Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi

Mehmet Mert

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2018

Evaluation of Soil Liquefaction Potential Using Linear and Nonlinear Analyses

Mehmet Mert

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Civil Engineering

June 2018

Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi

Mehmet Mert

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Geoteknik Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç.Dr. Hasan Savaş

"Bu tez ESOGÜ-BAP tarafından 2018-1979 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir."

Haziran 2018

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Mehmet Mert'in YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırladığı "Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi" 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. Volkan Okur

Üye : Doç.Dr. Murat Türköz

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Evren Seyrek

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Kamil Bekir Afacan

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç.Dr. Hasan Savaş danışmanlığında hazırlamış olduğum "Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Analizlerle Değerlendirilmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik 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. 30/06/2018

Mehmet Mert

İmza

ÖZET

Deprem esnasında meydana gelen sismik dalgaların oluşturduğu tekrarlı kayma gerilmeleri altında boşluk suyu basıncındaki ani artışa bağlı olarak efektif gerilmenin azalması nedeniyle, suya doygun zeminlerin mukavemet kaybına uğrayarak bir sıvı gibi davranması "sıvılaşma" olarak nitelendirilmektedir. Sıvılaşmaya bağlı olarak meydana gelen yapısal hasarların önlenebilmesi veya sıvılaşmanın olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi için, dinamik (tekrarlı) yüklerin etkisi altında bulunan ve sıvılaşma riski taşıyan zeminlerin, yerel zemin koşullarına bağlı olarak bu yükler altında nasıl bir davranış sergileyeceğinin araştırılması, sıvılaşma potansiyelinin önceden belirlenmesi ve değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında; Eskişehir ili Çifteler İlçesi çalışma alanında yer alan sıvılaşabilir özellikteki zeminlerden oluşan ve sondaj verileri bulunan 18 adet hücrenin DEEPSOİL programında bir boyutlu frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal yöntem ve bir boyutlu zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile zemin dinamik davranış analizleri ve sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda; yüzeyde oluşacak ivme değerlerinin değişimi belirlenerek, söz konusu hücrelerin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları ve sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri hesaplanmıştır. Son olarak da, eşdeğer doğrusal analizler sonucu elde edilen sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri kullanılarak belirlenen sıvılaşma potansiyeli dereceleri, doğrusal olmayan zemin dinamik analizleri sonucu elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum değerleri ile karşılaştırılmak suretiyle, çalışma alanında yer alan zeminlerin sıvılaşma potansiyeli her iki analiz yöntemi için incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Sıvılaşma, Sıvılaşma Potansiyeli, DEEPSOİL, Eşdeğer Doğrusal Analiz, Doğrusal Olmayan Analiz.

SUMMARY

Liquefaction is defined as the actuation of a water-saturated soil due to loss of strength due to the decrease in effective stress due to the sudden increase in the pressure of the water under the repeated shear stresses created by seismic waves during the earthquake. In order to prevent structural damage due to liquefaction or to reduce the adverse effects of liquefaction, it is important to investigate how the floors bearing the risk of liquefaction under the influence of dynamic (recurrent) loads will behave under these loads depending on the local soil conditions and the preliminary determination and evaluation of the liquefaction potential it is important. In this thesis study; ground dynamic behavior analysis and liquefaction analysis were carried out in DEEPSOIL program of 18 cells which are composed of liquefied property grounds in the Çifteler District of Eskişehir province and in one dimensional frequency definition field and nonlinear method in one dimensional time definition field. As a result of the analyzes made; the change of the acceleration values to be formed on the surface is determined, and the safety numbers and liquefaction potential index values of the respective cells are calculated. Finally, equivalent linear analyzes were used for both analysis methods with liquefaction potentials of the grounds in the study area, by comparing the liquefaction potential grades determined using the liquefaction potential index values obtained from the resultant, nonlinear soil dynamic analyzes to the resulting groundwater pressure formations.

Keywords: Liquefaction, Liquefaction Potential, DEEPSOİL, Equivalent Linear Analysis, Nonlinear Analysis.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmamı hazırlamam esnasında sahip oldukları bilgi, birikim ve tecrübeleri bana aktararak yardımcı olan başta danışman hocam Doç.Dr. Hasan Savaş olmak üzere, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri Dr.Öğr. Üyesi Kamil Bekir Afacan'a ve Doç.Dr. Murat Türköz'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Yüksek Lisans tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan ve desteklerini benden esirgemeyen aileme ve iş arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans tez çalışması ESOGÜ-BAP tarafından "2018-1979" numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi

SUMMARY vii

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xv

ÇİZELGELER DİZİNİ xviii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xix

1. GİRİŞ VE AMAÇ 1

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

3. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA 16

3.1. Sıvılaşmanın Tanımı 16

3.2. Sıvılaşma Mekanizması 16

3.3. Sıvılaşma Türleri 17

3.3.1. Akma türü sıvılaşma 17

3.3.2. Devirsel hareketlilik 18

3.4. Sıvılaşma Nedeniyle Oluşan Hasar Tipleri 18

3.4.1. Kum kaynaması 18

3.4.2. Akma göçmesi 19

3.4.3. Yanal yayılma 19

3.4.4. İstinat yapısı yenilmesi 20

3.4.5. Taşıma gücü kaybı 20

3.4.6. Gömülü yapı yüzeylenmesi 21

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.5. Sıvılaşma İçin Gerekli Koşullar (Sıvılaşma Duyarlılığı) 21
3.5.1. Depremin büyüklüğü ve süresi 22
3.5.2. Yeraltı su seviyesi 22
3.5.3. Zeminin tipi 22
3.5.4. Zeminin sıkılık derecesi 25
3.5.5. Zeminin tane boyutu ve dağılımı 26
3.5.6. Yerleştirme ve çökelme ortamı 27
3.5.7. Tabakalanma özellikleri ve drenaj şartları 27
3.5.8. Çevre basıncı 28
3.5.9. Zeminin tane şekli 28
3.5.10. Yaş ve taneler arası çimentolanma 28
3.5.11. Gerilme tarihçesi 29
3.5.12. Yatay toprak basıncı katsayısı 29
3.5.13. Aşırı konsolidasyon oranı 30
3.5.14. Bina yükü 30
4. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ 31
4.1. Basitleştirilmiş Yöntem 31
4.1.1. Tekrarlı gerilme oranı 31
4.1.2. Tekrarlı direnç oranı 32
4.1.3. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı 36
4.1.4. Sıvılaşma potansiyeli indeksi 37
4.2. Olasılıksal Yöntemler 38
4.3. Nümerik Analiz Yöntemleri 38

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. DEEPSOİL PROGRAMI 40

5.1. Program Hakkında 40

5.2. Programın Yapısı 40

5.3. Analiz Aşamaları 41

5.3.1. Analizin tanımlanması 42

5.3.1.1. Lineer (doğrusal) analiz 42

5.3.1.2. Frekans tanım alanında eşdeğer lineer (doğrusal) analiz 43

5.3.1.3. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan (nonlineer) analiz 44

5.3.1.4. Doğrusal olmayan omurga eğrisinin formülasyonu 45

5.3.1.5. Histerik (boşaltma-yükleme) eğrisinin formülasyonu 48

5.3.1.6. Boşluk suyu basıncının oluşumu ve yayılması 49

5.3.1.7. Başlangıç dinamik parametrelerinin tanımlanması 55

5.3.1.8. Zemin modeli 55

5.3.1.9. Birimler 56

5.3.2. Zemin profilinin tanımlanması 56

5.3.2.1. Zemin profili gösterimi 56

5.3.2.2. Zemin profili 57

5.3.2.3. Yer altı su seviyesi 58

5.3.2.4. Tablo lejantı 59

5.3.2.5. Dönüştürme araçları 59

5.3.3. Profil özeti 59

5.3.4. Anakaya özelliklerinin tanımlanması 59

5.3.4.1. Anakaya tipi 60

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.3.4.2. Anakaya özellikleri 60

5.3.4.3. Anakaya özelliklerine dair bilgiler 60

5.3.4.4. Kaydedilen anakaya özelliklerinin kullanılması 61

5.3.4.5. Konsolidasyon katsayısının girilmesi 61

5.3.4.6. Dekonvolüsyon 61

5.3.5. Zemin tabakalarının ve girdi hareketlerinin seçilmesi 61

5.3.5.1. Çıktı hareketine ihtiyaç duyulan tabakalar 62

5.3.5.2. Tepki spektrumu sönümlemesi 62

5.3.5.3. Hareketin seçimi 62

5.3.5.4. Zaman tanımlı grafikler 62

5.3.5.5. Spektral grafikler 63

5.3.5.6. Üç taraflı grafikler 63

5.3.5.7. Bilgi tablosu 63

5.3.5.8. Grafiklerin rengi 63

5.3.6. Viskoz sönümleme formülasyonunun seçilmesi 63

5.3.6.1. Sönümleme matrisi tipi 65

5.3.6.2. Rayleigh sönümleme seçenekleri 65

5.3.6.3. Girdi hareketi 65

5.3.6.4. Doğrusal frekans alanı grafiğinin çizilmesi 65

5.3.6.5. Doğrusal zaman alanı ile kontrol yapılması 66

5.3.6.6. Doğrusal zaman alanı grafiğinin silinmesi 66

5.3.6.7. Rayleigh sönüm eğrisinin çizilmesi 66

5.3.6.8. Sönümleme matrisinin güncellenmesi 66

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.3.7. Analiz kontrol parametreleri 66
5.3.7.1. Frekans alanı analizi 67
5.3.7.2. Zaman alanı analizi 68
5.3.8. Analiz sonuçları 68
5.3.8.1. Özet profiller 69
5.3.8.2. Mobilize edilmiş mukavemet profili 69
5.3.8.3. Tepki spektrumu özeti 70
5.3.8.4. Deplasman profili ve animasyon 70
5.3.8.5. Yakınsamanın kontrolü 70
5.3.8.6. Girdi parametreleri özeti 70
6. MATERYAL VE YÖNTEM 71
6.1. Materyal 71
6.1.1. Geoteknik veriler 71
6.1.2. Zemin dinamik davranış analiz programı 71
6.1.3. Sıvılaşma analiz yöntemleri 72
6.2. Yöntem 77
6.2.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulması 77
6.2.2. Zemin dinamik davranış analizlerinin gerçekleştirilmesi 80
6.2.3. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi 81
7. BULGULAR VE TARTIŞMA 82
7.1. Zemin Davranış Analizi Sonuçları 82
7.2. Sıvılaşma Analizi Sonuçları 89

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8. SONUÇ VE ÖNERİLER 111

KAYNAKLAR DİZİNİ 113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

3.1. Sıvılaşma oluşum mekanizması 16

3.2. Kum kaynaması oluşumunu gösteren kesit 18

3.3. Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen akma göçmesi..... 19

3.4. Sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılma 19

3.5. Sıvılaşma nedeniyle oluşan istinat yapısı yenilmesi 20

3.6. Sıvılaşma sonucu meydana gelen taşıma gücü kaybı 21

3.7. Gömülü yapı elemanlarının sıvılaşma sonucu yüzeylenmesi 21

3.8. Geliştirilmiş Çin kriterleri 23

3.9. Kocaeli depremi sonrasında elde edilen test sonuçları 24

3.10. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi 24

3.11. Atterberg limit çizelgesi 25

3.12. Sıvılaşma açısından duyarlı tane boyutu aralığı 27

3.13. Gerilme tarihçesinin sıvılaşma direncine etkisi 29

3.14. Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşma direncine etkisi 29

3.15. Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşma direncine etkisi 30

4.1. M=7.5 için tekrarlı direnç oranı ve $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki 35

5.1. DEEPSOİL programınım kullanıcı arayüzünde yer alan sekmeler 40

5.2. DEEPSOİL programının yapısal akış şeması 41

5.3. Analiz tanımlama penceresi 42

5.4. Eşdeğer doğrusal yinelemeli prosedür a) Modül azalım eğrisi b) Sönümleme eğrisi 43

5.5. Yatay olarak tabakalanmış zemin kolonunun çoklu-serbestlik-dereceli toplu parametre modeli 44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

5.6. Doğrusal olmayan hiperbolik zemin modeli 46

5.7. Genişletilmiş Masing kuralları 48

5.8. Zemin profilinin tanımlanması 56

5.9. Malzeme özelikleri penceresi 57

5.10. Parametre değerlerinin girilmesi 58

5.11. Zemin eğrilerinin oluşturulması 58

5.12. Profil özeti penceresi 59

5.13. Anakaya özelliklerinin tanımlanması 60

5.14. Zemin tabakalarının ve girdi hareketlerinin seçilmesi 62

5.15. Küçük birim deformasyonda sönümlemenin tanımlanması 64

5.16. Frekans ve zaman alanı analizleri için kontrol parametreleri 67

5.17. Analiz sonuçları penceresi 69

6.1. İnceleme alanını oluşturan 250x250 m boyutlarındaki hücreler 72

6.2. Kocaeli depremine ait ivme ve spektrum grafikleri 81

7.1. G6, B7, D7 ve G7 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri 83

7.2. H7, I7, D8 ve E8 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri 84

7.3. F8, G8, L8 ve C9 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri 85

7.4. H9, I9, H10 ve I10 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri 86

7.5. J10 ve K10 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri 87

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

7.6. G6 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 93

7.7. B7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 94

7.8. D7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 95

7.9. H7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 96

7.10. I7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 97

7.11. D8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 98

7.12. E8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 99

7.13. F8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 100

7.14. G8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 101

7.15. L8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 102

7.16. C9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 103

7.17. H9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 104

7.18. I9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 105

7.19. H10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 106

7.20. I10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 107

7.21. J10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 108

7.22. K10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 109

7.23. G7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları 110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Siltli ve killi kumların sıvılaşabilirliği 23

3.2. Relatif sıkılık oranına göre zemin sınıflandırılması 26

4.1. SPT için enerji oranı düzeltme katsayıları 33

4.2. SPT için kuyu çapı düzeltme katsayıları 34

4.3. SPT için tij boyu düzeltme katsayıları 34

4.4. Sıvılaşma potansiyeli indeksine göre potansiyel dereceleri 38

4.5. Sıvılaşma potansiyeli indeksine göre potansiyel dereceleri 38

5.1. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşum model ve parametreleri 50

5.2. Dobry / Matasovic model parametrelerinin tanımları 51

5.3. Matasovic ve Vucetic model parametrelerinin tanımları 52

5.4. GMP model parametrelerinin tanımları 53

5.5. Genelleştirilmiş model parametrelerinin tanımları 53

5.6. Park ve Ahn model parametrelerinin tanımı 54

6.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulmasında kullanılan geoteknik veriler 73

6.2. Dinamik davranış analizlerinde kullanılan temsili zemin profilleri 78

6.3. Çalışma kapsamında kullanılan zemin grupları ve dinamik davranış modelleri 80

6.4. Çalışma kapsamında kullanılan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri 80

7.1. Seçilen hücreler için zemin davranış analizi sonuçlarının karşılaştırılması 88

7.2. Sıvılaşma analizi sonucu elde edilen güvenlik katsayıları 90

7.3. Çalışma alanındaki hücreler için belirlenen LPI değerleri ve sıvılaşma potansiyeli dereceleri 92

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
Hz	Hetz
s	Saniye
%	Yüzde
Gs	Dane özgül ağırlığı
ɣ	Birim hacim ağırlığı
GM	Siltli çakıl
GM-GC	Siltli ve killi çakıl
GW	İyi derecelenmiş çakıl
SW	İyi derecelenmiş kum
CH	Yüksek plastisiteli kil
CL	Düşük plastisiteli kil
CL-ML	Düşük plastisiteli siltli kil
MH	Yüksek plastisiteli silt
ML	Düşük plastisiteli silt
SC	Killi kum
SM	Siltli kum

Kısaltmalar	**Açıklama**
EERA	Equivalent Linear Earthquake Response Analyses
FLAC	Fast Lagrangian Analysis of Continua
LNG	Liquefied Natural Gas
PGA	Peak Ground Acceleration
PSA	Pseudo Spectral Acceleration
NCEER	National Center for Earthquake Engineering Research
USCS	Unified Soil Classification System
MRDF	Modulus Reduction and Damping Factor
GMP	Green, Mitchel and Polito
YASS	Yeraltı Su Seviyesi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Dünyanın değişik bölgelerinde olduğu gibi ülkemizde de meydana gelen, oluşturduğu büyük çaptaki yapısal hasarların yanı sıra, çok sayıda can ve mal kaybı ile yaralanmalara neden olan doğal afetlerin en başında hiç kuşkusuz deprem gelmektedir. Deprem, yer kabuğu içerisinde meydana gelen kırılmalar (faylar) ve volkanik aktiviteler nedeniyle, aniden ortaya çıkan titreşimlerin sismik dalgalar halinde yayılması ve yer yüzeyini sarsması sonucu oluşmaktadır. Bu sismik dalgalar, zemin tabakalarının içinden geçtiği sırada düzensiz kayma gerilmelerine yol açmakta ve yerel zemin koşullarına bağlı olarak zemin tabakalarında bir yumuşama ve dayanım (mukavemet) kaybına neden olabilmektedir (Ansal, 1999). Bu durumda, söz konusu zemin tabakalarının üzerinde yer alan yapılarda büyük boyutta hasarlar meydana gelebilmektedir. Tekrarlı gerilmeler altında yerel zemin koşullarının neden olduğu yapısal hasarlardan biri de, genellikle kohezyonsuz zeminlerde karşılaşılan "sıvılaşma" olayıdır.

Deprem esnasında meydana gelen sismik dalgaların oluşturduğu tekrarlı kayma gerilmeleri altında boşluk suyu basıncındaki ani artışa bağlı olarak efektif gerilmenin azalması nedeniyle, suya doygun zeminlerin mukavemet kaybına uğrayarak bir sıvı gibi davranması "sıvılaşma" olarak nitelendirilmektedir. Sıvılaşma durumunda; temel zemininde taşıma gücü kaybı, büyük çapta oturmalar, şev göçmeleri, yanal zemin ötelemeleri, gömülü yapıların yüzeylenmesi ve istinat yapılarında yenilme gibi hasarlar meydana gelmektedir. Yapılarda meydana gelen bu hasarların can kayıplarına neden olması ve ekonomiyi olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle, sıvılaşma konusunda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmakta ve önem kazanmaktadır.

İlk kez 1918 yılında Amerikalı mühendis Allen Hazen tarafından Kaliforniya'daki Calaveras Barajının göçmesine atfen kullanılan "sıvılaşma" kavramı, 1964 yılında meydana gelen Nigata (Japonya) ve Büyük Alaska (ABD) depremlerinden sonra, 1965 yılında Arthur Casagrande tarafından "sismik sıvılaşma" olarak tanımlanmıştır. Her iki depremde sıvılaşmanın etkisiyle temel zemininde taşıma gücü kaybı, yanal zemin ötelemeleri, gömülü yapıların yüzeylenmesi ve istinat yapılarında ötelenme gibi hasarlar meydana gelmiştir.

Ülkemizde sıvılaşma ile ilgili yapısal hasarların gözlendiğine yönelik bulguların izlendiği bazı depremlerin daha önce de yaşanmasına karşın, 13 Mart 1992 tarihinde meydana gelen Erzincan depremi ile birlikte sıvılaşma olayı Türkiye'de daha fazla dikkate alınmaya başlanmıştır (Aydan vd., 2000). Erzincan ovası, 6,8 büyüklüğündeki depremle sarsılmış ve bunun sonucu olarak ovada yer alan Ekşisu bölgesinde de siltli kumlu zemin tabakalarının sıvılaşması sonucu zemin yüzeyinde kum konileri oluşmuştur. Zeminde deprem sonrası meydana gelen oturmalar nedeni ile yüzey dalgalı bir görünüm almıştır (Erken vd.,1997).

17 Ağustos 1999 günü meydana gelen 7,4 büyüklüğündeki Kocaeli ve Düzce depreminde, zeminlerin sıvılaşması ve yumuşaması zeminde büyük deformasyonların oluşmasına ve bunun sonucu olarak da taşıma gücü kayıplarına neden olmuştur. Bunun sonucunda, deprem bölgesinde temel zeminine bağlı olarak oluşan yapısal hasarlarda büyük artış olduğu görülmüştür. Zemin kaynaklı yapısal hasarlar özellikle Gölcük kıyıları ve Marmara Denizi kıyılarında, Sapanca Gölü çevresinde ve Adapazarı şehrinin ova üzerine yerleşmiş bölümünde oluşmuştur. Deprem sırasında oluşan sıvılaşmadan dolayı derin çatlaklar, aşırı oturmalar, yanal yayılmalar ve taşıma gücü kayıpları yaygı olarak görülmüştür. Yapıların bir kısmı tamamen yıkılırken, bazı yapılar ise sıvılaşmadan dolayı oturmuş, dönmüş veya zemine batmıştır (Erken vd., 2004).

23 Ekim 2011 tarihinde meydana gelen merkez üstü Van-Tabanlı olan 7,2 büyüklüğündeki depremde, Van il merkezinde, Erciş ilçesinde ve bu iki yerleşim birimi arasında Van Gölü kıyısı boyunca sıralanmış köylerde ciddi boyutlarda hasar meydana gelmiştir. Deprem sonrasında bölgede yapılan incelemelerde, zemin sıvılaşmasına bağlı olarak yanal yayılmalar, kum konileri, çatlaklar, oturmalar, heyelanlar ve şev kaymalarının oluştuğu gözlenmiştir. Sıvılaşan zeminlerden alınan numuneler üzerinde laboratuvar ortamında yapılan elek analizleri sonucunda, numunelerin dane dağılım eğrilerinin sıvılaşma potansiyeli olan zeminlerin dane dağılım eğrileri aralığında olduğu görülmüştür (Gülerce vd., 2011).

Sıvılaşmaya bağlı olarak meydana gelen yapısal hasarların önlenebilmesi veya sıvılaşmanın olumsuz etkilerinin azaltılabilmesi için, dinamik (tekrarlı) yüklerin etkisi altında bulunan ve sıvılaşma riski taşıyan zeminlerin, yerel zemin koşullarına bağlı olarak bu yükler altında nasıl bir davranış sergileyeceğinin araştırılması, sıvılaşma potansiyelinin önceden belirlenmesi ve değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesiyle ilgili bugüne değin çok sayıda çalışma yapılmış bulunmaktadır. 1970'li yılların başından günümüze kadar geçen süre içinde tekrarlı üç eksenli deneyinin avantaj ve dezavantajları, yerinde yapılan deneylerin önemi ve ampirik ilişkilerin geçerliliği gibi birçok konuda detaylı araştırmalar yapılmış ve bu konularla ilgili yer yer farklı düşünceler oluşmuştur. Ancak konuyla ilgili yapılan tüm çalışmalar, esas itibariyle "deprem yükü için gereken direncin, zeminin mevcut direnciyle mukayesesi" üzerine kurulmuştur (Tosun, 2002).

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ile ilgili olarak önerilen çeşitli analiz yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerden pratikte en yaygın kullanılan ve geçerli olanı Seed ve İdriss (1971) tarafından önerilen çevrimli gerilme oranı yaklaşımıdır. "Basitleştirilmiş Yöntem" olarak da bilinen bu yaklaşık yöntem; ampirik esaslara dayalı olup, arazi ve laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerin kullanılması ile birlikte, zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi konusunda önemli bilgiler elde edilmesini sağlamaktadır.

Günümüzde birçok araştırmacının yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucu geliştirilen bünye modellerini içeren, bir, iki, üç boyutlu lineer (doğrusal) ve nonlineer (doğrusal olmayan) zemin davranış analizi yapabilen çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Genellikle, taban kayası olarak nitelendirilen formasyondan yukarı doğru hareket ettiği varsayılan kayma dalgalarının yayılımını esas alan bu yazılımlar sayesinde zeminlerin dinamik özellikleri (kayma modülü, sönüm oranı) göz önüne alınarak, tekrarlı kayma gerilmeleri altında zemindeki hacim değişimi ve boşluk suyu basıncı artışı modellenebilmektedir. Böylelikle, yerel zemin tabakalarının deprem sırasındaki muhtemel davranışları gerçeğe yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında; daha önce Savaş vd. (2012) tarafından Eskişehir ili Çifteler İlçesi yerleşim alanı temel zemininin statik ve dinamik özelliklerini incelemek için gerçekleştirilen proje kapsamında yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen yerel zemin özelliklerinin bir kısmı kullanılarak, çalışma alanında yer alan sıvılaşabilir özellikteki zeminlerden oluşan hücrelerin DEEPSOİL programında bir boyutlu frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal yöntem ve bir boyutlu zaman tanım alanında doğrusal olmayan yöntem ile zemin dinamik davranış analizleri ve sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda; yüzeyde oluşacak ivme değerlerinin değişimi belirlenerek, söz konusu hücrelerin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları ve sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri hesaplanmıştır. Son olarak da, eşdeğer doğrusal analizler sonucu elde edilen sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri kullanılarak belirlenen sıvılaşma potansiyeli dereceleri, doğrusal olmayan zemin dinamik analizleri sonucu elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum değerleri ile karşılaştırılmak suretiyle, çalışma alanında yer alan zeminlerin sıvılaşma potansiyeli her iki analiz yöntemi için incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Uyanık (2002), gevşek ve suya doygun zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncinin değerlendirilmesi için kayma dalga hızı ölçümlerine bağlı bir yöntem ortaya koymuştur. Bu yöntemde, kayma dalgası hız ölçümleri ve deprem dalgasının hakim periyodu kullanılarak sıvılaştırmayı oluşturan devirsel gerilme oranı tespit edilmiştir. Bu oran ile daha önceki araştırmacılar tarafından geliştirilen devirsel gerilme oranı arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Çelik (2003); Denizli ili merkezindeki zeminleri basitleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırdıktan sonra, arazide yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerinden yararlanarak sıvılaşma analizlerini gerçekleştirmiş ve analiz sonuçlarını sıvılaşma indeksi kapsamında değerlendirilerek inceleme alanı için sıvılaşma potansiyeli haritaları oluşturmuştur.

Çavuş (2004); gevşek kum depozitlerin sıvılaşma potansiyelini, dünyada sıvılaşma olan yerlere ait arazi Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) değerlerinden korelasyon yoluyla elde ettiği kayma dalgası hızını ve sıvılaşmaya etki eden diğer önemli parametreleri (düzeltilmiş SPT değeri, yer altı suyu derinliği, zemin derinliği ve deprem zemin yüzey ivmesi değeri) kullanarak, bulanık mantık modelleme yöntemi ile incelemiştir. Elde edilen sonuçlar arazi verileri ile karşılaştırıldığında, modellemenin çok uygun ve makul sonuçlar verdiği görülmüştür.

Şen (2004); Denizli ili Gümüşler Belediyesi mücavir alanındaki zeminler üzerinde laboratuvar deneyleri yaparak, zeminlerin tane boyu dağılımları ile kıvam limitlerini belirlemiş ve basitleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre zeminleri sınıflandırmıştır. Daha sonra Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerinden ve Coğrafi Bilgi Sisteminden (CBS) faydalanarak sıvılaşma potansiyel indeksi değerlerini hesaplamış ve bu değerleri kullanarak eş sıvılaşma eğrilerini elde etmiştir.

Arslan ve Siyahi (2006); doğrusal ve rijit temel ana kayası varsayımı ile iki tabakalı bir zemin kolonunun yer tepkisini, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar kullanarak analiz etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, SHAKE programı ile yapılan eşdeğer doğrusal analizin, derinlik ve spektrum oranları boyunca daha büyük pik ivmeyi hesapladığı görülmüştür. Arslan ve Siyahi (2006), bu durumun doğrusal analizin yüksek frekansta ivme hesaplanmasından kaynaklandığını ve zemin derinliği ile özelliklerinin sismik yer tepkisinin tahmininde önemli parametreler olduğu belirtmişlerdir.

Karanlık (2006), Hatay Samandağ Altınköy ve çevresinin sıvılaşma potansiyelini belirleyebilmek için Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve laboratuvar deneyi verilerinden yararlanmıştır. Karanlık (2006); Siltli kum (SM) zeminler için Seed ve Idriss (1971), Seed vd. (1985) ve Youd vd. (2001) tarafından önerilen modifiye edilmiş yöntemi kullanarak sıvılaşma potansiyelini değerlendirmiş ve çalışma alanının önemli oranda sıvılaşma riskine sahip olduğunu, ancak tüm çalışma alanına yönelik olarak bu genellemenin yapılabilmesi için daha fazla araştırma yapılması gerektiğini belirtmiştir.

Şaylan (2006); Erzincan Ovası içerisinde yer alan 6 adet bölgede sismik kırılma çalışmaları ile elde edilen kayma dalgası hızını kullanarak, yerin dayanabileceği ivme ile depremin üreteceği ivmeyi karşılaştırmış, tabaka kalınlıklarını hesaplamış ve sıvılaşma potansiyelinin olup olmadığını incelemiştir. İnceleme sonucunda, çalışma yapılan bölgelerde yüksek oranda sıvılaşma riskinin olduğu görülmüştür.

Tonaroğlu (2006), 20 metre kalınlığındaki üniform bir kum tabakasının davranışını LASIII programını ile 1999 Kocaeli depremi Arçelik kaydı taban kayasında etkiyen bir yer hareketi olarak kullanarak incelemiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda; sarsıntı şiddeti, permeabilite, sıkılık derecesi, sürşarj yükleri, drenaj şartları ve deprem hareketinin özeliklerinin sıvılaşmaya etki eden faktörler olduğu görülmüştür. Tonaroğlu (2006) ayrıca; tek yönlü yer hareketinin etkisinde sıvılaşma derinliğinin 10 m'yi aşmadığını, gevşek olmayan kumlarda 6-7 metre ile sınırlı olduğunu ve sıvılaşma derinliğinin iki yönlü yer hareketleri etkisinde 15 m'yi geçebileceğini gözlemlemiştir.

Güngör (2007), İzmir bölgesinde uygulanmakta olan proje kapsamında yapılan Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) ve Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) verilerini ve çeşitli laboratuvar deneylerine ait sonuçları kullanarak sıvılaşma analizlerini gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada ayrıca, sıvılaşma potansiyelinin olduğu bölgelerde olası zararların önüne geçebilmek için yapılabilecek zemin iyileştirme yöntemleri ile birlikte alınabilecek yapısal önlemler de belirtilmiştir.

Koç (2007); Gölcük ve çevresinin deprem kaynaklı sıvılaşma potansiyelini, Gölcük Belediyesi tarafından Piyosen yaşlı Arslan Bey Formasyonu ve Alüvyon zemin üzerinde açtırılan 39 adet sondaj kuyusu verilerinden, arazi ve laboratuvar verilerinden yararlanarak araştırmıştır. Koç (2007), sıvılaşma analizi için Standart Sıvılaşma Analiz Yöntemini esas alan LiquefyPro (CivilTech 2002) programını kullanmış ve toplam 39 adet sondaj kuyusundan 20 tanesinde sıvılaşma potansiyelinin olduğunu tespit etmiştir.

Selçuk vd. (2007); Küçükçekmece-Sefaköy bölgesinden alınmış iki adet en kesit üzerinde, 200 metre kalınlığındaki zemin çökellerinin deprem sırasında oluşacak yüzey yer hareketi üzerindeki etkisini DEEPSOİL, EERA ve PLAXİS programları ile bir boyutlu eşdeğer lineer, bir boyutlu nonlineer ve iki boyutlu nonlineer analizler yaparak karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda, DEEPSOİL programı ile gerçekleştirilen bir boyutlu nonlineer analizlerden elde edilen maksimum yüzey ivmelerinin eşdeğer lineer analize göre bir miktar yüksek olduğu, EERA programı ile yapılan bir boyutlu eşdeğer lineer analiz sonuçlarının ise DEEPSOİL programı sonuçlarından genelde daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca; bir boyutlu nonlineer analiz ile hesaplanan maksimum spektral ivme değerlerinin, eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre daha yüksek çıktığı ve EERA programı ile elde edilen maksimum spektral ivme değerlerinin bir boyutlu nonlineer analiz sonuçlarından daha büyük olduğu görülmüştür. PLAXİS programı kullanılarak gerçekleştirilen iki boyutlu analizlerde ise, farklı yöntemlerle elde edilen viskoz sönüm katsayılarına bağlı olarak farklı maksimum yüzey ve spektral ivme değerleri ortaya çıkmıştır. Selçuk vd. (2007); topoğrafyanın değiştiği noktalarda maksimum yüzey ve spektral ivme değerlerinin bir boyutlu analizlere göre daha yüksek sonuçlar vermesi nedeniyle, bu alanlarda iki boyutlu analizlerin yapılmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

Kale (2008), Zeytinburnu İlçesi'nde yer alan inceleme alanından alınan üç en kesit üzerinde deprem sırasında oluşacak yüzey hareketlerini tespit edebilmek için bir boyutlu eşdeğer lineer analiz yapabilen EERA ve bir boyutlu eşdeğer lineer ve nonlineer analiz yapabilen DEEPSOİL ile iki boyutlu analiz yapabilen PLAXİS programlarını kullanarak dinamik zemin davranış analizleri gerçekleştirmiştir. Kale (2008); yaptığı dinamik analizlerde, anakaya girdi hareketi olarak olası İstanbul depremini temsil eden 475 yıllık tekrarlama periyotlu sentetik ivme kayıtlarını kullanmış ve incelme alanından aldığı üç en kesit için bir ve iki boyutlu analizler sonucu elde ettiği maksimum yüzey ve spektral ivmelerini, yüzey topoğrafyasını da dikkate alarak karşılaştırmıştır. Bir boyutlu analiz ile hesaplanan maksimum yüzey ivme değerleri karşılaştırıldığında; EERA ve DEEPSOİL programlarının eşdeğer lineer analiz yöntemleri ile hesaplanan değerlerin topoğrafyaya bağlı değişimi benzer şekilde yansıttığı, EERA ile hesaplanan maksimum yüzey ivme değerlerinin DEEPSOİL'in eşdeğer lineer analiz sonuçlarına göre daha küçük olduğu ve DEEPSOİL'in eşdeğer lineer ve nonlineer analizleri ile elde edilen maksimum yüzey ivme değerlerinin genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte, zemin koşullarına ve topoğrafik konuma bağlı olarak nonlineer analiz ile elde edilen değerlerin eşdeğer lineer analize göre daha küçük olabildiği gözlemlenmiştir. Bir boyutlu ve iki boyutlu analiz yöntemleri ile hesaplanan maksimum yüzey ivme değerleri karşılaştırıldığında; bir boyutlu analiz yöntemi ile hesaplanan değerlerin, topoğrafik konuma bağlı olarak aşırı ve düzensiz değişkenlikler gösterebildiği, iki boyutlu analiz sonuçları ile yüzey topoğrafyası arasında daha iyi bir uyum olduğu, iki boyutlu analiz sonuçları ile elde edilen maksimum yüzey ivme değerlerinin bir boyutlu analizlere göre daha büyük olduğu, ancak bazı noktalarda bir boyutlu analizler ile elde edilen değerlerin alt sınırına yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bir boyutlu analiz ile elde edilen maksimum spektral ivmeler karşılaştırıldığında; DEEPSOİL programı ile elde edilen değerlerin EERA ile elde edilen değerlere göre daha büyük olduğu ve nonlineer analizde bu farkın belirginleştiği, DEEPSOİL'in nonlineer analizi ile hesaplanan maksimum spektral ivme değerlerinin, eşdeğer lineer analizi ile hesaplanan değerlerden bir miktar büyük olduğu ve özellikle yamaç etekleri ile topuklarında bu farkın belirginleştiği görülmüştür.

Ayrıca; Kale (2008), bir ve iki boyutlu analiz sonuçlarından elde ettiği maksimum spektral ivmeleri karşılaştırdığında; iki boyutlu analizler ile elde edilen değerlerin yüzey topoğrafyasına daha uyumlu ve bir boyutlu eşdeğer lineer analizlerden elde edilen değerlere göre daha büyük olduğunu, şev topuklarındaki noktalar için bir boyutlu analiz ile hesaplanan değerlerin iki boyutlu analiz ile elde edilen değerlerden daha yüksek olabildiğini gözlemlemiştir. Kale (2008), bir ve iki boyutlu nümerik analiz yöntemlerinin birçok belirsizlikler içermesi nedeniyle, analiz sonuçlarının arazideki gerçek depremlerde kaydedilmiş zemin hareketleri ile karşılaştırılmasının, analiz yöntemlerinin kalibrasyonu için yararlı olacağını ifade etmiştir.

Sağlam (2008); birinci derece deprem bölgesinde yer alan Manisa ilinin Saruhanlı ilçesinin yeraltı suyunda rastlanan, kumlu, siltli-kumlu zeminlerindeki sıvılaşma olayını, Konik Penetrasyon Deneyi (CPT) verilerini ve yapılan sondajlardan elde edilen zemin örneklerinin laboratuvar analiz sonuçlarını kullanarak incelemiştir. Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucunda, Saruhanlı ilçesi yerleşim alanlarındaki ince taneli alüvyonda özellikle yüzeye yakın kesimlerde sıvılaşma olabileceği gözlemlenmiş ve sıvılaşmaya karşı alınabilecek önlemler belirtilmiştir.

Aslan (2010); Kocaeli ilçesinde yapılması planlanan Atıksu Arıtma Tesisinin inşa edileceği alüvyon birikintileri üzerindeki alanda, sondaj verileri ve zeminlerin indeks özelliklerini temel alarak sıvılaşma potansiyelini incelemiştir. Arslan (2010); yapılan sıvılaşma analizi sonucunda, inşa alanındaki zeminde sıvılaşma meydana gelebileceği, ancak örtü zemin etkisi nedeniyle sıvılaşmanın neden olabileceği zemin deformasyonlarının yüzeyde gözlenmeyeceği sonucuna varmıştır.

Ateş (2010); Manisa'nın Saruhanlı ilçesinde sıvılaşabileceği tahmin edilen alüvyon zeminler üzerinde Konik Penetrasyon Testi (CPT) verilerini ve laboratuvar ortamında yapılan devirsel üç eksenli deney sonuçlarını kullanarak, sıvılaşma potansiyelini araştırmıştır. Yapılan arazi ve laboratuvar deneyleri sonucunda; bir lokasyonda sıvılaşma olurken, diğer üç lokasyonda sıvılaşma oluşmadığı, ancak rölatif sıkılığın %50'ye düşürülmesi durumunda aynı lokasyonların sıvılaşabileceği görülmüştür.

Hosseini ve Pajouh (2010); doğrusal ve rijit temel ana kayası varsayımı ile, çeşitli kayma dalga hızlarında, dört faklı sahadaki tek tabakalı zemin depozitinin yer tepki analizini, eşdeğer doğrusal analiz yapabilen EERA, doğrusal olmayan bir çözüm yöntemini kullanan FLAC programları ile sonlu fark programlarından birini kullanarak sayısal olarak karşılaştırmıştır. Yapılan analizler, doğrusal yer tepki analizinin yüksek frekans aralığında ivme hesaplaması nedeniyle daha büyük maksimum ivme ve spektrum oranları tahmin ettiğini göstermiştir.

Rathje ve Kottke (2011), iki ayrı saha için eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analiz sonuçlarını karşılaştırmışlar ve bu iki yöntem arasındaki farklılıkları açıklamaya çalışmışlardır. Yapılan analizler; doğrusal olmayan analiz yönteminin, daha büyük girdi ivmelerinde (0,05 g'dan 0,1 g'a kadar) ve yüksek frekanslarda (25 Hz'den büyük) eşdeğer doğrusal yöntemden daha az, orta frekanslarda (5 ila 25 Hz arasında) eşdeğer doğrusal yöntemden daha fazla ve yerin doğal frekansında eşdeğer doğrusal yöntemden daha az amplifikasyon tahmin ettiğini göstermiştir. Rathje ve Kottke (2011), kısa doğal frekansalara (yani uzun doğal periyotlara) sahip olan sahalarda, frekansa bağlı Rayleigh sönümlemenin, yüksek frekanslarda tepkiyi önemli ölçüde azaltabileceğini ve bu durumlarda frekanstan bağımsız bir Rayleigh sönümleme formülasyonunun kullanılmasının gerektiğini belirtmişlerdir.

Savaş vd. (2012), Eskişehir ili Çifteler İlçesi yerleşim alanı temel zemininin statik ve dinamik özelliklerini incelemek için yerleşim alanını da kapsayacak şekilde belirli lokasyonlarda sondaj ve sismik tehlike analizi çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda belirlenen yer hareketi seviyeleri ile birlikte arazi ve laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen yerel zemin özellikleri kullanılarak, Shake 2000 programında detaylı olarak zemin büyütmesi ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Yapılan sıvılaşma analizleri sonucunda; çalışma alanında yer alan sıvılaşabilir özellikteki zeminlerden oluşan hücrelerin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayıları ve sıvılaşma potansiyel indeksi hesaplanmıştır. Son olarak da, sıvılaşma potansiyel indeksi değerine bağlı olarak belirlenen sıvılaşma potansiyeline göre mikrobölgeleme haritaları oluşturulmuştur.

Duman (2013), Erzincan ili ve çevresinin sıvılaşma potansiyelini değerlendirmek amacıyla Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerini ve MATLAB programlama dili ile yazılmış bir yazılım kullanarak sıvılaşma analizlerini gerçekleştirmiştir. Duman (2013), analiz sonuçlarının; yer altı suyu ve kumlu-siltli zeminlerin varlığında, bölgenin sismik özellikleri nedeniyle sıvılaşma potansiyelinin artacağını gösterdiğini belirtmiştir.

Zhang vd. (2013); Kuzey Anadolu Fayı yakınlarında bulunan ve sismik olarak dünyanın en aktif bölgelerinden birinde yer alan İzmit Körfezi Köprüsünün tasarımı için gerçekleştirilen yer tepki analizinde, zemin kolonundaki maksimum pik kayma birim deformasyonlarının tahmini için eşdeğer doğrusal yöntemlerin (SHAKE programı), doğrusal olmayan bir ve iki boyutlu analizler ile FLAC gibi bilgisayar yazılımlarını kullanılarak doğrulanması durumunda kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Adampira vd. (2014); gerçek bir sıvılaşabilir alan olarak değerlendirilen ve İran'ın güneyinde bulunan Assaluyeh'deki LNG limanı projesi sahasında, fay yakınında meydana gelen depremlerin bir boyutlu yer tepki analizini iki yöntemle karşılaştırmıştır. Proje sahasında gerçek fay yakınında kaydedilen verilerin olmaması nedeniyle, suni deprem oluşturmak için simüle edilmiş yöntem kullanılmış ve yer tepkisinin gerçek davranışı değerlendirmek için fay hattına yakın üç ivme-zaman geçmişi seçilmiştir. Daha sonra fay yakınında meydana gelen depremlerin gerçek ve simüle edilmiş hareketi, DEEPSOIL programının frekans alanındaki toplam gerilmeye dayalı eşdeğer doğrusal analiz ve zaman alanındaki efektif gerilmeye dayalı doğrusal olmayan analiz (aşırı boşluk suyu basıncı etkisi göz önüne alınarak) yöntemleri ile incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda, toplam gerilmeye dayalı eşdeğer doğrusal analizi kullanan yer tepki analizinde PGA'da göreceli bir artış gözlenirken, efektif gerilmeye dayalı doğrusal olmayan analiz kullanan yer tepki analizinde, eş değer doğrusal analizin doğrusallığının meydana getirdiği farktan dolayı, PGA'da göreceli bir azalma görülmüştür. Bununla birlikte Adampira vd. (2014), kayma modülü değerlerini ve sönümleme oranını hesaplamak için efektif gerilmenin kullanıldığını belirterek, doğrusal olmayan analizin daima eşdeğer doğrusal analizle paralel olarak, özellikle de yumuşak ve sıvılaşabilir zeminlerde ve güçlü depremlerde uygulanmasını önermiştir.

Bolisetti vd. (2014); güvenli nükleer yapıların inşası için uygun kabul edilen ve sert kayaçlardan sert zeminlere kadar çeşitli zeminlerden oluşan temsili dört sahanın yer tepki analizinde sırandan yer hareketlerini ve titreşimli hareketleri kullanarak, frekans alanlı eşdeğer doğrusal SHAKE ve zaman alanlı doğrusal olmayan DEEPSOIL ve LS-DYNA programlarını karşılaştırmıştır. Yapılan analizler sonucunda, SHAKE programı ile yapılan eşdeğer doğrusal analizde, yüksek frekans ivmesi tepkisi üretilemediğini ve kısa periyot aralığında neredeyse sabit spektral ivmelenme olduğu; LS-DYNA kullanan analizlerin, bazı gerçekçi olmayan yüksek frekans ivmesi ile sonuçlandığı ve DEEPSOIL kullanarak yapılan analizlerde, ardışık zemin tabakalarının pik birim deformasyonlarında ani değişiklikler olduğu görülmüştür. Bolisetti vd. (2014); güvenli nükleer yapı uygulamaları için büyük birim deformasyonlar ve yüksek frekanslar içeren eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin, büyük ölçekli laboratuvar deneyleri kullanarak doğrulanması gerektiğini ve 10.000-100.000 yıllık periyotlarda tekrarlanan deprem sarsıntılarının olduğu nükleer uygulamalarda yer tepki analizini gerçekleştirmek için, mevcut malzeme modellerinin çok büyük birim deformasyonlar için genişletilmesinin ve doğrulanmasının uygun olacağını belirtmişlerdir.

Kaklamanos vd. (2015); Japonya'daki Kiban-Kyoshin ağındaki (KiK-net) altı adet onaylanmış sahaya ait kaydedilmiş 191 adet yer hareketinin kapsamlı doğrusal, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yer tepki analizlerini, eşdeğer doğrusal yer teki analiz programı SHAKE, doğrusal olmayan yer tepki analiz programı DEEPSOIL ve normal sonlu elemanlar programı Abaqus/Explicit içindeki doğrusal olmayan bir yer tepki paylaşım modelini kullanarak karşılaştırmıştır. Analizler sonucunda; spesifik olarak, % 0,01 ile % 0,1 arasındaki pik kayma birim deformasyonlarında doğrusal yer tepki modellerinin, kısa periyotlu zemin hareketlerini doğru olarak tahmin edemediği, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin, bu seviyenin üzerindeki birim deformasyonlarda önemli ilerleme sağladığı, doğrusal olmayan modelin yaklaşık % 0,05'den büyük birim deformasyonlarda eşdeğer doğrusal modellere kıyasla az bir gelişme gösterdiği görülmüştür. Kaklamanos vd. (2015); tam doğrusal olmayan yer tepki modellerinin, doğrusal ve eşdeğer doğrusal modellere kıyasla bir gelişme göstermesine rağmen, doğrusal olmayan zemin davranışını yansıtmanın, karmaşık yer tepki davranışı tahminlerini geliştirmeye yönelik sadece bir adım olduğunu ifade etmişlerdir.

Desai ve Choudhury (2015); Mumbai şehrinde bulunan Jawaharlal Nehru limanı (JNPT) ve Mumbai limanı için sahaya özgü bir boyutlu yer tepki analizini, anakaya seviyesi giriş hareketlerini ve frekans alanında eşdeğer doğrusal (EQL) ile zaman alanında doğrusal olmayan (NL) yaklaşımları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analizde kullanılan kayma dalga hızları, SPT-N değerlerinden ampirik korelasyonlar yolu ile elde edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda; liman sahaları için hem EQL hem de NL analizinde, yer tepkisinin nispeten sert zeminli saha için aynı olacağı, ancak yumuşak zeminli saha için NL analizine kıyasla EQL analizi ile aşırı tahmin edildiği görülmüştür. Desai ve Choudhury (2015); MASW (yüzey dalgasının çok kanallı analizi) ve SASW (yüzey dalgasının spektral analizi) gibi geniş saha testlerinin; tüm liman sahalarını, zemin depozitini daha gerçekçi bir şekilde modellemeye ve sonuçları daha da hassaslaştırmaya yardımcı olacağını belirtmişlerdir.

Kaklamanos ve Bradley (2015); Japonya'da Kiban-Kyoshin ağındaki (KiK-net) 114 noktadaki 5626 zemin hareketi için bir boyutlu doğrusal olmayan yer tepki tahminlerini, DEEPSOIL programı kullanılarak gerçekleştirmiş ve gözlemlenen zemin hareketlerini SHAKE programındaki doğrusal ve eşdeğer doğrusal analizler ile karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler; eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan modellerin genelde % 0,05 ila % 0,1'lik maksimum kayma birim deformasyonlar elde edilinceye kadar önemli ölçüde birbirlerinden sapmadığını, daha büyük kayma birim deformasyonlarında doğrusal olmayan modellerin, tahminlerde eşdeğer doğrusal modele göre az da olsa gelişme gösterdiğini göstermiştir. Kaklamanos ve Bradley (2015); bir boyutlu yer tepki tahminlerindeki aksaklıkların ve/veya zayıf karakterize edilen zemin özellikleri gibi diğer faktörlerin, yer tepki davranışında önemli etkilere sahip olduğunu düşündürdüğünü ifade etmişlerdir.

Mirshekari ve Ghayoomi (2015); farklı emme seviyelerine sahip kuru ve kısmen doymuş kum ve silt tabakalarının ölçeklenmiş Northridge deprem hareketi altında eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yer tepki analizini karşılaştırmıştır. İncelenen her iki zemin tabakası için eşdeğer doğrusal analiz, doğrusal olmayan analizle karşılaştırıldığında; önemli ölçüde daha yüksek amplifikasyon parametreleri ürettiği ve eşdeğer doğrusal analizlerden elde edilen yanal deformasyonların doğrusal olmayan analizlere göre, sırasıyla Bonny siltinde daha yüksek ve Ottawa kumunda daha düşük olduğu görülmüştür.

Mirshekari ve Ghayoomi (2015); doygun olmayan zeminlerde yer tepkisi tahminlerinin geçerliliği için, dalga yayılım mekanizmalarında emme etkisinin hesaba katılmasının, sıkılaştırma etkisinin dikkate alınmasının, emme ve birim deformasyona bağlılığın daha doğru bir şekilde tahmin edilmesi için ise dinamik zemin özelliklerinin doğrusal olmayan tepki analizinde uygulanmasının gerektiğini belirtmişlerdir.

Iswanto ve Yee (2016); nükleer enerji sahalarının belirlenmesine yönelik çalışma kapsamında, Endonezya bölgesinde yer alan Bangka-Belitung Adalarındaki Batı Bangka (WB) sahası üzerinde, PS Logging Testi ve Standart Penetrasyon Testi sonuçları ile birlikte DEEPSOİL yazılımını kullanarak, Eşdeğer Doğrusal (EQL) ve Doğrusal Olmayan (NL) zemin tepki analizi yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Analizde kullanılan zemin profilleri 34 m'lik bir kil tabaka ve daha sonra granitten oluşmakta ve kayma dalgası hızı her tabakada değişmektedir. Girdi hareketi olarak, 12 Eylül 2007 tarihinde Batı Sumatra Sikuai Adası'nda meydana gelen 7,9 büyüklüğündeki Sikuai2 isimli Sumatra Depremi kullanılmıştır. Yapılan analizler; EQL yönteminin NL yöntemine benzer eğilimleri olduğunu ve NL yönteminin, EQL yöntemine kıyasla spektral ivmenin daha yüksek frekanslarını daha güvenilir bir şekilde yansıttığını göstermiştir. Iswanto ve Yee (2016), analizden elde edilen yer tepkisinin sahanın gerçek durumunu yansıtabilmesi için yerel girdi hareketlerinin kullanılmasını önermişlerdir.

Pruiksma (2016); Groningen sahasındaki zemin koşullarını temsil eden iki farklı zemin profili için aynı malzeme modellerini ve parametrelerini kullanarak, eş değer doğrusal ve doğrusal olmayan yer tepki sonuçlarını karşılaştırılmıştır. Çalışılan ilk zemin profili, Loppersum alanındaki zemin koşullarını temsil eden ve nispeten yumuşak killi topraklardan oluşan bir profildir. İkinci zemin profili ise, Slochteren bölgesindeki zemin koşullarını temsil eden daha kumlu, sert topraklardan oluşmaktadır. Yapılan analizler neticesinde; doğrusal olmayan yöntemin eşdeğer doğrusal yönteme göre PGA düzeylerini önemli ölçüde daha düşük yansıttığı, yaklaşık 1 s ve 2 s'lik daha büyük spektral periyotlarda, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler arasındaki farkların, daha kısa spektrum periyotlarına göre daha küçük olduğu, eşdeğer doğrusal yöntemin çoğu spektrumlu periyot için daha yüksek spektrum ivmesini hesaplaması nedeniyle, spektral ivmelenmelerin ihtiyatlı tahminlerine yol açtığı gözlenmiştir.

Bunun yanı sıra, istisna bir durum olarak 0.05 ve 0.08 s arasındaki periyotlar için doğrusal olmayan tepkinin eşdeğer doğrusal tepkiden biraz daha yüksek olduğu ve doğrusal olmayan yöntemdeki maksimum birim deformasyonların eşdeğer doğrusal yöntemdeki maksimum birim deformasyonlardan daha büyük olduğu görülmüştür. Pruiksma (2016); yaptığı bu çalışmanın eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yer tepki yöntemleri arasındaki tüm farklılıkları kapsamadığını belirterek, yer tepki yöntemleri için daha derin bir tabakanın etkisinin araştırılmasını önermiştir.

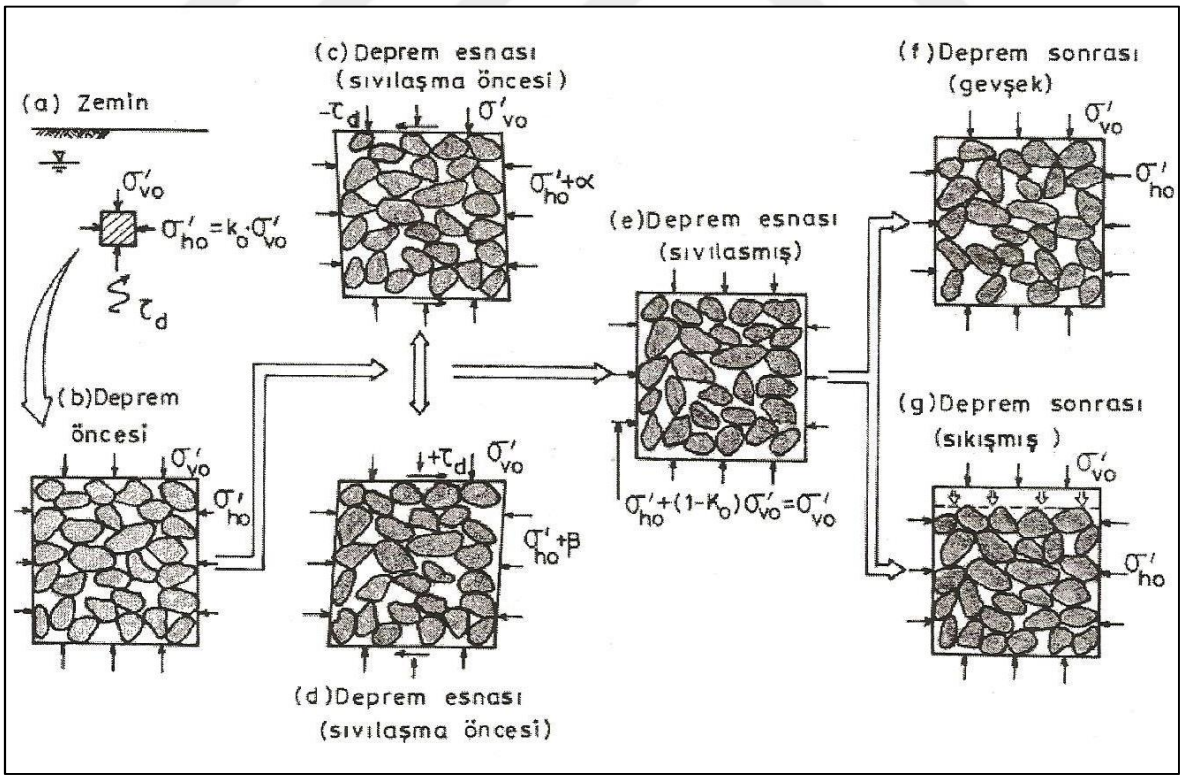
3. ZEMİNLERDE SIVILAŞMA

3.1. Sıvılaşmanın Tanımı

Sıvılaşma; depremin yol açtığı tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisi altında kalan suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerin, drenajsız koşullarda artan boşluk suyu basıncı ve azalan efektif gerilme sonucu kayma mukavemetini kısmen veya tamamen kaybetmesi nedeniyle, katı durumdan sıvı duruma dönüşmesi olarak tanımlanmaktadır.

3.2. Sıvılaşma Mekanizması

Deprem öncesinde (Şekil 3.1a); yeraltı su seviyesinin altındaki gevşek ve suya doygun kum tanelerinden oluşan bir zemin elemanına, düşey basınç (σ'_{vo}) ve yatay basınç (σ'_{ho}) gerilmeleri etki etmektedir (Şekil 3.1b).



Şekil 3.1. Sıvılaşma oluşum mekanizması (Tosun, 2002)

Yeraltı su seviyesinin altındaki hidrostatik basınç nedeniyle, boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Bu durumda, kumun kayma mukavemeti (τ_f) Eşitlik 3.1'de gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\tau_f = c + \sigma'.\tan\emptyset \tag{3.1}$$

Burada; c kohezyon katsayısı, σ' kumun efektif normal gerilmesi ve $\emptyset$ içsel sürtünme açısıdır. Deprem esnasında (Şekil 3.1c ve 3.1d), sismik dalgaların oluşturduğu tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisiyle sallanan zemin elemanının içerisindeki kum taneleri gevşeyerek su içerisinde asılı duruma gelmektedir (Şekil 3.1e). Bu durumda, efektif gerilme sıfıra eşit olacağından (c, kumlarda genellikle sıfıra eşittir), kayma mukavemeti de (τ_f) sıfıra eşit olacak ve zemin sıvılaşmaya başlayacaktır. Deprem sonrasında (Şekil 3.1f ve 3.1g), oluşan aşırı boşluk suyu basıncının etkisiyle, yeraltı suyu zemin yüzeyine doğru hareket ederek kum taneleri ile birlikte dışarıya doğru taşacaktır. Azalan aşırı boşluk suyu basıncı sonrasında, zemin elemanı içerisindeki kum taneleri daha sıkı veya daha gevşek hale gelecektir. Kum tanelerinin daha sıkı hale gelmesi durumunda, büyük olasılıkla tekrardan sıvılaşma meydana gelmeyecektir (Tosun, 2002).

3.3. Sıvılaşma Türleri

Sıvılaşma sonucu meydana gelen hasarların çeşidine bağlı olarak, "akma türü sıvılaşma" ve "devirsel hareketlilik (mobilite)" olmak üzere iki tür sıvılaşmadan söz edilebilmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.3.1. Akma türü sıvılaşma

Akma sıvılaşması, sıvılaşmış haldeki zeminin kayma mukavemetinin, zemin kütlesinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha az olduğu koşullarda oluşmaktadır. Akma sıvılaşması sonucu oluşan büyük şekil değiştirmelerin asıl sebebi statik kayma gerilmeleridir. Akma sıvılaşması çok hızlı bir şekilde ortaya çıkmakta, çabuk gelişmekte ve sıvılaşmış durumdaki zeminde çok büyük yer değiştirmeler meydana getirmektedir (Özaydın, 2007; Kramer, 1996).

3.3.2. Devirsel hareketlilik

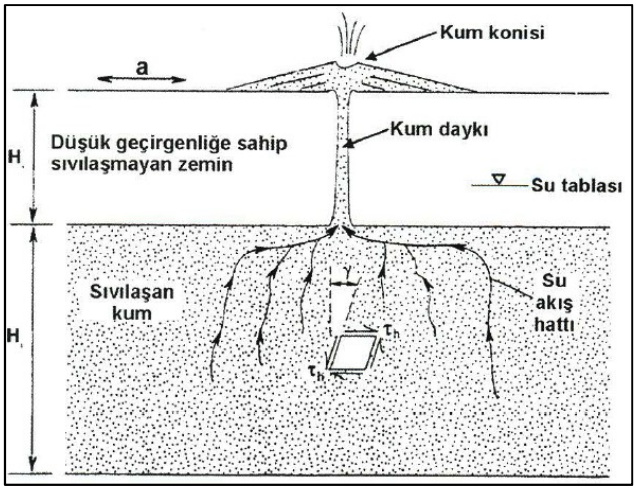
Devirsel hareketlilik bir diğer adıyla mobilite; sıvılaşmış haldeki zeminin kayma mukavemetinin, zemin kütlesinin statik dengesi için gereken kayma direncinden daha büyük olduğu koşullarda oluşmaktadır. Akma sıvılaşmasının aksine; devirsel hareketlilik sonucu oluşan büyük şekil değiştirmelerin gerçek nedeni, statik ve çevrimsel kayma gerilmeleridir. Devirsel hareketlilik sonucu oluşan büyük şekil değiştirmeler, çok az eğimli arazilerde yanal yayılmalara, düz sahalarda ise deprem sırasında zemin salınımlarına neden olabilmektedir (Özaydın, 2007; Kramer, 1996).

3.4. Sıvılaşma Nedeniyle Oluşan Hasar Tipleri

Akma türü sıvılaşma ve devirsel hareketlilik sonucunda oluşan kayma mukavemeti kaybı ve büyük şekil değiştirmeler, çeşitli hasarlara neden olmaktadır. Sıvılaşma nedeniyle oluşan başlıca hasar tipleri aşağıda açıklanmıştır.

3.4.1. Kum kaynaması

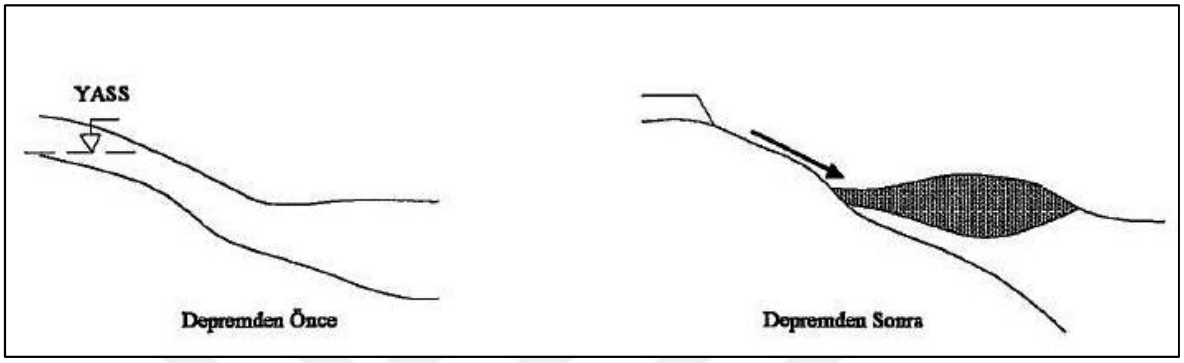
Deprem esnasında artan boşluk suyu basıncı nedeniyle tahliye olmaya çalışan boşluklardaki su, sıvılaşan zemin tanecikleri ile beraber yukarı yönde hareket etmekte ve zemin yüzeyinde meydana gelen çatlaklardan dışarıya fışkırarak yüzeyde kum konilerinin oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Kum kaynaması oluşumunu gösteren kesit (Ulusay, 2000)

3.4.2. Akma göçmesi

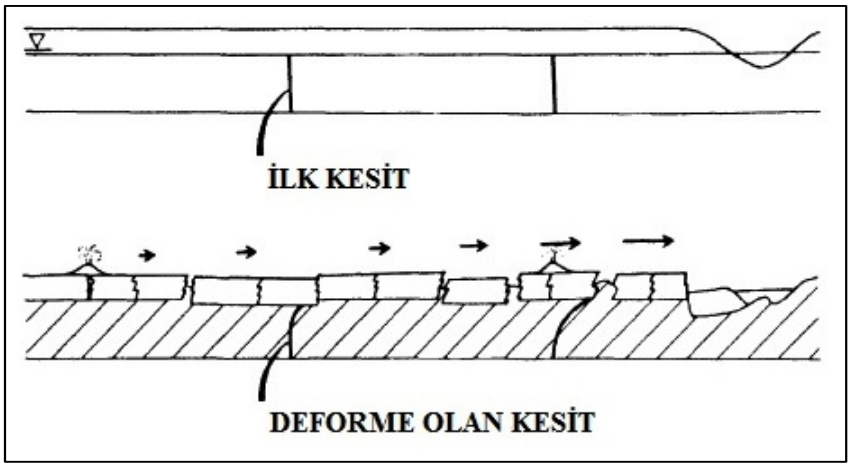
Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen en katastrofik göçme tipi olan akma göçmesi, genellikle eğimi üç dereceden fazla olan şevler üzerindeki büyük bir zemin kütlesinin çok kısa bir süre içerisinde kayarak deplasmana neden olmasıyla oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen akma göçmesi (Uyanık, 2002)

3.4.3. Yanal yayılma

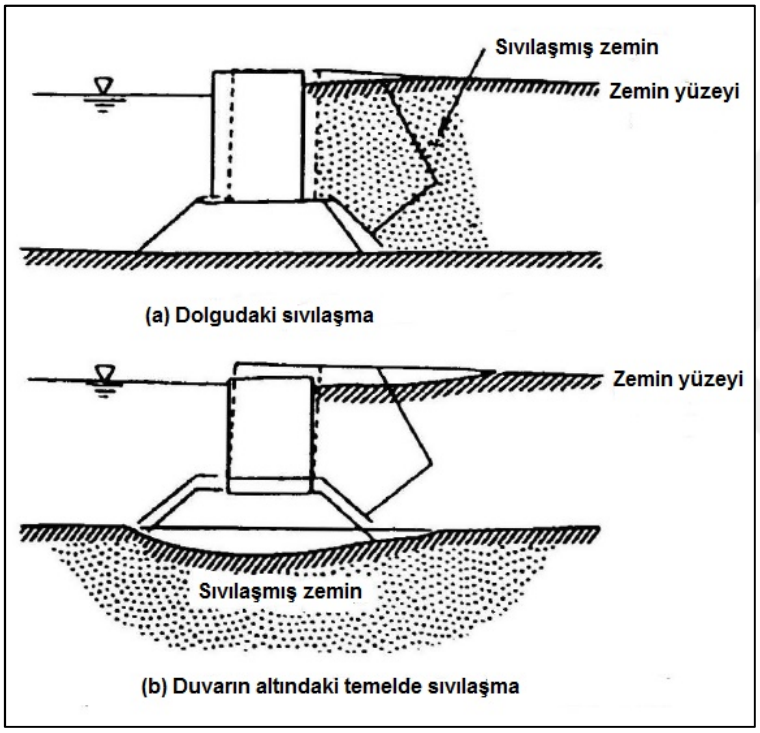
Yanal yayılmalar, çoğunlukla zemin yüzeyinin 0,3 ile 3 derece arasında eğimli olduğu yataya yakın şevlere sahip zeminlerde oluşur. Bu tip göçmeler, alttaki bir tabakanın sıvılaşmasına bağlı olarak oluşan zeminin büyük yanal deplasmanlarını ve yüzeysel bloklarını kapsamaktadır (Şekil 3.4). Yanal yayılmalar genellikle; köprüler, boru hatları gibi diğer yapılarda hasarların oluşmasına neden olmaktadır (Tosun, 2002).



Şekil 3.4. Sıvılaşmanın neden olduğu yanal yayılma (Youd, 1993)

3.4.4. İstinat yapısı yenilmesi

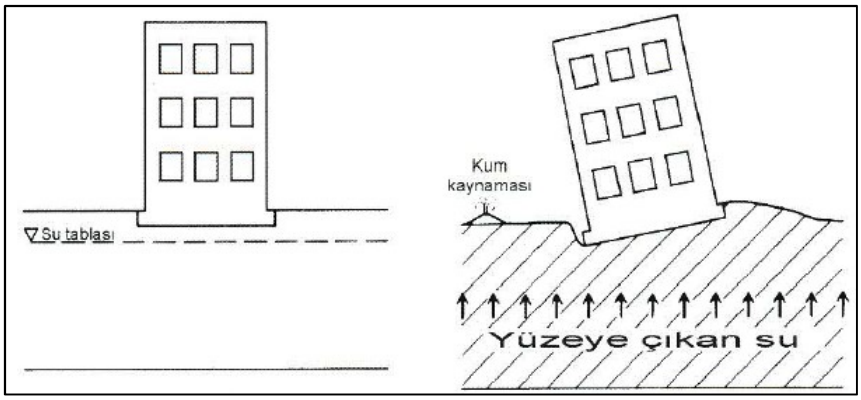
Sıvılaşmaya bağlı olarak, istinat yapısı altındaki zeminin taşıma gücünü kaybetmesi ve/veya istinat yapısının arkasında yer alan zeminin neden olduğu yanal kuvvetlerdeki artış nedeniyle, istinat yapısının düşey ve/veya yatay olarak yer değiştirmesidir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Bir istinat yapısındaki yenilme olayı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Sıvılaşma nedeniyle oluşan istinat yapısı yenilmesi (Lai, 1998)

3.4.5. Taşıma gücü kaybı

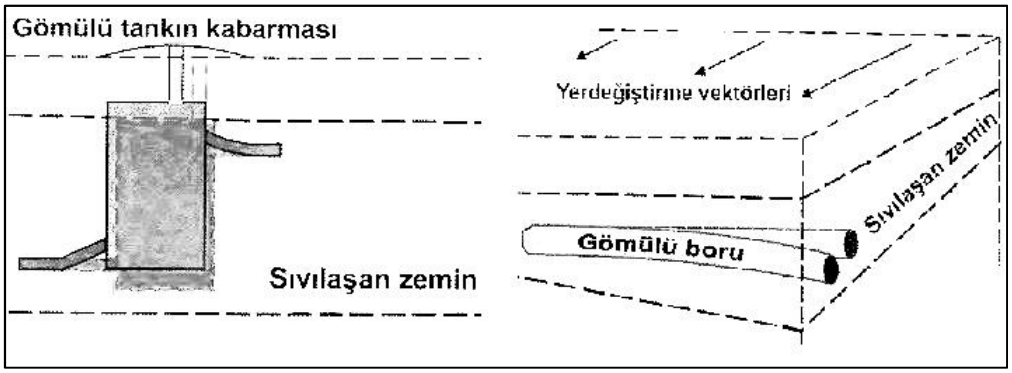
Taşıma gücü kaybı, boşluk suyu basıncındaki artışa bağlı olarak zeminin mukavemetini kaybetmesi ve sıvılaşma sırasında oluşan zemin yumuşamasından kaynaklanmaktadır (Cooke, 2000). Sıvılaşma sonucunda zeminde oluşan büyük boyuttaki deformasyonlar nedeniyle, temel zemini taşıma gücünü kaybeder. Bu taşıma gücü kaybına bağlı olarak, zemin üzerinde bulunan yapılarda oturma, batma, yan yatma veya devrilme gibi hasarlar meydana gelir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Sıvılaşma sonucu meydana gelen taşıma gücü kaybı (Ulusay, 2000)

3.4.6. Gömülü yapı yüzeylenmesi

Zemin içerisinde gömülü halde bulunan boru hatları, tank, muayene bacası vb. hafif alt yapı elemanları, sıvılaşma sırasında oluşan kaldırma kuvvetinin etkisiyle, zemin yüzeyine çıkarak hasara neden olmaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Gömülü haldeki bir muayene bacası ve boru hattında sıvılaşma sonucu oluşan yüzeylenme durumu Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Gömülü yapı elemanlarının sıvılaşma sonucu yüzeylenmesi (Ulusay, 2000)

3.5. Sıvılaşma İçin Gerekli Koşullar (Sıvılaşma Duyarlılığı)

Doğada bulunan zemin türlerinin tümü sıvılaşmaya karşı duyarlı değildir. Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarına bağlı olarak; bir zeminde sıvılaşmanın meydana gelebilmesi için gerekli koşullar, bir diğer ifadeyle zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığına etki eden faktörler aşağıda açıklanmıştır.

3.5.1. Depremin büyüklüğü ve süresi

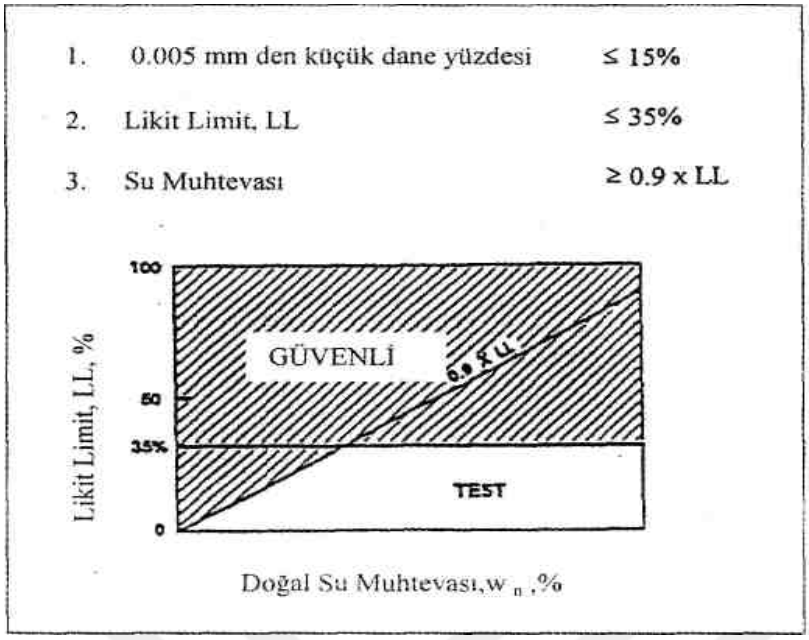
Sıvılaşma, deprem esnasında açığa çıkan sismik enerjinin etkisiyle meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu boşluk suyu basıncının artması nedeniyle oluşmaktadır. Depremin büyüklüğü ve süresi arttıkça, açığa çıkan sismik enerjinin de artmasına bağlı olarak büyük yer ivmesi ve yer sarsıntısı meydana gelmektedir. Artan yer ivmesi ve yer sarsıntısı etkisiyle oluşan kayma deformasyonları, zemin tanelerinin yer değiştirmesine ve boşluk suyunun artmasına, dolayısıyla sıvılaşmaya neden olmaktadır. Kısacası, depremin büyüklüğünün ve süresinin artması ile birlikte, sıvılaşma potansiyeli de artacaktır.

3.5.2. Yeraltı su seviyesi

Sıvılaşma, suya doygun kohezyonsuz zeminlerde meydana gelmektedir. Bu nedenle, yer altı su seviyesinin sığ olması sıvılaşma riskini artırmaktadır. Obermeier (1996), yeraltı su seviyesinin zemin yüzeyinden birkaç metre olduğu durumda, sıvılaşma için en uygun derinliğin yaklaşık olarak 2 ile 4 metre arasında yer aldığını ifade etmiştir (Tosun, 2002). Yeraltı su seviyesinin üzerinde kalan ve suya doygun olmayan zeminlerinde ise sıvılaşma mümkün olmadığından, bu tür zeminler genellikle sıvılaşma potansiyeli için değerlendirmeye alınmamaktadır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.5.3. Zeminin tipi

Plastik olmayan (kohezyonsuz) zeminler, sıvılaşmaya en yatkın zemin türleridir. Bu tür zeminlere örnek olarak; temiz kumlar, plastik olmayan siltli kumlar, plastik olmayan siltler ve çakıllar verilebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Kil ve siltli zeminlerde ise, düşük permeablite nedeniyle genel olarak ön sıvılaşma oluşmadığı kabul edilmektedir. İnce taneli, kohezyonlu silt ve kil karışımlarının sıvılaşıp sıvılaşmayacağı konusunda ise tartışmalar devam etmektedir. Düşük plastisiteli, ince taneli zeminlerin sıvılaşabilirliği konusunda genel kabul gören geliştirilmiş Çin kriterlerine (Wang, 1979) göre; zeminin kil yüzdesinin (< 0.005mm'den küçük tane yüzdesi) < %15, likit limitin (LL) < %35 ve su muhtevasının (w) likit limitin %90'ına eşit ya da daha fazla olması durumunda zeminlerin sıvılaşabileceği ifade edilmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Geliştirilmiş Çin kriterleri (Finn vd., 1994)

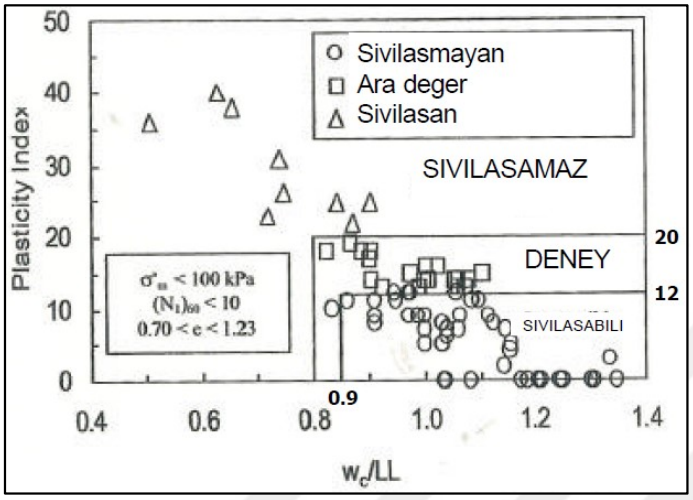
Silt, kil ve kum karışımlarının sıvılaşıp sıvılaşmayacağının belirlenmesine yönelik Andrews ve Martin (2000) tarafından yapılan bir diğer çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Siltli ve killi kumların sıvılaşabilirliği (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-Mika gibi)
Kil içeriği (<0.002 mm) ≥ %10	İleri çalışma gerekir (plastik olmayan kil boyutlu tane olduğu düşünülerek-maden veya ocak attığı gibi)	Sıvılaşmaz

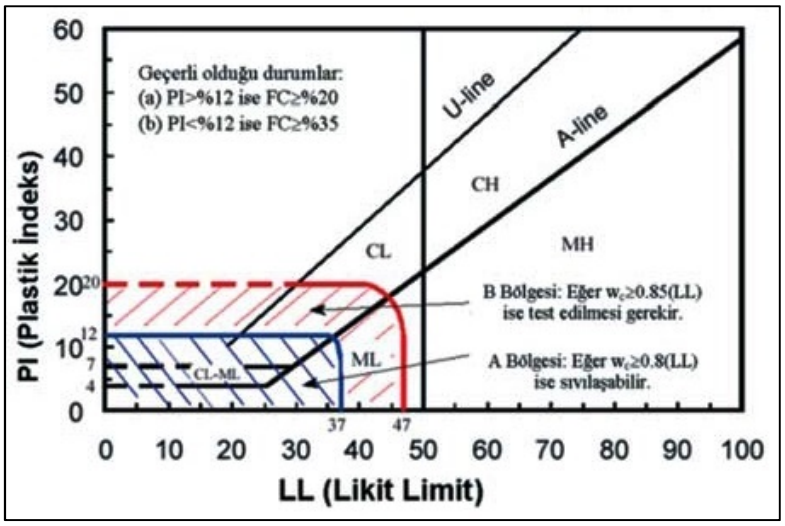
* Casagrande aleti ile belirlenen likit limit değerleri

1999 Kocaeli depreminden sonra, Bray vd. (2004) tarafından Adapazarı'nda yapılan çalışmalar neticesinde, sıvılaşmış zeminlerin bir kısmının hem Çin kriterlerine (Wang, 1979) hem de Andrews ve Martin (2000)'e göre sıvılaşmayacağı düşünülen kısımda yer aldığı gözlemlenmiştir (Çetin ve Unutmaz, 2004). Bu çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir.



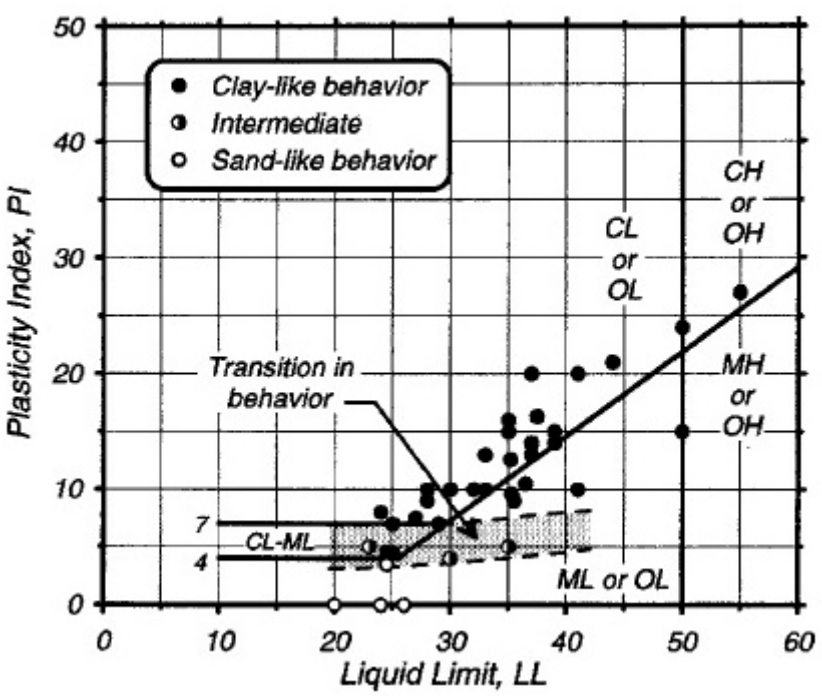
Şekil 3.9. Kocaeli depremi sonrasında elde edilen test sonuçları (Ecemiş, 2011)

Bütün bu çalışmalar neticesinde elde edilen verilerden yola çıkılarak ; Seed vd. (2003) tarafından, ince taneli zeminlerin sıvılaşabilirliğinin değerlendirilmesine yönelik olarak sonuçları Şekil 3.10'da verilen bir çalışma yapılmıştır.



Şekil 3.10. Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi (Çetin ve Unutmaz, 2004)

Boulanger ve Idriss (2006) ; Çin kriterleri ve buna benzer ampirik esaslı kriterlerin, ince daneli zeminlerin kum ve kil benzeri davranışları arasında yeterli ayrımı yapamadığını ve bu nedenle, söz konusu kriterlerin kullanılmasının sonlandırılması gerektiğini belirtmişlerdir. Boulanger ve Idriss (2006), silt ve kil zeminlerin sismik davranışlarının değerlendirilmesi için Şekil 3.11'de gösterilen çalışmayı yapmışlardır. Bu çalışmada; PI>7 olan ince taneli zeminlerin kil benzeri davranış sergileyeceği, CL-ML sınıfındaki zeminler için bu kriterin PI>5 olacak şekilde düşürülebileceği ve ayrıntılı laboratuvar testleri ile aksi belirtilmediği sürece, bu kriterleri karşılamayan ince daneli zeminlerin muhtemelen sıvılaşabilir kum benzeri davranış sergileyebileceği belirtilmektedir.



Şekil 3.11. Atterberg limit çizelgesi (Boulanger ve Idriss, 2006)

3.5.4. Zeminin sıkılık derecesi

Zemin tanelerinin istiflenme şeklinin boşluk suyu basıncının oluşumunda ve zeminin sıvılaşabilirliği üzerinde büyük bir etkisi vardır. Tekrarlı yükler altında kohezyonsuz zeminlerin davranışını etkileyen en önemli faktör zeminin sıkılık oranıdır. Seed ve Idriss (1971) tarafından ortaya konulan relatif sıkılık oranı ile zemin sınıflandırılması arasındaki ilişki Çizelge 3.2'de verilmiştir.

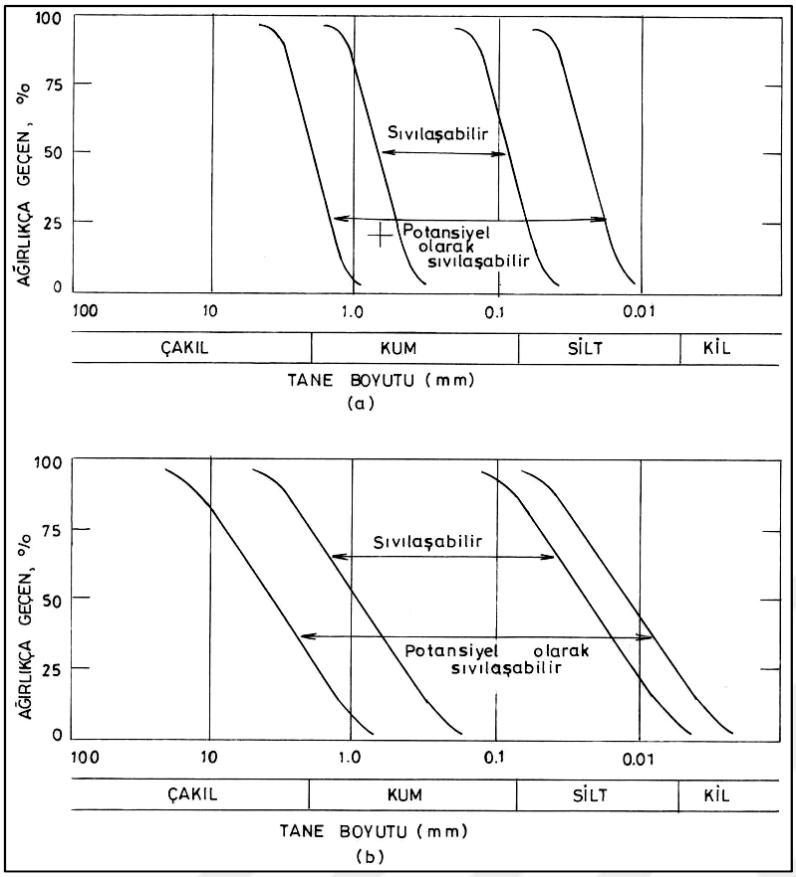
Çizelge 3.2. Relatif sıkılık oranına göre zemin sınıflandırılması (Seed ve İdriss, 1971)

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

Bu zemin sınıflaması göz önüne alındığında, relatif sıkılık değeri %65'ten büyük olan zeminlerde sıvılaşmanın olmayacağı söylenebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.5.5. Zeminin tane boyutu ve dağılımı

Yapılan araştırmalar, kohezyonsuz zeminlerin dinamik yükler altındaki davranışı üzerinde, tane boyutu ve tane dağılımının önemli ölçüde etkili olduğunu göstermiştir. Gevşek yapılı, temiz (kil veya silt veya bağlayıcı madde ihtiva etmeyen) ve kohezyonsuz kumlar, sıvılaşma yönünden uygun zeminlerdir. Şekil 3.12a ve 3.12b'de, sırasıyla kötü ve iyi derecelenmiş zeminler için sıvılaşabilir ve potansiyel olarak sıvılaşabilir tane boyutu aralıkları sunulmaktadır. Bu şekilden, ince ve orta boyutlu kumların çok kolayca sıvılaşabildiği görülmektedir. Ayrıca; Evans ve Zhou (1995) tarafından yapılan bir araştırma sonucunda, kum-çakıl karışımlarının sıvılaşma direncinin, çakıl muhtevasının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür (Tosun, 2002).



Şekil 3.12. Sıvılaşma açısından duyarlı tane boyutu aralığı (Iwasaki, 1986)

3.5.6. Yerleştirme ve çökelme ortamı

Deniz, nehir veya göllerde oluşan doğal çökeller, su altında yerleştirilmiş dolgular, gevşek ve dağınık zemin yapısı oluşturmaya daha müsait olduğundan, sıvılaşmaya oldukça duyarlıdır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.5.7. Tabakalanma özellikleri ve drenaj şartları

Suya doygun gevşek kohezyonsuz zeminlerde sıvılaşmaya neden olan etken, drenajsız koşullarda artan boşluk suyu basıncına bağlı olarak efektif gerilmenin azalmasıdır. Zemin tabakasının üzerinde daha az geçirimli başka bir tabaka olması durumunda, deprem esnasında artan boşluk suyu basıncının sönümlenmesi için gereken drenaj süresi uzayacağından, sıvılaşma potansiyeli artacaktır. (Çavuş, 2015). Boşluk suyu basındaki artışın hızlı bir şekilde sönümlenmesi durumunda ise zeminde sıvılaşma meydana gelmeyebilir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.5.8. Çevre basıncı

Zemin yüzeyinden daha derine inildikçe, artan çevre basıncına bağlı olarak zeminin sıvılaşmaya karşı duyarlılığı da azalmaktadır. Yapılan araştırmalar, zemin yüzeyinden itibaren yaklaşık 15 m derinliğe kadar olan bölgelerde sıvılaşma oluşabileceğini, 15 m'den daha derin bölgelerde yer alan zeminlerin ise daha yüksek çevre basıncına maruz kalmasından dolayı çoğunlukla sıvılaşmayacağını göstermektedir. Ancak, sıvılaşmayacağı düşünülen bu bölgeler için de birçok durumda sıvılaşma analizi yapılması gerekebilmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

3.5.9. Zeminin tane şekli

Yuvarlak zemin tanelerinden oluşan zeminler, köşeli zemin tanelerinden oluşan zeminlere göre daha kolay sıkışabildiğinden, bu tür zeminler sıvılaşmaya karşı daha duyarlıdır (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006). Wei ve Yang (2014), temiz kuma yuvarlak şekilli tozlar eklendiğinde, daha açısal şekildeki tozların eklenme durumuna göre, sıvılaşma potansiyelinde belirgin bir artışın olduğunu ve bu davranış farklılığın eklenen tanelerin sertliğinden ziyade şeklinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

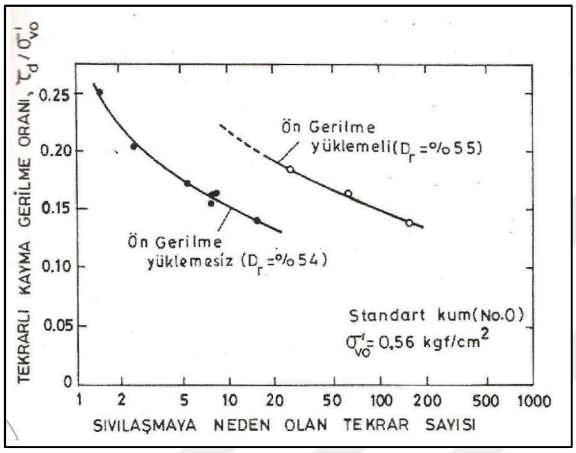
3.5.10. Yaş ve taneler arası çimentolanma

Sıvılaşmanın oluşumu açısından en uygun ortamlar, genç ve gevşek çökellerin depolandığı jeolojik ortamlardır. Holosen yaşlı (10000 yıldan daha genç) çökeller, sıvılaşmaya en duyarlı çökellerdir. Ülkemizde yaşanan depremlerdeki sıvılaşma olaylarının, genellikle bu tür çökellerin bulunduğu bölgelerde meydana geldiği gözlenmiştir (Ulusay, 2000).

Zemin taneleri arasındaki çimentolanma gözenekliği (porozite) azalttığından, tanelerin sıkışmasına bağlı olarak sıvılaşma direncinde artış meydana getirmektedir. Yer altı suyu derinliğinde dalgalanmaların olduğu asidik ortamlarda (organik asitler gibi) oluşabilen kimyasal reaksiyonlar sonucu çimentolanmanın zayıflaması nedeniyle, sıvılaşma direnci de azalmaktadır (Çavuş, 2015).

3.5.11. Gerilme tarihçesi

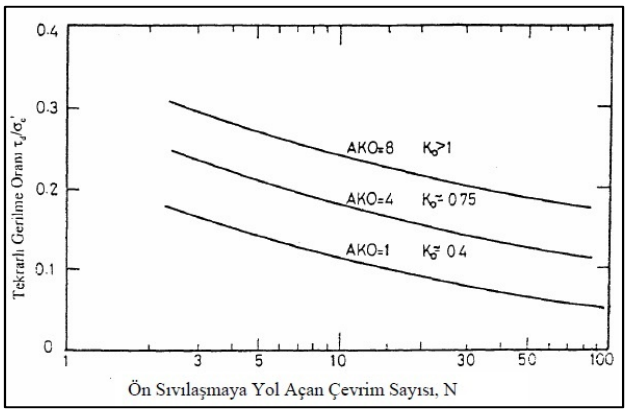
Yapılan deneysel çalışmalar, aynı şekilde ve sıklıkta hazırlanmış zemin numunelerinden; titreşime tabi tutulanların, hiç titreşime tabi tutulmamış numunelere göre daha fazla sıvılaşma direncine sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 3.13'te gösterildiği üzere, tekrarlı yükler altında yüklenen kum tabakalarının sıvılaşma direncinin, yüklemesiz duruma göre göreceli olarak daha yüksek olduğu görülmektedir (Tosun, 2002).



Şekil 3.13. Gerilme tarihçesinin sıvılaşma direncine etkisi (Seed, 1976)

3.5.12. Yatay toprak basıncı katsayısı

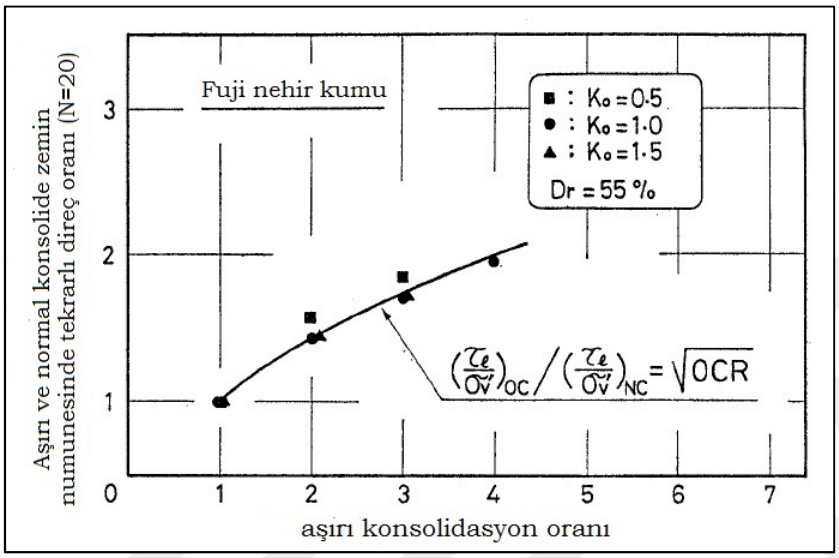
Yatay toprak basıncı katsayısının artmasıyla birlikte, Şekil 3.14'te görüldüğü üzere ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranlarında da artış meydana gelecektir (Çavuş, 2004).



Şekil 3.14. Yatay toprak basıncı katsayısının sıvılaşma direncine etkisi (Seed ve Lysmer, 1976)

3.5.13. Aşırı konsolidasyon oranı

Sıvılaşmaya etki eden bir değer faktör ise zemin tabakalarının konsolidasyon derecesidir. Ishihara ve Takatsu (1979), nehir kumu üzerinde yaptıkları üç eksenli burulmalı kesme deneyi sonucunda, aşırı konsolide oranının artmasıyla birlikte, sıvılaşma direncinin de doğrusal olmayan bir şekilde arttığını göstermişlerdir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Aşırı konsolidasyon oranının sıvılaşma direncine etkisi (Ishihara ve Takatsu, 1979)

3.5.14. Bina yükü

Binaların kum çökelleri üzerine inşa edilmesi durumunda, binaları taşıyan temellerin altında yer alan zeminler, bina yüklerinin meydana getirdiği kayma gerilmelerinin etkisi altında kalır. Bu durum, zeminin sıvılaşmaya karşı daha duyarlı olmasına neden olmaktadır. Rollins ve Seed (1990), yaptıkları sarsma tablası, santrifüj modeli deneyleri ve gevşek kumlar içeren basitleştirilmiş analizler sonucunda; bir bina temelinin bitişiğindeki alanın, aynı derinlikteki açık alana göre boşluk basıncı oluşumuna daha duyarlı olduğunu ve bu nedenle, bazı koşullar altında, bir yapı yakınındaki zeminin, deprem sarsıntısı sırasında daha önce sıvılaşabileceğini belirtmişlerdir.

4. SIVILAŞMA ANALİZ YÖNTEMLERİ

4.1. Basitleştirilmiş Yöntem

Sıvılaşmaya duyarlı zeminlerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde laboratuvar ve arazi deneylerine bağlı birçok analiz yöntemi önerilmiştir. Bu analiz yöntemleri arasında en eski olan ve en yaygın olarak kullanılan, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) için önerilen yöntemdir. Seed ve İdriss (1971) tarafından önerilen ve "Basitleştirilmiş Yöntem" olarak da bilinen bu analiz yöntemi, zeminin sıvılaşması için gerekli tekrarlı direnç oranının (CRR), depremin oluşturduğu tekrarlı gerilme oranı (CSR) ile karşılaştırılması sonucu zeminin sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısının (FS) belirlenmesi esasına dayanmaktadır.

4.1.1. Tekrarlı gerilme oranı

Depremin oluşturduğu tekrarlı gerilme oranı (CSR), Seed ve İdris (1971) tarafından önerilen Eşitlik 4.1 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$CSR = 0{,}65 \frac{a_{maks}}{g} \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} r_d \qquad (4.1)$$

Bu eşitlikte; a_{maks}= zemin yüzeyindeki maksimum yatay yer ivmesi, g = yer çekimi ivmesi (9,81 m/sn^2) , σ_{vo} = düşey toplam gerilme, σ'_{vo} = düşey efektif gerilme ve r_d = gerilme azaltma katsayısıdır. Gerilme azaltma katsayısı, Liao ve Whitman (1986) tarafından önerilen Eşitlik 4.2 ve 4.3 yardımı ile hesaplanabilmektedir.

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \qquad z \leq 9.15 \text{ m} \qquad (4.2)$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \qquad 9.15 \text{ m} < z \leq 23 \text{ m} \qquad (4.3)$$

Burada z, zemin yüzeyinden itibaren metre cinsinden derinliktir. Gerilme azaltma katsayısı (r_d), hesap kolaylığı sağlamak amacıyla (Youd vd., 2001) tarafından Eşitlik 4.4 ile ifade edilmiştir.

$$r_d = \frac{1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2} \quad (4.4)$$

4.1.2. Tekrarlı direnç oranı

Arazideki zeminin sıvılaşma direncini temsil eden tekrarlı direnç oranı (CRR), SPT deneyi ile ölçülen darbe sayısının (SPT-N) bir fonksiyonu olarak hesaplanabilmektedir. Deney düzeneğindeki farklılıklar, ölçülen darbe sayısını (SPT-N) değerlerini etkilemektedir. Bu nedenle, deney sonuçlarının yorumlanması öncesinde, SPT-N değerlerinde Eşitlik 4.5'te verilen düzeltmelerin yapılması gereklidir.

$$(N_1)_{60} = N*C_N*C_E*C_B*C_R*C_S \quad (4.5)$$

Bu eşitlikte;

$(N_1)_{60}$ = %60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı

N = ölçülen SPT darbe sayısı

C_N = üst tabaka yükü düzeltme katsayısı

C_E = enerji oranı düzeltme katsayısı

C_B = kuyu çapı düzeltme katsayısı

C_R = tij boyu düzeltme katsayısı

C_S = numune alma metodu düzeltme katsayısıdır.

Üst tabaka yükü düzeltme katsayısı, (Liao ve Whitman, 1986) tarafından önerilen Eşitlik 4.6 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \sqrt{\frac{p_a}{\sigma'_{vo}}} \leq 1{,}7 \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte, P_a= yaklaşık 100 kPa değerindeki referans gerilmesi ve $\sigma'_{vo} = P_a$ ile aynı birime sahip düşey efektif gerilmedir. C_N değeri, Youd vd. (2001)'e göre 1,7'yi aşmamalıdır. Ayrıca; yine bu değer aşılmamak kaydıyla, C_N değeri için Kayen vd. (1992) tarafından Eşitlik 4.7 önerilmiştir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

$$C_N = 2{,}2 / (1{,}2 + \frac{\sigma'_{vo}}{p_a}) \quad (4.7)$$

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) tarafından kullanılan başka bir yöntemde ise C_N değeri Eşitlik 4.8 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$C_N = \frac{170}{70+\sigma'_{vo}} \quad (4.8)$$

Youd vd. (2001), 200 kPa'a kadar olan düşey efektif gerilme değerlerinde Eşitlik 4.6'nın güvenilir olduğunu ancak 200 kPa'dan büyük efektif gerilmelerde, sonucun belirsiz olacağını ifade etmişlerdir. 300 kPa'a kadar olan düşey efektif gerilme değerleri için Eşitlik 4.7 ile daha tutarlı sonuçlar elde edilmektedir. Düşey efektif gerilmenin 300 kPa'ı aştığı durumlarda ise Youd vd. (2001)'e göre C_N değerinin başka yöntemlerle hesaplanması gerekmektedir (Mollamahmutoğlu ve Babuçcu, 2006).

Birçok ülkede SPT deneyi değişik şahmerdan tipleri ve düşürme yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Bunun sonucunda, deney esnasında zemine iletilen enerji veriminde farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu farklılığın ortadan kaldırılması amacıyla, SPT-N değerlerine %60 standart enerji verimine göre Çizelge 4.1'de verilen düzeltme katsayıları uygulanmaktadır.

Çizelge 4.1. SPT için enerji oranı düzeltme katsayıları (Seed vd., 1985)

Ülke	Şahmerdan tipi	Şahmerdan bırakma yöntemi	Tahmin edilen enerji oranı	%60 enerji oranına göre düzeltme katsayısı
Japonya	Donut	Serbest düşülü	78	78/60= 1,30
	Donut	Özel bırakma yöntemine sahip halat ve makara	67	67/60=1,12
ABD	Güvenlikli	Halat ve makara	60	60/60=1,00
		Halat ve makara	45	45/60=0,75
Arjantin	Donut	Halat ve makara	45	45/60=0,75
Çin	Donut	Serbest düşülü	60	60/60=1,00
	Donut	Halat ve makara	50	50/60=0,83

Skempton (1986) tarafından önerilen, Robertson ve Wride (1998) tarafından yeniden düzenlenen kuyu çapı (boyu) düzeltme katsayısı (C_B) ve tij boyu düzeltme katsayısı (C_R) değerleri Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. SPT için kuyu çapı düzeltme katsayıları (Youd vd., 2001)

Kuyu Çapı (mm)	Kuyu boyu düzeltme katsayısı (C_B)
65 - 115	1,0
150	1,05
200	1,15

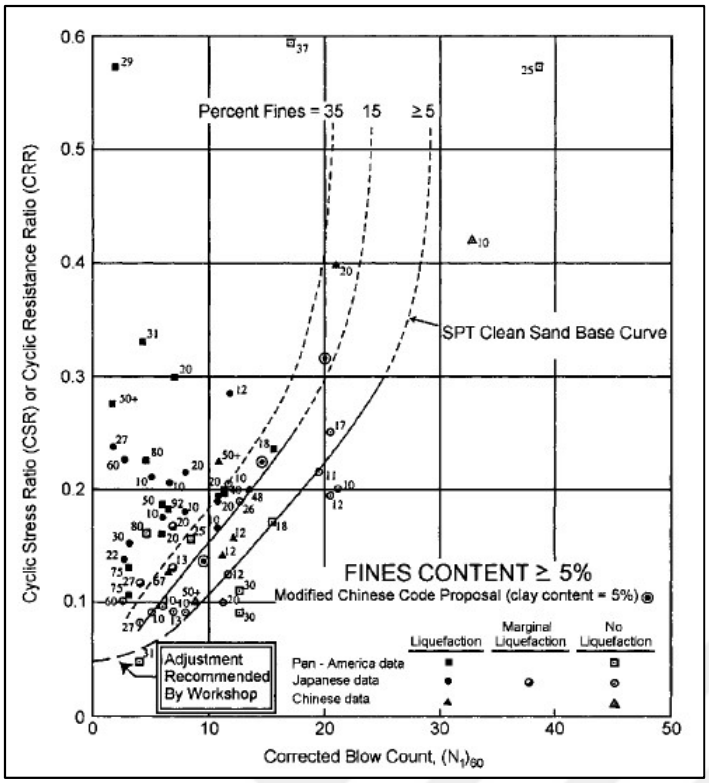
Çizelge 4.3. SPT için tij boyu düzeltme katsayıları (Youd vd., 2001)

Derinlik (m)	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C_R)
0 - 3	0,75
3 - 4	0,75
4 – 6	0,85
6 -10	0,95
10 – 30	1
> 30	1

Numune alma metodu düzeltme katsayısı (C_S) ise; numune alma yönteminin standart numune alıcı (kılıflı) olması durumunda 1, kılıfsız numune alıcı olması durumunda 1,1-1,3 aralığında değişen bir değer almaktadır (Youd vd., 2001).

Seed vd. (1985), M=7.5 büyüklüğünde depreme maruz kalmış temiz ve siltli kumlu zeminlerde, sıvılaşmanın oluştuğu ve oluşmadığı bölgelerde SPT darbe sayılarını araştırmış ve belirli SPT darbe sayılarında sıvılaşma olması için, gerekli minumum tekrarlı gerilme oranını, grafiksel olarak göstermiştir. Seed vd. (1985) tarafından geliştirilen bu grafik NCEER (1997) tarafından yeniden düzenlenmiş ve Şekil 4.1'de gösterilen nihai durumunu almıştır (Savaş vd., 2012).

Şekil 4.1'deki grafikteki yatay kısım, üst tabaka yüküne ve %60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe sayısını göstermektedir. Grafikteki eğriler ise, üç farklı ince tane oranını temsil etmektedir. İnce tane oranının %5 ve daha az olduğu zeminler, temiz kum olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.1. M=7.5 için tekrarlı direnç oranı ve $(N_1)_{60}$ arasındaki ilişki (Youd vd., 2001)

Tekrarlı direnç oranının (CRR) hesabında kolaylık sağlanması amacıyla, Youd vd. (2001) tarafından Şekil 3.1'deki eğrinin yerine Eşitlik 4.9 önerilmiştir.

$$CRR = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{\left(10(N_1)_{60} + 45\right)^2} - \frac{1}{200} \qquad (4.9)$$

Burada, $(N_1)_{60}$ yaklaşık 100 kPa'lık üst tabaka yüküne göre ve %60 enerji oranına göre normalize edilmiş SPT darbe sayısını ifade etmektedir. Bu eşitlik $(N_1)_{60}$ <30 değerleri için geçerli olmakta, $(N_1)_{60} \geq 30$ değerlerine sahip temiz kumlar çok sıkı kabul edildiğinden sıvılaşmayan zeminler olarak değerlendirilmektedir.

İnce tane oranının artması ile sıvılaşma direncinde önemli bir artış olduğu Seed vd. (1985) tarafından ortaya konulmuş ve bu ilişki Eşitlik 4.10 ile ifade edilmiştir (Youd vd., 2001).

$$(N_1)_{60tk} = \alpha + \beta\,(N_1)_{60} \qquad (4.10)$$

Bu eşitlikte;

$(N_1)_{60tk}$ = ince tane oranına göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı

$(N_1)_{60}$ = %60 enerji oranına göre düzeltilmiş SPT darbe sayısı

FC = ince tane oranı

α, β = ince tane düzeltme katsayılarıdır. Bu katsayılar aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

$$\alpha = 0 \quad ; \quad FC \leq \%5 \tag{4.10a}$$

$$\alpha = \exp[1.76-(190/FC^2)] \quad ; \quad \%5 < FC < \%35 \tag{4.10b}$$

$$\alpha = 5 \quad ; \quad FC \geq \%35 \tag{4.10c}$$

$$\beta = 1,0 \quad ; \quad FC \leq \%5 \tag{4.10d}$$

$$\beta = [0,99+(FC^{1.5}/1,000)] \quad ; \quad \%5 < FC < \%35 \tag{4.10e}$$

$$\beta = 1,2 \quad ; \quad FC \geq \%35 \tag{4.10f}$$

4.1.3. Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı

Yukarıdaki ifade edilen eşitliklerde kullanılan bütün CRR değerleri, 7.5 büyüklüğündeki depremler için ($CRR_{7.5}$) geçerli olup, deprem büyüklüğünün 7.5'den farklı olması durumunda, bu değerlerin Youd vd. (2001) tarafından önerilen büyüklük ölçeklendirme faktörüne (MSF) göre düzeltilmesi gerekmektedir. Büyüklük ölçeklendirme faktörü (MSF) Eşitlik 4.11 ile tanımlanmıştır.

$$MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \tag{4.11}$$

Burada, M_w moment büyüklüğüdür. Sonuç olarak, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS), aşağıdaki Eşitlik 4.12 yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$FS = (CRR_{7.5}/CSR) \times MSF \tag{4.12}$$

Bu eşitlikten çıkacak sonuca göre; FS<1 ve FS>1 durumları için sırasıyla zeminler sıvılaşabilir ve sıvılaşamaz olarak sınıflandırılmakta, FS =1 durumu ise limit denge durumu olarak değerlendirilmektedir.

4.1.4. Sıvılaşma potansiyeli indeksi

Sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı, geniş alanlar için göreceli bir değerlendirme yapılmasına ve sıvılaşma potansiyeli açısından sıvılaşma haritalarının hazırlanmasına doğrudan imkân vermemektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak, Iwasaki vd. (1982) tarafından Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI) adı verilen bir parametre önerilmiştir. Bu parametre Eşitlik 4.13 ile hesaplanarak bölgesel sıvılaşma potansiyeli değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

$$\mathrm{LPI} = \int_0^{20} (1 - \mathrm{FS})\, w(z)\, dz \qquad (4.13)$$

Bu eşitlikte;

LPI = sıvılaşma potansiyeli indeksi

FS = z derinliğindeki güvenlik sayısı

w(z) = 10-0.5z (z = m cinsinden yüzeyden derinliktir.)

Bu eşitlik, farklı zemin tabakalarının olması durumu için Eşitlik 4.14 ile ifade edilir. Bu değer 0-100 arasında değişmektedir.

$$\mathrm{LPI} = \sum_{i=1}^{n} (F.\, w.\, H)_i \qquad (4.14)$$

Bu eşitlikte; n= tabaka sayısı, z= m cinsinden, zemin yüzeyinden itibaren tabaka orta noktasının derinliği ve H= m cinsinden tabaka kalınlığıdır. F ise, sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısına bağlı bir değer olup; FS < 1 ise, F=1-FS; FS ≥ 1 ise, F=0 alınmaktadır. Tabaka orta noktasının derinliğinin 20 metreden küçük olması durumunda (z < 20m), w=10-0.5z; 20 metre ve daha büyük olması durumunda (z ≥ 20m) ise w=0 kabul edilmektedir.

Zeminlerin sıvılaşma potansiyeli dereceleri, Iwasaki vd. (1982)'e göre hesaplanan sıvılaşma potansiyeli indekslerine göre Çizelge 4.4'te verildiği gibi çok düşükten çok yükseğe derecelendirilerek sınıflandırılabilmektedir.

Çizelge 4.4. Sıvılaşma potansiyeli indeksine göre potansiyel dereceleri (Iwasaki vd.,1982)

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyeli Derecesi
0	Çok düşük
0< LPI ≤ 5	Düşük
5 < LPI ≤ 15	Yüksek
LPI > 15	Çok yüksek

Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen sıvılaşma potansiyeli dereceleri, Sönmez (2003) tarafından yeniden değerlendirilmiş ve 1<FS≤1.2 olması durumunu potansiyel sıvılaşma olarak göz önüne alan nihai LPI'a bağlı derecelenmeler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Sıvılaşma potansiyeli indeksine göre potansiyel dereceleri (Sönmez, 2003)

Sıvılaşma Potansiyeli İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyeli Derecesi
0	Sıvılaşmaz (FS≥1.2)
0<LPI≤2	Düşük
2<LPI≤5	Orta
5<LPI≤15	Yüksek
LPI>15	Çok yüksek

4.2. Olasılıksal Yöntemler

Olasılıksal korelasyonlara dayalı olarak geliştirilen bu yöntemlerde, arazi verileri ve yer hareketlerini etkileyen bazı faktörler göz önüne alınarak yerel zemin etkileri modellenebilmektedir. Olasılıksal yöntemlerde, daha fazla arazi verisi dikkate alınmakla birlikte, yararlanılan regresyon yöntemine bağlı olarak belirsizlik yüzdesi artmakta ve bazı yöntemlerde ince tane oranı gibi önemli faktörler dikkate alınmamaktadır (Özaydın, 2007).

4.3. Nümerik Analiz Yöntemleri

Sıvılaşma, depremin yol açtığı tekrarlı kayma gerilmelerinin etkisindeki zeminlerde boşluk suyu basıncındaki artış ve efektif gerilmedeki azalma nedeniyle oluşmaktadır.

Zemindeki hacim değişimi eğilimi nedeniyle oluşan boşluk suyu basınçlarının hesaplanabilmesi durumunda, sıvılaşma olasılığı belirlenebilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucu geliştirilen bünye modelleri sayesinde, tekrarlı kayma gerilmeleri altında zemindeki hacim değişimi ve boşluk suyu basıncı artışı modellenebilmektedir. Bu bünye modellerinin kullanıldığı nümerik yöntemlerde, zeminlerin dinamik özelliklerinin (kayma modülü, sönüm oranı) göz önüne alınması ve efektif gerilme esasında analiz yapılabilmesi nedeniyle, zeminlerin deprem esnasındaki davranışı doğruya yakın bir şekilde tahmin edilebilmektedir (Özaydın, 2007).

Günümüzde birçok araştırmacı tarafından bünye modellerini esas alarak gelştirilen; bir, iki, üç boyutlu lineer (doğrusal) ve nonlineer (doğrusal olmayan) zemin davranış analizi yapabilen çeşitli bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bir boyutlu analiz yapabilen yazılımlar yatay veya yataya yakın eğime sahip yüzeyli zeminlerin modellenmesinde kullanılırken, zemin yüzeyinin eğimli ve düzensiz olduğu, yüzey ve yeraltı topoğrafyasının göz ününe alınmasının gerektiği durumlarda iki ve üç boyutlu analiz yapabilen yazılımların kullanılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, bir boyutlu frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal analiz ve boşluk suyu basıncı artışının modellenmesine yönelik gelişmiş bünye modellerini içeren zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yapabilen DEEPSOİL yazılımı kullanılarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir.

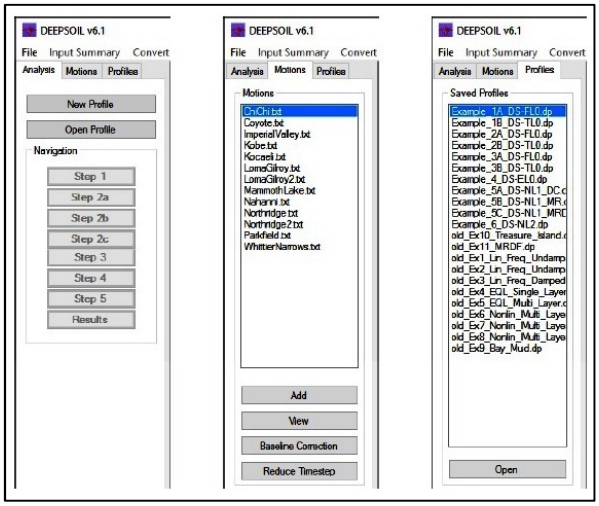
5. DEEPSOİL PROGRAMI

5.1. Program Hakkında

Illinois Üniversitesi'nde görev yapan Prof. Youssef M.A. Hashash başkanlığında, birçok lisans ve lisansüstü öğrencilerinin çalışmaları sonucunda geliştirilen DEEPSOİL programı ile frekans tanım alanında bir boyutlu doğrusal ve eşdeğer doğrusal analiz ile birlikte, zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan zemin davranış analizleri yapılabilmektedir. Bunun yanında; programın içeriğinde yer alan bünye modelleri sayesinde, deprem esnasındaki boşluk suyu basıncı artışları modellenebilmekte ve sıvılaşma analizi gerçekleştirilebilmektedir.

5.2. Programın Yapısı

DEEPSOİL programının ilk açılışında, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi "Analysis", "Motions" ve "Profiles" sekmelerinden oluşan kullanıcı ara yüzü karşımıza gelmektedir.



Şekil 5.1. DEEPSOİL programınım kullanıcı arayüzünde yer alan sekmeler

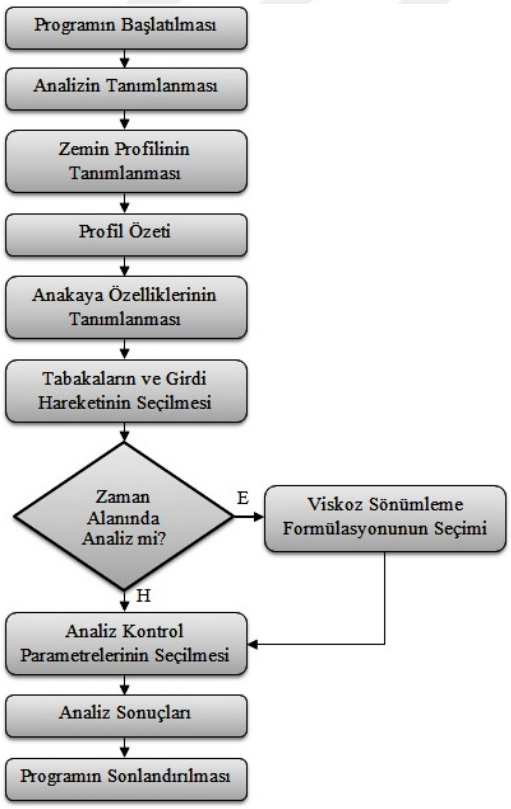
"Analysis" sekmesinde iken, yeni bir analiz çalışması oluşturmak için "New Profile" ve mevcut bir analiz çalışmasını açmak için "Open Profile" düğmesi kullanılmaktadır. Bu sekmede ayrıca, kullanıcının analiz sürecini adım adım takip edebilmesi maksadıyla "Navigation" bölümü yer almaktadır.

"Motions" sekmesi, anakaya girdi hareketlerinin listelendiği bölümdür. Herhangi bir anakaya hareketinin üzeri aktifken "View" düğmesi tıklandığında, seçilen hareket için programın oluşturduğu hız, ivme, deplasman, tepki spektrumu ve Fourier genlik spektrumu gibi özellikler grafiksel olarak ekrana gelmektedir. Seçilen bir girdi hareketinin özelliklerinde düzeltme yapmak için "Baseline Corection" düğmesi kullanılmaktadır. "Add" düğmesine tıklanarak ya da "File" menüsünden "New" ardından "Motion" seçilerek yeni bir girdi hareketi oluşturulabilmektedir.

"Profiles" sekmesinde, kaydedilmiş olan analiz çalışmaları gösterilmektedir. Kullanıcı, bu sekmede iken istediği çalışmayı açabilir, yeni bir analiz başlatabilir veya kaydedilmiş bir analiz dosyasını değiştirebilmektedir.

5.3. Analiz Aşamaları

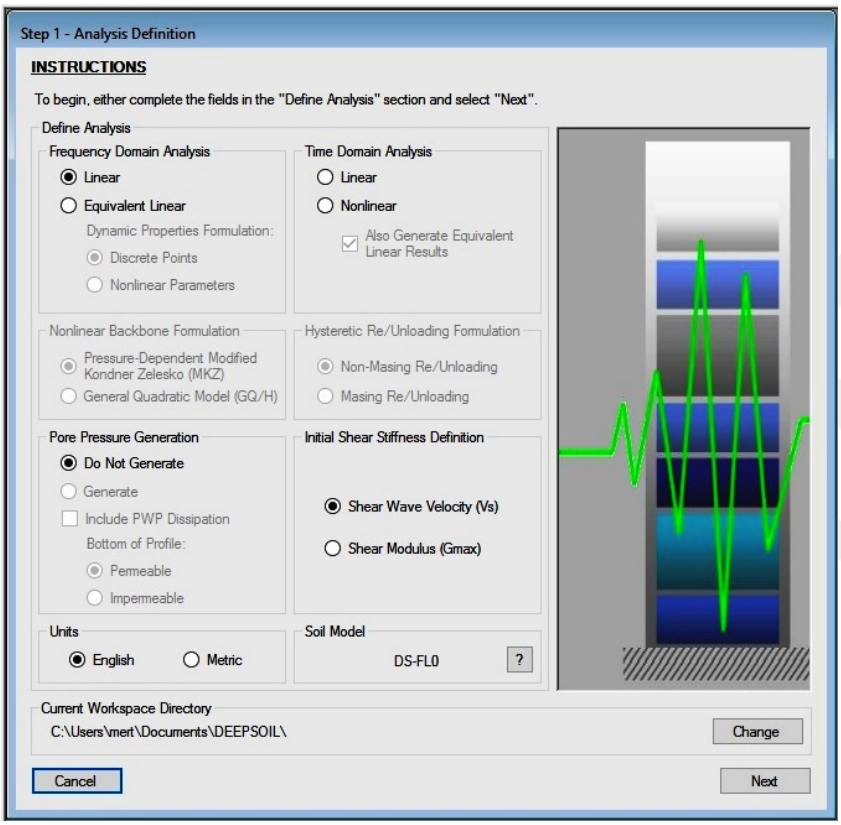
DEEPSOİL, birden çok aşamadan oluşan bir boyutlu yer tepki analizi programıdır. Bu analiz aşamaları, Şekil 5.2'deki yapısal akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 5.2. DEEPSOİL programının yapısal akış şeması

5.3.1. Analizin tanımlanması

Analiz sürecinin ilk aşaması, kullanılacak analiz yönteminin tanımlanmasıdır. Analizler frekans ve zaman tanım alanında gerçekleştirilmektedir. Frekans tanım alanında doğrusal ve eş doğrusal analiz yapılırken, zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir (Şekil 5.3).



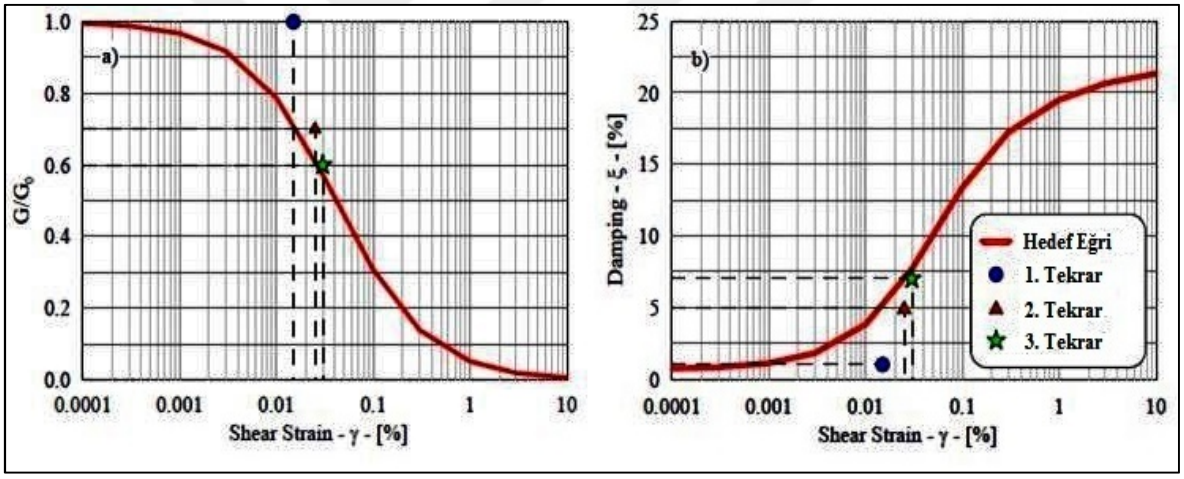
Şekil 5.3. Analiz tanımlama penceresi

5.3.1.1. Lineer (doğrusal) analiz

Doğrusal analizde, anakaya ivmesi gibi bir girdi hareketinin yer değiştirme, hız, ivme, kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu gibi değişik tepki parametrelerini bulmada transfer fonksiyonlarından yararlanılmaktadır. Anakaya girdi hareketinin Fourier serisindeki her terimi ilgili transfer fonksiyonu ile çarpılarak zemin yüzeyinin (çıktı) hareketi elde edilir. Bu çıktı hareketi, daha sonra transfer fonksiyonunun tersi kullanılarak zaman tanım alanında ifade edilebilmektedir (Kramer, 1996).

5.3.1.2. Frekans tanım alanında eşdeğer lineer (doğrusal) analiz

Seed ve Idriss (1969), kayma modülünün ve sönümlenmenin sırasıyla doğrusal bir yay ve bir sönümleyici kullanılarak modellendiği eşdeğer bir doğrusal tasarımın kullanılmasını önermişlerdir. Bu tasarımda, yay ve sönümleme katsayıları belirli bir kayma gerilmesi seviyesi için sekant kayma modülü (G_{sec}) ve sönümleme oranı (ξ) temel alınarak hesaplanmaktadır. Seed ve Idriss (1969), deprem girdi hareketi için bu özelliklerin belirli bir tabakadaki maksimum gerilme düzeyinin 2/3'üne eşit bir gerilme için hesaplanması gerektiğini önermektedir. Analiz sonlandırılmadan önce zemin profilinin her tabakasındaki maksimum gerilme seviyesinin belirlenmesinin mümkün olmaması nedeniyle, eşdeğer doğrusal tasarım Şekil 5.4'te gösterildiği üzere yinelemeli bir prosedür (iterasyon) kullanılarak uygulanmaktadır (Hashash vd., 2010).



Şekil 5.4. Eşdeğer doğrusal yinelemeli prosedür a) Modül azalım eğrisi b) Sönümleme eğrisi (Hashash vd., 2010).

Bu prosedürde ilk önce, her tabaka için rijitlik ve sönümleme özellikleri ayarlanır ve ardından kayma dalgası yayılım analizi yapılır. Analiz sonuçlandırıldıktan sonra, rijitlik ve sönümleme özellikleri, verilen her tabakadaki maksimum gerilimin Rγ katına karşılık gelen gerilmeye dayanılarak güncellenir. Efektif kayma birim deformasyonunun maksimum kayma birim deformasyonuna oranını ifade eden Rγ, deprem büyüklüğüne (M) bağlı olarak, İdriss ve Sun (1992) tarafından önerilen Eşitlik 5.1 ile hesaplanabilmektedir.

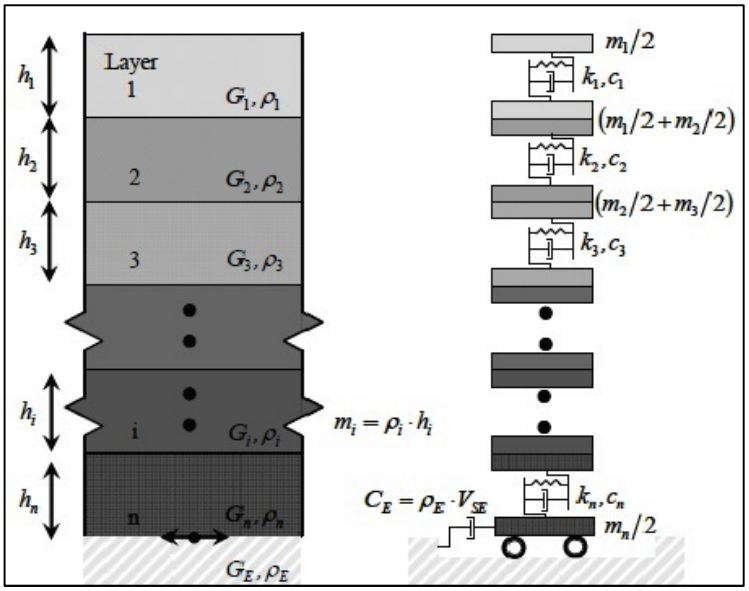
$$R\gamma = (M-1)/10 \qquad (5.1)$$

Sonraki analizler; iki ardışık hesaplama için hesaplanan rijitlik ve sönümleme özellikleri, bütün tabakalar için daha önceden belirlenen maksimum gerilime yaklaşıncaya kadar gerçekleştirilir.

Eşdeğer doğrusal analizde, modül azalım eğrisini ve sönümle eğrisini çizebilmek için iki seçenek bulunmaktadır. "Discrete Points" seçeneğinde, modül oranı ve sönüm oranı kayma birim deformasyonunun bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. "Nonlinear Parameters" seçeneğinde ise, zemin modeli için doğrusal olmayan parametrelerin tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu parametrelerin tanımlanması durumunda, program modül azalım eğrisini ve sönümleme eğrisini otomatik olarak oluşturmaktadır.

5.3.1.3. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan (nonlineer) analiz

Frekans tanım alanı analizleri; sağlamlık, basitlik ve düşük hesaplama gereksinimleri nedeniyle, saha etkilerinin tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan yöntemler olmasına rağmen bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Bir sismik olay sırasında, her tabaka için eşdeğer bir zemin rijitliği ve sönümlemesinin zemin kolonunu doğru bir şekilde temsil edemediği durumlarda, kayma modülü (G) ve sönümleme oranının (ξ) değişimini göstermek için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz kullanılmaktadır.



Şekil 5.5. Yatay olarak tabakalanmış zemin kolonunun çoklu-serbestlik-dereceli toplu parametre modeli (Hashash vd., 2010)

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde zemin kolonu, Şekil 5.5'te görüldüğü üzere çoklu-serbestlik-dereceli toplu parametre modeli veya sonlu elemanlar kullanılarak ayrık tabakalara ayrılmaktadır.

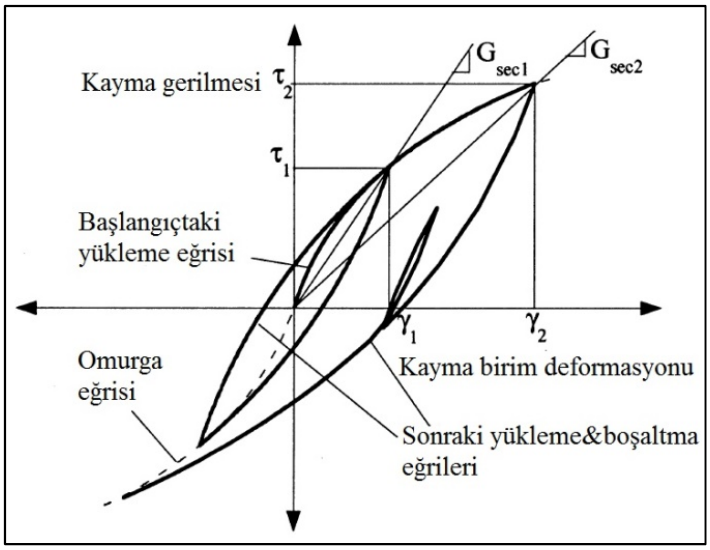
Her bir tabaka; bir kütle, doğrusal olmayan bir yay ve viskoz sönümle için bir sönümleyici ile temsil edilmektedir. Ardışık iki tabakayı temsil eden kütlelerin her birinin yarısının, iki tabakanın ortak sınırında bir araya gelmesi kütle matrisini [M] oluşturmaktadır. Rijitlik matrisi [K], zeminin doğrusalsızlığını birleştirmek için her bir zaman artışında güncellenmektedir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizde hareket denklemi Eşitlik 5.2 kullanılarak elde edilmektedir (Hashash vd., 2010).

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \qquad (5.2)$$

Burada; [M] kütle matrisi, [C] viskoz sönümleme matrisi, [K] rijitlik matrisi, {ü} nodal göreceli ivme vektörü, {û} nodal göreceli hızların vektörü ve $\{u\}$ nodal göreceli yer değiştirmeler vektörüdür. $\ddot{u}_g$ zemin kolonunun tabanındaki ivme ve $\{I\}$ birim vektördür. Dinamik denge denklemi olan bu eşitlik, Newmark β (1959) gibi bir zaman bütünleştirme yöntemi kullanılarak zaman adımlarının her birinde sayısal olarak çözülmektedir.

5.3.1.4. Doğrusal olmayan omurga eğrisinin formülasyonu

Hareket denkleminde yer alan [M], [C] ve [K] matrisleri, zemin tabakalarının artımsal özellikleri kullanılarak birleştirilmektedir. Bu özellikler, zeminin tekrarlı davranışını tanımlayan yapısal bir modelden elde edilmektedir. En eski yapısal modeller, kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu arasında ilişki kuran basit bir modeli kullanmaktadır. Bu sayede, omurga eğrisi hiperbolik bir fonksiyon olarak ifade edilmektedir. Omurga eğrisi, modül azalım eğrileri kullanılarak da türetilebilmektedir. Masing kuralları (Masing, 1926) ve genişletilmiş Masing kuralları (Pyke, 1979; Vucetic, 1990), Şekil 5.6'da görüldüğü üzere, zeminin tekrarlı yükleme koşulları altındaki davranışını ve boşaltma-yükleme kuralarını tanımlamaktadır (Hashash ve Park, 2001).



Şekil 5.6. Doğrusal olmayan hiperbolik zemin modeli (Hashash ve Park, 2001)

Kondner ve Zelasko (1963) tarafından önerilen hiperbolik model, daha sonra Matasovic (1993) tarafından modifiye edilerek geliştirilmiştir. Modifiye edilmiş hiperbolik modelde, gerilme-birim deformasyon ilişkisini ifade eden omurga eğrisi, Eşitlik 5.3 ile tanımlanmaktadır.

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1+\beta\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^s} \tag{5.3}$$

Burada; G_0 başlangıç kayma modülü, γ kayma birim deformasyonu, τ kayma gerilmesi, β boyutsuz bir faktör, s boyutsuz bir üs ve γ_r referans kayma birim deformasyonudur. γ_r parametresi, Hashash ve Park (2001) tarafından önerilen Eşitlik 5.4 ile hesaplanabilmektedir.

$$\gamma_r = \left(\frac{\sigma'_v}{Referans\ Gerilmesi}\right)^b \tag{5.4}$$

Bu eşitlikte; σ'_v dikey efektif gerilme, b basınca bağlı bir parametre ve Referans Gerilmesi, referans birim kayma deformasyonunun referans gerilmesine eşit olduğu durumdaki dikey efektif gerilmedir. Bu model, "basınca bağlı hiperbolik model" olarak adlandırılmaktadır (Hashash vd., 2016).

Büyük boyuttaki yer sarsıntılarında veya yumuşak zeminlerde bir boyutlu doğrusal olmayan yer tepki analizinden güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, zeminin doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon davranışının yanı sıra kayma mukavemetinin de temsil edilmesi gerekmektedir. Modifiye edilmiş hiperbolik modeller, düşük birim deformasyon davranışını doğru bir şekilde yansıtsa da, bazı durumlarda zeminin kayma mukavemeti göz ardı edilirken, bazı durumlarda ise fazla tahmin edilerek yer tepki analizinin hatalı sonuçlar vermesine neden olmaktadır. Groholski vd. (2015), bu hataları ve kısıtlamaları ortadan kaldırmak için doğrusal olmayan düşük birim deformasyon rijitliğini yansıtan ve göçme anındaki kayma mukavetinin tanımlanmasına imkân veren genelleştirilmiş ikinci dereceden bir hiperbolik modeli (GQ/H) ortaya koymuşlardır. Bu modelde omurga eğrisi Eşitlik 5.5 ile ifade edilmektedir.

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{2\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)+\sqrt{\left\{1+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)\right\}^2-4\theta_\tau\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}} \tag{5.5}$$

Bu eşitlikte; τ kayma gerilmesi, τ_{max} göçme anındaki kayma mukavemeti, γ kayma birim deformasyonu, γ_r referans kayma birim deformasyonu ve θ_τ eğri ayarlama parametresi olup Eşitlik 5.6 ile tanımlanmaktadır.

$$\theta_\tau = \theta_1 + \frac{\theta_2.\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)}{\theta_3+\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)} \leq 1 \tag{5.6}$$

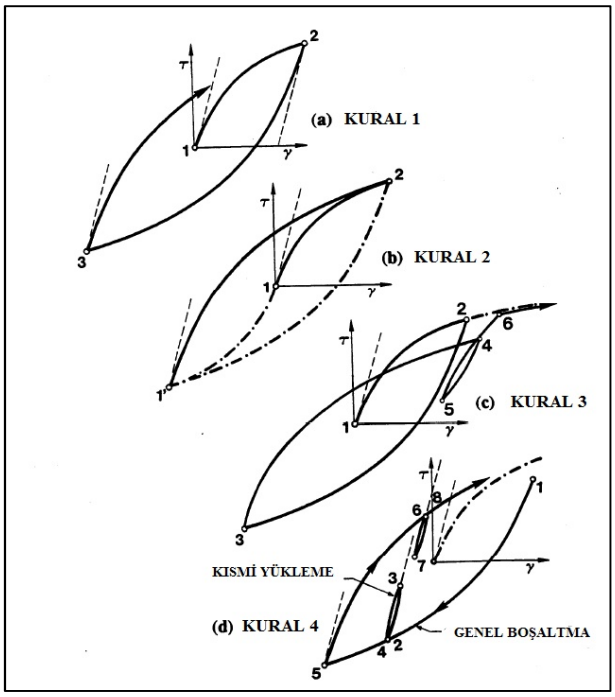
Burada; θ_1, θ_2 ve θ_3, tanımlanmış bir birim deformasyon aralığı boyunca kayma birim deformasyonuna karşılık gelen normalize edilmiş kayma modüllerinin değişimini gösteren eğrilerin en iyi şekilde ayarlanması için seçilen eğri ayarlama sabitleridir. $\theta_1$ve $\theta_2$sabitlerinin toplamları 1 veya 1'den küçük olmalıdır (Hashash vd., 2016).

5.3.1.5. Histerik (boşaltma-yükleme) eğrisinin formülasyonu

Bir zeminin tekrarlı yükler altındaki histerik (boşaltma-yükleme) davranışı Şekil 5.7'de gösterilen Masing kuralları (Masing, 1926) ve Genişletilmiş Masing kuralları (Pyke, 1979; Vucetic, 1990) ile tanımlanmaktadır. Bu kurallar aşağıdaki prosedürleri içermektedir:

Başlangıç yüklemesi için, gerilme-birim deformasyon eğrisi omurga eğrisini takip eder (Şekil 5.7a). Herhangi bir tekrarlı yükleme oluşması durumunda, boşaltma ve yükleme eğrisi iki faktör kadar büyütülerek omurga eğrisi ile aynı şekli alır (Şekil 5.7b). Boşaltma veya yükleme eğrisi, bir önceki maksimum birim deformasyonu aşar ve omurga eğrisiyle kesişirse, bir sonraki tekrarlı yüklemeye kadar omurga eğrisini izler (Şekil 5.7c). Boşaltma veya yükleme eğrisinin bir önceki tekrardan bir boşaltma veya yükleme eğrisi ile kesişmesi durumunda, gerilme-birim deformasyon eğrisi bir önceki tekrarın eğrisini takip eder (Şekil 5.7d).

Bu kurallardan ilik ikisi "Masing" kuralı olarak nitelendirilirken, diğer iki kuralla birlikte bu dört kural "Genişletilmiş Masing" kuralları olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 5.7. Genişletilmiş Masing kuralları (Steward vd., 2008)

Masing kurallarına bağlı kalınarak elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrileri kullanılarak histerik sönümlemenin hesaplanması, büyük birim deformasyonlarda sönümlenin olduğundan daha fazla tahmin edilmesine yol açabilmektedir. Masing kurallarının kullanılmasından kaynaklanan bu sorunların giderilmesi için; Phillips ve Hashash (2009) tarafından, Eşitlik 5.7 ile ifade edilen bir indirgeme faktörünün kullanıldığı Non-Masing modeli önerilmiştir.

$$F(\gamma_m) = p_1 - p_2\left(1 - \frac{G_{\gamma m}}{G_0}\right)^{P_3} \tag{5.7}$$

Burada; $F(\gamma_m)$ indirgeme faktörü, G_{γ_m} kayma modülü, G_0 başlangıç kayma modülü, p_1, p_2 ve p_3 hedeflenen sönümleme eğrisi ile mümkün olan en iyi uyumu elde etmek için seçilen boyutsal olmayan parametrelerdir.

Non-Masing modeli, modül azalım ve sönümleme eğrilerinin indirgeme faktörü kullanılarak ayarlandığı MRDF Basınca Bağlı Hiperbolik Model'dir. Bu modelde, indirgeme faktörüne bağlı olarak modifiye edilmiş boşaltma-yükleme denklemi Eşitlik 5.8'de tanımlanmıştır (Hashash vd., 2016).

$$\tau = F(\gamma_m)\left[2\frac{G_0\left((\gamma-\gamma_{rev})/2\right)}{1+\beta\left(\frac{(\gamma-\gamma_{rev})}{2\gamma_r}\right)^s} - \frac{G_0(\gamma-\gamma_{rev})}{1+\beta\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r}\right)^s}\right] + \frac{G_0(\gamma-\gamma_{rev})}{1+\beta(\gamma_m-\gamma_r)^s} + \tau_{rev} \tag{5.8}$$

Bu eşitlikte; γ kayma birim deformasyonu, γ_r referans kayma birim deformasyonu, β boyutsuz bir faktör, s boyutsuz bir üs, γ_{rev} ters kayma birim deformasyonu, τ_{rev} ters kayma gerilmesi, γ_m maksimum kayma birim deformasyonu, $F(\gamma_m)$ indirgeme faktörü ve G_0 başlangıç kayma modülüdür.

5.3.1.6. Boşluk suyu basıncının oluşumu ve yayılması

Bir zemin çökelinde aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu, zeminde sıvılaşmanın meydana gelmesine yol açabilmektedir. Bir boyutlu yer tepki analizlerinde aşırı boşluk suyu basıncının oluşumunun modellenmesi için arazi ölçümlerine ve laboratuvar testlerine bağlı olarak Çizelge 5.1'de verilen model ve parametreler ortaya konulmuştur.

Çizelge 5.1. Aşırı boşluk suyu basıncı oluşum model ve parametreleri (Hashash vd., 2016)

Model	Zemin Tipi	Kısaltma	Model No.	Parametreler						
				1	2	3	4	5	6	7
Dobry & Matasovic	Kum	S-M/D	1	f	p	F	s	γ_{tvp}	v	-
Matasovic & Vucetic	Kil	C-M	2	s	r	A	B	C	D	γ_{tvp}
GMP	Kohezyonsuz	GMP	3	α	D_r (%)	FC (%)	-	-	v	-
Park & Ahn	Kum	P/A	4	α	β	$D_{ru=1}$	CSR_t	-	v	-
Generalized	Herhangi biri	G	5	α	β	-	-	-	v	-

Dobry / Matasovic Modelinde, aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu için Matasovic ve Vucetic (1993, 1995) tarafından kumlar için önerilen Eşitlik 5.9 kullanılmaktadır. Bu eşitlikte yer alan parametrelere ilişkin tanımlar Çizelge 5.2'de verilmiştir.

$$u_N = \frac{p*f*N_c*F*(\gamma_c-\gamma_{tvp})^s}{1+f*N_c*F*(\gamma_c-\gamma_{tvp})^s} \quad (5.9)$$

Çizelge 5.2. Dobry / Matasovic model parametrelerinin tanımları

DEĞİŞKEN	AÇIKLAMALAR
u_N	Normalleştirilmiş aşırı boşluk suyu basıncıdır ($r_u = u'/\sigma'_v$).
N_{eq}	Eşdeğer döngü sayısıdır.
γ_c	Geçerli ters kayma birim deformasyonudur.
γ_{tvp}	Eşik kayma birim deformasyon değeridir.
p	Eğri ayarlama parametresidir. Farklı tip ve bağıl yoğunluklu kumlar için 1±% 7.1 arasında değer almaktadır. Laboratuvar verileri bulunmadığında, genellikle p = 1 olarak kabul edilmektedir.
s	Eğri ayarlama parametresidir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $s = (FC + 1)^{0.1252}$ (FC, yüzde olarak ince tane oranıdır.) (Carlton, 2014)
F	Eğri ayarlama parametresidir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $F = 3810 * V_s^{(-1.55)}$ (V_s, m/s cinsinden kayma dalga hızıdır.) (Carlton, 2014)
f	Boyutluluk faktörüdür. Bir boyutlu hareket için f=1, iki boyutlu hareket için f=2 alınmaktadır.
v	İndirgeme parametresidir.

Matasovic ve Vucetic (1995), killerde aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu için Eşitlik 5.10 ile ifade edilen denklemi önermişlerdir. Bu denklemdeki parametrelere ilişkin tanımlar Çizelge 5.3'te verilmiştir. Bu çizelgede, OCR aşırı konsolidasyon oranı ve PI plastisite indeksidir.

$$u_N = AN_c^{-3s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + BN_c^{-2s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + CN_c^{-s(\gamma_c-\gamma_{tvp})^r} + D \qquad (5.10)$$

Çizelge 5.3. Matasovic ve Vucetic model parametrelerinin tanımları

DEĞİŞKEN	AÇIKLAMALAR
u_N	Normalleştirilmiş aşırı boşluk suyu basıncıdır ($r_u = u'/\sigma_v'$)
N_{eq}	Eşdeğer döngü sayısıdır.
γ_c	En Son Geçerli ters kayma birim deformasyonudur.
γ_{tvp}	Eşik kayma birim deformasyon değeridir.
r	Eğri ayarlama parametresidir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $r = 0.7911\ x\ PI^{-0.113}\ x\ OCR^{-0.147}$ (Carlton, 2014).
s	Eğri ayarlama parametresidir. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $s = 1.6374\ x\ PI^{-0.802}\ x\ OCR^{-0.417}$ (Carlton, 2014).
A	Eğri ayarlama katsayısıdır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $A = \begin{cases} OCR < 1.1\ için\ 7.6451 \\ OCR \geq 1.1\ için\ 15.641 x OCR^{-0.242} \end{cases}$ (Carlton, 2014)
B	Eğri ayarlama katsayısıdır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $B = \begin{cases} OCR < 1.1\ için - 14.714 \\ OCR \geq 1.1\ için - 33.691 x OCR^{-0.33} \end{cases}$ (Carlton, 2014)
C	Eğri ayarlama katsayısıdır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $C = \begin{cases} OCR < 1.1\ için\ 6.38 \\ OCR \geq 1.1\ için\ 21.45 x OCR^{-0.468} \end{cases}$ (Carlton, 2014)
D	Eğri ayarlama katsayısıdır. Aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $D = \begin{cases} OCR < 1.1\ için\ 0.6922 \\ OCR \geq 1.1\ için - 3.4708 x OCR^{-0.857} \end{cases}$ (Carlton, 2014)

Green vd., (2000), kohezyonsuz zeminlerde aşırı boşluk suyu basıncı oluşumu işin enerji bazlı GMP modelini önermişlerdir. Bu modelde, aşırı boşluk suyu basıncının hesaplanması için Eşitlik 5.11 kullanılmaktadır. Bu eşitlikte yer alan parametrelere ilişkin tanımlar Çizelge 5.4'te verilmiştir.

$$r_u = \alpha \sqrt{\frac{W_s}{PEC}} \tag{5.11}$$

Çizelge 5.4. GMP model parametrelerinin tanımları

DEĞİŞKEN	AÇIKLAMALAR
r_u	Normalleştirilmiş aşırı boşluk suyu basıncıdır.
W_s	Zeminin birim hacmi başına normalleştirilmiş atıl enerjidir. Ws, mevcut gerilme-birim deformasyon yolunun altındaki alan olarak hesaplanır ve aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir. $W_s = \frac{1}{2\sigma_0'}\sum_{i=1}^{n}(\tau_{i+1}+\tau_i)*(\gamma_{i+1}-\gamma_i)$
PEC	Pseudo enerji kapasitesidir. Green, vd. (2000) tarafında geliştirilen grafik bir prosedür veya Polito, vd. (2008) tarafından önerilen aşağıdaki ampirik ilişki yardımıyla belirlenmektedir. $ln(PEC) = \begin{cases} FC < 35\% : e^{0.0139D_r} - 1.021 \\ FC \geq 35\% : -0.597 * FC^{0.312} + e^{0.0139D_r} - 1.021 \end{cases}$
α	Scala faktörüdür. Aşırı boşluk suyu basıncının laboratuvar veya arazi verilerine uyacak şekilde ölçeklendirilmesi için uygulanmaktadır.
v	İndirgeme parametresidir.

Berrill ve Davis (1985) ve Green, vd. (2000) tarafından önerilen "Genelleştirilmiş Enerji Temelli PWP Oluşum Modeli"ne göre aşırı boşluk suyu basıncı Eşitlik 5.12 ile ifade edilmektedir. Bu eşitlikteki parametrelerin tanımları Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

$$r_u = \alpha * W_s^{\beta} \tag{5.12}$$

Çizelge 5.5. Genelleştirilmiş model parametrelerinin tanımları

DEĞİŞKEN	AÇIKLAMALAR
α	Eğri ayarlama katsayısıdır.
β	Eğri ayarlama parametresidir.
W_S	Zeminin birim hacmi başına normalleştirilmiş atıl enerjidir.
v	İndirgeme parametresidir.

Gerilme yığılmasını hesaplamak için bir hasar parametresi kavramını kullanan Park ve Ahn (2013) modeli, gerilme temelli aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelidir. Bu modelde, aşırı boşluk suyu basıncı Eşitlik 5.13 ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte yer alan model parametrelerine ilişkin açıklamalar Çizelge 5.6'ta gösterilmiştir.

$$r_u = \frac{2}{\pi} arcsin\left(\frac{D}{D_{ru=1.0}}\right)^{\left(\frac{1}{2\beta}\right)} \tag{5.13}$$

Çizelge 5.6. Park ve Ahn model parametrelerinin tanımı

DEĞİŞKEN	AÇIKLAMALAR
r_u	Normalleştirilmiş aşırı boşluk suyu basıncıdır. Artımlı durumda, aşırı boşluk suyu basıncı modeli aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir: $dr_u = (r_u)_{i+1} - (r_u)_i - \frac{2}{\pi} arcsin\left[\left(\frac{D_{i+1}}{D_{r_{u=1.0}}}\right)^{\frac{1}{2\beta}}\right] - \frac{2}{\pi} arcsin\left[\left(\frac{D_i}{D_{r_{u=1.0}}}\right)^{\frac{1}{2\beta}}\right]$
D	Hasar parametresidir. Her zaman adımında aşağıdaki gibi hesaplanabilir: $D_{i+1} = D_i + \Delta D$ $\Delta D = 2(CSR_{i+1} - CSR_t)^{\alpha}$
$D_{r_{u=1.0}}$	Sıvılaşma başlangıcındaki hasar parametresidir. Aşağıdaki formül kullanılarak laboratuvar deneylerinden elde edilen CSR-N eğrilerinden hesaplanabilir: $D_{ru=1.0} = 4N(CSR - CSR_t)^{\alpha}$
CSR_t	Eşik kayma gerilmesi oranı değeridir.
α	Kalibrasyon parametresidir. Laboratuvar testlerinden elde edilen CSR-N eğrisi ile aşağıdaki formülasyon kullanılarak hesaplanabilir: $\alpha_{ave} = \frac{1}{M} * \sum_{i=1}^{M-1} \left(log(N_i/N_{i+1}) / \left(log(CSR_{i+1} - CSR_t) - log(CSR_i - CSR_t)\right)\right)$ Burada M, CSR-N eğrisindeki veri noktalarının toplam sayısıdır.
β	Ampirik bir sabittir. Temiz kumlar için, 0.7 değeri önerilmektedir.
v	İndirgeme parametresidir.

Zemin çökelinde aşırı boşluk suyu basıncının yayılımı ve yeniden dağılması, çökelin iç ve dış tabakalarındaki suyun akış hızı ve belirli bir zaman artımındaki boşluk suyu basıncı oranına bağlı olarak gerçekleştirilmektedir. Hashash (2009), boşluk suyu basıncının yayılımı ve yeniden dağılması modelini, konsolidasyon oranının (c_v) kullanıldığı Eşitlik 5.14 ile tanımlamıştır.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)_{st} + \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{cv} \tag{5.14}$$

Bir yer sarsıntısı sırasında, aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu, yayılımı ve yeniden dağılması eşzamanlı olarak meydana gelmektedir. Analizler, aşırı boşluk suyu basıncı dağılımının sadece dikey yönde oluştuğu varsayılarak gerçekleştirilmektedir. (Hashash vd., 2016).

Aşırı boşluk suyu basıncının oluşumu ve yayılması analizinde; "Permeable" veya "İmpermeable" seçenekleri kullanılarak, zemin profilinin altından suyun geçip geçmeyeceğine karar verilebilmekte ve böylece boşluk suyu basıncının yayılımı sınırlandırılabilmektedir.

5.3.1.7. Başlangıç dinamik parametrelerinin tanımlanması

Bu kısımda, "Kayma Dalgası Hızı" ve "Kayma Gerilmesi" olmak üzere iki seçenek yer almaktadır. Kayma dalgası hızı; yansıma, sismik kuyu, karşıt kuyu, sismik koni gibi arazi ölçüm yöntemlerinin yanı sıra, Standart Penetrasyon Deneyinden (SPT) elde edilen N darbe sayısına ve Koni Penetrasyon Deneyinden (CPT) elde edilen uç direncine (q_c) bağlı olarak önerilen ampirik ilişkiler yardımı ile belirlenebilmektedir. Kayma modülü ise, arazi araştırmalarına dayanan ampirik eşitlikler kullanılarak hesaplanabilmektedir.

5.3.1.8. Zemin modeli

Zemin modeli bölümünde, seçilen analiz türünü ifade eden tanımlayıcılar yer almaktadır. Bu tanımlayıcılar, analizin gerçekleşmesi sırasında analiz türüne ait bilgilerin hızla aktarılmasını sağlamaktadır.

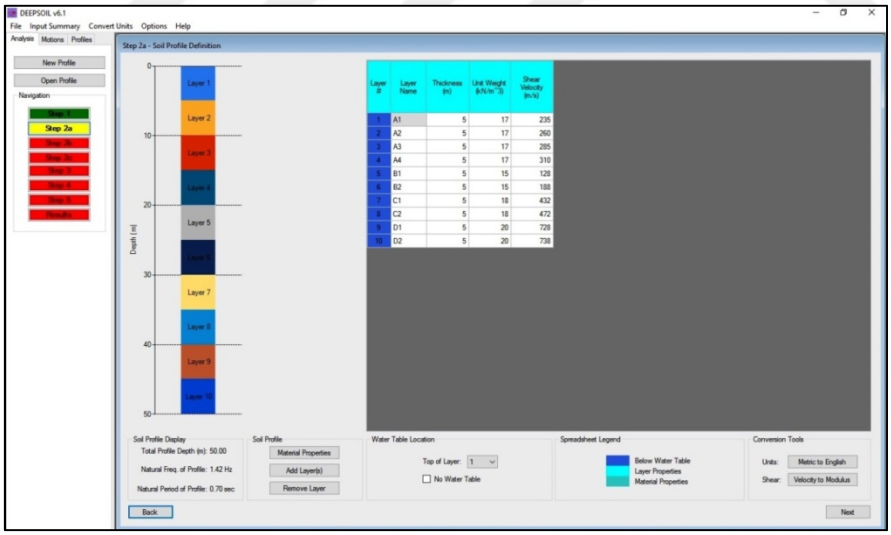
5.3.1.9. Birimler

Analizde kullanılacak ölçü birimlerinin seçildiği kısımdır.

5.3.2. Zemin profilinin tanımlanması

Analizin bu aşamasında, zemin profili oluşturulmakta ve her bir zemin tabakasına ait dinamik zemin özellikleri tanımlanmaktadır (Şekil 5.8).

Veri giriş penceresinin sol tarafında zemin profilinin görsel bir görüntüsü yer almaktadır. Sağ tarafta ise zemin profilinin oluşturulması için gerekli parametrelerinin girildiği tablo bulunmaktadır. Analizin birinci aşamasında seçilen analiz türüne göre, her tabakaya ait zemin özelliklerinin tabloya girilmesi gerekmektedir. Birinci aşamada boşluk suyu basıncının oluşumunun seçilmesi durumunda, seçilen aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modeline ait parametreler de (Bkz. Çizelge 5.1) kullanıcı tarafından programa girilmek üzere tabloya dâhil edilmektedir.



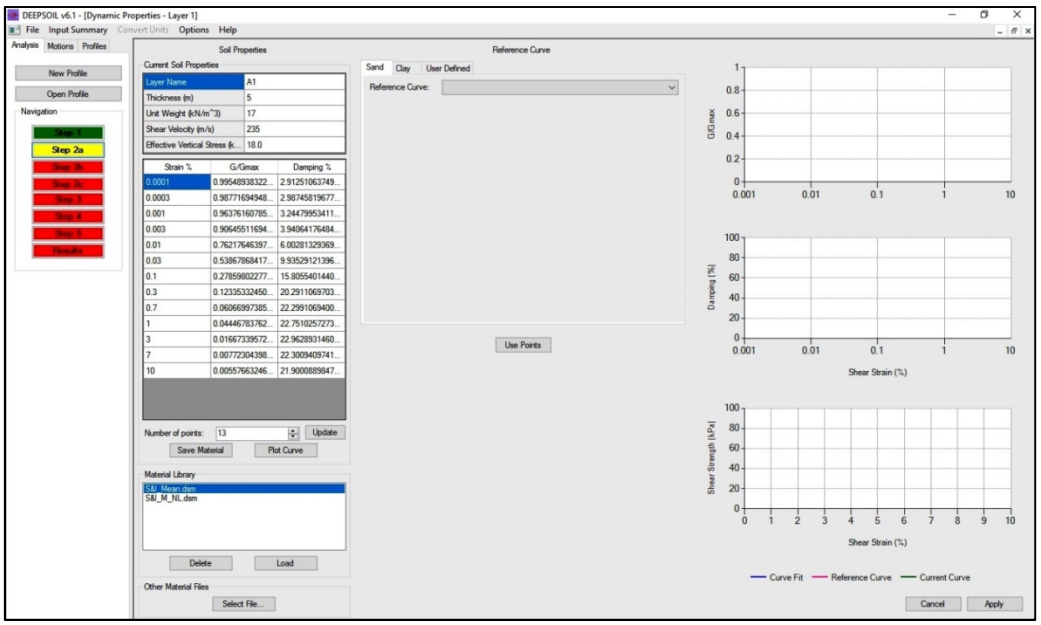
Şekil 5.8. Zemin profilinin tanımlanması

5.3.2.1. Zemin profili gösterimi

Zemin profiline ait toplan derinlik, doğal frekans ve doğal periyod bilgilerinin yer aldığı kısımdır.

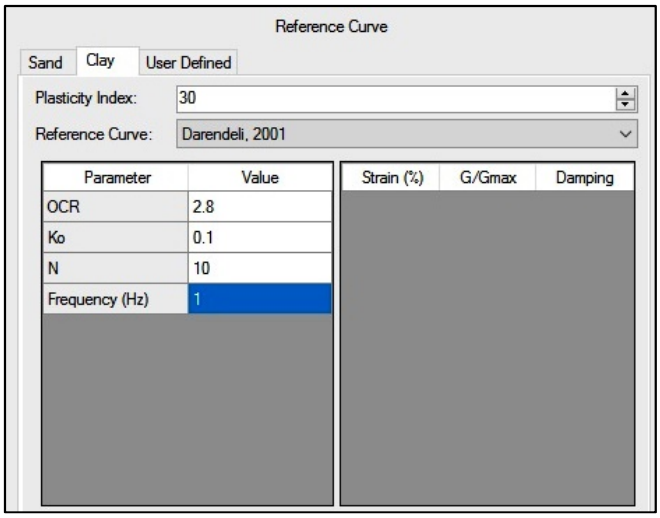
5.3.2.2. Zemin profili

Zemin profilini oluşturan tabakalara ait zemin eğrilerinin oluşturulabilmesi için "Material Properties" düğmesi kullanılmaktadır. Tabloda istenilen zemin tabakası seçildikten sonra "Material Properties" düğmesini tıklanarak veya tabaka üzerindeyken çift tıklanarak Şekil 5.9'daki "Material Properties" penceresi açılmaktadır. Zemin profili kısmında, ayrıca yeni bir tabaka eklemek için "Add Layer(s)" ve mevcut bir tabakayı silmek için "Remove Layer" düğmeleri yer almaktadır.



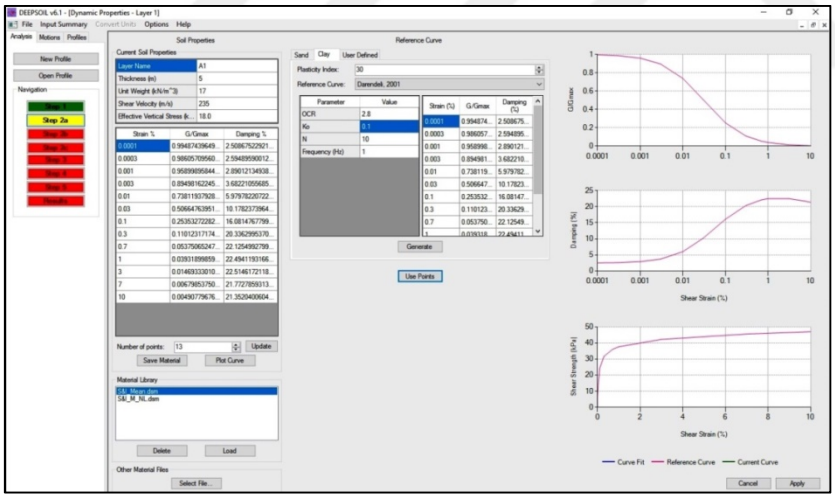
Şekil 5.9. Malzeme özelikleri penceresi

Seçilen zemin tabakasına ait modül azalım, sönümleme ve kayma mukavemeti eğrilerinin çizilebilmesi için öncelikle "Reference Curve" kısmından G/Gmax ve sönüm değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Kullanıcı "User Defined" sekmesinden G/Gmax ve sönüm değerlerini kendisi girebildiği gibi, "Sand" ve "Clay" sekmelerinde bulunan ve çeşitli araştırmacılar tarafından kum ve killer için önerilen modelleri de kullanabilmektedir. Örnek olması açısından; "A1" tabakasının kil olduğu kabul edilerek, bu tabaka için Darendeli (2001) modeli seçilmiş ve model tarafından tanımlanması istenilen parametre değerleri Şekil 5.10'da gösterildiği gibi programa girilmiştir.



Şekil 5.10. Parametre değerlerinin girilmesi

Daha sonra, önce "Generate" ardından "Use Points" düğmelerine tıklanarak Şekil 5.11'de gösterilen zemin eğrileri oluşturulmuştur. En son olarak, "Apply" düğmesine tıklanarak, oluşturulan zemin eğrileri analizde kullanılmak üzere tanımlanmıştır.



Şekil 5.11. Zemin eğrilerinin oluşturulması

5.3.2.3. Yer altı su seviyesi

Bu bölümde, "Top of Layer" kısmından seçilen tabaka numarasına göre, yer altı su seviyesinin hangi tabakadan itibaren başlayacağı belirlenebilmektedir. Eğer zemini oluşturan tabakalarının hepsi yer altı su seviyesinin üzerinde yer alıyorsa, bu durumda "No Water Table" seçeneği işaretlenmelidir.

5.3.2.4. Tablo lejantı

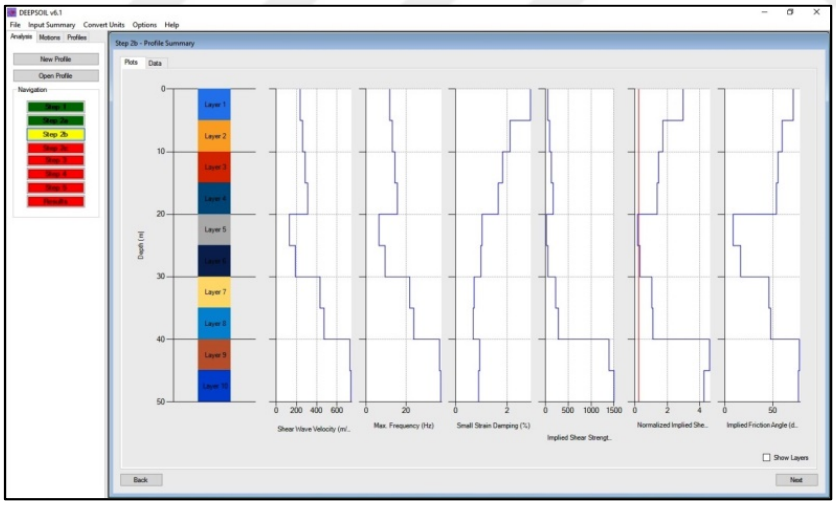
Tablo lejantında; yer altı su seviyesinin konumu, tabaka ve malzeme özellikleri farklı renkler ile gösterilmektedir.

5.3.2.5. Dönüştürme araçları

Dönüştürme araçları kullanılarak, analizin birinci aşamasında seçilmiş olan bir birim veya başlangıç dinamik parametresi değiştirilebilmektedir.

5.3.3. Profil özeti

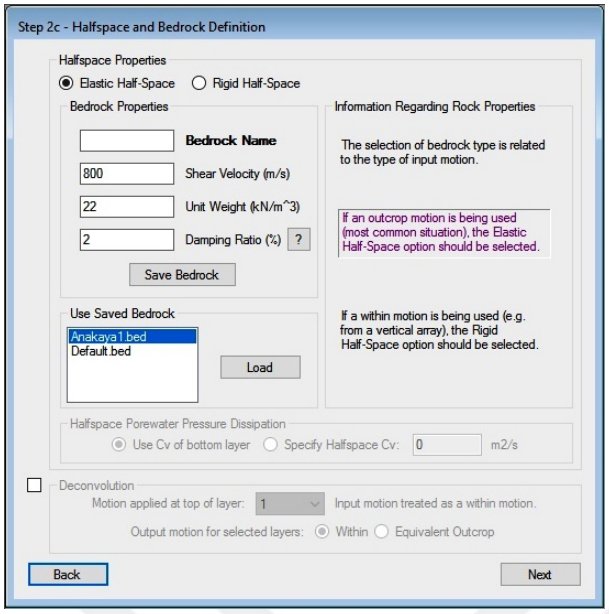
Bu analiz aşaması Şekil 5.12'de görüldüğü üzere, iki kısımdan oluşmaktadır. "Plots" kısmında; kayma dalgası hızı, maksimum frekans, yaklaşık kayma dayanımı gibi özelliklerin derinlikle değişimini gösteren grafikler yer alırken, "Data" kısmında bu grafiklere ait veriler bulunmaktadır.



Şekil 5.12. Profil özeti penceresi

5.3.4. Anakaya özelliklerinin tanımlanması

Zemin profilinin altında yer alan anakayanın özelliklerinin tanımlandığı aşamadır. Şekil 5.13 'te görüldüğü üzere altı kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 5.13. Anakaya özelliklerinin tanımlanması

5.3.4.1. Anakaya tipi

Elastik ve rijit olmak üzere iki tip anakaya modeli bulunmaktadır. Anakaya özelliklerinin (kayma dalgası hızı/kayma modülü, birim ağırlık ve sönüm oranı) mevcut olması durumunda anakaya elastik olarak modellenirken, bu özelliklerin mevcut olmaması durumunda ise rijit olarak modellenmektedir.

5.3.4.2. Anakaya özellikleri

Anakaya modelinin elastik olarak seçilmesi durumunda; kayma dalgası hızı (veya kayma modülü), birim ağırlık ve sönüm oranı değerlerinin ilgili alanlara girilmesi gerekmektedir. İstenildiği takdirde, girilen bu özellikler, "Bedrock Name" alanına bir anakaya ismi verildikten sonra "Save Bedrock" düğmesine tıklanarak kaydedilebilmektedir. Rijit model seçildiği takdirde, söz konusu alanlara veri girişine gerek olmamaktadır.

5.3.4.3. Anakaya özelliklerine dair bilgiler

Bu kısımda, anakaya tipinin seçimine yönelik özet bilgiler yer almaktadır.

5.3.4.4. Kaydedilen anakaya özelliklerinin kullanılması

Kaydedilmiş bir anakaya özelliğinin kullanılması için, listede yer alan anakaya ismi seçildikten sonra, “Load” düğmesine tıklanmaktadır.

5.3.4.5. Konsolidasyon katsayısının girilmesi

Aşırı boşluk suyunu basıncı oluşumu ve dağılması analizinde; zemin profilinin altından su geçmesinin istenmesi durumunda, konsolidasyon katsayısı ilgili alana girilebilmektedir. Konsolidasyon katsayısının girilmemesi durumunda, program en son zemin tabakasına ait konsolidasyon katsayısını kullanmaktadır.

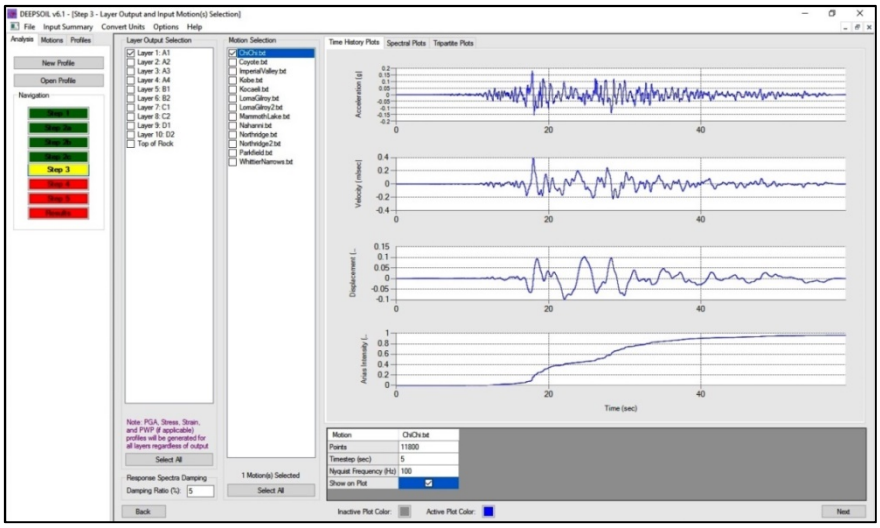
5.3.4.6. Dekonvolüsyon

Zemin yüzeyinde veya zemin kolonunun herhangi bir yerinde bilinen bir girdi hareketinden anakaya hareketini elde etmek için dekonvolüsyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Derinlik, kayma dalgası hızı (veya kayma modülü), birim ağırlık, sönüm oranı parametreleri her tabaka için programa girildikten sonra, açılır liste kutusundan bilinen girdi hareketinin uygulanacağı tabaka seçilmektedir. İstenilen anakaya hareketinin türü seçenek düğmeleri ile işaretlendikten sonra, diğer analiz adımlarına geçilmektedir.

Dekonvolüsyon, sadece frekans tanım alanında doğrusal ve eşdoğrusal analizlerde gerçekleştirilebilen bir işlemdir. Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler, dekonvolüsyon işlemi için uygun değildir (Hashash vd., 2016).

5.3.5. Zemin tabakalarının ve girdi hareketlerinin seçilmesi

Analizde kullanılacak girdi hareketlerinin ve çıktı hareketine ihtiyaç duyulan zemin tabakalarının seçildiği bu aşama, Şekil 5.14’teki ekran penceresinde üzere sekiz kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 5.14. Zemin tabakalarının ve girdi hareketlerinin seçilmesi

5.3.5.1. Çıktı hareketine ihtiyaç duyulan tabakalar

Çıktı hareketine ihtiyaç duyulan zemin tabakaları, pencerenin ilk sütununda yer alan uygun onay kutuları işaretlenerek seçilebilmektedir. Sütunun altında yer alan "Select All" düğmesine tıklanarak, bütün tabakalar seçilebilmekte ya da seçim kaldırılabilmektedir.

5.3.5.2. Tepki spektrumu sönümlemesi

Frekans alanında tepki spektrumunun hesaplanması için sönüm oranının girildiği kısımdır. Varsayılan sönüm oranı değeri % 5'tir.

5.3.5.3. Hareketin seçimi

İkinci sütunda yer alan uygun onay kutuları işaretlenerek analizde kullanılacak olan girdi hareketleri seçilebilmektedir. Sütunun altında yer alan "Select All" düğmesine tıklanarak, bütün girdi hareketleri seçilebilmekte ya da seçim kaldırılabilmektedir.

5.3.5.4. Zaman tanımlı grafikler

İvme, hız, yer değiştirme ve Arias yoğunluğu değerlerinin zamana bağlı değişimini gösteren grafiklerin yer aldığı kısımdır.

5.3.5.5. Spektral grafikler

Girilen sönüm oranı değerine göre sönümlenmiş spektral ivmenin periyoda bağlı değişimini ve fourier genliğinin frekansa bağlı değişimini gösteren grafiklerin yer aldığı kısımdır.

5.3.5.6. Üç taraflı grafikler

Gerçek olmayan spektral hız ile periyod ilişkisini ivme ve deplasmana bağlı olarak gösteren grafiklerin yer aldığı kısımdır.

5.3.5.7. Bilgi tablosu

Grafiklerin altında yer alan bilgi tablosunda, grafikleri oluşturan girdi hareketinin bazı özellikleri bulunmaktadır. Bilgi tablosu kullanılarak, grafiklerde görüntülenecek hareketlerin kontrolü yapılabilmektedir.

5.3.5.8. Grafiklerin rengi

Bilgi tablosunun altında yer alan düğmeler yardımı ile aktif ve aktif olmayan grafiklerin renkleri değiştirilebilmektedir.

5.3.6. Viskoz sönümleme formülasyonunun seçilmesi

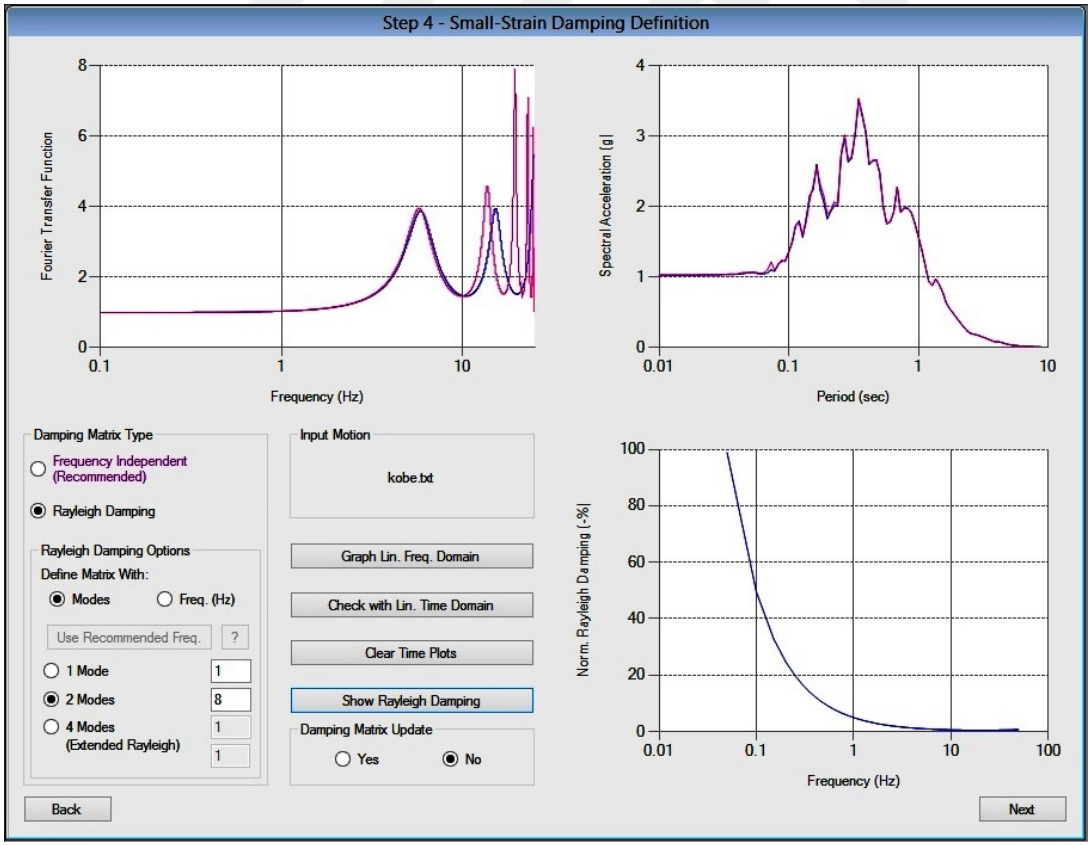
Doğrusal olmayan bir hiperbolik zemin modelinde sönümleme, histerik yükleme-boşaltma döngüleri yoluyla tanımlanmaktadır. Bu modelde, zemin özelliklerine bağlı olarak % 10^{-4}-10^{-2}'den daha büyük birim deformasyonlarda sönüm yansıtabilmektedir. Bununla birlikte; hiperbolik model, küçük birim deformasyonlarda (% 10^{-4}-10^{-2}'den daha düşük) neredeyse doğrusal bir davranış göstermekte ve hemen hemen hiç sönüm oluşmamaktadır. Bu durum, dalga yayılımı sırasında gerçekçi olmayan rezonansa neden olabilmektedir.

Küçük birim deformasyon içeren analizlerde sönümlenmenin yansıtılabilmesi ve gerçekçi olmayan rezonansın önlenmesi maksadıyla, hareket denklemine bir viskoz sönümleme matrisi [C] eklenmektedir (Hashash ve Park, 2002). Rayleigh ve Lindsay (1945) tarafından önerilen viskoz sönümleme formülasyonunda viskoz sönümleme matrisi [C], Eşitlik 5.15 ile ifade edilmektedir.

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \tag{5.15}$$

Burada; [C] viskoz sönümleme matrisi, [M] kütle matrisi, [K] rijitlik matrisi, a_0 ve a_1 ise Rayleigh sönüm katsayılarıdır.

Analizin bu aşamasında, doğrusal zaman alanlı çözüm ile doğrusal frekans alanlı çözümler karşılaştırılarak, uygun Rayleigh sönüm katsayılarının seçimi sağlanmaktadır. Bu aşama, Şekil 5.15'te gösterildiği üzere sekiz kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 5.15. Küçük birim deformasyonda sönümlemenin tanımlanması (Hashash vd., 2016)

5.3.6.1. Sönümleme matrisi tipi

Sönümleme matrisinin kullanıldığı iki tür viskoz sönümleme formülasyonu bulunmaktadır. Frekanstan Bağımsız Sönümleme Formülasyonu, herhangi bir mod veya frekans özelliklerine ihtiyaç duymaksızın, sönümleme matrisinin özdeğerlerini ve öz vektörlerini çözmektedir. Bu formülasyon, gerek Rayleigh Sönümlemesinin kısıtlamalarını ortadan kaldırması gerekse analiz süresini önemli ölçüde arttırmaması nedeniyle, daha çok tercih edilmektedir. Rayleigh Sönümlemesinde ise, viskoz sönümlemeyi tanımlamak için mod veya frekans özelliklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

5.3.6.2. Rayleigh sönümleme seçenekleri

Bu kısımda, Rayleigh sönümleme formülasyonu için gerekli mod veya frekanslar seçilmektedir. Üç çeşit Rayleigh sönümleme formülasyonu bulunmaktadır. Basitleştirilmiş formülasyonda 1 mod/frekans, tam formülasyonda 2 mod/frekans ve genişletilmiş formülasyonda 4 mod kullanılmaktadır. Varsayılan olarak 2 mod/frekans seçilmektedir.

5.3.6.3. Girdi hareketi

Analizde kullanılmak üzere bir önceki aşamada seçilen girdi hareketi gösterilmektedir.

5.3.6.4. Doğrusal frekans alanı grafiğinin çizilmesi

Doğrusal frekans alanında oluşturulan grafiklerin sonuçlarını göstermek için “Graph Lin. Freq. Domain” düğmesi kullanılmaktadır. Bu düğmeye tıklandıktan sonra, Frekans oranı ve Frekans ve Tepki spektrumu grafikleri mavi renkle gösterilmektedir.

5.3.6.5. Doğrusal zaman alanı ile kontrol yapılması

İstenilen mod veya frekans değerlerinin girilmesinin ardından, "Check with Lin. Time Domain" düğmesi kullanılarak, sonuçlar frekans alanı çözümü ile aynı pencerede pembe renkli eğriler halinde görüntülenmektedir. Doğrusal frekans alanı çözümüyle en iyi uyuşan modlar/frekanslar, bu tekrarlayıcı işlemler uygulanarak deneme yanılma yöntemi ile seçilmektedir.

5.3.6.6. Doğrusal zaman alanı grafiğinin silinmesi

Doğrusal zaman alanı ile kontrol yapılması için çizilen grafik "Clear Time Plots" düğmesi kullanılarak silinebilmektedir.

5.3.6.7. Rayleigh sönüm eğrisinin çizilmesi

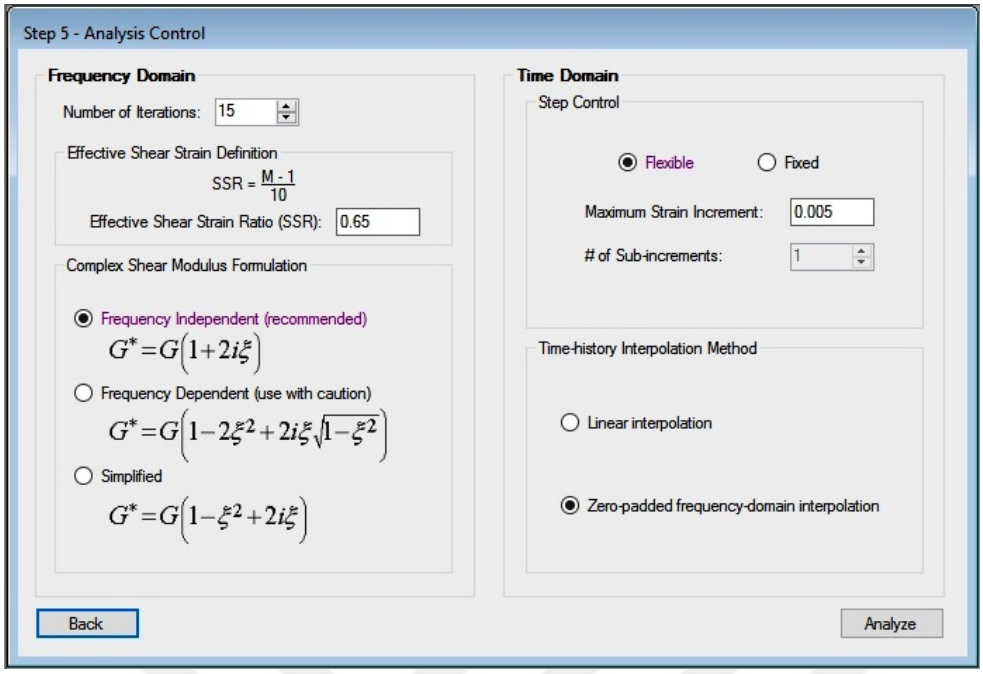
Rayleigh sönümleme fonksiyonu kullanılarak çizilen viskoz sönüm eğrisi, "Show Rayleigh Damping" düğmesine tıklanarak pencerenin sağ alt tarafında görüntülenmektedir.

5.3.6.8. Sönümleme matrisinin güncellenmesi

Bu kısım sadece doğrusal olmayan analizlerde gerçekleştirilmektedir. Doğrusal zaman alanı ile kontrol yapılması aşamasında zemin profilinin doğal modlarına karşılık gelen zemin rijitliği ve frekanslar her zaman adımda değişmektedir. Sönümleme matrisinin güncellenmesi kısmındaki "Yes" düğmesinin seçilmesi durumunda; seçilen doğal modlar, rijitlikteki değişikliği formülasyona eklemek için her zaman adımında yeniden hesaplanarak sönümleme matrisi güncellenmektedir.

5.3.7. Analiz kontrol parametreleri

Bu analiz aşamasında, frekans alanı ve zaman alanı analizlerinde kullanılacak kontrol parametreleri seçenekleri yer almaktadır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Frekans ve zaman alanı analizleri için kontrol parametreleri

5.3.7.1. Frekans alanı analizi

Eşdeğer doğrusal analizde gerçekleştirilecek yineleme/tekrar sayısı, "Number of İterations" kısmından belirlenebilmektedir. Varsayılan yineleme değeri 15'tir. Doğru sonuçlar elde edebilmek için bu değerin 10'dan az seçilmemesi tavsiye edilmektedir.

Eşdeğer doğrusal bir analizde, kayma modülünün ve sönüm oranının yinelemeli prosedüre (iterasyona) dayalı tahminlerinde efektif kayma birim deformasyonu (SSR) kullanılmaktadır. Bu değer, "Effective Shear Strain Ratio (SSR)" kısmından ayarlanabilmektedir. Varsayılan ve önerilen değer 0,65'tir. Efektif kayma birim deformasyonu (SSR), deprem büyüklüğüne (M) bağlı olarak Eşitlik 5.16 ile ifade edilmektedir.

$$SSR = (M-1)/10 \qquad (5.16)$$

Frekans alanı analizinde, frekanstan bağımsız, frekansa bağımlı ve basitleştirilmiş olmak üzere üç tür kompleks kayma modülü kullanılmaktadır. Bunlar arasında; frekanstan bağımsız kompleks kayma modülü, frekanstan bağımsız bir sönümleme meydana getirmesi nedeniyle, analizlerde kullanılması tavsiye edilmektedir.

5.3.7.2. Zaman alanı analizi

Zaman alanı analizlerde doğru sonuçlar elde edilebilmesi, seçilen zaman adım değerlerine bağlıdır. "Flexible" ve "Fixed" olmak üzere iki tür zaman adımı seçeneği bulunmaktadır.

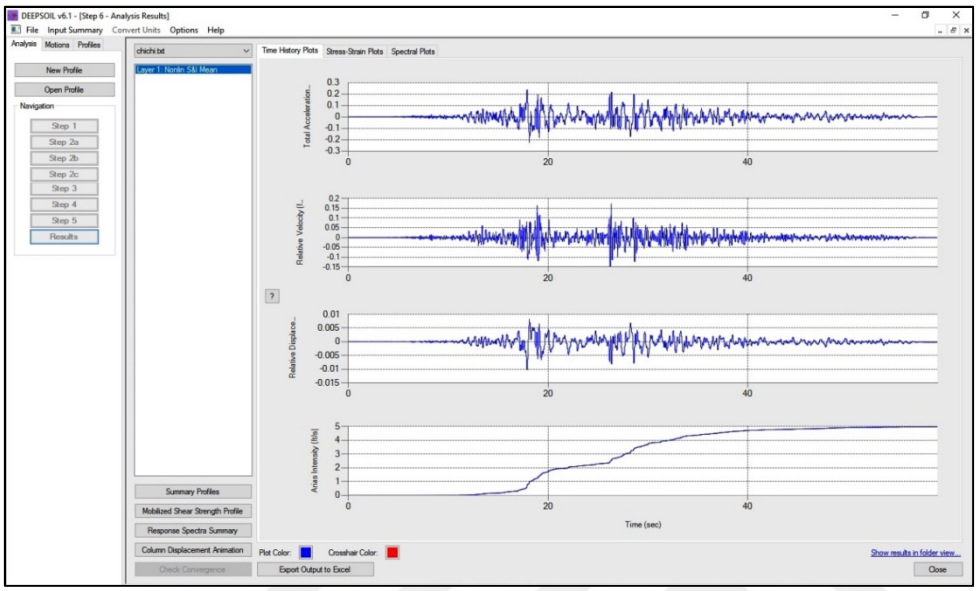
Zeminde hesaplanan birim deformasyonların belirlenmiş bir maksimumum birim deformasyonu aşması durumunda, "Flexible" seçeneği kullanılarak zaman artışı alt bölümlere ayrılmaktadır. Varsayılan maksimum birim deformasyon artış değeri 0,005'tir. "Fixed" seçeneğinin seçilmesi durumunda ise, tüm zaman adımları kullanıcı tarafından "of Sub-increments" kısmında tanımlanan sayıda alt artışlarla alt bölümlere ayırılmaktadır.

Zaman alanı analizlerde, bir zaman adımının alt bölümlere ayrılması sırasında, ivmelerin ara noktalarda hesaplanması gerekmektedir. Sadece "Flexible" seçeneği seçili iken gerçekleştirilen bu işlem için iki tür enterpolasyon yöntemi kullanılmaktadır. "Linear İnterpolation" seçeneği, ivmenin değişiminin basitçe eşit artışlara bölündüğü enterpolasyon yöntemidir. "Zero-padded frequency-domain interpolation" seçeneğinin seçilmesi durumunda ise çıktı hareketinde bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu yüzden, bu enterpolasyon yöntemi ile elde edilen sonuçların "Linear İnterpolation" yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması gerekmektedir (Hashash vd., 2016).

5.3.8. Analiz sonuçları

Analizin tamamlanmasının ardından, Şekil 5.17'de gösterilen pencerede yer alan sütundaki seçilen her bir zemin tabakasının çıktı hareketine ait zaman tanımlı çizimler, gerilme-birim deformasyon çizimleri ve spektral çizimler ekranda görüntülenecektir. Çizimlerin altında yer alan "Plot Color" ve "Crosshair Color" düğmeleri kullanılarak çizimlerin renkleri isteğe göre değiştirilebilmektedir.

Bunun yanı sıra; “Show results in folder view” düğmesi tıklanarak, çalışma klasörüne kaydedilmiş olan analiz sonuçları görüntülenebildiği gibi, “Export Output to Excel” düğmesi kullanılarak, analiz sonuçları excel dosyasına aktarılabilmektedir.



Şekil 5.17. Analiz sonuçları penceresi

5.3.8.1. Özet profiller

Analiz sonuçları penceresinin sol alt tarafında bulunan “Summary Profiles” düğmesine tıklanarak, her zemin tabakasına ait PGA, maksimum birim deformasyon ve maksimum kayma gerilme oranının derinliğe göre değişimleri gösteren grafikler görüntülenmektedir. PGA, her zemin tabakasının üst noktasında hesaplanırken, diğer tüm değerler zemin tabakasının orta noktasında hesaplanmaktadır. Boşluk suyu basıncının oluşumu ile ilgili bir analiz yapılması durumunda, bu pencerede ayrıca her tabaka için aşırı boşluk suyu basıncı oranı da gösterilmektedir (Hashash vd, 2016).

5.3.8.2. Mobilize edilmiş mukavemet profili

Mobilize ve normalize edilmiş kayma mukavemeti ile sürtünme açısının derinliğe bağlı olarak değişimlerini gösteren grafikleri görüntülemek için “Mobilized Shear Strenght Profile” düğmesi kullanılmaktadır.

5.3.8.3. Tepki spektrumu özeti

Seçilen tabakalar için analiz sonucunda hesaplanan yüzey ivmesi (PSA) ile anakaya girdi hareketine ait ivme grafikleri “Response Spectra Summary” düğmesine tıklanarak görüntülenmektedir.

5.3.8.4. Deplasman profili ve animasyon

Zemin profilinin, uygulanan girdi hareketi etkisiyle belirli bir zaman içerisinde yaptığı yer değiştirme hareketi, “Column Displacement Animation” düğmesi yardımı ile animasyon şeklinde gösterilmektedir.

5.3.8.5. Yakınsamanın kontrolü

Bu kısımda; eşdeğer doğrusal analizde gerçekleştirilen iterasyon işlemi sırasında, yapılan hesaplamaların maksimum gerilime yaklaşıp yaklaşmadığının kontrolü yapılmaktadır. Her iterasyon için çizilen maksimum gerilme profilleri “Check Convergence” düğmesine tıklanarak görüntülenmektedir.

5.3.8.6. Girdi parametreleri özeti

Analizde kullanılan girdi parametrelerinin gözden geçirilmesi için analiz sonuçları penceresinin üst kısmında yer alan “Input Summary” menüsü kullanılmaktadır. Bu menüde yer alan sekmeler, sadece ilgili parametreler girildikten sonra görülmektedir. Sekmelerdeki girdi parametreleri “Save” düğmesi kullanılarak text dosyası şeklinde kaydedilebilmektedir.

6. MATERYAL VE YÖNTEM

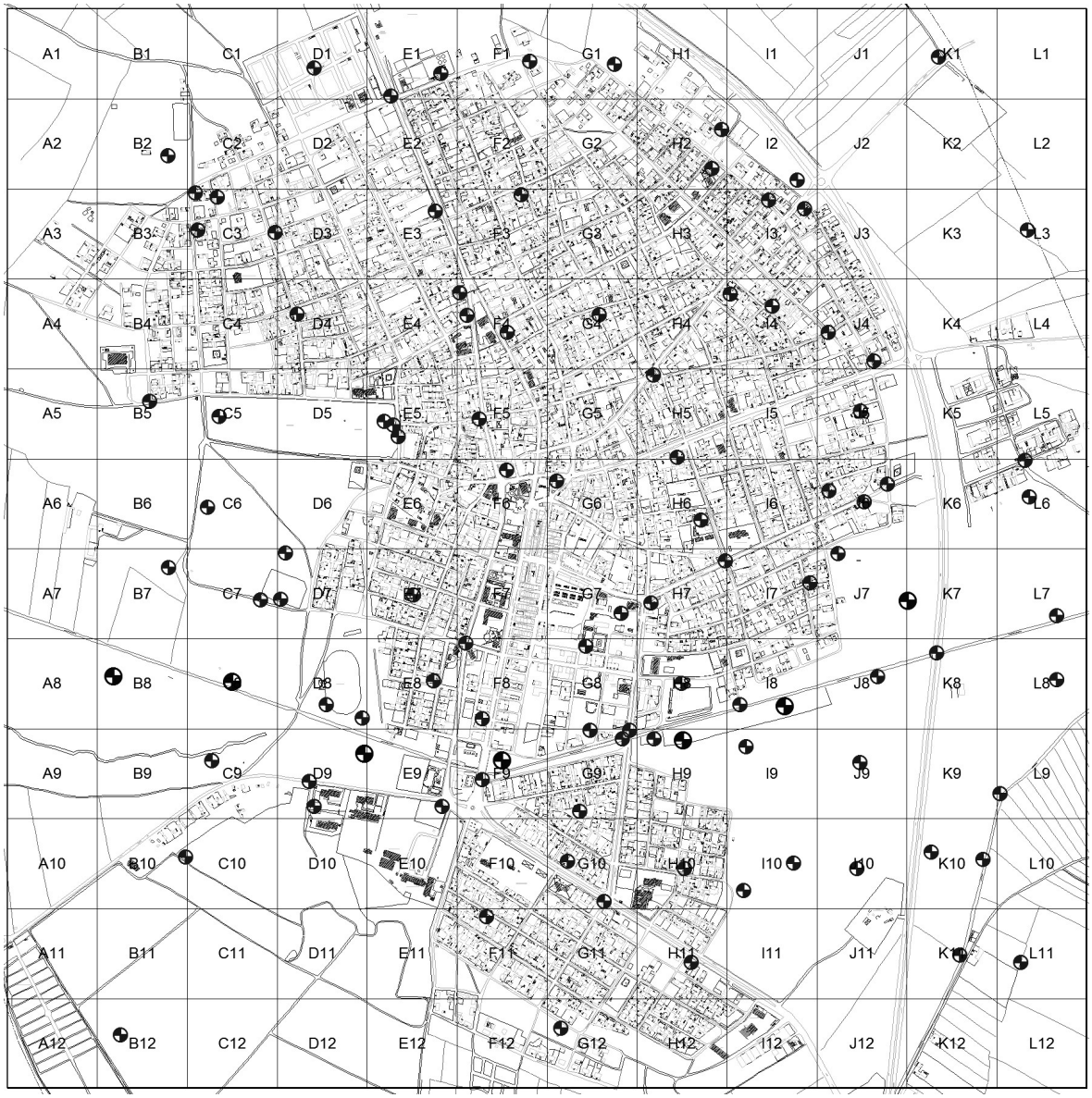
6.1. Materyal

6.1.1. Geoteknik veriler

Bu çalışmada incelenen alan, Eskişehir ilinin 70 kilometre güneydoğusunda yer alan Çifteler ilçesi olup, söz konusu inceleme alanını oluşturan geoteknik veriler, Çifteler Belediyesi için hazırlanan Jeolojik ve Jeoteknik Etüt raporundan ve Savaş vd. (2012) tarafından yapılan arazi ve laboratuar deney sonuçlarından elde edilmiştir. Bu zemin etüt raporunda, derinlikleri 7-14 metre arasında değişen 46 adet sondaj çalışması ve bu çalışmalara ait 195 adet SPT deneyi, 214 adet elek analizi ve 182 adet kıvam limitleri deney çalışmaları bulunmaktadır. Bu deney sonuçları incelendiğinde, birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre zeminlerin % 47'sinin ML, MH, CL, CH sınıfındaki kil ve silt zeminlerden, % 48'sinin SC, SM sınıfındaki kumlardan ve % 5'inin çakılların oluşturduğu görülmektedir. İnceleme alanı, Şekil 6.1'de gösterildiği üzere 250x250 m ölçülerinde 144 hücreye ayrılmış olup, sıvılaşabilir özellikteki zeminlerden oluştuğu değerlendirilen 18 adet hücre için temsili zemin profilleri oluşturulması maksadıyla, arazi ve laboratuvar çalışmaları sonucu elde edilmiş olan Çizelge 6.1'deki geoteknik veriler kullanılmıştır.

6.1.2. Zemin dinamik davranış analiz programı

Zemin dinamik davranış analizlerinin gerçekleştirilmesi için, Illinois Üniversitesi'nde görev yapan Prof. Youssef M.A. Hashash başkanlığında, birçok lisans ve lisansüstü öğrencilerinin çalışmaları sonucunda geliştirilen DEEPSOİL programı kullanılmıştır. DEEPSOİL programı ile frekans tanım alanında bir boyutlu doğrusal ve eşdeğer doğrusal analiz yapılabildiği gibi, aynı zaman da zaman tanım alanında doğrusal ve doğrusal olmayan zemin dinamik davranış analizleri de yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra, programın içeriğinde yer alan mevcut bünye modelleri sayesinde, deprem esnasında oluşan boşluk suyu basıncı artışları modellenebilmekte ve sıvılaşma analizi gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 6.1. İnceleme alanını oluşturan 250x250 m boyutlarındaki hücreler (Savaş vd., 2012)

6.1.3. Sıvılaşma analiz yöntemleri

Bu çalışmada, sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesi için nümerik analiz yöntemi ile birlikte basitleştirilmiş yöntem kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucu geliştirilen bünye modelleri sayesinde, zemin tabakalarının dinamik özellikleri de göz önünde bulundurularak, sıvılaşmanın bilgisayar ortamında nümerik olarak modellenmesi sağlanmıştır. Daha sonra nümerik analiz sonucu elde edilen maksimum yüzey ivme değerleri ve basitleştirilmiş yöntem kullanılarak, her bir zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı ile sıvılaşma potansiyeli indeksi değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 6.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulmasında kullanılan geoteknik veriler

S. No.	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N	Wn (%)	4.75mm (%)	0.75mm (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL	PL	PI	Zemin Sınıfı	Gs (g/cm^3)
1	G6	SK25	1,70	4,40	22	12,60	98,00	33,80	33,80	0,00	37,00	28,30	8,70	SM	2,63
			3,20	4,40	26	13,40	49,60	29,00	20,90	8,10				GM	2,63
			5,20	4,40	27	15,10	49,60	29,00	20,90	8,10				GM	2,69
			7,70	4,40	39	57,80	93,00	53,80	36,40	17,40	47,00	25,10	21,90	CL	2,69
2	B7	SK3	1,70	1,50	22	48,00	99,70	95,90	29,30	66,60	73,50	37,00	36,50	MH	2,53
			3,20	1,50	26	66,90	99,70	95,90	29,30	66,60	73,50	37,00	36,50	MH	2,53
			6,20	1,50	34	16,30	48,70	13,70	13,70	0,00				GM-GC	2,63
			7,70	1,50	38	29,40	48,70	13,70	13,70	0,00				GM-GC	2,63
3	D7	SK6	1,70	1,50	7	40,30	86,30	46,80	43,20	3,60	32,50	12,80	19,70	CL	2,54
			3,20	1,50	12	25,90	74,70	41,60	25,70	15,90				SM	2,72
			6,20	1,50	38	15,60	74,70	41,60	25,70	15,90				SM	2,72
			9,20	1,50	38	14,90	78,90	15,70	15,70	0,00	30,60	19,00	11,60	SM	2,56
4	G7	SK50	1,70	1,50	17	52,70	99,40	87,20	65,20	22,00	80,00	44,50	35,50	MH	2,62
			3,20	1,50	12	78,60	98,40	80,60	35,60	45,00	76,00	52,00	24,00	MH	2,58
			5,20	1,50	17	78,60	98,40	80,60	35,60	45,00	76,00	52,00	24,00	MH	2,58
			7,20	1,50	43	78,60	98,00	80,60	35,60	45,00	76,00	52,00	24,00	MH	2,58
5	H7	SK31	2,30	1,50	18	51,20	99,70	93,90	29,40	64,50	79,00	43,20	35,80	MH	2,55
			4,30	1,50	26	51,00	99,70	93,90	29,40	64,50	79,00	43,20	35,80	MH	2,55
			8,80	1,50	19	64,90	99,70	93,90	29,40	64,50	79,00	43,20	35,80	MH	2,55
			10,70	1,50	24	18,00	83,30	27,50	27,50	0,00	18,00	7,30	10,70	SC	2,60

Çizelge 6.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulmasında kullanılan geoteknik veriler (devam)

S. No.	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N	Wn (%)	4.75mm (%)	0.75mm (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL	PL	PI	Zemin Sınıfı	Gs (g/cm^3)
6	I7	SK40	2,40	1,50	6	26,30	83,60	9,20	9,20	0,00	31,80	21,90	9,90	SW	2,53
			4,20	1,50	10	16,30	83,60	9,20	9,20	0,00	19,00	14,40	4,60	SW	2,53
			6,20	1,50	39	32,40	94,90	61,30	48,90	12,40	31,20	19,00	12,20	CL	2,49
			7,90	1,50	46	29,80	94,90	61,30	48,90	12,40	31,20	19,00	12,20	CL	2,49
			9,70	1,50	48	21,80	75,00	38,90	38,90	0,00	37,20	26,50	10,70	SM	2,60
			10,70	1,50	46	25,40	94,90	61,30	48,90	12,40	31,20	19,00	12,20	CL	2,49
7	D8	DSK15	1,90	2,50	29	55,00	99,00	49,00			83,00	34,00	49,00	CH-MH	2,70
			3,50	2,50	9	71,00	100,00	76,00			83,00	34,00	49,00	CH-MH	2,70
			4,90	2,50	9	36,00	86,00	21,00			73,00	33,00	40,00	SC-SM	2,65
			12,40	2,50	44	17,00	89,00	26,00			61,00	28,00	33,00	SC-SM	2,65
8	E8	SK16	1,70	1,50	11	44,50	98,40	81,00	31,20	49,80	63,70	35,90	27,80	MH	2,65
			3,20	1,50	43	36,00	100,00	87,20	15,70	71,50	68,30	27,60	40,70	CH	2,66
			7,20	1,50	24	23,40	100,00	23,40	23,40	0,00				SM	2,58
			10,20	1,50	48	19,30	94,70	15,90	15,90	0,00				SM	2,55
9	F8	SK15	1,70	2,50	12	22,30	84,90	50,00	46,90	3,10	48,20	32,40	15,80	SM	2,58
			3,20	2,50	23	21,40	84,90	50,00	46,90	3,10	48,20	32,40	15,80	SM	2,58
			5,20	2,50	34	24,00	84,90	50,00	46,90	3,10	48,20	32,40	15,80	SM	2,58
			7,10	2,50	37	4,10	82,80	9,40	9,40	0,00				SW	2,66
			10,10	2,50	43	14,70	76,00	31,00	31,00	0,00	41,40	28,80	12,60	SM	2,60
			12,00	2,50	42	7,40	82,80	9,40	9,40	0,00				SW	2,55
			13,80	2,50	34	8,60	82,80	9,40	9,40	0,00				SW	2,55

Çizelge 6.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulmasında kullanılan geoteknik veriler (devam)

S. No.	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N	Wn (%)	4.75mm (%)	0.75mm (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL	PL	PI	Zemin Sınıfı	Gs (g/cm^3)
10	G8	SK26	2,20	1,50	16	30,90	95,50	44,80	40,60	4,20	36,00	21,20	14,80	SC	2,63
			4,20	1,50	22	57,40	100,00	87,40	53,00	34,40	72,20	50,50	21,70	MH	2,63
			6,20	1,50	22	48,10	95,50	75,80	36,00	39,80	57,00	42,70	14,30	MH	2,63
			7,60	1,50	36	12,10	59,30	13,60	13,60	0,00	14,50	10,30	4,20	SM	2,63
			10,60	1,50	40	48,80	95,50	75,80	36,00	39,80	57,00	42,70	14,30	MH	2,63
			12,20	1,50	44	36,60	95,50	75,80	36,00	39,80	57,00	42,70	14,30	MH	2,63
11	L8	SK54	1,70	1,50	16	41,70	100,00	97,00	36,60	60,40	47,80	26,30	21,50	CL-ML	2,59
			3,20	1,50	20	36,40	100,00	78,20	36,60	41,60	60,60	22,50	38,10	CH	2,67
			5,20	1,50	12	19,70	80,10	12,90	12,90	0,00				SW	2,61
			7,20	1,50	16	14,40	80,10	12,90	12,90	0,00				SW	2,61
12	C9	SK2	1,70	1,50	8	31,40	97,40	45,40	31,80	13,60	38,50	20,50	18,00	SC	2,59
			3,20	1,50	11	20,20	99,60	66,10	58,70	7,40	34,50	17,90	16,60	CL	2,63
			5,20	1,50	18	27,80	99,60	66,10	58,70	7,40	34,50	17,90	16,60	CL	2,63
			7,20	1,50	19	17,70	82,90	14,80	14,80	0,00				SM	2,54
			10,00	1,50	31	3,80	50,60	4,50	4,50	0,00				GW	2,64
13	H9	SK30	1,70	0,40	8	65,00	100,00	63,40	21,10	42,30	50,00	31,90	18,10	MH	2,45
			3,20	0,40	27	18,30	59,70	20,70	20,70	0,00	36,00	9,40	26,60	SC	2,54
			4,70	0,40	27	12,20	70,80	7,20	7,20	0,00				SW	2,58
			8,20	0,40	24	11,90	74,70	38,10	38,10	0,00	22,20	14,80	7,40	SC	2,53
			12,20	0,40	41	15,30	85,40	33,00	33,00	0,00	22,20	14,80	7,40	SC	2,59
14	I9	SK38	2,40	0,30	10	36,00	88,90	35,90	12,70	23,20	41,90	22,30	19,60	SC	2,55
			4,20	0,30	16	38,40	88,90	35,90	12,70	23,20	41,90	22,30	19,60	SC	2,55
			6,20	0,30	22	44,90	70,50	22,30	22,30	0,00	55,00	25,70	29,30	SC	2,63
			8,20	0,30	13	36,80	70,50	22,30	22,30	0,00	55,00	25,70	29,30	SC	2,63
			10,20	0,30	17	75,20	66,80	20,20	20,20	0,00	64,80	45,90	18,90	SM	2,55

Çizelge 6.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulmasında kullanılan geoteknik veriler (devam)

S. No.	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N	Wn (%)	4.75mm (%)	0.75mm (%)	Silt (%)	Kil (%)	LL	PL	PI	Zemin Sınıfı	Gs (g/cm^3)
15	H10	SK29	1,70	0,50	14	39,10	100,00	57,00	29,00	28,00	43,00	29,00	14,00	ML	2,60
			3,20	0,50	10	36,20	86,80	34,00	34,00	0,00	40,80	24,90	15,90	CL	2,52
			6,20	0,50	27	25,90	96,70	19,00	19,00	0,00	32,60	24,00	8,60	SM	2,63
			7,70	0,50	43	20,20	79,40	21,60	21,60	0,00	36,50	25,30	11,20	SM	2,55
16	I10	SK39	2,40	1,00	25	18,80	55,60	14,90	14,90	0,00	24,00	12,80	11,20	SC	2,58
			4,20	1,00	26	14,10	85,20	12,60	12,60	0,00	19,00	14,40	4,60	SC	2,69
			6,20	1,00	26	13,40	85,20	12,60	12,60	0,00	19,00	14,40	4,60	SC	2,69
			7,70	1,00	34	8,40	84,40	15,30	15,30	0,00	13,50	10,70	2,80	SC	2,65
			10,20	1,00	41	11,20	84,40	15,30	15,30	0,00	13,50	10,70	2,80	SC	2,65
17	J10	DSK6	2,40	3,20	11	26,00	100,00	64,00			83,00	34,00	49,00	CH-MH	2,70
			3,90	3,20	5	17,00	88,00	27,00			44,00	24,00	20,00	SC-SM	2,65
			5,40	3,20	10	32,00	95,00	52,00			43,00	15,00	28,00	SC-SM	2,70
			9,90	3,20	10	70,00	94,00	49,00						GC-GM	2,65
18	K10	SK55	1,70	1,50	16	50,50	100,00	96,20	32,90	63,30	51,20	24,90	26,30	CH	2,62
			3,20	1,50	17	36,20	100,00	96,20	32,90	63,30	51,20	24,90	26,30	CH	2,62
			5,20	1,50	22	33,40	97,20	92,20	92,20	0,00	49,70	31,80	17,90	ML	2,59
			7,50	1,50	30	20,20	94,60	16,10	16,10	0,00	22,10	14,90	7,20	SM	2,64
			10,20	1,50	36	16,90	79,60	21,80	21,80	0,00				SM	2,63

6.2. Yöntem

6.2.1. Temsili zemin profillerinin oluşturulması

Bir boyutlu zemin dinamik davranış analizi için ilk adım analizlerde kullanılacak olan temsili zemin profillerinin oluşturulmasıdır. Bu tür analizlerde, temsili zemin profilleri oluştururken, zemin tabakalarının ve anakaya yüzeyinin yatay yönde sonsuz uzanımlı olduğu kabul edilmektedir. Bu kabule dayanılarak yapılan geoteknik modellemede, her bir zemin tabakası; tabaka kalınlığı, birim hacim ağırlığı ve kayma dalga hızının yanı sıra, kayma modülü ve sönüm oranlarının kayma deformasyonuna bağlı olarak değişimini gösteren kayma modülü azalım eğrileri ve sönüm eğrileri ile karakterize edilmektedir.

Bu çalışmada; Çifteler Belediyesi için hazırlanan Jeolojik ve Jeoteknik Etüt raporundan ve Savaş vd. (2012) tarafından yapılan arazi ve laboratuar deneyi sonuçlarından elde edilmiş olan Çizelge 6.1'deki geoteknik veriler kullanılarak, seçilen hücreler için Çizelge 6.2'de sunulan temsili zemin profilleri oluşturulmuştur. Temsili zemin profillerinde yer alan kayma dalgası hızları, SPT-N sayılarına dayalı olarak İyisan (1996) tarafından önerilen ve tüm zemin tipleri için geçerli olan Eşitlik 6.1'deki ampirik bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = 51.5\ N^{0.516} \qquad (m/s) \qquad (6.1)$$

Bu bağıntıda; V, m/s cinsinden kayma dalgası hızı ve N, SPT vuruş sayısıdır.

Temsili zemin profillerinin oluşturulması aşamasında, analizlerde uygulanacak dinamik davranış modellerini belirlemek maksadıyla, daha önce Yağcı (2005) tarafından yapılan çalışmada uygulanan yaklaşımdan yararlanılmıştır. Kil-silt oranının % 30'un üstünde olduğu zeminlerin kil olarak tanımlandığı ve plastisite indislerine göre gruplandırıldığı bu yaklaşıma dayalı olarak, çalışma kapsamında kullanılan zemin grupları ve seçilen dinamik davranış modelleri Çizelge 6.3'de verilmiştir. Bunun yanı sıra, çalışma kapsamında gerçekleştirilen bir boyutlu doğrusal olmayan dinamik davranış analizlerinde kullanılan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri ise Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.2. Dinamik davranış analizlerinde kullanılan temsili zemin profilleri

S.No.	Hücre No.	Sondaj No.	Kalınlık (m)	YASS (m)	γ (kN/m^3)	V_S (m/s)
1	G6	SK25	1,70	4,40	21,82	253,80
			1,50		21,63	276,65
			2,00		21,60	282,09
			2,50		16,30	341,03
2	B7	SK3	1,70	1,50	16,59	253,80
			1,50		15,38	276,65
			3,00		21,00	317,72
			1,50		18,83	336,49
3	D7	SK6	1,70	1,50	17,28	140,57
			1,50		19,71	185,64
			3,00		21,66	336,49
			3,00		20,89	336,49
4	G7	SK50	1,70	1,50	16,49	222,19
			1,50		14,93	185,64
			2,00		14,93	222,19
			2,00		14,93	358,66
5	H7	SK31	2,30	1,50	16,41	228,84
			2,00		16,42	276,65
			4,50		15,54	235,31
			1,90		20,50	265,46
6	I7	SK40	2,40	1,50	18,82	129,82
			1,80		20,44	168,97
			2,00		17,90	341,03
			1,70		18,20	371,36
			1,80		19,83	379,60
			1,00		18,76	371,36
7	D8	DSK15	1,90	2,50	16,52	292,69
			1,60		15,53	160,03
			1,40		18,09	160,03
			7,50		20,97	362,93
8	E8	SK16	1,70	1,50	17,24	177,49
			1,50		18,13	358,66
			4,00		19,47	265,46
			3,00		20,00	379,60
9	F8	SK15	1,70	2,50	19,65	185,64
			1,50		19,80	259,69
			2,00		19,38	317,72
			1,90		24,49	331,89
			3,00		21,17	358,66
			1,90		22,60	354,33
			1,80		22,28	317,72

Çizelge 6.2. Dinamik davranış analizlerinde kullanılan temsili zemin profilleri (devam)

S.No.	Hücre No.	Sondaj No.	Kalınlık (m)	YASS (m)	Ɣ (kN/m^3)	V_S (m/s)
10	G8	SK26	2,20	1,50	18,63	215,34
			2,00		16,18	253,80
			2,00		16,87	253,80
			1,40		21,94	327,23
			3,00		16,81	345,52
			1,60		17,96	362,93
11	L8	SK54	1,70	1,50	17,31	215,34
			1,50		18,12	241,62
			2,00		20,24	185,64
			2,00		21,29	215,34
12	C9	SK2	1,70	1,50	18,41	150,59
			1,50		20,25	177,49
			2,00		19,05	228,84
			2,00		20,23	235,31
			2,80		24,43	302,94
13	H9	SK30	1,70	0,40	15,30	150,59
			1,50		20,12	282,09
			1,50		21,60	282,09
			3,50		21,35	265,46
			4,00		20,98	349,95
14	I9	SK38	2,40	0,30	17,74	168,97
			1,80		17,49	215,34
			2,00		17,14	253,80
			2,00		17,94	193,46
			2,00		15,02	222,19
15	H10	SK29	1,70	0,50	17,59	201,01
			1,50		17,61	168,97
			3,00		19,32	282,09
			1,50		19,85	358,66
16	I10	SK39	2,40	1,00	20,25	271,11
			1,80		21,83	276,65
			2,00		22,00	276,65
			1,50		23,05	317,72
			2,50		22,29	349,95
17	J10	DSK6	2,40	3,20	19,61	177,49
			1,50		20,97	118,16
			1,50		18,76	168,97
			4,50		15,48	168,97
18	K10	SK55	1,70	1,50	16,65	215,34
			1,50		17,97	222,19
			2,00		18,17	253,80
			2,30		20,30	297,85
			2,70		20,88	327,23

Çizelge 6.3. Çalışma kapsamında kullanılan zemin grupları ve dinamik davranış modelleri

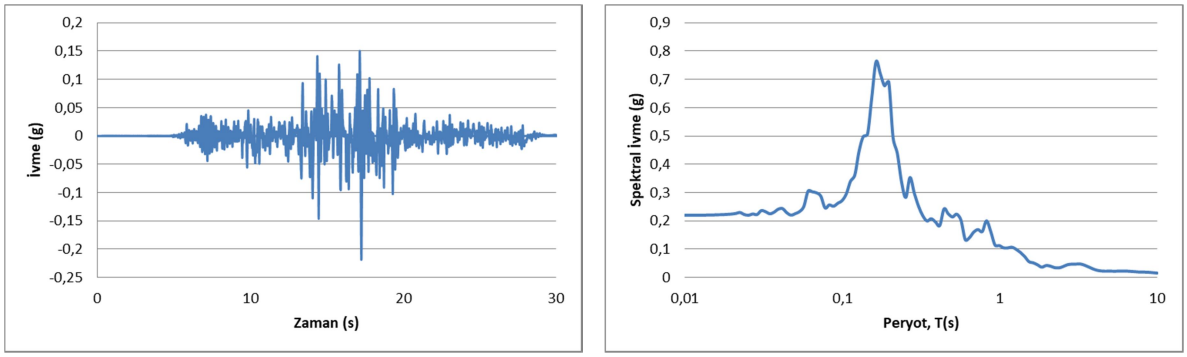
Zemin Sınıfı (USCS)	Zemin Grubu	Dinamik Davranış Modelleri
GM, GM-GC, GW, SW	KUM	Darendeli (2001)
CH, CL, CL-ML, MH, ML	KİL	Plastisite İndisine dayalı olarak Darendeli (2001)
SC, SM	KUM	Kil-silt oranı < %30 ise Darendeli (2001)
	KİL	Kil-silt oranı > %30 ise Plastisite İndisine dayalı olarak Darendeli (2001)

Çizelge 6.4. Çalışma kapsamında kullanılan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri

Zemin Sınıfı (USCS)	Zemin Grubu	Aşırı Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modelleri
GM, GM-GC, GW, SW	KUM	Dobry & Matasovic (1993), GMP (2000), Generalized (1985,2000)
CH, CL, CL-ML, MH, ML	KİL	Matasovic & Vucetic (1995)
SC, SM	KUM	Kil-silt oranı < %30 ise Dobry & Matasovic (1993), GMP (2000), Generalized (1985,2000)
	KİL	Kil-silt oranı > %30 ise Matasovic& Vucetic (1995)

6.2.2. Zemin dinamik davranış analizlerinin gerçekleştirilmesi

Bu çalışmada öncelikle, inceleme alanında yer alan ve sıvılaşabilir özellikteki zeminlerden oluştuğu değerlendirilen 18 adet hücre için, Çizelge 6.1'deki geoteknik veriler kullanılarak, Çizelge 6.2'de verilen temsili zemin profilleri oluşturulmuştur. Temsili zemin profillerinin oluşturulması aşamasında, analizlerde uygulanacak dinamik davranış modelleri Çizelge 6.3'de verilen modellerden seçilmiştir. Bunun yanı sıra, doğrusal olmayan dinamik analizlerde kullanılacak olan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri Çizelge 6.4'ten seçilerek bu modellere ait parametreler hesaplanmıştır. Oluşturulan temsili zemin profilleri ve hesaplanan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum parametreleri DEEPSOİL programına aktarıldıktan sonra, analizlerde kullanılacak olan anakaya girdi hareketi seçilmiştir. Bu çalışmada anakaya girdi hareketi olarak Şekil 6.2'de ivme ve spektrum grafikleri gösterilen ve 17 Ağustos 1999 tarihinde Yarımca-Petkim istasyonunda kaydedilen Kocaeli depremine (M_w=7.4) ait ivme kayıtları kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Kocaeli depremine ait ivme ve spektrum grafikleri

Anakaya girdi hareketinin seçilmesinden sonra, DEEPSOİL programı ile frekans tanım alanında eşdeğer doğrusal (lineer) analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan zemin dinamik davranış analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan eşdeğer doğrusal analiz sonucunda, seçilen hücrelerdeki her bir zemin tabakası için anakayadan yüzeye kadar olan ivme ve tepki spektrumu değerlerinin yer aldığı grafikler oluşturulmuştur. Doğrusal olmayan analizler sonucunda ise; her bir zemin tabakasına ait ivme ve tepki spektrumu grafiklerinin yanı sıra, anakayadan yüzeye kadar olan boşluk suyu basıncı oluşum değerlerinin yer aldığı grafikler elde edilmiştir.

6.2.3. Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi

Eşdeğer doğrusal zemin dinamik davranış analizleri sonucu elde edilen maksimum yüzey ivmesi değerleri Seed ve İdriss (1971) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntem ile birlikte kullanılarak, inceleme alanında yer alan seçilmiş hücrelerdeki her bir zemin tabakasının sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra, hesaplanan güvenlik katsayıları, Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen eşitlikte yerine konularak zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri elde edilmiştir. Sönmez (2003) tarafından önerilen çizelge göz önünde bulundurularak, hesaplanan sıvılaşma potansiyel indeksi değerlerine göre zemin tabakalarının sıvılaşma potansiyel dereceleri belirlenmiştir. Eşdeğer doğrusal analizler sonucu elde edilen veriler kullanılarak belirlenen sıvılaşma potansiyel dereceleri, doğrusal olmayan zemin dinamik analizleri sonucu elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum değerleri ile karşılaştırılmak suretiyle, çalışma alanında yer alan zeminlerin sıvılaşma potansiyeli her iki analiz yöntemi için incelenmiştir.

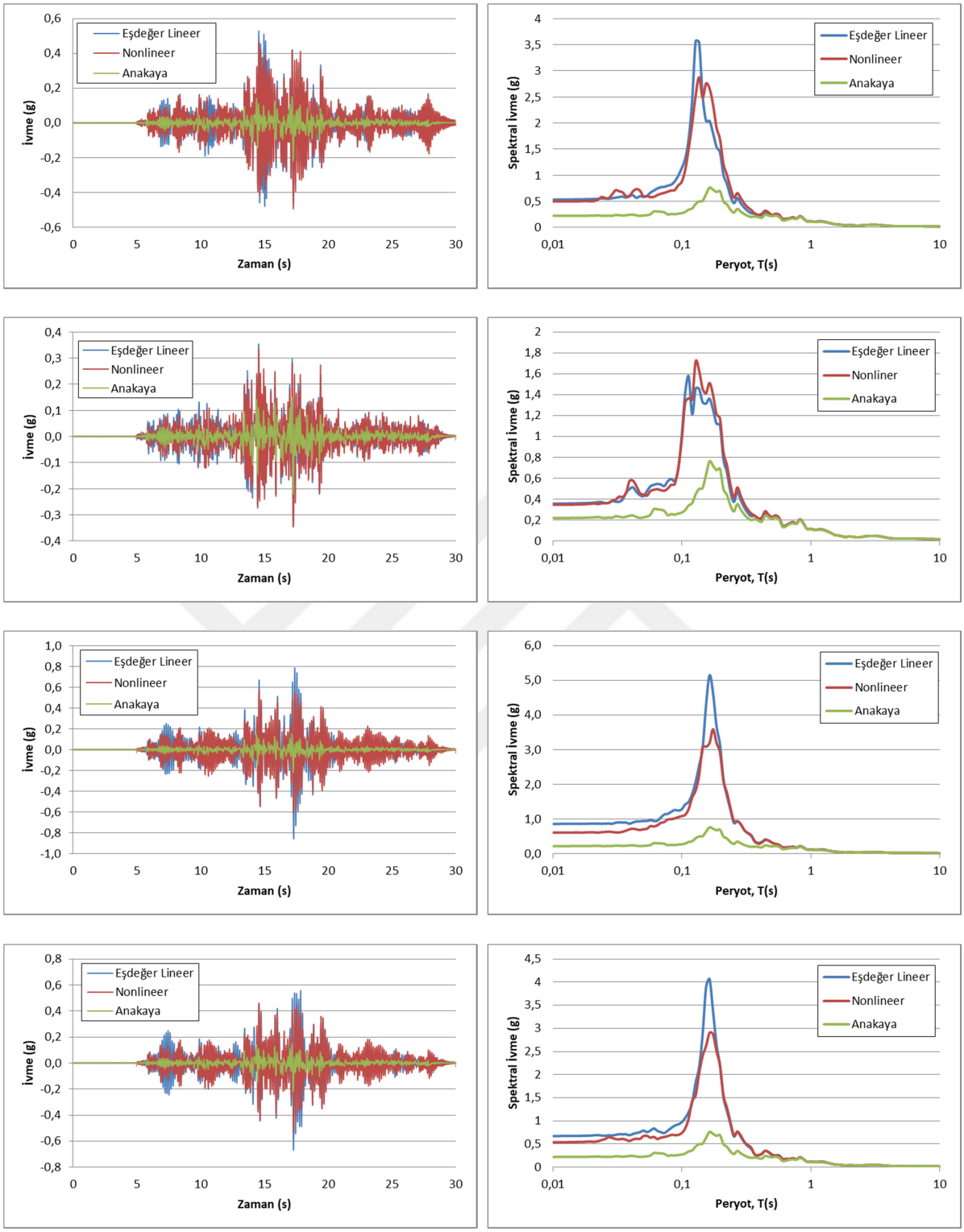
7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, Eskişehir ili Çifteler ilçesi yerleşim alanında yer alan ve sondaj verileri bulunan 18 adet hücre üzerinde bir boyutlu zemin dinamik davranış analizleri ve sıvılaşma analizleri yapılmıştır. Bir boyutlu zemin dinamik davranış analizleri, DEEPSOİL programında eşdeğer doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizleri için ise, DEEPSOİL programında doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yöntemi içerisinde yer alan aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri ve Seed ve İdriss (1971) tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntem kullanılmıştır. Bu bölümde, yapılan analizlere ait sonuçlar ana başlıklar hâlinde sunulmuştur.

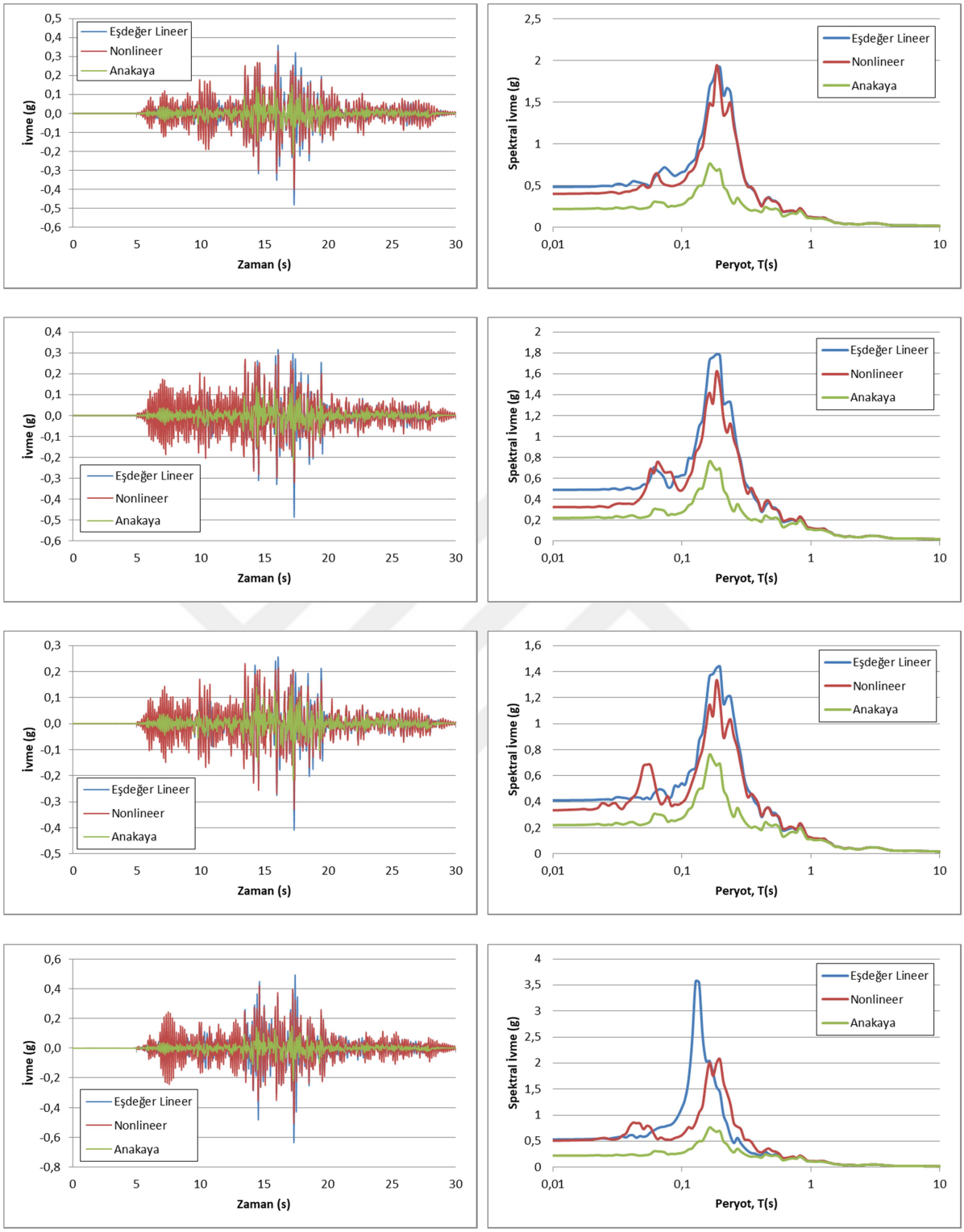
7.1. Zemin Davranış Analizi Sonuçları

Çalışma alanında yer alan temel zemin tabakalarının deprem hareketi etkisindeki dinamik davranışları, frekans tanım alanında bir boyutlu eşdeğer doğrusal (lineer) ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yapabilen DEEPSOİL programı kullanılarak analiz edilmiştir. Yapılan dinamik analizler sonucunda, seçilen her bir hücre için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman grafikleri ve ivme-zaman kayıtlarının spektral değerlerinin peryoda bağlı değişimini gösteren grafikler oluşturulmuştur.

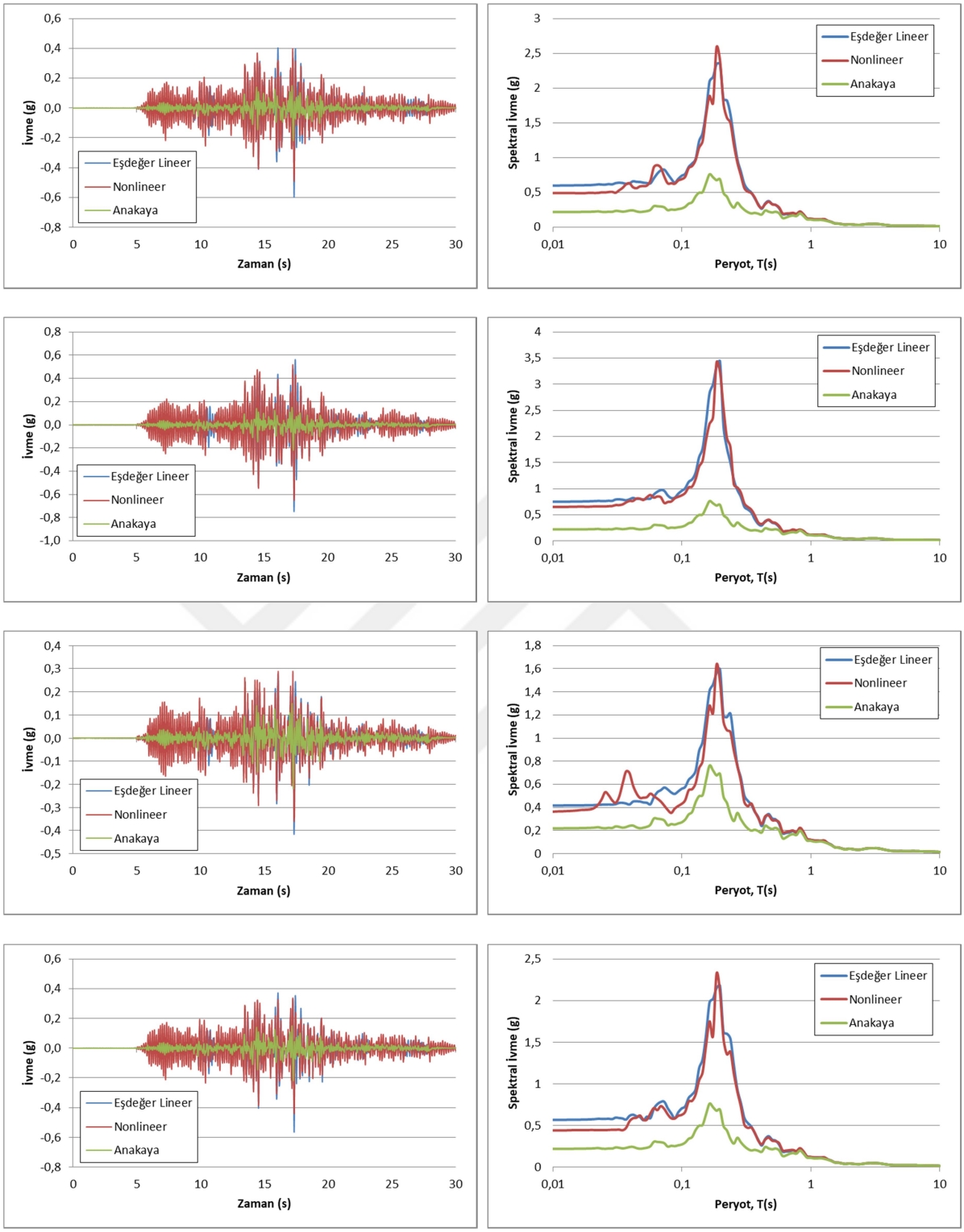
DEEPSOİL programı kullanılarak gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) analizler sonucunda elde edilen Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5'teki ivme-zaman grafikleri incelendiğinde; maksimum yüzey ivme değerlerinin birbirine yakın olmakla birlikte, eşdeğer doğrusal (lineer) analiz ile elde edilen ivme değerlerinin doğrusal olmayan (nonlineer) analize göre bir miktar yüksek olduğu görülmüştür. Nitekim bu durum literatürle uyum içerisindedir. Arslan ve Siyahi (2006), Kale (2008), Hosseini ve Pajouh (2010), Adampira vd. (2014) ve Pruiksma (2016) yaptıkları çalışmada; eşdeğer doğrusal (lineer) analizin, yüksek frekans aralığında ivme hesaplamasının yanı sıra zemin koşulları ve topoğrafik konuma bağlı olarak doğrusal olmayan (nonlineer) analize göre daha büyük maksimum yüzey ivmesi değerlerini tahmin ettiğini belirtmişlerdir.



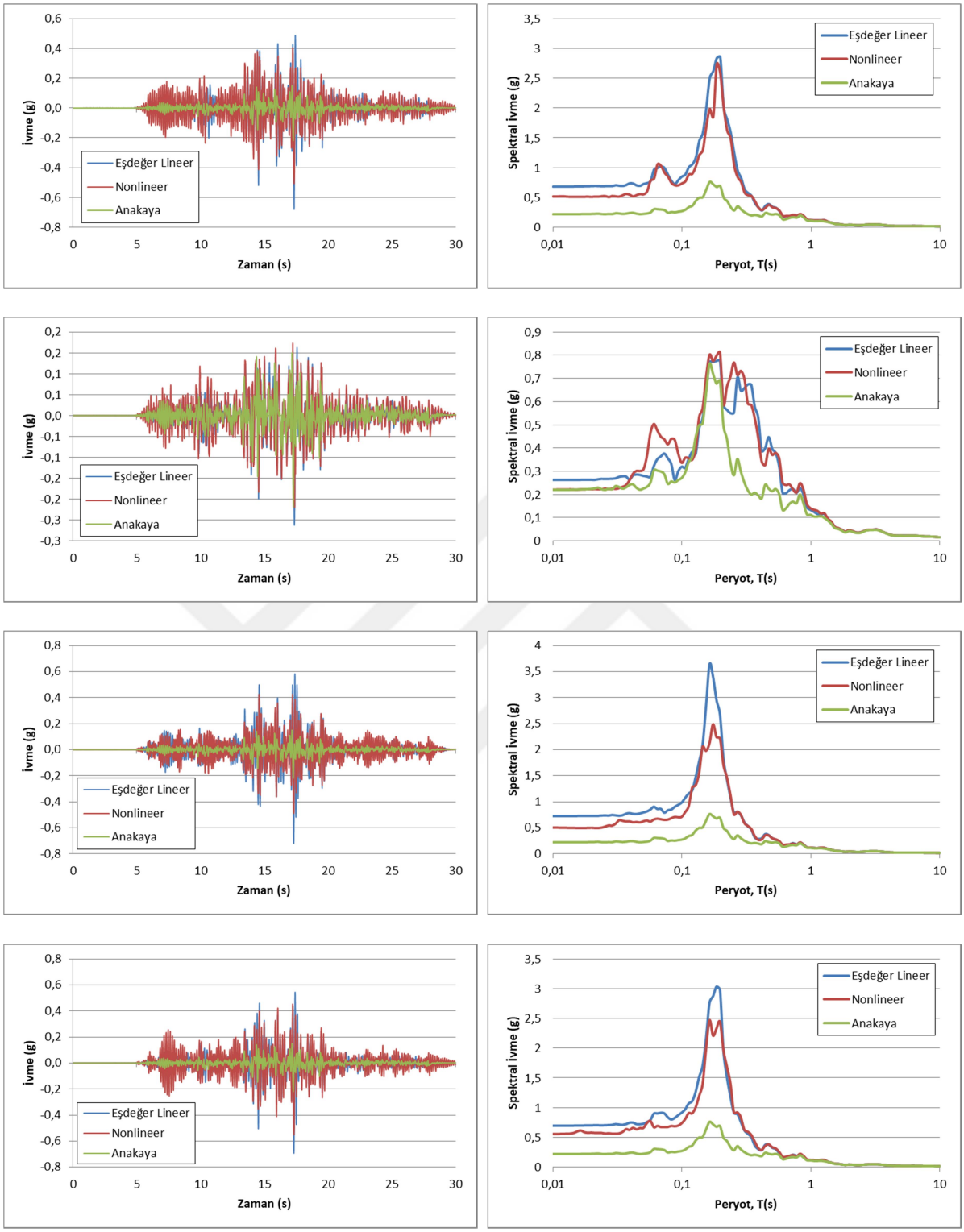
Şekil 7.1. G6, B7, D7 ve G7 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri



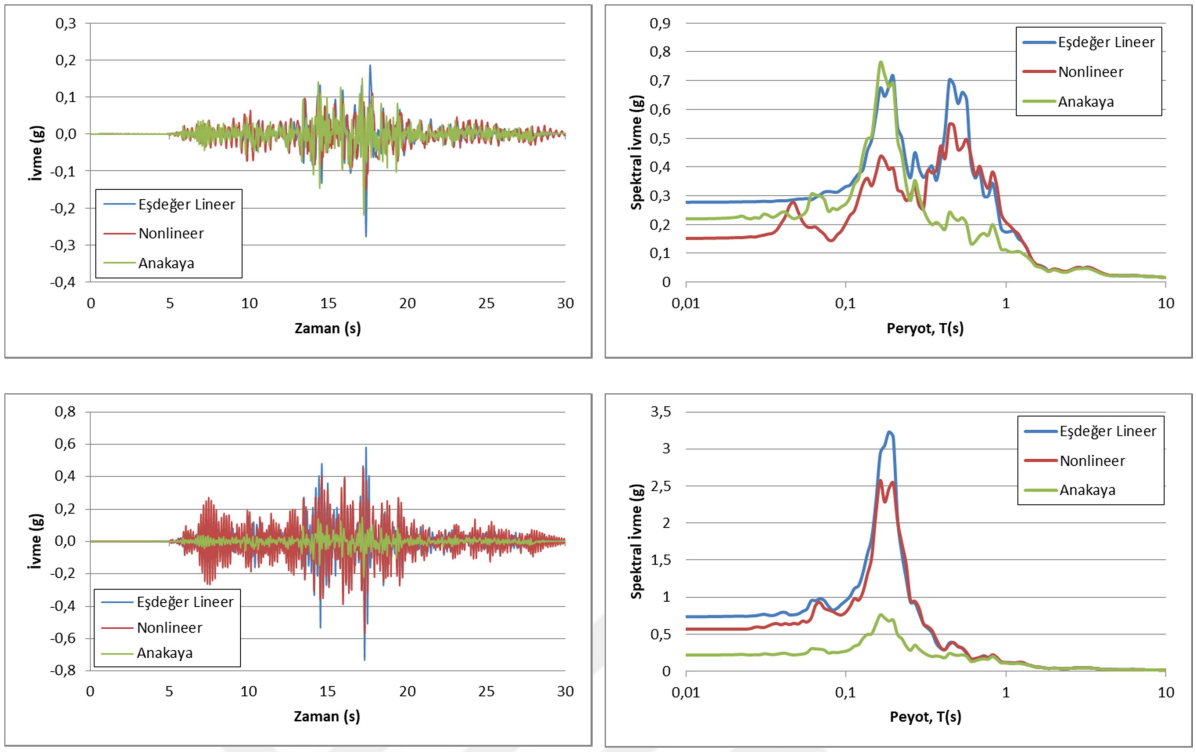
Şekil 7.2. H7, I7, D8 ve E8 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri



Şekil 7.3. F8, G8, L8 ve C9 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri



Şekil 7.4. H9, I9, H10 ve I10 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri



Şekil 7.5. J10 ve K10 hücreleri için zemin yüzeyinde elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri

DEEPSOİL programı ile gerçekleştirilen bir boyutlu eşdeğer doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) analizler sonucunda elde edilen Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5'teki spektral ivmelerin periyoda bağlı değişimi incelendiğinde; eşdeğer doğrusal (lineer) analiz ile elde edilen maksimum spektral ivme değerlerinin doğrusal olmayan (nonlineer) analize göre genelde bir miktar yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, bazı araştırmacıların literatürde yer alan çalışmaları ile uyum içerisindedir. Arslan ve Siyahi (2006), Hosseini ve Pajouh (2010) ve Pruiksma (2016) yaptıkları çalışmada; eşdeğer doğrusal (lineer) analizin yüksek frekans aralığında ivme hesaplaması nedeniyle, doğrusal olmayan (nonlineer) analize göre daha büyük maksimum spektral ivme değerlerini tahmin ettiğini belirtmişlerdir.

Çalışma alanında yer alan 18 adet hücre üzerinde gerçekleştirilen eşdeğer doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) analizler sonucunda elde edilen yüzey spektral ivmelerinin maksimum değerleri ile ana kaya spektral ivmesinin oranlanması ile her bir hücredeki zemin büyütme oranları elde edilmiştir. Her bir hücredeki yüzey spektral ivmelerinin maksimum değerine karşılık gelen zemin hâkim periyotları kullanılarak, büyütmelerin görüldüğü frekans değerleri belirlenmiştir.

DEEPSOİL programı kullanılarak gerçekleştirilen bir boyutlu zemin dinamik davranış analizlerinden elde edilen zemin büyütme oranları ve frekans değerleri iki ayrı analiz yöntemi için sırasıyla Çizelge 7.1'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 7.1. Seçilen hücreler için zemin davranış analizi sonuçlarının karşılaştırılması

S. No.	Hücre No.	Eşdeğer Lineer Analiz		Nonlineer Analiz	
		Frekans (Hz)	Büyütme Oranı	Frekans (Hz)	Büyütme Oranı
1	G6	7,82	8,00	7,35	5,77
2	B7	8,86	4,64	7,82	3,85
3	D7	6,10	6,75	5,73	4,98
4	G7	6,10	5,33	6,10	3,81
5	H7	5,06	2,78	5,39	2,86
6	I7	5,39	2,64	5,39	2,39
7	D8	5,06	2,08	5,39	1,97
8	E8	7,82	8,00	5,06	3,00
9	F8	5,39	3,47	5,39	3,82
10	G8	5,06	4,98	5,39	5,04
11	L8	5,06	2,31	5,39	2,41
12	C9	5,06	3,15	5,39	3,43
13	H9	5,06	4,14	5,39	4,03
14	I9	5,06	1,12	5,06	1,18
15	H10	6,10	4,77	5,73	3,45
16	I10	5,39	4,48	6,10	3,24
17	J10	5,06	1,03	2,26	2,26
18	K10	5,39	4,77	6,10	3,38

Çizelge 7.1'de verilen analiz sonuçları incelendiğinde; eşdeğer doğrusal (lineer) analiz sonucu elde edilen en büyük zemin büyütme oranının 7,82 Hz frekansında ve 8,00 değerinde olacak şekilde G6 ve E8 hücrelerinde, doğrusal olmayan (nonlineer) analizde ise 7,35 Hz frekansında ve 5,77 değerindeki G6 hücresinde olduğu görülmüştür. En düşük zemin büyütme oranı değerleri ise, her iki analiz yöntemi için sırasıyla 1,03 ve 1,18 değerlerindeki J10 ve I9 hücrelerinde elde edilmiştir. Analiz sonuçları karşılaştırıldığında; eşdeğer doğrusal (lineer) analiz sonucu elde edilen büyütme oranı değerlerinin genel olarak, doğrusal olmayan (nonlineer) analizden elde edilen büyütme oranı değerlerine göre daha büyük olduğu görülmüştür.

7.2. Sıvılaşma Analizi Sonuçları

Çalışma alanında yer alan ve sondaj verileri bulunan 18 hücre için sıvılaşma potansiyelini belirlemek maksadıyla, bölgedeki jeolojik oluşumlar ve yeraltı suyunun konumu da göz önüne alınarak derinliğe bağlı olarak sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizinde öncelikle, DEEPSOİL programında gerçekleştirilen bir boyutlu eşdeğer doğrusal (lineer) analiz sonucunda elde edilen maksimum yüzey ivme değerleri, Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen eşitlik ile birlikte kullanılarak, depremin neden olduğu tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) değerleri hesaplanmıştır. Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini temsil ettiği varsayılan tekrarlı direnç oranı (CRR) değerleri ise, Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) verilerine dayalı olarak Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Derinliğe bağlı olarak hesaplanan bu değerler tekrarlı kayma gerilmesi oranı (CSR) değerlerine oranlanarak, seçilen hücrelerdeki her bir zemin tabakasına ait sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayıları (FS) elde edilmiştir. Sıvılaşma analizi sonucunda elde edilen güvenlik katsayıları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Sıvılaşmaya karşı güvenlik katsayısı, her bir zemin tabakası için hesaplanabilir olmasına rağmen, çalışma alanında bulunan hücrelerin sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesinde tek başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, derinliğe bağlı olarak hesaplanan güvenlik katsayıları Iwasaki vd. (1982) tarafından önerilen eşitlik ile birlikte kullanılarak, her bir hücredeki zemin profilinin üst 20 metrelik kısmı için sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen LPI değerlerine bağlı olarak, Sönmez (2003) tarafından önerilen sıvılaşma potansiyeli dereceleri belirlenmiştir. Çalışma alanındaki 18 adet hücre için belirlenen sıvılaşma potansiyeli indeksi (LPI) değerleri ve sıvılaşma potansiyeli dereceleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3'te verilen sıvılaşma potansiyeli indeksi değerleri incelendiğinde, Sönmez (2003) tarafından önerilen derecelendirme yöntemine göre; J10 hücresinde sıvılaşma potansiyeli derecesinin yüksek, G6, B7, D7, G7, H7, I7, D8, E8, F8, G8, L8, C9, H9, I9, H10, I10 ve K10 hücrelerinde ise çok yüksek olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.2. Sıvılaşma analizi sonucu elde edilen güvenlik katsayıları

S.No	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	σ_v (kN/m^2)	σ_v' (kN/m^2)	$(N_1)_{60}$	r_d	a_{maks}	CRR	CSR	FS
1	G6	SK25	1,70	37,09	37,09	20	0,989	0,528	0,219	0,340	0,6
			3,20	69,54	69,54	18	0,978		0,187	0,336	0,6
			5,20	112,74	104,90	13	0,964		0,141	0,356	0,4
			7,70	153,49	121,12	17	0,941		0,186	0,409	0,5
2	B7	SK3	1,70	28,20	26,24	21	0,989	0,354	0,226	0,245	0,9
			3,20	51,28	34,60	20	0,978		0,216	0,334	0,6
			6,20	114,28	68,18	22	0,956		0,236	0,369	0,6
			7,70	142,52	81,70	21	0,941		0,232	0,378	0,6
3	D7	SK6	1,70	29,37	27,41	8	0,989	0,786	0,092	0,541	0,2
			3,20	58,93	42,26	10	0,978		0,117	0,697	0,2
			6,20	123,90	77,79	22	0,956		0,239	0,778	0,3
			9,20	186,57	111,03	18	0,920		0,195	0,789	0,2
4	G7	SK50	1,70	28,03	26,06	18	0,989	0,558	0,188	0,385	0,5
			3,20	50,42	33,74	12	0,978		0,128	0,530	0,2
			5,20	80,28	43,98	15	0,964		0,164	0,638	0,3
			7,20	110,13	54,22	28	0,946		0,372	0,697	0,5
5	H7	SK31	2,30	37,73	29,88	17	0,984	0,360	0,186	0,291	0,6
			4,30	70,57	43,10	20	0,970		0,220	0,372	0,6
			8,80	140,49	68,88	15	0,926		0,156	0,442	0,4
			10,70	179,44	89,19	16	0,890		0,169	0,419	0,4
6	I7	SK40	2,40	45,17	36,34	6	0,984	0,316	0,077	0,251	0,3
			4,20	81,96	55,47	9	0,971		0,101	0,294	0,3
			6,20	117,76	71,65	23	0,956		0,253	0,322	0,8
			7,90	148,70	85,92	24	0,938		0,270	0,333	0,8
			9,70	184,39	103,95	22	0,911		0,247	0,332	0,7
			10,70	203,16	112,90	22	0,890		0,240	0,329	0,7
7	D8	DSK15	1,90	31,39	31,39	39	0,987	0,256	0,075	0,165	0,5
			3,50	56,23	46,42	13	0,976		0,143	0,197	0,7
			4,90	81,56	58,02	12	0,966		0,129	0,226	0,6
			12,40	238,83	141,72	19	0,845		0,202	0,237	0,9
8	E8	SK16	1,70	29,30	27,34	12	0,989	0,492	0,130	0,339	0,4
			3,20	56,50	39,82	26	0,978		0,310	0,444	0,7
			7,20	134,40	78,48	16	0,946		0,171	0,518	0,3
			10,20	194,40	109,05	23	0,901		0,257	0,514	0,5
9	F8	SK15	1,70	33,40	33,40	12	0,989	0,403	0,128	0,259	0,5
			3,20	63,10	56,23	14	0,978		0,153	0,288	0,5
			5,20	101,86	75,38	18	0,964		0,196	0,342	0,6
			7,10	148,40	103,27	18	0,948		0,194	0,357	0,5
			10,10	211,90	137,34	19	0,903		0,198	0,365	0,5
			12,00	254,84	161,65	17	0,857		0,182	0,354	0,5
			13,80	294,95	184,09	14	0,801		0,148	0,336	0,4

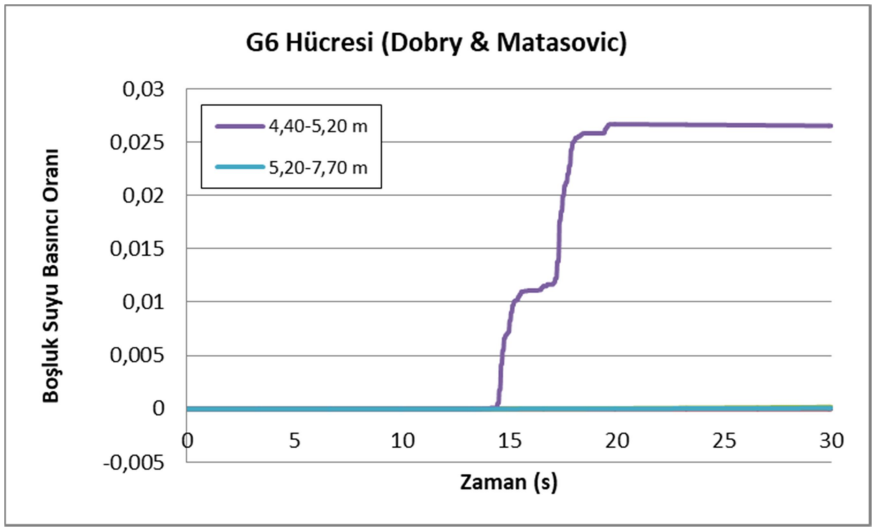
Çizelge 7.2. Sıvılaşma analizi sonucu elde edilen güvenlik katsayıları (devam)

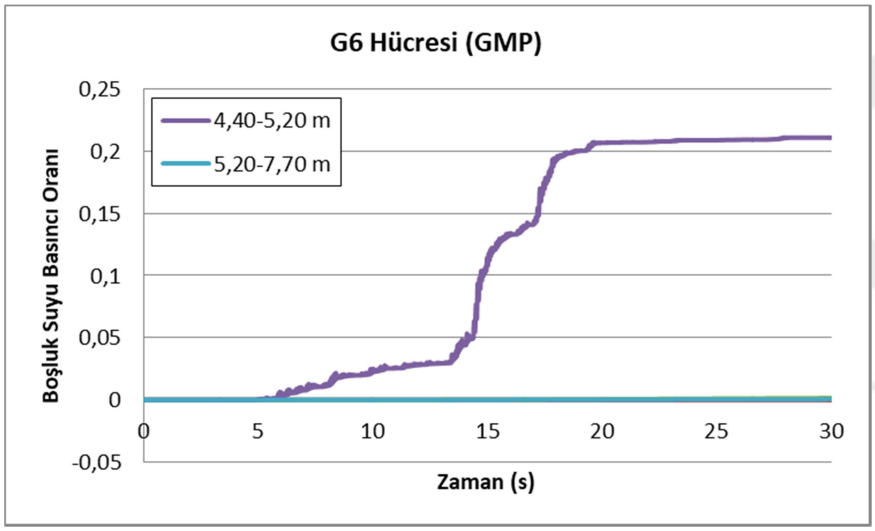
S.No	Hücre No.	Sondaj No.	Derinlik (m)	σ_v (kN/m^2)	σ_v' (kN/m^2)	$(N_1)_{60}$	r_d	a_{maks}	CRR	CSR	FS
10	G8	SK26	2,20	40,99	34,12	15	0,985	0,562	0,164	0,432	0,4
			4,20	73,35	46,87	18	0,971		0,188	0,555	0,3
			6,20	107,09	60,98	17	0,956		0,184	0,613	0,3
			7,60	137,81	77,97	21	0,942		0,228	0,608	0,4
			10,60	188,25	98,97	21	0,892		0,230	0,620	0,4
			12,20	216,98	112,01	21	0,851		0,232	0,602	0,4
11	L8	SK54	1,70	29,43	27,46	17	0,989	0,278	0,183	0,192	1,0
			3,20	56,60	39,93	16	0,978		0,171	0,251	0,7
			5,20	97,08	60,79	11	0,964		0,126	0,279	0,5
			7,20	139,66	83,75	12	0,946		0,135	0,286	0,5
12	C9	SK2	1,70	31,30	29,34	8	0,989	0,372	0,099	0,255	0,4
			3,20	61,68	45,00	9	0,978		0,106	0,324	0,3
			5,20	99,77	63,48	14	0,964		0,146	0,366	0,4
			7,20	140,24	84,32	13	0,946		0,142	0,381	0,4
			10,00	208,65	125,26	15	0,905		0,156	0,364	0,4
13	H9	SK30	1,70	26,00	13,25	12	0,989	0,487	0,135	0,615	0,2
			3,20	56,19	28,72	22	0,978		0,243	0,606	0,4
			4,70	88,59	46,41	20	0,968		0,211	0,585	0,4
			8,20	163,30	86,78	15	0,935		0,163	0,557	0,3
			12,20	247,22	131,47	18	0,851		0,195	0,507	0,4
14	I9	SK38	2,40	42,57	21,97	12	0,984	0,163	0,131	0,202	0,7
			4,20	74,06	35,80	17	0,971		0,181	0,212	0,9
			6,20	108,34	50,46	19	0,956		0,204	0,217	0,9
			8,20	144,21	66,71	12	0,935		0,133	0,214	0,6
			10,20	174,26	77,14	14	0,901		0,147	0,215	0,7
15	H10	SK29	1,70	29,91	18,14	18	0,989	0,582	0,197	0,617	0,3
			3,20	56,32	29,83	10	0,978		0,116	0,699	0,2
			6,20	114,28	58,37	20	0,956		0,210	0,708	0,3
			7,70	163,90	93,27	21	0,941		0,234	0,626	0,4
16	I10	SK39	2,40	48,59	34,86	19	0,984	0,544	0,204	0,485	0,4
			4,20	87,89	56,50	18	0,971		0,190	0,534	0,4
			6,20	131,88	80,87	17	0,956		0,177	0,551	0,3
			7,70	166,45	100,73	18	0,941		0,189	0,550	0,3
			10,20	222,18	131,93	18	0,901		0,195	0,537	0,4
17	J10	DSK6	2,40	47,06	47,06	15	0,984	0,186	0,162	0,119	1,4
			3,90	78,51	71,65	11	0,973		0,124	0,129	1,0
			5,40	106,65	85,07	13	0,962		0,144	0,146	1,0
			9,90	176,31	110,58	12	0,907		0,129	0,175	0,7
18	K10	SK55	1,70	28,31	26,34	18	0,989	0,582	0,187	0,402	0,5
			3,20	55,26	38,58	14	0,978		0,155	0,530	0,3
			5,20	91,60	55,31	16	0,964		0,173	0,604	0,3
			7,50	138,30	79,44	18	0,943		0,196	0,621	0,3
			10,20	194,68	109,33	19	0,901		0,199	0,607	0,3

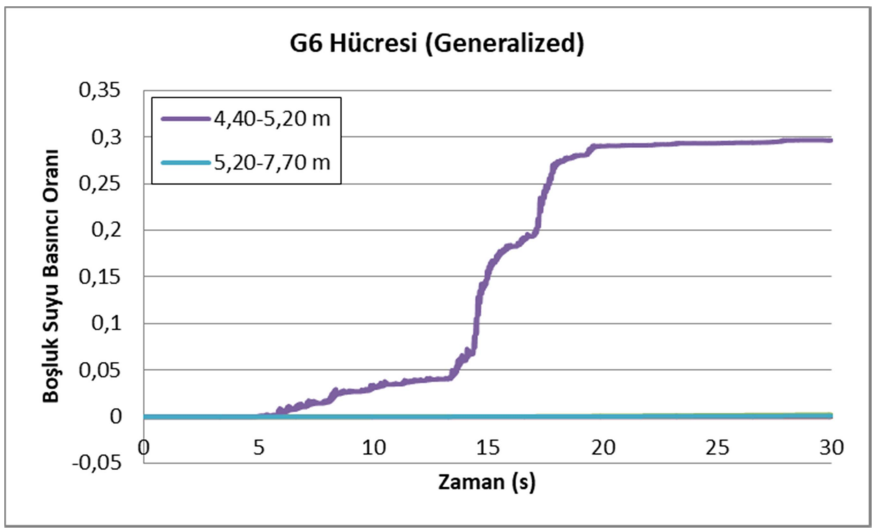
Çizelge 7.3. Çalışma alanındaki hücreler için belirlenen LPI değerleri ve sıvılaşma potansiyeli dereceleri

S.NO.	HÜCRE NO.	SONDAJ NO.	X KOORDİNATI	Y KOORDİNATI	LPI DEĞERLERİ	SIVILAŞMA POTANSİYELİ DERECESİ
1	G6	SK25	589527	4360937	44,46	ÇOK YÜKSEK
2	B7	SK3	588450	4360697	26,70	ÇOK YÜKSEK
3	D7	SK6	588774	4360737	71,81	ÇOK YÜKSEK
4	G7	SK50	589707	4360570	51,30	ÇOK YÜKSEK
5	H7	SK31	589790	4360598	45,61	ÇOK YÜKSEK
6	I7	SK40	590232	4360654	42,51	ÇOK YÜKSEK
7	D8	DSK15	588875	4360375	34,25	ÇOK YÜKSEK
8	E8	SK16	589185	4360381	49,19	ÇOK YÜKSEK
9	F8	SK15	589321	4360276	46,69	ÇOK YÜKSEK
10	G8	SK26	589621	4360244	61,34	ÇOK YÜKSEK
11	L8	SK54	590917	4360385	33,52	ÇOK YÜKSEK
12	C9	SK2	588569	4360160	57,25	ÇOK YÜKSEK
13	H9	SK30	589799	4360221	65,25	ÇOK YÜKSEK
14	I9	SK38	590054	4360198	25,39	ÇOK YÜKSEK
15	H10	SK29	589883	4359861	63,03	ÇOK YÜKSEK
16	I10	SK39	590048	4359799	58,99	ÇOK YÜKSEK
17	J10	DSK6	590375	4359875	9,12	YÜKSEK
18	K10	SK55	590568	4359906	61,37	ÇOK YÜKSEK

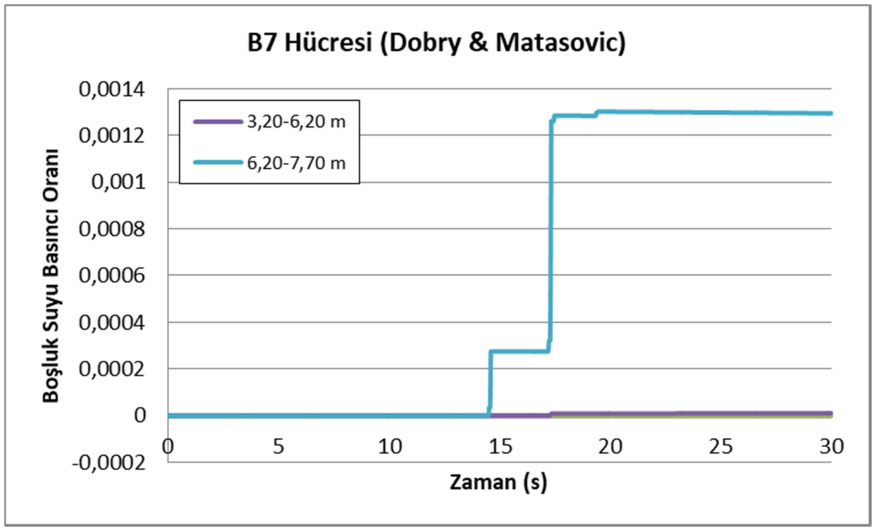
Sıvılaşma potansiyelinin değerlendirilmesine yönelik yapılan bu çalışmada; yukarıda açıklanan bir boyutlu eşdeğer doğrusal (lineer) analiz ve basitleştirilmiş yöntemin yanı sıra, DEEPSOİL programında yer alan analiz yöntemlerinden biri olan doğrusal olmayan (nonlineer) analiz ve buna bağlı aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri kullanılarak sıvılaşma analizi gerçekleştirilmiştir. Kil ve kum grubu zeminlerden oluşan G6, B7, D7, H7, I7, D8, E8, F8, G8, L8, C9, H9, I9, H10, I10, J10 ve K10 hücrelerindeki temsili zemin profilleri için Dobry & Matasovic (1993), GMP (2000) ve Generalized (1985,2000) olmak üzere üç ayrı aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modeli kullanılarak sıvılaşma analizi yapılmıştır. G7 hücresindeki temsili zemin profilinde ise sadece kil grubu zeminler yer aldığından, bu hücre için gerçekleştirilen sıvılaşma analizinde sadece Matasovic & Vucetic (1995) tarafından önerilen aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modeli kullanılmıştır. Çalışma alanındaki bu hücrelere ait sıvılaşma analizi sonuçları Şekil 7.6 ile Şekil 7.23 arasında gösterilmiştir.

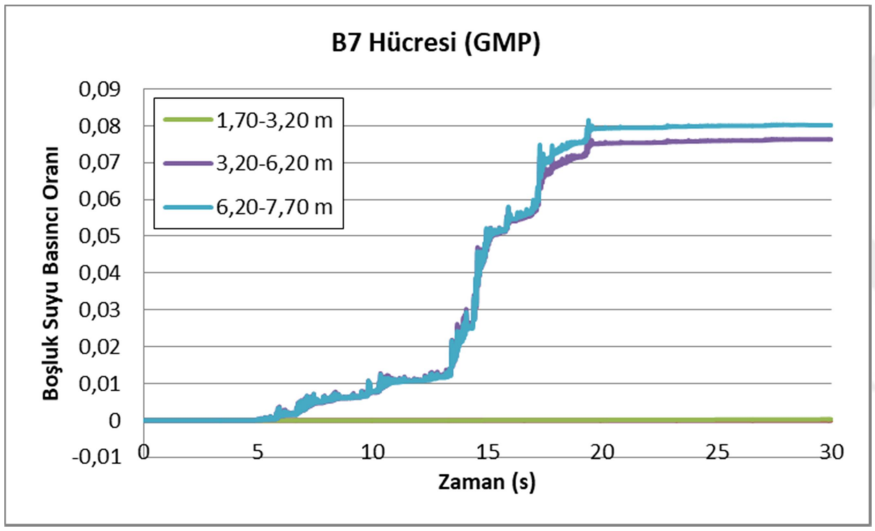


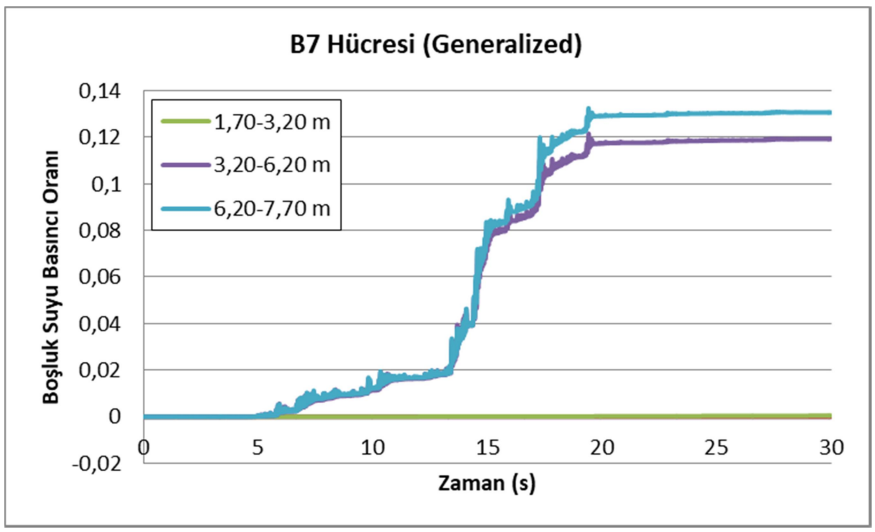




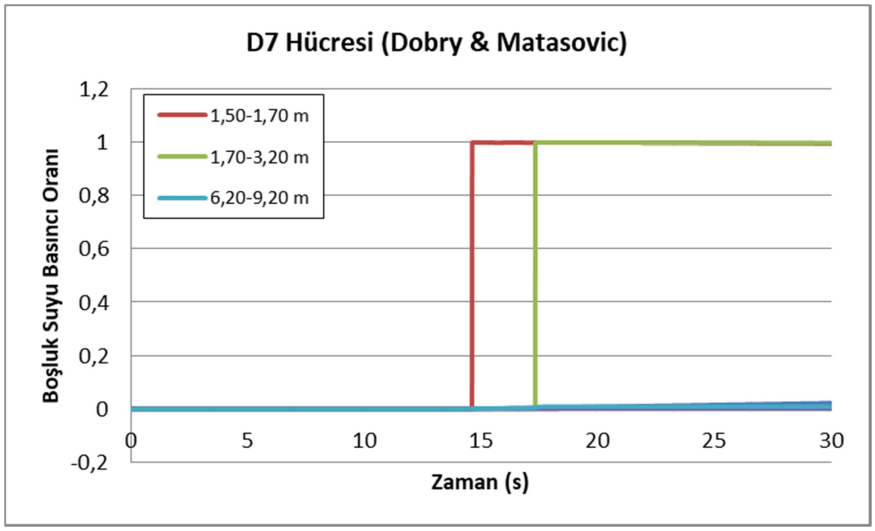
Şekil 7.6. G6 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

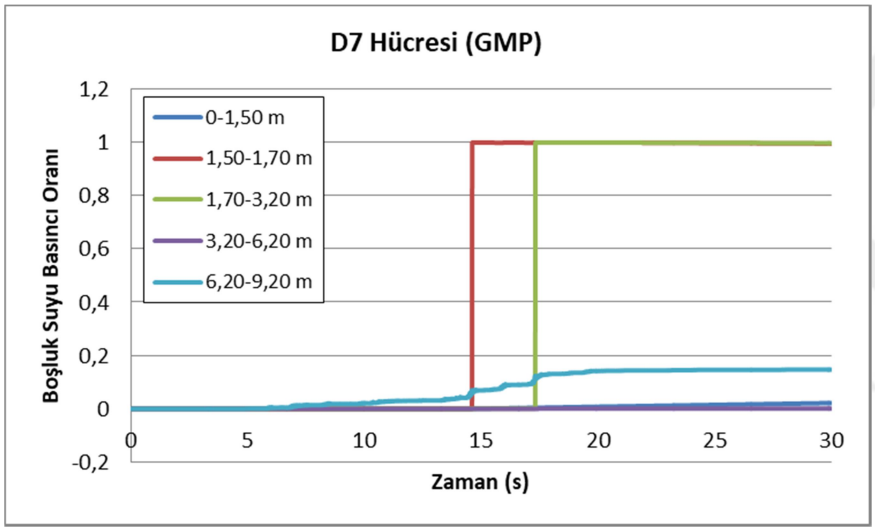


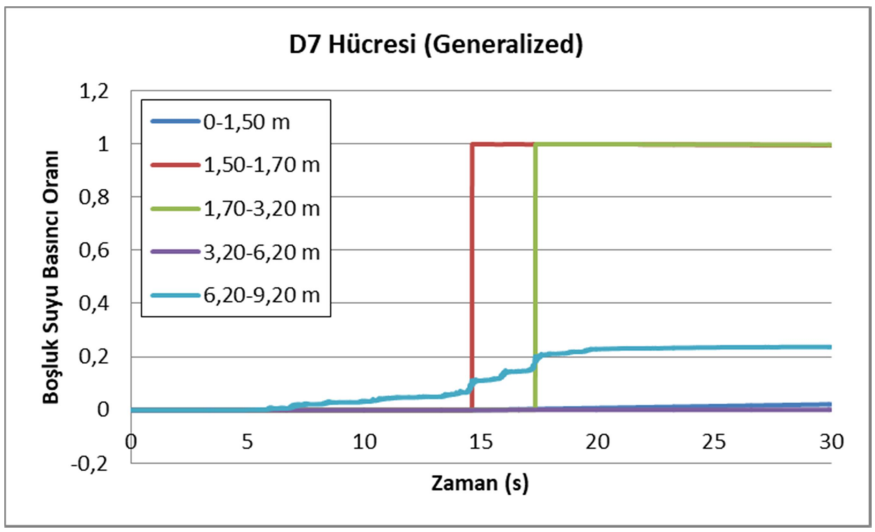




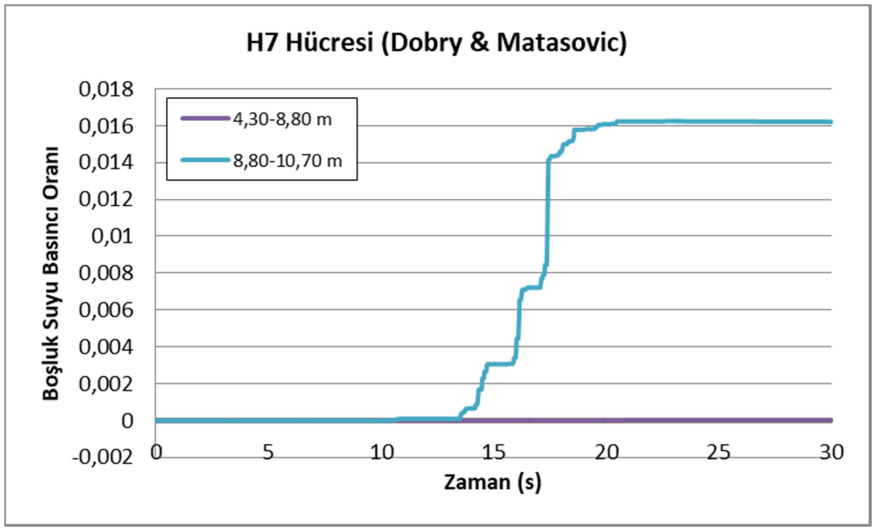
Şekil 7.7. B7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

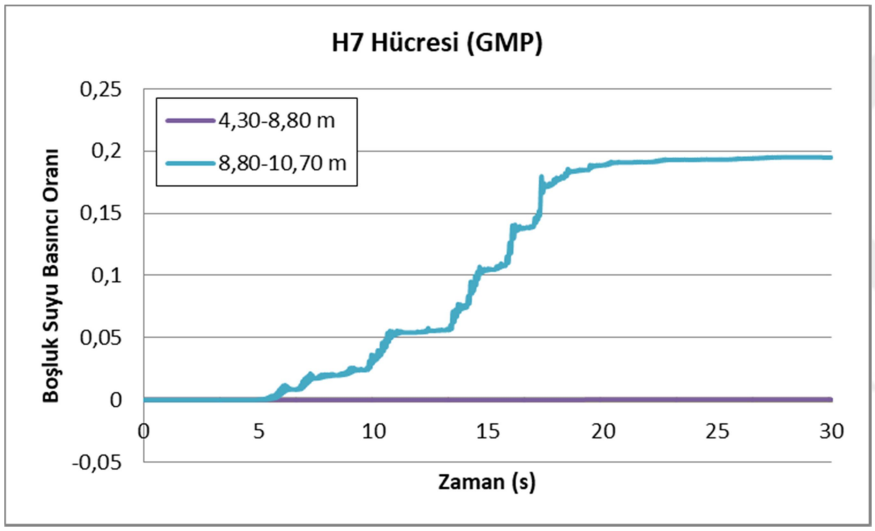


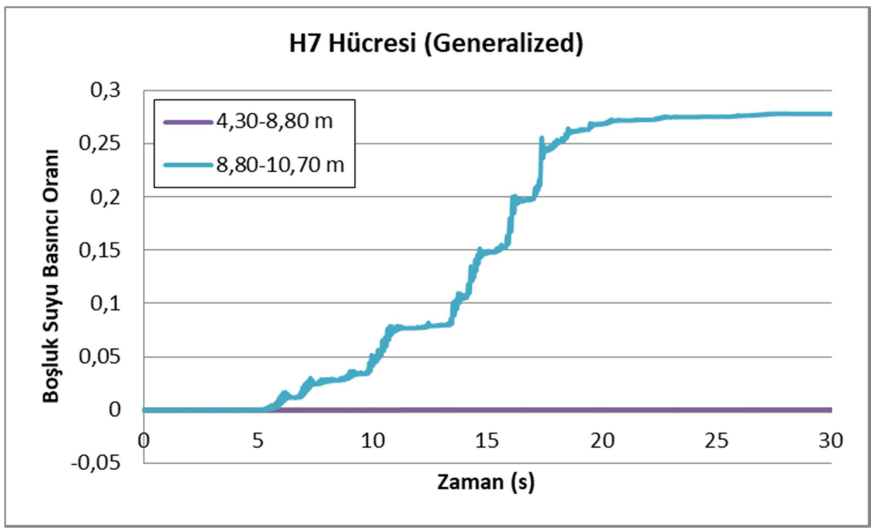




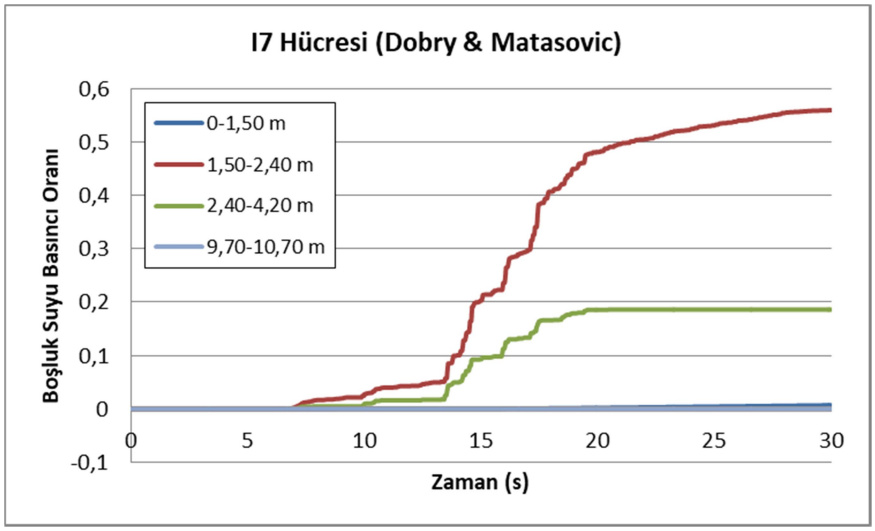
Şekil 7.8. D7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

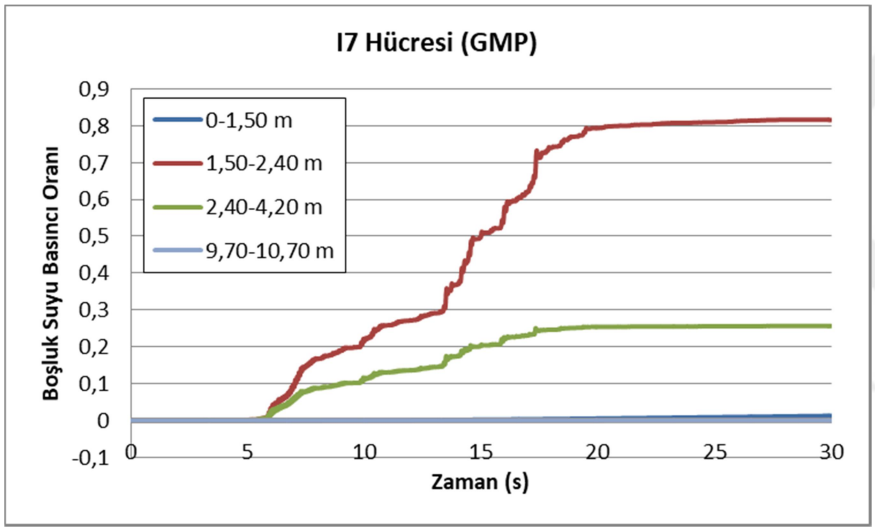


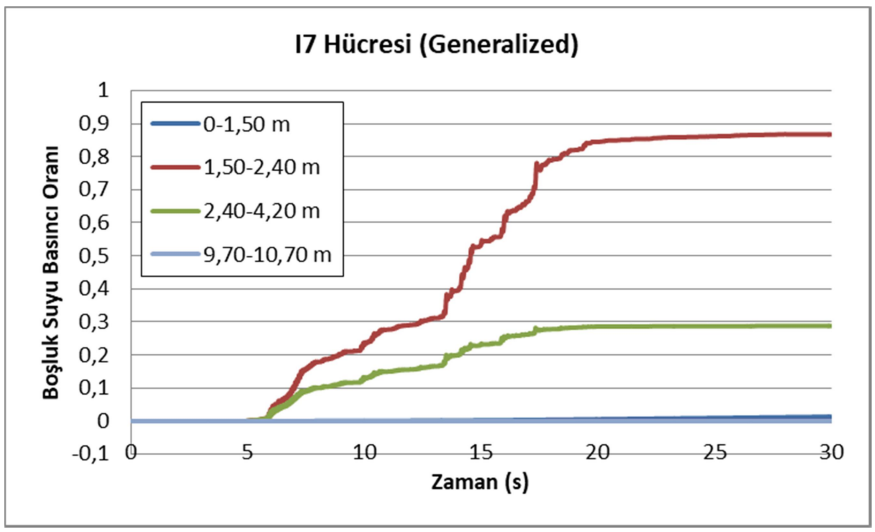




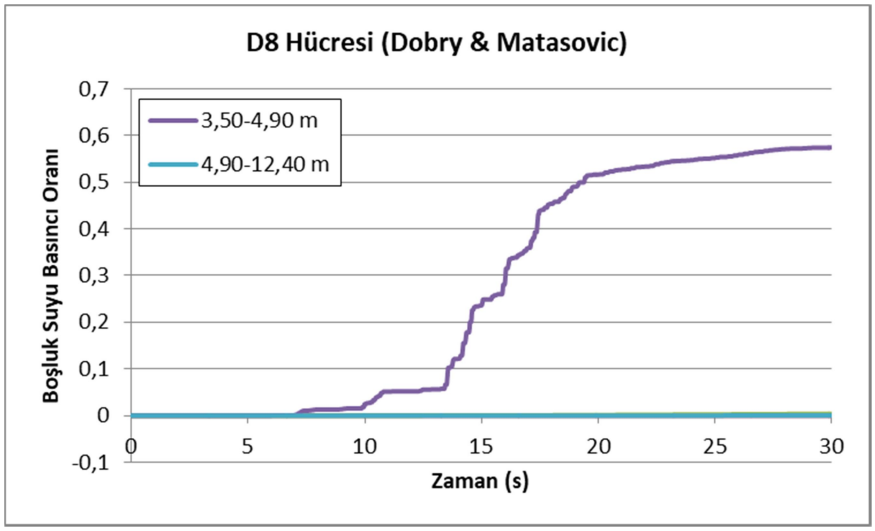
Şekil 7.9. H7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

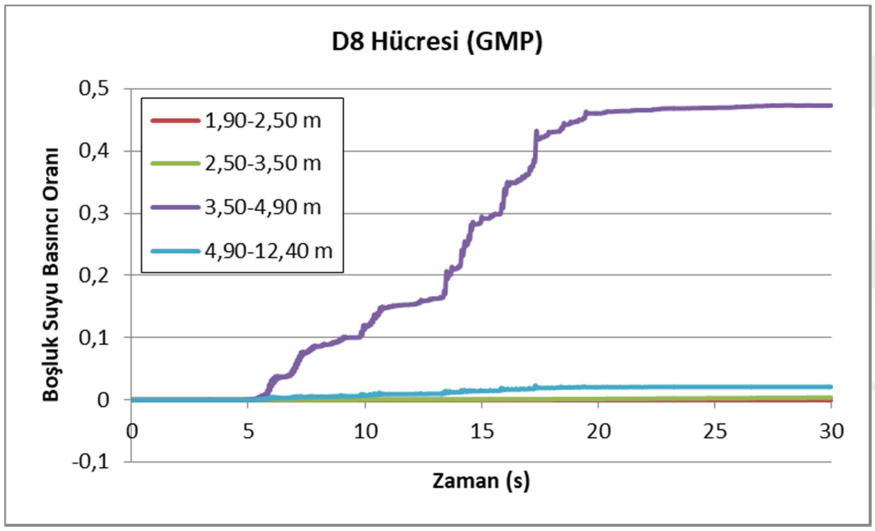


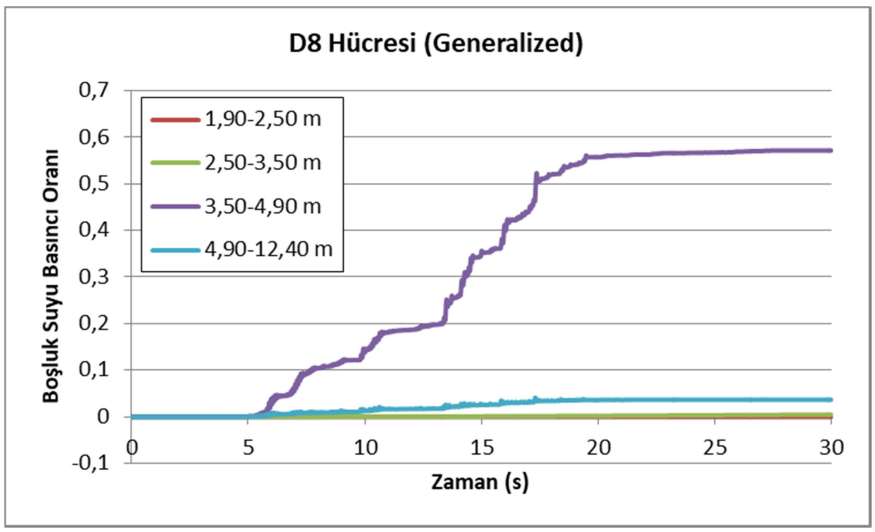




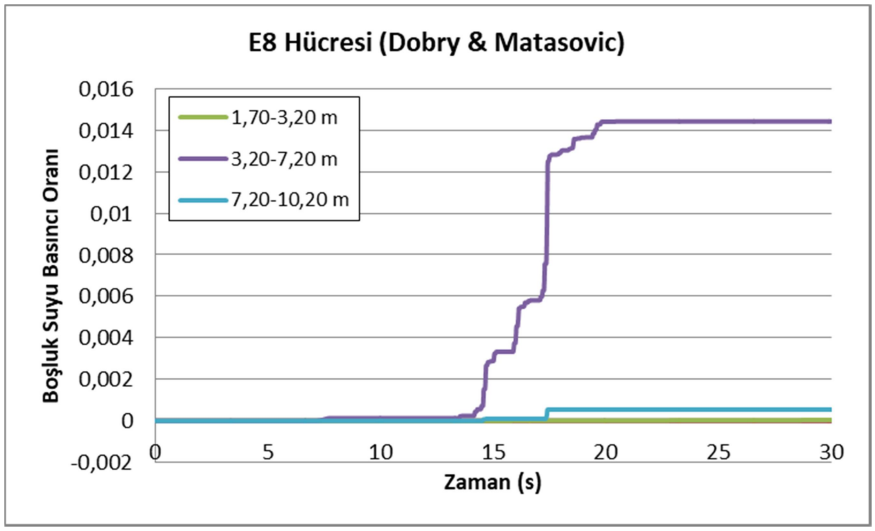
Şekil 7.10. I7 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

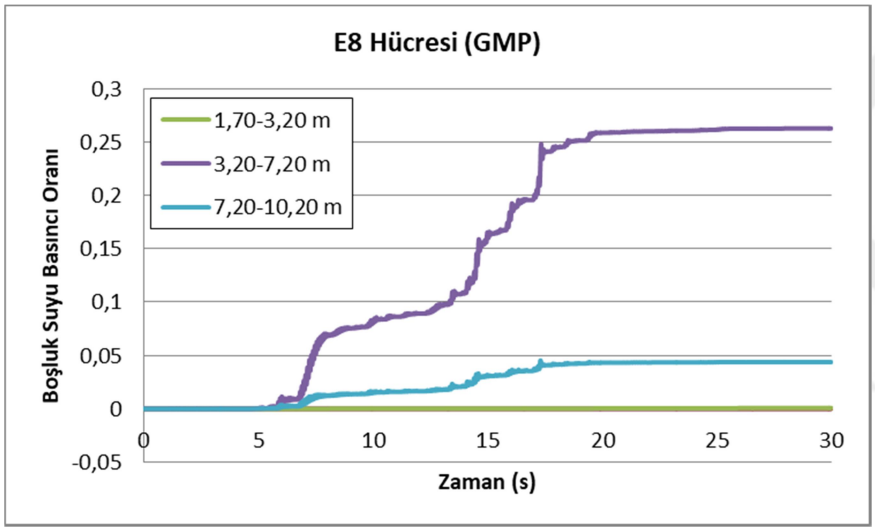


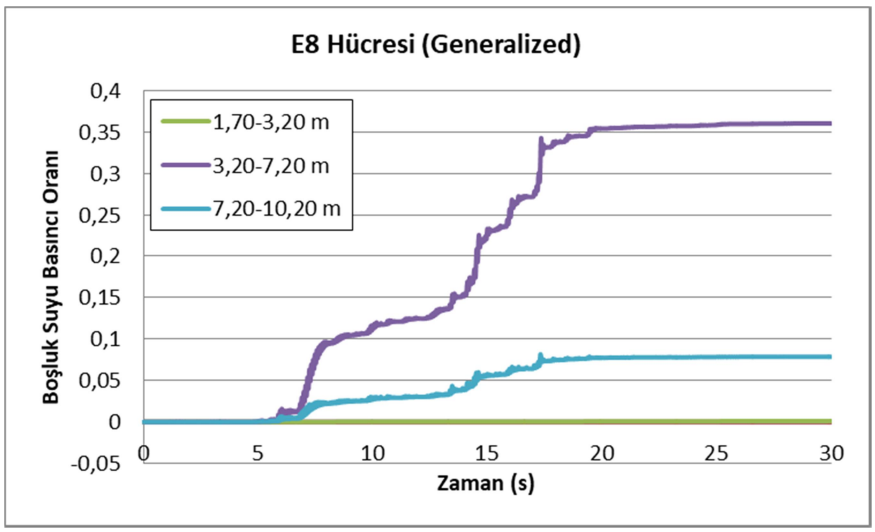




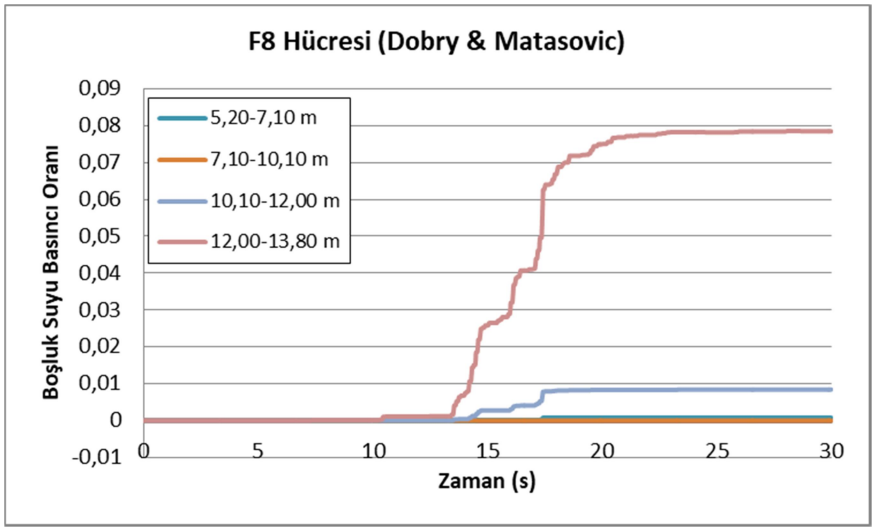
Şekil 7.11. D8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

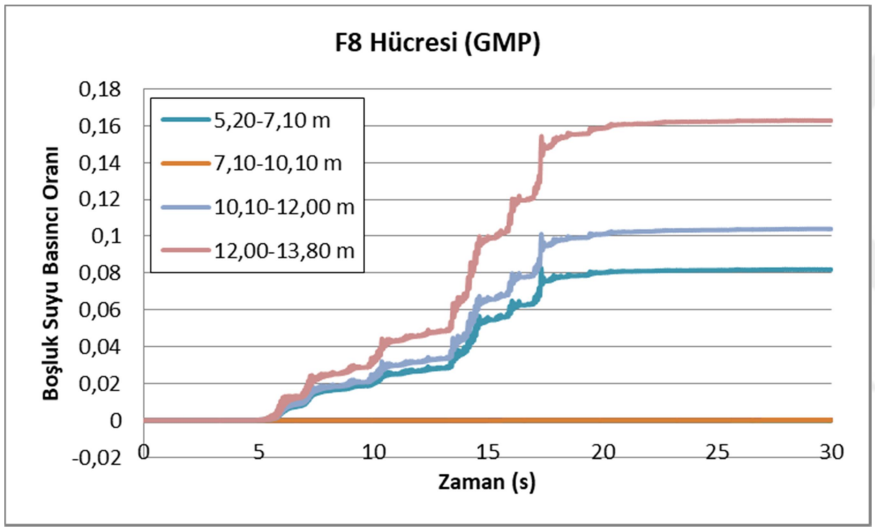


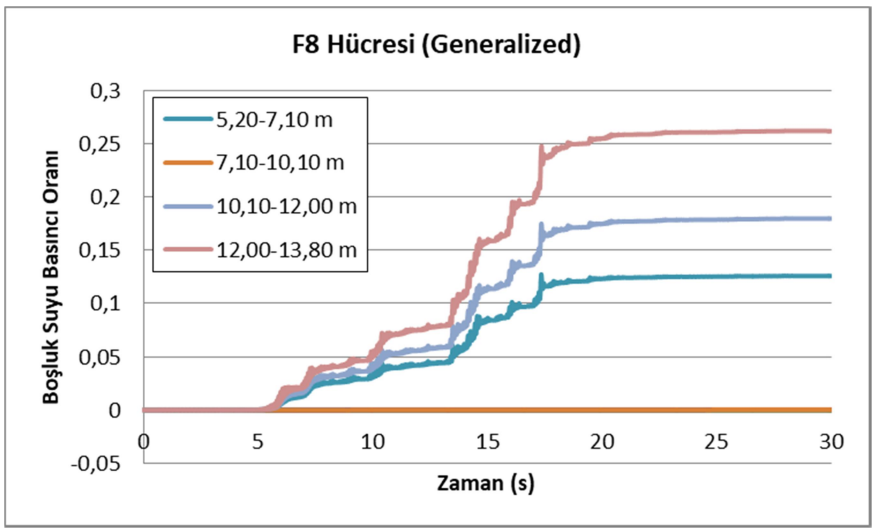




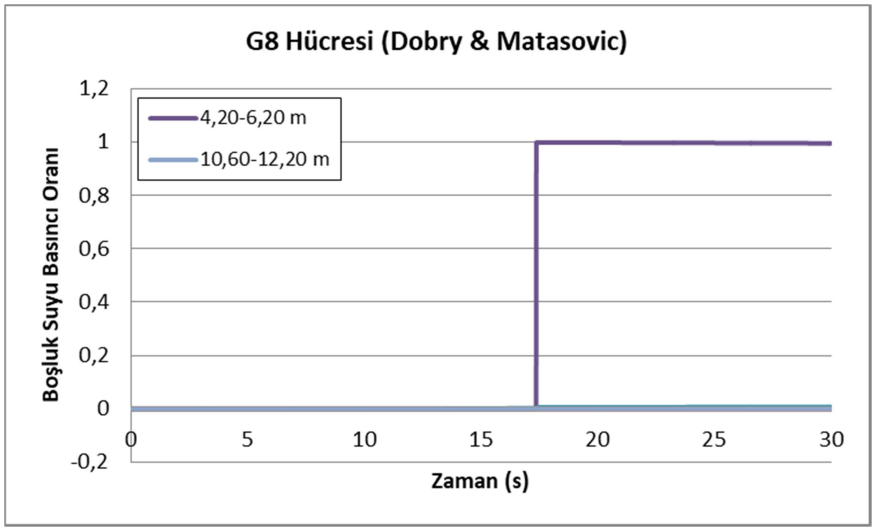
Şekil 7.12. E8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

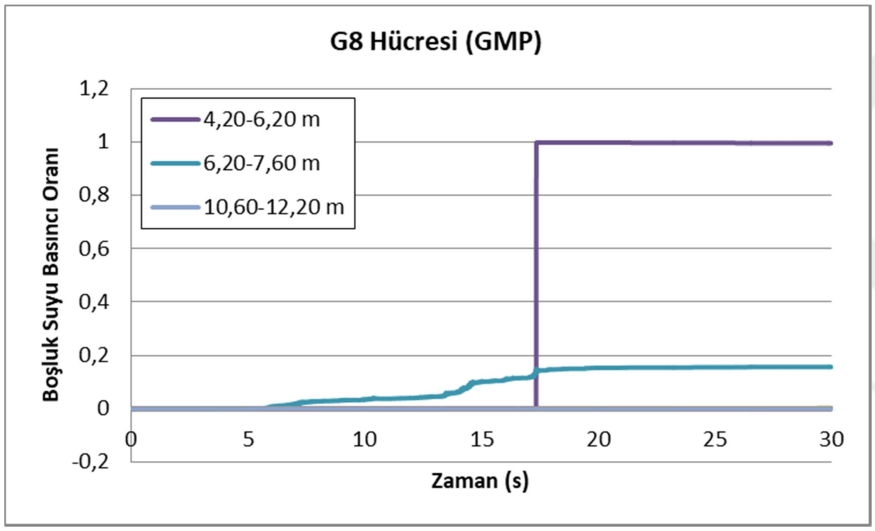


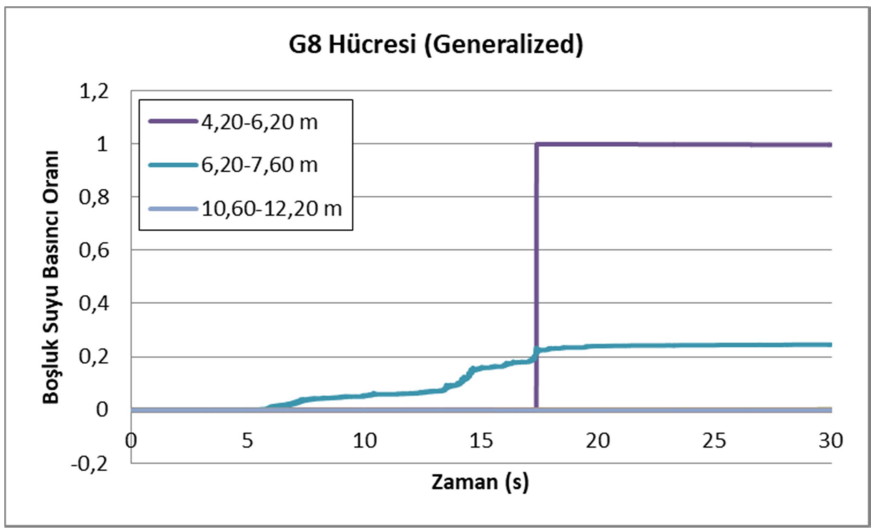




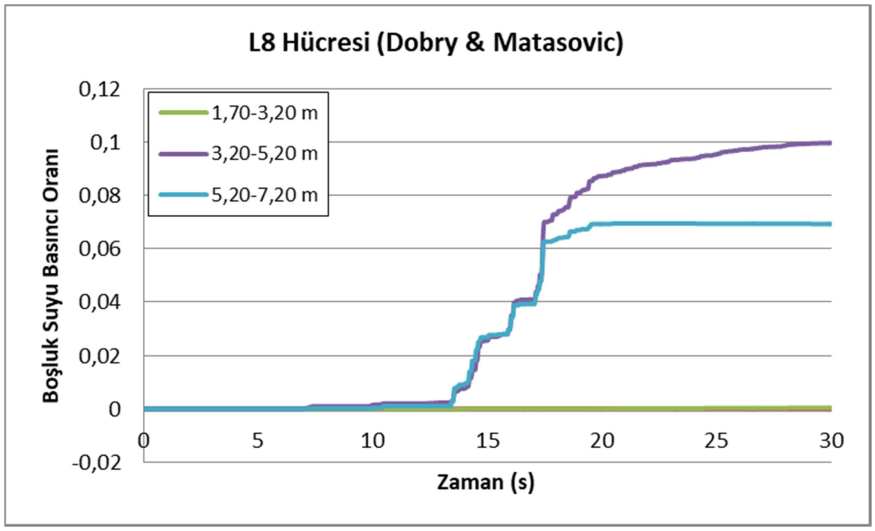
Şekil 7.13. F8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

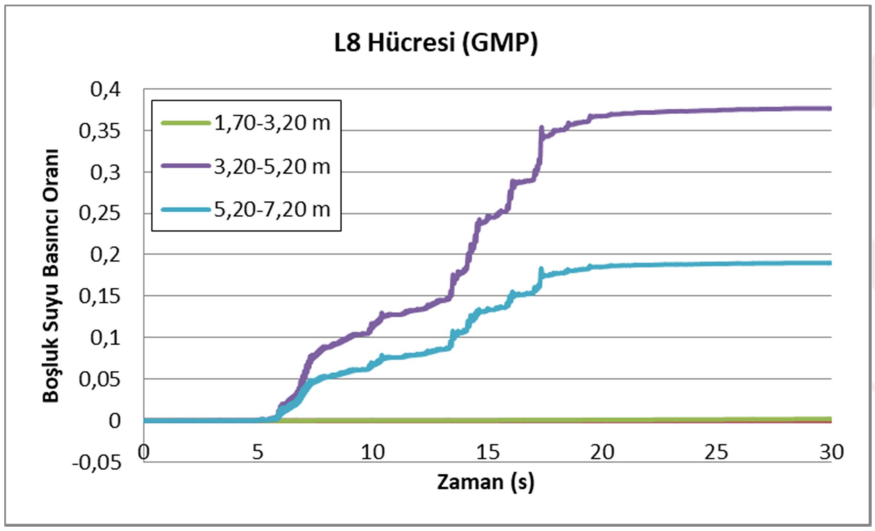


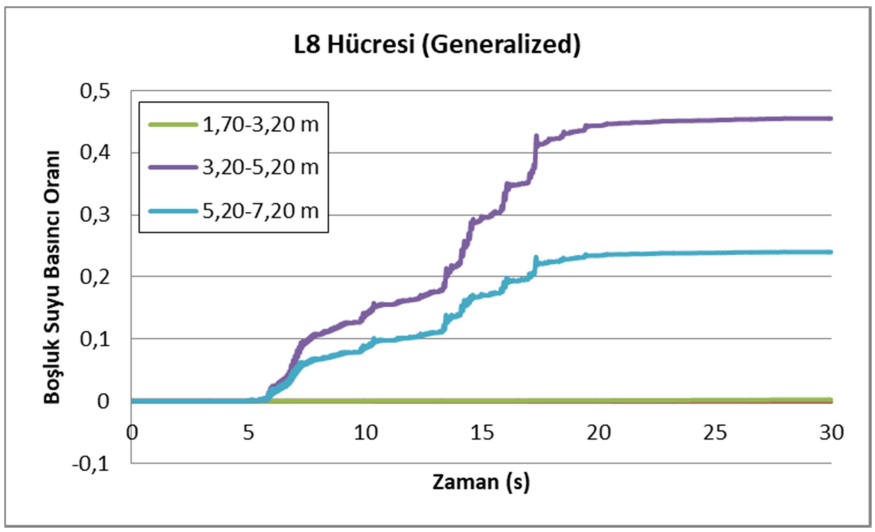




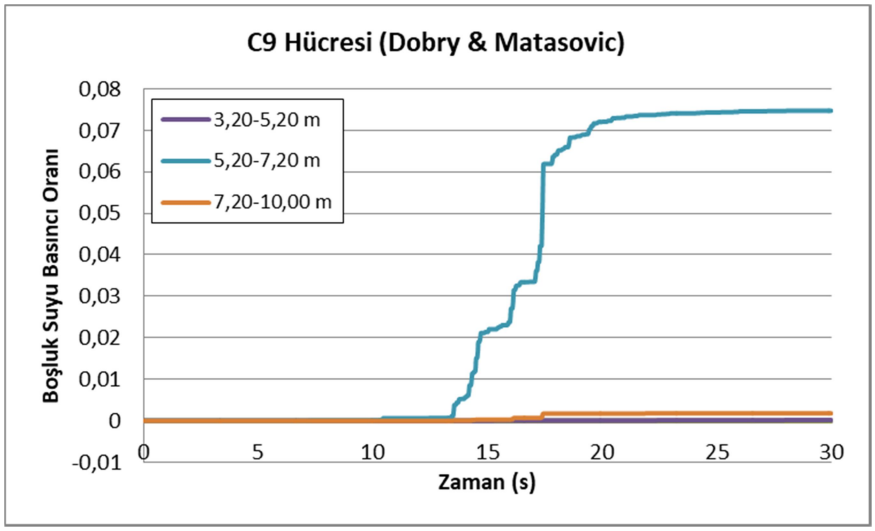
Şekil 7.14. G8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

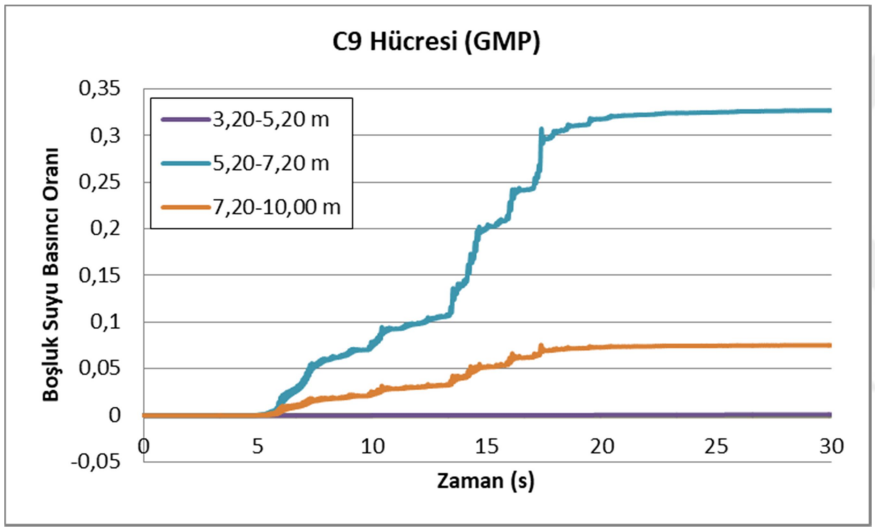


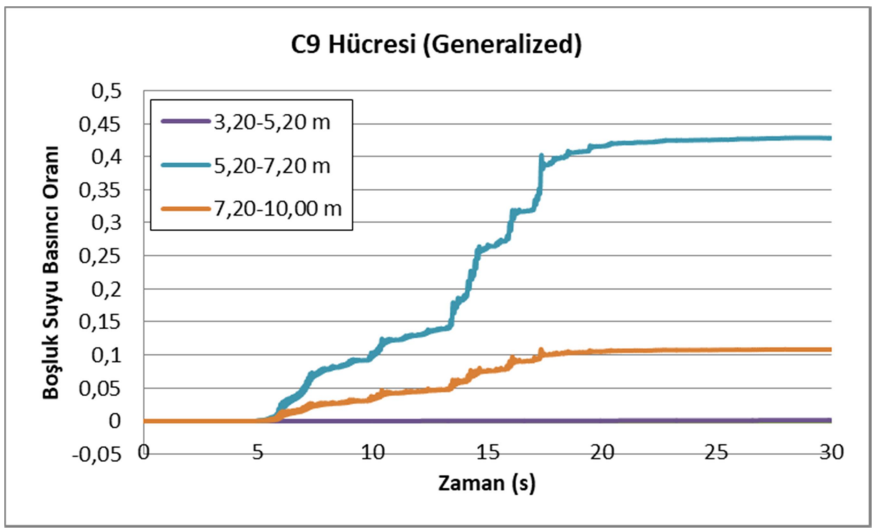




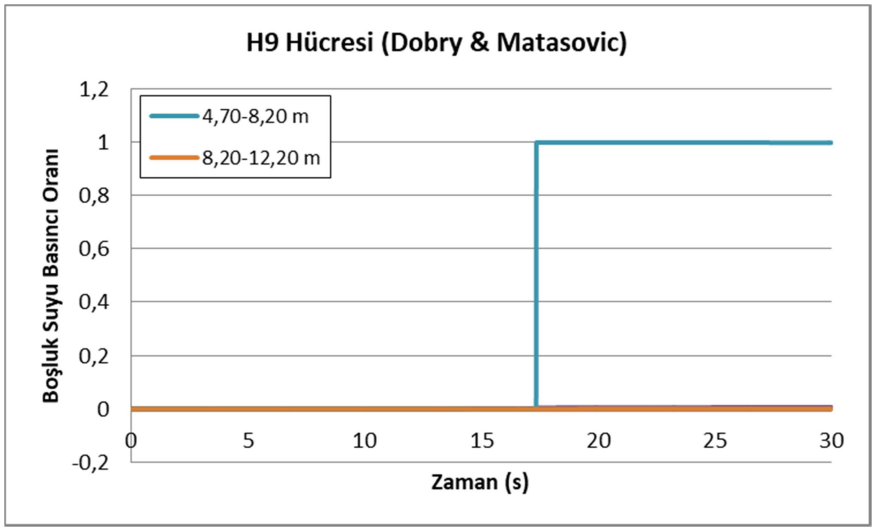
Şekil 7.15. L8 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

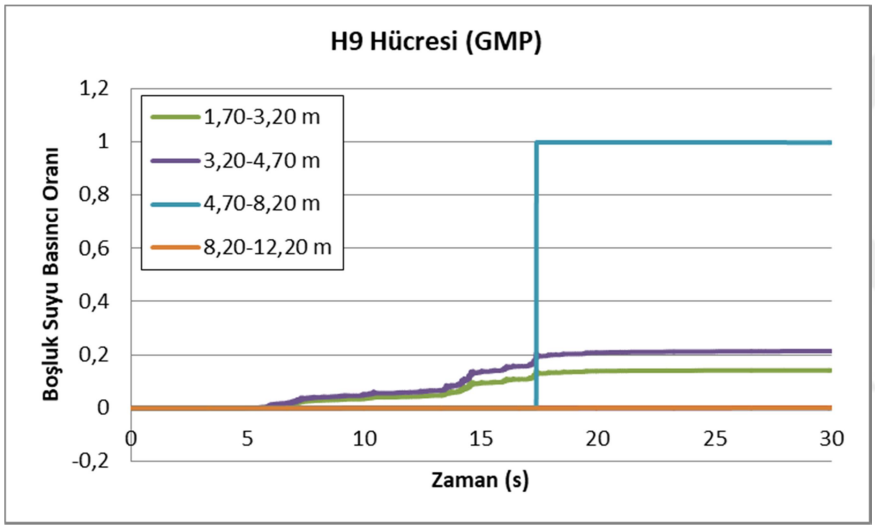


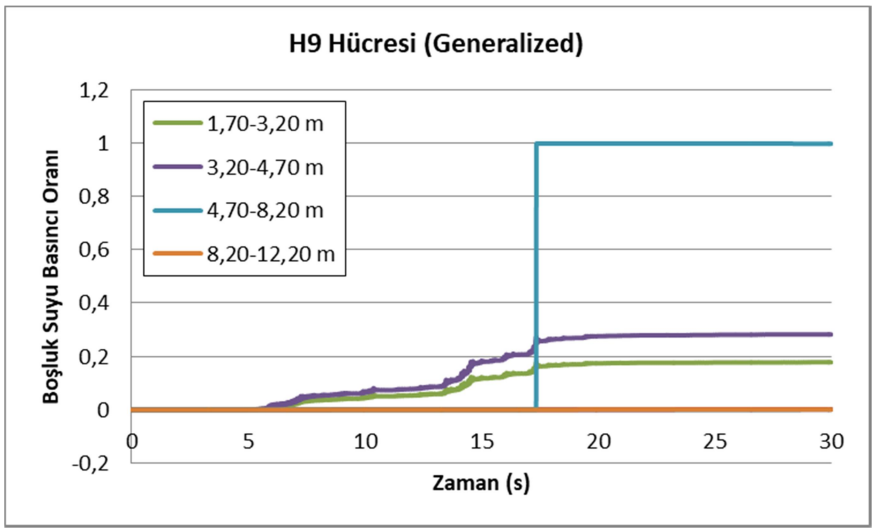




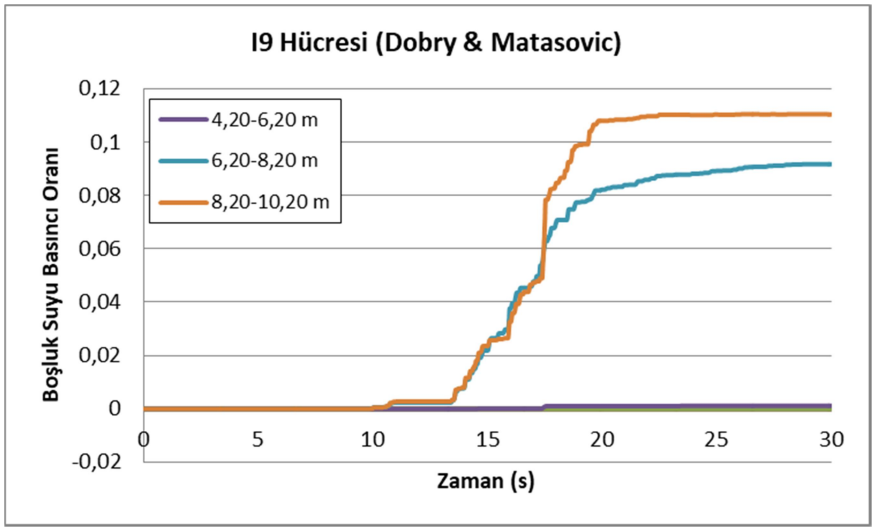
Şekil 7.16. C9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

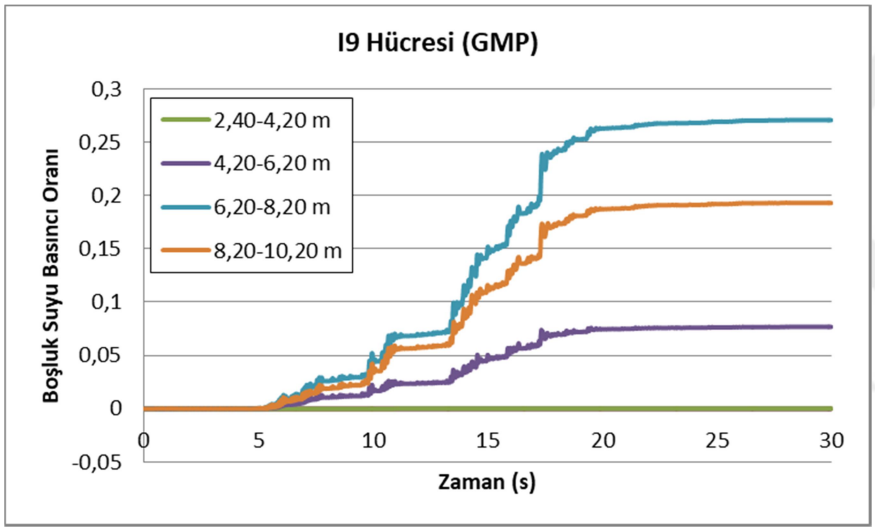


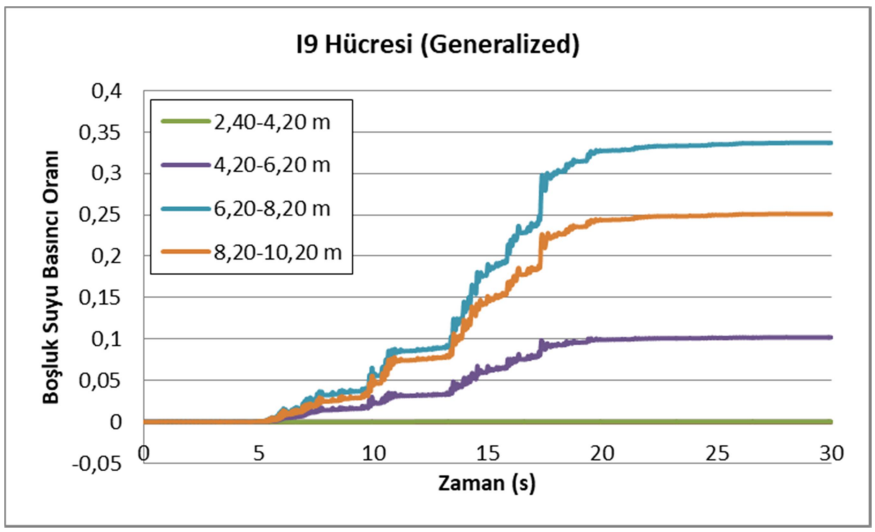




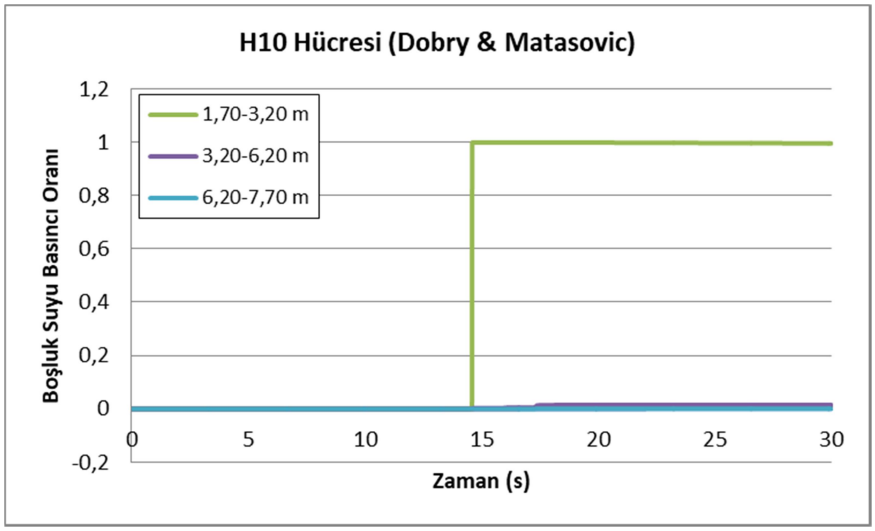
Şekil 7.17. H9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

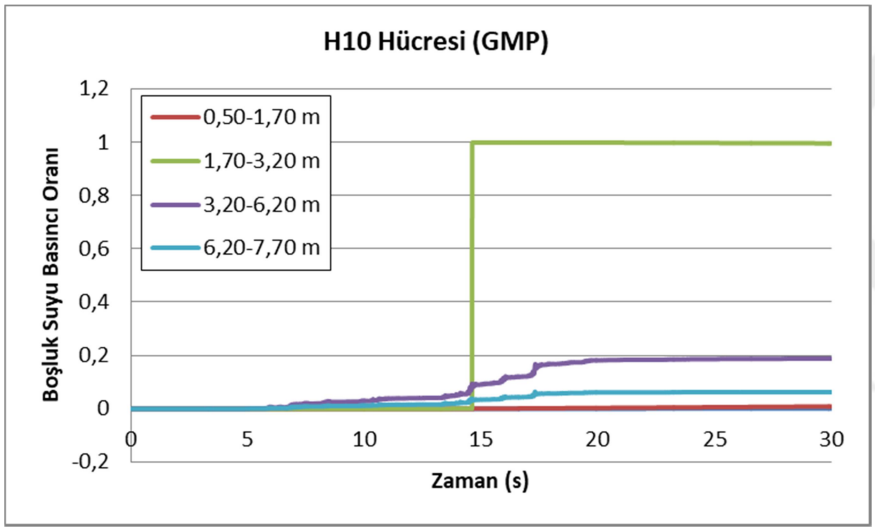


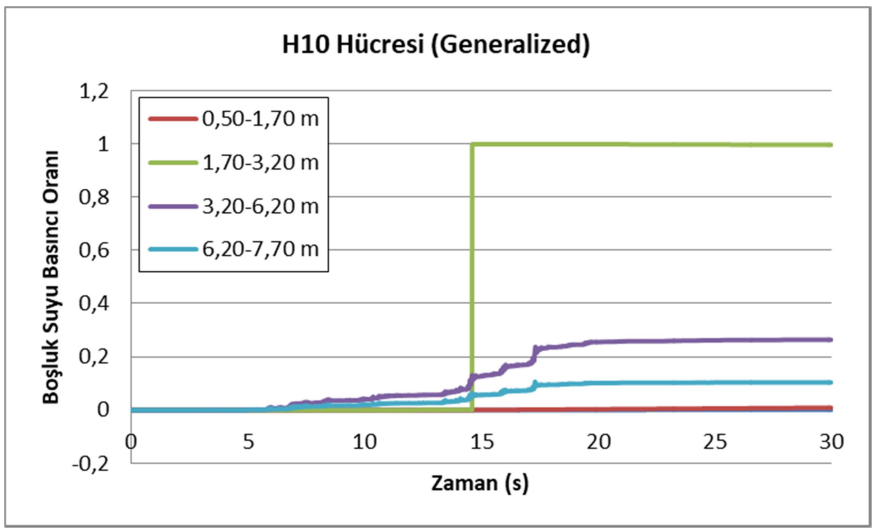




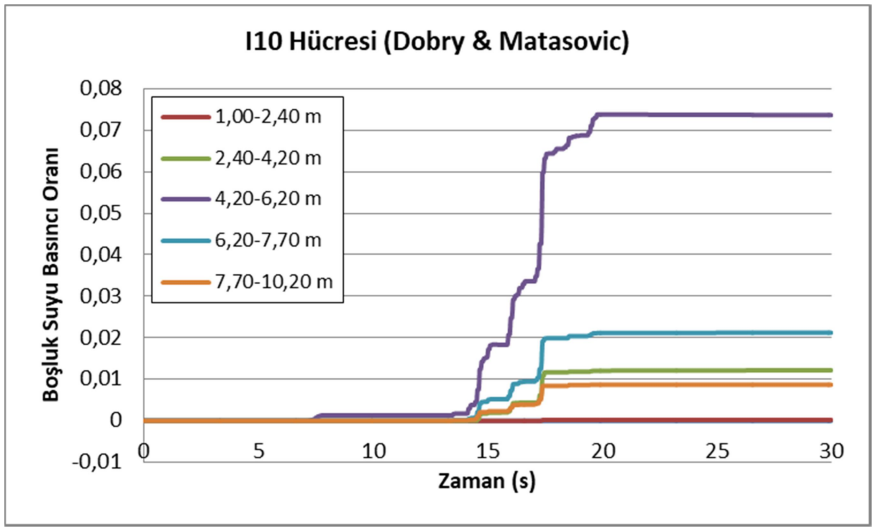
Şekil 7.18. I9 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

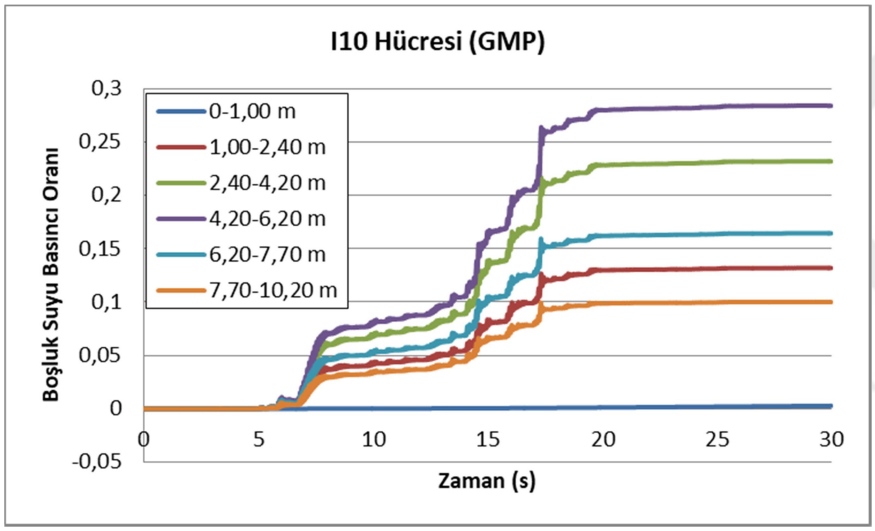


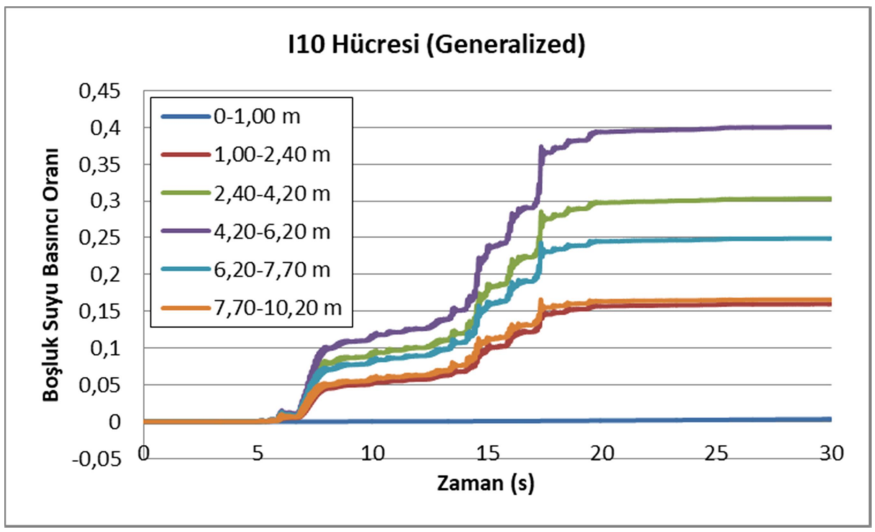




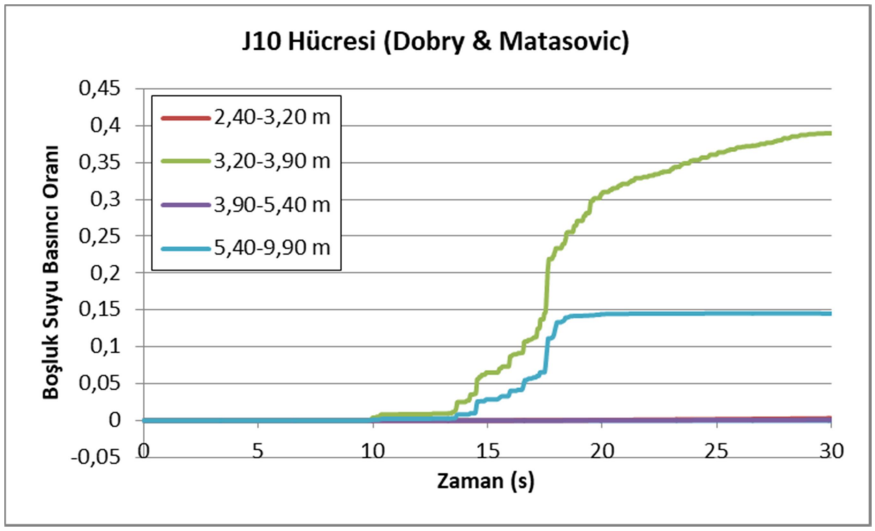
Şekil 7.19. H10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları

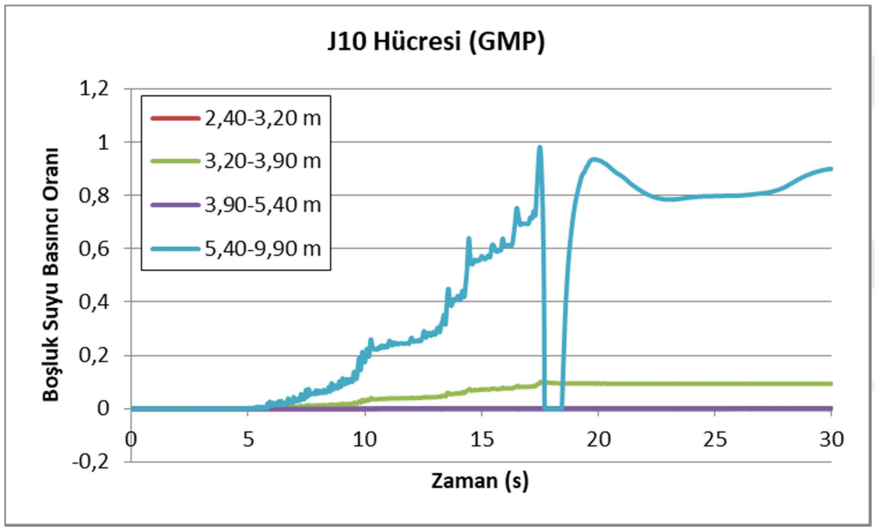


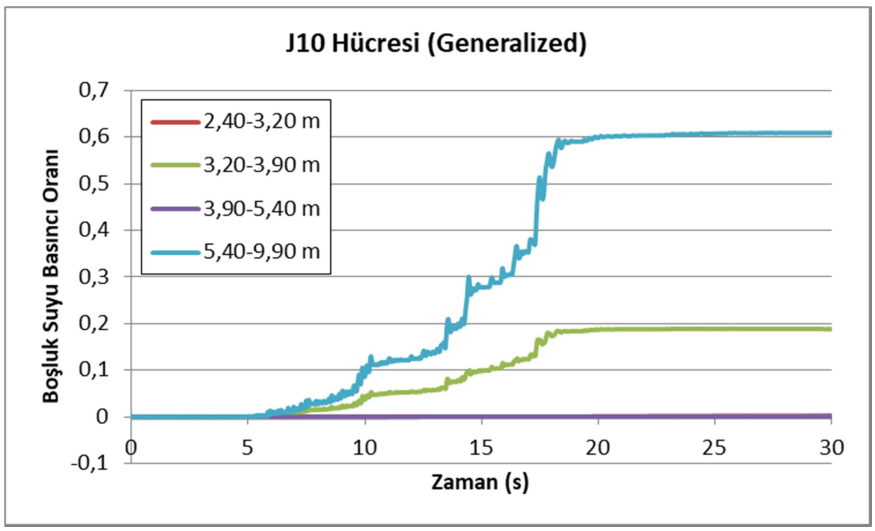




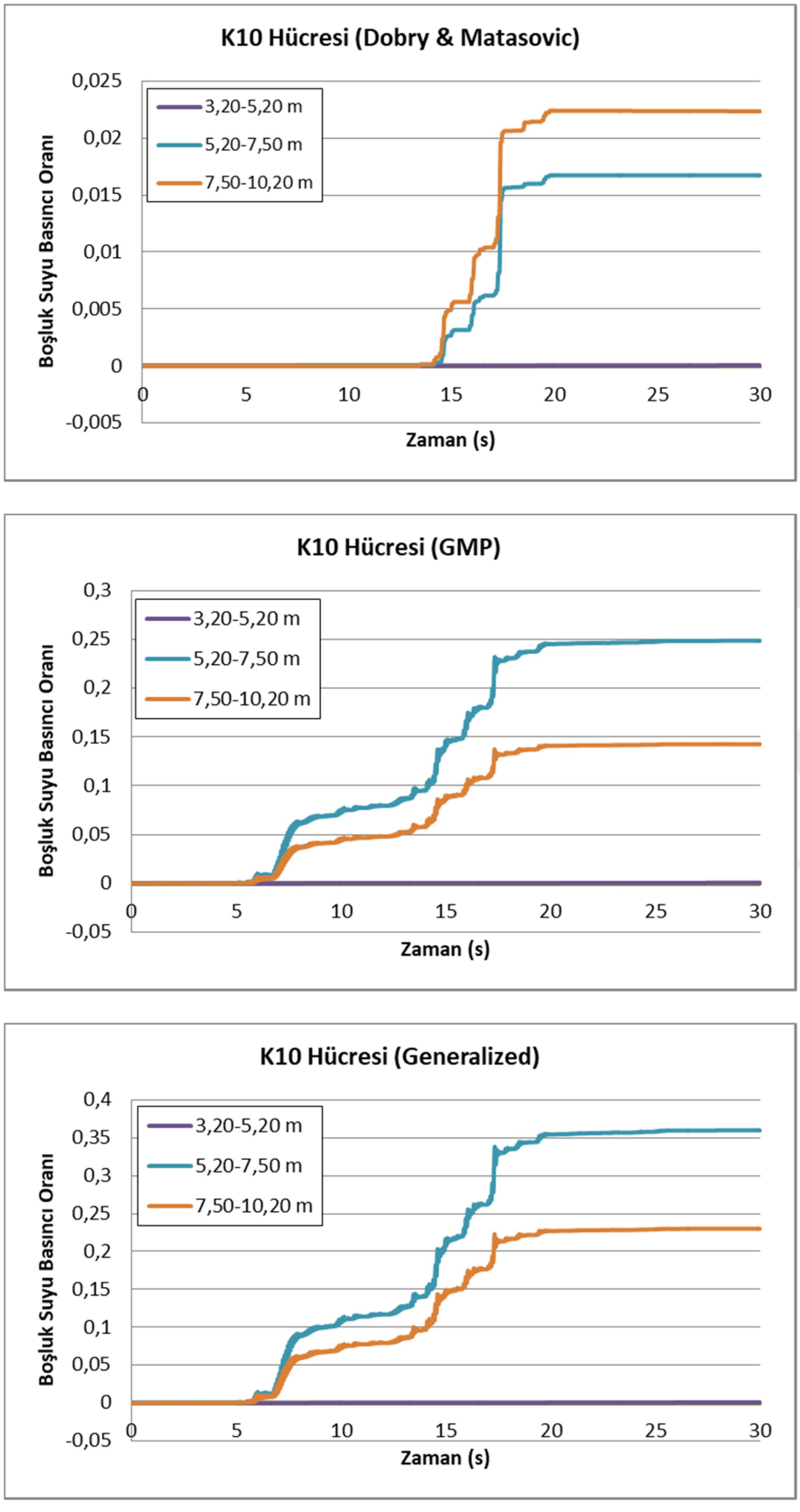
Şekil 7.20. I10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları



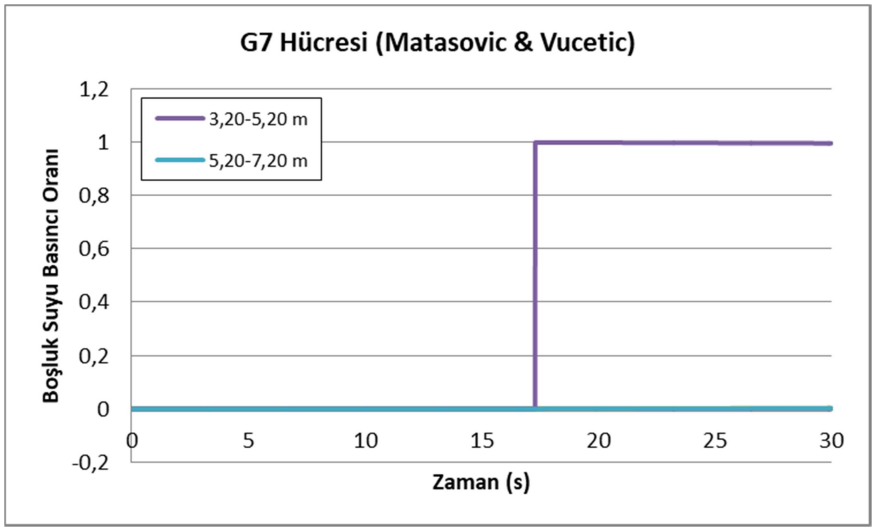




Şekil 7.21. J10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları



Şekil 7.22. K10 hücresi için sıvılaşma analizi sonuçları



Şekil 7.23. G7 hücresi için sıvılaşma analizi sonucu

DEEPSOİL programında zaman alanında bir boyutlu doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yöntemi ve buna bağlı aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modelleri kullanılarak gerçekleştirilen sıvılaşma analizleri sonucu elde edilen Şekil 7.6 ile Şekil 7.23 arasındaki aşırı boşluk suyu basıncı oranlarının zamana bağlı değişimini gösteren grafikler incelendiğinde; D7 hücresinde 1,50-1,70 m ve 1,70-3,20 m, G7 hücresinde 3,20-5,20 m, G8 hücresinde 4,20-6,20 m, H9 hücresinde 4,70-8,20 m, H10 hücresinde 1,70-3,20 m ve J10 hücresinde 5,40-9,90 m arasındaki derinliklerde yer alan tabakalarda aşırı boşluk suyu basıncı oranlarının yaklaşık 1 değerine ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar; D7, G7, G8, H9, H10 ve J10 hücrelerinde sıvılaşma meydana geldiğini göstermektedir. Diğer hücrelerdeki zemin tabakalarında ise aşırı boşluk suyu basıncı oranları 1 değerine ulaşmadığından, diğer bir deyişle efektif gerilmenin sıfır olması koşulu sağlanmadığından, bu tabakalarda sıvılaşma olayı görülmemiştir.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenen bu çalışma kapsamında, Eskişehir ili Çifteler İlçesi çalışma alanında yer alan ve sondaj verileri bulunan 18 adet hücre üzerinde doğrusal ve doğrusal olmayan zemin dinamik davranış analizleri ve sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylelikle, çalışma alanını oluşturan zeminlerin sıvılaşma potansiyeli her iki analiz yöntemi için incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında öncelikle, Çifteler Belediyesi için hazırlanan Jeolojik ve Jeoteknik Etüt raporundan ve Savaş vd. (2012) tarafından yapılan arazi ve laboratuar deney sonuçlarından elde edilen geoteknik verilerden yararlanılarak seçilen 18 hücre için temsili zemin profilleri oluşturulmuştur. İkinci aşamada, DEEPSOİL programı kullanılarak, oluşturulan temsili zemin profilleri üzerinde bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin dinamik davranış analizleri ile sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, eşdeğer doğrusal analizler sonucu elde edilen sıvılaşma potansiyel indeksi değerleri kullanılarak belirlenen sıvılaşma potansiyeli dereceleri, doğrusal olmayan zemin dinamik analizi ile birlikte gerçekleştirilen sıvılaşma analizi sonucu elde edilen boşluk suyu basıncı oluşum değerleri ile karşılaştırılmıştır.

DEEPSOİL programı ile gerçekleştirilen bir boyutlu eşdeğer doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) zemin dinamik analizleri sonucunda elde edilen ivme-zaman ve spektral ivme-peryot grafikleri incelendiğinde; eşdeğer doğrusal (lineer) analiz ile elde edilen maksimum yüzey ivme ve spektral ivme değerlerinin doğrusal olmayan (nonlineer) analize göre genelde bir miktar yüksek olduğu görülmüştür. Her iki analiz yöntemi kullanılarak elde edilen zemin büyütme oranları karşılaştırıldığında, eşdeğer doğrusal (lineer) analiz sonucunda doğrusal olmayan (nonlineer) analizlere göre genelde daha fazla zemin büyütme oranları elde edilmiştir. Bu durumun nedeni olarak, eşdeğer doğrusal (lineer) analizin, yüksek frekans aralığında ivme hesaplamasının yanı sıra zemin koşulları ve topoğrafik konum olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu değerlendirmelerin çalışma alanında yer alan tüm hücreleri kapsamadığı belirtilmelidir.

Çalışma alanında zemin dinamik analizlerinin yanı sıra, seçilen hücrelerin sıvılaşma potansiyelini belirlemek maksadıyla, bölgedeki jeolojik oluşumlar ve yeraltı suyunun konumu da göz önüne alınarak derinliğe bağlı olarak sıvılaşma analizleri gerçekleştirilmiştir. Sıvılaşma analizlerinde, Seed ve Idriss (1971) tarafından önerilen "Basitleştirilmiş Yöntem" ve "Nümerik Analiz Yöntemi" kullanılmıştır. Nümerik analizler, DEEPSOİL programının doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yönetimi içerisinde yer alan üç ayrı aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eşdeğer doğrusal analiz sonucu elde edilen maksimum yüzey ivmelerinin Basitleştirilmiş Yöntem ile birlikte kullanıldığı sıvılaşma analizi sonucunda, seçilen hücrelerde sıvılaşma potansiyelinin çok yüksek ve yüksek dereceli olduğu görülmüştür. DEEPSOİL programının içerisinde yer alan doğrusal olmayan (nonlineer) analiz yöntemi ve buna bağlı 3 ayrı aşırı boşluk suyu basıncı oluşum modeli ile gerçekleştirilen sıvılaşma analizlerinde ise eşdeğer doğrusal analizden farklı olarak sadece 5 hücrede sıvılaşma meydana geldiği ve kullanılan sıvılaşma modellerinin birbirinden farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Toplam gerilme esasına dayalı eşdeğer doğrusal analiz ve efektif gerilme esasına dayalı doğrusal olmayan (nonlineer) analiz sonuçları arasındaki farklılıklar, zeminin doğrusal olmama derecesine ve aşırı boşluk suyu basıncı faktörüne bağlı olarak değişmektedir.. Özellikle, aşırı boşluk suyu basıncının doğrusal olmayan zemin davranış analizlerinde göz önüne alınması, analiz sonuçları üzerinde etkili olmaktadır. Frekans tanım alanına dayanan eşdeğer doğrusal yöntem her ne kadar yer tepki analizlerinde yaygın olarak kullanılan bir yöntem olsa da, bu yöntemle elde edilen tepkilerin, zeminin doğrusal olmayan tepkileri olduğu düşünülmemelidir. Zeminin doğrusal olmayan tepkisini ifade eden kayma modülü ve sönüm oranı değerleri, efektif gerilme kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşdeğer doğrusal analiz yönteminde, bu değerlerin zaman içerisinde değişmediği varsayılmaktadır. Ancak, gerçekte bu değerler titreşim genliğinin değişmesine bağlı olarak zaman içerisinde değişmektedir. Bu nedenle; büyük boyuttaki yer sarsıntılarında, özellik de yumuşak ve sıvılaşabilir zeminlerde yapılacak bir boyutlu zemin dinamik davranış analizleri ile sıvılaşma analizlerinden güvenilir sonuçlar elde edebilmek için, eşdeğer doğrusal analize paralel olarak efektif gerilmeye dayalı doğrusal olmayan (nonlineer) analizin de yapılması önerilmektedir. İki analiz yönteminin karşılaştırılmasının, kullanıcının analizler sırasında oluşabilecek hataları hızlı bir şekilde tespit etmesine ve daha güvenilir sonuçlar elde etmesine yardımcı olacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M., Koohsari, H., 2014, Comparison of Equivalent Linear and Nonlinear Methods in Seismic Analysis of Liquefiable Site Response Due to Near-Fault İncident Waves: A Case Study, Arabian Journal of Geosciences, Volume 8 Issue 5, 3103-3118.

Andrews, D.C.A., Martin, G.R., 2000, Criteria for Liquefaction of Silty Soils, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand, p.1-8.

Ansal, A., 1999, Depremlerde Yerel Zemin Davranışları, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, Sayı: 384, s.64-68.

Arslan, H., Siyahi, B., 2006, A Comparative Study on Linear and Nonlinear Site Response Analysis, Environmental Geology, Volume 50 Issue 8, 1193-1200.

Aslan, R., 2010, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi (Kocaeli) Alanındaki Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 71 s.

Ateş, A., 2010, Manisa Saruhanlı İlçesi Zeminlerinin Sıvılaşma Potansiyelinin Arazi ve Laboratuvar Deneyleri İle İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 323 s.

Aydan Ö., Ulusay, R., Kumsak, H., Tuncay E., 2000, Site İnvestigation and Engineering Evaluation of The Düzce-Bolu Earthquake of November 12, 1999, Turkish Earthquake Foundation, TDV/DR 095-51, p.307.

Berrill, J.B., Davis, R.O., 1985, Energy Dissipation and Seismic Liquefaction of Sands: Revised Model, JSSMFE Soils and Foundations, 25(2), 106-118.

Bolisetti, C., Whittaker, A.S., Mason, H.B., Almufti, İ., Willford, M., 2014, Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis for Design and Risk Assessment of Safety-Related Nuclear Structures, Nuclear Engineering and Design, v.275, 107-121.

Boulanger, R.W, Idriss, I.M., 2006, Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 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, Vol. 130, Issue 7, p.673-685.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Carlton, B., 2014, An Improved Description of the Seismic Response of Sites with High Plasticity Soils, Organic Clays, and Deep Soft Soil Deposits, PhD Thesis, University of California, Berkeley, 845 p.

Cooke, H.G., 2000, Ground İmprovement for Liquefaction Mitigation at Existing Highway Bridges, PhD Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 372 p.

Çavuş, U.Ş., 2004, Deprem Sebebiyle Zeminlerin Sıvılaşma Potansiyelinin "Bulanık Mantık Modellemesi (Fuzzy Logic Modelling)" İle Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 126 s.

Çavuş, U.Ş., 2015, Zeminlerin Sıvılaşması ve Barajların Alüvyon Temellerinin Sıvılaşma Riskinin Pratik Değerlendirilmesi, DSİ Teknik Bülteni, 119, s.32-33.

Çelik, S.B., 2003, Denizli İli Merkezi Zeminlerinin Jeolojik, Jeoteknik Açıdan İncelenmesi ve Sıvılaşma Duyarlılığının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147 s.

Çetin, K.Ö., Unutmaz, B., 2004, Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 430-2004/2, s.33-34.

Darendeli, M.B., 2001, Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, The University of Texas, Austin, Texas.

Desai, S.S., Choudhury, D., 2015, Non-Linear Site-Specific Seismic Ground Response Analysis for Port Sites in Mumbai, India, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol.2, No.19, 733-736.

Duman, E.S., 2013, Erzincan İl Merkezi ve Çevresindeki Zeminlerin Standart Penetrasyon Deneyi Verileri Kullanılarak Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 154 s.

Ecemiş, N., 2011, Deprem Geotekniği: Zemin Sıvılaşması, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, s.64.

Erken, A., Özay, R., Kaya, Z., Ülker, M.B.C., Elibol, B., 2004, Depremler Sırasında Zeminlerin Sıvılaşması ve Taşıma Gücü Kayıpları, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 43-2014/3, s.20.

Erken, A., Özay, R., Ülker, R., 1997, Arazi Deneyleri ile Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi, Dördüncü Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, Ankara, s.91.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Evans, M.D., Zhou, S., 1995, Liquefaction Behaviour of Sand-Gravel Composites: Journal of Geotechnical Engineering, V.121, N.3, p.287-298.

Finn, W.D.L., Ledbetter, R.H., Wu, G., 1994, Liquefaction in Silty Soils, In S.Prakash and P.Dakoulos (editors), Ground Failures Under Seismic Conditions, American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication, 44, p.51-76.

Green, R.A., Mitchell, J.K., Polito, C.P., 2000, An Energy-Based Pore Pressure Generation Model for Cohesionless Soils, Proceedings: John Booker Memorial Symposium, Melbourne, Australia.

Groholski, D.R., Hashash, Y.M.A., Musgrove, M., Harmon, J., Kim, B. 2015, Evaluation of 1-D Non-linear Site Response Analysis Using A General Quadratic/Hyperbolic Strength-Controlled Constitutive Model, In 6ICEGE: 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand.

Gülerce, Z., Yılmaz, M.T., Huvaj, N., Sağlam, S., Sandıkkaya, A., vd., 2011, 23 Ekim 2011 Mw 7.2 Van Depremi Sismik ve Yapısal Hasara İlişkin Saha Gözlemleri, METU/EERC 2011-04 Raporu, 76 s.

Güngör, L., 2007, İzmir-Mavişehir Kuzey Üst Bölgesi Kapsamındaki Sıvılaşma Riskinin Teorik ve Uygulamalı Olarak Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 333 s.

Hashash, Y.M.A., 2009, DEEPSOIL V 3.7, Tutorial and User Manual, 2002-2009, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Hashash, Y.M.A., Duhee, P., 2001, Non-linear One-dimensional Seismic Ground Motion Propagation in the Mississippi Embayment, Engineering Geology, Vol.62, No.1-3, 185-206.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., vd., 2016, DEEPSOIL 6.1, User Manual.

Hashash, Y.M.A., Park, D., 2002, Viscous Damping Formulation and High Frequency Motion Propagation in Nonlinear Site Response Analysis, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.22, No.7, p.611-624.

Hashash, Y.M.A., Phillips, C., Groholski, D., 2010, Recent Advances in Non-linear Site Response Analysis, Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, Paper no.OSP 4, p.1-22.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hosseini, S.M.M.M., Pajouh, M.A., 2010, Comparative Study on the Equivalent Linear and the Fully Nonlinear Site Response Analysis Approaches, Arabian Journal of Geosciences, Volume 5 Issue 4, 587-597.

Idriss, I.M., Sun, J.I., 1992, SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis.

Ishihara, K., Takatsu, H., 1979, Effects of Overconsolidation and K_0 Conditions on the Liquefaction Characteristics of Sands, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.19, No.4, 59-68.

Iswanto, E.R., Yee, E., 2016, Comparison of Equivalent Linear and Non Linear Methods on Ground Response Analysis: Case Study at West Bangka Site, Jurnal Pengembangan Energi Nuklir, Vol. 18, No.1, 23-29.

Iwasaki, T., 1986, Soil l,quefaction Studies in Japan, State-of-Art, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, V.5, N.1, 2-68.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., vd., 1982, Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, Vol.3, In: Proceedings of 3rd İnternational Conference on Microzonation, Seattle, p.1319–1330.

İyisan, R., "Zeminlerde Kayma Dalgası Hızı ile Penetrasyon Deney Sonuçları Arasındaki Bağıntılar", İMO Teknik Dergi, 1187-1199, 1996.

Kaklamanos, J., Baise, L.G., Thompson, E.M., Dorfmann, L., 2015, Comparison of 1D Linear, Equivalent-Linear, and Nonlinear Site Response Models at Six Kik-Net Validation Sites, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v.69, 207-219.

Kaklamanos, J., Bradley, B.A., 2015, Evaluation of 1D Nonlinear Total-stress Site Response Model Performance at 114 KiK-net Downhole Array Sites, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Christchurch, New Zealand.

Kale, P., 2008, Yerel Arazi Etkilerinin Bir ve İki Boyutlu Analizlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 161 s.

Karanlık, S., 2006, Hatay Altınköy Çevresinin Zemin Sıvılaşma Riskinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 80 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kayen, R.E., Mitchell, J.K., Seed, R.B., Lodge, A., Nishio, S., vd., 1992, Evaluation of SPT, CPT and Shear Wave-Based Methods for Liquefaction Potential Assessment Using Loma Prieta Data, Proceedings, 4th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Vol.1, p.177-204.

Koç, G., 2007, Gölcük ve Çevresinin Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78 s.

Kondner, R.L., Zelasko, J.S., 1963, Hyperbolic Stress-strain Formulation of Sands, Second Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sao Paulo, Brazil, 289-324.

Kramer, S.L., 2003, Geoteknik Deprem Mühendisliği, (Çev.K.Kayabalı), Gazi Kitabevi, Ankara, s.277-457.

Lai, S., 1998, Rigid and Flexible Retaining Walls During Kobe Earthquake, International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, SOA-4, p.108-127.

Liao, S.S.C., Whitman, R.V., 1986, Overburden Correction Factor for SPT in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 3, p.373-377.

Masing, G., 1926, Eignespannungen und Verfestigung beim Messing, Second International Congress on Applied Mechanics, Zürich, Switzerland, 332-335.

Matasovic, N., 1993, Seismic Response of Composite Horizontally-layered Soil Deposits, Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, 452 p.

Matasovic, N., Vucetic, M., 1993, Cyclic Characterization of Liquefiable Sands, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.119, No.11, p.1805-1822.

Matasovic, N., Vucetic, M., 1995, Generalized Cyclic Degradation-Pore Pressure Generation Model for Clays, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.121, No.1, p.33-42.

Mirshekari, M., Ghayoomi, M., 2015, Simplified Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis of Partially Saturated Soil Layers, American Society of Civil Engineers, IFCEE 2015, 2131-2140.

Mollamahmutoğlu, M., Babuçcu, F., 2006, Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi, s.3-98.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Newmark, N.M., 1959, A Method of Computation for Structural Dynamics, Journal of the Engineering Mechanics Division, 85, 67-94.

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,

Özaydın, K., 2007, Zeminlerde Sıvılaşma, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, s.232-239.

Park D., Ahn, J.K., 2013, Accumulated Stress Based Model for Prediction of Residual Pore Pressure, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, p.1567-1570.

Phillips, C., Hashash, Y., 2009, Damping Formulation for Non-linear 1D Site Response Analyses, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, v.29, p.1143–1158.

Polito, C.P., Green, R.A., Lee, J.H., 2008, Pore Pressure Generation Models for Sands and Silty Soils Subjected to Cyclic Loading, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 134(10), 1490-1500.

Pruiksma, J.P., 2016, Nonlinear and Equivalent Linear Site Response Analysis for the Groningen Area, TNO 2016 R10460, 37 p.

Pyke, R.M., 1979, Nonlinear Soil Models for İrregular Cyclic Loadings, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 105(GT6), 715-726.

Rathje, E.M., Kottke, A.R., 2011, Relative Differences Between Equivalent Linear And Nonlinear Site Response Methods, 5th İnternational Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile.

Rayleigh, J.W.S., Lindsay, R.B., 1945, The Theory of Sound, Dover Publications, New York.

Robertson, P.K., Wride, C.E., 1998, Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using The Cone Penetration Test, Canadian Geotechnical Journal, Vol.35, No.3, p.442-459.

Rollins, K.M., Seed, H.B., 1990, Influence of Buildings on Potential Liquefaction Damage, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.116, No.2, 165-185.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Sağlam, M., 2008, Saruhanlı (Manisa) Belediyesi İmar Planına Esas Alanların Sıvılaşma Potansiyelinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 155 s.

Savaş, H., Tosun, H., Türköz, M., Orhan, A., Seyrek, E., 2012, Eskişehir Çifteler İlçesi Temel Zeminin Statik ve Dinamik Davranışının İncelenmesi, ESOGÜ-BAP "201015012" No'lu Proje Sonuç Raporu, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 90 s.

Seed, H.B., 1976, Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes, ASCE, Liquefaction Problems in Geotechnical Engineering, p.1-105.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1969, Influence of Soil Conditions on Ground Motions During Earthquakes, ASCE J Soil Mech Found Div., 95, 99-137.

Seed, H.B., Idriss, I.M., 1971, Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No SM9, Proc. Paper 8371, 1249-1273.

Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, R.M., 1985, Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12), 1425-1445.

Seed, H.B., Ugas, C., Lysmer, J., 1976, Site-Dependent Spectra for Earthquake Resistant Design, Bulletin of The Seismological Society of America, Vol 66, No 1, p.221-243.

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, California, p.4.

Selçuk, M.E., Kılıç, H., Özaydın, K., 2007, Kalın Zemin Çökellerinde Eşdeğer-Lineer ve Non-Lineer Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması, Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, s.197-198.

Skempton, A.K., 1986, Standard Penetration Test Procedures and The Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Aging and Overconsolidation, Geotechnique, London, Vol.36, No.3, p.425-447.

Sönmez, H., 2003, Modification of The Liquefaction Potential İndex and Liquefaction Susceptibility Mapping for A Liquefaction-Prone Area (İnegol-Turkey), Environmental Geology, 44(7), 862–871.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Stewart, J.P., Kwok, A.O., Hashash, Y.M.A., Matasovic, N., Pyke, R., vd., 2008, Benchmarking of Nonlinear Geotechnical Ground Response Analysis Procedures, Report PEER 2008/04, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, p.11-12.

Şaylan, F.S., 2006, Erzincan Ovasının Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 145 s.

Şen, G., 2004, Gümüşler Belediyesi Mücavir Alanının Sıvılaşma Analizi ve Coğrafi Bilgi Sisteminde Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147 s.

Tokimatsu, K., Yoshimi, Y., 1983, Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT-N Value and Fines Content, Soil and Foundations, Vol.23, No.4, p.56-74.

Tonaroğlu, M., 2006, Sıvılaşmanın Nümerik Yöntemlerle Modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 150 s.

Tosun, H., 2002, Dolgu Baraj Depremselliği ve Tasarım Esasları, DSİ Genel Müdürlüğü Yayınları, Ankara, s.45-74.

Ulusay, R., 2000, Zemin Sıvılaşması, Mavi Gezegen Popüler Yerbilim Dergisi, Sayı: 02, s.47-54.

Uyanık, O., 2002, Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 218 s.

Vucetic, M., 1990, Normalized Behavior of Clay Under İrregular Cyclic Loading, Canadian Geotechnical Journal, 27(1), 29-46.

Wang, W.S, 1979, Some Findings in Soil Liquefaction, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1-17.

Wei, L.M., Yang, J., 2014, On the Role of Grain Shape in Static Liquefaction of Sand-Fines Mixtures, Géotechnique, V.64, N.9, 740-745.

Yağcı, B., Mikrobölgeleme Metodolojileri ve Balıkesir için bir Uygulama, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Estitüsü, 2005.

Youd, T.L., 1993, Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement, NCEL Technical Note, N- 1862, p.32.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Youd, T.L., Idrıss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., vd., 2001, Liquefaction Resistance of Soils-Summary Report From The 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(4), 297-313.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., vd., 2001, Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Journal Of Geotechnical and Geoenviromental Engineering, ASCE, Vol.127, No.10, p.817-833.

Zhang, Y., Yao, S., Christie, S.R., 2013, Non-Linear and Equivalent Linear Site Response Analysis for The İzmit Bay Bridge, Cesedininse of the 3rd International FLACDEM Symposium, Hangzhou, P.R. China.