

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZEMİN DEĞİŞKENLERİNİN SIVILAŞMAYA ETKİSİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep KAYGUSUZ

2100001752

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Program: Geoteknik

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi N. Özge FERCAN

HAZİRAN 2025

T.C.
İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ZEMİN DEĞİŞKENLERİNİN SIVILAŞMAYA ETKİSİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep KAYGUSUZ

2100001752

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Program: Geoteknik

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi N. Özge FERCAN

Diğer Jüri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Erdal COŞKUN

Doç. Dr. Zülal Akbay ARAMA

HAZİRAN 2025

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
KISALTMALAR.....	III
TABLO LİSTESİ.....	IV
ŞEKİL LİSTESİ.....	V
SİMGE LİSTESİ.....	IX
KISA ÖZET	X
ABSTRACT.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Amaç	1
1.2 Kapsam.....	1
2. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ VE SIVILAŞMA	1
2.1. Sıvılaşmanın Tanımı	2
2.2. Sıvılaşma Kavramının Tarihi	2
2.3. Sıvılaşma Hesap Yöntemleri.....	3
2.3.1 Basitleştirilmiş Ampirik Sıvılaşma Değerlendirme Yöntemi.....	4
2.3.1.1. Sıvılaşma Potansiyeli.....	7
2.3.1.2. Sıvılaşma Şiddeti.....	8
2.3.2. Bir Boyutlu (1-D) Saha Tepki Analizi Yöntemi	9
2.3.2.1. Doğrusal Olmayan Analiz.....	10
2.3.2.2. Doğrusal Olmayan Zemin Modelleri.....	13
2.3.2.2.1 Dobry ve Matasovic Modeli.....	14
2.3.2.2.2. Matasovic ve Vucetic Modeli.....	15
2.4. Zeminin Sıvılaşma Davranışını Etkileyen Faktörler.....	17
3. SAHA- ZEMİN ÖZELLİKLERİ	24
3.1 Deprem Yer Hareketi Seçimi	24
3.2. Zemin Özellikleri	27
4. DEEP SOIL İLE 1-BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN NÜMERİK ANALİZ... 35	
5. SIVILAŞMA ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	39
5.1. Kayma Dalga Hızının Etkisi	39
5.1.1. Deprem İvme Kaydı 0.23 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi	39

5.1.2. Deprem İvme Kaydı 0.46 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi.....	52
5.1.3 Deprem İvme Kaydı 0.69 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi	65
5.1.4 Deprem İvme Kaydı 0.92 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi	77
5.2. Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi	90
5.3. Kum Tabaka Kalınlığının Etkisi	97
5.4. Deprem Büyüklüğünün Etkisi.....	101
6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	109
6.1. 1-Boyutlu Ampirik Oturma Hesabı.....	111
7. BULGULAR	115
7.1. Kayma Dalga Hızı Etkisi	115
7.2. Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi	119
7.3. Kum Tabaka Kalınlığı Etkisi	122
7.4. Deprem Yer Hareketi Büyüklüğünün Etkisi	125
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	129
KAYNAKÇA.....	132

KISALTMALAR

- AFAD** : Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı
PSA : Maksimum spektral ivme
SASW : Yüzey dalgalarının spektral analizi
SK : Sondaj kuyusu
TBDY : Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TDTH : Türkiye deprem tehlike haritaları
CPT : Konik penetrasyon deneyi
CSR : Çevrimli gerilme oranı
CRR : Çevrimli dayanım oranı
ESP : Tabakalı zemin profili
FC : İnce tane oranı
FS : Sıvılaşma güvenlik faktörü
IR : Sıvılaşma riski indisi
LBS : Sıvılaşma kaynaklı bina oturma indisi
LPI : Sıvılaşma potansiyeli indisi
LS : Sıvılaşma şiddeti indisi
MSF : Magnitüt ölçeklendirme faktörü
PGA : Pik yer ivmesi
SPT : Standart penetrasyon deneyi
SPT-N : Standart penetrasyon deneyi son 30 cm penetrasyon sağlayan darbe sayısı toplamı

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 SPT Düzeltme Katsayıları	6
Tablo 2.2 LPI Sıvılaşma Potansiyel Derecesi.....	8
Tablo 2.3 Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) sınıflaması (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005)	9
Tablo 2.4 Deep Soil Modellerinde Değişkenler	14
Tablo 3.1 Seçilen Zemin Özellikleri.....	29
Tablo 4.1 Hesaplarda Kullanılan Zemin Modeli Değişkenleri.....	36
Tablo 4.2 Hesaplarda Kullanılan Zemin Değişkenlerinin Özet Gösterimi.....	36
Tablo 6.1 Yüzeyde ölçülen PGA değerlerinin hesap no ile değişimi.....	109
Tablo 6.2 Zemin profilleri boyunca ölçülen maksimum birim şekil değiştirme değerleri	110
Tablo 6.3 Sıvılaşan tabakaların hesap numaralarına göre değişimi.....	110
Tablo 6.4 Anpirik yaklaşıma göre elde edilen oturma miktarları.....	113
Tablo 6.5 H1 Profili için oturma hesabı	113

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sıvılaşma kaynaklı oturma gözlemlenmiş bir yapı (Gölbaşı, Adıyaman, 2023 Kahramanmaraş Depremleri).....	1
Şekil 2.2 Kayma dalgası hızı ile sıvılaşma ilişkisi (Andrus and Stokoe, 2000)	7
Şekil 2.3 Genişletilmiş Masing kuralları: (a) kayma gerilmesinin zamanla değişimi; (b) sonuçta ortaya çıkan gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer, 1996).....	11
Şekil 2.4 Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizlerinde Yöntemlerin Dinamik Özelliklere Etkisi (Hashash vd., 2010).....	11
Şekil 3.1 DEEPSOIL’de Deprem Kayıtları Seçimi	24
Şekil 3.2 0.23g’ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri	25
Şekil 3.3 0.46g’ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri	25
Şekil 3.4 0.69g’ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme- Zaman Grafikleri	26
Şekil 3.5 0.92g’ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri	26
Şekil 3.6 Deprem Kayıtlarının İvme- Zaman Grafiği.....	27
Şekil 3.7 Deprem Kayıtlarının Fourier Genlik-Zaman Grafiği	27
Şekil 3.8 Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Azalım Eğrileri (Darendeli, 2001)	28
Şekil 3.9 H1-H12 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği	31
Şekil 3.10 H13-H24 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği	32
Şekil 3.11 H25-H36 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği	33
Şekil 3.12 Genelleştirilmiş Zemin Profili	34
Şekil 4.1 Analiz yöntemi seçimi	35
Şekil 4.2 Kum tabakalar için zemin modelinin tanımlanması	37
Şekil 4.3 Kil tabakalar için zemin modelinin tanımlanması.....	37
Şekil 4.4 Zemin profili zemin değerleri grafikleri	38
Şekil 5.1 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)	40
Şekil 5.2 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)	41
Şekil 5.3 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=7.50m$)	42

Şekil 5.4 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=7.50m$)	43
Şekil 5.5 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)	44
Şekil 5.6 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı) .	45
Şekil 5.7 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Deprem Kaydı) .	46
Şekil 5.8 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı) .	47
Şekil 5.9 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Deprem Kaydı).....	48
Şekil 5.10 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)...	49
Şekil 5.11 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Deprem Kaydı).....	50
Şekil 5.12 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)...	52
Şekil 5.13 PGA-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)	53
Şekil 5.14 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)	54
Şekil 5.15 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)	55
Şekil 5.16 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)	56
Şekil 5.17 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı) ...	57
Şekil 5.18 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı) ..	58
Şekil 5.19 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı) ..	59
Şekil 5.20 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı) ..	60
Şekil 5.21 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı).....	61
Şekil 5.22 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı).....	62
Şekil 5.23 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı).....	63
Şekil 5.24 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı).....	64
Şekil 5.25 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)	65
Şekil 5.26 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)	66
Şekil 5.27 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)	67
Şekil 5.28 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)	68
Şekil 5.29 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı) ..	69
Şekil 5.30 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)	70
Şekil 5.31 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)	71

Şekil 5.32 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)	72
Şekil 5.33 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı).....	73
Şekil 5.34 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)...	74
Şekil 5.35 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı).....	75
Şekil 5.36 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)...	76
Şekil 5.37 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)	78
Şekil 5.38 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)	79
Şekil 5.39 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)	80
Şekil 5.40 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)	81
Şekil 5.41 Birim Şekil Değişirme-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)...	82
Şekil 5.42 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)	83
Şekil 5.43 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)..	84
Şekil 5.44 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)	85
Şekil 5.45 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı).....	86
Şekil 5.46 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)...	87
Şekil 5.47 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı).....	88
Şekil 5.48 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)...	89
Şekil 5.49 YASS Değişimine Bağlı PGA- Derinlik Grafiği.....	91
Şekil 5.50 YASS Değişimine Bağlı Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği	92
Şekil 5.51 YASS Değişimine Bağlı Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği.....	93
Şekil 5.52 YASS Değişimine Bağlı PGA- Derinlik Grafiği.....	94
Şekil 5.53 YASS Değişimine Bağlı Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği	95
Şekil 5.54 YASS Değişimine Bağlı Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği.....	96
Şekil 5.55 Kum tabakası kalınlığı değişiminin zemin profili boyunca PGA-dağılımına etkisi	98
Şekil 5.56 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği.....	99
Şekil 5.57 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği	100

Şekil 5.58 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m).....	102
Şekil 5.59 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m).....	103
Şekil 5.60 Birim Deformasyon- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m).....	104
Şekil 5.61 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m).....	105
Şekil 5.62 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)	106
Şekil 5.63 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)	107
Şekil 6.1 Maksimum Kayma Birim Şekil Değiştirme- Hacimsel Şekil Değiştirme Grafiği (Ishihara ve Yoshimine, 1992).....	112
Şekil 7.1 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği Karşılaştırması	116
Şekil 7.2 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği Karşılaştırması	117
Şekil 7.3 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=5m$).....	118
Şekil 7.4 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=7.5m$)..	118
Şekil 7.5 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=10m$)...	119
Şekil 7.6 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=15m$)...	119
Şekil 7.7 PGA-Derinlik ve Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafikleri Karşılaştırma ..	120
Şekil 7.8 Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği Karşılaştırması	121
Şekil 7.9 PGA- Derinlik Grafiği Karşılaştırması.....	121
Şekil 7.10 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği.....	122
Şekil 7.11 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği	123
Şekil 7.12 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=100m/s$)	124
Şekil 7.13 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=125m/s$)	124
Şekil 7.14 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=150m/s$)	125
Şekil 7.15 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=175m/s$)	125
Şekil 7.16 PGA-Derinlik Grafiği Karşılaştırması.....	126
Şekil 7.17 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Derinlik Grafikleri Karşılaştırması..	127
Şekil 7.18 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği.....	128

SİMGE LİSTESİ

- D_r** : Rölatif sıklık
 D_{50} : Tanelerin ağırlıkça 50%'sinin geçtiği ortalama dane boyutu
 e : Boşluk oranı
 e_{min} : Minimum boşluk oranı
 e_{max} : Maksimum boşluk oranı
 g : Yerçekimi ivmesi
 I_c : Zemin davranış tipi indisi
 M_w : Deprem magnitüdü
 P_a : Atmosfer basıncı
 R_d : Gerilme azalım faktörü
 r_u : Boşluk suyu basıncı oranı
 u : Boşluk suyu basıncı
 U_c : Üniformluk katsayısı
 PI : Plastisite indisi
 c_u : Drenajsız kayma mukavemeti
 a_{max} : Maksimum spektral ivme
 A_g : Spektral zemin büyütmesi
 G : Kayma modülü
 ρ : Yoğunluk
 T_g : Maksimum spektral zemin büyütmesi değeri görülen periyot
 T_n : Zemin profili doğal periyodu
 T_s : Yüzey tepki spektrumundaki hakim periyot
 V_s : Kayma dalgası hızı
 σ_{v0}' : Düşey efektif jeolojik gerilme
 ν : Poisson oranı
 η : Viskozite
 w : Su muhtevası
 ΔW : Bir histeretik döngüde kaybolan enerji
 W_e : Bir histeretik döngüde depolanan maksimum deformasyon enerjisi
 τ : Kayma gerilmesi
 τ_c : Herhangi bir deformasyon anındaki kayma gerilmesi
 γ : Kayma deformasyonu
 γ_c : Herhangi bir deformasyon anındaki kayma deformasyonu
 S_r : Doygunluk derecesi
 N : Çevrim sayısı

Enstitüsü : Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Dalı : İnşaat Mühendisliği
Programı : Geoteknik
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi N. Özge FERCAN
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Haziran 2025

KISA ÖZET

ZEMİN DEĞİŞKENLERİNİN SIVILAŞMAYA ETKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Zeynep Kaygusuz

Deprem kaynaklı yer hareketine maruz kalanyeraltı su seviyesinin altındaki suya doygun zemin tabakalarında sıvılaşma potansiyeli oluşmaktadır. Sıvılaşma kaynaklı zemin taşıma gücü yenilmeleri ve oturmalar deprem sırasında ve sonrasında yeraltı ve yerüstü yapılarında ciddi hasara sebep olmaktadır. Bu tez kapsamında, çeşitli zemin değişkenlerinin ve deprem yer hareketlerinin sıvılaşma davranışına etkisini belirlemek amacıyla bir dizi doğrusal olmayan zemin tepki analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekçi zemin profilleri oluşturularak, yeraltı su seviyesinin konumu, kum tabaka kalınlığı, zeminin dinamik özellikleri ve deprem ivme büyüklüğünün bir boyutlu dalga yayılımı teorisine dayanan sayısal hesap yöntemi ile sıvılaşmaya etkisi araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: sıvılaşma, doğrusal olmayan analiz, zemin büyütmesi, boşluk suyu basıncı, deprem ivme kaydı

University : Istanbul Kültür University
Institute : Institute of Graduate Studies
Department : Civil Engineering
Programme : Geotechnics
Supervisor : Assis.Prof.Dr. N. Özge FERCAN
Degree Awarded and Date : M.Sc – June 2025

ABSTRACT

ASSESSMENT OF SOIL VARIABLES FOR LIQUEFACTION

Zeynep Kaygusuz

Liquefaction potential occurs in water-saturated soil layers below the underground water level exposed to earthquake-induced ground motion. Liquefaction-induced soil bearing capacity failures and settlements cause serious damage to underground and aboveground structures during and after earthquakes. In this thesis, a series of nonlinear soil response analyses were performed to determine the effect of various soil variables and earthquake ground motions on liquefaction behavior. Realistic soil profiles are created and the effect of the location of groundwater level, sand layer thickness, dynamic properties of the soil and earthquake acceleration magnitude on liquefaction is investigated by numerical calculation method based on one-dimensional wave propagation theory.

Key Words: liquefaction, nonlinear analysis, soil amplification, pore water pressure, earthquake acceleration record

1. GİRİŞ

1.1 Amaç

Zeminlerin statik yükler altındaki davranışının yanı sıra dinamik yükler altındaki davranışını belirlemek deprem riski taşıyan bölgelerde büyük önem taşımaktadır. Türkiye bölgesel olarak aktif tektonik bir rejim altında sürekli olarak deprem yer hareketine maruz kalmakta, can kayıplarının yanında çok büyük maddi ve manevi hasara uğramaktadır. Dönemin şartname ve standartlarına uygun olmayan şekilde tasarlanan yapılarda zemin ve yapısal kaynaklı hasarlar meydana gelebilmektedir. Zeminin fiziksel, mekanik ve dinamik özelliklerini belirlemek ve sahaya özel yapısal tasarımı belirlemek İnşaat Mühendisliğinin bir alt branşı olan Geoteknik Deprem Mühendisliğinin ana amacını oluşturmaktadır. Deprem yer hareketi altında suya doygun gevşek kumlu zeminlerde ani yükselen ve hızlı sönmelenemeyen boşluk suyu basınçlarının efektif gerilmeleri aşmasıyla beraber zemin mukavemetini tamamen kaybetmekte ve akışkan bir sıvı gibi davranarak “Sıvılaşma” olayı gerçekleşmektedir. Bu çalışma kapsamında, dinamik etkiler altındaki zemin davranışlarından biri olan sıvılaşma konusu ve sıvılaşmayı etkileyen kum tabaka kalınlığı ve kayma dalga hızı, yer altı su seviyesi (YASS) derinliği vb. zemin değişkenleri incelenmiştir. Deprem yer hareketi büyüklüğüne göre sıvılaşma derecesini ifade eden zeminde gelişen artık boşluk suyu basıncı (boşluk suyu basıncı oranı- r_u), sıvılaşan tabaka kalınlığı ve zemin tabakalarında oluşan maksimum birim kayma deformasyonları bir boyutlu nümerik yöntem ile hesaplanmış, buna bağlı olarak ampirik bir yaklaşımla sıvılaşma sonrası düşey yönde oluşan oturma değerleri elde edilmiştir. Bu parametrik çalışma ile edilen sonuçlar değerlendirilerek, zemin rijitliğinin, deprem anakaya ivme kaydı büyüklüğünün, sıvılaşabilir tabaka kalınlığının ve yeraltı su seviyesinin sıvılaşmaya etki dereceleri belirlenmiş, bu zemin değişkenlerine bağlı olarak sıvılaşma sonrası oturmanın belirlenebileceği ampirik bir korelasyon önerilmiştir.

1.2 Kapsam

Yoğun sismik aktiviteye sahip ülkemizde yerleşim alanlarının yer aldığı zayıf zemin koşulları göz önünde bulundurulduğunda, sıvılaşma potansiyelinin saha ve zemin incelemeleri ile önceden tespit edilmesi ve buna bağlı olarak gerekli önlemlerin alınması önem arz etmektedir. Sıvılaşma riskinin tespiti için ilgili standart ve

şartnamelerde belirtilen ampirik yaklaşımlar ile zemin etüdü ve geoteknik araştırmalardan elde edilen veriler kullanılarak sıvılaşma analizleri yapılabilir. Bu çalışma kapsamında ise, ince dane oranı içeriğine sahip olan kumlu zemin tabakalarının kayma dalgası hızı (V_s), tabaka kalınlığı, yeraltı su seviyesi (YASS) gibi özelliklerinin sıvılaşmaya etkisi 1-boyutlu dalga yayılımı teorisi kullanılarak doğrusal olmayan zemin tepki analizi ile incelenmiştir. Ayrıca, her bir kayma dalgası hızı, tabaka kalınlığı ve yeraltı su seviyesi değişkenleri sabit tutularak deprem yer hareketi büyüklüğünün de sıvılaşmaya etki incelenmiştir. Çalışma kapsamında, kum tabakası en üstte yer almak üzere, kum ve kil tabakalarının ardalanmasından oluşan zemin profilleri üretilerek, sıvılaşma hesaplarında 1-boyutlu zemin tepki analizi yapan DEEPSOIL V7.1.8 (2024) yazılımı kullanılmıştır. 1-boyutlu zemin tepki analizinde zemin tabakaları birbirine paralel olarak yer almakta ve yanal olarak sonsuz bir ortamı temsil etmektedir. 1-boyutlu dalga yayılımı denklemi yalnızca yanal deplasmanlar ve birim kayma şekil değiştirmelerin ölçülmesine imkan tanımaktadır. Çalışmada zeminin sıvılaşma davranışını gözlemleyebilmek için boşluk suyu basıncını modellemeye olanak sağlayan doğrusal olmayan hesap modülü ve zemin modelleri kullanılmıştır. Analiz sonuçları incelenen zemin değişkenlerine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Zemin profili boyunca elde edilen maksimum birim kayma şekil değiştirme değerlerine bağlı olarak ise Ishiara ve Yoshimine (1992)'nin önerdiği hacimsel birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve zemin profili boyunca zemin değişkenlerinin sıvılaşma sonrası oturmayı nasıl etkilediği incelenmiştir.

2. ZEMİNLERİN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ VE SIVILAŞMA

Deprem sırasında en çok tartışmaya neden olan zemin dinamik davranışlarından biri de karmaşık bir olgu olan sıvılaşmadır. Sıvılaşma sonucunda zeminde taşıma gücü kaybı buna bağlı olarak yapı temelinde oturma ve dönme oluşabilirken, az eğimli suya doymun geniş arazilerde yanal yayılma davranışı gözlenebilmektedir (Kramer, 1996), (Şekil 2.1). Ülkemizde son olarak meydana gelen $M_w=7.7$ ve $M_w=7.6$ büyüklüğündeki 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinde sıvılaşma gözlemlenmiş ve zemin iyileştirme işlemi yapılan sahalarda bile yapısal hasar olduğu görülmüştür. Gökdoğan vd. (2024)'nin Adıyaman İli Gölbaşı İlçesi müftülük binasındaki incelemesine göre, bina temelinin fore kazıklar ile güçlendirilmiş olmasına rağmen deprem sonrası yapı temelinde oturma meydana geldiği anlaşılmıştır (Şekil 2.1). Bu örnek göz önünde bulundurulduğunda, sıvılaşma potansiyelinin uygun bir yöntem ile tespit edilmesi ve sahaya özel çözümün önerilmesi büyük önem arz etmektedir. Ampirik yaklaşımların hızlı ve pratik kullanım açısından tercih edilmelerine karşın, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yaklaşık değerlendirmeler vermekte ve yeterli gelmeyebilmektedir. Bu amaçla, bu tez kapsamında ampirik yaklaşımdaki değerlendirme kriterlerini de kapsayan zemin değişkenlerinin sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkisi 1-boyutlu dalga yayılımı teorisini kullanan doğrusal olmayan nümerik hesap yöntemi ile değerlendirilmiş, 1-boyutlu oturmaya etkisi araştırılmıştır.



Şekil 2.1 Sıvılaşma kaynaklı oturma gözlemlenmiş bir yapı (Gölbaşı, Adıyaman, 2023 Kahramanmaraş Depremleri)

2.1.Sıvılaşmanın Tanımı

Sıvılaşma, kohezyonsuz zeminlerde drenajsız yükleme durumunda oluşan aşırı boşluk suyu basıncı olarak tanımlanmaktadır. Suya doygun ve kohezyonsuz zeminlerin çevrimsel dinamik yüke maruz kalması ile sıkılaşıma meydana gelmekte, boşluk suyu basıncı artmaktadır. Boşluk suyu basıncının artması ise efektif gerilmenin azalmasına neden olarak zeminin mukavemetini kaybederek bir sıvı gibi davranmasına sebep olmaktadır. Sıvılaşmanın çoğunlukla kum ve siltli zeminlerde meydana geldiği bilinmektedir (Kramer, 1996).

Kramer (1996), sıvılaşmayı akma sıvılaşması ve çevrimsel hareketlilik olarak iki ana başlıkta incelemiştir. Statik kayma gerilmesinin sıvılaşan zeminin kayma dayanımından büyük olduğu ve büyük deformasyonlara sebep olan sıvılaşma, akma sıvılaşması olarak tanımlanmıştır. Çevrimsel hareketlilik ise statik kayma gerilmesinin sıvılaşan zeminin kayma gerilmesinden küçük olduğu durumlarda gerçekleşerek büyük ve kalıcı deformasyonlara neden olmaktadır. Çevrimsel hareketliliğin sebep olduğu deformasyonlara yanal yayılma da denilmektedir. Yanal yayılma hem düz alanlarda (az eğimli), hem de yapılaşmanın olduğu bölgelerde ciddi deformasyonlara neden olmaktadır. Çevrimsel hareketliliğin bir diğer türü olan düz yüzey sıvılaşması ise; aşırı boşluk suyu basıncının deprem sonrasında sönmelenmesi esnasında suyun zemin ile beraber yukarı doğru hareket etmesidir. Düz yüzey sıvılaşması, kum kaynamalarına, büyük düşey oturmalara ve zemin akmalarına neden olmaktadır.

TBDY (2018), zemin sıvılaşmasını yeraltı su seviyesinin altında yer alan ve yüzeyden 20.0 m derinliğe kadar yer alan doygun kohezyonsuz ya da düşük kohezyonlu ($PI < 12$) zeminlerin deprem sarsıntısı altında, boşluk suyu basıncındaki artışa paralel olarak kayma mukavemeti ve rijitliğindeki önemli oranda azalış olarak tanımlanmaktadır. Potansiyel olarak sıvılaşabilir zeminler, yeraltı su tablasının altında yer alan kum, çakıllı kum, siltli killi kum, plastik olmayan silt ve silt-kum karışımları olarak belirtilmiştir (TBDY 2018, Madde16.6).

2.2. Sıvılaşma Kavramının Tarihi

Sıvılaşma kavramını kullanan ilk kişi olan Allen Hazen, 1918'de Kaliforniya'daki aktif fay hatlarına yakın olan Calaveras Barajı'nın kayması hakkında çalışmıştır. Hazen (2020), hazırladığı makalede "sıvılaşmış zemin (liquefied soil)" kavramını kullanarak zemin yenilmesini nedenselleştirmiştir. Boşluk suyu basıncı yüksek

olduğunda zemin dayanımının sıvıya yakın davranış göstermesi bu makale ile zemin mekaniği literatüründe ilk kez tanımlanmıştır (Hazen, 2020).

Karl Terzaghi, gevşek kumlarda su basıncının oluşturacağı akma hareketine ve “spontan (kendiliğinden) sıvılaşma” terimine 1925’te yayınladığı Teorik Zemin Mekaniği kitabında değinmiştir. Terzaghi, özellikle boşluk suyu basıncının kayma direncini nasıl düşürdüğünü vurgulamış ve zemin yenilmelerinde bu etkiyi örneklendirmiştir.

Casagrande (1936) ise “kritik boşluk suyu oranı” kavramını kullanarak granüler zeminlerde sıvılaşmanın hangi şartlarda olabileceğini araştırmıştır. Bu çalışmada, dinamik yükleme deneyinde gevşek kumların kesme gerilmesi arttığında hacimsel olarak küçüldüğü/sıkıştığı sonucuna varılmıştır.

Terzaghi ve Peck (1948), Mühendislik Pratiğinde Zemin Mekaniği çalışmasında “spontan sıvılaşma” terimini “doğal kayma mukavemeti değerinin ani sıfırlanması” olarak tanımlamıştır.

Sıvılaşma konusunda, Japonya’daki 1948 Fukui Depremi’nden sonra Mogami ve Kubo (1953) “soil liquefaction” kavramını kullanarak laboratuvarda zemin dinamik deneyleri yapmıştır. Zemin sıvılaşması hakkındaki ilk deneyler olan bu deneylerde, zemindeki salınım şiddetinin arttıkça kesme dayanımının azalarak aniden zeminde sıvılaşmayı başlattığı belirtilmiştir. 1964 yılında gerçekleşen Niigata-Alaska depremleri sonrasında sıvılaşma kavramı daha çok çalışılan bir konu olmuştur.

2.3. Sıvılaşma Hesap Yöntemleri

Günümüzde sıvılaşma potansiyelinin tespit edilebilmesi amacıyla, mevcut Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde (TBDY, 2018) önerilen ampirik bir yaklaşıma dayalı basitleştirilmiş zemin sıvılaşma analizine, 1-boyutlu dalga yayılımı teorisi kullanan 1-boyutlu nümerik yöntemlere ve 2-3-boyutlu sonlu elemanlar/sonlu farklar hesap yöntemlerine başvurulmaktadır. Zemin koşulları, yerinde ve laboratuvar ortamında belirlendikten sonra saha koşulları da göz önünde bulundurularak birlikte değerlendirilmesi ve sıvılaşma potansiyeli için uygun hesap yönteminin seçilmesi gerekmektedir.

Suya doymun zeminlerde sıvılaşma potansiyelinin tespit edilebilmesi amacıyla arazi ve laboratuvar deneyleri yapılarak zeminin dinamik özellikleri elde edilmektedir. Bu amaçla yapılan laboratuvar deneyleri zemin indeks özelliklerini belirleyen elek analizi

ve Atterberg limitleri deneylerini içerirken, zemin dinamik özelliklerini ise dinamik üç eksenli, dinamik basit kesme, santrifüj ve sarsma tablası deneyleri ile elde etmek mümkündür (Özaydın, 2007). Bunun yanında zemin mukavemetini ölçen delgili arazi deneylerinden SPT, CPT vb. ve delgisiz yöntemlerden Sismik Kırılma, Sismik Yansıma, Çok Kanallı Yüzey Dalgası Yöntemi (MASW) vb. jeofizik yöntemler ile kayma dalga hızı (V_s) sırasıyla dolaylı yoldan ve doğrudan elde edilebilmektedir. Sıvılaşma potansiyelinin tespit edilmesinde basitleştirilmiş ampirik yaklaşımlar (Seed ve Idriss, 1971, Seed ve diğ., 1985, Youd, 2001) zeminin türü, kum tabaka kalınlığı, SPT-N darbe sayısı, zemin kayma dalga hızı (V_s) ince tane içeriği (%), yeraltı su seviyesi vb. temel zemin özelliklerini baz almakta, koordinata dayalı pik yer ivmesi veya spektral ivme değerlerini kullanarak yaklaşık değerlendirmeler sunmaktadır. Nümerik yöntemler ise dalga yayılımı teorisini kullanarak sıvılaşma riskinin tespit edilmesinde ana kriter olan boşluk suyu basıncı artışının ölçümüne olanak sağlamak ve bu bakımdan daha güvenilir ve doğru sonuçlar vermektedir.

2.3.1 Basitleştirilmiş Ampirik Sıvılaşma Değerlendirme Yöntemi

İlk olarak Seed ve Idriss (1981)'in geliştirdiği ampirik yöntem, sonrasında Youd vd. (2001) tarafından geliştirilmiştir. TBDY (2018) ise Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen basitleştirilmiş ampirik sıvılaşma değerlendirme yöntemini Türkiye'nin depremselliğine uygun hale getirmiştir. Basitleştirilmiş ampirik sıvılaşma değerlendirme yönteminde deprem yer hareketine bağlı olarak lokasyona özel çevrimsel kayma gerilmesi oranı (CSR) ve çevrimsel kayma dayanım oranı (CRR) hesaplanarak, karşılaştırılmakta ($FS \geq 1.1$ olmalı), çevrimsel kayma dayanım oranının aşılması durumunda sıvılaşma meydana geldiği kabul edilmektedir. Öncelikle TBDY (2018), ince daneli zeminlerde SPT verilerinin geçerliliğini sınırlandırarak plastisite indeksi ve su muhtevasına dayalı net kriterler getirmiştir. Ayrıca, deprem büyüklüğüne bağlı düzeltme katsayısı olan MSF değeri için belirli bağıntılar tanımlanmış; bu büyüklüğün $M_w=7.5$ üzerindeki etkisi, formülasyonlar ile doğrudan hesaba katılmıştır. Derinlik etkisine yönelik olarak da tabaka derinliğine bağlı olarak düzeltmeler önerilmiştir. Çevrimsel kayma dayanımı oranının (CRR) hesaplanmasında standart penetrasyon deneyi (SPT) N-vuruş değerleri kullanılmakta ve SPT-N değerlerine enerji oranı, t_{ij} uzunluğu ve örnekleyici vb. düzeltmeler uygulanarak sonuçların standartlaştırılması her iki yöntemde de yer almaktadır. TBDY (2018), CRR'nin hesaplanmasında $(N_1)_{60}$ düzeltilmiş SPT-N vuruş sayısı kullanılmasını zorunlu hale

getirilmiştir. Sıvılaşma direnci (CRR) için grafik temelli klasik yaklaşımların yanında, TBDY (2018) sayısal bağıntılarla daha pratik bir hesaplama imkânı sunmuştur. Ayrıca, zemin profili değerlendirmelerinde kayma dalga hızı (V_s) bazlı yöntem alternatif olarak yer alırken, yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu koşullarda doygunluk durumu dikkate alınarak analiz kapsamı sınırlandırılmıştır. Youd vd. (2001) yaklaşımında CSR hesabında doğrudan PGA (a_{max}) kullanılırken; TBDY (2018) ise yüzeydeki PGA değerini direk kullanmak yerine PGA'nın Türkiye Deprem Tehlike Haritasından lokasyona özel DD-1-2-3 deprem düzeylerine göre elde edilen kısa periyod spektral ivme (S_a) değerlerinden türetilmesini ($0.4 \times S_{DS}$) önermiştir. Tüm bu değişiklikler, sıvılaşma analizlerinin daha gerçekçi ve yerel koşullara duyarlı şekilde yürütülmesini amaçlamaktadır (Youd vd., 2001; TBDY, 2018).

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'ne göre yeraltı su seviyesinin altında ve yüzeyden 20.0 m derinliğe kadar mevcut olan düşük kohezyonlu ($PI < \%12$) zeminlerde deprem sırasında sıvılaşma ihtimali bulunmaktadır.

Magnitüdü $M=7.5$ olan senaryo depremine göre TBDY (2018) metodu ile sıvılaşma analizi tabaka ortası derinliğe (z) bağlı olarak yapılmaktadır:

z : Tabaka ortası derinlik

$$r_d : z \leq 9.15m \quad \rightarrow r_d = 1 - 0.00765z \quad 2.1$$

$$9.15m < z \leq 23m \quad \rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267z \quad 2.2$$

$$23m < z \leq 30m \quad \rightarrow r_d = 0.744 - 0.008z \quad 2.2$$

$$30m < z \quad \rightarrow r_d = 0.50 \quad 2.3$$

$$C_N : 9.78 \sqrt{(1/\sigma'_{v0})} \quad (C_N \leq 1.7) \quad 2.4$$

$$N_{1,60} : N * C_N * C_R * C_S * C_B * C_E \quad 2.5$$

C_N : Örtü yükü düzeltme katsayısı

C_R : Tij boyu düzeltme katsayısı

C_S : Numune alma metodu düzeltme katsayısı

C_B : Kuyu çapı düzeltme katsayısı

C_E : Enerji oranı düzeltme katsayısı

$$N_{1,60f} (\text{İnce tane düzeltmesi uygulanmış } N_{1,60} \text{ değeri}) : \alpha + \beta * N_{1,60} \quad 2.6$$

İDO: İnce Dane Oranı olmak üzere:

$$\text{İDO} \leq \%5 \quad \alpha = 0 \quad \beta = 1 \quad 2.7$$

$$\%5 < \text{İDO} < \%35 \quad \alpha = \exp [1,76 - (190/\text{İDO}^2)] \quad \beta = [0,99 + (\text{İDO}^{1,5} / 1000)] \quad 2.8$$

$$\dot{I}DO \geq \%35 \quad \alpha = 5 \quad \beta = 1,20 \quad 2.9$$

$$\text{Sıvılaşma Direnci, } \tau_R : CRR_{M7.5} * C_M * \sigma'_{v0} \quad 2.10$$

$$CRR_{M7.5} = (1 / (34 - N_{1,60f})) + (N_{1,60f} / 135) + (50 / (10 * N_{1,60f} + 45)^2) - (1/200) \quad 2.11$$

$$C_M = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad 2.12$$

$$\text{Kayma Gerilmesi, } \tau_{\text{deprem}} : 0,65 * \sigma_{v0} (0.4S_{DS}) * r_d \quad 2.13$$

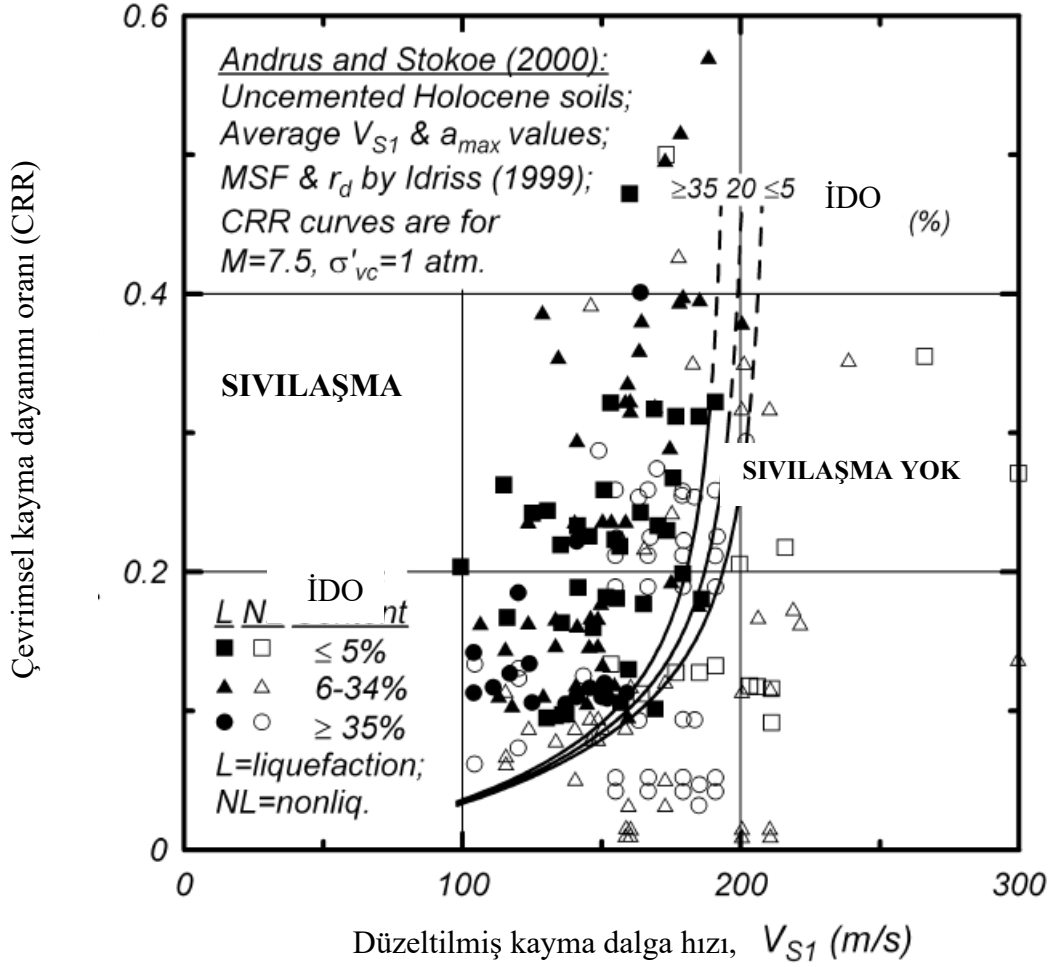
$$\text{GS (Güvenlik Sayısı) : } \tau_R / \tau_{\text{deprem}} \geq 1.10 \quad 2.14$$

$$N_{1,60} : N_{60} * C_N \quad 2.15$$

Tablo 2.1 SPT Düzeltme Katsayıları

Düzeltilme Katsayısı	Değişken	Değer
C _R	3m ile 4m aralığında	0.75
	4m ile 6m aralığında	0.85
	6m ile 10m aralığında	0.95
	10m'den derin	1.00
C _S	Standart numune alıcı (iç tüpü olan)	1.00
	İç tüpü olmayan numune alıcı	1.10-1.30
C _B	Çap 65mm-115mm arasında	1.00
	Çap 150mm	1.05
	Çap 200mm	1.15
C _E	Güvenli tokmak	0.60-1.17
	Halkalı tokmak	0.45-1.00
	Otomatik darbeli tokmak	0.90-1.60

Çevrimsel kayma dayanımının (CRR-sıvılaşma direnci) hesaplanmasında Andrus ve Stokoe (2000), SPT-N verisi yerine arazi jeofizik deneylerinden elde edilebilecek kayma dalgası hızı-V_s verisinin kullanabileceği bir korelasyon önermiştir (Şekil 2.2). Buna göre zeminin sıvılaşma davranışı zemin kayma dalga hızı ve ince dane oranına bağlı olarak hesaplanabilmektedir.



Şekil 2.2 Kayma dalgası hızı ile sıvılaşma ilişkisi (Andrus and Stokoe, 2000)

2.3.1.1. Sıvılaşma Potansiyeli

Basitleştirilmiş ampirik yaklaşıma göre zeminlerdeki sıvılaşma olasılığını belirledikten sonra sıvılaşma derecesini elde etmek daha ölçülebilir bir değerlendirme sunmaktadır. Bu amaçla Iwasaki ve diğ. (1982) tarafından önerilen suya doymun zemin tabakalarında oluşan yüzeyden ilgili derinliğe kadar olan (20 m, TBDY, 2018) sıvılaşma potansiyelini belirlemek için kullanılan hesap adımları sıvılaşma güvenlik katsayısı ve tabaka derinliği kullanılarak hesaplanmıştır:

$$LPI = \int Fw(z) dz \quad 2.16$$

$$F = 1 - FS; \quad FS \leq 1 \text{ için,} \quad 2.17$$

$$F = 0; \quad FS > 1 \text{ için} \quad 2.17$$

LPI: sıvılaşma potansiyel indeksi

z: derinlik

Tablo 2.2 LPI Sıvılaşma Potansiyel Derecesi

Sıvılaşma Potansiyel İndeksi (LPI)	Sıvılaşma Potansiyel Derecesi
0	Çok Düşük
$0 < LPI \leq 5$	Düşük
$5 < LPI \leq 15$	Orta
$15 < LPI$	Yüksek-Çok Yüksek

Iwasaki ve diğ. (1982) çalışmasında, 0-5 arası LPI değerinde düşük, 5-15 arası LPI değerinde ise orta derecede, LPI değerinin 15'ten yüksek olması durumunda çok yüksek sıvılaşma riskinin olduğunu belirtmiştir. Sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) değeri en düşük 0, en yüksek 100 değerini alabilmektedir.

2.3.1.2. Sıvılaşma Şiddeti

Sıvılaşma derecesini elde etmek için önerilen bir diğer yaklaşım ise Sönmez ve Gökçeoğlu (2005) tarafından geliştirilen Sıvılaşma Şiddeti İndeksi olarak tanımlanmıştır. Bu yaklaşımda birden fazla zemin tabakaları için oluşturan yüzeyden ilgili derinliğe kadar olan sıvılaşma potansiyelini hesaplamak için aşağıdaki hesap adımları önerilmiştir:

$$L_S = \int_0^{20} P_L(z)W(z)dz$$

$$F_L \leq 1.411 \text{ için; } P_L = \frac{1}{1+(F_L/0.96)^{4.5}} \quad 2.19$$

$$F_L > 1.411 \text{ için; } P_L = 0 \quad 2.20$$

$$z < 20 \text{ m için; } W(z) = 10 - 0.5z \quad 2.21$$

$$z > 20 \text{ m için; } W(z) = 0 \quad 2.22$$

z: Sıvılaşan Tabaka Kalınlığı

$P_L(z)$: Her bir seviye için Juang vd. (2003) tarafından tanımlanan sıvılaşma olasılığı

F_L : Sıvılaşmaya karşı güvenlik koşulu (Youd vd., 2001)

L_S : Sıvılaşma Şiddeti İndeksi

Hesaplanan toplam sıvılaşma şiddeti indeksi değerine göre derecelendirilen sıvılaşma potansiyeli, “Sıvılaşma Şiddeti İndeksi” ne ait değer tablonun altında belirtilmiştir.

Tablo 2.3 Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) sınıflaması (Sönmez ve Gökçeoğlu, 2005)

L_s	Derece
$85 \leq L_s < 100$	Çok Yüksek
$65 \leq L_s < 85$	Yüksek
$35 \leq L_s < 65$	Orta
$15 \leq L_s < 35$	Düşük
$0 < L_s < 15$	Çok Düşük
$L_s = 0$	Sıvılaşmaz

Sıvılaşma şiddeti indeksi (L_s) en yüksek 100, en düşük 0 değerini alabilmektedir. L_s değeri 85-100 arasında olduğunda sıvılaşma şiddeti çok yüksek olarak kabul edilmiştir. L_s sıfıra eşit olduğunda ise sıvılaşmayan zemin olduğu kabul edilmiştir.

2.3.2. Bir Boyutlu (1-D) Saha Tepki Analizi Yöntemi

Sahaya özel zemin tepki analizleri zeminlerin dinamik yükler altında nasıl tepki vereceğini modellemek için kullanılmaktadır. Zemin tepki analizleri sayesinde yapıların deprem yer hareketi etkisinde tasarım spektrumlarına uygun olarak daha güvenli şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Bir boyutlu zemin tepki analizleri deprem gövde dalgalarından yalnızca kayma dalgasının yatay bileşenini (SH) kullanmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, anakayaya etkiyecek deprem yer hareketi kayıtları seçilmesi gerekmektedir. Zemin tepki analizleri sayesinde zemin profili boyunca ve yer yüzeyindeki çevrimsel kayma gerilmesi, birim kayma şekil değiştirme, yer ivmesi, yer deplasmanı ve yer hızı değerleri nümerik olarak elde edilmekte ve zemin tabakalarının deprem dalgalarını yüzeye ulaşana kadar nasıl değiştirdiği tespit edilerek üst yapılara etkiyecek tasarım spektral ivme, hız ve deplasman değerleri hesaplanabilmektedir.

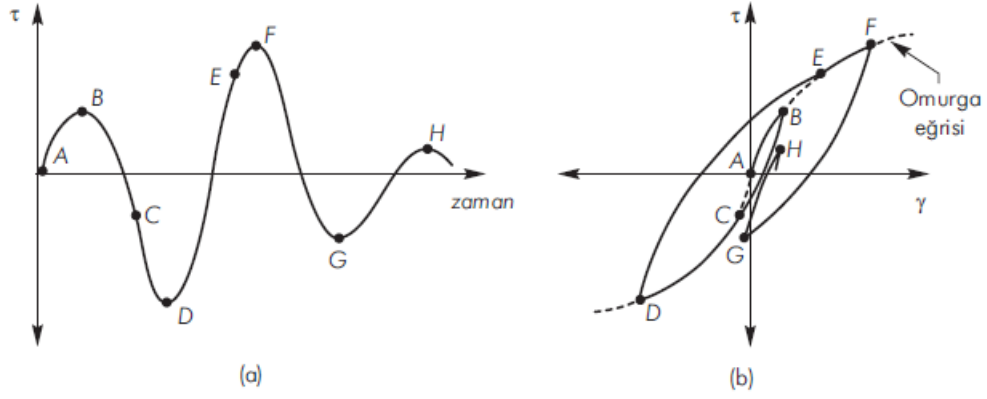
Bir boyutlu zemin tepki analizinde zemin ortamı yarı sonsuz olarak tanımlanmakta, tabakaların ise yanal olarak devam ettiği ve birbirlerine paralel olarak üst üste ardalandığı kabul edilmektedir. Zemin tepki modellemesi için tabaka kalınlıkları, zemin dinamik özellikleri, yer altı su seviyesi, anakaya derinliği ve anakaya özellikleri bilinmelidir.

2.3.2.1. Doğrusal Olmayan Analiz

Doğrusal olmayan analiz yöntemi, dinamik yüklemeler altında zeminin elasto-plastik ve plastik davranışı modellemede kullanılmaktadır. Zaman tanım alanında uygulanan bu hesap yöntemi ile büyük birim kayma şekil değiştirmeleri doğru ve güvenilir bir yaklaşım ile elde edilebilmektedir. Bu tez kapsamında DEEPSOIL yazılımında tanımlı olan tekrarlı doğrusal olmayan analiz modülü kullanılmıştır.

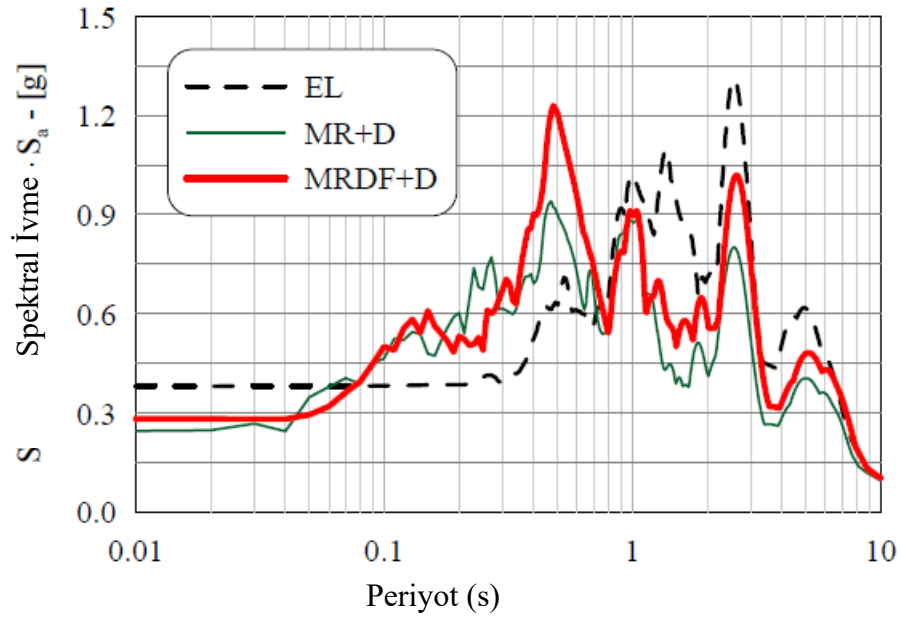
Deprem mühendisliğinde zemin davranışını daha gerçekçi şekilde modelleyebilmek amacıyla doğrusal olmayan analiz yöntemleri tercih edilmektedir. Bu yöntemlerde, zemin malzemesinin kayma gerilmesi ve kayma birim deformasyonu arasındaki ilişkisinin doğrusal olmadığı ve enerji sönümünün sabit kalmadığı kabul edilir. Zemin, tekrarlı yükleme altında enerji sönümleyerek davranışını değiştirir ve bu durum “histerez eğrileri” olarak adlandırılan döngüsel gerilme–şekil değiştirme eğrileriyle temsil edilir (Şekil 2.2). Bu eğriler, yükleme ve boşaltma sırasında zemin içinde oluşan enerji kaybını ve sertlik azalmasını gösterir. Bu eğride, omurga eğrisi kesikli çizgi ile gösterilmiştir.

Doğrusal olmayan analizlerde kullanılan bu eğriler genellikle laboratuvar deneylerinden (örneğin döngüsel triaxial veya torsional shear testlerinden) elde edilir ve sayısal modellere tanımlanarak farklı zemin tiplerinin ve genlik seviyelerinin dinamik tepkisi daha gerçekçi şekilde simüle edilir. Örneğin DEEPSOIL gibi yazılımlar, bu tür histerez eğrilerini kullanarak zemin profilinin sönüm ve rijitlik özelliklerini her yükleme adımında güncelleyebilir. Bu yaklaşım, özellikle büyük genlikli hareketlerin etkili olduğu durumlarda (örneğin sıvılaşma potansiyeli yüksek gevşek kumlarda) zemin davranışını daha doğru yansıtması bakımından önemlidir.



Şekil 2.3 Genişletilmiş Masing kuralları: (a) kayma gerilmesinin zamanla değişimi; (b) sonuçta ortaya çıkan gerilme-birim deformasyon davranışı (Kramer, 1996)

Doğrusal olmayan zemin modeli için Phillips and Hashash (2009), kayma modülü ve sönüm oranı uydurma yükleme modelini (MRDF+D) geliştirmişler, Hashash vd. (2010) zaman tanım alanı ve frekans tanım alanında yaptıkları analizlerde, eşdeğer lineer (EL), modül azaltma (MR), kayma modülü ve sönüm oranı uydurma (MR+D) yöntemlerini kullanmışlardır. MR analizlerine kıyasla, MRDF eğrisinin daha doğru sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi kısa ve uzun periyotlarda MRDF eğrisi eşdeğer lineer eğrinin bir miktar altında, orta periyotta ise üstünde yer almıştır.



Şekil 2.4 Doğrusal Olmayan Yer Tepki Analizlerinde Yöntemlerin Dinamik Özelliklere Etkisi (Hashash vd., 2010)

Phillips ve Hashash (2009), doğrusal olmayan analizde yüksek birim şekil değiştirme değerlerine ulaşıldığında kayma gerilimi düzeltmesi uygulanması gerektiğini ifade etmişlerdir. Genelleştirilmiş Kuadratik/Hiperbolik (GQ/H) Model, Darendeli (2001) gibi eğri uydurma tabloları ile referans eğrisini düzeltebilmektedir (Groholski et al. 2016). Yüksek birim şekil değiştirme τ_{max} , θ_1 - θ_5 ise eğri uydurma parametreleri modül azaltma eğrisi oluşturulurken yüksek şekil değiştirmeleri düzeltmek için kullanılmaktadır.

DEEPSOIL programı (Hashash et al. 2016), bu eğri uydurma parametrelerini kullanarak referans eğriden kayma gerilmesi eğrisi oluşturmaktadır. Kullanıcı istediği referans eğrisini seçebilmektedir. τ_{max} , G_0 , and θ_1 - θ_5 değerleri kullanılarak kayma gerilmesi ve birim şekil değiştirme eğrisi aşağıdaki formül ile elde edilmektedir:

$$\theta_{\tau} = \theta_1 + \theta_2 * \frac{\theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}}{\theta_3^{\theta_5} + \theta_4 * \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^{\theta_5}} \quad 2.23$$

γ_r referans gerilme $\gamma_r = \tau_{max}/G_0$ formülü ile hesaplanmaktadır. θ_{τ} tanımlandıktan sonra kayma gerilmesi ve birim şekil değiştirme eğrisi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$\tau = \tau_{max} * \left[\frac{1}{\theta_{\tau}} * \left\{ 1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) - \sqrt{\left\{ 1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right\}^2 - 4 * \theta_{\tau} * \frac{\gamma}{\gamma_r}} \right\} \right] \quad 2.24$$

Masing olmayan boşaltma-yeniden yükleme basınca bağlı hiperbolik model olarak Deep Soil programında kullanılmaktadır (Phillips and Hashash, 2009).

$$\xi_{MasingHysteretic} = F(\gamma_{max}) * \xi_{Masing} \quad 2.25$$

$F(\gamma_m)$ azaltma faktörü, herhangi bir zamanda zemindeki maksimum kayma dayanımı- γ_m fonksiyonu ile hesaplanır. ξ -Masing histerik sönümlenme ise masing kuralları kullanılarak modül azalım eğrisi ile hesaplanmaktadır.

Hiperbolik ve basınca bağlı hiperbolik boşaltma- yeniden yükleme formülü ile azaltma faktörü, $F(\gamma_m)$, aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\tau = F(\gamma_m) \left[2 \frac{G_0((\gamma - \gamma_{rev})/2)}{1 + \beta \left(\frac{(\gamma - \gamma_{rev})}{2\gamma_r} \right)^s} - \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} \right] + \frac{G_0(\gamma - \gamma_{rev})}{1 + \beta \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_r} \right)^s} + \tau_{rev} \quad 2.26$$

MRDF-basınca bağılı hiperbolik modeli (Phillips and Hashash, 2009) ile azalım faktörü farklı formüller ile hesaplanabilmektedir. Bu formüllerden biri Darendeli (2001) tarafından yapılan deneyler sonucu elde edilmiştir. Bu formül, farklı zemin türlerinin dinamik hareketini doğrusal olmayan yöntem ile tahmin etmektedir. Azalım faktörü şu şekilde formüle edilmiştir:

$$F(\gamma_m) = P_1(G(\gamma_m)/G_0)^{P_2} \quad 2.27$$

γ_m maksimum kayma gerilmesi, maksimum kayma gerilmesi anındaki $G(\gamma_m)$ kayma modülü γ_m , P_1 ve P_2 eğri uydurma değişkenleridir.

Boşluk suyu basıncı oranının $r_u=0.70$ 'i aştığı durumda efektif gerilme azalımına bağlı olarak zeminin sıvılaşmaya başladığı kabul edilmektedir (Beaty ve Perlea, 2011). Boşluk suyu basıncının düşey efektif gerilmeye eşit olduğu durumda ise $r_u=1.0$ 'a (100%) ulaşmakta ve tam sıvılaşma uğradığı kabul edilmektedir. Dolayısıyla nümerik analizler ile sıvılaşmanın tespit edilebilmesi için boşluk suyu basıncının modellenmesi gerekmektedir. Bu amaçla doğrusal olmayan zemin modelleri kullanılmaktadır.

$$r_u = \frac{u}{\sigma_v'} \quad 2.28$$

r_u : Boşluk suyu basıncı oranı

u : Boşluk suyu basıncı

σ_v' : Efektif düşey gerilme

Bu çalışmada Beaty ve Perlea (2011)'nin yaklaşımı kullanılarak, boşluk suyu basıncı oranının $r_u=0.70$ 'yi aştığı durumda sıvılaşmaya başladığı kabul edilmiştir.

2.3.2.2. Doğrusal Olmayan Zemin Modelleri

Bu tez çalışması kapsamında 1-boyutlu dalga yayılımı teorisini ve doğrusal olmayan analiz yöntemini uygulayan DEEPSOIL yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde

kullanılmak üzere farklı zemin türlerini ve koşullarını ifade eden 5 adet doğrusal olmayan zemin modeli sunulmuştur; Dobry & Matasovic (1992), Matasovic & Vucetic (1995), GMP (Green, Mitcher and Polito), Park & Ahn ve Genelleştirilmiş Enerji Temelli Boşluk Suyu Basıncı Oluşum Modeli şeklindedir. Her zemin modeli için programın kullanıcı arayüzüne girilen zemin değişkenleri farklılık göstermektedir.

Mei, Olson ve Hashash (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, Vucetic ve Dobry (1986) tarafından geliştirilen boşluk suyu basıncı (PWP) üretim modeli ele alınmıştır. Bu model, 1 boyutlu etkin gerilme tabanlı zemin tepki analizlerinde yaygın olarak kullanılan DEEPSOIL ve D-MOD gibi yazılımlarda uygulanmaktadır. Ancak, modelin eğri uydurma parametreleri genellikle karmaşık laboratuvar testleri gerektirmektedir. Bu durumu aşmak amacıyla, araştırmacılar, kumlar üzerinde yapılan 123 adet çevrimsel kesme testi verilerini kullanarak, model parametrelerini rölatif sıkılık (D_r) ve uniformluk katsayısı (CU) gibi zemin özellikleriyle ilişkilendiren ampirik bağıntılar geliştirmiştir. Bu sayede, karmaşık laboratuvar testlerine ihtiyaç duyulmadan, PWP üretim modeli parametrelerinin tahmin edilmesi mümkün hale gelmiştir.

Bu tez kapsamında yazılım içerisinde yer alan zemin modellerinden kum tabakalar için Dobry & Matasovic Modeli ve killi birimler için ise Matasovic & Vucetic Modeli kullanıldığından ötürü yalnızca bu iki model açıklanmıştır. Bu iki model için kullanılan değişkenler Tablo 2.4'te verilmiştir. Dobry & Matasovic modelinde 6 adet, Matasovic & Vucetic modelinde ise 7 adet zemin değişkeni mevcuttur. Bu zemin modelleri detayları olarak aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

Tablo 2.4 Deep Soil Modellerinde Değişkenler

Model	Zemin Türü	Değişkenler						
		1	2	3	4	5	6	7
Dobry & Matasovic	Kum	f	p	F	s	γ_{tvp}	v	-
Matasovic & Vucetic	Kil	s	r	A	B	C	D	γ_{tvp}

2.3.2.2.1 Dobry ve Matasovic Modeli

DEEPSOIL yazılımında kum birimler için Dobry ve Matasovic Modeli kullanılması tavsiye edilmiştir (DEEPSOIL Manual, 2024).

Matasovic (1992) boşluk suyu basıncı hesaplanırken parametreler devirsel drenajsız laboratuvar testi verilerinin eğri uydurma yöntemi ile belirlenmektedir. Eğri uydurma parametreleri belirlendikten sonra, Matasovic ve Vucetic (1993, 1995) tarafından aşağıdaki denklem boşluk suyu basıncını hesaplamak için kullanılmaktadır:

$$u_N = \frac{p * f * N_c * F * (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s}{1 + f * N_c * F * (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s} \quad 3.1$$

u_N : Normalize edilmiş aşırı boşluk basıncı (r_u)

N_{eq} : Eşdeğer çevrim sayısı

γ_c : Mevcut ters kayma gerilmesi

γ_{tvp} : Eşik kayma gerilmesi değeri

p : Eğri uydurma değişkeni

s : Eğri uydurma değişkeni

F : Eğri uydurma değişkeni

f : Boyut faktörü

v : Bozunma parametresi

Kumlar için eğri uydurma parametreleri olan F ve s için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır (Carlton, 2014). İDO, yüzde cinsinden ince tane oranını, V_s ise m/s birimli kayma dalga hızını ifade etmektedir.

$$F = 3810 * V_s^{(-1.55)} \quad 3.2$$

$$s = (IDO + 1)^{0.1252} \quad 3.3$$

2.3.2.2.2. Matasovic ve Vucetic Modeli

DEEPSOIL Programında kil birimler için Matasovic ve Vucetic Modeli kullanılması tavsiye edilmiştir (DEEPSOIL Manual, 2024). Matasovic ve Vucetic (1995), kil zeminlerde boşluk suyu basıncı değeri için aşağıdaki denklemi vermiştir:

$$u_N = A * N_c^{-3s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + B * N_c^{-2s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + C * N_c^{-s(\gamma_c - \gamma_{tvp})^r} + D \quad 3.4$$

u_N : Normalize edilmiş aşırı boşluk basıncı (r_u)

N_{eq} : Eşdeğer çevrim sayısı

γ_c : En son ters kayma gerilmesi

γ_{tvp} : Eşik kayma gerilmesi değeri

r : Eğri uydurma değişkeni

s : Eğri uydurma değişkeni

A : Eğri uydurma değişkeni

B : Eğri uydurma değişkeni

C : Eğri uydurma değişkeni

D : Eğri uydurma değişkeni

Eğri uydurma parametreleri, Carlton (2014) tarafından aşağıdaki şekilde formüllendirilmiştir:

$$s = 1.6374 * PI^{-0.802} * OCR^{-0.417} \quad 3.5$$

$$r = 0.7911 * PI^{-0.113} * OCR^{-0.147} \quad 3.6$$

$$OCR < 1 \text{ için; } A=7.6451, B=-14.714, C=6.38, D=0.6922 \quad 3.7$$

$OCR \geq 1$ için;

$$A = 15.641 * OCR^{-0.242} \quad 3.8$$

$$B = -33.691 * OCR^{-0.33} \quad 3.9$$

$$C = 21.45 * OCR^{-0.468} \quad 3.10$$

$$D = -3.4708 * OCR^{-0.857} \quad 3.11$$

2.4. Zeminin Sıvılaşma Davranışını Etkileyen Faktörler

Sıvılaşma olayının gerçekleşmesine birden çok zemin değişkeni etki etmektedir. Sıvılaşma potansiyelini etkileyen temel zemin indeks ve mekanik özellikleri, deprem yer hareketi genliği, yer altı su seviyesi vb. değişkenler birçok araştırmacı tarafından çeşitli arazi gözlemleri, deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. Bu tez kapsamında ise, 1-boyutlu dalga yayılımı teorisinin uygulandığı nümerik bir yöntem kullanılarak çeşitli zemin ve deprem yer hareketi değişkenlerinin sıvılaşma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Literatürde birçok çalışma nümerik olarak sıvılaşabilir zeminler hakkında doğrusal olmayan zemin tepki davranışını incelemiş ve genellikle sıvılaşmayı ifade eden artık boşluk suyu basıncı oluşumun yer yüzeyindeki ivme-zaman tanım alanı veya tepki spektrumuna etkilerini incelemiştir (Matasovic, 1993; Zeghal ve diğ., 1996; Foerster ve Modaressi, 2007; Zheng ve Luna, 2011; Markham ve diğ., 2016; Taghavinezhad ve diğ., 2019; Selçuk, 2021). Bunun yanında diğer zemin ve deprem yer hareketi değişkenlerinin sıvılaşma potansiyeli üzerine etkilerini anlatan çalışmalar her değişkene özel olarak oluşturulmuş başlıklar altında sunulmuştur.

2.4.1. Zemin İndeks ve Mekanik Özelliklerinin Sıvılaşmaya Etkisi

Bu bölümde, zemin indeks özelliklerinden rölatif sıkılık, boşluk oranı, zemin tanelerinin köşeliliği/küreselliği vb. etmenlerin sıvılaşma potansiyeline etkileri hakkında çalışmalar sunulmuştur. Ishibashi ve diğ. (1982) hacim değişimi potansiyelinin ($e - e_{min}$) rölatif sıkılık parametresine göre daha güvenilir bir sıvılaşma potansiyeli göstergesi olduğunu ve zemin tanelerinin köşelilik (veya küresellik) özelliğinin boşluk suyu basıncının gelişmesinde önemli bir role sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Ecemiş ve diğ. (2014), gevşek ve sıvılaşma potansiyeli çok yüksek olan silika kumları laminar kutulara yerleştirerek sarsma masası deneyleri uygulamış, rölatif sıkılık artsa bile kumların tekrar sıvılaşmaya karşı direncinin düştüğü tespit edilmiş, dolayısıyla tekrar-sıvılaşma direncinin yalnızca rölatif sıkılığa bağlı olduğu belirlenmiştir. Karakan ve Altun (2016), silt içerikli kumlarda silt yüzdesinin sıvılaşma üzerine etkisini incelemiş, sabit taneler arası boşluk oranında silt içeriği arttıkça karışımın boşluk oranının azaldığı ve dinamik etkiye daha dirençli hale geldiği ifade edilmiştir, bunun aksine silt içeriğinin eşik değeri aşması durumunda karışımın boşluk oranının arttığı ve dinamik etkilere dayanımının azaldığı belirtilmiştir. Ceylan (2021)

çalışmasında %70-%80 doygunluğa sahip kısmi doygun kumların sıvılaşma direncini, birim kayma deformasyonları açısından deneysel olarak incelenmişler ve bu zeminlerin sıvılaşma direnci, birim kayma deformasyonu açısından değerlendirilmiştir. Araştırmada, kısmi doygunluğun sıvılaşma direncini artırıcı bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle, doygunluğu düşük numunelerde daha yüksek birim deformasyonlara ulaşılmasına rağmen sıvılaşma gelişmemiştir; bu durum, zemindeki hava boşluklarının sıvılaşmayı bastırıcı etkisiyle açıklanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, %70-%80 doygunluğa sahip kumlar, tam doygun kumlara kıyasla belirgin şekilde daha yüksek cyclic resistance ratio (CRR) değerleri göstermektedir. Bu bulgular, kısmi doygunluk durumunun zemin iyileştirme yöntemlerinde dikkate alınması gereken bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

Subaşı ve İyisan (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı rölatif sıklıklara (%35, %55 ve %75) sahip kum zemin profilleri oluşturularak, bu profiller üzerinde PM4Sand bünye modeli kullanılarak iki boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizler Plaxis 2D yazılımı ile yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, zemin sıklığının sıvılaşma davranışı üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Düşük sıklık derecesine (%35) sahip zeminlerde, yüksek boşluk suyu basıncı birikimi ve erken sıvılaşma meydana gelmiş, bu da büyük kalıcı yer değiştirmelere yol açmıştır. Orta sıklıktaki zeminlerde (%55) sıvılaşma daha geç başlamış ve boşluk suyu basıncı birikimi kısmen sınırlanmıştır. Yüksek sıklıkta (%75) ise zeminlerin sıvılaşma direnci önemli ölçüde artmış, boşluk suyu basıncı artışı oldukça sınırlı kalmış ve kalıcı yer değiştirmeler minimum düzeyde gerçekleşmiştir. Bu çalışma, zeminlerin rölatif sıklıklarının arttırılmasının sıvılaşma riskini azaltmada etkin bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri sonrasında yürütülen saha değerlendirmelerinde, hasarın dağılımında zemin özelliklerinin belirleyici rol oynadığı tespit edilmiştir (Öser ve diğ., 2023). Arazi gözlemleri, sondaj verileri ve laboratuvar testleri doğrultusunda yapılan değerlendirmelerde, özellikle gevşek, suya doygun ve ince taneli alüvyon zeminlerde sıvılaşma, oturma ve taşıma gücü kaybı gibi zemin davranışlarının yapı hasarlarını ciddi ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Çalışmada sıvılaşma potansiyelini etkileyen temel parametreler olarak tane boyu dağılımı, yer altı su seviyesi, rölatif sıklık, tabaka kalınlığı ve topoğrafik eğim gibi zemin ve arazi özellikleri vurgulanmıştır. Ayrıca bazı bölgelerde, sıvılaşmaya bağlı olarak yüzeyde kum fişkirmaları, zemin çatlakları ve temel oturmaları gözlemlenmiştir. Yerel zemin

koşulları ve topoğrafik yapıların, deprem dalgalarını büyüterek yapısal hasarları artırdığı da çalışmada öne çıkan bulgular arasındadır.

Sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde deneysel yöntemlerin rolü üzerine yapılan çalışmalar, özellikle dinamik davranışın modellenmesinde santrifüj deneylerinin sağladığı avantajları ortaya koymaktadır. Bu kapsamda Tozburun (2022) tarafından yürütülen tez çalışmasında, gevşek kumlu zeminlerin sıvılaşma ve oturma davranışları, farklı zemin parametreleri ve tabaka kalınlıkları altında santrifüj modelleme yöntemiyle detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada, zeminlerin sıvılaşma sonrasında gösterdiği oturma davranışları, yüzeydeki su içeriği, yoğunluk ve tabaka geometrisi gibi etkenler çerçevesinde değerlendirilmiş ve zemin-su etkileşiminin sıvılaşma üzerindeki belirleyici rolü vurgulanmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, sıvılaşma kaynaklı oturma miktarlarının tahmininde kullanılan ampirik ilişkilerin iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda çalışma, özellikle sıvılaşma sonrası oturmaların tahmini ve yapısal güvenlik analizlerinde dikkate alınması gereken parametreler konusunda literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

2.4.2. Zemin Kayma Dalga Hızının Sıvılaşmaya Etkisi

Salgado ve diğ. (2000) kayma dalga hızının (V_s) sıvılaşma direncini etkileyen zeminin kritik kayma mukavemeti açısı ve dilatans parametrelerini temsil etmediği belirtmesine rağmen son dönemde V_s 'nin penetrasyon deneylerinden elde edilen verilere nazaran sıvılaşma direnci ile önemli derecede ilişkili olduğu, buna göre V_s ve sıvılaşma direncinin aynı parametrelere (örn: rölatif sıkılık, efektif gerilme, tanelerin zamanla tekrar dizilimi ve aynı yönde çimentolaşma) karşı duyarlı olduğu ifade edilmiştir (Tokimatsu ve Uchida, 1990; De Alba ve diğ., 1994; Baxter ve diğ., 2008). Bu amaçla V_s ve sıvılaşma direncinin ilişkilendirildiği birçok çalışma yayınlanmış, Andrus ve Stokoe (2000)'nin V_s 'e bağlı olarak sıvılaşabilir veya sıvılaşamayan zeminleri belirleyen ve çevrimsel kayma direnci oranını veren korelasyonu kabul gören son V_s 'e dayalı sıvılaşma direnci değerlendirme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Ortalama ince dane oranı ağırlıkça $\dot{I}DO \leq 5\%$, $\dot{I}DO = 20\%$, and $\dot{I}DO \geq 35\%$ olan üç farklı eğri önermişler, çevrimsel kayma direncinin 35% 'e kadar artan $\dot{I}DO$ ile arttığını, sonrasında ise sabit kaldığını ifade etmişlerdir. Ecemiş (2020) ise ince dane oranının V_s 'e bağlı olarak sıvılaşma değerlendirmesinde etkisinin tam olarak

anlaşılmadığını ve çalışmalarda İDO'nun V_s 'e bağlı değerlendirmeye etkisinin nadir olarak raporlandığını ifade etmiştir. Bu sebeple Ecemiş (2020) çalışmasında, V_s ve konik penetrasyon direnci arasındaki korelasyonda ince dane oranının etkisini incelemiş, farklı zemin tiplerinde değişen ince tane oranıyla beraber çevrimsel kayma direnci ve V_s arasındaki korelasyonun da değiştiğini ifade etmiş ve zemine özel (Holosen yaşlı) çevrimsel kayma direnci- V_s korelasyonu önermiştir.

2.4.3. Deprem Yer Hareketi Seviyesinin Sıvılaşmaya Etkisi

Magistris ve diğ. (2013), sıvılaşma olayının gelişmesi için gerekli eşik PGA seviyesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiş, Boulanger ve diğ. (2012)'nin SPT'ye-dayalı, Moss ve diğ. (2006)'nin CPT'ye dayalı ve Andrus ve diğ. (1999)'nin kayma dalgası hızına dayalı sıvılaşma analizi yaklaşımlarını birleştirerek sıvılaşmanın meydana geldiği lokasyonlar için değerlendirmelerde bulunarak bir sıvılaşma veritabanı oluşturmuşlardır. Buna göre sıvılaşmanın gerçekleşmesi için gerekli olan eşik PGA değeri 0.09 g olarak ifade edilmiştir. Demir (2021), yer hareketi genliği arttıkça doygun kumlarda ölçülen en büyük PGA, yanal deplasman ve maksimum kayma birim şekil değiştirme değerlerinin arttığını ifade etmiştir.

Subaşı ve İyisan (2022) tarafından yürütülen çalışmada, farklı deprem kaynak özelliklerine sahip 14 adet kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılarak, kum zeminlerde sıvılaşma potansiyeli Plaxis 2D yazılımı ve PM4Sand bünye modeli ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler, yer hareketi karakteristiklerinin sıvılaşma davranışı üzerinde belirgin etkiler yarattığını ortaya koymuştur. Özellikle deprem kayıtlarının maksimum ivme değerleri (PGA), süresi, frekans içeriği ve enerjisi, zeminlerde sıvılaşmanın başlama süresi, fazla boşluk suyu basıncı birikimi ve kalıcı yer değiştirmelerin büyüklüğü üzerinde doğrudan etkili olmuştur. Yüksek ivmeli ve uzun süreli kayıtlar, daha erken sıvılaşma oluşumuna ve daha büyük oturmalara neden olurken; düşük enerjili ve kısa süreli kayıtlar, sıvılaşmayı sınırlı düzeyde tetiklemiş, yer değiştirmeler düşük seviyede kalmıştır. Bu sonuçlar, sıvılaşma analizlerinde yalnızca zemin parametrelerinin değil, deprem yer hareketi kayıtlarının seçiminin de analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen kritik bir unsur olduğunu göstermektedir (Subaşı & İyisan, 2022).

Tozburun (2022) tarafından yürütülen çalışmada, dinamik santrifüj modelleme yöntemiyle gerçekleştirilen deneysel analizlerde, farklı karakteristiklere sahip deprem

yer hareketi kayıtları kullanılmış ve bu kayıtların sıvılaşma potansiyeli üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yer hareketleri, ivme düzeyi ve frekans içeriği açısından çeşitlilik göstermekte olup, sıvılaşma süreci ile oturma davranışı üzerinde belirleyici rol oynamıştır. Özellikle daha yüksek ivmeli ve uzun süreli kayıtların kullanıldığı deneylerde, fazla boşluk suyu basıncının daha hızlı biriktiği ve zeminlerde daha büyük oturma değerlerinin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Buna karşın düşük enerjili yer hareketi kayıtlarında sıvılaşma gelişimi daha sınırlı kalmış ve oturma miktarları da düşmüştür. Bu bulgular, deprem yer hareketi kayıtlarının yalnızca giriş verisi olarak değil, sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde kritik bir parametre olarak değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2.4.4. Yeraltı Su Seviyesinin (YASS) Sıvılaşmaya Etkisi

Demir (2021), bir boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizi ile yeraltı su seviyesi lokasyonunun sıvılaşmaya etkisini araştırmış, bu değişkenin zemin profili boyunca ölçülen PGA'ya, spektral büyütme oranına, boşluk suyu basıncı oranına (r_u), kayma gerilme-şekil değiştirmeye ve yanal deplasmanlara etkisini ortaya koymuştur. Buna göre yeraltı su seviyesi derine doğru indikçe zemin profili boyunca gözlemlenen pik yatay ivmeler artmış, yüzeydeki yatay ivmeler ise büyütme uğramıştır. Buna karşın, artık boşluk suyu basıncı oranı, maksimum kayma şekil değiştirme ve maksimum yanal deplasmanlar azalmıştır. Demir (2021) bu sonuçların YASS'a bağlı olarak sıvılaşan tabakanın efektif gerilmelerindeki değişiminden kaynaklandığını ifade etmiştir.

Jalil ve diğ. (2021) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, 28 Eylül 2018 tarihinde Endonezya'nın Orta Sulawesi bölgesinde meydana gelen Mw 7.5 büyüklüğündeki depremin ardından gözlemlenen yaygın zemin sıvılaşması olayları analiz edilmiştir. Üç farklı bölgeden elde edilen zemin profilleri esas alınarak yapılan değerlendirmelerde, DEEPSOIL v7.0 yazılımı kullanılmış ve GQ/H + PWP modeli temelinde bir boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, yer altı su seviyesinin derinliği, zemin tabakalarının fiziksel özellikleri ve boşluk suyu basıncının gelişimi, sıvılaşma potansiyelini etkileyen başlıca parametreler olarak parametrik analizlerle incelenmiştir. Analiz sonuçları, yer altı su seviyesinin yüzeye yaklaştıkça sıvılaşma potansiyelinin dramatik biçimde arttığını

açıkça ortaya koymuştur. Özellikle, yüzeye yakın su tablasına sahip bölgelerde, deprem etkisiyle fazla boşluk suyu basıncının çok daha hızlı bir şekilde geliştiği ve bunun sonucunda zemin dayanımının ani biçimde kaybolduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, çalışmada yer altı suyu seviyesinin, sıvılaşmayı doğrudan tetikleyen en kritik faktörlerden biri olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, gevşek ve suya doymuş zeminlerde bu etkinin daha da belirgin olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda, çalışmanın bulguları, su doymuşluğu ve zemin dinamik özelliklerinin sıvılaşma değerlendirmelerinde mutlaka dikkate alınması gereken faktörler olduğunu ortaya koymaktadır.

2.4.5. Sıvılaşma Sonrası Oturma

Subaşı ve İyisan (2022) çalışmasında, sıvılaşma sonucu oluşan oturma miktarları, PM4Sand bünye modeli kullanılarak yapılan iki boyutlu doğrusal olmayan dinamik analizler ile hesaplanmış ve bu değerler, literatürde yer alan yarı-ampirik tahmin yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, sayısal modelleme ile öngörülen oturma miktarlarının ampirik yöntemlerle elde edilen değerlere genel olarak yakınsadığını göstermiştir. Ancak özellikle yüksek ivmeli ve uzun süreli yer hareketlerinin etkili olduğu analiz senaryolarında, oturma miktarlarında önemli sapmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, oturma davranışının yalnızca zemin profiline değil, aynı zamanda deprem hareketinin şiddeti ve süresi gibi dinamik parametrelere son derece duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışma ayrıca, sayısal modellerin oturma miktarlarını zamana bağlı olarak daha ayrıntılı ve gerçekçi biçimde takip edebildiğini, bu yönüyle yarı-ampirik yöntemlere göre daha detaylı içgörüler sunduğunu da göstermiştir. Bu kapsamda, sıvılaşma sonrası oluşan kalıcı yer değiştirmelerin doğru tahmini için hem sayısal hem de ampirik yöntemlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Ishihara ve diğ. (2015) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, sıvılaşma sonrası oturma davranışı, Tayvan'ın Nantou bölgesinden alınan doğal ve yeniden oluşturulmuş zemin örneklerinin hacimsel şekil değiştirme özellikleri temel alınarak incelenmiştir. Laboratuvar ortamında uygulanan dinamik yüklemeler sonrasında elde edilen veriler, sıvılaşma sonrası oturma zemin örneğinin doğallığını ve içyapısını koruyup korumamasına bağlı olarak belirgin şekilde değiştiğini ortaya koymuştur. Çalışma bulgularına göre, doğal zemin örneklerinde sıvılaşma sonrası daha düşük hacimsel şekil değiştirme ve daha sınırlı oturma meydana gelirken; yeniden oluşturulmuş,

gevşek ve yapısı bozulmuş örneklerde daha yüksek kalıcı oturmalar gözlemlenmiştir. Bu durum, doğal zeminlerin iç yapısal düzeninin, sıvılaşma sonrası deformasyonlara karşı daha dirençli bir davranış sergilediğini göstermektedir. Ayrıca, zeminin sıklığı, tane boyu dağılımı ve boşluk oranı gibi parametrelerin, hacim değişimi yoluyla gelişen oturmalar üzerinde doğrudan etkili olduğu vurgulanmıştır. Bu bağlamda çalışma, sıvılaşma sonrası oturma tahminlerinde yalnızca genel zemin sınıflamalarının değil, örnekleme yöntemi ve zemin dokusunun korunup korunmadığının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

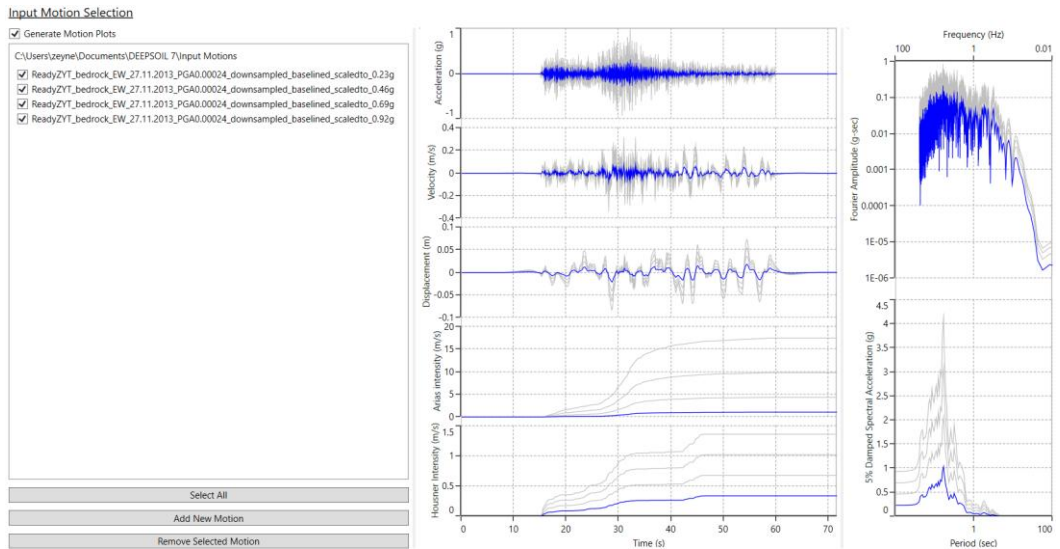
Sıvılaşma sonrası oluşan oturma miktarlarının belirlenmesi, zemin davranışının değerlendirilmesinde kritik öneme sahiptir. Tozburun (2022), dinamik santrifüj modelleri ile gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarda, özellikle gevşek kum zeminlerde meydana gelen sıvılaşmanın önemli düzeyde oturmalara neden olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada kullanılan farklı deprem yer hareketi kayıtları, ivme büyüklüğü ve süre gibi sismik parametrelerin oturma davranışı üzerinde belirleyici etkiler yarattığını göstermiştir. Yer altı su seviyesinin yüzeye yakın olduğu durumlarda, sıvılaşma sonrası oturma miktarlarının belirgin şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde Yasuda ve diğ. (1995), farklı zemin koşullarında meydana gelen sıvılaşma sonrası oturmaları gözlemsel veriler üzerinden incelemiş ve özellikle suya doygun kumlu zeminlerde boşluk suyu basıncı birikimini takiben ani ve büyük oturmaların meydana geldiğini belirtmiştir. Ayrıca, sarsıntının süresi, yer altı su seviyesinin derinliği ve zemin tabakasının kalınlığı gibi parametrelerin de oturma büyüklüğü üzerinde etkili olduğu ifade edilmiştir. Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, sıvılaşma kaynaklı oturmaların tahmininde hem zemin özelliklerinin hem de deprem hareketine ait parametrelerin bütüncül biçimde analiz edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

3. SAHA- ZEMİN ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, oluşturulan zemin profilleri ve değişkenleri sunularak 1-boyutlu doğrusal olmayan zemin tepki analizi sırasında kullanılacak deprem yer hareketi kayıtları ve uygulanan işlemler anlatılmıştır.

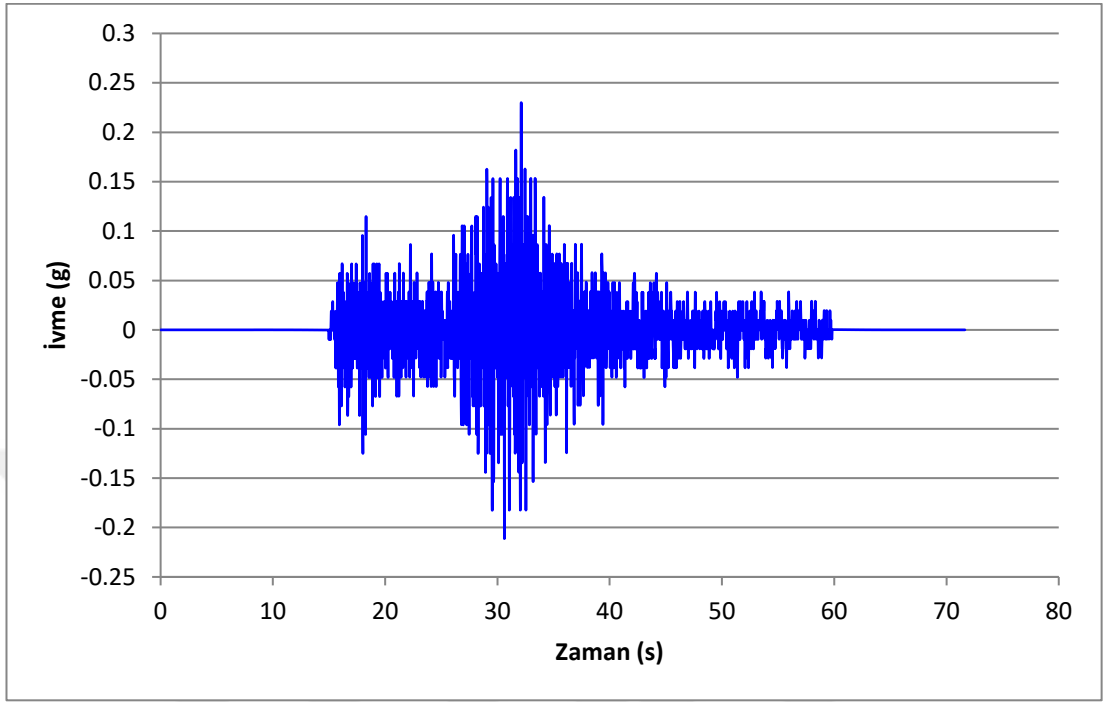
3.1 Deprem Yer Hareketi Seçimi

Bu tez kapsamındaki hesaplamalarda, 27.11.2013 tarihinde Marmara Ereğlisi'nde gerçekleşen $M_L=4.7$ büyüklüğündeki depremin, Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü Deprem Mühendisliği Bölümü tarafından işletilmekte olan İstanbul Geoteknik Düşey Veri Ağı Zeytinburnu istasyonu tarafından yüzeyden 240 m derinde ölçülen anakaya kaydı ölçeklenerek kullanılmıştır. Anakaya kaydı ilk olarak 0.01-25 Hz arasında Butterworth filtre ile filtrelenerek ardından hız ve deplasman grafiklerinde görülen sıfır çizgisinden sapmayı düzeltmek amacıyla taban düzeltmesi uygulanmıştır. Kullanılan deprem kaydının PGA (Pik yer ivmesi) değeri 0.00024 g'dir. Bu depremin ivme zaman kayıtları, PGA'ları 0.23 g, 0.46 g, 0.69 g ve 0.92 g değerlerine ulaşacak şekilde ölçeklendirilerek 4 farklı büyüklükte deprem kaydı üretilmiştir. Tüm analizler, bu 4 adet deprem kaydı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). Tek bir deprem kaydının ölçeklendirilmiş halde kullanılmasının nedeni, seçilen parametrelerin etkilerinin incelenebilmesidir. Bu sayede, deprem büyüklüğünün etkisi de değerlendirilebilmiştir.



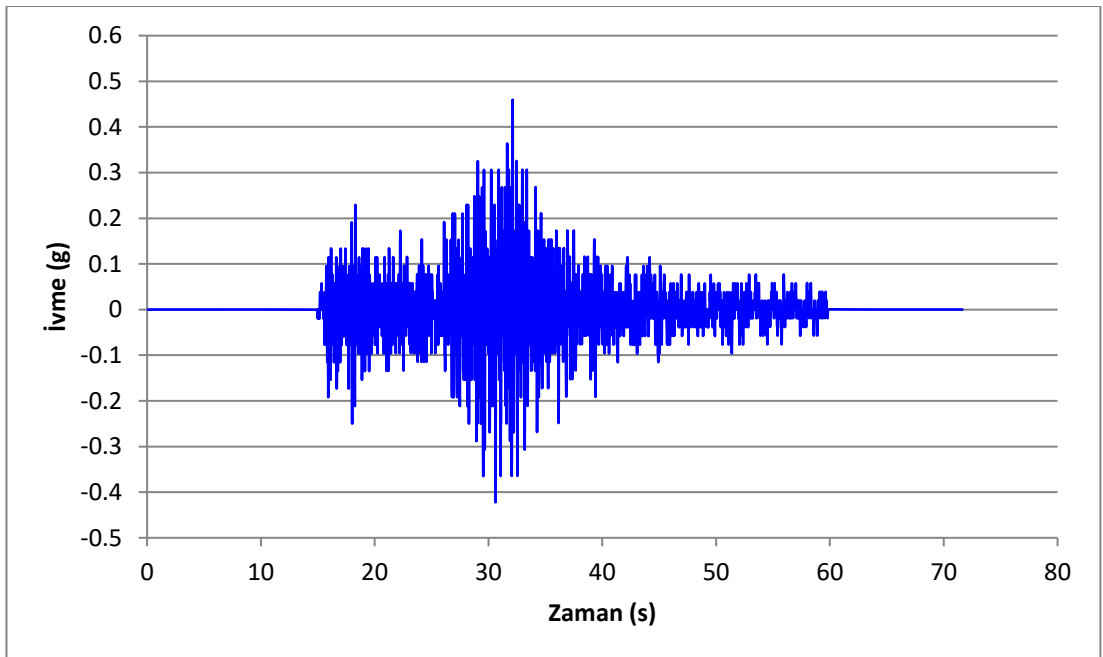
Şekil 3.1 DEEPSOIL'de Deprem Kayıtları Seçimi

Kaya kaydına çevrilmiş deprem kaydının 0.23 g'ye ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 3.2'de verilmiştir.



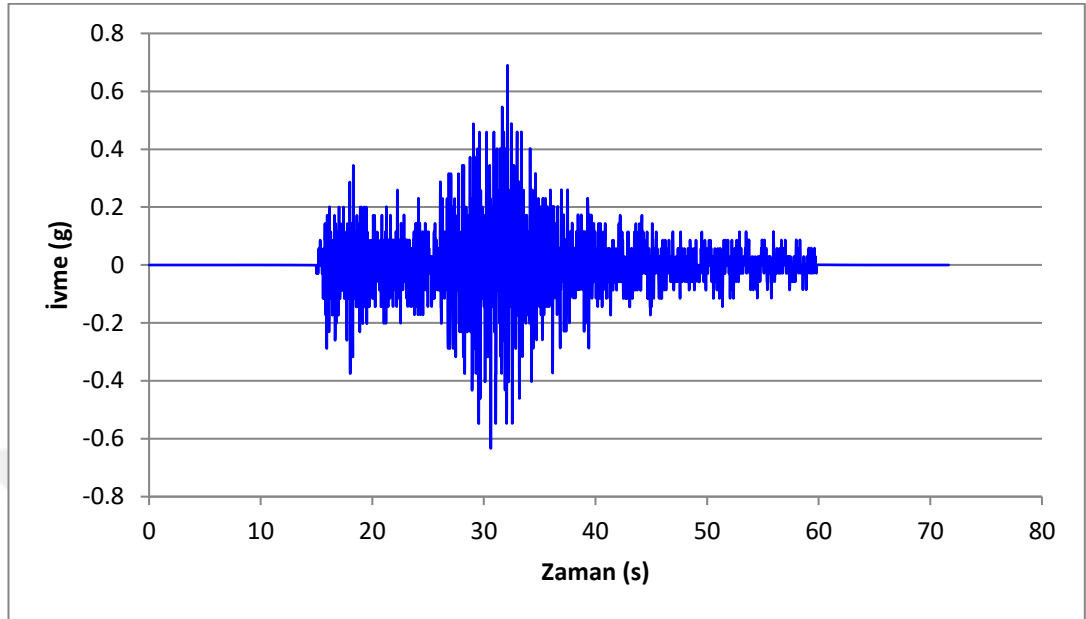
Şekil 3.2 0.23g'ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri

Kaya kaydına çevrilmiş deprem kaydının 0.46 g'ye ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 3.3'te verilmiştir.



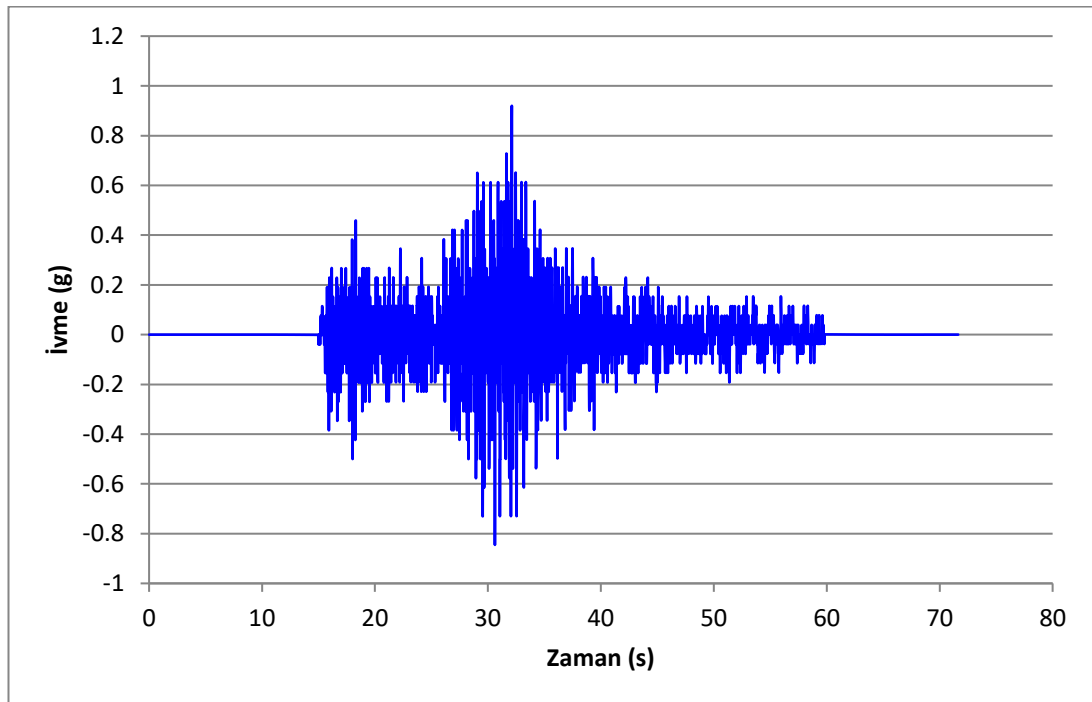
Şekil 3.3 0.46g'ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri

Kaya kaydına çevrilmiş deprem kaydının 0.69 g'ye ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 3.4'te verilmiştir.



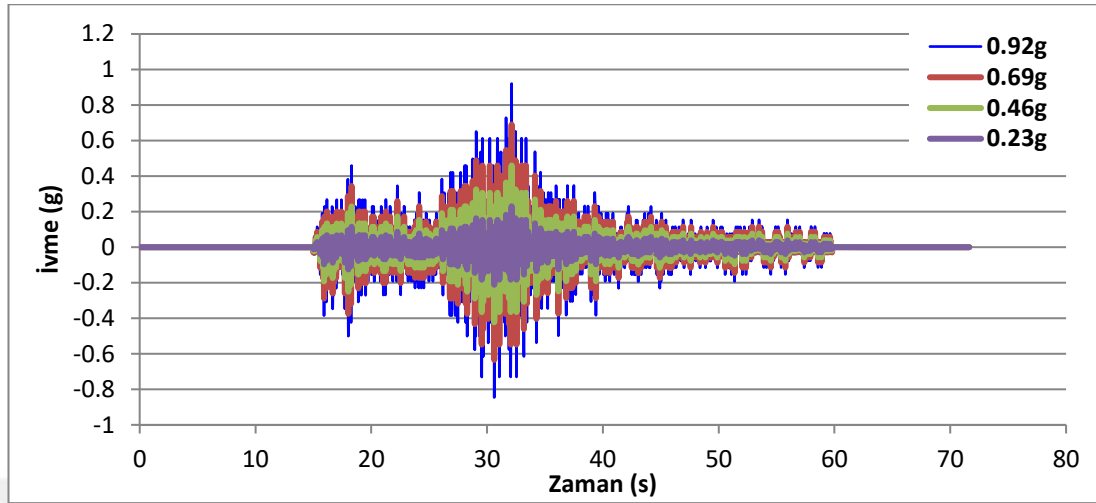
Şekil 3.4 0.69g'ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme- Zaman Grafikleri

Kaya kaydına çevrilmiş deprem kaydının 0.92 g'ye ölçeklendirilmiş ivme zaman grafiği Şekil 3.5'te verilmiştir.



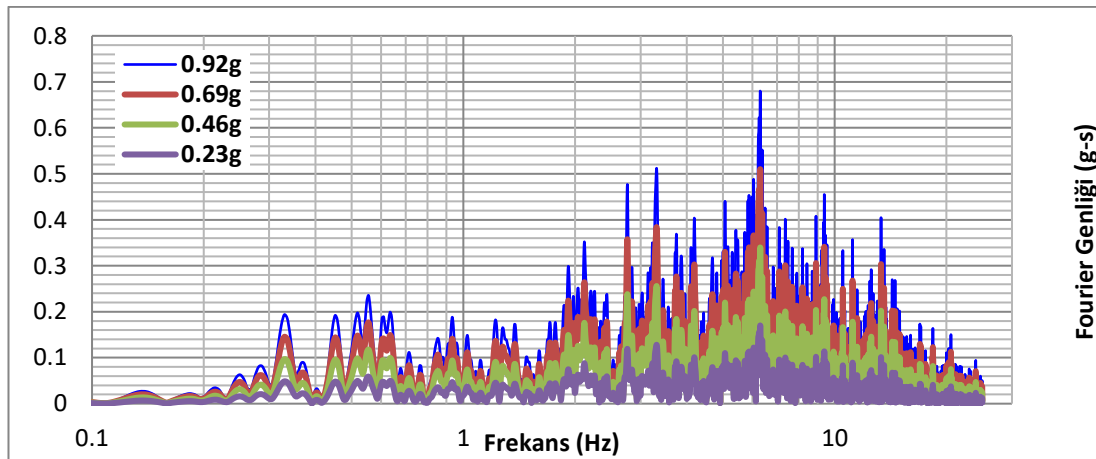
Şekil 3.5 0.92g'ye Ölçeklendirilmiş Deprem Kaydı için İvme-Zaman Grafikleri

Anakaya kaydı 0.23 g, 0.46g, 0.69g ve 0.92 g olarak ölçeklendirilmiş 4 adet deprem kaydının ivme- zaman grafiği Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Deprem Kayıtlarının İvme- Zaman Grafiği

Anakaya kaydı PGA değeri 0.23 g, 0.46g, 0.69g ve 0.92 g olarak ölçeklendirilmiş 4 adet deprem kaydının Fourier Genlik- Zaman grafiği Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Maksimum frekans 6.1 Hz civarı ve maksimum Fourier genliği ise 0.16-0.68 g-s arasında görülmektedir (Şekil 3.7).



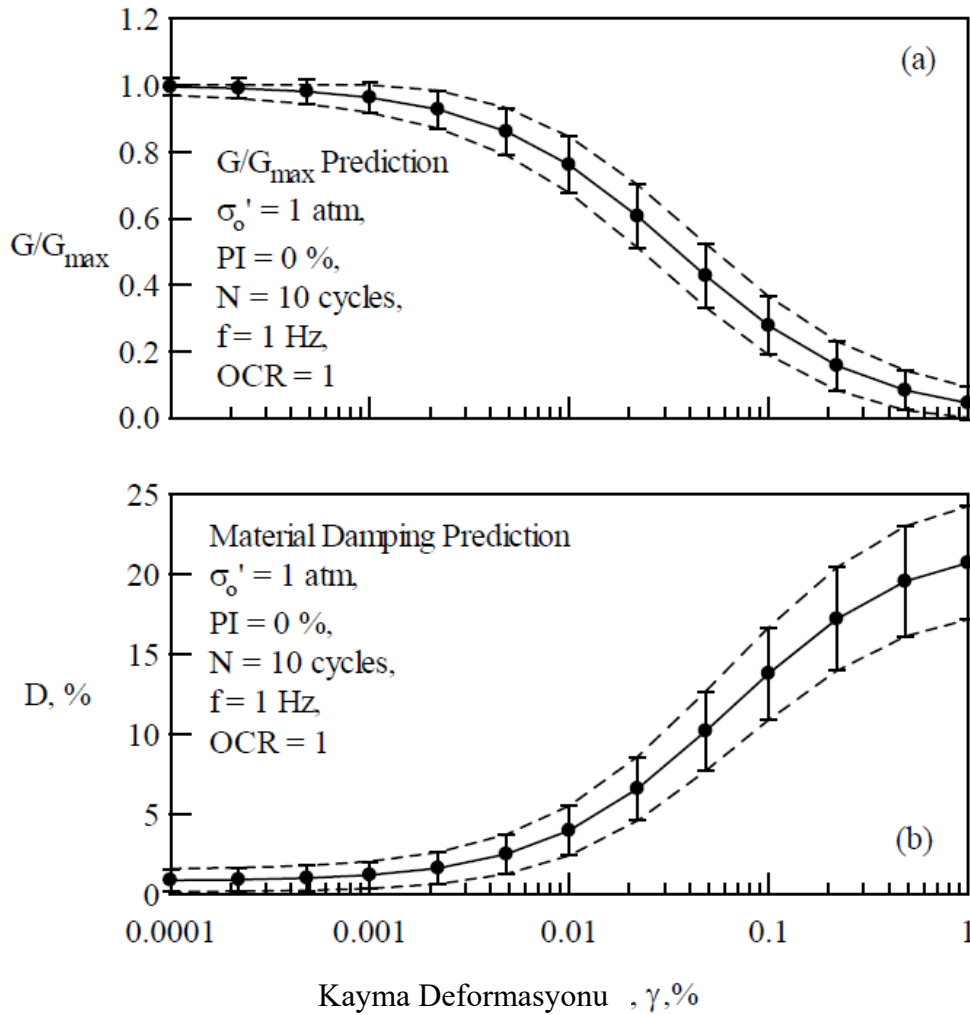
Şekil 3.7 Deprem Kayıtlarının Fourier Genlik-Zaman Grafiği

3.2. Zemin Özellikleri

Bu tez kapsamında, zemin dinamik özellikleri seçilirken parametrik bir yaklaşım benimsenmiştir. Zemin dinamik özellikleri, analiz yaklaşımlarına göre belirlenmiştir. Zemin kayma dalgası hızının, kum tabakası kalınlığının ve yeraltı su seviyesinin

derinliğinin sıvılaşmaya etkisinin incelenebilmesine uygun olarak farklı değerlerde seçilmiştir.

Darendeli (2001), kil numunelerde yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda, plastisite indisi arttıkça sönüm oranının azaldığını ve kayma modülünün arttığını göstermiştir. Elde ettiği değerler yüksek gerilme seviyelerinde olmuştur. Doktora tezi kapsamında, 110 adet örselenmemiş numune ile gerçekleştirdiği rezonanslı kolon kayma deneyleri sonucunda Darendeli (2001) azalım eğrisini elde etmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Kayma Modülü ve Sönüm Oranı Azalım Eğrileri (Darendeli, 2001)

Zemin profilindeki ilk tabaka kum, sonra kil ve en altta ise kıltaşı tabakası olarak tanımlanmış ve tüm zemin profilleri değişkenlere bağlı olarak Tablo 4.1'de bir profil numarası ile tanımlanmıştır. Kıltaşı tabakasının altında anakaya yer almaktadır. Anakaya derinliği, kum tabakası kalınlığının değişimine bağlı olarak 83.00- 95.00 m derinlikte yer almaktadır. Analizler yeraltı su seviyesi yüzeyde ve 4.0 m derinde olacak

şekilde iki farklı seçenek ile tanımlanmıştır. Analiz sonuçlarında yeraltı su seviyesinin sıvılaşma etkisi incelenirken buna ek olarak 2.0 m derinde yeraltı su seviyesindeki profiller de eklenmiştir.

Kum tabakasının ince tane oranı (İDO) 15%, içsel sürtünme açısı ise 30° olarak kabul edilmiştir. Kum tabakasının kayma dalga hızı 100 m/s, 125 m/s, 150 m/s ve 175 m/s olarak değişkenlik göstermektedir. Kum birim hacim ağırlığı 18.0 kN/m³'tür.

Kum tabakası kalınlığı zemin profil göre 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m ve 15.0 m olarak farklılık göstermektedir. Kum tabakası sıvılaşma derinliğinin detaylı olarak incelenmesi amacıyla 1.0 m tabakalar halinde tanımlanmıştır.

Tüm hesaplarda kil, kiltası ve anakaya zemin değişkenleri sabit kalmıştır. Kum tabakasının altında yer alan kil tabakasının kalınlığı 30.0 m, kayma dalga hızı ise 300 m/s olarak seçilmiştir. Kil tabakası 3.0 m kalınlığında tabakalar halinde tanımlanmıştır. Kil birim hacim ağırlığı 19.0 kN/m³ ve içsel sürtünme açısı 35°'dir. Tablo 3.1'de verilen zemin özelliklerinden H tabaka kalınlığı, V_s kayma dalga hızı, T ise periyodu göstermektedir.

Tablo 3.1 Seçilen Zemin Özellikleri

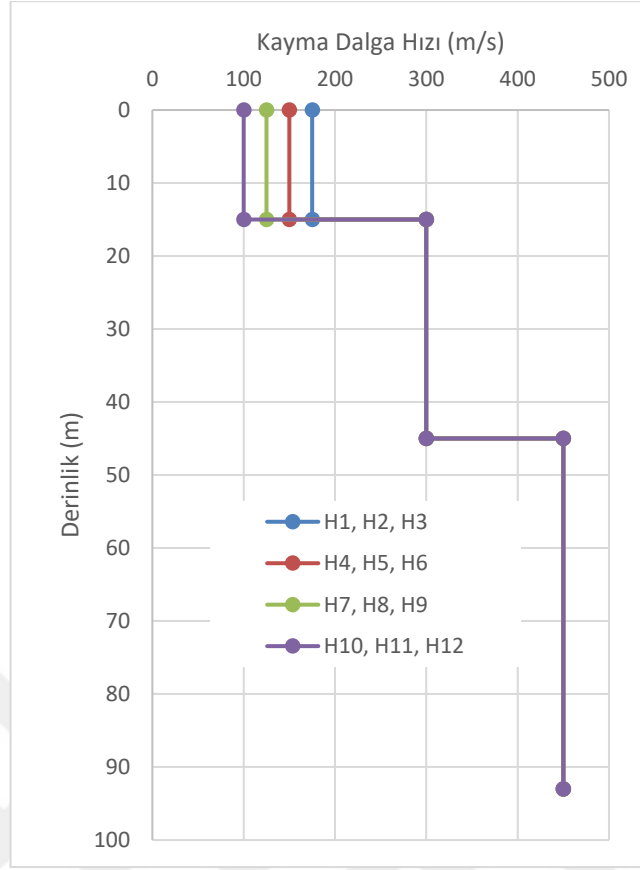
Zemin Profil No	Tabaka-1			Tabaka-2			Tabaka-3			Anakaya Derinliği (m)
	Kum			Kil			Kiltası			
	H (m)	V _s (m/s)	T (s)	H (m)	V _s (m/s)	T (s)	H (m)	V _s (m/s)	T (s)	
1	15	175	0.34	30	300	0.4	48	400	0.48	93
2	15	175	0.34	30	300	0.4	48	400	0.48	93
3	15	175	0.34	30	300	0.4	48	400	0.48	93
4	15	150	0.4	30	300	0.4	48	400	0.48	93
5	15	150	0.4	30	300	0.4	48	400	0.48	93
6	15	150	0.4	30	300	0.4	48	400	0.48	93
7	15	125	0.48	30	300	0.4	48	400	0.48	93
8	15	125	0.48	30	300	0.4	48	400	0.48	93
9	15	125	0.48	30	300	0.4	48	400	0.48	93
10	15	100	0.6	30	300	0.4	48	400	0.48	93
11	15	100	0.6	30	300	0.4	48	400	0.48	93
12	15	100	0.6	30	300	0.4	48	400	0.48	93
13	7.5	175	0.17	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
14	7.5	175	0.17	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
15	7.5	175	0.17	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
16	7.5	150	0.2	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
17	7.5	150	0.2	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5

18	7.5	150	0.2	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
19	7.5	125	0.24	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
20	7.5	125	0.24	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
21	7.5	125	0.24	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
22	7.5	100	0.3	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
23	7.5	100	0.3	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
24	7.5	100	0.3	30	300	0.4	48	400	0.48	85.5
25	10	175	0.23	30	300	0.4	48	400	0.48	88
26	10	175	0.23	30	300	0.4	48	400	0.48	88
27	10	175	0.23	30	300	0.4	48	400	0.48	88
28	5	175	0.11	30	300	0.4	48	400	0.48	83
29	5	175	0.11	30	300	0.4	48	400	0.48	83
30	5	175	0.11	30	300	0.4	48	400	0.48	83
31	10	125	0.32	30	300	0.4	48	400	0.48	88
32	10	125	0.32	30	300	0.4	48	400	0.48	88
33	10	125	0.32	30	300	0.4	48	400	0.48	88
34	5	125	0.16	30	300	0.4	48	400	0.48	83
35	5	125	0.16	30	300	0.4	48	400	0.48	83
36	5	125	0.16	30	300	0.4	48	400	0.48	83

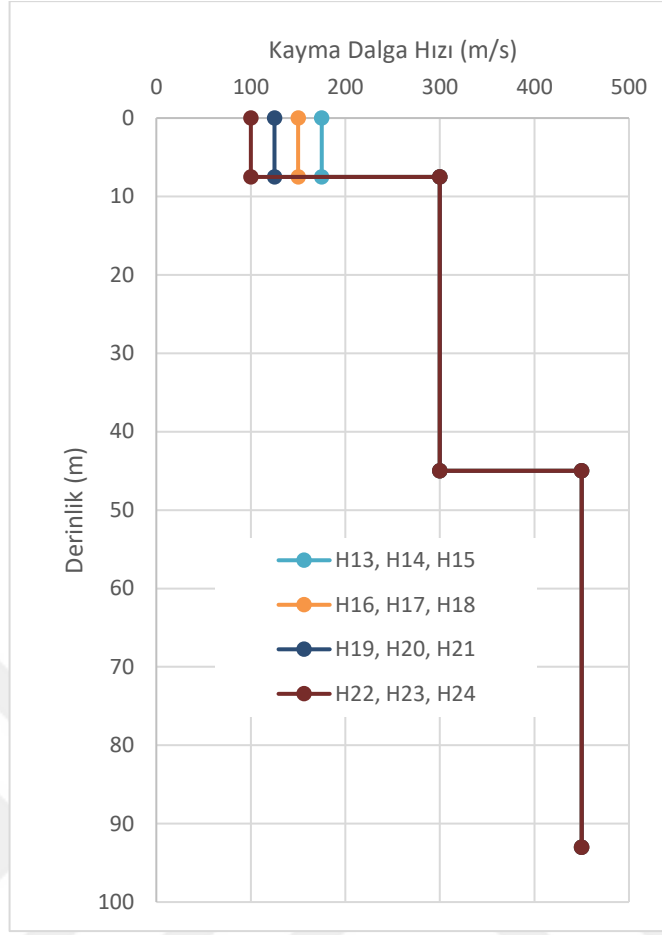
Değişken zemin parametrelerinin etkisinin incelenebilmesi için, kum tabakası altındaki zeminlerde zemin periyodu sabit kalmıştır. Zemin hakim periyodu kayma dalga hızı arttıkça artmaktadır. Zemin hakim periyodu aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$T = \frac{4H}{V_s} \quad 4.1$$

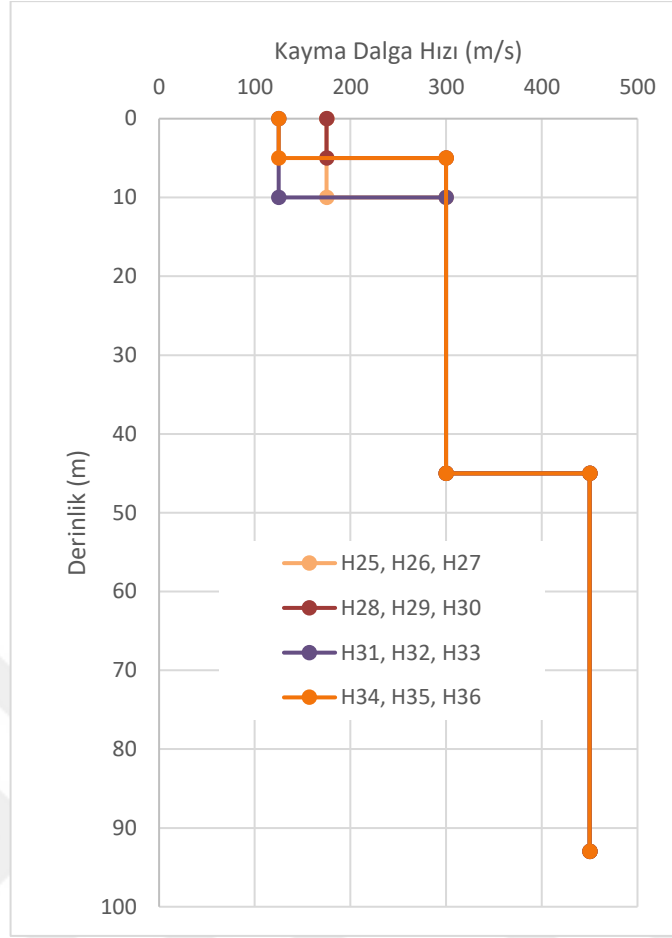
Her bir zemin tabakası için kayma dalga hızı değerlerini gösteren grafikler aşağıda Şekil 3.9, Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.9 H1-H12 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği

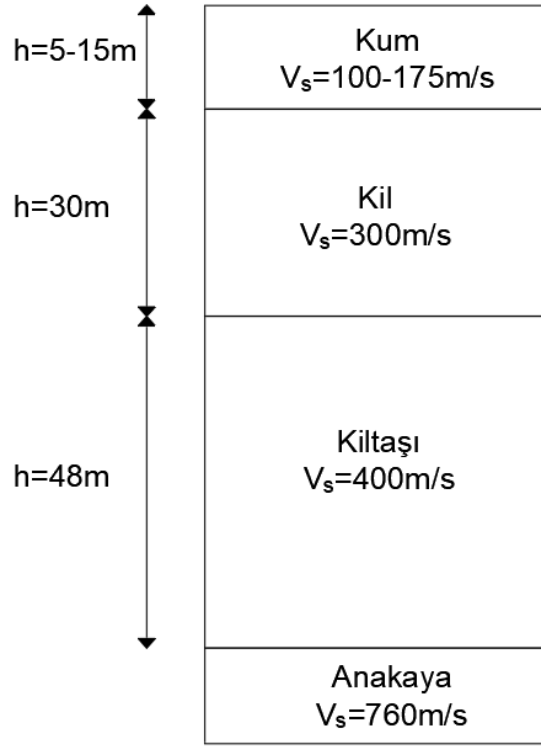


Şekil 3.10 H13-H24 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği



Şekil 3.11 H25-H36 Kayma Dalga Hızı- Derinlik Grafiği

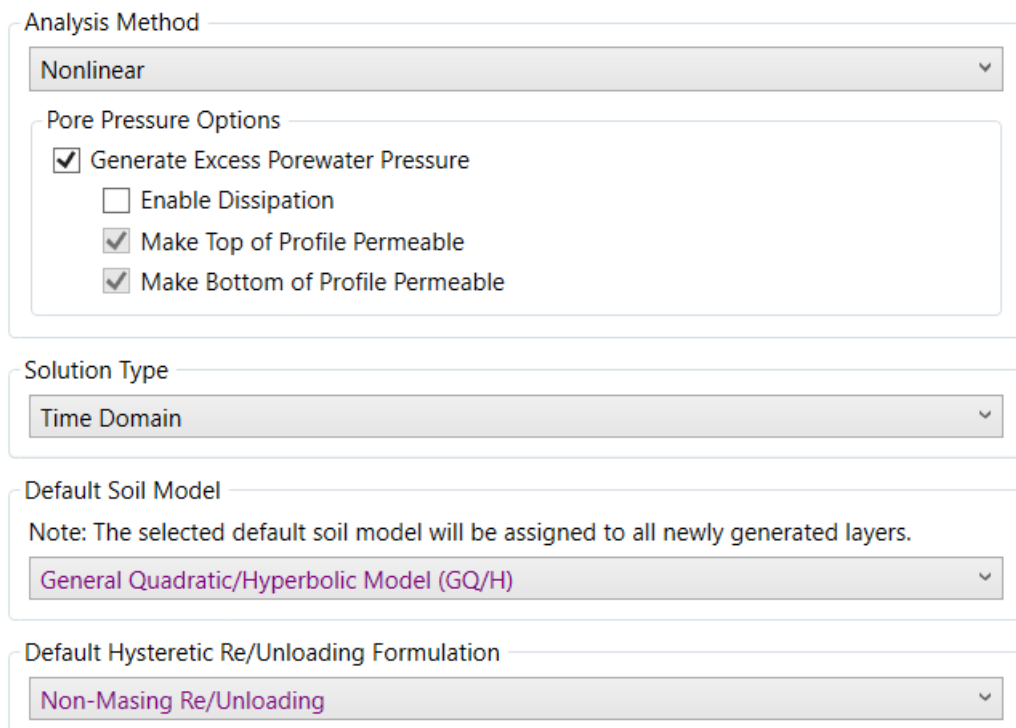
Kil tabakası ile anakaya arasında yer alan kıltaşı tabakasının kalınlığı 48.0 m ve kayma dalga hızı 400 m/s olarak kabul edilmiştir. Kıltaşı tabakası 4.0 m tabakalar halinde tanımlanmıştır. Kıltaşı birim hacim ağırlığı 20.0 kN/m^3 ve içsel sürtünme açısı 45° olarak kabul edilmiştir. Genelleştirilmiş zemin profili Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12 Genelleştirilmiş Zemin Profili

4. DEEP SOIL İLE 1-BOYUTLU DOĞRUSAL OLMAYAN NÜMERİK ANALİZ

Bu çalışma kapsamındaki nümerik hesaplar DEEPSOIL v7.1.8.0 programı kullanılarak doğrusal olmayan analiz yöntemi ile 1-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu programda, doğrusal olmayan analizler zaman tanım alanında yürütülmektedir. Bünye modeli olarak Genelleştirilmiş Kuadratik/Hiperbolik (GQ/H) Modeli ve histerik yeniden/boşaltma formülasyonu Non-Masing Re/Unloading olarak kullanılarak zemin tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. DEEPSOIL programı kullanıcı arayüzünde analiz yöntemleri seçimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



The image shows a screenshot of the DEEPSOIL software interface for selecting analysis methods. The interface is organized into several sections:

- Analysis Method:** A dropdown menu is set to "Nonlinear".
- Pore Pressure Options:** A group of four checkboxes:
 - Generate Excess Porewater Pressure
 - Enable Dissipation
 - Make Top of Profile Permeable
 - Make Bottom of Profile Permeable
- Solution Type:** A dropdown menu is set to "Time Domain".
- Default Soil Model:** A dropdown menu is set to "General Quadratic/Hyperbolic Model (GQ/H)". A note above it states: "Note: The selected default soil model will be assigned to all newly generated layers."
- Default Hysteretic Re/Unloading Formulation:** A dropdown menu is set to "Non-Masing Re/Unloading".

Şekil 4.1 Analiz yöntemi seçimi

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi DEEP SOIL programında analiz yöntemlerinin seçiminde zemin profilinin altı ve üstü geçirgen olarak seçilmiştir. Bunun nedeni, boşluk suyu basıncının sönmelenmesine izin vermektir.

Anakaya derinliği hesaplarda 83.00- 93.00 m arasında değişmektedir. Anakaya birim hacim ağırlığı 20 kN/m³, kayma dalgası hızı (V_s) 760 m/s’dir. Tüm değerler programda tanımlandıktan sonra deprem kayıtları seçilerek 1-boyutlu yer tepki analizleri yapılmaktadır.

Kil ve kaya birimler için zemin değişkenleri tüm hesaplarda aynı kullanılmıştır (Tablo 4.1). Hesaplarda yalnızca kum tabaka kalınlığı, kum tabakasının kayma dalga hızı ve yeraltı su seviyesi değişkenlik göstermiştir. Her hesap 4 farklı deprem kaydı için yapılarak deprem büyüklüğünün değişiminin de etkisi incelenmiştir.

Tablo 4.1 Hesaplarda Kullanılan Zemin Modeli Değişkenleri

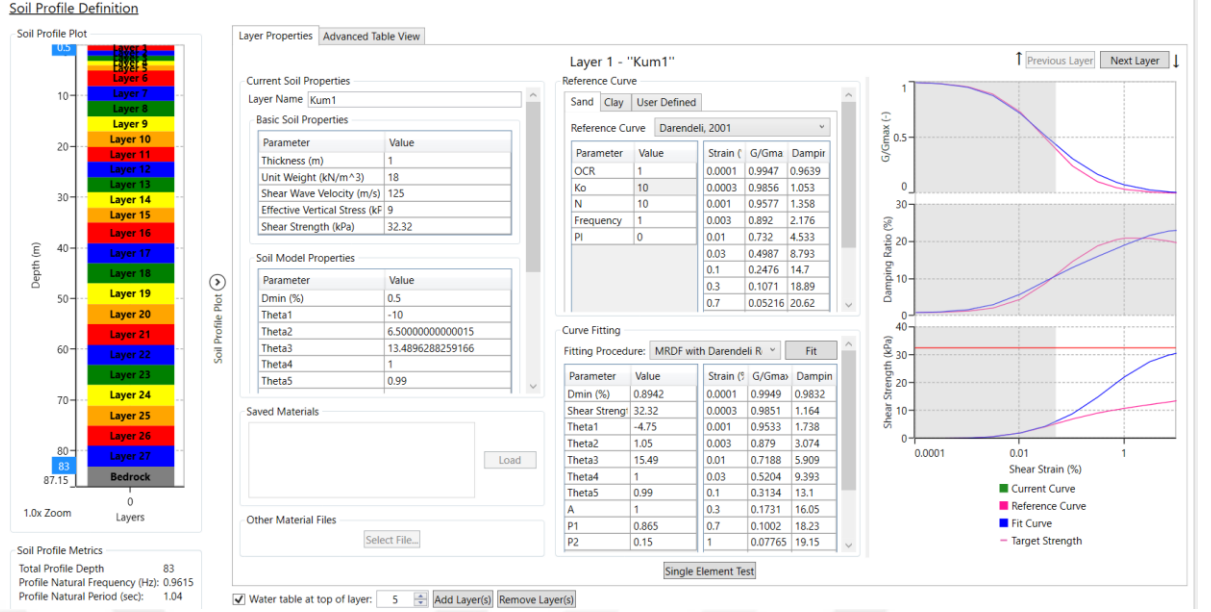
No	Tabaka İsmi	Zemin Modeli	Birim Hacim Ağırlığı (kN/m ³)	Vs (m/s)	Kayma Dayanımı (kPa)	D (%)	FC (%)	Φ (°)	Ko	Max r _u	cv (m ² /s)	cv comp.	f s	p r	F A	s B	γ C	v D	vtvp (%)
1	Kum1	Sand- Vucetic/Dobry	18	100	23.03	0.5	15	30	0.50	0.95	0.06	0	2	1	29.48	1.41	0.02	1	-
2	Kum2	Sand- Vucetic/Dobry	18	125	32.32	0.5	15	30	0.50	0.95	0.06	0	2	1	17.42	1.41	0.02	1	-
3	Kum3	Sand- Vucetic/Dobry	18	150	42.65	0.5	15	30	0.50	0.95	0.06	0	2	1	11.34	1.41	0.02	1	-
4	Kum4	Sand- Vucetic/Dobry	18	175	53.91	0.5	15	30	0.50	0.95	0.06	0	2	1	7.89	1.41	0.02	1	-
5	Kil	Clay- Matasovic	19	300	122.30	0.5	-	35	0.43	0	0.00001	0	0.15	0.56	7.65	-14.72	6.38	0.69	0.1
6	Kiltaşı	Clay- Matasovic	20	400	189.39	2	-	45	0.29	0	0.00001	0	0.15	0.56	7.65	-14.72	6.38	0.69	0.1

Tablo 4.2’de yer tepki analizlerinde kullanılan zemin profillerinin özet gösterimi yer almaktadır.

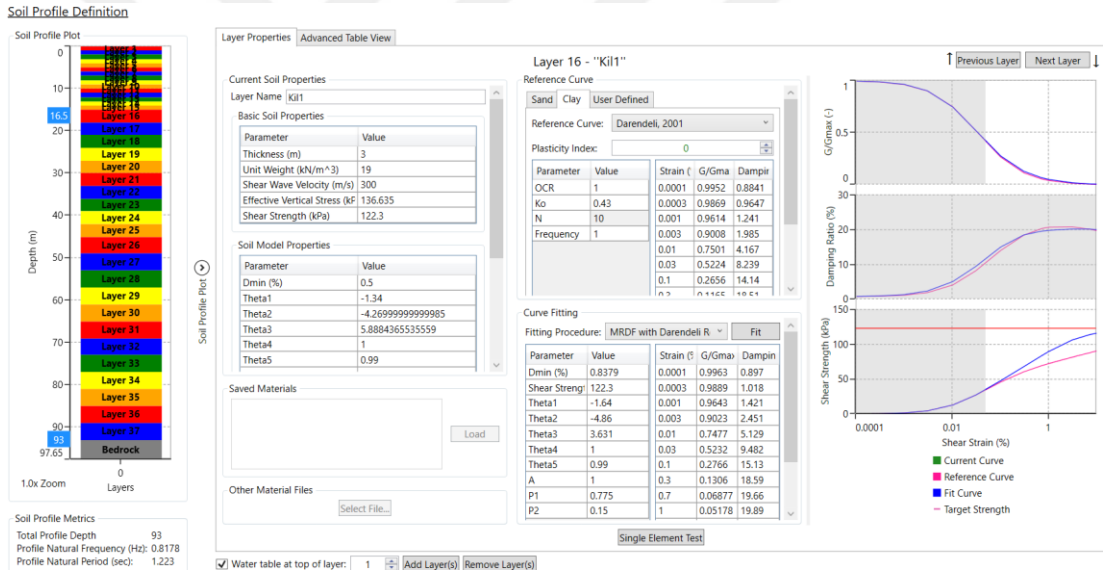
Tablo 4.2 Hesaplarda Kullanılan Zemin Değişkenlerinin Özet Gösterimi

Tabaka No	Zemin	T (s)	H (m)	Vs (m/s)
1	Kum	0.11-0.60	5.0-15.0	100-175
2	Kil	0.40	30.0	300
3	Kiltaşı	0.48	48.0	400

Kil ve kiltası tabakaları için Marine Clay (OCR = 1.0), Matasovic and Vucetic (1995) zemin değişkenleri kullanılmıştır (DEEPSOIL Manual, 2024). Program bünyesinde hazırda tanımlı olan eğrilerden Darendeli (2001) kayma modülü ve sönüm azalım eğrisi kullanılarak zemin parametreleri elde edilmiştir (Şekil 4.2, Şekil 4.3).

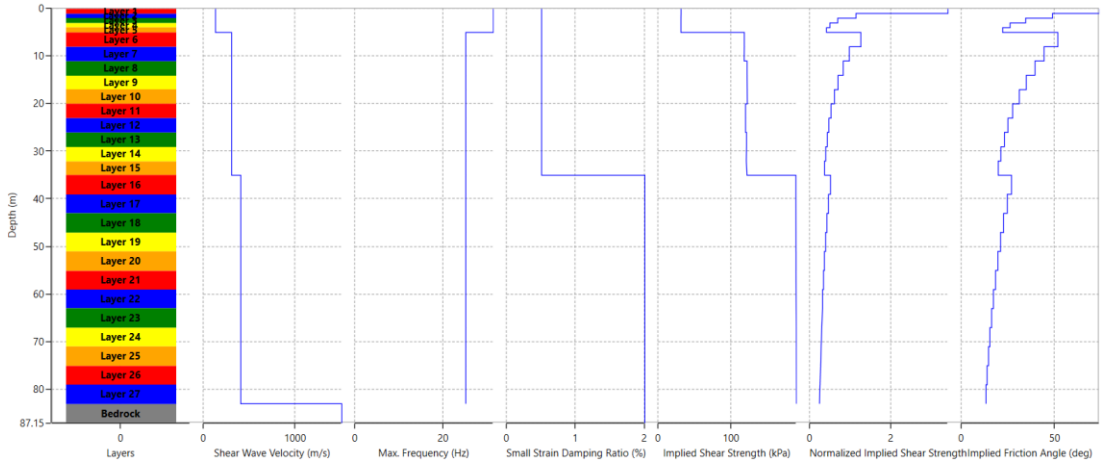


Şekil 4.2 Kum tabakalar için zemin modelinin tanımlanması



Şekil 4.3 Kil tabakalar için zemin modelinin tanımlanması

Tüm zemin profillerinin kayma dalga hızı, frekans, sönüm oranı, kayma gerilmesi ve içsel sürtünme açısı değerleri Şekil 4.4'teki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 4.4 Zemin profili zemin değerleri grafikleri



5. SIVILAŞMA ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

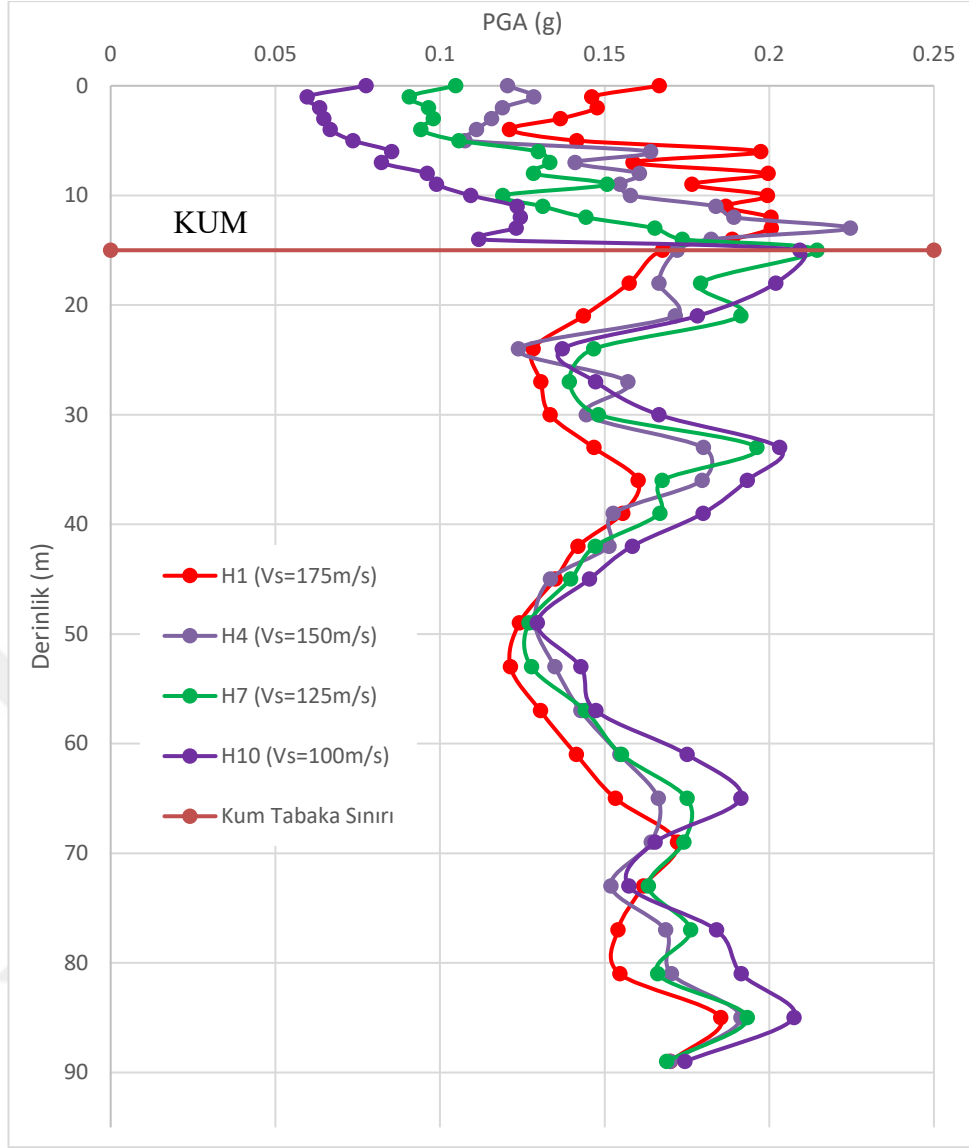
Bu bölümde, DEEPSOIL programı ile yapılan numerik analiz sonuçları üstte yer alan kum tabakasının kalınlığı, kayma dalgası hızı, yeraltı su seviyesinin derinliği ve deprem büyüklüğünün etkisi değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler yapılırken kum tabakası dışındaki zeminlerin dinamik özellikleri sabit kalmıştır. Analiz sonuçları farklı zemin profilleri grafik ve tablolar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar her bir değişken için ayrı olarak ele alınmıştır.

5.1. Kayma Dalga Hızının Etkisi

Analizlerde en üstteki tabaka olan kum tabakasının kayma dalgası hızı (V_s) 100 m/s, 125 m/s, 150 m/s ve 175 m/s olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Her bir kayma dalgası hızına göre analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde ve 4.0 m derinlikte olduğu durumlar için 4 adet farklı genlikteki deprem ivme kaydı (PGA=0.23 g, 0.46 g, 0.69 g, 0.92 g) için grafikler aşağıdaki bölümlerde gösterilmiştir. Kum tabaka kalınlığı analizlerde 7.50 m ve 15.0 m olarak seçilmiştir.

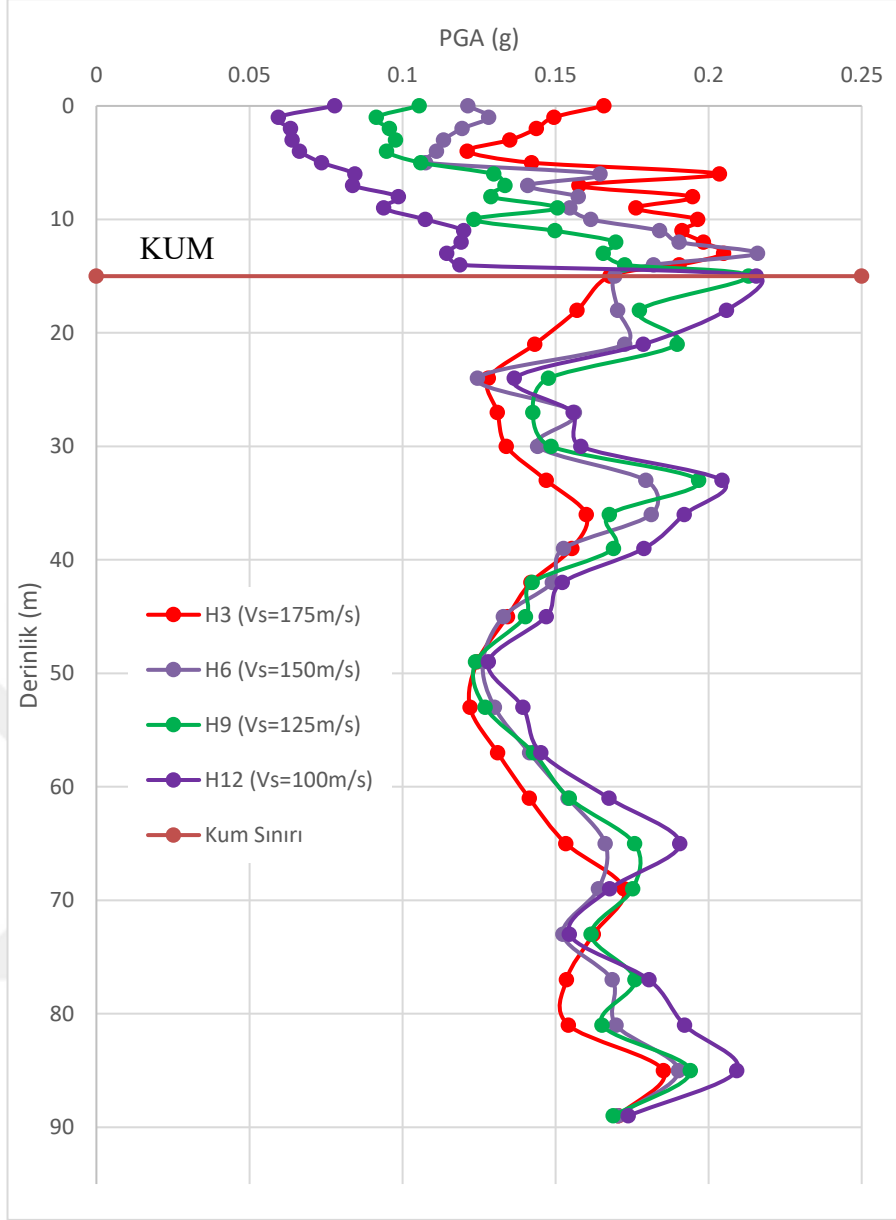
5.1.1. Deprem İvme Kaydı 0.23 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.1). Kum tabaka sınırını belirten grafiklerdeki kırmızı çizginin üstünde yer seviyesine kadar kum tabakası bulunmaktadır. Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



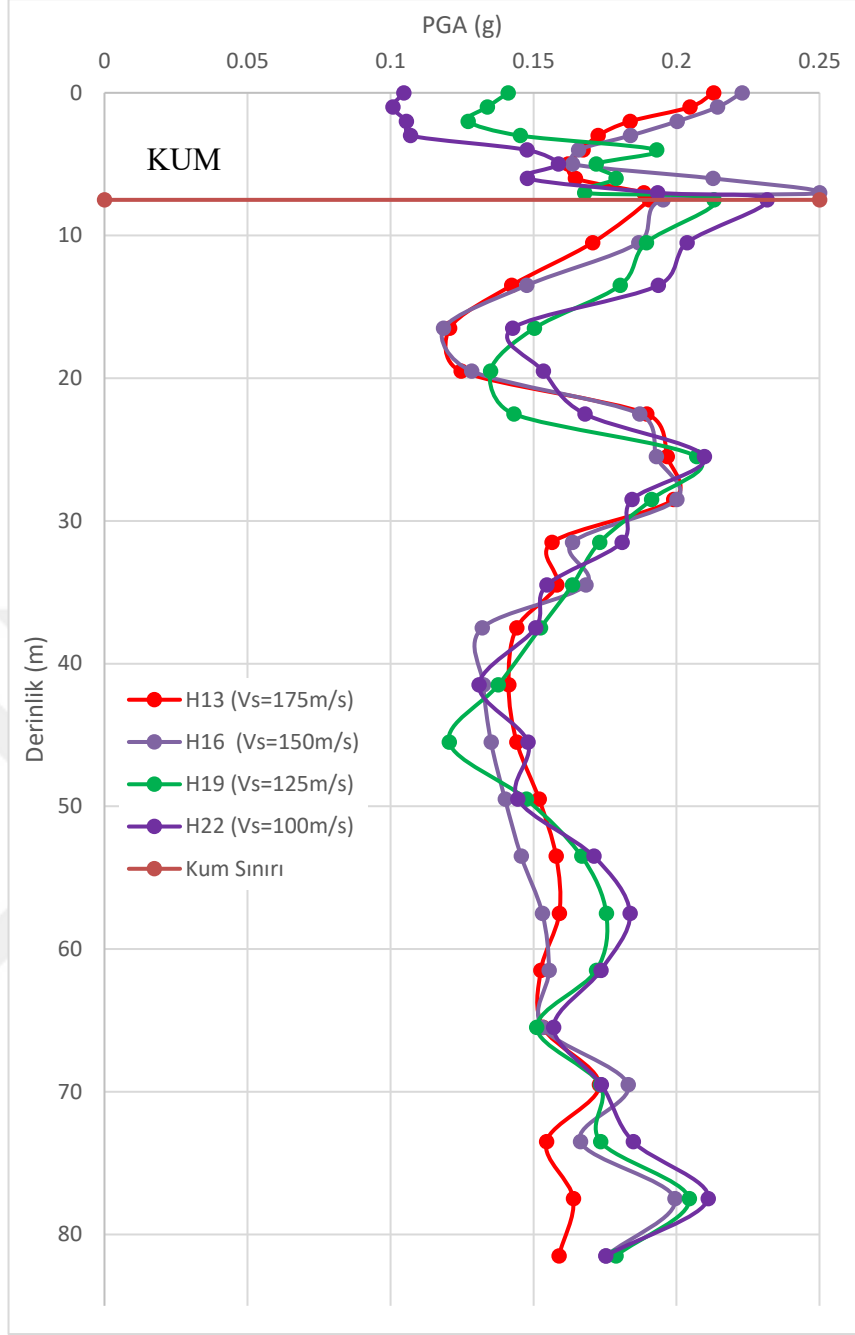
Şekil 5.1 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.2). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde veya 4.0 m derinlikte olması elde edilen yüzey PGA değerlerini değiştirmemiştir.



Şekil 5.2 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)

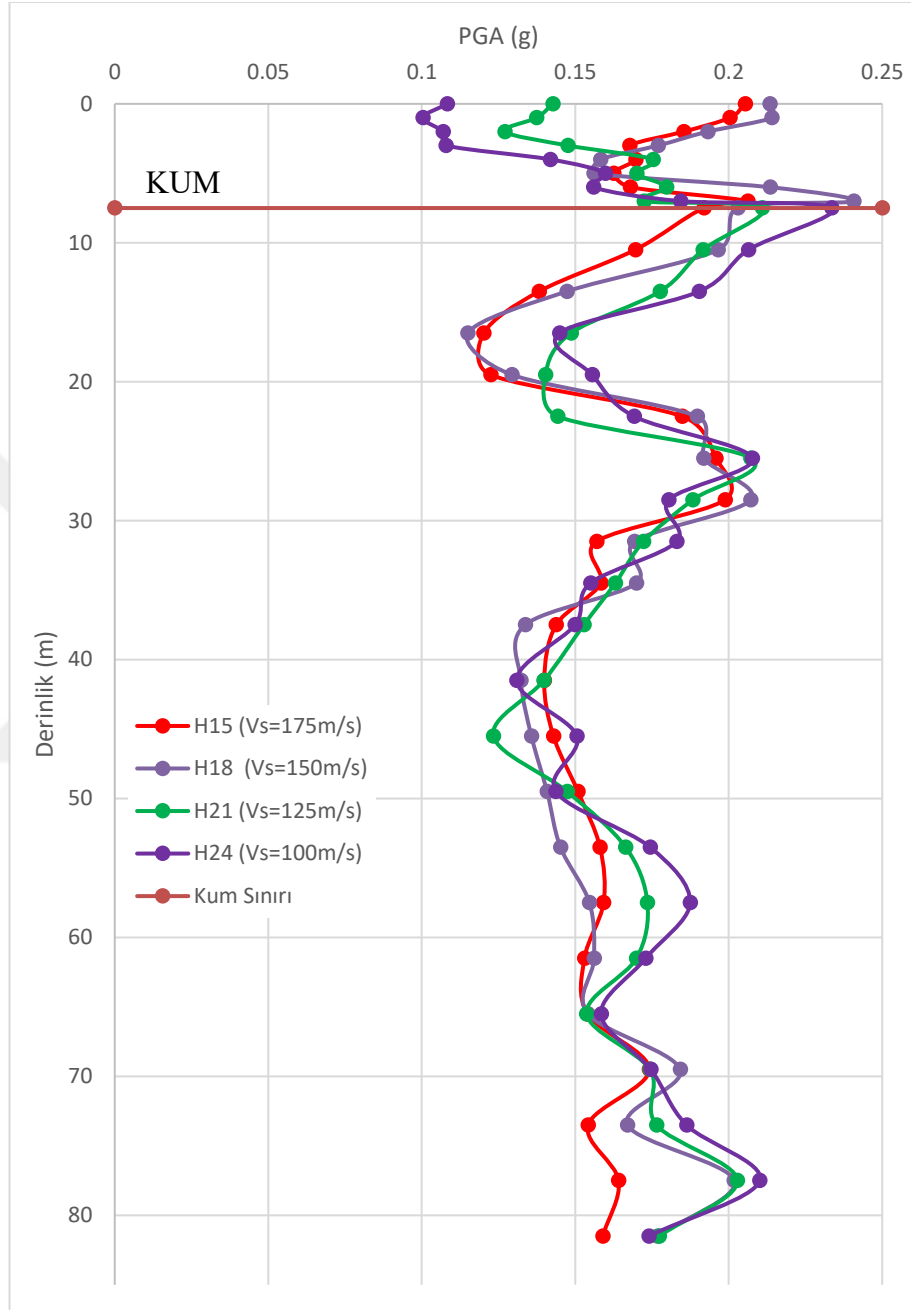
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.3). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır. Kayma dalga hızı 150 m/s olduğunda, 175 m/s olan kayma dalga hızlı profile göre PGA daha yüksek bulunmuştur. Kum kalınlığının 15.0 m olduğunda, 7.5 m kum kalınlığı olan profillere göre PGA daha düşük olduğu görülmüştür. Yeraltı su seviyesi 0 m'den 4.0 m'ye düştüğünde PGA değerlerinde değişiklik olmamıştır.



Şekil 5.3 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=7.50m$)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.4). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır. Kayma dalga hızı 150 m/s olduğunda, 175 m/s olan kayma dalga hızlı profile göre PGA daha yüksek bulunmuştur. Yeraltı su seviyesinin

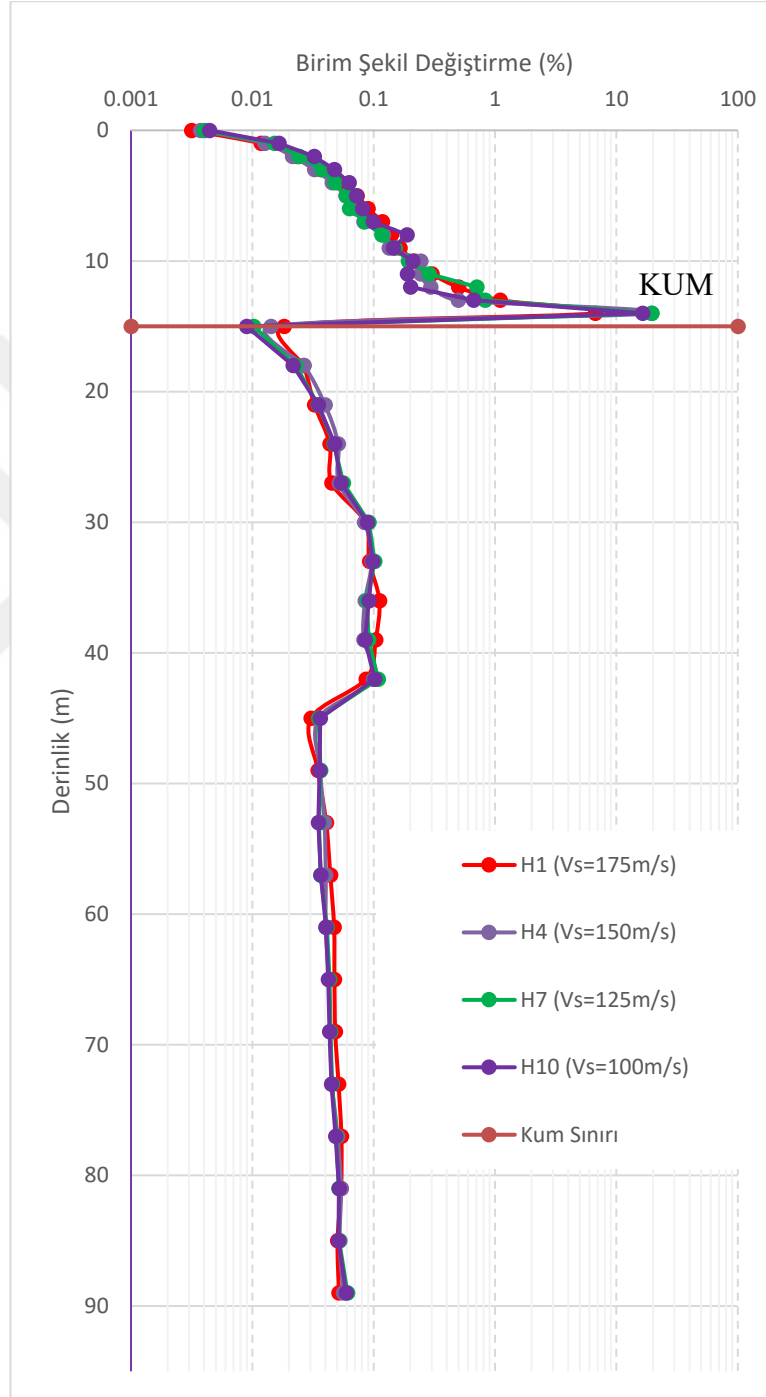
yüzeyde veya 4.0 m derinlikte olması bu zemin profillerinde PGA değerlerini etkilememiştir. Kum tabaka kalınlığı 15.0 m'den 7.50 m'ye indiğinde PGA değerlerinde değişim gözlenmemiştir.



Şekil 5.4 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı,
H_{kum}=7.50m)

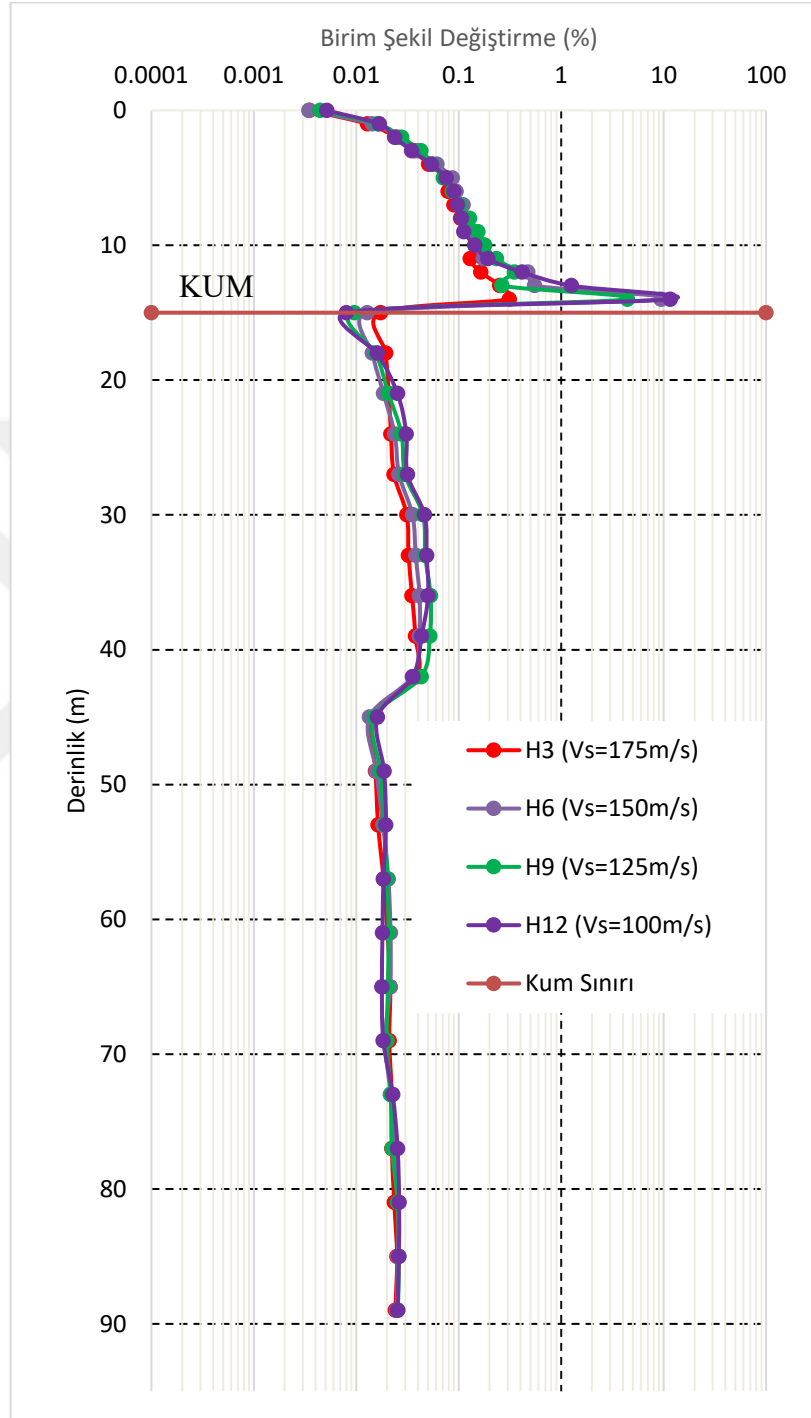
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda PGA=0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri arasında anlamlı bir ilişki elde edilmemiştir (Şekil 5.5). Kum tabakası için kayma

dalgası hızı değişimi birim şekil değiştirme değerlerinde büyük bir farka sebep olmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



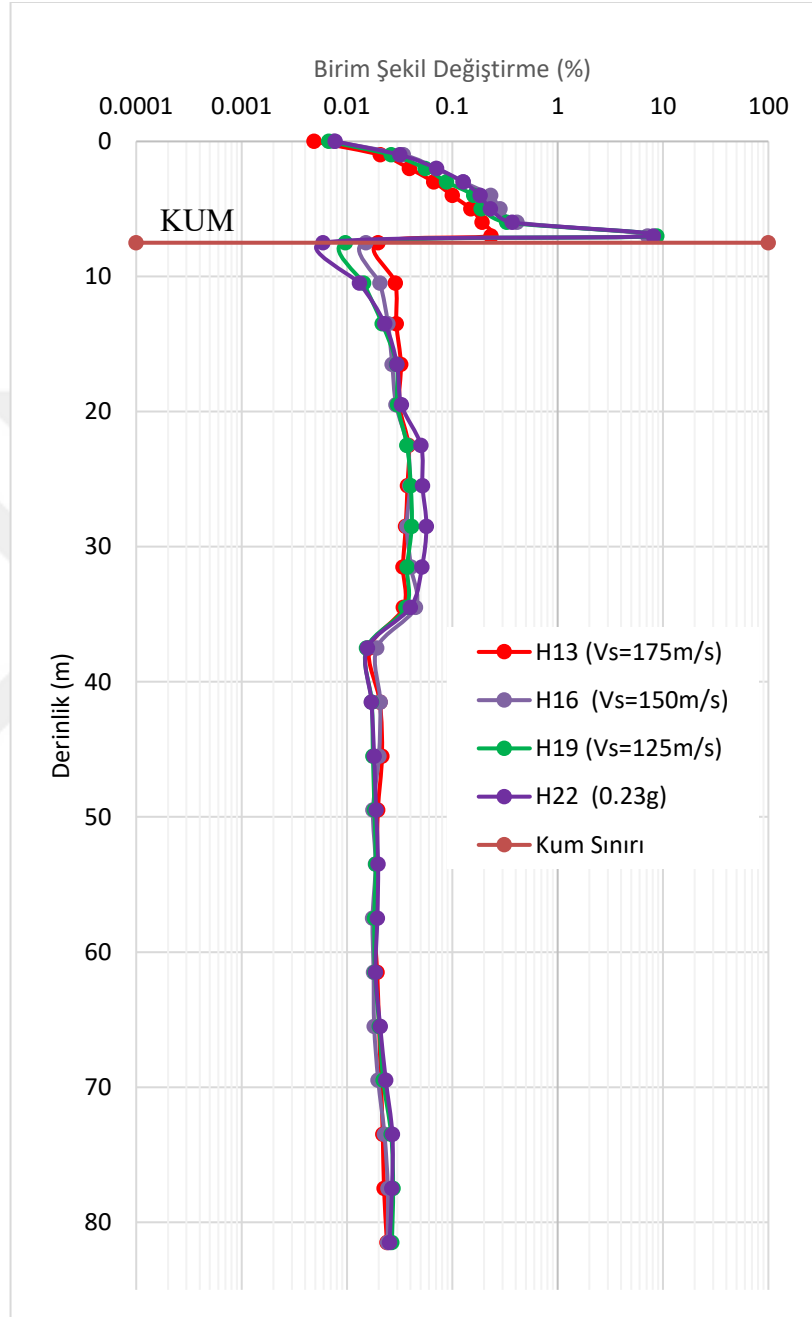
Şekil 5.5 Birim Şekil Değişirme-Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Anakaya Deprem Kaydı, $H_{kum}=15.0m$)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında maksimum birim şekil değıştirme değeri benzer elde edilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Birim Şekil Değıştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)

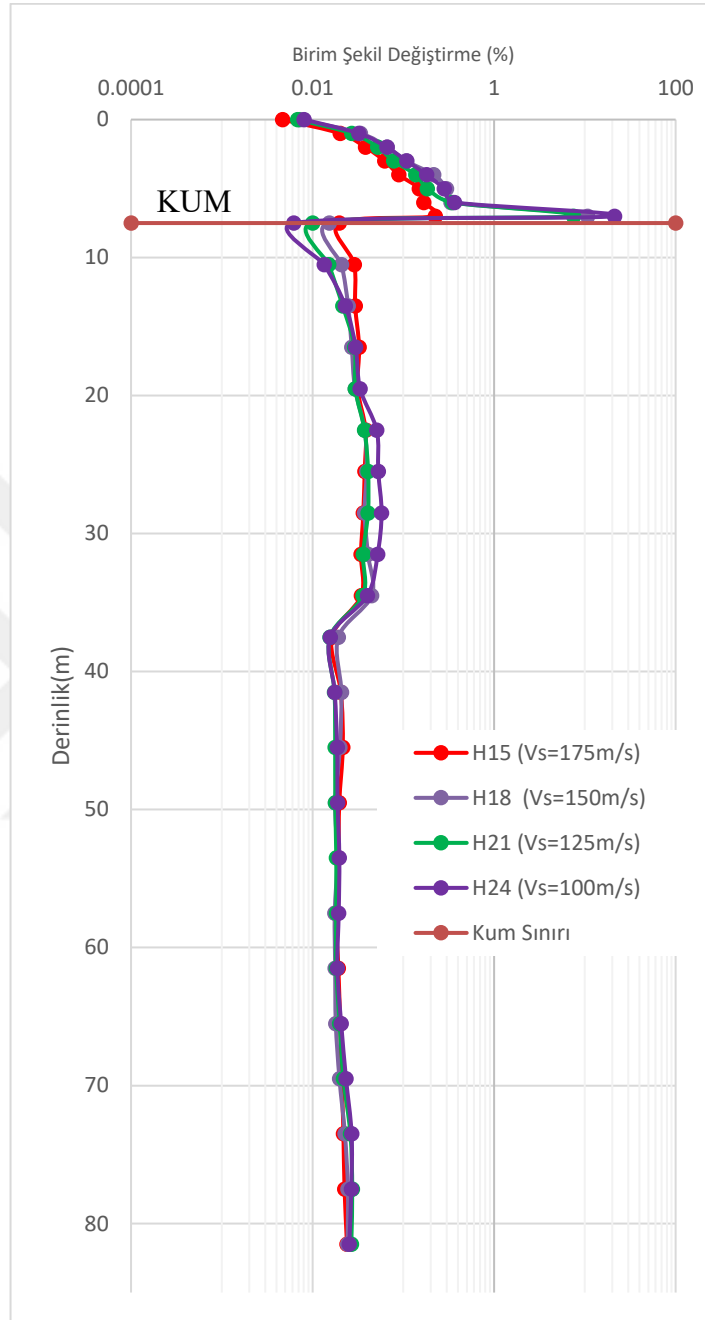
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında maksimum birim şekil değiştirme değeri benzer elde edilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m, 0.23g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri

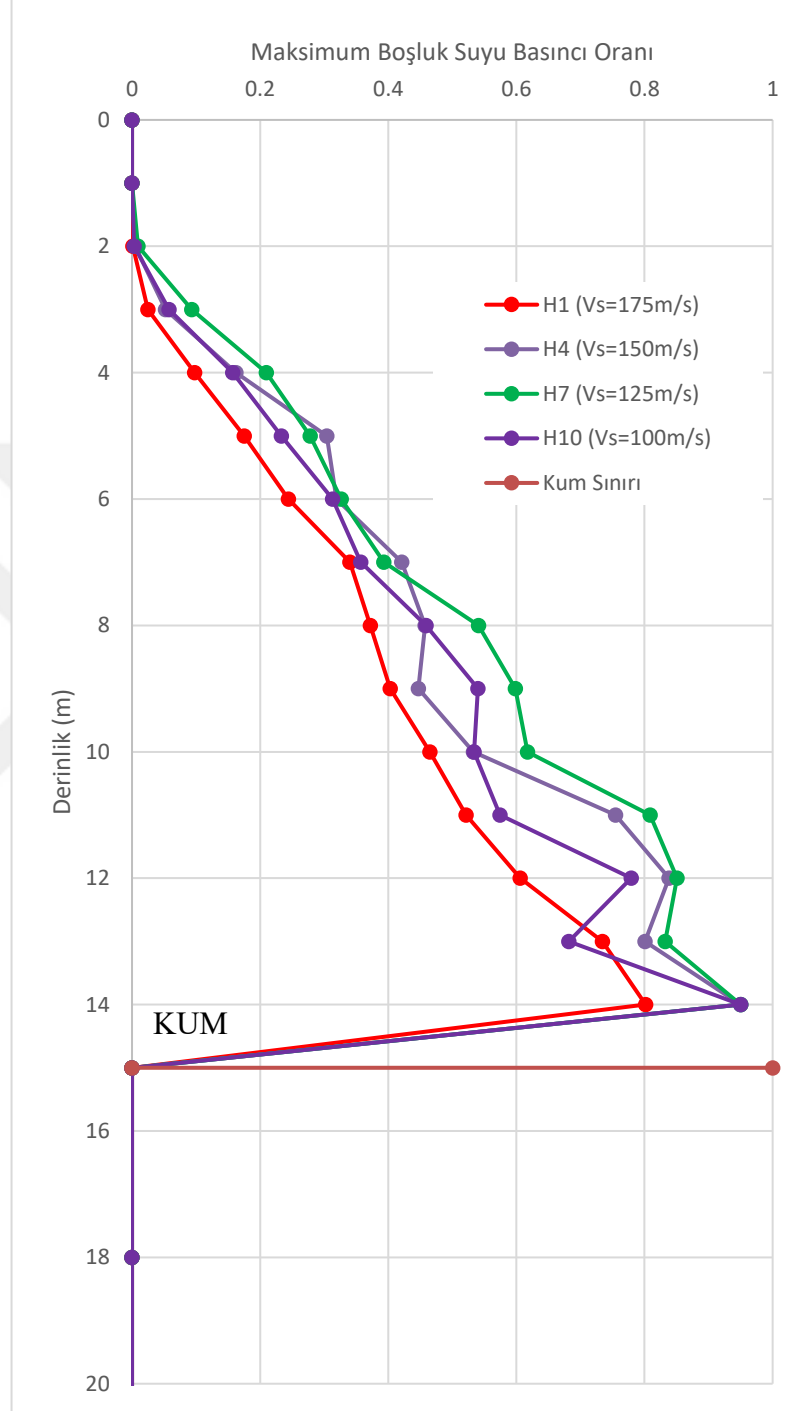
benzer elde edilmiştir (Şekil 5.8). Kum tabaka kalınlığı 15.0 m'den 7.50 m'ye indiğinde maksimum birim şekil değıştirme değeri artmıştır.



Şekil 5.8 Birim Şekil Değıştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda $PGA=0.23$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.9). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça

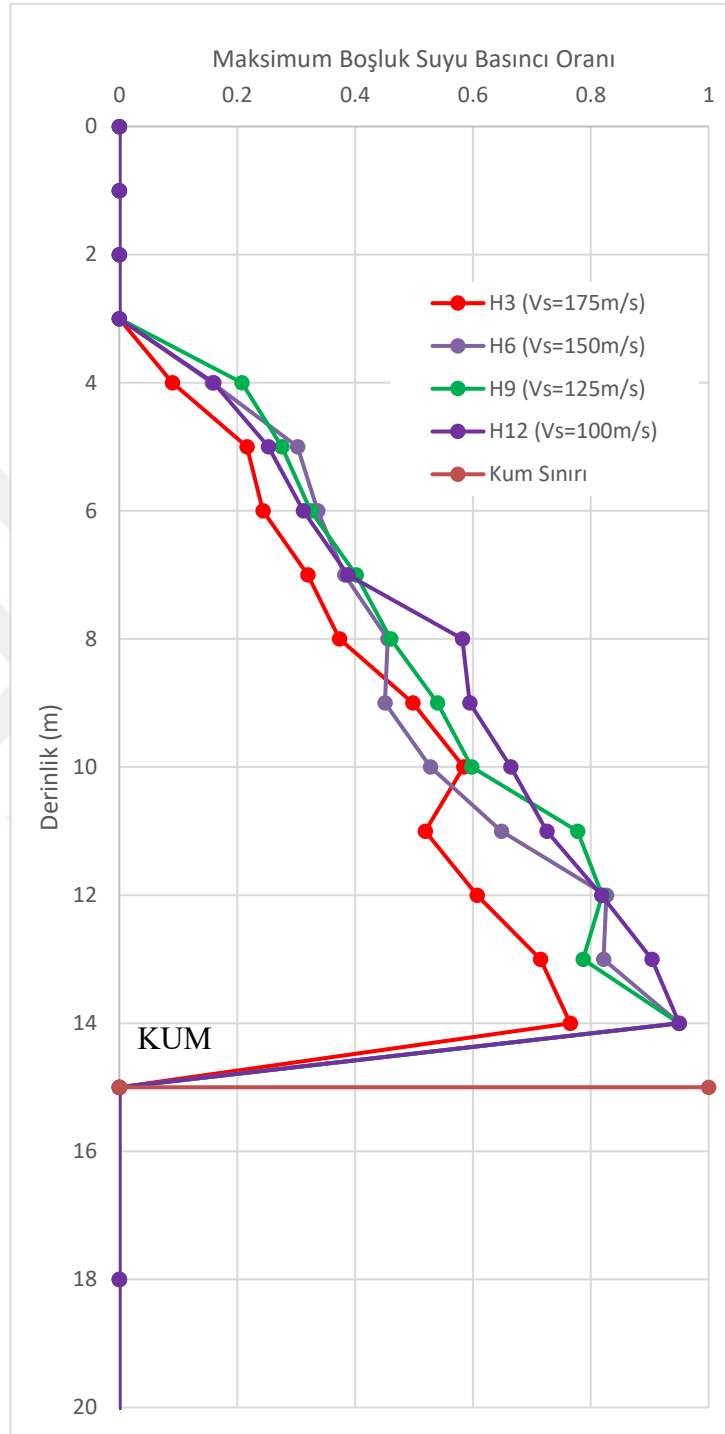
yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır. Yüzeğe yakın kesimlerde boşluk suyu basıncının sönümlendiği görülmüştür.



Şekil 5.9 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Deprem Kaydı)

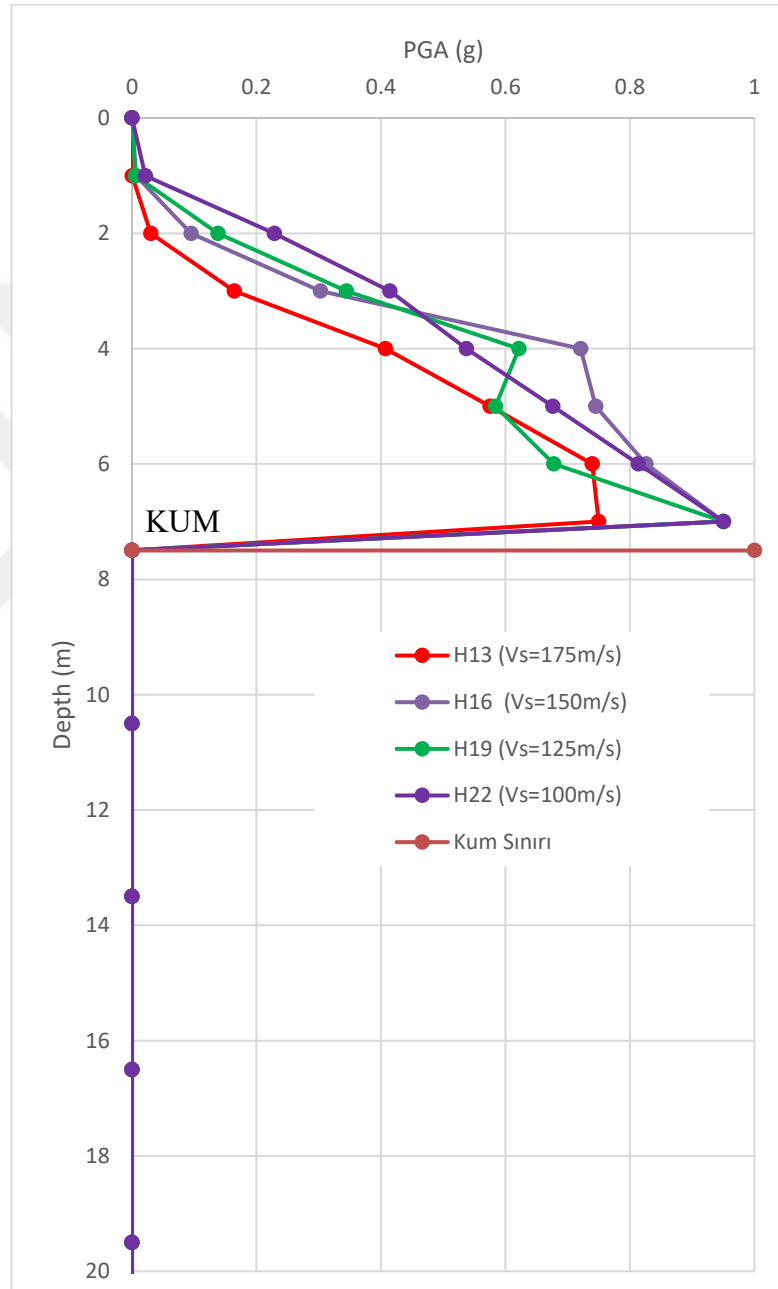
Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda PGA=0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde

edilmiştir (Şekil 5.10). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.10 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)

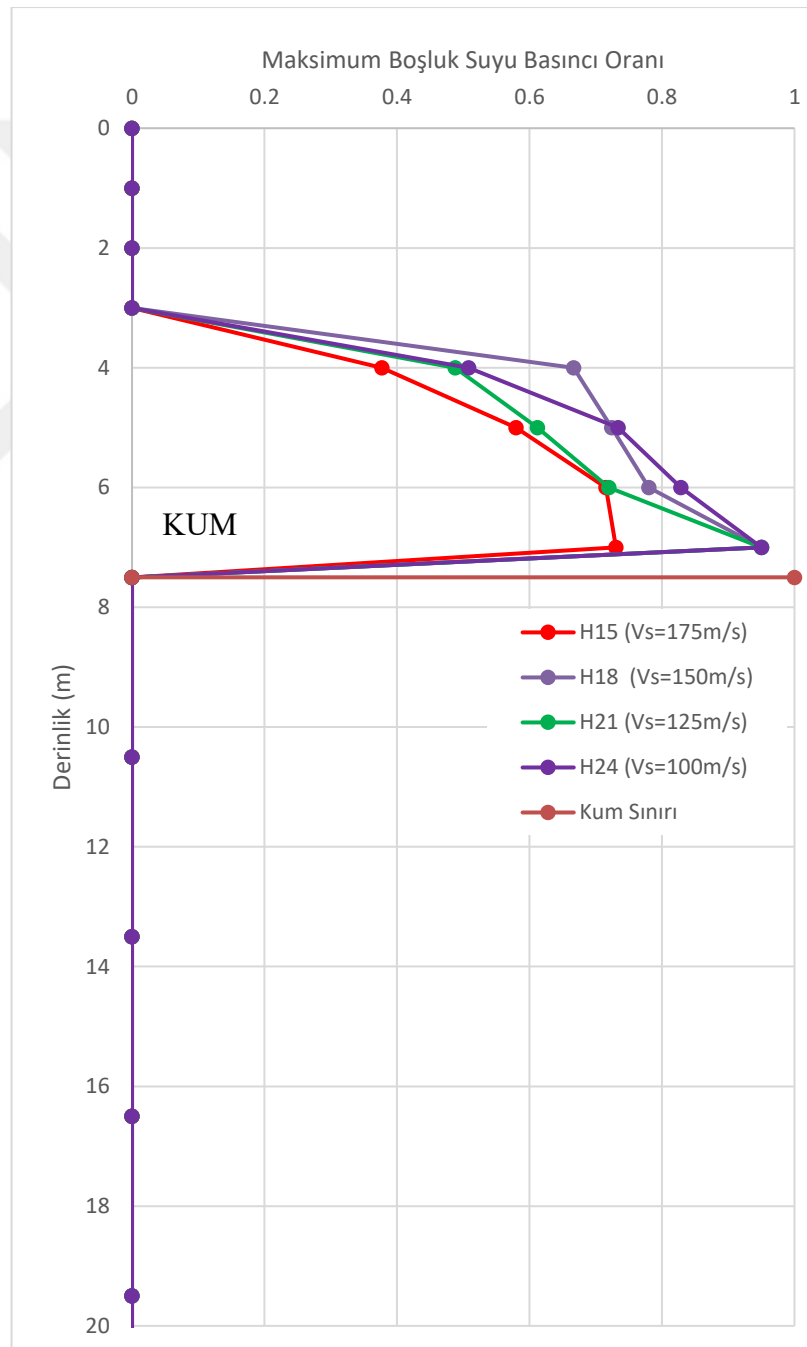
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda PGA=0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.11). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça derindeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.11 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.23g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda PGA=0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı

yüksek olan profile daha düşük, düşük olan profile ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.12). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır. Boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde, kum tabakası kalınlığı boyunca yeraltı su seviyesi 0.0-4.0 m aralığında V_s değerinin değişimi sıvılaşmada etkili olduğu görülmüştür. V_s değeri azaldıkça boşluk suyu basıncı artmış, dolayısıyla sıvılaştıran tabaka kalınlığı artmıştır. Yeraltı su seviyesi yüzeye yaklaştıkça boşluk suyu basıncı ve dolayısıyla sıvılaştıran tabaka kalınlığı artmıştır.

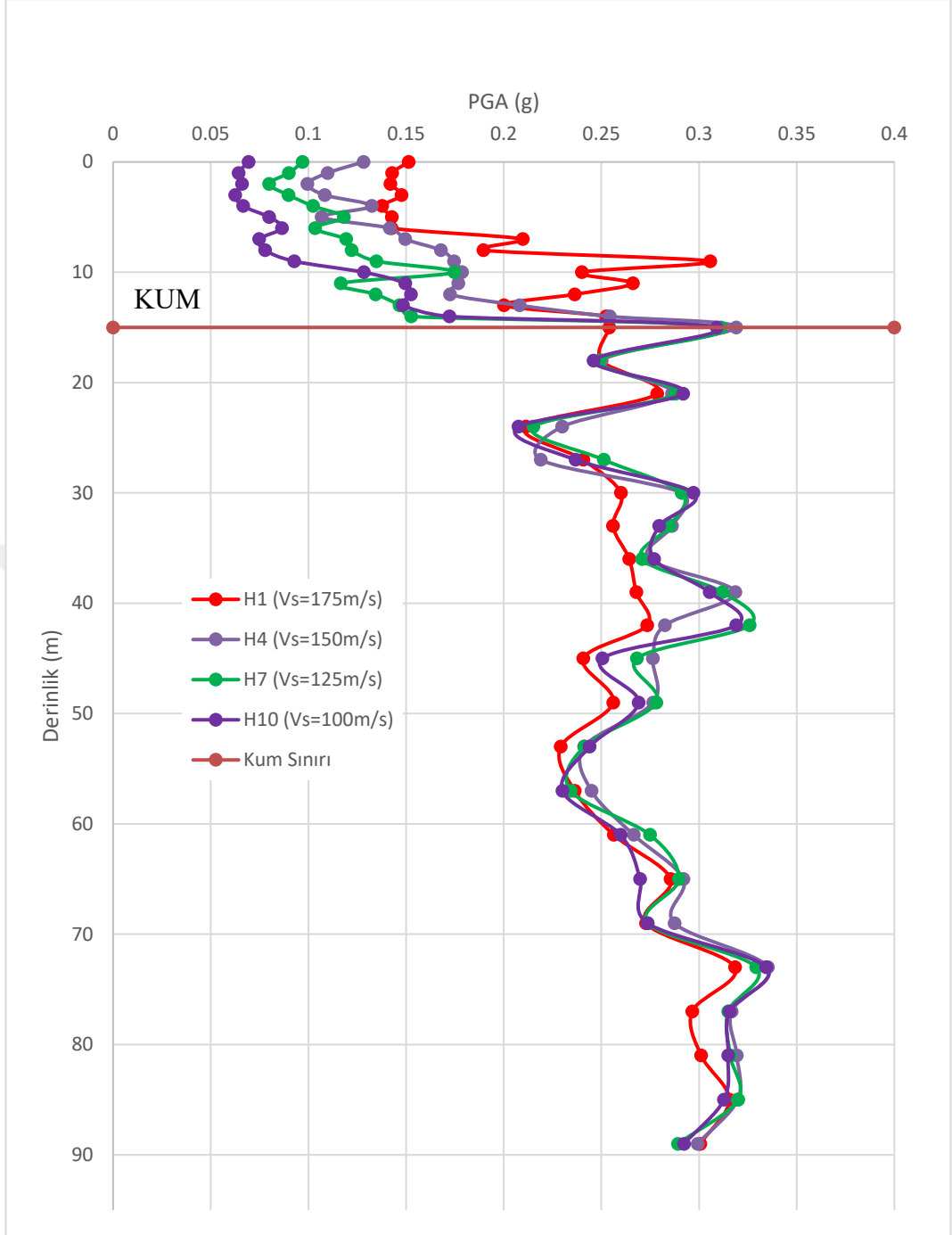


Şekil 5.12 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.23g Deprem Kaydı)

5.1.2. Deprem İvme Kaydı 0.46 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi

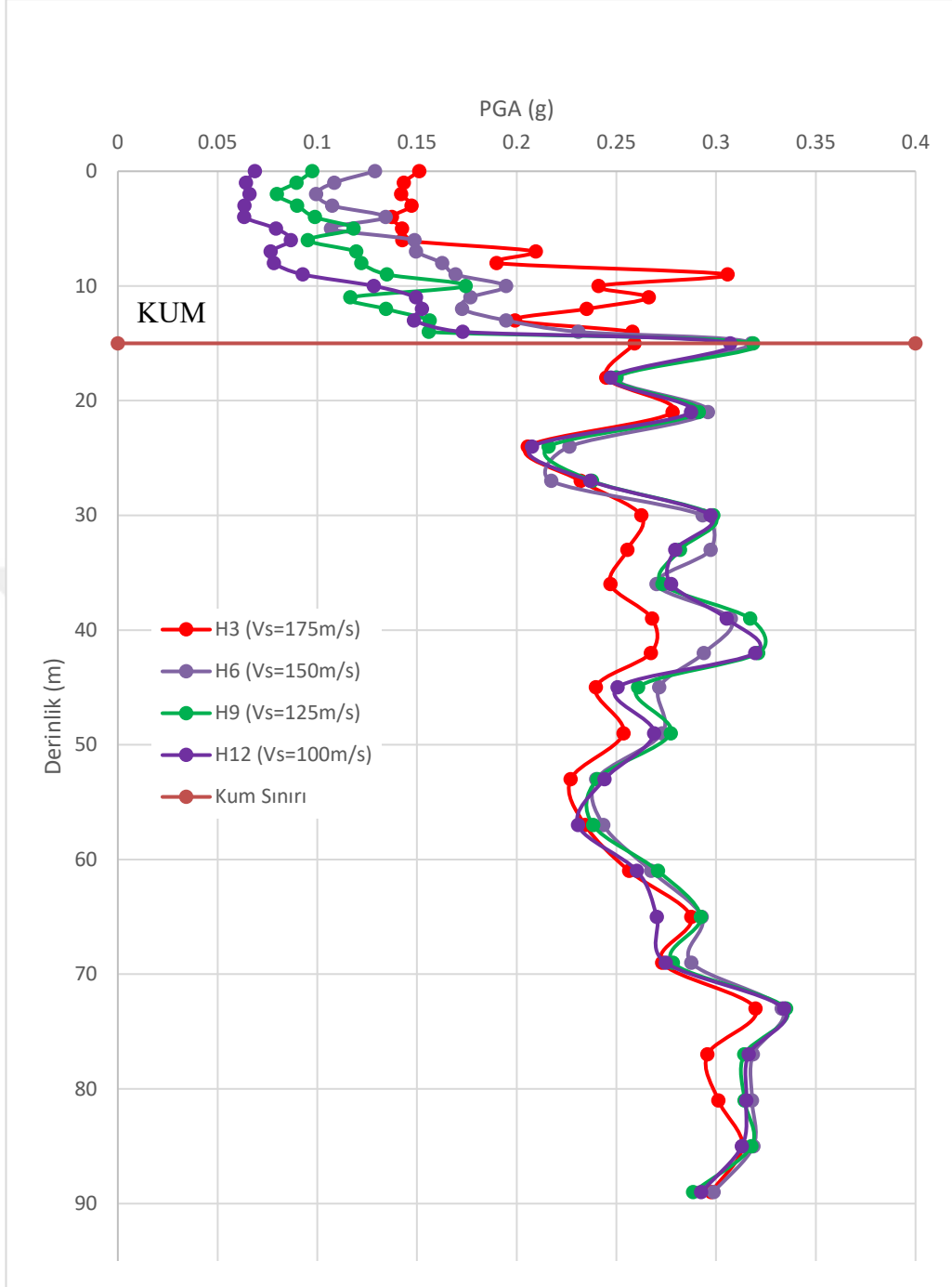
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda $PGA=0.46$ g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.13). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.





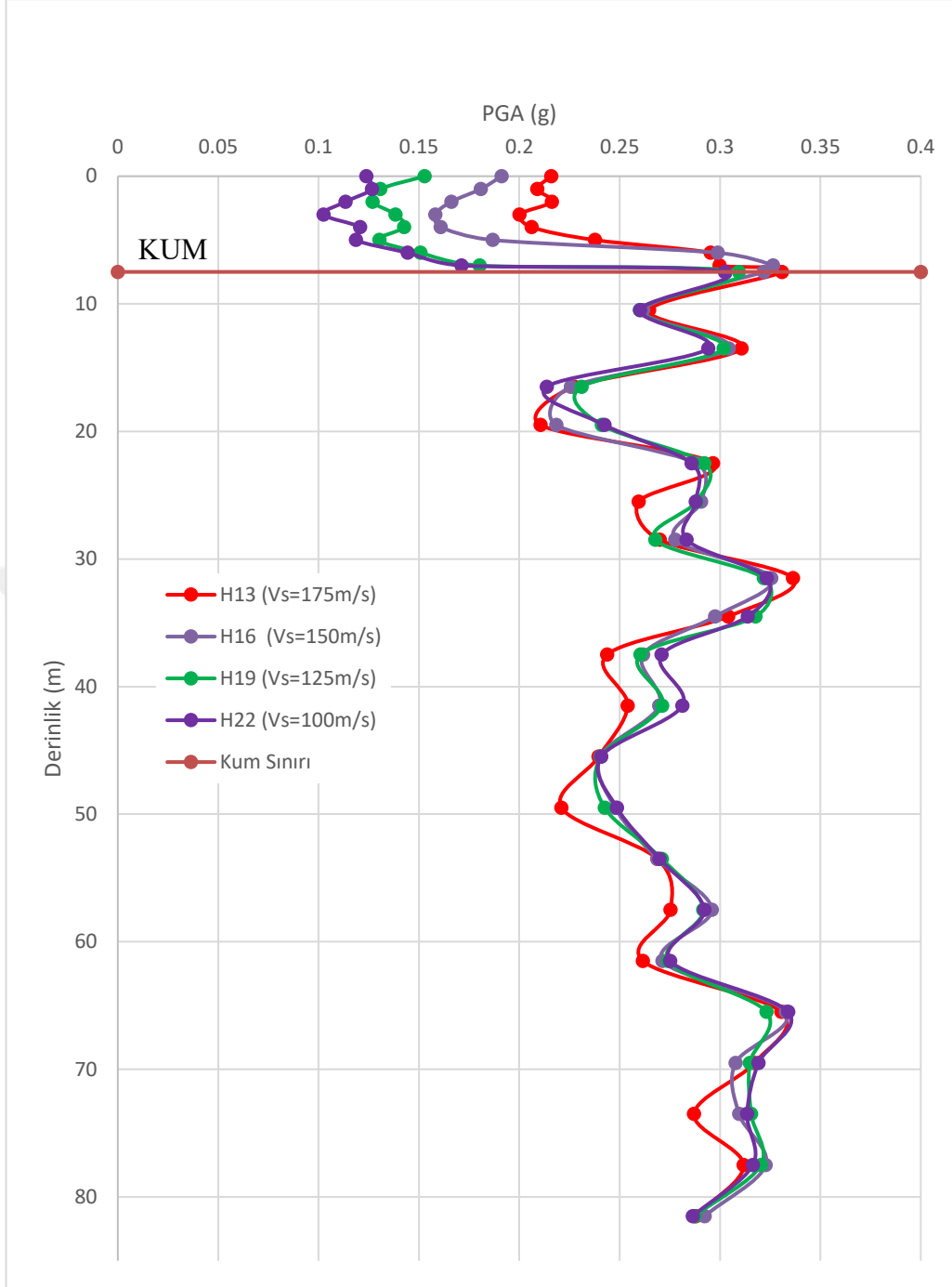
Şekil 5.13 PGA-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.46 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.14). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



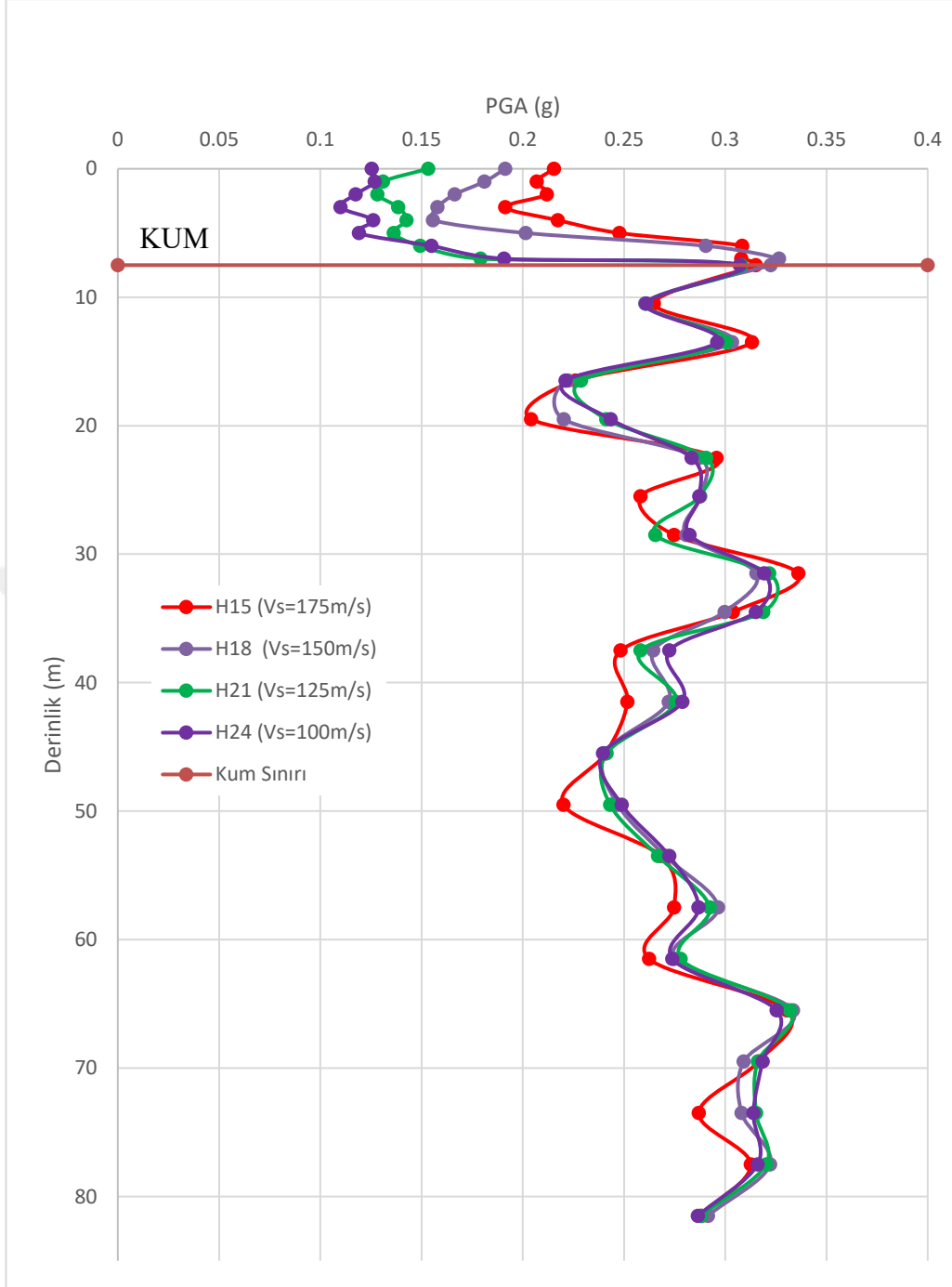
Şekil 5.14 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.15). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



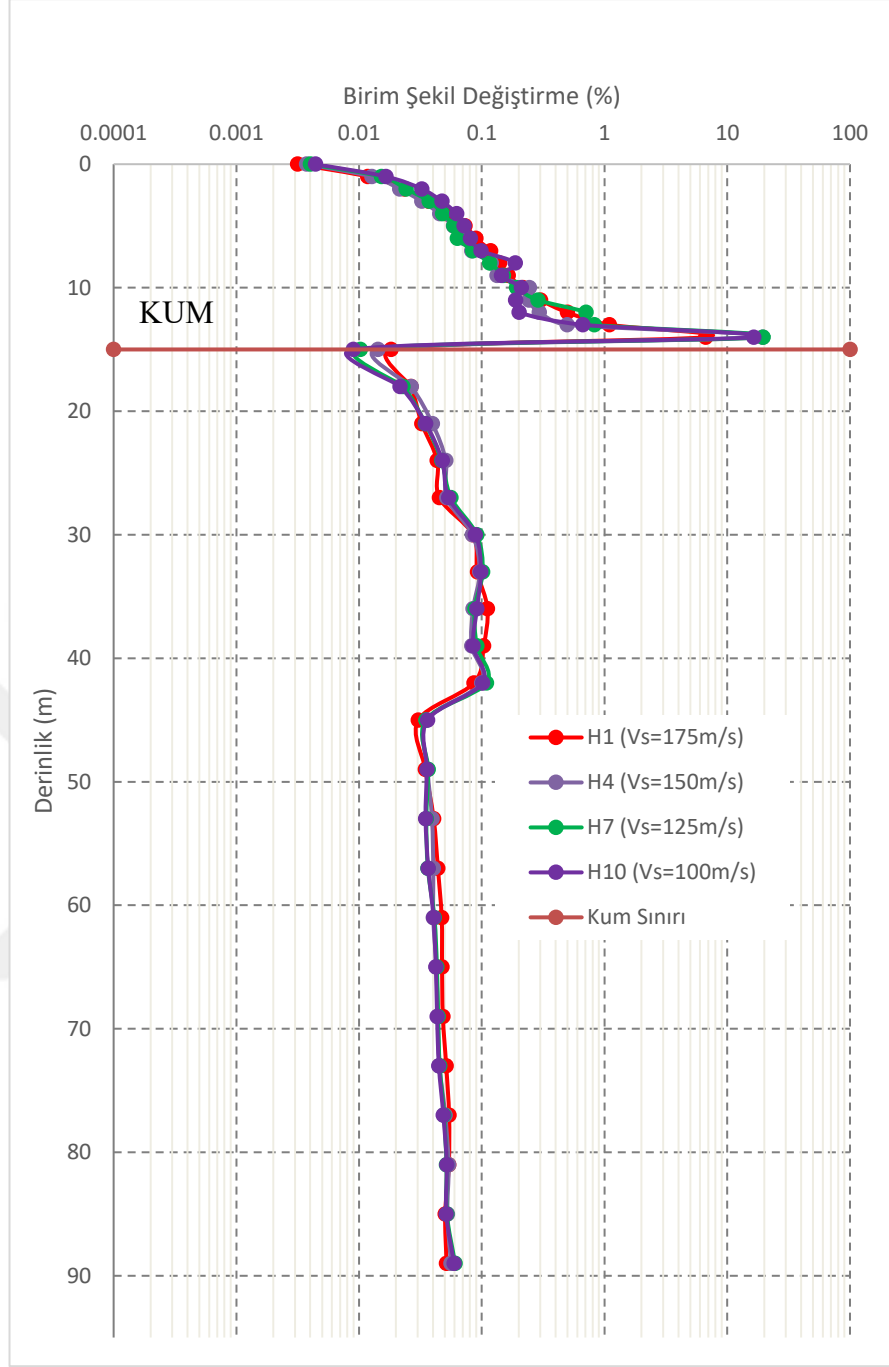
Şekil 5.15 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.16). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.16 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)

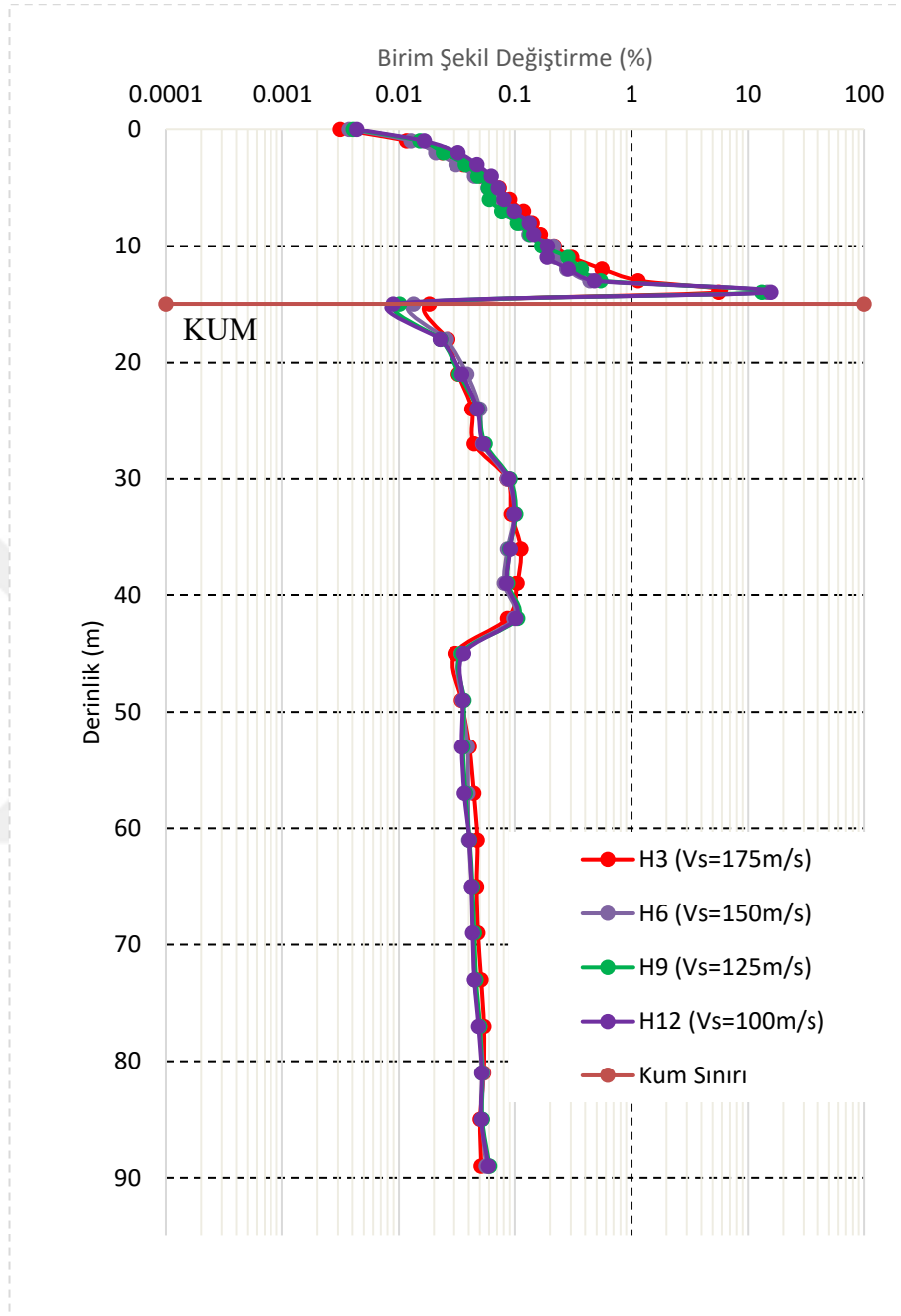
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.46 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında kum tabakasındaki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.17). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.17 Birim Şekil Değişirme-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değışirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.18). Kum tabakasında kayma dalga hızı değışimi yüzeydeki birim şekil değışirme değeri fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değışirmelerde

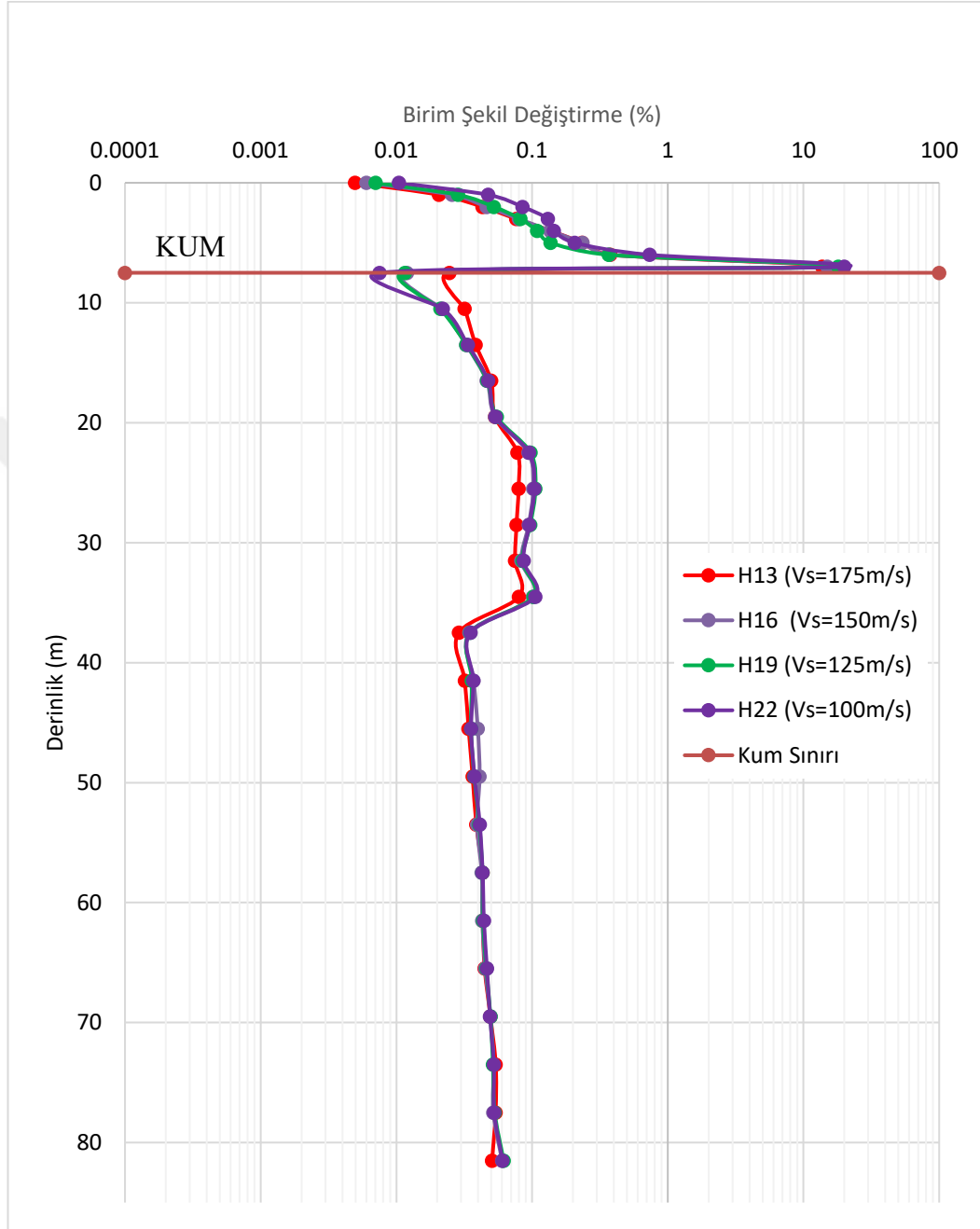
ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.18 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.19). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde

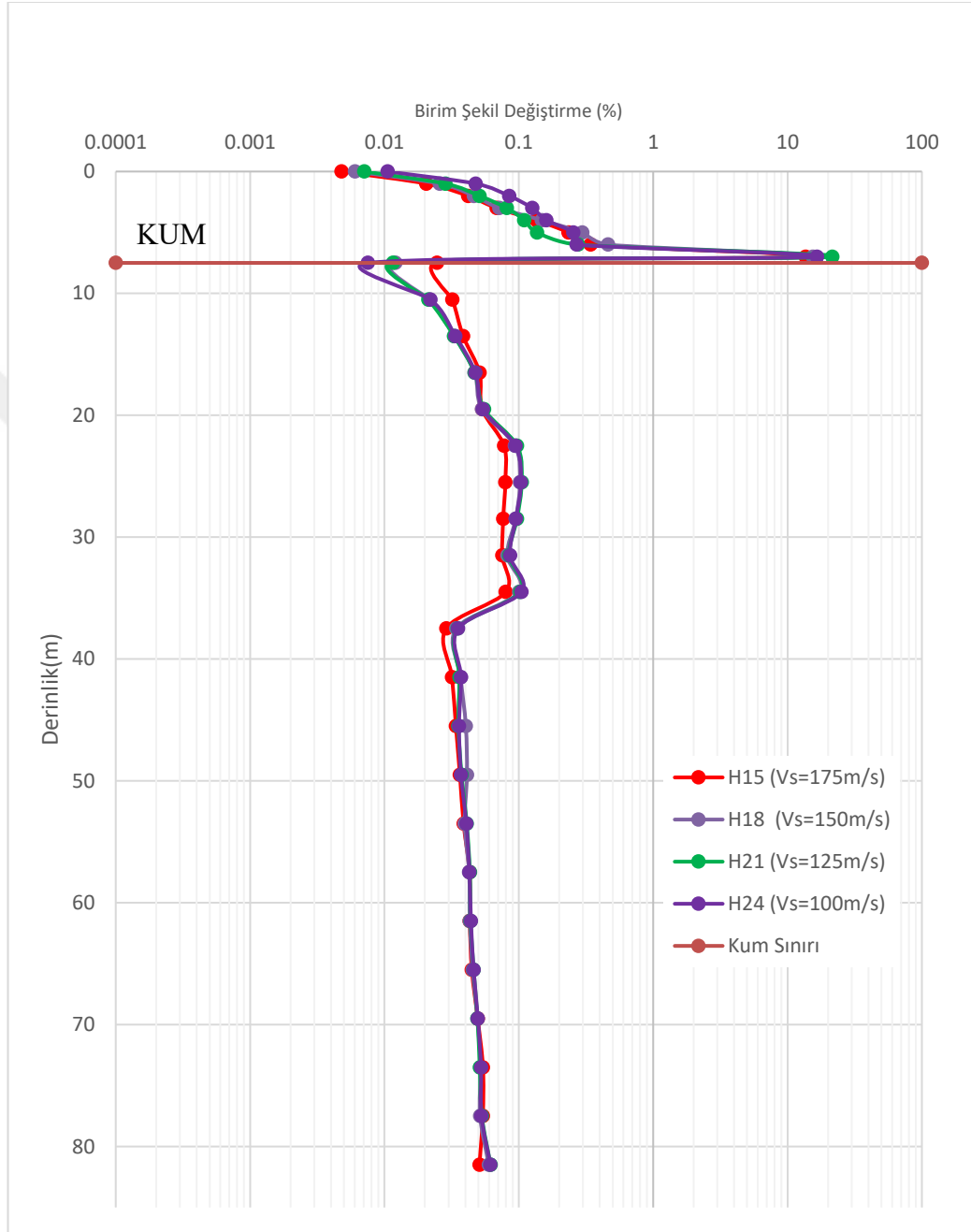
ani bir artış görülmüştür. Yüzeiden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değıştirme değeri arttığı görülmüştür.



Şekil 5.19 Birim Şekil Değıştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeideki birim şekil değıştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.20). Kum tabakasında kayma dalga hızı değışimi yüzeideki birim şekil değıştirme değeriinde fark

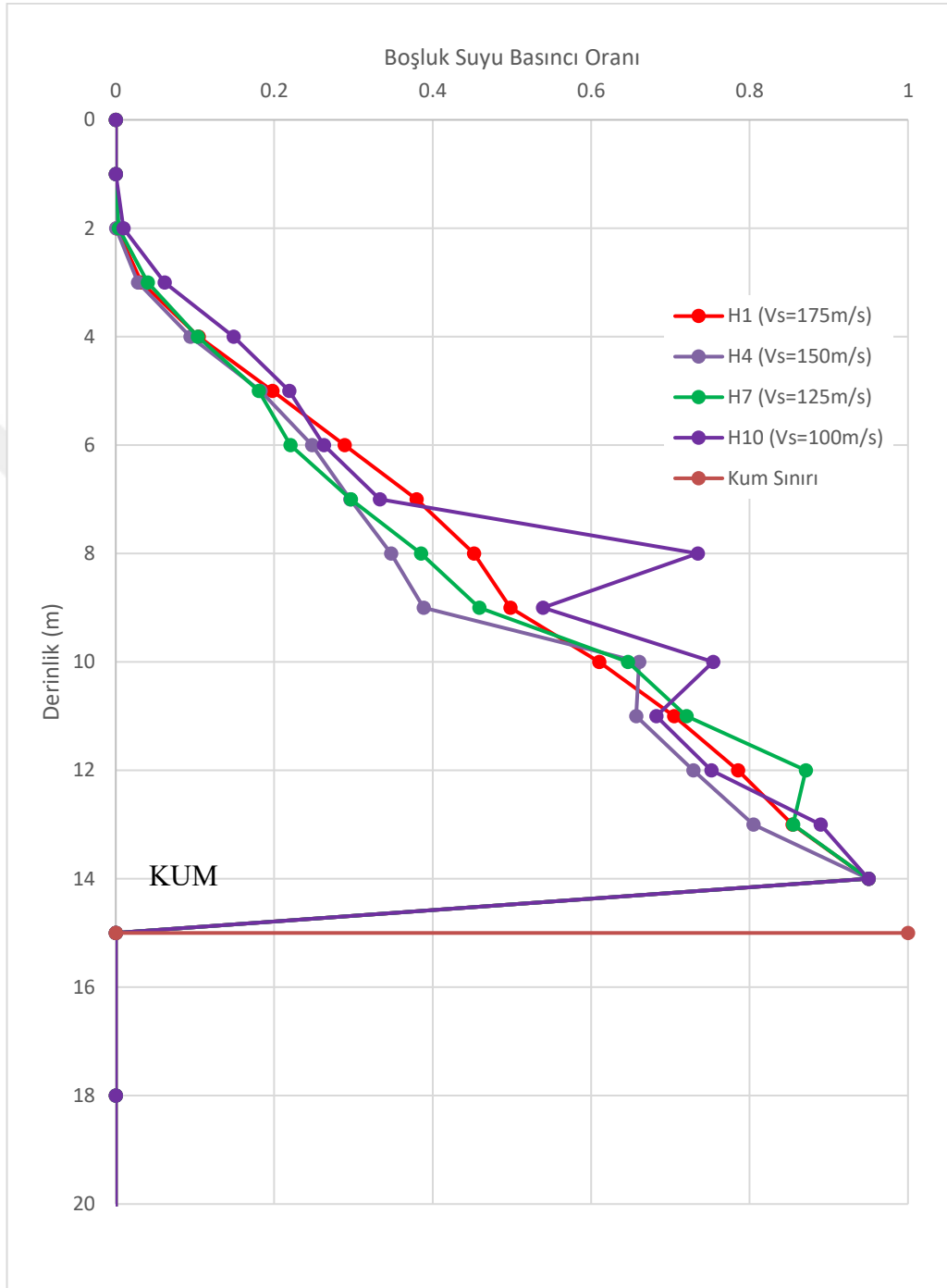
yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değıştirmelerde ani bir artış görölmüştür. Yüzeiden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değıştirme değeri arttığı görölmüştür.



Şekil 5.20 Birim Şekil Değıştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek

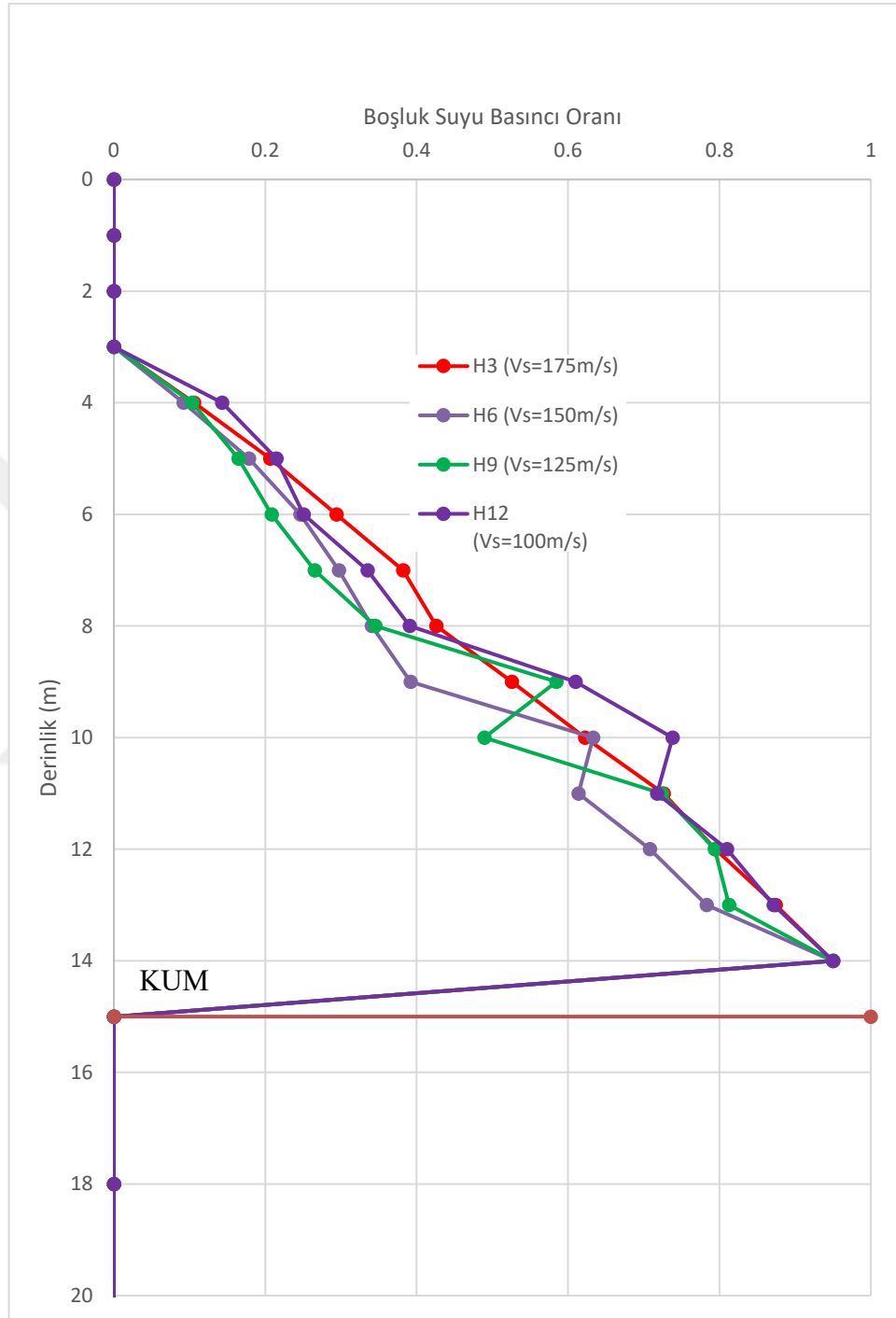
olarak elde edilmiştir (Şekil 5.21). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.21 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek

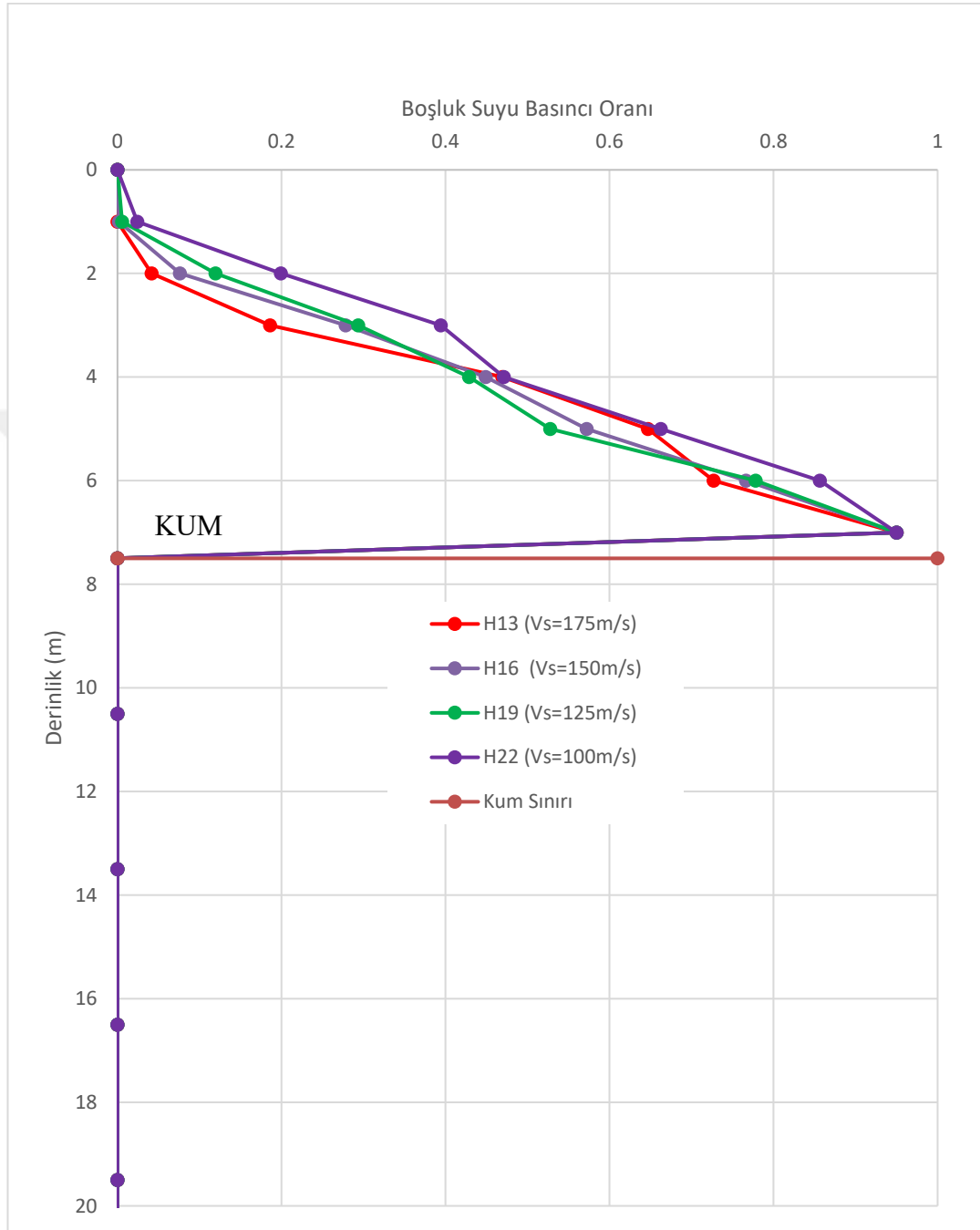
olarak elde edilmiştir (Şekil 5.22). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.22 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profile daha düşük, düşük olan profile ise daha yüksek

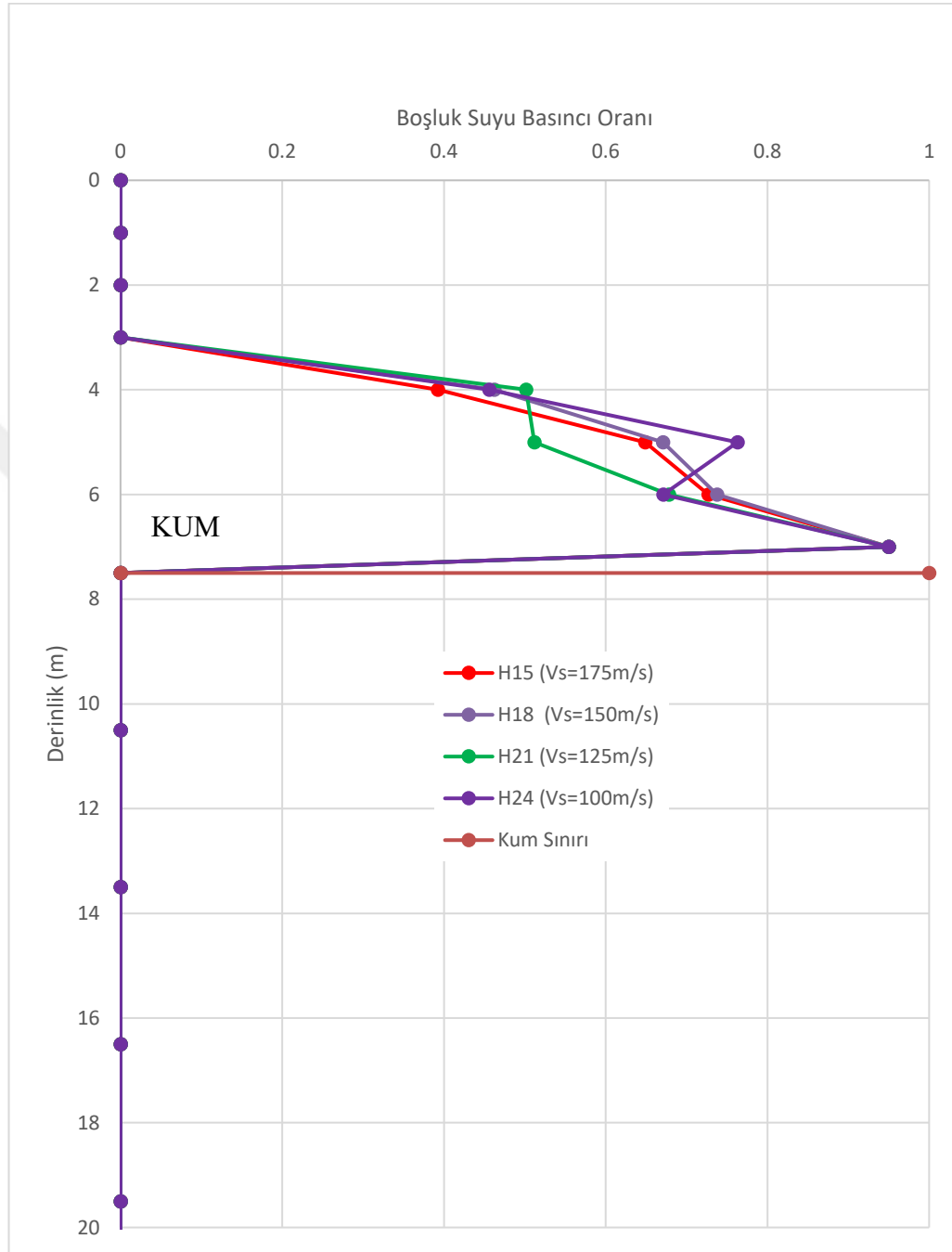
olarak elde edilmiştir (Şekil 5.23). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.23 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.46 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek

olarak elde edilmiştir (Şekil 5.24). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.

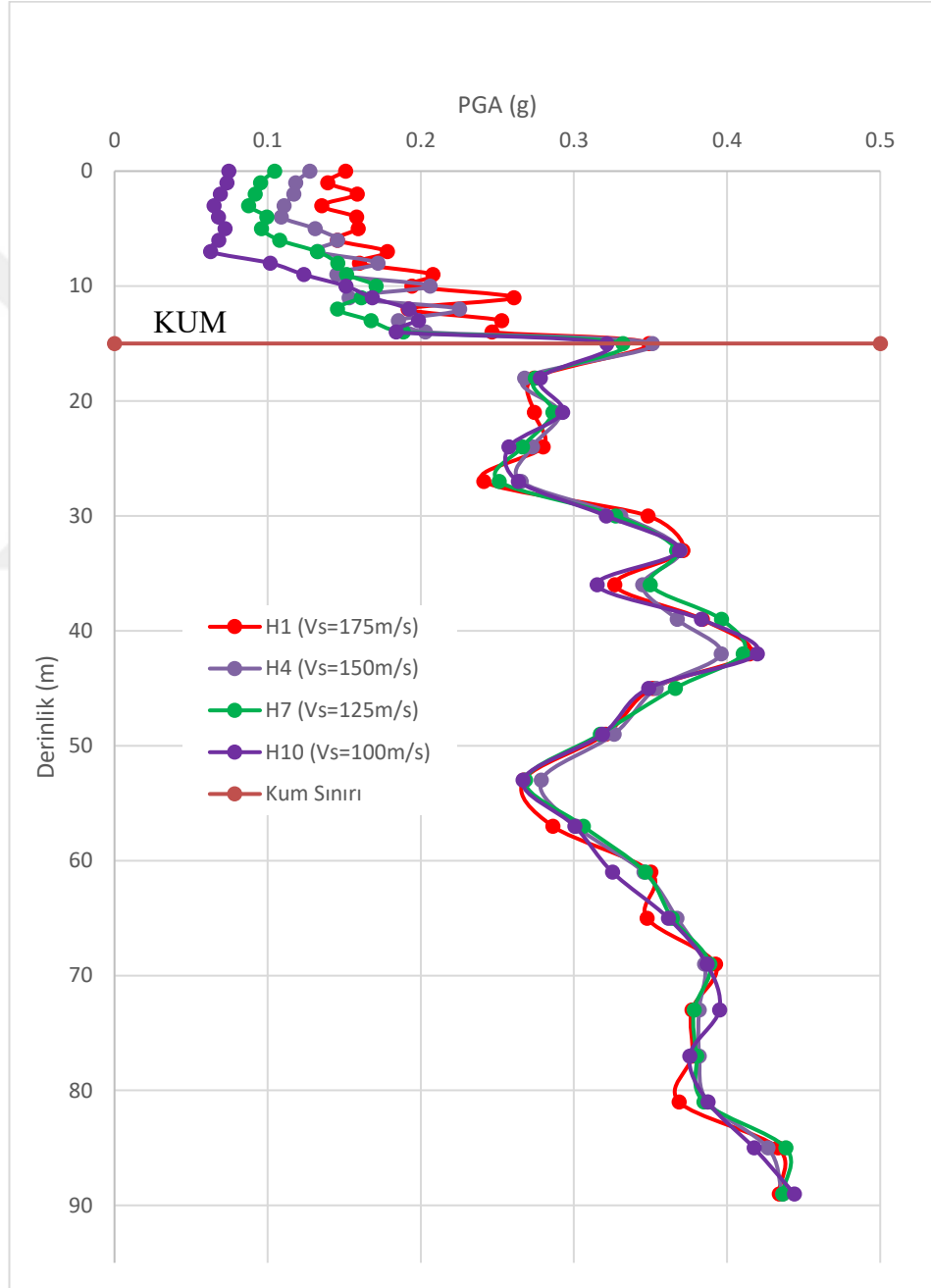


Şekil 5.24 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.46g Deprem Kaydı)

Boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde, kum tabakası kalınlığı boyunca yeraltı su seviyesi 0-4.0 m aralığında V_s değerinin değişimi sıvılaşmada etkili olduğu görülmüştür. V_s değeri azaldıkça boşluk suyu basıncı artmış, dolayısıyla sıvılaşan tabaka kalınlığı artmıştır.

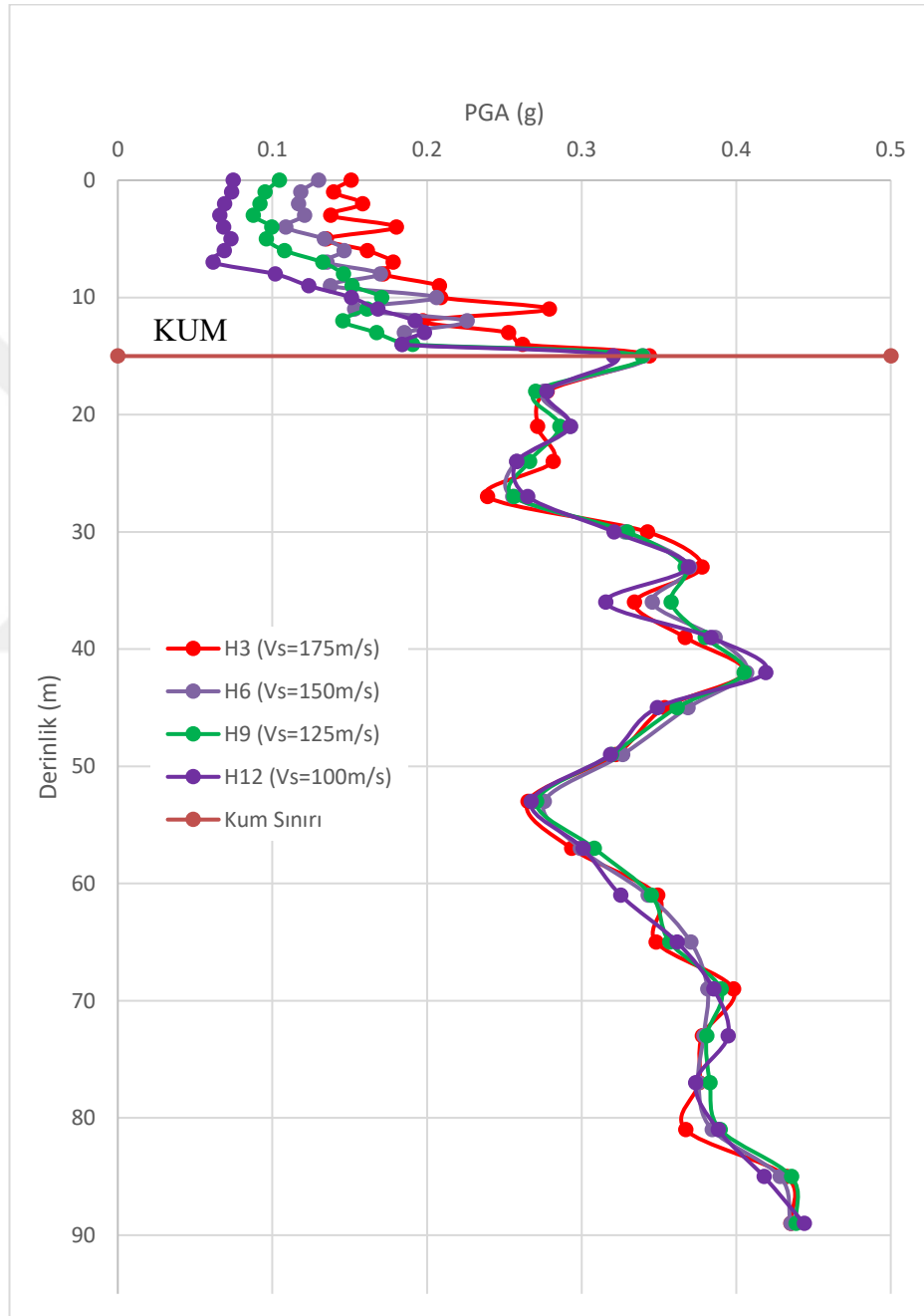
5.1.3 Deprem İvme Kaydı 0.69 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakayaanaakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.25). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



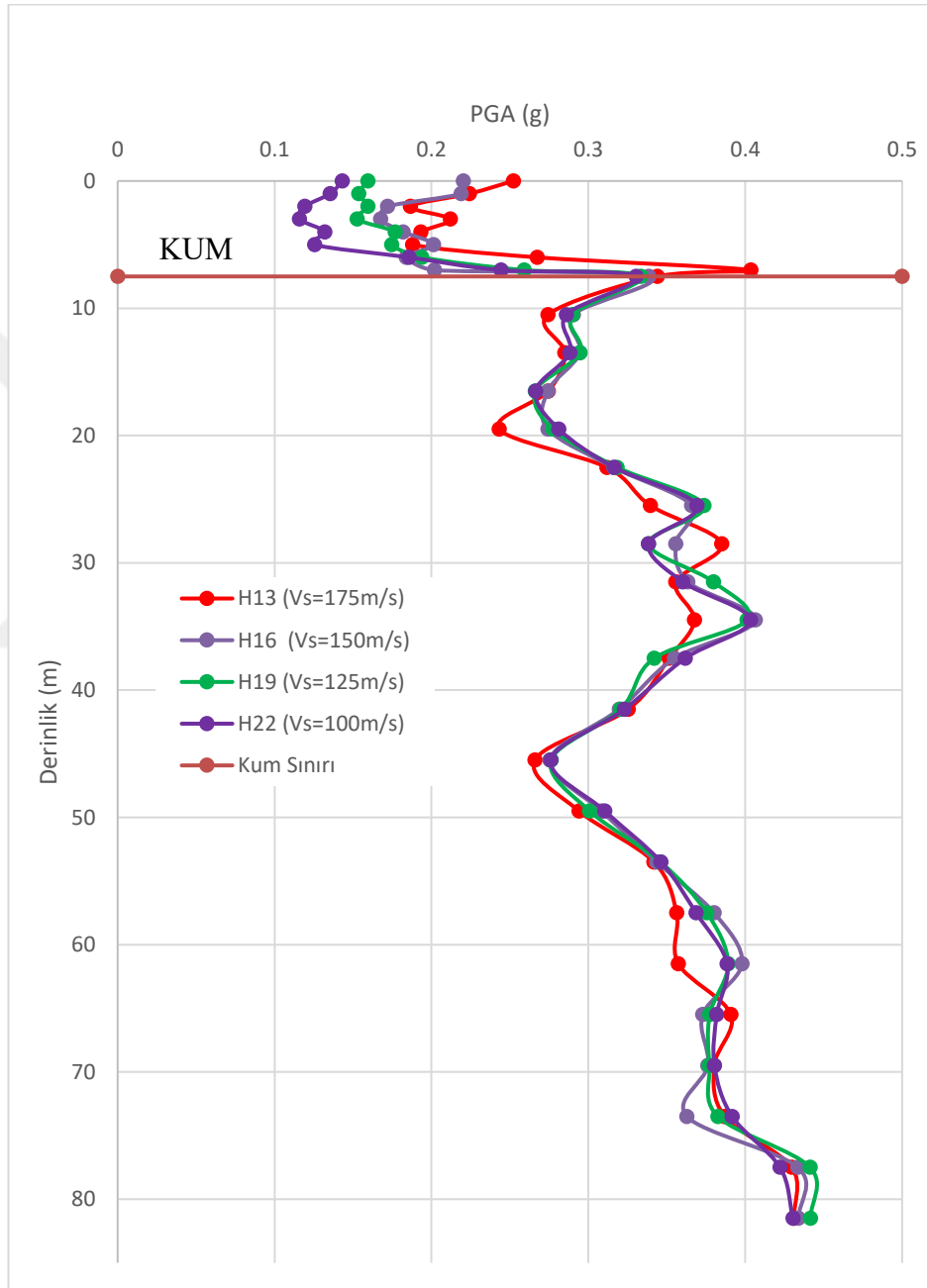
Şekil 5.25 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.26). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.26 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

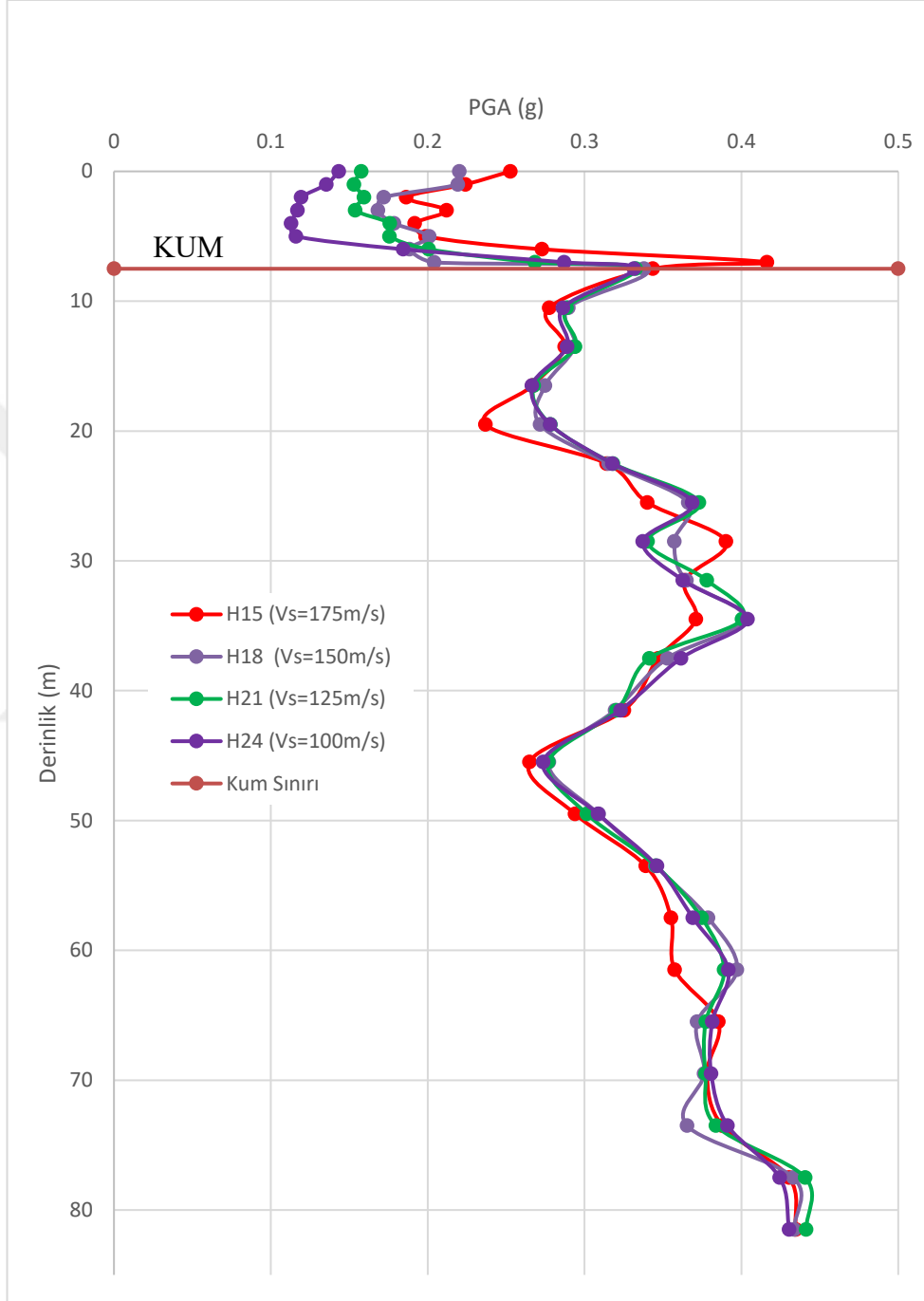
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.27). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.27 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin

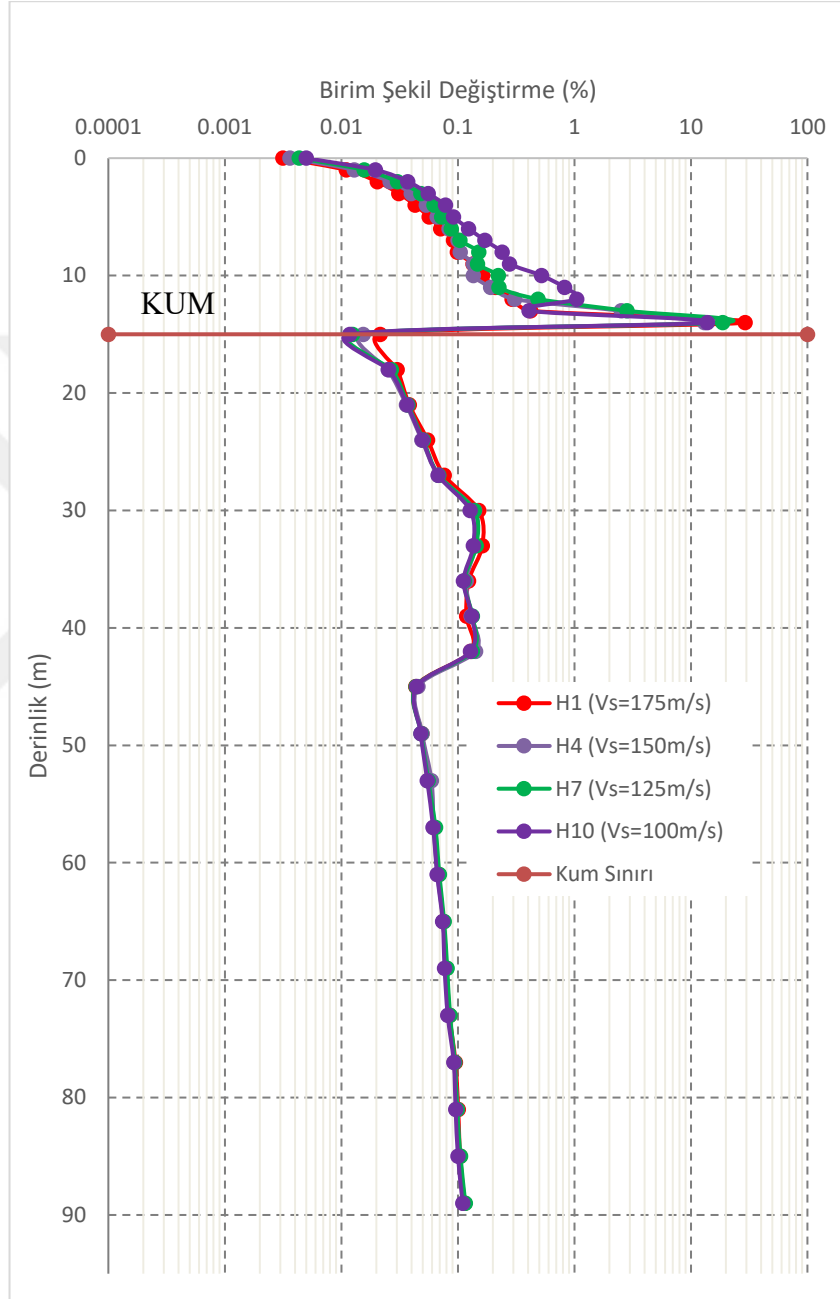
kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.28). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.28 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.29). Kum tabakasında

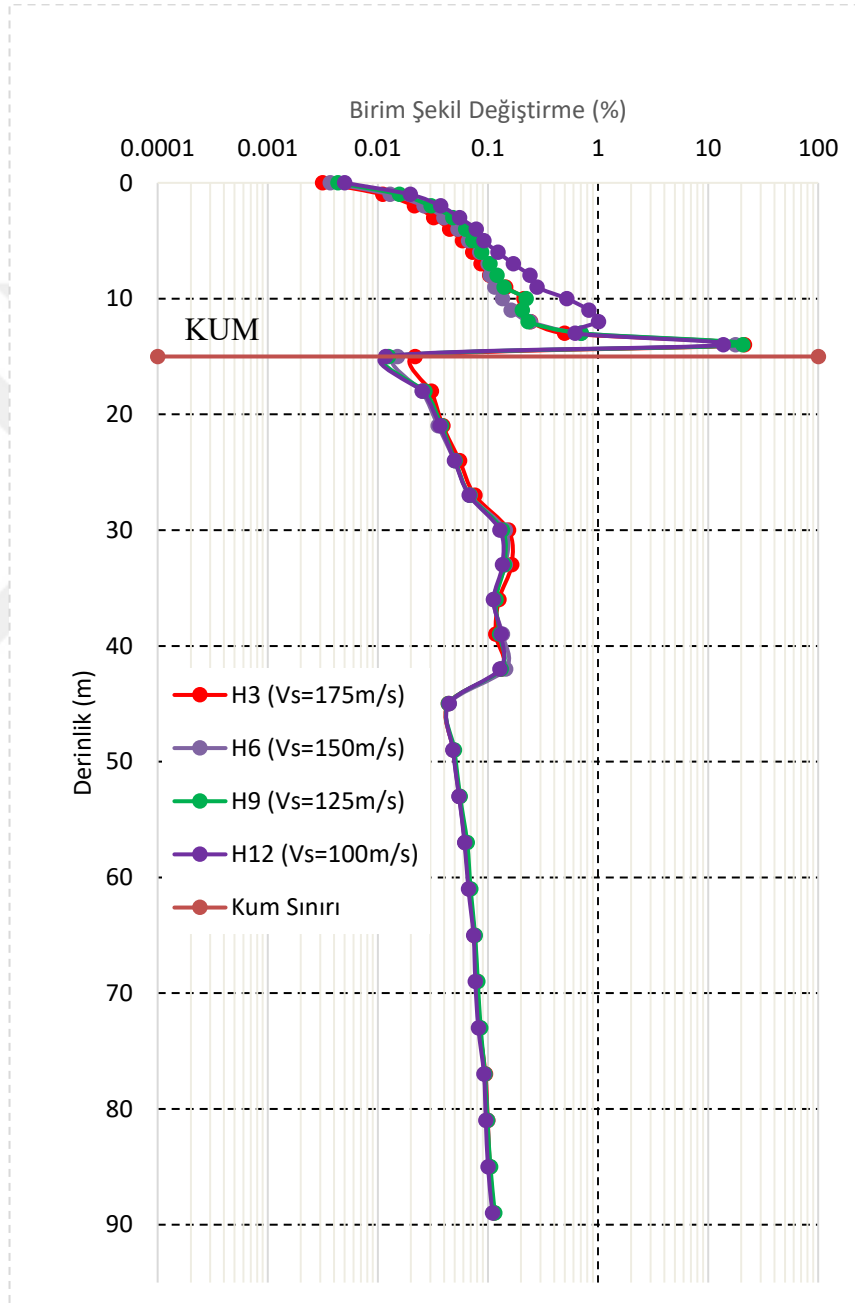
kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.29 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)

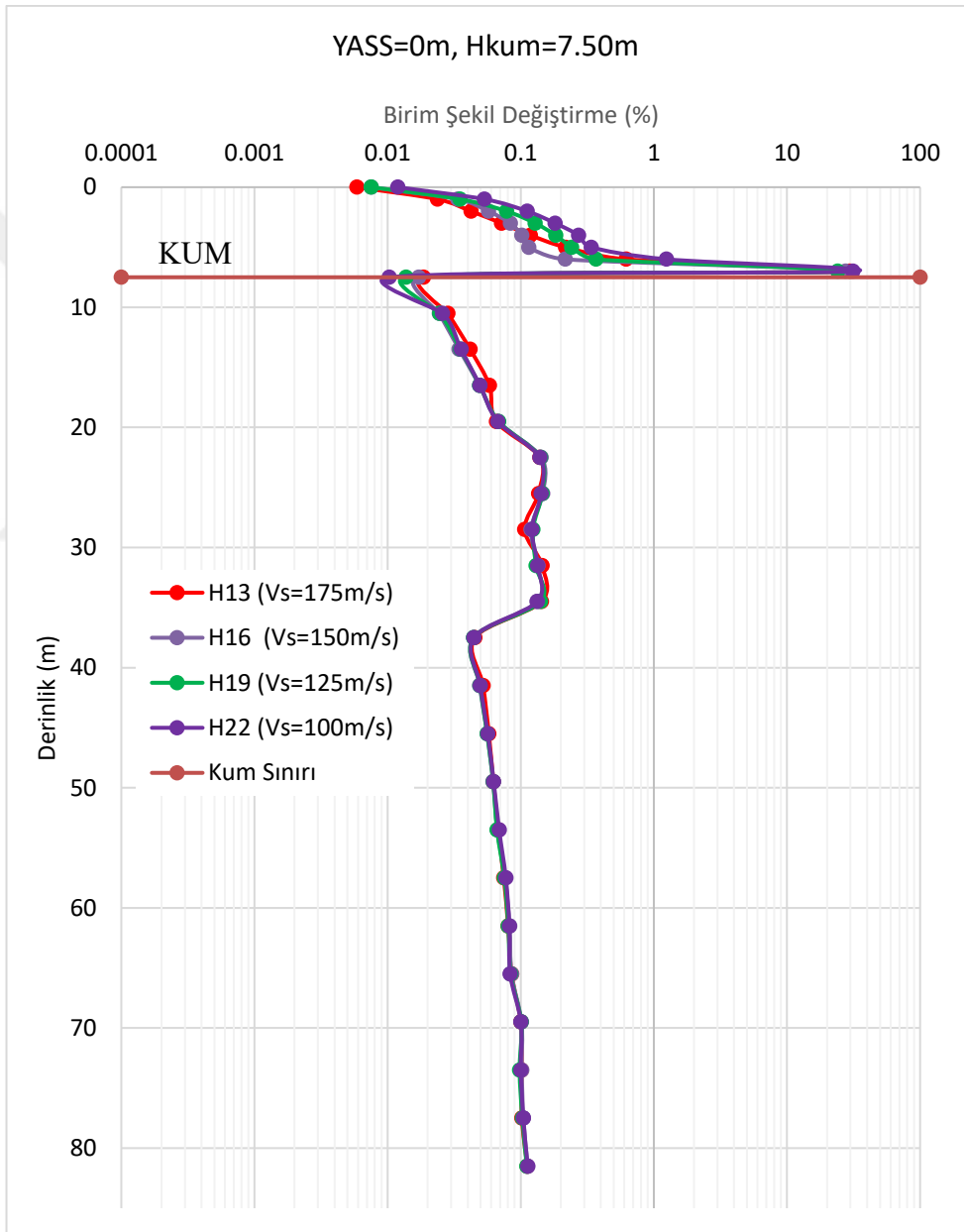
Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme

değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.30). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



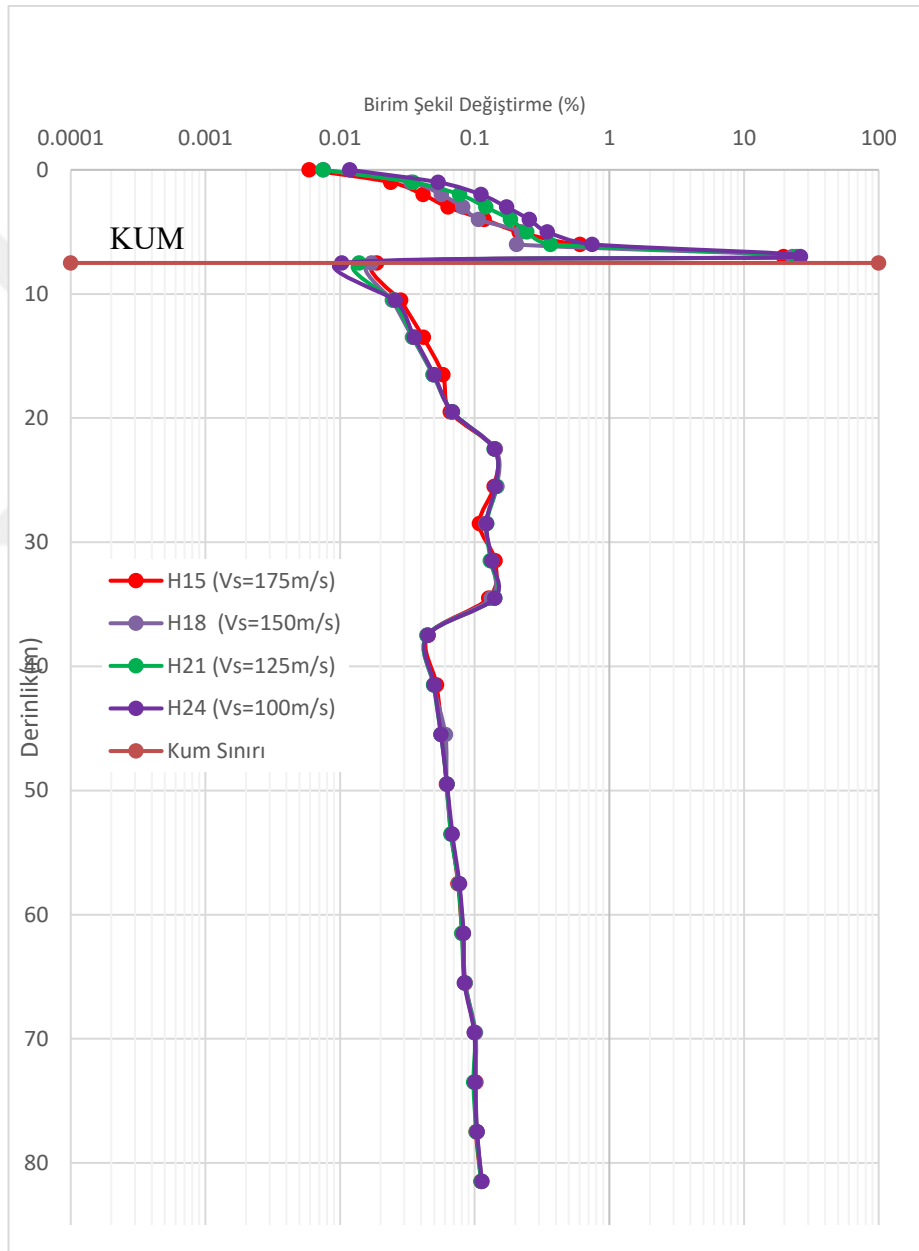
Şekil 5.30 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakayaaanakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değıştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.31). Kum tabakasında kayma dalga hızı değışimi yüzeydeki birim şekil değıştirme değeri fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değıştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değıştirme değeri arttığı görülmüştür.



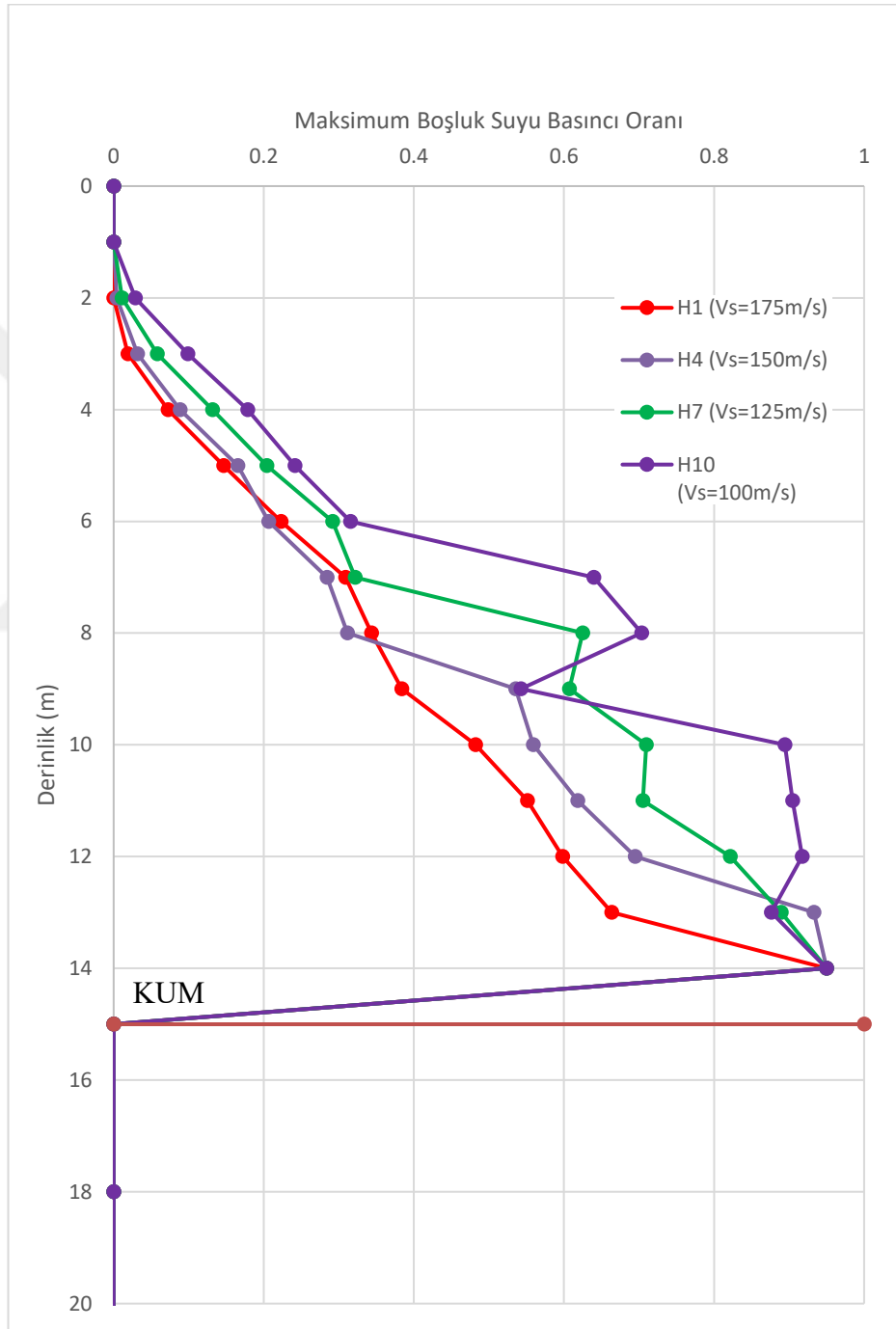
Şekil 5.31 Birim Şekil Değıştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.32). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



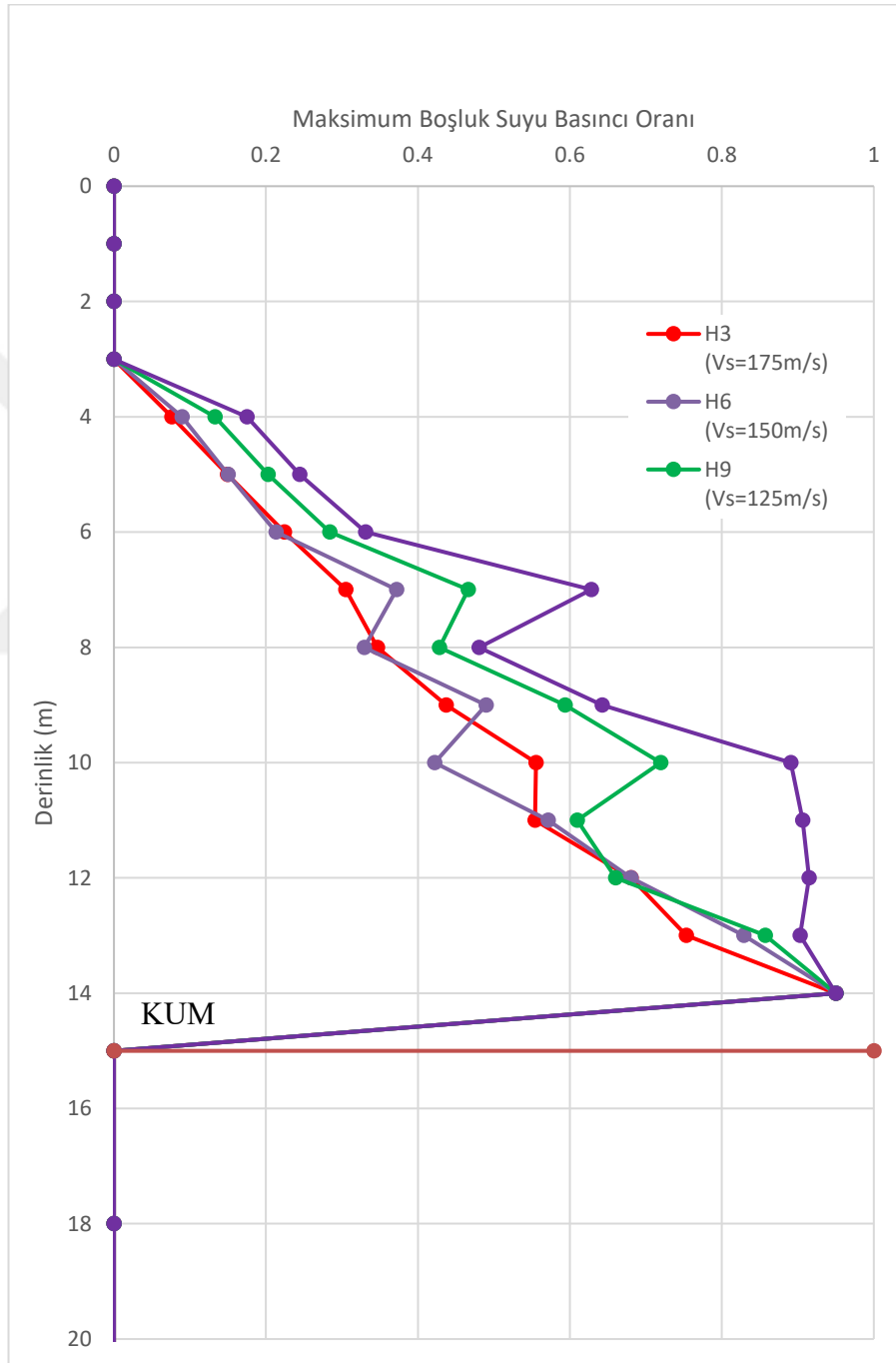
Şekil 5.32 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.33). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



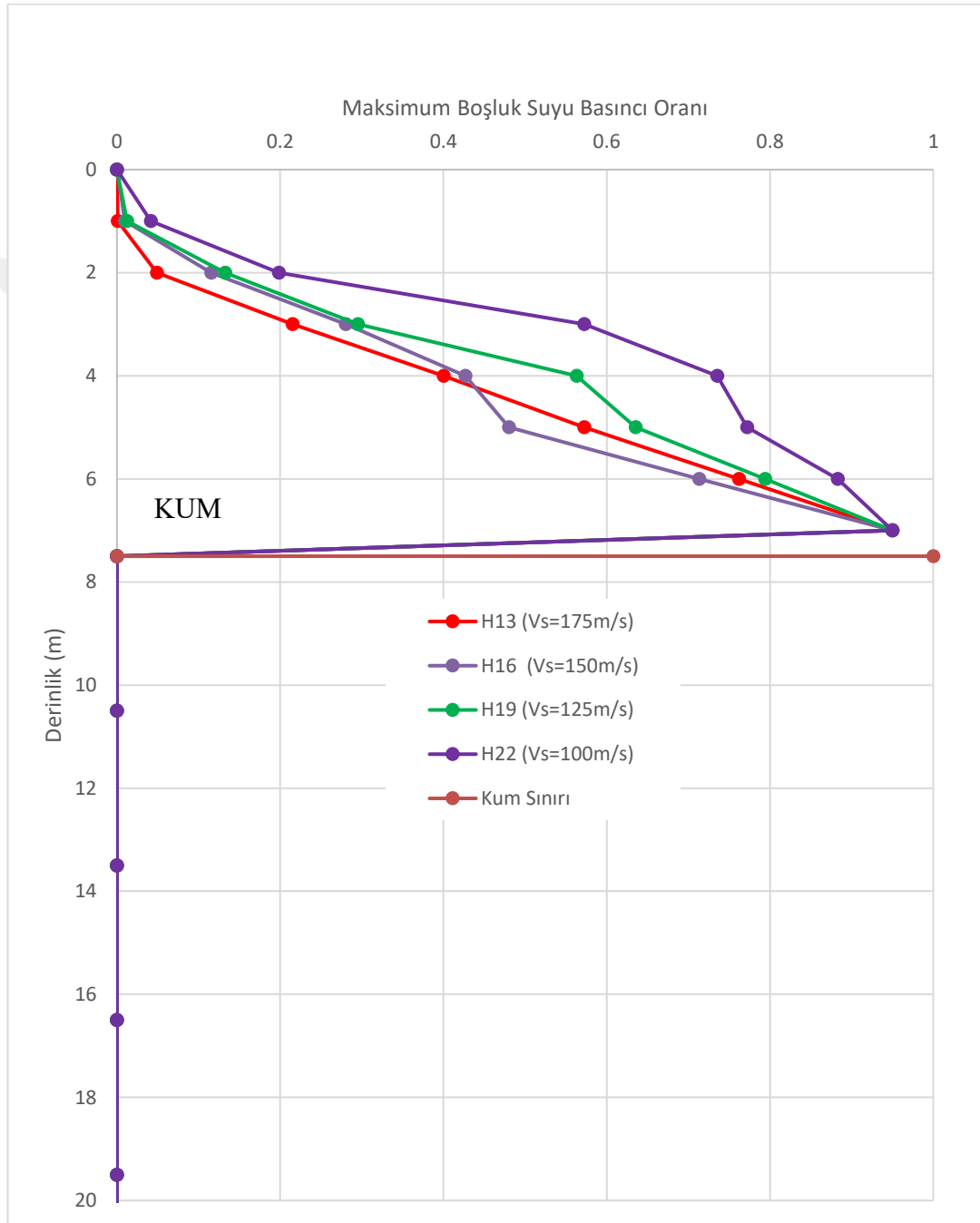
Şekil 5.33 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.69 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.34). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



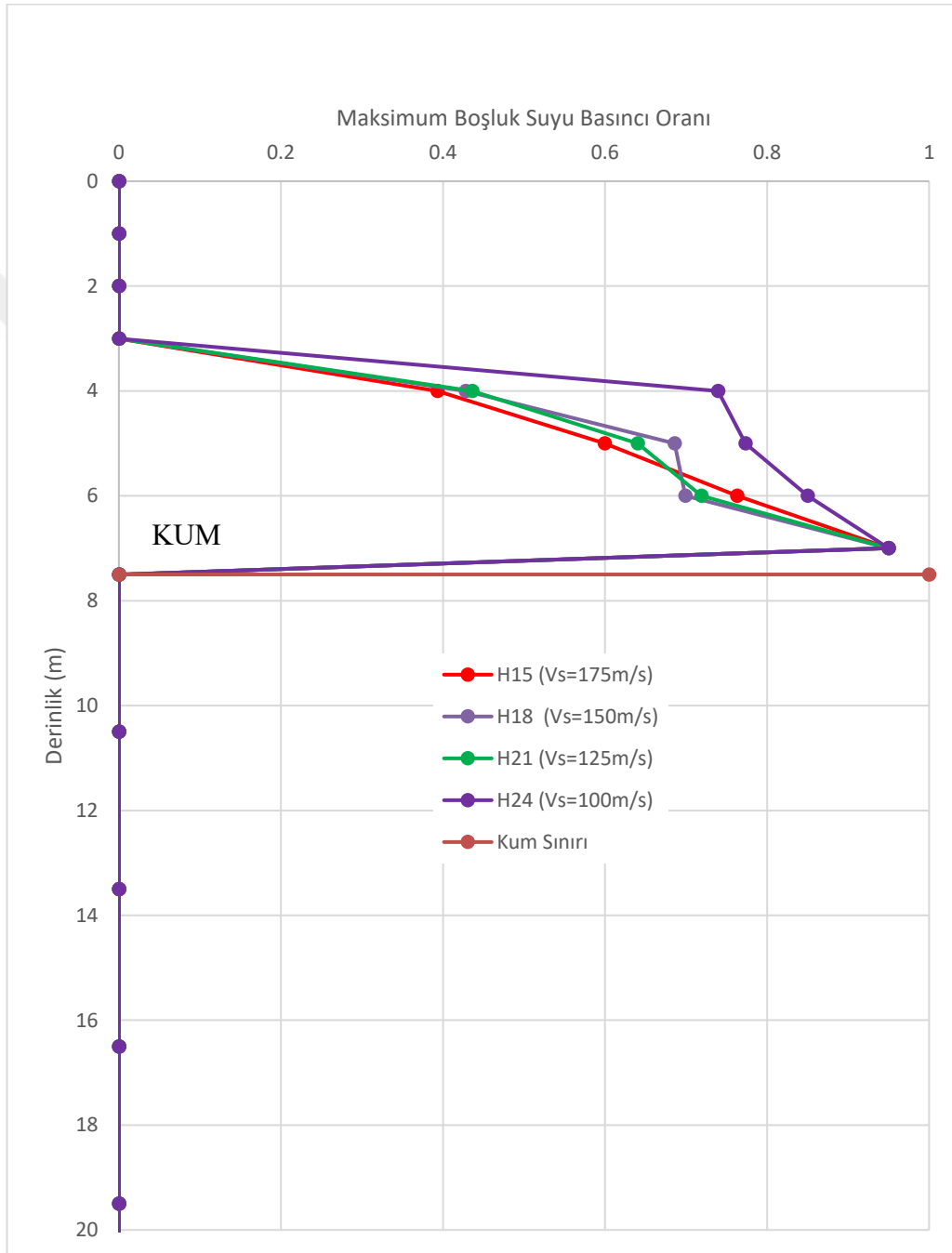
Şekil 5.34 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.35). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.35 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.69 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.36). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.

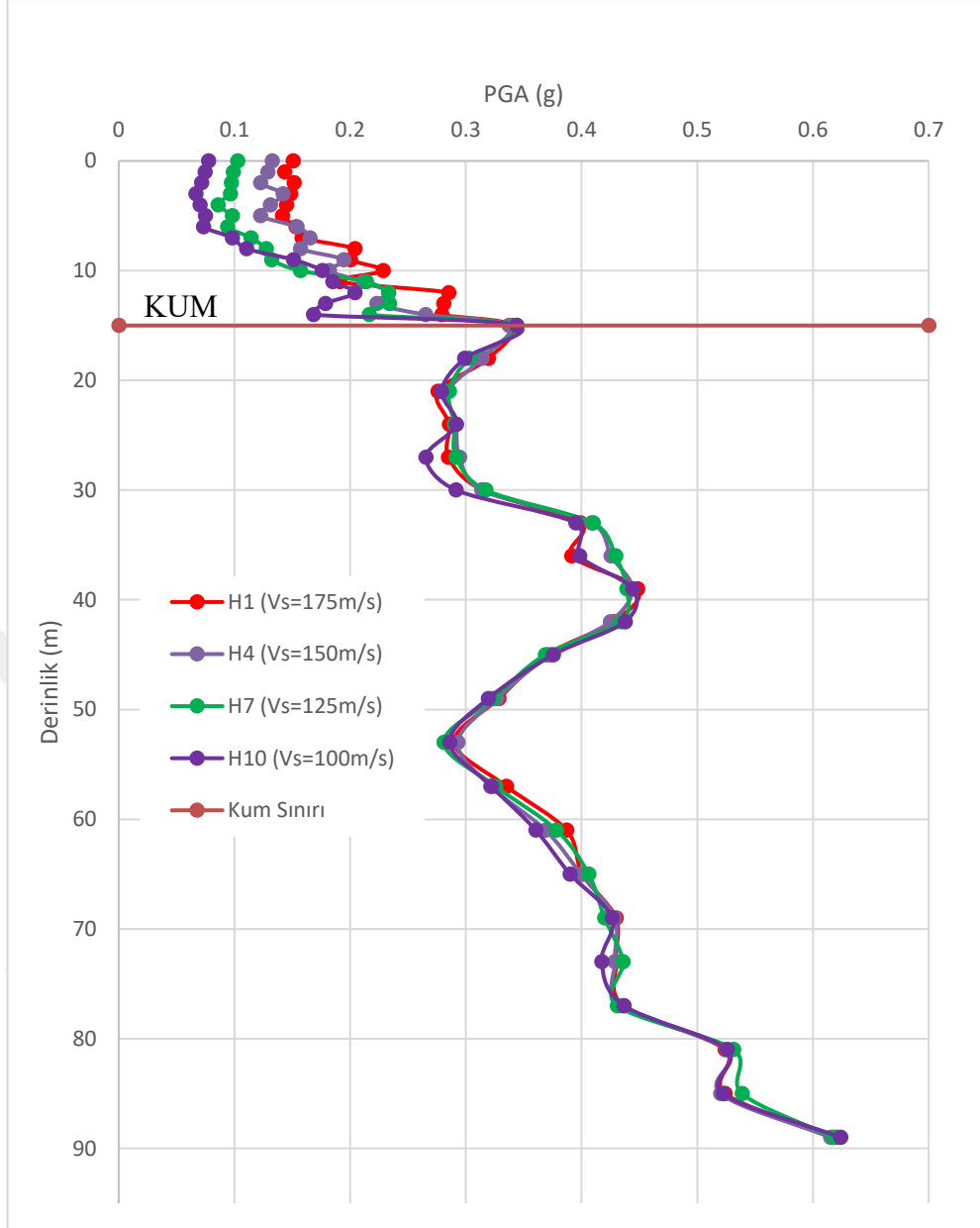


Şekil 5.36 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.69g Deprem Kaydı)

Boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde, kum tabakası kalınlığı boyunca yeraltı su seviyesi 0-4.0 m aralığında V_s değerinin değişimi sıvılaşmada etkili olduğu görülmüştür. V_s değeri azaldıkça boşluk suyu basıncı artmış, dolayısıyla sıvılaşan tabaka kalınlığı artmıştır.

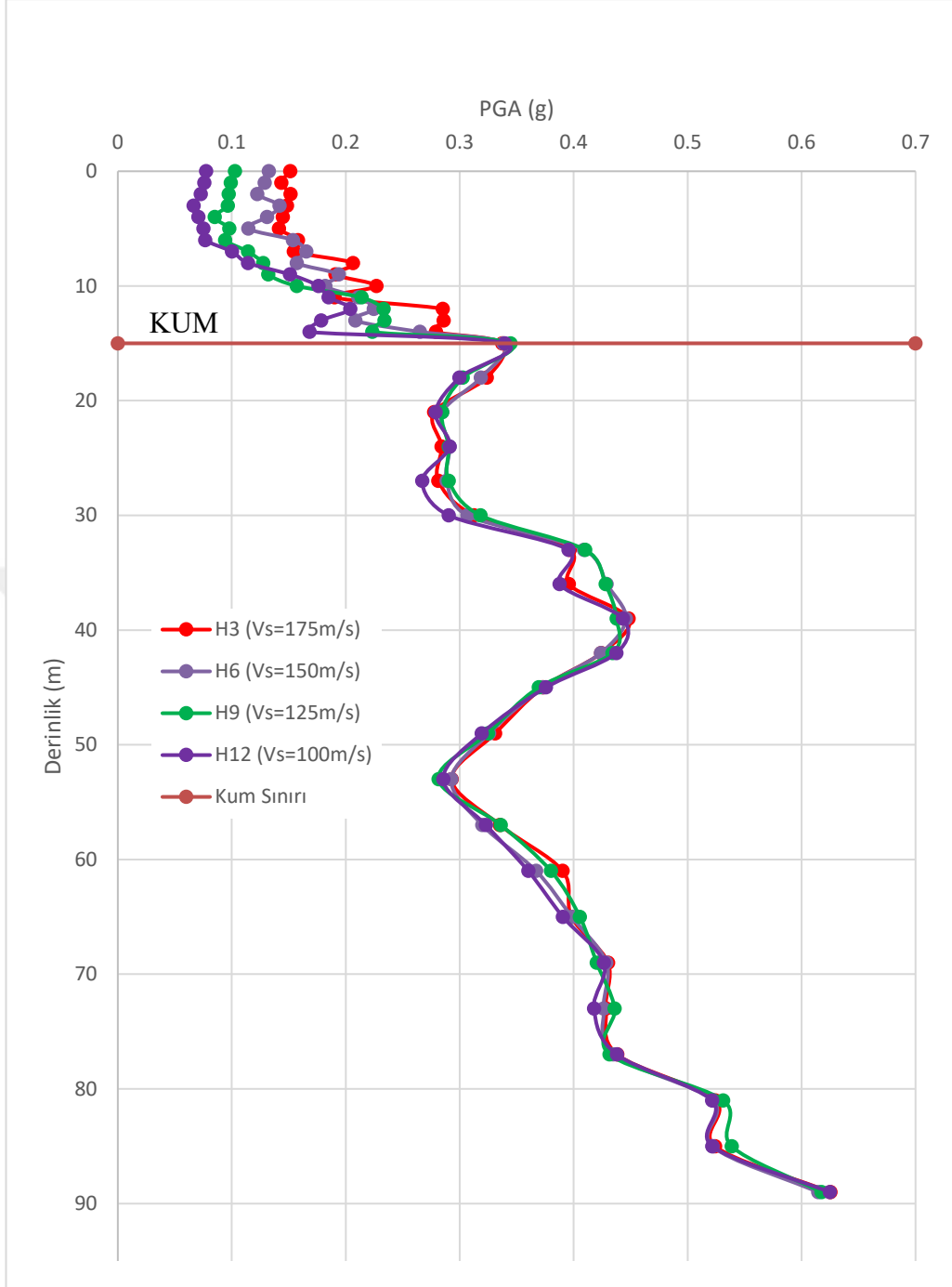
5.1.4 Deprem İvme Kaydı 0.92 g Etkisi Altında Kayma Dalga Hızının Etkisi

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.37). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



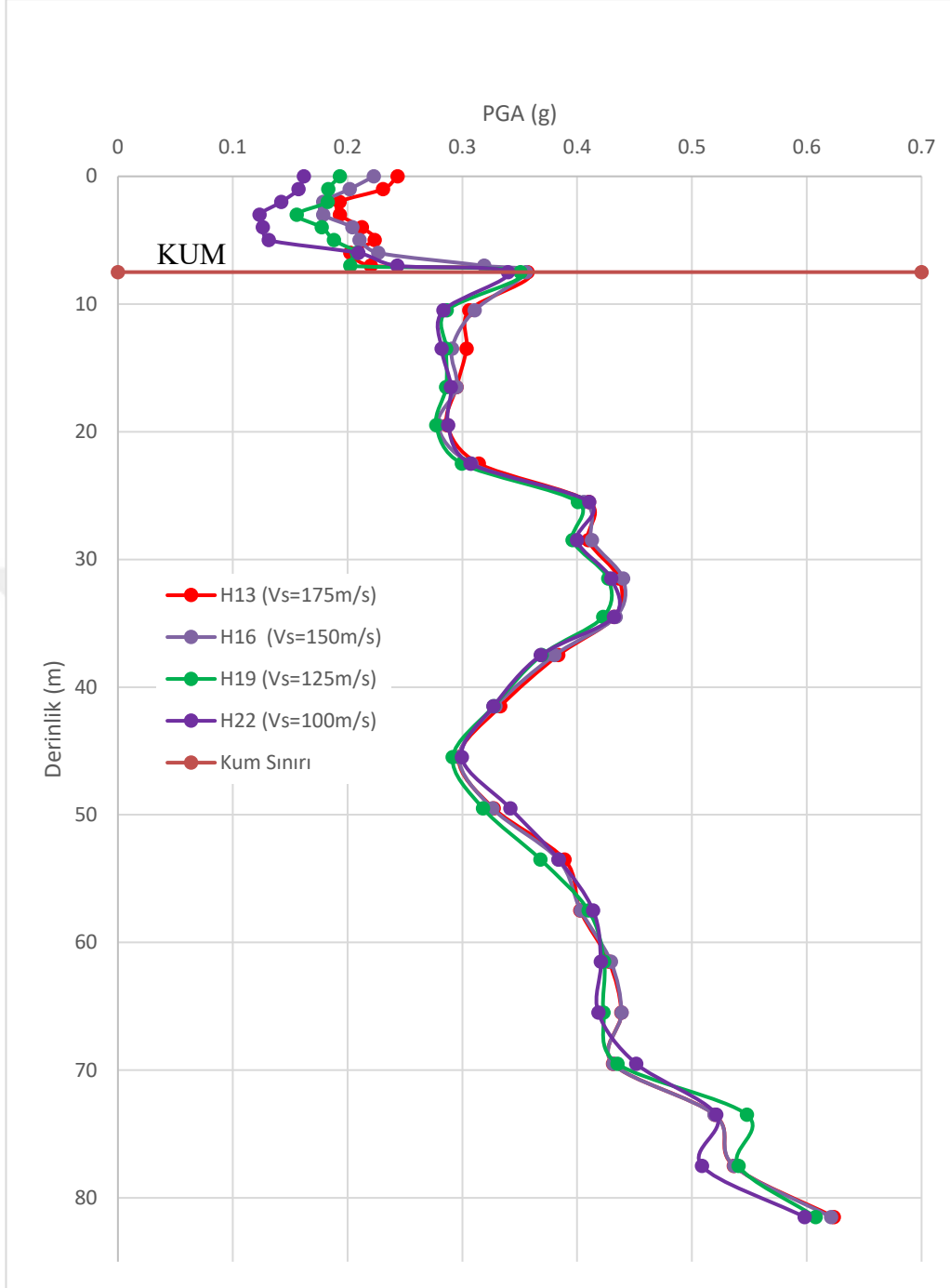
Şekil 5.37 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.38). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



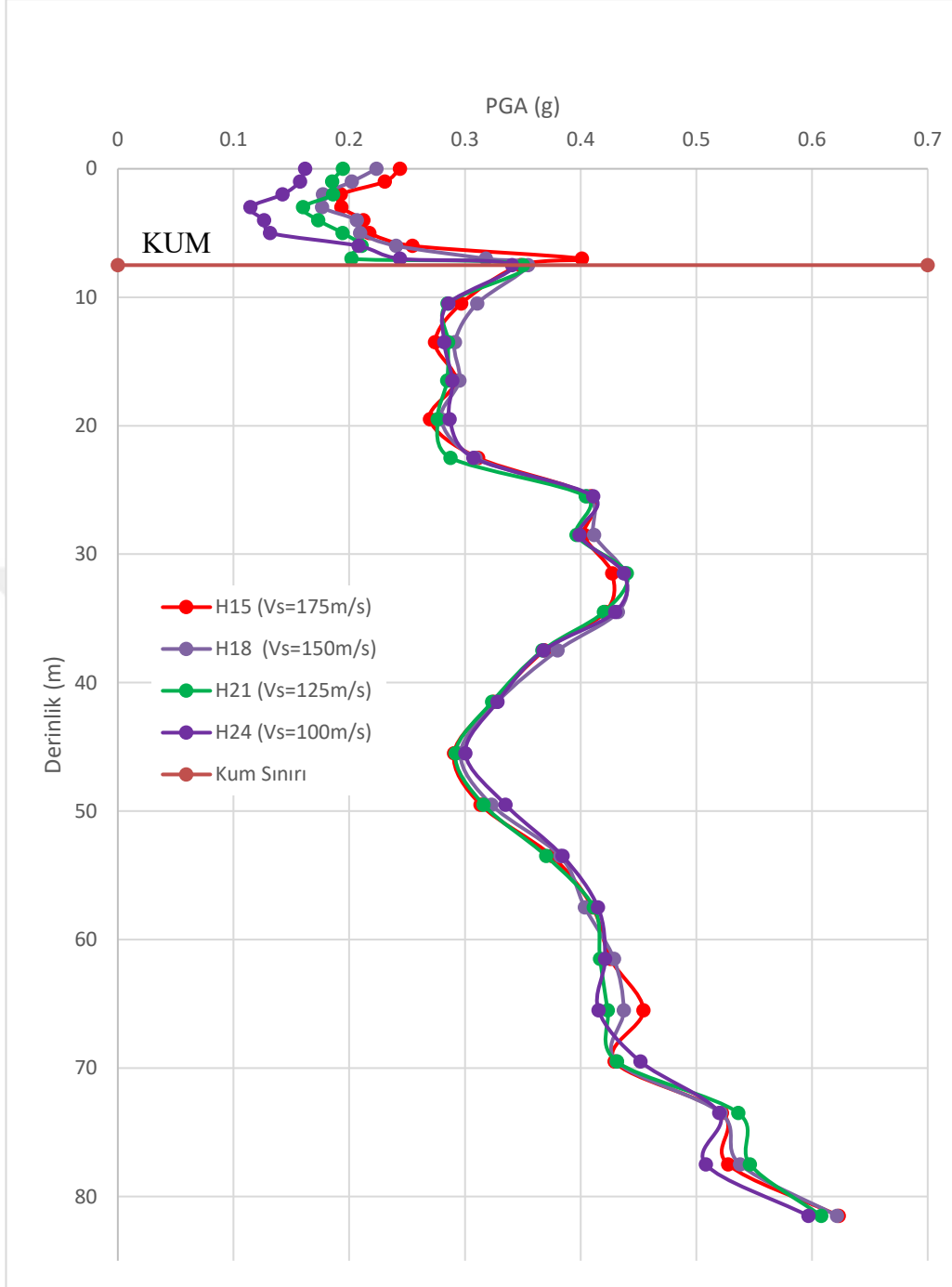
Şekil 5.38 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.39). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.39 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

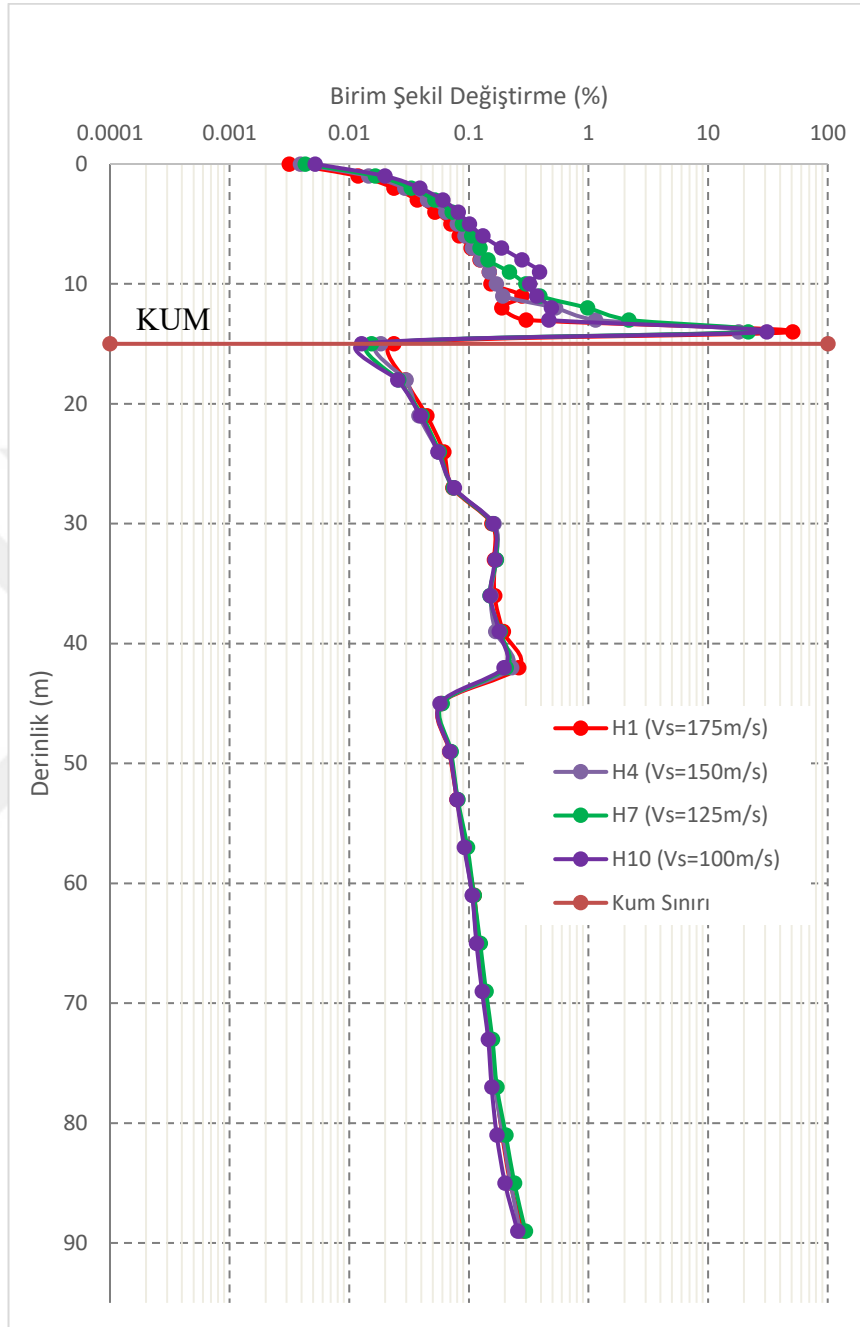
Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; zemin kayma dalga hızı yüksek olan profile daha yüksek, düşük olan profile ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.40). Aynı kum tabakası kalınlığında, kum tabakasının V_s değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır.



Şekil 5.40 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.41). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış

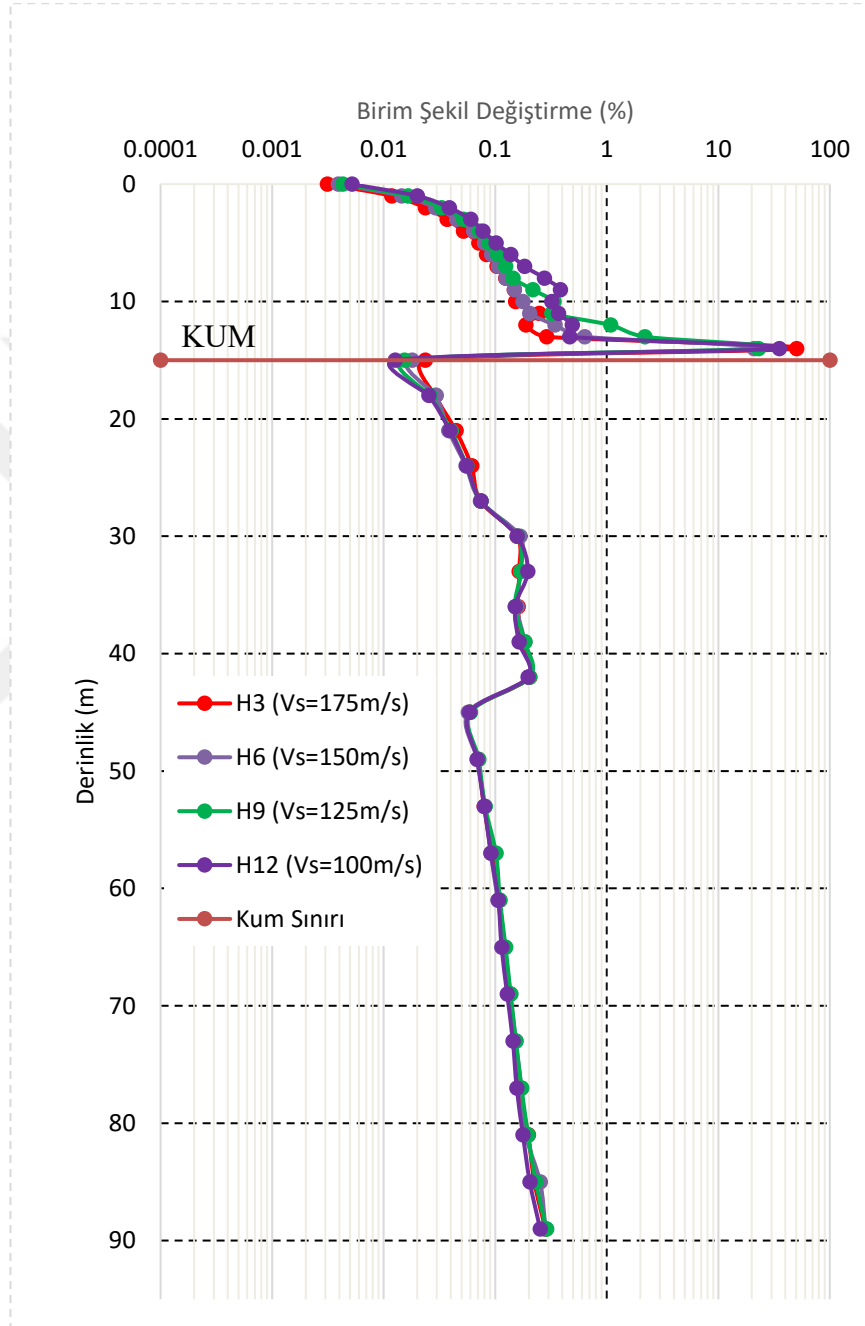
görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



Şekil 5.41 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

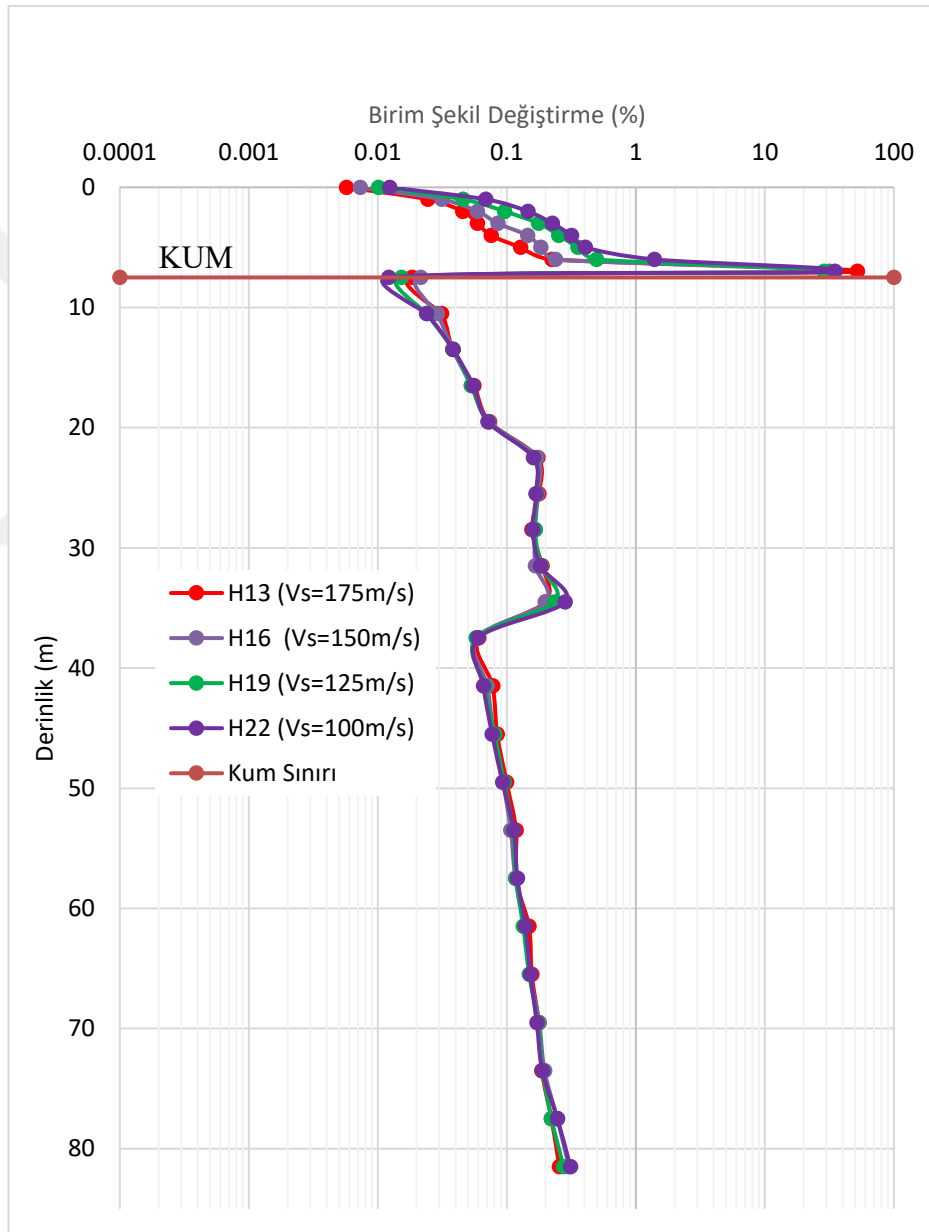
Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.42). Kum tabakasında kayma dalga

hızı değişimi yzeydeki birim Şekil değişirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim Şekil değişirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim Şekil değişirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



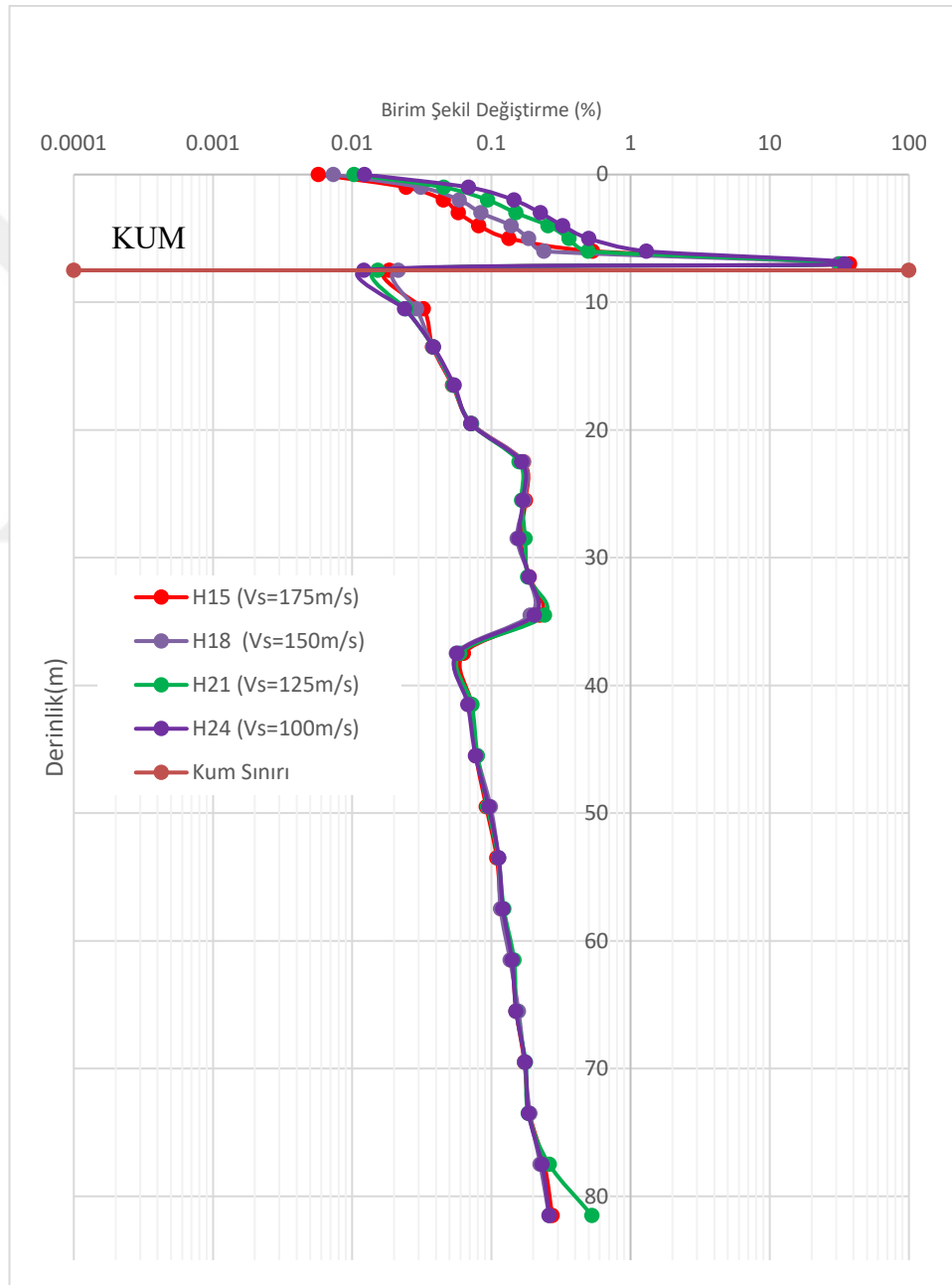
Şekil 5.42 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.43). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



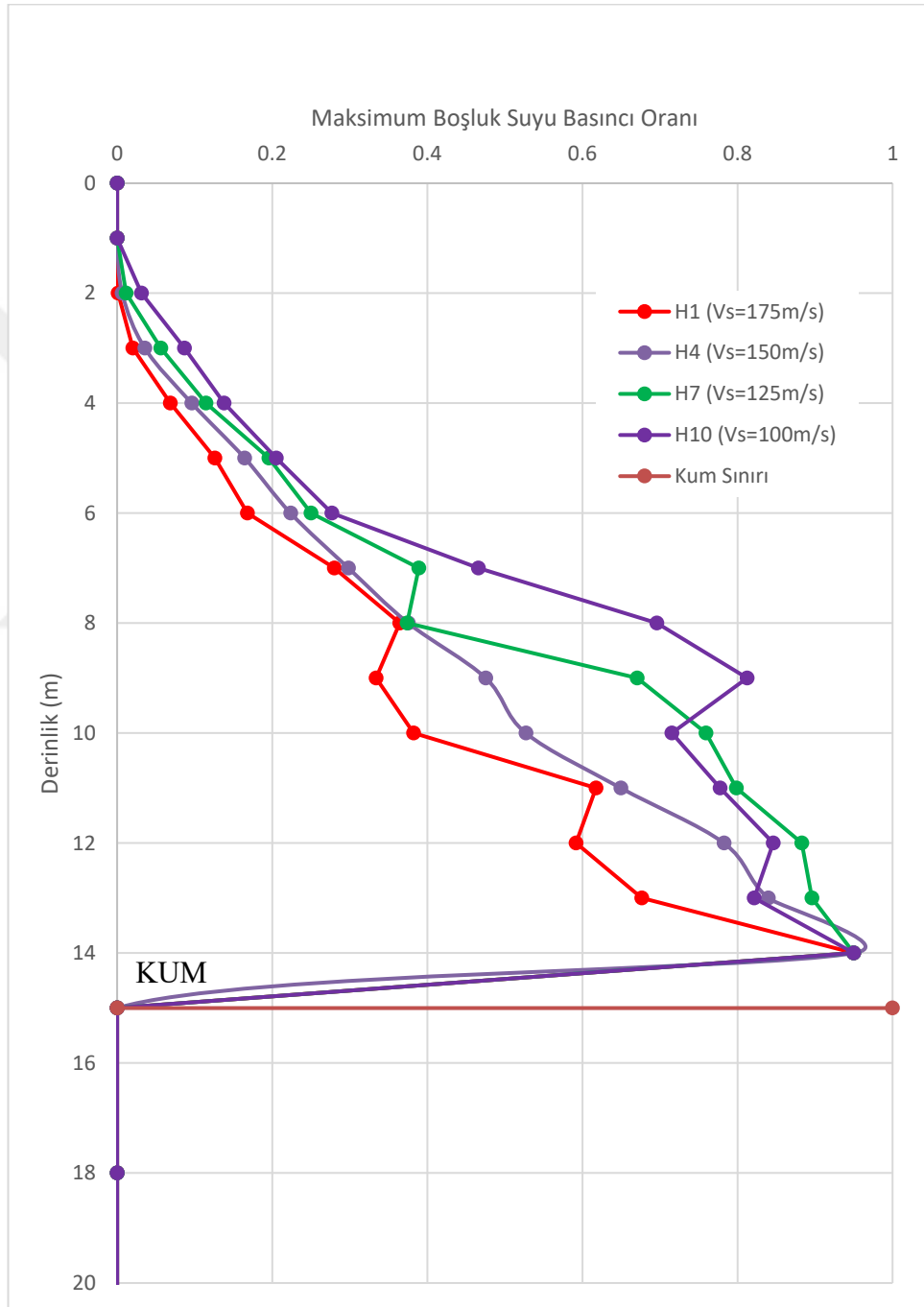
Şekil 5.43 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri 4 adet zemin profilinde de benzer elde edilmiştir (Şekil 5.44). Kum tabakasında kayma dalga hızı değişimi yüzeydeki birim şekil değiştirme değerinde fark yaratmamıştır. Fakat kum tabakasının en alt seviyesinde birim şekil değiştirmelerde ani bir artış görülmüştür. Yüzeyden kum tabakasının sınırına doğru inildikçe birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı görülmüştür.



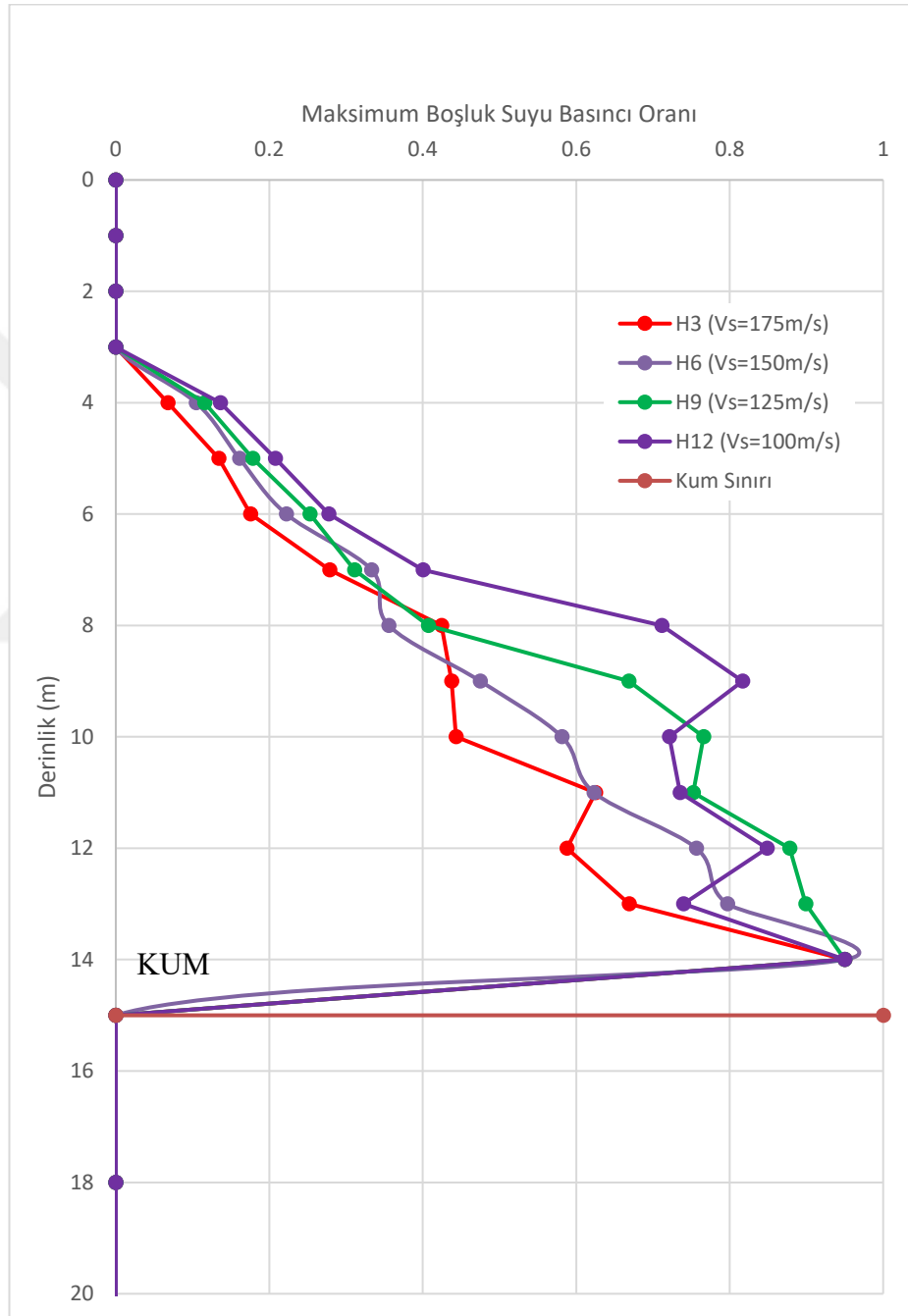
Şekil 5.44 Birim Şekil Değiştirme- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.45). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



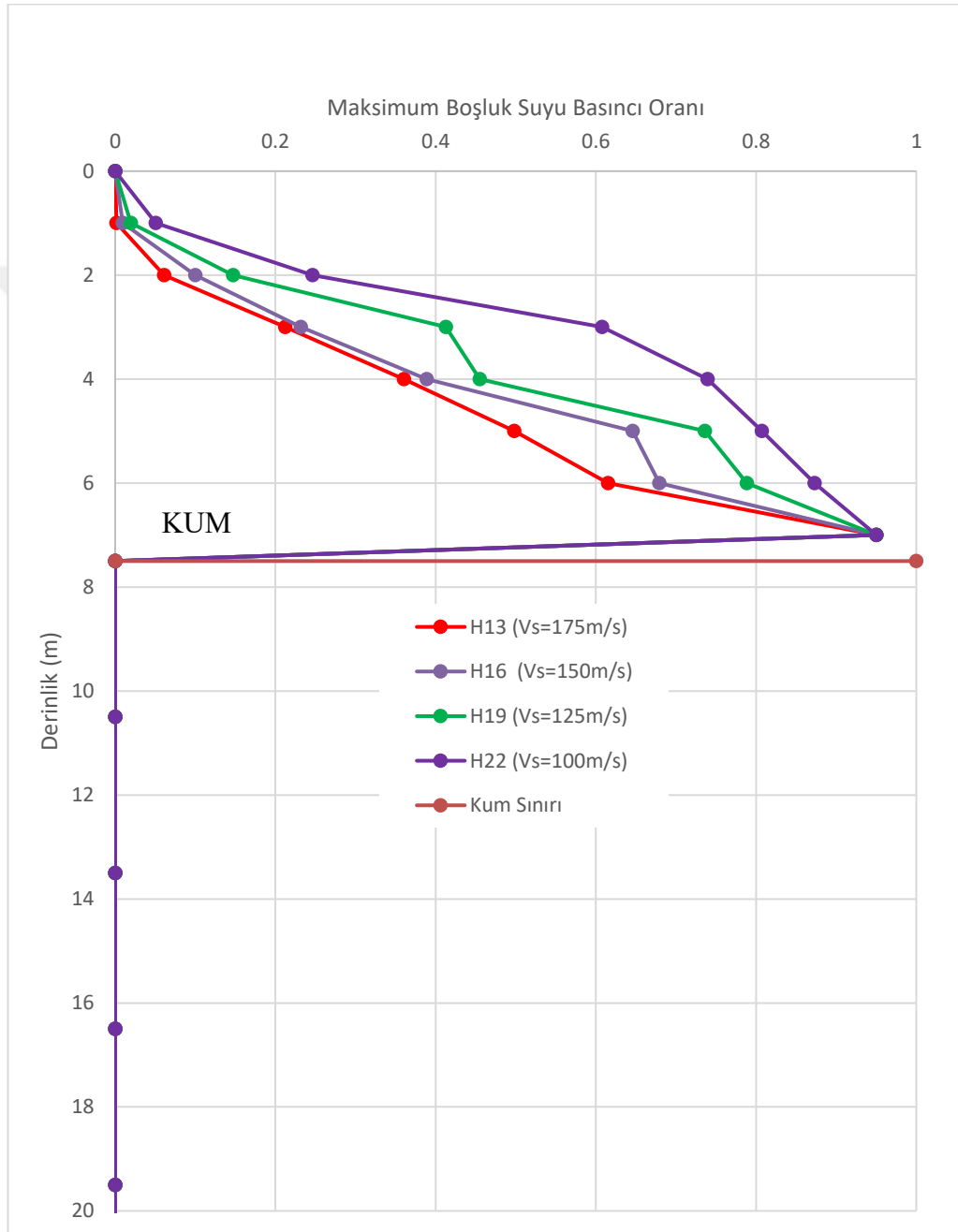
Şekil 5.45 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.46). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



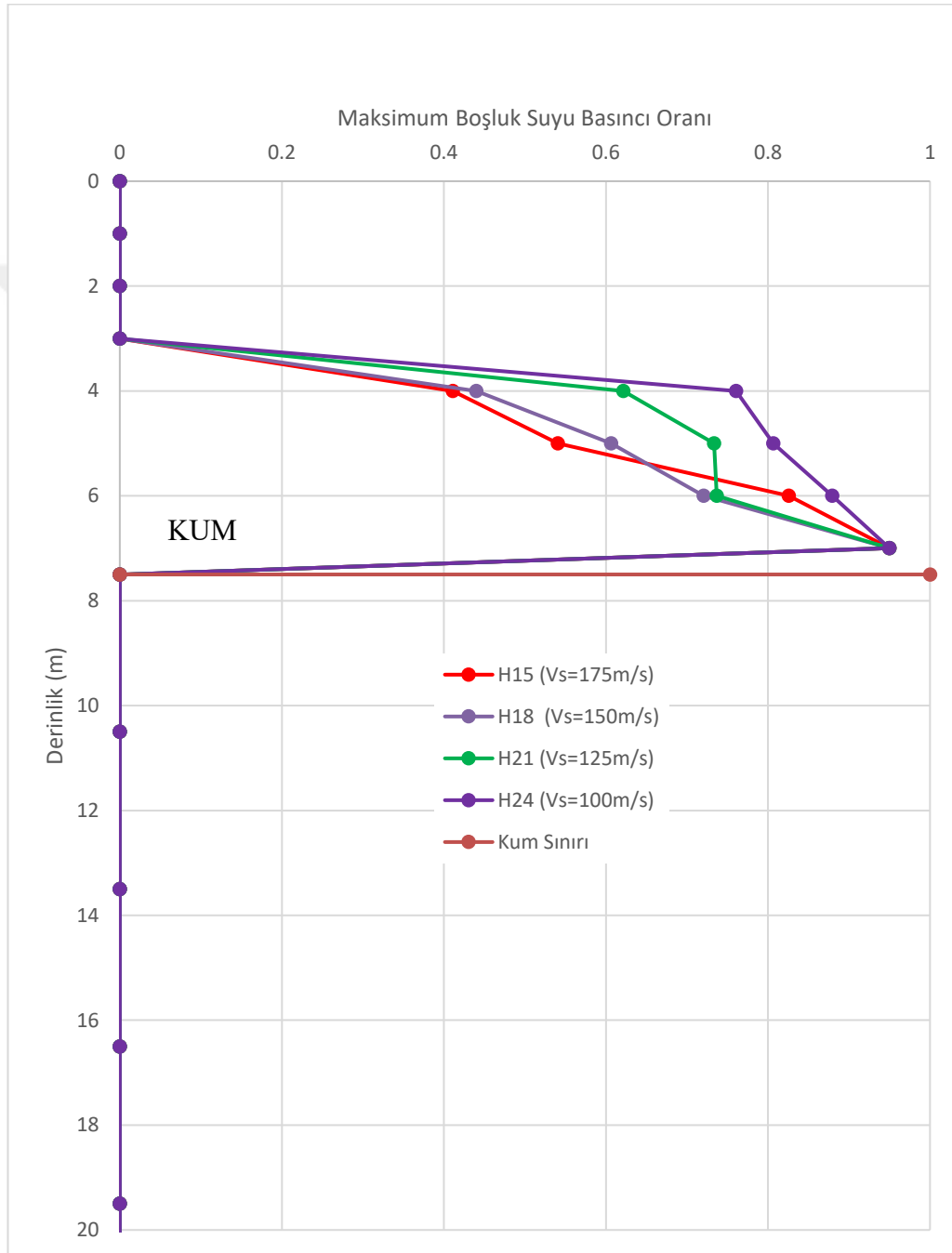
Şekil 5.46 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.47). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



Şekil 5.47 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Yeraltı su seviyesi 4.0 m ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında boşluk suyu basıncı; zemin kayma hızı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise daha yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.48). Aynı kum tabakası kalınlığında kum V_s değeri arttıkça yüzeydeki boşluk suyu basıncı değeri azalmıştır.



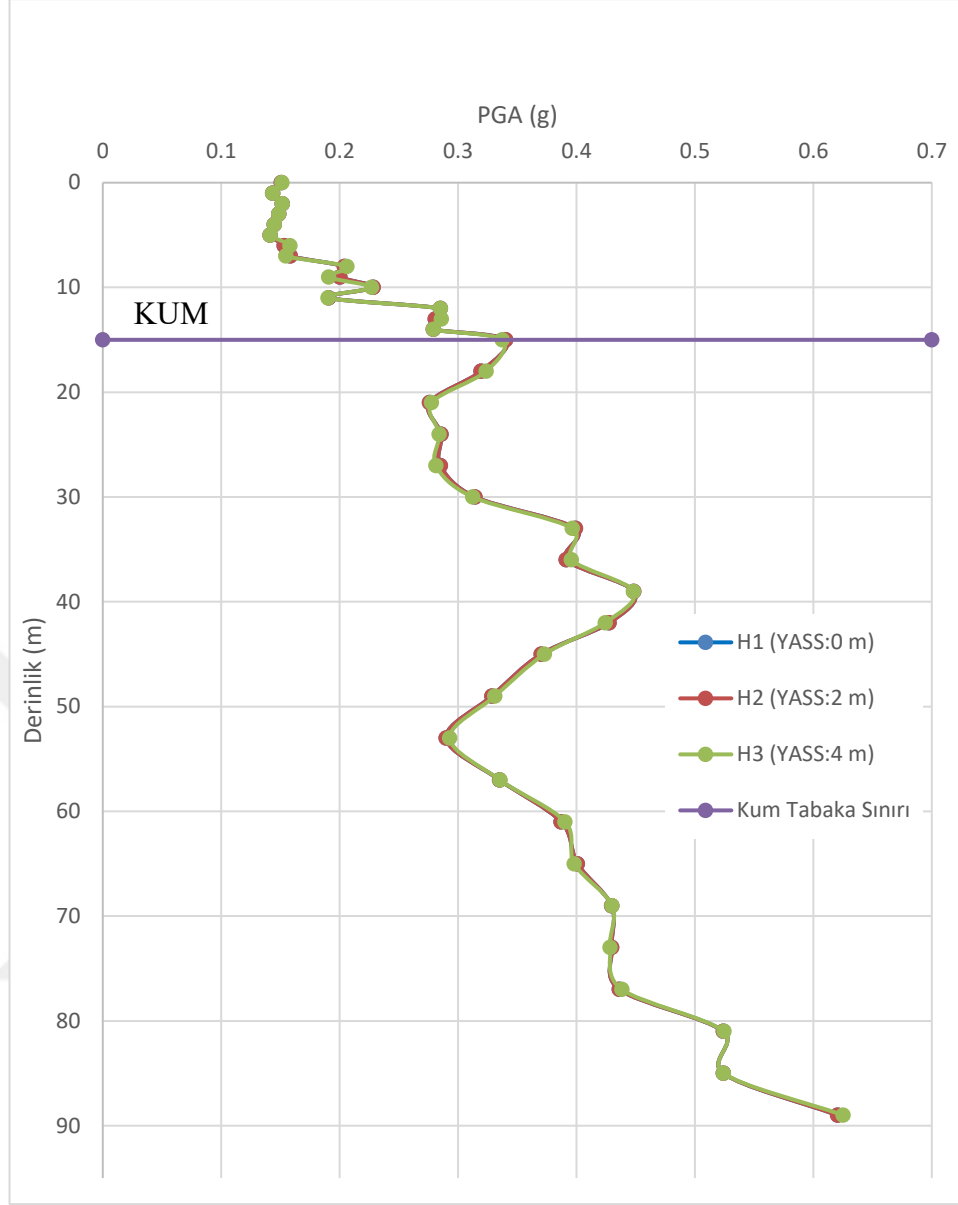
Şekil 5.48 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:4.0m, 0.92g Deprem Kaydı)

Boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde, kum tabakası kalınlığı boyunca yeraltı su seviyesi 0-4.0 m aralığında V_s değerinin değişimi sıvılaşmada etkili olduğu görülmüştür. V_s değeri azaldıkça boşluk suyu basıncı artmış, dolayısıyla sıvılaşan tabaka kalınlığı artmıştır.

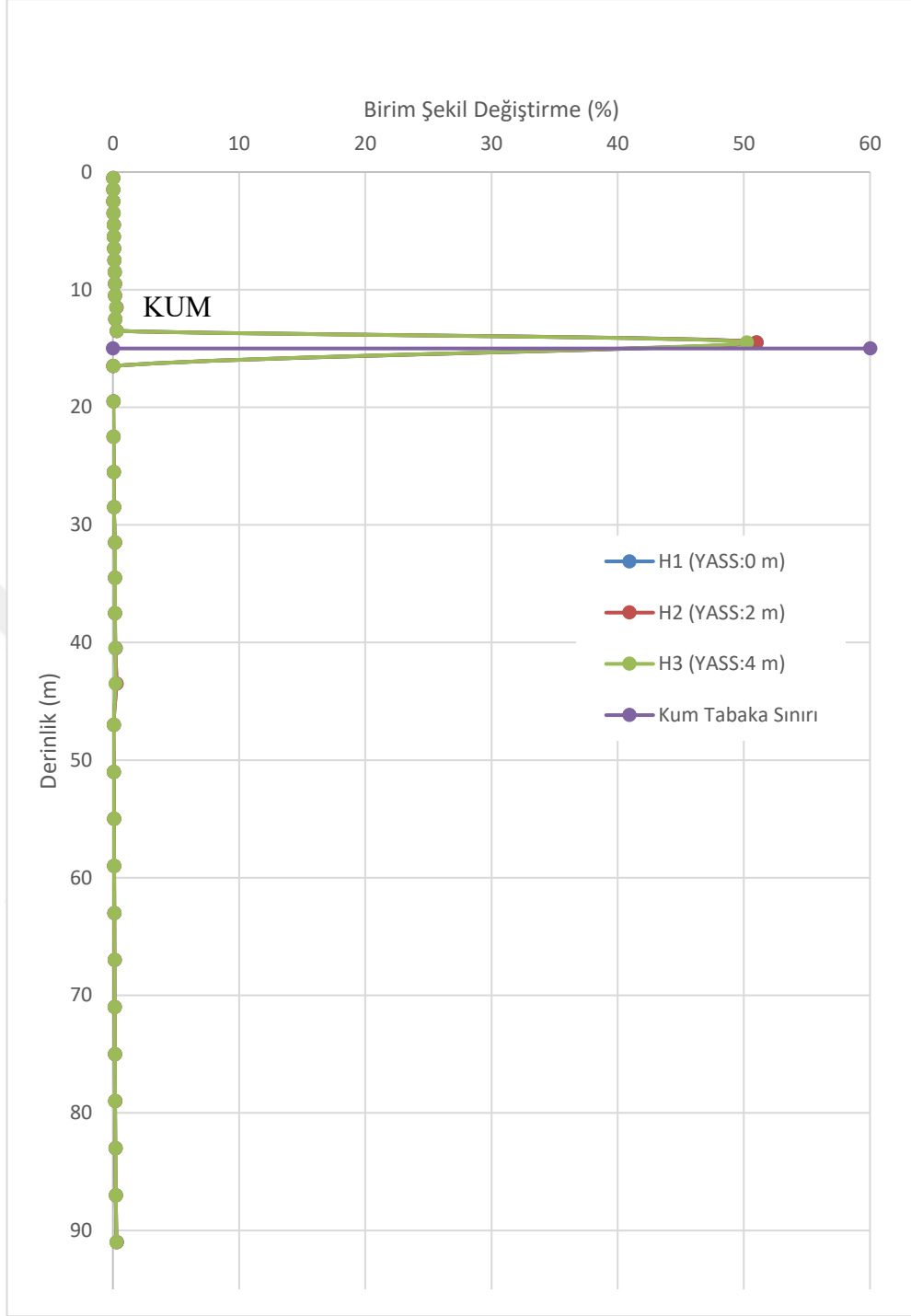
5.2. Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi

Analizlerde yeraltı su seviyesi yüzeyde, 2.0 m ve 4.0 m derinlikte olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Her bir yeraltı su seviyesine göre 2 profilde analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Yeraltı su seviyesi yüzeyde yer aldığı ve kum tabaka kalınlığının 15.0 m olması durumunda 0.92 g deprem kaydı ile hesap yapıldığında, yüzeydeki PGA değeri; yeraltı su seviyesinin 2 m ve 4 m derinde yer almasına bağlı olarak bir değişkenlik göstermemiştir (Şekil 5.49).

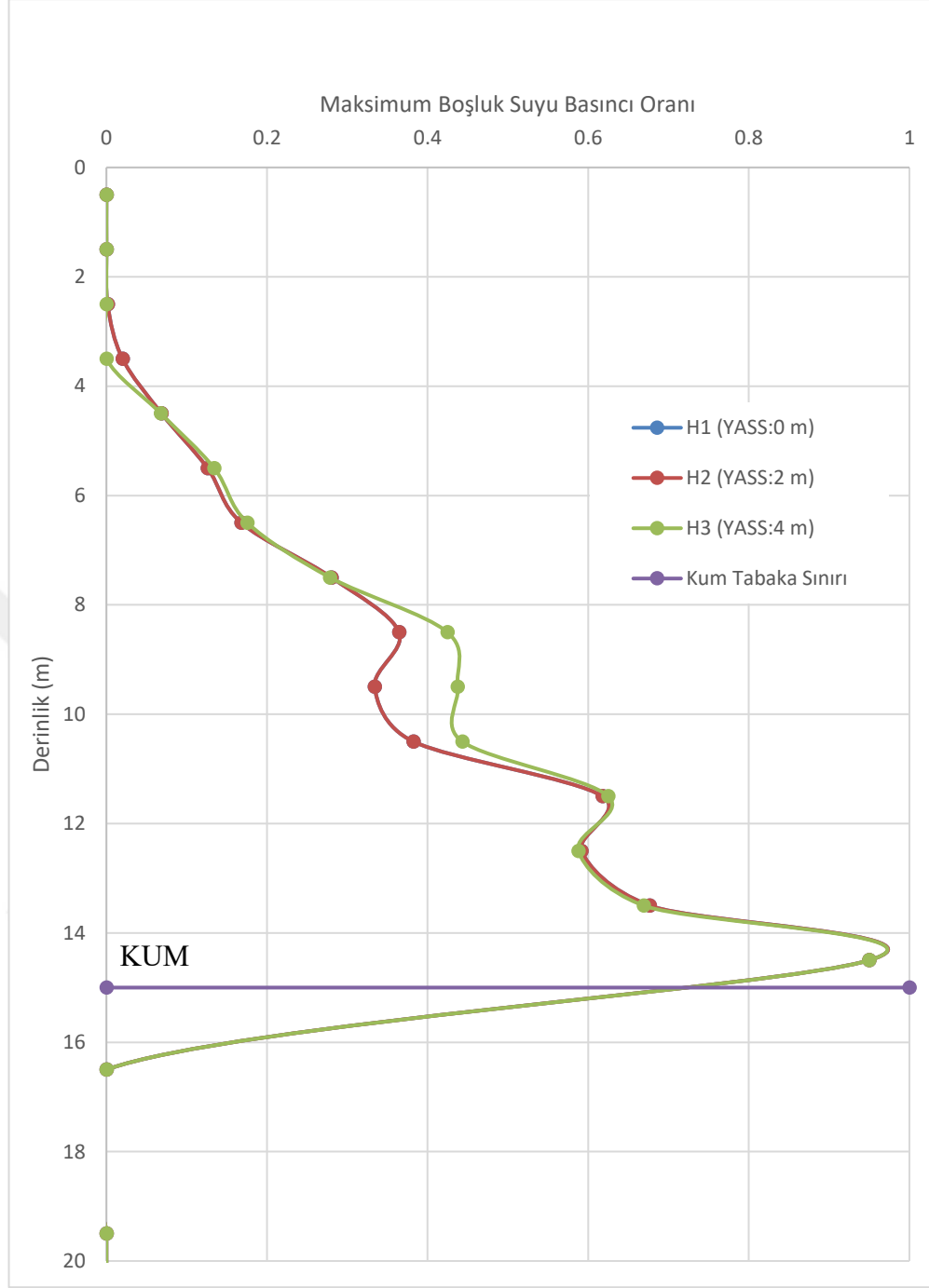


Şekil 5.49 YASS Değişimine Bağlı PGA- Derinlik Grafiği
 Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri; yeraltı su seviyesinin 2 m ve 4 m'ye düşmesi durumunda bir değişkenlik göstermemiştir (Şekil 5.50).



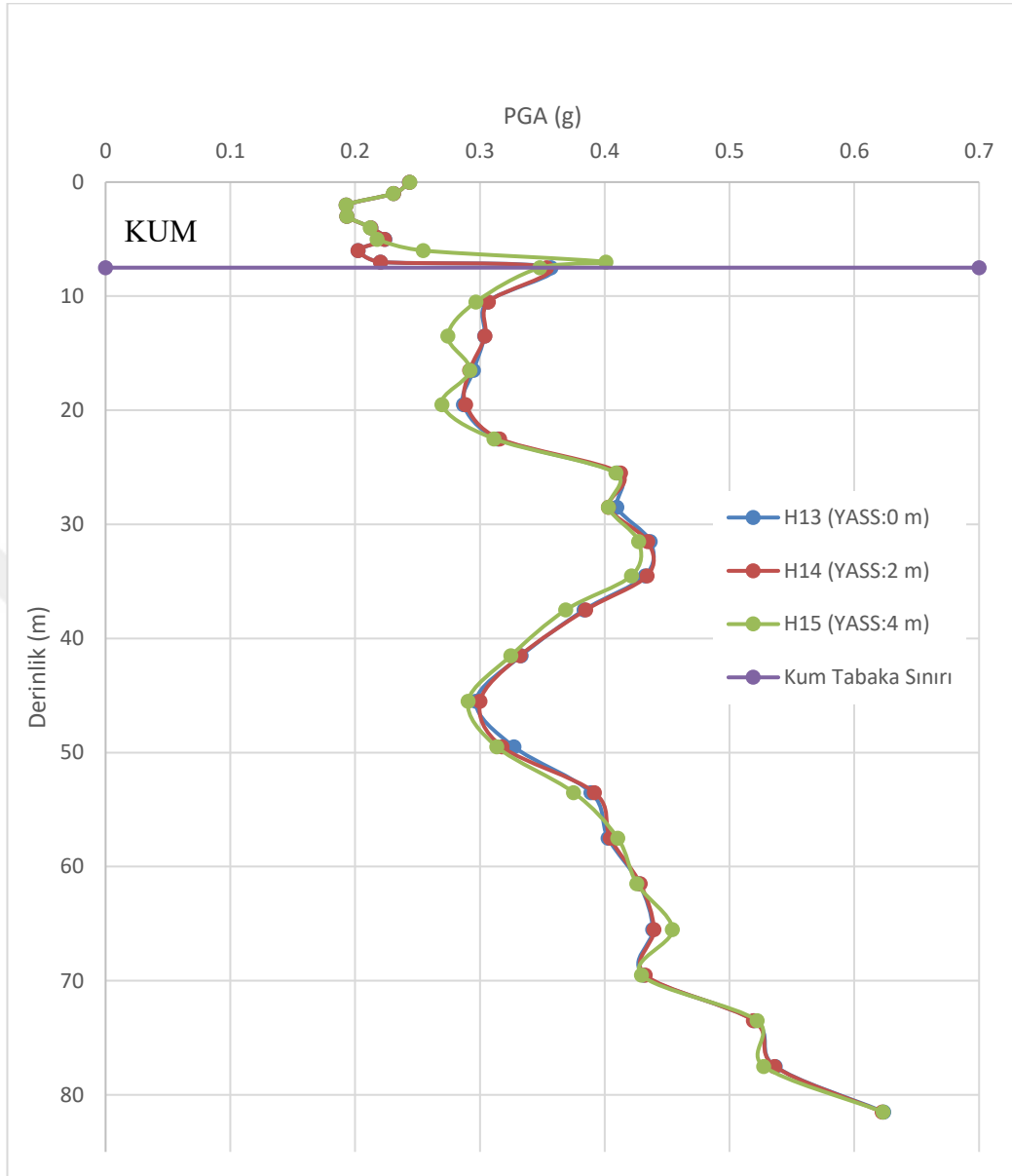
Şekil 5.50 YASS Değişimine Bağlı Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile H1- H2- H3 profillerinde hesap yapıldığında kum sınırındaki maksimum boşluk suyu basıncı oranı değeri; yeraltı su seviyesi azalımına göre değişiklik göstermemiştir (Şekil 5.51). Yeraltı su seviyesinin değişimi sıvılaşmayı etkilememiştir.



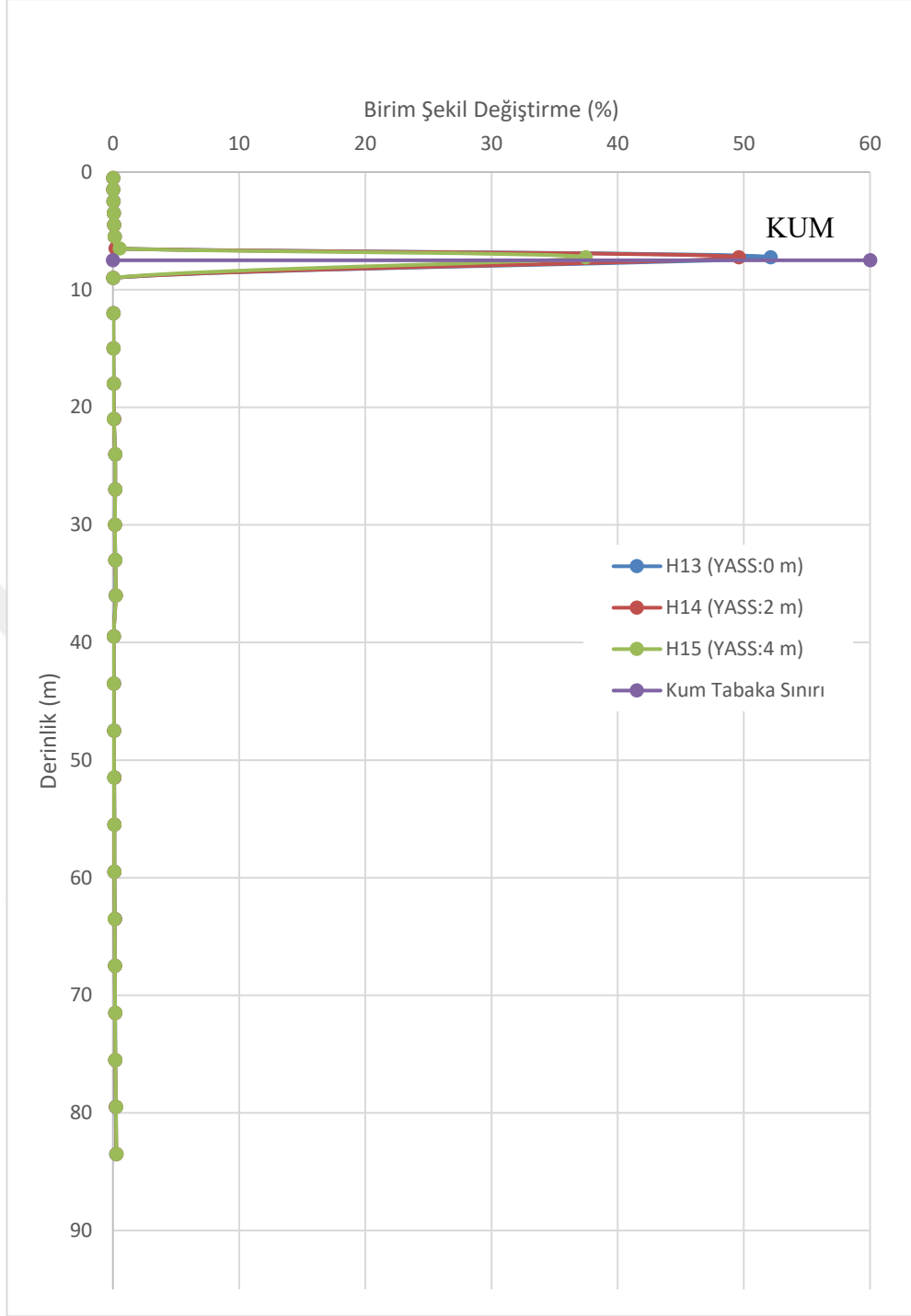
Şekil 5.51 YASS Değişimine Bağlı Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki maksimum boşluk suyu basıncı oranı değeri; yeraltı su seviyesi azalmasına göre değişkenlik göstermemiştir (Şekil 5.52). Yeraltı su seviyesinin değişimi sıvılaşmayı etkilememiştir. 0.92 g ana kaya ivme kaydıyla yapılan analizlerde yeraltı su seviyesinin yüzeyden 2.0 m ve 4.0 m'ye düşürülmesi sıvılaşma etkisini değiştirmemiştir.



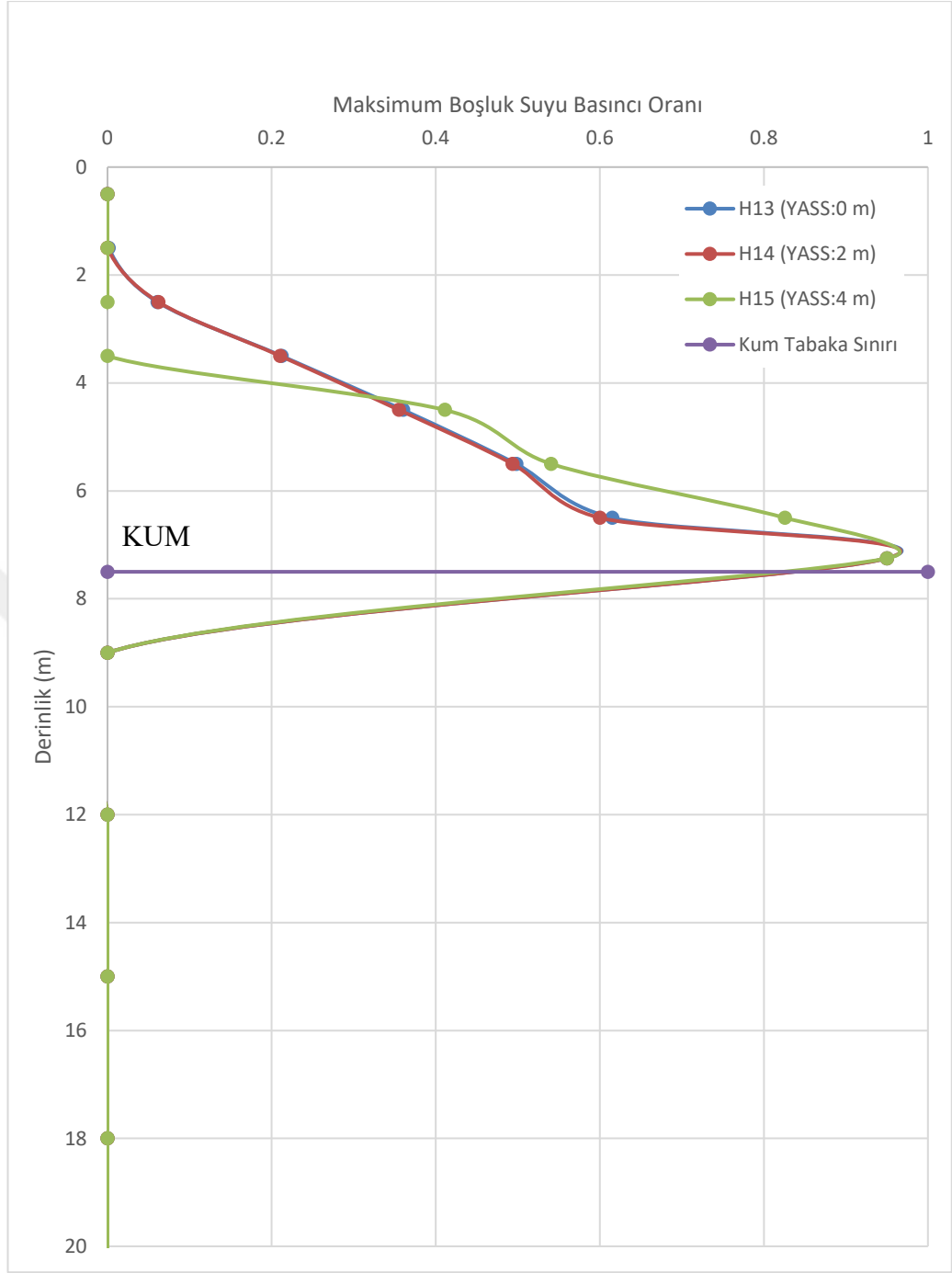
Şekil 5.52 YASS Değişimine Bağlı PGA- Derinlik Grafiği

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim şekil değiştirme değeri; yeraltı su seviyesi düşük olan profile daha düşük elde edilmiştir (Şekil 5.53). Yeraltı su seviyesi yüzeye yaklaştıkça, birim şekil değiştirme artmıştır.



Şekil 5.53 YASS Değişimine Bağlı Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 0.92 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki maksimum boşluk suyu basıncı oranı değeri; yeraltı su seviyesi azalımına göre değişkenlik göstermemiştir (Şekil 5.54). Yeraltı su seviyesinin değişimi birim şekil değışirme değeri etkilemiştir.



Şekil 5.54 YASS Değişimine Bağlı Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği

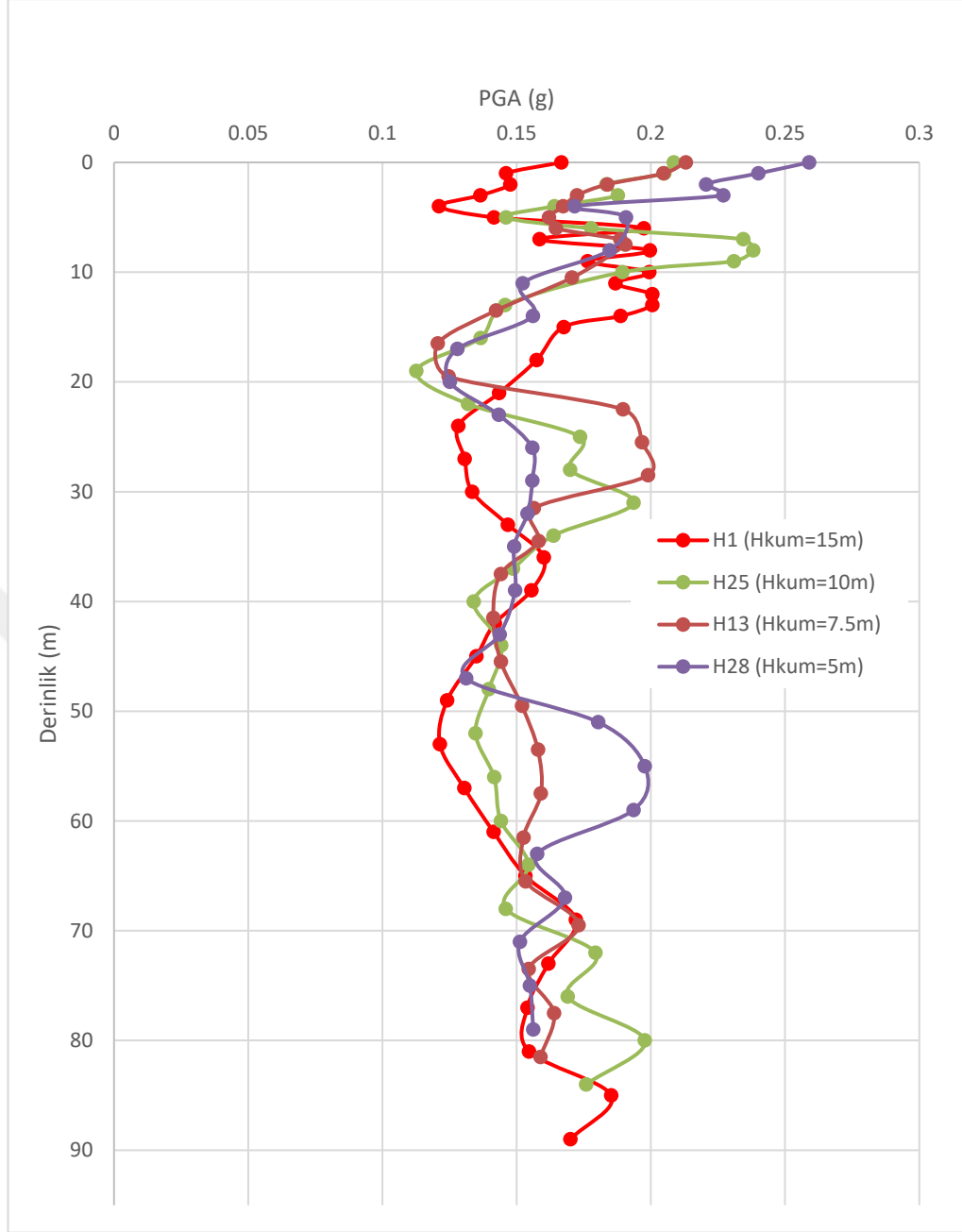
Yeraltı su seviyesi 4.0 m olduğunda 2.0 m ve yüzeyde olduğu profillere göre sıvılaştıran tabaka kalınlığı artmıştır. Sıvılaşma kum tabakasının son kademesinde gerçekleşmiştir.

5.3. Kum Tabaka Kalınlığının Etkisi

Analizlerde en üstteki tabaka olan kum tabakasının kalınlığı 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m ve 15.0 m olmak üzere değişkenlik göstermektedir. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde olduğu durumda, her bir kum tabakası kalınlığına göre analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

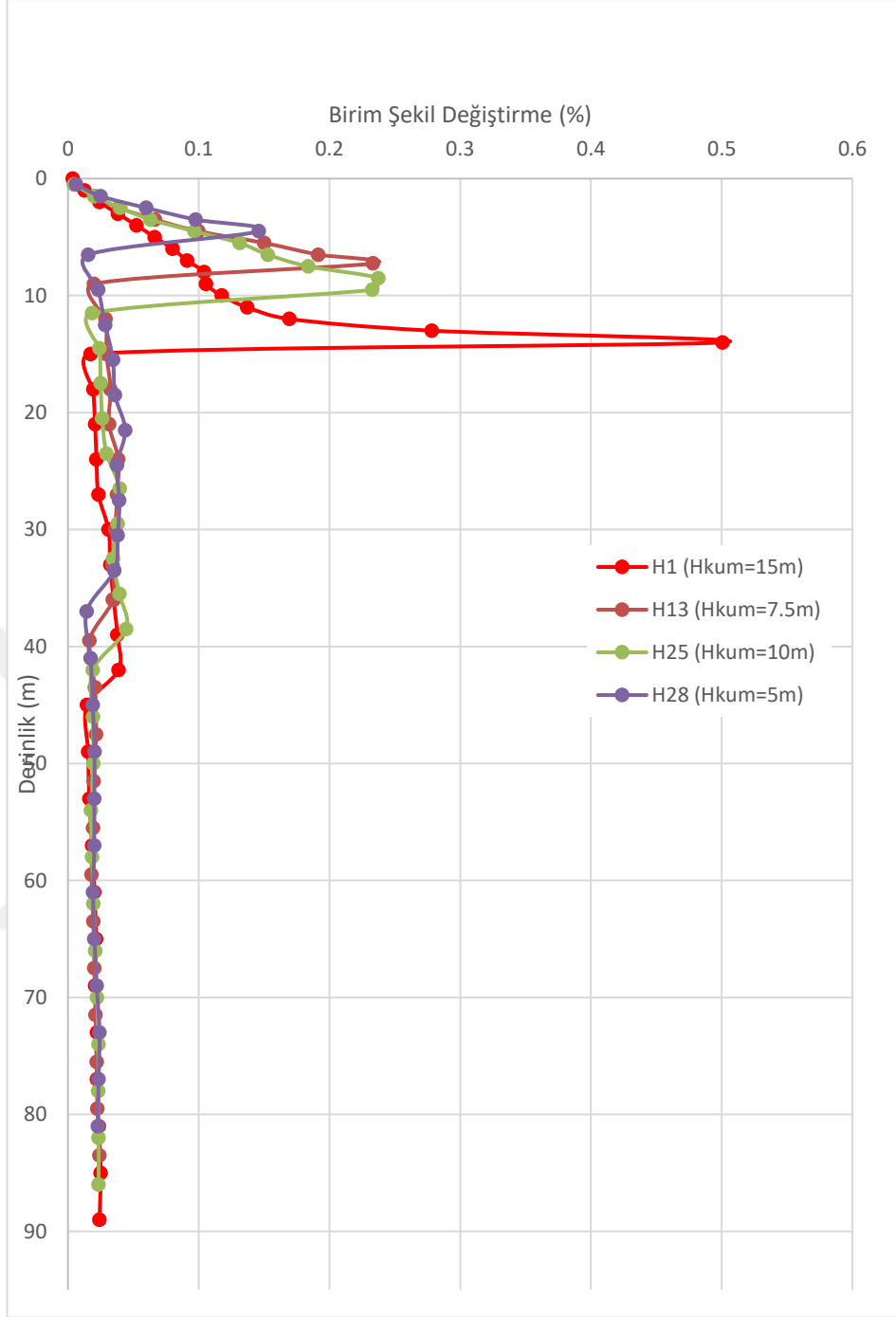
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı değişken olduğunda 0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; kum tabaka kalınlığı yüksek olan profilde daha düşük, düşük olan profilde ise en yüksek olarak elde edilmiştir (Şekil 5.55). Farklı kum tabakası kalınlıklarına göre kum tabakası kalınlığı arttıkça yüzeydeki PGA değeri düşmüştür.





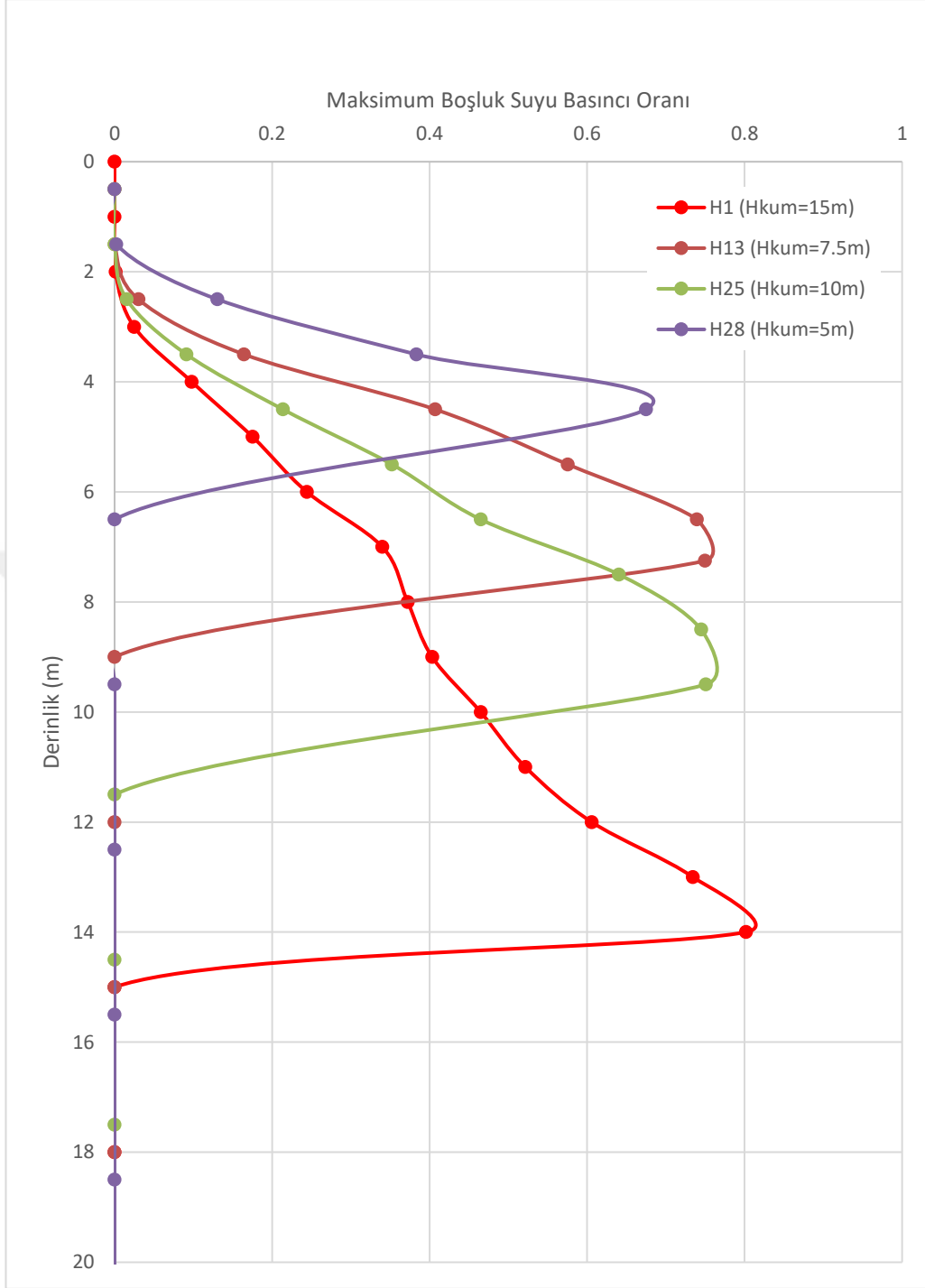
Şekil 5.55 Kum tabakası kalınlığı değişiminin zemin profili boyunca PGA-dağılımına etkisi

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı değişken olduğunda 0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında birim deformasyon değeri; kum tabaka kalınlığı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.56). Farklı kum tabakası kalınlığında kum tabakası kalınlığı arttıkça sıvılaştıran tabakadaki birim deformasyon değeri düşmüştür.



Şekil 5.56 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı değişken olduğunda 0.23 g anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında maksimum boşluk suyu basıncı değeri; kum tabaka kalınlığına bağlı olarak farklı derinliklerde elde edilmiştir (Şekil 5.57).



Şekil 5.57 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği

Farklı kum tabakası kalınlığında kum kalınlığı arttıkça sıvılaştıran tabaka derinliği artmıştır. Kum tabaka kalınlığı 7.5 m, 10.0 m ve 15.0 m olduğunda sıvılaşma gözlenmiştir. Yalnızca kum tabaka kalınlığı 5.0 m olan H28 profilinde sıvılaşma gerçekleşmemiştir.

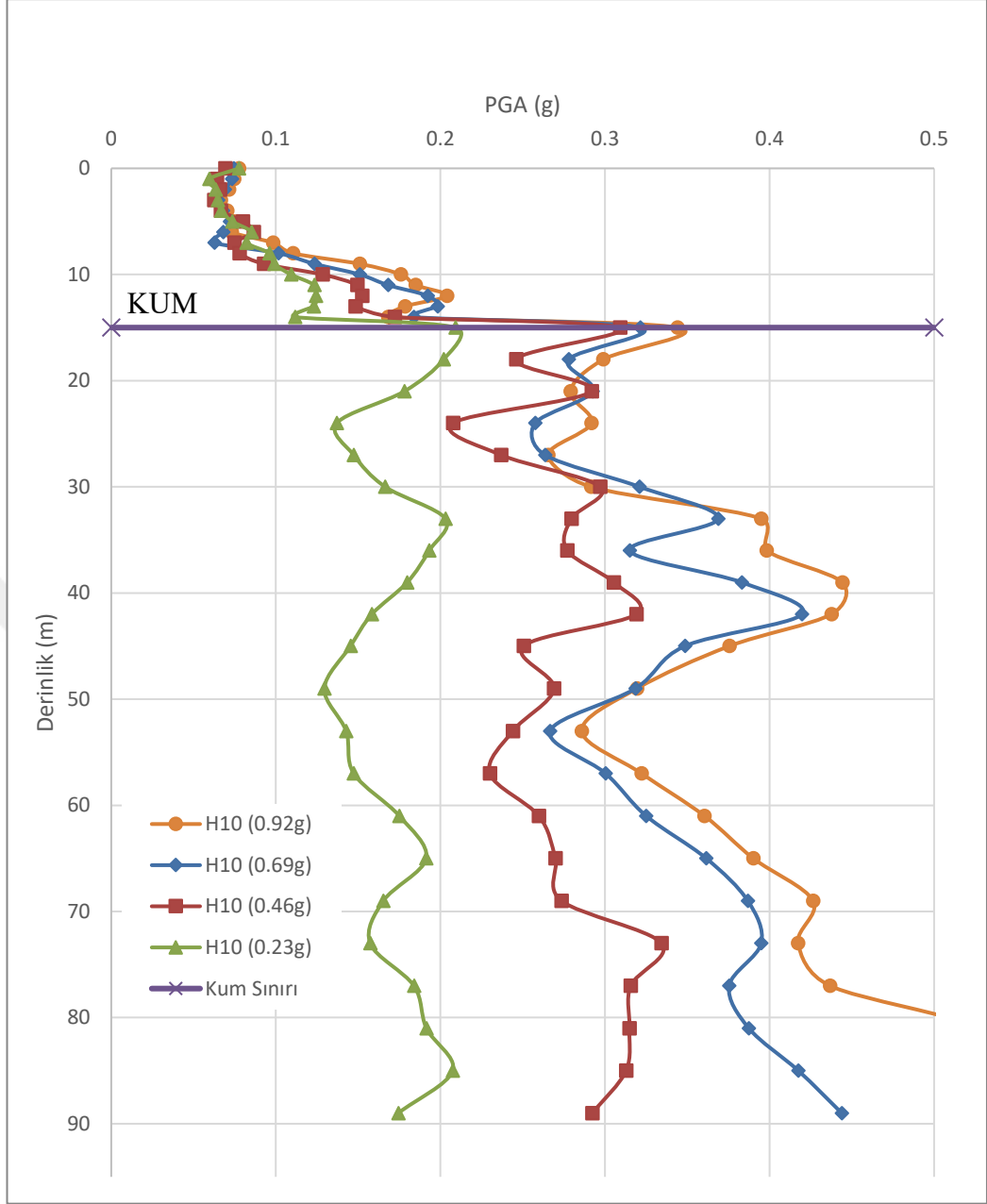
Sıvılaşma olabilmesi için belirli bir derinlikteki zemin tabakasının boşluk suyu basıncındaki ani artışı ile birlikte sönmelenemediği görülmüştür. Beaty ve Perlea

(2011)'e göre r_u değeri 0.7 üstünde olduğunda o tabaka sıvılaştırılabilir zemin olarak tanımlanmıştır. Bu tez kapsamında da, hesap yapılan zemin profillerinde r_u değeri 0.7'den büyük olan zemin tabakalarının sıvılaştığı kabul edilmiştir.

5.4. Deprem Büyüklüğünün Etkisi

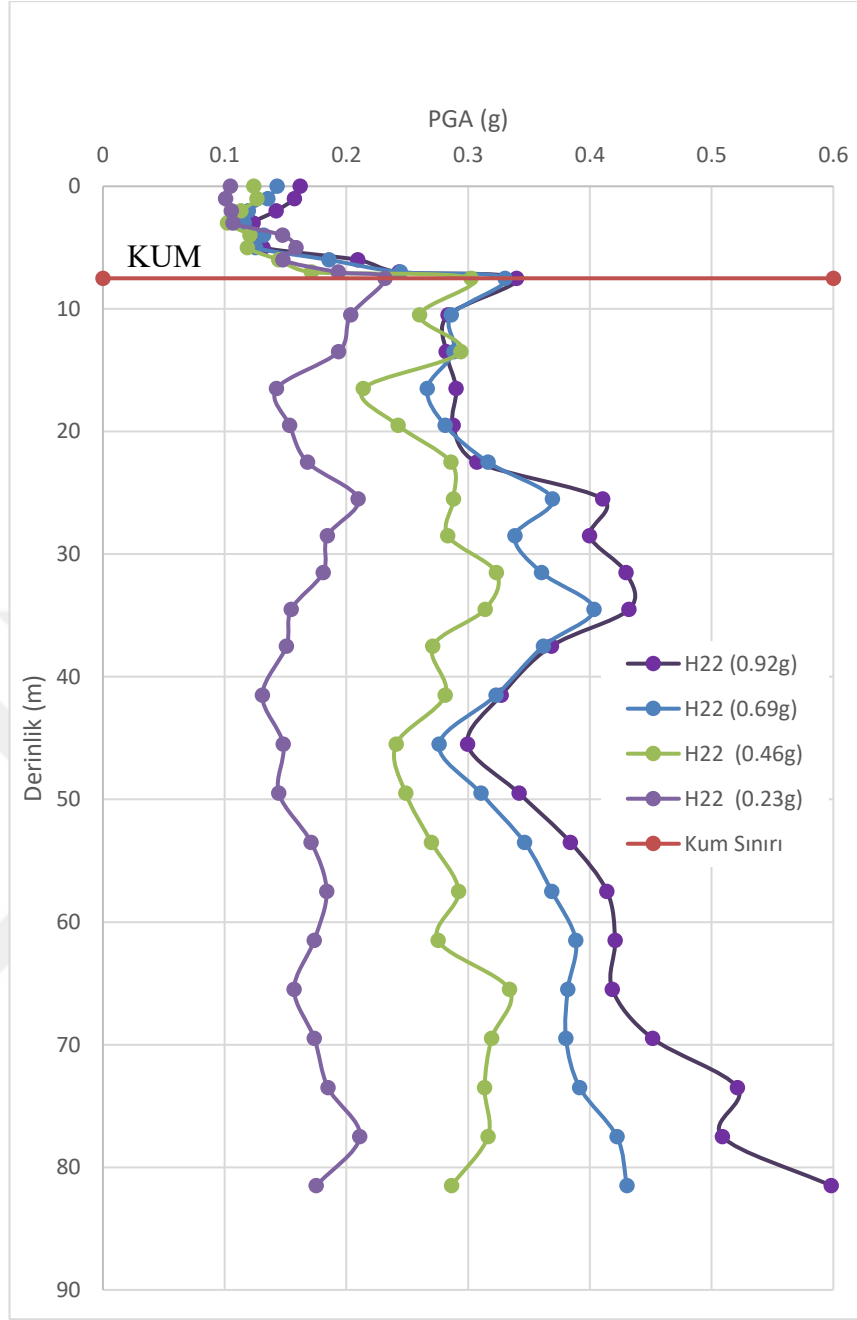
Analizlerde aynı depremin farklı ölçeklenmiş şekilde 0.23g, 0.46g, 0.69g ve 0.92g ivmeli deprem kayıtları kullanılmıştır. Her bir deprem kaydına göre analiz sonuçları birbiri ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Deprem yer hareketi büyüklüğünün sıvılaşmaya etkisini incelemek için kum tabakası kayma dalga hızı $V_s=100$ m/s olan ve yeraltı su seviyesi yüzeyde olan 2 adet profildeki analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; deprem ivme kaydı genliği yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.58). Kum tabakasının altındaki tabakalarda, deprem ivme kaydı değeri arttıkça PGA değeri artmıştır. Kum tabakasında ise PGA değerinde doğrusal bir artış veya azalma gözlenmemiştir.



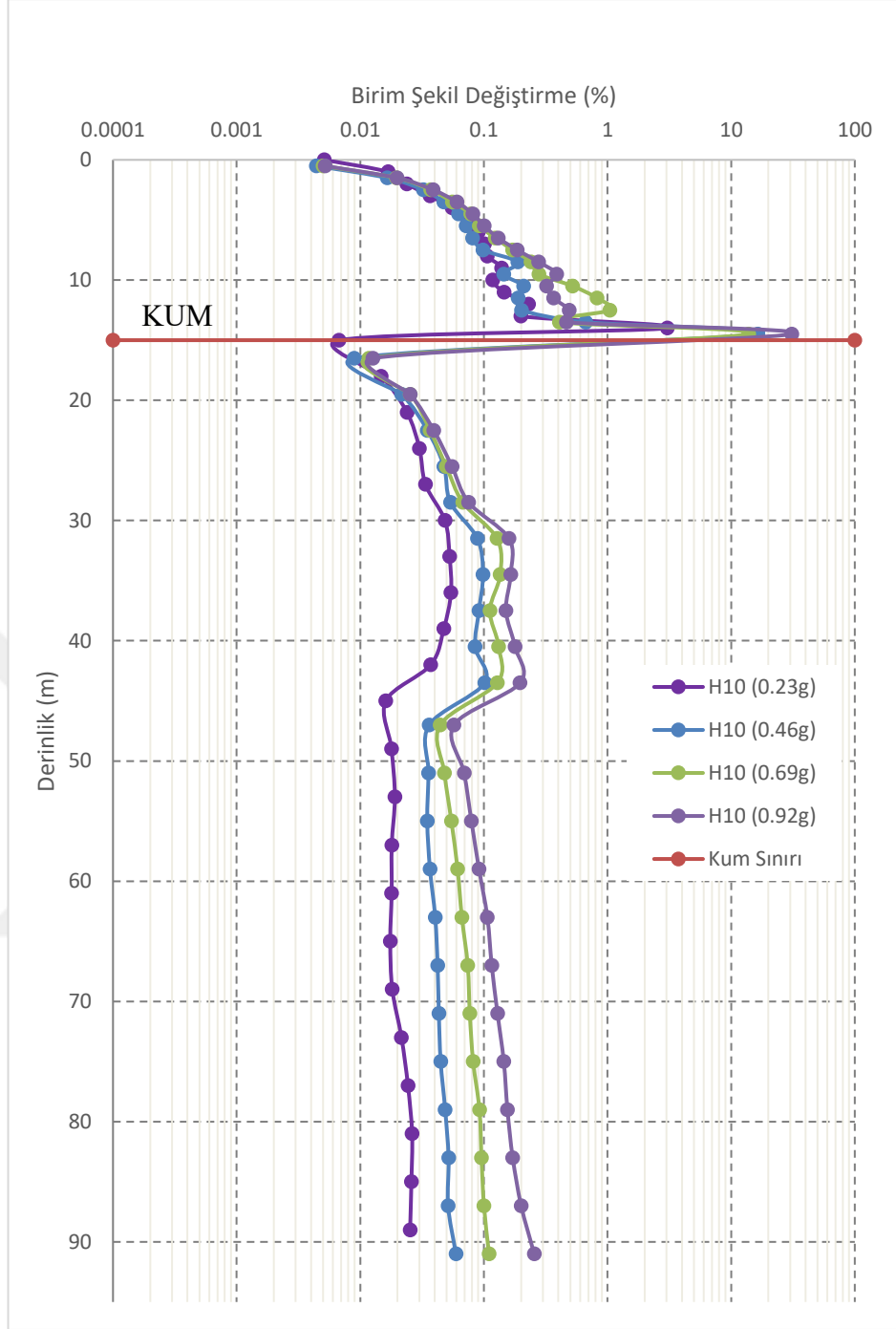
Şekil 5.58 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki PGA değeri; deprem ivme kaydı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.59). Aynı kum tabakası kalınlığında deprem ivme kaydı değeri arttıkça yüzeydeki PGA değeri artmıştır. Kum tabakasının altındaki tabakalarda, deprem ivme kaydı değeri arttıkça PGA değeri artmıştır. Kum tabak sınırına yaklaştıkça PGA değeri artmakta, yüzeye doğru azalmaktadır.

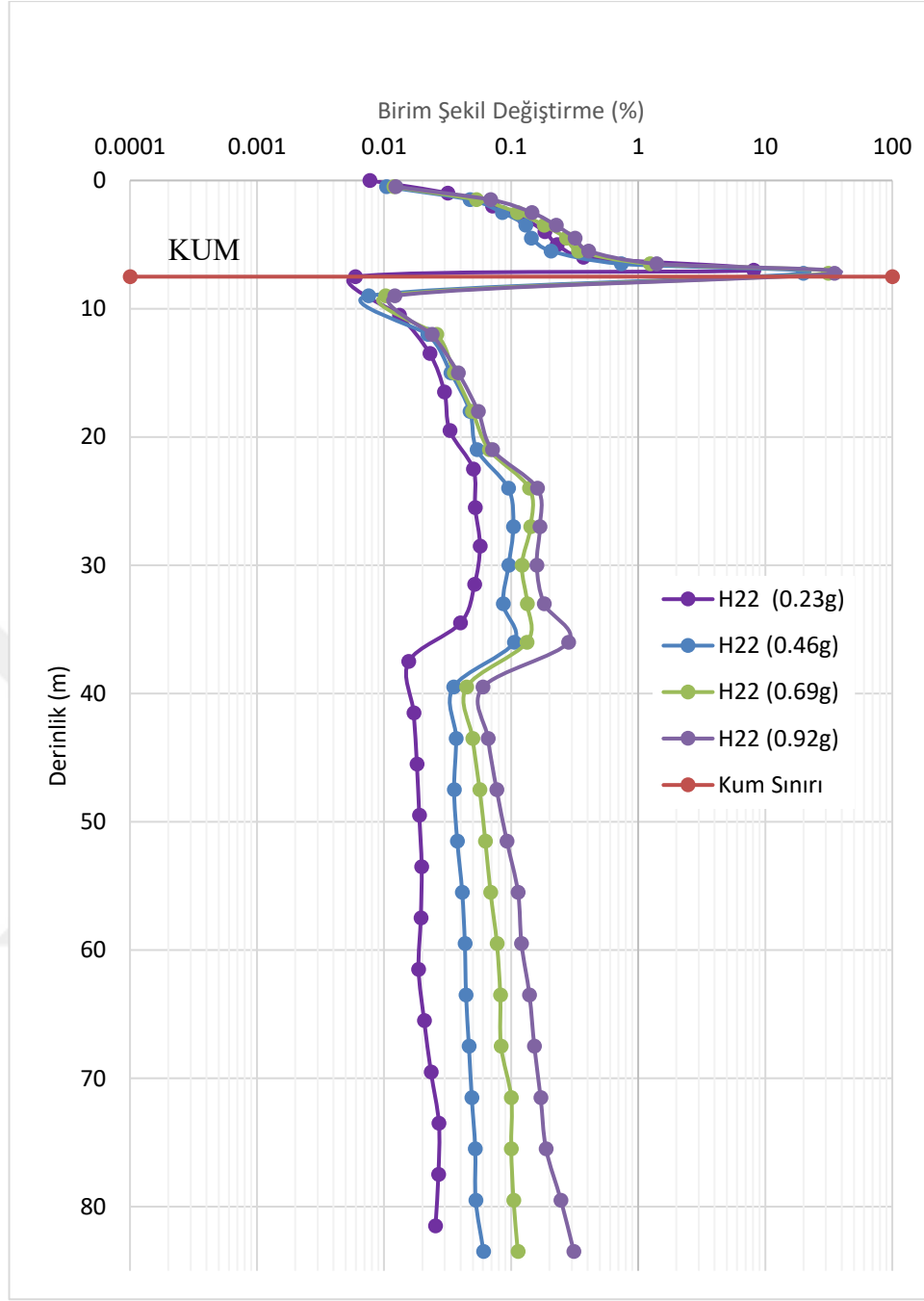


Şekil 5.59 PGA- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)

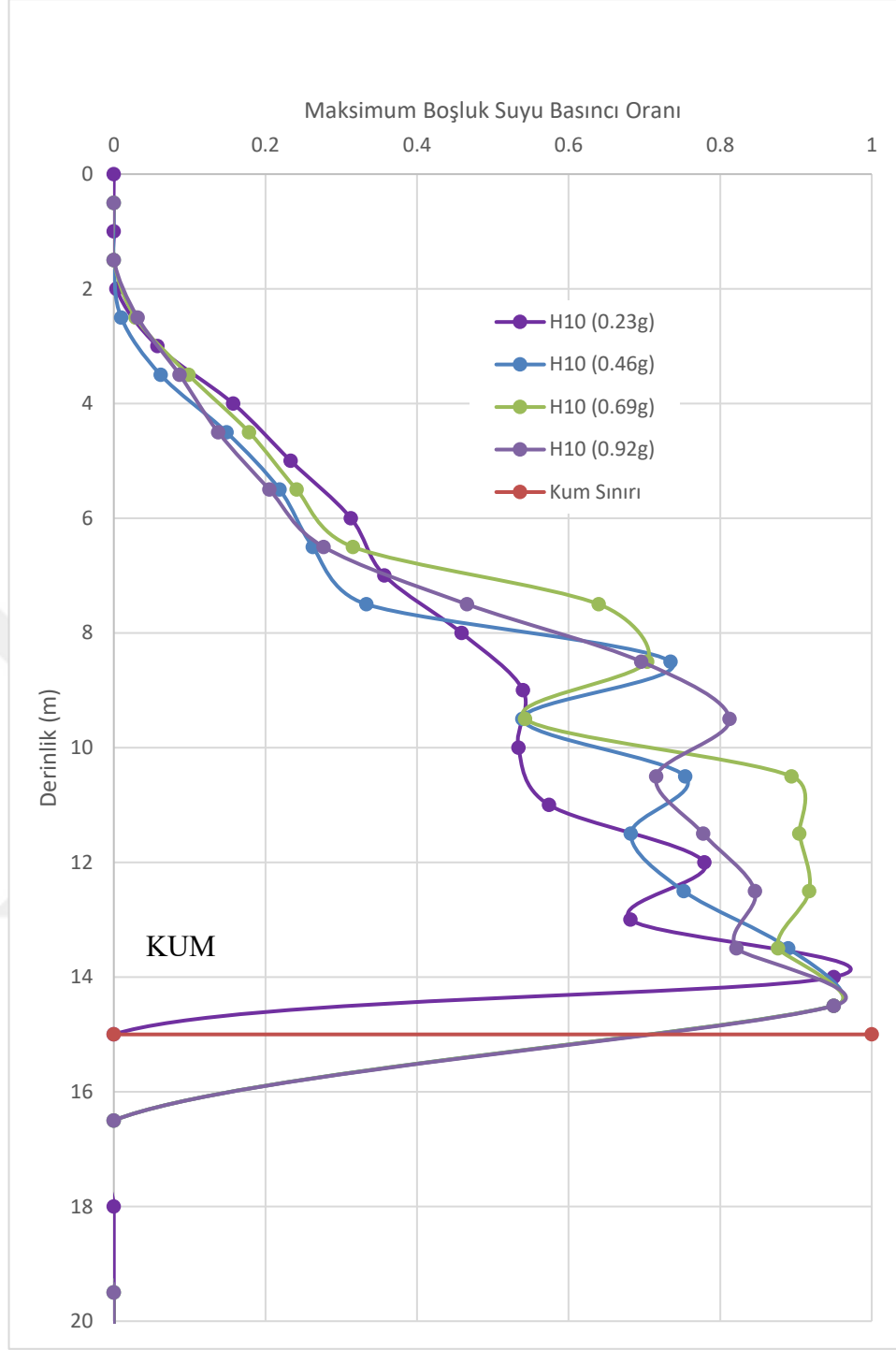
Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim deformasyon değeri; deprem ivme kaydı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.60). Aynı kum tabakası kalınlığında deprem ivme kaydı değeri arttıkça yüzeydeki birim deformasyon değerinde anlamlı bir etki görülmemiştir. Kum tabaka kalınlığı azalınca yüzey PGA değerleri artmıştır.



Şekil 5.60 Birim Deformasyon- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)
 Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki birim deformasyon değeri; deprem yer hareketi genliği yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.61). Aynı kum tabakası kalınlığında deprem ivme kaydı değeri arttıkça yüzeydeki birim deformasyon değerinde anlamlı bir etki görülmemiştir.



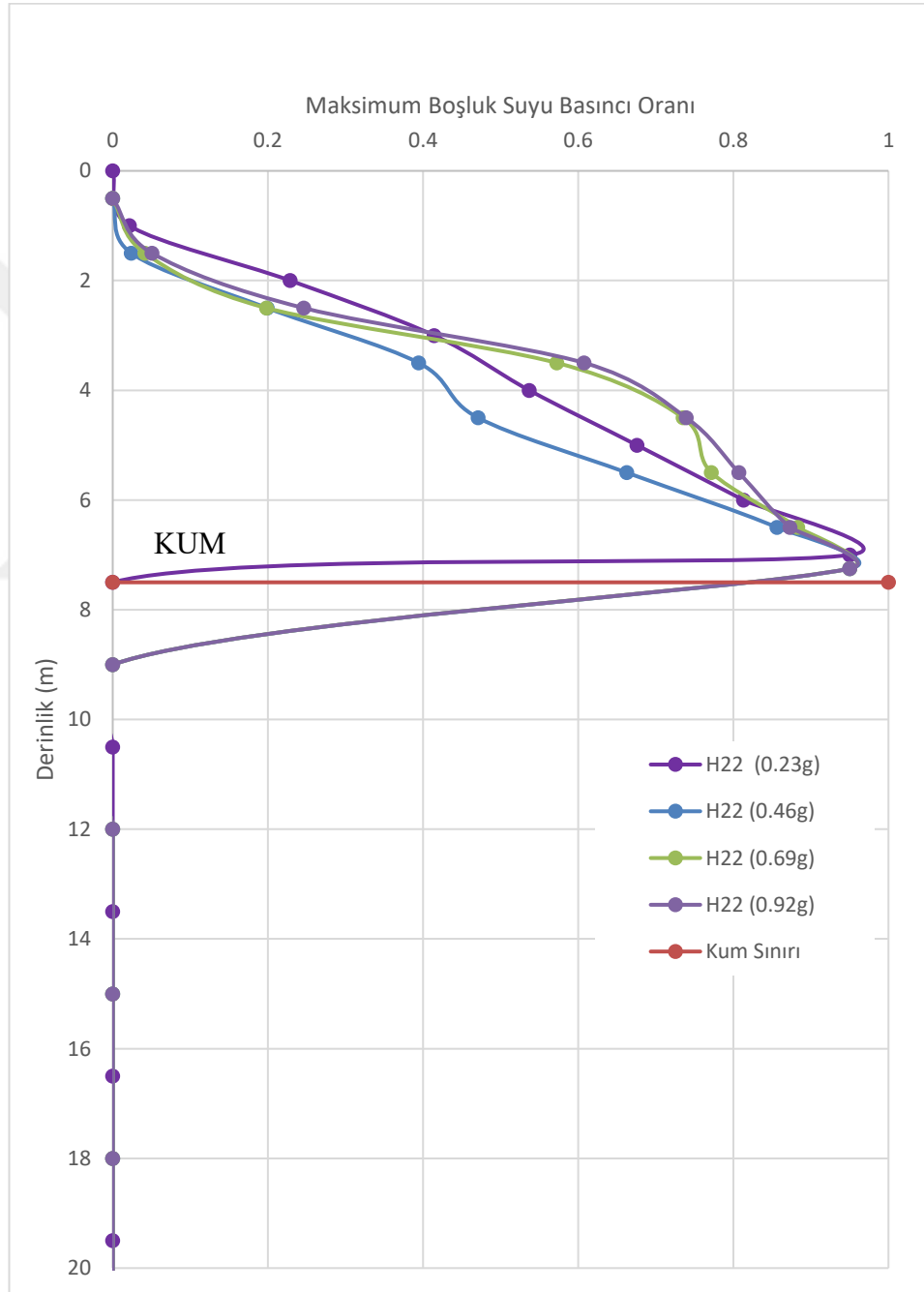
Şekil 5.61 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)
H10 profilinin 4 adet anakaya deprem kaydıyla yapılan analizlerinde, boşluk suyu basıncında ani değişimler gözlenmiştir. Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 15.0 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki maksimum boşluk suyu basıncı oranı değeri; deprem ivme kaydı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.62). Kum tabaka kalınlığı azaldığında maksimum birim şekil değişirme artmaktadır.



Şekil 5.62 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)

Aynı kum tabakası kalınlığında deprem ivme kaydı değeri arttıkça maksimum boşluk suyu basıncı oranı değerinde ve sıvılaştıran tabaka kalınlığında artış olmuştur. Tüm deprem seviyeleri için boşluk suyu basıncının 0.7 değerini aştığı ve sıvılaşma olduğu görülmüştür. 0.69g ve 0.92g deprem ivme kayıtlarında sıvılaşmanın yüzeye daha yakın derinliklerde başladığı görülmüştür.

Yeraltı su seviyesi yüzeyde ve kum tabaka kalınlığı 7.50 m olduğunda 4 adet anakaya deprem kaydı ile hesap yapıldığında yüzeydeki maksimum boşluk suyu basıncı oranı değeri; deprem ivme kaydı yüksek olan profilde daha yüksek, düşük olan profilde ise en düşük olarak elde edilmiştir (Şekil 5.63). Aynı kum tabakası kalınlığında deprem ivme kaydı değeri arttıkça maksimum boşluk suyu basıncı oranı değerinde ve sıvılaştıran tabaka kalınlığında artış olmuştur.



Şekil 5.63 Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği (YASS:0.0m)

Boşluk suyu basıncı değerleri incelendiğinde, kum tabakası kalınlığı boyunca yeraltı su seviyesi 0-4.0 m aralığında anakaya deprem kaydı büyüklüğü değişiminin sıvılaşmada etkili olduğu görölmüştür. Deprem yer hareketi genliği arttıkça boşluk suyu basıncı artmış, dolayısıyla sıvılaşan tabaka kalınlığı artmıştır.



6. ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Analizlerden elde edilen zemin profili yüzeyindeki maksimum yer ivmesi (PGA) sonuçları Tablo 6.1’de özet olarak verilmiştir. Maksimum yer ivmesi değerlerinin deprem ivmesi arttıkça doğru orantılı şekilde arttığı görülmektedir. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde veya 4.0 m derinlikte olmasının yüzeydeki maksimum yer ivmesi değerlerinde etki yaratmamıştır.

Tablo 6.1 Yüzeyde ölçülen PGA değerlerinin hesap no ile değişimi

Hesap No	YASS (m)	H _{anakaya} (m)	Kum		PGA (g)			
			H (m)	V _s (m/s)	0.23g	0.46g	0.69g	0.92g
1	0	93	15	175	0.167	0.151	0.151	0.151
3	4	93	15	175	0.144	0.142	0.158	0.151
4	0	93	15	150	0.120	0.128	0.151	0.133
6	4	93	15	150	0.121	0.129	0.130	0.133
7	0	93	15	125	0.105	0.097	0.104	0.103
9	4	93	15	125	0.105	0.098	0.105	0.103
10	0	93	15	100	0.078	0.069	0.074	0.078
12	4	93	15	100	0.078	0.069	0.075	0.077
13	0	85.5	7.5	175	0.213	0.216	0.252	0.244
15	4	85.5	7.5	175	0.205	0.215	0.253	0.244
16	0	85.5	7.5	150	0.223	0.191	0.220	0.223
18	4	85.5	7.5	150	0.213	0.191	0.220	0.224
19	0	85.5	7.5	125	0.141	0.153	0.159	0.193
21	4	85.5	7.5	125	0.143	0.153	0.158	0.195
22	0	85.5	7.5	100	0.105	0.124	0.143	0.162
24	4	85.5	7.5	100	0.108	0.125	0.143	0.162
25	0	88	10	175	0.209	0.190	0.199	0.189
27	4	88	10	175	0.209	0.190	0.199	0.189
28	0	83	5	175	0.259	0.266	0.266	0.253
30	4	83	5	175	0.238	0.261	0.262	0.253
31	0	88	10	125	0.113	0.120	0.144	0.156
33	4	88	10	125	0.116	0.122	0.144	0.156
34	0	83	5	125	0.165	0.183	0.232	0.242
36	4	83	5	125	0.160	0.184	0.234	0.243

Analizlerden elde edilen yüzeydeki birim şekil değiştirme oranı sonuçları Tablo 6.2’de özet olarak verilmiştir. Deprem yer hareketi genliğinin ve yeraltı su seviyesinin değişiminin derindeki birim şekil değiştirme değerlerinde etki yaratmadığı görülmektedir.

Tablo 6.2 Zemin profilleri boyunca ölçülen maksimum birim şekil değiştirme değerleri

Hesap No	YASS	H _{anakaya}	Kum		Maksimum Birim Şekil Değiştirme (%)			
	(m)	(m)	H (m)	V _s (m/s)	0.23g	0.46g	0.69g	0.92g
1	0	93	15	175	0.50	6.67	29.25	50.99
3	4	93	15	175	0.31	5.62	21.37	50.22
4	0	93	15	150	6.87	19.45	13.04	17.94
6	4	93	15	150	9.44	14.68	17.73	20.84
7	0	93	15	125	3.28	19.55	18.74	21.58
9	4	93	15	125	4.42	13.13	20.66	22.90
10	0	93	15	100	3.04	16.41	13.85	30.90
12	4	93	15	100	11.65	15.68	13.71	35.27
13	0	85.5	7.5	175	0.23	13.72	29.55	52.12
15	4	85.5	7.5	175	0.22	13.67	19.61	37.46
16	0	85.5	7.5	150	7.16	14.96	27.56	31.49
18	4	85.5	7.5	150	10.75	15.41	22.88	31.25
19	0	85.5	7.5	125	8.72	18.09	24.06	28.73
21	4	85.5	7.5	125	7.49	21.54	24.40	32.43
22	0	85.5	7.5	100	8.09	19.94	31.30	35.02
24	4	85.5	7.5	100	21.20	16.56	26.27	34.39
25	0	88	10	175	0.24	5.82	9.40	28.19
27	4	88	10	175	0.23	5.83	9.41	26.44
28	0	83	5	175	0.15	6.55	9.18	21.64
30	4	83	5	175	0.17	6.54	11.82	15.06
31	0	88	10	125	3.38	14.03	13.93	17.61
33	4	88	10	125	3.38	8.45	13.00	22.58
34	0	83	5	125	3.52	7.65	12.85	15.13
36	4	83	5	125	3.38	10.24	16.51	21.73

Analizlerden elde edilen boşluk suyu basıncı oranının 0.7 ve üzerinde elde edilen sıvılaştıran zemin tabakaları Tablo 6.3'te özet olarak verilmiştir. Sıvılaştıran zemin tabakalarının genellikle en üstteki kum tabakasının en alt seviyesi olduğu görülmüştür. Deprem ivme değerleri arttıkça sıvılaştıran tabaka kalınlığının arttığı gözlenmiştir. Yeraltı su seviyesinin yüzeyde veya 4.0 m derinlikte olması sıvılaştırmayı etkilememiştir.

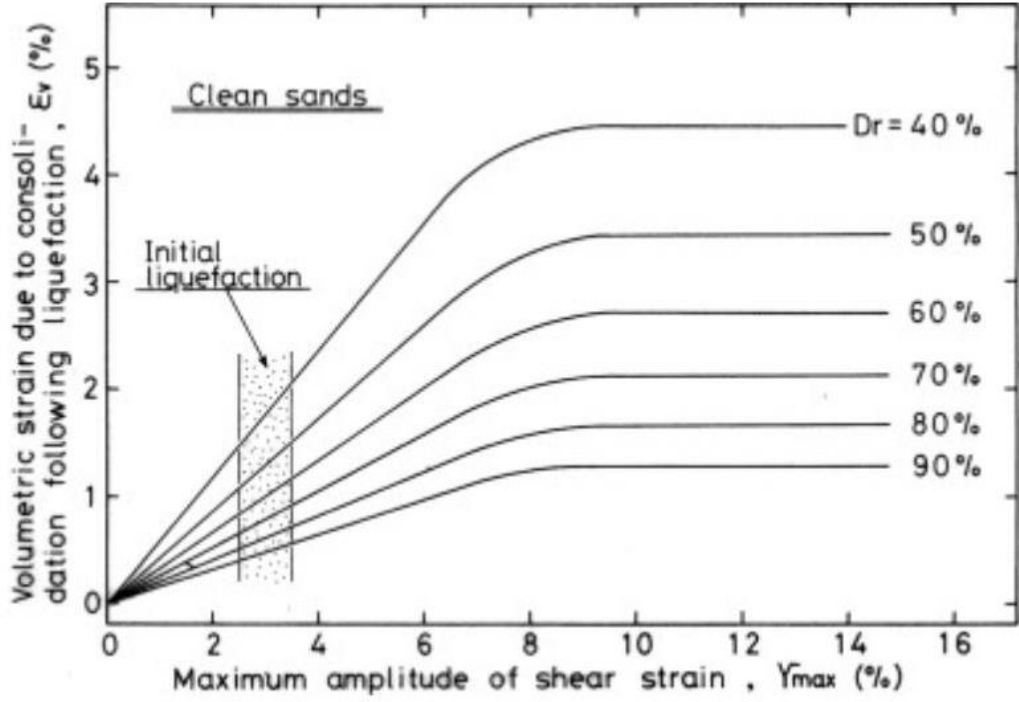
Tablo 6.3 Sıvılaştıran tabakaların hesap numaralarına göre değişimi

Hesap No	YASS (m)	H _{anakaya} (m)	Kum		Sıvılaştıran Tabaka Derinliği (m)			
			H (m)	V _s (m/s)	0.23g	0.46g	0.69g	0.92g
1	0	93	15	175	13-15	11-15	14-15	14-15
3	4	93	15	175	13-15	11-15	13-15	14-15

4	0	93	15	150	11-15	12-15	13-15	12-15
6	4	93	15	150	12-15	12-15	13-15	12-15
7	0	93	15	125	11-15	11-15	10-15	10-15
9	4	93	15	125	11-15	11-15	10-11, 13-15	10-15
10	0	93	15	100	12-13, 14-15	8-9, 10-11, 12-15	8-9, 10-15	8-15
12	4	93	15	100	11-15	10-15	10-15	8-15
13	0	85.5	7.5	175	6-7.5	6-7.5	6-7.5	7-7.5
15	4	85.5	7.5	175	6-7.5	6-7.5	6-7.5	6-7.5
16	0	85.5	7.5	150	4-7.5	6-7.5	6-7.5	7-7.5
18	4	85.5	7.5	150	5-7.5	6-7.5	6-7.5	6-7.5
19	0	85.5	7.5	125	7-7.5	6-7.5	6-7.5	5-7.5
21	4	85.5	7.5	125	6-7.5	7-7.5	6-7.5	5-7.5
22	0	85.5	7.5	100	6-7.5	6-7.5	4-7.5	4-7.5
24	4	85.5	7.5	100	5-7.5	5-6, 7-7.5	4-7.5	4-7.5
25	0	88	10	175	8-10	8-10	9-10	9-10
27	4	88	10	175	8-10	9-10	9-10	8-10
28	0	83	5	175	YOK	4-5	4-5	4-5
30	4	83	5	175	4-5	4-5	4-5	4-5
31	0	88	10	125	7-10	8-10	7-10	6-10
33	4	88	10	125	8-10	9-10	5-6, 7-10	6-10
34	0	83	5	125	3-5	4-5	3-5	4-5
36	4	83	5	125	4-5	4-5	4-5	4-5

6.1. 1-Boyutlu Ampirik Oturma Hesabı

Bu bölümde, deprem etkisi altında sıvılaşmaya uğrayan zeminlerde oluşan oturma miktarları, 1-boyutlu ampirik bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, dinamik analiz programından elde edilen birim şekil değiştirme (strain) değerleri kullanılmış ve bu değerler literatürde yaygın kabul gören ampirik bağıntılarla hacimsel şekil değiştirmeye (volumetric strain) dönüştürülmüştür. Bu amaçla, özellikle Nagase ve Ishihara (1988) tarafından gevşek ve temiz kumlar için önerilen tablosu esas alınmıştır.



Şekil 6.1 Maksimum Kayma Birim Şekil Değişirme- Hacimsel Şekil Değişirme Grafiği (Ishihara ve Yoshimine, 1992)

Ampirik hesaplarda, her bir zemin tabakasında elde edilen maksimum shear strain değerlerine karşılık gelen hacimsel şekil değişirme oranları belirlenmiş ve bu oranlar ilgili tabaka kalınlıkları ile çarpılarak toplam oturma hesaplanmıştır. Söz konusu yaklaşım, 1-boyutlu bir modelleme olup, yalnızca düşey oturma miktarını temsil etmektedir ve yanal deformasyonları kapsamaz.

Elde edilen sonuçlara göre, shear strain değerinin düşük olduğu (ör. %0.5'ten küçük) tabakalarda hacimsel şekil değişirme ve dolayısıyla oturma ihmal edilebilir düzeyde bulunmuştur (Şekil 6.1). Ancak daha yüksek birim şekil değişirme değerlerine sahip tabakalarda, özellikle sıvılaşmaya yakın seviyelerde, oturma miktarlarının mühendislik açısından dikkate alınacak düzeye ulaştığı görülmüştür.

Hacimsel şekil değişirme oranı ilgili zemin tabakası kalınlığıyla birim şekil değişirme değerinin çarpılarak oturma miktarı elde edilmiştir.

$$S = \varepsilon_v \cdot H \quad 6.1$$

Bu yöntemle yapılan hesaplamalar, farklı derinliklerdeki zemin davranışını karşılaştırma ve tabaka bazında oturma dağılımını değerlendirme imkanı sağlamıştır.

Ayrıca, ampirik yöntemlerin özellikle dinamik analiz sonuçları ile birlikte kullanıldığında, sivilaşmaya bağlı oturma tahminlerinde hızlı ve pratik bir çözüm sunduğu ortaya konmuştur. Oturma miktarı özet tablosu Tablo 6.4'te sunulmuştur.

Tablo 6.4 Ampirik yaklaşıma göre elde edilen oturma miktarları

Hesap No	YASS (m)	H _{anakaya} (m)	Kum		Oturma Miktarı (cm)			
			H (m)	V _s (m/s)	0.23g	0.46g	0.69g	0.92g
1	0	93	15	175	0.85	5.75	5.1	5.2
3	4	93	15	175	0.7	5.75	5.25	5.2
4	0	93	15	150	4.9	5.25	6.6	5.75
6	4	93	15	150	4.75	5.1	5.35	5.35
7	0	93	15	125	2.35	5.4	6.75	6.8
9	4	93	15	125	3.15	5.25	5.35	6.8
10	0	93	15	100	2.2	5.35	6	5.7
12	4	93	15	100	5.6	5.2	6	5.55
13	0	85.5	7.5	175	0.4	4.8	4.95	4.7
15	4	85.5	7.5	175	0.3	4.8	4.95	4.85
16	0	85.5	7.5	150	4.4	4.8	4.8	4.8
18	4	85.5	7.5	150	4.9	4.8	4.8	4.8
19	0	85.5	7.5	125	4.8	4.8	4.9	4.7
21	4	85.5	7.5	125	4.5	4.8	4.9	4.9
22	0	85.5	7.5	100	4.6	5.05	5.4	5
24	4	85.5	7.5	100	4.9	4.9	5.15	5.55
25	0	88	10	175	0.6	4.9	4.8	4.9
27	4	88	10	175	0.6	4.9	4.8	4.9
28	0	83	5	175	0.2	4.6	4.6	4.6
30	4	83	5	175	0.1	4.6	4.5	4.5
31	0	88	10	125	2.4	4.9	5.15	5.25
33	4	88	10	125	2.4	4.9	5	5.25
34	0	83	5	125	2	4.6	4.7	4.7
36	4	83	5	125	2	4.5	4.7	4.7

H1 profili için 0.92 g anakaya deprem kaydıyla yapılan analiz için hesaplanan oturma miktarı 5.2 cm olarak elde edilmiştir (Tablo 6.5).

Tablo 6.5 H1 Profili için oturma hesabı

Tabaka No	Derinlik (m)	Kalınlık (m)	Birim Şekil Değişirme (%)	Hacimsel Şekil Değişirme (%)	Oturma (cm)
1	0.5	1	0.00	0	0
2	1.5	1	0.01	0	0
3	2.5	1	0.02	0	0
4	3.5	1	0.04	0	0
5	4.5	1	0.05	0	0

6	5.5	1	0.07	0	0
7	6.5	1	0.08	0	0
8	7.5	1	0.10	0.1	0.1
9	8.5	1	0.12	0.1	0.1
10	9.5	1	0.15	0.1	0.1
11	10.5	1	0.15	0.1	0.1
12	11.5	1	0.28	0.1	0.1
13	12.5	1	0.19	0.1	0.1
14	13.5	1	0.30	0.1	0.1
15	14.5	1	50.99	4.5	4.5
Toplam Oturma Miktarı (cm):					5.2



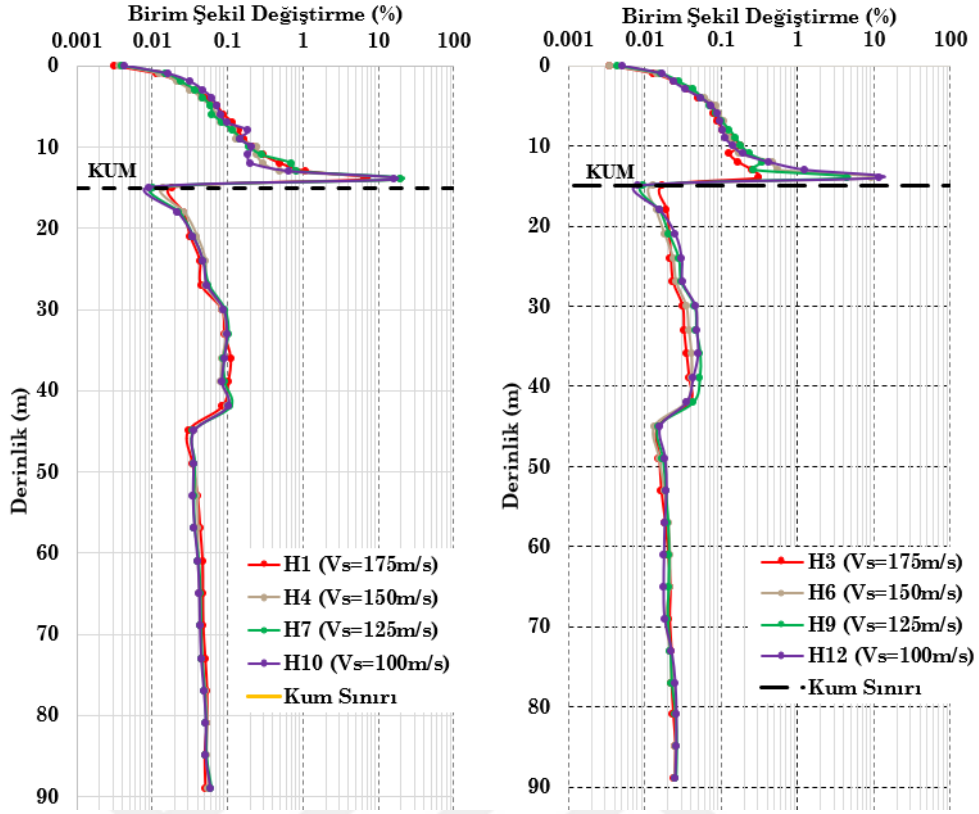
7. BULGULAR

Bu bölümde, farklı anakaya yatay ivme (PGA) değerleri ve zemin tabaka kalınlıklarına bağlı olarak, kum tabakası kayma dalga hızı $V_s = 100, 125, 150$ ve 175 m/s için sınıvlaşma sonrası meydana gelen oturma miktarlarına ilişkin ampirik korelasyonlar geliştirilmiştir. Bu korelasyonlar, parametrik analizler yoluyla elde edilmiş olup, zemin profilinin sismik yanıtına ve kesme dalga hızına duyarlıdır. Bulgular, düşük V_s değerlerine sahip zeminlerde PGA artışına bağlı olarak oturma miktarının belirgin şekilde yükseldiğini; daha yüksek V_s değerlerinde ise oturma artışının görece olarak sınırlı kaldığını göstermektedir. Ayrıca, zemin tabaka kalınlığı arttıkça sınıvlaşmaya bağlı oturma miktarının da doğrusal olmayan biçimde arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, mühendislik tasarımlarında sınıvlaşma, yerel zemin özelliklerinin ve deprem yer ivmesi büyüklüğünün birlikte değerlendirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

7.1. Kayma Dalga Hızı Etkisi

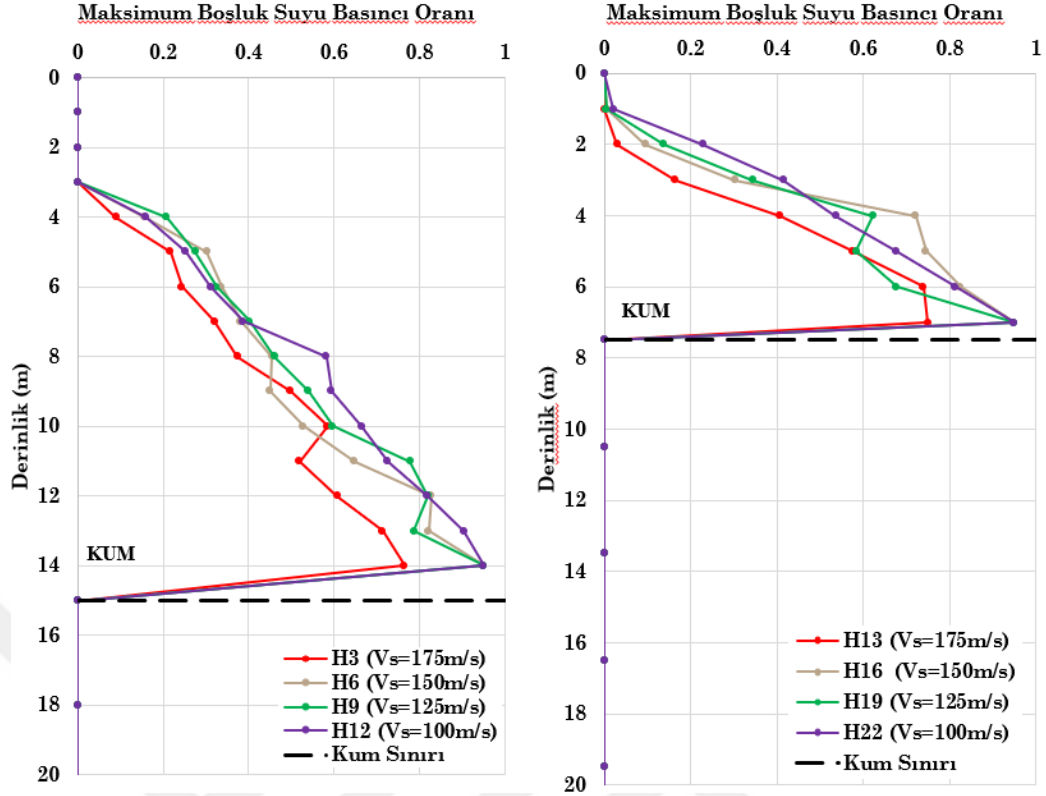
Kayma dalga hızının sınıvlaşma davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla yapılan bir boyutlu doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırmalı sonuç tabloları ve korelasyonları bu bölümde verilmiştir.

Birim şekil değiştirme değerleri kum tabakası alt sınırında maksimum seviyelere ulaşmıştır. Maksimum birim şekil değiştirme değeri ise en düşük kayma dalga hızına sahip olan kum tabakasının bulunduğu profilde görülmüştür (Şekil 7.1).



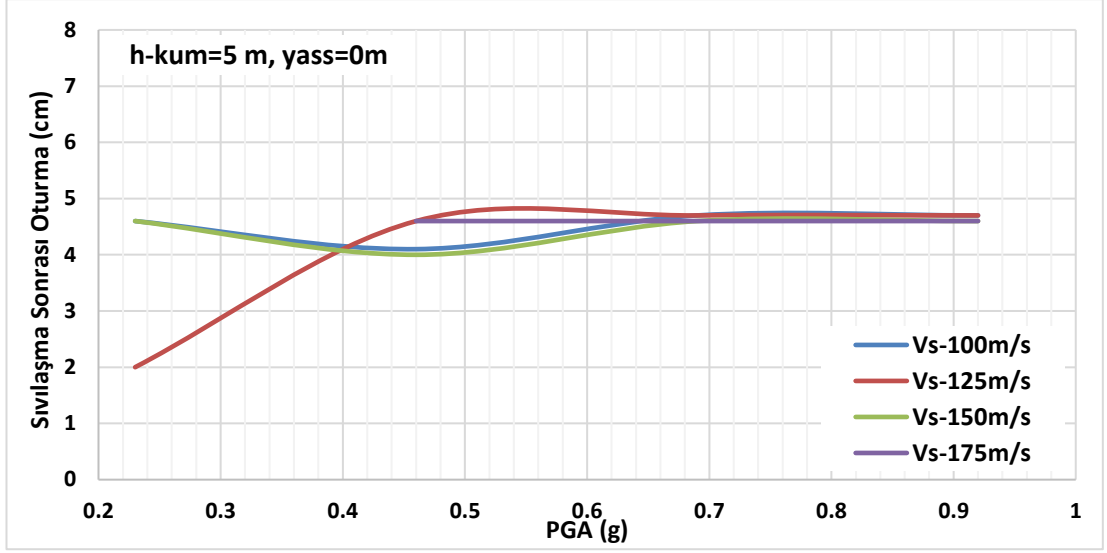
Şekil 7.1 Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafiği Karşılaştırması

Kum tabaka sınırına yaklaşınca 10.0 m derinlikten sonra boşluk suyu basıncı oranı 0.7'yi aşmıştır. Kum tabakasının kayma dalgı hızının azalması sıvılaşılan tabaka kalınlığını arttırmaktadır (Şekil 7.2).

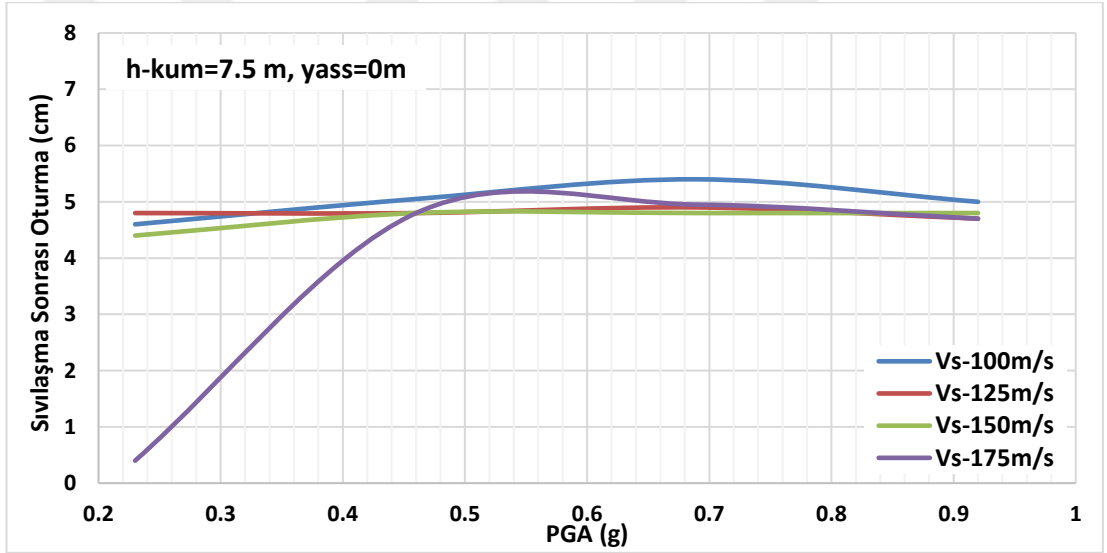


Şekil 7.2 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı- Derinlik Grafiği Karşılaştırması

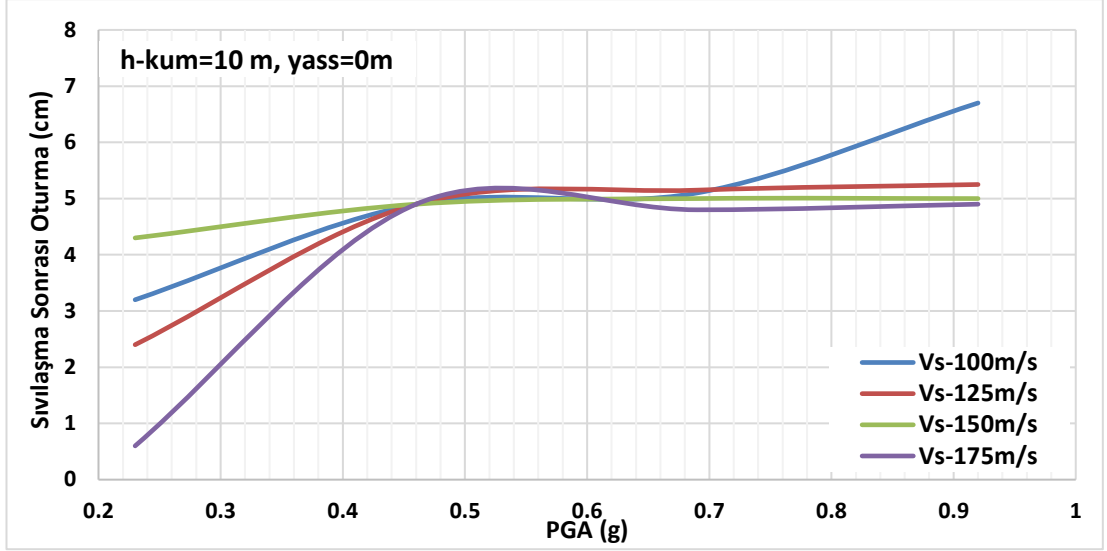
Ishiara ve Yoshimine (1992)'nin önerdiği maksimum kayma birim şekil değiştirme-hacimsel şekil değiştirme ilişkisinden yararlanılarak, anakaya ivme kaydı PGA seviyesinin değişmesine bağlı olarak artan rijitlikteki (V_s) kum tabalarının sıvılaşma sonrası oturma miktarları hesaplanmış ve farklı kum tabaka kalınlıkları için Şekil 7.3, Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'daki korelasyonlar ile ifade edilmiştir. Buna göre $h=5$ m kalınlığındaki kum tabakası için oturma miktarları $PGA=0.65$ g seviyesinden daha düşük PGA seviyeleri için farklı V_s değerlerinde belirli bir trende uymamakta, fakat $PGA=0.65$ g seviyesinden daha büyük ivme seviyeleri için tüm V_s değerlerinde eşit ve sabit değerler vermektedir. Kum tabaka kalınlığının $h=5$ m'den $h=15$ m'ye doğru artmasıyla beraber, oturma miktarlarında artan PGA seviyesiyle beraber bir artış olduğu görülmektedir. Bununla beraber daha kalın kum tabakalarında oturma miktarlarının düşük V_s 'e sahip kum tabakaları için daha yüksek olduğu görülmüştür.



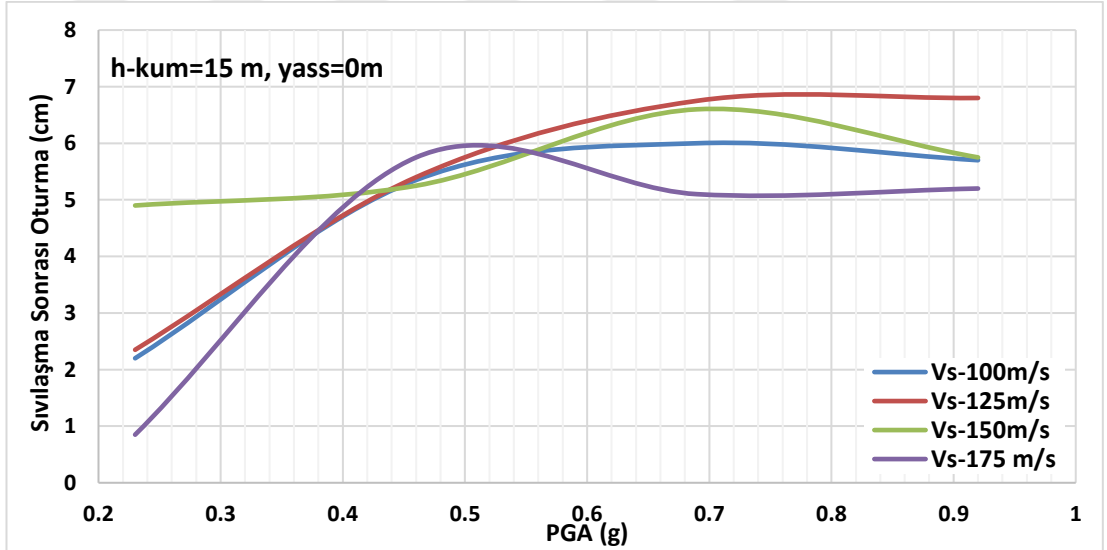
Şekil 7.3 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=5m$)



Şekil 7.4 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=7.5m$)



Şekil 7.5 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=10m$)

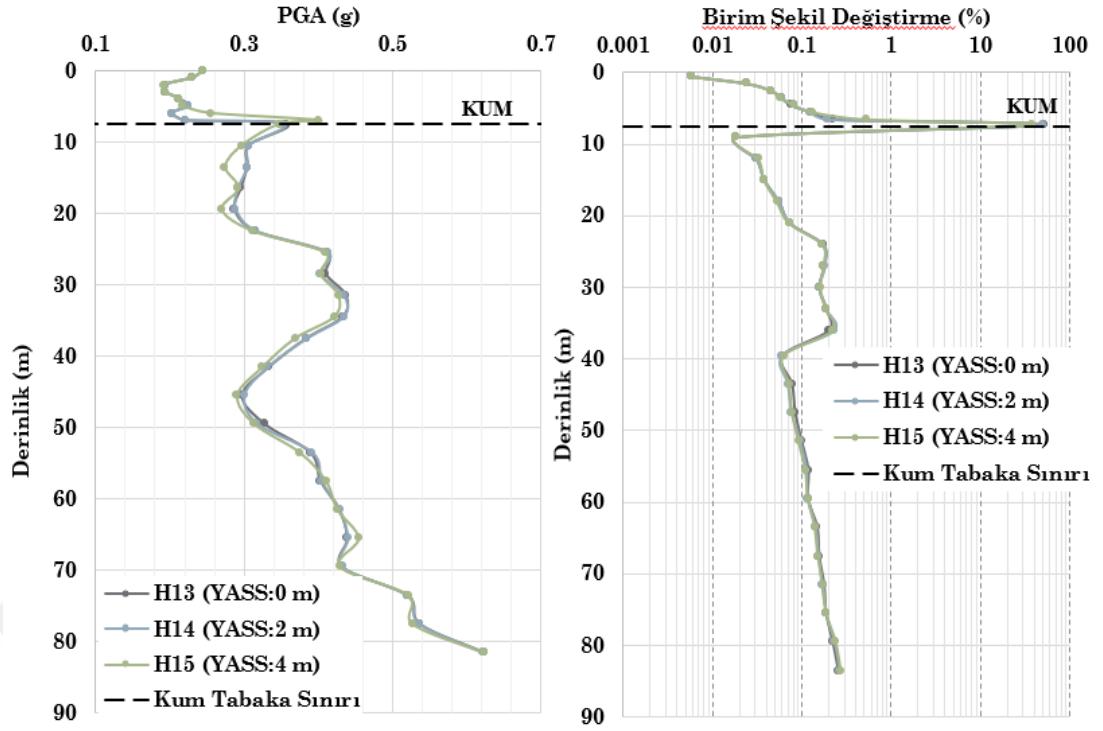


Şekil 7.6 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($H_{kum}=15m$)

7.2. Yeraltı Su Seviyesinin Etkisi

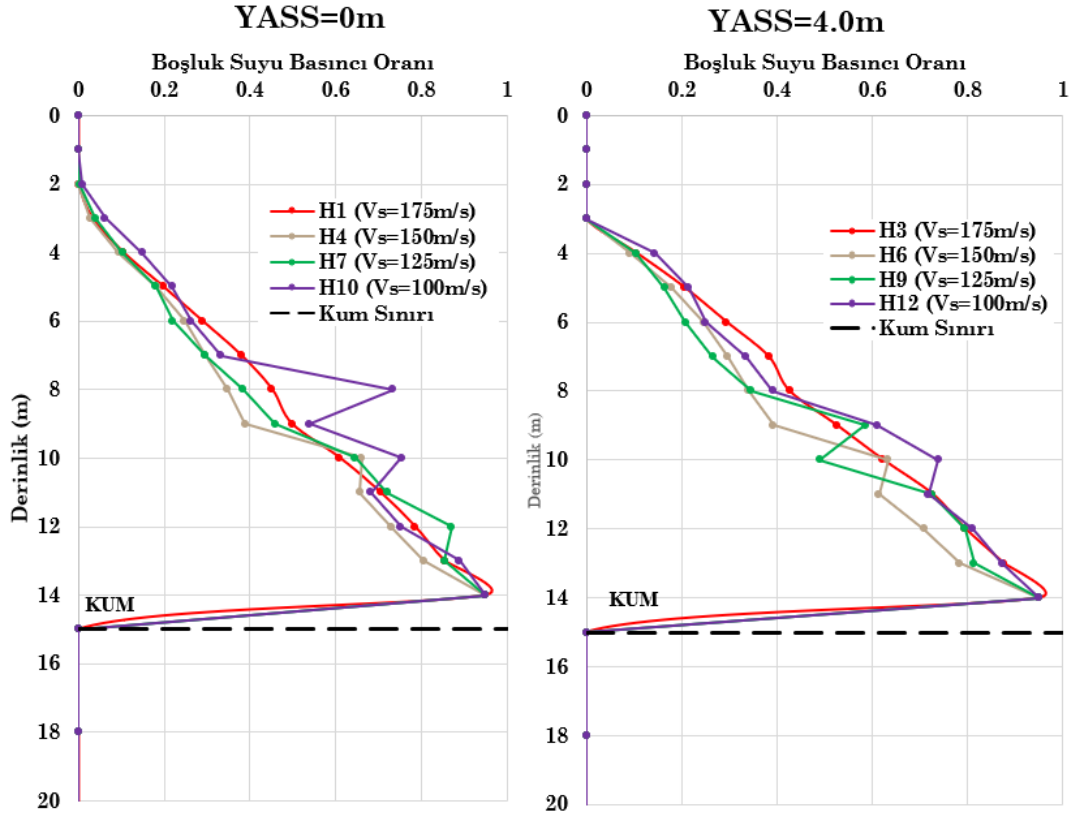
Yeraltı su seviyesinin sıvılaşma davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla yapılan bir boyutlu doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırmalı sonuç tabloları ve korelasyonları bu bölümde verilmiştir.

Yeraltı su seviyesinin 0 m, 2 m ve 4 m derinliklerde yer almasına bağlı olarak kum tabakası ve zemin profili boyunca gözlemlenen PGA ve birim şekil değiştirme değerlerinde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir (Şekil 7.7).

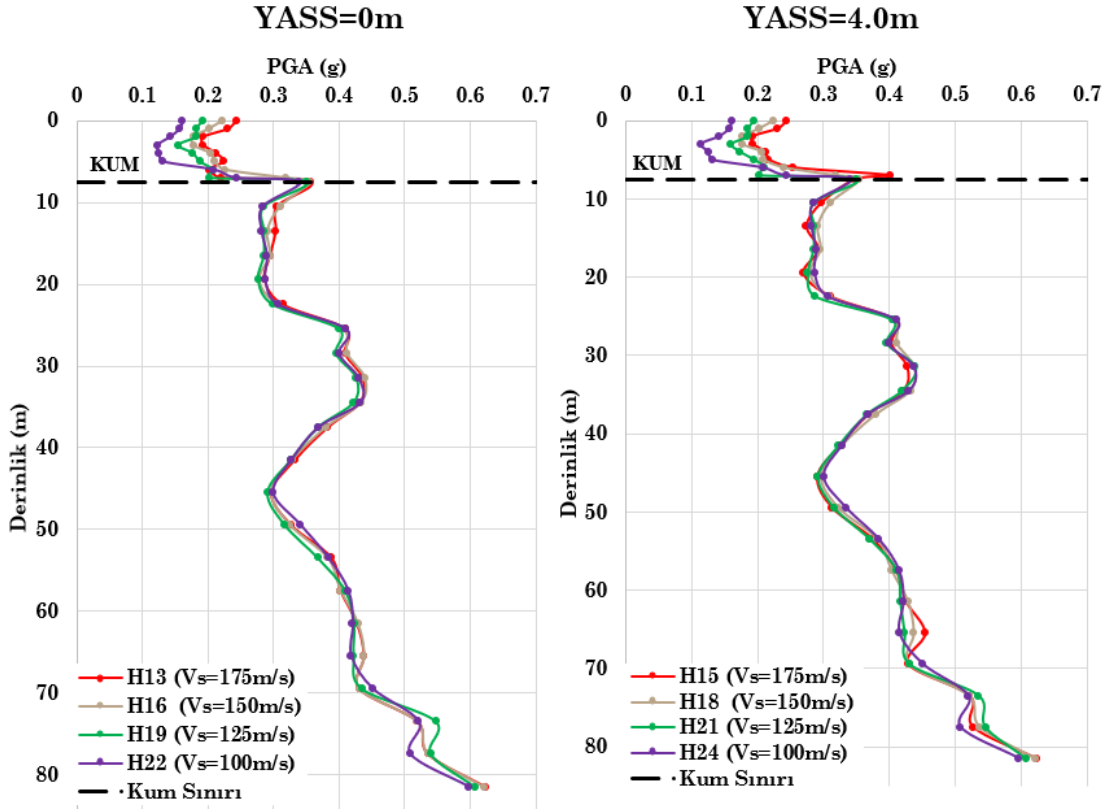


Şekil 7.7 PGA-Derinlik ve Birim Şekil Değişirme- Derinlik Grafikleri Karşılaştırma Yeraltı su seviyesi yüzeydeyken (YASS= 0 m) boşluk suyu basıncı oranı yüzeye daha yakın seviyelerde büyük değerlere ($r_u > 0.7$) ulaşmakta ve sıvılaşma yüzeye daha yakın seviyelerde başlamaktadır (Şekil 7.8). Buna bağlı olarak sıvılaşan tabaka kalınlığının diğer yeraltı su seviyesindeki profillere göre (YASS= 2 m ve 4 m) daha kalın olduğu anlaşılmaktadır.

Yeraltı su seviyesi yüzeydeyken (YASS= 0 m), YASS= 4 m derinde olması durumuna göre zemin profili boyunca gözlemlenen PGA seviyeleri değişmemiş yalnızca $V_s=175$ m/s olan profilde kum sınırındaki PGA değeri düşmüştür (Şekil 7.9).



Şekil 7.8 Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği Karşılaştırması

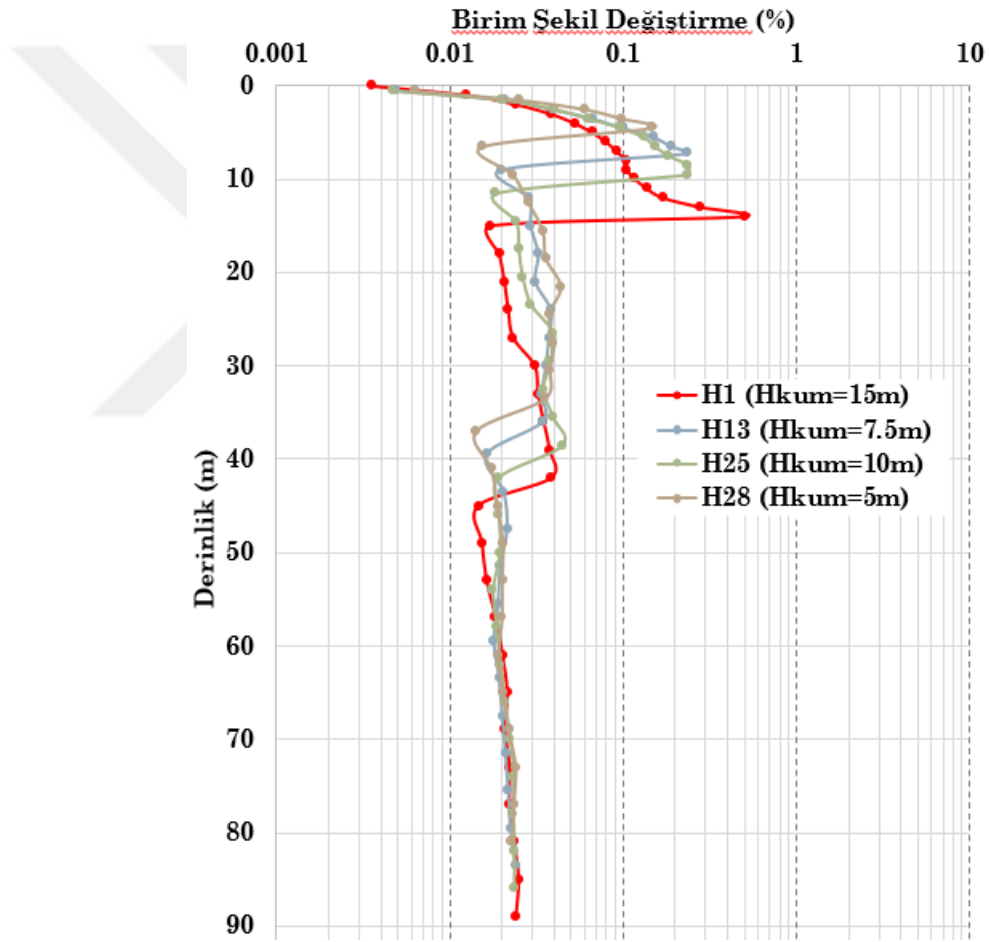


Şekil 7.9 PGA- Derinlik Grafiği Karşılaştırması

7.3. Kum Tabaka Kalınlığı Etkisi

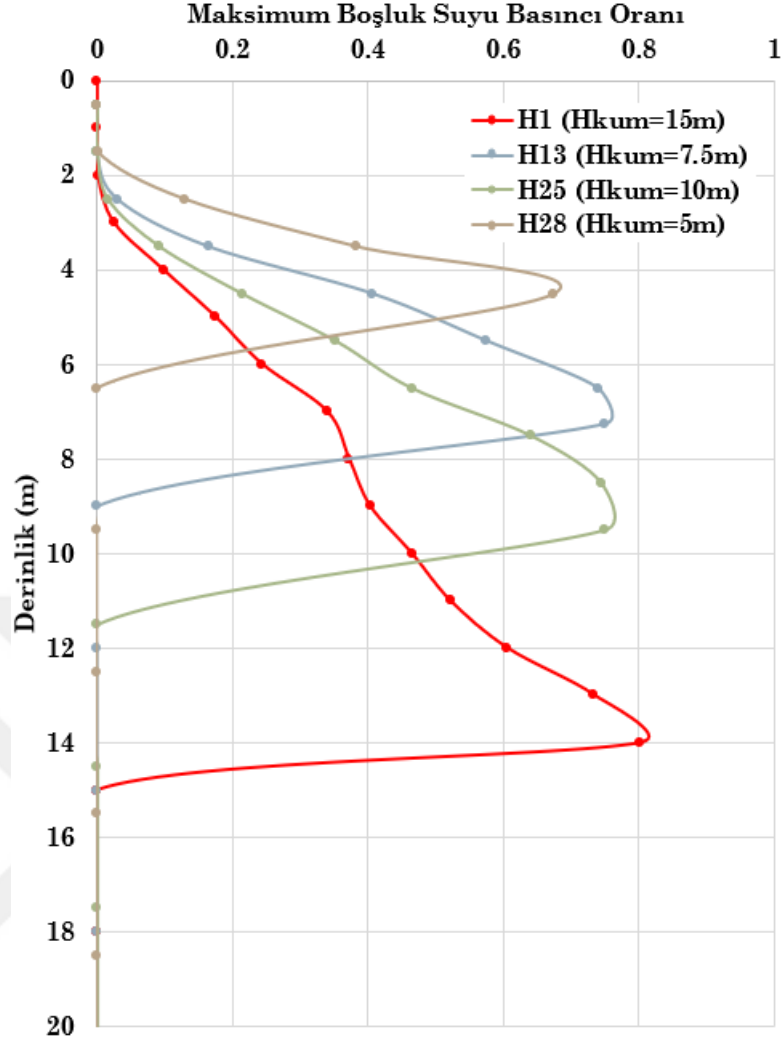
Kum tabaka kalınlığının sıvılaşma davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla yapılan bir boyutlu doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırmalı sonuç tabloları ve korelasyonları bu bölümde verilmiştir.

Kum tabaka kalınlığı $h=5$ m'den $h=15$ m'ye doğru yükseldikçe maksimum birim şekil değiştirme değerleri de yükselmekte ve en yüksek birim şekil değiştirme değerleri sıvılaşmanın gözlemlendiği kum tabakasında tabaka sınırına yakın olarak görülmüştür (Şekil 7.10).



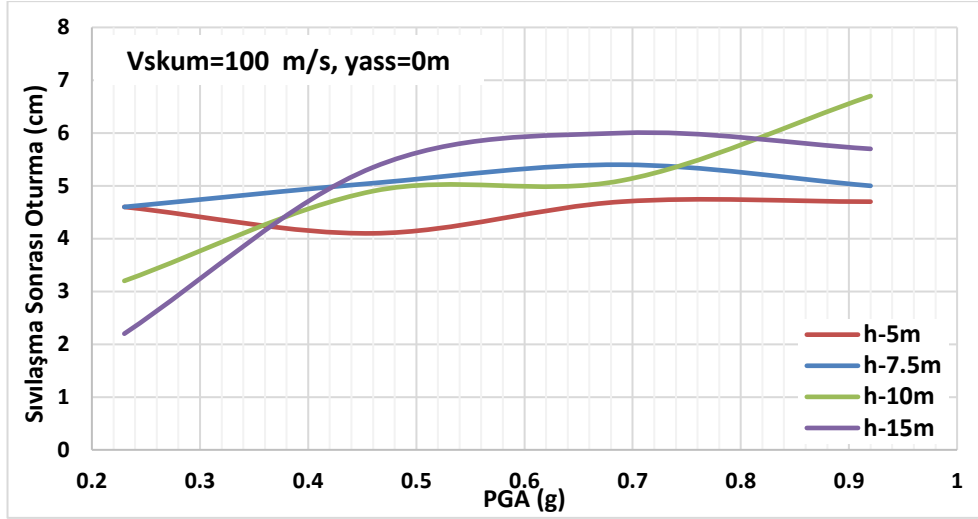
Şekil 7.10 Birim Şekil Değiştirme-Derinlik Grafiği

Kum tabaka kalınlığı arttıkça maksimum boşluk suyu basıncı oranı artmış ve sıvılaşma daha derinde, kum tabakası sınırına yakın gerçekleşmiştir (Şekil 7.11).

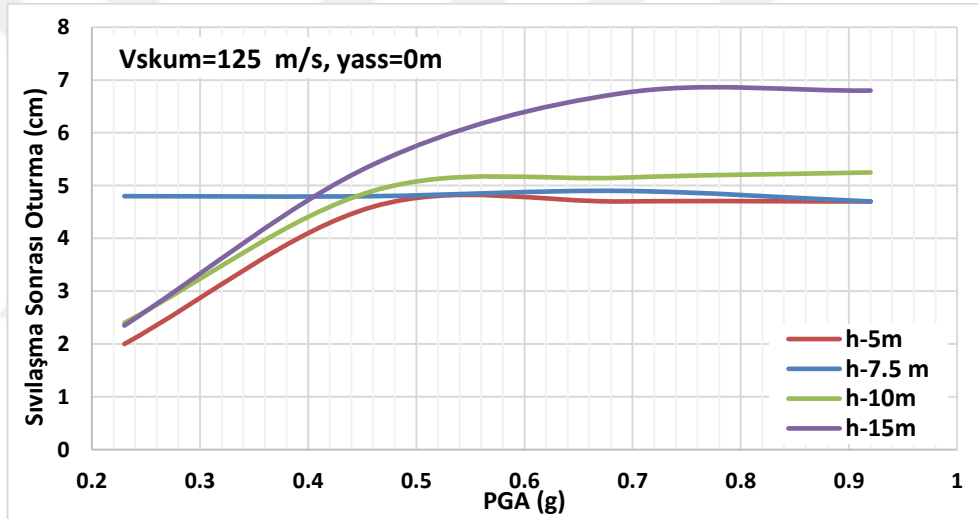


Şekil 7.11 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı- Derinlik Grafiği

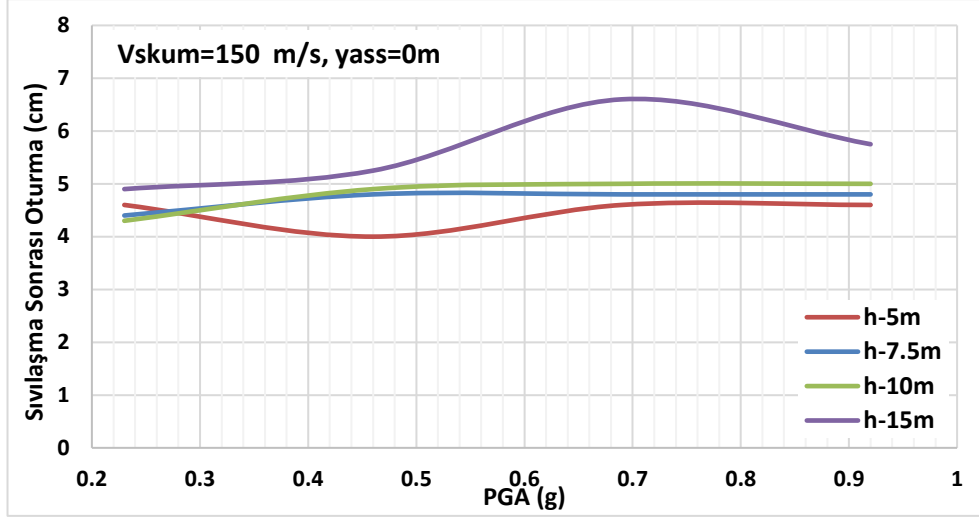
Şekil 7.12, Şekil 7.13 ve Şekil 7.14 ve Şekil 7.15'teki korelasyonlar ile tabaka kalınlığı değişiminin artan PGA seviyesine bağlı olarak sıvılaşma sonrası oturma değerlerini nasıl etkilediği sunulmuştur. Bu korelasyonlarda $V_s=100, 125, 150$ ve 175 m/s'lik kum tabakasına sahip zemin profilleri için artan anakaya PGA seviyesi ile değişen tabaka kalınlıklarında oturma değerlerinin değişimi görülmektedir. Buna göre kum tabakası için oturma miktarları artan PGA seviyesi ile artmış, en yüksek oturma miktarları $h=15$ m kalınlığındaki kum tabakalı profilde gözlenmiştir.



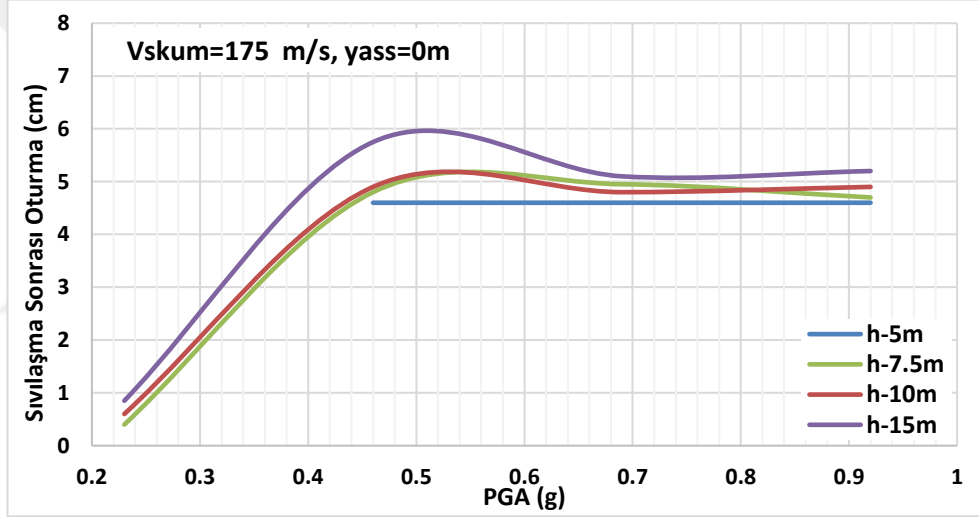
Şekil 7.12 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=100\text{m/s}$)



Şekil 7.13 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=125\text{m/s}$)



Şekil 7.14 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=150\text{m/s}$)



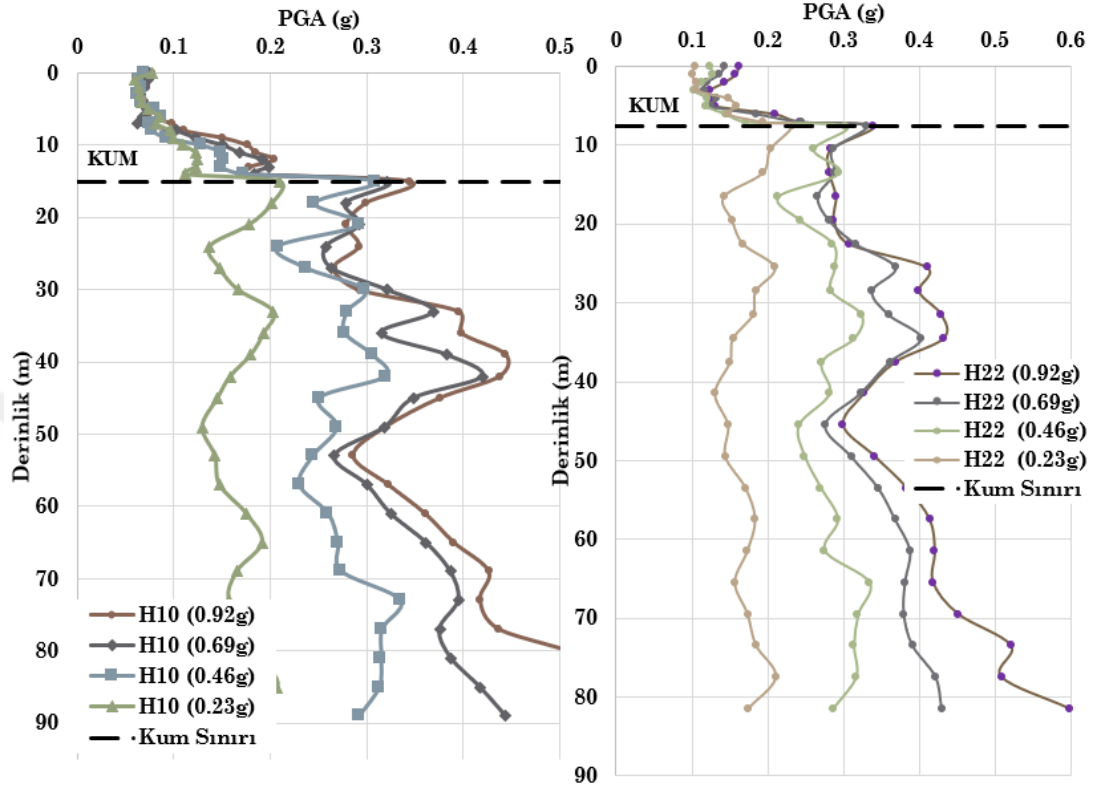
Şekil 7.15 Artan anakaya PGA seviyesine bağlı sıvılaşma sonrası oturma ($V_s=175\text{m/s}$)

7.4. Deprem Yer Hareketi Büyüklüğünün Etkisi

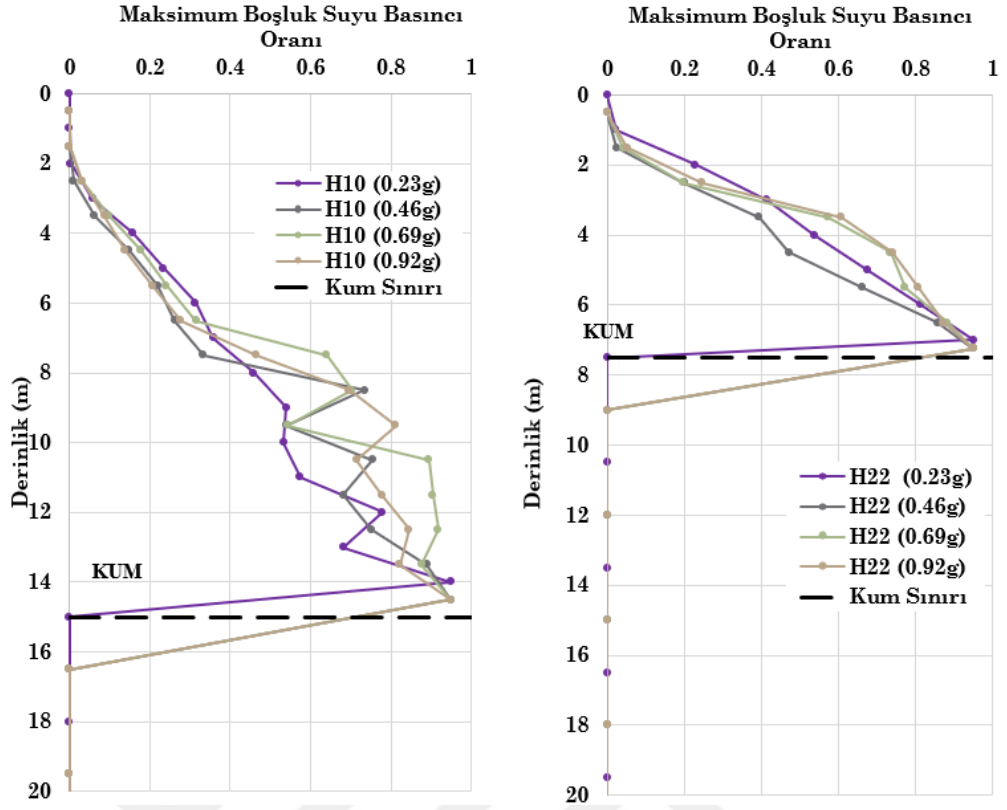
Deprem yer hareketi büyüklüğünün sıvılaşma davranışına etkisini gözlemlemek amacıyla yapılan bir boyutlu doğrusal olmayan analizlerin karşılaştırmalı sonuç tabloları ve korelasyonları bu bölümde verilmiştir.

Farklı tabaka kalınlığına sahip kum içeren profillerde ($h=7.5\text{ m}$ ve 15 m), anakaya deprem ivme değerleri (PGA) arttıkça, profil boyunca gözlemlenen PGA değerlerinin değişmediği fakat yüzeyde gözlemlenen PGA değerlerinin $h=7.5\text{ m}$ 'lik kum tabaka içeren profilde daha yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 7.16). Bunun yanında anakaya

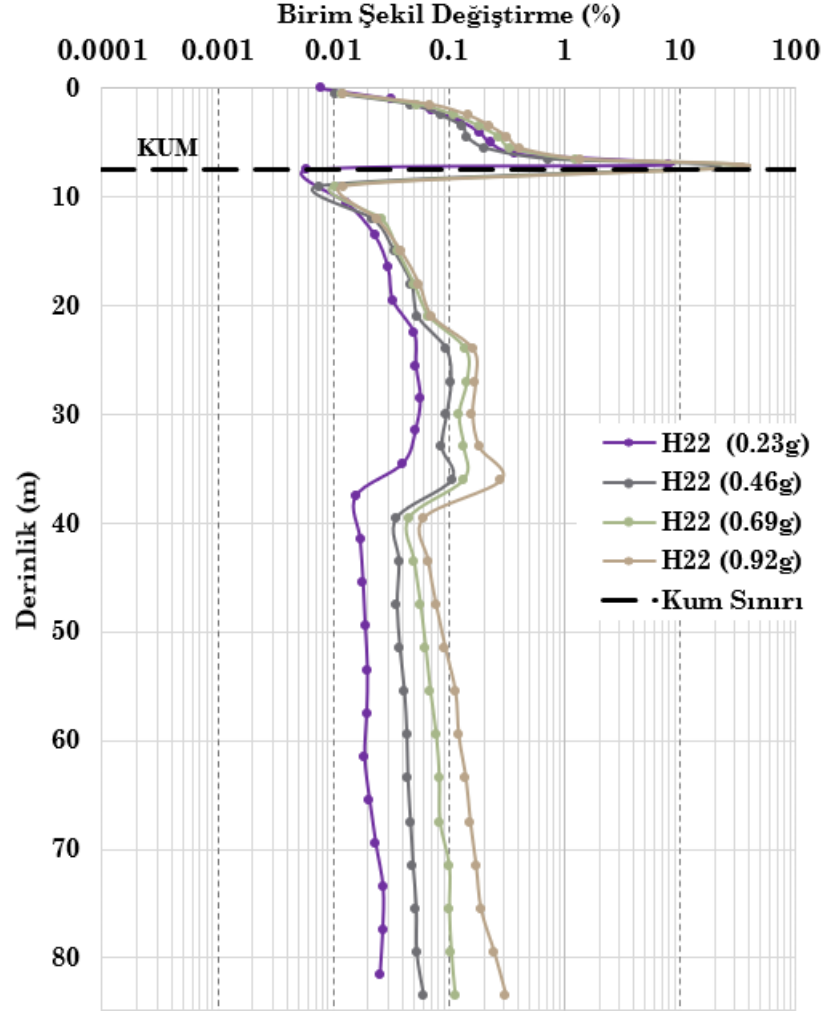
deprem ivme değerleri (PGA) arttıkça, kum tabakaları boyunca gözlemlenen boşluk suyu basıncı oranının ve birim şekil değiştirme değerlerinin arttığı (Şekil 7.17 ve Şekil 7.18).



Şekil 7.16 PGA-Derinlik Grafiği Karşılaştırması



Şekil 7.17 Maksimum Boşluk Suyu Basıncı Oranı-Derinlik Grafikleri Karşılaştırması



Şekil 7.18 Birim Şekil Değişirme-Derinlik Grafiği

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dinamik yüklere maruz kaldığında suya doymun zeminlerde oluşan sıvılaşma, önemli yapısal hasarlar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle, zemin tepki analizlerinin yapılması ve zeminde oluşan kayma gerilmelerinin boşluk suyu basıncı artışına neden olup olmayacağını incelenmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında, daha doğru ve güvenilir bir hesap yöntemi olan doğrusal olmayan zemin modeli ile 1-boyutlu dalga yayılım denklemini içeren DEEPSOIL programı kullanılmış, zemin profili boyunca oluşan zemin tepkisi ölçülmüş ve zemin değişkenlerinin sıvılaşma üzerine etkileri incelenmiştir.

Üstte kum tabakası, altta kil ve kiltası tabakası bulunan genelleştirilmiş bir zemin profili oluşturularak, kum tabakası kayma dalga hızı, kalınlığı, yeraltı su seviyesi ve deprem yer hareketi genliğinin (PGA=0.23 g, 0.46 g, 0.69 g, 0.92 g) sıvılaşmaya etkisi değerlendirilmiştir. Bazı zemin değişkenlerini sabit tutarken, bazılarını arttırıp azaltarak 36 adet farklı zemin profili oluşturulmuş, DEEPSOIL v7.1.8 programı ile 1-boyutlu doğrusal olmayan yer tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu nümerik analizler neticesinde, şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Bu çalışmada gerçekleştirilen doğrusal olmayan etkin gerilme analizlerinde, gerilme-şekil değiştirme davranışı ile gözenek suyu basıncı gelişimini birlikte değerlendirebilmek adına GQ/H + PWP modeli tercih edilmiştir. Jalil ve diğ. (2021) tarafından Palu depremi özelinde başarıyla uygulanan bu modelin, farklı zemin profillerinde sıvılaşma potansiyelini derinlik bazında öngörebildiği gösterilmiş olup, bu tez kapsamında yapılan analizlerin de benzer şekilde tutarlı sonuçlar sağladığı görülmüştür.
2. Bu çalışmanın konusunu oluşturan, sıvılaşmaya etki eden zemin değişkenleri, deprem yer hareketi genlikleri ve sıvılaşma sonrası oturma miktarları birçok çalışma özelinde deneysel, gözlemsel ve nümerik yöntemlerle incelenmiş, ve bu tez kapsamında elde edilen sonuçların geçmiş çalışmalarla tutarlı olduğu tespit edilmiştir.
3. Çalışmada 1- boyutlu zemin tepki analizlerinden elde edilen boşluk suyu basıncı oranının $r_u=0.7$ ve üzerinde elde edilen zemin tabakalarında sıvılaşma

olduğu kabul edilmiştir. Sıvılaşan zemin tabakalarının genellikle en üstteki kum tabakasının en alt seviyesi olduğu görülmüştür.

4. Diğer çalışmalardan farklı olarak zemin profili ve diğer tabakaların özellikleri sabit tutularak, kum tabakasının kayma dalga hızının (V_s) sıvılaşmaya etkisi değerlendirilmiştir. Kum tabakasının kayma dalgası hızı (V_s) 100 m/s, 125 m/s, 150 m/s ve 175 m/s olarak değerştirilerek V_s değerinin sıvılaşmada etkili olduğu görülmüştür. V_s değerini azaldıkça boşluk suyu basıncı artmış, sıvılaşma gelişmiştir. Aynı kum tabaka kalınlığında, kum tabakasının V_s değerini arttıkka yüzeydeki PGA değerini artmıştır.
5. Zeminlerin kayma dalga hızı (V_s) ile sıvılaşma potansiyeli arasında anlamlı bir ilişki tespit edilmiştir. Andrus ve Stokoe (2000)'nin ampirik ve deneysel verilere dayanarak ortaya koyduğu gibi, düşük V_s değerlerine sahip zeminlerde sıvılaşma eğilimi artmakta; yüksek V_s değerlerinde ise sıvılaşma riski azalmaktadır.
6. Yeraltı su seviyesinin sıvılaşma ve sıvılaşma kaynaklı oturma miktarları üzerinde doğrudan etkili olduğu görülmüştür. Chang ve diğ. (2022) alışmasında da vurgulandığı üzere, yeraltı su seviyesindeki küçük değeriklikler dahi sıvılaşma emniyet katsayısı (FS) ve sıvılaşma potansiyel indeksi (LPI) üzerinde önemli farklılıklar yaratabilmektedir. Benzer şekilde, bu tezde yapılan analizlerde, yeraltı su seviyesi yükseldikçe sıvılaşma riski artmış buna bağlı olarak kum tabaka sınırında birim şekil değerştirme değerleri artmıştır.
7. Kum tabaka kalınlığının sıvılaşma üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Nitekim Jia ve Wang (2013) ve Ecemiş (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da, sıvılaşabilir ara tabakaların kalınlığı arttıkka, boşluk suyu basıncı birikiminin ve ardından gelen oturmaların daha belirgin hâle geldiği; dolayısıyla kum tabakası kalınlığının sıvılaşma davranışını doğrudan etkilediği vurgulanmıştır. Bunun yanında kum tabaka kalınlığı azalınca yüzey PGA ve birim şekil değerştirme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi, kalın kum tabakalarındaki boşluk suyu birikimi, boşluk suyu basıncı artışı ve akabinde sıvılaşmanın zemin büyütmelerinde bir sönüm etkisi oluşturması olarak açıklanabilir.
8. Bu çalışmada bir anakaya deprem ivme kaydı artan PGA seviyelerine ($PGA=0.23$ g, 0.46 g, 0.69 g, 0.92 g) ölçeklenerek, frekans içeriği ve süresi

aynı olan deprem yer hareketlerinin yalnızca genlik değişiminin sıvılaşmaya etkisi araştırılmıştır. Buna göre anakaya deprem PGA değeri arttıkça boşluk suyu basıncı oranı, birim kayma şekil değiştirme ve sıvılaştıran tabaka kalınlığı artmıştır. Bu bulguların, yer hareketi genliği arttıkça ölçülen PGA, yanal deplasman ve maksimum kayma birim şekil değiştirme değerlerinin de arttığını ifade eden Demir (2021) ve Subaşı (2022)'nin çalışmalarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

9. 1-boyutlu nümerik yöntemde yalnızca yanal yöndeki deplasmanlar elde edilebildiğinden ampirik yaklaşım kullanılarak birim kayma şekil değiştirmelere ve tabaka kalınlığına göre elde edilen sıvılaşma sonrası oturma miktarları belirlenmiştir. Buna göre, belirli V_{s-kum} (≤ 175 m/s) ve tabaka kalınlıklarına ($h_{kum}=5$ m, 7.5 m, 10 m, 15 m) göre oturma değerlerinin elde edilebileceği ampirik bir korelasyon önerilmiştir.
10. Elde edilen oturma sonuçlarına göre, shear strain değerinin $\gamma < \%0.5$ olduğu tabakalarda hacimsel şekil değiştirme ve oturma ihmal edilebilir düzeyde bulunurken, $\gamma > \%0.5$ birim şekil değiştirmeye sahip sıvılaştıran seviyelerde, oturma miktarlarının mühendislik açısından dikkate alınacak düzeye ulaştığı görülmüştür.
11. Bu tez çalışmasında zemin değişkenlerinin ve deprem yer hareketi genliğinin sıvılaşmaya etkisi incelenmiştir. Buna göre kum tabakasının kayma dalga hızı- V_s , deprem yer hareketi genliği (PGA) ve yeraltı su seviyesi (YASS) parametrelerinin sıvılaşabilir tabaka kalınlığını, zemin yüzeyinde ölçülen PGA değerlerini ve sıvılaşmaya bağlı oluşan oturma miktarlarını büyük ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Önerilen ampirik oturma ilişkileri ile, penetrasyon direnci-SPT-N bilgisi bulunmayan kum tabakalarında jeofizik yöntemlerden elde edilen belirli V_s ve tabaka kalınlığı bilgisine bağlı olarak, deprem yer hareketi seviyesi için oturma miktarları hesaplanabilir, bu bakımdan sektörel uygulamaya da katkıda bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

- Andrus, R. D., & Stokoe, K. H. II. (2000). Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(11), 1015–1025.
- Ateş, A. (2010). *Manisa Saruhanlı İlçesi zeminlerinin sıvılaşma potansiyelinin arazi ve laboratuvar deneyleri ile incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi].
- Baxter, C. D. P., Bradshaw, A. S., & Green, R. A. (2008). *Influence of fines content and grading on liquefaction resistance*. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 181, 1–10.
- Beaty, M. H., & Perlea, V. G. (2011). Several observations on advanced analyses with liquefiable materials. In *Proceedings of the 31st Annual USSD Conference on 21st Century Dam Design—Advances and Adaptations* (pp. 1369–1397).
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2012). *Probabilistic standard penetration test-based liquefaction-triggering procedure*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(10), 1185–1195. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000665](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000665)
- Carlton, B. (2014). *An improved description of the seismic response of sites with high plasticity soils, organic clays, and deep soft soil deposits* [Doktora tezi, University of California, Berkeley].
- Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves* [Doktora tezi, University of Texas at Austin].
- Demir, S. (2021). Effect of groundwater level on site response behavior of a one-layered liquefiable soil. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 9(3), 796–808. <https://doi.org/10.21923/jesd.901500>
- De Alba, P., Seed, R. B., & Chan, C. K. (1994). *Sand liquefaction in large-scale shaking table tests*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5).
- Ecemiş, N., Demirci, H. E., & Karaman, M. (2014). Effects of relative density and coefficient of consolidation on re-liquefaction potential of sand. *2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (2ECEES), Istanbul, Turkey*.
- Ecemiş, N. (2020). Effect of soil-type and fines content on liquefaction resistance-shear-wave velocity correlation. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(8), 1311–1335. <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1475312>

- Ecemiş, N. (2021). Experimental and numerical modeling on the liquefaction potential and ground settlement of silt-interlayered stratified sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106621. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106621>
- Hashash, Y. M. A. (Ed.). (2024, December 5). *DEEPSOIL user manual* (v7.1). University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hashash, Y. M. A., Phillips, C., & Groholski, D. R. (2010). Recent advances in non-linear site response analysis. In *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*.
- Gökdoğan, A., Işık, N., & Fırat, S. (2024). 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinde zemin davranışları: Vaka analizi. *Türk Mühendislik Araştırma ve Eğitimi Dergisi*, 3(1), 48–57.
- Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S., & Sato, H. (1982). Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Microzonation* (Vol. 3, pp. 1310–1330). Seattle.
- Ishibashi, I., Zhang, X., & Tsai, J. C. (1982). *Undrained monotonic and cyclic stress-strain behavior of fine sand*. University of Delaware, Department of Civil Engineering.
- Jalil, A., Fathani, T. F., Satyarno, I., & Wilopo, W. (2021). Nonlinear site response analysis approach to investigate the effect of pore water pressure on liquefaction in Palu. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 871(1), 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/871/1/012053>
- Jia, S., & Wang, J. (2013). Dynamic effective stress analysis of a site with liquefiable interlayer. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), 2743–2755. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2743-2013>
- Karakan, E., & Altun, S. (2016). Liquefaction behavior and post-liquefaction volumetric strain properties of low plasticity silt-sand mixtures. *Teknik Dergi*, 27(4), 7593–7617.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.
- Mei, X., Olson, S. M., & Hashash, Y. M. A. (2015). Empirical curve-fitting parameters for a porewater pressure generation model for use in 1-D effective stress-based site response analysis. In *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. Christchurch, New Zealand. <https://www.issmge.org/publications/publication/empirical-curve-fitting-parameters->

for-a-porewater-pressure-generation-model-for-use-in-1-d-effective-stress-based-site-response-analysis

Matasovic, N., & Vucetic, M. (1993). Cyclic characterization of liquefiable sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 119(11), 1805–1822.

Matasovic, N. (1992). *Seismic response of composite horizontally-layered soil deposits* [Doktora tezi, University of California, Los Angeles].

Matasovic, N., & Vucetic, M. (1995). Generalized cyclic degradation–pore pressure generation model for clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 121(1), 33–42.

Moss, R. E. S., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & Cetin, K. O. (2006). *CPT-based probabilistic and deterministic assessment of in situ seismic soil liquefaction potential*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1032–1051. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:8\(1032\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:8(1032))

Ishihara, K., & Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, 32(1), 173–188. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.173>

Öser, C., Sarğın, S., Yildirim, A. K., Korkmaz, G., Altinok, E., & Kelesoglu, M. K. (2023). *Geotechnical aspects and site investigations on Kahramanmaraş earthquakes, February 06, 2023*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment. <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03097-1>

Özaydın, K. (2007). Zeminlerde sıvılaşma. In *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*. İstanbul: İnşaat Mühendisleri Odası.

Plaxis bv. (2022). *Plaxis Materials Manual*. Delft University of Technology & Plaxis bv.

Santucci de Magistris, F., Lanzano, G., Forte, G., & Fabbrocino, G. (2013). A database for PGA threshold in liquefaction occurrence. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 54, 17–19. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.07.011>

Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., & Chung, R. M. (1985). The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425–1445.

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(SM9), 1249–1273.

- Sönmez, H., & Gökçeoğlu, C. (2005). A liquefaction severity index suggested for engineering practice. *Environmental Geology*, 48(1), 81–87.
- Subaşı, O., & İyisan, R. (2022). Sıvılaşma nedeniyle meydana gelen oturmaların PM4Sand bünye modeli ile incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(3), 378–388. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.06606>
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.
- Tezcan, S., Kaya, E., Bal, E. I., & Özdemir, Z. (2002). Seismic amplification at Avcılar, Istanbul. *Engineering Structures*, 24, 661–667.
- Tozburun, C. (2022). *Investigation of liquefaction and settlement behavior of sandy soils by dynamic centrifuge test* (Master's thesis). İzmir Institute of Technology.
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. Resmi Gazete, 30364, 18 Mart 2018.
- Tokimatsu, K., & Uchida, A. (1990). *Correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity*. In Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (pp. xxx–xxx). Tokyo, Japan.
- Yasuda, S., Iwatate, T., Harada, K., Ishikawa, K., & Kaneko, Y. (1995). *Re-evaluation of liquefaction-induced ground displacements at the 1964 Niigata earthquake*. Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Tokyo, Japan.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Arango, I., Castro, G., Christian, J. T., ... & Stokoe, K. H. (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*, 127(10), 817–833.