

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜVİYAL SAHALARDA SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru ÜÇKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

OCAK 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜVİYAL SAHALARDA SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru ÜÇKUN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ertan BOL

OCAK 2023

Ebru ÜÇKUN tarafından hazırlanan “Alüviyal Sahalarda Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi” adlı tez çalışması 24.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Geoteknik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Aşkın Özocak Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Ertan Bol (Danışman) Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. İsa Vural Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Alüviyal Sahalarda Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(24/01/2023)

Ebru ÜÇKUN

TEŞEKKÜR

Sakarya Üniversitesi lisans ve yüksek lisans eğitimimde ayrıca tez çalışmamın tüm aşamalarında yardımlarını esirgmeden her daim destek olduğu için danışman hocam Doç. Dr. Ertan BOL'a ve yine başta danışman hocam olmak üzere Doç. Dr. Sedat SERT, Doç. Dr. Aşkın ÖZOCAK'a bugüne kadar değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak bu alanda bizlere her zaman yol gösterdikleri için teşekkürlerimi sunarım.

Ebru ÜÇKUN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SİMGELER	xiii
TABLO LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR	3
2.1. Önceki Çalışmalar	3
2.2. Zemin Davranışı	13
2.3. Zeminlerde Oluşan Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı	13
2.3.1. Kayma modülü	15
2.3.2. Sönüm	18
2.3.2.1. Modül azalımı G/G_{max} ve sönüm ilişkileri	19
2.3.3. Kayma dalgası hızı	22
2.4. Zeminlerin Deprem Etkisi Altındaki Davranışları	24
2.4.1. Dinamik zemin özelliklerinin ölçülmesi	24
2.4.2. Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış modeli	25
2.4.2.1. Doğrusal zemin davranış modeli	25
2.4.2.2. Transfer fonksiyonları	26
2.4.2.3. Doğrusal olmayan zemin davranış modeli	27
2.4.2.4. Zemin davranış modellerinin karşılaştırılması	28
2.5. Yer Tepki Analizi	29
2.5.1. Dekonvolüsyon	32
2.5.2. Sismik empedans değeri	33
2.6. Spektrum Analizi	33
2.7. Fourier Genlik ve Güç Spektrumu	34
3. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ...	37
3.1. Deprem Kayıt Kaynakları	37
3.1.1. Yapay olarak üretilmiş deprem kayıtları	37
3.1.2. Benzeştirilmiş deprem kayıtları	37
3.1.3. Gerçek depremlerden elde edilen kayıtlar	38
3.2. Deprem Kayıtlarının Seçilmesi	38
3.2.1. Yer hareketi ölçme yöntemleri	39
3.2.1.1. Frekans tanım alanında ölçeklendirme	39
3.2.1.2. Zaman tanım alanında ölçeklendirme	40
4. PEER VERİ TABANI	42
4.1. PEER Veri Tabanı	42

4.2. Peer Veri Tabanı Kayıt Arama Modülü ve Açıklamaları.....	43
4.2.1. Fay tipi	43
4.2.1.1. Oluşum mekanizmalarına göre fay türleri.....	43
4.2.1.2. Atım tiplerine göre fay türleri	43
4.2.2. Magnitüd	44
4.2.3. R_{Rjb} (km).....	44
4.2.4. R_{Rup} (km).....	45
4.2.5. V_{s30} (m/s).....	45
4.2.6. D_{5-95} (s)	45
4.3. Gerçek Kayıtların TBDY Uygun Seçilmesi ve Ölçeklenmesi	46
4.3.1. TBDY uygun sahaya özel deprem yer hareketi seçimi	46
4.3.2. TBDY uygun seçilen depremler ve ölçeklendirme	47
4.4. Seismo Match	50
5. ADAPAZARI BÖLGESİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ	54
5.1. Adapazarı Zeminlerine Genel Bir Bakış	54
5.2. Adapazarı Bölgesinin Geoteknik Özellikleri.....	54
5.3. Adapazarı Yeraltı Suyu	58
5.4. Adapazarı Jeomorfolojisi ve Jeolojisi	59
5.4.1. Bölgenin jeolojisi	60
5.5. Bölgenin Depremselliği.....	65
5.6. İnşaat Sahası ve Yapı Hakkında Bilgiler.....	71
5.6.1. Çalışma alanı zemin modeli	71
5.6.1.1. Zemin özellikleri	73
5.7. Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi	76
5.7.1. TBDY 2018'e göre zemin sınıfı ve tasarım spektrumunun belirlenmesi. 76	
5.7.2. Çalışma alanı deprem tasarım spektrumu (TBDY-2018'e göre)	79
6. DEEPSOIL PROGRAMI İLE DOĞRUSAL OLMAYAN SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ	82
6.1. DeepSoil Programı	82
6.2. DeepSoil Programında Sahaya Özel Doğrusal Olmayan Davranış Analizi	85
6.3. DeepSoil Analiz Sonucu Elde Edilen Tasarım Spektrum Değerleri	90
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	92
7.1. Sahaya Özel Zemin Davranış Analiz Sonuçları	93
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
USCS	: Birleştirilmiş Zemin Sınıflama Sistemi
OCR	: Aşırı Konsolidasyon Oranı
S(T)	: Spektrum Katsayısı
DD-2	: 50 Yılda Aşılma Olasılığı %10 (Tekrarlanma Periyodu 475 Yıl) Olan Deprem Yer Hareketi Düzeyi
NL	: Doğrusal Olmayan

SİMGELER

τ	: Kesme Gerilmesi
ν	: Poisson Oranı
ρ	: Yoğunluk
G_{max}	: Dinamik Kayma Modülü
G	: Kayma Modülü
ξ	: Sönüm Oranı
γ	: Kayma Birim Deformasyonu
V_s	: Kayma Dalgası Hızı
V_{s30}	: Üst 30 metre zemin için ortalama kayma dalga hızı değeri
I_p	: Plastisite İndisi
$S_{ae}(T)$: Yatay Elastik Tasarım Spektral İvmesi
S_{DS}	: Kısa Periyot Tasarım Spektral İvme Katsayısı
S_{D1}	: 1.0 Saniye Periyot İçin Tasarım Spektral İvme Katsayısı
S_s	: Kısa Periyot Harita Spektral İvme Katsayısı
S_1	: 1.0 Saniye Periyot İçin Harita Spektral İvme Katsayısı
F_s	: Kısa Periyot Bölgesi İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı
F_1	: 1.0 Saniye Periyot İçin Yerel Zemin Etki Katsayısı

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. PEER veri tabanından seçilen 11 adet deprem yer hareketi kayıtlarına ait parametreler.....	49
Tablo 5.1. Şehirlere göre hasarlı bina sınıflandırması (Kaya, Ş., Saroğlu, E., Musaoğlu, N., 2005) Kaya, Ş., Saroğlu, E., Musaoğlu, N., 2005).....	70
Tablo 5.2. Yorgalar Gasilhane Arsası Sondaj Koordinatları.....	72
Tablo 5.3. Yorgalar Gasilhane Arsası Zemin Özellikleri (Sondaj Sıralı) (SAÜ-Geoteknik Laboratuvarı)	73
Tablo 5.4. Yorgalar Gasilhane Arsası Zemin Özellikleri (Derinlik Sıralı) (SAÜ-Geoteknik Laboratuvarı)	74
Tablo 5.5. Yerel zemin sınıfları (TBDY 2018)	75
Tablo 0.6. Çalışma alanı için farklı deprem düzeylerinden elde edilen S_s ve S_1 değerler.....	78
Tablo 0.7. Çalışmada kullanılan tabakalı zemin modeli parametreleri	79
Tablo 6.1. Belirlenen zemin modeli için analizde kullanılan ilk 30 m verilerinin gösterilmesi	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sekant kayma modülü Gsec ve Tanjant kayma modülü Gtan (Kramer, 1996)	15
Şekil 2.2. (a) Kayma birim deformasyon değişimi ile Gsec değerini gösteren omurga eğrisi; (b) Kayma birim deformasyon değişimi ile oluşan modül azalım eğrisi (Kramer, 1996)	16
Şekil 2.3. Kayma birim deformasyondaki değişim ile oluşan modül oranı grafiği (Saraçoğlu, 2017)	17
Şekil 2.4. Drenajsız kayma direncinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi	18
Şekil 2.5. Drenajsız kayma direncine göre en büyük kayma modülünün değişimi ...	18
Şekil 2.6. Kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ile sönüm oranı elde edilmesi	19
Şekil 2.7. Farklı plastisite değerine bağlı olarak ince daneli zeminlerde görülen modül azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)	20
Şekil 2.8. Farklı plastisite değerlerindeki ince daneli zeminlerin sönüm oranı eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)	21
Şekil 2.9. Ortalama efektif hücre basıncının (a) plastik olmayan (PI=0) ve (b) plastik (PI=50) zeminlerin modül azalım eğrileri üzerindeki etkisi (Ishibashi, 1992)	21
Şekil 2.10. Devirsel azalımın kayma modülüne etkisi (Vucetic ve Dobry, 1991)....	22
Şekil 2.11. Kesme gerilmesinin zaman bağlı değişimi ve tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer, 1996).....	28
Şekil 2.12. Deprem etkisinin kaynaktan yapıya doğru hareket aşamaları (Yamazaki, 2003).....	30
Şekil 2.13. Sismik tehlike analizi sırasında yer hareketi parametrelerindeki değişim (Kramer, 1996)	30
Şekil 2.14. Kaynakta meydana gelen depremin yer yüzeyine iletilmesi (Yoshida ve Iai, 1998).....	31
Şekil 2.15. Farklı saha şartlarında ortalama tepki spektrumları (%5 sönüm, Seed ve ark., 1976).....	34
Şekil 4.1. PEER veri tabanı giriş modülü	42
Şekil 4.2. Faylarda doğrultu ve atım ilişkisinin gösterilmesi (Koroğlu, 2019).....	44
Şekil 4.3. Bir fay kopma düzlemi boyunca dikey bir kesit kullanılarak deprem kaynağının ve mesafe ölçümlerinin gösterilmesi. Fay kopma düzleminin (L) uzunluğu, çarpma boyunca ölçülür (sayfanın düzlemine dik) (Baise, 2011).	45
Şekil 4.4. Kayıt süresi D5-95 grafik tanımı (Trifunac ve Brady, 1975)	46
Şekil 4.5. SeismoMatch programına deprem kayıtlarının eklenmesi	50
Şekil 4.6. SeismoMatch programına tanımlanan deprem kaydının ölçekli ve ölçeksiz görüntüsü	51
Şekil 4.7. Yerel zemin sınıfı ZC tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş Kocaeli ivme kaydının SeismoMatch programındaki görüntüsü.....	51

Şekil 4.8. Seçilen 11 adet deprem kaydının SeismoMatch programındaki ölçeklenmemiş görüntüsü	52
Şekil 4.9. Seçilen 11 adet deprem kaydının SeismoMatch programındaki ölçeklenmiş görüntüsü	52
Şekil 5.1. Adapazarı ilçesinde belirli noktalarda açılan sondaj yerleri (Erken, 2001)	55
Şekil 5.2. İlk 15 metre için Adapazarı zemin tabakaları (Erken, 2001).....	56
Şekil 5.3. a) Adapazarı ilçesi için tipik zemin kesiti b) Ağır hasarların olduğu Adapazarı'nda bölge için elde edilen zemin kesiti (Erken ve ark., 2003). 57	57
Şekil 5.4. Zemin profillerinin Adapazarı kent merkezi için gösterimi(Sancio ve ark., 2002).	57
Şekil 5.5. 2000-2002 yıllarına ait Adapazarı YASS seviyeleri (Bol, 2003)	58
Şekil 5.6. Adapazarı'nın KD'den ve GB'ye doğru morfolojik görünümü (Bol, 2003)	59
Şekil 5.7. Adapazarı'nın jeomorfolojisi ve jeolojisi (Bol, 2003).....	61
Şekil 5.8. Adapazarı sayısal haritası (Bol, 2003).....	62
Şekil 5.9. Belirli derinliklerdeki Adapazarı zemin haritası (Bol, 2003)	63
Şekil 5.10. 3.76-5.25 m arası zemin sınıfları (Bol, 2003).....	63
Şekil 5.11. Adapazarı ve çevresindeki yerleşkelerin Neo-Tektonik Haritası (Koçyiğit ve ark., 1999)	65
Şekil 5.12. Türkiye'nin aktif tektonik haritası (Okay ark., 2000'den değiştirilerek alınmıştır; GPS hız değerleri Reilinger ark., 2006'dan alınmıştır).....	66
Şekil 5.13. Marmara Bölgesi'nde yer alan aktif faylar ve son iki bin yılda $M_s:6,8$ değerinden daha büyük depremlerin meydana geldiği bulunduğu merkezlerin gösterilmesi(Ambraseys ve Finkel, 1991; Şaroğlu ve ark., 1992; Emre ve ark., 1998; Ambraseys, 2002; Armijo ve ark., 2002; Tan ve ark., 2008).	66
Şekil 5.14. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları interaktif web uygulaması Türkiye Haritası Diri Fayların Dağılımı (MTA 2012 Haritalarından Faydalanılarak)	67
Şekil 5.15. 17 Ağustos Depremi sonrası hasar dağılım haritası (MTA Genel Müdürlüğü 1999;akt.Vural, İ., 2012).....	68
Şekil 5.16. Bol 2003'e göre Adapazarı bölgesi hasar oranı dağılım haritası (Bol, 2003)	69
Şekil 5.17. 1999 Depremi'nin yaşandığı bölge ve yakın çevresinin aktif fay haritası (URL1).....	70
Şekil 5.18. Çalışma alanı görüntüsü.....	72
Şekil 5.19. Çalışma alanında kullanılan sondaj lokasyonları.....	72
Şekil 5.20. Yatay elastik tasarım ivme spektrum grafiği (TBDY 2018).....	77
Şekil 5.21. Çalışmada kullanılan DD-2 deprem yer hareketi spektrumu.....	78
Şekil 6.1. DeepSoil programı giriş ekranı	82
Şekil 6.2. Tabakaların özelliklerine uygun seçilecek veri giriş ekranı	83
Şekil 6.3. Tabakaların parametrelere göre belirlenmesi	84
Şekil 6.4. Zemin profiline uygun parametreler yardımıyla oluşturulan tabakalar	84
Şekil 6.5. Tabakalı zemin modelinin DeepSoil v7'deki görünümü	85
Şekil 6.6. Çalışmada kullanılan tabakalı zemin modelinin DeepSoil v7'deki görünümü	86
Şekil 6.7. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının DeepSoil programına tanımlanması	86
Şekil 6.8. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının seçilmesi	87
Şekil 6.9. İvme kaydının etkisi için istenilen derinlik seçimi	88

Şekil 6.10. Seçilen deprem kayıtları ve belirlenen profil için DeepSoil analiz aşaması	88
Şekil 6.11. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 ivme kaydının EW bileşeni için yüzeyde elde edilen spektral ivme değişimi	90
Şekil 6.12. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 ivme kaydının NS bileşeni için yüzeyde elde edilen spektral ivme değişimi	91
Şekil 6.13. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 kuvvetli yer hareketi EW ve NS bileşenlerinin geometrik ortalama bileşke spektrumları.....	91
Şekil 7.1. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama EW spektral ivme değişimi	93
Şekil 7.2. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama NS spektral ivme değişimi	94
Şekil 7.3. Doğrusal olmayan analiz sonucunda DD-2 spektrumu için elde edilen periyoda göre değişen yerel zemin etki katsayısı	94
Şekil 7.4. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama geometrik ortalama bileşke spektral ivme değişimi	95
Şekil 7.5. Çalışma sonucunda önerilen sahaya özel birleştirilmiş deprem tasarım spektrumu	96

ALÜVİYAL SAHALARDA SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

ÖZET

Sismik yer hareketi mühendislik yapılarının tasarımı için önemli olduğu kadar yapıların bulunduğu yerel zemin şartlarında da incelenmesi gereken önemli etkilere yol açmaktadır. Zeminlerde meydana gelen problemlerin çoğu deprem sırasında meydana gelen yerel zemin davranışı sonucunda taşıma gücü kayıplarının yaşanması, oturma, sıvılaşma ve zemin büyütme davranışları olarak gözlemlenebilmektedir. Deprem yükleri altında yapılarda oluşacak deformasyon seviyeleri yerel zemin koşullarına bağlı olarak değiştiği için zeminlerdeki dinamik davranış analizlerinin gerekliliği önem arz etmektedir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-TBDY 2018 kapsamında yapılan değişikliklerle tasarımlarda dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmiştir. Yönetmelik kapsamında yapılan değişikliklerden biri olarak kabul edebileceğimiz “ZF” yerel zemin sınıfı için Sahaya Özel Zemin Davranışı Analizi ’nin yapılması zorunluluğu ile TBDY-2018 16.5 bölümünde izlenmesi gereken adımlar belirtilmiştir. Yerel zemin sınıfı ZF dışında olan zeminler için ise analizlerin yapılması çalışma sahası özelinde gösterdiği zemin davranışına uygun olarak tasarımcıların inisiyatifine bırakılmıştır.

Bu çalışmada, Adapazarı'nda bulunan çalışma alanı için toplam 85 metre derinliğe sahip 5 adet döner sondaj sonucu elde edilen değerler kullanılmıştır. Çalışma alanında yapılan geoteknik ve jeofizik çalışmalar sonucunda 140 m derinlik seviyesine kadar tabakalı zemin modeli oluşturulmuştur. TBDY-2018 2.2.2'ye göre standart tasarım deprem yer hareketi olarak adlandırılan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve yerel zemin sınıfı ZC yerel zemin şartlarını sağlayacak şekilde deprem seçimi ve ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında TBDY-2018'de maddeleri göz önünde bulundurularak kuvvetli yer hareketi kayıtları için; deprem büyüklükleri M_w : 6.0-8 aralığında, V_{s30} değeri ZC zemin sınıfını temsil eden 350-760 m/s aralığında seçilmiştir. Toplamda çalışma alanı ile uyumlu 11 adet kuvvetli yer hareket kaydı belirlenmiş ve PEER veri tabanından elde edilmiştir. Seçilen bu kuvvetli yer hareketi kayıtları SeismoMatch2022 programı kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Ölçeklenen deprem kayıtlarının DeepSoil v.7 programına tanımlanması ile 56 adet tabakadan oluşan zemin profili çözümlenmiştir. DeepSoil analizi zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi (1D Nonlinear-NL) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Zemin davranış spektrumlarının her iki bileşenin ortalaması alınarak doğrusal olmayan analiz tamamlanmıştır. TBDY-2018 2.4.1 maddesi kapsamında sahaya özel deprem yer hareketi spektrumlarının ordinatları için belirlenen değer aralığına uygun biçimde deprem yer hareketi spektrumu %90 DD2_ZD spektrum değerlerinde grafiklerde gösterilmiştir. Çalışma sonucunda ise DD-2 deprem düzeyi için üst yapı analizlerinde kullanılması önerilen birleştirilmiş sahaya özel deprem tasarım spektrumu verilmiştir. Ortalama yer hareketlerinin verildiği grafikten yararlanarak kısa periyot için yerel zemin etki katsayısı F_s : 0.266 olarak hesaplanırken, 1,0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı F_1 : 1.155 olarak hesaplanmıştır.

SITE RESPONSE ANALYSIS ON THE ALLUVIAL FIELDS

SUMMARY

Seismic ground motion is not only important for the design of engineering structures, but also has significant effects on the local soil conditions where the structures are located. Most of the problems can be observed as loss of bearing capacity as a result of settlement, liquefaction and soil amplification behavior, as well as local soil behavior during earthquakes. Since the deformation levels that will occur in structures under earthquake loads vary depending on local soil conditions, the requirement for dynamic behavior analysis of soils is important. In sequence to determine the changes in the surface of local soil classes due to seismic movements, local soil behavior analysis is performed by considering the characteristic seismic properties of the site. The seismic waves can be observed on the surface under the effect of damping or amplification according to the dynamic properties of the soil. The amplified earthquake motion transmitted to building foundations can have destructive effects on structural elements at various deformation levels. Depending on the local soil conditions, the acceleration-time histories can reach high values in certain areas, resulting in very serious structural damage.

With the issues made within the scope of Turkey Building Earthquake Regulation-TBDY 2018, the points to be considered in the designs are specified. TBDY 2018 requires site-specific response analysis to be performed in order to determine the soil behavior in accordance with the actual soil behavior, and thus, it is targeted to model the results of the actual acceleration effects in the building designs in the most accurate modeling. The necessary stages to be applied are specified in section 16.5 of TBDY 2018 with the requirement of performing a Site Response Analysis for the "ZF" local soil classification, which can be considered as one of the issues introduced within the scope of the regulation. The site response analysis for soils other than local soil class "ZF" is at the designers' discretion in accordance with the behaviors of the soils exhibited in the field. The behavior of the soil contains the parameters that are important for the structural calculation methods of the structure to be constructed. The soil behavior or the parameters to be used in the design of the structures vary depending on the site response. By taking into account the soil-structure interaction, both soil properties and structural properties are considered to be compatible with each other in the designs. It is significant to identify the local site response and design features of the constructions in order to evaluate the damage assessments that may occur as a consequence of seismic activities. The amplified earthquake motion transmitted to structure foundations can have devastating effects on structural elements, including different kinds of deformation degrees. Bedrock accelerations with very minor magnifications can be amplified several times in some regions due to the influence of local site conditions, producing very severe damage. Many earthquakes in the past have revealed the importance of soil-structure interaction and the necessity to investigate site-specific analyzes.

The site response analysis are performed by taking into account the local seismic characteristics in order to determine the earthquake characteristics that will occur on the surface of local soil layers as a result of earthquake activities.

As in Adapazari, it is important to evaluate the local soil behavior in order to determine the most optimum design parameters and adequate design limits for structures to be designed on soft soils (nuclear power plants, sports complexes, industrial structures, high-rise structures, storage sites, etc.) composed of deep sedimentary soils. For this reason, not only the performance of the construction elements but also the soil behavior in accordance with the local soil properties should be taken into consideration while examining the seismic behavior effect during design phase of the constructions. Considering the variety of studies carried out, the performances that will be revealed according to the type of analyzes to be carried out should be evaluated in accordance with the field within the scope of the regulations and improvements should be continued by taking into account the recommendations in this respect. In order to examine the soil and structure behavior under the influence of earthquakes effectively, the soil profile and seismic records should be determined in accordance with the reality. For site response; soil profile and geotechnical properties of the soils should be realistically representative and constructed. The selection of earthquake records should be made appropriate to the design spectrum and according to the method used in the selection. In the TBDY 2018 regulation, several amendments have been made in order to minimize the damages that may occur during an earthquake. Site-specific design acceleration spectrum parameters were updated by redetermining the local soil classes. Six soil classes are represented and the parameters $(V_s)_{30}$, $(N_{60})_{30}$ and $(C_u)_{30}$ are used to characterize them. According to this regulation, soils termed as soil class ZF are defined as the soil for which a site response analysis is to be mandatory. Design earthquake response spectrum curves are used to inspect the effect of earthquake loads on structural design. The design spectra exhibit the dynamic characteristics of the seismic recordings. Within the scope of the regulations, it is also recommended to use a normalized acceleration spectrum to examine the impact of seismic motions on designs. AFAD Turkey Earthquake Maps have provided the opportunities to use the design of spectrum in a site-specific manner. With the AFAD application, spectrum curves can be used for different earthquake levels and soil classes to be applied in the structures planned to be designed.

In this study, the values obtained from 5 rotary drillings with a total depth of 85 meters were used for the study area located in Adapazari. With the help of the data acquired from the geotechnical and geophysical investigations conducted for the study area, a stratified soil model was constructed to a depth of 140 m. According to TBDY2018 2.2.2, the real earthquake records were selected and scaled in accordance with the standard design earthquake motion which is referred to as Earthquake Motion Level-2 (DD-2) and local soil properties. Within the scope of the study, in accordance with the seismicity of the site; earthquake magnitudes were assigned in the range of M_w : 6.0-8.0 and shear wave velocity $(V_s)_{30}$ was assigned in the range of 350-760 m/s for the first thirty meters to represent the local soil class ZC soils. In total, 11 strong ground motion records compatible with the study area were selected and the actual acceleration recordings were obtained from the The Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) database. These selected strong ground motion records were scaled using the SeismoMatch2022 program. By defining the scaled earthquake records in DeepSoil v.7 program, the soil profile which consists of 56 layers has been analyzed. The soil behavior analysis of DeepSoil has been performed in time-domain

using the nonlinear analysis method (1D Nonlinear-NL). The nonlinear analysis has been completed by averaging both the components (North-South (NS), East-West (EW)) of the soil behavior spectrum. According to the value range specified for the ordinates of site response earthquake ground motion spectra according to TBDY-2018 2.4.1, the earthquake ground motion spectrum has been shown in the graphics for 90 % DD2_ZD spectrum values. At the conclusion of the study, a site-specific integrated earthquake design spectrum has been obtained for the DD-2 earthquake level, which is recommended to be used during the design of the structure. By using the mean ground motion graphic, the local soil impact coefficient has been calculated as F_s : 0.266 for the short period, while the local soil impact coefficient has been calculated as F_1 : 1.155 for the period of 1.0 second.

1. GİRİŞ

Zemin davranışları tasarlanan yapı hesap yöntemleri için önemli parametreler barındırmaktadır. Zemin davranışına bağlı olarak yapılardaki davranışlar ya da yapılardaki tasarım parametreleri değişiklik göstermektedir. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınarak hem zemin özellikleri hem de yapı özellikleri tasarımlarda birbiriyle bağdaşık olarak düşünülmektedir. Meydana gelecek sismik hareketler etkisi altında zemin özellikleri ve yapı özellikleri meydana gelecek hasar sonucunu belirleyebilmektedir. Zemin doğal davranışına göre göstereceği etki dolayısıyla sismik hareketlerin etkisini büyütme veya sönümleme davranışı gözlemlenebilmektedir.

Deprem hareketleri sonucunda yerel zemin tabakaları yüzeyinde oluşacak deprem özelliklerini belirleyebilmek amacıyla, yerel sismik özellikler de göz önüne alınarak zemin davranış analizleri yapılmaktadır. Sismik hareketler sonucunda meydana gelen dalgalar zemin cinsine ve dinamik özelliklere bağlı olarak sönümlenme veya büyütme etkisi olarak yüzeye iletilmektedir. Yapı temeline iletilen büyütülmüş deprem hareketi, farklı deformasyon seviyelerinde olmak üzere yapı elemanları üzerinde yıkıcı etkilere sahip olabilmektedir. Çok küçük değerlere sahip ana kaya ivmeleri yerel zemin koşullarının etkisi ile bazı bölgelerde birkaç kat büyüyerek çok ağır hasarlara sebep olabilmektedir (Kramer, 1996).

Zemin davranışının incelenmesi için TBDY 2018 kapsamında sahaya özel zemin davranış analizleri gerçekleştirilerek yapı tasarımlarında gerçek etkilerin modellenmesi amaçlanmaktadır. Sahaya özel yapılan analizlerde zemin yapısı kadar kuvvetli yer hareketi spektrumlarının bilinmesi zemin davranışına uygun modelleme için önem arz etmektedir. Sahaya özel olarak yapılması planlanan incelemelerde yapıların depreme göre analizlerinin ve tasarımlarının yapılabilmesi için bölgenin fay türü, çalışma sahasının faya olan uzaklığı, meydana gelen depremin büyüklüğü, yerel zemin koşullarına bağlı olarak değişen özelliklere göre deprem seçimi ile analizler yapılmaktadır. Mühendislik açısından düşünüldüğünde deprem ivme spektrumları deprem özelliklerini yansıtan ve yapıların tasarımında kullanılan parametre olarak kabul edilmektedir (Ansal ve ark., 2011).

Geçmişte meydana gelen birçok deprem yapı-zemin etkileşiminin ne derece önemli olduğunu ve sahaya özel davranış analizlerinin irdelenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Adapazarı örneğinde olduğu gibi yumuşak zeminler olarak adlandırılabilir kalın çökelli zemin tabakalarında tasarlanacak farklı düzeylerde belirlenen (nükleer santraller, spor tesisleri, endüstri yapıları, yüksek binalar, depolama alanları vb.) bina kullanım sınıfları için zemin davranışının analiz edilmesi önem arz etmektedir.

Bu nedenle yapı tasarımları sırasında sismik davranışların incelemesinde sadece üst yapı elemanlarının meydana getirdiği etkilerin değil aynı zamanda yerel zemin koşullarının ortaya çıkardığı etkilerin de göz önüne alınması gerekmektedir. Yapılan çeşitli çalışmalar sayesinde yürütülen analiz tipine göre meydana gelen performanslar yönetmelikler kapsamında sahaya uygun olarak değerlendirilmeli ve bu doğrultudaki öneriler göz önüne alınarak geliştirilmeye devam edilmelidir.

2. LİTERATÜR

2.1. Önceki Çalışmalar

Şartnamelerde belirlenen çalışma sahalarında dizayn spektrumu kullanılarak sismik tehlike analizi yapılmaktadır. Özdemir ve ark. (2007) yapmış olduğu çalışmada deprem hesabı için 2007 Türkiye Deprem Şartnamesinde tanımlanan esaslara göre deprem kaydı ölçeklendirmesi ile önerilen spektrumlarla karşılaştırma yapmışlardır. Kayıtların ölçeklendirme işlemi için zaman ve frekans tanım alanında ölçekleme işlemlerini kullanmışlardır. Zaman tanım alanı için analizlerinde sadece kayıt genliği için frekans tanım alanı için yapılan analizlerinde ise frekans içeriği değiştirilerek deprem etkileri gözlenmiştir. Her iki yöntemle elde edilen ölçeklendirilmiş kayıtlar ile çalışmada belirlenen sistemin lineer ve nonlineer davranışlarını kıyaslamışlardır.

Fahjan (2008) tarafından yapılan yapısal tasarım analizinde ve sismik analiz incelemesinde zaman tanım alanındaki hesap yöntem değerlendirmeleri kullanılmıştır. Çalışmalarında 2007 DBYBHY kapsamında uygun görülen deprem ivme kayıtları seçimiyle zemin davranışı incelenmiştir. Yönetmelik gereksinimini karşılayacak deprem kayıtları aynı zamanda belirlenen farklı zemin tiplerine uygun olacak şekilde seçilmiştir. Uygun kuvvetli yer hareketi kayıtlarının seçimi için önerilen temel yöntemlerini ve kriterlerini ortaya koymuşlardır. 2007 Türkiye Deprem Yönetmeliğinde belirtilen parametrelere göre ölçekleme yöntemi uygulanan ivme kayıtlarını, farklı zeminler için en uygun olacak şekilde gerçek kayıtlardan seçmişlerdir.

Ansal ve ark. (2011) yapmış oldukları çalışmada deprem sırasında deprem dalgalarında zemin tabakalarının etkisi neticesinde değişimler gözlenebilirken zeminlerin mühendislik özelliklerinin de deprem dalgalarının etkisi nedeniyle değişim göstermesinin söz konusu olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmalarında bu değişikliklerin deprem dalgalarının anakayadan yüzeye doğru hareketi neticesinde farklı zeminlerde, farklı deprem dalga özelliklerinde incelenebileceği belirtilmiştir. Değişimlerin zemin kendi muhtevasına göre deprem ivme genliklerinde, ivme zaman kayıtlarının sürelerinde veya frekans değişimlerinde kendisini gösterebileceği ifade edilmiştir. Her

zemin davranışının kendine özgü davranış göstermesi sebebiyle mevcut çalışma sahalarına uygun zemin davranışı ve deprem özellikleri incelenmesinin önemine dikkat çekmişlerdir. Çalışma sahalarındaki zemin tabakaları belirlenmesinden sonra sismik haritalar ve sismik analizler göz önünde bulundurulmasını tavsiye etmişlerdir. Zemin özelliklerine göre yapılacak karşılaştırmaların ve davranışların yorumlanmasının en doğru şekilde yapılabilmesi için deprem kayıtlarının zemin davranışına uygun olacak şekilde seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla çalışmalarında zemin büyütme değişiminin incelemesi için tek boyutlu Shake91 program yardımıyla analiz yöntemi frekans ve düşey gerilme etkilerini hesaba alacak şekilde analiz işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 25 zemin profili için 22 spektra uyumlu olarak seçtikleri ivme zaman kayıtlarını kullanarak zemin büyütme analizlerinde %5 sönüm oranı için hesaplama yapmışlardır. 1999 Kocaeli deprem kaydı kullanılarak saha davranışına ait bulgular elde etmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kullanmış oldukları zemin büyütme analizi programı için sahaya özel deprem özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Ansal ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada deprem kuvvetlerinin olası depremler göz önünde bulundurulduğunda zemin kesitindeki tabakaya göre farklılıklar göstermesi beklendiğinden bahsetmişlerdir. Zemin tabakalarındaki farklılığın deprem kayıtlarındaki ivme, süre ve frekans değerlerinde artım-azalım değişimine sebep olacağı belirtilmiştir. Bu nedenle zemin davranışına göre meydana gelecek değişim olasılıklarını değerlendirmek için zemin tabakalarının kapsamlı şekilde incelenmesi gerektiğini önermişlerdir. Analizler için uygun deprem kayıtlarının seçilmesi ve kayıtların belirlenen çalışma alanı koşullarına uygun olarak ölçeklenmesi gerektiğini ,zemin büyütme davranışlarının da kapsamlı bir şekilde incelenmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında kullanılan deprem kaynak özellikleri birçok parametreden etkileneceği için ortaya çıkacak saçılımın gözlenebilmesi için fay türü, kaynak uzaklığı, deprem büyüklüğü, kayıt noktası yeri, kayma dalgası hızı, en büyük ivme gibi parametrelerin önemine dikkat çekmişlerdir. Yapılan zemin büyütme analizlerinde mühendislik ana kayası olarak tanımlanan V_s kayma dalgası hız değerinin değişiminin sismik tehlike analizlerindeki değişimi etkileyeceği belirtilmiştir. V_s kayma dalgasına göre belirlenecek ana kaya varsayımının sismik tehlike analizlerindeki azalım ilişkilerini ve ivme kaydı seçimlerini etkileyeceği belirtilmiştir. Farklı performans seviyelerine karşılık gelen deprem kayıtları, sahaya

özel analiz gerektiren sahalarda beklenen aynı olasılıksal aşılmayı göstermeyeceği için zemin büyütme etkisi sonucunda yüzeyde hesaplanan spektrumu gözlemleyerek karşılaştırmalar yapmışlardır.

Şahin ve ark. (2015) yapmış oldukları araştırmalarda derin alüvyon zemin profili üzerinde yer alan arazi için zemin davranış analizini incelemişlerdir. Zemin profilinin oluşturulması için jeofizik arazi deney sonuçları dahil olmak üzere laboratuvarında elde edilen zemin parametrelerinin kullanılması ile modelleme yapmışlardır. Çalışma sahaları için belirlenen özelliklerde, faylanma durumu ve bölge fay uzaklıkları göz önünde bulundurularak deprem kayıt seçimi yönetmeliğe uygun olacak şekilde belirlemişlerdir. Zemin profilinde kayma dalgası hızı (V_s) ≥ 760 ve 1500 m/s olmak üzere iki farklı derinlikteki farklı kaya türü için incelemelerini yürütmüşlerdir. Çalışmalarında belirlemiş oldukları Metot I'de mühendislik anakayası üzerinde D1-2-3 deprem düzeyi için tek boyutlu eşdeğer lineer ve nonlinear analiz yapmışlardır. Metot II olarak belirledikleri çalışma yöntemlerinde ise depremlerin anakayadan uygulanabilmesi için ters evrişim yöntemi ile zemin yüzeyinden alınan kayıtları anakayaya taşımışlardır. Çalışmalarında akarsuların taşıdığı derin alüvyal bir zeminde lineer ve nonlinear davranışlar karşılaştırması yapmışlardır. Derin alüvyon tabakaların dinamik davranış üzerindeki etkisinin gözlemlendiği D2-orta şiddetli deprem analizlerinin sonucunda literatürdeki çalışmalarla (Bartlett ve ark., 2015) uyum gösteren uzun periyot bölgesindeki ötelenmenin meydana geldiğini ve bu ötelenmenin zemin yüzeyinde elde edilecek tasarım spektrumunu da etkileyeceğini belirtmişlerdir.

Civelekler ve ark. (2018) yaptıkları çalışmaya göre yapı-zemin etkileşimi ve üst yapı davranışının gözlenmesi için sismik yükler altındaki zemin davranışının modellenmesinin önemine vurgu yapmışlardır. Çalışmalarında bu amaçla Eskişehir Odunpazarı bölgesi için dinamik davranış analizi gerçekleştirmişlerdir. Bu kapsamda zeminlerdeki deprem etkisinin, zemin tabakalanmasına bağlı olarak değişiklik gösterdiği ve her zeminin farklı sismik hareketler doğrultusunda büyütme veya sönmüleme davranışı gösterebileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında belirlenen üç farklı lokasyonda 30m derinliğe sahip 8 adet sondaj verisi kullanmışlardır. Sahaya özel dinamik zemin özellikleri ve bölgeyi temsil eden zemin profillerinden yararlanarak eşdeğer liner analiz yöntemi ile DeepSoil program modellemesini kullanmışlardır. Küçük sönmü değerlerinin dahi hareketlerdeki değişimi etkileceğini belirtmişlerdir. Üç lokasyonda zemin büyütme analizi için değerlendirmelerde

bulunmuşlardır. Büyütme (amplifikasyon) oranlarındaki değişimlerde yüksek periyot davranışlarının benzerlik gösterdiğini, pik değerlere farklı periyotlarda ulaşıldığını belirtmişlerdir. Aynı lokasyonun farklı konumlu sondajlarından elde edilen büyütme oranları ile zemin özelliklerindeki değişimin sonuçları ne kadar etkileyebileceğini göstermişlerdir. Bununla birlikte 2016 TBDY’de sahaya özel zemin davranışı için belirtilen 16. Bölüm maddesine göre ‘‘Doğrusal Olmayan Serbest Zemin Modeli ve Deprem Analizi’’ gereken zeminlerde doğrusal olmayan değişim incelenmesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir.

Afacan ve ark. (2019) yaptığı çalışmaya göre zeminin sismik yükler altında gösterdiği davranış zemin cinsine ve parametrelerine göre farklılık göstermiştir. TBDY 2018 yönetmeliği ile birlikte sahaların özel davranışının yapılar üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesi için sahaya özel davranış analizi ZF türü zeminler için zorunlu hale getirilmiştir. Yeni zemin sınıfları ile saha analizinin zorunlu kılındığı ZF türü zeminlerde kayma dalgası hızı kullanılarak eşdeğer lineer ve lineer olmayan analizler yapılmaktadır. V_s kayma dalgası hızının etkisi analiz parametreleri arasında büyük öneme sahiptir. Yalnızca V_s kayma dalgası hızı ile değil zeminin gerçek sondaj ve laboratuvar verileri kullanılarak zemin profili oluşturulup zemin davranışı gözlemlenmektedir. Afacan ve ark. (2019) bu çalışmada ZD türü zemin sınıfında benzer kayma dalgası hız değerleri için eşdeğer lineer ve lineer olmayan analiz değişimlerinin gösterilmesini amaçlamışlardır. SK-Ç ve SK-H olarak belirlenen iki ayrı sondaj noktasında benzer kayma dalgası hız değeri için analiz yapmışlardır. SK-Ç olarak belirlenen lokasyonda eşdeğer lineer analiz sonucu zemin profili spektrum davranışını büyütmüş, lineer olmayan analiz sonucunda ise zemin profilinin kısa ve orta periyot değerlerinde anakaya ile aynı davranışı gösterdiği belirtilmiştir. SK-H lokasyonu için ise eşdeğer lineer ve nonlineer analizlerin anakaya ivmesini sönmüleyecek davranış sergiledikleri belirtilmiştir. Eşdeğer analizler sonucunun spektral ivmelerde, nonlineer davranışa göre az da olsa büyüme gösterdiği ve davranış eğrisinin sağa kaydığını gözlemlemişlerdir. Yönetmelik önerilen spektrum zarfının maksimum ivme değerlerine göre makul seviyede olduğu belirtilmiştir. Eşdeğer lineer analizlerin literatürde kullanımının yaygın olduğundan ancak zemin dinamik özelliklerinden sönmü oranı belirlenmesinde gerçek zemin davranışını tam olarak yansıtamadığı için eşdeğer lineer analizlerin yüzey davranış tahmininde gerçekçi sonuçlar veremeyeceği belirtilmiştir. Elde etmiş oldukları sonuçlara göre zemin

özelliklerine bakılmaksızın yalnızca kayma dalgası hızının analizde kullanılmasının zemin davranışını yansıtmakta yeterli olamayacağını saptamışlardır. Ayrıca lineer olmayan analizlerin zemin davranışını doğru yansıttığını, böylece mühendislik tasarımı ve ekonomisi açısından verimliliği arttıracığını çalışmalarında belirtmişlerdir.

Aytekin ve ark. (2019) Tarafından yapılan çalışmada zeminin dinamik davranış analizi için sığ ve derin zemin kesitinde incelemeler yapılmıştır. Derin alüvyon bir sahada modellemiş oldukları araştırma sondajları ile zemin parametrelerinin belirlenmesi için eş zamanlı yürütülen yerinde yer altı sismik deneyleri ile parametrelerin elde edilmesi sağlanmıştır. Deprem giriş hareketi incelemesi hem mevcut zemindeki ZB sınıfı taban kayasında hem de yönetmelik kapsamında belirtilen ZC-ZD zemin sınıfları taban kayası için irdelenmiştir. TBDY-2018 'e göre derin alüvyon zeminlerde deprem giriş hareketinin, yüze yakın bir tabakadan yerel zemin etki katsayısı değerlerinin büyütülmesi ile tanımlanabileceği belirtilmiştir. Çalışmalarının yer aldığı saha konumuna, kullanılacak analiz parametrelerine ve yerel zemin sınıflarına uygun olarak yönetmelik kapsamında belirtilen tasarım ivme spektrumu ile uyumlu 31 adet yer hareket kaydı seçilmiş derin ve sığ modeller üzerindeki analizler karşılaştırılmıştır. Bir boyutlu dinamik analizlerinde DeepSoil yazılımını kullanmışlardır. Zemin tabakalarının kayma birim şekil değiştirme değerlerinin %1'i aşmadığını belirterek frekans tanım alanında analiz yöntemini tercih etmişlerdir. Zemin tabakalarının değişim eğrileri için belirlenen derinliklerdeki efektif gerilme-plastisite indisi değerlerine göre Ishibashi-Zhang (1993) bağıntısını kullanmışlardır. Derin zemin modelleri için elde etmiş oldukları spektral ivme değerlerinin, spektrum köşe periyot aralığında bulunan periyotlarda yönetmelik ivme değerlerinden %25-50 oranında daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Elde ettikleri sahaya özgü spektral ivme değerlerindeki farklılıkların, tasarımı planlanan yapılarda tasarım değerlerinin üstüne çıkabileceğini bazı yapılarda ise güvensiz tarafta kalınmasına sebep olacağına işaret etmişlerdir.

Mühendislik çalışmaları kapsamında depremlerin yapılar ve zemin davranışı üzerindeki etkisi araştırmaların sürekliliğini kaçınılmaz kılmaktadır. Türkiye etkin deprem kuşakları üzerinde bulunduğu için araştırmalarda ve tasarımlarda deprem etkisi incelenmektedir. Sismik yükler altında yapıların davranışının güvenli tarafta kalması için saha analizleri öncelikli hale getirilmektedir. Sismik yükler altında zemin

davranışı için zeminin yapısını, zemin tabaka sayılarının ve zemin parametrelerinin gerçeğe uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. Bozkurt ve ark. (2020) tarafından analizi yapılmış olan Aksaray ili Hamidiye bölgesi için eşdeğer doğrusal analiz yöntemi kullanılmış, çalışmalarının yürütüldüğü sahanın dinamik davranışı incelenmiştir. Hamidiye bölgesinde yapılmış sismik ölçüm verilerine göre çalışması yürütülen zemin için “B orta tehlike düzeyi” sınıfına uygun modelleme yapmışlardır. Analizlerinde sönüm oranı değeri, yönetmelik kapsamında da belirtildiği gibi %5 olarak seçmişlerdir. Deprem kaydı olarak 1999 Kocaeli deprem kaydı seçilmiş ve DeepSoilde zemin davranışını modellemişlerdir. Elde etmiş oldukları veri analiz sonuçlarına göre zemin büyütme oranlarında, aynı bölge sondajlarında bile farklılıklar olduğunu belirtilmişlerdir. DeepSoil programının gerçeğe yakın sonuçlar verdiği belirtilmiş ve sahaya uygun gerçekçi çözümler için sahaya özgü dinamik davranış analizinin yapılmasını tavsiye etmişlerdir.

Alver ve ark. (2021) Çalışmalarında TBDY 2018 kapsamında sınıvlaşma potansiyeli olan zeminlerde zemin davranışına göre derin temel tasarımını incelemişlerdir. Mudanya'da yürütmüş oldukları çalışma sahası için bir yapının zemin-kazık-yapı etkileşimi ve sınıvlaşma incelemesi de dahil olmak üzere geoteknik mühendislik tasarım aşamalarını gerçekleştirmişlerdir. Konut yapılarının incelemesi için Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) seçilmiştir. Tasarım depremi büyüklüğünün belirlenmesi hususunda yönetmelikte herhangi bir bilgi yer almadığı için yönetmeliğin hazırlama aşamasında kullanılan ASCE 7 ve ilgili NEHRP kaynaklarından yararlanmışlardır. Alver ve ark. (2021), bölge anakarasına uygun olacak şekilde 11 adet deprem kaydı seçmiş ve PEER veri tabanından gerçek deprem kayıtları alınarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Kazıklı temel deprem hesabında kullanılacak şekilde ivme spektrumlarının ve tasarım spektrumlarının belirtilen sınırları göz önünde bulundurularak TBDY 2018 Bölüm 2.5.3'e göre dönüştürülüp RspMatch (GeoMotions, LLC) programında ölçekleme işlemlerini tamamlamışlardır. Saha davranışı göz önünde bulundurularak zemin profilinde sınıvlaşma potansiyeli bulunan tabakaları mevcut olduğu için boşluk suyu basıncının da dikkate alındığı DeepSoil programı kapsamında bulunan Dobry-Matasovic (1993) yaklaşım seçilerek ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan dinamik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Elde etmiş oldukları ivme spektrumlarının yanı sıra yapı-zemin etkileşim değerlendirmesinde kullanmak üzere zeminin yatay yer değiştirmesinin ve kayma şekil değiştirmesinin

derinlikle değişimini incelemişlerdir.Yönetmelik kapsamında sahaya özgü davranış analizi için belirlenecek gerçek ivme kayıtlarının yerel zemin koşulları ile beraber tasarım yer hareketi düzeyine, deprem büyüklüğüne, fay uzaklığına, kaynak mekanizmalarına uygun olarak seçilmesi gerekliliğinin belirtilmesi, ayrıca gerçek ivme kayıtları için bu kriterlerin sağlanamaması halinde kayıtların zaman tanım alanında benzeştirilmiş kayıtlardan elde edilmesi gerekliliğinin belirtilmesi; benzeştirilmiş kayıt spektrum ordinat değerlerinin de tasarım spektrum ordinat değerlerinden daha küçük olamayacak şekilde elde edilmesi gerekliliğinin uygulama aşamasında zorluklar yaratabileceğini belirtmişlerdir.

Yapısal hasarların nedenleri arasında yer alan başlıca faktörlerden bir tanesi de yerel zemin koşullarındaki farklılık olarak belirtilebilmektedir. Zeminde deprem etkisi neticesinde yaşanan her değişim yapıların tasarımını, yapı ömrünü ve hasarlarını etkilemektedir. Sismik yükler altında zeminlerin gösterdiği sıvılaşma, zemin büyütmesi davranışı gibi meydana gelen durumlar yerel zemin tabakalanması, zemin cinsi, zeminin dinamik özellikleri çerçevesinde doğrudan etkilenmektedir. Yapı hasarlarının minimum seviyelere indirgenebilmesi, tasarımların güvenli tarafta kalınarak gerçeleştirilebilmesi için sıvılaşma analizlerinin ve zemin davranış analizlerinin incelenmesi gerekmektedir. Gücek ve ark. (2021) yaptıkları çalışma çerçevesinde TBDY yönergeleri kapsamında 11 adet deprem kaydı seçerek belirlenen bölgenin dinamik davranışını incelemişlerdir. Çalışmaları doğrultusunda 124 farklı sondaj verisinden yararlanarak yerel zemin sınıfını ZD olarak belirlemişlerdir. Zemin davranış analiz seçiminde, yönetmelik kapsamında da belirtilen sıvılaşma bölgelerinde frekans tanım alanında eşdeğer lineer analizlerin kullanamayacağı belirtildiği için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini seçmişlerdir. Çalışmalarında DeepSoil programı ile zemin profili modellenmiş sıvılaşma analizi için boşluk suyu basınçlarının dikkate alınmadığı General Quadratic Model (GQ/H) formülasyonunu kullanmışlardır. Zemin profilinin oluşturulması aşamasında Darendeli (2001), Dobry ve Matasovic (1993) ve Matasovic ve Vucetic (1995) yöntemleri seçilerek doğrusal olmayan analiz sonuçlarını elde etmişlerdir. Yönetmelik kapsamında deprem kayıt sayısı için belirlenen ve bölge şartları ile uyumlu 11 adet ivme kaydı DD-1, DD-2, DD-3, DD-4 deprem yer hareketi düzeyine göre ölçeklendirilerek sıvılaşma analizleri için incelemeler yapmışlardır. Her deprem düzeyi için ivme kayıtlarında ölçekleme işlemi yapmışlardır ancak yapı tasarım

değerlendirmesi için DD-1 ve DD-2 deprem düzeylerini dikkate almışlardır.Çalışma sahaları için genel zemin profilinin göz önünde bulundurulmasıyla 20 m derinlikten itibaren killi tabakaları için sıvılaşma oranının 0 olduğunu, kumlu tabakalara doğru gidildikçe sıvılaşma riski oranının artış gösterdiğini ve bu oranın 11-13.00 m aralığında maksimum %96 değerine ulaştığını belirtmişlerdir.

Bilal (2021) tarafından yapılan çalışmada kazıklı temellerin deprem etkisi altında yumuşak zeminlerde yer alan yüksek yapı tasarımlarıyla yapı-kazık-zemin etkileşimindeki davranışı incelenmiştir.Bu konuyla ilgili Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nin içeriğinde tasarımlar için belirlenen yöntemlerin detaylı bir şekilde verilmiş olduğunu belirtmiş olsalar da yine de her aşama için seçilen parametre çeşitliliği nedeniyle anlaşılmasının karmaşık bir süreçten ibaret olduğunu belirtmişlerdir. Belirtmiş oldukları bu problem için çözüm yolu olarak literatür kapsamında belirlenmiş metod, 1B Eşdeğer Doğrusal/Doğrusal olmayan modeller yardımıyla ivme kayıtlarının işlenmesi ve işlenen kayıtlardan elde edilen veriler yardımıyla 2B sonlu eleman analizi çıktıları doğrultusunda tasarımların yapılması olduğunu belirtmişlerdir.Ayrıca tüm modellemelerin yönetmelik (TBDY-2018) kapsamında Deprem Tasarım Sınırı (DTS), Zemin Sınıfı ve Bina Yükseklik Sınıfı kategorileri gözetilmesi dahilinde belirlenen sınırlarda çözümlenmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

DeepSoil programında oluşturulan serbest zemin modelinin Flac3D modeliyle de karşılaştırmışlardır.DeepSoil saha tepki analiz aşamaları için malzeme modeli olarak GQ/H (Generalized Quadratic/Hyperbolic, Groholski vd., 2016) ve Darendeli (2001) düzeltilmesi ile kayma modülü azalım eğrileri için Vucetic&Dobry (1991) eğrilerine uyumlu olacak eğrileri kullanmışlardır.Her zemin modeli için ($V_s=150-250-350-450$ m/s) için karşılaştırmalar yapmış, genel olarak iki programdan da elde edilen sonuçların uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Karşılaştırmalar kapsamında ivme kaydının tek yönlü etkisi incelenmiş, ancak yönetmelik kapsamında da belirtildiği gibi çift yönlü etkinin daha doğru olduğunu bunun kanıtı olarak da tek yönlü etki sonucunda moment, kesme kuvveti ve deplasmanlarda yüksek değerler elde edilmesini göstermişlerdir.Ayrıca kayıtların TBDY-2018'de de belirtildiği gibi çift yönlü olarak etki ettirilmesi ile gerçek sonuçlara ulaşılabileceği için çift yön incelemesinin bir zorunluluk olarak görülmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Güçlü yer hareketi etkisi ile yapı-kazık-zemin sisteminin dinamik yük altındaki davranışının gözlemlenebilmesi için 1999 Kocaeli deprem kaydını seçmiş, bu deprem kaydının bütün periyot değerlerinde etkisinin bulunması ve ayrıca deprem kaydının enejisinin yüksek olması nedeniyle seçildiğini belirtmişlerdir. Çalışmaları kapsamında hazırlamış oldukları modellerin farklı deprem etkileri ile nasıl davranış göstereceğinin incelenmesi için 11 adet deprem kaydı seçilerek DD-1 seviyesinde ölçeklendirme işlemi yapmışlardır ve bu deprem kayıtlarını çift yönlü olmak üzere modele taban seviyesinden etki ettirmişlerdir.

Seçmiş oldukları ve ölçeklendirmiş oldukları 11 adet ivme kaydınının farklı deprem büyüklüklerinde ve gömme derinliklerinde meydana gelen değişim sonuçlarını incelemişlerdir. Her bir kayda ve gömme derinlik değişimine göre elde ettikleri analizlerinin sonucunda özet olarak yapı-kazık sistemi için belirlenen girdi hareketine bağlı olarak titreşim halindeki zemin profili çerçevesinde direndiği müddetçe kazıklarda iç kuvvet artışının gözlemlendiği, direnmenin olmadığı durum için ise kazık davranışında esnek hareketlerin gözlemlendiği fakat diğer taraftan üstyapı yerdeğiştirmelerinin arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonuçlarının daha önce yapılan Bazaiar (2018) çalışmalarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Belirlemiş oldukları malzeme model parametreleri, zemin rijitliği, gömme derinliği etkisi ve deprem ivme genlik değişimi ile üstyapı davranışının ve kazık tasarımı için irdelenmesi gereken iç kuvvet etkisinin araştırmasını yapmışlardır. Kazıkların daha rijit zemin modellerinde beklenen sonucu göstererek içsel kuvvetlerinde azalmanın gözlemlendiğini, V_s 200 m/s zemin özelliklerinde diğer zeminlere kıyasla yüksek değerlerde sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bunun sebebinin de yumuşak zeminlerdeki dinamik davranış etkisinin yüksek olmasından kaynaklandığı yorumunu yapmışlardır. Genel sonuç itibarıyla de doğrusal olmayan davranışın başlamasıyla üstyapının, kazık iç kuvvetleri için azaltıcı etkide davranış gösterdiğini belirtmişlerdir.

Analizlerinde belirtmiş oldukları kazık analiz sonuçlarının yanı sıra zemin ortamındaki değişim doğrultusunda V_s değerleri azaldıkça zemin ortamındaki sönümden dolayı spektral ivme değerlerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ancak yaklaşık $T=1$ değerinden itibaren büyük değerlerde ivme değerlerinde artış gözlemlendiği çalışmalarında belirtilmiştir.

Eseller-Bayat ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada TBDY 2018'e göre deprem bölgesinde bulunan tank yapısının geoteknik değerlendirilmesi ele alınmıştır. Çalışmalarının yapıldığı mevcut sahada sıvılaşma potansiyelinin olduğu ve kayma mukavemetinin düşük olduğu zeminlerde bulunması nedeniyle doğrusal olmayan zemin davranış analizi yapmışlardır. Çalışma sahalarında zemin profili oluşturmak ve anakaya derinliği saptamak amacıyla yapılan jeofizik çalışmaları ile 150 m derinliğe kadar kayma dalgası hız profili elde edebilmişlerdir. Bu doğrultuda yönetmelikte belirtilen şekilde sahaya özel zemin davranış analizlerinde kullanılacak deprem kayıtları ZC ya da ZD zemin sınıfına uygun olacak yerel zemin etki katsayıları ile büyütülmüş deprem spektrumlarına uyacak biçimde ölçeklendirilmişlerdir ve serbest zemin modelini 150 m derinlikte DeepSoil v.7 programında modellemişlerdir. 150m derinlik için kayma dalgası değerini $180 < 350 < 360$ m/s belirlemişler ve ZD zemin sınıfı için belirlenen kayma dalgası hız aralığında kaldığını belirterek zemin profilini oluşturmuşlardır. DeepSoil analizlerinde zemin profilini oluştururken düşük kayma dalgası değerine sahip tabakalar için iletilecek maksimum frekans ($f_{maks} > 30$ Hz) değerinin sağlanması için zemin profili 102 alt tabakayla oluşturmuşlardır. PEER veri tabanından seçilen deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesi ile DeepSoil programında boşluk suyu basıncının dikkate alınıp alınmamasına göre analizler yapılmıştır. Davranış analizi yapılırken boşluk suyu basıncının var olduğu Groholski ve ark. (2016) tarafından önerilen doğrusal olmayan GQ/H modeli ve boşluk suyu basıncının olmadığı Konder ve Zelasko (1963) tarafından oluşturulan ayrıca Matasovic (1993) tarafından geliştirilen doğrusal olmayan MKZ modeli ile analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Boşluk suyu basıncının dahil edildiği analiz sonuçlarının dahil edilmeyen analiz sonuçlarına göre yüzey spektrumlarında daha düşük değerler verdiği belirtilmiştir. Zemin yumuşamasının ve sıvılaşmasının, yanal yer değiştirmelere ve düşey oturmalara neden olduğu tahmininde bulunmuşlardır.

Kara ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada İzmir ili Konak ilçesi sınırlarında belirlenen çalışma sahasında dört farklı derinlik için analiz yapmışlardır. Yönetmelikte belirtilen dört ayrı deprem düzeyi tasarım spektrumuna uygun 11 adet deprem kaydı seçilerek ölçeklenen kayıtlar ile saha davranış analizlerini tamamlamışlardır. Seçmiş oldukları 11 adet deprem kaydını çift yönlü olarak kullanarak çalışma sahalarındaki zemin davranışlarını zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi ile incelemişlerdir. Analizler sonucunda V_s değeri 200-280 m/s aralığında bulunan

zemin davranış analizi gerektiren zeminler için önerilerde bulunmuşlardır. Çalışmalarının sonucunda TBDY 2018 Madde 16.5.2.3 (a) uyarınca belirlenen derinlik incelemesi için genişliği fazla olan yapılar için üst sınır getirilmesi gerektiğini ve hâkim zemin periyodunun 0.5 sn ve altındaki periyot değerlerinde olan yapı tasarımlarında zemin davranış analizi için ASCE 7-16 (ASCE7-16 2017) Bölüm 20.3.1 koşuluna uygun olarak ayrıca zemin davranış analizine gerek duyulmadan proje sahasında belirlenen yerel zemin sınıfı için elde edilen spektrum değerlerinin kullanılmasını önermişlerdir.

2.2. Zemin Davranışı

Dinamik yükler altında zemin davranışı statik yüklemelerde oluşan problemlerdeki gibi kapsamlı olarak düşünülmelidir. Zeminler dinamik yükleme davranışı altında iki yönden ele alınmaktadır. Birincisi zeminleri, yapıların yerleştirildiği temel altı malzemesi olarak ikincisi ise zeminlerin inşaat malzemesi olarak kabul edildiği yapılar olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Zeminlerin temel altı malzemesi olarak ele alındığı durumlarda taşıdığı her bir yapıyı atalet kuvvetlerinin şiddetinde oluşturacağı değişimle etkilemektedir. Zeminin tasarım aşamasında inşaat malzemesi olarak düşünüldüğü yaklaşımlarda zeminlerin maruz kaldığı tekrarlı yüklerle karşı gösterdiği direnç değeri önemli kazanmaktadır. Zeminlerin deprem etkisi gibi tekrarlı yük altındaki davranışının gözlemlenebilmesi için dinamik özellikleri hakkında fikir sahibi olmamızı sağlayan parametrelerin de incelenmesi gerekmektedir. Hem yapıların modellemesi hem de zemin davranışlarının analizi kapsamında bu konu dikkat çekmektedir. Sahaya özel zemin davranışının özellik kazanması yine tekrarlı yükler altındaki zemin davranışında dikkat edilmesi gereken konular arasında başı çekmektedir. Zeminlerde tekrarlı yükler altında drenajlı ve drenajsız durumlar için ortaya çıkacak sıvılaşma, aşırı deformasyon etkilerinin değişimi ve göçme davranışlarının incelenmesi gerekmektedir.

2.3. Zeminlerde Oluşan Gerilme-Şekil Değiştirme Davranışı

Zeminler genel olarak anizotrop malzemelerdir ve elasto-plastik davranış göstermektedir. Zeminlerde farklı şekil değiştirme seviyelerinde ve farklı dinamik özellikleri dolayısı ile farklı şekil değiştirme davranışları gözlemlenebilmektedir. Gerilme-şekil değiştirme niteliğinin değerlendirilebilmesi için zeminlerin dinamik

kayma modülü ve sönüm oranı etkisiyle meydana getirdiği birim şekil değiştirmelere dikkat edilmesi gerekmektedir.

Zeminlerin karakteristiklerine bağlı olarak gösterdikleri dinamik davranış özelliği zeminde oluşan deformasyon mertebesi ile ilişkilidir. Yüksek seviyelerde meydana gelebilecek şekil değiştirmelerde ise uygulanan yük etkisiyle zeminde oluşan mukavemet kayıpları ve plastik şekil değiştirme nitelikleri önemlidir.

Büyük seviyelerde şekil değişimine sebep olan genlik ve çevrim sayısındaki değişimler, zeminlerdeki mukavemet özelliklerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için göz önünde bulundurulmalıdır.

Zeminlerde dinamik davranış sonucu meydana gelen düşük deformasyon seviyelerindeki değişimi belirleyen rijitlik, sönümlenme, yoğunluk vb. parametreler dalga yayılımını etkileyen zemin özellikleri olarak değerlendirilmektedir. Gerilme-şekil değiştirme davranışının karakteristik özellikleri dinamik kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinden her bir çevrimin sonunda (histerez ilmiği üzerinden) elde edilmektedir. Deformasyonların belirli sınırlar içerisinde gözlemlendiği deneylerde çevrim sayısının artması (deformasyon düzeyi sabit) kayma gerilmesindeki genliklerin azalmasına ve sonucunda ise histerez ilmiklerinin küçülmesine, yatık hale gelmesine sebep olmaktadır.

Dinamik davranış özelliklerinin belirlenmesi ve analizlerdeki olası şekil değiştirme seviyesi değerlendirmeler için belirleyici bir rol oynamaktadır. Zeminlerde gözlenen dinamik davranış şekil değiştirme aralığının belirlenmesine göre farklı seviyelerde meydana gelmektedir. Elastik sınırlar içerisinde kalması istenen şekil değiştirmelerin teorik olarak yaklaşık 10^{-5} değerinden küçük olması gerekmektedir. Bu değerler ile önerilen şekil değiştirme seviyelerinin elde edilmesi ve zemin davranışına uygun olarak kalınması istenen elastik sınırlar çerçevesinde dinamik kayma modülünün maksimum değere ulaştığı ve sabit olarak alındığı kabulü yapılmaktadır. Şekil değiştirme seviyesinin 10^{-3} değerlerine ulaşması halinde zeminlerin elasto-plastik davranış göstereceği belirtilmektedir. Elasto-plastik davranışa uygun olarak dinamik kayma modülü şekil değiştirmelerle ters orantılı olarak azalan değerlere ulaşacaktır.

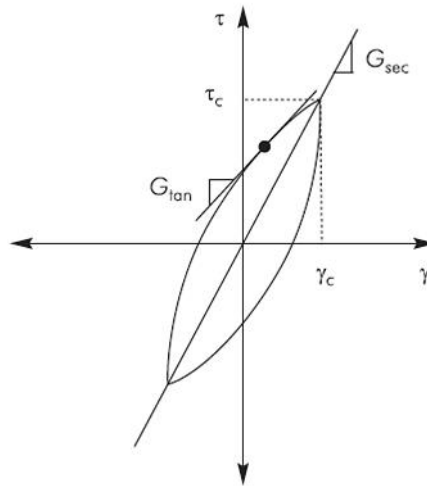
Dinamik yüklemelerle birlikte enerji sönümlenmesi adı verilen özellik bu şekil değiştirme seviyelerinde başlamaktadır ve bu özellik sönüm oranı olarak tanımlanmaktadır. Zeminlerde meydana gelen enerji sönümlenmesi histeritik biçimde

gerçekleşmektedir. Zemin özelliklerini bu seviyelerdeki şekil değiştirme değerlerinde yansıtılabilmek amacıyla kayma modülü ve sönüm oranı şekil değiştirme davranışının fonksiyonu olarak belirtilmelidir. Şekil değiştirme değerinin 10^{-2} mertebelerinden daha büyük değerlerde elde edilmesi sonucunda zeminlerde kalıcı şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Teorik olarak belirlenmiş bu mertebelerdeki şekil değişimlerinde oluşan seviye artışı kayma modülü ve sönüm oranı değerlerinin elde edilmesini sağlayan yükleme çevrimlerindeki hareketi de değiştirmeye devam edecektir.

2.3.1. Kayma modülü

Zeminlerde meydana gelen kayma gerilmelerinin, gerilme etkisi sonucunda gösterdiği birim şekil değiştirme oranı kayma modülü olarak tanımlanmaktadır. Kayma modülündeki artış, malzemedeki rijitliğin artışı olarak değerlendirilebilmektedir.

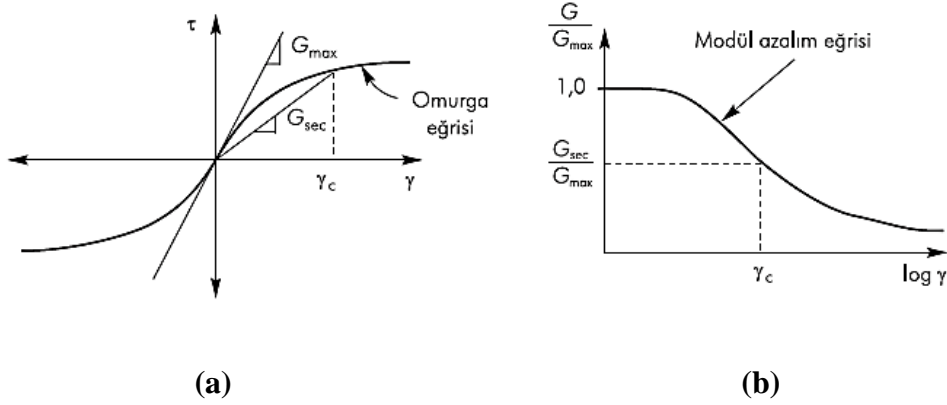
Sismik yüklere maruz kalan zemin davranışı sonucunda Şekil 2.1.' de gösterilen histerezis döngüsü meydana gelmektedir. Şekil 2.1. histerezis eğrisinin eğimi kayma birim deformasyona karşılık gelen kayma gerilme değerini vermektedir. Elde edilen bu eğim (G_{tan}) tanjant kayma modülü olarak tanımlanmaktadır. Dinamik kayma modülünün elde edilebilmesi için çevrimler sonucu oluşan histerezis ilmiklerinin uç noktalarından geçen doğrunun eğimi alınmalıdır. Kayma modülü, şekil değiştirme düzeyine göre farklı değer aralıklarında elde edilir. G_{tan} modülü döngü boyunca değişebilmektedir, G_{sec} modülü (Denklem 2.1) ise eğrinin genel eğimi olarak tanımlanabilirken yaklaşık olarak elde edilebilmektedir.



Şekil 2.1. Sekant kayma modülü G_{sec} ve Tanjant kayma modülü G_{tan} (Kramer, 1996)

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (2.1)$$

τ_c ve γ_c sırasıyla kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyon olarak ifade edilmektedir. Dinamik kayma oranı ise birim deformasyona değişimle ters orantılı olarak deformasyon düzeyi arttıkça azalmaktadır ve bu doğrultuda doğrusal olmayan zemin davranışı sergilenmektedir. Kayma modülü birim kaymaya bağlı olarak şekil değiştirme (γ) mertebesindeki artışla orantılı olarak azalım göstermektedir. Zeminlerin lineer elastik davranış gösterdikleri sınır içerisinde belirli kayma birim genlik değerlerine ulaşabildikleri bilinmektedir. Dinamik kayma modülü pik değeri bu aralıkta elde edilmektedir ve sabit bir değer almaktadır.

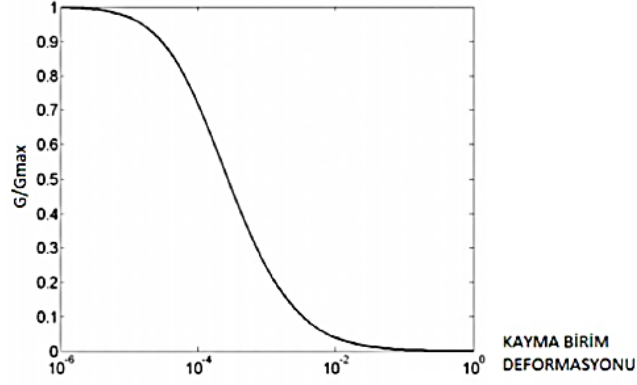


Şekil 2.2. (a) Kayma birim deformasyon değişimi ile G_{sec} değerini gösteren omurga eğrisi; (b) Kayma birim deformasyon değişimi ile oluşan modül azalım eğrisi (Kramer, 1996)

Zemin elemanlarındaki sekant kayma modül değeri, tekrarlı birim deformasyondaki genlik değişimiyle farklı değerler almaktadır. Farklı birim deformasyon değerlerine karşılık gelen genlikler ile meydana gelen histerez döngü uç noktalarının birleştirilmesi Şekil 2.2.a'da gösterilen omurga eğrisini oluşturur. Oluşan omurga eğrisinin sıfır noktası maksimum kayma modülü (G_{max}) olarak adlandırılmaktadır.

Büyük tekrarlı birim deformasyon genlik değerlerinde modül oranı (G_{sec}/G_{max}) 1'den küçük değerler almaktadır. Zeminlerin rijitlik derecelerindeki farklılıktan söz edebilmek için maksimum kayma modülü (G_{max}) ve modül azalım oranındaki (G/G_{max}) değişimin dikkate alınması gerekmektedir.

Modül oranının birim deformasyon genliğine bağlı olarak gösterdiği değişim, azalım eğrisi Şekil 2.2.b ve Şekil 2.3.'te gösterilen grafikler aracılığıyla ifade edilebilmektedir.



Şekil 2.3. Kayma birim deformasyondaki değişim ile oluşan modül oranı grafiği (Saraçoğlu, 2017)

G_{max} değerinin arazi deneylerinin yardımıyla da bulunabilmektedir. Dinamik kayma modülü değerine ulaşmak için enine dalga hızı ve zeminin yoğunluk değerinin bilinmesi gerekmektedir. Arazide yerinde yapılan sismik ölçümler yardımıyla kayma dalga hızı (V_s) belirlenebilmektedir. Belirlenen kayma dalgası hızının yardımıyla başlangıç (düşük genlikli) kayma modülü Denklem 2.2'de verilen ilişki ile hesaplanabilmektedir.

$$G_{max} = \frac{V_s^2}{g} \times \rho_t \quad (2.2)$$

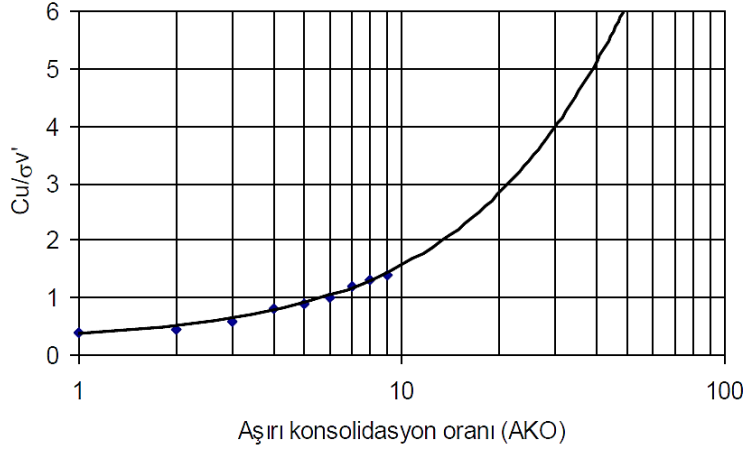
G_{max} : Küçük Şekil Değiştirme için Dinamik Kayma Modülü

V_s : Kayma Dalgası Hızı

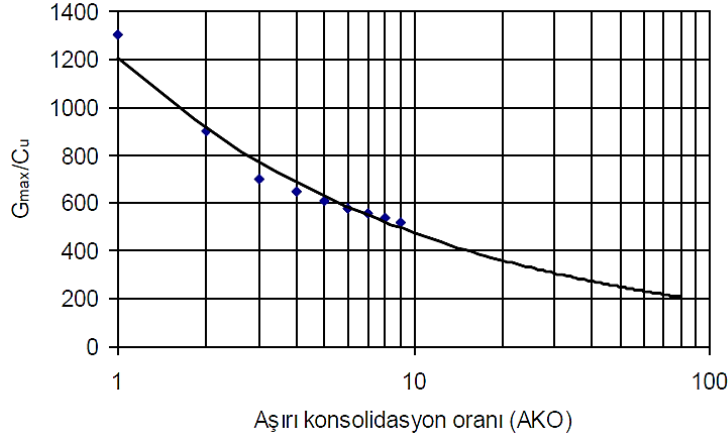
ρ_t : Zeminin Toplam Birim Hacim Ağırlığı

g : Yerçekimi İvmesi (gr/cm^3)

Dinamik kayma modülünü killi zeminlerde elde edebilmek için ilk olarak drenajsız kayma direnci ile OCR (AKO-Aşırı Konsolidasyon Oranı) arasındaki ilişkinin deneysel olarak belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.4.'te efektif gerilme değerine göre normalize edilmiş drenajsız kayma direncinin, OCR değerindeki değişime bağlı olarak davranışı gösterilmektedir. Şekil 2.5.'te yer alan eğri yardımıyla drenajsız kayma direncine göre normalize edilmiş G_{max} değerinin, farklı aşırı konsolidasyon oranlarındaki değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Drenajsız kayma direncinin aşırı konsolidasyon oranı ile değişimi

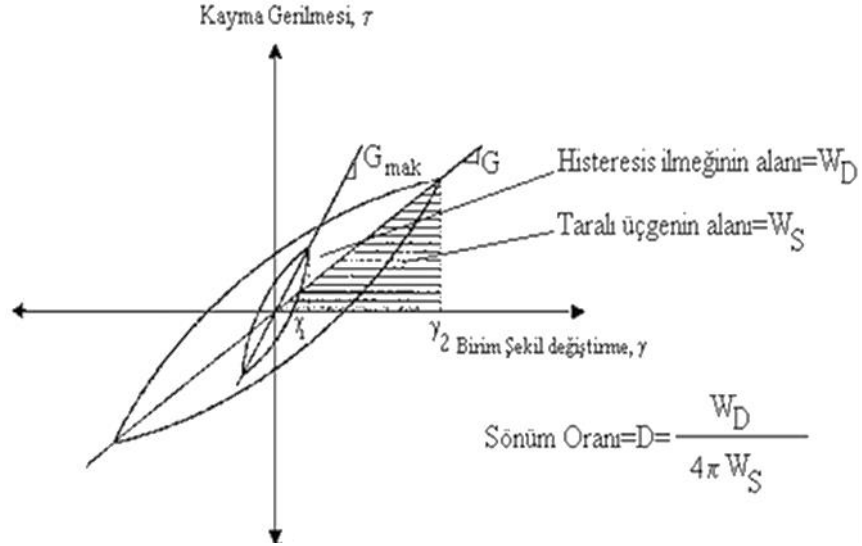


Şekil 2.5. Drenajsız kayma direncine göre en büyük kayma modülünün değişimi

Arazideki bulunan kohezyonlu zeminin belirli bir noktasında efektif gerilme ile aşırı konsolidasyon oranı belirlenir. Aşırı konsolidasyon oranının belirlenmesi ile Şekil 2.4. 'te görülen benzer deneysel eğriler yardımıyla drenajsız kayma direnci ulaşılabilir. Aşırı konsolidasyon oranı ve drenajsız kayma direncinin bilinmesi ile Şekil 2.5. 'teki gibi grafiklerden yararlanarak G_{max} değerinin elde edilmesi sağlanmaktadır.

2.3.2. Sönüm

Genel tanım itibariyle dinamik yükler altında malzemelerde ya da mekanik sistemlerde açığa çıkan enerji miktarının ısıya dönüşüp azalması olarak ifade edilebilirken zemin elemanlarının dinamik yükler altında gösterdiği davranış etkisiyle her bir çevrim sonucunda yutulan enerji miktarı sönüm olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.6. Kayma gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ile sönüm oranı elde edilmesi

Sürtünme gibi nedenlerle ortaya çıkan enerji kayıplarının etkisiyle plastik şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Plastik şekil değiştirmelerine sebep olan etkenin enerjinin sönümlenmesiyle ortaya çıktığı bilinmektedir. Sönüm oranı, zemin tarafından sönümlenen enerji (W_D), histeres ilmeğin uç noktalarının birleştirilmesiyle Şekil 2.6.' da elde edilen doğrunun altında kalan, sistemde depolanan birim deformasyon enerjisi (W_S) olarak tanımlanan değerin oluşturduğu, üçgenin alanına oranı olarak tanımlanmaktadır. Deprem yükleri altındaki zemin davranışının anlaşılabilmesi amacıyla modellenen dinamik problemlerde; zeminlerin sönümleme özellikleri, dalga yayılım davranışları modelin gerçek davranışa uygunluğu açısından önem arz etmektedir.

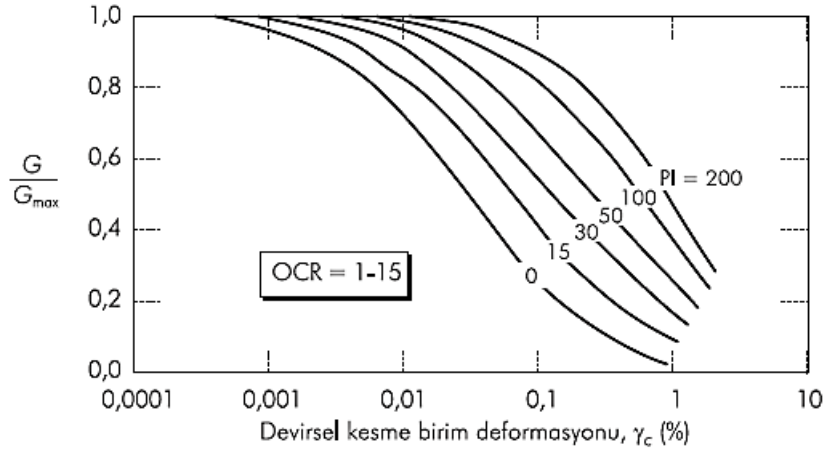
2.3.2.1. Modül azalımı G/G_{max} ve sönüm ilişkileri

Zeminlerdeki rijitlik derecesi tekrarlı yükler altındaki çevrim sayısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Çevrim sayısındaki artış ile meydana gelen rijitlik değerindeki azalma zeminlerde yumuşama olarak tanımlanabilmektedir. Bu tür zeminlerin dinamik davranışı literatürde bulunan boyutsuz $G-\gamma$ ve $\beta-\gamma$ omurga eğrilerinin kullanılmasıyla modellenebilmektedir.

Zeminlerdeki plastisite değeri, G/G_{max} (modül azalımı) eğrilerin biçimini etkilemektedir. Şekil 2.7.'de ileri derecedeki plastik davranış gösteren zeminlerin birim deformasyon değişiminin (γ), düşük plastisiteli zeminlere göre daha büyük değerlerde olduğu gözlemlenebilmektedir. Plastisitesi yüksek olan zeminlerde kayma

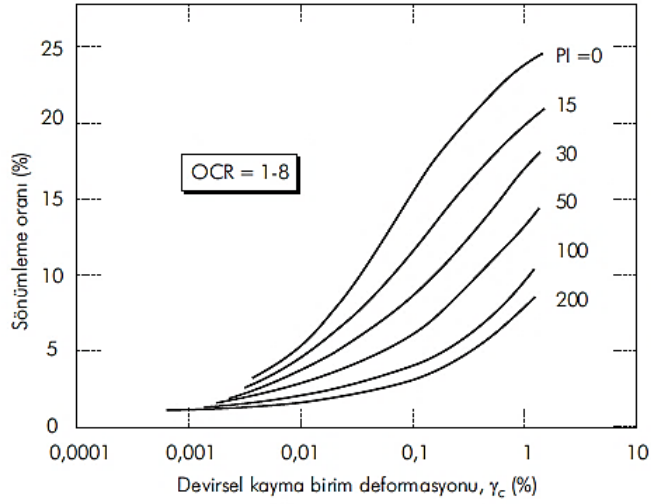
modülü değeri, düşük plastisiteli zeminlerdekine oranla daha yavaş biçimde azalma göstermektedir.

$G_{max} = G_0$ kabulü ile elde edilen başlangıç kayma modülü değeri plastisite indisinin artmasıyla artmaktadır. Plastiklik derecesindeki artış ile birim şekil değiştirmelerde meydana gelen deformasyonlar Şekil 2.7.'de görülen eğrilere benzer biçimde modellenebilmektedir.



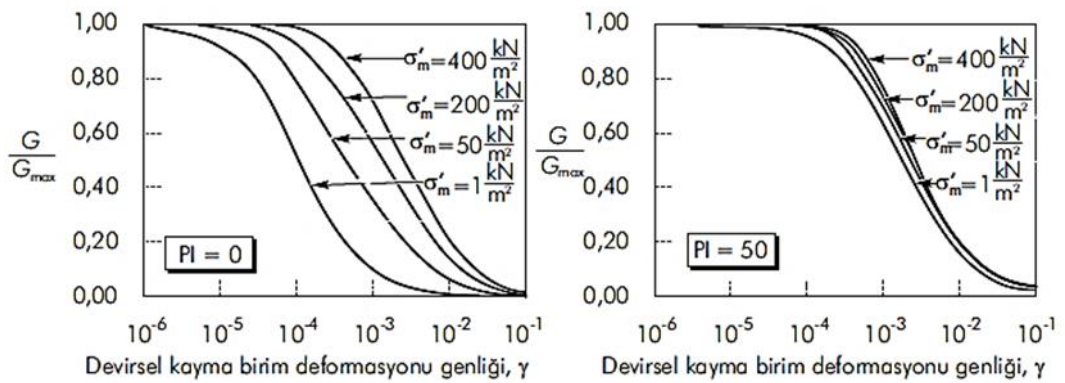
Şekil 2.7. Farklı plastisite değerine bağlı olarak ince daneli zeminlerde görülen modül azalım eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)

Zeminlerin plastik değerine değişen davranışını temsil eden Şekil 2.7.'de yer alan eğriler, zemin çökelinin bir deprem etkisi altında büyütme ya da sönümleme davranışı göstermesi hakkında bilgi verebilmektedir. Şekil 2.7.'de yer alan $PI=0$ eğrisi iri daneli zeminler için kullanılır ve sönüm oranı, kayma birim deformasyon değerine eşit olmaktadır. Şekil 2.8.'de bulunan sönümleme eğrileri ince daneli zeminler davranışını temsil etmektedir.



Şekil 2.8. Farklı plastisite değerlerindeki ince daneli zeminlerin sönüm oranı eğrileri (Vucetic ve Dobry, 1991)

Plastiklik derecesinin düşük olduğu zeminlerde oluşan efektif basınç, modül azalım davranışını (G/G_{max}) etkilemektedir. Plastisite değerinin farklı olduğu zeminlerde $PI=0$ (Şekil 2.9.a) ve $PI=50$ (Şekil 2.9.b) olarak belirlenen, düşük ve yüksek plastisiteli zeminlerde çevre basıncı etkisiyle meydana gelen modül azalım eğrileri gösterilmektedir. Efektif basıncın daha yüksek değerlerde elde edildiği zeminlerde meydana gelen kayma birim deformasyon (γ), daha düşük efektif basınç değerlerinde meydana gelen deformasyonlardan büyük olmaktadır.

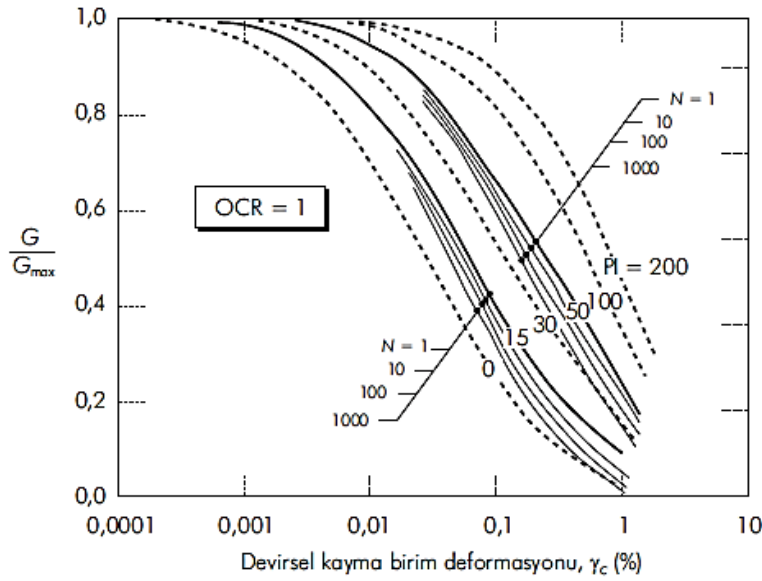


(a)

(b)

Şekil 2.9. Ortalama efektif hücre basıncının (a) plastik olmayan ($PI=0$) ve (b) plastik ($PI=50$) zeminlerin modül azalım eğrileri üzerindeki etkisi (Ishibashi, 1992)

Gerilme kontrollü deneylerde meydana gelen boşluk suyu basınç değişimleri vb. değişimler sonucunda kayma birim deformasyon genlik değeri, artan devir sayısı (N) ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Modül azalım değeri (G/G_{max}) ve devir sayısı (N) arasındaki ilişki (Şekil 2.10.) kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerde, kayma birim deformasyon değeri devir sayısındaki genliğin artışı ile ters orantılı olarak azalmaktadır. Devir sayısındaki artışın etkisiyle çevrimli yüklere maruz kalan numunelerde, rijitlik değeri de azalma eğilimi göstermektedir.



Şekil 2.10. Devirsel azalmanın kayma modülüne etkisi (Vucetic ve Dobry, 1991)

2.3.3. Kayma dalgası hızı

Kayma dalgası hızı (Denklemler 2.3), bir kaynaktan açığa çıkarılan kayma enerjisi ile zemin içinde oluşturulan kayma dalgalarının kaynaktan bilinen mesafelerde bulunan bir veya daha fazla alıcı noktasında gözlenerek, kayma dalgasının hareket ettiği mesafenin varış zamanına bölünmesiyle elde edilen önemli bir parametredir (İyisan,1994).

$$V_s = \frac{d}{t_s} \text{ (m/s)} \quad (2.3)$$

Burada;

V_s : kayma dalgası hızı (m/s)

d : kaynak ile alıcı arasındaki mesafe (m)

t_s : kayma dalgası varış zamanı (s)

Kayma dalgası hızı mevcut ampirik eşitlikler yardımıyla belirlenebilmektedir. Standart penetrasyon deneyi (SPT) ve koni penetrasyon deneyi (CPT) sonuçlarından kayma dalgası hızı tahmin edilebilmektedir. SPT deneyi ile zemin sınıflandırması için numune almak, zeminlerin sıklık derecesini belirlemek ve (N) darbe sayısının bulmak mümkün olmaktadır. Zemin incelemelerinde kullanılan zemin hakkında fikir sahibi olmamızı sağlayan birçok geoteknik parametre (Birim hacim ağırlıkları, içerdiği su muhtevası, içsel sürtünme açısı, OCR değeri, boşluk oranı (e) , kayma modülü, poisson oranı, sismik dalga hızları vb.) mevcuttur. Her bir parametrenin gerçekçi bir şekilde tayin edilebilmesi ve aralarında korelasyon kurulabilmesi için çeşitli ölçüm tekniklerinden yararlanılmaktadır. Kayma modülünü, deneyler ile arazide ölçülen kayma dalgası hız değerinden Denklem 2.4 ile bulmak sağlıklı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (2.4)$$

Karşıt kuyu deneyinin yapılamaması durumunda kayma dalgası hızı, SPT deneyinden elde edilen penetrasyon darbe sayısı (N) ile ampirik formül dönüşümleri yapılarak hesaplanabilmektedir (Kaptan ve Tezcan, 2012). Tablo 2.1.'de farklı zemin tipleri için literatürde yer alan ampirik formül dönüşüm örneklerinden bazıları verilmiştir.

Tablo 2.1. SPT-N ve V_s arasındaki korelasyonlar (Thaker ve Rao, 2011)

	Tüm zemin tipleri	Kum	Kil
Kanai (1966)	$V_s=19N^{0.5}$	---	---
Ohba ve Toriumi (1970)	$V_s=84N^{0.31}$	---	---
Shibata (1970)	---	$V_s=32N^{0.5}$	---
Imai ve Yoshimura (1970)	$V_s=76N^{0.33}$	---	---
Fujiwara (1972)	$V_s=92.1N^{0.337}$	---	---
Ohta ve diğ. (1972)	---	$V_s=87N^{0.36}$	---
Ohsaki ve Iwasaki (1973)	$V_s=82N^{0.39}$	---	---
Imai ve Yoshimura (1975)	$V_s=92N^{0.329}$	---	---
Imai (1977)	$V_s=91N^{0.337}$	$V_s=80.6N^{0.331}$	$V_s=80.2N^{0.292}$
Ohta ve Goto (1978)	$V_s=85.35N^{0.348}$	$V_s=88N^{0.34}$	---
JRA(1980)	---	$V_s=80N^{0.33}$	$V_s=100N^{0.33}$
Seed ve Idriss (1981)	$V_s=61N^{0.5}$	---	---
Imai ve Tonouchi (1982)	$V_s=97N^{0.314}$	---	---
Sykora ve Stokoe (1983)	---	$V_s=100.5N^{0.29}$	---
Jinan (1987)	$V_s=116.1(N+0.3185)^{0.202}$	---	---
Okamoto ve diğ. (1989)	---	$V_s=125N^{0.3}$	---
Lee (1990)	---	$V_s=57.4N^{0.49}$	$V_s=114.43N^{0.31}$
Sisman (1995)	$V_s=32.8N^{0.51}$	---	---
Athanasopoulos (1995)	$V_s=107.6N^{0.36}$	---	$V_s=76.55N^{0.445}$
Iyisan (1996)	$V_s=51.5N^{0.516}$	---	---
Jafari ve diğ. (1997)	$V_s=22N^{0.85}$	---	---
Kiku ve diğ. (2001)	$V_s=68.3N^{0.292}$	---	---
Jafari ve diğ. (2002)	---	---	$V_s=27N^{0.73}$
Hasancebi ve Ulusay (2007)	$V_s=90N^{0.308}$	$V_s=90.82N^{0.319}$	$V_s=97.89N^{0.269}$
Maheshwari ve diğ. (2010)	$V_s=95.64N^{0.301}$	$V_s=100.53N^{0.265}$	$V_s=89.30N^{0.358}$

2.4. Zeminlerin Deprem Etkisi Altındaki Davranışları

2.4.1. Dinamik zemin özelliklerinin ölçülmesi

Dinamik zemin özelliklerinin belirlenebilmesi için çeşitli ölçümler yapılmaktadır ve ölçümler için belirlenen deneyler, üzerinde çalışılan problem özelinde dikkatli bir şekilde seçilmeli ve gerçekleştirilmelidir. Deneyler ve belirlenen deney yöntemleri,

başlangıç gerilme şartları ve beklenen tekrarlı yükleri mümkün olan en yaklaşık halde ve her zaman tekrarlayabilecek şekilde yansıtması gerekmektedir. Dalga yayılmasını etkileyen zemin özellikleri rijitlik, sönümleme, poisson oranı ve yoğunluğu olarak örneklendirilebilmektedir. Dinamik analiz için rijitlik ve sönümleme parametreleri zemin davranışının anlaşılabilmesi açısından önem arz etmektedir. Tekrarlı olarak yüklenen zeminlerdeki rijitlik ve sönümleme değerleri çoğu mühendislik problemi açısından önemlidir.

Zeminler doğrusal olmayan malzemeler olduğu için bu değerlerdeki değişim yalnızca düşük deformasyon seviyelerinin oluşması ile değil orta ve yüksek düzey deformasyonlarda da gözlemlenebilmektedir. Yüksek deformasyonlarda devirsel yük sayısı ve hızı kayma dayanımını etkileyebilir ayrıca bu deformasyonlarda hacim özelliklerindeki değişimler de önemlidir.

Zeminler tekrarlı yükleme etkisi altında doğrusal olmayan, inelastik gerilme-birim deformasyon davranışı göstermektedir. Düşük birim deformasyon düzeylerinde zeminin rijitliği en yüksek; sönümlemesi ise en düşük değeri almaktadır. Yüksek birim deformasyon seviyelerinde zeminin doğrusal olmayan davranışı ve inelastik özellikleri artmaktadır. Düşük rijitliklerde yüksek sönümleme değerlerine ulaşılır. Bu tür davranışların anlaşılabilmesi ve modellenmesi karmaşıktır ancak geoteknik deprem mühendisliği analizlerinin büyük bir çoğunluğunda bu özelliklerin yaklaşık olarak belirlenmesi davranışların yorumlanabilmesi için yeterli olmaktadır.

Geoteknik deprem mühendisliği analizlerinde kullanılacak gerilme-birim deformasyon modelleri üç başlık altında kategorize edilebilmektedir.

2.4.2. Doğrusal ve doğrusal olmayan davranış modeli

Zeminin doğrusal davranışı için her bir zemin tabakasında sabit kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmektedir. Doğrusal olmayan zemin davranışının incelenmesi için ise gerilme-deformasyon ilişkisine bağlı olarak kayma modülü ve sönüm oranı sürekli bir değişim göstermektedir.

2.4.2.1. Doğrusal zemin davranış modeli

Eşdeğer doğrusal modellerde zeminler doğrusal viskoelastik malzeme olarak düşünülmektedir. Zeminlerdeki doğrusal davranışta her bir zemin tabakası için sabit kayma modülü ve sönüm oranı belirlenmektedir. Zeminin rijitliği genellikle düşük

birim deformasyonlarda mobilize olan maksimum kayma modülü ve kayma modülünün büyük birim deformasyonlarda nasıl azaldığını gösteren modül azalım eğrisi ile karakterize edilmektedir. Sönümlenme davranışı ise artan birim deformasyon genliğiyle doğru orantılı olarak sönümlenme oranındaki artış ile karakterize edilmektedir. Zeminin plastisite derecesi modül azalım eğrisi ile sönümlenme eğrisinin şekillerini etkilemektedir. Düşük plastisiteli zeminlerde ise eğri şekilleri çevre basıncından etkilenmektedir.

Transfer fonksiyonları, yer tepki analizinde ana kaya ivmesi gibi girdi hareketi için yer değiştirme, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu gibi farklı tepki parametrelerinin bulunması amacıyla kullanılmaktadır. Doğrusal yaklaşımlardaki kilit rol transfer fonksiyonlarının doğru değerlendirilmesi olarak belirtilebilmektedir.

2.4.2.2. Transfer fonksiyonları

Zemin yüzeyinde meydana gelen hareket genlik değerlerinin kaya yüzeyindeki hareket genlik değerine oranlanması transfer fonksiyonu olarak belirlenmektedir. Zemin yüzeyindeki genlik değeri, kaya yüzeyinde oluşan genlik ile transfer fonksiyonunun çarpımı şeklinde elde edilebilmektedir.

Transfer fonksiyonu yaklaşımında ana kaya girdi hareketindeki zamana bağlı değişim genelde (Fast Fourier Transform) FFT kullanılarak Fourier serisi biçiminde temsil edilmektedir. Ana kaya girdi hareketi için Fourier serisinde yer alan her bir terim, transfer fonksiyonu ile çarpılarak zemin yüzeyinde meydana gelen hareketin Fourier serisi elde edilmektedir. Sonrasında ise ters FFT (Fast Fourier Transform) kullanılması ile yine zaman tanım alanında zemin yüzeyi çıktı hareketi elde edilmektedir. Transfer fonksiyonu bu sayede ana kaya girdi hareketinde oluşan her bir frekans değeri için zeminlerin bu hareketi nasıl büyüttüğünü veya sönümlendiğini belirlemektedir. Giriş hareketinin transfer fonksiyonu ile frekans ortamında çarpılması ise zemin yüzeyindeki hareketin frekans ortamında elde edilmesini sağlamaktadır.

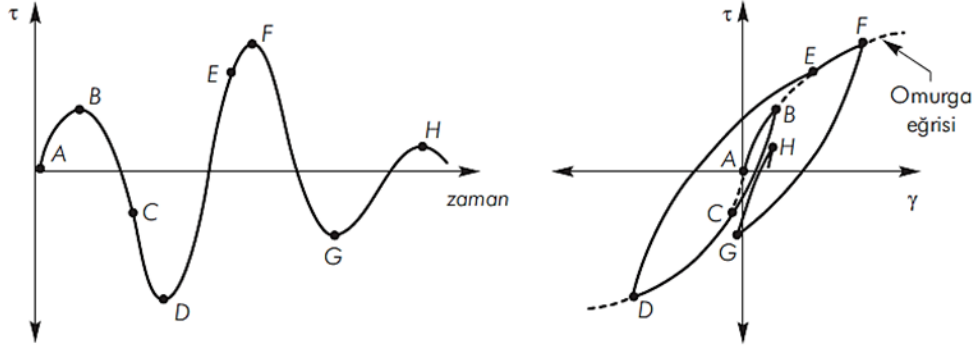
Herhangi bir noktada zemin transfer fonksiyonu iki biçimde belirlenebilmektedir. İlk olarak deneysel çalışmalar, yani deprem kayıtlarının kullanımı ile belirlemek; ikinci olarak ise teorik olarak geliştirilmiş bağıntılar yardımıyla tek boyutlu, iki boyutlu veya üç boyutlu modellemeyle zeminlerdeki transfer fonksiyonları hesaplanabilmektedir.

2.4.2.3. Doğrusal olmayan zemin davranış modeli

Doğrusal olmayan zemin davranışında gerilme-deformasyon ilişkisine göre kayma modülü ve sönüm oranı sürekli değişmektedir. Doğrusal olmayan yaklaşıma kıyasla eşdeğer doğrusal yaklaşım hesap yöntemi açısından ve birçok analiz için makul sonuçlar verse de sismik yer tepkisinin doğrusal olmayan gerçek davranışını yaklaşık biçimde ortaya koyan bir yöntem olarak değerlendirilmektedir.

Tekrarlı doğrusal olmayan modeller, doğrusal olmayan bir omurga eğrisi ile boşaltma yükleme davranışını kontrol eden bir dizi kural kullanılarak zemin davranışı temsil edilmektedir ve tekrarlı yüklere maruz kalan zeminlerde gerilme-birim deformasyon eğrileri genliklerindeki değişiklikler ile doğrusal olmayan davranış incelenebilmektedir. Omurga eğrisi şeklini belirleyen iki parametre bulunmaktadır. Bu parametrelere bağlı olarak omurga eğrisi şekillenmektedir. Bu parametrelerden birincisi zeminin başlangıç (düşük birim deformasyon) rijitliği; diğeri de (yüksek birim deformasyon) kayma dayanımı olarak belirlenmektedir. Zemin doğrusal davranış gösterdiği durumlarda yer hareket genlikleri düşük seviyelerde gözlemlenebilmektir ancak tekrarlı yükler altında ve büyük genlikli titreşim hareketlerinin oluşması halinde doğrusal olmayan zemin davranışı ortaya çıkmaktadır. Doğrusal olmayan zemin davranışı bu büyük genlikli ve tekrarlı titreşimlerin plastik deformasyonları meydana getirmesi ile oluşmaktadır.

Boşaltma-yükleme kuralları, gerilme çevrilmesi sırasında modelin davranışını kontrol eder ve modelin düzensiz tekrarlı yükler altındaki davranışı gerçek zeminlerin sergilediği biçimle eşleşmeyi desteklemektedir. Eşdeğer doğrusal modellerden farklı olarak tekrarlı doğrusal olmayan modeller kalıcı birim deformasyonların gelişmesine imkân tanımaktadır. Zeminlerde gözlenen dinamik davranış birçok parametreye ve değişkene bağlı olarak geliştiği için karmaşık bir modelleme olarak karşımıza çıkmaktadır. Dinamik davranıştaki değişen parametreler dinamik hareketin karakteristik özelliklerine bağlı olarak (frekans genliği, süresi vb.) değişiklik göstermektedir. Zeminin doğrusal olmayan davranışını gösteren gerilme-birim deformasyon grafiği birim deformasyon seviyelerindeki değişime göre şekillenmektedir. Şekil 2.11.'de kayma gerilmesinin zamana bağlı değişimi A noktasından başlayarak gerilme-birim deformasyon davranışını temsil eden omurga eğrisi üzerindeki kesik çizgi değişimi ile gösterilebilmektedir. Kayma gerilmesindeki değişim ile gerilme-birim deformasyon davranışı çevrimler halinde devam etmektedir.



Şekil 2.11. Kesme gerilmesinin zaman bağılı değişimi ve tekrarlı yükleme sonucu gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer, 1996)

Doğrusal olmayan modeller tekrarlı yükleme sırasında efektif gerilmedeki değişimleri yorumlayabilmek için kullanılan boşluk suyu basıncı oluşturma modelleri ile eşleşebilmektedir. Tekrarlı doğrusal modellerde boşluk suyu basıncındaki değişim ve dolayısıyla da efektif gerilmedeki değişimler hesaplanabilmektedir. Boşluk suyu basınç artışına bağlı olarak efektif gerilmeler azalır ve doğru orantılı olarak G_{max} ve τ_{max} değerlerinde de azalmalar görülmektedir. Omurga eğrisinin şekli ve pozisyonu G_{max} ile τ_{max} 'a bağlı olduğundan bu tür davranışın modellenmesi için boşluk suyu basıncı artışına bağlı olarak orijinal omurga eğrisinin küçülmesi (yumuşaması) beklenmektedir.

Gerçek zemin davranışının yansıtılabilmesi adına gerilme-birim deformasyon modelindeki rijitlik; eşdeğer doğrusal modelde varsayıldığı gibi sadece tekrarlı birim deformasyon genliğine bağlı olmayıp, zeminin gerilme geçmişine de bağlıdır. Tekrarlı doğrusal modeller, zemin tepkisinin hesaplanması amacıyla modellemelerde kullanıldığında deprem sarsıntısı sırasında, öncesinde ve sonrasındaki boşluk suyu basıncının değerlendirilebilmesi açısından fırsat oluşturmaktadır.

2.4.2.4. Zemin davranış modellerinin karşılaştırılması

Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yer tepki analiz sonuçları birçok farklı araştırmacı tarafından (örnek olarak; Joyner ve Chen, 1975; Martin ve Seed, 1978; Dikmen ve Ghaboussi, 1984) karşılaştırılmış ve genel olarak aşağıda kısaca bahsedilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Eşdeğer doğrusal analizlerin niteliklerindeki doğrusallık yanıltıcı halde gözlenebilir, örnek vermek gerekirse girdi olarak seçilen ivme hareketi kuvvetli bileşenin eşdeğer

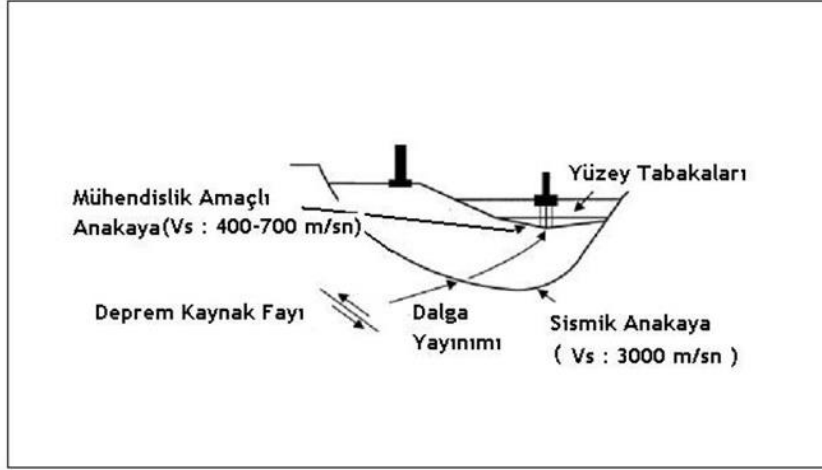
doğrusal zemin çökeli doğal frekanslarından biriyle çakışması halinde zeminde oluşabilecek yüksek büyütme seviyelerine sebep olmaktadır.

Doğrusal olmayan modeller deprem hareketi sırasında ve sonrasında meydana gelen aşırı boşluk suyu basıncının oluşumunu, yeniden dağılımını ve nihai sönümlenmesinin modellenmesi için efektif gerilmeler cinsinden değerlendirilebilmektedir. Eşdeğer doğrusal yöntemlerde böyle bir imkân bulunmamaktadır. Doğrusal olmayan yöntemler için gerekli olacak parametreler (örn; güvenilir bir gerilme-birim deformasyon vb.) eşdeğer doğrusal yöntemler kadar iyi belirlenmemektedir. Diğer taraftan doğrusal olmayan yöntemlerde kullanılacak parametrelerin değerlendirilmesi için kapsamlı bir arazi veya laboratuvar deney programı gereklilik oluşturmaktadır.

Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçları arasındaki farklılık gerçek zemin davranışındaki doğrusal olmayan özelliğin derecesine bağlı olarak değişmektedir. Birim deformasyon düzeylerinin düşük tutulduğu sert zemin profilleri vb. durumlarda iki analiz türü de zemin tepkisi için kabul edilebilir sonuçlar üretebilmektedir. Oluşan kayma gerilmesinin zeminin mevcut kayma dayanımına yaklaştığı durumlar düşünüldüğünde birim deformasyon düzeylerinin yüksek olduğu analizler için doğrusal olmayan yöntemlerin kabul edilebilir sonuçlar verme olasılığı yüksektir.

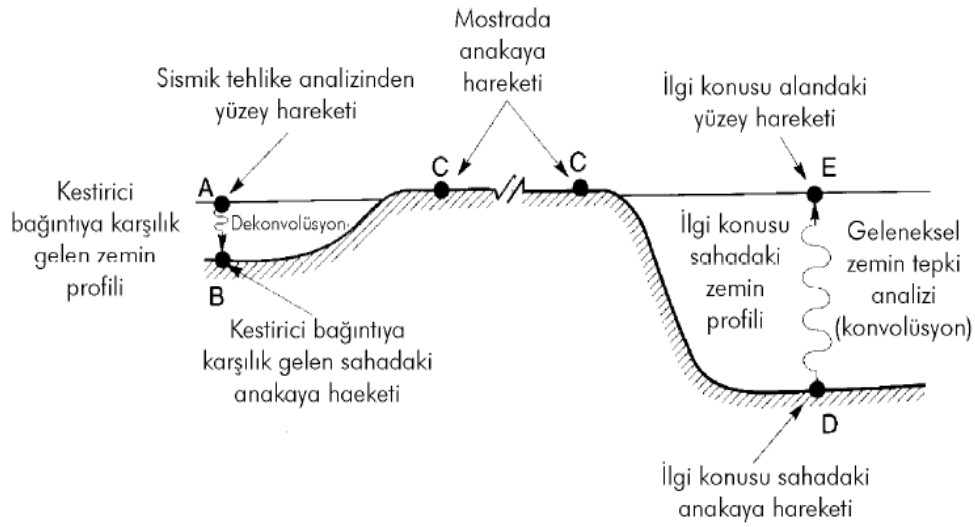
2.5. Yer Tepki Analizi

Yer tepki analizleri yer sarsıntıları üzerindeki yerel zemin koşullarına bağlı olan etkilerin değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. Yer tepki analizlerinde (genellikle taban kayasından yukarı doğru ulaşmaya çalıştığı varsayımı ile) kayma dalgalarının zeminler içerisinde oluşturduğu yayılımlar analiz edilmektedir. Faylarda meydana gelen yırtılmalar sonucunda deprem kaynağından yayılan dalgalar farklı zemin yapıları ile karşılaştıklarında kırılarak yapıya doğru hareket etmektedir (Şekil 2.12.).

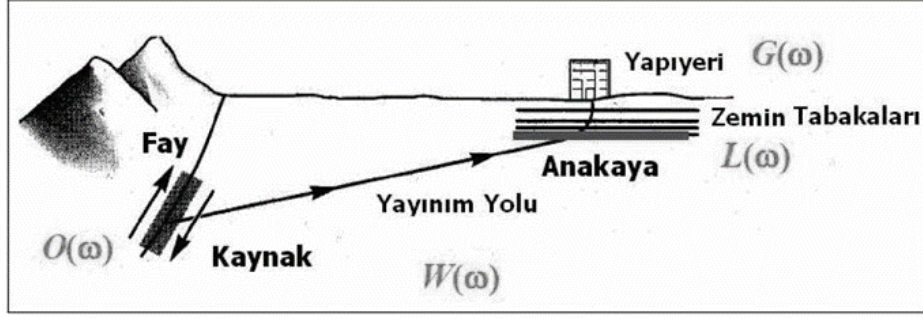


Şekil 2.12. Deprem etkisinin kaynaktan yapıya doğru hareket aşamaları (Yamazaki, 2003)

Zemin tepki analizlerinde, yer hareketini açıklamak amacıyla yaygın olarak kullanılan serbest yüzey hareketi; anakaya üzerindeki bir zeminin yüzeyindeki hareket olarak tanımlanmaktadır. Zemin tabanında meydana gelen hareket anakaya hareketi olarak, anakayanın yüzeye ulaştığı yer hareketi ise mostra veren kaya hareketi (Şekil 2.13.' te gösterilen C noktası) olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.13. Sismik tehlike analizi sırasında yer hareketi parametrelerindeki değişim (Kramer, 1996)



Şekil 2.14. Kaynakta meydana gelen depremin yer yüzeyine iletilmesi (Yoshida ve Iai, 1998)

Deprem hareketi sonucunda meydana gelen titreşimler kaynaktan yapıya doğru çeşitli ortamlardan geçerek iletilmektedir (Şekil 2.14.). Oluşan yer hareketinin yüzeyde herhangi bir noktada zamana bağlı kaydı Fourier Spektrum Denklemi (2.5) ile ifade edilmektedir.

$$G(w) = O(w) \times W(w) \times L(w) \quad (2.5)$$

Burada;

$O(w)$: Kaynak spektrumu,

$W(w)$: Kaynak ile zemin arasında oluşan transfer spektrumu,

$L(w)$: Anakaya ile yapı arası zeminde oluşan transfer spektrumu olarak tanımlanmaktadır.

Geoteknik deprem mühendisliği çalışmalarında sık karşılaşılan problemlerden bir tanesi yer tepki analizinin doğru bir biçimde değerlendirilebilmesidir. Uygun şartlar altında eksiksiz bir yer tepki analizinde deprem kaynağında meydana gelen fayların yırtılma mekanizması, meydana gelen titreşim dalgalarının zeminde yayılarak belirli bir saha altındaki anakayanın üzerine iletilmesi şeklinde modellenmektedir. Meydana gelen deprem hareketinin anakaya üzerinde yer alan zeminleri nasıl etkilediği belirlenmektedir. Fay yırtılma mekanizması kompleks bir davranış göstermekle beraber kaynaktan yayılan enerjinin de nasıl aktarıldığı tam olarak belirlenmemektedir. Bu karmaşıklık ve belirsizlik nedeniyle mühendislik uygulamalarında pek kullanışlı bir yaklaşım olarak düşünülmemektedir. Altta bulunan temel kayada oluşan hareketten kaynaklanan zemin çökeline ortaya çıkan tepkinin belirlenmesi yer tepki analizi için problem oluşturmaktadır (Kramer, 1996).

İdeal şartlar altında eksiksiz bir yer tepki analizinin yapılabilmesi için belirli adımlar izlenerek parametreler seçilmeli ve analizler yapılmalıdır. Analiz için en büyük yer ivmesi, tasarım yer hareketi, zemin tabakalarına bağlı dinamik özellikler ve dinamik davranışı yapılacak analiz yöntemi seçilebilmektedir.

En büyük yer ivme (PGA) değerinin belirlenebilmesi için hâkim periyot ve etkime süresi gibi deprem özellikleri, beklenen en büyük deprem magnitudü, çalışma sahalarının aktif faya olan uzaklığı ve faylanma mekanizmaları dikkate alınarak uygun yaklaşık bağıntı ve grafiklerden belirlenebilmektedir. Tasarım yer hareketi, benzer zemin koşulları göz önünde bulundurularak belirlenen diğer özelliklere de sahip geçmişte meydana gelen depremler sonucunda kaydedilmiş ivme kayıtlarından ya da sismik tehlike analizleri yardımıyla yapay olarak elde edilen ivme kayıtlarından seçilebilmektedir. Zeminlerin dinamik özellikleri yapılan laboratuvar veya arazi deneyleri sonucunda elde edilen bulgular ile ampirik bağıntılardan belirlenerek seçilebilmektedir.

Bir boyutlu yer tepki analizlerinde zemin ve anakaya yüzeylelerinin yatay yönde sonsuz uzanımlı olduğu kabul edilir (Kramer, 1996). Tek boyutlu yer tepki analizlerinde zemin tepkisine anakayadan düşey yönde yayılan dalgaların sebep olduğu, tüm sınırların yatay olduğu, zeminin ve anakayanın yatayda sonsuz uzanımlı olduğu varsayımı göz önünde bulundurulmaktadır.

Bir boyutlu yer tepki analizleri düşünüldüğünde iki farklı problemle karşılaşılabilir. Bu problemlerden ilki anakaya hareketinin bilindiği ve zemin yüzündeki deprem hareketinin tahmin edilmek istendiği çalışmalardır. İkinci olarak ise serbest yüzey hareketi bilinen benzer koşullardaki bir arazide serbest yüzey hareketinin tekrar belirlenmeye çalışılmasıdır. Bir boyutlu yer tepki analizi için doğrusal ve doğrusal olmayan (non-linear) yaklaşımlar yapılmaktadır.

2.5.1. Dekonvolüsyon

Eşdeğer doğrusal yaklaşımlarda doğrusal analizlerden yararlanıldığı için bir noktadaki herhangi bir tepki başka bir tepki ile ilişkilendirilebilir. Geliştirilen transfer fonksiyonları, hesaplanmış serbest yüzey hareketini anakayadaki hareket ile ilişkilendirirse de herhangi bir derinlikteki hareketi de ilişkilendirebilecek transfer fonksiyonları türetilmektedir. Dekonvolüsyon adı verilen bu işlem, zemin

çökelleri yüzeylerinde elde edilen gerçek yer hareketinin en doğru şekilde yorumlanabilmesi açısından önemli bir gereçtir.

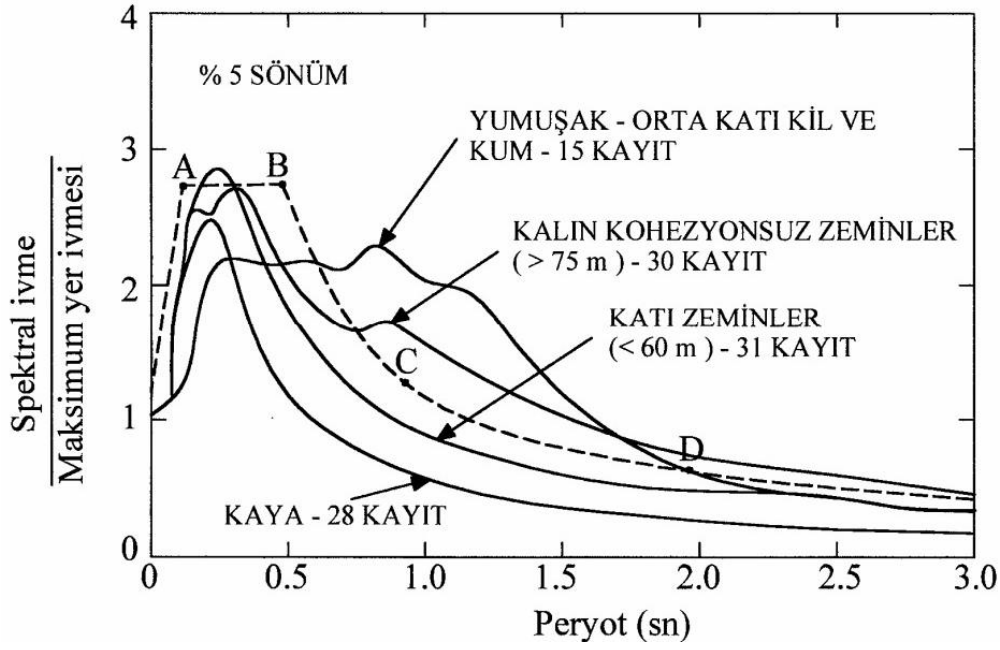
2.5.2. Sismik empedans değeri

Sismik dalgalara maruz kalan zemin tabakaları benzetmek gerekirse tam anlamıyla süzgeç görevi görmektedir. Bazı frekans değerlerindeki sismik dalgalar tabakalar tarafından sönlendirilirken bazı tabaka özellikleri sebebiyle büyütme etkisi gözlemlenebilmektedir. Yumuşak zeminlerde karakteristik özelliğine bağlı olarak oluşan ivme hareketleri genliklerinde artış meydana getirmektedir. Genliklerinde gözlenen bu artışın temel sebebi ise zeminlerin, üzerinde buldukları ana kaya arasında oluşturdukları sismik empedans farkı olarak belirtilebilmektedir. Tanecik hareketine karşı ortamların gösterdiği direnç sismik empedans olarak tanımlanabilmektedir. Zemin tabakaları içerisinde yayılan düşey S dalgaları için sismik empedans değerinin (z) hesaplanması; birim hacim ağırlık (ρ) ve S dalga hız (V_s) değerlerinin çarpımı (Denklem 2.6) olarak ifade edilmektedir.

$$z = \rho \times V_s \quad (2.6)$$

2.6. Spektrum Analizi

Deprem Mühendisliği için spektrumlar ;belirli bir yer hareketi etkisi altında (sönm oranı değerinin sabit tutulması ile), farklı periyotlara ve tek serbestlik derecesine sahip sistemlerde, belirlenen yer hareketine karşı meydana getireceği tepkinin en büyük değerinin elde edildiği diyagramlar olarak ifade edilmektedir (Saraçoğlu, 2017).Farklı periyotlardaki ancak eşit kütlelere sahip yapıların aynı deprem bileşenine karşı gösterdikleri tepkilerin maksimum değerlerinden oluşturulan eğri tepki spektrumu (spektrum eğrisi) olarak adlandırılmaktadır. Tasarım Spektrumu, deprem yer hareketlerinin karakteristik özelliklerini ve yapılarda oluşacak etkilerini tanımlayan pratik bir araç olarak kullanılabilir.



Şekil 2.15. Farklı saha şartlarında ortalama tepki spektrumları (%5 sönüm, Seed ve ark., 1976)

Tasarım spektrumları, belirlenen bölgeye ait sismik özelliklerin ve yerel zemin davranışlarının etkisi ile oluşacak maksimum deprem etkilerinin gözlemlenebilmesi için farklı ivme kayıtları yardımıyla elde edilmektedir. Elde edilen tepki spektrumlarına uygun zarf eğrilerinin benzeştirilmesi ile oluşmaktadır (Kale, 2017). Spektrum eğrileri, farklı saha şartlarında ve ivme kaydı içeriğine göre (Şekil 2.15.) değişiklik gösterebilmektedir.

2.7. Fourier Genlik ve Güç Spektrumu

Kuvvetli yer hareketlerinin Fourier genlik spektrumu, belirlenen hareketin hangi frekans bileşenlerinde ya da bileşen genliklerindeki değişimlerinde olduğunun gösterilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Belirlenen deprem hareketinin yapılara olan etkisinin incelenmesinde Fourier spektrumlarından yararlanılmaktadır. Büyük genlikli bileşen barındıran deprem kayıtlarında bu bileşen frekans değerine ya da periyoduna göre hâkim frekans-periyot olarak adlandırılmaktadır.

Deprem dalga bileşenlerinin frekans ve genliklerine göre değişen ilişkisini gösteren veri grafiğine genlik spektrumu adı verilmektedir. Grafik değerlerinin Fourier analiz yöntemi gereğince $N \times \Delta t / 2$ değeri ile çarpılan grafik de Fourier Genlik Spektrumunun elde edilmesini sağlamaktadır. Burada N değeri kullanılan nokta sayısını belirlemektedir. Δt değeri noktaların aralıklarını göstermektedir. Belirlenen dalga

bileşenleri için faz açısı -frekans değerlerine karşılık gelen noktalar ile grafik çizildiğinde Fourier Faz Spektrumu elde edilmektedir (Saraçoğlu, 2017).

Güç Spektrumu (ya da güç spektrumu yoğunluk fonksiyonu), yer hareketinin frekans içeriği olarak tanımlanabilmektedir. Fourier Spektrumu değerlerinin kareleri alınarak elde edildiği için deprem kaydı bileşenlerinin yapılarda ortaya çıkaracağı etki, güç spektrumunda gözle görülür şekilde elde edilmektedir. Güç Spektrumu için, Fourier Genlik ve Faz Spektrumlarından yararlanarak bir ilişki kurulacak olursa Fourier Genlik ve Faz Spektrumunun bilinmesi halinde gerçek dalga formu anlamlı olarak yeniden oluşturulabilmektedir ancak sadece Güç Spektrumunun kullanılabilmesi durumunda dalga bileşenlerinden her biri birçok faz açısına sahip olabileceği için belirlenmiş Güç Spektrumunda sınırsız sayıda deprem dalgası oluşturulabilmektedir (Saraçoğlu, 2017).

3. DEPREM KAYITLARININ SEÇİLMESİ VE ÖLÇEKLENDİRİLMESİ

3.1. Deprem Kayıt Kaynakları

İvme kayıtları genellikle üç kaynaktan elde edilebilir: Bunlardan birincisi yapay olarak elde edilen tasarım ivme spektrumu için uyumlu olacak kayıtlar (RSPMATCH gibi programlar vasıtasıyla), ivme kayıt değişkenlerinin fiziksel olarak benzeştirildiği kayıtlar (SMSIM programı gibi programlar sayesinde) ve herhangi belirli bir yılda yaşanmış gerçek depremlerin kayıt istasyonlarından yararlanılarak elde edilen ivme kayıtlarıdır (Fahjan ve Özdemir , 2007).

3.1.1. Yapay olarak üretilmiş deprem kayıtları

Tepki spektrumunun, belirlenmiş tasarım spektrumuyla uyumlu kayıtlar yapay olarak üretilebilmektedir. Tepki spektrumları ile güç spektral yoğunluk fonksiyonu oluşturulur ve bu fonksiyon ile rastgele faz açıları birleştirilerek sinüzoidal sinyaller türetilmektedir. Bu sinüzoidal hareketler toplanarak yapay kayıtların elde edilmesi sağlanmaktadır. İteratif yöntemler yardımı ile hedef ivme spektrumu ile eşleşme iyileştirilebilmektedir. Seçilen frekans değerlerinde gerçek tepki spektrumu ordinat değerleri ile hedef tasarım spektrum ordinat değerleri arasındaki ölçekleme katsayısı bulunmaktadır. Bulunan ölçekleme katsayısı ile üretilen kayıtlar düzenlenir ve yeni kayıt ölçeklenmiş bir biçimde elde edilmektedir. Ancak yapay kayıtların analizlerde kullanımını iki temel sorunu ortaya çıkarmaktadır. İlk temel sebep kaydedilen çok sayıdaki ivme hareketi için ortalama değerde ve tasarım spektrumuna uyacak şekilde tek bir kayıt elde etmeye çalışmak kolay bir şekilde mümkün olmamaktadır. İkinci temel sebep ise kuvvetli yer hareketinde meydana çevrim sayılarının artışına bağlı olarak , gerçeğe uygun olmayan büyüklükte bir enerjinin açığa çıkmasıdır (Fahjan ve Özdemir, 2007).

3.1.2. Benzeştirilmiş deprem kayıtları

Benzeştirilmiş deprem kayıtlarının oluşturulabilmesi için sismik kaynak modeli gerekmektedir. Bu model için kayda uygun zemin koşulları ile beraber kayıt dalga

yayımlar ortamının özellikleri de belirlenmesi gerekmektedir. Bu gereklilikler sonucunda modelde kayıtlarla uyumlu yayılım ortamı, yerel zemin özelliği ve kaynak seçimi sorun haline gelmektedir. İncelemenin yürütüleceği çalışma sahasında, kaynak ve dalga yayılımının karakteristiği benzeştirilmiş kayıtların elde edilmesini sağlayacak analizlerde belirlenen senaryo deprem parametrelerine (büyüklüğüne ve uzaklığına) bağlı olarak tanımlanmaktadır. (Fahjan ve Özdemir, 2007). Fakat mevcut yönetmelikler kapsamında bu bilgilere ulaşım genel olarak mümkün olmadığı için benzeştirilmiş kayıt kullanımı ile analizlerin sağlanması zorlaştırmaktadır (Bommer ve ark., 2003).

3.1.3. Gerçek depremlerden elde edilen kayıtlar

Depremin genliği, süresi, faz özellikleri ve frekans içeriği bakımından en doğru bilgiyi veren kayıtlar gerçek depremlerden elde edilmiş kayıtlardır. Deprem kayıtlarını etkileyen kaynak etkisi, hareketin olduğu ortam ve yerel zemin koşulları gibi bütün faktörleri ve sismolojik parametreleri yansıtmaları gerçek depremlerden elde edilen kayıtları kullanmanın diğer avantajları arasında sayılabilmektedir. İlerleyen teknolojik gelişmeler doğrultusunda gerçek deprem kayıtlarının elde edilmesi kolaylaşmaktadır. Kayıtların farklı farklı veri tabanları yardımıyla elde edilmesi, sayılarındaki ve içerik imkanlarındaki artışlar gerçek deprem kayıtlarının kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu gelişmelerden harici olarak ivme kayıtlarının direkt kullanılamaması, ölçeklenme sorununu meydana getirmektedir. Bununla beraber elde edilen ivme kayıtları tasarımı yapılacak her bölge için uygun özellik taşıyamamaktadır. Bu durum uygun kuvvetli yer hareket kaydının seçimi sorununu ortaya çıkarmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte sismik kayıtlara ulaşımın sağlandığı veri tabanları sürekli artmasına rağmen, tasarımı yapılacak yapının yer aldığı bölgeye uygun deprem büyüklük değeri, yırtılma mekanizması, kaynağın saha ile arasındaki mesafe ve yerel zemin sınıfı gibi göz önünde bulundurulması gereken birçok parametrenin varlığı istenen uyumdaki deprem kayıtlarının elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

3.2. Deprem Kayıtlarının Seçilmesi

Zaman tanım alanında yapılacak deprem etkisi hesapları için deprem kayıt seçiminde göz önünde bulundurulması gereken maddeler sırasıyla;

- ◆ Tasarlanacak deprem hareketleri ile uyumlu deprem büyüklükleri,

- ◆ Faylara uzaklıkları,
- ◆ Kaynağın nitelikleri
- ◆ Çalışmanın yapıldığı ya da yapılacağı zeminin yerel zemin koşulları dikkate alınarak yapılması gerekmektedir.

Geçmiş ve olması muhtemel depremlerin inceleme sahasında yer alan zeminlerin mevcut koşullarında ve mevcut yapılarda meydana getireceği etki gerçekçi bir şekilde hesaba katılmalıdır. Seçilecek depremlerin özellikleri mevcut zeminin davranışı hesaba katılarak seçimler gerçekleştirilmektedir. Deprem etkisini ve zemin davranışının en iyi şekilde görülebilmesi için zemin koşullarının parametrelerinin doğru ve güncel şekilde belirtilmesi göz önünde bulundurulmaktadır. Bu nedenle çalışma sahası tabakaları kapsamlı bir şekilde modellenmesi gerekmektedir. Belirlenen bölge sismik haritalarına ve yapılan analizlere göre deprem kayıtlarının seçimi dinamik davranış analizine yakın parametreler çerçevesinde gerçekleştirilmektedir. Modelde kullanılacak parametreler ile varsa geçmiş gerçek deprem kayıtlarının parametreler bakımından uyumlu olduğunun gösterilmesi gerekmektedir. TBDY 2018 kapsamında en az 11 adet deprem kaydı kullanılacak ve aynı depreme ait en fazla 3 kayıt analizlerde yer alabilmektedir. Deprem kayıtlarının elde edilmesinin ardından bu kayıtların ölçekleme işlemi gerçekleştirilerek ve dinamik analizler tamamlanabilmektedir.

3.2.1. Yer hareketi ölçekleme yöntemleri

Ölçekleme yönteminde bölge için belirlenen spektral ivme-zaman kaydının zaman veya frekans tanım alanında eşleştirilmesi amaçlanmaktadır. Deprem kayıtlarının benzerliğini ya da farklı oranlardaki katsayılar ile değişiminin göz önüne alınabilmesi için ölçekleme katsayısı ile büyütülerek veya küçülterek elde edilmektedir. Ölçeklenen kayıtlar hedef spektrumu ile karşılaştırılarak analiz sonuçları yorumlanmaktadır.

3.2.1.1. Frekans tanım alanında ölçeklendirme

Bu yöntemde deprem kaydı seçilerek kaydın tasarım ivme spektrumunun bu kayda ait davranış spektrumuna oranı ile frekans tanım alanında incelenecek şekilde yaklaştırılır. Diğer bir deyişle seçilen kayıt frekans içeriği karşılaştırılacak spektrum ile eşleşecek halde değiştirilir. Yeterli düzeydeki eşleşme kontrol edilir.

3.2.1.2. Zaman tanım alanında ölçeklendirme

Bu yöntemde, yer hareketi kaydı aynı miktarda yukarı veya aşağı yönde ölçeklenerek (1'den büyük veya 1'den küçük ve sabit bir katsayı ile çarpılarak) istenilen periyot aralığında, hedef tasarım ivme spektrumuna en uygun eşleştirme yapılır. Bu işlem kaydın frekans içeriğini değiştirmez (Fahjan, 2008).

4. PEER VERİ TABANI

4.1. PEER Veri Tabanı

PEER Ground Motion Database- Beta Sürümü, kullanıcının tasarım yer hareketlerini temsil eden güçlü yer hareketi hızlanma zaman serileri kümelerini seçmesine olanak tanıyan etkileşimli bir web tabanlı uygulamadır. Kullanıcı, bir hedef yanıt spektrumu açısından tasarım yer hareketlerini ve deprem büyüklüğü, kaynaktan sahaya uzaklık ve diğer genel özellikler açısından deprem yer hareketlerinin istenen özelliklerini belirtir. PGMD (Peer Ground Motion Database) aracı daha sonra, kullanıcı tarafından belirlenen seçim kriterlerini karşılayan ve hedef yanıt spektrumuna iyi uyum sağlayan döndürülmüş hızlanma zaman serilerini seçebilmektedir. Şekil 4.1.'de PEER veritabanı giriş modülünün ara yüzü gösterilmektedir.

The screenshot shows the PEER Ground Motion Database search interface. The header features the logo and text: "PEER Ground Motion Database NGA-West2 Pacific Earthquake Engineering Research Center". Navigation links include HOME, DOCUMENTATION, HELP, SUBSCRIBE, and PEER. The main content area is titled "New Search" and contains a search form with the following sections:

- Record Characteristics:** RSN(s) : ; RSN1,...RSNn; Event Name : ; Station Name :
- Search Parameters:** Fault Type : All Types (dropdown); Magnitude : ; R_JB(km) : ; R_rup(km) : ; Vs30(m/s) : ; D5-95(sec) : ; Pulse : Any Record (dropdown)
- Additional Characteristics:** Max No. Records : (<=100)
- Suite:** Spectral Ordinate : SRSS (dropdown); Damping Ratio : 5% (dropdown); Suite Average : Arithmetic (dropdown)

At the bottom, there is a "Controls" section with a "Search Records" button.

Şekil 4.1. PEER veri tabanı giriş modülü

4.2. Peer Veri Tabanı Kayıt Arama Modülü ve Açıklamaları

4.2.1. Fay tipi

Fay, tanım olarak tektonik hareketler sonucu yer kabuğundaki yer değiştirmiş kırık kısımlardır (AFAD, Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü). Yer kabuğu levha hareketleri sonucunda biriken enerjilerin gerilme ve sıkışma hareketleri sonucunda açığa çıkması fay adı verilen hareketli kesimlerin oluşmasına sebep olmaktadır.

4.2.1.1. Oluşum mekanizmalarına göre fay türleri

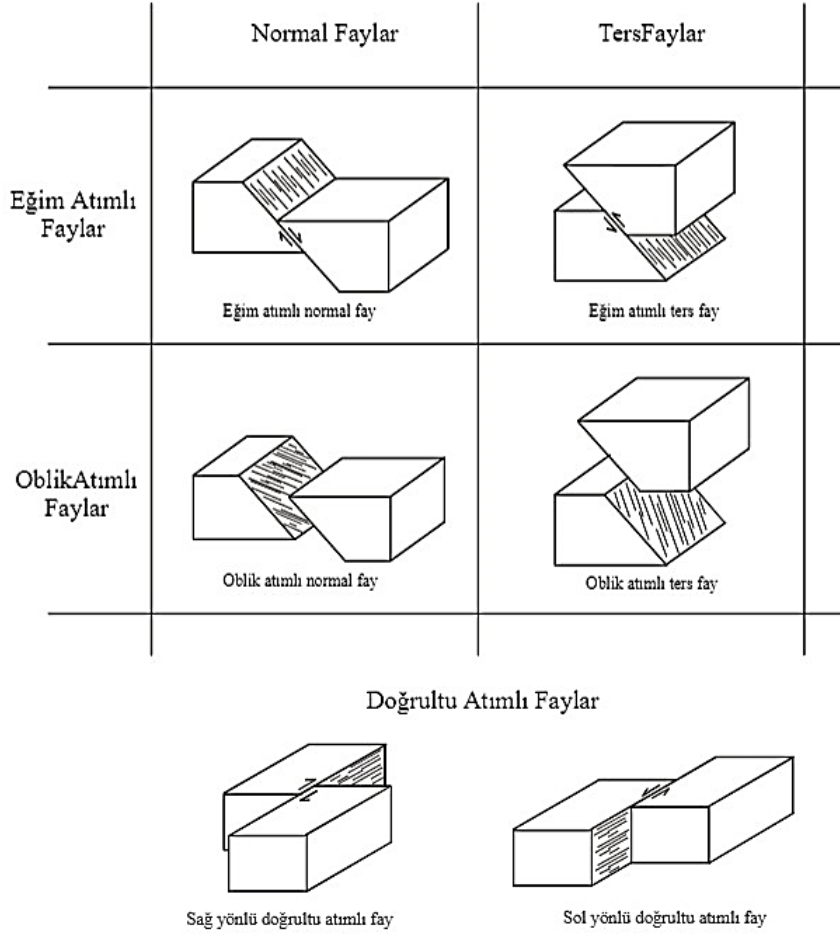
Faylar oluşum mekanizmalarına göre üç tipe ayrılmaktadırlar:

- Normal fay: Fay düzleminin eğimli olduğu ve bu fay düzleminin üzerinde yer alan kısmın da aşağıya doğru hareket ettiği faylar normal fay olarak adlandırılmaktadır.
- Ters fay: Normal fayların tersine fay düzleminin eğimli olduğu ve bu düzlem üzerinde kalan kısmın da yukarıya doğru hareket etmesiyle meydana gelen faylar ters fay olarak adlandırılmaktadır.
- Doğrultu atımlı faylardır: Normal ve ters faylarda olduğu gibi belirli fay düzleminin düşey olduğu ve fay düzleminin her iki tarafında bulunan kısımları, yatay olacak biçimde birbirinin tersi istikametinde hareket ettiği faylar doğrultu atımlı faylar olarak tanımlanmaktadır.

4.2.1.2. Atım tiplerine göre fay türleri

Faylar atımlarına göre de sınıflandırılabilirler

- Eğim atımlı faylar,
- Doğrultu atımlı faylar,
- Oblik atımlı faylar olarak sınıflandırılabilir ve oblik atımlı faylar bir fayın kendi düzlemi boyunca hareketini hem düşey hem de yatay yönde göstermesi ile oluşmaktadır.Şekil 4.2.' de fay tipleri ve atım tiplerinin modellenmesi verilmiştir.



Şekil 4.2. Faylarda doğrultu ve atım ilişkisinin gösterilmesi (Köroğlu, 2019)

4.2.2. Magnitüd

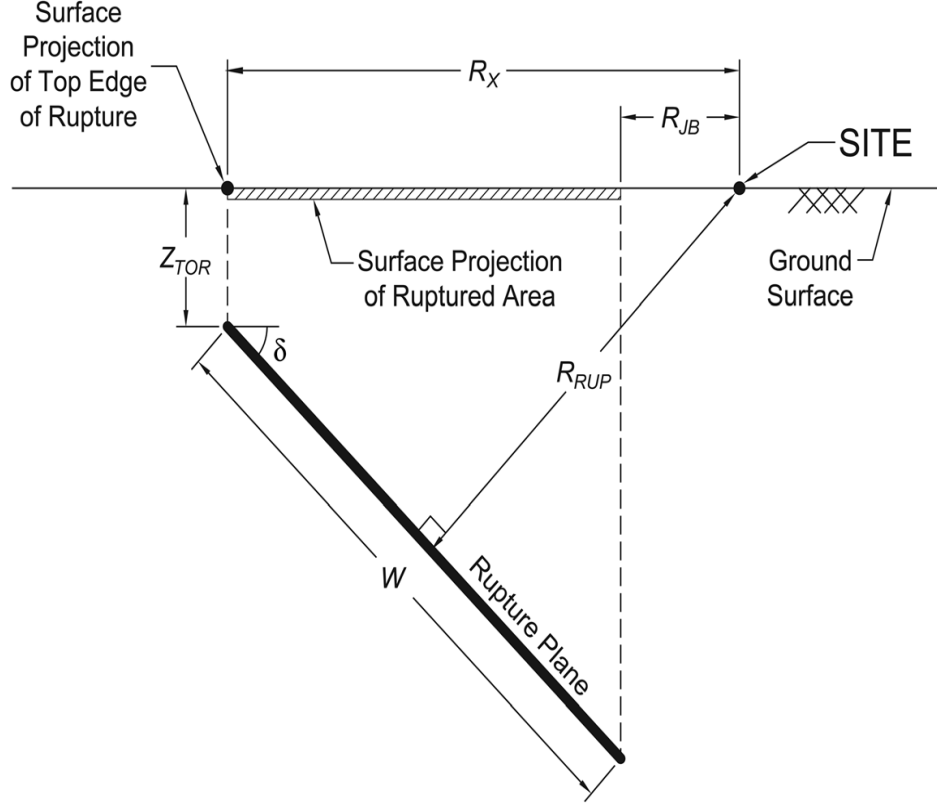
Depremın büyüklüğü anlamına gelen bu terim yer kabuğunun kırılan yüzey büyüklüğünü ve kırılma sonucu ortaya çıkan enerji seviyesini belirleyen bir parametredir. Deprem sırasında ortaya çıkacak enerjinin direkt olarak ölçülmesi mümkün değildir bu yüzden Prof. C. Richter tarafından 1930 yıllarında bulunan bir yöntemle depremlerin aletsel bir ölçüsü olan “Magnitüd” tanımlanmıştır. Deprem odağından 100 km uzaklıkta bulunan ve sert bir zemine yerleştirilen özel nitelikli sismograf yardımıyla kaydettiği zemin hareketinin maksimum genlikli logaritmik dönüşümü ile belirlediği değere magnitüd adı verilmiştir.

4.2.3. R_{RJB} (km)

R_{RJB} ; Saha ile fay kırığının yüzey izdüşümü ile kuvvetli yer hareketi istasyonu arasındaki en yakın mesafedir.

4.2.4. R_{RUP} (km)

R_{RUP} ; yırtılma yüzeyine en yakın mesafedir. Şekil 4.3.'te R_{RJB} ve R_{RUP} parametrelerinin kesit üzerindeki gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Bir fay kopma düzlemi boyunca dikey bir kesit kullanılarak deprem kaynağının ve mesafe ölçümlerinin gösterilmesi. Fay kopma düzleminin (L) uzunluğu, çarpma boyunca ölçülür (sayfanın düzlemine dik) (Baise, 2011).

4.2.5. V_{s30} (m/s)

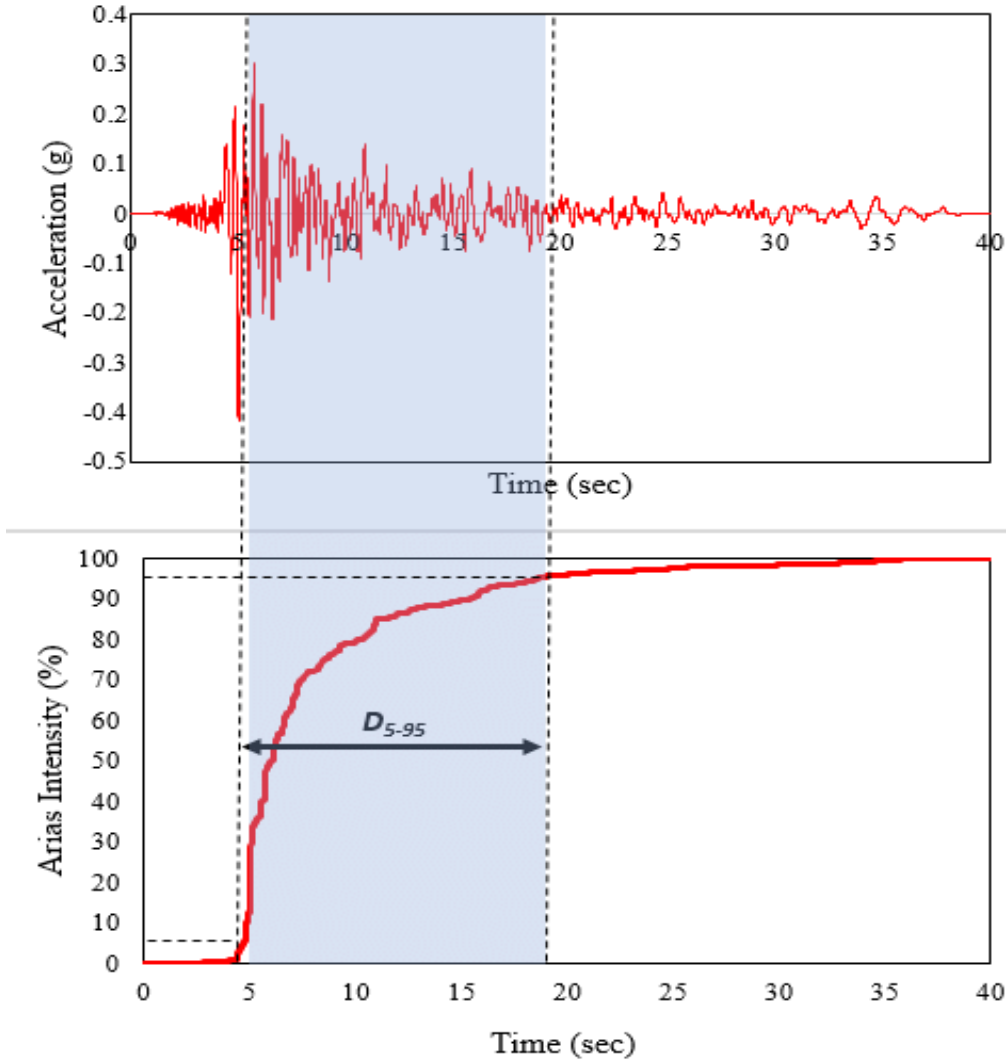
V_s hızları tabakaların sağlamlığının bir göstergesidir (Louie, 2001). V_{s30} ise üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı olarak tanımlanmaktadır.

4.2.6. D_{5-95} (s)

Kayıtların önemli süresinin aralığı olarak tanımlanmaktadır. Yer hareketi kayıtlarındaki önemli süre belirli bir miktarda enerjinin biriktiği zaman aralığı olarak ifade edilmektedir. Denklem 4.1'deki integral yardımıyla birikmiş enerjinin %5 ila %95'i arasındaki zaman aralığı (Şekil 4.4.'te gösterildiği gibi D_{5-95} 'i) elde edilmektedir (Trifunac ve Brady, 1975).

$$\int_0^{t_{max}} \alpha(t)^2 dt \quad (4.1)$$

Yer hareketleri önemli sürelerine uygun olacak şekilde kısa ya da uzun süreli hareketler olarak sınıflandırılabilir. Chandramohan ve ark. (2016), 45s'den küçük D5-95 değerlerine sahip yer hareketlerini kısa süreli hareketler olarak belirtmişlerdir.



Şekil 4.4. Kayıt süresi D5-95 grafik tanımı (Trifunac ve Brady, 1975)

4.3. Gerçek Kayıtların TBDY Uygun Seçilmesi ve Ölçeklenmesi

4.3.1. TBDY uygun sahaya özel deprem yer hareketi seçimi

TBDY-2018 2.5 maddesinde binaların deprem hesabında gerekli deprem yer hareketlerinin tanımlanması için kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi madde alt başlıklarında belirtilmiştir. Deprem hesabında kullanılacak deprem kayıtlarının seçimi tasarıma esas deprem yer hareket düzeyi ile uyumlu, deprem büyüklüğü, fay uzaklıkları ve mekanizmalarına göre yerel zemin şartlarını sağlayacak şekilde

seçilmelidir. Yapıların bulunduğu bölge için deprem yer hareketi düzeyine uygun deprem kayıtlarının bulunması halinde bu kayıtların kullanılması belirtilmiştir. Depremlere ait sahaya özel deprem tehlikesi analizine en iyi biçimde katkıda bulunacak haliyle deprem tehlikesinin ayırtıştırma işleminden yararlanılabilmektedir.

Bölüm 2.5.1.3 maddesine göre hesaplar için seçilecek deprem kayıtlarının sayısı en az on bir olarak belirlenmektedir. Aynı depremden seçilecek kayıt veya kayıt takımı sayısı üçü geçmeyecek şekilde belirlenmelidir. Deprem kayıtlarının ölçeklendirilmesinde ise basit ölçeklendirmesinde TBDY-2018 2.3.5 veya 2.4.1'e göre tanımlanan tasarım spektrumunun aynı periyod aralığındaki genliklerinden daha küçük olmaması kuralına göre, deprem yer hareketlerinin genlikleri ölçeklendirilmelidir.

Seçilen deprem kayıtları tanımlanan tasarım spektrumuna spektral uyuşum şeklinde dönüştürülmesi ile de elde edilebilecektir. Dönüştürülen deprem yer hareketlerinin spektrumlarının ortalamaları, tüm periyotlar için tasarım spektrumu ordinatlarından daha küçük olmayacaktır. Bunlara ek olarak oluşturulacak deprem yer hareketi spektrumları belirlenecek deprem yer hareketi düzeyine göre %5 sönüm oranı için tanımlanması gerekmektedir.

4.3.2. TBDY uygun seçilen depremler ve ölçeklendirme

Seçilen depremler bölge depremselliğini yansıtacak şekilde belirlenmiştir. Zaman tanım alanında kullanılacak deprem kayıtları için tasarıma esas deprem yer hareketi düzeyi ile uyumlu yönetmelikte belirtilen diğer kriterlere göre seçim yapılmıştır. Deprem büyüklüğü, fay uzaklıkları, kaynak mekanizmaları zemin sınıfının belirlediği özellikler dikkate alınarak ölçekleme işlemine geçilmiştir. Tez kapsamında bölge ile uyumlu özelliklere sahip deprem kayıtları seçilmiş ve Tablo 4.1.'de gösterilmiştir.

Çalışma kapsamında TBDY-2018'de maddeleri göz önünde bulundurularak kuvvetli yer hareketi kayıtları için aşağıdaki gibi seçim adımları uygulanmıştır;

- Kuvvetli yer hareketi kayıtları PEER-Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (The Pacific Earthquake Engineering Research Center) veri bankasından elde edilmiştir.
- Bölgenin depremsellik haritası dikkate alınarak deprem büyüklükleri M_w : 6.0-8 aralığında seçilmiştir.

- Yerel zemin özelliklerinin uyuşum göstermesi için zemin sınıflamasında kullanılan V_{S30} değeri ZC zemin sınıfını temsil eden 350-760 m/s aralığında seçilmiştir.
- Çalışma alanı için en yakın faya uzaklık mesafesi 0-25 km aralığında seçilmiştir.
- Toplamda çalışma alanı ile uyumlu 11 adet kuvvetli yer hareket kaydı belirlenmiştir.
- Belirlenen bu kuvvetli yer hareketi kayıtları SeismoMatch2022 programı vasıtasıyla ölçeklendirilmiştir.
- Yer hareketinin bileşenlerine ve bunların bileşkesine ait bileşke spektrumlar %5 sönüm oranı için elde edilmiştir.

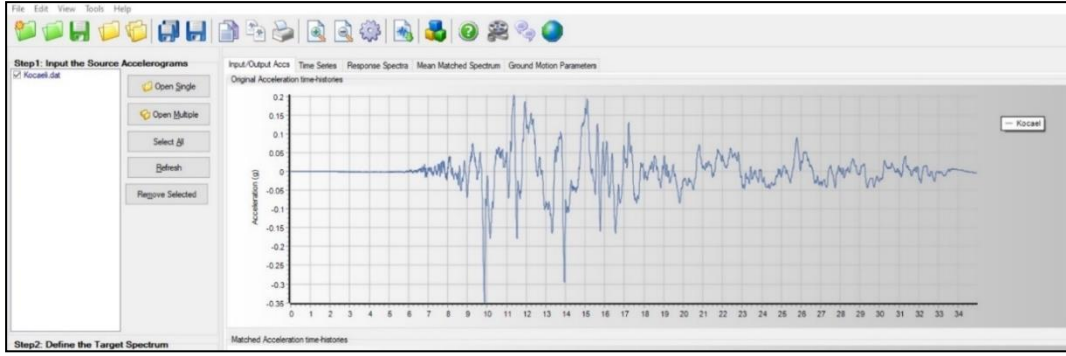
Yukarda verilen TBDY-2018 hükümlerini sağlayan çalışma kapsamında seçilmiş ve ölçeklendirilmiş kuvvetli yer hareketi kayıtları Tablo 4.1.' de verilmiştir.

Tablo 4.1. PEER veri tabanından seçilen 11 adet deprem yer hareketi kayıtlarına ait parametreler

PEER veri numarası	Deprem İsmi	Yıl	Kaydedilen İstasyon	Büyükük (M _w)	Deprem Mekanizma	Deprem Merkezine Uzaklık (km)	V _{s30} (m/sn)	Kullanılabilir en düşük frekans (Hz)	Ölçek Faktörü
190	Imperial Valley-06	1979	Superstition Mtn Camera	6.53	Doğrultu Atımlı	24.61	362.38	0,125	0.493
1618	Düzce, Türkiye	1999	Lamont 531	7.14	Doğrultu Atımlı	8.03	638.39	0,075	1.2586
4128	Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Stone Corral	6.0	Doğrultu Atımlı	7.68	565.08	0,4125	0.5109
164	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.53	Doğrultu Atımlı	15.19	471,53	0,1125	0.8072
459	Morgan Hill	1984	Gilroy Array	6.19	Doğrultu Atımlı	9.85	663.31	0,1625	0.7235
550	Chalfant Valley-02	1986	Bishop - Paradise Lodge	6.19	Doğrultu Atımlı	14.97	585.12	0,125	0.307
864	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	Doğrultu Atımlı	11.03	379,32	0.07	0.6787
1614	Duzce, Turkey	1999	Lamont 1061	7.14	Doğrultu Atımlı	11.46	481.0	0,0875	0.5522
1787	Hector Mine	1999	Hector	7.13	Doğrultu Atımlı	10.35	726.0	0,0375	0.5415
2703	Chi-Chi, Taiwan-04	1999	CHY028	6.2	Doğrultu Atımlı	17.63	542.61	0,0325	1.1939
3753	Landers	1992	Fun Valley	7.28	Doğrultu Atımlı	25.02	388,63	0,0625	1.1309

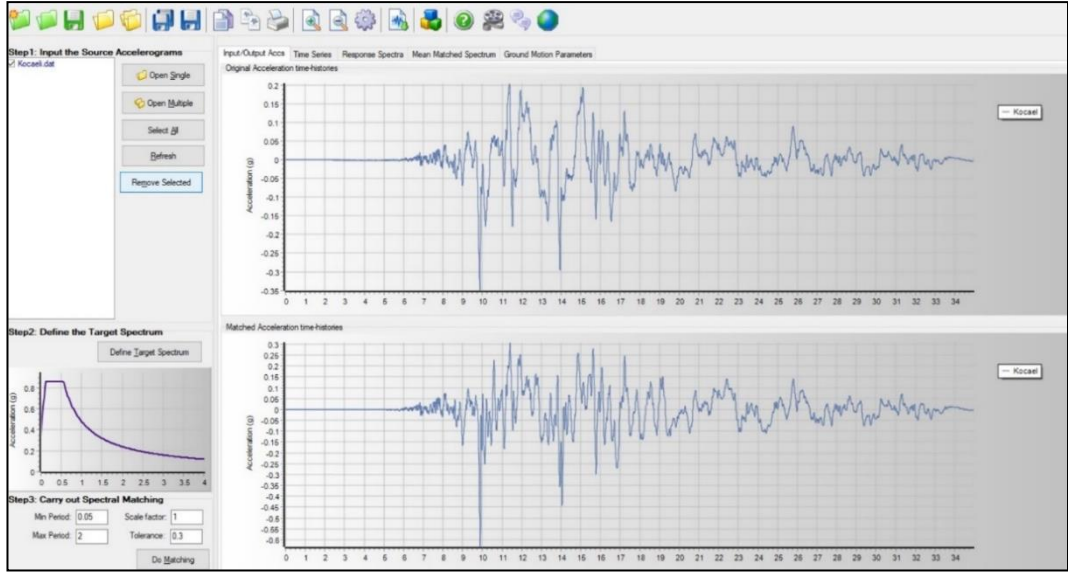
4.4. Seismo Match

Abrahamson (1992) ve Hancock et al. (2006) veya Al Atik ve Abrahamson (2010) tarafından önerilen algoritma ile belirli ivme kayıtlarını SeismoMatch programına yükledikten ve hedef spektrumunu tanımladıktan sonra hedef spektruma uygun eşleşmeyi sağlayan ivme değerlerinin sunulduğu bir programdır. Tez kapsamında daha önce bahsettiğimiz PEER veri tabanı gibi çeşitli veri tabanlarından deprem yer hareketi düzeyine ve bölgenin depremselliğine uygun olacak şekilde belirlenen deprem kayıtlarının seçiminden sonra analiz edilecek spektrumlardaki eşleşmenin sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Kullanıcının spektral eşleştirme algoritmasını, spektral eşleştirme uygun periyodunu ve periyot aralığını, gerekli tolerans değerini belirterek spektrum eğrilerindeki eşleşirmeyi analiz edebilmesi sağlanmaktadır.



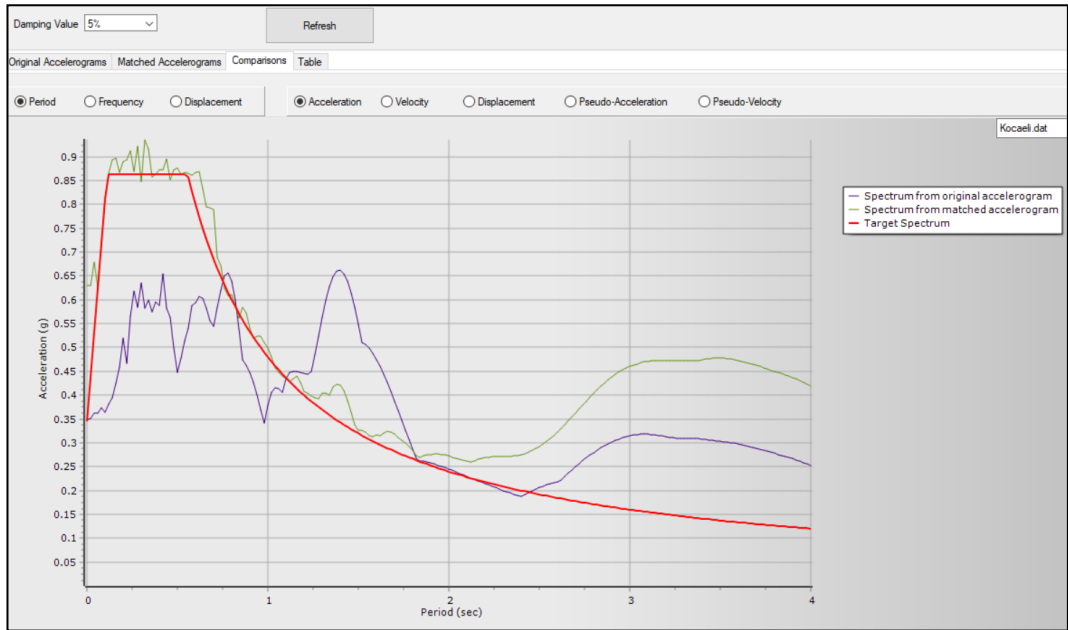
Şekil 4.5. SeismoMatch programına deprem kayıtlarının eklenmesi

SeismoMatch programına eşleştirme işleminden önce seçilecek deprem kayıtlarının aktarılabilmesinin yanı sıra programın kendi bünyesinde tanımlı bulunan deprem kayıtları da analizler için hedef olarak seçilebilmektedir. İncelenecek kayıt analizleri için programda tanımlı yönetmeliklerden uygun olanın seçimi ya da belirlenen analiz yönteminin seçimi ile SeismoMatch programında çalışılabilir. Şekil 4.5.'te program verilerinde kayıtlı bulunan ivme kaydının gösterimi yer almıştır. Şekil 4.6.'da bulunan örnek deprem kaydının seçilmesi ile istenilen analiz değerlerine göre ölçeklenmiş kayıt hareketinin elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 4.6. SeismoMatch programına tanımlanan deprem kaydının ölçekli ve ölçeksiz görüntüsü

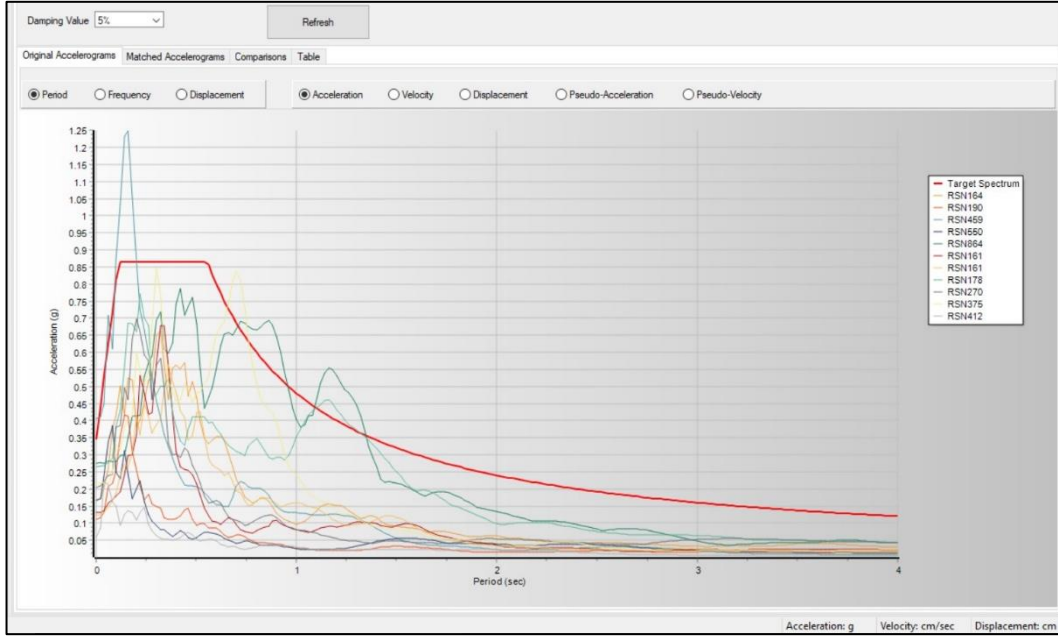
Seçilen deprem kayıtları tasarım spektrumu ile eşleştirilmesinden sonra orijinal ve eşleştirilmiş kayıtların parametreleri ve spektruma yaklaştırılmış eğri grafiği seçilen depremlere göre karşılaştırılabilir. Şekil 4.7.'de programda tanımlı bulunan Kocaeli ivme kaydının spektruma uygun ölçekli gösterimi örnek olarak verilmiştir.



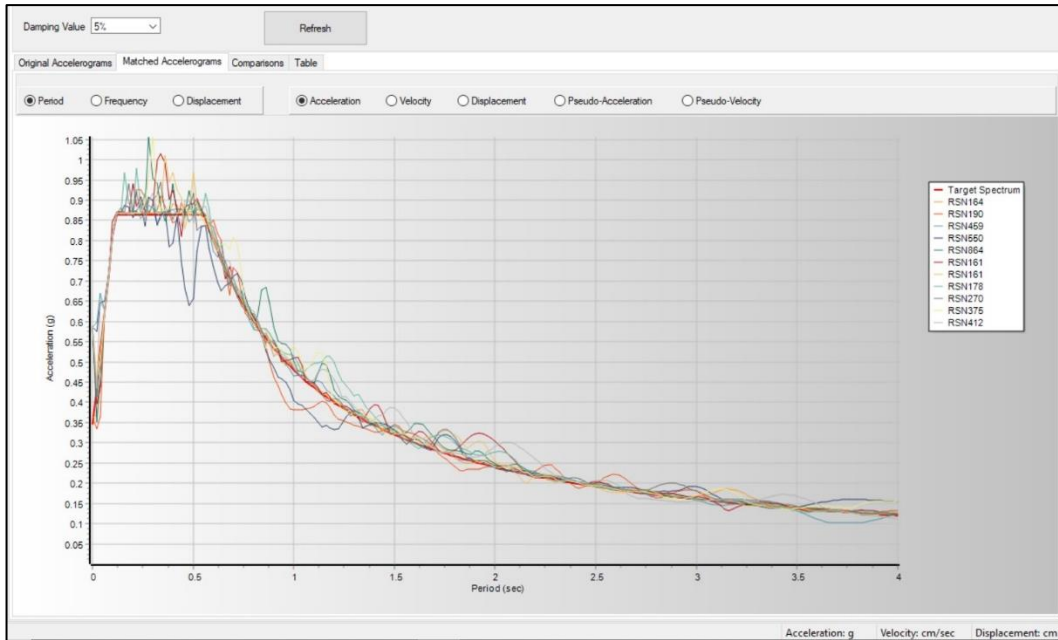
Şekil 4.7. Yerel zemin sınıfı ZC tasarım spektrumuna göre ölçeklenmiş Kocaeli ivme kaydının SeismoMatch programındaki görüntüsü

Seçtiğimiz deprem kayıtları SeismoMatch programına tanımlandıktan sonra TBDY 2018 ZC zemin sınıfına uygun tasarım spektrumuna göre eşleştirilmiş ve ölçeklenmiş

kayıtlar elde edilmiştir. Tablo 4.1.'de yer alan orijinal kayıtların tasarım spektrumuna göre ölçeklenmemiş davranışı Şekil 4.8.'de ve ölçeklenmiş kayıtların tasarım spektrumuna uygun olarak yaklaştırılmış biçimleri Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Seçilen 11 adet deprem kaydının SeismoMatch programındaki ölçeklenmemiş görüntüsü



Şekil 4.9. Seçilen 11 adet deprem kaydının SeismoMatch programındaki ölçeklenmiş görüntüsü

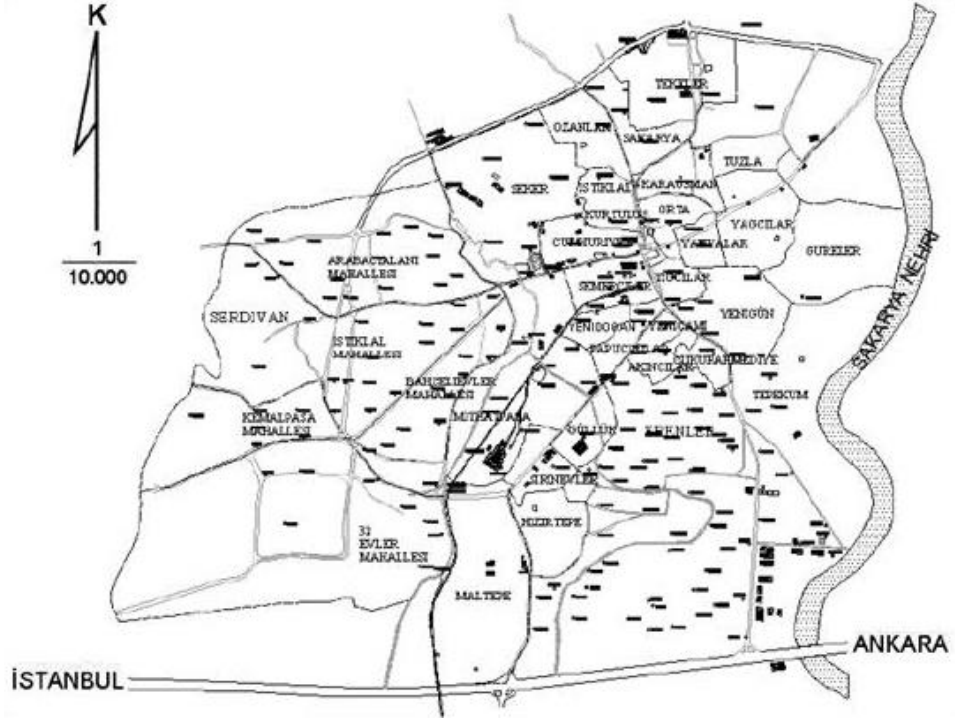
5. ADAPAZARI BÖLGESİNİN GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ

5.1. Adapazarı Zeminlerine Genel Bir Bakış

Adapazarı zeminlerinin genel yapısında 17 Ağustos 1999 depremi nedeniyle sıvılaşma ve taşıma gücü kayıpları gibi değişimler gözlemlenmiştir. Yapılarda sıvılaşma etkisinden kaynaklı olmak üzere dönme, batma ve ötelenme hareketleri meydana gelmiştir. Adapazarı zayıf zeminler üzerinde kurulduğu için deprem etkisi ile en büyük hasar ilçe merkezinde ortaya çıkmıştır. Adapazarı zeminleri konsolidasyonunu tamamlamadığı ve ince dane oranı yüksek zeminlerden meydana geldiği için sıvılaşma potansiyeli yüksektir. 17 Ağustos 1999 depremi ile zeminler 7.4 büyüklüğündeki depremi şiddet olarak yüksek değerlerde hissetmiştir. Büyük yıkımlara sebep olan 1999 depremi Adapazarı'na oranla Kuzey Anadolu Fayı'na yakın olmasına rağmen Sapanca ve Arifiye ilçelerinde daha az etkiye yol açmıştır. İlçeler arasında deprem etkisinin bu şekilde farklı hissedilmesindeki gerekçe ise bölgelerdeki havza taban topoğrafyasında yüksek tepeliklerin bulunması ve gevşek çökellerin çok ince olması olarak belirtilmektedir. Deprem sonrası incelemelerde mevcut zemin nitelikleri sebebiyle yapılarda 2 m'ye kadar gözlenen oturmalar oluşmuştur. Kanalizasyon boşluklarına hareket eden bina hareketleri oluşmuş ve mevcut gömülü kanalizasyon sistemleri de yüzeye doğru harekete zorlanmıştır.

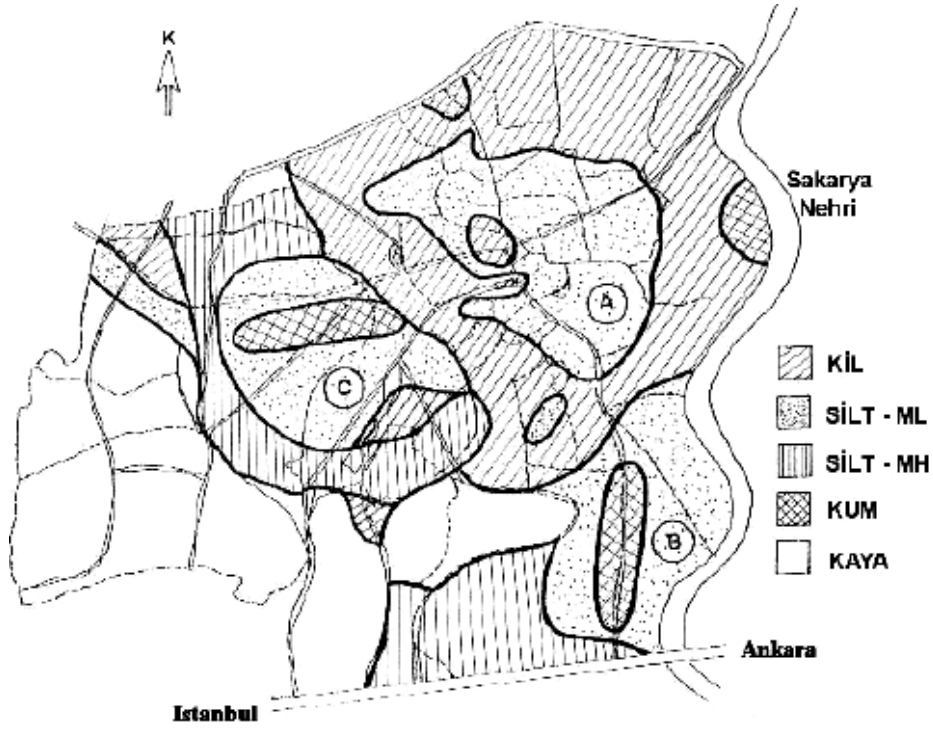
5.2. Adapazarı Bölgesinin Geoteknik Özellikleri

Sakarya Havzası içerisinde yer alan Adapazarı ilçesi jeolojik süreçler esnasında Sakarya Nehri ve Çark Suyu tarafından taşınan alüvyonlar nedeniyle oluşmuştur. Deprem sonrası zorunlu hale getirilmiş zemin etütlerinin parseller özelinde yapılması için ilçenin birçok bölgesinde sondaj çalışmaları yapılmıştır (Vural, 2012).



Şekil 5.1. Adapazarı ilçesinde belirli noktalarda açılan sondaj yerleri (Erken, 2001)

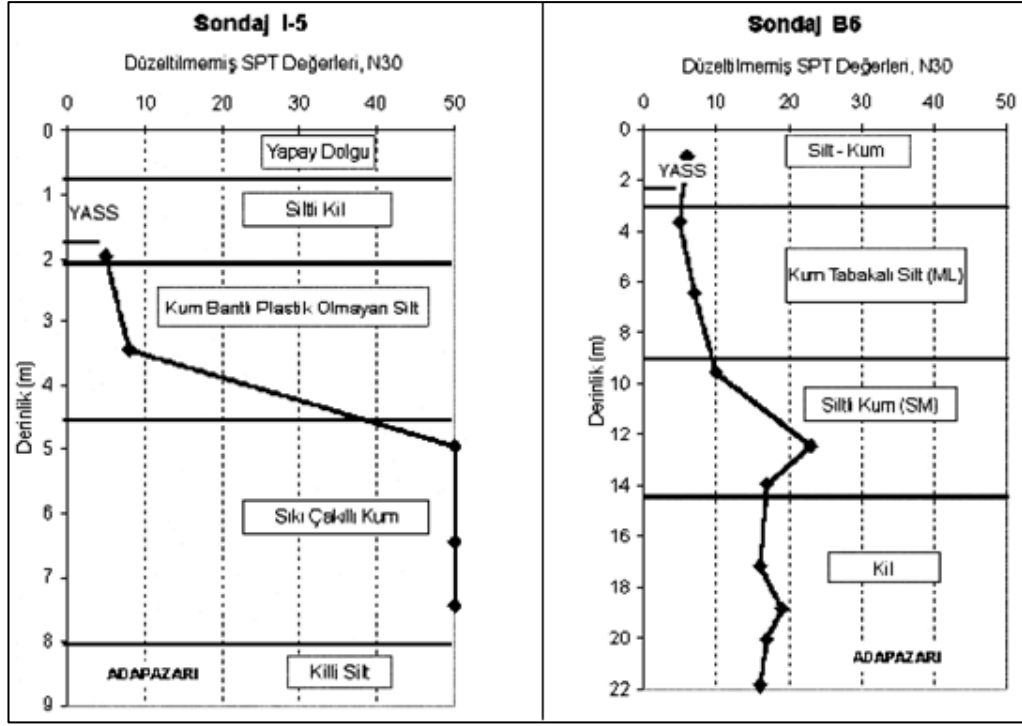
Erken (2001)'nin çalışmasına göre Şekil 5.1.'de belirlenen bölgeler için yapılan sondaj verileri ile yapılan değerlendirmeler sonucunda ,şehir merkezinde plastik olmayan veya düşük plastisite özelliğine sahip silt tabakaları yer almaktadır. Bölgede siltli zeminlerin içerisinde bazı yerlerdeki kum oranları %50 mertebesine kadar ulaşmaktadır.Adapazarı zemin tabakaları için belirlenen bölgede zemin sınıflandırılmasının yer aldığı harita Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. İlk 15 metre için Adapazarı zemin tabakaları (Erken, 2001)

Erken (2001)'nin çalışmasında hasarların yoğun olarak görüldüğü bölgeler arasında yer alan Çark Caddesi boru hattı projesi için yapılan sondajlardan elde edilen iki adet sondaj kesiti Şekil 5.3.a ve b'de verilmiştir. Kesitlerden de görüleceği gibi kum bantlı plastik olmayan silt tabakası, yapay dolgu ve siltli kil tabakalarının altında yer almaktadır. Killi siltli zemin tabakasının üzerinde sıkı çakıllı-kum zemin tabakası bulunduğu görülmektedir.

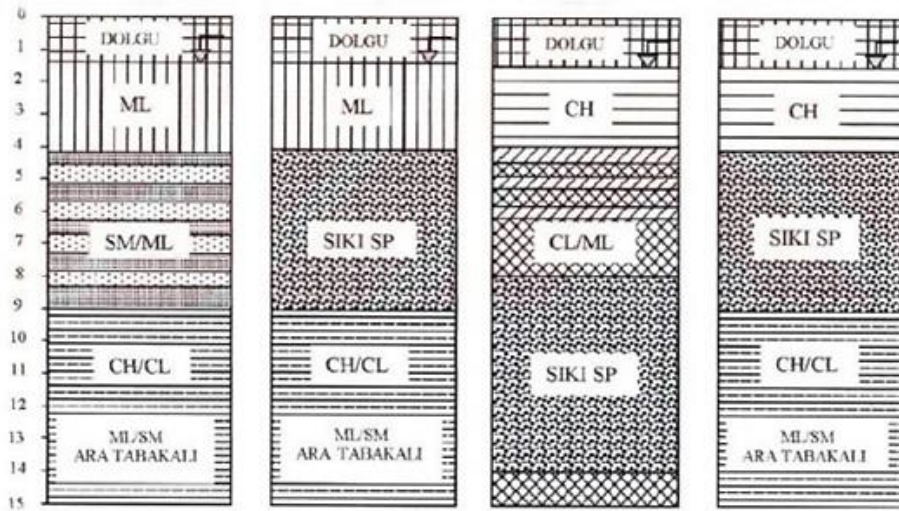
Erken ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışma sonucunda Şekil 5.3.b'de görülen sondaj kesitinde ise şehirde ağır hasar görmüş bölgelerin genel zemin yapısını gösteren sondaj verileri ve sınıflandırmalar elde edilmiştir. Şekil 5.3.b.'deki kesite göre yumuşak silt ve kum tabaka derinliğinin 14m'lere kadar uzandığı gözlemlenebilmektedir. Yer altı su seviyesi Adapazarı zeminlerinde yaklaşık 1- 3 m arasında bulunmaktadır.



(a)

(b)

Şekil 5.3. a) Adapazarı ilçesi için tipik zemin kesiti b) Ağır hasarların olduğu Adapazarı'nda bölge için elde edilen zemin kesiti (Erken ve ark., 2003).



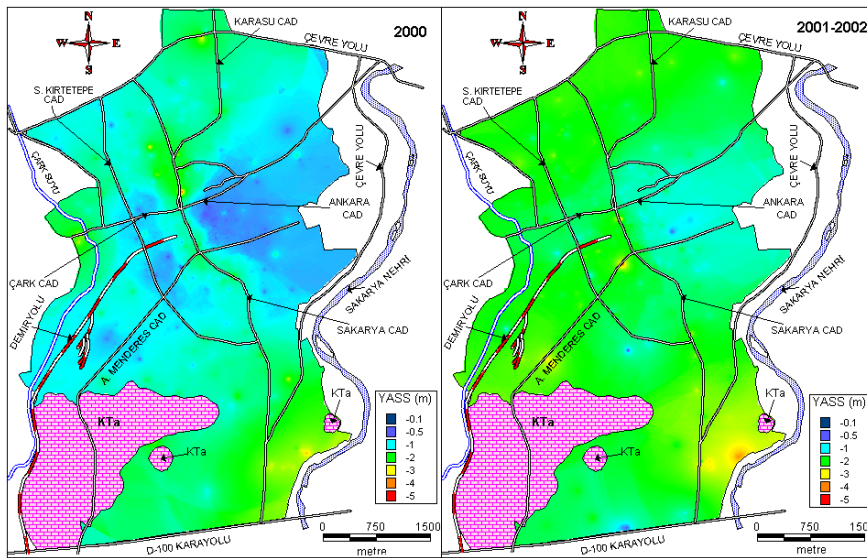
Şekil 5.4. Zemin profillerinin Adapazarı kent merkezi için gösterimi(Sancio ve ark., 2002).

Yapılan diğer çalışmalarda ise Şekil 5.4.'te gösterilen kesitlerde kalınlığı 6 m'yi bulan sıkı kum ve çakıllı kumların varlığından bahsedilebilmektedir. Sıkı kumların üstünde killi silt ve siltli killerin derin katmanlarında silt ve kum ara katmanlı kil tabakalarının varlığı gözlemlenmiştir. Deprem sonrası DSİ tarafından yürütülen 200m'lik sondaj

çalışmalarında ana kayaya ulaşılammış ve zeminin üst katmanlarında genel olarak ince kum içeren kil ve silt katmanları olduğu belirtilmiştir. 50 m ile 70 m arasında ise birkaç CL (düşük plastisiteli organik silt ve organik siltli killer) zeminleri dışında tüm kesitin yüksek plastisiteli killerden oluştuğu gözlemlenmiştir (Sert, 2003).

5.3. Adapazarı Yeraltı Suyu

Adapazarı zeminlerinde yer altı su seviyesi (YASS) yüzeye yakın bulunmaktadır ve bazı bölgelerde 1 m ile 2 m arasında değişen seviyelerde YASS değerine ulaşılmaktadır. Aşırı yağış ve kar erimeleri sebebiyle YASS seviyesi yüzeye kadar ulaşmaktadır. 1999 yılı öncesinde 60 sondaj verisine göre ölçülen ortalama YASS değeri 1,56 m olarak gözlenirken temmuz aylarında bu değer 2,77 metrelere kadar düşmektedir. 2000 yılında ise 488 sondaj verisinden elde edilen YASS ortalaması 1,05 m'ye kadar yükselmiştir (Bol, 2003).



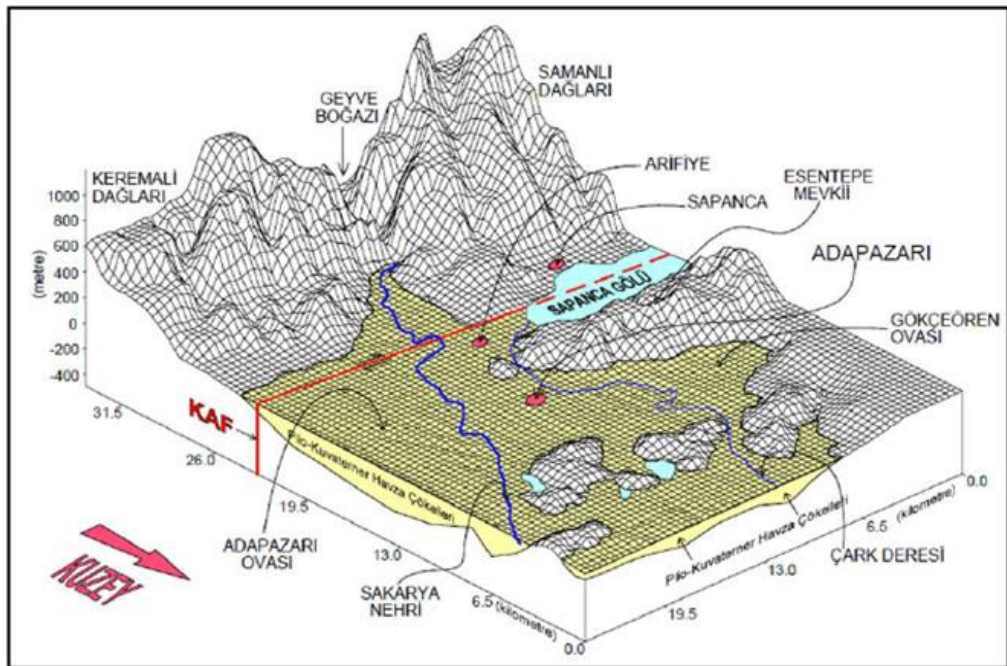
Şekil 5.5. 2000-2002 yıllarına ait Adapazarı YASS seviyeleri (Bol, 2003)

2000 yılı içinde ortalama su seviyesinin en yüksek değeri 0,48 metre ile mart ayı, en düşük su seviyesi 1,37 metre ile eylül ve aralık ayında gözlemlenmiştir. 2001 yılındaki ortalama yer altı su seviyesi değeri 1,79 m olarak belirtilirken aynı yıl ağustos ayı için bu değer minimum 2,20 m olarak belirlenmiştir. 2002 yılında ise ortalama değer 1,88 metre ve bu yılda ölçülen minimum seviye 2,62 metre olarak yine ağustos ayında elde edilmiştir. Şekilde 5.5.'te 2001–2002 yıllarında ölçülen yer altı su seviyeleri verilmiş haritalarda gösterilen yeşil bölgeler yaklaşık 2,0 metre derinliği göstermektedir (Bol, 2003).

5.4. Adapazarı Jeomorfolojisi ve Jeolojisi

Adapazarı Kuvaterner olarak geniş alanda konumlanmış alüvyon ile temsil edilmektedir. Adapazarı, Hendek ve Akyazı ovaları tutturulmamış kum, kil, silt ve çakıldan oluşmaktadır. Bu ovaları oluşturan alüvyal malzemeler Sakarya Nehri, Çark Suyu ve Mudurnu Çayı tarafından Kuzey Anadolu Fay zone ve güneyinde yer alan kayalardan taşınmıştır.

MTA (1998), yapılan çalışmalar sonucunda ova kenarlarında düşük seviyelerde ölçülen alüvyon kalınlığının ovanın ortalarında ise 150 metrelere kadar ulaştığını bildirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen verilere göre Adapazarı zeminlerinde 200 m derinliğe kadar yapılan sondajda kaya tabakasına ulaşılamamıştır. Bu büyüklükteki alüvyal dolgunun hangi bölgelerden taşındığının bilinmesi için Sakarya havzasının bilinmesi önem arz etmektedir. Sakarya havzası 58.000 km²'lik su toplama alanı ve 4 milyar m³'ün üzerindeki yıllık ortalama su hacmi ile Türkiye'nin hatırı sayılır havzalarından biri olarak kabul edilmektedir (Nurlu ve ark.,1995).



Şekil 5.6. Adapazarı'nın KD'den ve GB'ye doğru morfolojik görünümü (Bol, 2003)

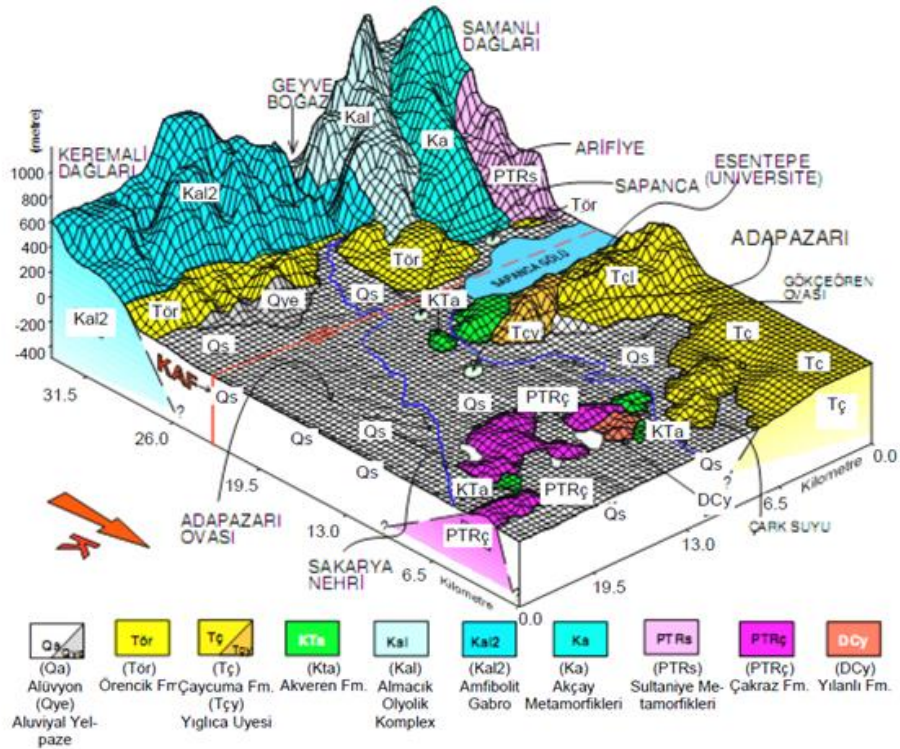
Sakarya Nehri ilin içerisinde yer alır ve 159,5 km uzunluğunda olup Pamukova ilçesinin güneyinden il topraklarına girmektedir. Nehir Geyve Boğaz'ına uğramadan önce Karaçay'ın suyunu da bünyesine katar. Devamında doğudan Mudurnu Çayını da (65 km.) bünyesine kattıktan sonra kuzeye yönelir. Sapanca Gölünün fazla suyunu boşaltan Çark Suyu (45 km.) kuzeyde Sakarya ile birleşir. Vadinin batısında 1000

metreye ulaşan dağlar yükselir. Nehir Karasu ilçesinden Karadeniz'e dökülmektedir. Nehrin hareketini sürdürdüğü ova boyunca farklı kısımlarda menderes oluşturarak aktığına dair bulgular mevcuttur. Nehir yüksek boşalımlı olmasından dolayı ve ayrıca sel etkisine karşı duracak bitki örtüsünün yetersizliği sebebiyle yüksek hacimde çökelle doludur. Nehir istikametinde yer alan Geyve Boğazı çıkışının ardından Adapazarı ovasının düzlüğünde akış hızını kaybettiği için taşıdığı çakıl, kum, kil ve silt malzemelerini ovaya bırakmış ve yatağın gittikçe dolması sonucunda azalan akım hızı ile kil ve silt istiflenmesine yol açmıştır (Bilgin, 1984).

Şekil 5.6.'da görüldüğü gibi Adapazarı havzasını çevreleyen yüksek kısımlar Doğu-Batı uzanımlı olarak yer alıp bu uzanımın batı kısmını Samanlı Dağları, doğu kısmını ise Karadağ-Keremali Dağları oluşturmaktadır. Sakarya Nehri yüksekliğin kısmen azaldığı Geyve Boğazı olarak bilinen derin vadiden geçmektedir. Adapazarı'nın güney batısında bulunan Sapanca Gölü'nün kuzey ve güney bölümleri yüksek tepeliklerle sınırlanmakla birlikte doğu bölümü ise düz bir saha oluşturmaktadır. Şehrin kuzey taraflarında yer alan (Karakamış, Dağdibi kuzey kenarları) 150-200 m civarındaki tepelik ile sınırlandırılır. Şehir merkezinin bulunduğu saha genelde düz bir görünüm oluşturmakta ve deniz seviyesine göre yüksekliği genelde 31 m civarındadır. Bu yükseklik değeri Kuzey-Doğu istikametinde ‰0,5 Kuzey-Batı istikametinde ‰2'lik bir eğimle azalma göstermektedir. Kentleşme sınırlarında yer alan bu düzlük batıda Serdivan ve güneybatıda Erenler mevkileri ile kısmen de olsa bozulmaktadır.

5.4.1. Bölgenin jeolojisi

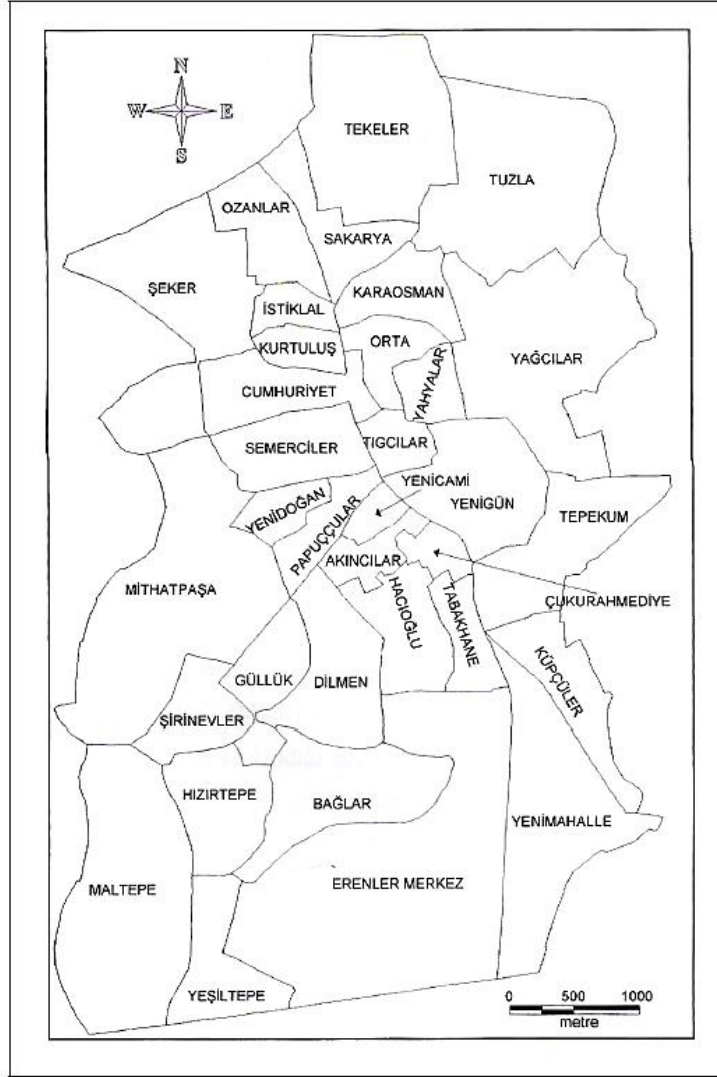
Arazide bulunan Sakarya ve Mudurnu nehirleri Adapazarı ve etrafının büyük bir miktarını oluşturan çakıllı-siltli kum malzemelerinin taşınması ile Kuvaterner alüvyal birikintilere sebep olmuştur. Bol (2003) tarafından yapılan çalışma sonucunda Adapazarı bölge jeomorfolojisinin ve jeolojisinin gösterildiği model Şekil 5.7.'de verilmiştir. Çakıl-kum-silt serileri çoğunlukla süreklilik oluşturacak biçimde görülmekle beraber oluşan birikintilerde plastisite değeri düşük kil-silt serilerinin yer aldığı bilinmektedir. Çalışmalar sonucunda elde edilen bazı yerlerde yalnızca zemin ardaşmaları şeklinde bulunan ve bazı kısımlarda ise kombinasyonları kil, kum, çakıl ve silt yerleşimi ile görülmektedir (Önalp ve ark., 2000).



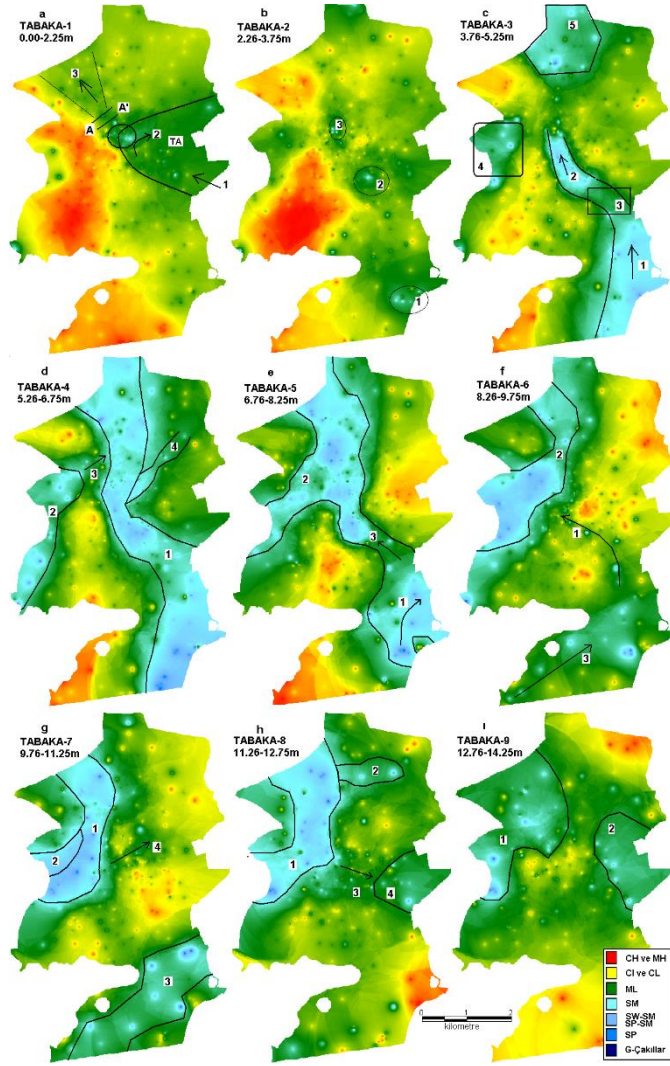
Şekil 5.7. Adapazarı'nın jeomorfolojisi ve jeolojisi (Bol, 2003)

Sancio (2003) tarafından 4 m derinlikten alınan bir karbon numunesi üzerinde yapılan çalışmalarda zeminin 1000 yaşında olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonuca göre yüzeyde yer alan zeminlerin sadece birkaç yüz yıllık olduğu veya daha düşük bir yaşta olduğu belirtilmiştir. Ana kaya ve zemin tabakaları arasındaki yoğunluk farkının 500 kg/m³'lük değeriyle yerçekimi anomali prensibine uygun olarak zemin profilini modellemişlerdir. Zeminlerdeki alüvyon tabaka kalınlığının yaptıkları incelemeler sonucunda 1000-1500m derinlikte bulunduğu belirlenmiştir (Kaya ve ark., 2011).

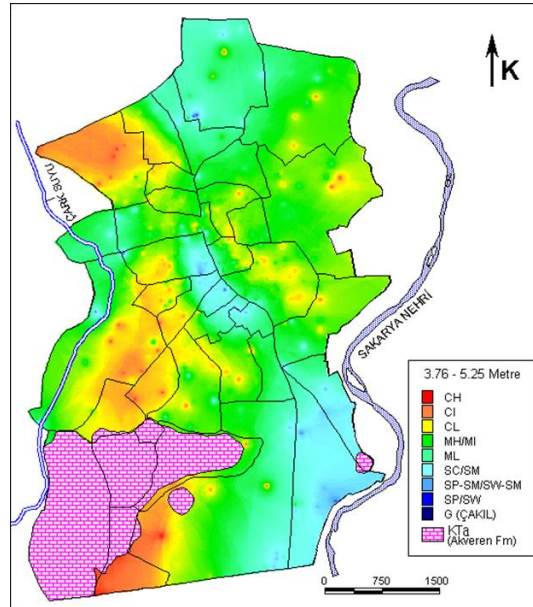
Bol (2003), Adapazarı ve Erenler belediyesinin dahil edildiği 34 mahallede Adapazarı zeminlerini TS 1500/2000 hükümlerine göre 15,75 metreye kadar sınıflandırmıştır. Araştırması yapılan 34 adet mahallelinin bulunduğu sayısal harita aşağıdaki Şekil 5.8. 'de gösterilmiştir. Bu kapsamlı araştırma ile Adapazarı zeminlerinde belirli derinliklerde zemin sınıflandırılması yapılmıştır. Belirlenen mahallelerden 26 tanesi Adapazarı Merkez Belediyesine, 8 tanesi ise Erenler belediyesine aittir.



Şekil 5.8. Adapazarı sayısal haritası (Bol, 2003)



Şekil 5.9. Belirli derinliklerdeki Adapazarı zemin haritası (Bol, 2003)



Şekil 5.10. 3.76-5.25 m arası zemin sınıfları (Bol, 2003)

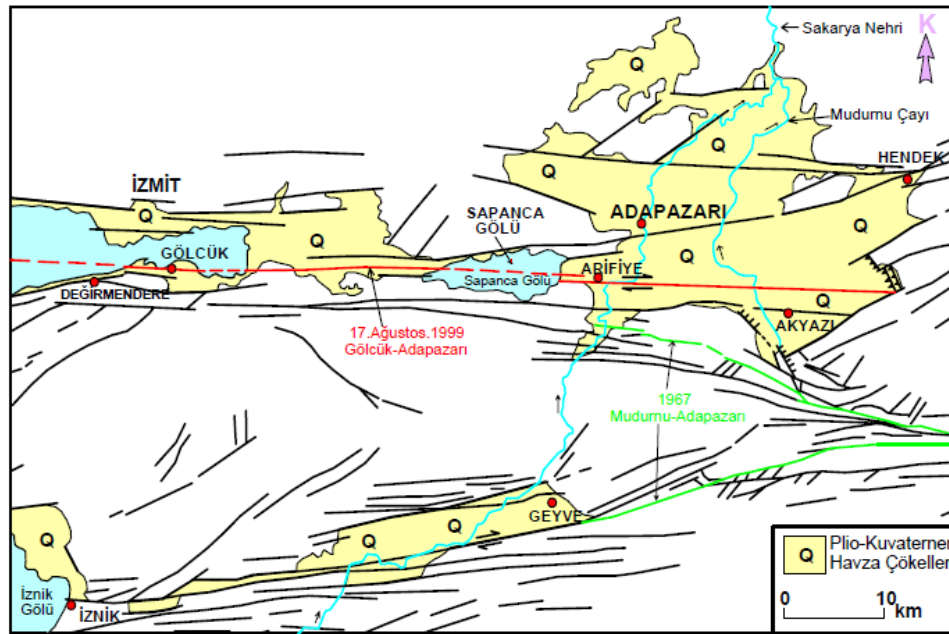
Şekil 5.8.'deki sayısal haritada görülen, şehir merkezi için Yeşiltepe mahallesinin kuzey tarafı, merkezin Güney Doğusunda bulunan Maltepe, ayrıca Hızırtepe, Bağlar ve Güllük Mahallesinin güney kısmı ana kaya üzerinde bulunmaktadır.

Bol (2003), çalışmasına göre Şekil 5.9'da yer alan haritaya göre (Tabaka-1 ve Tabaka-2) kırmızı ile gösterilen CH sınıfı zeminler büyük bir alanı kaplamaktadır. Bu CH sınıfı killeri yüzey sularının çeşitli kayaların ayrışma ürünü olan ince malzemeyi tepelerin eteklerine biriktirmesi sonucunda oluşmuşlardır. Tabaka-1 ve Tabaka-2 olarak gösterilen Şekil 5.9.'da yer alan haritalarda kumlar çok kısıtlı bir alanı kaplamaktadır. Kumların kapladığı alan Sakarya Nehri'nin bulunduğu bölgeye yakın olduğu için belli dönemlerdeki taşkınların bu bölgelerde kum birikmeleri sonucunda meydana gelebileceği belirtilmiştir.

Bol (2003), çalışmasına göre taşkın durumunda su kentin içine ok1 yönünde (Şekil 5.9.) girmekte taşkın debisinin çok yüksek olmadığı zamanlarda ise ok2 ile gösterilen doğrultuda bir menderes yaparak bölgeden uzaklaşmaktadır. 2.26-3.75 metreleri için hazırlanan haritada belirtilen 1, 2 ve 3 bölgelerinde sellenmeden dolayı kumlanma görülmektedir. 3.76-5.25 metre derinliklerde Tabaka-1 ve Tabaka-2'de (Şekil 5.9.) yer alan CH zeminleri yerini CL sınıfı zeminlerine bırakmıştır yine de CH sınıfı zeminlere bölgede yer yer rastlanmaktadır. Şekil 5.10.'da 3.76-5.25 m arasındaki zeminler için oluşturulmuş zemin sınıf haritası yer almaktadır. 5.26-6.75 metre derinliğinde ise bir kanal şeklinde kum tabakası olduğu belirtilmiştir. Bu da bahsedilen bölgede bir nehir yatağının bulunduğunu göstermiştir. 6.76-8.25 metre derinliklerinde kuzeydoğu bölgelerinde CL tipi zeminler belirgin şekilde gözlenmekte ve yer yer CH tipi zeminler görülebilmektedir. Belirlenen aralıktaki tabakada kum, kil, silt cinsi zeminler bölgesel olarak yoğunluk göstermektedir. 8.26-9.75 metre derinliklerinin kuzeydoğu bölgelerinde CL sınıfı zeminler bulunmaktadır ve yine yer yer CH sınıfı zeminler görülmektedir. 9.76-1.25 metre derinliğinde ise doğuda bulunan hâkim CL sınıfı zeminler arasında ML türü zeminler gözlemlenebilmekte ve CH türü zeminler varlığını kaybetmektedir. Ok4 ile gösterilen doğrultuda killerin arasında kanal biçiminde silt birimleri belirgin, doğuya doğru ise bu silt genişleyerek yaklaşık sınırlı bir bölge haline gelmiştir.

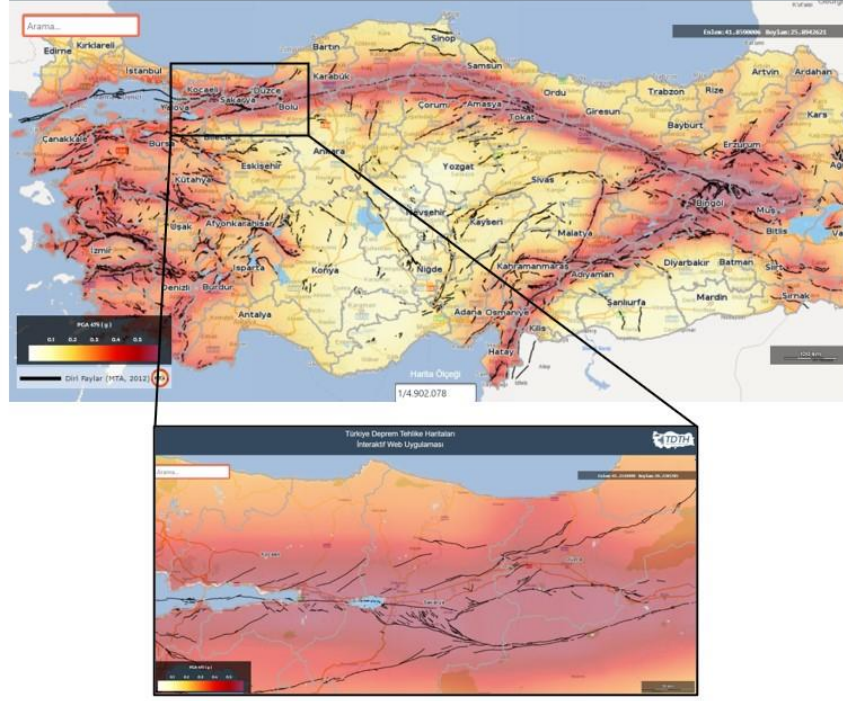
5.5. Bölgenin Depremselliği

Adapazarı zeminleri yapısı itibarı ile henüz sıkılaşmamış ve genel olarak birbirleriyle gevşek olarak tutturulmuş uzun zaman geçmemiş genç sedimentlerden oluşan alüvyon karakterli bir ovadır. Adapazarı örneğinde olduğu gibi genç çökel zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin yüksek olması nerdeyse kaçınılmazdır. Yönetmeliklere ve belirlenen şartnamelere uygun zemin etütlerinin yapılmaması, temel derinliğinin binaya uygun olarak belirlenememesi ve uygulanamaması, gerekli zemin iyileştirmelerinin göz ardı edilmesi 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde yapıların oturulamaz hale gelmesine ve çok sayıda can kaybını yaşanmasına sebep olmuştur.



Şekil 5.11. Adapazarı ve çevresindeki yerleşkelerin Neo-Tektonik Haritası (Koçyiğit ve ark., 1999)

Kuzey Anadolu Fay Zonu'nun ilk olarak Paleotektonik dönemde Anadolu Levhasının sıkışması sonucunda oluştuğu çok sayıda araştırmacı (Ketin (1969), Tokay (1973), Seymen (1975), Şengör ve ark. (1985), Barka ve Gülen (1987) vb.) tarafından belirtilmiştir. Şekil 5.11.'de Adapazarı ve çevresindeki yerleşkelerin Neo-Tektonik Haritası gösterilmektedir. Kuzey Anadolu Fayı Mudurnu-Adapazarı kısmında iki kola ayrılmıştır. Şekil 5.12.'de Türkiye aktif tektonik haritası yer almaktadır. Şekil 5.13.'te Adapazarı bölgesi için aktif fayların ve son iki bin yılda 6.8 büyüklüğündeki depremlerden, daha büyük depremlerin meydana geldiği noktaların yer aldığı harita gösterilmektedir. Şekil 5.14.'te AFAD interaktif web uygulamasından yararlanılarak Adapazarı aktif faylarının gösterimi yer almaktadır.

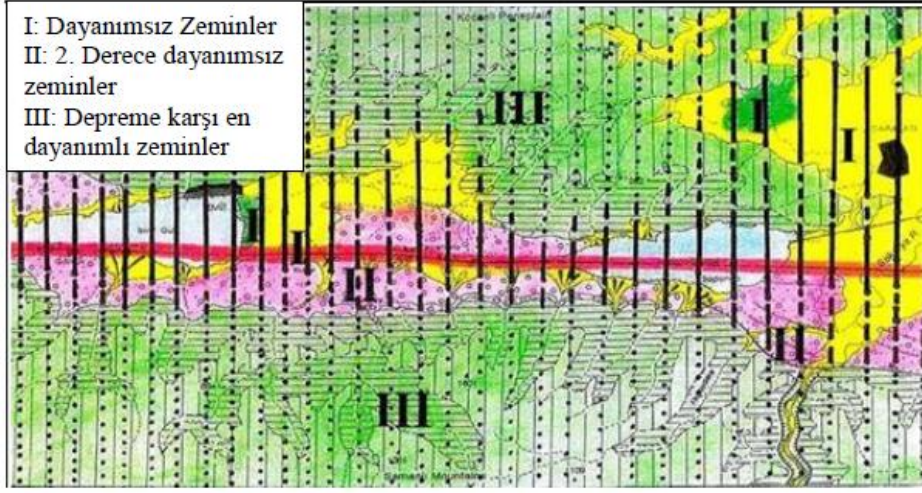


Şekil 5.14. AFAD Türkiye Deprem Tehlike Haritaları interaktif web uygulaması Türkiye Haritası Diri Fayların Dağılımı (MTA 2012 Haritalarından Faydalanılarak)

17 Ağustos 1999 tarihinde 03:01:37 yerel zamanında meydana gelen depremin yüzey dalga magnitüdü 7.8 (USGS), cisim dalga magnitüdü 6.3 (USGS), süre magnitüdü 6.7 (Kandilli), moment magnitüdü 7.4 (USGS, Kandilli), episenter koordinatları 40.702K, 29.987D (USGS) ve derinliği 17km (USGS)'dir. Deprem Gölcük kasaba yakınında 7.4 büyüklüğünde Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerinde dört segment halinde meydana gelmiştir (Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü). 17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi için elde edilen ana kayıt meydana gelen yüzey kırılmasının yalnızca 3,3 km kuzeyinde bulunan Sakarya Bayındırlık ve İskân Müdürlüğü deprem istasyonundan alınmıştır. İstasyondaki kayıtlarda faya neredeyse paralel olan doğu-batı ve düşey yönde ivmeler elde edilmiştir. Elde edilen ivme kayıtlarından doğu-batı doğrultusundaki kayıt için en büyük ivme değeri (PGA) 0.415g, en büyük hız 81 cm/sn ve statik ötelenme değeri 214 cm olarak meydana gelmiştir (Anderson ve ark., 2000; Bray ve ark., 2001).

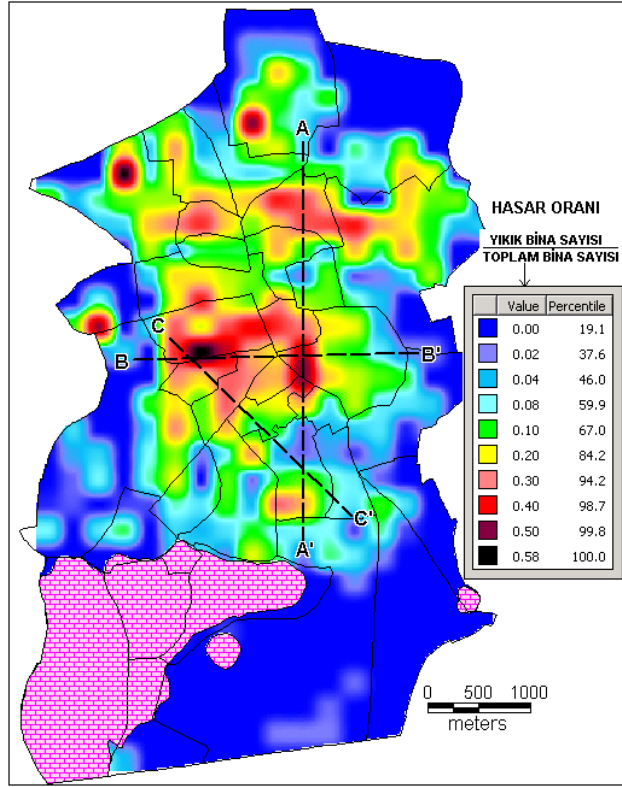
Deprem sonucunda meydana gelen yapı hasarlarında geoteknik zemin özelliklerinin belirleyici etkisi, saha gözlemleri doğrultusunda ortaya konulmuştur. Fay boyunca belirlenen 20-200 m genişliğindeki yüzey kırığında ölümle sonuçlanan hasarlar yeni alüvyon zeminler üzerinde gerçekleşmiştir. Şekil 5.15.'te belirtilen sürekli koyu

çizgiler hasarın en yoğun olduğu bölgeleri, kesikli çizgiler orta hasarlı bölgeleri, noktalı çizgiler ise hasarın en az olduğu bölgeleri, kırmızı çizgi ise depremde kırılan hattı göstermektedir.



Şekil 5.15. 17 Ağustos Depremi sonrası hasar dağılım haritası (MTA Genel Müdürlüğü 1999;akt.Vural, İ., 2012)

Yüzey kırığına çok yakın mesafelerde ve bununla birlikte fay kırığı üzerinde yer alan sağlam zeminlerde deprem sarsıntılarının daha az etkilemesine bağlı olarak ölümcül hasarlar görülmemiştir. Ancak deprem merkez üssü ve fay kırığına olan uzaklığının fazla olduğu jeolojik açıdan depreme karşı dayanımsız zeminlerde ölümle sonuçlanan hasarların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumu en iyi şekilde örnekleyebilecek şehir merkezi Adapazarı olarak belirtilebilmektedir. Fay kırığının yakın çevresinde beklenen maksimum hasar, şehrin faya uzak merkez bölgelerinde meydana gelmiştir. Hasar dağılımının yerel zemin özellikleri sonucunda bu şekilde ortaya çıktığı belirtilmiştir. Afet bölgesi olarak belirtilen alan içinde yer alan Gölcük-İzmit-Sapanca-Adapazarı-Akyazı gibi büyük yerleşimlerde de ölümle sonuçlanan hasarın dayanımsız zemin özellikleri nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir. Sonuç olarak 1999 depremi sonrası yaşanan can kaybı ve hasarın esas nedeni, bölgedeki yapılaşmanın yoğun olarak depreme karşı çok zayıf zeminde yer alması olarak belirtilmiştir (MTA Genel Müdürlüğü 1999;akt.Vural, İ., 2012).

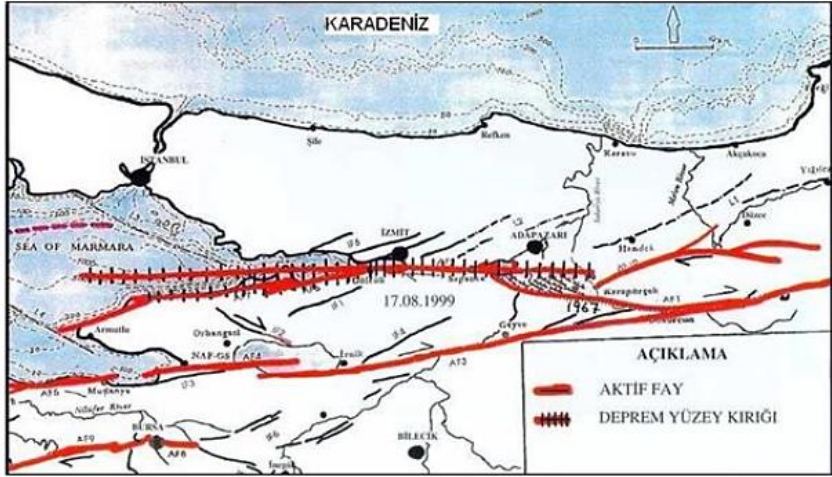


Şekil 5.16. Bol 2003'e göre Adapazarı bölgesi hasar oranı dağılım haritası (Bol, 2003)

1999 depreminin etkisi ile binalarda oluşan hasar sınıflandırılmaları resmî kurumlar tarafından yıkık-ağır hasarlı, orta hasarlı, az hasarlı, hasarsız olmak üzere belirlenmiştir. Yıkık-ağır hasarlı bina sınıflandırmasında tamamen göçmüş veya kısmen göçme davranışı göstermiş yapılar ve zemine bağlı olarak eğilme, batma, devrilme davranışı gösteren onarılmayacak haldeki yapılar kabul edilmiştir. Şekil 5.16.'da hasarların oluşum sebeplerini göstermek amacıyla Bol (2003) tarafından hasar oranı dağılım haritası oluşturulmuştur. Haritalama için zemin sınıvlaşması, taşıma gücü problemleri ve mevcut zemin özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Yıkılan ya da hasarlı bina sayısını belirtmek için mahalle bazında düzenleme yöntemi seçilmiştir. Kent merkezinde yerleşimin yoğun olduğu ve seyrek olduğu kısma uygun olacak şekilde 'bağlı yıkım oranı' olarak belirtilen yaklaşım kullanılmıştır. Bundan önceki çalışmalarda her mahalle için bir oran kullanılması sebebiyle mahallelerin yapılaşmasına uygun hasar tespit oranı gerçekçi biçimde yansıtılamamıştır. Belediyelerden temin edilen 1/1000'lik haritalar 250 metrelik karelere ayrıştırılarak yıkık veya ağır hasarlı bina sayısı için gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Adapazarı merkezinde ve merkezin kuzeyinde hasarların daha yüksek olduğu doğu-batı doğrultulu iki büyük zon arasında kalan bölge için hasarların daha az olduğu

gözlemlenebilmiştir. Bölgedeki Akveren Formasyonu olarak isimlendirilen ana kayanın yüzelendiği kısımlarda hasar tespiti hemen hemen hiç gözlenmemiştir. Bu bölgede yıkık yapılara rastlansa dahi oluşan hasarların yapısal kaynaklı olduğu belirtilmiştir (Bol, 2003).



Şekil 5.17.1999 Depremi'nin yaşandığı bölge ve yakın çevresinin aktif fay haritası (URL1)

Şekil 5.17.'de MTA Genel Müdürlüğü'nün yürüttüğü çalışma kapsamında afet bölgesi olarak ilan edilen lokasyonda, depremden iki yıl önce gerçekleştirdikleri çalışmalara göre belirlenen aktif faylar gösterilmektedir. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı ve Valilikler tarafından depremde zarar görmüş binalar tespit edilmiştir (Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, 1999). Adapazarı'nın değerlendirmeler sonucunda yıkılan ve ağır hasarlı yapı durumları bakımından depremden en çok etkilenen şehir olduğu belirtilmiştir.

17 Ağustos 1999 Kocaeli depremi sonrasında depremden etkilenen binaların Adapazarı, İzmit ve Yalova şehirlerine ait hasar sonuçları aşağıdaki tabloda yer almaktadır (Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2000).

Tablo 5.1.Şehirlere göre hasarlı bina sınıflandırması (Kaya, Ş., Saroğlu, E., Musaoğlu, N., 2005)

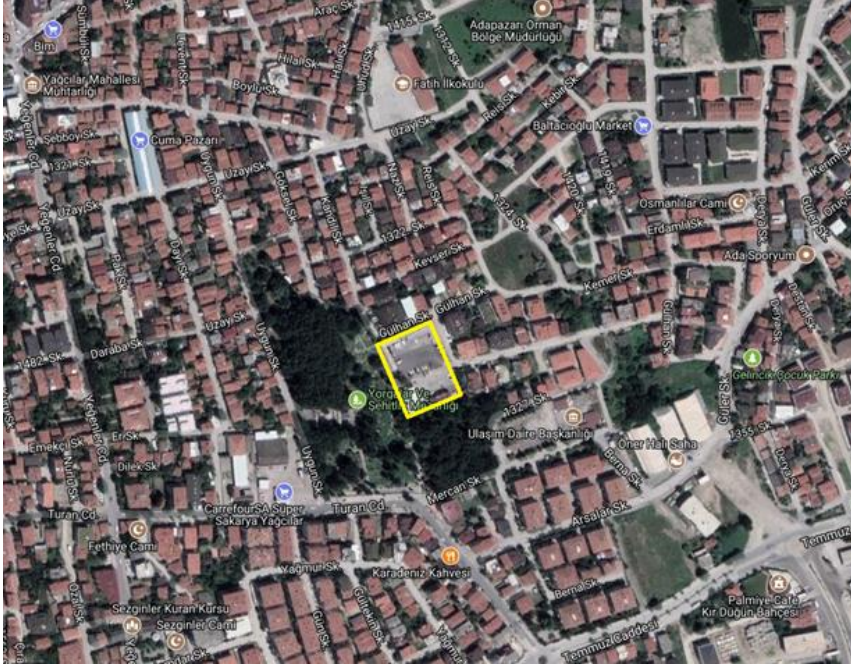
Şehir	Ağır Hasarlı ve Yıkılan Bina Sayısı	Orta Hasarlı Bina Sayısı	Az Hasarlı Bina Sayısı
Sakarya (Adapazarı)	11373	5813	8763
İzmit (Kocaeli)	3614	12944	13335
Yalova	9637	8988	12677

Yapıların planlandığı zeminlerin geoteknik nitelikleri, deprem sırasında meydana gelecek yapı hasarlarında ve yapıların yıkılmasında büyük bir rol oynamaktadır. Deprem esnasında deprem dalgalarının farklı zeminlerdeki geçişleri ile meydana gelen davranışları ve yıkım etkileri farklılık göstermektedir. Depremin meydana geldiği sırada gevşek ve sıkışmamış zeminler, zemin hâkim titreşim periyodunun büyümesine sebep olur bu durumda da depremlerin yıkıcılık etkisi artmaktadır.

5.6. İnşaat Sahası ve Yapı Hakkında Bilgiler

5.6.1. Çalışma alanı zemin modeli

Sakarya İli, Adapazarı Merkez İlçesi, Yağcılar Mahallesi, Yorgalar Asri Mezarlığı (Alçaktarla) Mevki, Gülhan Sokakta bulunan Gasilhane binası için mevcut sondaj verileri yardımıyla zemin profili oluşturulmuştur.Şekil 5.18.'de yer bulduru haritası görülmektedir.



Şekil 5.18. Çalışma alanı görüntüsü

Bu çalışma kapsamında söz konusu parselde toplam derinliği 85 metre olan 5 adet dönele sondaj yapılmıştır. Şekil 5.19.'da çalışma kapsamında yapılan sondajların lokasyonları gösterilmektedir. Arazi verileri ve söz konusu sondajlardan elde edilen örselenmemiş ve örselenmiş numuneler üzerinde gerçekleştirilen fiziksel ve mekanik deneyler Sakarya Üniversitesi (SAÜ) İnşaat Mühendisliği Geoteknik Laboratuvarı tarafından yürütülmüştür.



Şekil 5.19. Çalışma alanında kullanılan sondaj lokasyonları

İncelenen alan için yapılan sondajların koordinatları ile burada ölçülen yeraltı suyu düzeyleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Yorgalar Gasilhane Arsası Sondaj Koordinatları

	Enlem	Boylam	YASS (m)	Ölçüm Tarihi
SK-1	40.778379°	30.414999°	2.20	21.06.2018
SK-2	40.778571°	30.414916°	2.30	21.06.2018
SK-3	40.778543°	30.415473°	2.50	21.06.2018
SK-4	40.778711°	30.415340°	2.40	21.06.2018
SK-5	40.778632°	30.415134°	2.10	21.06.2018

5.6.1.1. Zemin özellikleri

Çalışma sahası flüviyal karakterli alüvyonlar üzerinde yer almaktadır ve sahanın yaklaşık iki kilometre doğusundan geçen Sakarya nehrinin bölgeyi şekillendirmesinden önemli derecede etkilenmiştir. Sondaj logları incelendiğinde; alanda yeraltı su seviyesinin 2.10-2.50 metreler arasında olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yapılan sondaj çalışmasında alınan örselenmiş ve örselenmemiş numuneler TS 1900/1 ve TS 1900/2 (2006) uyarınca zemin mekaniği deneylerine tabi tutulmuş ve zeminler TS 1500 (2000) uyarınca sınıflandırılmışlardır (SAÜ, Geoteknik Laboratuvarı). Bu çalışma kapsamında kullanılan parametreler Tablo 5.3. ve Tablo 5.4.’ te verilmiştir.

Sondaj logları ve deney sonuçları birlikte incelendiğinde zemininin üst kesimlerinde kalınlığı 4,50 metreye varan silt arakatlı orta plastisiteli killerin bulunduğu gözlemlenmektedir. Bu seviyenin altında 17 metrelere kadar çoğunlukla plastik olmayan siltler bulunmakta ve bunun altında 17 metrelerden sonra ise killere rastlanmaktadır. Sahada bulunan kalın silt tabakası bu bölgenin geçmişte Sakarya Nehri’ nin taşkın alanı olduğu fikrini güçlendirecek niteliktedir.

Tablo 5.3. Yorgalar Gasilhane Arsası Zemin Özellikleri (Sondaj Sıralı) (SAÜ-Geoteknik Laboratuvarı)

SK	Derinlik	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	FC	% C	Sımf	SPTN	SK	Derinlik	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	FC	% C	Sımf	SPTN
1	1.50	KG	19	NP	NP	NP	-	16	-	SM	7	3	6.00	Y	31	31	26	6	0.99	91	14	ML	9
1	4.00	Y	57	95	30	65	0.42	99	-	CH	7	3	7.50	YG	34	32	NP	NP	1.05	74	14	ML	13
1	4.50	YKG	34	38	19	20	0.80	84	-	CI	4	3	9.00	Y	40	41	28	13	0.90	95	-	MI	9
1	7.50	YG	28	25	NP	NP	1.07	60	8	ML	14	3	12.00	GY	27	29	NP	NP	0.94	83	11	ML	16
1	14.50	YG	30	32	25	8	0.71	79	-	ML	13	3	14.50	GY	30	29	NP	NP	1.03	91	11	ML	17
1	17.00	Y	40	75	21	54	0.34	97	-	CH	16	4	3.00	YG	31	29	NP	NP	1.10	74	8	ML	6
2	1.50	YK	37	45	24	21	0.61	98	-	CI	5	4	4.00	KG	30	NP	NP	NP	-	75	10	ML	4
2	3.00	KY	36	43	25	19	0.57	98	-	CI	5	4	4.50	K	28	29	NP	NP	0.95	70	9	ML	5
2	4.50	KY	35	46	25	21	0.48	96	-	CI	7	4	6.00	K	32	28	NP	NP	1.15	70	8	ML	5
2	6.00	K	34	NP	NP	NP	-	76	10	ML	8	4	7.50	K	29	28	NP	NP	1.07	77	9	ML	8
2	7.50	YG	31	NP	NP	NP	-	53	-	ML	9	4	9.00	YG	32	29	NP	NP	1.13	72	11	ML	8
2	9.00	YG	26	0	NP	NP	-	52	-	ML	15	4	12.00	YK	28	25	NP	NP	1.07	60	9	ML	11
2	12.00	Y	29	NP	NP	NP	-	32	-	SM	17	5	3.00	KG	11	NP	NP	NP	-	28	-	SM	7
2	14.50	YG	31	NP	NP	NP	-	66	-	ML	19	5	4.50	YG	25	NP	NP	NP	-	46	14	SM	6
3	3.00	YG	32	35	29	7	0.49	95	17	MI	6	5	7.50	YG	29	NP	NP	NP	-	74	10	ML	9
3	4.50	YG	30	NP	NP	NP	-	73	9	ML	8	5	12.00	YG	27	NP	NP	NP	-	69	12	ML	14
3	5.00	Y	40	51	24	27	0.63	97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

K: Kahve Y: Yeşil G: Gri B: Krem

Tablo 5.4.Yorgalar Gasilhane Arsası Zemin Özellikleri (Derinlik Sıralı) (SAÜ-Geoteknik Laboratuvarı)

SK	Derinlik	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	FC	% C	Sınıf	SPTN	SK	Derinlik	Renk	w _n	w _L	w _P	PI	I _L	FC	% C	Sınıf	SPTN
1	1.50	KG	19	NP	NP	NP	-	16	-	SM	7	1	7.50	YG	28	25	NP	NP	1.07	60	8	ML	14
2	1.50	YK	37	45	24	21	0.61	98	-	CI	5	2	7.50	YG	31	NP	NP	NP	-	53	-	ML	9
2	3.00	KY	36	43	25	19	0.57	98	-	CI	5	3	7.50	YG	34	32	NP	NP	1.05	74	14	ML	13
3	3.00	YG	32	35	29	7	0.49	95	17	MI	6	4	7.50	K	29	28	NP	NP	1.07	77	9	ML	8
4	3.00	YG	31	29	NP	NP	1.10	74	8	ML	6	5	7.50	YG	29	NP	NP	NP	-	74	10	ML	9
5	3.00	KG	11	NP	NP	NP	-	28	-	SM	7	2	9.00	YG	26	0	NP	NP	-	52	-	ML	15
1	4.00	Y	57	95	30	65	0.42	99	-	CH	7	3	9.00	Y	40	41	28	13	0.90	95	-	MI	9
4	4.00	KG	30	NP	NP	NP	-	75	10	ML	4	4	9.00	YG	32	29	NP	NP	1.13	72	11	ML	8
1	4.50	YKG	34	38	19	20	0.80	84	--	CI	4	2	12.00	Y	29	NP	NP	NP	-	32	-	SM	17
2	4.50	KY	35	46	25	21	0.48	96	-	CI	7	3	12.00	GY	27	29	NP	NP	0.94	83	11	ML	16
3	4.50	YG	30	NP	NP	NP	-	73	9	ML	8	4	12.00	YK	28	25	NP	NP	1.07	60	9	ML	11
4	4.50	K	28	29	NP	NP	0.95	70	9	ML	-	5	12.00	YG	27	NP	NP	NP	-	69	12	ML	14
5	4.50	YG	25	NP	NP	NP	-	46	14	SM	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

K: Kahve Y: Yeşil G: Gri B: Krem

5.7. Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi

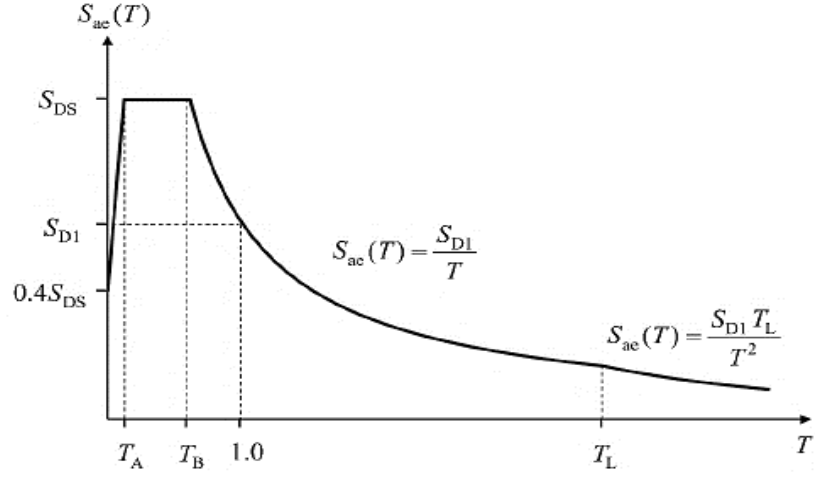
5.7.1. TBDY 2018'e göre zemin sınıfı ve tasarım spektrumunun belirlenmesi

Yayınlanan TBDY 2018 yönetmeliğine göre deprem sırasında oluşabilecek hasarların azaltılması amacıyla çeşitli değişiklikler belirtilmiştir. Yerel zemin sınıfları yeniden belirlenmiş ve bu sayede tasarım ivme spektrum değerlerinin bölgeye özgü seçilme fırsatı oluşturulmuştur. Zeminler 6 sınıf halinde sunulmuş ve sınıfların belirlenmesinde $(V_s)_{30}$ (Üst 30 metredeki ortalama kayma dalgası hızı [m/s]), $(N_{60})_{30}$ (Üst 30 metredeki ortalama standart penetrasyon darbe sayısı) ve $c(u)_{30}$ (Üst 30 metredeki ortalama drenajsız kayma dayanımı (kPa)) parametreleri kullanılmıştır. Yeni yönetmeliğe göre Tablo 5.5.'te verilen ZF sınıfı zeminler, sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler olarak adlandırılmıştır.

Tablo 5.5. Yerel zemin sınıfları (TBDY 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi
ZA	Sağlam, sert kayalar
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar
ZD	Orta sıkı – sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
ZE	Gevşek kum, çakıl veya yumuşak – katı kil tabakaları veya $PI > 20$ ve $w > \% 40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killer, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killer, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killer, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killer

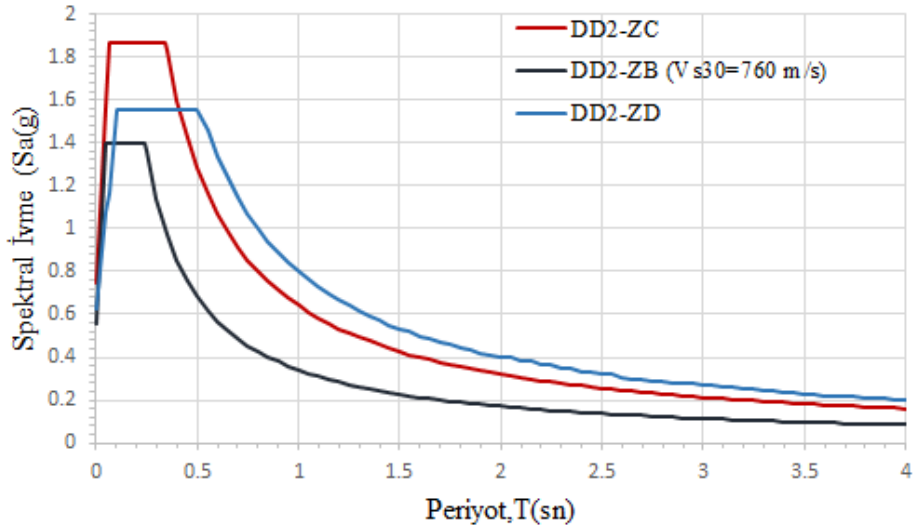
Deprem yüklerinin yapı tasarımına etkisini inceleyebilmek için tasarım spektrum eğrileri kullanılmaktadır. Yönetmelikler kapsamında da deprem etkisinin tasarımlardaki etkisi için normalleştirilmiş ivme spektrum kullanımı tavsiye edilmiştir.



Şekil 5.20. Yatay elastik tasarım ivme spektrum grafiği (TBDY 2018)

Tasarım spektrumları sismik kayıtların dinamik özelliklerini göstermektedir. AFAD Türkiye Deprem Haritaları bölgeler için tasarım spektrumunu özel olarak kullanma imkânı sunmuştur. AFAD uygulaması ile bölgeler için tasarlanması planlanan yapılarda uygulanacak deprem düzeyleri ve farklı zemin sınıfları için spektrum zarfları kullanılabilir. Yönetmelik kapsamında güncellenen Şekil 5.20.'de yer alan yatay elastik spektrum eğrisi, belirlenen zemin sınıflarına uygun olarak belirlenen parametreler (T_A ve T_B köşe periyotları, S_{DS} ve S_{D1} 1 saniyelik periyot ve kısa periyot için tasarım spektral ivme katsayısı) ile tasarımlarda kullanılmaktadır.

Çalışma alanında yapılan geoteknik ve jeofizik çalışmalar neticesinde 140 m derinlik seviyesine kadar tabakalı zemin modeli oluşturulmuş ve taban kayanın derinde olması nedeni ile zemin modeli ZC ile sonlandırılmıştır. TBDY-2018 Bölüm 2.2.2'ye göre standart tasarım deprem yer hareketi olarak adlandırılan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve yerel zemin sınıfı ZC' ye göre deprem seçimi ve ölçeklendirmede kullanılacak tasarım spektrumu Şekil 5.21.'de verilmiştir.



Şekil 5.21. Çalışmada kullanılan DD-2 deprem yer hareketi spektrumu

TBDY 2018 yönetmeliği 16.5.1.1 maddesine sahaya özel zemin davranış analizleri, taban kayasında tanımlanan deprem yer hareketinin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek üzere yapılmaktadır. Yönetmelik 16.5.1.2 maddesinde ise sahaya özel zemin davranışları için zemin modelinin oluşturulması gerektiği belirtilmektedir. Sahaya özel zemin davranış modelinin oluşturulması amacı ile madde 16.5.2.1'e göre analizlerde kullanılması arazi zemin koşullarına göre belirlenen parametrelerin elde edilmesi için gerekli deney ve kabullerin yapılması önerilmektedir. Bu doğrultuda sahaya özel zemin davranış analizi için yatay tabakalı serbest zemin modeli göz önünde bulundurularak tanımlanan deprem yer hareketi altında yönetmelik 16.5.2.1 maddesinde belirtilen analiz yöntemleri içerisinde seçim yapılması önerilmektedir. 16.5.2.1'de tanımlanan doğrusal olmayan dinamik zemin parametreleri esas alınarak aşağıdaki analiz yöntemlerinden biri ile yapılması önerilmektedir :

- a) Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz,
- b) Kayma birim şekil değiştirmesinin %1'i aşmaması koşulu ile, frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal hesap modeli kullanılarak ardışık yaklaşımla doğrusal olmayan analiz.

Toplam gerilmenin dikkate alındığı frekans ortamı yönteminde frekans aralığı geniş alındığından dolayı en büyük pik ivmeleri değerlerini olduğundan biraz daha büyük hesaplanmaktadır (Yoshida 1994; Yoshida ve Lai 1998). Her zemin tabakasının rijiditesi ve sönüm oranı doğru bir biçimde hesaplanamayacağı bu durumda zemin

davranışını gerçekçi bir şekilde ortaya koyamayabileceği Hashash (2010) tarafından belirtilmiştir. Bu nedenle çalışmada zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmıştır.

TBDY 2018 yönetmeliğine göre doğrusal olmayan analiz yönteminde serbest zemin modeli TBDY-2018-16.5.2.3 maddesine yerel zemin sınıfına uygun belirlenecek, mühendislik taban kayası alt sınır değerine göre yerel zemin etki katsayıları elde edilmektedir. Tasarım deprem yer hareketini tanımlayan spektral büyüklükler yerel zemin sınıfına göre yerel zemin etki katsayıları göz önünde bulundurularak büyütme işlemleri yapılmaktadır. Analizde tabakalar altındaki zemin ortamı, yönetmelikte belirtilen tek boyutlu zemin profili modeline uygun olarak incelenmektedir. Analiz hassasiyetinin sağlanabilmesi için zemin profili ince alt tabakalara ayrılıp gerekli zemin parametrelerinin seçimine dikkat edilmektedir.

5.7.2. Çalışma alanı deprem tasarım spektrumu (TBDY-2018'e göre)

Çalışma kapsamında sahaya özel zemin davranış spektrumlarının oluşturulmasında TBDY-2018 yönetmeliği esas alınarak SeismoMatch 2022 ve DeepSoil v7.1 programları eş zamanlı kullanılmıştır. DeepSoil programı zaman ortamında doğrusal olmayan analiz yöntemi için hedef sönüm eğrileri ile uyumlu ikinci dereceden hiperbolik zemin modeli kullanılırken; azalım ve sönümlenme eğrilerinin seçiminde, kumlu tabakalar için Darendeli (2001), kil-silt tabakalar için ise Vucetic ve Dobry (1991) eğrileri kullanılmıştır.

Türkiye Deprem Tehlike Haritası esas alınarak çalışma alanının DD-1, DD-2, DD-3, DD-4 deprem yer hareketi düzeylerine göre ayrı ayrı kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s) ve 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1) değerleri Tablo 5.6.' da verilmiştir.

Tablo 5.6. Çalışma alanı için farklı deprem düzeylerinden elde edilen S_s ve S_1 değerleri

Deprem Düzeyi	S_s	S_1	PGA (g)
DD-1	2.637	0.756	1.038
DD-2	1.539	0.422	0.625
DD-3	0.601	0.148	0.261
DD-4	0.315	0.075	0.138

Bu çalışma kapsamında geoteknik çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak tabakalı zemin modeli 140 m derinlik için oluşturulmuştur. Zemin tabakası, taban kayasının derinde olması nedeni ile de ZC zemin tabakasında sonlandırılmıştır. Ayrıca tabakalı zemin modeli olabildiğince ince tabakalara bölünmüş olup, tabakalı zemin modeli Tablo 5.7.' de verilen kaynaklara göre 56 tabakadan oluşturulmuştur (Şekil 6.6.).

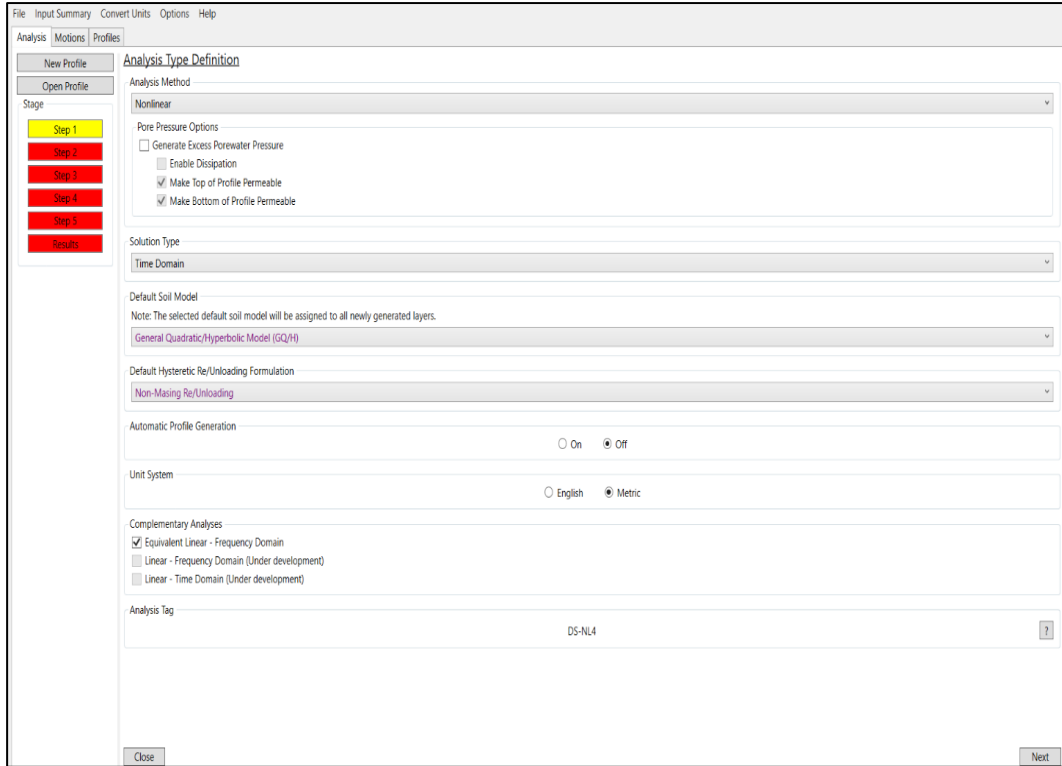
Tablo 5.7. Çalışmada kullanılan tabakalı zemin modeli parametreleri

Derinlik (m)	V_s Test (m/s)	V_s Verisi	Geoteknik Veri
1-18	Spt Korelasyonu	Ufy Sondaj No	SAÜ
18-30	MASW	OVA Müh. SK3	SAÜ
30-73.20	S-PS Logging	Tübitak 108M303	Tübitak 108M303 Bol (2003), Kuyu No:
73.20-140	SPAC Method	Kudo vd. 2002	SYG050

6. DEEPSOIL PROGRAMI İLE DOĞRUSAL OLMAYAN SAHAYA ÖZEL ZEMİN DAVRANIŞ ANALİZİ

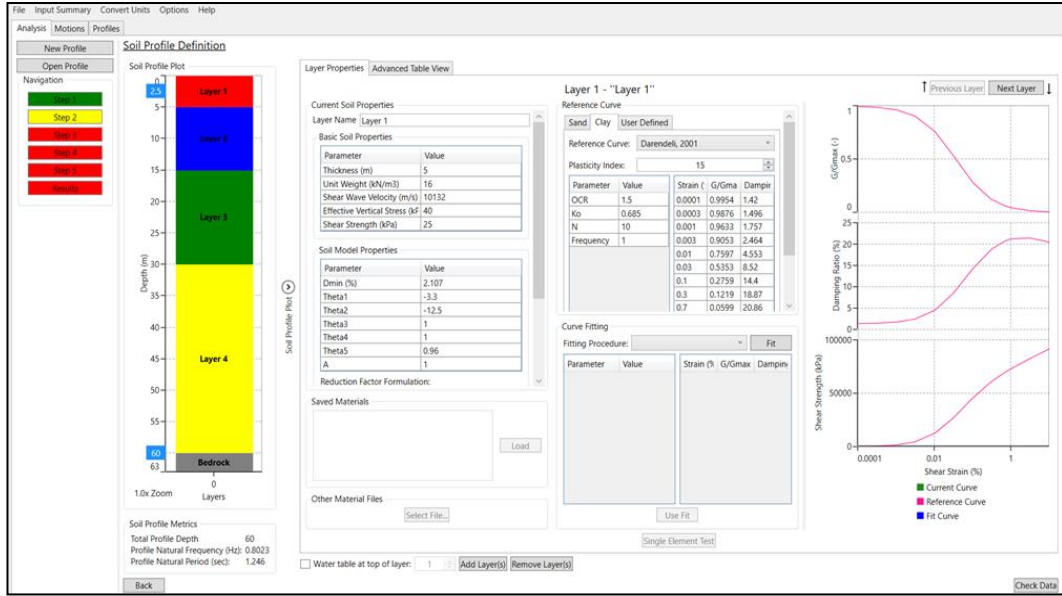
6.1. DeepSoil Programı

Zemin davranış analizinde kullanılacak deprem kayıtlarının programa tanımlanabilmesine ve zemin modellemesinin gerçeğe yakın bir biçimde yapılmasına imkân sağladığı için sahaya özel davranış analizlerinde tercih edilen bir programdır. Program frekans ve zaman tanım alanında çözümler ile kullanıcılara modellenecek yerel zeminler modelinde analiz tercih imkanını sunmaktadır. DeepSoil programı aynı zamanda eşdeğer doğrusal analiz ve doğrusal olmayan sahaya özel davranış analizi için kullanılabilir. Tez kapsamında çalışması yürütülen sahanın deprem performansının gerçeğe uygun şekilde yansıtılabilmesi, sahadaki tabakaların varlığının gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi, boşluk suyu basıncının etkilerinin gözlemlenebilmesi ve deprem dalgalarının zemin davranışını nasıl etkilediğini görebilme imkânı tanıdığı için zemin profili DeepSoil programında modellenmiştir.



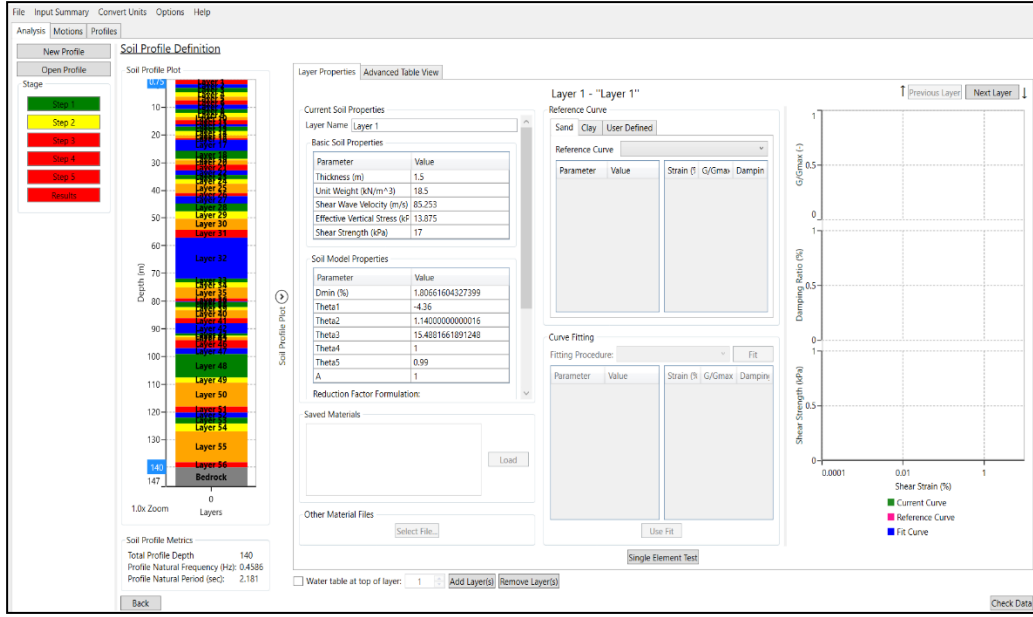
Şekil 6.1. DeepSoil programı giriş ekranı

DeepSoil analiz tipi belirlenirken program giriş sayfasından (Şekil 6.1.) zemin koşullarına ve hangi davranış analizi için çözüm yapılacaksa ona uygun olmak üzere eşdeğer lineer ve doğrusal olmayan analiz davranışı seçilebilmektedir. Zaman ya da frekans tanım alanındaki seçim sekmesi analiz tercihinin göre değiştirilebilmektedir.



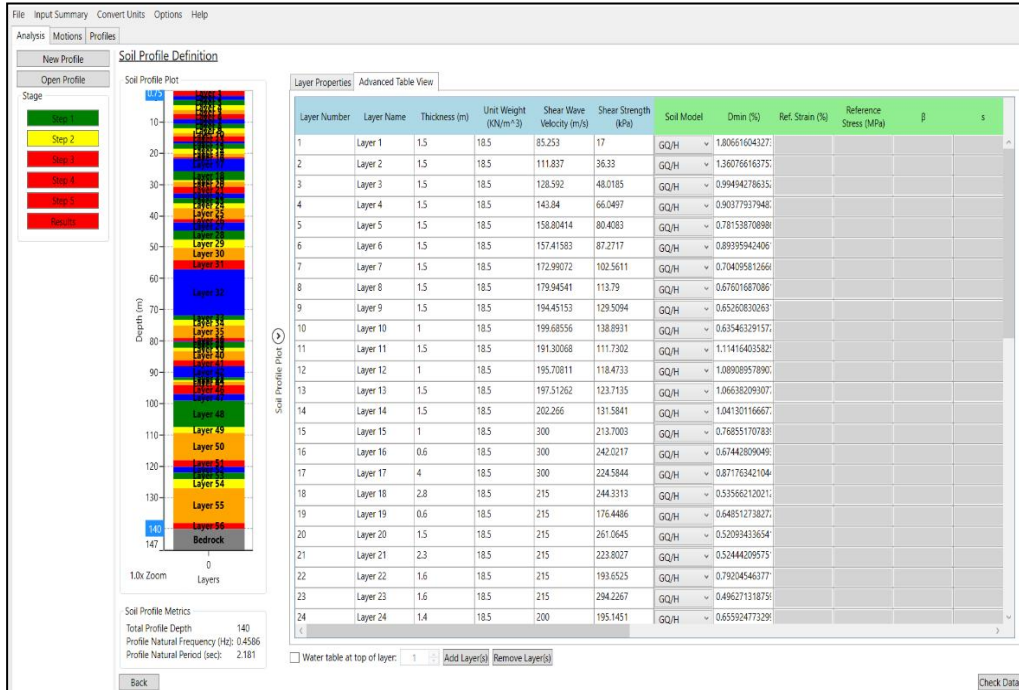
Şekil 6.2. Tabakaların özelliklerine uygun seçilecek veri giriş ekranı

Belirlenen zemin profiline göre tabakalar ve tabakaların parametreleri DeepSoil programında işlenerek zemin profili kesite uygun olacak biçimde oluşturulmaktadır. Çalışma kapsamında yer alan binanın olduğu yerel zemin koşullarına göre ana kaya seçimi yönetmelik yönergeleri doğrultusunda ZC zemin sınıfı ana kaya olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.3. Tabakaların parametrelere göre belirlenmesi

Şekil 6.2. ve Şekil 6.3.'te gösterilen program ekranlarında tabaka özelliklerine bağlı olarak verilerin programa aktarılması yer almaktadır, böylece tabakalı zemin profilinin oluşturulması sağlanmaktadır. Şekil 6.4.'te 56 adet tabakadan oluşan zemin profilinin, ilk 25 adet tabakası için programa aktarılan değerlerin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 6.4. Zemin profiline uygun parametreler yardımıyla oluşturulan tabakalar

6.2. DeepSoil Programında Sahaya Özel Doğrusal Olmayan Davranış Analizi

Çalışmada zaman ortamında doğrusal olmayan analiz yönteminde hedef sönüm eğrileriyle iyi bir uyum sağlayan ikinci dereceden hiperbolik zemin modeli kullanılırken; azalım ve sönümlenme eğrilerinin seçiminde literatürde birçok çalışmada kullanılan; kumlu tabakalar için Darendeli (2001), kil-silt tabakalar için ise Vucetic ve Dobry (1991) eğrileri kullanılmıştır. K_0 (yatay basınç katsayısı) parametresinin belirlenmesi için ϕ kayma açısı ve OCR değerlerine dayanan ampirik bağlantılar kullanılarak tahmin edilmiştir (Denklem 6.1).

$$K_0 = (1 - \sin \phi) \times OCR^{\sin \phi} \quad (6.1)$$

Her katmanın kesme dayanımı zemin cinsine uygun olacak şekilde hesaplanmıştır. Kohezyonsuz dolgu ve kum katmanının kayma mukavemeti hesabı için Denklem 6.2 ve kil tabakaları için Denklem 6.3'te verilen denklemler kullanılmıştır.

$$\tau = \sigma \times \tan \phi \quad (6.2)$$

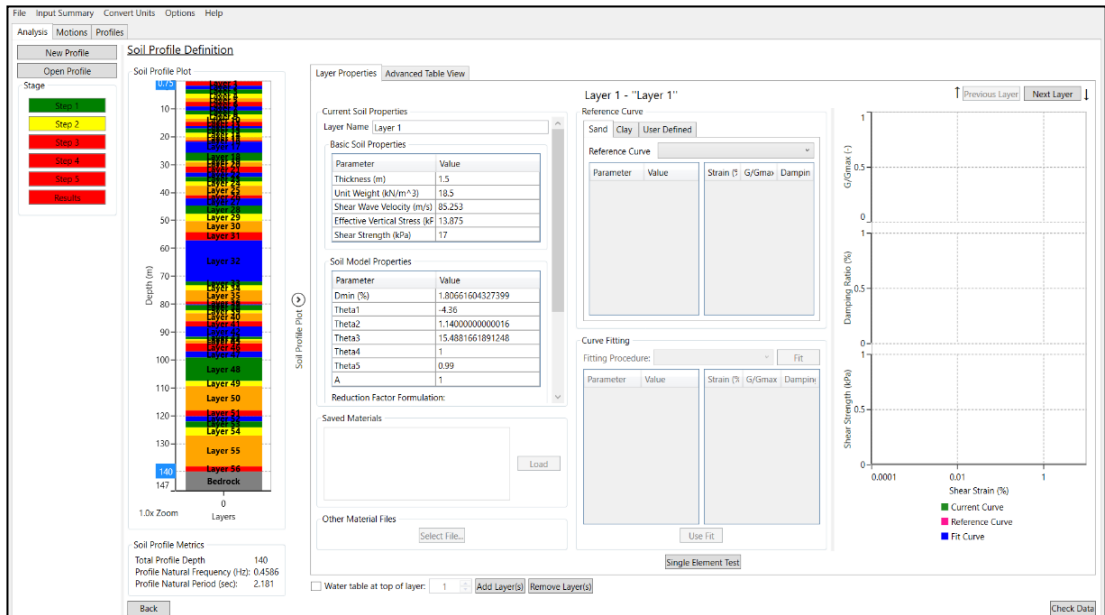
$$\tau = c_u \quad (6.3)$$

Burada;

τ : Kayma mukavemeti (kPa) , c_u : Drenajsız kayma direnci (kPa)

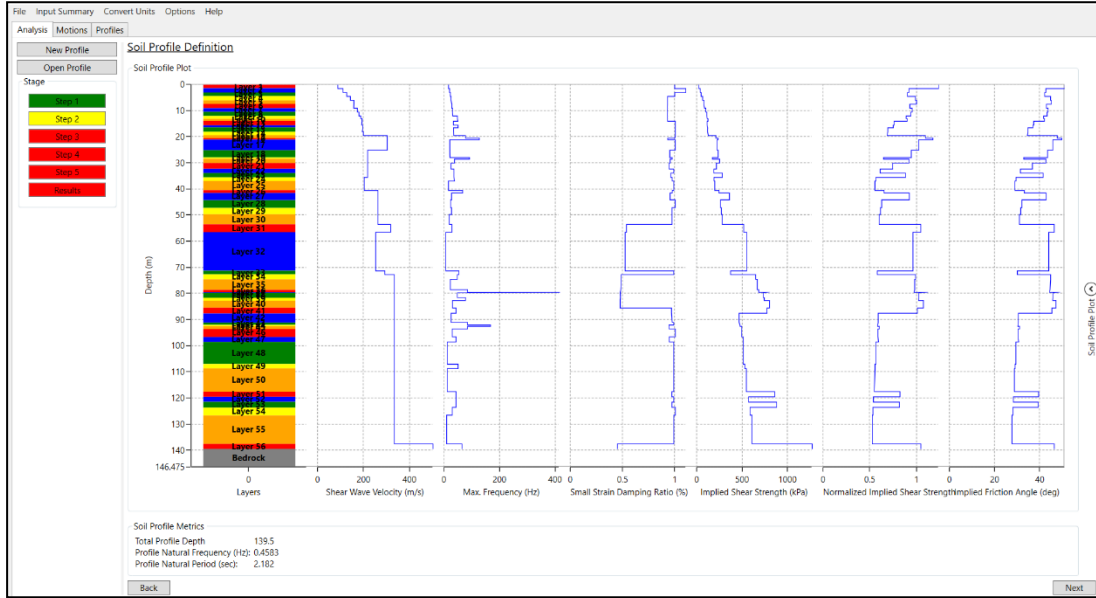
σ : Normal gerilme (kPa)

ϕ : Kayma açısı

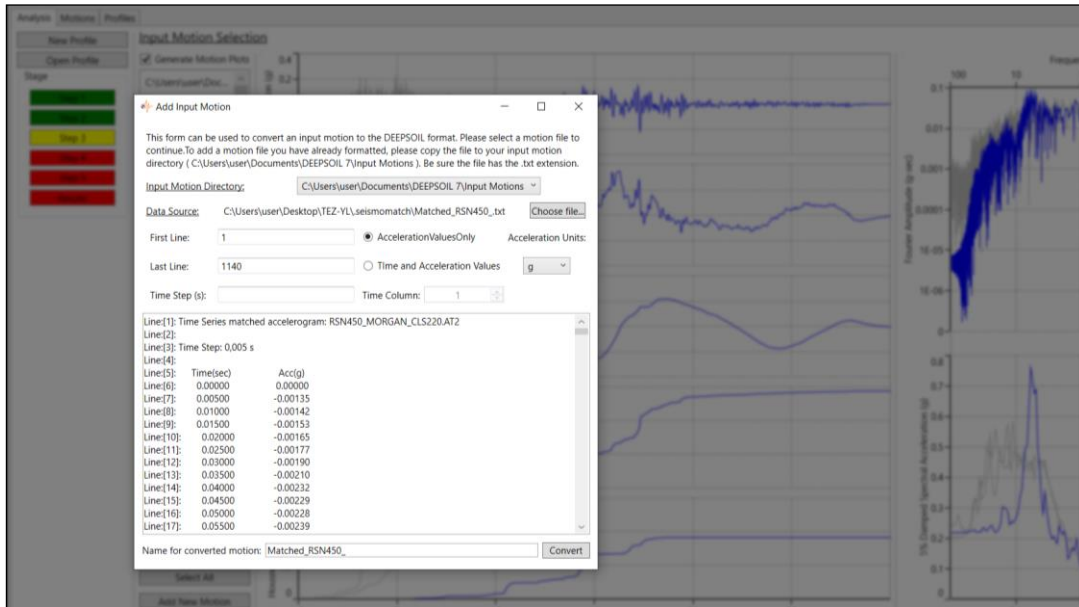


Şekil 6.5. Tabakalı zemin modelinin DeepSoil v7'deki görünümü

Zemin profilinin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi ve analizlerin hassasiyetle yapılmasını sağlamak için tabakalar oluşturulmuştur (Şekil 6.5. ve Şekil 6.6.). Tabakalı zemin modeli Tablo 5.7.’ de verilen kaynaklara göre 56 tabakadan oluşturulmuştur (Şekil 6.6.). Bu tabakalara ait parametreler ise Tablo 6.1.’ de verilmiştir.



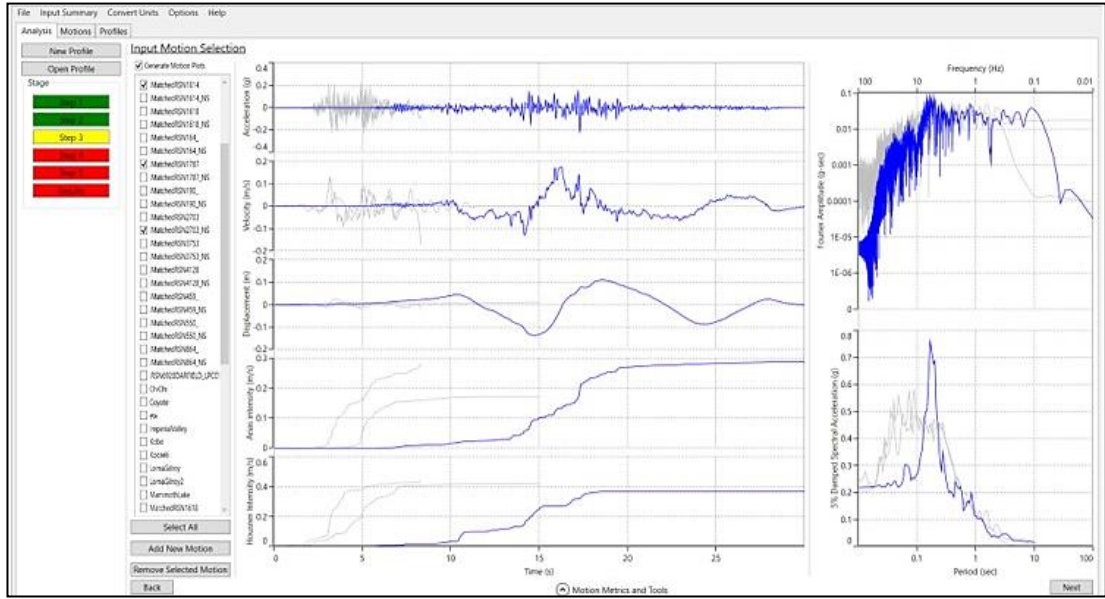
Şekil 6.6. Çalışmada kullanılan tabakalı zemin modelinin DeepSoil v7’deki görünümü



Şekil 6.7. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının DeepSoil programına tanımlanması

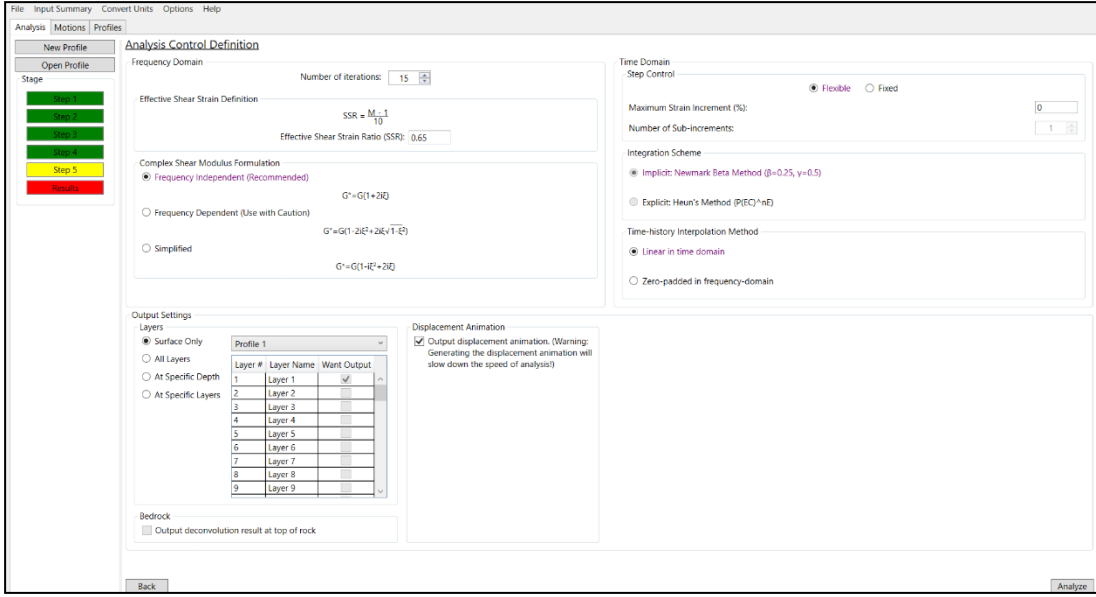
Deprem düzeyine ve yerel zemin koşullarına uygun seçilen deprem kayıtları SeismoMatch program yardımı ile ölçeklendirilmiş ivme kayıtları DeepSoil programına tanımlanmıştır (Şekil 6.7.). Tanımlanacak deprem kayıtları için programda

yer alan Add New Motion sekmesinden (Şekil 6.8.) ivme-zaman aralık değerleri DeepSoil programına kaydedilmiştir.

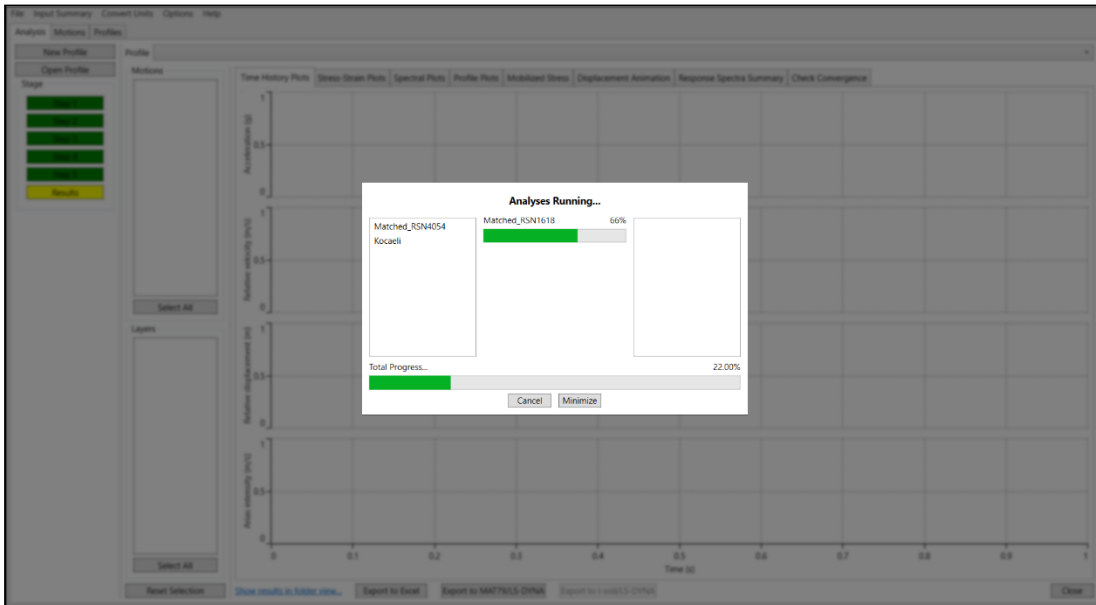


Şekil 6.8. Ölçeklenmiş ivme kayıtlarının seçilmesi

Ölçeklenen ve analizlerde kullanılan kayıtlar DeepSoil programına tanımlandıktan sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Yönetmelik kapsamında belirtilen deprem kayıt seçimine uygun olacak şekilde 11 adet deprem kaydı analiz işlemi için tanımlanmıştır. Seçilen deprem kayıtları Tablo 4.1.'de verilmiştir ve Şekil 6.8.'de görülen DeepSoil program ekranında deprem kayıtlarının seçimi sırasında bu kayıtların ölçeklenmiş hali kullanılmıştır. Programda tüm tabakalar için analiz sonuçları ya da gözlem yapılması istenen tabaka derinliğinin seçimi ile program sonuçları incelenebilmektedir (Şekil 6.9.).



Şekil 6.9. İvme kaydının etkisi için istenilen derinlik seçimi



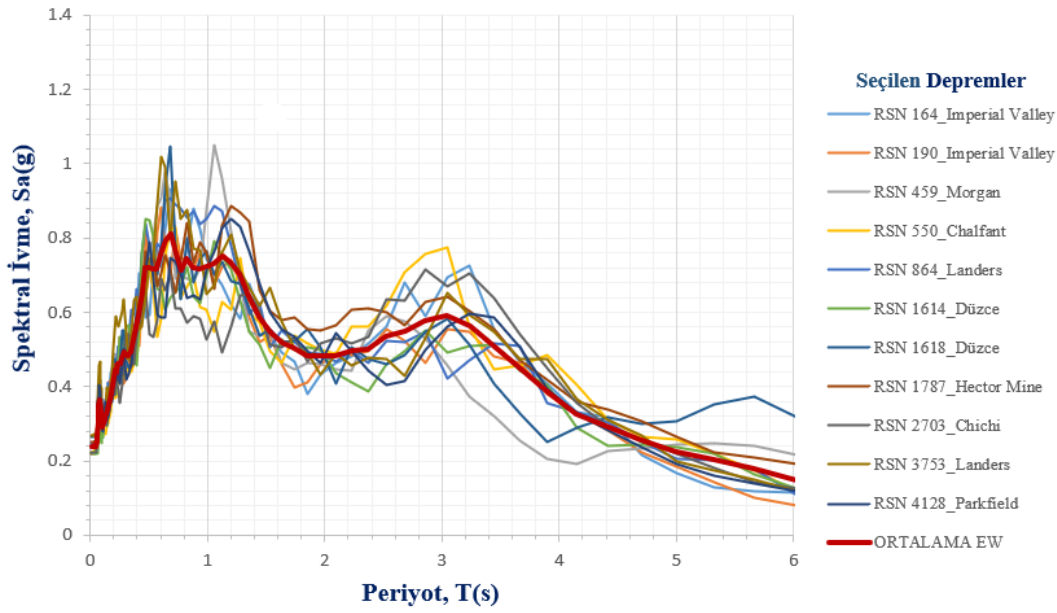
Şekil 6.10. Seçilen deprem kayıtları ve belirlenen profil için DeepSoil analiz aşaması
11 adet deprem kaydının seçimi ile zemin profilindeki davranışı incelenmiştir. İvme kayıtları ile tepki analizleri tamamlanmıştır (Şekil 6.10.).

Tablo 6.1. Belirlenen zemin modeli için analizde kullanılan ilk 30 m verilerinin gösterilmesi

Tabaka Sayısı	Zemin Sınıfı	Kalınlık (m)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Kayma Dalgası Hızı (m/s)	Kesme Dayanımı (kPa)	Dmin (%)	P1	P2	P3
1	CI	1.5	18.5	85.253	17.73	0.992907469	0.865	0.35	1.5
2	SM	1.5	18	107.934	32.54	1.099657225	0.865	0.15	-
3	CI	1.5	18.5	124.166	43.94	0.993152902	0.775	0.25	3
4	ML	1.5	18.5	139.989	61.57	0.925322174	0.865	0.05	50
5	ML	1.5	18.5	155.327	75.93	0.925285797	0.865	0.05	50
6	MI	1.5	18.5	154.499	83.07	0.924527396	0.865	0.05	50
7	ML	1.5	18.5	170.213	98.29	0.924701555	0.865	0.05	50
8	ML	1.5	18.5	177.396	109.58	0.924570492	0.865	0.05	50
9	ML	1	18.5	185.087	113.79	0.924797973	0.865	0.05	50
10	ML	1	18.5	190.873	123.34	0.92469581	0.865	0.05	50
11	CH	1.5	18.5	189.238	108.66	0.998047189	0.865	0.6	0.5
12	CH	1	18.5	193.744	115.44	0.998080079	0.865	0.6	0.5
13	CH	1.5	18.5	191.417	114.08	0.998018552	0.865	0.6	0.5
14	CH	1.5	18.5	196.485	122.05	0.998051451	0.865	0.6	0.5
15	CI	1	18.5	300	211.72	0.993351815	0.82	0.3	1.5
16	MI	0.6	18.5	300	239.41	0.926111152	0.865	0.95	35.5
17	CH	4	18.5	300	222.6	0.99714234	0.775	0.4	1
18	ML	2.8	18.5	215	240.9	0.945528863	0.865	0.05	50
19	CI	0.6	18.5	215	174.47	0.968802458	0.82	0.2	4
20	ML	1.5	18.5	215	257.63	0.949046282	0.865	0.05	50

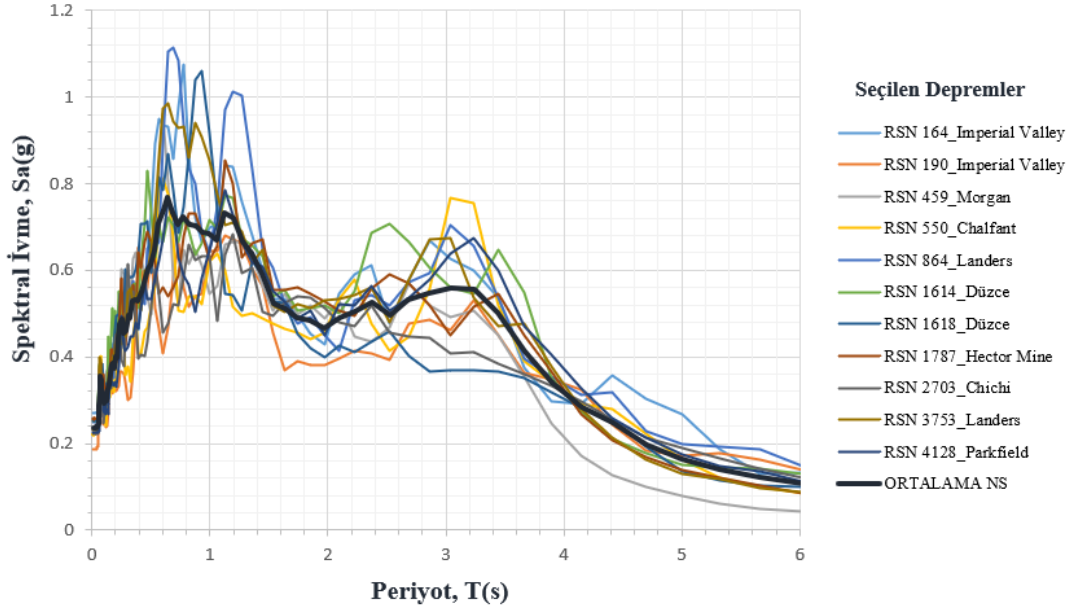
Tabakalı zemin modeli Tablo 5.7.' de verilen kaynaklara göre 56 tabakadan oluşturulmuştur (Şekil 6.6.). Bu tabakalara ait parametreler ise Tablo 6.1.' de verilmiştir. Tablo 6.1.'de yer alan P1,P2 ve P3 değerleri kayma modülü azalımı- sönüm oranı değişimiyle DeepSoil programının tanımladığı gerilme-şekil değiştirme eğrilerine uyum sağlayan ve yükleme boşalma ilişkisini sağlayan model parametreleri olarak tanımlanabilmektedir (Alver ve ark., 2021).

6.3. DeepSoil Analiz Sonucu Elde Edilen Tasarım Spektrum Değerleri

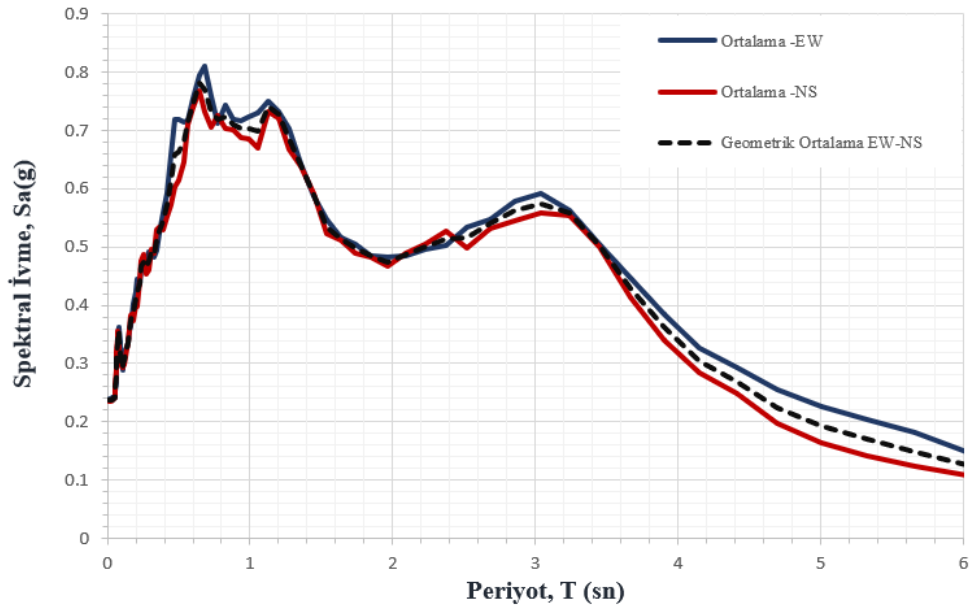


Şekil 6.11. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 ivme kaydının EW bileşeni için yüzeyde elde edilen spektral ivme değişimi

DeepSoil analizlerinde zemin davranış spektrumlarının, Kuzey-Güney (NS) ve Doğu-Batı (EW) bileşenleri doğrusal olmayan analiz yöntemi ile elde edilmiştir. Şekil 6.11. ve Şekil 6.12.'de her iki doğrultu için DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 ivme kayıtları ortalamalarından elde edilen ivme spektrumları verilmiştir. Şekil 6.13.'te her iki bileşenin ortalamaları alınarak toplam bileşke doğrusal olmayan analiz spektral ivme spektrumu verilmiştir.



Şekil 6.12. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 ivme kaydının NS bileşeni için yüzeyde elde edilen spektral ivme değişimi



Şekil 6.13. DD-2 spektrumu ile uyumlu seçilen 11 kuvvetli yer hareketi EW ve NS bileşenlerinin geometrik ortalama bileşke spektrumları

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

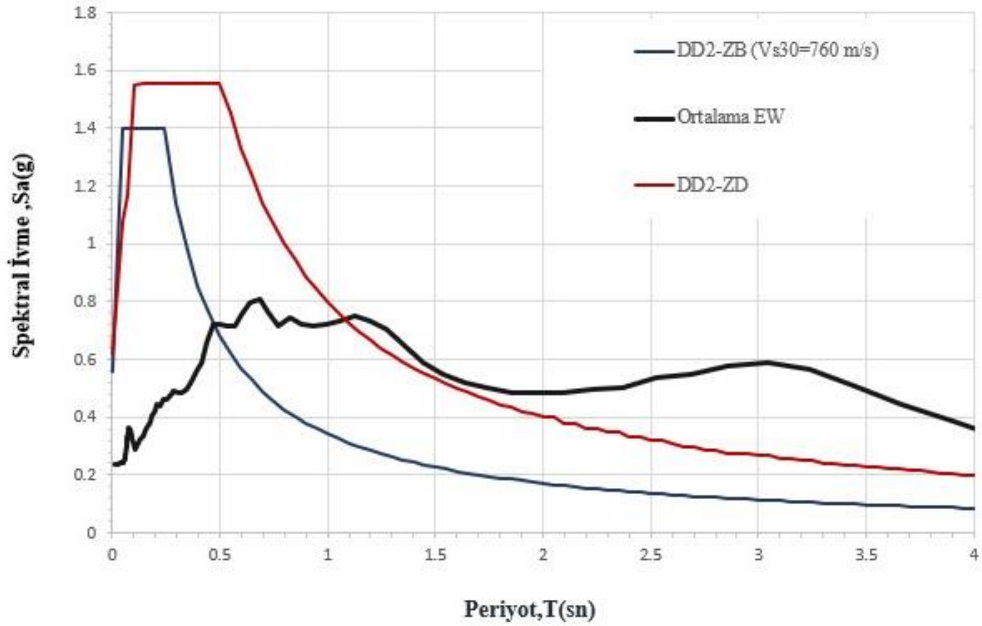
Tasarımı planlanan her yapı için mevcut yerel zemin koşullarındaki değişimler deprem bölgesi olarak adlandırabileceğimiz sahalarda dinamik analiz gerekliliğini ve önemini göz önüne sermektedir. Yönetmelikler kapsamında da getirilen şartlar ile birlikte sahaya özel yapılan analizlerde zemin yüzeylerinde oluşacak etkiler yapı davranışının doğru bir biçimde modellenebilmesi ve mühendislik çalışmaları açısından önem arz etmektedir.

Bu çalışmada Adapazarı merkezinde yer alan çalışma alanı için toplam derinliği 85 metre olan 5 adet dönel sondaj yapılmıştır. Çalışma alanında yapılan geoteknik ve jeofizik çalışmalar sonucunda zemin modeli oluşturulmuştur. Zemin tabakası taban kayasının derinde olması nedeni ile de ZC zemin tabakasında sonlandırılmış ve modelde 140 m derinlik seviyesine kadar tabakalı zemin modeli oluşturulmuştur. TBDY-2018 2.2.2'ye göre standart tasarım deprem yer hareketi olarak adlandırılan Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2) ve yerel zemin sınıfı ZC yerel zemin şartlarını sağlayacak şekilde deprem seçimi ve ölçeklendirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında TBDY-2018'de maddeleri göz önünde bulundurularak kuvvetli yer hareketi kayıtları için; deprem büyüklükleri M_w : 6.0-8 aralığında, V_{s30} değeri ZC zemin sınıfını temsil eden 350-760 m/s aralığında seçilmiştir.

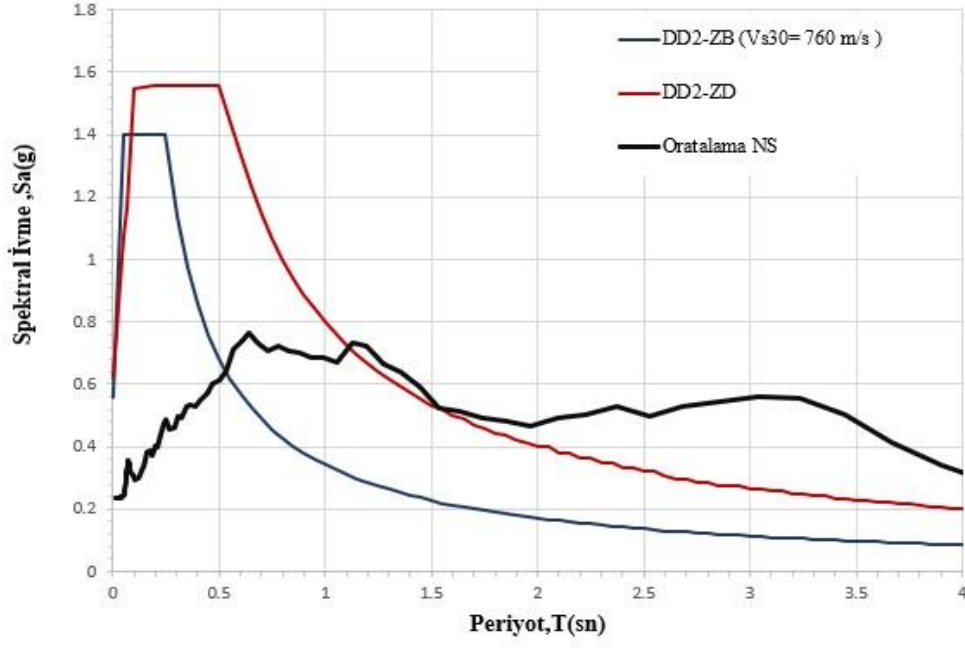
Toplamda çalışma alanı ile uyumlu 11 adet kuvvetli yer hareket kaydı belirlenmiş ve PEER veri tabanından elde edilmiştir. Seçilen bu kuvvetli yer hareketi kayıtları SeismoMatch2022 programı kullanılarak ölçeklendirilmiş ve ölçeklenen deprem kayıtları DeepSoil v.7 programında 56 adet tabakadan oluşan zemin profilinde çözümlenmiştir. DeepSoil analizi zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemi (1D Nonlinear-NL) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

7.1. Sahaya Özel Zemin Davranış Analiz Sonuçları

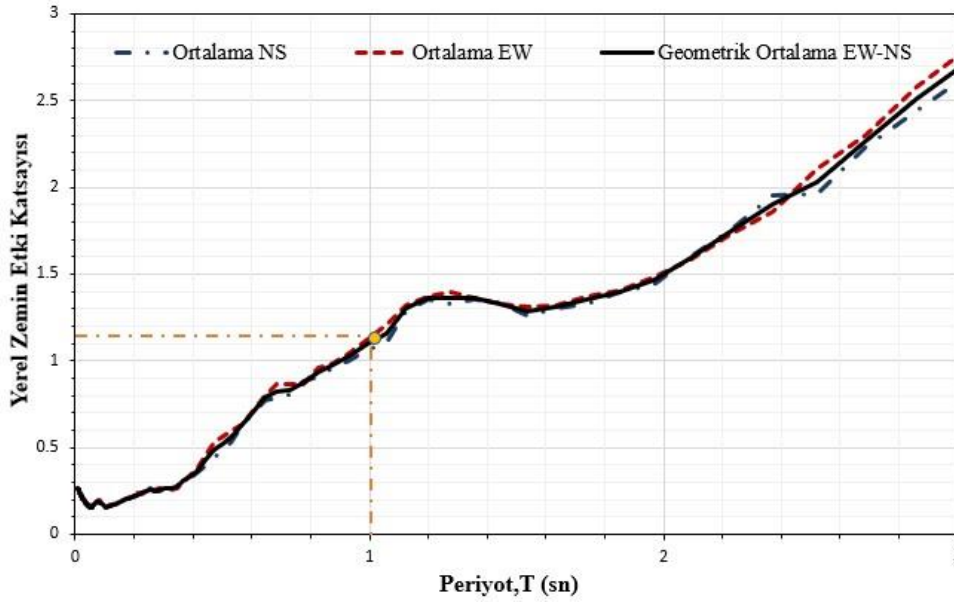
Sahaya özel zemin davranış analiz çalışması kapsamında DD-2 (Şekil 4.9.) spektrumu ile ölçeklendirilmiş 11 kuvvetli yer hareketi kaydı (Tablo 4.1.) çalışma alanı için üretilen tabakalı zemin modeli (Şekil 6.6.) ile çözümlenmiştir. Frekans ortamına göre yapılan çalışmalarda frekans aralığının geniş olması sebebiyle en büyük pik ivmeleri değerleri gerçek değerlerinden daha büyük hesaplanmaktadır (Yoshida 1994; Yoshida ve Lai 1998). Her tabakanın rijiditesinin ve sönüm etkisinin doğru biçimde hesaplamasının mümkün olmadığı durumlarda Hashash (2010) tarafından da ifade edildiği gibi zemin tepkisi de doğru bir şekilde yapılamamaktadır. Bu nedenle çalışmada zaman tanım alanında doğrusal olmayan 1 boyutlu analiz (1D Nonlinear-NL) kullanılmıştır. Analiz sonucunda zemin davranış spektrumlarının Kuzey-Güney (NS) ve Doğu-Batı (EW) bileşenleri doğrusal olmayan analiz yöntemi ile çözümlenmiş, sonuçları Şekil 6.12. ve Şekil 6.11.' de verilmiştir. Her iki bileşenin ortalamaları alınarak toplam bileşke doğrusal olmayan analiz spektral ivme spektrumu ise Şekil 6.13.' te verilmiştir.



Şekil 7.1. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama EW spektral ivme değişimi

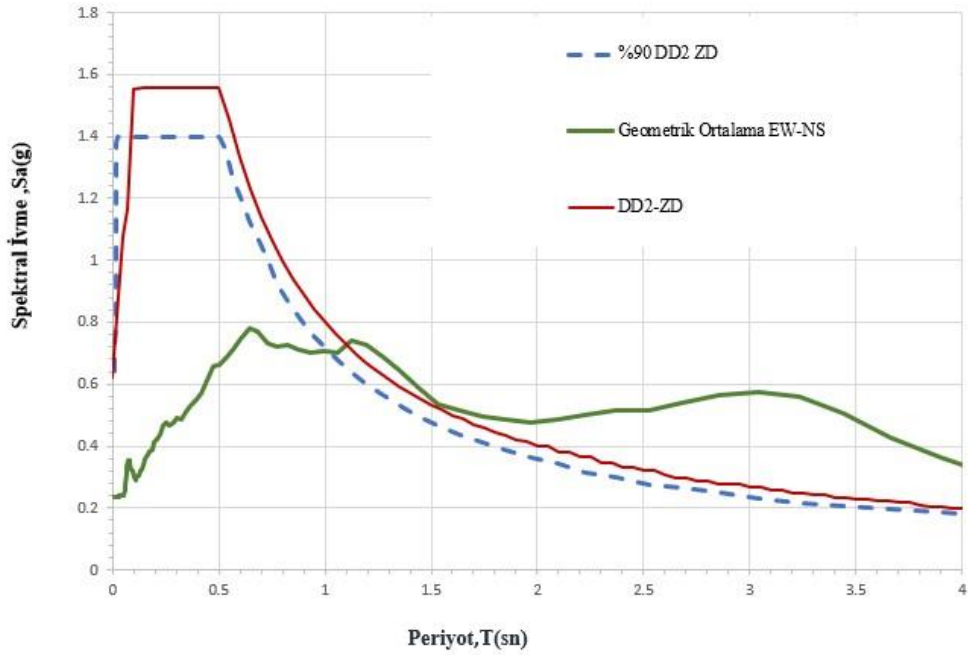


Şekil 7.2. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama NS spektral ivme değişimi

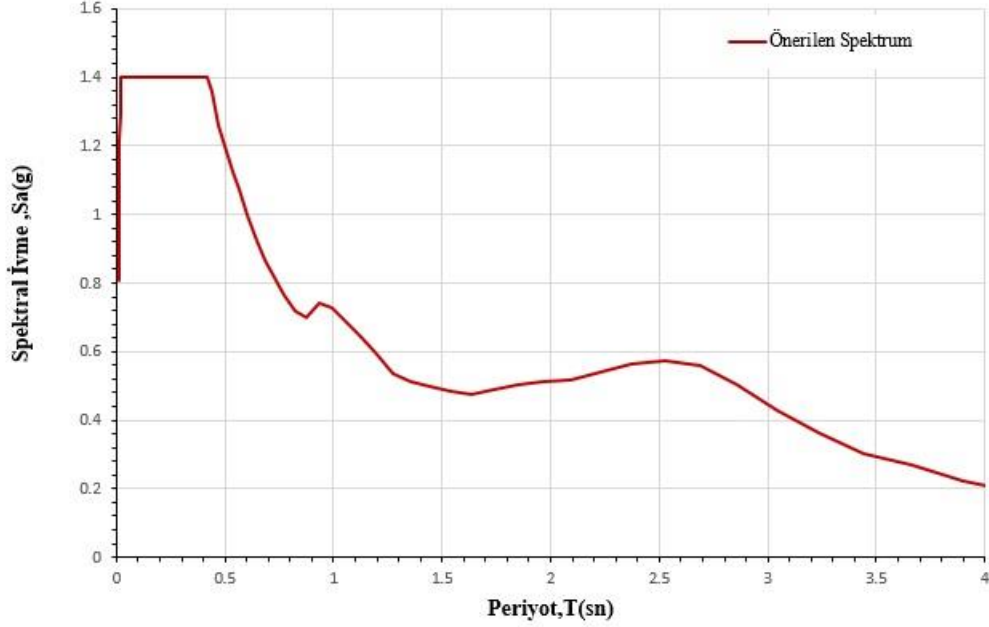


Şekil 7.3. Doğrusal olmayan analiz sonucunda DD-2 spektrumu için elde edilen periyoda göre değişen yerel zemin etki katsayısı

Tez çalışması kapsamında elde edilen DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu EW-NS ve geometrik ortalama bileşke spektral ivme değişimleri Şekil 7.1., Şekil 7.2. 'de verilmiştir. Analiz sonucunda farklı periyotlar için yerel zemin etki katsayısı zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemine göre Şekil 7.3.'te gösterilmiştir. TBDY-2018 2.4.1 maddesi kapsamında sahaya özel deprem yer hareketi spektrumlarının ordinatları için belirlenen değer aralığına uygun biçimde deprem yer hareketi spektrumu %90 DD2_ZD spektrumu eşliğinde Şekil 7.4.' te verilmiştir. Çalışma sonucunda ise DD-2 deprem düzeyi için üst yapı analizlerinde kullanılması önerilen birleştirilmiş sahaya özel deprem tasarım spektrumu Şekil 7.5.' te verilmiştir. Şekil 7.3.'e göre analizler sonucunda kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı F_S : 0.266 olarak hesaplanırken, 1,0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı F_1 : 1.155 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.4. DD-2 spektrumu ve ZD zemin sınıfı ile uyumlu ortalama geometrik ortalama bileşke spektral ivme değişimi



Şekil 7.5. Çalışma sonucunda önerilen sahaya özel birleştirilmiş deprem tasarım spektrumu

Analiz sonucunda zemin davranış spektrumlarının her iki bileşenin ortalamaları alınarak doğrusal olmayan analiz tamamlanmıştır. Zemin davranış analizleri sonucunda elde edilen yerel zemin etki katsayıları ile TBDY 2018'e göre çalışmada kullanılan DD-2 spektrumu ve yerel zemin sınıfı için verilen yerel zemin etki katsayıları (F_S , F_I) ve analiz sonucu saha için önerilen tasarım spektrumu elde edilmiştir.

Analiz sonuçları göz önünde bulundurularak ilgili öneriler aşağıda sunulmaktadır.

- Adapazarı gibi alüvyal kökenli çalışma alanlarında yer altı su seviyesi yüksek değerlerde seyrettiği için depremler sırasında meydana gelecek yer hareketlerinden önemli ölçüde etkilenmesi beklenmektedir. Bu nedenle TBDY yönetmeliğinde belirtildiği ve diğer birçok yönetmelik kapsamında yer alan öneriler doğrultusunda bu tür sahaya özel inceleme gereken zeminlerde sahaya uygun analiz yöntemlerinin irdelenmesi gerekmektedir.
- Zemin sınıflandırılması aşamasında da kullanılan V_S kayma dalgası hızının tabaka özelliğine bağlı olarak değişimi, spektral davranışta zemin etkisinin görülebilmesine de imkân tanıyacağı için sahaya özel yapılacak analizlerde zemin profili modellemesi bakımından zemin karakteristiğine uygun değerlerde elde edilmesi gerekmektedir.

- Dinamik analizlerdeki aşamalardan bir tanesi de deprem kayıtlarının belirlenebilmesi olarak sayılabilmektedir. Kullanılan deprem kayıtları için tek adet deprem kaydı seçimi ile bölge karakteristiğinin anlaşılabilmesi bakımından yeterli davranış elde edilememektedir. Bu durumda daha çok deprem hareketinin etkisi gözlenebilmektedir. Seçimlerde deprem kaydı seçiminin bölge özelliklerini yansıtabilmesi açısından yeterli sayıyı sağladıktan sonra tasarım depremleri ile karşılaştırılabilmesi için ölçeklendirme işlemlerinin gerekliliğine dikkat edilmesi gerekmektedir. Ölçeklenmiş yer hareketlerinin bu analizlerde elde edilmesi yapı davranışının gerçek depremlere göre tasarlanması açısından katkı sağlayacaktır.
- Sahaya uygun tercih edilen analiz yöntemi için zaman tanım alanında doğrusal olmayan çalışmalar gerçek ivme kayıtlarının kullanımı, tasarımlarda zeminin dinamik davranışını doğru modellenmesi, yapılarda doğrusal olmayan davranış etkilerinin hangi derecelerde olduğunun gösterilebilmesi açısından uygun koşulları sağlayabilmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntemlerin çeşitli sahalarda uygulanması hem literatür çalışmalarına katkıda bulunmak için hem de doğrusal olmayan yöntemin kullanılacağı bundan sonraki çalışmalara yol gösterici nitelik taşıyabilmesi bakımından önem arz etmektedir.
- Tamamlanmış olan analiz sonuçları için çeşitli karşılaştırmalar ve çalışmalar yapılarak saha kapsamındaki farklı etkileri incelenebilecektir. Sahaya özel zemin davranışı analizi üzerinde boşluk suyu basınçlarının oluşturduğu etkiler, analiz sonucu önerilen iyileştirme kapsamında farklı kayma dalga hızlarındaki davranışların karşılaştırılması, mühendislik anakayasındaki kabullerin farklı değerlerde alınması ile oluşacak etkiler, literatürde ve programlar bulunan çalışmalar sonucunda kişilerin önerdiği analiz tiplerindeki farklılıklar irdelenerek karşılaştırmalar ve yeni analiz sonuçları elde edilebilir.
- TBDY 2018 'in sahaya özel zemin davranışı analizlerini 'ZF' zemin sınıfı için zorunlu hale getirmesi ve saha özelinde analizlerin gerekliliğinin tasarımcılara bırakılması deprem etkisi altında zeminlerde meydana gelen büyütme ve sönümleme etkilerinin gözlemlenebilmesi, sıvılaşmalar sonucunda önerilecek iyileştirme parametrelerinin belirlenebilmesi ve analizler sonucunda elde

edilecek spektrumlarının gerçek zemin davranışına uygun doğru mühendislik sonuçlarına ulaştırması bakımından tercih edilmesi tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrahamson, N.A., 1992. Non-stationary spectral matching. *Seismological research letters*, 63(1), 30.
- Afacan, B.K., Güler, E., 2019. Benzer Kayma Dalgası Hızına Sahip Farklı Zeminlerin Sahaya Özel Analizlerinin Kıyaslanması ve Yeni Deprem Yönetmeliği Performansının İncelenmesi, 8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu 13 - 15 Kasım 2019, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul.
- AFAD, 2022. T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Açıklamalı Afet Yönetimi Terimleri Sözlüğü, <https://www.afad.gov.tr/aciklamali-afet-yonetimi-terimleri-sozlugu>.
- Akkar, S., Azak Eroğlu, T., Çan, T., Çeken, U., Demircioğlu M.B., Duman, T., Ergintav, S., Kadirioglu, F.T., Kalafat, D., Kale, Ö., Kartal R.F., Kılıç, T., Özalp, S., Şeşetyan, K., Tekin, S., Yakıt, A., Yılmaz, M.T., Zülfikar, Ö., 2014. Türkiye Sismik Tehlike Haritasının Güncellenmesi. AFAD, Proje No: UDAP-Ç-13-06.
- Al Atik, L., Abrahamson, N., 2010. An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*, 26(3), 601-617.
- Alver, O., Sezen, A., Eseller-Bayat, E., E., 2021. TBDY 2018'e Göre Geoteknik Tasarım: Sıvılaşma ve Yapı-Kazık-Zemin Etkileşimi Analizleri , *Teknik Dergi*, 2021 11197-11225, Yazı 631.
- Ambraseys, N.N., Finkel, C.F., 1991. Long term seismicity of İstanbul and of the Marmara region. *Terra Nova* 3, 527-539.
- Ambraseys, N.N., 2002. The seismic activity of the Marmara Sea region over the last 2000 years, *Bulletin of the Seismological Society of America* 92 (1), 1-18.
- Anderson, J.G., Sucuoğlu, H., Erberik, A., Yılmaz, T., Inan, E., Durukal, E., Erdik, M., Anooshehpour, R., Brune, J.N. ve Ni, S., 2000. Implications for seismic hazard analysis, *Earthquake Spectra*, 16, 113-137.
- Ansal, A., Tönük, G., Kurtuluş, A., 2015. Sahaya Özel Tasarım Depremi, 11-15 Mayıs Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul.
- Ansal, A., Tönük, G., 2007. Source and Site Effects for Microzonation. Theme Lecture, 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, *Earthquake Geotechnical Engineering*, Editör: K.Pitilakis, Bölüm 4, 73-92, Springer.
- Ansal A., Tönük, G., Kurtuluş, A., 2011. Zemin Büyütme Analizleri ve Sahaya Özel Tasarım Depremi Özelliklerinin Belirlenmesi, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 11-14 Ekim 2011, ODTÜ, Ankara.
- ASCE 7-16, 2017. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures, American Society of Civil Engineers (ASCE).

- Armijo, R., Meyer, B., Navarro, S., King, G., Barka, A., 2002. Asymmetric slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart: a clue to propagation processes of the North Anatolian Fault Terra Nova 14 (2), 80-86.
- Aslan, Ö., 2015. 13 Mart 1992 Erzincan Depremi Yapısal Hasarları Üzerinde Yerel Zemin Koşullarının Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Atabey, E., 2000. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınlarından Eğitim Serisi No. 34, Deprem, Ankara.
- Aytekin, B., Haşal, E.M., Özasan, B., İyisan, R., 2019. Alüvyon Bir Saha İçin Düzenlenen Dinamik Davranış Analizlerinde Deprem Giriş Hareketi Yeri Seçiminin Tasarım Spektrumuna Etkisi, 8. Uluslararası Geoteknik Sempozyumu 13 - 15 Kasım 2019, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul.
- Barka, A., ve Gülen, L., 1987, Age and total displacement of the North Anatolian fault zone and its significance for the better understanding of tectonic history and present day dynamics of the Eastern Mediterranean region: (abstract), Melih Tokay Geology Symposium 87,57-58.
- Bartlett, S. F., Ostadan, F., Abghari, A., & Farnsworth, C., 2015. "Development of Design Spectra for Deep and Soft Soil Sites", www.civil.utah.edu/~bartlett/CVEEN6330/spectra.pdf
- Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, 1999. 17 Ağustos 1999 Gölcük Depreminin Tektonik Konumu - Ön Rapor, Bayındırlık ve İskân Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı Yayını, Ankara.
- Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, 2000. 17 Ağustos 1999 İzmit Körfezi Depremi Raporu, Ankara.
- Baziar, M., H, Rafiee, F., Azizkandi A.S., Lee, C.J., 2018. Effect of super-structure frequency on the seismic behavior of pile-raft foundation using physical modeling. Soil Dyn Earthq Eng; 104:196–209.
- Bilal, O., 2021. Kazık Temelli Yapıların Deprem Etkisi Altında Yapı – Kazık – Zemin Etkileşiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Bilgin, T., 1984. Adapazarı Ovası ve Sapanca Oluğunun Alüvyal Morfolojisi ve Kuvaternerdeki Jeomorfolojik Tekamülü, İst. Üni. Edebiyat Fak. Yayınları, İstanbul.
- Biringen, E., 2000. "Soil Amplification and Case Studies for Clayey Soils", Master Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- Bol, E., 2003. Adapazarı Zeminlerinin Geoteknik Özellikleri, Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bommer, J. J., Acevedo, A. B., Douglas, 2003. J. The Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms for Use in Seismic Design and Assessment, Proceedings of ACI International Conference on Seismic Bridge Design and Retrofit, American Concrete Institute.

- Bozkurt, R., Demiröz, A., 2020. Aksaray Hamidiye Bölgesi Zemin Dinamik Davranışının Eşdeğer Doğrusal Analiz Yöntemi ile İncelenmesi, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, c.8, s.3, 643-651.
- Bray, J. D., Sancio, R.B., Durgunoglu, H.T., Onalp, A., Seed, R.B., Stewart, J.P., Youd, T.L., Baturay, M.B., Cetin, K.O., Christensen, C., Karadayılar, T. ve Emrem, C., 2001. Ground failure in Adapazari, Turkey, in 15th ICSMGEg, TC4 Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 19-28, İstanbul, Türkiye.
- Chandramohan, R., Baker, J. and Deierlein, G., 2016. Quantifying the Influence of Ground Motion Duration on Structural Collapse Capacity Using Spectrally Equivalent Records. *Earthquake Spectra*. Vol. 32, pp.927-950.
- Civelekler, E., Okur, D. V., Afacan, B. K., 2018. Eşdeğer Analiz Yöntemi ile Zeminin Dinamik Davranışının Değerlendirilmesi: Eskişehir Örneği, Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences 2018,4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı Özel Sayısı, Cilt:6 - syf. 124 – 132.
- Çinicioğlu, F., 2005. “Zeminlerde Statik ve Dinamik Yükler Altında Taşıma Gücü, Anlayışı ve Hesabı”, İMO, İstanbul.
- Darendeli, M. B., 2001. Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas.
- Dikmen, S.U. and Ghaboussi, J., 1984. "Effective stress analysis of seismic response and liquefaction, theory," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No.5, pp. 628-644.
- Duke, C. M., 1969. “Techniques for Field Measurement of Shear Wave Velocity in Soils”, *Proceedings of the Fifth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- Durgunoğlu, H. T., Tezcan, S. S., Erden, S., and Acar, Y., 1980. “Crosshole Survey at a Nuclear Power Plant Site ”, *Proc. of 7WCEE*, İstanbul, Turkey, Sept. 8-13, Vol. III, pp. 297-304.
- Emre, Ö., Erkal, T., Tchepalyga, A., Kazancı, N., Keçer, M., Ünay, E., 1998. Neogene-Quaternary evolution of the Eastern Marmara Region, Northwest Turkey, *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 120, 119-145.
- Eseller-Bayat, E.E., Deniz, O., 2022. Deprem Bölgesinde Bulunan Mevcut Bir Tank Yapısının Geoteknik Değerlendirmesi, *Teknik Dergi*, 2022 11921-11954, Yazı 665.
- Eren Ensaroğlu, F., 2010. Betonarme Perdelerde Kesme Kuvveti Dinamik Büyütme Katsayısının Doğrusal Olmayan Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile İrdelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Erken, A., 2001. The Role of Geotechnical Factors on Observed Damage in Adapazari, XV ICMGE Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, İstanbul.
- Erken, A., Okan, R., Erdem, A., 2003. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Adapazari’nda Yer alan Zeminlerin Davranışı, V. Ulusal Deprem Müh. Konferansı, İstanbul.

- Fahjan, Y. M., Özdemir, Z., 2007. Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY, 2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, İMO Teknik Dergi.
- Fahjan, Y., 2008. Türkiye Deprem Yönetmeliği (DBYBHY), (2007) Tasarım İvme Spektrumuna Uygun Gerçek Deprem Kayıtlarının Seçilmesi ve Ölçeklenmesi, İMO Dergi.
- Fırat, S., Demir, M., 2016. Adapazarı Bölgesi Zemin Büyütme Faktörünün İncelenmesi, Türk Bilim Araştırmaları Vakfı 9(3) syf 1-9.
- Fujiwara, T., 1972. "Estimation of Ground Movements in Actual Destructive Earthquake", Proceedings of the Fourth European Symposium on Earthquake Engineering, London.
- Groholski, D., Hashash, Y., Kim, B., Musgrove, M., Harmon, J., and Stewart, J., 2016. "Simplified Model for Small-Strain Nonlinearity and Strength in 1D Seismic Site Response Analysis." J. Geotech. Geoenviron. Eng., 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001496, 04016042.
- Gücek, S., Zorluer, İ., 2021. Bir Boyutlu Analiz Yöntemiyle Sahaya Özel Sıvılaşma Risk Haritalarının Oluşturulması: Afyonkarahisar Örneği, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Araştırma Makalesi, AKÜ FEMÜBİD 21 (2021) 045602 (908-921).
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer, J. J., Markatis, A., McCOY, E. M. M. A., Mendis, 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., and V. P., Drnevich, 1972. "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves" , Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98.
- Hashash, Y. M., Phillips, C., Groholski, D. R. 2010. Recent advances in non-linear site response analysis. In: Proceedings of the fifth international conference on recent advances in geotechnical earthquake engineering and soil Dynamics, San Diego, California, 1-22.
- Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Ilhan, O., 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.
- Idriss, I. M. and Sun, J. I., 1992. "User's Manual for SHAKE91, A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits"
- Ishibashi, I., 1992. Discussion to "Effect of soil plasticity on cyclic response," by M. Vucetic and R. Dobry, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 5, pp. 830-832.
- Ishibashi, I. and Zhang, X., 1993. "Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay," *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, pp. 182-191.
- Itasca, 2012. FLAC – Fast Lagrangian Analysis of Continua, FLAC 3D Version 5.0. Itasca Consulting Group. www.itascacg.com

- İyisan, R., 1994. "Geoteknik Özelliklerin Belirlenmesinde Sismik ve Penetrasyon Denev Sonuçlarının Karşılaştırılması", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Joyner, W.B. and Chen, A.T.F., 1975. "Calculation of nonlinear ground response in earthquakes," Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, pp. 1315-1336.
- Kale, Ö., 2017. Tasarım Spektrumu Parametreleri için Olasılıksal Sismik Tehlike Analizlerine Bağlı Bir Çalışma, İMO Teknik Dergi, Yazı 488, 8077-8103.
- Kara, İ., F., Şahin, B., 2022. Sahaya Özel Zemin Davranış Analizlerinde Profil Derinliği Değişiminin İncelenmesi, Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, Araştırma Makalesi 8(1): 37-52
- Kaptan, K., Tezcan, S., 2012. Deprem Dalgalarının Zemin Büyütmesi Üzerine Örnekler, Türk Bilim Araştırmaları Vakfı, Tüfav Bilim Dergisi, Cilt:5, Sayı:4, Sayfa: 17-32.
- Kaya, Z., Erken, A.,2009. Adapazarı Zeminlerinin Dinamik Davranış Özellikleri, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Geoteknik Mühendisliği Programı, Ayazağa, İstanbul, İTÜ dergisi Mühendislik, Cilt: 8, Sayı:5, 157-168.
- Kaya, Ş., Saroğlu, E., Musaoğlu, N., 2005. Depremin Neden Olduğu Ağır Hasarın Şehir Alanına Etkisinin Uzaktan Algılama Verileri ile Belirlenmesi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara.
- Ketin, İ.,1969. Kuzey Anadolu Fayı Hakkında, Maden Tetkik ve Arama Dergisi, Dergipark Araştırma Makalesi, Cilt 72, Sayı 72, 1 – 27.
- Koçyiğit, A, Yusufuğlu, H., Bozkurt, E., 1999. Evidence from the Gediz graben for episodic two-stage extension in western Turkey. Journal of Geological Society London 156, 605-616.
- Konder, R., L. and Zelasko, J., S., 1963. "A hyperbolic stress-strain formulation of sands." Proceedings of the 2nd Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, Brasil, 289-324.
- Köroğlu, M. A., 2019. "Deprem Mühendisliği Esasları", 12.10.2019 tarihinde, <https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/insaatmuhendisligi>, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ders Notları.
- Kramer, S.L.,1996. Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, New Jersey.
- Kudo, K., Kanno, T., Okada, H., Özel, O., Erdik, M., Sasatani, T., Higashi, S., Takahashi, M., Yoshida, K., 2002. Site-Specific Issues for Strong Ground Motions during the Kocaeli, Turkey, Earthquake of 17 August 1999, as Inferred from Array Observations of Microtremors and Aftershocks", Bulletin of the Seismological Society of America, 92, 1, pp. 448–465.
- Kurtuluş, C., Bozkurt A., 2007. Jeofizik Yöntemlerle Yer ve Yapı İncelemeleri, Kocaeli Üniversitesi Yayınları, syf 61, İzmit.
- Laurie, G., Baise,M. EERI, and David M. Boore, 2011. Estimating Unknown Input Parameters when Implementing the NGA Ground-Motion Prediction

- Equations in Engineering Practice, Article in Earthquake Spectra, Tufts University.
- Martin, G.R., Finn, W.D.L., and Seed, H.B., 1978. "Effects of system compliance on liquefaction tests," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 104, No. GT4, pp. 463-479.
- Matasovic, N., and Vucetic, M., 1993. Cyclic Characterization of Liquefiable Sands. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 119, No. 11, pp 1805-1822.
- Matasovic, N., Vucetic, M., 1995. Generalized Cyclic Degradation-Pore Pressure Generation Model for Clays. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 121, 1, 33-42.
- MTA, 1998. Sakarya İlinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- NEHRP, 2009. Research Paper 12, Evaluation of geologic hazards and determination of seismic lateral earth pressures. Recommended Seismic Provisions.
- Nurlu, M., Batman, B., Chorowicz, J. and Genç, M.A., 1995. A geometrical approach relating to the movement mechanism of North Anatolian Fault Zone, International Symposium on the Geology of the Black Sea region, Erler, A., Ercan, T., Ergüzer, B. and Örcen, S. (ed), Ankara, 283-291.
- Okay, A.İ., Kaşlılar-Özcan, A., İmren, C., Boztepe-Güney, A., Demirbağ, E., Kuşçu, İ., 2000. Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multichannel seismic reflection study. Tectonophysics, 321, 189-218.
- Ordonez, G.A., RSPMATCH. 2005. A computer program for GeoMotions (<http://www.geomotions.com>).
- Önalp, A., Sert, S., Bol, E., 2000. Adapazarı Zeminlerinin Deprem Performansı, Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Sekizinci Ulusal Kongresi, İstanbul Teknik Üniversitesi, s.373-382.
- Özdemir, Z., Fahjan, Y., M., 2007. Gerçek Deprem Kayıtlarının Tasarım Spektrumlarına Uygun Olarak Zaman ve Frekans Tanım Alanında Ölçekleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması, 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı.
- Özgirgin, F., 1997. "Case Studies on Soil Amplification", Master Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.
- PEER, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2006. PEER Strong Motion Database, <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I., Stepanyan, R., Nadariya, M., Hahubia, G., Mahmoud, S., Sakr, K., ArRajehi, A., Paradissis, D., Al-Aydrus, A., Prilepin, M., Guseva, T., Evren, E., Dmitrotsa, A., Filikov, S.V., Gomez, F., Al-Ghazzi, R., Karam, G. 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-ArabiaEurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. Journal of Geophysical Research, 111, B05411.
- Sağlam, G. ve ark., 1999. 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi, İTÜ Ön Değerlendirme Raporu.

- Sancio, R.B., Bray, J.D., Stewart, J.P., Youd, T.L., Durgunoğlu, H.T., Önalp, A., Seed, R.B., Christensen, C., Baturay, B. and Karadayılar, T., 2002. "Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1093-1102.
- Saraçoğlu, F., 2017. Farklı Zeminlerde Üst Yapıya Etkiyen Deprem Yüğü Hesabı İçin Normalize Davranış Spektrumu Önerisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Seed, H.B., Ugas, C., and Lysmer, J., 1976. "Site-dependent spectra for earthquake-resistant design," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 66, pp. 221-243.
- SeismoMatch 2022. A computer program for spectrum matching of earthquake records, <https://seismosoft.com>.
- Sert, S., 2003. Aluviyal Ortamda Kazıklı Yayılı Temellerin Üç Boyutlu Analizi, Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sert, S., Özocak, A., Arel, E., Bol, E., 2005. Sakarya Bölgesinde Yerel Zemin Özelliklerinin Hasar Büyüklüğüne Etkisi, Arifiye-Geyve-Güneşler Örneği. Kocaeli Deprem Sempozyumu, 1214-1224.
- Seymen, L., 1975. Kelkit Vadisi Kesiminde Kuzey Anadolu Fay Zonunun Tektonik Özelliği: İTÜ Maden Fak. Yayınları, İstanbul.
- Stewart, J. P., Chiou, S. J., Bray, J. D., Graves, R. W., Somerville, P. G., Abrahamson, N. A., 2001. Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design, PEER Report 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Şahin, M., Özden, G., 2015. Derin Alüvyon Zeminlerde Sahaya Özel Tasarım İvme Spektrumunun Belirlenmesinde Rol Oynayan Unsurlar, 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı 14-16 Ekim 2015, DEÜ, İzmir.
- Şaroğlu, F., Emre, Ö., Kuşçu, İ., 1992. Türkiye Diri Fay Haritası, MTA Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Şengör, A.M.C., Görür, N., ve Şaroğlu, F., 1985. Strike slip faulting and related basin formation in zone of tectonic escape: Turkey as a case study: Biddle, K. ve Christie-Blick, N., eds, *The Soc. of Econ. Paleon, and Miner.*, 227-264.
- Şölenoğlu, E., Çiftçi, T., Çavdar, E., Özdemir, G., 2021. Influence of Ground Motion Duration on Response of a Lead Rubber Bearing Isolated Structure, Eskişehir Teknik Üniversitesi, ACE 2020-21 14th International Congress on Advances in Civil Engineering, 6-8 Eylül 2021, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tan, O., Tapırdamaz, M.C., Yörük, A., 2008. The earthquake catalogues for Turkey, *Turk. J. Earth Sci.*, 17, 405- 418.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Thaker, T. P., Rao, K. S., 2011. Development of statistical correlations between shear wave velocity and penetration resistance using MASW technique, Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Kanada.

- Tokay, M., 1973. Kuzey Anadolu Fay Zonunun Gerede ile Iğaz Arasındaki Kısımında Jeolojik Gözlemler: Kuzey Anadolu Fayı ve Deprem Kuşağı sempozyumu, Ankara, 12-29.
- Trifunac, M., and Brady, A., 1975. Study on duration of strong earthquake ground motion. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, pp. 581-626.
- TUBITAK, 2010. The Scientific and Technological Research Council of Turkey, "Development of Performance Based Design and Evaluation Methods by Comparison with Observed Earthquake Performance of the Structures in Turkey," TUBITAK Project No: 108M303.
- Vucetic, M., Dobry, R., 1991. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering, 117(1), 89-107.
- Vural, İ., 2012. Alüvyal ve Sıvılaşılabilen Zeminlerde Altyapıların Deprem Risk Analizi: Adapazarı Örneği, Doktora Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Yalçınkaya, E., 2002. Zemin Özelliklerinin Yer Hareketine Etkisi: 1 Ekim 1995 Dinar ve 27 Haziran 1998 Adana-Ceyhan Depremi Örnekleri, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- Yamazaki, F., 2003. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Lecture Notes, <http://www.sce.ait.ac.th/people/faculty/~yamazaki>.
- Yoshida, N., 1994. Applicability of conventional computer code SHAKE to nonlinear problem. In: Proceedings of symposium on amplification of ground shaking in soft ground, Tokyo, Japan, 14-31.
- Yoshida, N., Iai, S., 1998. Nonlinear Site Response Analysis And Its Evaluation and Prediction, 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokosuka, Japan, pp 71-90.
- URL 1-<https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/abaf> adresinden 10 Mart 2023 tarihinde alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ebru ÜÇKUN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** :2018, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yükseklisans** :Halen devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Geoteknik Bilim Dalı

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Üçkun, E., Bol, E. 2023. Alüviyal Sahalarda Sahaya Özel Zemin Davranış Analizi, *Politeknik Dergisi*,(Hakem değerlendirmesinde).