yapılan analizlerin TBDY-2018 ile oldukça uyumlu olduğu sonucuna

varılmıştır. Her ne kadar ulusal ve uluslararası yönetmeliklerce belirtilmese de ivmeye duyarlı cihazlar deprem esnasında ve sonrasında fonksiyonel kalabilmesi için literatürde ve üretici firmalarca belirlenen 3 m/s^2 ivme limitinin altında kaldığı gözlemlenmiştir.

Yerel zemin etkilerinin dikkate alındığı zemin tepki analizlerinden elde edilmiş yüzey kayıtları ve basit ölçeklendirme yöntemi ile ölçeklendirilmiş kayıtların kullanıldığı farklı koşullara ait analizlerin sonuçları tüm veriler (taban deplasmanları, göreli kat ötelemesi oranı, kat ivmesi) açısından ayrı ayrı değerlendirildiğinde sismik yalıtım için kullanılan izolatör parametrelerinin izolasyonlu bina sismik davranışı üzerinde kayda değer bir fark yaratmadığı görülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Basit ölçeklendirilmiş kayıtların kullanıldığı analizlerde her iki doğrultuda elde edilen taban deplasmanları en büyük deprem yer hareketi (DD-1) alt sınır için belirlenen taban deplasmanı kapasitesi olan 329 mm'yi aşmamıştır. DeepSoil'den elde edilen temel seviyesi kayıtları ile gerçekleştirilen analizlerde yer altı suyu seviyesinden bağımsız olarak RSN14, RSN139 ve RSN359 no lu kayıtların taban deplasman talepleri TBDY-2018'e göre belirlenen taban deplasman kapasitesi sırasıyla 40 mm, 260 mm ve 15 mm aşılmıştır.
- Plaxis 2D geoteknik sonlu elemanlar yazılımı içerisinde gömülü bulunan zemin tepki analizi modülü ile yapılan analizlerden elde edilen temel seviyesi kayıtları ile yapılan analizler sonucu, RSN14 ve RSN139 için talep taban deplasmanları, kapasite taban deplasman değerini sırasıyla yaklaşık olarak 32 mm ve 145 mm aşmıştır. DeepSoil kaynaklı kayıtların kullanıldığı analiz sonuçlarına benzer şekilde; yer altı suyu seviyesinin varlığından bağımsız olarak sonuçlarda kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir.
- Hem basit ölçeklendirilmiş kayıtların hem de geoteknik yazılımlardan temel seviyesi kayıtlarının kullanıldığı kayıt için doğrusal olmayan zaman tanım alanındaki on bir analizin ortalaması tüm analizlerde TBDY-2018'de belirlenen kapasite taban deplasmanını her iki doğrultuda da aşmadığı sonucuna varılmıştır.
- DD-2 deprem düzeyi izolasyon üst limit parametreleri ile yapılan modelde basit ölçeklendirilmiş kayıtların kullanıldığı durumda maksimum göreli kat ötelemesi oranı % 0.18 değerine ulaşmış olup; TBDY-2018'de tanımlanan kesintisiz kullanım (KK) limit değeri olan % 0.5'i aşmamıştır.
- DD-2 deprem düzeyi izolasyon üst limit parametreleri ile yapılan modelde geoteknik yazılımlardan elde edilen temel seviyesi kayıtlarının kullanıldığı analiz sonuçları bir arada değerlendirildiğinde, maksimum göreli kat ötelemesi oranının % 0.165 olduğu görülmüştür. Bu değerin, bir önceki maddede belirtilen TBDY-2018 basit

ölçeklendirme esaslarına göre yapılan analiz sonuçlarından bir miktar düşük olduğu gözlemlenmiştir.

- DD-2 deprem düzeyi izolasyon nominal tasarımı yapılan modelde pik ivmelerin katlara göre dağılımına bakıldığında, tüm durumlarda maksimum değere beklendiği gibi en üst kat seviyesinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. TBDY-2018 basit ölçekli analizden elde edilen pik kat ivmesi X doğrultusunda ve RSN265 kaydı altında en üst katta 2.480 m/s^2'dir.
- Geoteknik yazılımlardan elde edilen temel seviyesi kayıtlarının kullanıldığı analiz sonuçları YASS'tan bağımsız olarak pik kat ivmeleri açısından değerlendirildiğinde, RSN 139 kaydı altında yaklaşık olarak 2.5 m/s^2 olduğu görülmüştür. Ancak Plaxis 2D geoteknik sonlu elemanlar yazılımından elde edilen pik ivme değeri DeepSoil'e göre YASS'tan bağımsız olarak aynı kayıtta %20 azalarak yaklaşık 2 m/s^2 olarak hesaplanmıştır.
- On bir kayda ait her kattaki pik ivme değerlerinin ortalamaları tüm durumlar için karşılaştırıldığında; TBDY-2018 basit ölçeklendirme yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçları ile Plaxis 2D analiz sonuçlarının YASS'tan bağımsız olarak yakınsadığı görülmüştür. Bununla birlikte, DeepSoil temel seviyesi kayıtları ile yapılan analizlere ait ortalama kat ivme değerleri diğer iki durumda elde edilen ortalama pik kat ivmelerinden büyük kalmıştır.

Ülkemizde özellikle son 20 yılda meydana gelen yıkıcı depremlerde yapısal bütünlüğü korumak ve böylece can kayıplarının önüne geçebilmek için günümüzde alternatif bir yöntem olan sismik izolasyon sistemlerine olan talep artmaktadır. Ancak izolasyonlu yapıların tasarımı, inşaat mühendisliği alanının ileri seviye konuları kapsamındadır. Binanın yapılacağı sahaya özgü deprem kayıtlarının seçimi, yerel zemin koşullarının dikkate alınarak zemin-yapı etkileşim analizlerinin yapılması gibi konular hassasiyetle değerlendirilmelidir.

Bu çalışmada, deprem kayıtlarının tabandan etki ettirilerek bina temellerinin yerleştirildiği temel seviyesine kadar zemin ortamında dinamik (sismik) yükler altında davranışının modellenmesi uygun geoteknik karakterizasyonu yapılarak dahil edilmiştir.

Bu çalışmanın devamı niteliğinde, TBDY-2018 Bölüm 14 kapsamında belirtilen yerel zeminin sınıfı ZD'den daha zayıf olduğu durumlarda üç boyutlu dinamik yapı-zemin etkileşim hesaplarının yapılması gerekliliği nedeniyle sıvılaşma potansiyeli olmayan ZD zemin sınıfına

ait gerçek bir zemin profilinde analizler tüm koşullar altında tekrarlanarak sonuçların değerlendirilme aşamasına geçilmiştir.

KAYNAKLAR

Albaş, M.Y., 2021, *TBDY 2018'e göre sismik yalıtımlı yapının tasarlanması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Alhan, C., Öncü-Davas, S., 2016, Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes, *Engineering Structures*, 116, 83-94.

Alpan ,1970, "The geotechnical properties of Soils", Earth-Science Reviews 6:5-49

Ansal, A., Kurtuluş, A., Tönük, G., 2010, Seismic microzonation and earthquake damage scenarios for urban areas, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1319-1328.

ASCE/SEI-7-10, 2010, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, *American Society of Civil Engineers*, Virginia /ABD.

Ateş, Ş., Yurdakul, M., ,2011, Site-response effects on RC buildings isolated by triple concave friction pendulum bearings, *Computers and Concrete*, 8, 693-715. https://doi.org/10.12989/CAC.2011.8.6.693.

Atik, L., Abrahamson, N., 2010, "An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching" *Earthq. Spectra* 26, 601–617.

Bhandari, M., Bharti, S., Shrimali, M., Datta, T., 2018, The Numerical Study of Base-Isolated Buildings Under Near-Field and Far-Field Earthquakes , *Journal of Earthquake Engineering*, 22, 1007 - 989. https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1269698.

Bonilla, L. F., Tsuda, K., Pulido, N., Régnier, J., Laurendeau, A., 2011, Nonlinear site response evidence of K-NET and KiK-net records from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, planets and space*, 63, 785-789.

Borcherdt, R. D., 1970, Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29-61.

Borcherdt, R. D., 1994, Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification), *Earthquake spectra*, 10(4), 617-653.

Borcherdt, R. D., Glassmoyer, G., 1992, On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California, *Bulletin of the seismological society of America*, 82(2), 603-641.

Bouc, R., 1967, Forced vibration of mechanical systems with hysteresis, *Proceedings of the Fourth Conference on Non-linear oscillation*, Prague, Czechoslovakia.

Cara, F., Cultrera, G., Azzara, R. M., De Rubeis, V., Di Giulio, G., Giammarinaro, M. S., Tosi, P., Vallone, P., Rovelli, A., 2008, Microtremor measurements in the City of Palermo, Italy: Analysis of the correlation between local geology and damage, *Bulletin of the Seismological Society of America*. https://doi.org/10.1785/0120060260

Castaldo, P., & Ripani, M., 2016, Optimal design of friction pendulum system properties for isolated structures considering different soil conditions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 74-87.

Castellaro, S., Mulargia, F., Rossi, P. L., 2008, VS30: Proxy for seismic amplification?., *seismological research letters*, 79(4), 540-543.

Chen, Q., Gao, G., Yang, J., 2011, Dynamic response of deep soft soil deposits under multidirectional earthquake loading, *Engineering Geology*, 121, 55-65. https://doi.org/10.1016/J.ENGGEO.2011.04.013.

Constantinou, M. C., 2004, Friction Pendulum Double Concave Bearing, University at Buffalo State University of New York, Buffalo, NY

Darendeli M.B., 2001, *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, 362 pp.

Darüş, F., 2020, *Yerel Zemin Sinifi Ve Deprem Özelliklerinin Tek Boyutlu Dinamik Davranışa Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Darwish, A. Q., Bhandari, M., 2022, Vibration response reduction of seismic forces using lead rubber bearing isolators in composite buildings, *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 10(4), 1309-1324.

Dynamic Isolation Systems, 1994, **http://www.dis-inc.com/**, [Ziyaret Tarihi: Kasım 2022].

Du, W., Pan, T., 2016, Site response analyses using downhole arrays at various seismic hazard levels of Singapore, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 90, 169-182. https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2016.08.033.

Feyizoğlu T., 2020, *Yerel Zemin Sinifi Ve Deprem Özelliklerinin Tek Boyutlu Dinamik Davranişa Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

GEOSAN, 2020, "ÇOMÜ Yurt Binası Yerine Ait Zemin Etüt Çalışması Veri Raporu"

Güner, G., 2012, *Bir Hastane Yapısının Klasik Yöntemle Ve Sismik İzolatör Kullanılarak Tasarımının Dinamik Yönden Karşılaştırılmasının Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Hadian, A., Mutalib, A., Baharom, S., 2013, Seismic Behaviour Of Base Isolation System Using Lead Rubber Bearing , *Journal of Teknology*, 65, 79-88. https://doi.org/10.11113/JT.V65.2195.

Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatıs, A., Mccoy, E., ve Mendıs, R., 2006, An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion using Wavelets, *Journal of Earthquake Engineering*, 10(spec01), 67-89.

Hardin, B. O. & Drnevich , V. P., 1972a, Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. *Journal o f the Soil Mechanics and Foundations Division,* Haziran, Issue 98, pp. 603-624.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Okan, I., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D.R., Phillips, C.A., and Park, D., 2020, "DEEPSOIL 7.0, User Manual",Urbana,IL,*Board of Trustees of University of Illinois at Urbana*-Champaign.

Hassan, A., Pal, S., 2018, Effect of soil condition on seismic response of isolated base buildings, *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10(3), 249-261.

Hassal, M. E., 2011, Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi, *İTÜ Dergisi*, 2011, 47–56.

İyisan, R., Haşal, M. E., 2011, Zemin büyütmesi ve yerel koşulların spektral ivmeye etkisi, *Itü dergisi*, 2011, 47–56.

Kelly, T.E., 2001a, *Base Isolation of Structures - Design Guidelines*, Holmes Consulting Group, available from www.holmesgroup.com.

Kramer, S. L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall.

Kokusho, T., Sato, K., 2008, Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array strong motion records, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(9), 707-716.

Komodromos, P., 2000, Seismic isolation for earthquake-resistant structures, *WIT Press*, 1-85312-803-1.

Lee, D., Medland, I., 1979, Base isolation systems for earthquake protection of multi-storey shear structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 7, 555-568. https://doi.org/10.1002/EQE.4290070605.

Lee, V. W., Trifunac, M. D., 2010, Should average shear-wave velocity in the top 30 m of soil be used to describe seismic amplification?, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1250-1258.

Livaoğlu, H., Irmak, T. S., Güven, I. T., 2019, Seismic vulnerability indices of ground for Değirmendere (Kocaeli Province, Turkey). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 507–517. https://doi.org/10.1007/s10064-017-1102-8

Lu, L.Y., Lin, G.L., Kuo, T.C., 2008, Stiffness controllable isolation system for near-fault seismic isolation, *Engineering Structures*, 30(3), 747-765.

Matasovic, Neven, and M. Vucetic (1995) "Generalized Cyclic Degradation-Pore Pressure Generation Model for Clays," *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,Vol. 121, No. 1, pp 33-42.

Matsagar, V. A., Jangid, R. S., 2004, Influence of isolator characteristics on the response of base-isolated structures, *Engineering structures*, 26(12), 1735-1749.

Monaco, P., Totani, G., Totani, F., Grasso, S., Maugeri, M., 2011, Site effects and site amplification due to the 2009 Abruzzo earthquake, *WIT Transactions on the Built Environment*, 120, 29-40. https://doi.org/10.2495/ERES110031.

Mucciarelli, M., Gallipoli, M. R., 2006, Comparison between Vs30 and other estimates of site amplification in Italy, *In First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.*

Murat, E., 2007, *Binaların Tabanlarına Elastomer Mesnetler Yerleştirerek Sismik Yalıtım Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Naeim, F., Kelly, J.M., 1999, *Design of Seismic Isolated Structures*, John Wiley &Sons Inc, USA.

Nakamura, Y., 1989, A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, Vol. 30, No.1.

Nogoshi, M. and Igarashi, T., 1971, On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2) (in Japanese with English abstract), *Jour. Seism. Soc. Japan*, 24, 26-40.

Park, D., Hashash, Y. M., 2004, Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, 8(02), 249-274.

Park, K., Ok, S., 2015, Optimal design of hybrid control system for new and old neighboring buildings, *Journal of Sound and Vibration*, 336, 16-31. https://doi.org/10.1016/J.JSV.2014.09.044.

PEER, 2019, Pacific Earthquake Engineering Resource Center: NGA West-2 kuvvetli yer hareketi veritabanı, http://ngawest2.berkeley.edu/ , [Ziyaret Tarihi: Mart 2022].

Peker, F. Ü., Işık, E., 2021, TBDY-2018'deki Yerel Zemin Koşullarının Çelik Yapı Deprem Davranışına Etkisi Üzerine Bir Çalışma, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, c. 10, sayı. 3, ss. 1125-1139, doi:10.17798/bitlisfen.915996.

Priestley M.J.N., Calvi, M.C., and Kowalsky, M.J., 2007, *Displacement-Based Seismic Design of Structures IUSS Press*, Pavia, , 670 pp.

Ramallo, J. C., Johnson, E. A., Spencer Jr, B. F., 2002, Smart base isolation systems, *Journal of Engineering Mechanics*, 128(10), 1088-1099.

Regnier, J., F. Bonilla, A. M. Duval, J. F., Semblat, E. Bertrand, 2011, "Revisiting V_{s30} as a proxy parameter for site effects: a case study using KiK-net data", *Proceedings of the Fifth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile, 10-13 Jan.

Richins, B. D., 2011, *Evaluation and Seismically isolated Substructure redesign of a typical multi-span pre-stressed concrete girder highway bridge*, Thesis (MSc), Utah State University, Civil and Environmental Engineering, Utah, USA.

Rodriguez-Marek, A., Bray, J., 2006, Seismic Site Response for Near-Fault Forward Directivity Ground Motions, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132, 1611-1620. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:12(1611).

Rodriguez-Marek, A., Bray, J., Abrahamson, N., 2001, An Empirical Geotechnical Seismic Site Response Procedure, *Earthquake Spectra*, 17, 65 - 87. https://doi.org/10.1193/1.1586167.

Sarğın, S., 2019, *Zeminlerin rijitlik ve sönümleme davranışının tanımlanması ve nümerik modellemede kullanılması*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

SeismoSoft, 2018, "Seismo Match Earthquake Software for Response Spectrum Matching" (çevrimiçi), İndirilen websitesi:https://seismosoft.com/products/seismomatch/, [Ziyaret Tarihi: Mart 2022].

Sevim, E., 2016, *Sismik İzolatörlerin Bina Türü Yapıların Dinamik Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Steidl, J. H., 2000, Site response in southern California for probabilistic seismic hazard analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6B), S149-S169.

Steven, K., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, ISBN 0-13374943-6.

Şafak, E., 2001, Local site effects and dynamic soil behaviour, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21, s.453-458.

Taflanidis, A. A., Jia, G., 2011, A simulation-based framework for risk assessment and probabilistic sensitivity analysis of base-isolated structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 40(14), 1629-1651.

Tafheem, Z., Arafat, T., Chowdhury, A., Iqbal, A., 2017, Effect Of Base Isolator On The Structural Response Of Reinforced Concrete Multistoreyed Building Under Seismic Loads, *Journal of Civil Engineering, Science and Technology*, 8, 49-56. https://doi.org/10.33736/jcest.378.2017.

TDTH, 2018, Türkiye Deprem Tehlikesi Haritaları, AFAD-2018, https://tdth.afad.gov.tr, [Ziyaret Tarihi: Mart 2023].

Türker, H., 2005, Sismik İzolasyon Sistemlerinin Kullanılış Tipleri Örnek Bir Maliyet Analizi, *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, Mart 2005 Kocaeli, Bildiriler Kitabı, 538-545.

TBDY, 2018, *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı-Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara.

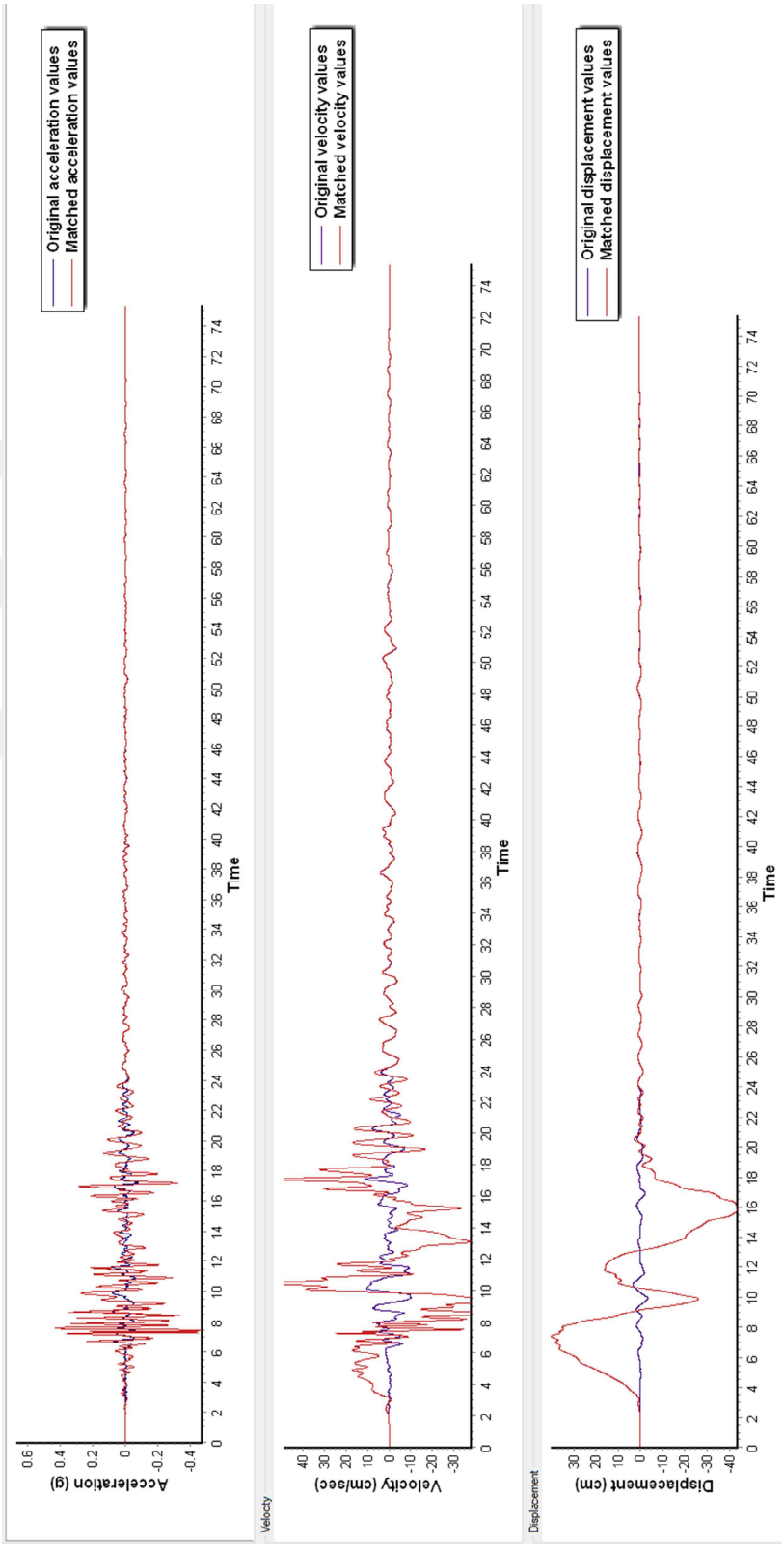
Özpalanlar, G., 2004, *Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımında Sismik İzolasyon Ve Enerji Sönümleyici Sistemler*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Wieland, M., Pittore, M., Parolai, S., Zschau, J., Moldobekov, B., Begaliev, U., 2012, Estimating building inventory for rapid seismic vulnerability assessment: Towards an integrated approach based on multi-source imaging, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 36, 70-83.

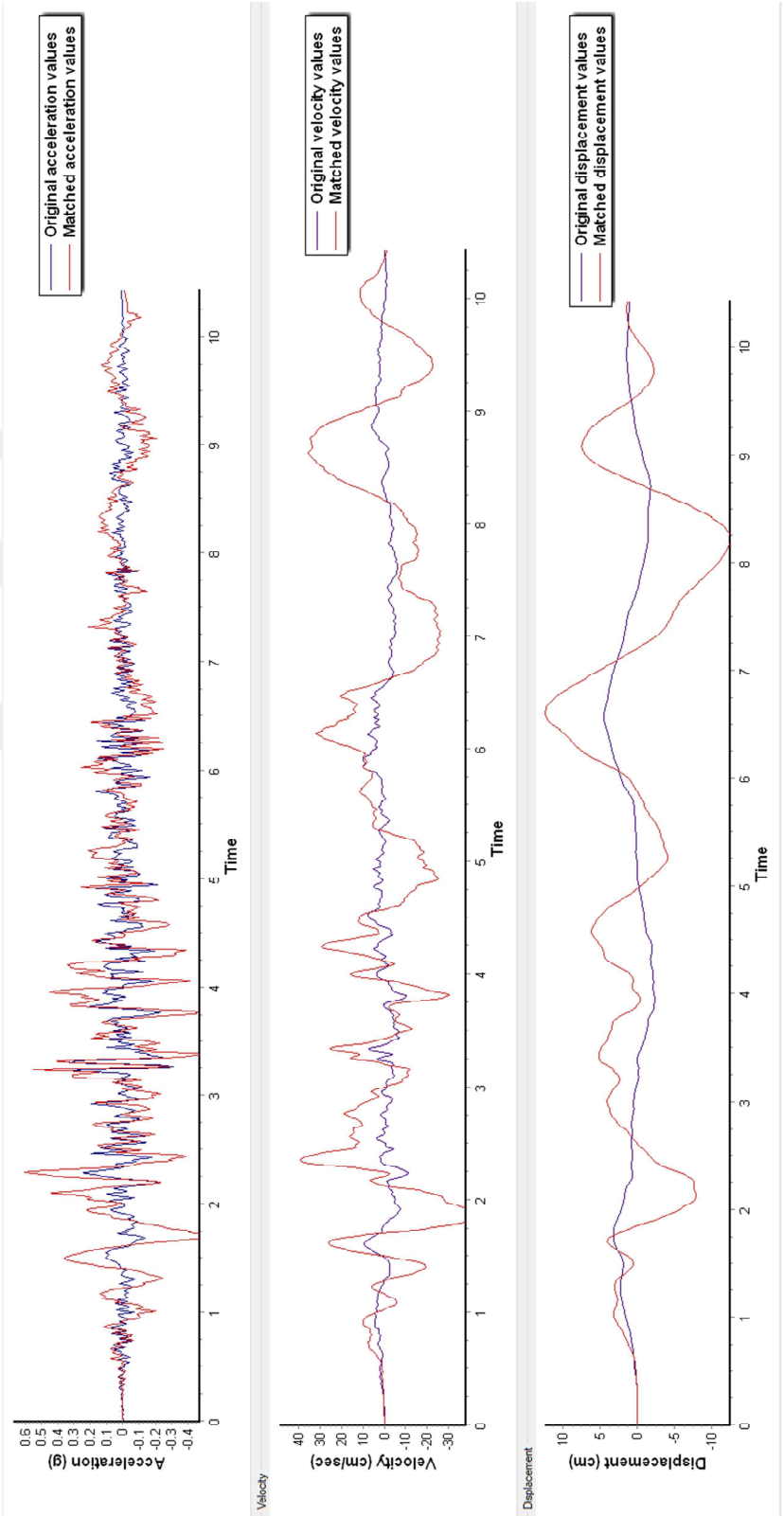
Wen, Y. K., 1976, Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of the engineering mechanics division*, 102(2), 249-263.

EKLER

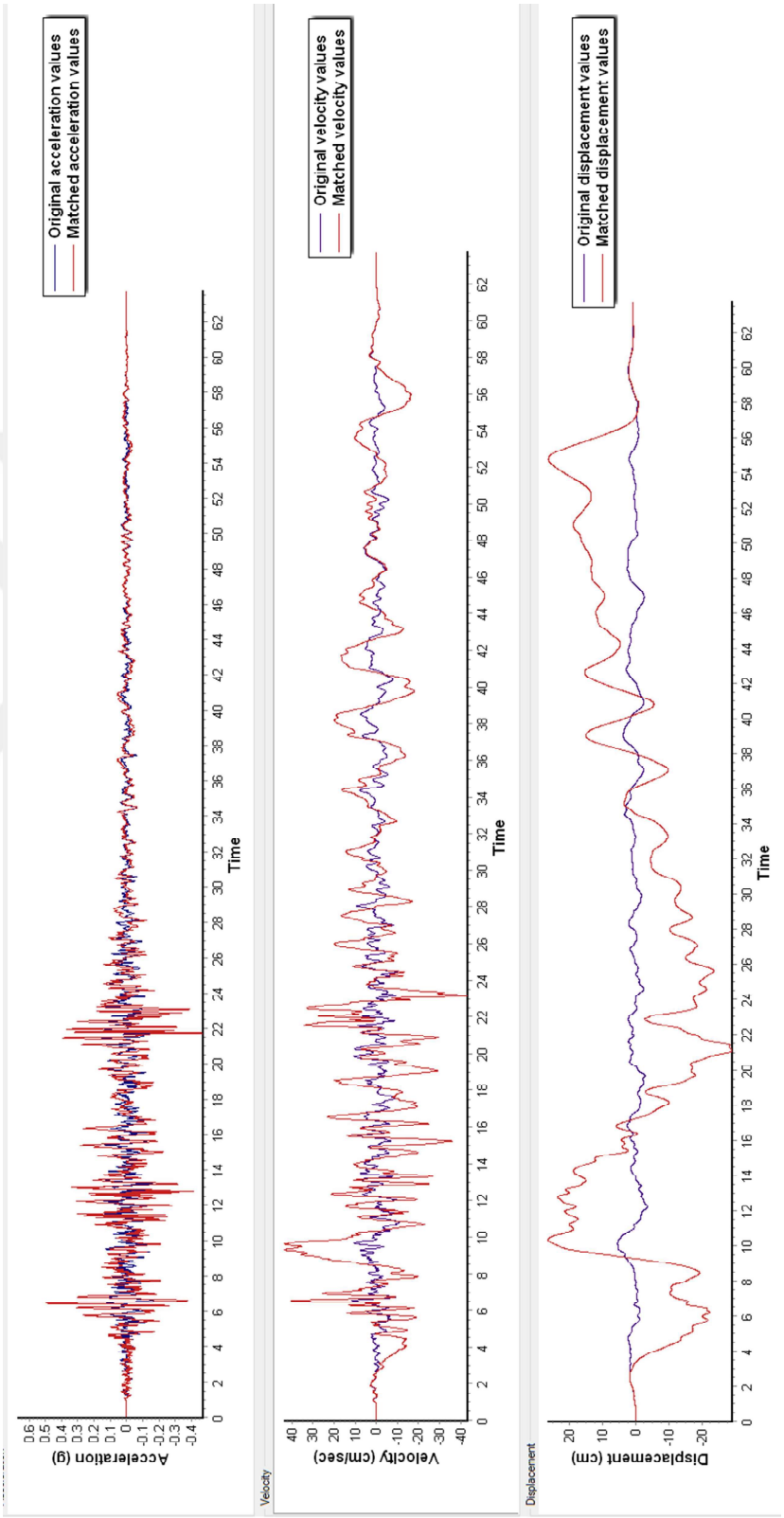
EK-1: TBDY-2018, DD-1 Tasarım Spektrumuna Tam Ölçekli ve Orijinal Kayıtların X-1 doğrultusunda İvme-Zaman, Hız-Zaman, Deplasman-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması



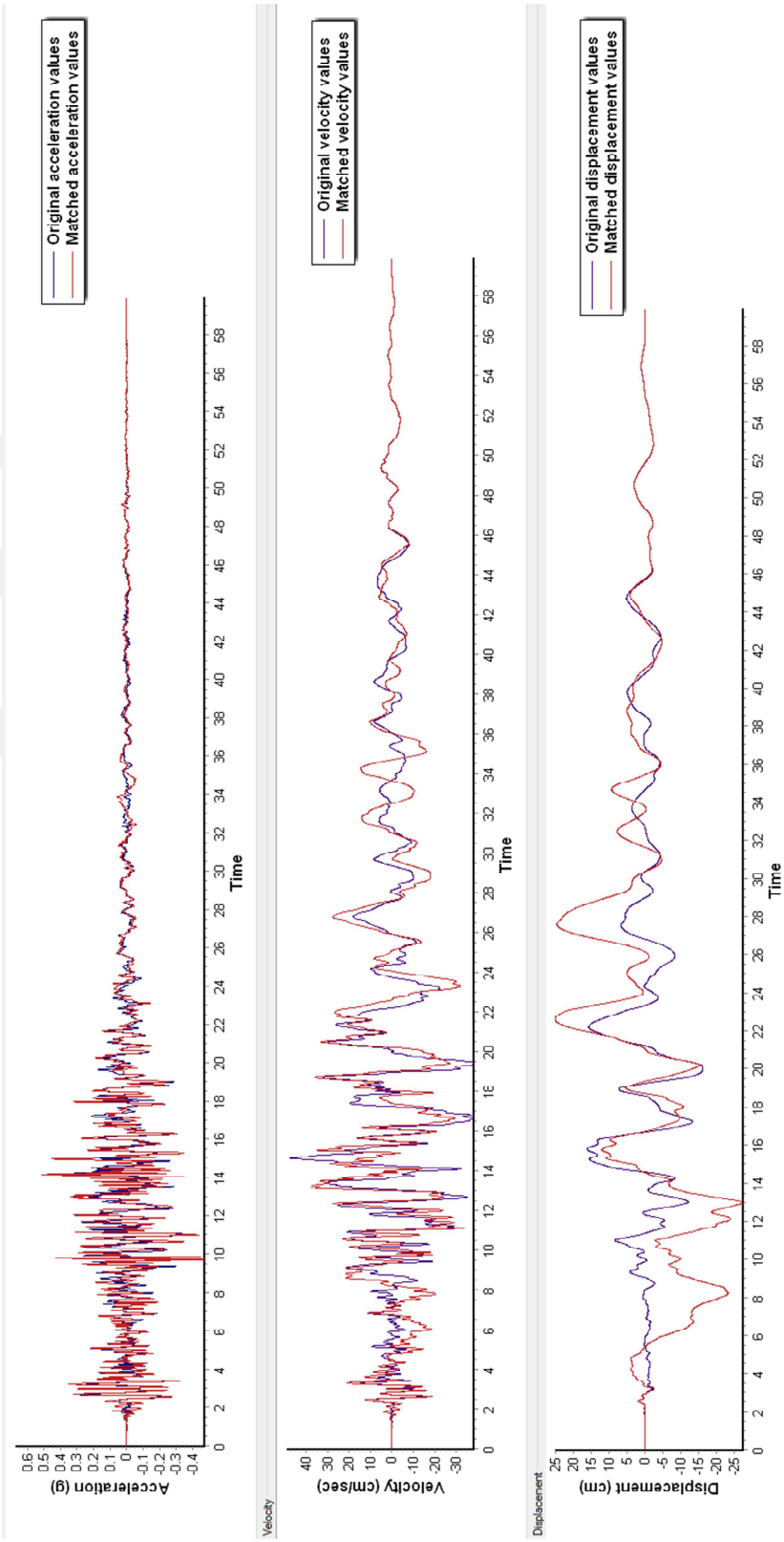
Şekil Ek-1.1: RSN14_KERN_SBA042 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



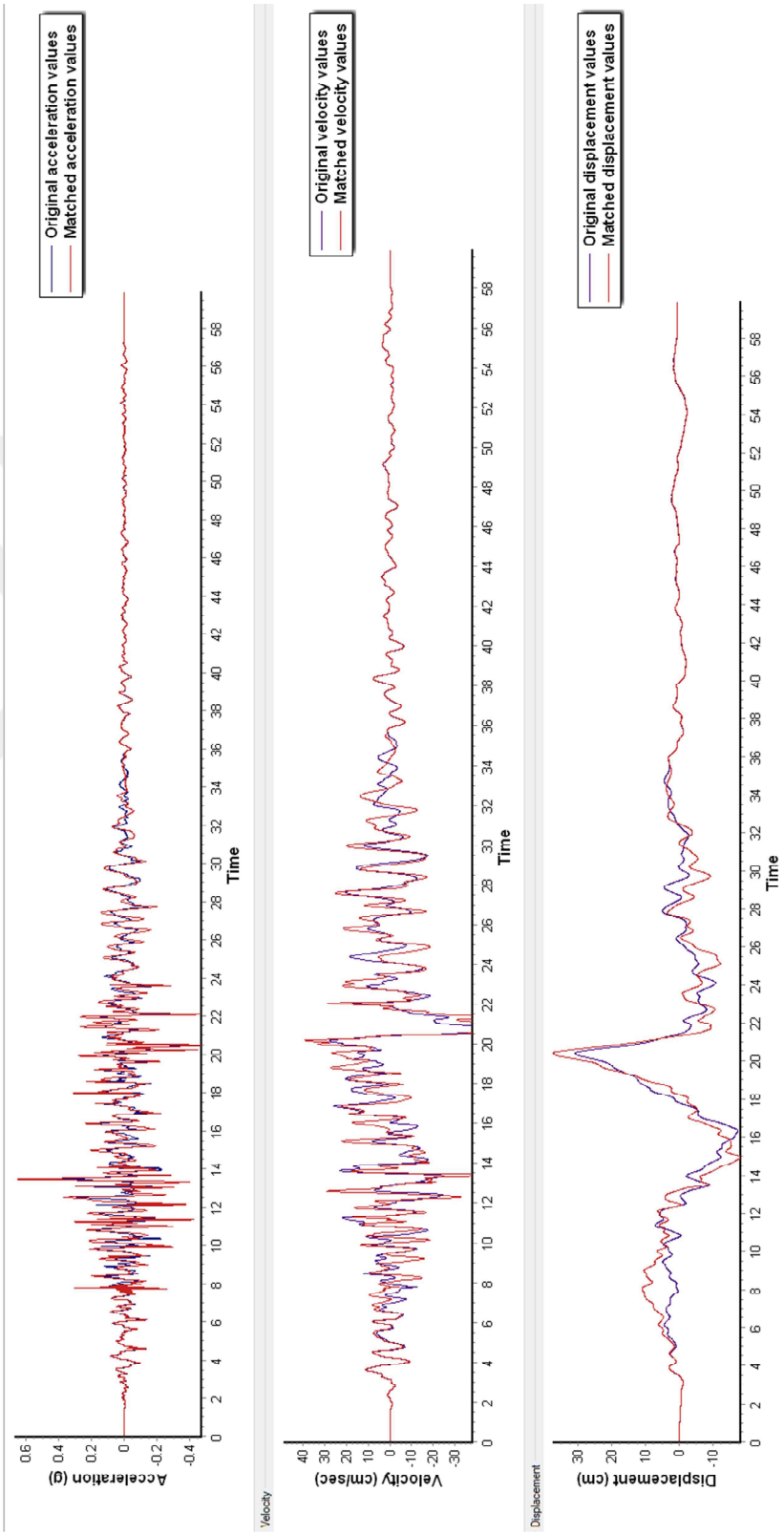
Şekil Ek-1.2: RSN139_TABAS_DAY_L1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



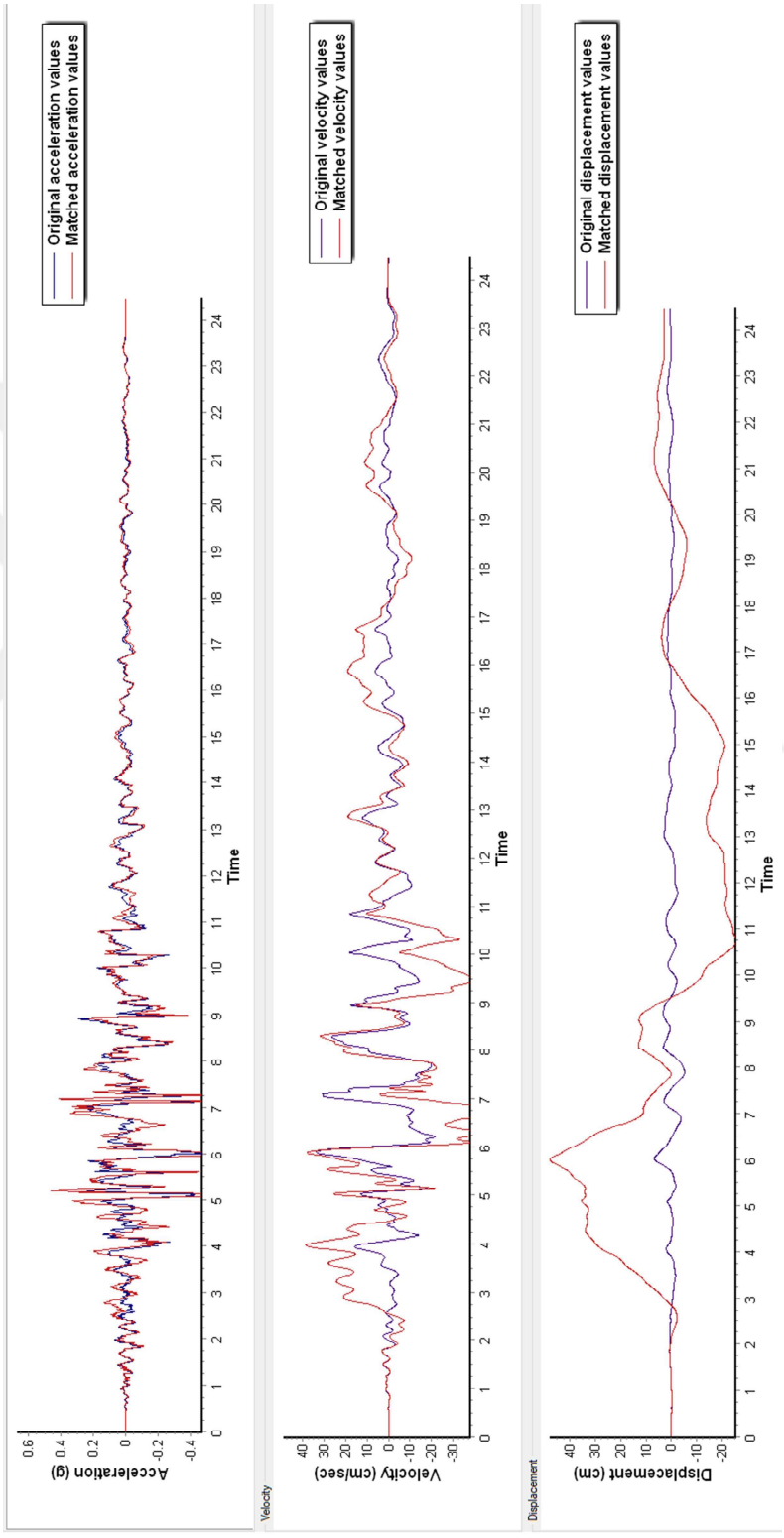
Şekil Ek-1.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPET147 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



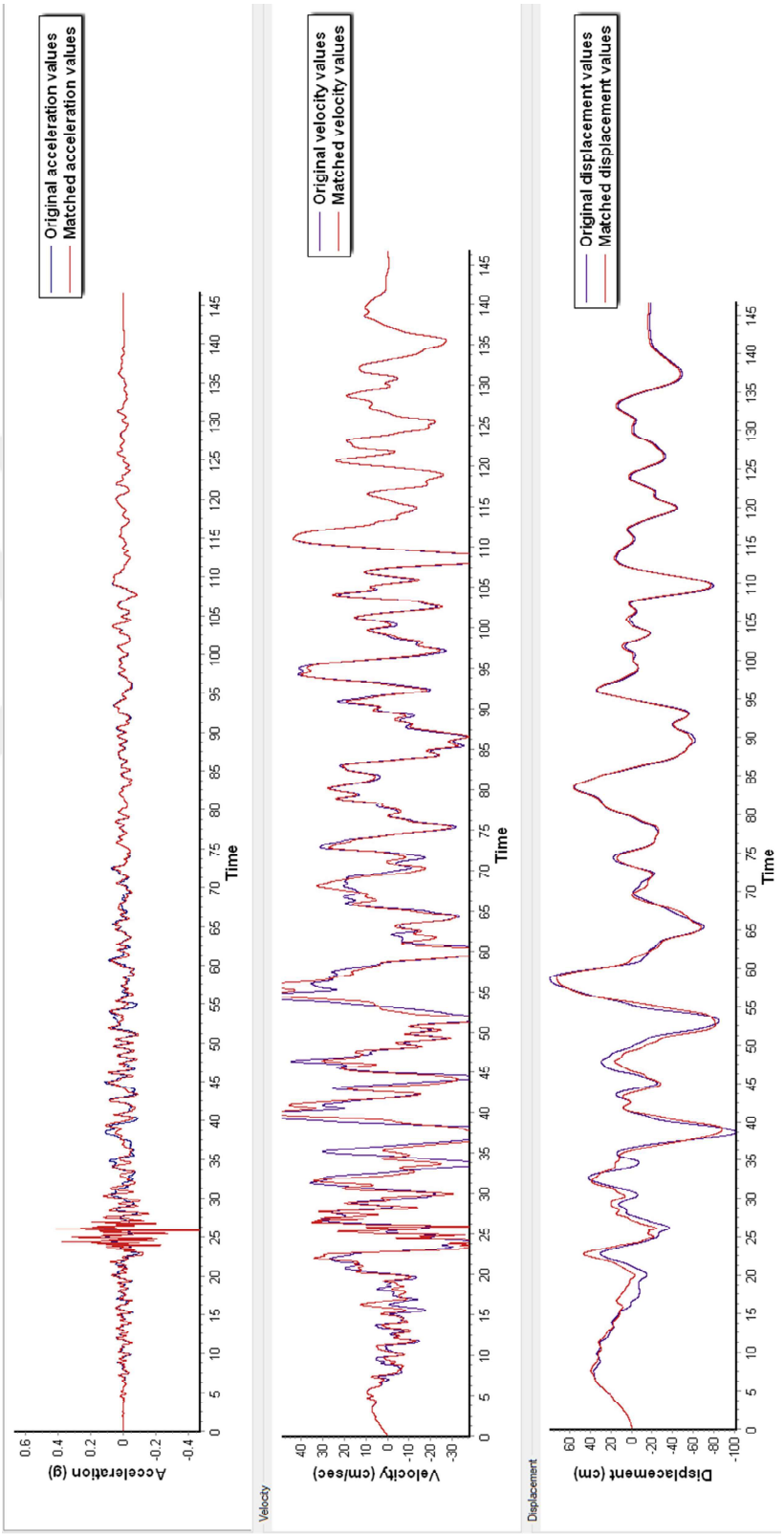
Şekil Ek-1.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



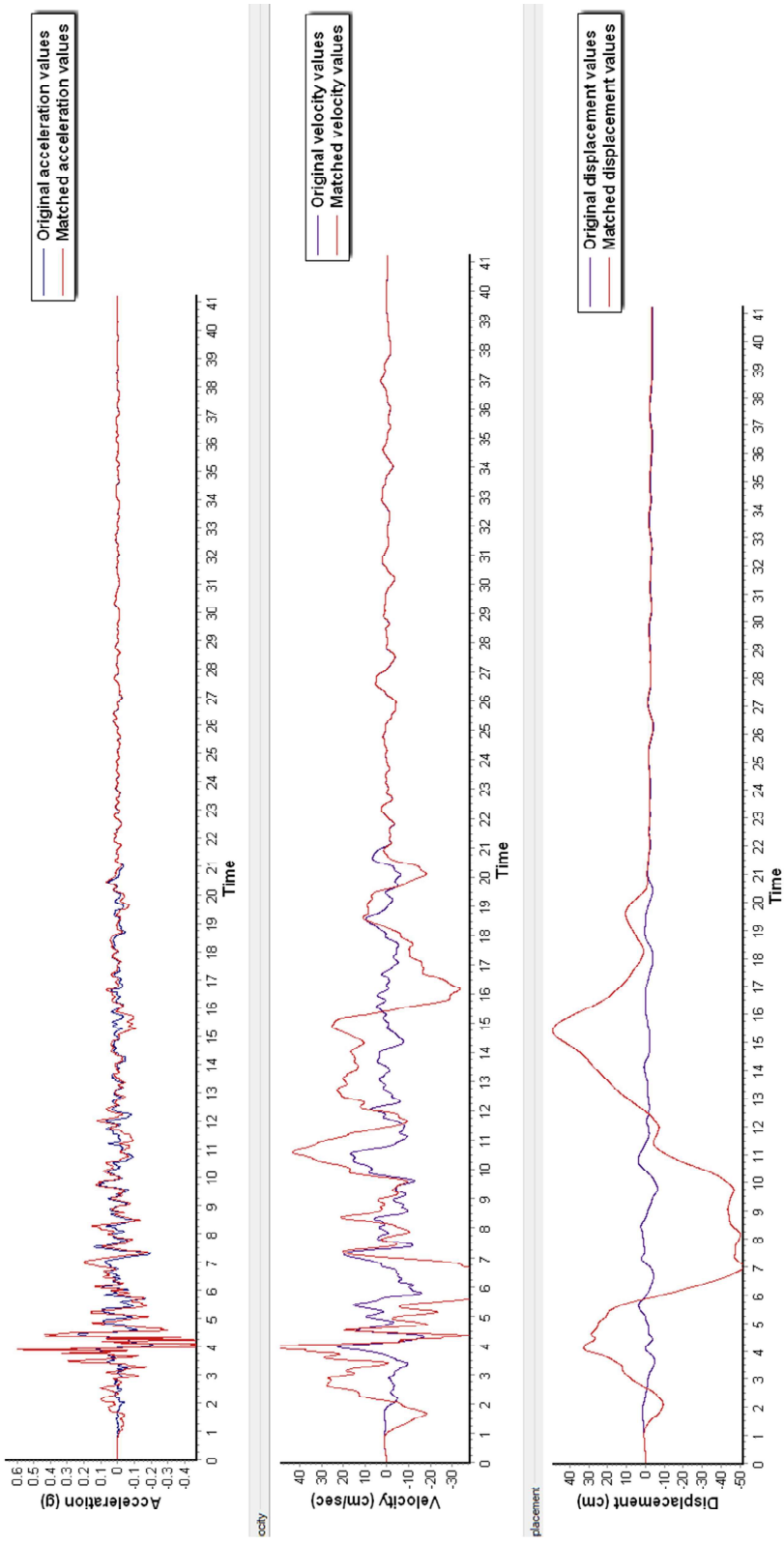
Şekil Ek-1.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



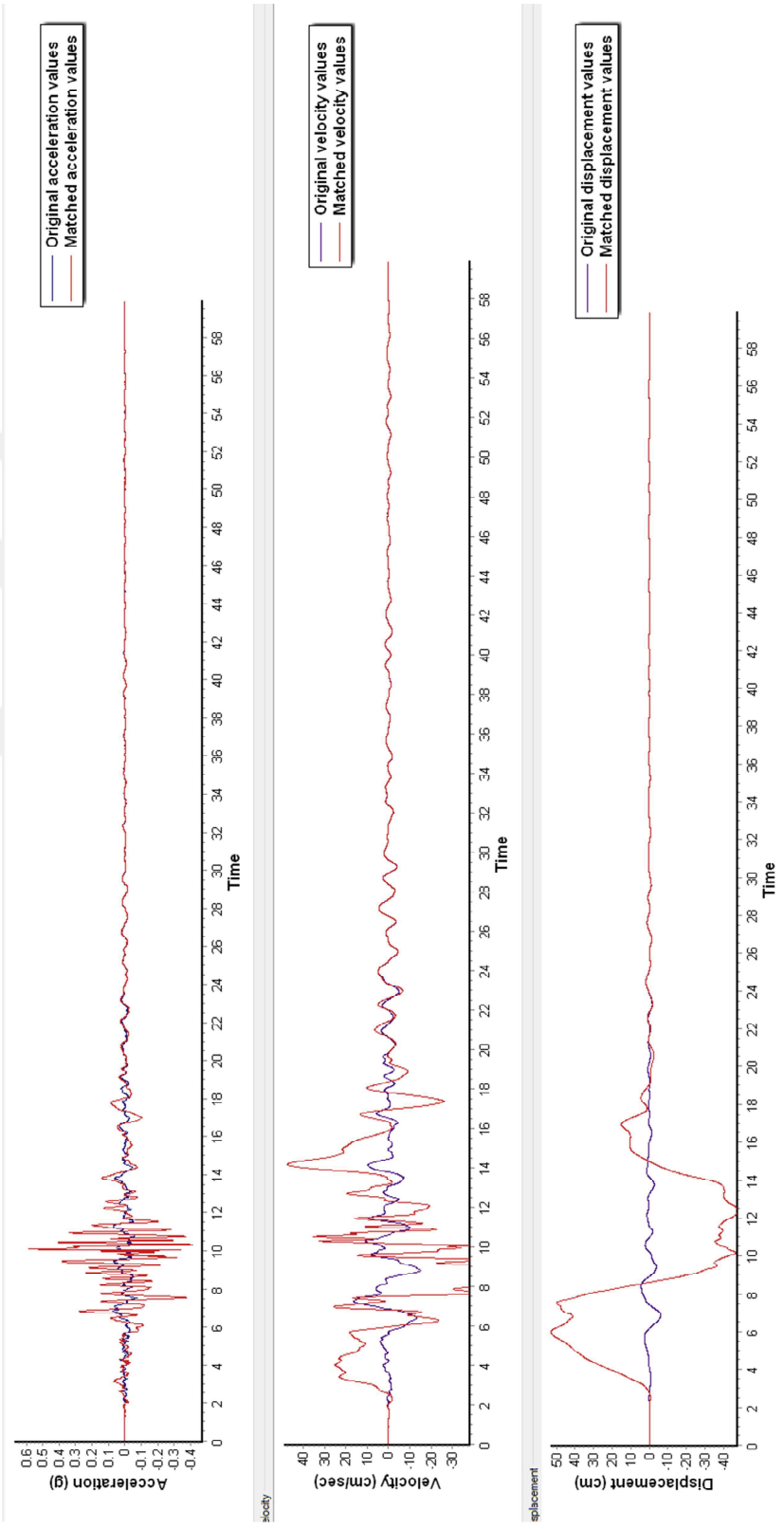
Şekil Ek-1.6: RSN265_VICT_CPE045 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



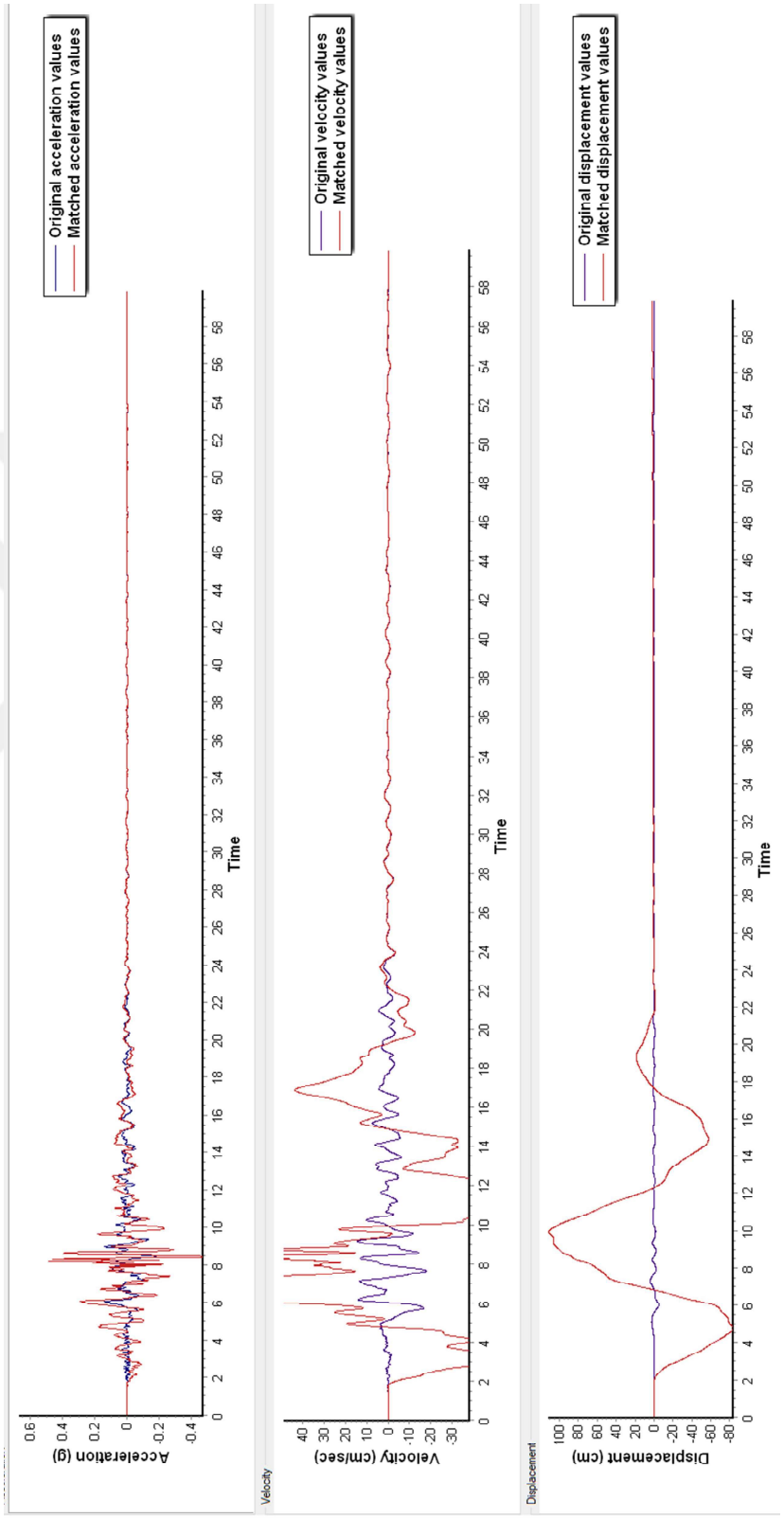
Şekil Ek-1.7: RSN289_ITALY_A-CTR000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



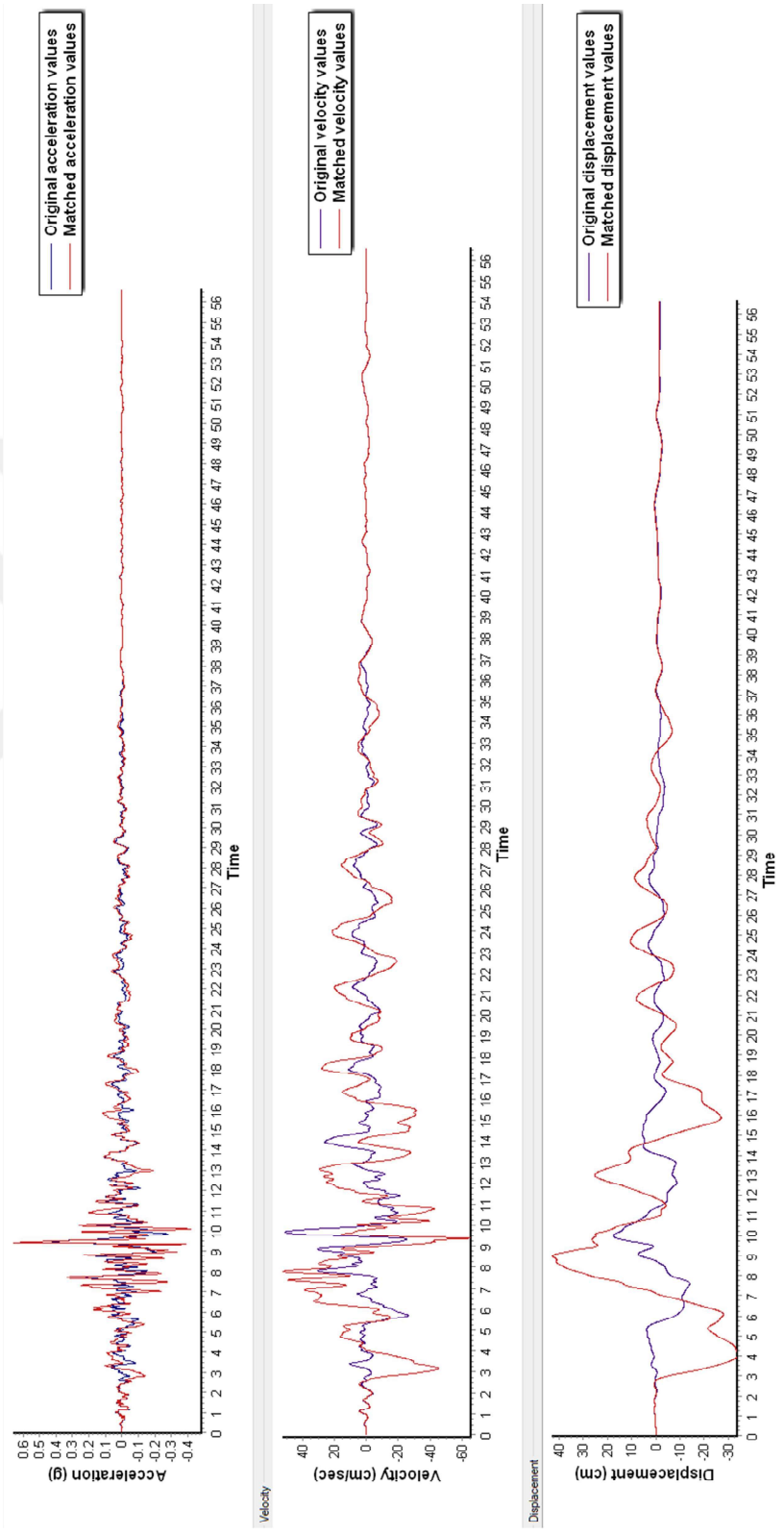
Şekil Ek-1.8: RSN313_CORINTH_COR--L no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-1.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

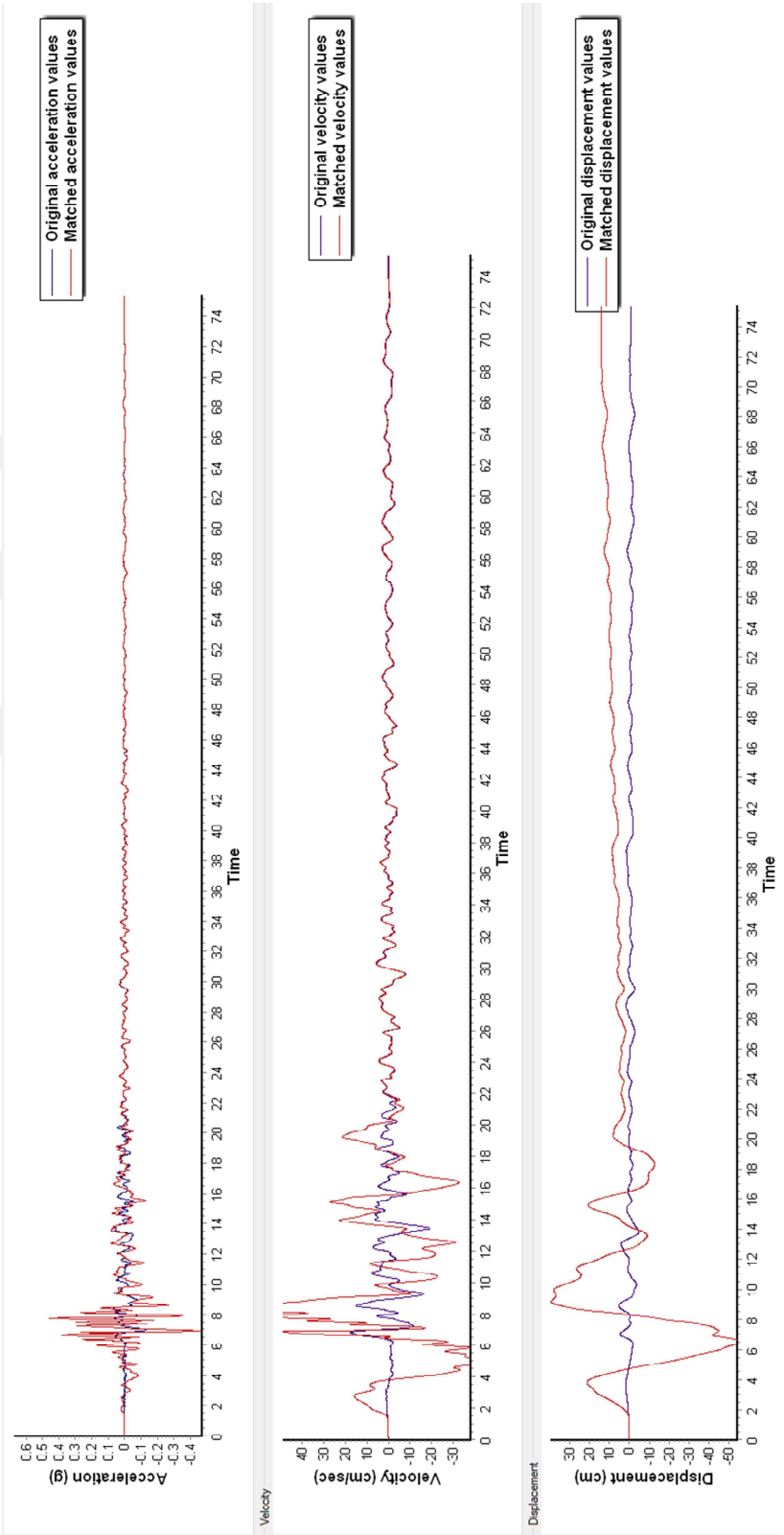


Şekil Ek-1.10: RSN359_COALINGA.H_H-PV1000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

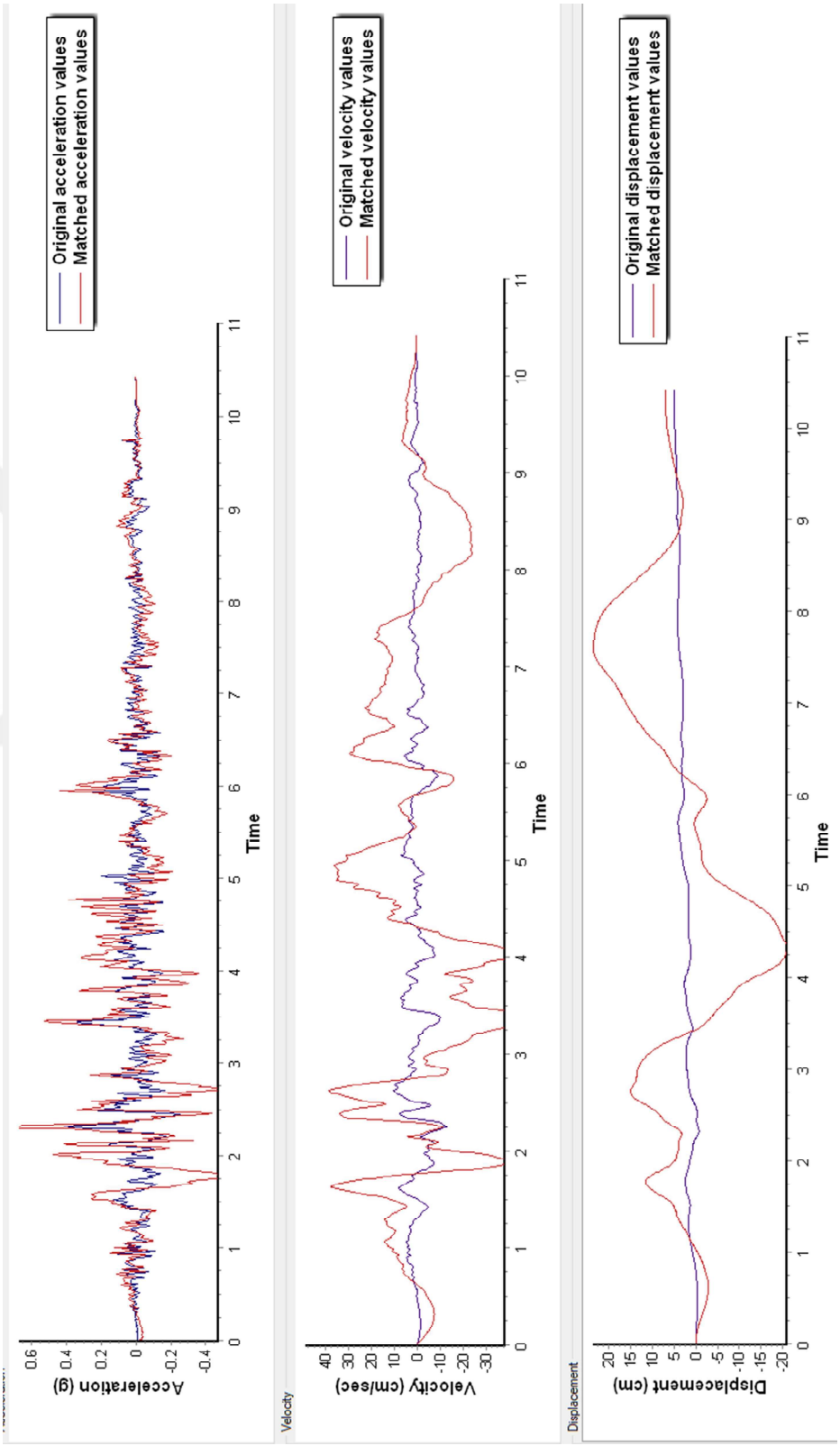


Şekil Ek-1.11: RSN448_MORGAN_AND250 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

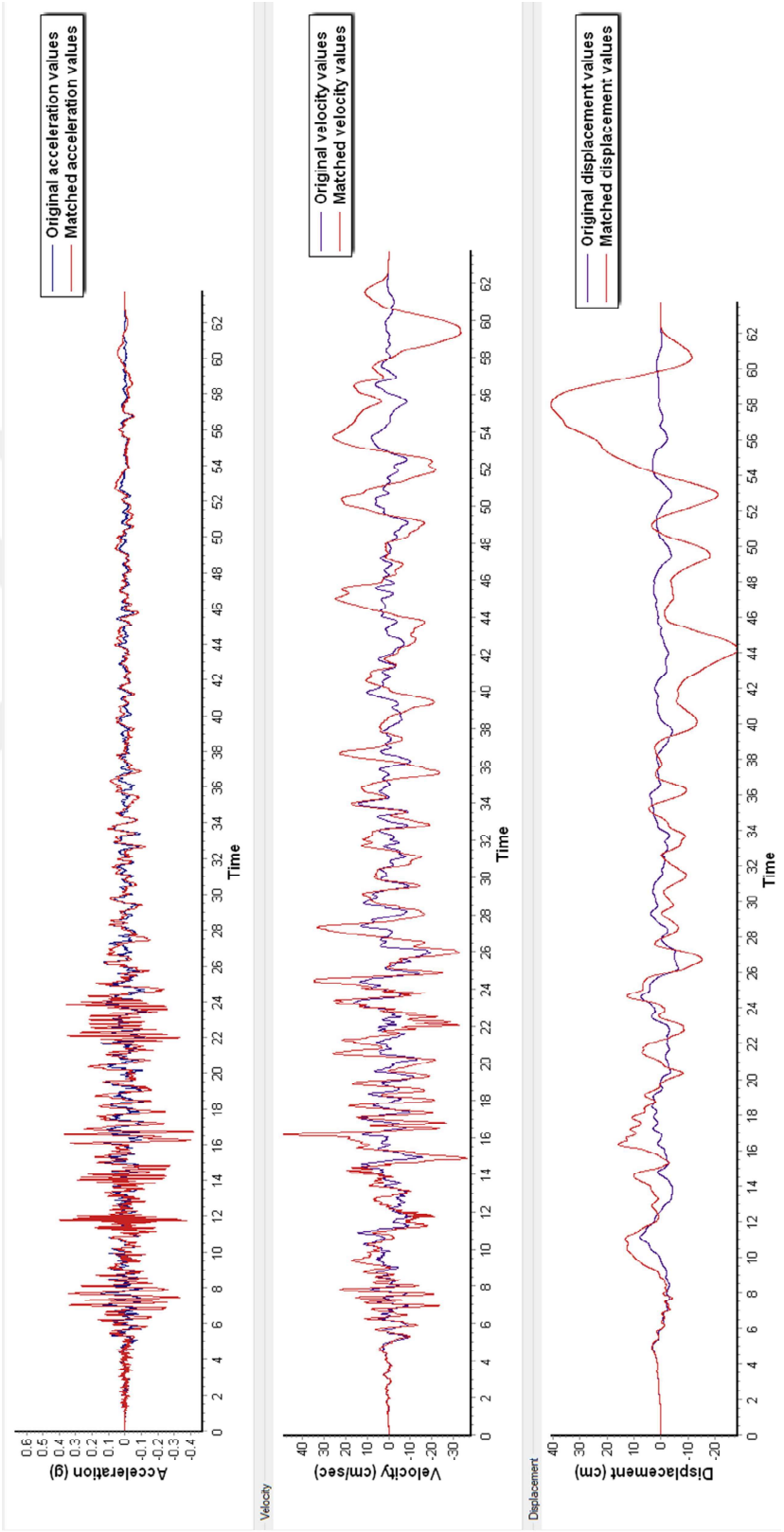
EK-2: TBDY-2018, DD-1 Tasarım Spektrumuna Tam Ölçekli ve Orijinal Kayıtların X-2 doğrultusunda İvme-Zaman, Hız-Zaman, Deplasman-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması



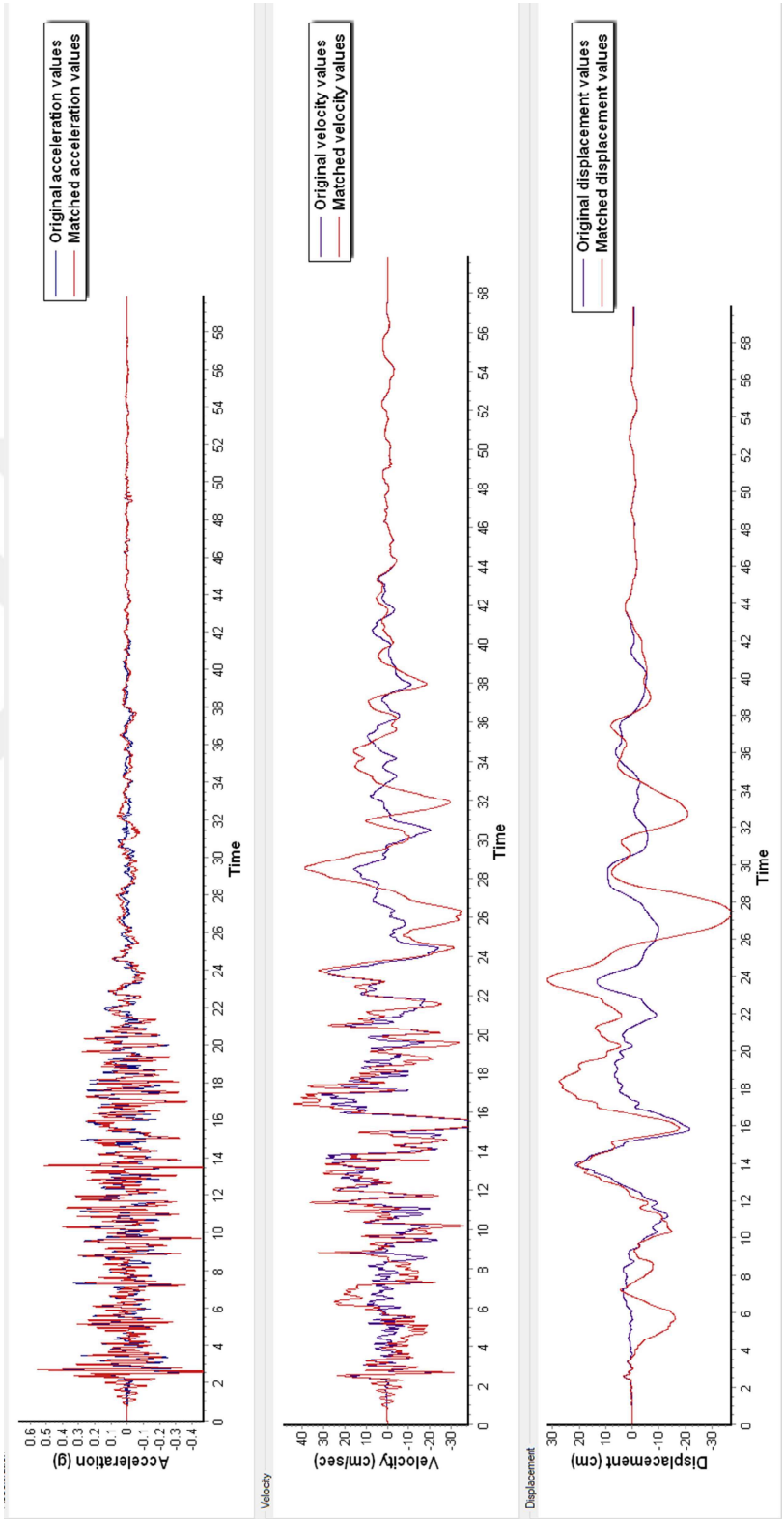
Şekil Ek-2.1: RSN14_KERN_SBA132 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



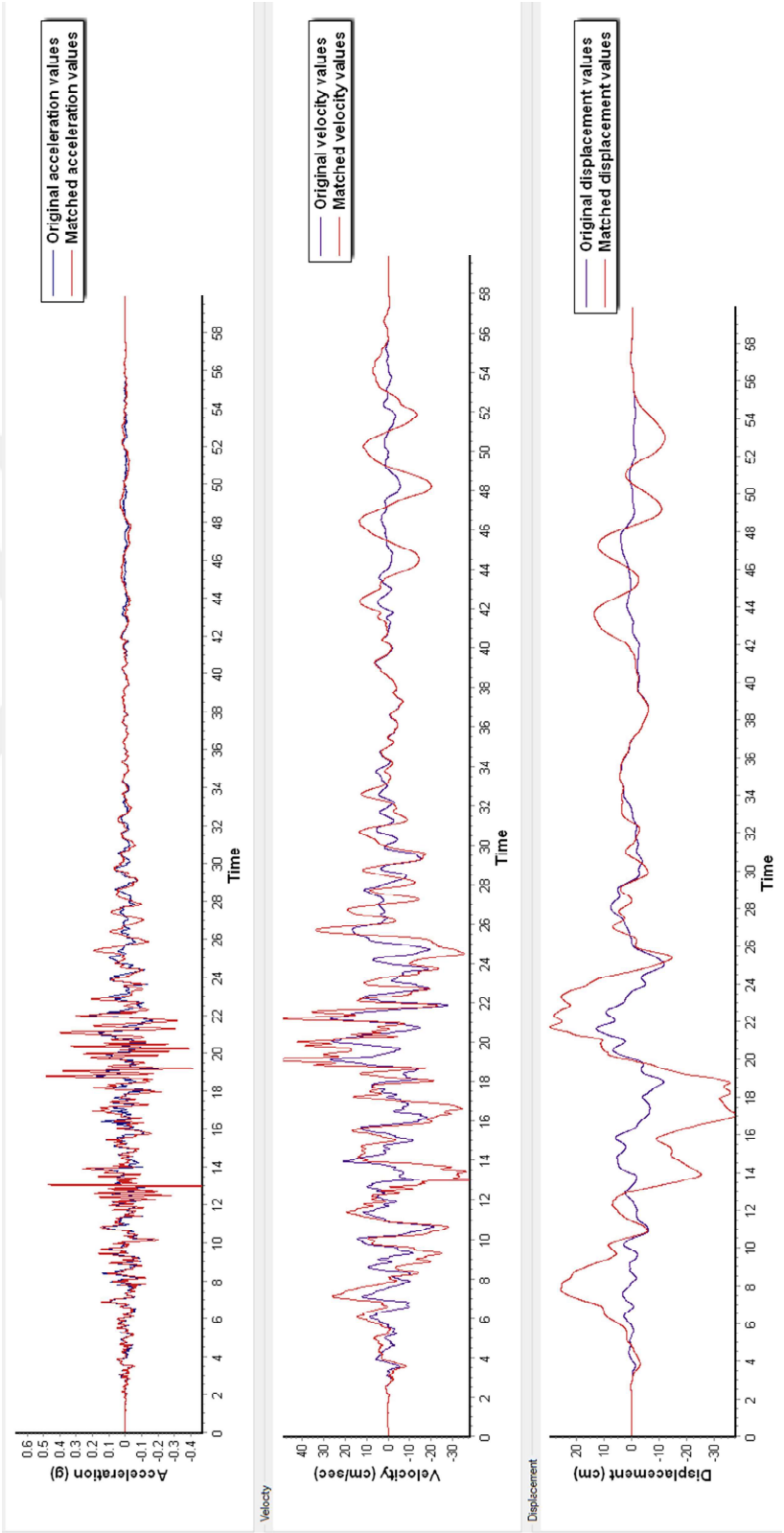
Şekil Ek-2.2: RSN139_TABAS_DAY-T1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



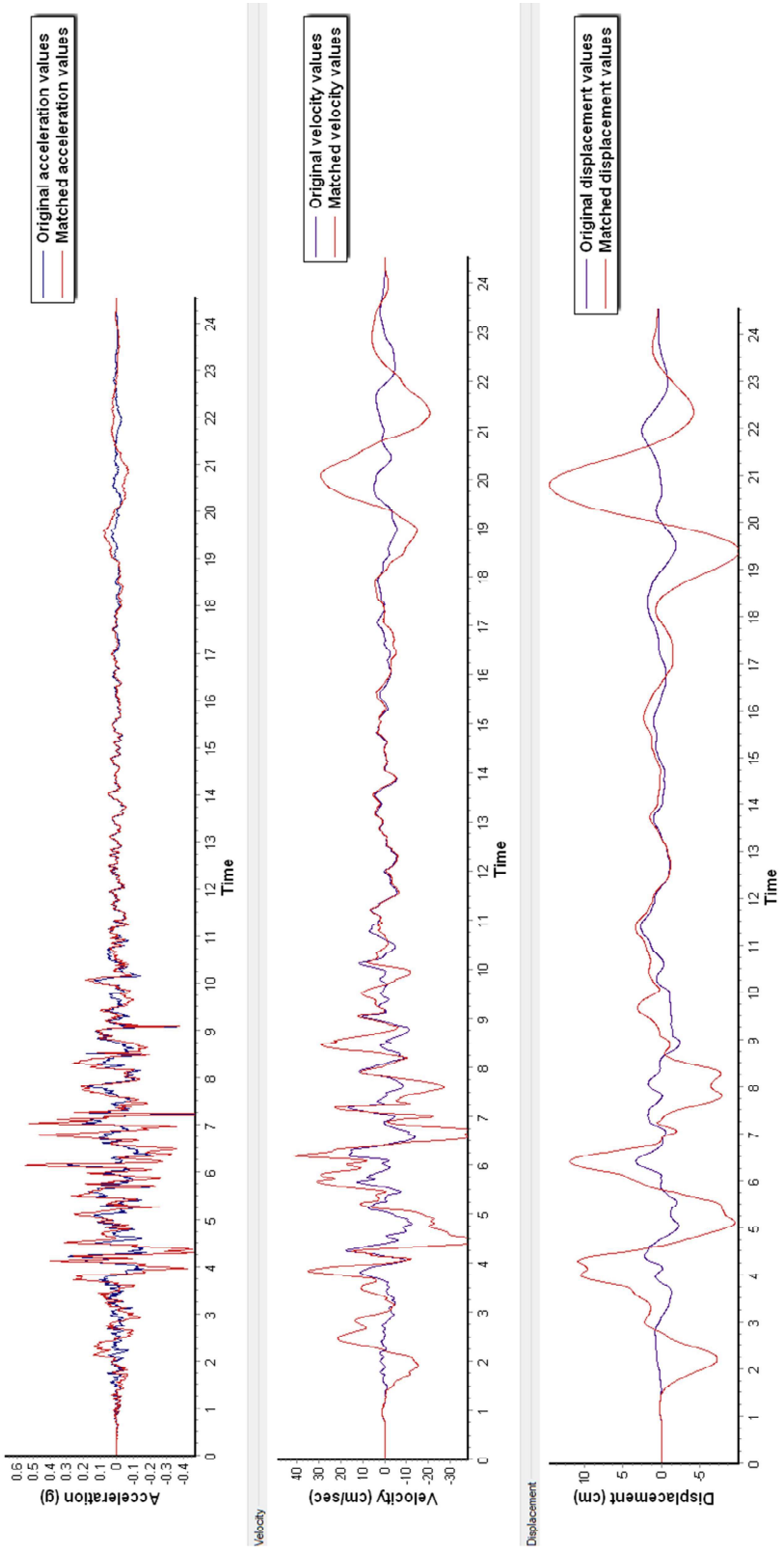
Şekil Ek-2.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPE237 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



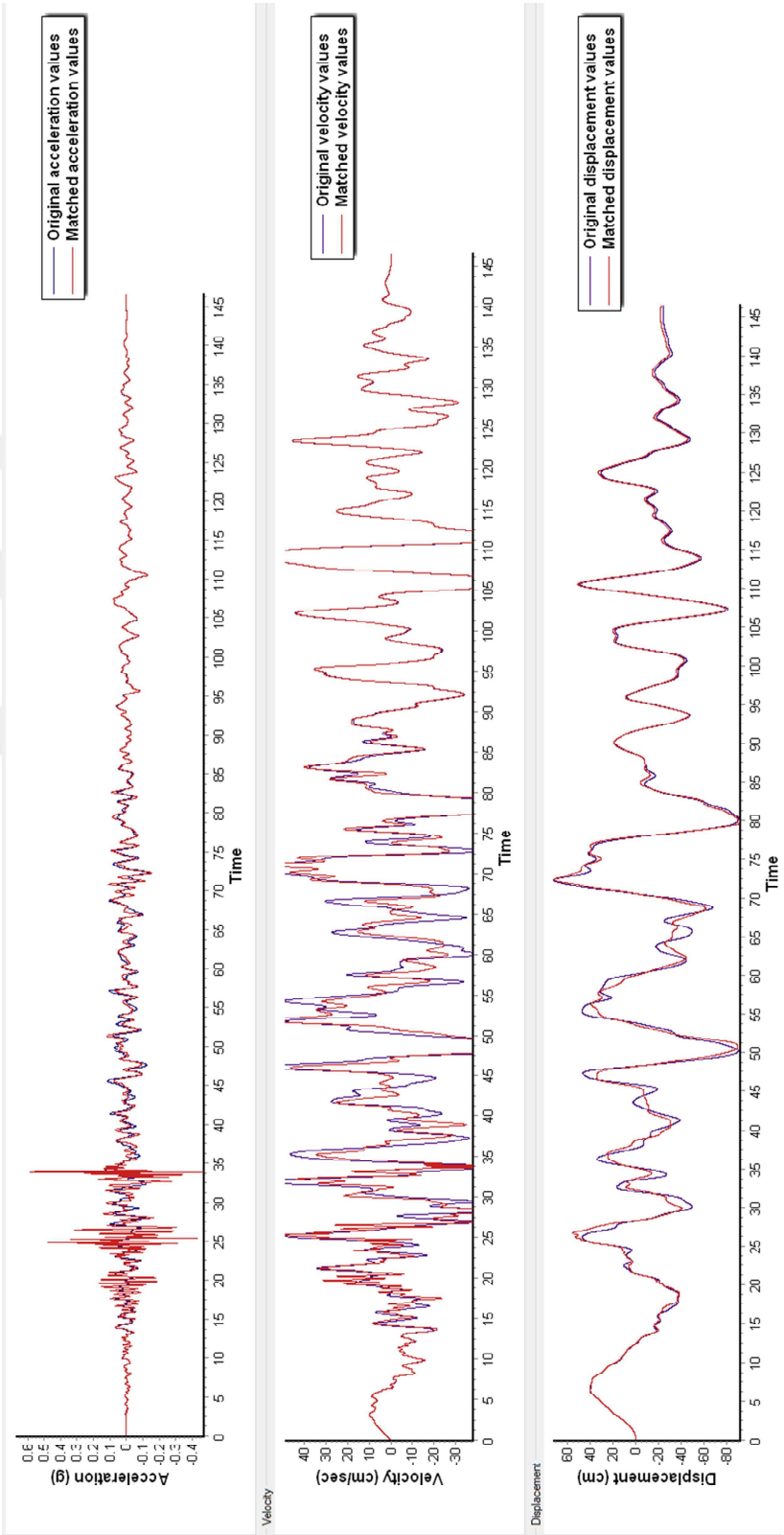
Şekil Ek-2.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK180 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



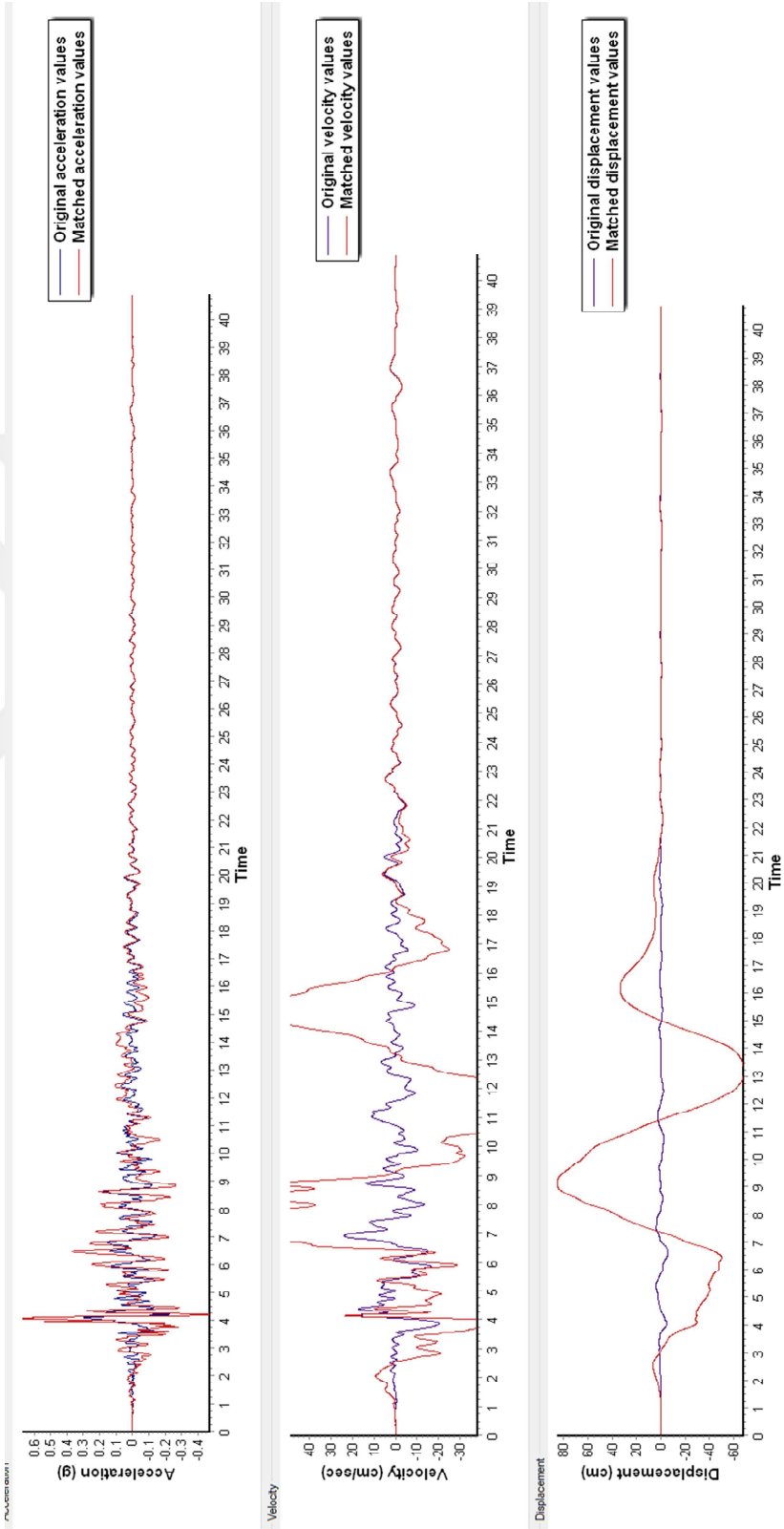
Şekil Ek-2.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



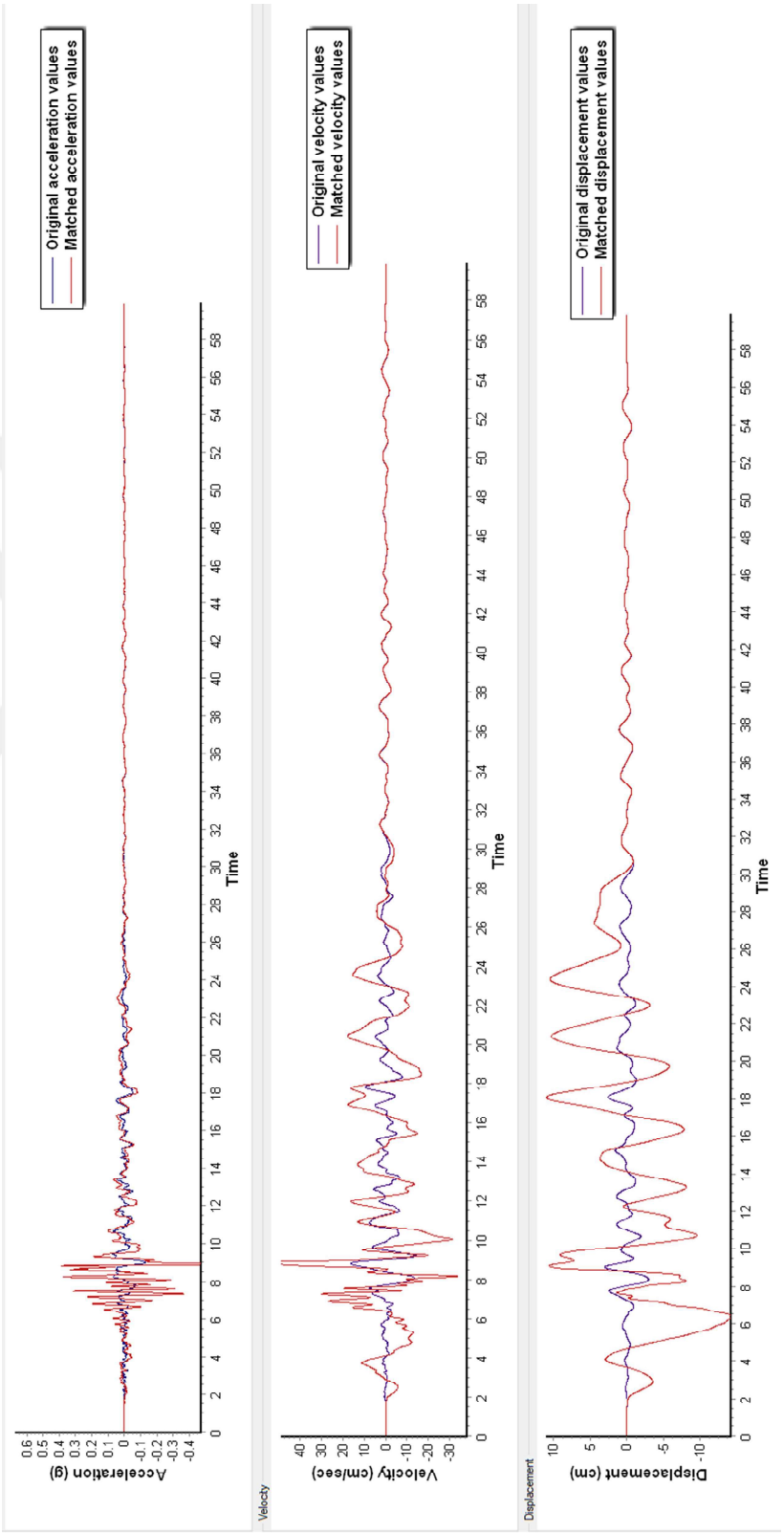
Şekil Ek-2.6: RSN265_VICT_CPE315 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



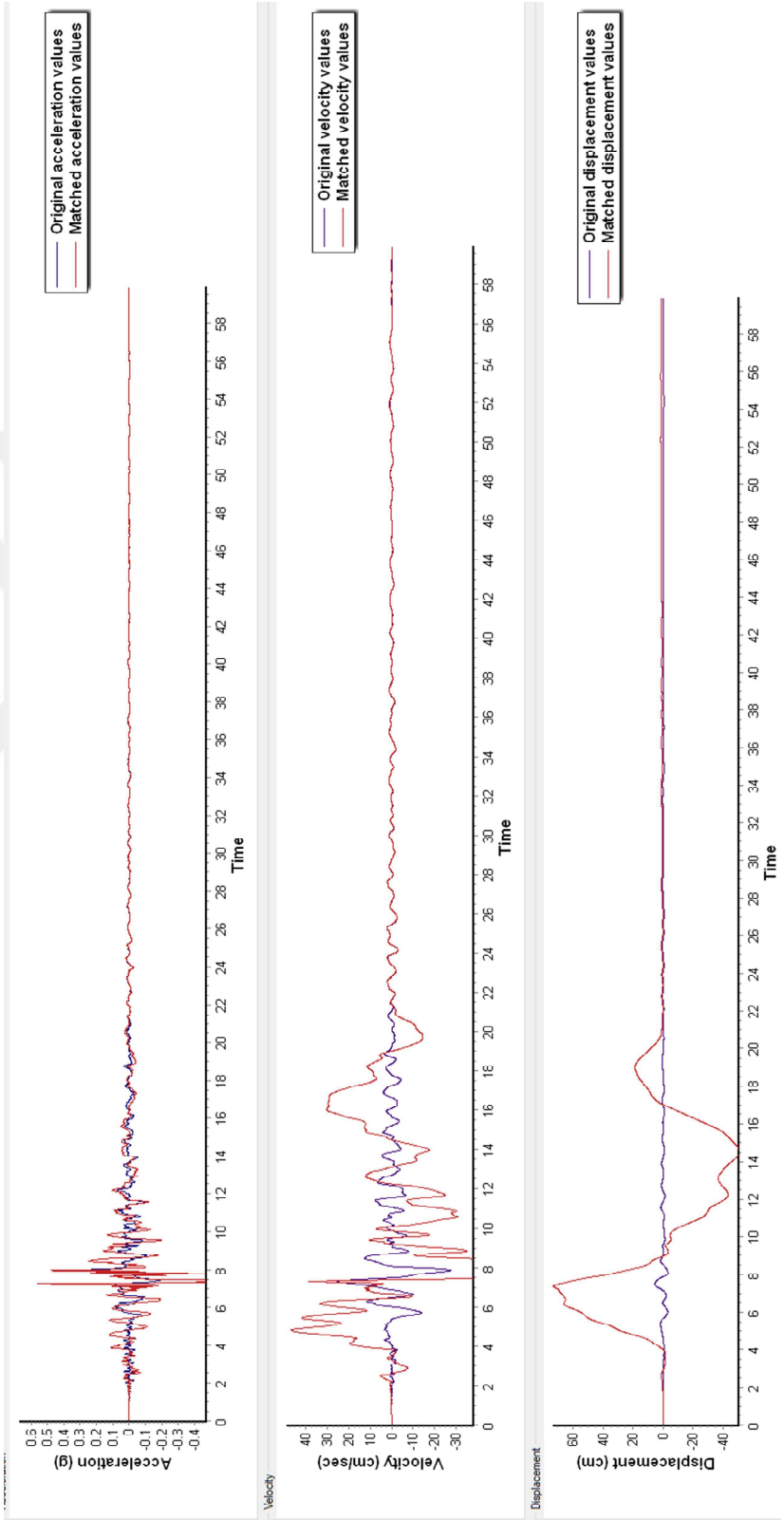
Şekil Ek-2.7: RSN289_ITALY_A-CTR270 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



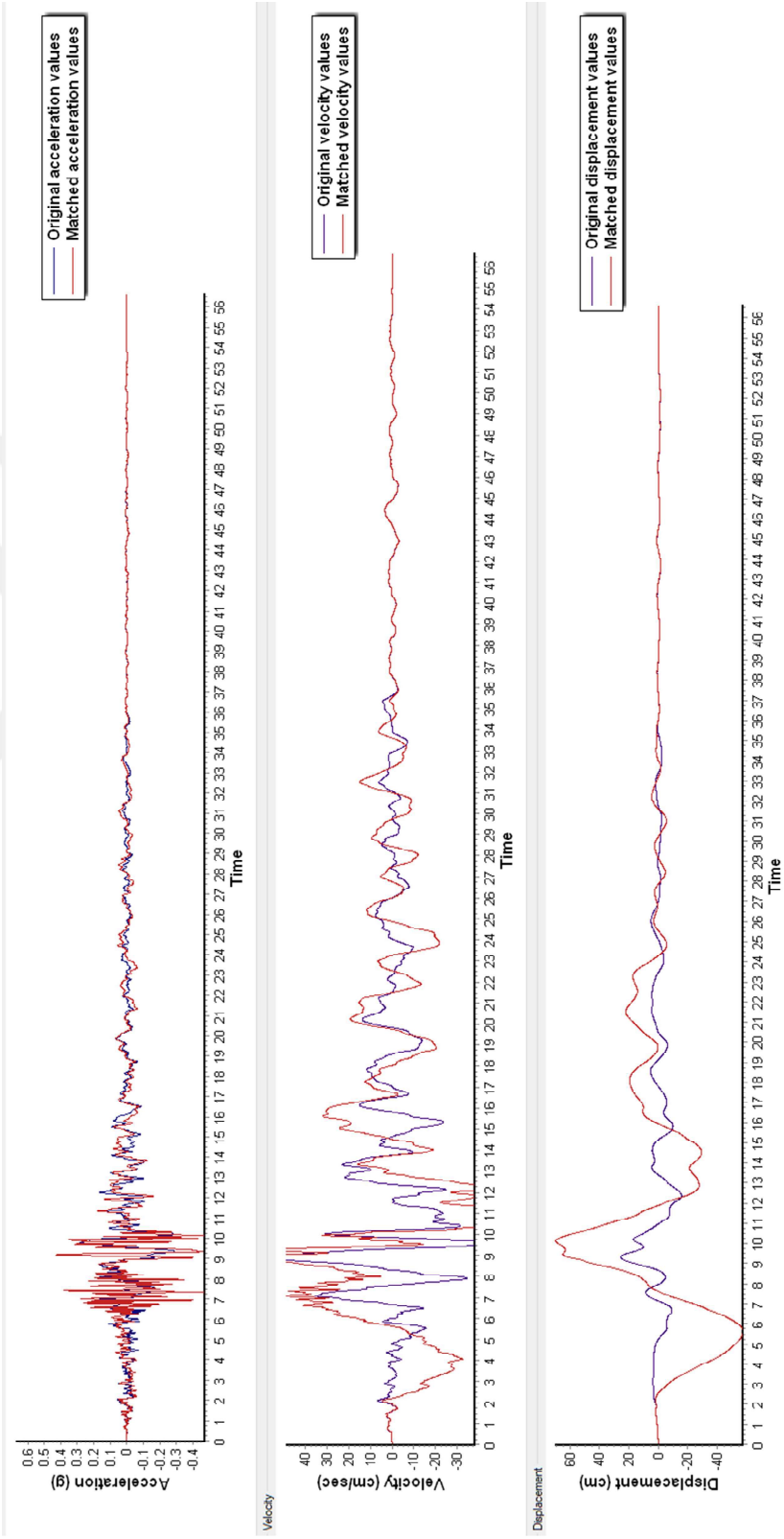
Şekil Ek-2.8: RSN313_CORINTH_COR—T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-2.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10090 T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

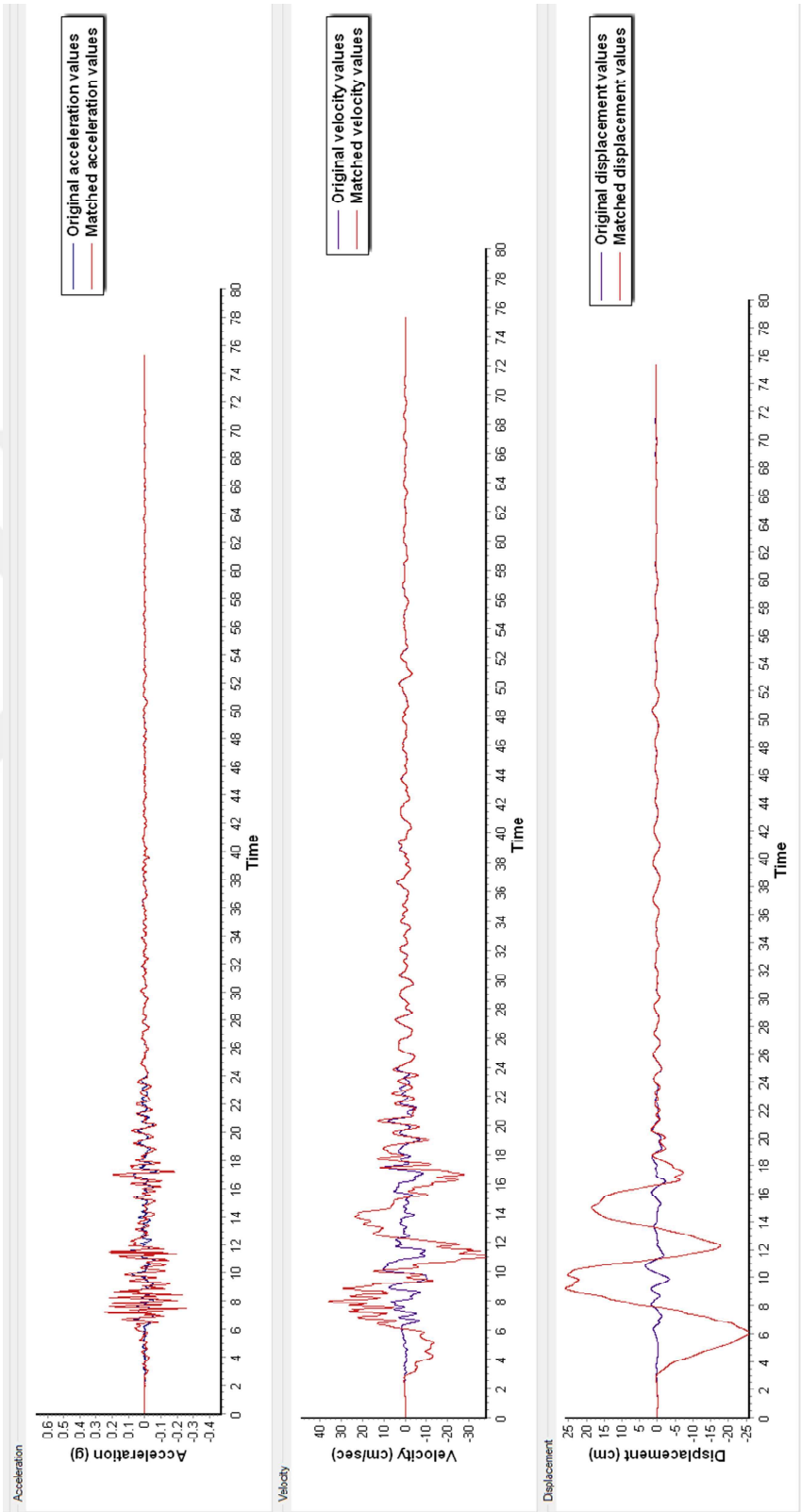


Şekil Ek-2.10: RSN335_COALINGA.H_H-PV1090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

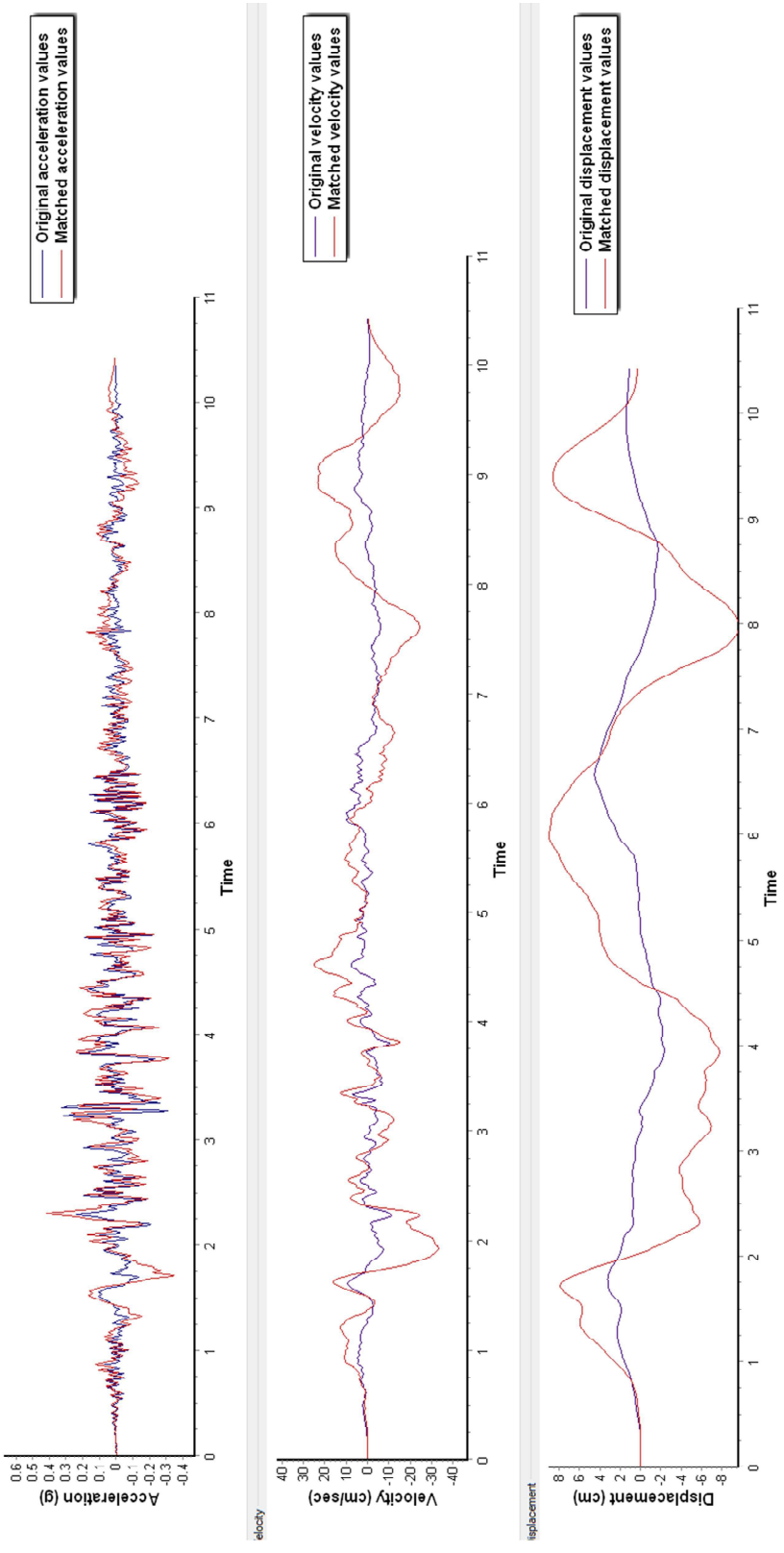


Şekil Ek-2.11: RSN448_MORGAN_AND340 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

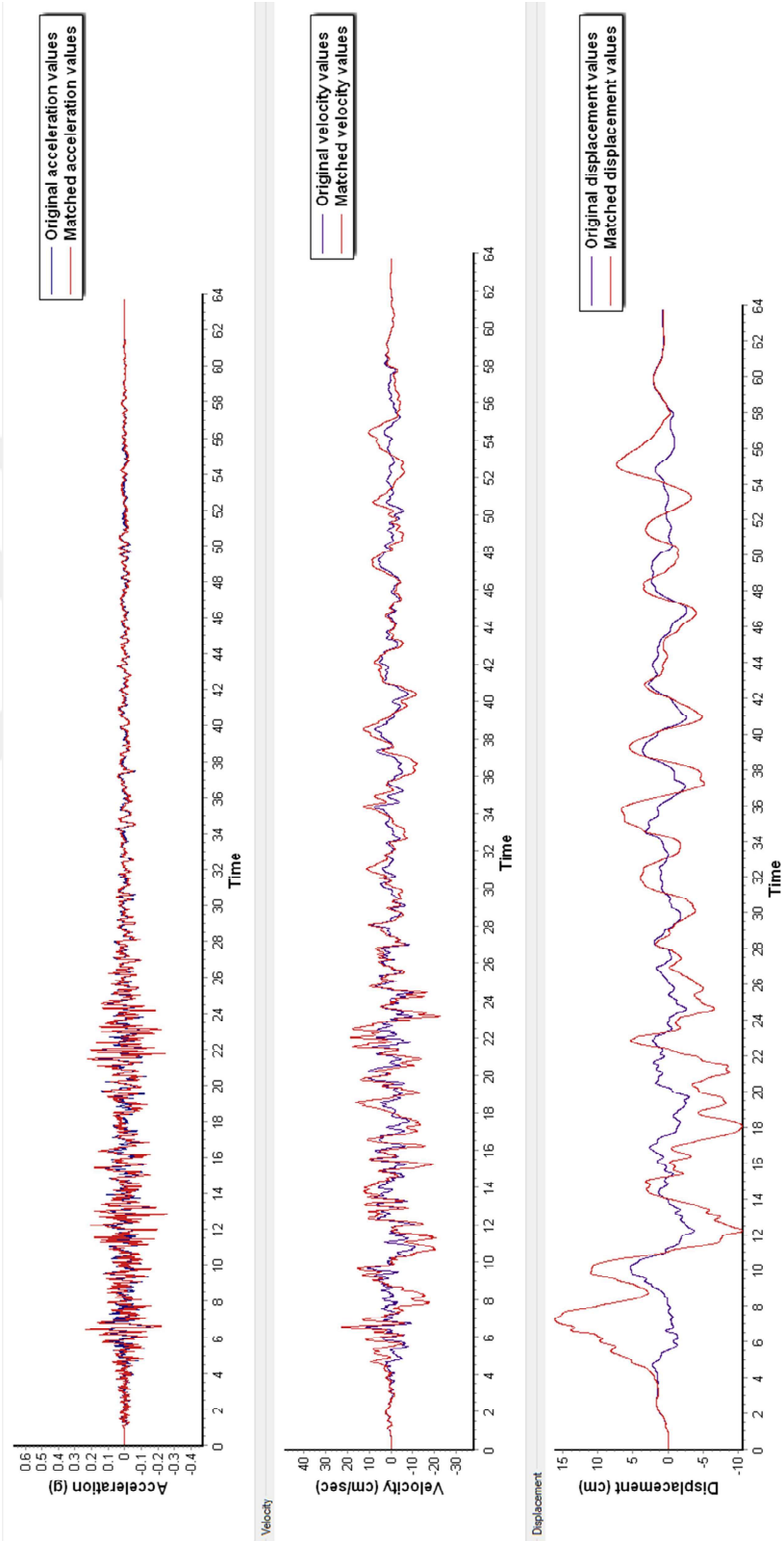
EK-3: TBDY-2018, DD-2 Tasarım Spektrumuna Tam Ölçekli ve Orijinal Kayıtların X-1 doğrultusunda İvme-Zaman, Hız-Zaman, Deplasman-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması



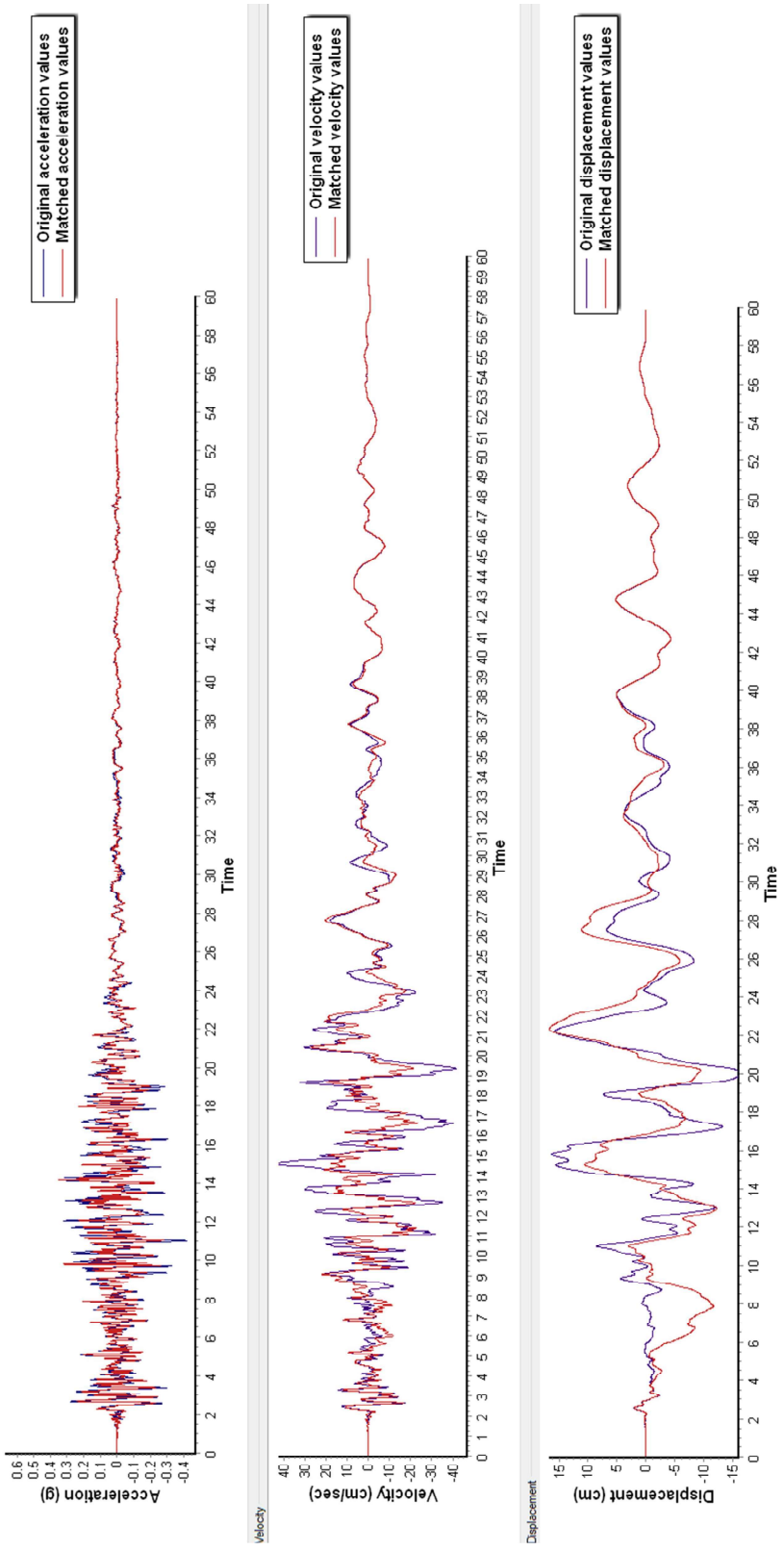
Şekil Ek-3.1: RSN14_KERN_SBA042 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



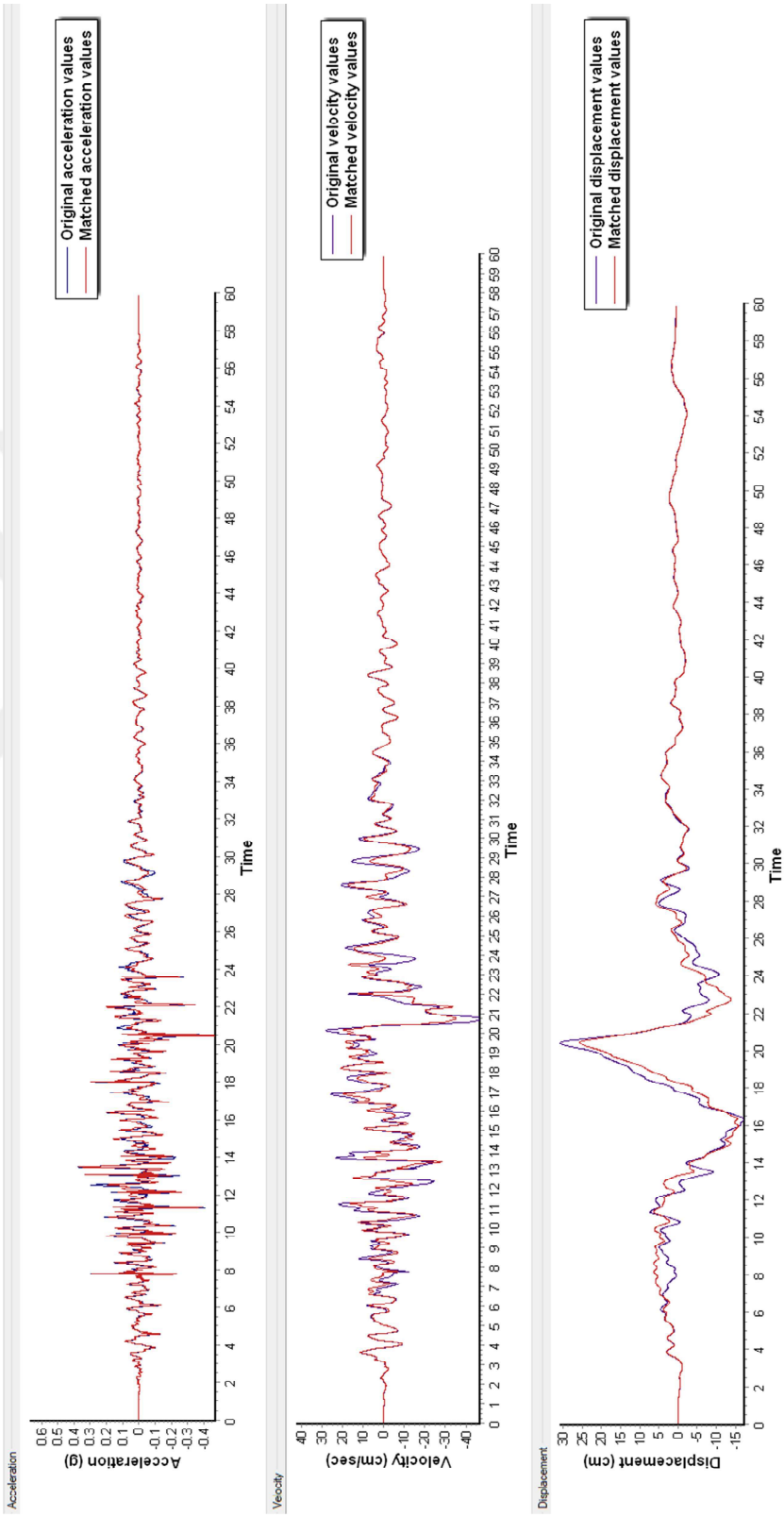
Şekil Ek-3.2: RSN139_TABAS_DAY_L1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



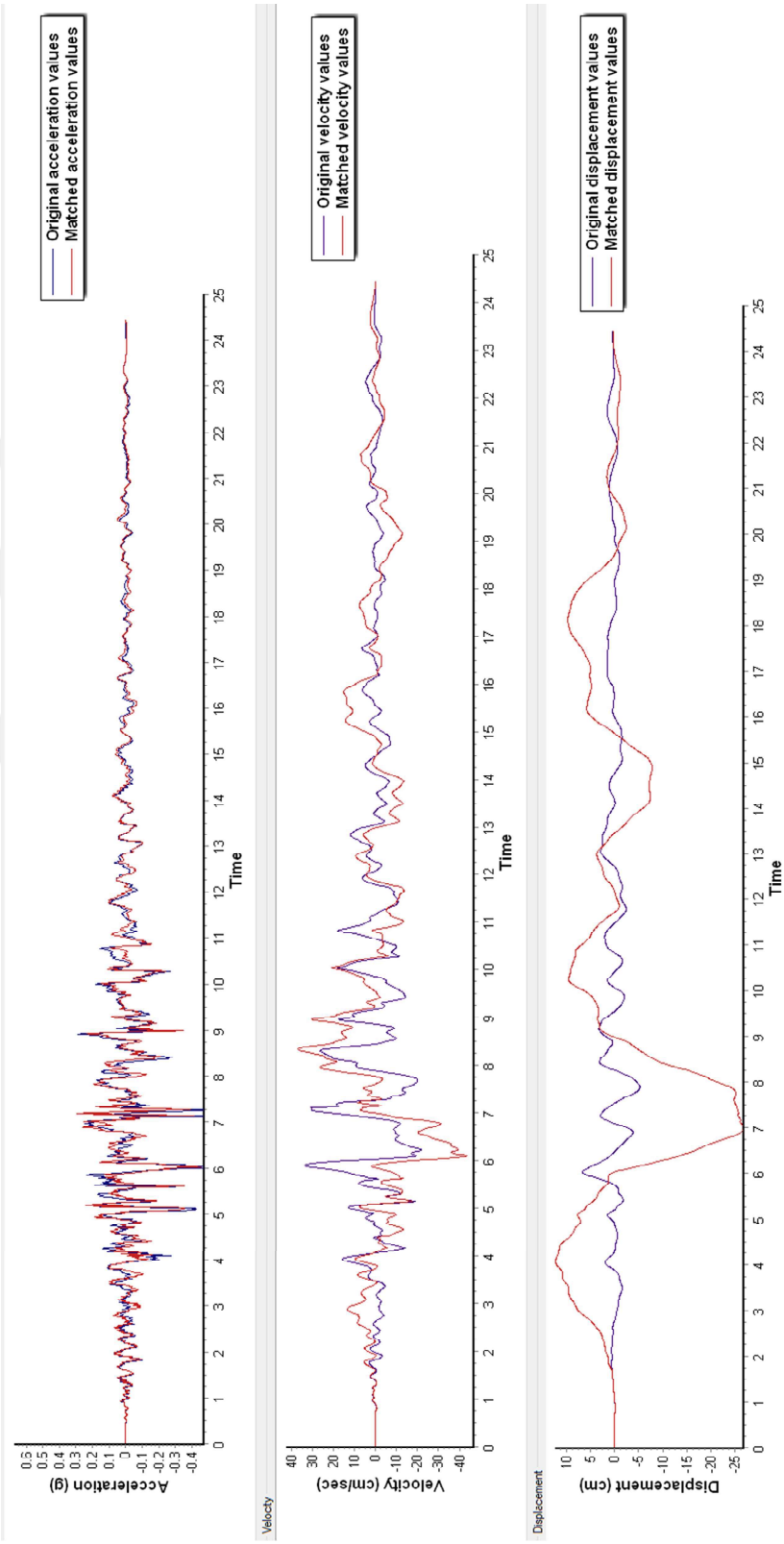
Şekil Ek-3.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPET147 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



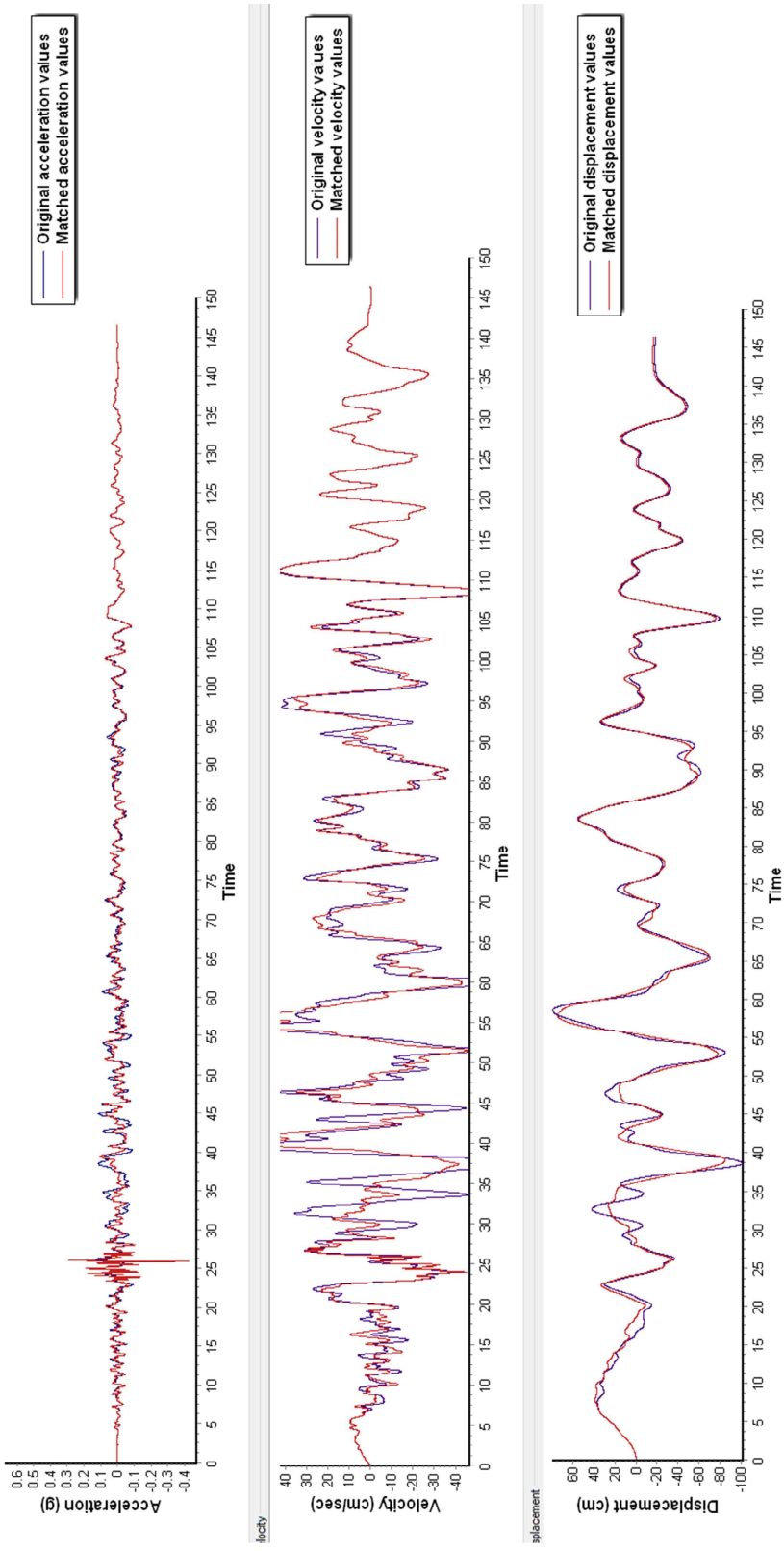
Şekil Ek-3.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



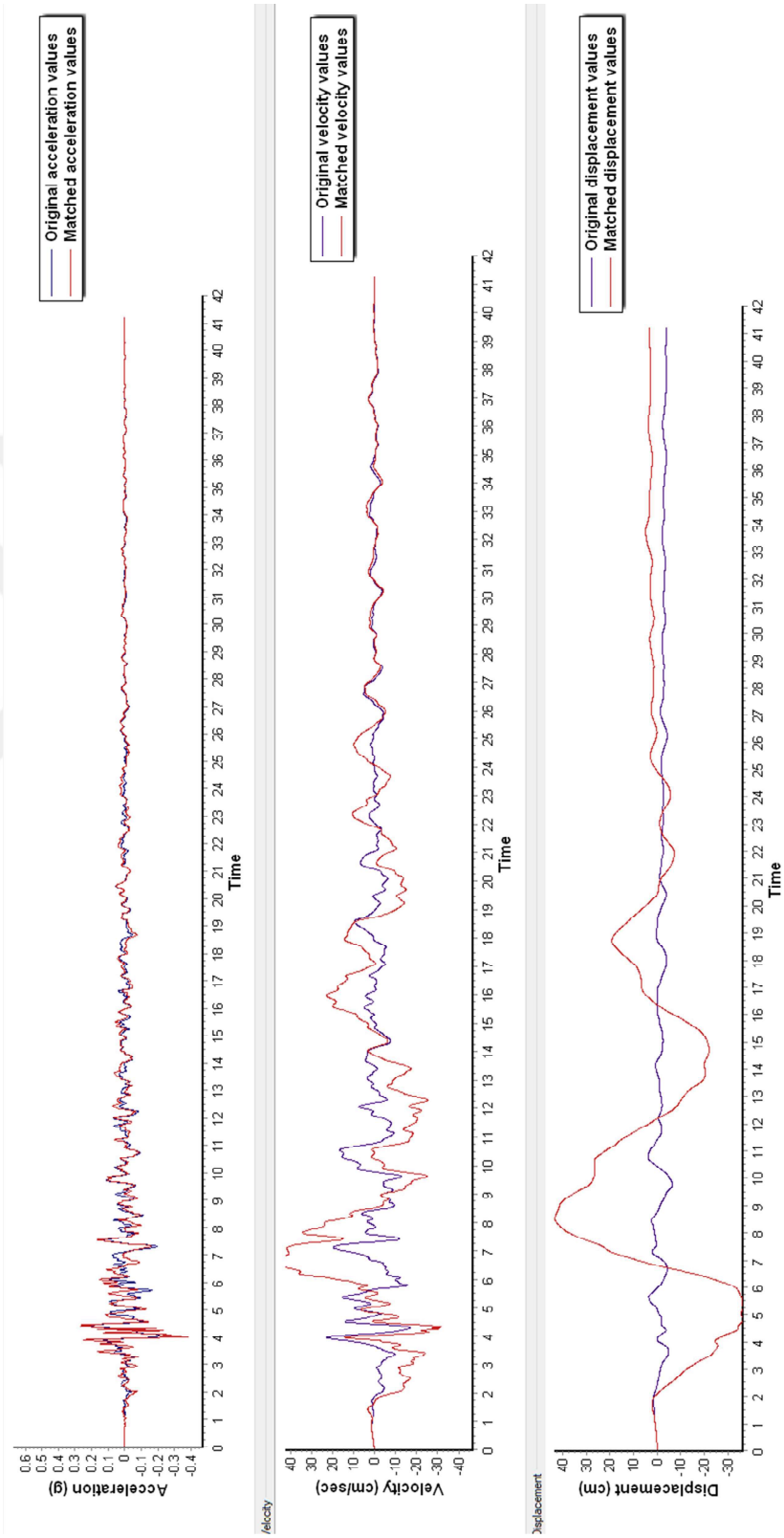
Şekil Ek-3.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



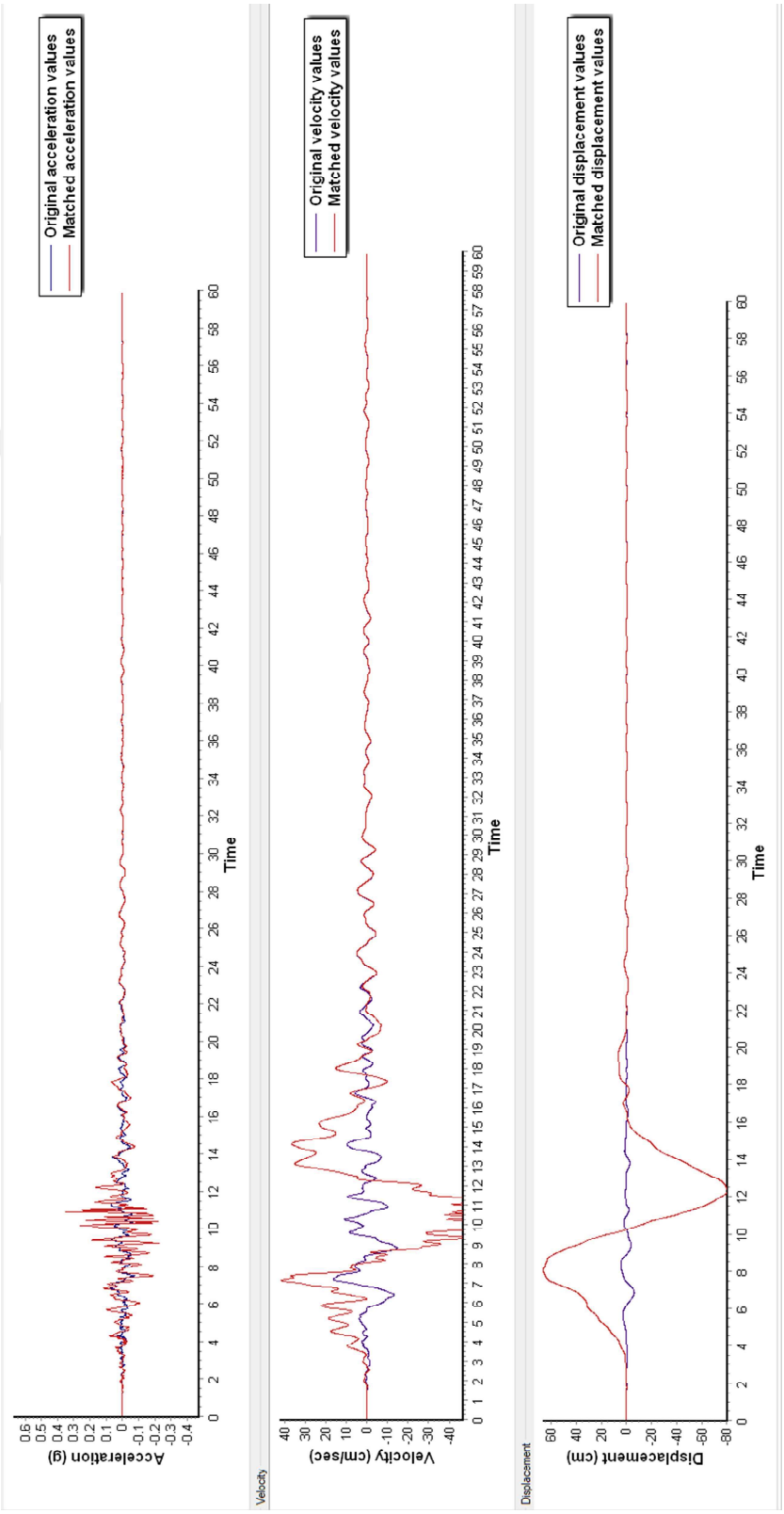
Şekil Ek-3.6: RSN265_VICT_CPE045 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



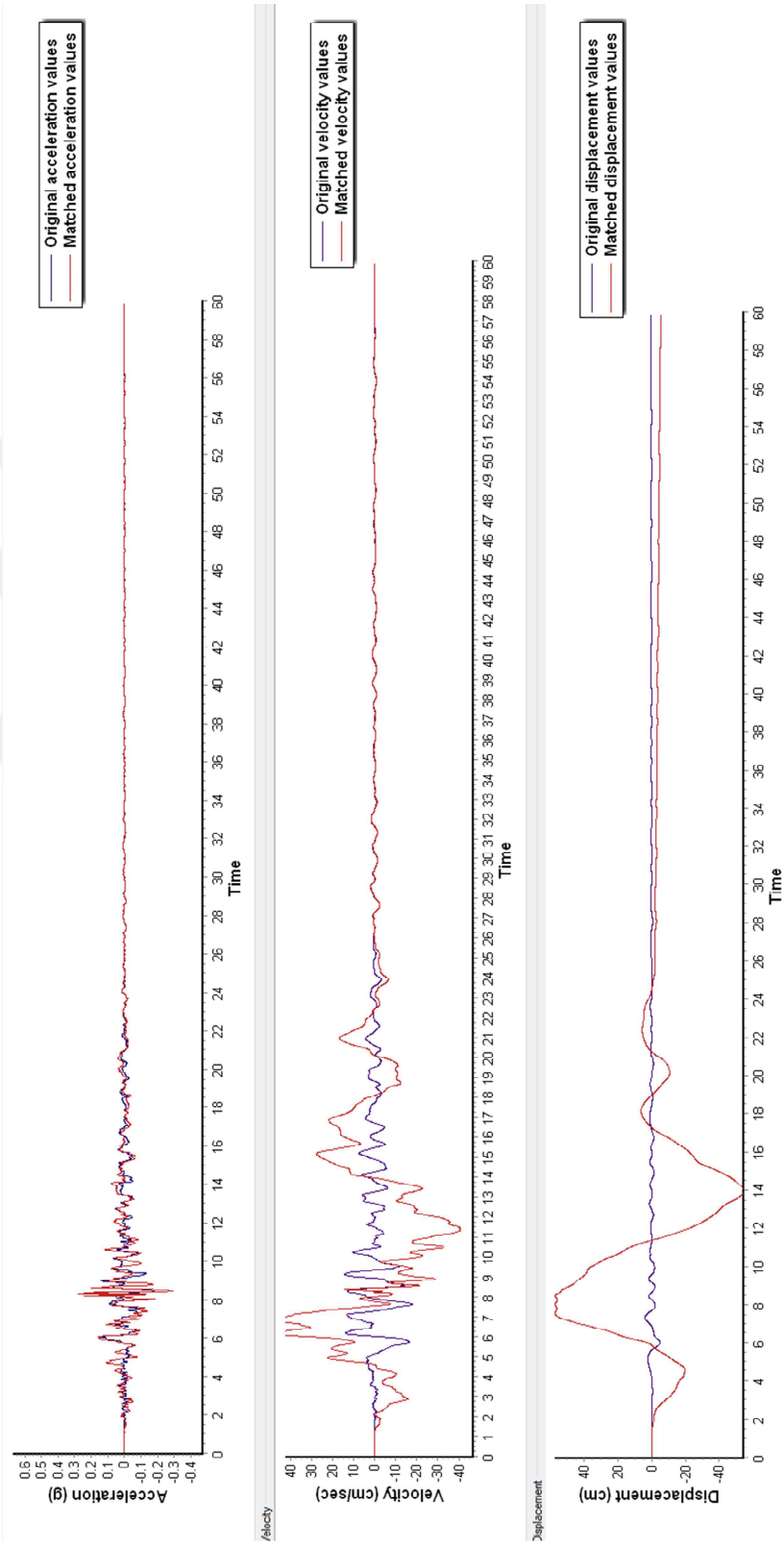
Şekil Ek-3.7: RSN289_ITALY_A-CTR000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



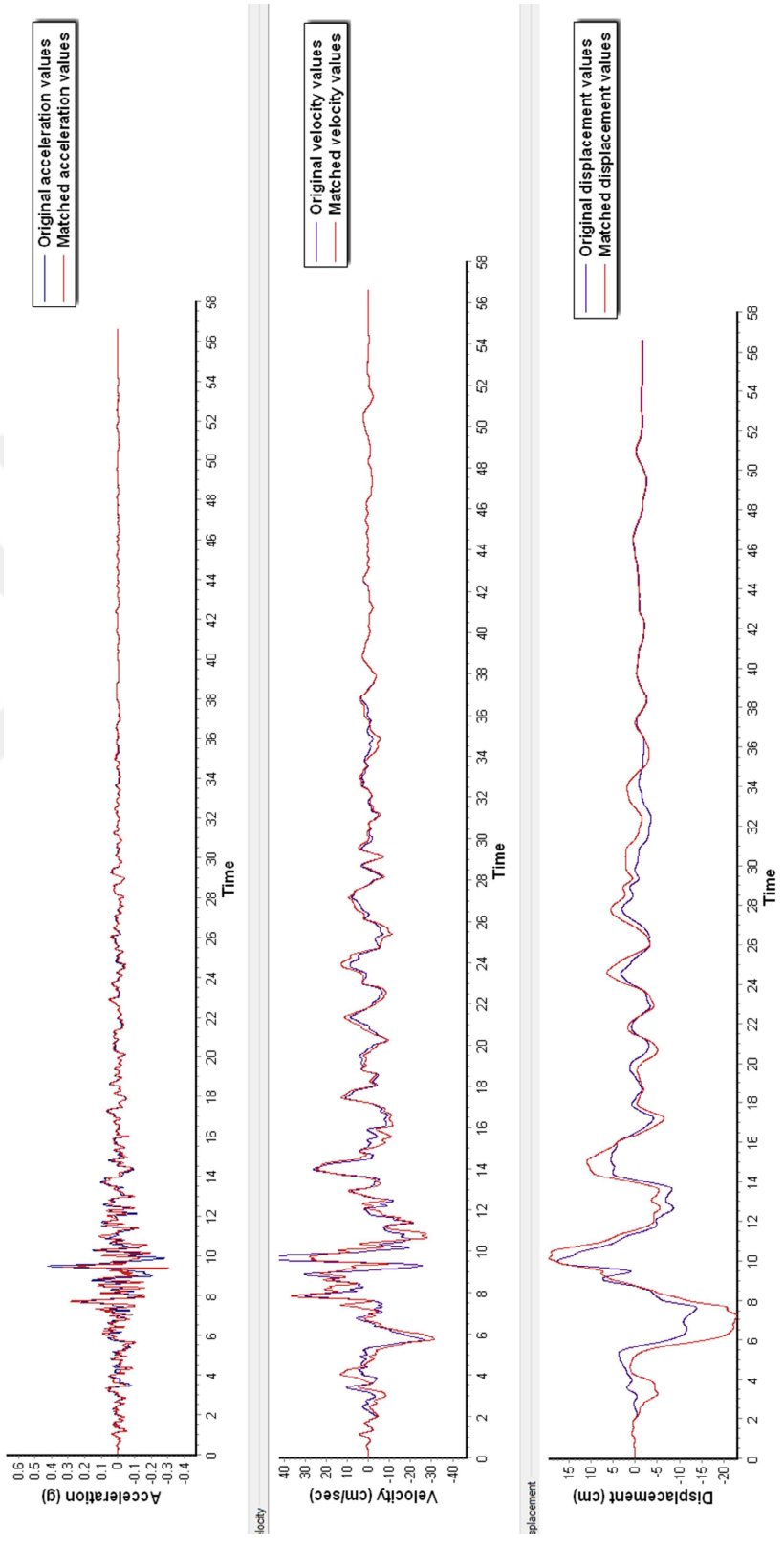
Şekil Ek-3.8: RSN313_CORINTH_COR--L no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-3.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

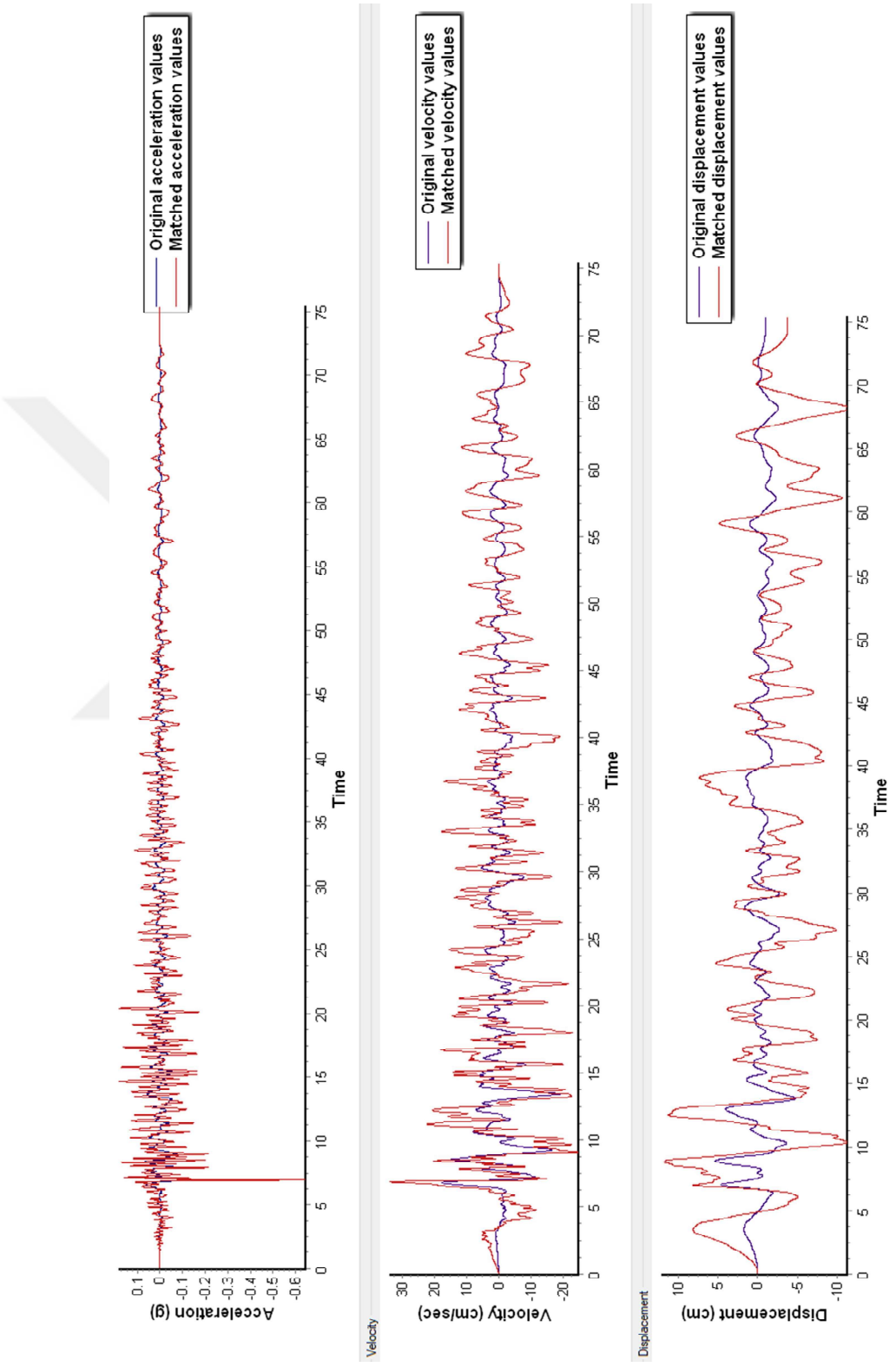


Şekil Ek-3.10: RSN359_COALINGA.H_H-PV1000 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

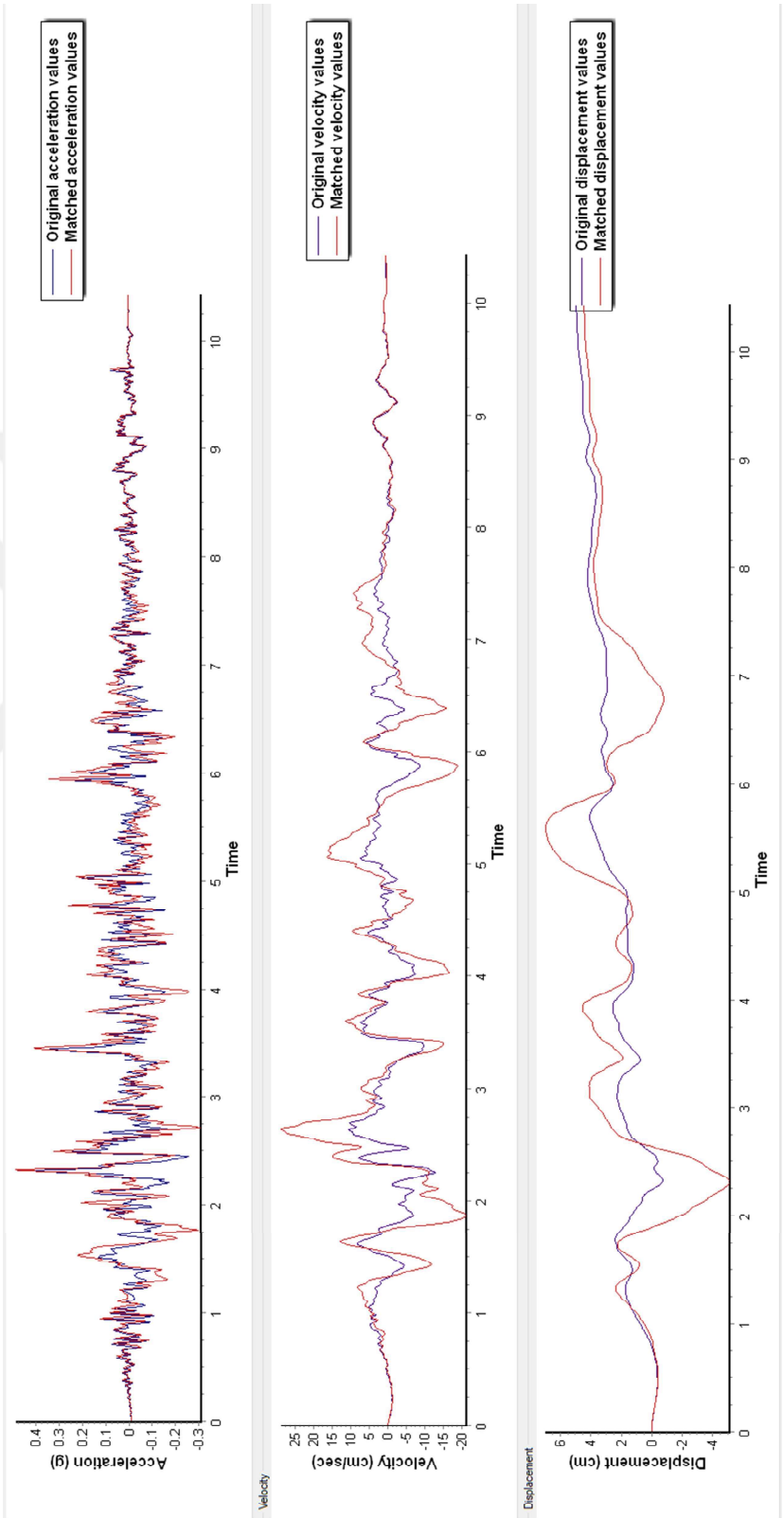


Şekil Ek-3.11: RSN448_MORGAN_AND250 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

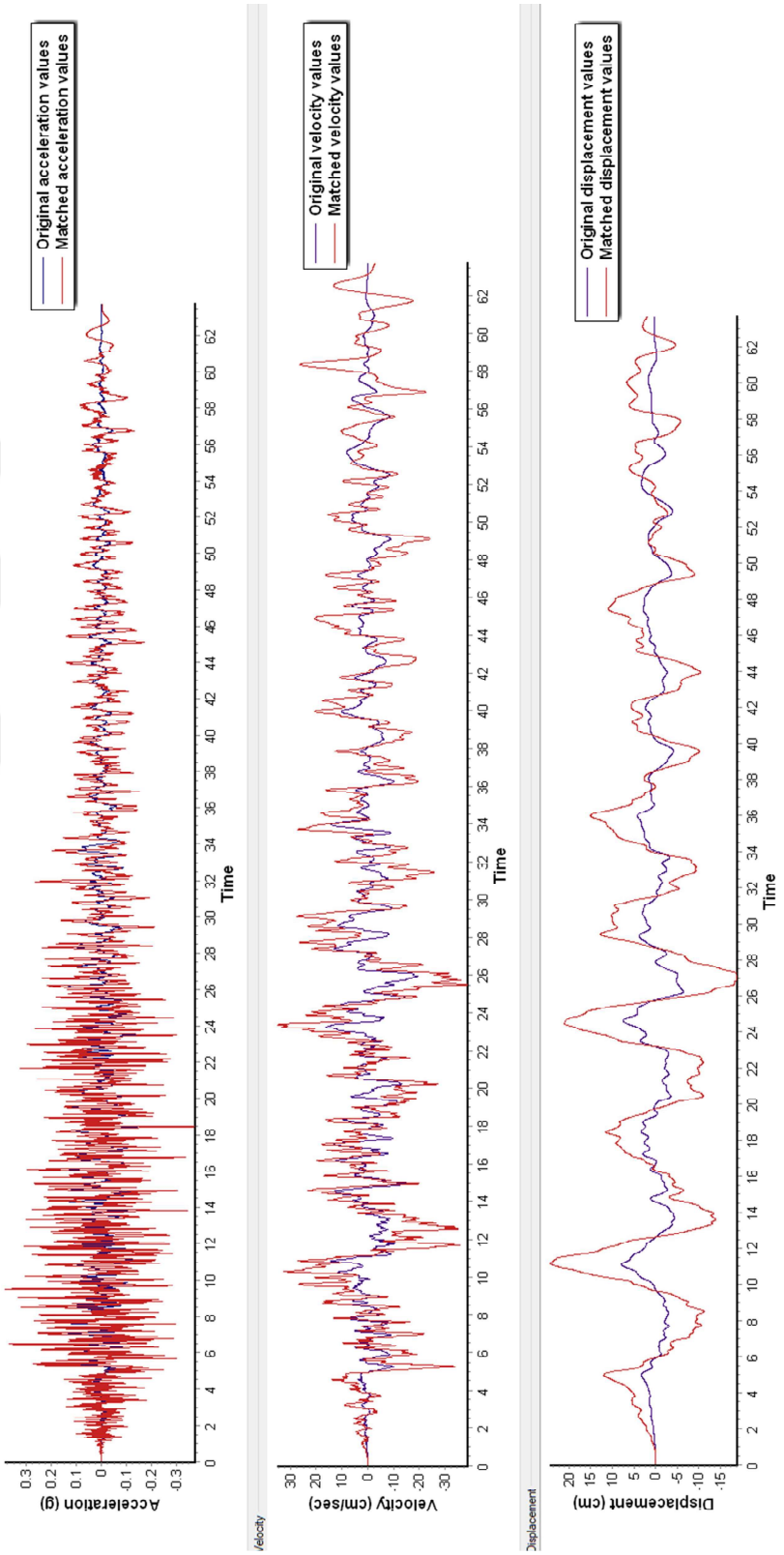
EK-4: TBDY-2018, DD-2 Tasarım Spektrumuna Tam Ölçekli ve Orijinal Kayıtların X-2doğrultusunda İvme-Zaman, Hız-Zaman, Deplasman-Zaman Grafiklerinin Karşılaştırılması



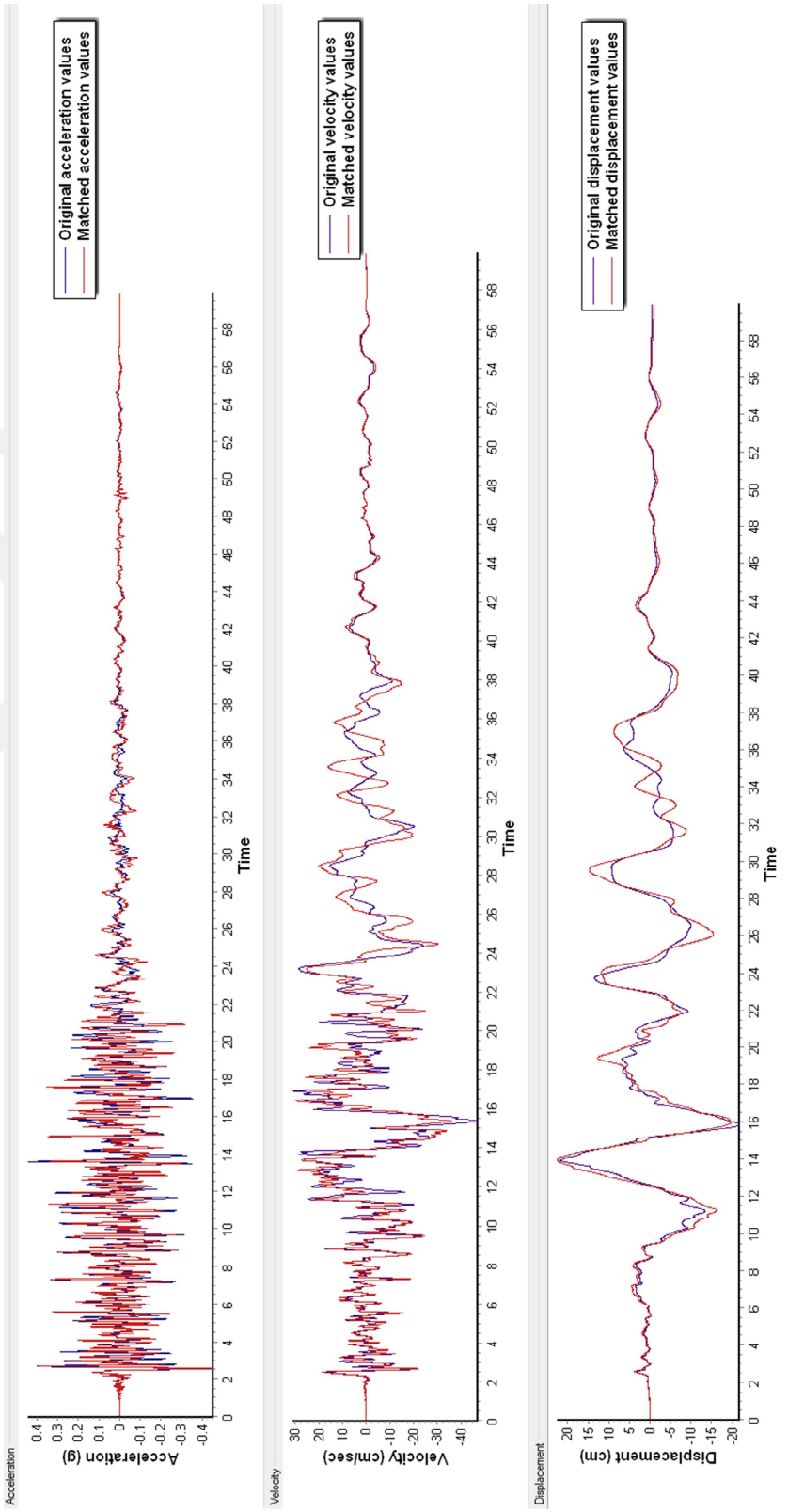
Şekil Ek-4.1: RSN14_KERN_SBA132 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



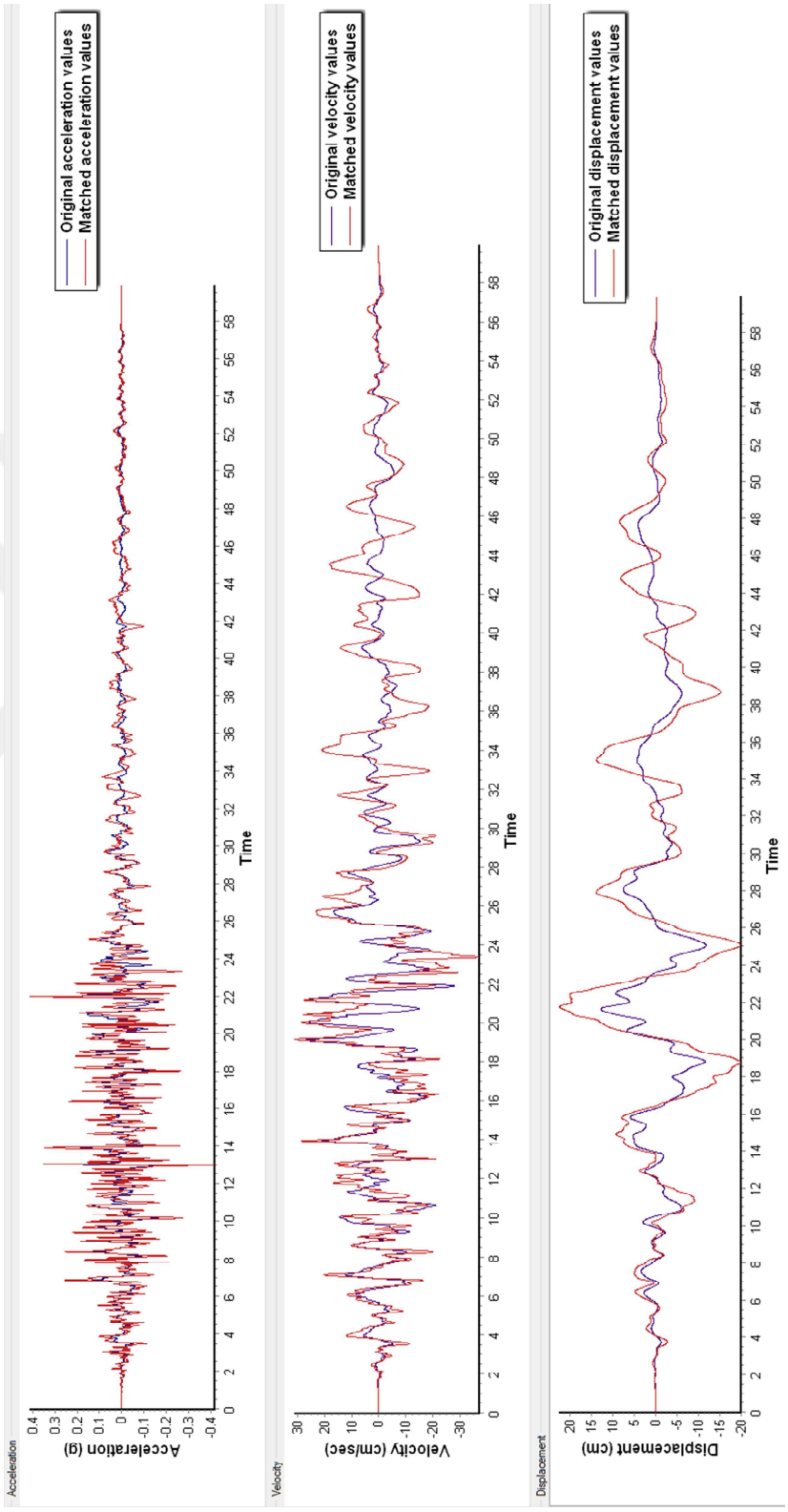
Şekil Ek-4.2: RSN139_TABAS_DAY-T1 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



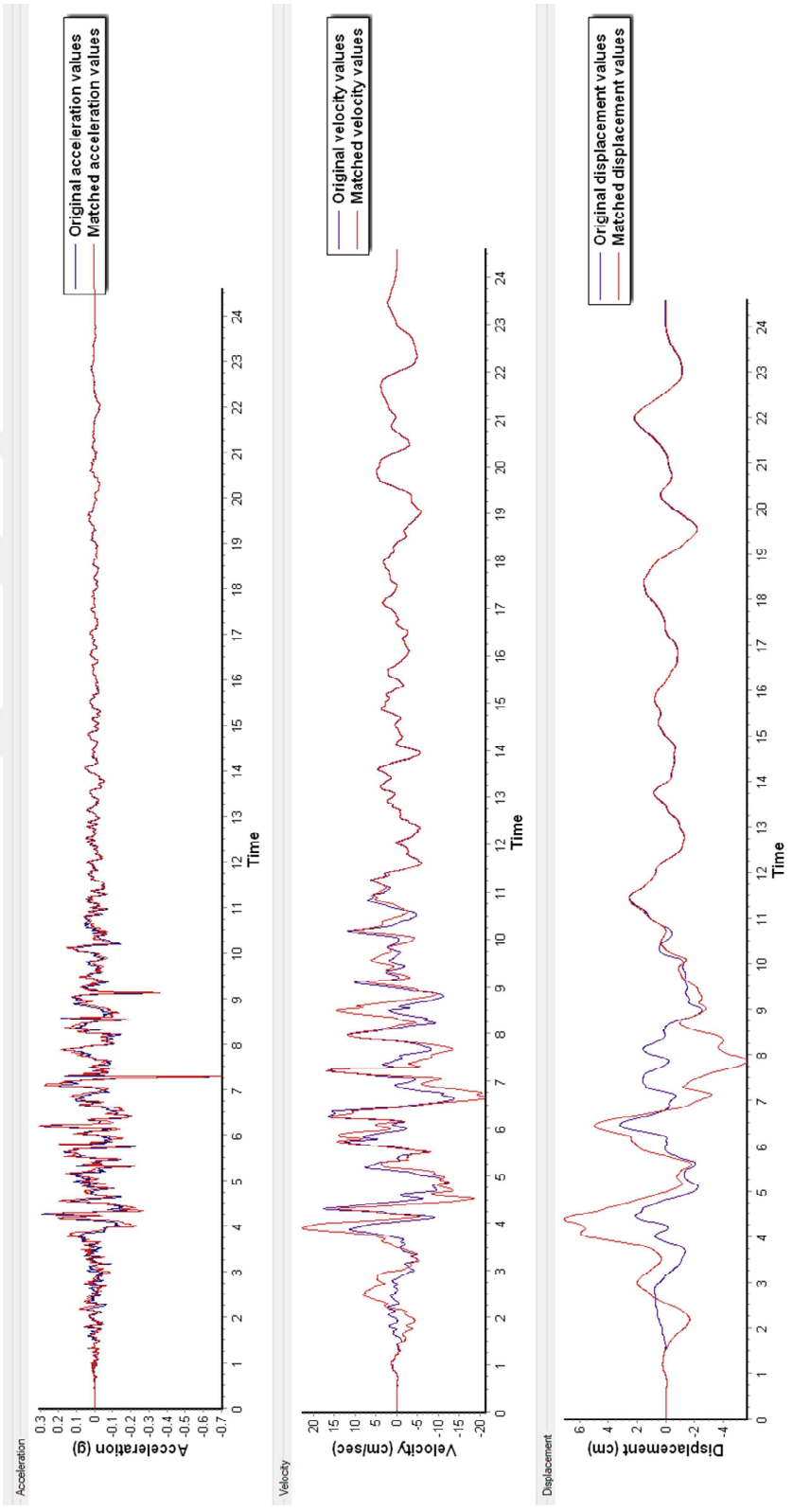
Şekil Ek-4.3: RSN164_IMPVALL.H_H-CPE237 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



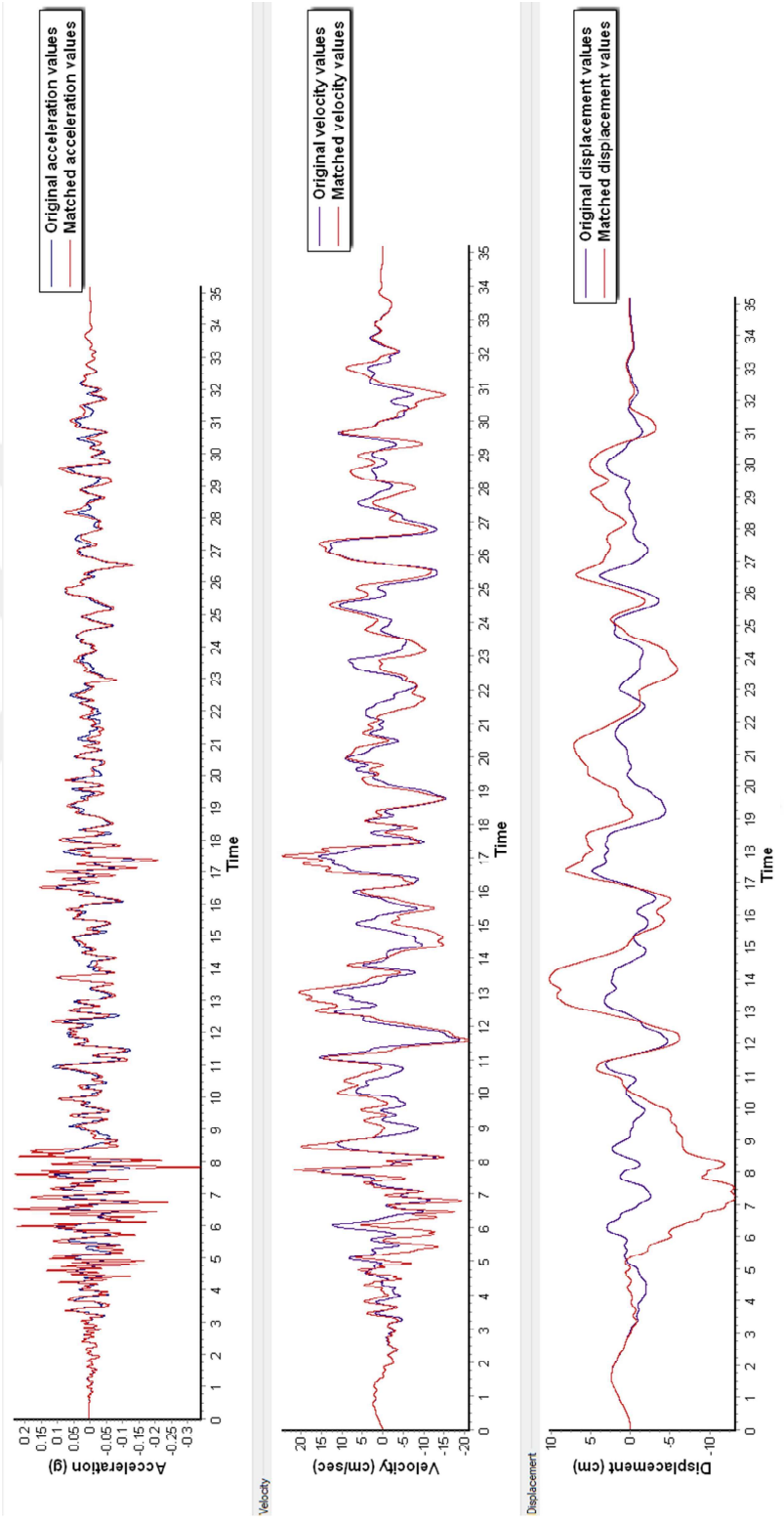
Şekil Ek-4.4: RSN230_MAMMOTH.I_I-CVK180 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



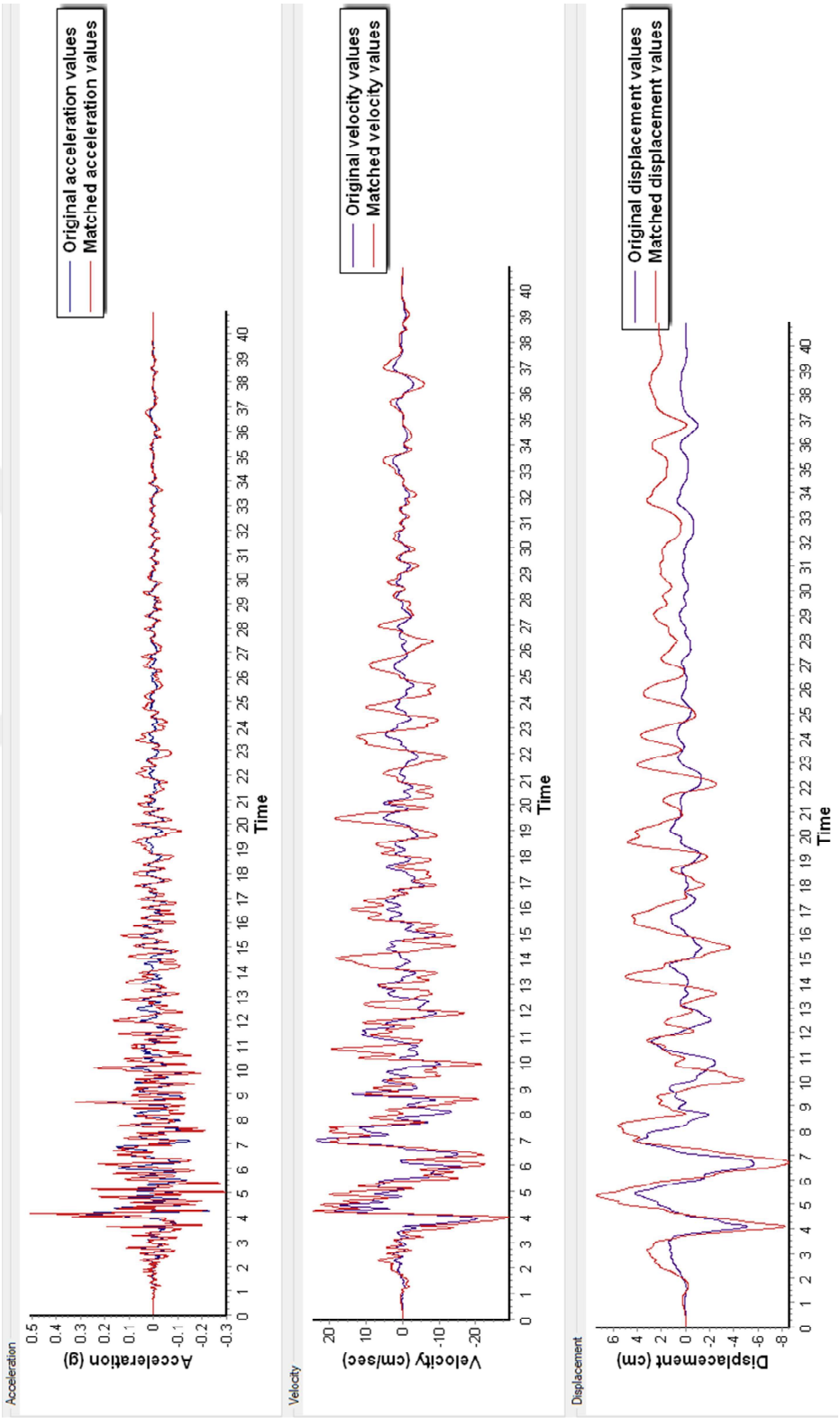
Şekil Ek-4.5: RSN231_MAMMOTH.I_I-LUL090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



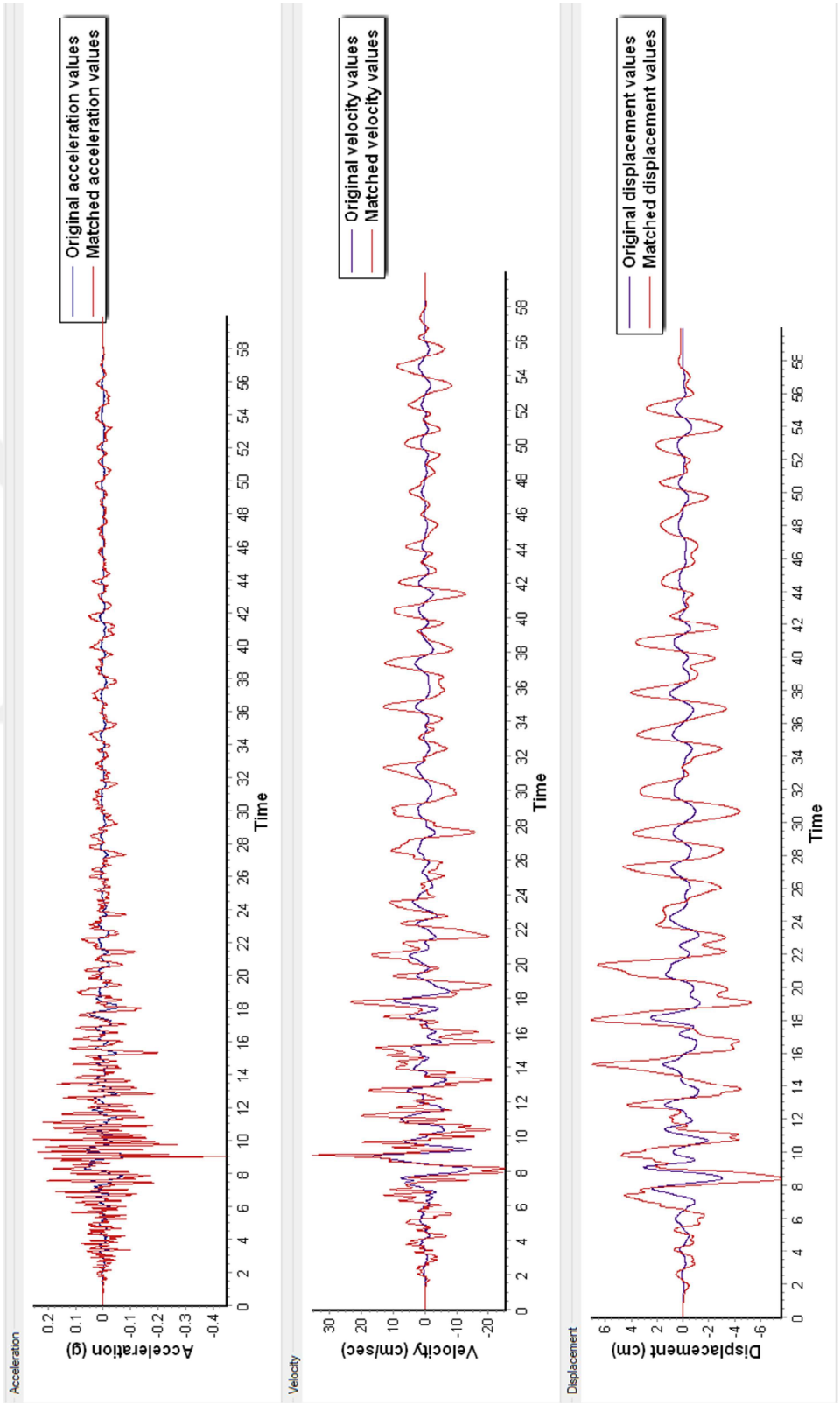
Şekil Ek-4.6: RSN265_VICT_CPE315 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



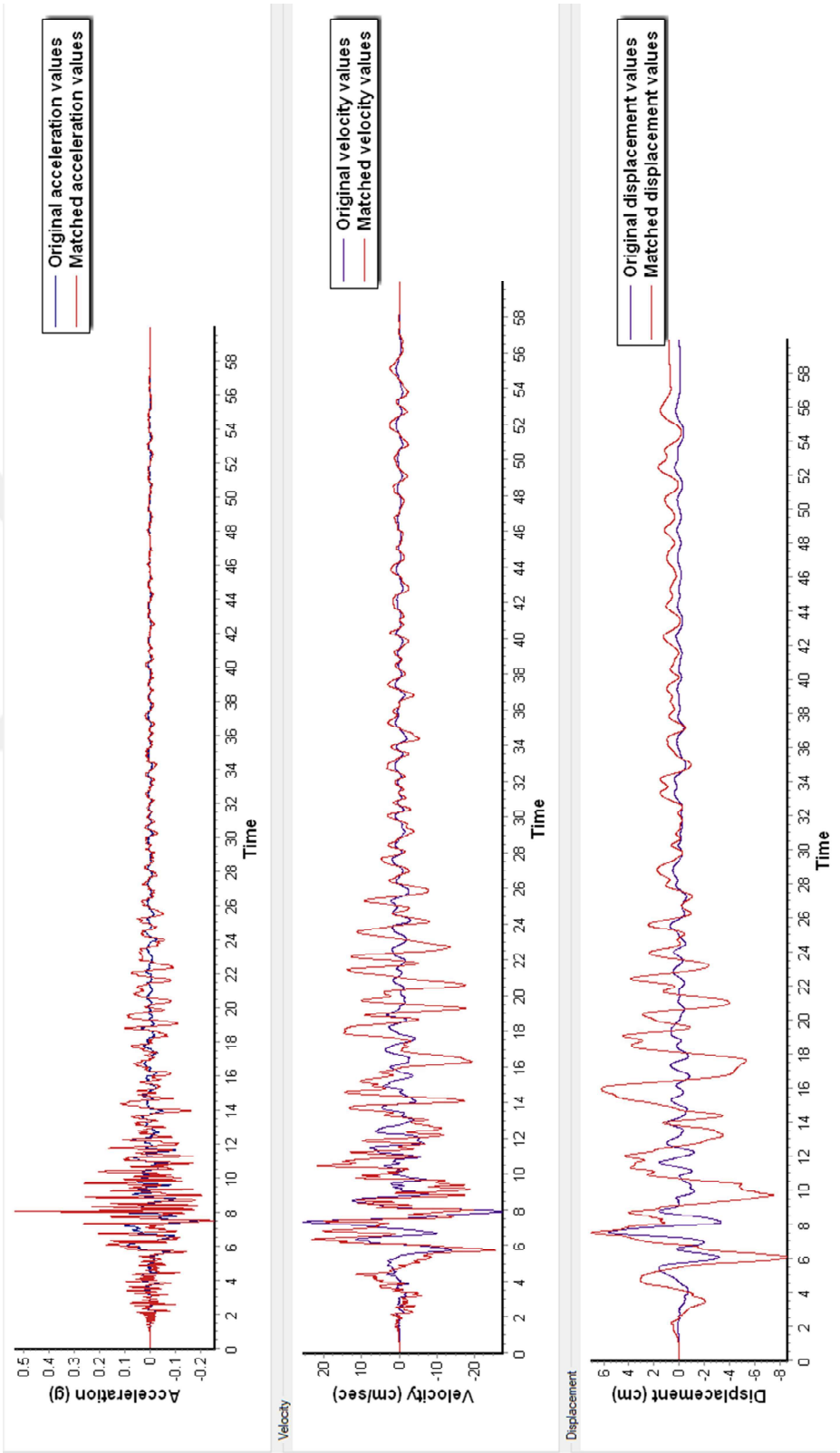
Şekil Ek-4.7: RSN289_ITALY_A-CTR270 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



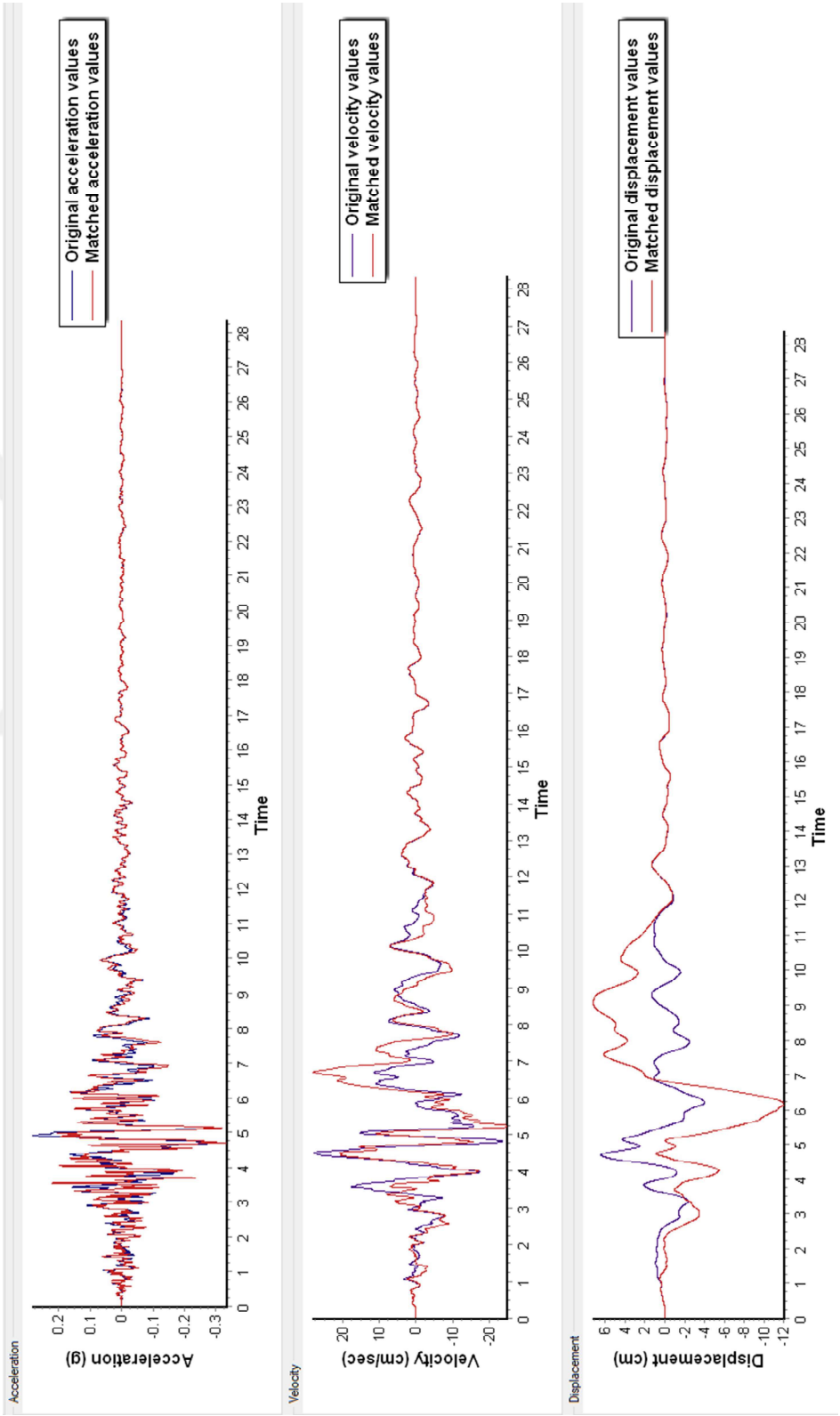
Şekil Ek-4.8: RSN313_CORINTH_COR—T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-4.9: RSN335_COALINGA.H_H-Z10090 T no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-4.10: RSN335_COALINGA.H_H-PV1090 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.



Şekil Ek-4.11: RSN448_MORGAN_AND340 no.'lu istasyona ait orijinal ve ölçekli kayıtların ivme,hız,deplasman-zaman grafiklerinin karşılaştırılması.

İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI