

İyileştirilmiş Zeminlerin Deprem Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Hanife Topal

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2025



Determination of Earthquake Design Spectrum of Improved Soils

Hanife Topal

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

May 2025

İyileştirilmiş Zeminlerin Deprem Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi

Hanife Topal

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Geoteknik Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Hasan Savaş

Mayıs 2025

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi **Hanife Topal**'ın YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırladığı “İyileştirilmiş Zeminlerin Deprem Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Hasan Savaş
İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Hasan Savaş

Üye: Doç. Dr. Evren Seyrek

Üye: Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih
ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Fatma TÜMSEK

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Hasan SAVAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “İyileştirilmiş Zeminlerin Deprem Tasarım Spektrumunun Belirlenmesi” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 05/05/2025

Hanife Topal

İmza

ÖZET

"DEPREM" yer kabuğundaki çatlaklar nedeniyle meydana gelen ani dalgalar ile yer yüzeyinin sarsılması olayıdır. Harita spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak standart biçimde veya sahaya özel deprem tehlikesi analizleri kullanılarak deprem yer hareketi spektrumları oluşturulur. Sahaya özel zemin davranış analizleri, taban kayasında deprem yer hareketinin zemin tabakaları boyunca değişimini ve zemin yüzeyindeki deprem yer hareketini belirlemek için yapılır. Bu çalışmada tasarım spektrum eğrisindeki değişimi gözlemlemek adına sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, PLAXİS programında sıvılaşma potansiyeli taşıyan bir zeminde sıvılaşmayı da gözlemlemek için UBC3D-PLM modeli kullanılarak doğal zeminde, yapı yükü olan zeminde ve jet-grout kolonları tanımlanmış zeminde sayısal modelleme yapılmıştır. Belirlenen zemin profilinin deprem yükü etki ettiğinde gösterdiği davranış, sayısal modelde gerçeğe yakın sonuçlar verecek şekilde modellenmiştir. Oluşturulan model 200 metre genişliğinde ve 30 metre yüksekliğinde, sıvılaşma ihtimali yüksek olan kum zemin profilidir. İyileştirme yöntemi olarak 80 cm çapında ve 15 m boyunda Jet Grout kolonları modele tanımlanmıştır. Zemin profiline etki ettirilecek olan deprem verileri PEER veri tabanından alınmıştır. ZD zemin sınıfına göre AFAD dan alınan tasarım spektrum eğrisine göre SEISMOMATCH programında hedef spektruma göre ölçeklendirilmiştir. Model doğal zemin ve iyileştirilmiş zemin olarak ayrı ayrı aşamalarda statik ve dinamik olarak modellenmiştir. Kesitte belirlenmiş olan noktalarda 11 adet deprem için analizler yapıp yüzeydeki ivme-zaman değişimi ve tasarım spektrum grafiği değişimi gözlemlenmiştir. Analizlerden alınan sonuçlar deprem hareketi sonuçlarına benzer ancak belirlenen analiz noktalarından iyileştirmenin altında bulunan noktalarda artış eğiliminde olduğu, iyileştirme yapılan bölgede yer alan noktalarda azalan eğilim gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Zemin Sıvılaşması, Zemin İyileştirme, Jet Grout Tekniği, Tasarım Spektrumu

SUMMARY

‘EARTHQUAKE’ is the shaking of the earth's surface by sudden waves caused by cracks in the earth's crust. Depending on the map spectral acceleration coefficients and local soil impact coefficients, earthquake ground motion spectra are generated using standard or site-specific earthquake hazard analyses. Site-specific soil behaviour analyses are performed to determine the variation of earthquake ground motion in the bedrock through the soil layers and the earthquake ground motion at the ground surface. In this study, in order to observe the change in the design spectrum curve, the finite element method was used and numerical modelling was performed on natural ground, ground with building load and ground with jet-grout columns using the UBC3D-PLM model to observe liquefaction in a ground with liquefaction potential in PLAXIS programme. The behaviour of the identified soil profile when earthquake load is applied is modelled in the numerical model to give realistic results. The model created is a 200 m wide and 30 m high sand soil profile with high liquefaction probability. Jet grout columns with a diameter of 80 cm and a length of 15 m were defined in the model. The earthquake data to be affected on the soil profile were taken from the PEER database. The model was scaled according to the target spectrum in SEISMOMATCH programme according to the design spectrum curve obtained from AFAD for ZD soil class. The model was modelled statically and dynamically in separate stages as natural soil and improved soil. Analyses were carried out for 11 earthquakes at the points determined in the cross section and the acceleration-time change on the surface and the change in the design spectrum graph were observed. The results obtained from the analyses are similar to the earthquake motion results, however, it is observed that there is an increasing trend at the points located below the improvement from the determined analysis points and a decreasing trend at the points located in the improvement area.

Keywords: Soil Liquefaction, Soil Improvement, Jet Grouting Technique, Design Spectrum

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışma süresinde her türlü bilgi paylaşımında elinden geleni yapan, her konuda anlayış gösteren desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Doç. Dr. Hasan Savaş olmak üzere, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Kamil Bekir Afacan'a teşekkür ve saygılarımı sunarım. Ayrıca kızım Semra ve iş arkadaşlarıma tüm anlayış ve destekleri için teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
SUMMARY.....	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. DEPREM TASARIM SPEKTRUMU TANIMLAMALAR.....	4
3.1. Deprem.....	4
3.2. Standart Deprem Yer Hareketi Spektrumları.....	5
3.3. Zemin Sınıfları.....	5
3.4. Yerel Zemin Etki Katsayısı.....	6
3.5. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu.....	7
3.6. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu.....	8
4. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA.....	10
4.1. Sıvılaşmanın Tanımı ve Mekanizması.....	10
4.2. Sıvılaşma Meydana Gelmesi için Koşullar.....	11
5. ZEMİNLERDE İYİLEŞTİRME.....	17
5.1. İyileştirme Tanımı.....	17
5.2. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Seçimi.....	17
5.3. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	18
5.3.1. Zemin güçlendirme.....	18
5.3.1.1. Taş kolonlar.....	18
5.3.1.2. Derin karıştırma yöntemi.....	19
5.3.1.3. Jet-Grout metodu.....	20
5.3.1.4. Donatılı zemin yöntemi ve geosentetikler.....	20

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
5.3.1.5. Geogrid.....	21
5.3.1.6. Geomembran.....	22
5.3.1.7. Geokompozit.....	22
5.3.1.8. Geosel.....	22
5.3.1.9. Zemin Ankrajları.....	23
5.3.2. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri.....	23
5.3.2.1. Drenaj.....	23
5.3.2.2. Kompaksiyon.....	24
5.3.2.3. Çimento ile stabilizasyon.....	24
5.3.2.4. Kireç ile stabilizasyon.....	25
5.3.2.5. Bitüm ile stabilizasyon.....	25
5.4. Sıvılaşma Olan Zeminlerde Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	26
6. JET ENJEKSİYONU.....	27
6.1. Jet Grout Teknikleri.....	27
6.1.1. Tek akışkanlı olan jet enjeksiyonu.....	28
6.1.2. Çift akışkanlı olan jet enjeksiyonu.....	28
6.1.3. Üç akışkanlı olan jet enjeksiyonu.....	28
6.1.4. Süper jet enjeksiyon.....	28
6.2. Jet Grout Uygulama Parametreleri.....	29
6.2.1. Enjeksiyon basıncı.....	29
6.2.2. Dönme-çekme hızı.....	30
6.2.3. Dozaj.....	30
6.3. Enjeksiyon İşletim Parametrelerinin Seçimi.....	30
6.4. Uygulama Kriterleri.....	32
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
7.1. Materyal.....	34
7.1.1. İnceleme alanının hakkında.....	34
7.1.2. İnceleme alanının depremselliği ve geçmiş depremler.....	35
7.1.3. Zemin değerleri.....	36
7.1.4. Laboratuar deneyleri.....	38

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
7.1.5. Jeofizik çalışmalar.....	38
7.2. Yöntem.....	39
7.2.1. Zemin profillerinin oluşturulması.....	39
7.2.2. Sıvılaşma yönünden değerlendirme.....	40
7.2.3. Tasarım spektrum değerlerinin belirlenmesi.....	44
7.2.4. Deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi.....	45
7.2.5. Seismomatch verileri.....	46
7.2.6. Sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik analiz.....	47
7.2.6.1. Zemin Modeli UBC3D'nin temel özellikleri.....	48
8. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
8.1. Sayısal Analiz.....	50
8.1.1. Zemin parametrelerinin girilmesi.....	50
8.1.2. Dinamik yüklerin girilmesi.....	51
8.1.3. Model ağının oluşturulması.....	52
8.2. Sayısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	53
8.2.1. Sıvılaşma yönünden değerlendirme.....	53
8.2.2. Deformasyon yönünden değerlendirme.....	55
8.2.3. Yatay ve düşey deplasman yönünden değerlendirme.....	55
8.2.4. İvme yönünden değerlendirme.....	56
8.2.5. Spektral ivme eğrisi yönünden değerlendirme.....	61
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Yatay elastik tasarım spektrumu.....	8
3.2. Yatay elastik yerdeğiştirme spektrumu.....	8
3.3. Düşey elastik tasarım spektrumu.....	9
4.1. Sıvılaşma oluşum mekanizması.....	10
4.2. Geliştirilmiş Çin kriterleri.....	12
4.3. Kocaeli depremi sonrasında alınan test sonuçları.....	13
4.4. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi.....	14
4.5. Atterberg limit çizelgesi.....	14
4.6. Sıvılaşmaya duyarlı dane boyutu aralığı.....	15
5.1. Taş kolon yöntemi.....	19
5.2. Derin karıştırma yöntemi.....	19
5.3. Geosentetik malzeme örnekleri.....	21
5.4. Zemin ankrajları.....	23
6.1. Jet enjeksiyonu kolonların oluşturulması.....	27
6.2. Jet grout kolonlarının oluşturulma biçimi.....	29
6.3. Jet enjeksiyon sistemleri.....	29
6.4. Farklı zeminlerin istenilen basınç dayanımında çimento miktarındaki değişim.....	31
7.1. İnceleme alanı ve civarına ait uydu görünümü.....	34
7.2. İnceleme alanı ve civarındaki diri fay yerleşimi.....	35
7.3. Bölgede meydana gelen M+4 depremleri.....	36
7.4. Bölgede meydana gelen M+4 depremlerin sayı histogramı (AFAD'dan alınmıştır). Ana şok-artçı şok ayrımı yapılmamıştır. (1900-2020).....	36
7.5. CSR gerilme azaltım eğrileri.....	43
7.6. İyileştirme sonrası SK-1 sondajı sıvılaşma analizi.....	44
7.7. İyileştirme sonrası SK-2 sondajı sıvılaşma analizi.....	44
7.8. İyileştirme sonrası SK-3 sondajı sıvılaşma analizi.....	44
7.9. İyileştirme sonrası SK-4 sondajı sıvılaşma analizi.....	44
7.10. Deprem düzeyi DD-2 ve zemin sınıfı ZD için tasarım spektrum değerleri.....	45
7.11. D-1 depremi orjinal ve ölçeklenmiş ivme kaydı.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.12. Orijinal ve ölçeklenmiş ortalama tasarım spektrumu.....	47
8.1. Plaxis programında oluşturulan model.....	50
8.2. Dinamik yük penceresi.....	51
8.3. Model ağ.....	52
8.4. Model analiz noktaları.....	52
8.5. Dinamik durumda iyileştirme öncesi zeminin 5 m ile 20 m arasında sıvılaştığını gösteren zemin profili.....	54
8.6. Dinamik durumda iyileştirme sonrası durumda sıvılaşmanın engellendiğini gösteren zemin profili.....	54
8.7. İyileştirme öncesi deformasyon 31 mm.....	55
8.8. İyileştirme sonrası deformasyon 15 mm.....	55
8.9. İyileştirme öncesi yatay deplasman.....	56
8.10. İyileştirme sonrası yatay deplasman.....	56
8.11. İyileştirme öncesi düşey deplasman.....	56
8.12. İyileştirme sonrası düşey deplasman.....	56
8.13. D-6 depreminin A1-A7 noktalarındaki iyileştirme öncesi ve sonrası ivme değerleri	58
8.14. 11 adet depremin iyileştirme öncesi ve sonrası yüzeydeki ivme kayıtları.....	61
8.15. D-6 Depremi'nin A1-A7 noktalarındaki PSA değerleri.....	63
8.16. 11 adet depremin iyileştirme öncesi ve sonrası yüzeydeki spektral ivme kayıtları....	65
9.1. Doğal ve iyileştirilmiş zeminin yüzeyindeki spektral ivme değişimi.....	67
9.2. Doğal ve iyileştirilmiş zeminin yüzeyindeki ortalama ivme değişim.....	68
9.3. Spektral ivme grafikleri.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

Sayfa

3.1. 2018 TBDY'ne göre yerel zemin sınıfları.....	6
3.2. Kısa periyot yerel zemin etki katsayısı.....	6
3.3. 1.0 saniye periyot yerel zemin etki katsayısı.....	7
4.1. Killi ve siltli kumların sıvılaşma durumu.....	12
4.2. Relatif sıkılık oranlarına göre zeminlerin sınıflandırılması.....	14
7.1. Sondaj çalışmaları sonucu elde edilen zemin profili.....	37
7.2. Zemin birimlerinin SPT değerleri ve ortalaması.....	37
7.3. Zemin birimleri elek analizi deney sonuçları.....	38
7.4. Zemin birimleri direkt kesme deney sonuçları.....	38
7.5. Sismik deney sonuçlar.....	39
7.6. SPT ortalaması ve SPT-N ₆₀ , SPT-N _{1,60} değerleri.....	39
7.7. SK-1 sondajı sıvılaşma analizi.....	41
7.8. SK-2 sondajı sıvılaşma analizi.....	41
7.9. SK-3 sondajı sıvılaşma analizi.....	41
7.10. SK-4 sondajı sıvılaşma analizi.....	41
7.11. Tasarım hesapları ve kontroller.....	43
7.12. 11 adet depremin kayıt bilgileri.....	46
8.1. Belirlenen zemin profili için Plaxis UBCPLM modelde kullanılan parametreler.....	50
8.2. Belirlenen zemin profili için Plaxis JET Grout parametreleri.....	51
8.3. Belirlenen zemin profili için Plaxis temel parametreleri.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
%	Yüzde
ρ	Yoğunluk
τ_f	Kayma mukavemeti
$\emptyset$	İçsel sürtünme açısı
$a_{\max}$	Yüzeydeki en büyük yatay ivme
C	Kohezyon katsayısı
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
CL-ML	Düşük plastisiteli siltli kil
E	Elastisite
E_{50}^{ref}	Sekant Rijitliği
E_{oed}^{ref}	Tanjant rijitliği
E_{ur}^{ref}	Elastik yükleme/boşaltma rijitliği
F_s	Kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısı
F_1	1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı
S_{DS}	Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı
S_{D1}	1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı
S_s	Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı
S_1	1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı
γ	Birim hacim ağırlığı
G	Maksimum Kayma Modülü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
GM	Siltli çakıl
GM-GC	Siltli ve killi çakıl
G _s	Dane özgül ağırlığı
GW	İyi derecelenmiş çakıl
Hz	Hertz
K	Bulk Modülü
LL	Likit Limit
M	Magnitüt
MH	Yüksek plastisiteli silt
ML	Düşük plastisiteli silt
NP	Non-Plastik
r _d	Gerilme azaltma katsayısı
s	Saniye
SC	Killi kum
SM	Siltli kum
SW	İyi derecelenmiş kum
V _s	Kayma Dalga Hızı
w	Su Muhtevası
σ'	Gerilme
σ'_v	Efektif düşey gerilme
σ_v	Toplam düşey gerilme

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Kısaltmalar****Açıklama**

AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
CPT	Koni penetrasyon deneyi
DD-2	Deprem Yer Hareketi Düzeyi
DTS	Deprem Tasarım Sınıfı
HS	Hardening Soil
MASW	Multi- channel analysis of surface waves
MTA	Maden Tetkik ve Arama
PGA	Peak Ground Acceleration
PSA	Pseudo Spectral Acceleration
SPT	Standart penetrasyon deneyi
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
USCS	Unified Soil Classification System
YASS	Yeraltı Su Seviyesi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Ülkemizin artan nüfusunun ve gelişen teknolojinin gereksinimlerini karşılamak, yeni yaşam alanları ihtiyacını doğurmuştur. Bu durum, taşıma gücü düşük olan zeminlerde de yapı yapmak zorundalığını getirmiştir. Bu zeminler yapılaşmaya uygun değilse, zeminlerde oturma ve sivilaşma problemi gibi çeşitli geoteknik mühendislik sorunlarını ortaya çıkmıştır. Bu tarz sorunları çözmek için belirli zemin iyileştirme teknikleri kullanılarak zemin yapılaşma açısından kullanılabilir duruma getirilmektedir.

Bu çalışmada, yapılaşma alanı olması düşünülen ancak laboratuvar ortamından elde edilen veriler ve geoteknik parametreler değerlendirildiğinde zemin özellikleri açısından kötü olduğu düşünülen zemin sonlu elemanlar yöntemi olarak modellenmiştir. Bu analizlerde, mevcut alanın deprem bölgesine olan uzaklığından dolayı ani bir sismik yüklemeye maruz kalabileceği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, statik ve dinamik senaryolar bu alanı modellemek için ayrı ayrı kullanılmıştır. İyileştirmedeki yöntem jet-grout yöntemi olarak belirlenmiştir.

Tezin ilk bölümünde deprem, zemin özellikleri türleri ve tasarım spektrumuyla ilgili tanımlamalardan bahsedilmiştir.

Bölüm 2’de zayıf zemin tabakasında gerçekleşen zemin sivilaşmasından ve sivilaşma potansiyelini belirleyen unsurlardan bahsedilmiştir.

Bölüm 3’te zemin iyileştirme yapılması gereken durumlardan bahsedilmiş olup, zemin iyileştirme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

Bölüm 4’te iyileştirme yöntemi olan jet grout yöntemi hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Bölüm 5 ‘te bölge depremselliği ve jeolojisi, bölgede yapılmış arazi ve laboratuvar deneylerindeki geoteknik veriler değerlendirilmiştir.

Son bölümde, sayısal modelin analiz sonuçları ile arazi ve laboratuvar verileri korele edilerek jet grout uygulaması incelenmiş ve uygulamanın sonucundan elde edilen bulgular yorumlanarak sonuçlar özetlenmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İncetaş ve Tanrikulu (2002), Eşdeğer deprem yükü yöntemi, çok fazla düzensizlik içermeyen az katlı yapıların deprem yüklerini hesaplamak için kullanılır. Bu yöntem, tasarım ivme değerini, yapının doğal titreşim periyoduna göre tasarım spektrum grafiğine bağlı olarak hesaplar ve binanın kütlesiyle çarparak bulur. Bina periyodu ve spektrum eğrisi bina üzerindeki deprem yükünü etkiler. Her ülkenin deprem yönetmelikleri, depreme dayanıklı binaların tasarımı ve analizini sağlar.

Pruksma (2016); Groningen bölgesinin zemin koşulları ile iki ayrı türde zemin profili için doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal yer tepkilerini karşılaştırmak için aynı malzeme modellerini ve parametreleri kullandık. Çalışılan ilk zemin profili, Loppersum bölgesinin yumuşak killi topraklarından oluşuyordu. İkinci zemin profili, Slochteren'deki kumlu ve sert toprağı temsil ediyor. Yapılan analizler, doğrusal olmayan yöntemdeki sonuçların eşdeğer doğrusal yöntem sonuçlarına göre PGA düzeylerini büyük oranda daha düşük gösterdiği ve daha kısa spektrum periyotlarında doğrusal olmayan ve eşdeğer doğrusal analizler arasındaki farkın daha küçük olduğunu göstermiştir.

Koçer vd. (2018) , DBYBHY(2007) ve TBDY(2018)' de tanımlanmış olan, spektral ivme değeri ve zemindeki hakim titreşim periyotları farklı olan dört ilin deprem risk düzeylerini karşılaştırmıştır.

Nemutlu vd. (2020) çalışmalarında, Bingöl ve Elazığ il merkezleri için DBYBHY 2007 ile TBDY 2018 tasarım ivme spektrumlarını oluşturup, farklı zemin sınıflarının ivme değerleri, köşe periyotları, tasarım spektrumları, arasındaki farklılıkları incelemiştir.

Bozer (2020), TBDY- 2018 ile DBYBHY -2007 ye göre tanımlanan elastik tasarım spektrumlarının 81 il için 1.0s periyod ile kısa periyod bölgelerinde spektral değerleri karşılaştırmıştır.

3. DEPREM TASARIM SPEKTRUMU TANIMLAMALAR

3.1. Deprem

"DEPREM" yerkabuğundaki kırılmalar nedeniyle meydana gelen ani dalgaların etkisiyle yer yüzeyinin sarsılması olayıdır.

Deprem kayıtları farklı sönüm, genlik, periyod ve frekansa sahiptir. Dalga hareketleri, harmonik titreşimler olarak adlandırılan hareketlerdir. Dalga hareketinin tepe noktaları arasındaki süre periyoddur. Birim zamandaki hareket sayısına Frekans denir.

Zaman birimi bir hareketin 1 saniyede kendini tekrarlama sayısı yani Frekans olup, birimi hertz olarak tanımlanır. Titreşim hareketinin zamanla azalmasına veya yok olmasına sönümleme denir.

Farklı harmonik titreşimlerin yapı üzerindeki etkisi de farklıdır. Farklı periyodda elde edilen titreşimlerden oluşan maksimum yer değiştirme, ivme veya hız değerlerinin grafiği Spektrum eğrisi/grafiğidir.

2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde dört adet deprem yer hareketi düzeyi tanımlanır. Bunlar

- **Deprem Yer Hareketi Düzeyi-1 (DD-1)**

DD-1 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklüklerin aşılma olasılığının %2 ve tekrarlanma periyodunun 2475 yıl olduğu durumlardır.

- **Deprem Yer Hareketi Düzeyi-2 (DD-2)**

DD-2 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklüklerin aşılma olasılığının %10 ve tekrarlanma periyodunun 475 yıl olduğu durumlardır.

- **Deprem Yer Hareketi Düzeyi-3 (DD-3)**

DD-3 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklüklerin aşılma olasılığının %50 olduğu ve tekrarlanma periyodunun 72 yıl olduğu sık deprem yer hareketidir.

- **Deprem Yer Hareketi Düzeyi-4 (DD-4)**

DD-4 Deprem Yer Hareketi, 50 yılda spektral büyüklüklerin aşılma olasılığının %68 ve tekrarlanma süresinin ise 43 yıl olduğu çok yaygın deprem yer hareketidir.

3.2. Standart Deprem Yer Hareketi Spektrumları

Harita spektral ivme katsayılarına ve yerel zemin etki katsayılarına bağlı olarak standart biçimde veya sahaya özel deprem tehlikesi analizleri kullanılarak, deprem yer hareketi spektrumları, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi esas alınarak %5 sönüm oranı için özel olarak tanımlanır. Kısa periyot için harita spektral ivme-katsayısı S_S , 1.0 saniyelik bir periyot için spektral ivme-katsayısı S_1 'dir.

Harita spektral ivme katsayıları, birbirine dik iki yatay doğrultudaki deprem etkilerinin geometrik ortalamasına karşılık gelen boyutsuz katsayılardır. Bu katsayılar, belirli bir deprem yer hareketi düzeyi için referans zemin koşulu $(VS)_{30}$ olarak bilinir ve %5 sönüm oranı için harita spektral ivmeleri yerçekimi ivmesine bölünür. Harita spektral ivme katsayıları S_S ve S_1 , SDS ve SD1 tasarım spektral ivme katsayılarını oluşturmak için aşağıdaki şekilde değiştirilir:

$$S_{DS}=S_S.F_S$$

$$S_{D1}=S_1.F_1$$

Burada F_1 ve F_S tanımlanan yerel zemin etki katsayılarını gösterir.

3.3. Zemin Sınıfları

Zemin Sınıfları 2018 TBDY'de ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF olarak sınıflandırılır. ZA en iyi zemini ifade ederken, ZF'ye gidildikçe zemin sağlamlığı azalır. TBDY 2018'e

göre, yerel zemin sınıflarının belirlenme kriterinde, Kayma Dalgası Hızı (V_s) , Kohezyonlu Zeminler için c_u değeri, Darbe Sayısı N ve SPT(Standart Penetrasyon Deneyi) kullanılabilir. Bu değerler sahada yapılan zemin etüd raporları ve laboratuvar deneyleri sonrasında belirlenir. Laboratuvar deneyleri sondaj, araştırma çukuru ya da arazide sıkı zemin veya kayalardan alınan numuneler üzerinde uygulanır.

Çizelge 3.1. 2018 TBDY’ne göre yerel zemin sınıfları (TBDY, 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Zemin Cinsi	Üst 30 metrede ortalama		
		(VS)30 m/s	(N60)30 darbe/30 cm	(Cu)30 Kpa
ZA	Sağlam, sert kayalar	> 1500		
ZB	Az ayrılmış, orta sağlam kayalar	760 - 1500		
ZC	Çok sıkı kum, çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış, çok çatlaklı zayıf kayalar	360 - 760	> 50	> 250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları	180 - 360	15 - 50	70 - 250
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	< 180	< 15	< 70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaştırılabilir zeminler, yüksek derecede hassas killler, göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.) 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve/veya organik içeriği yüksek killler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) killler, 4) Çok kalın (> 35 m) yumuşak veya orta katı killler.			

3.4. Yerel Zemin Etki Katsayısı

Yerel zemin etki katsayısı olan F_s ve F_1 , TBDY-2018 e göre belirlenen yerel zemin sınıflarına bağlı şekilde Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kısa periyot yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizleri yapılacaktır.					

Çizelge 3.3. 1.0 saniye periyot yerel zemin etki katsayısı (TBDY, 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	1.0 saniye periyot için Yerel Zemin Etki Katsayısı F1					
	$S1 \leq 0.10$	$S1 = 0.20$	$S1 = 0.30$	$S1 = 0.40$	$S1 = 0.50$	$S1 \geq 0.60$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZC	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.4
ZD	2.4	2.2	2.0	1.9	1.8	1.7
ZE	4.2	3.3	2.8	2.4	2.2	2.0
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizleri yapılacaktır.					

Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'e göre ZF yerel zemin sınıfına sahip olan zeminler zayıf zeminler olup, sıvılaşma potansiyeli yüksek zeminlerdir. Sahaya özel zemin davranış analizi yapılır.

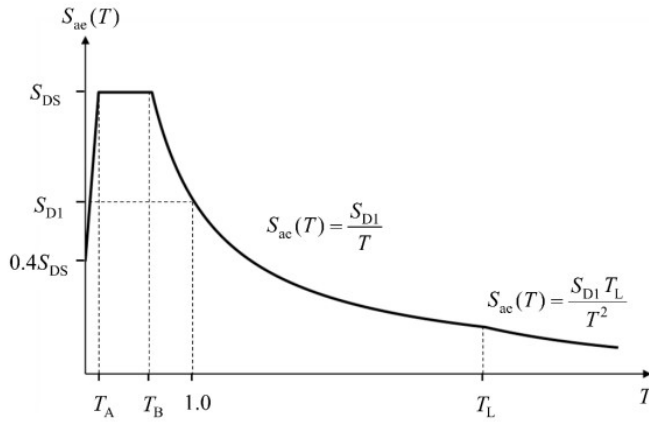
3.5. Yatay Elastik Tasarım Spektrumu

Yatay doğrultudaki elastik davranışı ifade eden yatay elastik tasarım ivme spektrumu yapıların yer hareketine karşı elastik tepkilerini değerlendirmek için kullanılır. Ordinatları olan $S_{ae}(T)$, yatay elastik tasarım ivme spektrumunun ivmeleri, doğal titreşim periyoduna bağlı olarak, yerçekimi ivmesi (g) cinsinden hesaplandığı Denklem 3.1'de açıklanmıştır.

$$\begin{aligned}
 S_{ae}(T) &= (0.4 + 0.6 \frac{T}{T_A}) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_A) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1}}{T} & (T_B \leq T \leq T_L) \\
 S_{ae}(T) &= S_{DS} & (T_A \leq T \leq T_B) \\
 S_{ae}(T) &= \frac{S_{D1} T_L}{T^2} & (T_L \leq T)
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada S_{DS} ve S_{D1} tasarım spektral ivme katsayıları'nı, T ise doğal titreşim periyodunu gösterir. Yatay tasarım ivme spektrumu köşe periyotları T_B ve T_A Denklem 3.2 ile S_{D1} ve S_{DS} 'e bağlı olarak tanımlanır. Sabit yerdeğiştirme bölgesine geçiş periyodu için $T_L=6$ s alınır.

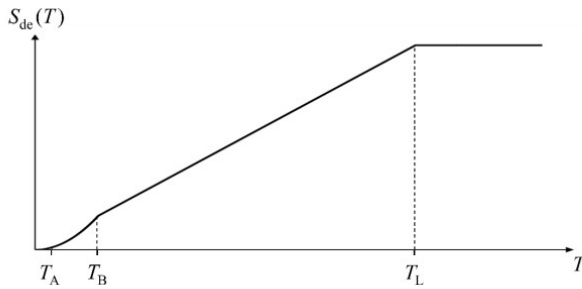
$$T_A = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad ; \quad T_B = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.2)$$



Şekil 3.1. Yatay elastik tasarım spektrumu (TBDY,2018)

Her bir deprem hareket seviyesi için yatay elastik tasarım yer değiştirme spektrumunun ordinatı $S_{de}(T)$, metre (m) cinsinden doğal titreşim periyodunun bir fonksiyonu olarak hesaplanır ve Denk.(3.3) olarak tanımlanır.

$$S_{de}(T) = \frac{T^2}{4\pi^2} g S_{ac}(T) \quad (3.3)$$



Şekil 3.2. Yatay elastik yerdeğiştirme spektrumu (TBDY,2018)

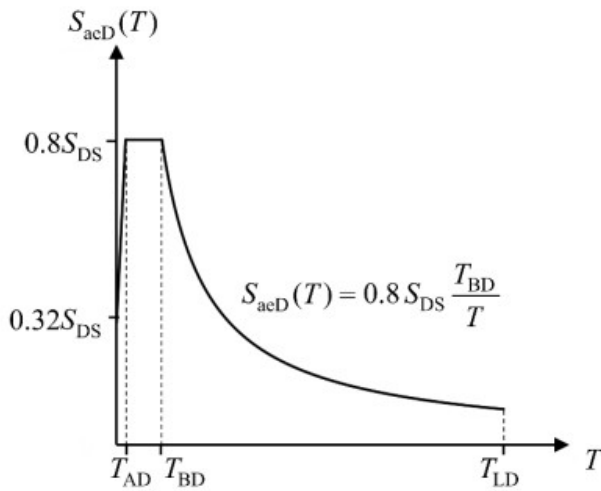
3.6. Düşey Elastik Tasarım Spektrumu

Yatay deprem hareketi için belirlenen kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ve doğal titreşim periyoduna bağlı olarak, düşey elastik tasarım ivme spektrumu ordinatları olan $S_{aed}(T)$, herhangi bir deprem hareketi düzeyi için yerçekimi ivmesi [g] cinsinden Denk.(3.4) ile belirlenir (Şekil 3.3).

$$\begin{aligned}
 S_{aeD}(T) &= (0.32 + 0.48 \frac{T}{T_{AD}}) S_{DS} & (0 \leq T \leq T_{AD}) \\
 S_{aeD}(T) &= 0.8 \cdot S_{DS} & (T_{AD} \leq T \leq T_{BD}) \\
 S_{aeD}(T) &= 0.8 \cdot S_{DS} \frac{T_{BD}}{T} & (T_{BD} \leq T \leq T_{LD})
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Denk. (3.4)'te yer alan T_{AD} ve T_{BD} düşey spektrum köşe periyotları ile T_{LD} periyodu Denk. (3.5)'te verilmiştir.

$$T_{AD} = \frac{T_A}{3} \quad ; \quad T_{BD} = \frac{T_B}{3} \quad ; \quad T_{LD} = \frac{T_L}{2}
 \tag{3.5}$$



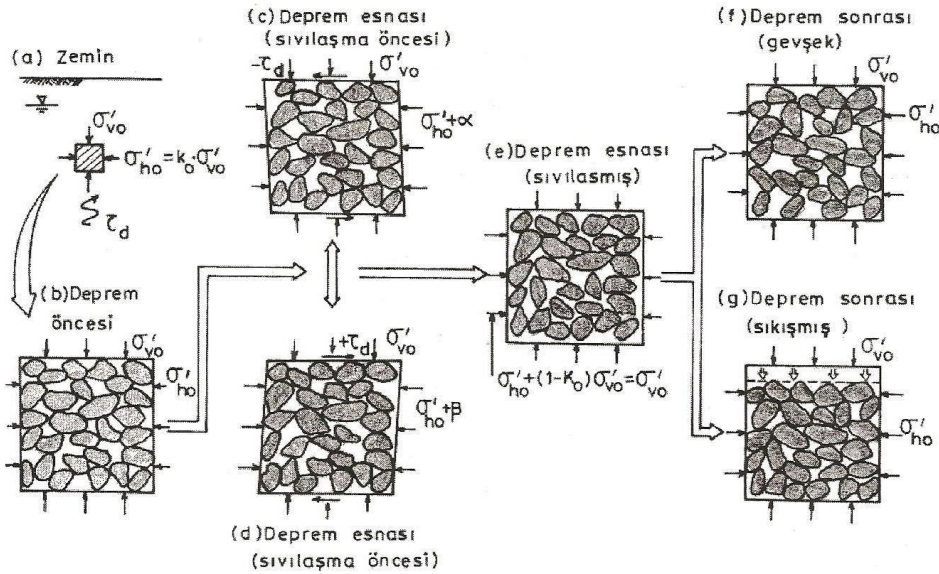
Şekil 3.3. Düşey elastik tasarım spektrumu

4. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

4.1. Sıvılaşmanın Tanımı ve Mekanizması

Sıvılaşma; depremin neden olduğu tekrarlanan kayma gerilmelerinin etkisi altında kalan, kohezyonsuz, gevşek ve suya doymun durumda olan zeminlerde gerçekleşir. Drenajsız durumlarda artmış olan boşluk suyu basıncı ve azalmış olan efektif gerilme sonucu zemin kayma mukavemetini kısmen veya tamamen kaybeder.

(Şekil 4.1a) Depremden önce; yeraltı suyunun altında yeralan gevşek ve suya doymun kum tanelerine, düşey basınç (σ'_{vo}) ve yatay basınç (σ'_{ho}) gerilmeleri etki etmektedir (Şekil 4.1b).



Şekil 4.1. Sıvılaşma oluşum mekanizması (Tosun, 2002)

Boşluk suyu basıncı, yeraltı su seviyesinin altındaki hidrostatik basıncın bir sonucudur. Kumun kayma mukavemeti (τ_f) bu durumda, Denk.(4.1)'de gösterildiği şekilde ifade edilir.

$$\tau_f = c + \sigma' \cdot \tan \phi \quad (4.1)$$

Bu durumda, c kohezyon katsayısı, σ' kumun etkili normal gerilmesi ve ϕ içsel sürtünme açısı bulunmaktadır. Sismik dalgaların oluşturduğu sürekli kayma gerilmeleri, deprem sırasında sallanan zemin elemanının kum tanelerini gevşetir (Şekil 4.1c ve 4.1d). Bunun sonucunda kum taneleri su içinde asılır (Şekil 4.1e). Bu durumda, kumlarda tipik olarak sıfır olan efektif gerilme (c), kayma mukavemetinde (τ_f) sıfıra eşit yapacak ve zemin sıvılaşacaktır. Depremden sonra (Şekil 4.1f ve 4.1g), aşırı boşluk suyu basıncı nedeniyle yeraltı suyu kum taneleri ile beraber zeminin yüzeyine hareket eder. Zemin üzerindeki aşırı boşluk suyu basıncı azaldığında, kum taneleri gevşek veya daha sıkı hale gelir. Kum taneciklerinin daha sıkı olduğu durumda, sıvılaşmanın tekrar meydana gelme olasılığı düşüktür. (Tosun, 2002).

4.2. Sıvılaşma Meydana Gelmesi için Koşullar

Doğada yeralan zemin çeşitlerinin hiçbiri sıvılaşmaya karşı dayanıklı değildir. Zeminlerin sıvılaşmaya karşı duyarlılığını etkileyen faktörler;

- **Deprem süresi ve büyüklüğü**

Deprem sırasında sismik enerji açığa çıkar ve boşluk suyu basıncı artar. Yer ivmesi ve yer sarsıntısı, depremin büyüklüğü ve süresi arttıkça artmaktadır. Yer ivmesi ve sarsıntısı nedeni ile oluşan kayma deformasyonları, boşluk suyu basıncında artışa ve zemin tanelerinde yer değiştirmeye neden olur. Kısacası, depremin süresi ve büyüklüğü arttıkça sıvılaşma olasılığı da artacaktır.

- **Yeraltı su seviyesi**

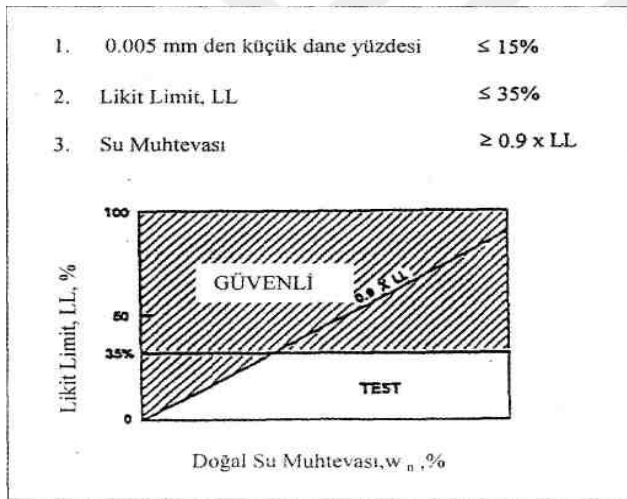
Kohezyonsuz zeminler sıvılaşmaya neden olur. Sonuç olarak, yer altı su seviyesinin yüksekliği sıvılaşma riskini artırır. Obermeier (1996), Yeraltı suyunun zemin yüzeyine yakın olduğu durumlarda sıvılaşmanın 2 - 4 metre arasında olacağı belirtilmiştir. (Tosun,2002).

Yeraltı su seviyesinin üstünde olan ve suya doymun olmayan zeminler genellikle sıvılaşma potansiyeli için değerlendirilmez (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

- **Zeminin tipi**

Sıvılaşmaya en yatkın zemin türü, plastik olmayan veya kohezyonsuz zeminlerdir. Bunlar kumlar, plastik olmayan siltler, siltli kumlar ile çakıllar örnektir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Kili ve siltli zeminlerde düşük permeablite nedeni ile ön sıvılaşma genel olarak gerçekleşmez. Geliştirilmiş Çin kriterleri, düşük plastisiteli, ince taneli zeminlerin sıvılaşabilirliğini belirlemektedir (Wang, 1979). Bu kriterlere göre, zemindeki kil yüzdesinin (0.005 mm'den küçük) en az %15, likit sınırının (LL) en az %35, su muhtevası (w) likit sınırının %90' ına eşit veya daha çok olması durumunda zeminler sıvılaşabilir (Wang, 1979).



Şekil 4.2. Geliştirilmiş Çin kriterleri (Finn vd., 1994)

Kil, kum ve silt karışımlarının sıvılaşp sıvılaşmayacağını belirlemek için Andrews ve Martin(2000) tarafından oluşturulan çalışmanın sonuçları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

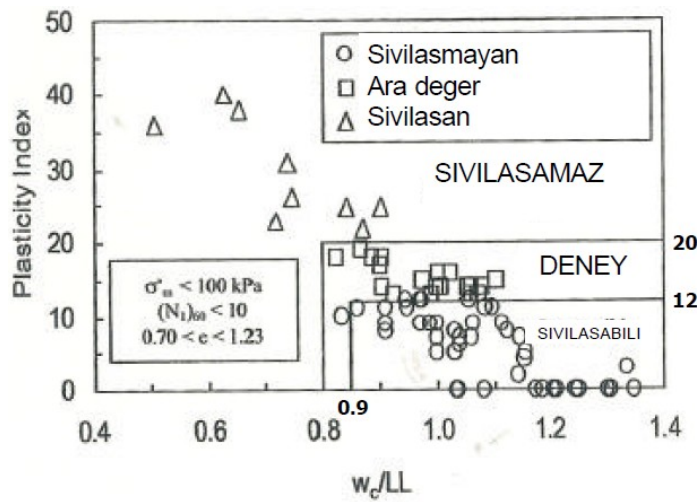
Çizelge 4.1. Killi ve siltli kumların sıvılaşma durumu (Andrews ve Martin, 2000)

	Likit limit* < 32	Likit limit* ≥ 32
Kil içeriği (<0.002 mm) < %10	Sıvılaşabilir	İleri çalışma gerekir (plastik kil harici tane olduğu düşünülerek)
Kil içeriği (<0.002 mm) ≥ %10	İleri çalışma gerekir	Sıvılaşmaz

	(plastik olmayan, kil boyutlu tane olduğu düşünülerek)	
--	--	--

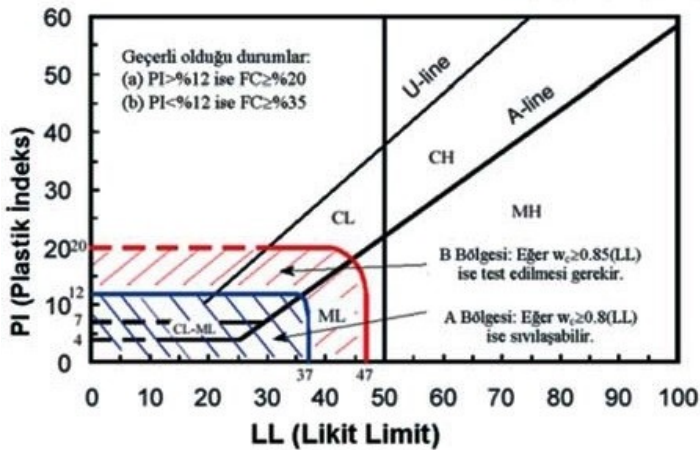
* Casagrande aleti ile belirlenmiş olan likit limit değerleri

1999 Kocaeli depreminin ardından Bray ve ark. (2004) tarafından Adapazarı'nda yapılmış çalışmalar , sıvılaşma olan zeminlerin bazılarının hem Andrews ve Martin (2000) hem de Çin standartlarına (Wang, 1979) göre sıvılaşmayacağı düşünülen kısımda olduğunu göstermiştir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Şekil 4.3, bu çalışmanın sonuçlarını göstermektedir.



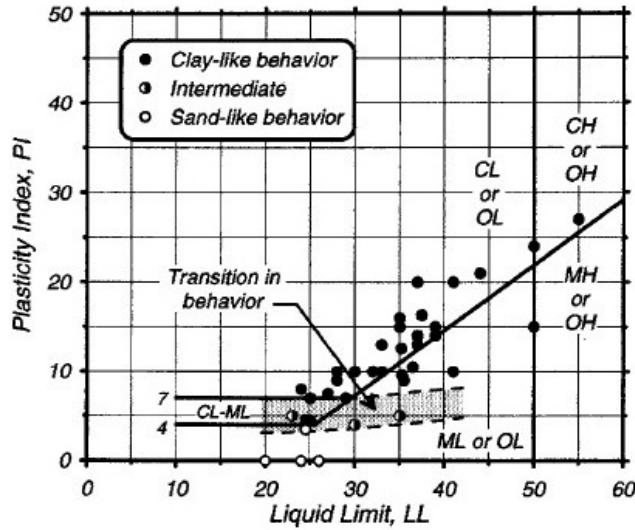
Şekil 4.3. Kocaeli depremi sonrasında alınan test sonuçları (Ecemiş, 2011)

Bu çalışmalardan elde edilen verilerden yararlanarak Seed ve ark. (2003) , ince daneli zeminlerde sıvılaşabilirliğin değerlendirmek için Şekil 4.5'te sonuçları gösteren bir çalışma yürüttüler.



Şekil 4.4. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi (Çetin ve Unutmaz, 2004)

Boulanger ve Idriss (2006), Çin ve benzeri ampirik esaslı standartların, ince daneli zeminin kum ve kil gibi davranışları arasında yeterli bir ayrım yapamadığını ve bu nedenle bu standartların kullanılmaması gerektiğini söylüyor. Boulanger ve Idriss (2006), silt ve kil zeminlerin sismik davranışını incelemek için Şekil 3.11'de gösterilen araştırmayı yürüttüler. Bu çalışmada, $PI > 7$ olan ince taneli zeminlerin kil benzeri bir davranış sergileyeceği belirtilmektedir. CL-ML sınıfındaki zeminler için bu kriter daha düşük olabilir, ayrıntılı laboratuvar testleri ile aksi belirtilmediği sürece, bu kriterleri karşılamayan, ince taneli zeminlerin sıvılaştırılabilir kum benzeri bir davranış sergileyebileceği belirtilmektedir.



Şekil 4.5. Atterberg limit çizelgesi (Boulanger ve Idriss, 2006)

- **Zeminin sıklık derecesi**

Zemin taneciklerinin istiflenme şekli, boşluk suyu basıncı oluşumunu ve zeminin sıvılaştırılabilirliğini önemli ölçüde etkiler. Zeminin sıklık oranı, sürekli yükler altında bulunan kohezyonsuz zeminlerin davranışlarını etkileyen en önemli bileşendir. Çizelge 4.2, Seed ve Idriss (1971) in çalışmaları sonucu bulunan relatif sıklık oranı ve zemin sınıflandırması arasında ki ilişkiyi göstermektedir.

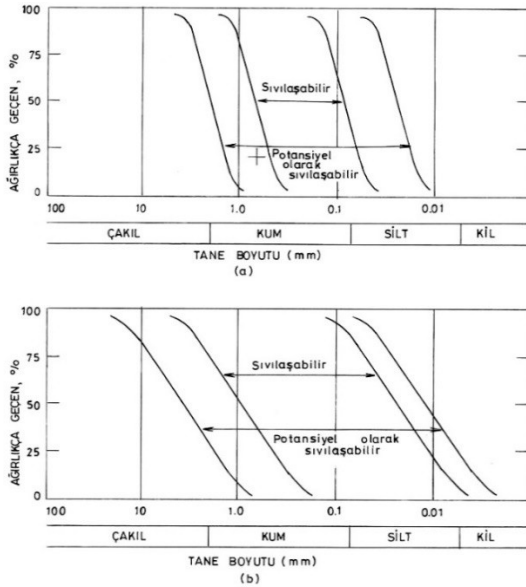
Çizelge 4.2. Relatif sıklık oranlarına göre zeminlerin sınıflandırılması (Seed ve İdriss, 1971)

Relatif Sıkılık (D_r)	Açıklama
85-100	Çok Sıkı
65-85	Orta sıkı
35-65	Sıkı
15-35	Gevşek
0-15	Çok gevşek

Karşılaştırmalı sıkılık değeri %65'ten fazla olan zeminlerde sıvılaşma olmaz (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

• Zeminlerin dane boyutu dağılımı

Çalışmalar, dinamik yükler altındaki kohezyonsuz zeminlerin davranışının büyük ölçüde tane boyutu ve tane dağılımından etkilendiğini göstermektedir. Sıvılaşma için uygun zeminler, gevşek yapılı ve kohezyonsuz kumlardır. 4.6a ve 4.6b, kötü derecelenmiş zeminlerin sıvılaşabilir tane boyutu aralıklarını göstermektedir. Bu şekilde, orta ve ince boyutlu kumların sıvılaşması çok kolay olduğu görülmektedir. Ek olarak, Evans ve Zhou(1995) nun yaptığı bir araştırmaya göre, kum-çakıl karışımlarının sıvılaşma direnci, çakıl muhtevasının daha yüksek olduğunda daha yüksek olduğunu göstermiştir (Tosun,2002).



Şekil 4.6. Sıvılaşmaya duyarlı dane boyutu aralığı (Iwasaki, 1986)

• Bina yükü

Yapılar kum zemin üzerine inşa edildiği durumda, yapıları taşıyan temellerin altında bulunan zeminler, yapı yüklerinin neden olduğu kayma gerilmelerinden etkilenir. Bu nedenle, zemin sıvılaşmaya daha duyarlı hale gelir. Rollins ve Seed (1990), bir temelin yakınındaki alanın, açık alanda bulunun aynı derinlikteki başka bir alana göre boşluk suyu basıncı oluşmasına karşı daha hassas olduğunu keşfettiler. Bu nedenle, belirli koşullar altında, deprem sarsıntısı sırasında bir yapı yakınındaki zemin daha önce sıvılaşabilir.



5. ZEMİNLERDE İYİLEŞTİRME

5.1. İyileştirme Tanımı

Zemin iyileştirme, zeminlerin mühendislik parametrelerinin herhangi bir yapı için yetersiz kaldığı durumlarda zemin özelliklerinin iyileştirilmesi yoluyla zemin yapısının elverişli hale getirilmesidir. Zemin iyileştirmesinin ana hedefleri, yapısal oturmaları azaltmak, taşıma kapasitesini artırmak, su geçirgenliğini azaltmak, sıvılaşma riskini azaltmak ve çevresel koşulları iyileştirmektir.

Zemin iyileştirme teknikleri mevcut yapı ve yeni yapılaşmalarda yaygın şekilde kullanılır. Bu teknikler, zayıf toprak zeminine sahip alanlarda proje tasarımı ve inşaatı için uygundur. Kullanılan yöntemlerde zeminlerdeki boşluk oranlarının azaltılması ve boşlukların farklı bileşimlerden oluşan karışımlar ile doldurulması sonucu taşıma kapasitesinin artırılması, zemin iyileştirmenin ana amacıdır. (Tunçdemir 2004).

Forekazıklar, taşkolonlar ve jet grout kolonları, zeminlerin iyileştirme yöntemlerinden en yaygın olanlardır. Bu uygulamalar, mevcut zeminin kayma dayanımını ve gerilme-deformasyon modülünü artırırken, geçirimsizliği, sıvılaşmayı, sıkışabilirliği, şişme ve büzülme azaltır. (Kurtuluş 2014).

Zayıf zemin grupları;

- Killi silt,
- Normal konsolide kil,
- Rastgele yerleştirilmiş dolgu,
- Gevşek kumlu zeminler.

5.2. Zemin İyileştirme Yöntemlerinin Seçimi

- Zeminin cinsi, yer altı suyu yüksekliği ve jeolojik ortamı
- Malzeme, iş gücü ve ekipman temininin kolaylığı

- Hedeflenen iyileştirmenin türü ve derecesi
- Projenin boyutları / iyileştirme maliyeti, iyileştirme süresi
- Civar yapılara etkileri

5.3. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Zemin Güçlendirme: Farklı malzemeler kullanılarak zemin güçlendirilir.

- Taş Kolon
- Zemin Ankrajları
- Jet Grout
- Derin Karışım
- Donatılı Zeminler

Zemin İyileştirme: Zemin boşluklarının mekanik araçlarla azaltılması ve çeşitli bileşimlerden oluşan karışımlar kullanılarak doldurulması.

- Drenaj
- Çimento, Kireç ve Bitüm ile stabilizasyon
- Kompaksiyon

5.3.1. Zemin güçlendirme

5.3.1.1. Taş kolonlar

Her tür arazide kullanılabilir. İstenilen derinliğe kadar kuyu, vibroflot, burgu ve delgi aletleri kullanılarak zemin içinde açılır. Granüler malzeme, kuyu tabanından itibaren kademeler halinde sıkıştırılır ve rijit kolonlar oluşturur.

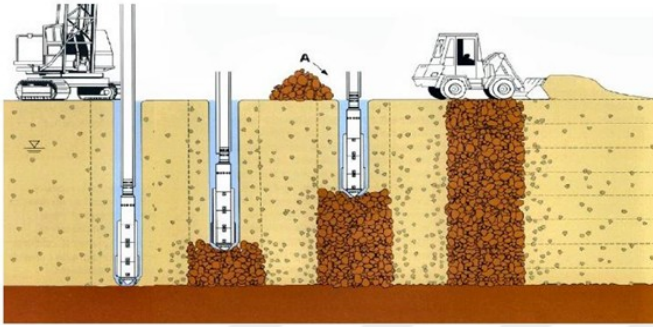
Derinlik: Maks. 20 m, Kuyu çapı: 0.60 -1.0 m'dir.

20-75 mm, kırmataş, tabii kaba çakıl agregası ya da çakıl-kum karışımı kullanılır.

Yumuşak kilde boru çakma ve içi doldurularak çekme yöntemi sıklıkla kullanılır.

Kohezyonlu zeminlerde kullanılan taşkolonlar;

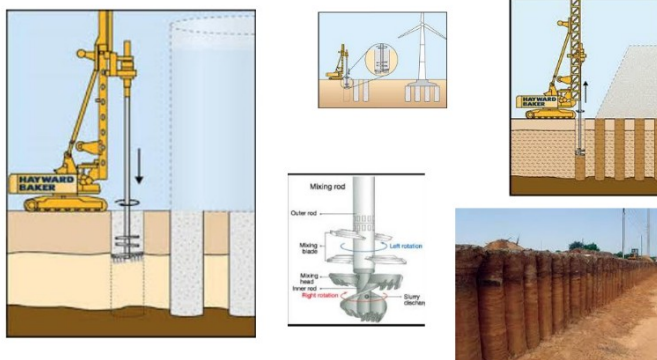
- Düşey dren olarak çalışır.
- Taş kolonlar ile ıslah edilmemiş zeminlerde oturmaları %50 azaltmak mümkündür.
- Taşıma kapasitesi artar,
- Konsolidasyon hızlanır,



Şekil 5.1. Taş kolon yöntemi

5.3.1.2. Derin karıştırma yöntemi

Yumuşak killerde uygulanan derin karıştırma, çimentolu kireçli malzeme kullanılarak zeminin yerinde karıştırılması yoluyla uygulanır. Özel karıştırma ekipmanları kullanılarak, killi yumuşak zeminin yerinde çimento şerbeti ya da kireç ile karıştırılması sonucu rijit kolonlar oluşturur. Bağlayıcı maddeler uçucu kül-çimento- kireç,yüksek fırın cürufu çeşitli katkılardır. Metodik olarak, ucunda bir palet bulunan içi boş özel burgular(auger)kullanılır.



Şekil 5.2. Derin karıştırma yöntemi

Uygulama alanları; kazı çukurlarının desteklenmesi, rıhtım yapılarının, tünel zeminlerinin desteklenmesi, geçirimsizlik perdeleri oluşturma, sıvılaşmanın önlenmesi durumu ve temel takviyesidir. Uygulama derinliği ~30 m'dir.

5.3.1.3. Jet-Grout metodu

Jet- grout metodu, yüksek basınç uygulanarak (700 kg/cm^2) küçük kuyulardan çimento şerbetini pompalayarak zemini bıçak gibi kesen silindirik kolonlar oluşturulur. Bu kolonlar, kazığa benzer şekilde zeminin taşıma kapasitesini artırırken aynı zamanda sıkışabilirliğini azaltmaktadır. Birbirleriyle kesiştirildiğinde, sızdırmazlık perdeleri oluşur. Kuyu, öngörülen derinliğe kadar özel delgi makinaları kullanılarak açılır. Otomatik valfler, delgi tijinin ucundaki delikleri kapatmak için kullanılır. Genellikle 400-600 bar basınçla, püskürtme nozulları monitör olarak bilinen özel parçaya jet enjeksiyonu yapar. 1.5 ya da 4.0 mm çaplı nozullardan ya da 250 m/sn hızla çıkan enjeksiyon malzemesi, taşıdığı yüksek kinetik enerji ile çevresindeki zemini parçalar. İstedığınız mukavemette, boyda ve çapta kolonlar yapılabilir.

5.3.1.4. Donatılı zemin yöntemi ve geosentetikler

Günümüzde geoteknik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ve en hızlı şekilde gelişen ve değişen malzemelerin başında polimerik malzemeler gelmektedir. Fabrika ortamında üretilen polimerik malzemeler, zeminle birlikte kullanıp geoteknik projelerin uygulanmasında önemli role sahiptir. Bu polimerik malzemeler, ortam performansını artırarak geleneksel yöntemlere oranla daha düşük maliyetli estetik çözümler sunar. Bahsi geçen polimerik malzemelerin önde gelenleri, geniş bir malzeme ailesinden gelen geosentetiklerdir.

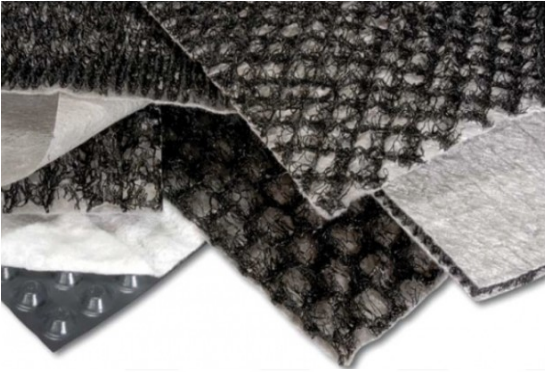
GEOGRİD



GEOMEBRAN



GEOKOMPOZİT



GEOSSEL



Şekil 5.3. Geosentetik malzeme örnekleri

5.3.1.5. Geogrid

Yüksek deformasyon modüllü bu polimerlerin üretimi için gerekli yöntemlerdeki ilerlemeler, bu malzemelerin donatı olarak kullanılmasına izin vermiştir. En önemli kullanım alanları güçlendirmedir. Bu alanda zemin güçlendirme için çeşitli yöntemler, malzemeler ve teknikler olmasına rağmen, geogridlerin kullanımı hızla artmaktadır. Zeminin içinden geçmesine izin verilecek genişlikte, boylamasına-enlemesine bulunan şeritler arasında bulunan mesafeler, geogridlerin en önemli özelliğidir. Geogrid şeritlerinin dayanımı, bağlanma dayanımı kadar önemlidir. Geogridler, zeminin deliklerden geçmesine izin verir. Bu nedenle enine şeritlerde zahiri bir kohezyon ve pasif dayanım oluşturur. Bu şeritler aynı zamanda geogridi zemine bağlar. Geogridler çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Bunlar, kaplamasız yollarda agrega kullanımı, toprak dolguların ve dolgu barajlarının güçlendirilmesi, heyelanlarının onarılması, kaplamaların yapılması ve kaplamaların yapılması. Bunlar, agregaların altında, toprak dolgunun ve dolgu barajlarının

güçlendirilmesinde, heyelanların onarılmasında ve asfalt kaplamalarında asfalt donatısında bulunabilir.

5.3.1.6. Geomembran

Genel olarak geçirimsizliğin sağlanmasında geomembranlar kullanılır. Geomembranlar yine saha uygulamalarında geçirimsizliği sağlar. Çevre, geoteknik ve hidrolik alanlarda geomembranlar aşağıdaki şekillerde kullanılır: sıvı atıklar ile su kanalları için kaplama malzemeleri; tünellerde geçirimsizliği sağlamak için kaya dolgu barajları; şişen zeminleri kontrol etmek; dona hassas zeminleri kontrol etmek; ve asfalt üst kaplamaların altında sızdırmazlık sağlayan bir tabaka olarak.

5.3.1.7. Geokompozit

Geokompozitler, genellikle iki veya daha fazla geosentetik malzemenin birleştirilmesi yoluyla oluşturulurlar. Bu metod, iki ila daha çok örgüsüz geotekstil malzemesinin birleştirilmesini içerir. Kullanılan geogrid malzemeyi güçlendirirken, örgüsüz geotekstil ayrımı ve filtrasyonu gerçekleştirir. Demiryolları, karayolları ve istinat yapıları, geogrid ve geotekstil malzemelerinin birleşmesinden oluşan geokompozit malzemelerin yaygın kullanım alanlarıdır.

5.3.1.8. Geosel

Geocell, yüksek yoğunluklu polietilen alaşımından yapılmış, petek dokulu bir zemin güçlendirici ve erozyon önleyici malzemedir. Hücresel dolgu sistemi için kullanılır. Genel olarak, eğimli yüzeylerde su ve rüzgar etkisiyle toprak kaybının önlenmesi için kullanılır.

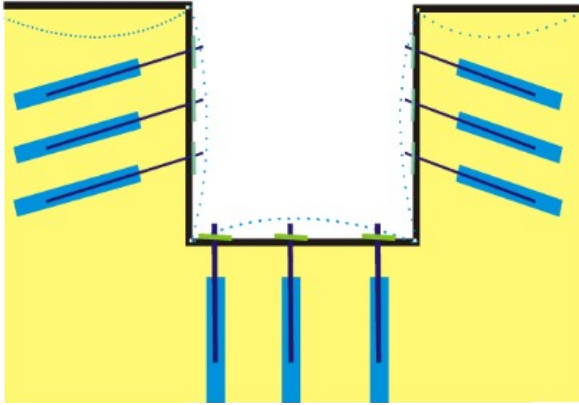
Hızlı drenaj ve dolgu malzemelerinin kolay sıkışması nedeniyle delikli yapıda yapılmıştır. Geogrid mantığı kullanılarak çalışan geocell, geogridleri zemin üzerinde güçlendirmek ve istinat duvarlarında donatı sağlamak için kullanılır.

Sistemdeki dolgu içleri, yüzey yüküne ve kullanım türüne göre kum, toprak, taş, beton, çakıl kullanılarak doldurulur.

5.3.1.9. Zemin Ankrajları

Ankraj, donatıların zemin ya da kayanın içine yerleştirilme işleminden sonra çimento enjeksiyonuyla ön germeye tabi olan donatı çubuklarının çekme gerilmelerinin zemine ya da kayaya aktarma işlemidir.

Ankraj, tipik olarak üç parçadan oluşan bir gergi çubuğu veya telden oluşur. Ankraj çubuğunu zemine yerleştirmek için çevresine çimento enjeksiyonu yapılmış kafa kısmı birinci kısımdır. Ankrajın dış tarafında bulunan ikinci parça, kafa olarak bilinir. Ankraj gücünü sathı aktaran bir başlık içerir. Ankraj çubuğunun bu iki parçası arasında kalan uzunluk, tipik olarak yalnızca kuvveti iletmeye yarar.



Şekil 5.4. Zemin ankrajları

5.3.2. Yüzeysel zemin iyileştirme yöntemleri

İnce tabakalar halinde olan katkılı ya da katkısız zeminin karıştırılması ve drenajı, yüzeysel zemin iyileştirmesi olarak bilinir Genel olarak, drenaj, zemin üzerindeki suyun uzaklaştırılması sürecidir.

5.3.2.1. Drenaj

Bir zeminin faydalı özelliklerinin ortaya çıkması ve geliştirilmesi, su muhtevasının azaltılması yoluyla gerçekleşir. Su miktarının artması, özellikle kohezyonlu zeminlerde

taşıma gücünü ve mukavemeti azaltır. Bu nedenle, zeminin sağlam ve istikrarlı olarak korunması, sahadan suyun uzaklaşması ve sahaya suyun girmemesini gerektirir. Bunun gerçekleşmesi için, gerekli drenaj alt yapısının mümkün olduğu kadar benzer bir su ortamına sahip olmasını sağlamalıdır. (Uzuner, 1995)

5.3.2.2. Kompaksiyon

Kompaksiyon (sıkıştırma), zemin taneciklerinin birbirine yaklaşmasını ve aralarında ki hava boşluklarının azaltmasını sağlamak için mekanik araçlar kullanılarak gerçekleştirilir.

Zeminlerde sıkıştırılma yapılması, birim hacim ağırlığını artırarak mühendislik özelliklerini geliştirir. Danelerin birbirlerine yaklaşması ve sıkışması mümkündür, ancak daneler statik ve ya dinamik etkiler altında hareket ederler. Kompaksiyon enerjisi, zemin içindeki suyun miktarına bağlıdır.

Zeminin kompaksiyon durumunu ölçmek için kuru birim hacim ağırlığı kullanılır. Kuru zeminlere su ilave edildiğinde, daneler arasındaki sürtünme durumu azalır ve daneler daha kolay yerleşir ve sıkışır. Kuru birim hacim ağırlığıda artış gösterir. Zemine sürekli olarak su ilave edildiğinde, zemin boşluklarındaki su miktarı, kuru birim hacim ağırlığındaki artış yerine azalmaya neden olur. Bu, zemin tamamen suya doymun olduğunda gerçekleşir. Zeminin sabit bir sıkıştırma enerjisi ile elde edilen kuru birim hacim ağırlık değeri optimum su muhtevasıdır. Zeminin en kolay sıkışabileceği yer sudur. Optimum su muhtevası, aynı zeminin kompaksiyon enerjisine bağlı olarak değişmektedir.

5.3.2.3. Çimento ile stabilizasyon

1920'lerde Amerika Birleşik Devletleri'nde eyalet karayollarının çimento kullanarak zemini geliştirilmeye başlaması, zemin iyileştirme sürecini başlatmıştır. Birincil reaksiyonlar nedeniyle çimento zeminle güçlü bağ oluşturur. Reaksiyonunun etkinliğini azaltmaya yönelik hem laboratuvar da hem de arazide altı saatten fazla sıkıştırma işleminden kaçınılır. Kil mineralinin yapısı ve ortamdaki amorf malzemeler ikincil reaksiyonlar yoluyla değiştirilir.

Çimento stabilizasyonu, farklı zeminlerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılır. Yeterli karışım elde etmek en önemli sorundur. Çimento muhtevaları, arazi verimindeki azalma önemsenerek laboratuvar deneyleri ile minimum değerin üzerine çıkarılır. Arazide karıştırılan verimin oranları yüzde altmış ila seksen arasında değişmektedir. Serbest basınç mukavemeti, çimentoya bağlı olarak lineer şekilde artar.

Çimento eklendiğinde kumların ve çakılların geçirgenliği önemli ölçüde azalır, ancak siltlerde, siltli killerde ve killerde geçirgenlik artar. Arazide istenen dayanıklılığı ve mukavemeti sağlamak için çimento muhtevasını %1,50'ye kadar artırabilirsiniz. (Uzuner, 1995).

5.3.2.4. Kireç ile stabilizasyon

Kil içeren zeminlerin büyük bölümü %3-8 sönmüş kireç eklenmesine yardımcı olur. Kil mineralleri silikat jeli oluşturur. Kil mineralinin silisi, kireçle reaksiyona girerek çıkarılır. Silikat jel, kil tabakalarını ve zemin boşluklarını kaplar ve kristalleştikçe tobermorit ve hillebrandit olarak bilinen hidratlı silise dönüşür.

Zeminde ki dayanıklılık bir yıl kadar sürer. Kireç, zemin üzerindeki serbest basıncı artırır. İnce kumlarda ve löslü zeminlerde CaOH_2 kireçten daha iyidir. Çünkü hidratasyon sürecinde su tüketir. Hidratasyon belirli miktarda ısı açığa çıkarır ve zemin kurur. Kireçle birlikte toz haline getirilmiş cüruf ve uçucu kül kullanılır. Reaksiyon hızı yüksek olmadığı için iyileştirme sürecinde sorun çıkarmaması da bir avantajdır. Kil içeriğinin yüzde onuna bir kireç ilave edilmelidir.

5.3.2.5. Bitüm ile stabilizasyon

Bitüm, ince dane zeminle karıştırıldığında zemin geçirimsiz hale gelir. Kireç, reçine ve çimentodan pahalı olduğundan daha az kullanılır. Bu yöntem, plastisite indisi 18'den az olan zeminler için idealdir. Bu şekilde daneler, asfaltla kaplandığı gibi daneleri bir araya getirme görevi görür. Danelerin yüzeyini kaplayan asfalt, danelerin sudan yumuşamasını engeller, su ve rüzgar erozyonuna karşı daha dayanıklı hale gelir. (Uzuner, 1995).

Bitümlü emülsiyonlar genellikle kuru iklimlerde kullanılabilir. Böyle zeminler için su ve bitümlü bağlayıcı kullanılır. Britanya'da, çimento ile bitüm emülsiyonunun karıştırılması için bir teknik gelişmiş ve bu teknikle hazırlanan emülsiyon, ince daneli zeminler ile karıştırıldığı zaman bir süre sabit kalarak zeminin her tarafına bitümü dağıtır. Emülsiyona katılan çimento, emülsiyonu parçalar, zemindeki suyu emer ve zeminine mukavemet verir. Normalde emülsiyon %5-8 ve çimento %3-5 arasında karıştırılır. Zemin-çimento ve zemin-bitüm özellikleri aynı değildir. Sert olmasına rağmen su geçirmezdir.

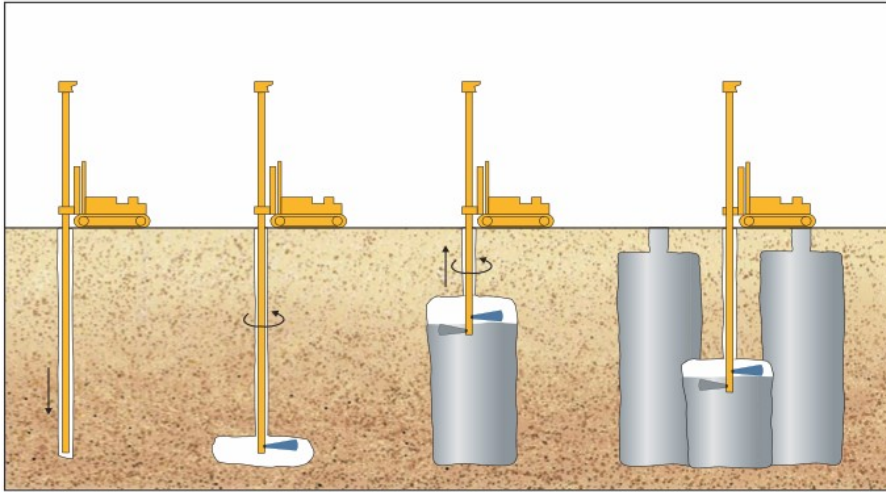
5.4. Sıvılaşma Olan Zeminlerde Zemin İyileştirme Yöntemleri

İnce daneli ve kohezyonsuz olan zeminlerin ve kohezyonlu silt-kil karışımından oluşan zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin yüksek olması nedeniyle, titreşim veya deplasmanla sıkıştırma en yaygın kullanılan iyileştirme yöntemidir. Bir diğeri ise bağlayıcı madde ile zemin içinde oluşturulan rijit kolonlardır.

Bu çalışmada sıvılaşma riski taşıyan zeminler için sıvılaşmaya karşı önlem yöntemlerinden olan jet grouting yönteminin zemin iyileştirmedeki etkisi incelenmiştir.

6. JET ENJEKSİYONU

Jet enjeksiyonunda, tasarım derinliğine kadar su ile delgi oluşturur ve çimento şerbeti, delgi de kullanılan tijlerin uçlarındaki nozullardan zemine püskürtülür. Bu sırada, tijler yine zemin üzerinde aşağıdan yukarıya doğru belirli bir hızla döner. Bu nedenle, zemin içinde belirli bir boy ve çapta silindirik bir kolon oluşturulur. Yapım sırasında, çimento jeti ile birlikte hava ve su jetleri de kullanılır. Bu mekanizmanın gösterdiği gibi jet enjeksiyonu aslında bir karıştırma yöntemidir. Bu nedenle, zemin üzerinde beton-zemin karışımı kullanılarak yüksek dayanıma sahip ve geçirimsizlik seviyesi düşük olan kolonlar oluşturulur.



Şekil 6.1. Jet enjeksiyonu kolonların oluşturulması

Jet enjeksiyon sonucu zemin içinde oluşan kolonlar, taşıma ve oturma problemi kontrolünde kullanılabilir. Yumuşak zeminli olan tünel yapılarında tünel kesiti üstünde taşıyıcı bir şemsiye olarak da kullanılabilir.

6.1. Jet Grout Teknikleri

Jet kurutma teknikleri, ıslah edilecek zeminin koşullarına ve oluşturulmak istenen jet kolon özelliğine göre değişebilir. Dört farklı jet grout yöntemi vardır, her biri kullanım amacı ve kullanım şekline göre değişiklik gösterir.

6.1.1. Tek akışkanlı olan jet enjeksiyonu

Enjeksiyon akışkanı yatay nozuldaki yüksek yoğunlukta pompalanır. Bu enerji (yaklaşık 200 m/sn) zeminde karışım ve erozyona neden olur ve enjeksiyon kolonu oraya yerleştirilir. Granüler zeminlerde 0.5 ila 1 metre kolon çapları yapılabilir. Siltli, kumlu yumuşak olan zeminlerde yüksek çaplar mümkündür. Kohezyonlu zeminlerde tek akışkanlı jet enjeksiyonu faydalı olmayabilir.

6.1.2. Çift akışkanlı olan jet enjeksiyonu

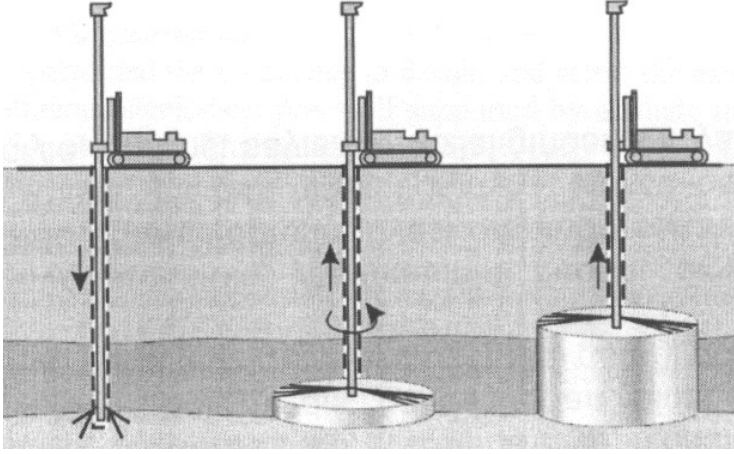
Bu sistemin iki çıkışında hava ve enjeksiyon malzemesi farklı deliklerden zemine dağıtılır. Kolonlar, zeminin karıştırılması ve yer değiştirmesi yoluyla oluşur. Hava, daha büyük çaplı kolonların oluşturulmasına izin verir. 1 metreden büyük çaplar yapılabilir. Kohezyonlu zeminlerde çift akışkanlı sistemler daha faydalıdır.

6.1.3. Üç akışkanlı olan jet enjeksiyonu

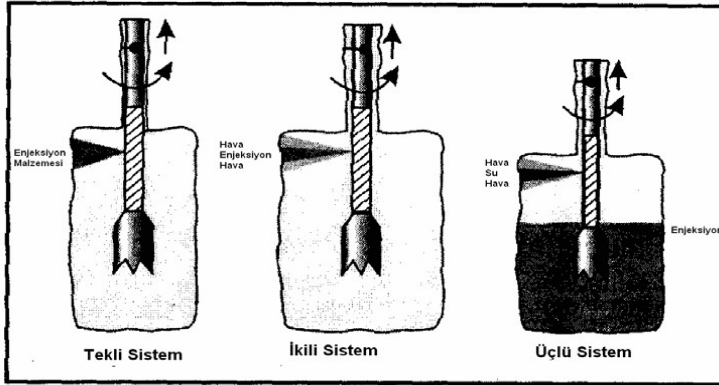
Yüksek basınçla enjeksiyon malzemesi çeşitli borulardan pompalanır. 1.5 m'den büyük enjeksiyon kolonları yapılabilir. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, kohezyonlu zeminlerde en iyi sonucu sağlar.

6.1.4. Süper jet enjeksiyon

Yüksek basınç, enjeksiyon malzemesini, havayı ve delici akışkanı zemine pompalar. Yüksek yoğunlukta olan enjeksiyon malzemesi delici akışkanı hava ile birlikte zemine pompalarken karışır. Çok düşük devirle dönen silindir kafa, 5 ila 3 metre çapında kolonlar oluşturur. Maliyet açısından avantajlıdır.



Şekil 6.2. Jet grout kolonlarının oluşturulma biçimi



Şekil 6.3. Jet enjeksiyon sistemleri

6.2. Jet Grout Uygulama Parametreleri

Jet grout yönteminde yapılan iyileştirme, kullanılan ekipmanların özelliğine ve zeminin cinsine bağlıdır. Zeminlerin özellikleri, oluşturulmak istenen kolonların çapı, jet grout metodu ve kolonun taşıma kapasitesi işlem parametrelerini belirler. Bu özellikler, dozaj, enjeksiyon basıncı, dönme ve çekme hızlarıdır.

6.2.1. Enjeksiyon basıncı

Enjeksiyon basıncı üç kategoriye ayrılır: yüksek basınç: 400-700 bar, orta basınç: 300-400 bar ve düşük basınç: 200-250 bar. Basınç, istenilen çapın elde edilmesinde en önemli unsurdur.

6.2.2. Dönme-çekme hızı

Bu metodoloji için dönme ve çekme hızları en iyi işlem parametreleridir. Dönme işlemi, tijin kendi ekseni etrafında belli bir hız ile dönmesidir. Tijlerin dönüş hızlarının belirli bir değerden fazla olmaması karışımı homojen hale getirir. Tij çekme hızı da iyileştirilen her bölgede sürekli olmalıdır. Tijin dönme hızı, 10 ila 20 devir/dakika arasında değişebilir ve oluşan kolon çapını değiştirme işlemi için artırılabilir veya azaltılabilir.

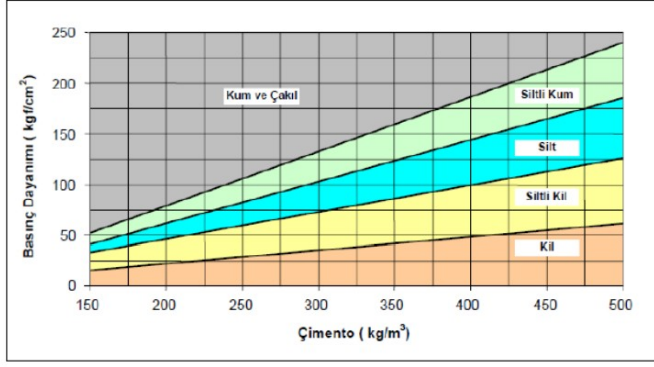
Çekme işlemi, delgi makinasında bulunan tijlerin jet grout kolonlarının alt kotuna indirilmesi ve enjeksiyon işlemi başladığında belirli bir hızla yukarı çekilmesidir. Sürekli ve kademeli çekme seçenekleri bulunmaktadır. Kademeli çekmede her bir kademe 4 cm ve 6-10 sn çekme hızı vardır. Sürekli çekme, enjeksiyon başladığında tijin belirli bir hız ile yukarı doğru çekilmesi olayıdır. (Melegary ve Garassino 1997).

6.2.3. Dozaj

Su-çimento oranı 1 olan karışımın özgül ağırlığı $1410-1570 \text{ kg/m}^3$ '1'dir. Bu oran, seçilmiş olan yöntem, uygulanacak ıslah yöntemi ve jet grout kolonlarının dayanımına bağlıdır.

6.3. Enjeksiyon İşletim Parametrelerinin Seçimi

İlk olarak, enjeksiyon uygulanacak zemine göre seçilecek olan jet grout kolonunun hangi aralıkta basınç dayanımının olması gerektiğini belirlenmelidir. Bu basınç dayanımını belirlemek için bir metrekare enjeksiyon karışımı içinde bulunan çimento miktarı belirlenmelidir. İstenilen dayanımı elde etmede gerekli çimento miktarı, Şekil 6.4'teki grafik yardımı kullanılarak pratik olarak belirlenir.



Şekil 6.4. Farklı zeminlerin istenilen basınç dayanımında çimento miktarındaki değişim

İstenen kolon çapının belirlenmesi ve bir metre boyundaki kolona harcanacak çimento miktarının belirlenmesi ikinci adımdır. Daha sonra karışıma dahil edilecek öğelerin belirlenmesi yapılır. Elde edilen karışım akışkan bir kıvamda olmalıdır. Daha akışkan bir karışım su ve çimento oranı arttıkça elde edilir, fakat bu karışımın mukavemetinin düşmesine neden olur. Jet grout yöntemi uygulanacak zeminlerin dane çapları, geçirimsizliği ve mevcut su durumu karışıma eklenecek bileşen oranlarını belirler. Bu sıralanan işlemlerden hesaplanan değerler, 1 m'lik jet grout kolonuna gerekli karışım miktarlarını belirler.

Elde edilen basınç 40 MPa ile 50 MPa tipik olarak tercih edilir fakat, basınç değeri tespit edilmesinde önceki deneyimler dikkate alınmalıdır. Tayin edilecek basınç, makinelerin püskürtme kapasitesi ve uygulanacak zemine bağlıdır. Bütün bu faktörlerin en üst seviyede olması, oluşturulan kolon çapının en büyük olmasını sağlar.

Şekil 6.4'teki akım/basınç grafiğinde, enjeksiyon karışımının akımını pratik olarak hesaplamak için püskürtme memelerinin sayısını ve çapını gösterir. Daha önce hesaplanan veriler kullanılarak bir m kolon oluşturmak için gereken süre belirlenir. Makinenin püskürtme parçaları yavaş yavaş geri çekilir. Bu kademeler genellikle 3 cm'den 8 cm'ye kadar değişmektedir. Makine parçaları yukarı çekilirken, istenilen kolon çapına ulaşmak için işlemin hangi kademede gerçekleşebileceğini belirlemek için bir süre belirlenir. Makinenin püskürtme aksamaları belirli bir hızda yukarıya çekilir.

Öncelikle bu hızın belirlenmesi gerekiyor. Bu hızda her kademede aksamalar bir veya iki tur atmalıdır. Uygulanacak zeminde deneme enjeksiyonları yapılır ve yukarıda

belirtilen değerler imalat için kullanılır. Bu denemeler üç farklı yerde , dört kademeden oluşacak şekilde yapılır. Her denemede karışımki malzeme miktarları, , su yada hava akımları ,enjeksiyon malzemesi, ve kademeler arası süre farklı olacağından, bu denemelerin sonuçları farklı olacaktır (zkan 2006).

6.4. Uygulama Kriterleri

- **evre bilgileri:**

evre bilgileri altyapı kanallarının tespit edilmesinde nedeniyle önemlidir.

- **Malzeme:**

Su, bentonit kum, imento ve katkı malzemesi gereklidir. P 32,5 imento genellikle enjeksiyonda kullanılır. Kullanılan su, katkısız asit ve çimentoya zarar verebilecek minerallerden oluşan bir karışım içermemelidir.

- **Ekipman:**

Uygulanacak zemin tipine göre delici makine, vidye, delici u matkap ve tij gereklidir.

- **Enjeksiyon karışımı:**

Enjeksiyon karışımı, belirli oranlardaki su ve çimentoyu mikserde karıştırarak yapılır. Dolacak alanın çok fazla olması durumunda karışıma %25 ila 40 oranında kum eklenir.

- **Enjeksiyon şekli:**

Projede belirlenen yere ait teknik bilgiler kullanılarak enjeksiyon karışımı hazırlanır ve basılır. Bu, delici makine yardımıyla açılan kuyunun içine yerleştirilen tij ve matkap ucundan enjeksiyon karışımını zemine bastırmak için yapılır. Projeye göre, enjeksiyon karışımının tatbik noktası üzerinde kuyuya paketler yerleştirilerek zemine enjekte edilir.

Zeminde enjeksiyon karışımı yeterli miktara geldikten sonra paketler yukarı alınır ve enjeksiyon karışımı üst seviyeye taşınır.

- **Delme:**

Kuyu ağız delme aşamasında yer altı su seviyesinin daha altında olmalıdır. Delme işleminin türü, delinecek zeminin özelliklerine göre belirlenir. Bu nedenle, enjeksiyon sırasında bilinen tüm darbeli rotary teknikleri kullanılabilir. Uç takımın soğutulma işlemi ve zeminin enjeksiyon işlemine önceden hazırlanması, delme işlemini kolaylaştırır. Belirli derinliğe gelindiğinde, delme ve su basma işi durur. Çelik bilye delme borusunun içine yerleştirilir ve jet enjeksiyon malzemelerini taşıyan monitör olarak bilinen bir takıma çevrilir. Yüksek basınçlı enjeksiyon pompalandıktan sonra enjeksiyon fazı başlayacaktır. Yüksek hızlı enjeksiyon, zemin üzerindeki doğal yapıları parçalar ve doğal zemine karışır. Düşey kolonlar, delici takımın dönme işlemi ile sabit hızla oluşan çekme hareketinin birleştiğinde oluşur.

- **Daneli zeminde uygulanması**

Enjeksiyon basıncı Daneli zeminde genellikle 400-500 bar'dır ve nuzzle çapı 2,5-3 mm'dir. Bu, daha fazla enjeksiyon maddesinin zemine girmesini sağlar.

7. MATERİYAL VE YÖNTEM

7.1. Materyal

7.1.1. İnceleme alanının hakkında

Bu çalışma kapsamında incelenen alan; Aydın ilinde, Koçarlı ilçesi sınırlarında; 37.763863° enlem ve 27.702508° boylamda yer almaktadır. İnceleme alanı ve civarına ait uydu görünümü Şekil 7.1’ de verilmektedir. Sondaj verileri bulunan parselde zemine dinamik yükler altında analiz ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Zemin dinamik davranış analizleri, Plaxis programında iyileştirme öncesi ve sonrası zemin yüzeyinde ölçülen ivme ve deplasman değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sıvılaşma analizleri yapılmış olan alanda iyileştirme sonrası sıvılaşma kontrolü yapılmıştır. Söz konusu alanda yapılan sahaya özel zemin davranış analizlerine ait veriler başlıklar halinde verilmiştir.



Şekil 7.1. İnceleme alanı ve civarına ait uydu görünümü

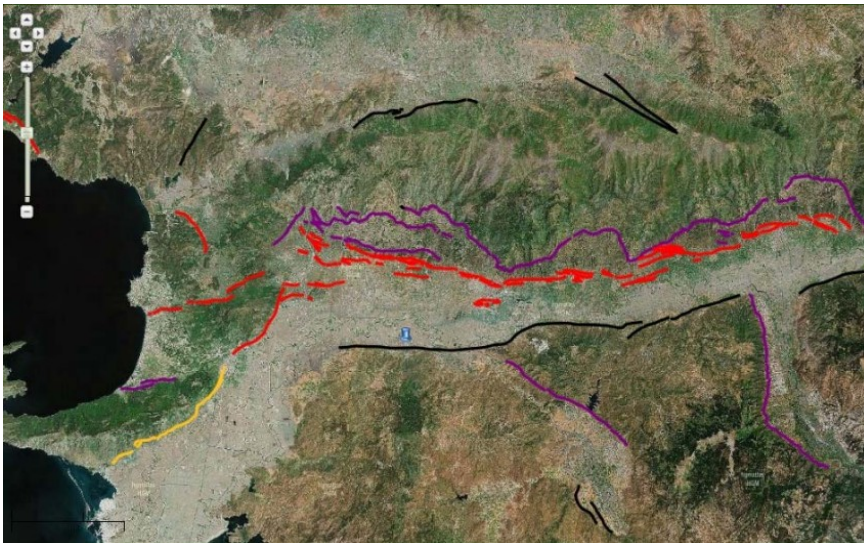
Söz konusu inceleme alanını için elde edilen veriler rapor kapsamında yapılan çalışmaya esas; jeolojik, jeofizik ve geoteknik verileri bölgede yapılan Zemin Etüt raporundan alınmıştır. Rapor kapsamında incelenen proje sahasına özel deprem etkisi

altındaki zemin davranış analizleri 2018 tarihinde yayınlanmış olan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine (TBDY-2018) uygun olarak hazırlanmıştır.

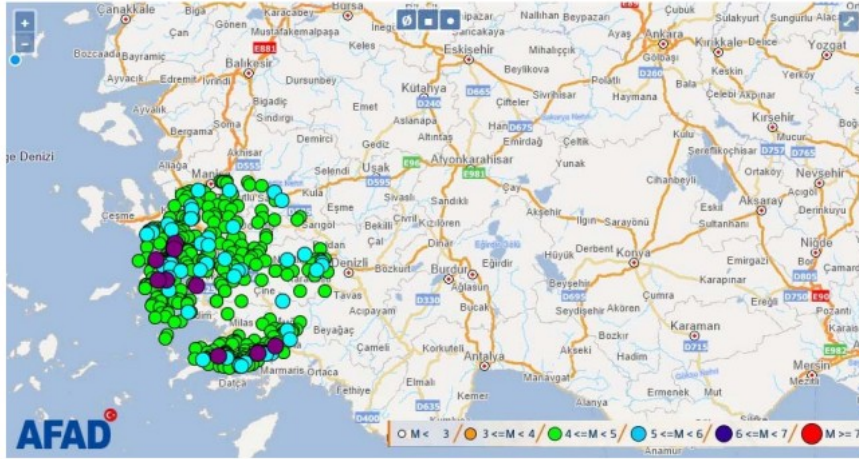
7.1.2. İnceleme alanının depremselliği ve geçmiş depremler

İnceleme alanını merkeze alacak şekilde (Enlem:37.763863,Boylam:27.702508) yaklaşık 100 km yarıçapta bir alanda MTA diri fay haritası ve bölgede gözlemlenen moment magnitudü (M) 4.0'ten büyük depremler incelenmiştir. (<http://yerbilimleri.mta.gov.tr/anasayfa.aspx> ve AFAD veri tabanından (<https://deprem.afad.gov.tr/depremkatalogu>).

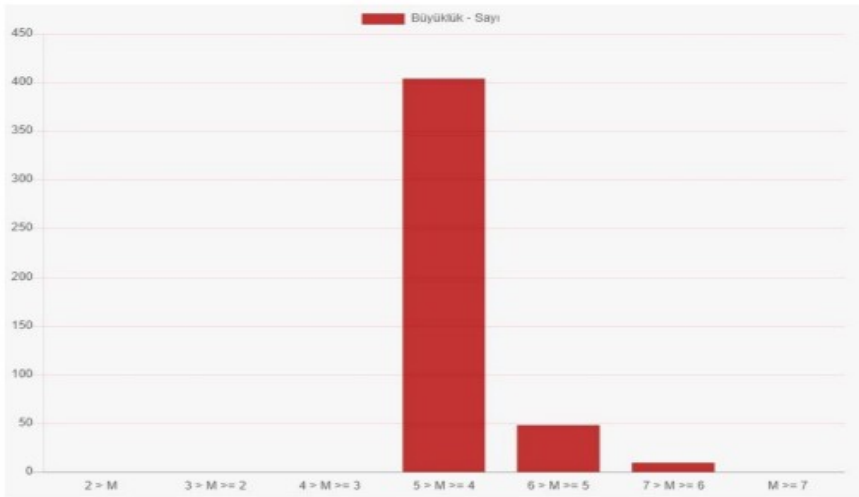
Şekil 7.2.'de MTA fay haritası verilmiştir. Proje sahasının yaklaşık 13 km kuzeyinden Büyük Menderes Graben Sistemi geçmektedir. Bu fay sisteminin üretebileceği maksimum moment büyüklüğü Türkiye Sismik Tehlikesi Haritası hazırlanırken 6.0-7.0 olarak alınmıştır (Akkar vd., 2017). Şekil 7.3.'te bölge civarında meydana gelen M+4 depremler gösterilmiştir ve bu veriye ait istatistiksel bilgi Şekil 7.4.'te verilmiştir. Anlaşılabacağı üzere bölgede depremler genellikle uzak mesafelerde olmuş ancak bölgenin faylanması dikkate alındığında yakın mesafelerde oluşacak depremlerde olasıdır. Proje kapsamında sismik tehlike analizi yapılmayacağından bu bilgiler kayıt seçiminde kullanılacaktır.



Şekil 7.2. İnceleme alanı ve civarındaki diri fay yerleşimi (MTA'dan alınmıştır)



Şekil 7.3. Bölgede meydana gelen M+4 depremleri (AFAD'dan alınmıştır)



Şekil 7.4. Bölgede meydana gelen M+4 depremlerin sayı histogramı (AFAD'dan alınmıştır). Ana şok-artçı şok ayrımı yapılmamıştır. (1900-2020)

7.1.3. Zemin değerleri

Parsel için zemin özelliklerini belirlemek amacıyla alanda 4 ayrı noktada derin sondaj çalışması ve sismik veriler içinde MASW yapılmıştır. Aşağıda sondaj çalışmalarına göre litoloji tanımı verilmektedir.

Çizelge 7.1. Sondaj çalışmaları sonucu elde edilen zemin profili

Kuyu No	Sondaj Kotu	Temel Kotu	Derinlik	Litoloji
SK-1	30	19,95	0-0,5	Dolgu Malzemesi
			0,5-34,5	Kahverenkli az çakıllı kötü derecelenmiş az killi kum-silt karışımı
SK-2	30	19,95	0-0,5	Dolgu Malzemesi
			0,5-25	Kahverenkli az çakıllı kötü derecelenmiş az killi kum-silt karışımı
SK-3	30	19,95	0-0,5	Dolgu Malzemesi
			0,5-34,5	Kahverenkli az çakıllı kötü derecelenmiş az killi kum-silt karışımı
SK-4	30	19,95	0-0,5	Dolgu Malzemesi
			0,5-25	Kahverenkli az çakıllı kötü derecelenmiş az killi kum-silt karışımı

Yapılmış olan temel sondajları ile diğer arazi çalışmaları sonuçları değerlendirildiğinde yüzeyden itibaren 0.5 metre kalınlıkta dolgu malzemesi, devamında ise kuvaterner yaşlı alüvyon birimlere ait yaklaşık 34,50 m ye kadar kahverenkli az çakıllı kötü derecelenmiş az killi kum-silt karışımı tespit edilmiştir.

Çizelge 7.2. Zemin birimlerinin SPT değerleri ve ortalaması

Derinlik (m)	SK-1	SK-2	SK-3	SK-4	SPT-N Ort
1,50	7	8	6	6	7
3,00	10	9	10	9	10
4,50	8	7	6	6	7
6,00	11	13	9	10	11
7,50	13	17	12	13	14
9,00	16	15	15	14	15
10,50	15	17	14	19	16
12,00	18	18	16	15	17
13,50	20	21	24	23	22
15,00	21	24	25	25	24
16,50	25	26	29	29	27
18,00	23	28	29	32	28
19,50	27	31	30	34	31
21,00	30	36	36	37	35
22,50	33	42	37	43	39
24,00	35		45		40
25,50	43		43		43
27,00	46		48		47
28,50	50		50		50
30,00	50		50		50

7.1.4. Laboratuvar deneyleri

Laboratuvar ortamında sondajlardan elde edilen numuneler üzerinde zeminin indeks ve dayanım özelliklerini belirlemek için Kıvam Limitleri, Elek Analizi, Kesme Kutusu Deneyleri yapılmıştır. Çalışma sahası plastik olmayan zemin (NP) olarak belirlenmiştir. Sonuçlar aşağıda tablo olarak özetlenmiştir.

Çizelge 7.3. Zemin birimleri elek analizi deney sonuçları

Kuyu No	Numune Tipi	Derinlik (m)	Silt-Kil (%)	Kum(%)	Çakıl (%)	Zemin Tipi
SK-1	UD-1	4.50-5.00	18,5	76,8	4,7	SM
	SPT-1	5.00-5.45	68,2	31,8	0	ML
	SPT-2	7.50-7.95	44,1	54,7	1,2	SM
	SPT-3	13.50-13.95	52,9	47,1	0	ML
SK-2	UD-1	4.50-5.00	31,7	63,2	5,1	SM
	SPT-1	5.00-5.45	33,4	63,8	2,8	SM
	SPT-2	6.50-6.95	50,9	47	2,1	ML
SK-3	UD-1	4.50-5.00	71,5	27,2	1,3	ML
	SPT-1	5.00-5.45	58,3	40	1,7	ML
	SPT-2	12.00-12.45	52,9	45,9	1,2	ML
SK-4	UD-1	4.50-5.00	40,7	56	3,3	SM
	SPT-1	5.00-5.45	32,2	65,9	1,9	SM
	SPT-2	7.50-7.95	36,4	59,1	4,5	SM
	SPT-3	9.50-9.95	56,9	41,3	1,8	ML

Kıvam limitleri deneyleri zeminin Non-Plastik (plastik olmayan) özelliği sebebiyle yapılmamıştır. Çizelge 7.4' te sondaj numuneleri üzerinde yapılan dayanım testleri sonuçları verilmektedir.

Çizelge 7.4. Zemin birimleri direkt kesme deney sonuçları

Kuyu No	Derinlik (m)	Direk Kesme Deneyi (UU)	
		Cu(kPa)	ø
SK-1	4.5-5.0	0,165	20
SK-2	4.5-5.0	0,257	15
SK-3	4.5-5.0	0,289	9
SK-4	4.5-5.0	0,236	15

7.1.5. Jeofizik çalışmalar

Zemin etüt raporunda verilen jeofizik çalışmalar kapsamında, alınan ölçülerden elde edilen yüzey dalgalarının ters çözümüyle her bir profile ait Vs ve Vp dalga hızının

derinlik ile değişim modeli belirlenmiştir. Yüzey dalgalarının analizi (MASW Deneyi) ile elde edilmiş olan kayma dalgası hızı (V_s) değerleri 185-370 m/s aralığındadır. Hesaplanan bu hızlara göre, belirlenen her bir tabaka için Maksimum Kayma Modülü (G), Yoğunluk (ρ), Bulk Modülü (K), Young Modülü (Elastisite- E), değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan mühendislik parametreleri Çizelge 7.5'te verilmiştir. Sismik verilere bakıldığında zemin sınıfı ZD olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 7.5. Sismik deney sonuçlar

MASW	Tabaka No	V_p (m/sn)	V_s (m/sn)	h (m)	ρ (gr/cm ³)	ν	G_{max} (kg/cm ²)	E_d (kg/cm ²)	K (kg/cm ²)
	1	380	185	2	1,71	0,35	578	1555	1669
	2	1062	370	-	1,96	0,45	2685	7685	18544

Çizelge 7.6. SPT ortalaması ve SPT- N_{60} , SPT- $N_{1.60}$ değerleri

Zemin Birimi	Derinlik (m)	SPT-N Ortalama	Zemin Türü	$\bar{V}$ Değal (kN/m ²)	$\bar{V}$ Deygun (kN/m ²)	σ'_{v0} (kN/m ²)	Derinlik Düzeltme Katsayısı C_N	Enerji Düzeltme Katsayısı C_E	Sondaj Delgi Çapı Düzeltme Katsayısı C_B	Numune Alıcı Tipi Düzeltme Katsayısı C_S	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı C_R	SPT N_{60}	SPT $N_{1.60}$
Siltli Kum-1	1,50	7	Kohezyonsuz	18	19,0	27,00	1,70	1,00	1,00	1,00	0,75	5	9
	3,00	10	Kohezyonsuz	18	19,0	54,00	1,33	1,00	1,00	1,00	0,85	8	11
	4,50	7	Kohezyonsuz	18	19,0	81,00	1,09	1,00	1,00	1,00	0,85	6	7
	6,00	11	Kohezyonsuz	18	19,0	99,19	0,98	1,00	1,00	1,00	0,95	10	10
Siltli Kum-2	7,50	14	Kohezyonsuz	18	19,0	112,98	0,92	1,00	1,00	1,00	0,95	13	12
	9,00	15	Kohezyonsuz	18	19,0	126,76	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00	15	13
	10,50	16	Kohezyonsuz	18	19,0	140,55	0,82	1,00	1,00	1,00	1,00	16	13
	12,00	17	Kohezyonsuz	18	19,0	154,33	0,79	1,00	1,00	1,00	1,00	17	13
	13,50	22	Kohezyonsuz	18	19,0	168,12	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	22	17
	15,00	24	Kohezyonsuz	18	19,0	181,90	0,73	1,00	1,00	1,00	1,00	24	17
Siltli Kum-3	16,50	27	Kohezyonsuz	18	19,0	195,69	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	27	19
	18,00	28	Kohezyonsuz	18	19,0	209,47	0,68	1,00	1,00	1,00	1,00	28	19
	19,50	31	Kohezyonsuz	18	19,0	223,26	0,65	1,00	1,00	1,00	1,00	31	20
	21,00	35	Kohezyonsuz	18	19,0	237,04	0,64	1,00	1,00	1,00	1,00	35	22
	22,50	39	Kohezyonsuz	18	19,0	250,83	0,62	1,00	1,00	1,00	1,00	39	24
	24,00	40	Kohezyonsuz	18	19,0	264,61	0,60	1,00	1,00	1,00	1,00	40	24
	25,50	43	Kohezyonsuz	18	19,0	278,40	0,59	1,00	1,00	1,00	1,00	43	25
	27,00	47	Kohezyonsuz	18	19,5	303,18	0,56	1,00	1,00	1,00	1,00	47	26
	28,50	50	Kohezyonsuz	18	19,5	317,72	0,55	1,00	1,00	1,00	1,00	50	27
	30,00	50	Kohezyonsuz	18	19,5	332,25	0,54	1,00	1,00	1,00	1,00	50	27

7.2. Yöntem

7.2.1. Zemin profillerinin oluşturulması

Araştırma zeminin tasarım spektrumunun belirlenmesi, deprem etkisi altında tasarım spektrum değerleri ve iyileştirme sonrası tasarım spektrum değerlerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda TBDY-2018'e göre proje sahası için aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

- Proje sahası için yapılan geoteknik, jeofizik etüt ve inceleme raporları değerlendirilmiştir.
- TBDY-2018 yönetmeliği doğrultusunda proje sahası Deprem Düzeyi DD-2 tasarım spektrumu ZD zemin sınıfları için hesaplanmıştır.
- İnceleme alanının depremselliği ve TBDY-2018 kriterleri göz önünde bulundurularak en az 11 adet deprem kaydı seçilmiş, bu kayıtlar ZD zemin sınıfı için DD-2 tasarım spektrumları ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiştir.
- İnceleme alanında yapılan jeolojik, geoteknik, jeofizik etütlerin sonuçları kullanılarak tabakalı zemin profili oluşturulmuş, alan için seçilen ve DD-2 spektrumları ile uyumlu duruma getirilen deprem kayıtları da kullanılarak statik ve dinamik zemin davranış analizi yapılmıştır.

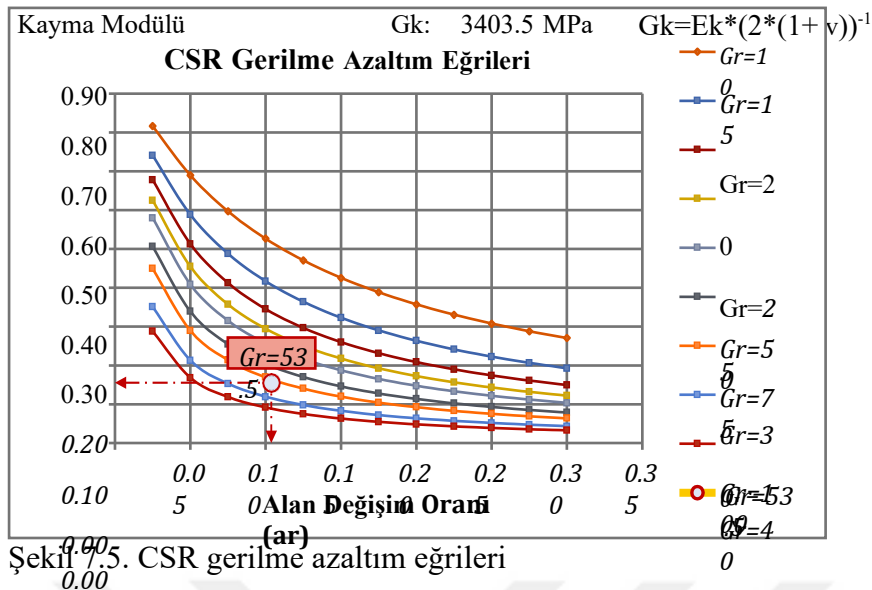
Yapılan çalışmalarda aşağıdaki yazılımlar kullanılmıştır;

- SeismoMatch v2018, Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions, 2018.
- PLAXIS 2D CONNECT Edition V21, 2021.

Çalışma kapsamında kullanılan deprem kayıtları için PEER veritabanı kullanılmıştır (<https://ngawest2.berkeley.edu/>).

7.2.2. Sıvılaşma yönünden değerlendirme

Sıvılaşma çevrimli yükler (deprem yükleri) altında suya doygun veya su tabakası altında olan kum-kumlu birimlerde zeminin kayma dayanımının aşılması sonucu zeminin viskoz bir sıvı gibi davranması şeklinde gerçekleşen bir olaydır. Yeraltı su seviyesi 4.5~5.0 m olup zemin birimleri kumlu zeminler olduğundan Deprem Yönetmeliği gereği 20 m derinliğe kadar sıvılaşma yönünden incelemenin gerekli olduğu değerlendirilmektedir. Her sondaj için sıvılaşma analizi yapılmıştır. Sondaj sonuçlarından elde edilen SPTN darbe sayılarında gerekli düzeltmeler yapıp N_{1,60} değerleri hesaplanmıştır. N_{1,60} değeri kullanılıp derinliklerdeki sıvılaşma karşı güvenlik katsayıları hesaplanmıştır.



Çizelge 7.11. Tasarım hesapları ve kontroller

TASARIM HESAPLARI VE KONTROLLER				
Kayma Modül Oranı	Gr:	53.50		
Gerilme Azaltım Faktörü	SR:	0.15		$SR=(1+(Gr-1)*ar)^{-1}$
Derinlikle Azalma Faktörü	rd:	0.55		
Maksimum Kayma Gerilmesi	τ_{max} :	94.53		$\tau_{max}=\sigma_v*rd*a_{max}$
Ortalama Kayma Gerilmesi	τ_{ort} :	61.44		$\tau_{ort}=\%65*\tau_{max}$
Kolon Gerilme Paylaşımı		85%		Kolonlarda yoğunlaşan gerilme yüzdesi
Ara Zemin Gerilme Paylaşımı		15%		Ara zeminde yoğunlaşan gerilme yüzdesi
Gerilme Konsantrasyonu		5.45		
Kolona Gelen Kayma Kuvveti	Vk:	251.29	kN	
Ara Zemin Kayma Kuvveti	Vs:	46.09	kN	
Kolon Kesme Kapasitesi	Vmk:	282.11	kN	$Vmk=0.3*(qk)^{0.5}*Ak$
$Vmk>Vk$: Kolon Kapasitesi Yeterli ve Tasarım Uygundur				
Sonuc :				
Kolon çapı ve seçilen aralıklar depremde oluşacak kayma gerilmelerini güvenle taşımaktadır.				

İyileştirme sonrası durumda sıvılaşma analizleri tekrar yapılarak jet kolonların sıvılaşmaya karşı güvenliğe katkısı incelenmiştir. İyileştirme sonrası durumda tüm seviyelerdeki $FS > 1.1$ olduğundan sıvılaşma yönünden iyileştirmenin sağlanacağı ve sıvılaşma riskinin ortadan kaldırılacağı değerlendirilmektedir. Jet kolon çapı $\varnothing 80$ cm ve boyu temel altı kottan itibaren 15 m olarak uygulanmalıdır. Yerleşim karelağı 2×2 m olarak belirlenmiştir.

[illegible]



Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması

Kullanıcı Girdileri

Rapor Başlığı:	aydın	
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2	50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi
Yerel Zemin Sınıfı	ZD	Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları
Enlem:	37.763863°	
Boylam	27.702508°	

Çıktılar

$S_s = 1.182$ $S_1 = 0.277$ $PGA = 0.478$ $PGV = 27.438$

S_s : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

S_1 : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı [boyutsuz]

PGA : En büyük yer ivmesi [g]

PGV : En büyük yer hızı [cm/sn]

Şekil 7.10. Deprem düzeyi DD-2 ve zemin sınıfı ZD için tasarım spektrum değerleri

$$F_s = 1.027 \quad F_1 = 2.046$$

$$S_{Ds} = S_s \cdot F_s = 1,182 \times 1,027 = 1,214 \quad S_{D1} = S_1 \cdot F_1 = 0,277 \times 2,046 = 0,56$$

7.2.4. Deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi

TBDY-2018’de zaman tanım alanında yapılacak analizler için en az 11 deprem yer hareketi seçilmesi ve ilgili zemin sınıfındaki elastik ivme spektrumu ile benzeştirilmesi istenmektedir. Bu çalışma kapsamında ZD zemin sınıfı için verilen DD2 yatay elastik tasarım spektrum değerleri ile uyumlu en az 11 adet yer hareketinin seçilmesinde ve ölçeklendirilmesinde aşağıdaki maddeler dikkate alınmıştır:

- Deprem yer hareketlerinin seçilmesinde PEER NGA Veri Bankası (PEER, 2013) kullanılmıştır.
- Her deprem kaydı için bölgenin depremselliği ile uyumlu olan gerçek depremlerin ivme kaydı kullanılmıştır. Deprem kayıtların seçilmesi esnasında sismolojik parametreler olarak moment büyüklüğü (M6,0 - M7,6 aralığında),

fay kırığına en yakın mesafe (R_{rup} ; 2,0 - 57 km arasında) ve VS30 değerleri (180-450 m/s aralığında) kullanılmıştır.

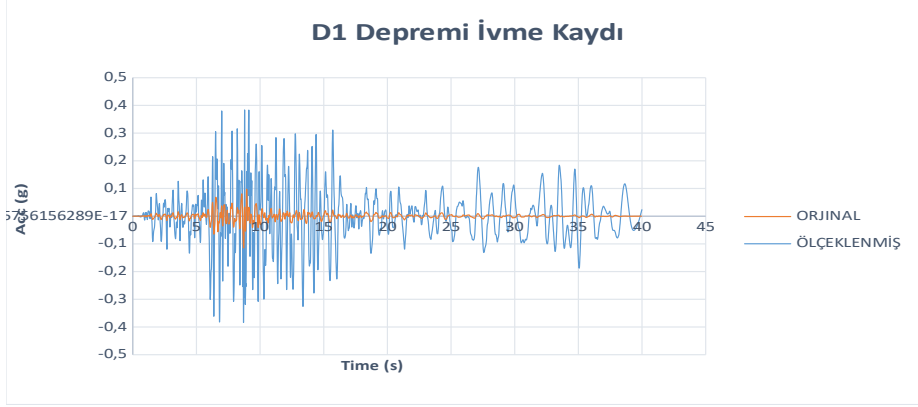
- PEER veri tabanından en uygun olan kayıtlar seçilmiştir. Bu seçim esnasında ölçekleme faktörü 0.2 ila 5 arasında ve MSE değerinin de 0,3'ten az olmasına dikkat edilmiştir.
- DD-2 ve ZD Zemin profili için oluşturulan 11 deprem kaydı PEER veritabanından uygun sismomühendislik parametrelerine göre seçilip SeismoMatch yazılımı kullanılarak DD-2 yatay elastik ivme spektrumu ile uyumlu hale getirilmiştir. Orijinal ve benzeştirilmiş kayıtlara ait ivme ve deplasman serileri verilmiştir. Bu kayıtların M, R_{rup} , VS30, PGA, PSAT=0.2s ve PSAT=1.0s bilgileri Çizelge 7.12'de verilmiştir.

Çizelge 7.12. 11 adet depremin kayıt bilgileri

ID	Record Number	Earthquake Name	Year	Magnitude	R_{rup} (km)	VS30 (m/sec)	PGA(g)	PSAT _{0,2} (g)	PSAT _{1,0} (g)
D4	RSN-6	Imperial Valley	1940	6,95	6,09	213,44	0,21074	0,51	0,28
D2	RSN-68	San Fernando	1971	6,61	22,77	316,46	0,22476	0,64	0,25
D3	RSN-95	Managua_Nicaragua-01	1972	6,24	4,06	288,77	0,32952	1,09	0,3
D5	RSN-160	Imperial Valley-06	1979	6,53	2,66	223,03	0,59872	0,43	0,24
D11	RSN-180	Imperial Valley-06	1979	6,53	3,95	205,63	0,52867	1,17	0,41
D8	RSN-332	Coalinga-01	1983	6,36	50,2	251,57	0,13317	0,24	0,1
D6	RSN-338	Coalinga-01	1983	6,36	29,48	246,07	0,2739	0,43	0,68
D1	RSN-8	Ferndale City Hall	1941	6,4	44,68	219,31	0,11476	0,31	0,04
D7	RSN-367	Coalinga-01	1983	6,36	8,41	257,38	0,30032	0,62	0,59
D9	RSN-460	Morgan Hill	1984	6,19	12,07	333,85	0,11366	0,34	0,034
D10	RSN-122	Codroipo	1976	6,5	33,4	249,28	0,09098	0,12	0,12

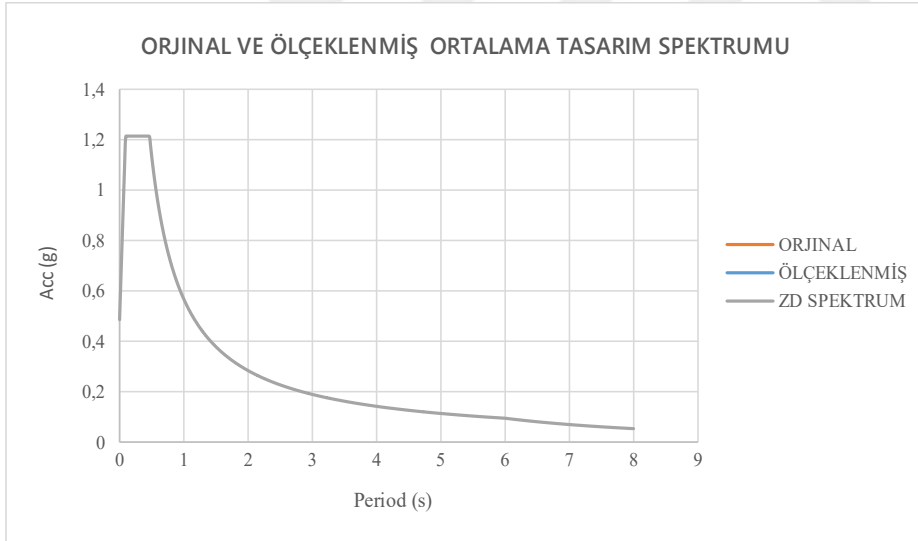
7.2.5. Seismomatch verileri

11 Adet deprem için ayrı ayrı orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme kaydı EK açıklamalarda verilmiş olup D-1 depremine ait ivme kaydı grafiği aşağıdaki şekilde görüldüğü gibidir.



Şekil 7.11. D-1 depremi orijinal ve ölçeklenmiş ivme kaydı

11 Adet depremin orijinal spektral ivme kaydı, TBDY 2018 Deprem yönetmeliğine göre ZD zemin sınıfı için DD-2 tasarım spektrumları ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Şekil 7.12’de orijinal, ölçeklenmiş ve ZD tasarım spektral eğrileri görülmektedir.



Şekil 7.12. Orijinal ve ölçeklenmiş ortalama tasarım spektrumu

7.2.6. Sonlu elemanlar yöntemi ile dinamik analiz

Zemin dinamik davranış analizleri, geoteknik mühendisliği sorunlarının sayısal analizini kolaylaştıran sonlu elemanlar programı olan PLAXİS programı ile yapılmıştır. Program projelerin tasarım aşamasında gerekli olan şekil değiştirme ve stabilize analizlerini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Plaxis kullanılarak analiz edilmek istenen

bir problemin önce sayısal modelini oluşturmak gerekir. Sayısal model, çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış durumunu tanımlar. Bir grafik model, noktalardan, çizgilerden ve hücrelerden oluşur ve sayısal modeli oluşturur. Sayısal model, çeşitli zemin tabakalarını, yapısal bileşenleri, inşaat aşamalarını ve çevredeki sınır koşullarını içermelidir. Modelin sınırları, yarı sonsuz problemlerde sonuçları etkilemeyecek şekilde seçilmelidir.

Sonlu elemanlar ağı, 2D Plaxis yazılımında üçgen elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Üçgen elemanlar 6 ya da 15 düğümünden oluşabilmekte olup, bu özellik işe başlarken seçilebilmektedir. Gerilme ve deformasyonları doğru bir şekilde hesaplayıp gerçekçi sonuçlar elde etmek için daha pratik bir tercih 15 düğüm noktalı olan elemandır. Bu çalışmada 15 düğüm noktalı elemanlar kullanılmıştır.

Plaxis 2D programı ile modellenmiş olan ve sıvılaşma ihtimali yüksek olan zeminin statik ve dinamik durumdaki davranışları incelenmiş olup, jet kolonlarının sıvılaşmaya olan etkisi ve deprem ivmesinin yüzeydeki değişimlerine etkisi incelenmiştir.

7.2.6.1. Zemin Modeli UBC3D'nin temel özellikleri

Literatürde Nümerik analizler için literatürde pek çok zemin modelleri olmasına rağmen sıvılaşmayı gözlemlemek adına UBC3D-PLM modeli bu çalışmanın kapsamında kullanılmıştır.

Tsegaye (2010) tarafından geliştirilen UBC3D-PLM modeli PLAXIS'te kullanıcı tanımlı bir model olarak kullanılmıştır. Puebla ve diğerleri'nin (1997), Beaty ve Byrne'in (1998) tanıttığı UBCSAND modeline yakından dayanmaktadır. Orijinal UBCSAND, kumlu zeminlerde sıvılaşmayı gözlemlemek için iki boyutta bir model olarak tasarım yapılmıştır. Hiperbolik bir şekil değiştirme sertleşme kuralı ve Duncan-Chang yöntemi, formülasyonun temelini oluşturur. Mobilize sürtünme açısı, belirli bir gerilmedeki plastik kayma gerinimiyle ve sertleşme kuralı ile ilişkilidir. Model, iki boyutlu bir Mohr-Coulomb akma yüzeyi ve potansiyel olarak ilişkisiz bir plastik işlevi içerir.

Rowe (1962) tarafından geliştirilen gerilme-dilatasyon teorisi, modelin akış kuralı için temeldir. Bu teori daha sonra enerji konularına göre doğrusallaştırılmış ve basitleştirilmiştir. UBC3D ile UBCSAND arasındaki en önemli fark, ikinci genelleştirilmiş üç boyutlu formülasyonun olmasıdır. Ek olarak, deviatorik düzlemde gerilme-şekil değiştirme eşeksenliliği varsayımını korumak için Drucker-Prager kriterini temel alan değiştirilmiş ilişkisiz plastik potansiyel fonksiyonu kullanılır. Bu, izotropik çizgiden başlayan bir gerilme yolu içindir (Tsegaye, 2010).



8. BULGULAR VE TARTIŞMA

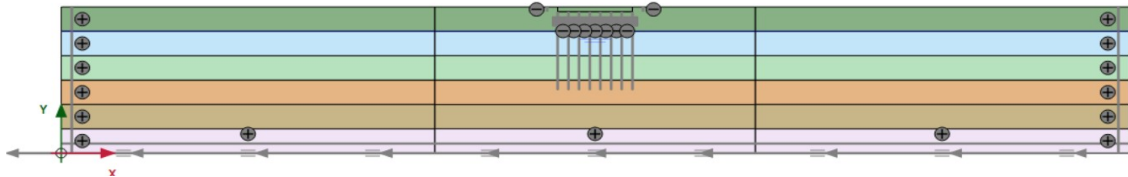
8.1. Sayısal Analiz

8.1.1. Zemin parametrelerinin girilmesi

Bu çalışmada Aydın ili Koçarlı ilçesinde bulunan parsele ait zemin profili Plaxis 2D programında modellenmiştir. Zemin Etüt raporu ve geoteknik verilerden elde edilen parametrelere göre zemin katmanları Şekil 8.1’ de gösterildiği gibi; 5 m lik 6 katman şeklinde bölünmüş olup 30 m düşeyde ve 200 m yatayda olacak şekilde kum tabakaları olarak modellenmiştir. Yer altı suyunun seviyesi 5 m girilmiştir. Jet grout 15 m boyunda, 80 cm çapında 2x2 karelajla yerleştirilmiştir. Zemin katmanlarının malzeme parametreleri girilirken UBC3D-PLM model parametreleri hesaplanmıştır. Kullanılan parametreler aşağıda tablo şeklinde verilmiştir.

Çizelge 8.1. Belirlenen zemin profili için Plaxis UBCPLM modelde kullanılan parametreler

Layer	H (m)	γ (kN/m ³)	SPT- N _{1,60}	k _B ^e	k _G ^e	k _G ^P	m _e	n _e	n _p	Φ_{cv}	Φ_p	c (kPa)	f _{dens}	f _{Epost}	Pref (kPa)	R _f
1	5,00	18	9	631,88	902,69	319,35	0,5	0,5	0,4	28,1	29,00	0,1	1	1	100,00	0,79
2	5,00	19	12	695,47	993,53	529,2				28,8	30,00	0,1	1	1		0,76
3	5,00	19	14	732,14	1045,91	715				29,6	31,00	0,1	1	1		0,74
4	5,00	19	20	824,56	1177,94	1513,5				29	32,00	0,1	1	1		0,7
5	5,00	19	24	876,22	1251,74	2263				28,8	33,00	0,1	1	1		0,68
6	5,00	19	27	911,3	1301,86	2947,2				28,9	34,00	0,1	1	1		0,67



Şekil 8.1. Plaxis programında oluşturulan model

Modelde oluşturulacak olan temel parametreleri Çizelge 8.3'te ve embedded beam olarak tanımlanmış olan iyileştirme yöntemi jet grout parametreleri Çizelge 8.2'de verilmiştir.

Çizelge 8.2. Belirlenen zemin profili için Plaxis JET Grout parametreleri

80 CM 2X2 ARALIKLI JET GROUT			
E (MPa)	g (kN/m ³)	D (m)	L(m)
8849	24	0,8	2,2

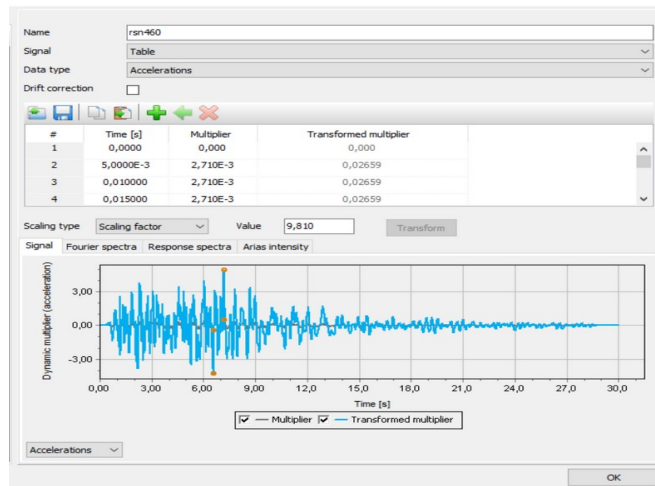
E= Elastisite Modülü, D= Jet Kolon Çapı, L= Jet Kolon Boyu,g= Yoğunluk

Çizelge 8.3. Belirlenen zemin profili için Plaxis temel parametreleri

TEMEL					
E (MPa)	g (kN/m ³)	v	G (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	
30	24	0,2	1,25E+04	3,30E+04	

8.1.2. Dinamik yüklerin girilmesi

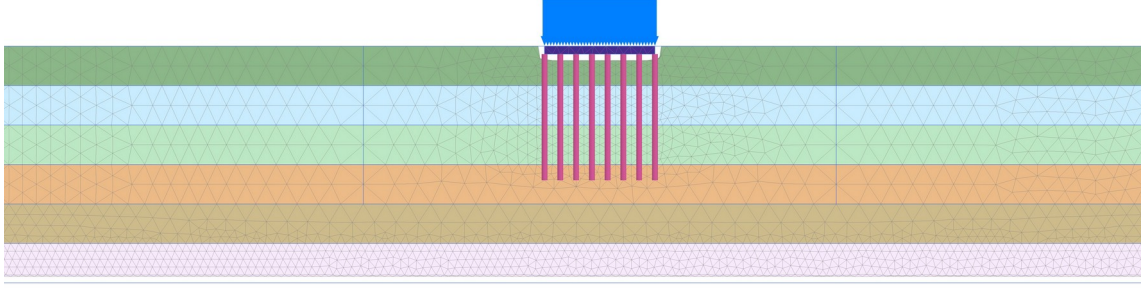
Dinamik deprem yükünü tanımlamak için modelin tabanında yatay yönlü deplasman tanımlanmış olup ZD tasarım spektrum eğrisine göre ölçeklenmiş 11 adet deprem kaydına ayrı ayrı analiz yapılmıştır. Dinamik yük penceresi Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8.2. Dinamik yük penceresi

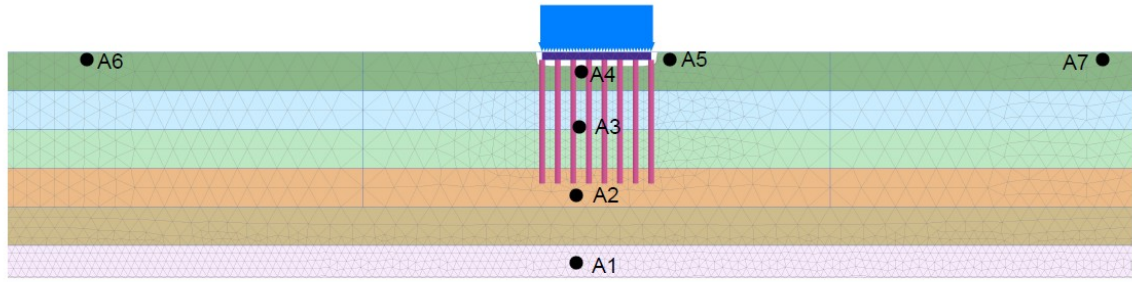
8.1.3. Model ağının oluşturulması

Model ağının oluşturulmasında ivme ve deformasyonlarda meydana gelecek değişimleri gerçeğe yakın görmek için mesh aralıkları oldukça küçük tutularak eleman sayısı artırılmıştır. Oluşturulan model ağı Şekil 8.3'teki gibidir.



Şekil 8.3. Model ağı

Analiz sonuçlarında, iyileştirme yönteminin sınılaşma, deformasyon ve ivme değişimleri üzerindeki etkisini gerçeğe yakın görmek için analiz noktaları önemlidir. Bu çalışmada Şekil 8.4' teki gibi A7, A6, A5, A4, A3, A2 ve A1 noktalarında analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.4. Model analiz noktaları

Bu çalışmada oluşturulan modelde hesap aşamaları aşağıda anlatıldığı şekilde oluşturulmuştur:

- Başlangıç aşamasında K0 prosedürü uygulanmıştır.
- Birinci aşamada başlangıç aşamasına temel ve bina yükü etki ettirilerek statik analiz yapılmıştır.

- İkinci aşamada birinci aşamadaki koşullara bağlı olarak dinamik analiz yapılmış ve deprem etkisi görülmüştür.
- Üçüncü aşamada jet-grout kolonları tanımlanarak statik durum analizi yapılmıştır.
- Dördüncü durumda ise jet-grout kolonlarının, temel ve bina yükünün aktif olduğu statik analiz yapılmıştır.
- Beşinci aşamada ise dördüncü aşamadaki durumlara ek olarak deprem verisi girilmiş ve dinamik analiz yapılmıştır.

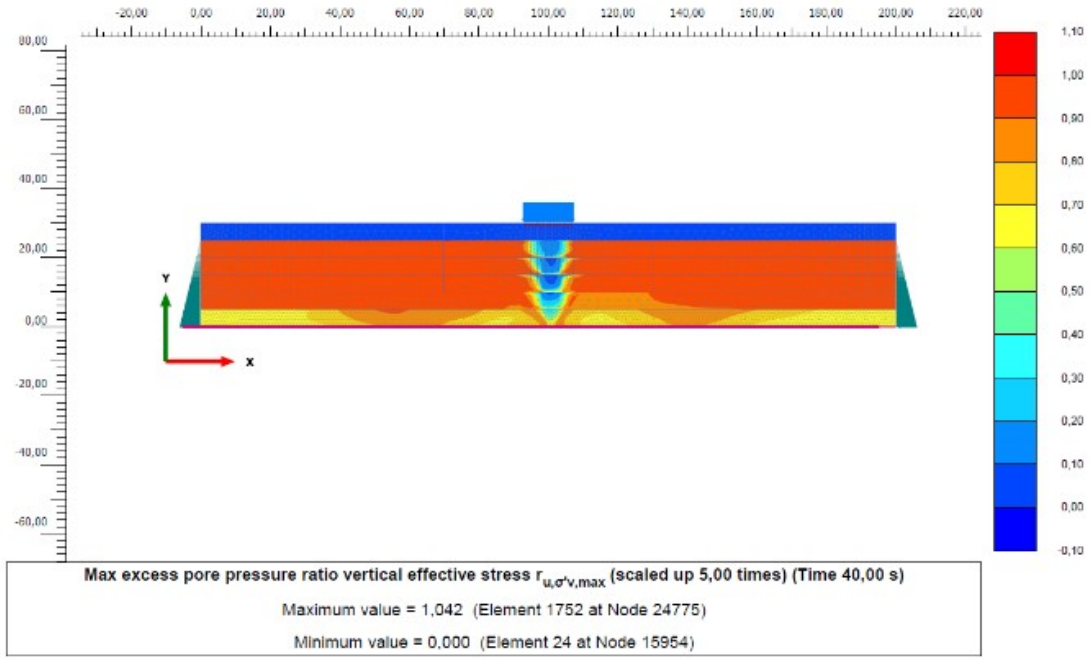
Bütün analizler UBC3D-PLM yöntemi ile (Undrained-A) drenajsız davranışla yapılmıştır.

8.2. Sayısal Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

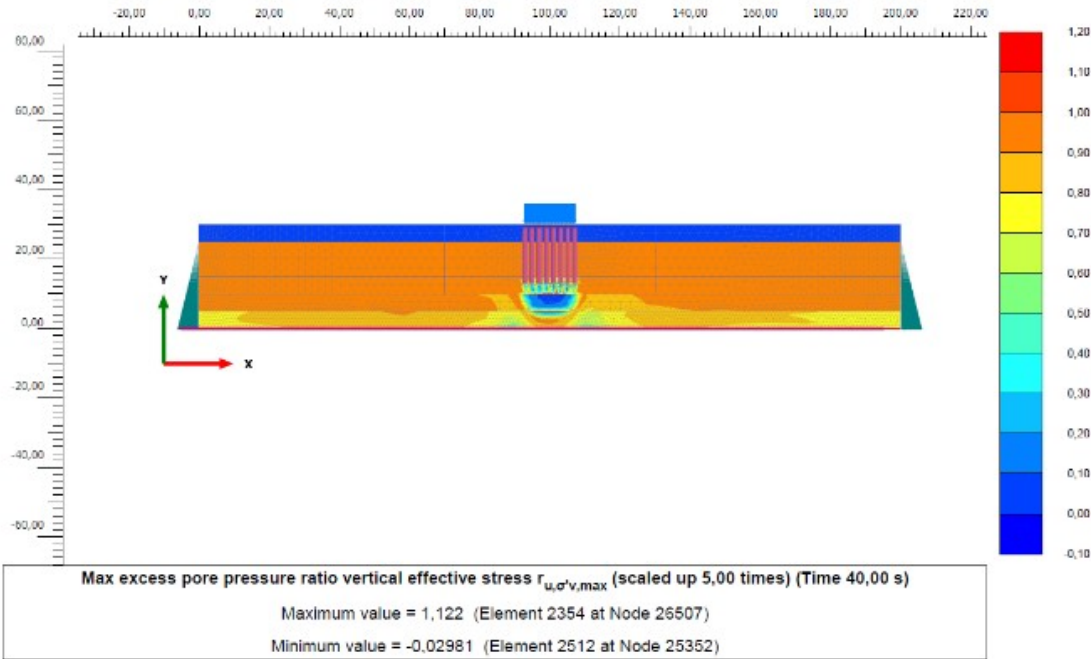
Sıvılaşma potansiyeli yüksek olan Aydın ili, Koçarlı ilçesinde yer alan parselde ait zeminin sayısal analiz programı yardımıyla modellenmesi sonucu yapılan iyileştirmenin spektral ivme, ivme, deplasman ve sıvılaşmaya olan etkisi incelenmiştir.

8.2.1. Sıvılaşma yönünden değerlendirme

30X200 m olarak hazırlanan modelde UBC3D-PLM parametreleri girildikten sonra depremli durumda dinamik analiz yapılmış ve sıvılaşan zemin tabakası analiz sonucunda oluşturulan Plaxis modelde Şekil 8.5' teki gibi görülmüştür. Yüzeyden itibaren 20 m derinlik seviyesinde sıvılaşma ihtimali bulunan zemin birimi olduğu söylenebilir. Jet Grout parametreleri girilerek tanımlanan modelde iyileştirmenin sıvılaşmayı önlediği ve ru değerinin $r_u > 1.1$ olduğu durum Şekil 8.6'da görülmüştür.



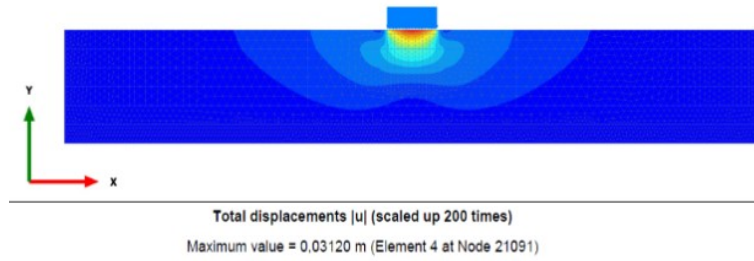
Şekil 8.5. Dinamik durumda iyileştirme öncesi zeminin 5 m ile 20 m arasında sıvılaştığını gösteren zemin profili



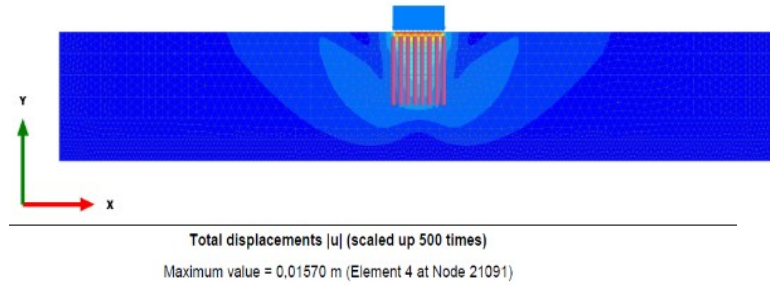
Şekil 8.6. Dinamik durumda iyileştirme sonrası durumda sıvılaşmanın engellendiğini gösteren zemin profili

8.2.2. Deformasyon yönünden değerlendirme

Toplam deformasyonun iyileştirme öncesi durumda 31 mm olduğu şekil 8.7’de, iyileştirme sonrası durumda deformasyonun 15 mm e düştüğü durum şekil 8.8’de görülmektedir.



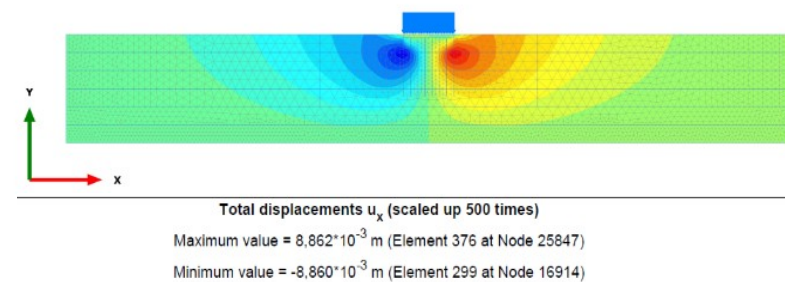
Şekil 8.7. İyileştirme öncesi deformasyon 31 mm



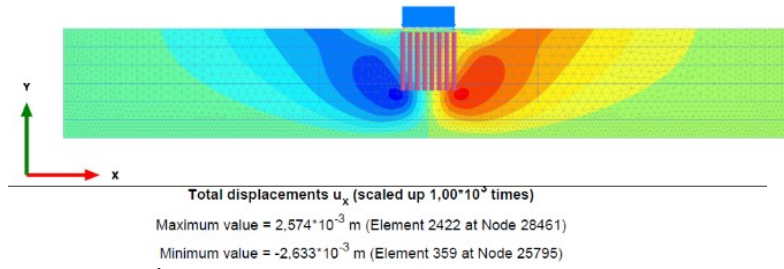
Şekil 8.8. İyileştirme sonrası deformasyon 15 mm

8.2.3. Yatay ve düşey deplasman yönünden değerlendirme

İyileştirme yapılmadan önce yatay deplasman şekil 8.9’da ki gibi 8,8 mm sonuç vermekte olup, iyileştirme yapıldıktan sonra 2,6 mm ye düştüğü şekil 8.10’da görülmektedir.

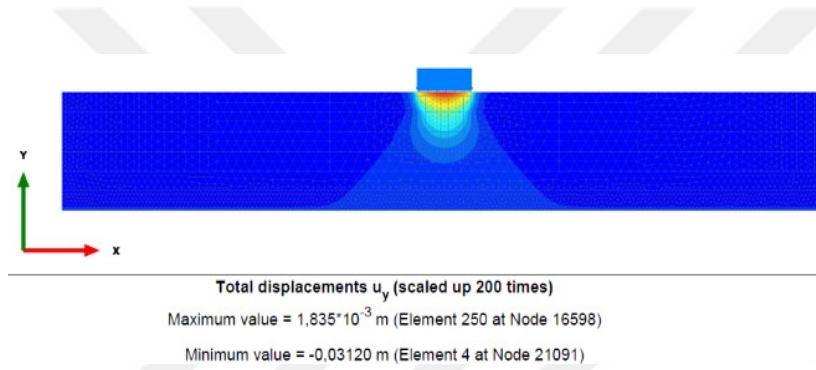


Şekil 8.9. İyileştirme öncesi yatay deplasman

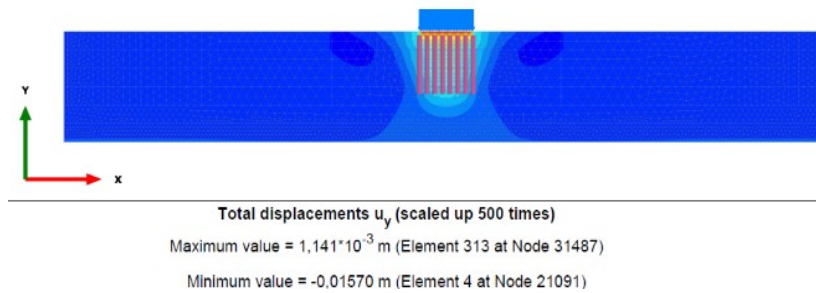


Şekil 8.10. İyileştirme sonrası yatay deplasman

İyileştirme yapılmadan önce düşey deplasman Şekil 8.11’de görüldüğü gibi 3,1 cm sonuç vermekte olup, iyileştirme yapıldıktan sonra 1,5 cm ye düştüğü Şekil 8.12’de görüldüğü gibi sonuç vermiştir.



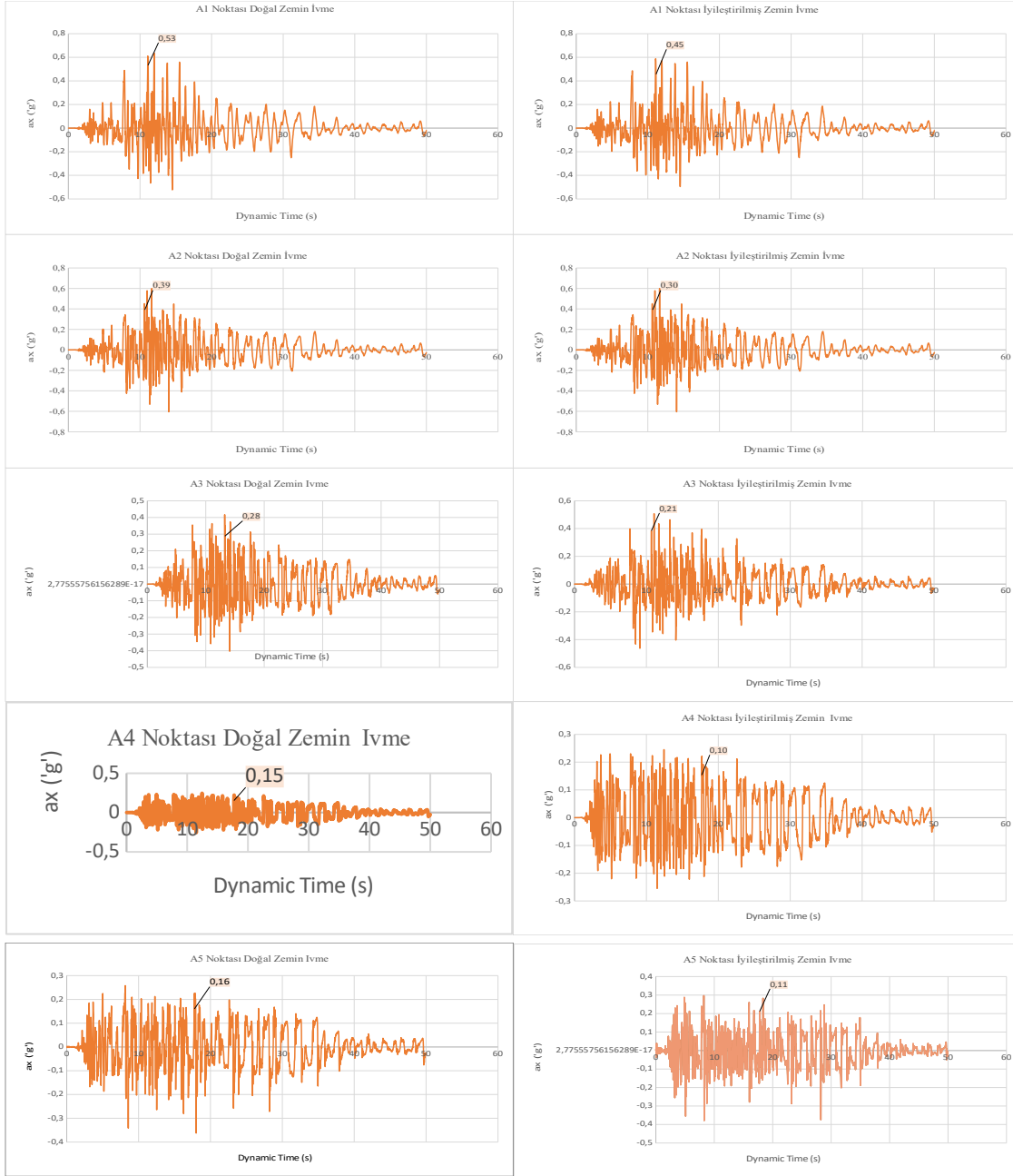
Şekil 8.11. İyileştirme öncesi düşey deplasman

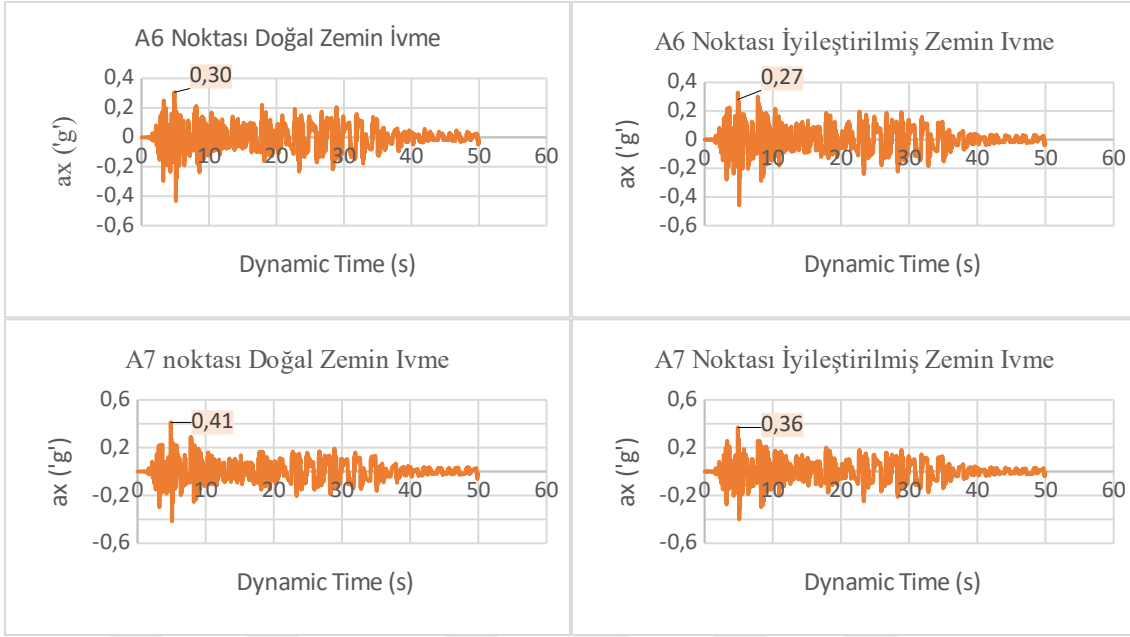


Şekil 8.12. İyileştirme sonrası düşey deplasman

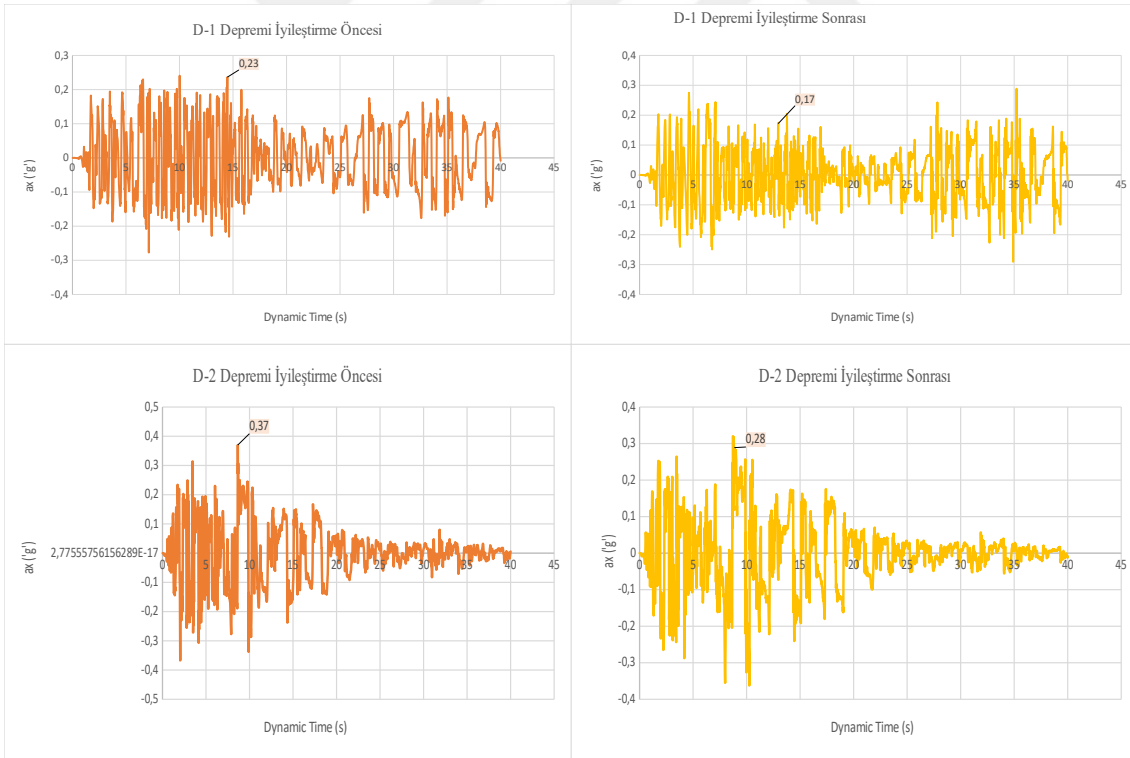
8.2.4. İvme yönünden değerlendirme

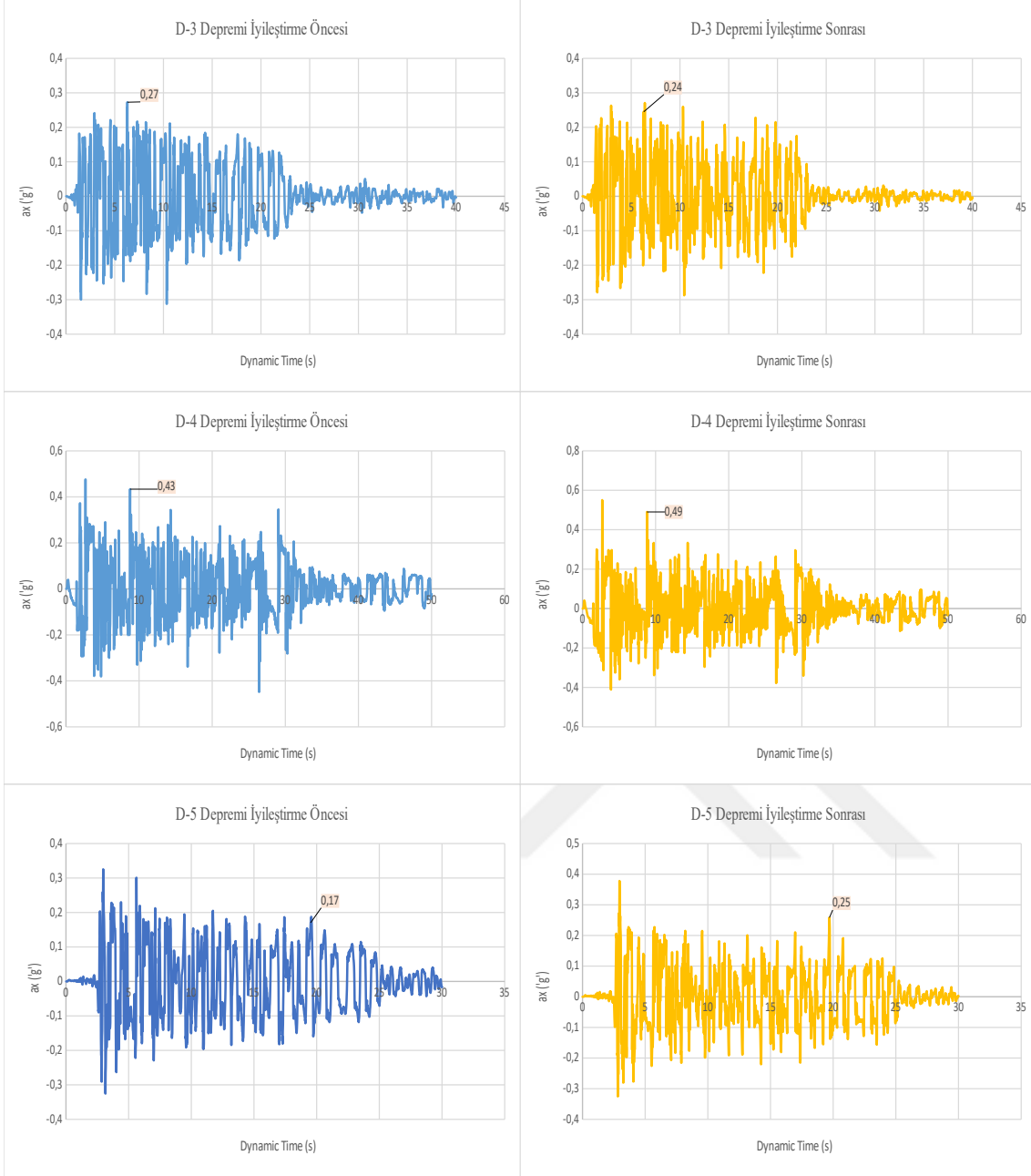
Sayısal analiz sonucunda Şekil 8.13’ te gösterilen analiz noktalarından alınan ivme-zaman değişimleri tek bir deprem için tüm noktalarda kayıtlar alınmış olup, uyguladığımız 11 adet deprem içinde ayrı ayrı yüzeydeki ivme kayıtları alınmış, iyileştirme öncesi ve sonrası durumlar için hesaplamalar gösterilmiştir.



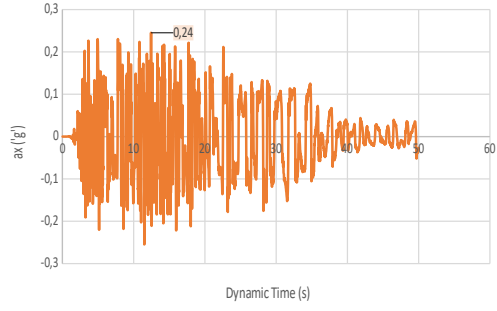


Şekil 8.13. D-6 depreminin A1-A7 noktalarındaki iyileştirme öncesi ve sonrası ivme değerleri

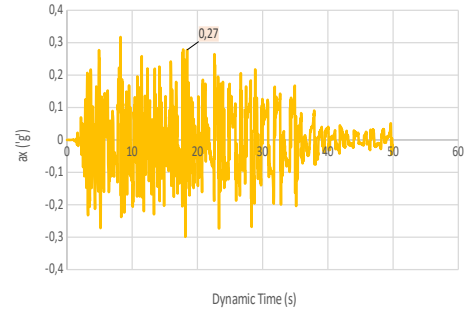




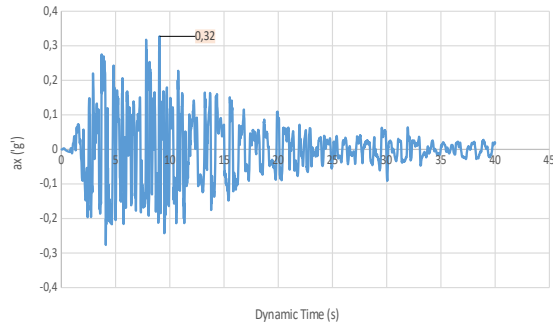
D-6 Depremi İyileştirme Öncesi



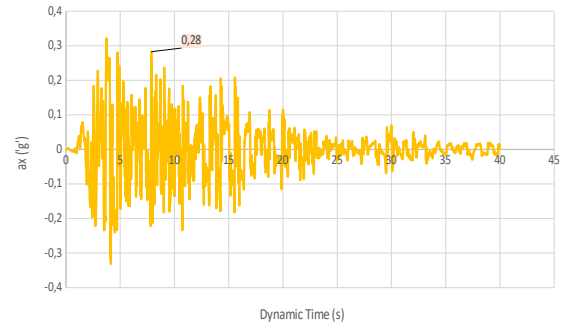
D-6 Depremi İyileştirme Sonrası



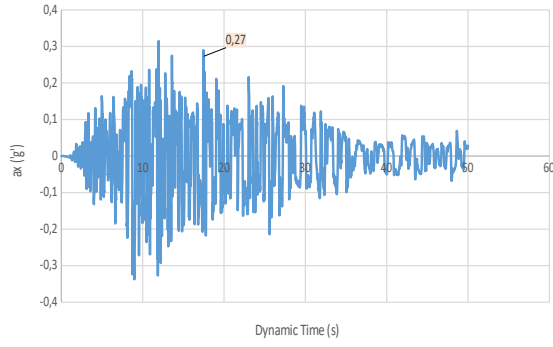
D-7 Depremi İyileştirme Öncesi



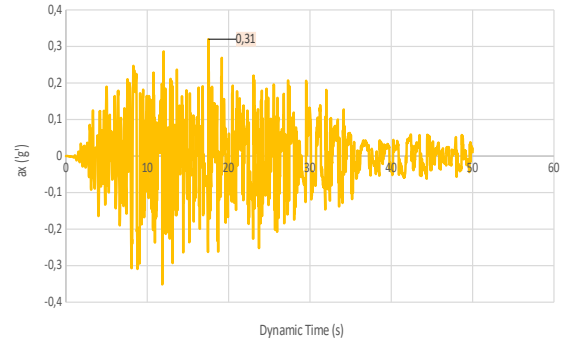
D-7 Depremi İyileştirme Sonrası



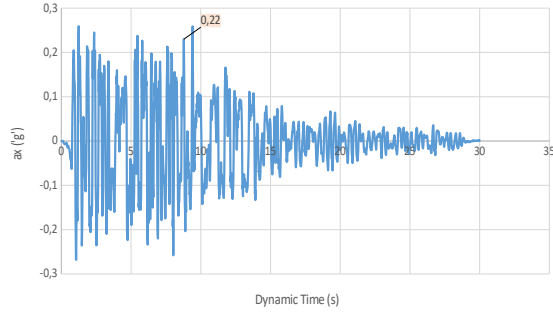
D-8 Depremi İyileştirme Öncesi



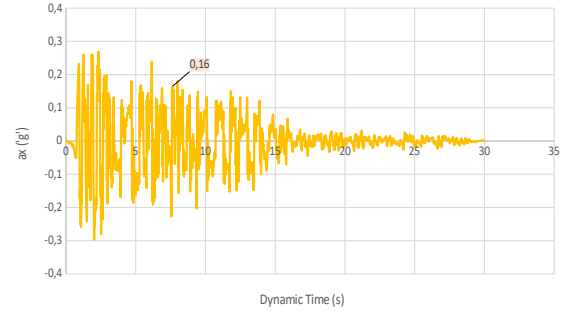
D-8 Depremi İyileştirme Sonrası

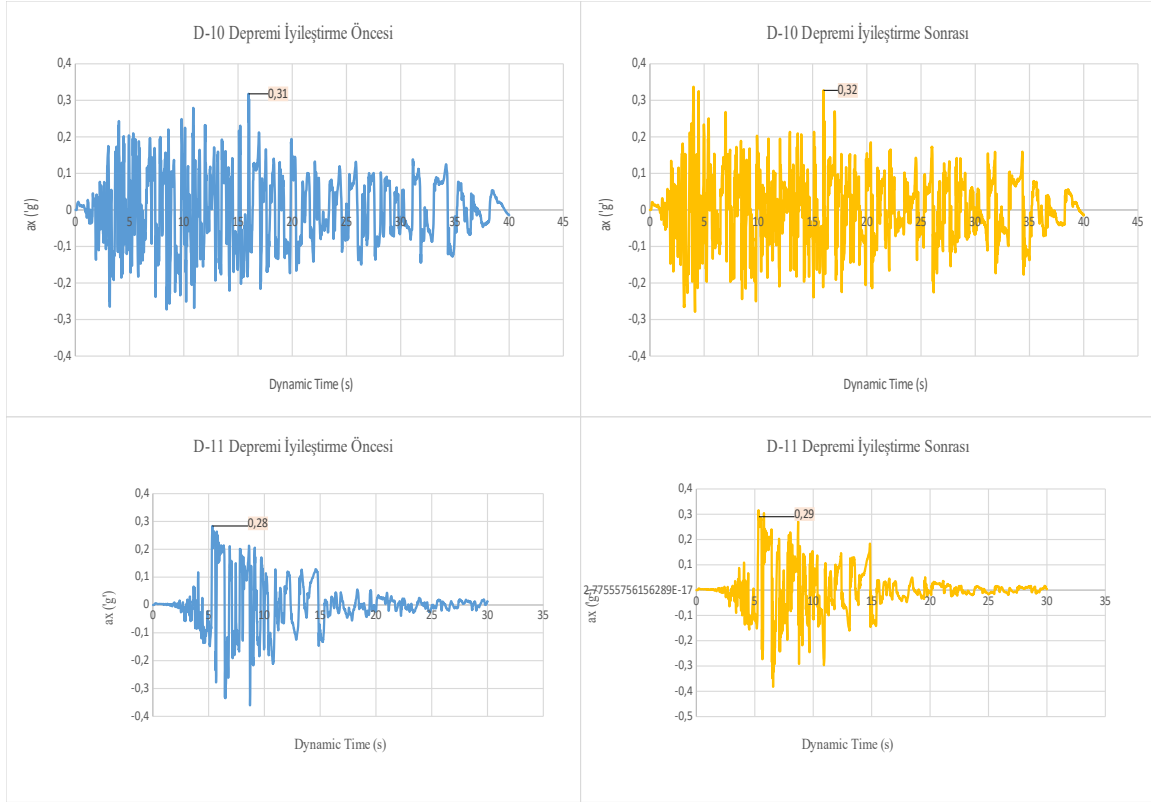


D-9 Depremi İyileştirme Öncesi



D-9 Depremi İyileştirme Sonrası

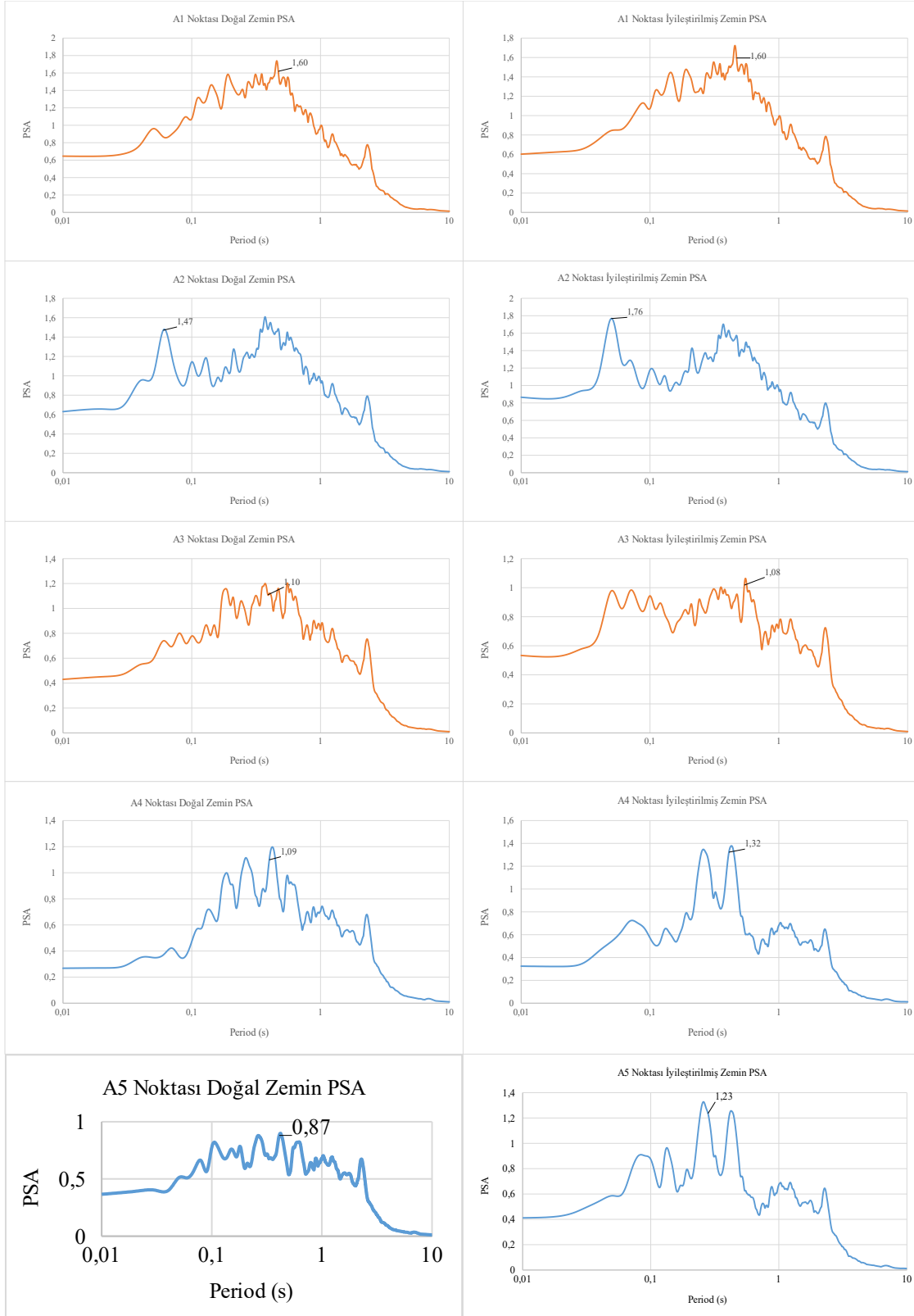


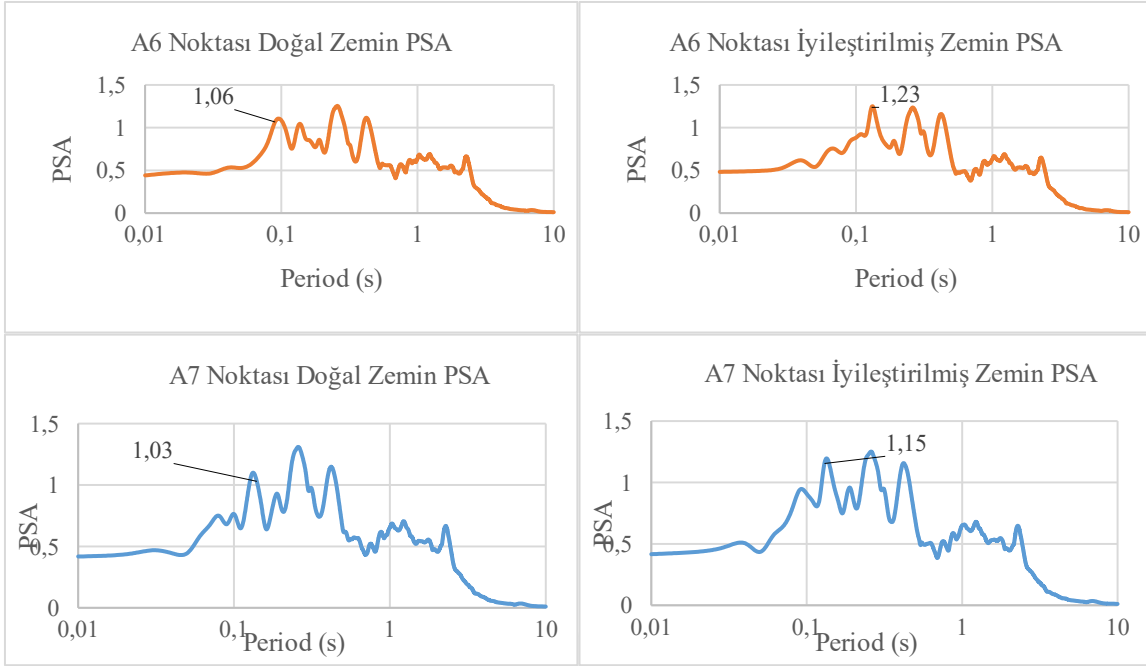


Şekil 8.14. 11 adet depremin iyileştirme öncesi ve sonrası yüzeydeki ivme kayıtları

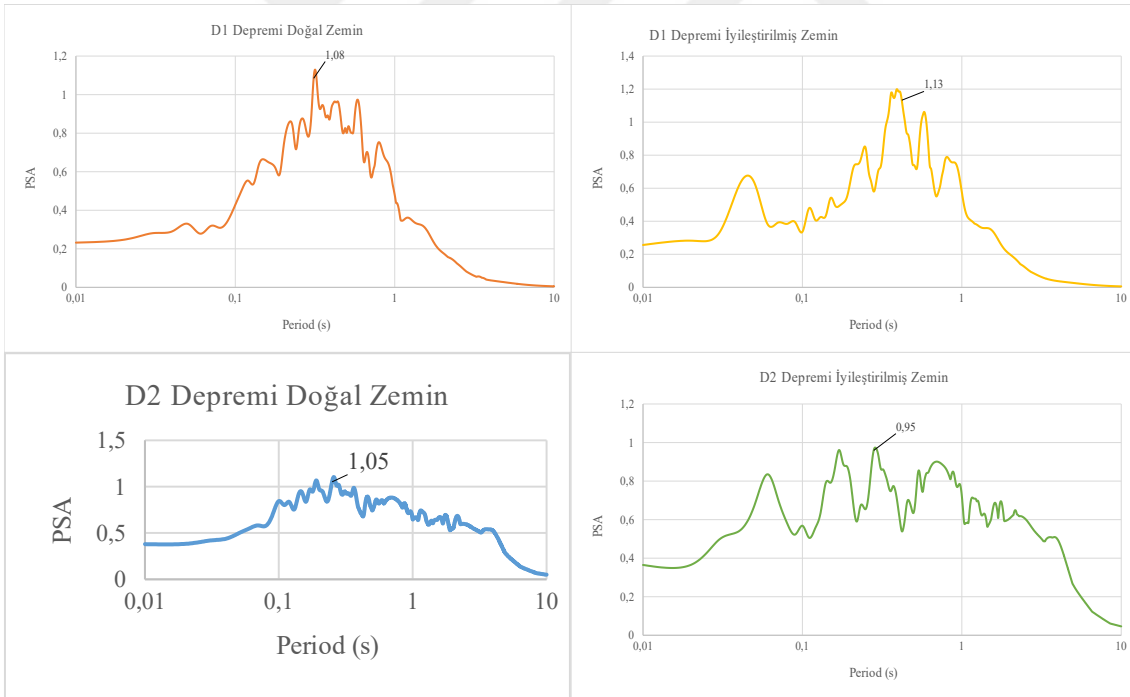
8.2.5. Spektral ivme eğrisi yönünden değerlendirme

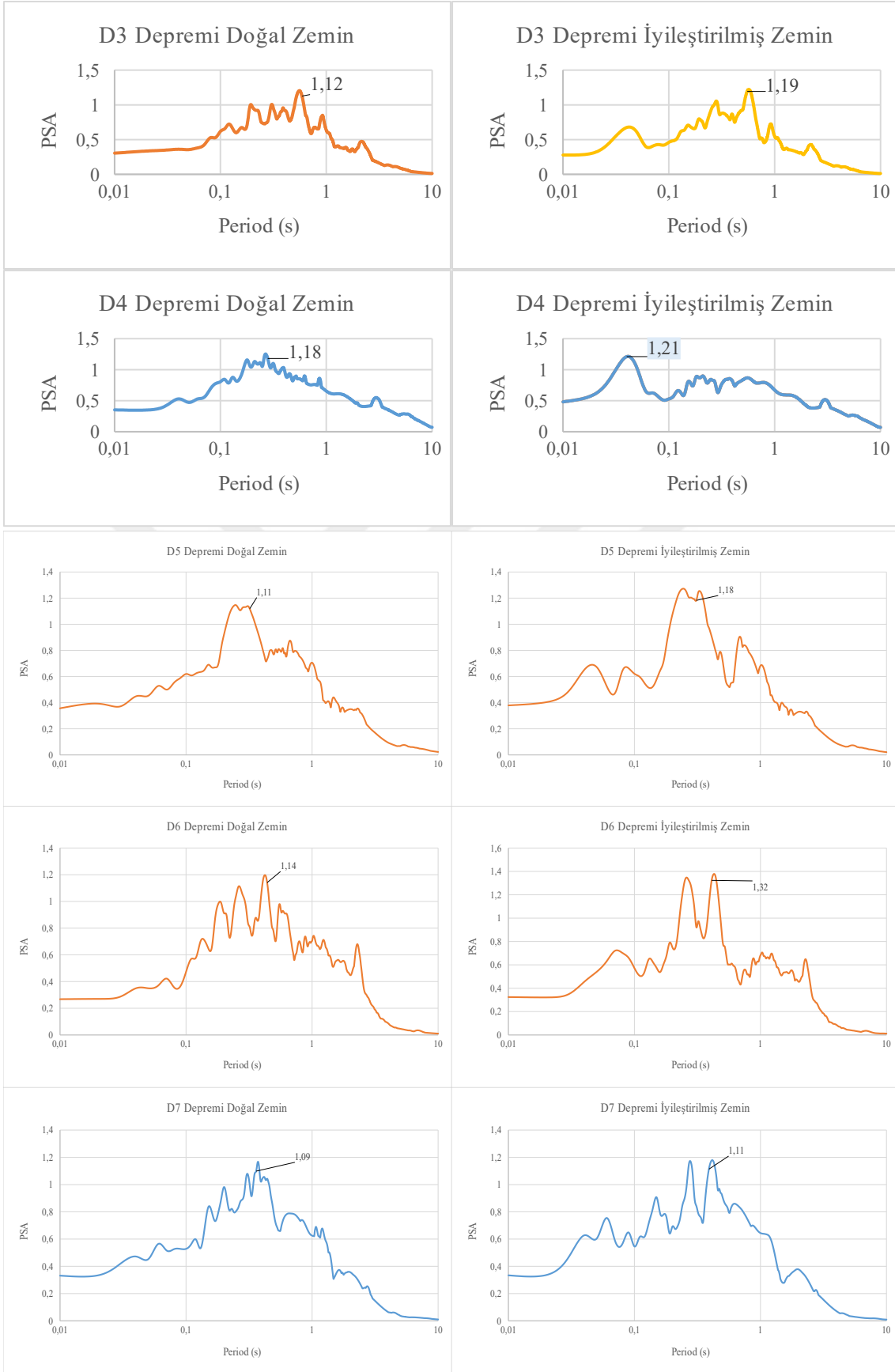
Sayısal analiz sonucunda Şekil 8.4' te gösterilen analiz noktalarından alınan PSA- Dinamik Zaman grafikleri tek bir deprem için tüm noktalarda kayıtlar alınmış olup, uyguladığımız 11 adet deprem içinde ayrı ayrı yüzeydeki Spektral ivme- Dinamik Zaman grafik kayıtları alınmış, iyileştirme öncesi ve sonrası durum için ayrı ayrı gösterilmiştir.

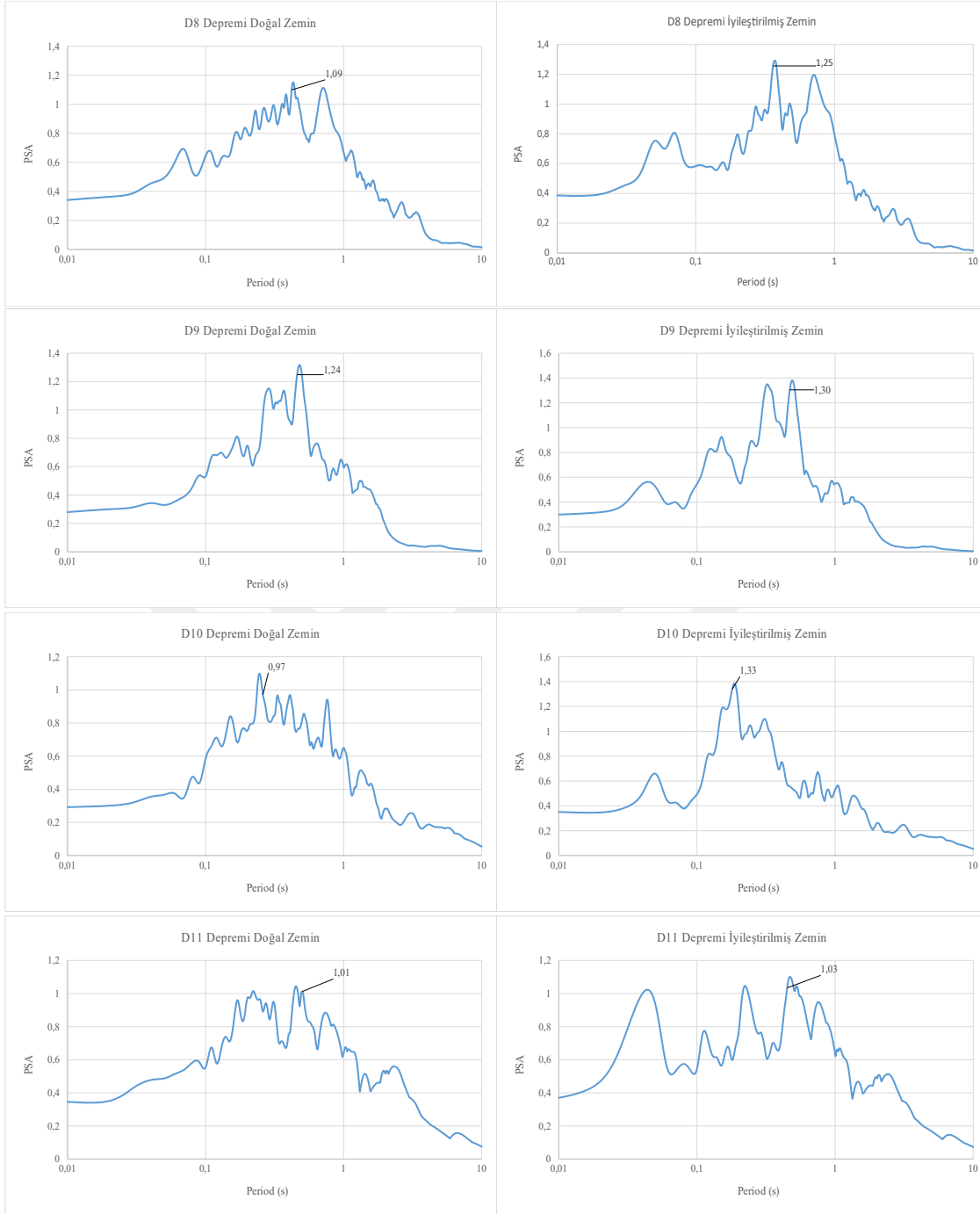




Şekil 8.15. D-6 Depremi'nin A1-A7 noktalarındaki PSA değerleri







Şekil 8.16. 11 adet depremin iyileştirme öncesi ve sonrası yüzeydeki spektral ivme kayıtları

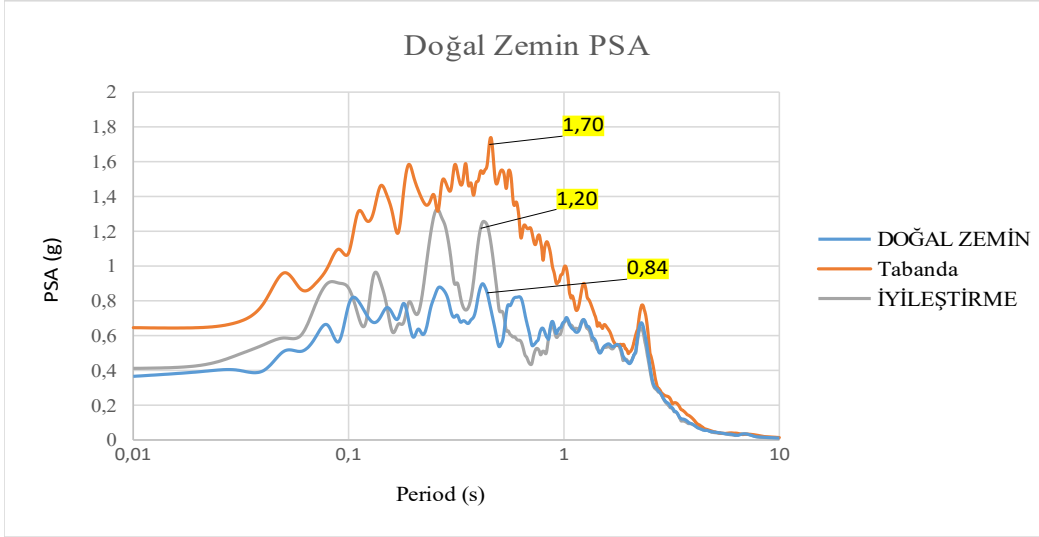
9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Aydın ili, Koçarlı ilçesine ait kötü zemin özelliklerine sahip olan bir parselde yapılmış olan jeolojik ve jeofizik etütler sonucunda elde edilmiş olan zemin etüt ve geoteknik raporlar kullanılarak analizler yapılmıştır. Analizler sıvılaşma problemi olan zeminde hem statik hemde dinamik yükler altında ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bölgenin depremselliği göz önünde bulundurularak PEER veritabanından alınan deprem kayıtları ZD zemin sınıfı için DD-2 tasarım spektrumları ile uyumlu olacak şekilde ölçeklendirilmiştir. Jeolojik ve jeofizik veriler doğrultusunda elde edilen zemin profili sayısal analiz programı olan Plaxis'te UBC3D-PLM modeli kullanılarak modellenmiştir. Sıvılaşma problemi olan zemin profilinde iyileştirme yöntemi olarak Jet Grout yöntemi kullanılmış olup, 11 adet deprem kaydı için iyileştirme öncesi ve sonrası durum için statik ve dinamik analizler yapılmıştır. Sahaya özel yapılan dinamik davranış analizlerinde zeminden etki ettirilen deprem ivme kayıtlarındaki değişimin zemin tabakaları boyunca nasıl değişime uğradığı 7 ayrı noktada gözlemlenmiştir. Yüzeydeki ivme ölçümleri her deprem için ayrı ayrı kayıt altına alınmış grafiklerde gösterilmiştir. Ayrıca 11 adet deprem için elde edilen zemin yüzeyi spektral ivmesinin elastik spektrum ivmesine oranı hesaplanmış ve tüm kayıtların ortalaması alınarak ilgili periyot için yerel zemin etki katsayısı olarak grafik oluşturulmuştur. Bu katsayıların elastik spektrumu ile çarpılması sonucunda, zemin yüzeyindeki sahaya özel deprem spektrumu belirlenmiştir. Hesaplanan bu deprem spektrumu ZD yerel zemin sınıfı göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında sahada yapılan sondajlar ve laboratuvar analizlerinin sonuçları doğrultusunda oluşturulan zemin profili üzerinde sayısal analiz yapılarak zemin iyileştirmesinin sıvılaşma, yatay ve düşey deplasman, deformasyon ve sismik kuvvetler üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Her ne kadar çalışma konusu iyileştirmenin tasarım spektrum eğrisi üzerindeki etkisini değerlendirmek üzerine olsa da iyileştirme sonucu boşluk suyu basıncı oluşumunun önlenmesi ve sıvılaşmanın engellendiği ru değerindeki değişimle gözlemlenmiştir.

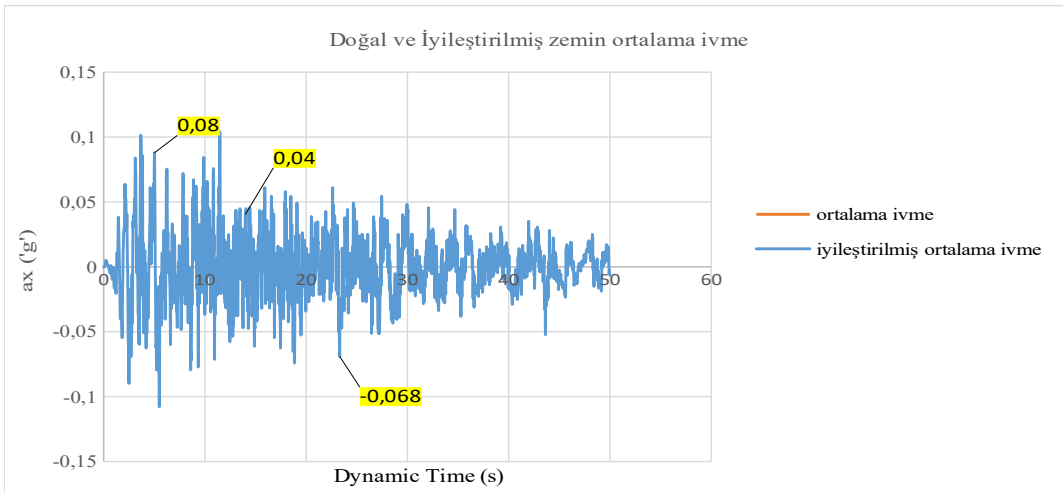
Zemindeki deformasyonun % 50, yatay deplasmanın % 75 ve düşey deplasmanın % 50 oranında azaldığı analizlerle gözlemlenmiştir.

Yüzeydeki ivme kayıtları incelendiğinde Jet Grout kolonlarının hemen altında bulunan zemin tabakasında ivme kayıtlarında artış gözlenirken, iyileştirme yapılan zemin tabakalarında ivme kayıtları azalan eğilim göstermiştir. Buda bize iyileştirmenin etkisini ve daha sıkı bir zemin tabakasına geçiş olduğunu göstermektedir.



Şekil 9.1. Doğal ve iyileştirilmiş zeminin yüzeyindeki spektral ivme değişimi

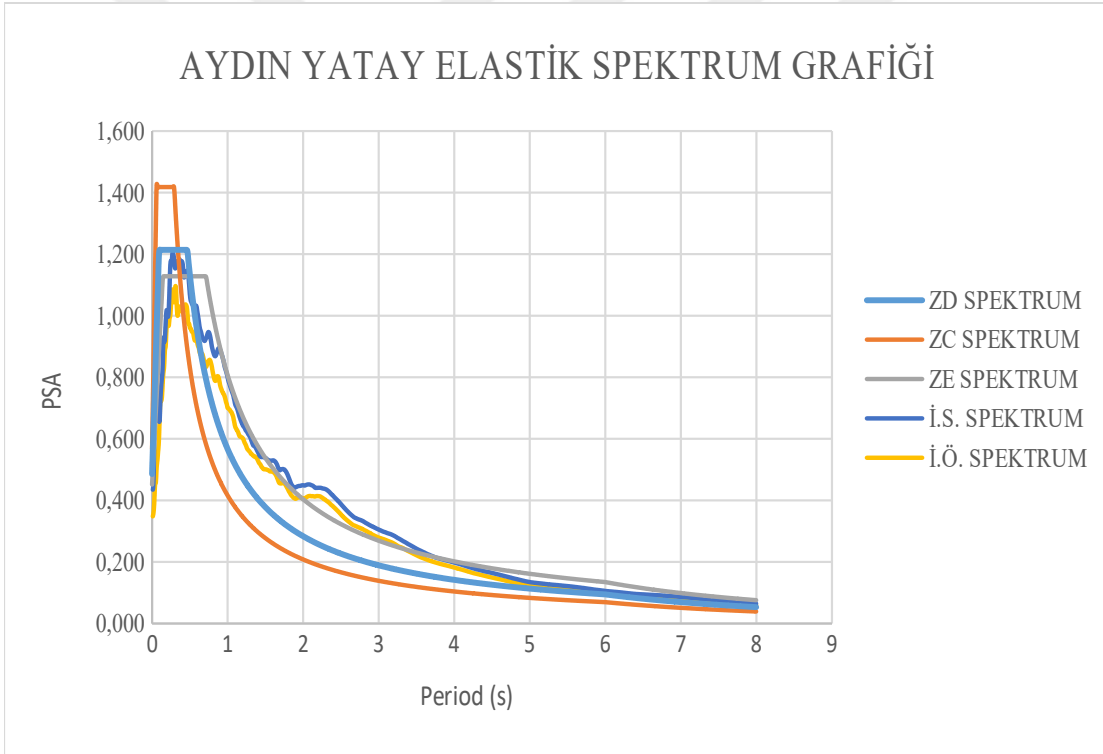
Doğal zemine etki eden deprem kaydında tasarım spektrum eğrisi tabanda 0,1 sn de 0.9 g, doğal zemin yüzeyinde 0.8 g olarak ölçülmüş olup, iyileştirme yapılmış zeminde 1.2 g olarak ölçülmüştür. Spektral ivme kaydında % 50 oranında bir artış gözlenmiştir. Doğal zemine etki eden deprem kaydında tasarım spektrum eğrisi tabanda 1 sn de 0.7 g, doğal zemin yüzeyinde 0.7 g olarak ölçülmüş olup, iyileştirme yapılmış zeminde 1 g olarak ölçülmüştür. Spektral ivme kaydında % 43 oranında bir artış gözlenmiştir.



Şekil 9.2. Doğal ve iyileştirilmiş zeminin yüzeyindeki ortalama ivme değişimi

Şekil 9.2’ de 11 adet deprem kaydının iyileştirme öncesi ve sonrası için ortalama ivme-dinamik zaman grafiği görülmektedir. İyileştirme öncesi ivme kayıtları iyileştirme sonrası durumda azalma eğilimi göstermiştir.

Yapılan analizler sonucunda Şekil 9.3. teki grafikte görüldüğü gibi iyileştirme öncesi ZE zemin sınıfı spektral ivme grafiğine yakın olan ivme grafiği, iyileştirme sonrası ZD zemin sınıfı spektral ivmesine yakın bir eğilim göstermektedir. Jet grout iyileştirmesinin zemindeki etkisini bu grafiklerdeki değişim göstermektedir. Ayrıca İyileştirmenin sıvılaşmayı önleyici etkisi de gözlemlenmiştir.



Şekil 9.3. Spektral ivme grafikleri

KAYNAKLAR DİZİNİ

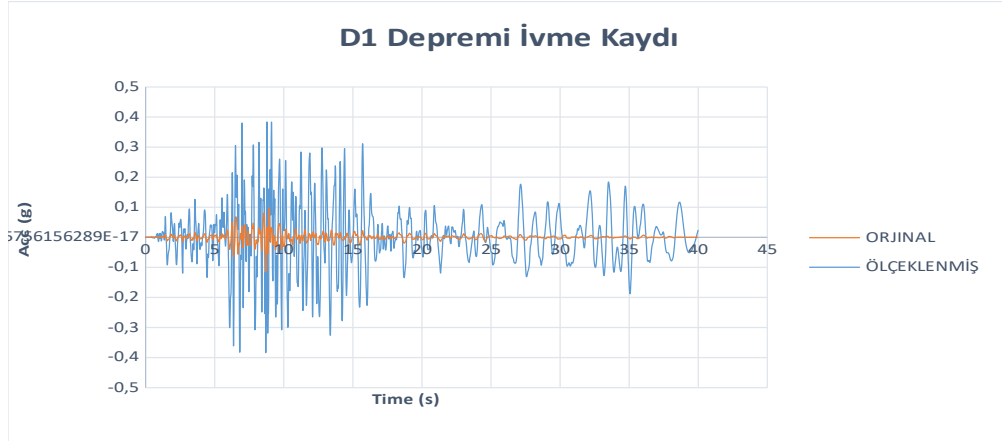
- Akan, R. (2013). *Jet Grout yönteminin zemin iyileştirmesine katkısının ve bu yöntemde kullanılan parametrelerin etkilerinin irdelenmesi* Yüksek lisans tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 60 s. (yayımlanmamış).
- Andrews, D.C.A., Martin, G.R. (2000). *Criteria for liquefaction of silty soils*. 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, s. 1-8.
- Boulanger, R.W, Idriss, I. M. (2006). Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 132(11), 1413–1426.
- Bray, J., Sancio, R. B., Durgunoglu, T., Önalp, A., Youd, T. L., vd. (2004). *Subsurface characterization at ground failure sites in Adapazarı, Turkey*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(7), 673-685.
- Çetin, K. Ö., Unutmaz, B. (2004). *Zemin sıvılaşması ve sismik zemin davranışı* Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 430(2), 33-34.
- Ecemiş, N. (2011). *Deprem Geotekniği: Zemin Sıvılaşması*. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Evans, M. D., Zhou, S. (1995). *Liquefaction behaviour of sand-gravel composites*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(3), 287-298.
- Finn, W.D.L., Ledbetter, R. H., Wu, G. (1994). *Liquefaction in silty soils*. S. Prakash ve P. Dakoulos (Ed.), *Ground Failures Under Seismic Conditions* içinde (s. 51-76). American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication.
- Melegary C., Garassino A. L. (1997). *Seminar on Jet Grouting*. CIPremier Pte. Ltd.
- Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F. (2006). *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri*. Gazi Kitabevi.
- Obermeier, S. F. (1996). *Use of Liquefaction-Induced Features for Paleoseismic Analysis- An Overview of How Seismic Liquefaction Features Can Be Distinguished from Other Features and How Their Regional Distribution and Properties of Source Sediment Can Be Used to Infer the Location and Strength of Holocene Paleo-Earthquakes*. *Engineering Geology*, 44, 1-76,

KAYNAKLAR DİZİNİ

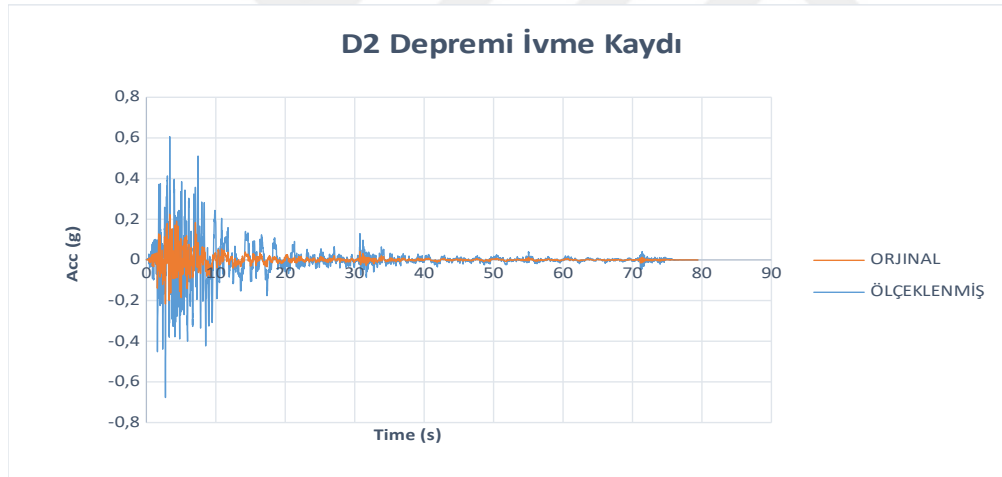
- Rollins, K. M., Seed, H. B. (1990). *Influence of buildings on potential liquefaction damage*. Journal of Geotechnical Engineering, 116(2), 165-185.
- Seed, H. B., Idriss, I. M. (1971). *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 97(9), 1249-1273.
- Seed, R. B., Çetin, K. Ö., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu J., vd. (2003). *Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework*. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, s. 4, California.
- T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması.
- TBDY (2019). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- TBDY (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. T.C. Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Tosun, H., 2002, Dolgu Baraj Depremselliği ve Tasarım Esasları, DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, s.45-74.
- Tunçdemir F. (2004). *Temel zeminlerinin enjeksiyon tekniğiyle iyileştirilmesi*. TMH Türkiye Mühendislik Haberleri, 430(2), 59-64,
- Uzuner, B. A. (1995). *Temel Mühendisliğine Giriş*. Derya Kitabevi.
- Wang, W. S. (1979). *Some findings in soil liquefaction*. Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, s. 1-17.

EK AÇIKLAMALAR

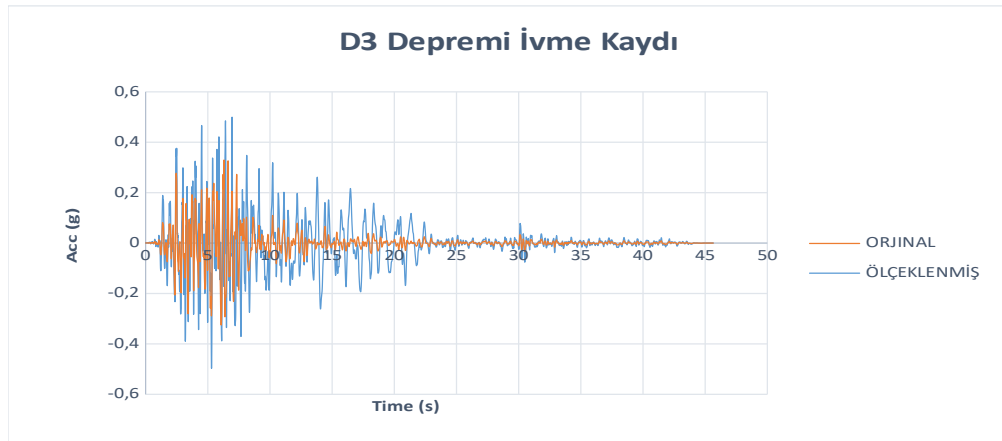
D-1 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



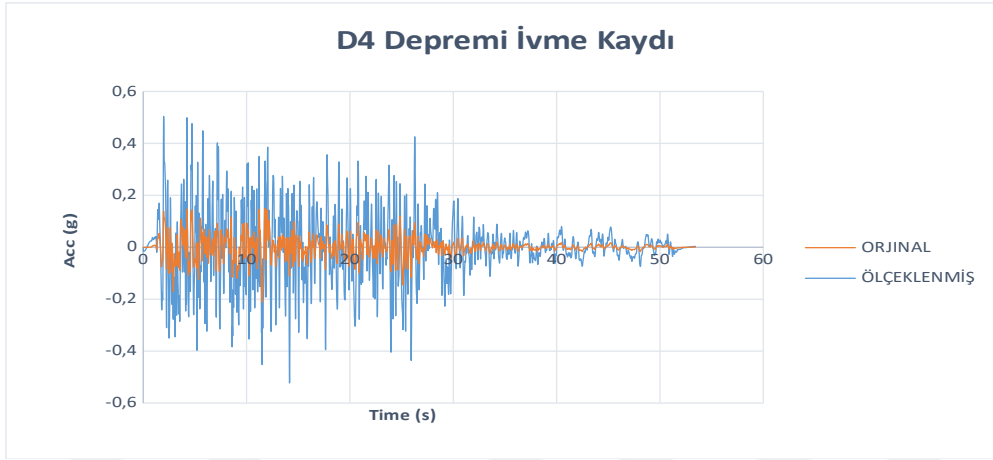
D-2 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



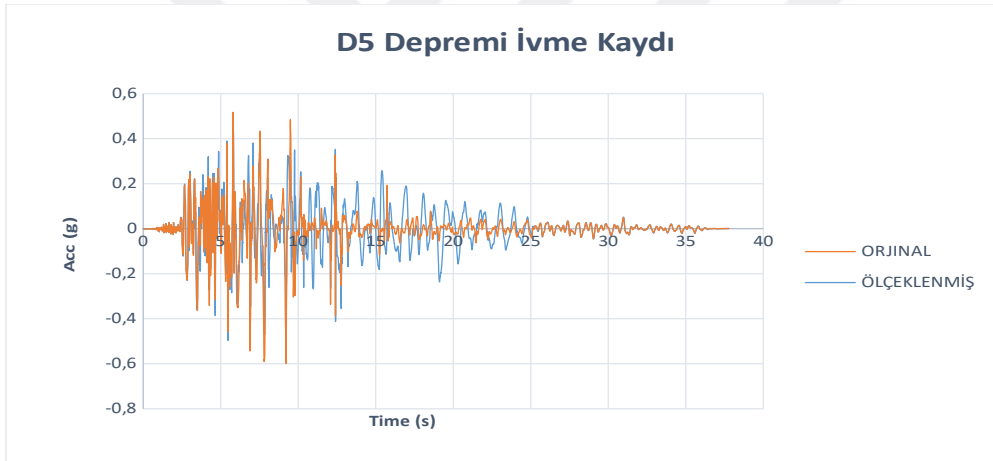
D-3 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



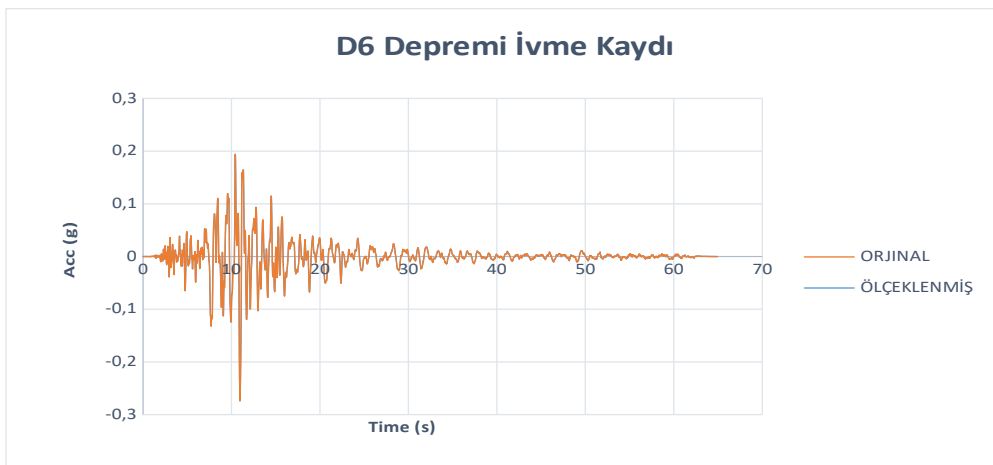
D-4 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



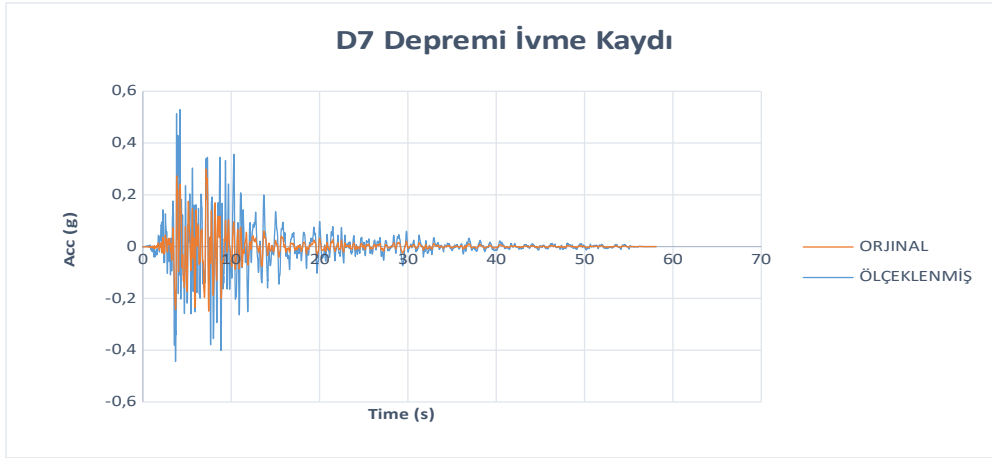
D-5 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



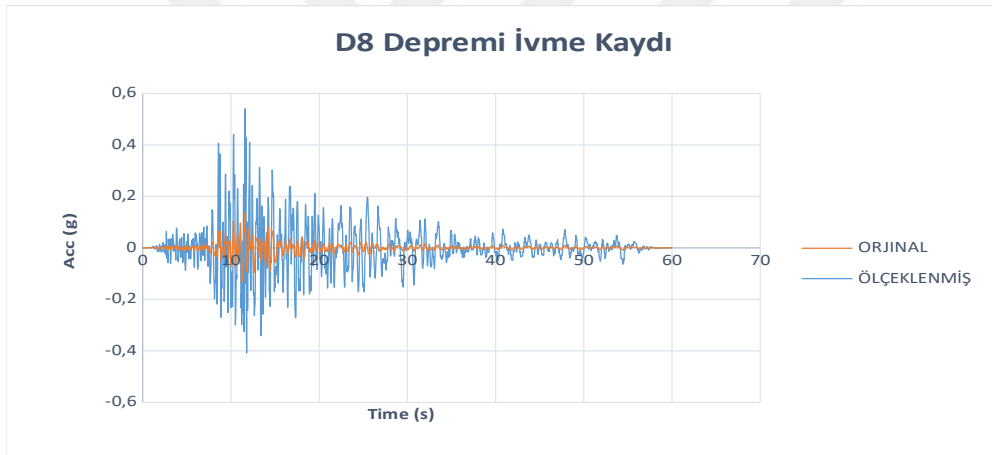
D-6 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



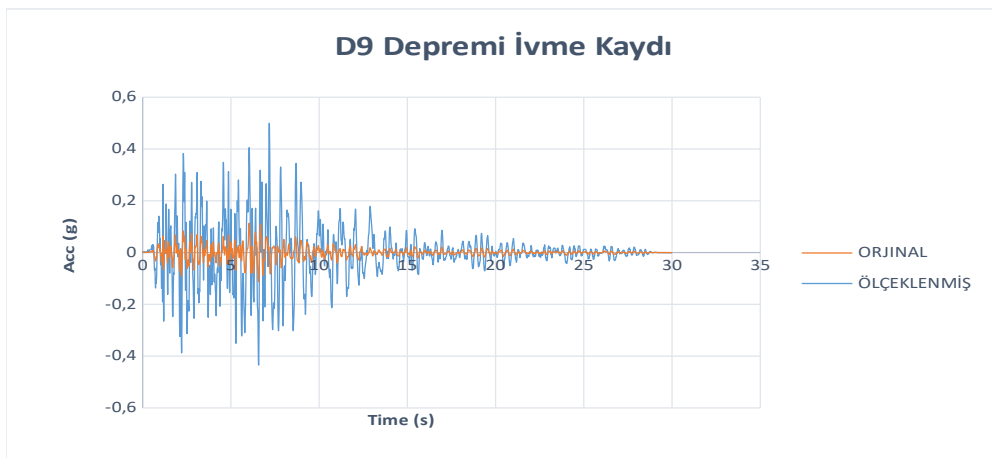
D-7 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



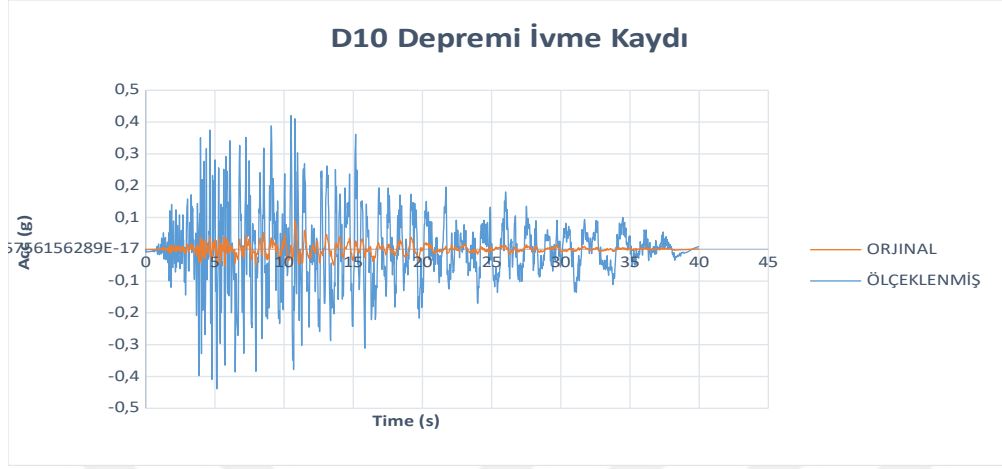
D-8 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



D-9 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



D-10 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı



D-11 Depremi Orjinal ve Ölçeklenmiş İvme Kaydı

